T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PROBLEMLİ ZEMİN KOŞULLARINDA ŞEMSİYE BORU DESTEK SİSTEMİNİN SAYISAL MODELLEMESİ: BİR VAKA ANALİZİ

Emre YILDIRIM

DANIŞMAN
Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2022

Bu çalışma, 25.05.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU (Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. İlknur BOZBEY
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendslik Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa HATİPOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmî Gazete ’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Bu çalışmada Gebze-Darıca Metro Projesi kapsamında çalışma şaftı olarak kullanılan Şaft-3 bölgesinde, şaftın hat tünellerine bağlanmasını sağlayan yaklaşım tünellerinde, zorlu zemin koşullarından dolayı meydana gelen deformasyonlar ve bu deformasyonlara karşı alınan tedbirler incelenmiştir.

Yüksek lisans sürecinde, ders dönemlerinde ve tez aşamasında bir an bile desteklerini benden esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli hocam Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU'NA ve 3 boyutlu modelleme ve analizler için her daim yardımda bulunan değerli meslektaşım M. Furkan YILMAZ'a ,yüksek lisans eğitimim boyunca, göstermiş oldukları sabır, destek ve hoşgörülerinden dolayı, Gebze-Darıca Metro Projesi'nde çalışan, başta Tasarım Koordinasyon Şefi Sn. Başak AYKIN SELÇUK olmak üzere, tüm yöneticilerime ve ekip arkadaşlarıma ve son olarak, tüm hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve desteklerini bir an olsun esirgemeyen, başta annem ve babam olmak üzere tüm aileme, Simge DOĞAN'a ve bütün arkadaşlarıma, tüm kalbimle sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Nisan 2022 Emre YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **xv**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xviii**
SUMMARY ..... **xx**
1. GİRİŞ **1**
1.1 TEZİN AMACI 2
2. GENEL KISIMLAR **3**
2.1 TÜNELCİLİĞİN TARİHSEL GELİŞİMİ VE TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ 3
2.2 YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ (NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD) 3
2.2.1 NATM ile Açılan Tünellerde Oluşan Gerilmeler 4
2.2.2 NATM ile Açılan Tünellerde Karşılaşılabilecek Olası Problemler 4
2.2.2.1 Tünel İçi Deformasyonlar *5*
2.2.2.2 Yüzey Oturmaları *5*
2.2.3 NATM ile Açılan Tünellerde Destek Sistemleri 6
2.2.3.1 Püskürtme Beton *7*
2.2.3.2 Çelik İksalar *8*
2.2.4 TÜNELLERDE ZEMİN İYİLEŞTİRME 10
2.2.4.1 Zemin Donatılama *10*
2.2.4.2 Umbrella Arch (Şemsiye Boru Kemer) Yöntemi *11*
2.3 "UMBRELLA ARCH" UYGULAMASININ MODELLENMESİ VE OLUŞAN DEFORMASYONLARIN SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ 14
2.3.1 Hoek (2004) Çalışması 15
2.3.2 Dehghan (2020) Çalışması 15
2.3.3 Morotvatdar ve diğ. (2020) Çalışması 24

2.3.4 Klotoé ve Bourgeois (2019) Çalışması....35
2.3.5 Yaşıtlı (2013) Çalışması....44
2.3.6 Aksoy ve Onargan (2010) Çalışması....52
3. MALZEME VE YÖNTEM....60
3.1 GEBZE-DARICA METRO PROJESİ....60
3.1.1 Projeye Ait Genel Bilgiler....60
3.1.2 Çalışma Sırasında Karşılaşılan Problemler....61
3.2 ZEMİN PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE GEOTEKNİK KARAKTERİZASYON....63
3.2.1 Bölgenin Genel Jeolojisi ve Tektonizma....63
3.2.2 Bölgenin Yerel Jeolojisi....64
3.2.3 İdealize Zemin Profili....65
3.2.3.1 SPT Deney Sonuçları....66
3.2.3.2 Presiyometre Deneyi Sonuçları....66
3.2.3.3 Atterberg Likit Limit Deneyi....68
3.2.4 TASARIM PARAMETRELERİ....70
3.2.4.1 Kontrolsüz Dolgu....70
3.2.4.2 TQk Katı Kil....70
3.2.5 ŞAFT-3 B5 YAKLAŞIM TÜNELİ....73
3.2.5.1 Şaft-3 B5 Yaklaşım Tüneli Kazı-Destek Sistemleri....74
3.3 SAHA ÖLÇÜMLERİ....79
3.4 SAYISAL MODELLEME....92
3.4.1 2 Boyutlu Sayısal Modelleme....93
Kesit-1 Analizleri....96
Kesit -2 Analizleri....103
Kesit-3 Analizleri....110
3.4.2 3 Boyutlu Sayısal Modelleme....116
4. BULGULAR....119
4.1 2 BOYUTLU ANALİZ SONUÇLARI....119
4.1.1 Kesit-1 Analiz Sonuçları....119
4.1.2 Kesit-2 Analiz Sonuçları....125
4.1.3 Kesit-3 Analiz Sonuçları....132
4.2 3 BOYUTLU ANALİZ SONUÇLARI....138
4.2.1 km: 0+007.40 Analiz Sonuçları İncelemesi....139
4.2.2 km: 0+0026.70 Analiz Sonuçları İncelemesi....144

4.2.3 km: 0+0044.6 Analiz Sonuçları İncelemesi 150
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 159
6. KAYNAKLAR 162
7. EKLER 166
EK 1. PRT-GUZ-SK-03 sondaj logu ve karot sandığı fotoğrafları 166
EK 2. AYGM-SK-14 sondaj logu ve karot sandığı fotoğrafları 172
8. ÖZGEÇMİŞ 178

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Attewell'in 3 boyutlu oturma dağılımı (Attewell, ve diğ., 1986). 6

Şekil 2.2: Tünel içerisinde püskürtme beton uygulaması. 8

Şekil 2.3: Çelik kafes iksalar. 9

Şekil 2.4: Profil iksalar. 9

Şekil 2.5: Tünellerde kaya bulonu uygulaması. 11

Şekil 2.6: Hoek "*umbrella arch"* uygulaması (Hoek, 2004). 12

Şekil 2.7: ϕ114mm *"umbrella arch"* boruları.....13

Şekil 2.8 : Tünelde *"umbrella arch"* uygulaması. 13

Şekil 2.9: Dehghan Jeolojik profil (Dehghan, 2020). 16

Şekil 2.10: Dehghan İnşaat aşamaları kesiti (Dehghan, 2020). 17

Şekil 2.11: İyileştirilmiş bölgenin şematik gösterimi (Dehghan, 2020). 20

Şekil 2.12: Maksimum yüzey oturmaları (Dehghan, 2020). 21

Şekil 2.13: 3-Boyutlu sayısal analiz modeli (Dehghan, 2020). 22

Şekil 2.14: Yüzey oturma grafiği (Dehghan, 2020). 23

Şekil 2.15: Kazvin-Raşt tüneli geometrisi (Morotvatdar, ve diğ., 2020). 25

Şekil 2.16: Tünel bölgesi jeolojik yapı haritası (Morotvatdar, ve diğ., 2020).....26

Şekil 2.17: 3 Boyutlu model (Morotvatdar, ve diğ., 2020). 27

Şekil 2.18: Tünel kazı aşamalarının 3 boyutlu modeli (Morotvatdar, ve diğ., 2020).....29

Şekil 2.19: *"Umbrella arch"* sisteminin yer aldığı 3 Boyutlu model (Morotvatdar, ve diğ., 2020).....30

Şekil 2.20: 3 Boyutlu modelde *"umbrella arch"* sistemi kesiti (Morotvatdar, et al., 2020). 30

Şekil 2.21: *"Umbrella arch"* sisteminin aktif olmadığı (a) ve aktif olduğu (b) analiz çıktıları (Morotvatdar, ve diğ., 2020). 31

Şekil 2.22: *"Umbrella arch"* sisteminin uygulandığı ve uygulanmadığı durumlarda deformasyon karşılaştırması (Morotvatdar, ve diğ., 2020). 32

Şekil 2.23: Tünel tavanında meydana gelen deplasmanların saha verileri ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırması (Morotvatdar, ve diğ., 2020). 33

Şekil 2.24: 3 Boyutlu modellerde literatürde yer alan geometri kabulleri (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019). 35

Şekil 2.25: 3 Boyutlu sonlu elemanlar modeli (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019). 37

Şekil 2.26: İnşaat aşamaları (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019). 38

Şekil 2.27: Desteksiz durum için analiz sonuçları (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019). 39

Şekil 2.28: Basitleştirilmiş geometri ile sonlu elemanlar modeli (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019). 41

Şekil 2.29: Toulon Tüneli geometrisi (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019). 42

Şekil 2.30: Toulon Tüneli kazı-destek sistemi (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019)....43

Şekil 2.31: Metro güzergahı ve jeolojik plan-profil. (Yaşıtlı, 2013)....45

Şekil 2.32: Tünel geometrisi (Ocak, 2008)....46

Şekil 2.33: Deformasyon sonrası kullanılan kazı-destek sistemi (Ocak, 2008). 47

Şekil 2.34: 3 Boyutlu sayısal model (Yaşıtlı, 2013). 49

Şekil 2.35: Başlangıç koşulu gerilmeleri (Yaşıtlı, 2013)....49

Şekil 2.36: Düşey gerilme dağılımı (Yaşıtlı, 2013). 50

Şekil 2.37: Nümerik analiz sonucu elde edilen yüzey oturması profili (Yaşıtlı, 2013). 51

Şekil 2.38: Jeolojik harita (Aksoy & Onargan, 2010). 53

Şekil 2.39: Tünel kazı-destek sistemi kesiti ve inşaat aşamaları (Aksoy & Onargan, 2010). 54

Şekil 2.40: Kazı-destek sistemi kesiti, sayısal model görüntüsü (Aksoy, 2008) (Aksoy, 2009) (Aksoy, ve diğ., 2010)....55

Şekil 2.41: 3 Boyutlu model ve analiz sonuçları (Aksoy & Onargan, 2010). 56

Şekil 2.42: Yüzey oturmalarının karşılaştırılması (Aksoy & Onargan, 2010). 57

Şekil 2.43: Konverjans değerlerinin karşılaştırılması (Aksoy & Onargan, 2010).....57

Şekil 3.1: Proje güzergahı.....60

Şekil 3.2: Şaft-3 güzergâh üzerindeki konumu. 61

Şekil 3.3: Şaft-3 şantiye yerleşimi fotoğrafı.....61

Şekil 3.4: Şaft-3 B5 yaklaşım tüneli boykesiti. 62

Şekil 3.5: Türkiye'nin tektonik yapısı. (Altınoğlu, 2005).....64

Şekil 3.6: Sondaj lokasyonları. 65

Şekil 3.7: Efektif Kayma Direnci ile Plastisite Arasındaki İlişki (Terzaghi, ve diğ., 1996).....71

Şekil 3.8: SPT-N Plastisite İndisi Arasındaki İlişki (Stroud, 1974). 72

Şekil 3.9: Şaft -3 B5 Yaklaşım Tüneli planı.....73

Şekil 3.10: B5 Yaklaşım Tüneli geometrisi.....74

Şekil 3.11 : Deformasyon öncesi kazı-destek sistemi en kesiti.....76

Şekil 3.12 : Deformasyon öncesi kazı-destek sistemi boy kesiti.....76

Şekil 3.13 : Deformasyon sonrası kazı-destek sistemi en kesiti.....78

Şekil 3.14 : Deformasyon sonrası kazı-destek sistemi boy kesiti. 78

Şekil 3.15: O-Ş3-YT-0+007.4 No'lu reflektör ölçümleri. 79

Şekil 3.16: O-Ş3-YT-0+012.0 No'lu reflektör ölçümleri. 80

Şekil 3.17: O-Ş3-YT-0+016.7 No'lu reflektör ölçümleri. 81

Şekil 3.18: O-Ş3-YT-0+021.4 No'lu reflektör ölçümleri. 82

Şekil 3.19: O-Ş3-YT-0+026.7 No'lu reflektör ölçümleri. 83

Şekil 3.20: O-Ş3-YT-0+031.8 No'lu reflektör ölçümleri. 84

Şekil 3.21: O-Ş3-YT-0+035.9 No'lu reflektör ölçümleri. 85

Şekil 3.22: O-Ş3-YT-0+041.0 No'lu reflektör ölçümleri. 86

Şekil 3.23: O-Ş3-YT-0+044.6 No'lu reflektör ölçümleri. 87

Şekil 3.24: Oturma bulonları montaj planı. 89

Şekil 3.25: Kazı ilerlemesine göre ŞFT3-İ-Y11 oturma-zaman ve O-Ş3-YT-0+026.7 deformasyon – zaman grafiği. 90

Şekil 3.26: Kazı ilerlemesine göre ŞFT3-İ-Y42 oturma-zaman ve O-Ş3-YT-0+044.6 deformasyon – zaman grafiği. 91

Şekil 3.27: 2 Boyutlu analiz kesitleri....94

Şekil 3.28: Kesit-1 analiz modeli. 96

Şekil 3.29: Başlangıç aşaması, geostatik durum....98

Şekil 3.30 : 1. aşama, yol kazıklarının modellenmesi. 98

Şekil 3.31: 2. aşama, yol kazısının yapılması ve sürşarj yüklerinin aktif edilmesi. 99

Şekil 3.32: 3. aşama, B5 tünel üst yarı kazısı + *"umbrella arch"* imalatı yapılması. 99

Şekil 3.33: 4.aşama, B5 tüneli üst yarı ilerlemesi (0.8m)....100

Şekil 3.34: 5. aşama, tünel üst yarı kafes iksa sistemi imalatı ve zemin çivisi imalatları. ...100

Şekil 3.35: 6. aşama, B5 tünel üst yarı kazı destek sistemi uygulaması. (4 günlük maturasyon) 101

Şekil 3.36: 7. aşama, üst yarı basıncının serbest bırakılması. (28 günlük maturasyon) 101

Şekil 3.37: 8. aşama, alt yarı kazısı ve kazı destek sistemi imalatları. 102

Şekil 3.38: 9. aşama, alt yarı iç basıncının tamamen serbest bırakılması. (28 günlük maturasyon) 102

Şekil 3.39: Kesit-2 analiz modeli. 103

Şekil 3.40: Kesit-2 başlangıç aşaması, geostatik durum. 105

Şekil 3.41 : Kesit-2 1. aşama, yol kazıklarının modellenmesi. 105

Şekil 3.42: Kesit-2 2. aşama, yol kazısının yapılması ve sürşarj yüklerinin aktif edilmesi. 106

Şekil 3.43: Kesit-2 3. aşama, B5 tünel üst yarı kazısı + *"umbrella arch"* imalatı yapılması....106

Şekil 3.44: Kesit-2 4.aşama, B5 tüneli üst yarı ilerlemesi (0.8m)....107

Şekil 3.45: Kesit-2 5. aşama, tünel üst yarı kafes iksa sistemi imalatı ve zemin çivisi imalatları. 107

Şekil 3.46: Kesit-2 6. aşama, B5 tünel üst yarı kazı destek sistemi uygulaması. (4 günlük maturasyon) 108

Şekil 3.47: Kesit-2 7. aşama, üst yarı basıncının serbest bırakılması. (28 günlük maturasyon) 108

Şekil 3.48: Kesit-2 8. aşama, alt yarı kazısı ve kazı destek sistemi imalatları. 109

Şekil 3.49: Kesit-2 9. aşama, alt yarı iç basıncının tamamen serbest bırakılması. (28 günlük maturasyon) 109

Şekil 3.50: Kesit-3 analiz kesiti. 110

Şekil 3.51: Kesit-3 Başlangıç aşaması, geostatik durum. 111

Şekil 3.52 : Kesit-3 1. aşama, yol kazıklarının modellenmesi. 111

Şekil 3.53: Kesit-3 2. aşama, yol kazısının yapılması ve sürşarj yüklerinin aktif edilmesi. 112

Şekil 3.54: Kesit-3 3. aşama, B5 tünel üst yarı kazısı + *"umbrella arch"* imalatı yapılması 112

Şekil 3.55: Kesit-3 4.aşama, B5 tüneli üst yarı ilerlemesi (0.8m) 113

Şekil 3.56: Kesit-3 5. aşama, tünel üst yarı kafes iksa sistemi imalatı ve zemin çivisi imalatları. 113

Şekil 3.57: Kesit-3 6. aşama, B5 tünel üst yarı kazı destek sistemi uygulaması. (4 günlük maturasyon) 114

Şekil 3.58: Kesit-3 7. aşama, üst yarı basıncının serbest bırakılması. (28 günlük maturasyon) 114

Şekil 3.59: Kesit-3 8. aşama, alt yarı kazısı ve kazı destek sistemi imalatları. 115

Şekil 3.60: Kesit-3 9. aşama, alt yarı iç basıncının tamamen serbest bırakılması. (28 günlük maturasyon) 115

Şekil 3.61: 3 Boyutlu sonlu elemanlar modeli boyutları. 116

Şekil 3.62: Şaft-3 B5 Yaklaşım Tüneli sonlu elemanlar modeli. 118

Şekil 3.63: Şaft-3 B5 Yaklaşım Tüneli sonlu elemanlar model kesiti. 118

Şekil 4.1: Kesit-1 Geostatik durum ve 3. aşama analiz sonuçları. 119

Şekil 4.2: Kesit-1 4. ve 9. aşamalar arası analiz çıktıları 120

Şekil 4.3: Kesit-1 analizi tünel içi deformasyon-analiz aşamaları grafiği. 121

Şekil 4.4: Tünel içi deformasyon- tarih grafiği. 122

Şekil 4.5 : ΔZ01 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 123

Şekil 4.6: ΔZ02 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 123
Şekil 4.7: ΔZ03 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 124
Şekil 4.8: Kesit-2 Geostatik durum ve 3. aşama analiz sonuçları. 125
Şekil 4.9: Kesit -2 4. aşama ve 9. aşama arası analiz sonuçları. 126
Şekil 4.10: Kesit-2 analizi tünel içi deformasyon-yapım aşamaları grafiği. 127
Şekil 4.11: Kesit-2 analizi tünel içi deformasyon-tarih grafiği. 128
Şekil 4.12: ΔZ01 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 128
Şekil 4.13: ΔZ02 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 129
Şekil 4.14: ΔZ03 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 129
Şekil 4.15: Analiz sonuçları toplam oturma-analiz aşamaları grafiği. 130
Şekil 4.16: Analiz sonuçları toplam oturma-tarih grafiği. 131
Şekil 4.17: Analiz sonuçları ve ölçüm sonuçları oturma değerleri karşılaştırma grafiği. 131
Şekil 4.18: Kesit-3 Geostatik durum ve 7.aşama arası analiz sonuçları. 132
Şekil 4.19: Kesit-3 8. ve 9.aşama analiz sonuçları. 133
Şekil 4.20: Kesit-3 analizi tünel içi deformasyon-analiz aşamaları grafiği. 133
Şekil 4.21: Kesit-3 analizi tünel içi deformasyon-tarih grafiği. 134
Şekil 4.22: ΔZ01 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 135
Şekil 4.23: ΔZ02 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 135
Şekil 4.24: ΔZ03 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 136
Şekil 4.25: Analiz sonuçları toplam oturma-analiz aşamaları grafiği. 137
Şekil 4.26: Analiz sonuçları toplam oturma-tarih grafiği. 137
Şekil 4.27: Analiz sonuçları ve ölçüm sonuçları oturma değerleri karşılaştırma grafiği. 138
Şekil 4.28: 3 Boyutlu analiz ekran çıktısı. 139
Şekil 4.29: 3 Boyutlu analiz, Kesit-1 deformasyon- analiz aşamaları grafiği. 140
Şekil 4.30: 3 Boyutlu analiz, Kesit-1 deformasyon-tarih grafiği. 140
Şekil 4.31: ΔZ01 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 141
Şekil 4.32: ΔZ02 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 141

Şekil 4.33: ΔZ03 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 142
Şekil 4.34: ΔZ01 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği. 142
Şekil 4.35: ΔZ02 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği. 143
Şekil 4.36: ΔZ03 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği. 143
Şekil 4.37: 3 Boyutlu analiz, Kesit-2 deformasyon- analiz aşamaları grafiği. 144
Şekil 4.38: 3 Boyutlu analiz, Kesit-2 deformasyon- analiz aşamaları grafiği. 145
Şekil 4.39: ΔZ01 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 146
Şekil 4.40: ΔZ02 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 146
Şekil 4.41: ΔZ03 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 147
Şekil 4.42: ΔZ01 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği. 148
Şekil 4.43: ΔZ02 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği. 148
Şekil 4.44: ΔZ03 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği. 149
Şekil 4.45: 3 Boyutlu analiz, Kesit-3 deformasyon- analiz aşamaları grafiği 150
Şekil 4.46: 3 Boyutlu analiz, Kesit-3 deformasyon- tarih grafiği 150
Şekil 4.47: ΔZ01 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 151
Şekil 4.48: ΔZ02 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 151
Şekil 4.49: ΔZ03 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği. 152
Şekil 4.50: ΔZ01 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği. 152
Şekil 4.51: ΔZ02 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği. 153
Şekil 4.52: ΔZ03 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği. 153
Şekil 4.53: ŞFT-İ-Y11, Toplam oturma-Analiz aşamaları grafiği. 154
Şekil 4.54: ŞFT-İ-Y42, Toplam oturma-Analiz aşamaları grafiği. 155
Şekil 4.55: ŞFT-İ-Y11 Analiz sonuçları saha ölçümleri karşılaştırma grafiği 155
Şekil 4.56 : ŞFT-İ-Y42 Analiz sonuçları saha ölçümleri karşılaştırma grafiği. 156
Şekil 4.57: ŞFT-İ-Y11 2D ve 3D analiz sonuçları karşılaştırma grafiği. 156
Şekil 4.58: ŞFT-İ-Y42 2D ve 3D analiz sonuçları karşılaştırma grafiği. 157

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Dehghan Geoteknik parametreler (Dehghan, 2020). 16

Tablo 2.2: Zarbalizadeh-Maddah tüneli destek sistemleri (Dehghan, 2020). 18

Tablo 2.3: Zarbalizadeh-Maddah tüneli destek sistemleri mukavemet parametreleri (Dehghan, 2020). 18

Tablo 2.4: Zarbalizadeh-Maddah tüneli iyileştirilmiş bölge mukavemet parametreleri (Dehghan, 2020). 19

Tablo 2.5: Kazvin-Reşt tüneli geometrik özellikleri (Morotvatdar, ve diğ., 2020).....25

Tablo 2.6: Kazvin-Raşt tüneli idealize zemin profili (Morotvatdar, ve diğ., 2020). 26

Tablo 2.7: Projede kullanılan *"umbrella arch"* borularının fiziksel özellikleri (Rockwell, ve diğ., 2001). 27

Tablo 2.8: Zemin ve iyileştirilmiş bölgeye ait geoteknik özellikler (Morotvatdar, et al., 2020). 28

Tablo 2.9: İksa elemanlarının mekanik özellikleri (Morotvatdar, et al., 2020).....28

Tablo 2.10: Değiştirilmiş *"umbrella arch"* boru parametreleri (Morotvatdar, et al., 2020). 33

Tablo 2.11: Destek elemanlarına ait parametreler (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019). 37

Tablo 2.12: Modelde kullanılan zemin parametreleri (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019). 37

Tablo 2.13: Maksimum oturuma değerleri (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019). 39

Tablo 2.14: İkinci analiz için kullanılan zemin parametreleri (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019). 40

Tablo 2.15: Zemin parametreleri (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019). 42

Tablo 2.16: Tüneller etrafında bulunan bölgeye geoteknik parametreler (Ocak, 2008). 45

Tablo 2.17: Yüzey oturma değerlerinin analiz sonuçları ile karşılaştırılması (Yaşıtlı, 2013). 52

Tablo 2.18: Kaya birimlerin mekanik özellikleri (Aksoy & Onargan, 2010). 53

Tablo 2.19: Tünel kazı-destek sisteminde kullanılan yapısal elemanların dayanım özellikleri (Aksoy & Onargan, 2010). 54

Tablo 3.1: İdealize zemin profili. 66

Tablo 3.2: SPT-N – Derinlik tablosu. 66

Tablo 3.3: Net Limit Basınç değerleri. 67

Tablo 3.4: Menard Elastisite Modülü değerleri. 67

Tablo 3.5: Derinlik-Likit Limit ilişkisi (%). 68

Tablo 3.6: Derinlik-Plastik Limit ilişkisi (%). 69

Tablo 3.7: Derinlik-Plastisite İndisi ilişkisi. 69

Tablo 3.8: Değişik zemin türlerinde α faktörünün değerleri (Lunne, ve diğ., 1997). 71

Tablo 3.9: Analizlerde kullanılacak zemin parametreleri. 73

Tablo 3.10 : Deformasyon öncesi tünellerde kullanılan kazı destek sistemi elemanları. 75

Tablo 3.11: Deformasyon sonrası tünellerde kullanılan kazı destek sistemi elemanları. 77

Tablo 3.12: Kazı aşamaları tanımı ve rahatlama katsayıları. 95

Tablo 3.13: İyileştirilmiş bölge parametreleri. 97

Tablo 3.14: 2 Boyutlu modelde yapısal eleman parametreleri. 97

Tablo 3.15: 2 Boyutlu modelde yapısal eleman parametreleri. 104

Tablo 3.16: İyileştirilmiş bölge parametreleri. 117

Tablo 3.17: 3 Boyutlu Modelde yapısal eleman parametreleri. 117

Tablo 4.1: Maksimum deplasmanlar özet tabloları. 158

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
γ	: Birim Hacim Ağırlık
γ_{sat}	: Doygun Birim Hacim Ağırlık
γ_{unsat}	: Kuru Birim Hacim Ağırlık
ϕ	: Kayma Direnci Açısı
ϕ'	: Efektif Kayma Direnci Açısı
ν	: Poisson Oranı
Ψ	: Dilatasyon Açısı
c	: Kohezyon
E	: Elastisite Modülü
E_{50}	: Sekant Modülü
E_{oed}	: Ödometre Elastisite Modülü
E_{50}^{ref}	: Referans Gerilme Şekil Değiştirme Sekant Modülü
E_{oed}^{ref}	: Referans Ödometre Elastisite Modülü
E_{ur}^{ref}	: Referans Boşaltma Geri Yükleme Elastisite Modülü
f_1	: Drenajız Kayma Mukavemeti Faktörü
f_{ck}	: Betonun Karakteristik Basınç Dayanımı
f_{yk}	: Betonun Karakteristik Akma Dayanımı

Kısaltmalar	Açıklama
LL	: Likit Limit
KAF	: Kuzey Anadolu Fayı
NATM	: New Australlian Tunelling Method (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi)
PI	: Plastisite İndisi
PL	: Plastik Limit
SPT	: Standart Penetrasyon Testi
TBM	: Tunnel Boring Machine (Tünel Açma Makinesi)

ÖZET

PROBLEMLİ ZEMİN KOŞULLARINDA ŞEMSİYE BORU DESTEK SİSTEMİNİN SAYISAL MODELLEMESİ: BİR VAKA ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre YILDIRIM

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

Son yıllarda hızla artan dünya nüfusu özellikle büyük şehirlerde karayolu trafiğinin artmasına sebep olmakta ve artan maliyetler insanları toplu taşıma alternatiflerine yönlendirmektedir. Toplu taşımada yeraltı raylı sistemlerinin önemi gün geçtikçe artmaktadır. Ancak özellikle büyük şehirlerde, yapılaşmanın yoğun olduğu bölgelerde yeraltı raylı sistemlerin inşası sırasında açılan tünellerde ciddi mühendislik problemleriyle karşılaşılmaktadır. Şehir içi tünelciliğinde en sık karşılaşılan problemler yüzey oturmalarından kaynaklı olarak yüzeyde bulunan yapılarda meydana gelen deformasyonlardır.

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi ile açılacak tünellerde hem işçi hem de yapım güvenliğini sağlamak için çeşitli tahkimat sistemleri ve zemin iyileştirme yöntemleri kullanılmaktadır. *"Umbrella arch" yöntemi* de hem çalışmalar sırasında işçi güvenliğini hem de yüzeyde oluşabilecek oturmaların engellenmesini sağlayan, zeminin iyileştirilmesine yönelik uygulanan bir sistem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada, Gebze-Darıca Metro projesi kapsamında çalışma şaftı olarak kullanılan Şaft-3 bölgesinde, şaftın hat tünellerine bağlanmasını sağlayan yaklaşım tünellerinde ve bu tünellerin

geçtiği güzergâh üzerinde bulunan, Eskihisar Kavşağı iksa kazıklarında meydana gelen deformasyonlar ve bu deformasyonlara karşı alınan tedbirler incelenmiştir.

İnşa edilen tünel ve yüksek deformasyon gözlenen Eskihisar Kavşağı iksa kazıkları, Midas GTS NX yazılımı ile üç boyutlu olarak modellenmiş, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar saha verileriyle karşılaştırılmış ve tünel yapımının güvenli şekilde devam etmesini sağlayan en önemli etken olan *"umbrella arch"* yönteminin etkinliği tartışılmıştır.

Mayıs 2022, 178 sayfa.

Anahtar kelimeler: Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi, Yüzey Oturmaları, Sonlu Elemanlar Analizi, Şemsiye Kemer Yöntemi.

SUMMARY

NUMERICAL MODELING OF AN UMBRELLA ARCH SUPPORT SYSTEM IN DIFFUCULT SOIL CONDITIONS: A CASE STUDY

M.Sc. THESIS

Emre YILDIRIM

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

In recent years, the rapidly increasing world population has caused an increase in road traffic, especially in big cities, and increasing costs lead people to public transportation alternatives. The importance of underground rail systems in public transportation is increasing day by day. However, especially in big cities, serious engineering problems are encountered in tunnels opened in areas with many buildings. The most common problems in urban tunneling are the deformations that occur in the structures on the surface due to surface settlements.

Various support systems and ground improvement methods ensure both worker and construction safety in the tunnels to be opened with the New Austrian Tunneling Method. The Umbrella arch method appears as a system applied to improve the ground, ensuring worker safety during the works and preventing settlements on the surface.

In this study, the deformations in the tunnel and Eskihisar Junction piles located on the route where the approach tunnels that connect the shaft to the line tunnels pass in the Şaft-3 region, which is used as the working shaft within the scope of the Gebze-Darica Metro project, and the measures taken against these deformations are examined.

The constructed tunnel and the Eskihisar Junction piles, where high surface settlements occur, were modeled in 3D with Midas GTS NX software and analyzed with the finite element method. The results obtained were compared with the field data, and the effectiveness of the umbrella arch method, which is the most important factor that ensures the safe continuation of tunnel construction, is discussed.

May 2022, 178. pages.

Keywords: NATM, Surface Settlements, Finite Element Analysis, Umbrella Arch Method

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızlı artışından kaynaklı olarak, bireysel araçların neden olduğu trafik yoğunluğu ve artan maliyetler sebebiyle, bireyler ulaşım gereksinimlerini karşılamak amacı ile toplu taşımaya yönelmektedir. Günümüz modern şehirlerinde kimi zaman karayolu toplu taşımacılığı kapasite olarak yetersiz kalabilmekte ve trafik yoğunluğuna neden olabilmektedir. Bu sebeple gerek yolcu kapasitesinin fazla olması gerekse daha az trafik yoğunluğuna ve aynı zamanda daha az çevre kirliliğine sebep olması nedeniyle, toplu taşımacılıkta raylı sistemlerin önemi gün geçtikçe artmaktadır. Ancak, şehirleşme sürecinde, kentsel planlamada toplu ulaşım çözümlerinde, raylı sistemlerin planlara yeterince dahil edilmemesi ile şehir içinde yeni yapılacak yer yüzü raylı sistem projeleri için alan kalmamakla birlikte, bunun sonucunda, kamulaştırma maliyetleri hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu noktada çözüm olarak raylı sistemlerin yeraltına inşası büyük önem teşkil etmektedir. Bu sebeple, gün geçtikçe metro ağlarının sayısı artmakta ve günümüzde uygarlık seviyesinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir.

Ancak, metro inşaatlarında, tünellerin inşası sırasında farklı birçok problemle karşı karşıya kalınabilmektedir. Bu problemler, işçi güvenliği, tünellerde oluşabilecek deformasyonlara bağlı yapım güvenliği problemleri ve metro güzergahının geçtiği bölgelerde yüzeyde yer alan yapılarda meydana gelebilecek deformasyonlardır. Şehir içi tünelciliği açısından bu problemlerden en kritik olanı yüzeyde bulunan yapılarda deformasyona yol açan yüzey oturmalarıdır. Kritik seviyelere ulaşan yüzey oturmaları, tünellerin geçeceği güzergahta bulunan yapılarda hasara neden olabileceğinden dolayı, yüzey oturmaları kritik seviyelere gelmeden gerekli önlemler alınarak kısıtlanmalıdır.

Günümüzde metro projelerinde yaygın olarak, tünel açma yöntemlerinden TBM (Tam Cepheli Tünel Açma Makinesi) ve NATM (Yeni Avusturya Tünel Yöntemi) kullanılmaktadır. TBM kullanılarak açılan tünellerde oluşabilecek yüzey oturmaları, kazı aynasına uygulanan basınçla engellenebilirken; NATM ile açılacak tünellerden dolayı meydana gelebilecek yüzey

oturmalarını engellemek amacıyla, kazı adım mesafesinin azaltılması, kazı adımlarında uygulanacak destek sistemlerinin rijitliğinin arttırılması, tünel aynasına zemin çivisi veya kaya bulonu uygulaması yapılması ve tünel üst yarısına (kalot) enjeksiyonlu süren borularıyla şemsiye boru uygulaması gibi zemin iyileştirme yöntemler kullanılmaktadır.

1.1 TEZİN AMACI

Bu çalışmada, NATM ile açılacak tünellerin inşası sırasında, meydana gelebilecek yüzey oturmalarının önlenebilmesi için kullanılan şemsiye boru yönteminin etkinliğinin incelenmesi amacıyla, çeşitli analizler gerçekleştirilecek olup, şemsiye boru uygulamasının yüzey oturmalarına etkisi incelenecektir. Bu sebeple; çalışmada, Kocaeli ilinde 2018 yılında yapımına başlanan ve halen devam etmekte olan Gebze-Darıca Metro Projesi'nde, inşası sırasında şemsiye boru uygulaması yapılan ve hem tünel içerisinde hem de yüzeyde kritik deplasman değerlerinin okunduğu tüneller, bilgisayar programları aracılığı ile modellenecek ve yapılacak olan analizler sonucunda, söz konusu tünellerde meydana gelen deformasyonlar, sahadan elde edilen veriler ile incelenerek şemsiye boru yönteminin bu deformasyonlara olan etkinliği tartışılacaktır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1 TÜNELCİLİĞİN TARİHSEL GELİŞİMİ VE TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

İlk insanlar yeryüzünde kendiliğinden oluşan mağaralardan barınma, saklanma, depolama, taşımacılık ve benzeri amaçlarla faydalanmış ve bu mağaralar insanlığın ilerlemesi için ilham kaynağı olmuştur. İlerleyen zamanlarda mağaralardan esinlenen insanlar, çeşitli amaçlar doğrultusunda yer altında galeriler ve tüneller açmaya başlamıştır. Tarih boyunca yapılan araştırmalar özellikle Mısır ve Roma uygarlıklarında ilk tünellerin suyun taşınması amacı ile açıldığını, daha sonra farklı uygarlıklar tarafından askeri amaçlar doğrultusunda kullanılmak amacıyla tünellerin yaygınlaştığını göstermiştir.

Zaman ilerledikçe, tüneller ulaşım amaçlı kullanılmaya başlanmış ve demiryollarının gelişimine paralel olarak büyük kesitli tünellerde artış gözlemlenmiş, bu büyük kesitli tünellerin güvenli bir şekilde açılabilmesi için de farklı yöntemler geliştirilmeye başlanmıştır.

Teknolojinin ilerlemesi ve makine sektöründe yaşanan gelişmeler, tünel inşaatlarında çeşitli makinelerin kullanılmasına olanak sağlamış ve bu sayede daha kısa sürede daha az maliyetlerle daha güvenilir tüneller inşa edebilme imkânı doğmuştur.

Günümüzde tüneller genel olarak aç-kapa, delme patlama ve mekanize kazı yöntemleri ile inşa edilmektedir.

2.2 YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ (NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD)

NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi), tünelin, açıldığı ortama kendisini taşıtması prensibi ile ortaya çıkan ve günümüzde çok yaygın kullanılan mekanize kazı ile tünel açma yöntemleri arasında yer almaktadır. NATM'de belirli kazı ve tahkimat sistemi bulunmamakla birlikte, en güvenli sistemi sağlayabilmek amacıyla, tünelde yapılan çalışmalar, tünel aynası ve oluşan deformasyonlar düzenli bir şekilde takip edilerek ortama en uygun tahkimat miktarı ve sistemi belirlenebilmektedir.

İlk büyük ölçekli NATM uygulaması Rabcewicz tarafından Venezüella'da yapılmıştır. (Polat, 2010). Başarıya ulaşan metot dünya genelinde yaygınlaşmaya başlayarak, günümüzde hala en yaygın tünel açma yöntemlerinden biri olarak tercih edilmektedir.

Temel prensibi ortamı kendi kendine taşıtmak olan NATM'de bu prensibi yerine getirebilmek için en önemli unsur zayıf bölgeyi çeşitli sistemlerle güçlendirmektir. Bu prensip yerine getirilirken, ilk kazıdan sonra ortaya çıkan yüksek basınçları taşımak yerine, ortamın bir miktar rahatlamasına izin verilmekte ve daha sonra zayıf bölge güçlendirilmektedir. Bunu en rahat sağlama yöntemi kazı sonrası esnek bir kaplama olarak deformasyonlara bir miktar izin verecek püskürtme beton uygulaması yapılması ve daha sonra zayıf bölgeyi donatılandırarak (kaya bulonları, zemin çivileri vb. aracılığıyla) güçlendirmektir (Satıcı & Topal, 2015).

NATM ile açılan tünellerde hem tünel çevresinde hem de yüzeyde deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, oluşabilecek deformasyonlara karşı, çalışmalar sırasında tüneller ve tünel güzergahının geçeceği bölgede yüzey düzenli bir şekilde izlenmelidir.

2.2.1 NATM ile Açılan Tünellerde Oluşan Gerilmeler

Yeraltında yapılan kazı, tünel vb. çalışmalar sonucu ortaya çıkan kazı boşluğu, var olan doğal gerilmeleri yön ve şiddet değişikliğine uğratarak yeni bir gerilme dağılımı ortaya çıkarmaktadır. Ortamdaki gerilmeler, çalışmalar öncesi birincil gerilmeler ile çalışmalardan dolayı kaynaklanan ikincil gerilmeler olarak ikiye ayrılmaktadır (Çeçen, 2007). Oluşan ikincil gerilmeler kazının yöntemine, desteksiz kalma süresine ve desteğin niteliğine bağlı olarak değişmektedir.

İkincil gerilmeler, maksimum değerlerini kazı kesitinin tavanı, tabanı veya yan cidarlarında almaktadırlar. Maksimum gerilme seviyesi ve ortamın mekanik özelliklerine bağlı olarak bu noktalar etrafında kırılma bölgeleri oluşturmaktadır (Birön & Arıoğlu, 1980).

2.2.2 NATM ile Açılan Tünellerde Karşılaşılabilecek Olası Problemler

Yeraltında yapılan tünel çalışmalarından dolayı oluşan ikincil gerilmeler, ortamın direncine bağlı olarak, tünel içi deformasyonlara ve yüzey oturmalarına sebep olabilmektedirler.

2.2.2.1 Tünel İçi Deformasyonlar

Tünel inşaatı sırasında oluşan ikincil gerilmeler sonucu, tünel duvarlarında deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Deformasyonların, ikincil gerilmelerin maksimum değerlere ulaştığı tavan ve yan cidarlarda daha yüksek olması beklenmektedir. Tünelin yan duvarlarında ve tavanında oluşan deformasyonlar sökülmelere neden olabilmektedir.

Meydana gelen deformasyonlar tünel içerisinde kapanma hareketine neden olmakta ve bu kapanma hareketi konverjans olarak adlandırılmaktadır. Konverjans değerleri, yapım yöntemine, tünelin açıldığı ortamın mühendislik özelliklerine ve kullanılan kazı-destek sistemine göre değişiklik göstermektedir. Deformasyonlar tünel kazısının başladığı andan itibaren başlamakta ve sabitlenmesi uzun zamanlar alabilmektedir.

Panet (1993) yapmış olduğu çalışmada, tünel içerisinde meydana gelen deformasyonların kökeninin ve doğasının anlaşılabilmesi için hem kazı destek sisteminin maruz kaldığı yükler altındaki davranışının hem de sahadan elde edilecek bilgilerin birlikte yorumlanması gerektiğini belirtmektedir. Bu nedenle tünel içerisinde düzenli bir şekilde konverjans ölçümü yapılması gerekmektedir. Günümüzde konverjans ölçümleri tünel içerisinde belirlenen noktalara reflektörler yerleştirilerek yapılmaktadır. Konverjans değerlerinin kritik seviyelere ulaşması durumunda uygulanan kazı-destek sisteminin gözden geçirilmesi gerekmektedir.

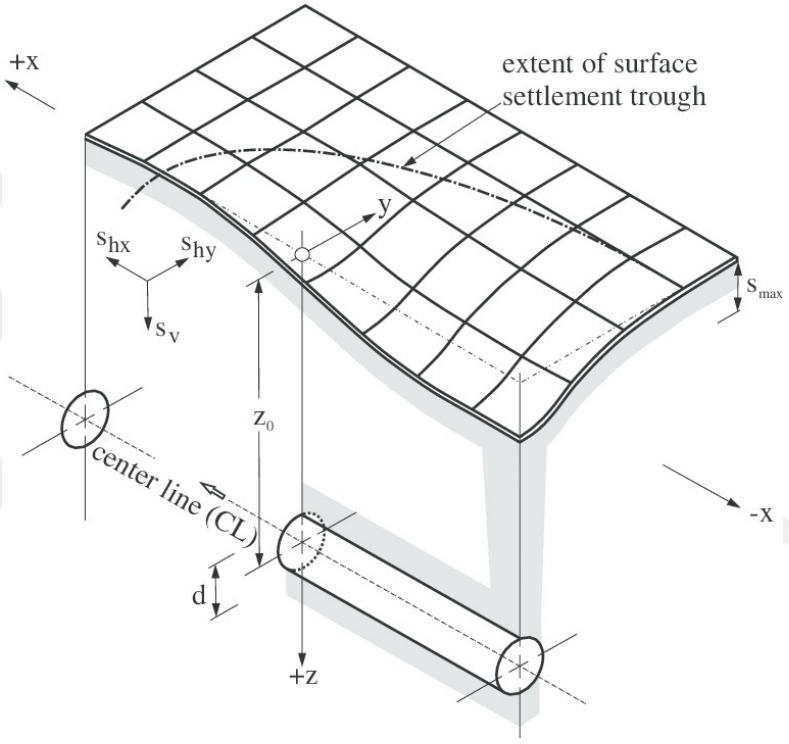
2.2.2.2 Yüzey Oturmaları

Yüzey oturmaları, kentsel alanlara inşa edilecek tüneller için karşılaşılabilecek en önemli sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu oturmalar, planlanan tünel kazı eksenine paralel yapıların ya da dik durumda bulunan, köprü ayakları, üstyapı temelleri gibi yapıların oturma davranışını etkileyebilmektedir. Dolayısı ile tünelin geçeceği güzergâh üzerinde bulunan yapıların hasara uğramasına sebep olabilecek bu yüzey oturmalarının önceden tahmin edilmesi, büyük önem taşımaktadır.

Peck (1969) yapmış olduğu çalışmada tünel güzergahı üzerinde meydana gelmesi beklenen oturmanın hacmi ile, tünel açılımı sırasında meydana gelen zemin kaybını ilişkilendirmektedir. Gevşek zeminlerde inşa edilen tünellerde, genel olarak yüzeyde meydana gelen oturmanın hacmi, tünel kazısından dolayı oluşan zemin kaybına eşit olarak kabul edilmektedir. Zemin kaybı sonucunda yüzeyde bir oturma eğrisi oluşmakta ve bu eğrinin şekli ve büyüklüğü ise

tünel açım tekniği, tünelin bulunduğu derinlik -bir başka deyişle örtü kalınlığı-, zeminin mühendislik özellikleri ve tünel çapı ile değişiklik göstermektedir.

Tünel çalışmaları sonucunda oluşan yüzey oturmalarının Attewell ve diğ. (1986) tarafından oluşturulan şematik 3 boyutlu gösterimi Şekil 2.1'de yer almaktadır.



Şekil 2.1: Attewell'in 3 boyutlu oturma dağılımı (Attewell, ve diğ., 1986).

2.2.3 NATM ile Açılan Tünellerde Destek Sistemleri

Kazı güvenliğinin sağlanması ve yüzeydeki yapıların zarar görmemesi adına, çalışmalar sırasında, tünel içinde ve yüzeyde oluşan deformasyonların kritik seviyelere ulaşmadan önlenmesi gerekmektedir. Tünel çevresinde ve yüzeyde oluşacak deformasyonları engellemek veya belirli bir seviyede tutmak amacıyla NATM ile açılan tünellerde çeşitli tahkimat sistemleri kullanılmaktadır. Bu tahkimat sistemleri tünelin bulunduğu ortamın mekanik özelliklerine göre değişiklik gösterebilmektedir.

2.2.3.1 Püskürtme Beton

Püskürtme beton, basınçlı hava yolu ile uygulama bölgesine yüksek hızla püskürtülerek elde edilen betondur. Püskürtme betonda kalıp gereksinimi bulunmamakta, dayanımını kullanılan özel katkılar sayesinde hemen kazanmaya başlamakta ve bu sayede kısa süre içerisinde taşıyıcılık görevini yerine getirmeye başlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde püskürtme beton özellikle yer altı mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yeraltı yapıları dışında, barajlar, şevler ve kazı-destek sistemlerinde de püskürtme beton kullanılabilmektedir (Arıoğlu, ve diğ., 2008) .

Püskürtme beton karışımlarında çimento miktarı normal betona göre daha fazla olmakla birlikte, püskürtme beton uygulamaları kuru ve ıslak karışım olarak iki farklı sistemde uygulanabilmektedir. Kuru sistemde karışım susuz olarak hazırlandıktan sonra hava yolu ile tabancaya iletilip bu aşamada su ile karıştırılmaktayken, ıslak sistemde çimento, agrega ve su karıştırıcıda karıştırılarak tabancaya iletilmektedir.

Püskürtme beton, tünel imalatlarında, uygulandığı bölgede zemin/kayanın kesme dayanımını arttırmakta, tünel kesiti çevresindeki zemin/kayadaki boşlukları doldurarak dökülmeleri önlemektedir. Esnek bir kaplama oluşturarak ikincil gerilmelerin ve deformasyonların bir kısmını karşılamaktadır.

Püskürtme beton tünellerde kazı çevresinde uygulandığı gibi kazı aynasında da ayna stabilitesinin sağlanması için donatılı ve donatısız olarak uygulanabilmektedir.



Şekil 2.2: Tünel içerisinde püskürtme beton uygulaması.

2.2.3.2 Çelik İksalar

Tünellerde kazı esnasında yapım güvenliğini sağlamak amacıyla kazı kesitinin çevresine iksalar yerleştirilmektedir. İksalar, kazı ortamını güçlendirmezler ancak imalatlara destek olarak, deformasyonları kısıtlamaya ve püskürtme betondaki yük dağılımının sağlanmasına yardımcı olmaktadırlar.

İksalar ahşap, beton veya çelik olabilmektedir. Ahşap iksalar daha çok maden galerilerinde tercih edilmekle birlikte günümüzde tünellerde destek elemanları olarak daha çok çelik iksalar tercih edilmektedir.

Çelik iksalar zeminin/kayanın mekanik özelliklerine bağlı olarak profil (IPE, IPN, HEB vb.) veya kafes kiriş olarak seçilebilmektedir. Çelik iksalar atölyelerde hazırlanmakta ve tünel içerisine parçalı şekilde taşınmaktadırlar. Montaj sırasında cıvata ve somunlar aracılığıyla birbirlerine bağlanmakta ve kazı kesitinin çevresine monte edilmektedirler.



Şekil 2.3: Çelik kafes iksalar.



Şekil 2.4: Profil iksalar.

2.2.4 TÜNELLERDE ZEMİN İYİLEŞTİRME

Zemin/kayanın mühendislik özelliklerinin herhangi bir yapı için uygun olmadığı durumlarda daha elverişli duruma getirilmesi için yapılan uygulamaların tümü zemin/kaya iyileştirme olarak adlandırılmaktadır. Zemin/kaya iyileştirme uygulamaları, proje özelliklerinin değiştirilmesinin mümkün olmadığı veya ekonomik olmadığı durumlarda uygulanmaktadır.

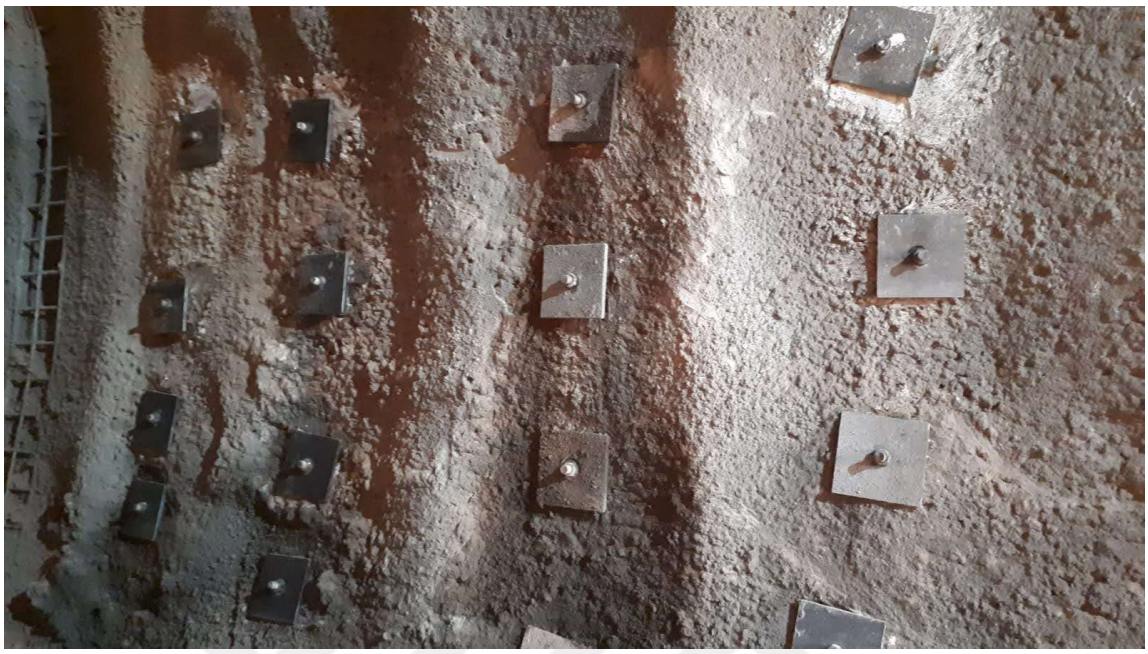
Tünellerde iyileştirme işlemleri sırasında, çekme gerilmesi veya eğilme momenti alacak donatılar ilave edilebilir, yüksek basınç altında enjeksiyon uygulanarak sağlanabilmektedir. İyileştirme işlemleri ile; tünel içi deplasmanları ve yüzey oturmaları azaltılabilmekte, ayna stabilitesi sağlanabilmektedir (Çeçen, 2007).

2.2.4.1 Zemin Donatılama

Tünel stabilitesini korunma ve uygulanacak olan ilave yöntemlere destek olması açısından tünellerde, zemin çivileri ve kaya bulonları olarak adlandırılan destekleme elemanları kullanılmaktadır. (Yoluk, 2020)

Tünel çalışmalarında, zemin çivileri veya kaya bulonları sayesinde ortama kesme dayanımı kazandırılabilmektedir. Donatılama işlerinin, tünel kazısından dolayı, kazı kesiti dışında oluşan plastik bölgenin dışındaki bölgeye yapılması, sistemin verimli çalışabilmesi açısından önem teşkil etmektedir. Donatılama işlemi tünel en kesitine paralel olarak uygulanacağı gibi kazı aynasına da (tünel ilerlemesine paralel olacak şekilde), uygulanabilir. Bu işlemin amacı aynaya basınç uygulayarak ayna stabilitesini sağlamaktır.

Donatılama işleri, öngörülen karelajda deliklerin açılması ve daha sonra donatıların bu delikler içerisine yerleştirilmesi ile yapılmaktadır. Açılan delik ile donatı arasında kalacak boşluk gerektiğinde enjeksiyon ile doldurulabilir. Donatılama işlemi sırasında kullanılacak olan malzeme, zemin özelliklerine ve donatıların kalıcı olup olmayacağına göre değişiklik gösterebilmektedir (Çeçen, 2007).



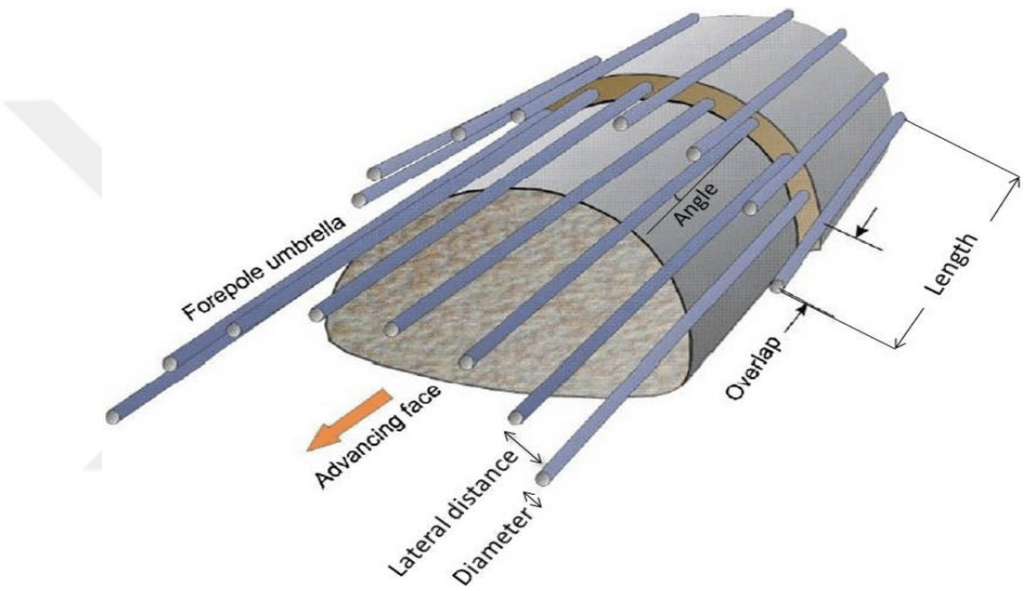
Şekil 2.5: Tünellerde kaya bulonu uygulaması.

2.2.4.2 Umbrella Arch (Şemsiye Boru Kemer) Yöntemi

"Umbrella arch" yöntemi, kohezyonu düşük zeminlerde NATM ile açılan tünellerde kazı güvenliğini sağlama amacıyla ilk olarak İtalya'da kullanılmıştır. Yöntemin başarıya ulaşmasının ardından yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Uygulamanın yaygınlaşması ile elde edilen saha verilerinin artması ve edinilen tecrübeler araştırmacıları konu üzerine akademik çalışmalar yapmaya teşvik etmiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar (Morotvatdar, ve diğ., 2020), (Yaşıtlı, 2013), yöntemin sadece kazı güvenliği ve ayna stabilitesini arttırmakla kalmayıp aynı zamanda sığ tünellerde yüzeyde meydana gelen deformasyonları da önemli oranda azalttığı görülmüştür. Bu sebeple, günümüzde kentsel alanlarda inşa edilecek tünellerde, tünelin geçeceği güzergâh üzerinde bulunan yapıların hasar görmemesi için *'umbrella arch'* yöntemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

"Umbrella arch" yönteminin amacı, kazı kesiti çevresinde belirli bir alanda, güçlendirilmiş zemin/kaya bölgesi oluşturarak, tünel cidarına eksenel olarak etki eden yüklerin, kendi kendini taşıması mümkün olmayan tünel üst yarısına doğrudan etki etmesini engellemek ve tünelin yan cidarlarına dağılmasını sağlamaktır. Bu sayede duraylılık artmakta, dolayısı ile tünel kazısının güvenli yapılmasına ve yüzeyde oluşacak deformasyonların önlenmesine olanak sağlanabilmektedir (Değirmenci, 2019).

"Umbrella arch" yönteminde kazı tavanına çelik borular yerleştirilmekte ve boru içerisinde bulunan hortum aracılığıyla içine basınçlı enjeksiyon verilmektedir. Bu boruların yerleştirilebilmesi için üst yarı kazısı kesiti normal ilerleme kesitinden daha geniş açılmaktadır. Bu nedenle "*umbrella arch*" yöntemi uygulanan tünellerde, kazı ilerlemesi yönünde genişleyen iksalar kullanılmaktadır. Şekil 2.2'de şematik olarak *"umbrella arch"* yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Hoek "*umbrella arch"* uygulaması (Hoek, 2004).

"Umbrella arch" uygulamasında ilk olarak tünel üst yarısında belirli uzunlukta, eğimde ve adette birer atlamalı olarak delikler açılmaktadır. Delgi işleminin tamamlanmasından sonra projelerde belirtilen çapta ve et kalınlığında çelik borular yine birer atlamalı olacak şekilde yerleştirilmektedir. Boruların delik içerisinde kolay ilerleyebilmesi Şekil 2.2'de de görülebileceği gibi için uçları sivri hale getirilmektedir. Boruların içine hortum yerleştirilip borunun ağzı alçı ile sıvanmakta ve boruların içine yerleştirilen bu hortum aracılığıyla yüksek basınçlı enjeksiyon pompalanmaktadır. Bu sırada borular ile delik arasında boşluk kalmaması büyük önem taşımaktadır. Enjeksiyonun borunun etrafını tam olarak doldurabilmesi için ise boru cidarında delikler açılmaktadır. Yerleştirilen boruların projelerde belirtilen kadar kısmı, bir sonraki ano ile bindirmeli olacak şekilde bırakılmaktadır. Boruların montajı ve enjeksiyonu tamamlanıp, priz aldıktan sonra tünel kazısına geçilmektedir. Şekil 2.4'te *"umbrella arch"* yönteminin tünel içinde uygulaması görülmektedir.



Şekil 2.7: ϕ114mm *"umbrella arch"* boruları



Şekil 2.8 : Tünelde *"umbrella arch"* uygulaması.

Literatürde *"umbrella arch"* borularının optimum boy, çap, et kalınlığı, yataydaki yerleştirilme aralıkları ve bindirme boyları ile ilgili birçok parametrik çalışma yer almaktadır. Morovatdar ve diğ. (2020) yapmış oldukları çalışmada; optimum boru çapı, et kalınlığı ve yatayda borular arası mesafenin zemin koşullarına göre değişebileceğini ancak optimum *"umbrella arch"* borusu boyunun, tünel çapının 1.5 katı kadar, minimum bindirme boyunun ise boru uzunluğunun %25'inden az olmaması gerektiğini belirtmektedir. Zhang ve diğ. (2014) ise yapmış oldukları çalışmada minimum bindirme boyunun 3m'den az olmaması gerektiğini belirtmektedirler.

2.3 "UMBRELLA ARCH" UYGULAMASININ MODELLENMESİ VE OLUŞAN DEFORMASYONLARIN SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Yukarıdaki bölümlerde de bahsedildiği gibi, kentleşmenin yoğun olduğu bölgelerde tünel inşaatlarının en önemli çevresel etkisi yüzey oturmaları olarak karşımıza çıkmaktadır. Yüzey oturmalarının önlenmesi veya belirli sınırlarda tutulabilmesi için günümüzde *"umbrella arch"* yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntemin yaygınlaşması sonucu sahadan elde edilen verilerin artması ile *"umbrella arch"* yönteminin sayısal yöntemler kullanılarak nasıl modellenmesi gerektiği, yüzey oturmalarına karşı etkinliği ve gelen yükler altındaki davranışı birçok araştırmaya konu olmuştur.

Oke ve diğ. (2014) *"umbrella arch"* yöntemi üzerine yapmış olduğu genel bir çalışmada, farklı tünel projelerinde uygulanan, çeşitli parametrik özelliklerdeki *"umbrella arch"* borularını inceleyerek, sahadan elde edilen yüzey oturma verileriyle ilişkilendirmiş ve ön tasarım için *"umbrella arch"* seçim metodolojisi oluşturmuştur. Çalışmada herhangi bir sayısal modelleme yapılmamış olup, farklı sahalardan elde edilen verilerle, literatürde yapılan çalışmalar harmanlanarak, *"umbrella arch"* uygulaması için ortak bir dil oluşturulması ve ileride yapılacak çalışmalara yol gösterebilmesi hedeflenmiştir.

"Umbrella arch" uygulamasının sayısal modellemesinde geometrik özelliklerinden kaynaklı olarak, modelleme işlemi ve sonrasında analiz işlemlerinin oldukça uzun sürmesi, bu konu üzerinde çalışan araştırmacıların birtakım kabuller ile modeli basitleştirmesine sebep olmuştur.

2.3.1 Hoek (2004) Çalışması

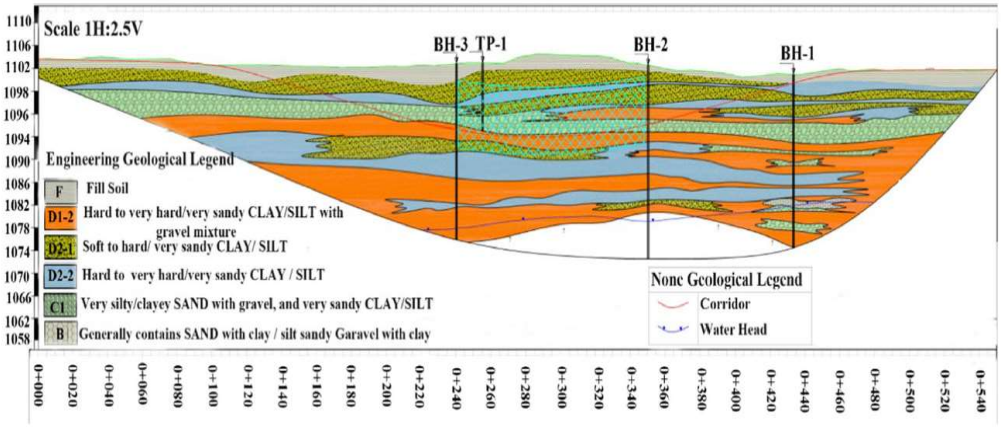
Hoek (2004) yapmış olduğu çalışma ile "*umbrella arch"* yönteminin uygulandığı bölgede güçlendirilmiş bir zemin bölgesi oluşturduğunu belirtmiştir. Bu güçlendirilmiş bölgenin mukavemet özelliklerinin, her bir bileşenin (kaya/zemin, çelik ve borular içine uygulanacak enjeksiyon harcı) mukavemetinin, her bileşenin kesit alanı ile çarpılması ve ardından bu çarpımların toplam alana bölünmesi ile tahmin edilebileceğini öne sürmüştür. Barla ve Bzowka (2013) ve Dehghan (2020) da yapmış oldukları çalışmaları bu kabul doğrultusunda gerçekleştirmiştir.

2.3.2 Dehghan (2020) Çalışması

Yakın bir zamanda yaptığı çalışmada Dehghan (Dehghan, 2020), Tahran'da bulunan Zarbalizadeh-Maddah tünelini modelleyerek, trafik yükleri altında açılan tünellerde *"Umbrella arch"* yönteminin yüzey oturmalarına etkilerini incelemiştir. Çalışmada tüneller 2 ve 3 boyutlu olarak ayrı ayrı modellenmiştir.

Çalışmada modellenen tünel Zarbalizadeh ve Maddah sokaklarını birbirine bağlayan yaklaşık 150 m^2 kesit alanına sahip olan ve 43 m uzunluğunda ve üzerinden demiryolu geçen sığ bir karayolu tünelidir. Tünel üzerindeki örtü kalınlığı maksimum 5 m'dir.

Çalışma kapsamında incelenen bölgenin, jeolojik ve geoteknik özelliklerini belirleyebilmek için tünel güzergahı boyunca 1 adet test çukuru ve 3 adet sondaj kuyusu açıldığı görülmektedir. Test çukurunda Plaka Yükleme Deneyi (PLT) ve sondaj kuyularında Standart Penetrasyon Deneyleri gerçekleştirilmiş ve alınan numuneler üzerinde de laboratuvarda; 3 eksenli ve tek eksenli basınç dayanımı testi, kesme kutusu deneyi, konsolidasyon test, elek analizleri ve Atterberg limitleri testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm bu çalışmalar neticesinde 3 ana birimden oluşan bir jeolojik profil oluşturulmuştur. (Şekil 2.9)



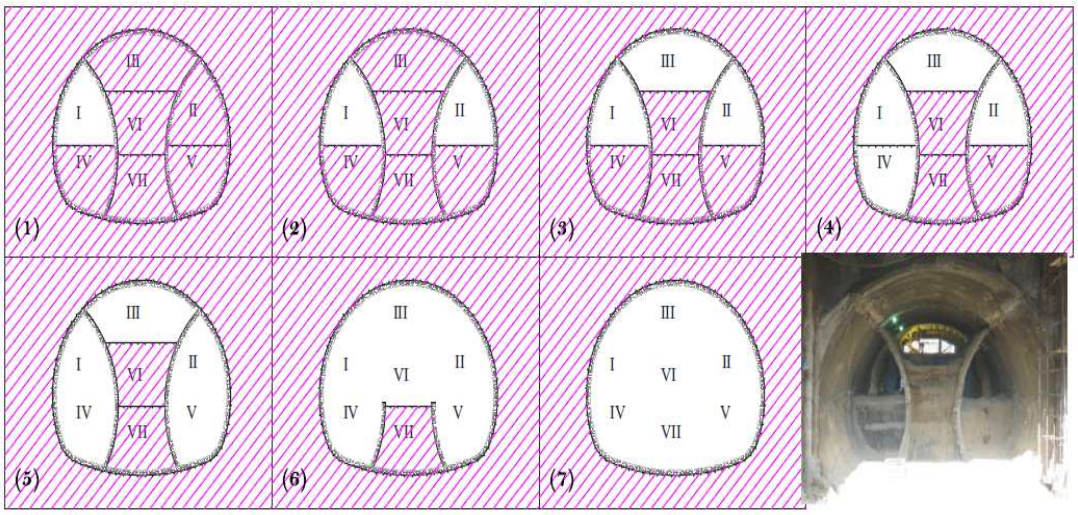
Şekil 2.9: Dehghan Jeolojik profil (Dehghan, 2020).

Yapılan çalışmalar ile bu 3 jeolojik ana birim altında, tünel güzergahı boyunca değişken mekanik ve fiziksel özellikler gösteren 11 zemin tabakası tanımlanmıştır. (Tablo 2.1)

Tablo 2.1: Dehghan Geoteknik parametreler (Dehghan, 2020).

Katman	Birim	D	γ_{unsat}	γ_{sat}	E_{oed}^{ref}	E_{50}^{ref}	E_{ur}^{ref}	K_0^{nc}	ψ	φ	c	ν	m
		m	kN/m3	kN/m3	MPa	MPa	MPa		derece	derece	kPa		
1	Dolgu	0 - 2.7	18	18	23	23	69	0.56	0	26	15	0.5	0.5
2	D2-1	2.7 - 6	18	18	28	28	84	0.53	0	28	30	0.3	0.5
3	D2-2	6 - 7.5	18	18	26	26	78	0.54	0	27	32	0.3	0.5
4	D2-1	7.5 - 10	18	18	28	28	84	0.53	0	28	30	0.3	0.5
5	C1	10 - 14.5	18.5	18.5	52	52	156	0.44	4	34	20	0.31	0.5
6	D1-2	14.5 - 18	18	18	30	30	90	0.50	0	30	31	0.32	0.5
7	D2-1	18 -19.7	18	18	28	28	84	0.53	0	28	30	0.3	0.5
8	D2-2	19.7 - 23.5	18	18	26	26	78	0.54	0	27	32	0.3	0.5
9	D1-2	23.5 - 27	18	18	30	30	90	0.50	0	30	31	0.32	0.5
10	D2-2	27 - 28	18	18	26	26	78	0.54	0	27	32	0.3	0.5
11	D1-2	28 - 50	18	18	30	30	90	0.50	0	30	31	0.32	0.5

Çalışmaya konu olan karayolu tüneli olumsuz zemin koşulları, büyük kesit alanına sahip olması ve örtü kalınlığının oldukça az oluşu sebebiyle toplamda 7 aşamada açılmıştır. (Şekil 2.10)



Şekil 2.10: Dehghan İnşaat aşamaları kesiti (Dehghan, 2020).

Tünel kazısı, ayna tahkimatları ve *"Umbrella arch"* imalatları ile başlamış ve tipik olarak aşağıdaki sıralama ile devam etmiştir:

a) 1. Aşama kazısı
b) İlk kat püskürtme beton uygulaması
c) İlk kat çelik hasır montajı
d) Kafes iksa montajı
e) İkinci kat çelik hasır montajı ve son kat püskürtme beton uygulaması

Yukarıda sıralanan imalatları takiben diğer üst yarı kazı aşamaları (II ve III) gerçekleştirilmiş ve her biri için aynı adımlar izlenmiştir. Üst yarı kazı mesafesi 2m'ye ulaştıktan sonra alt yarı kazısı başlamış, yukarıda bahsedilen adımlar uygulanarak Şekil 2.10'da belirtilen sıra ile tünel kazısı devam etmiştir. Kazı adımı koridor bölgesinde 0.5 m ve koridor öncesi bölümde 0.75 m olarak belirlenmiştir.

Çalışmada tünel kazısının stabilitesini sağlamak amacıyla uygulanan destek imalatları, başlangıç ve geçici destek sistemleri olarak adlandırılmıştır. Başlangıç destek sistemi tünel tavanı, invert ve yan duvarlara uygulanan destek imalatlarını kapsarken, geçici destek sistemi olarak adlandırılan imalatlar ise kazı aşamaları sırasında ortada yer alan (topal iksa) bölümlere uygulanan destek imalatlarını kapsamaktadır. Bu destek sistemlerine ait yapısal özellikler ve dayanım özellikler sırasıyla Tablo 2.2 ve Tablo 2.3'te yer almaktadır.

Tablo 2.2: Zarbalizadeh-Maddah tüneli destek sistemleri (Dehghan, 2020).

Destekleme sistemi tipi	Önerilen destekleme sitemi
Koridor bölgesi	
Başlangıç (Yan duvarlar, tavan ve invert)	300 mm püskürtme beton, çift sıra hasır çelik, çelik kafes iksa
Geçici (orta duvarlar, taç ve altyarı)	250 mm püskürtme beton, çift sıra hasır çelik, çelik kafes iksa

Tablo 2.3: Zarbalizadeh-Maddah tüneli destek sistemleri mukavemet parametreleri (Dehghan, 2020).

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Başlangıç destek sistemi			
Elastisite modülü (E)	$2.14E^{7}$ kN/m^2	Basınç dayanımı	20 MPa
Normal kuvvet rijitliği (EA)	$6.41E^{6}$ kN	Kalınlık	300 mm
Eğilme rijitliği (EI)	$2.40E^{4}$ kN m^2	Çatlama faktörü	0.50
Geçici destek sistemi			
Elastisite modülü (E)	$2.14E^{7}$ kN/m^2	Basınç dayanımı	20 MPa
Normal kuvvet rijitliği (EA)	$5.34E^{6}$ kN	Kalınlık	250 mm
Eğilme rijitliği (EI)	$1.39E^{4}$ kN m^2	Çatlama faktörü	0.50

Çalışmada, nümerik analizlerin gerçekleştirilebilmesi için Zarbalizadeh-Maddah tüneli Plaxis 2D ve Plaxis 3D Tunnel programları ile modellenmiştir.

2 Boyutlu modellemede model boyutu, yatayda ve düşeyde tünel yarıçapının 6 katı olacak şekilde ayarlanırken, 3 boyutlu model için analiz süresi ve model büyüklüğü de göz önüne alınarak yatayda tünel çapının 4 katı ve düşeyde tünel çapının 2.5 m katı olacak şekilde ayarlanmıştır. Modellerde yan sınırlar yatay deplasmana kısıtlanırken alt sınır deplasmanlara karşı tamamen sabitlenmiştir.

Demiryolu trafik ve ray ağırlığı düşünülerek modelde 93.5 kPa düzgün yayılı yük tanımlanmıştır.

Analizlerde daha kesin sonuçlar vereceği düşünüldüğünden sertleşen zemin bünye modelleri kullanılmıştır.

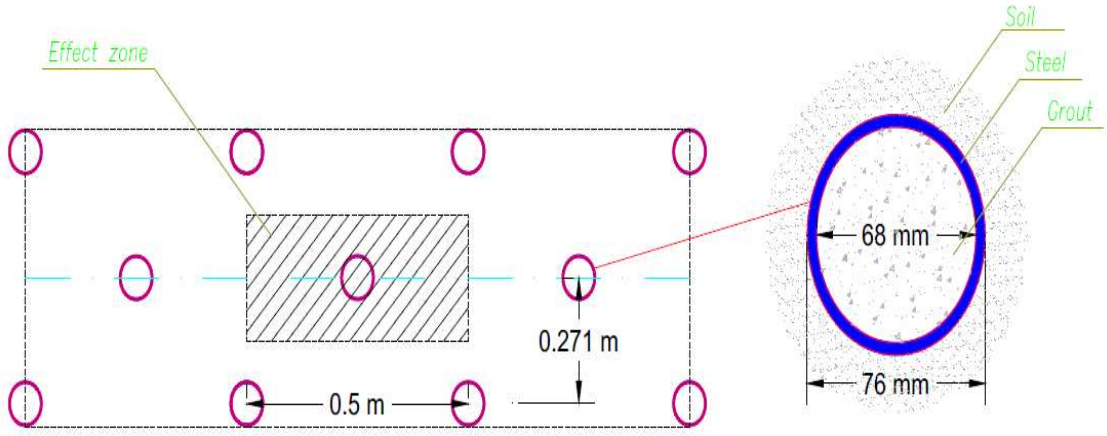
Tünel kazıları başlamadan önce yoğun yükler altında ve düşük örtü kalınlığına sahip bölgelerde, yüzey oturmalarını ve aynada oluşabilecek deformasyonları kontrol altına alabilmek amacıyla *"Umbrella Arch"* imalatı yapılmıştır. Uygulama sırasında kullanılan *"Umbrella arch"* boruları; 76 mm dış çapa, 68 mm iç çapa ve 4 mm et kalınlığına sahiptir. *"Umbrella arch"* boruları, 8 m uzunluğunda ve bindirme boyu 6 m olacak şekilde, 0.5 m yatay aralıklarla, 7 derecelik eğimle uygulanmıştır.

"*Umbrella arch"* uygulama bölgesinin parametreleri belirlenirken Hoek'un (2004) önerileri dikkate alınmıştır. *"Umbrella arch"* uygulaması sonucunda oluşan iyileştirilmiş bölgeye ait parametreler Tablo 2.3'te ve iyileştirilmiş bölgeye ait temsili bir çizim Şekil 2.11'de yer almaktadır. İyileştirilmiş bölgeye ait parametreler aşağıda yer alan formülle hesaplanmıştır.

$$\bar{X} = \frac{\sum(X_i * A_i)}{A_{etki\ alanı}} \quad ; \quad X = \{E,\ \gamma\} \quad ; \quad i = \{zemin, enjeksiyon, çelik\} \tag{2.1}$$

Tablo 2.4: Zarbalizadeh-Maddah tüneli iyileştirilmiş bölge mukavemet parametreleri (Dehghan, 2020).

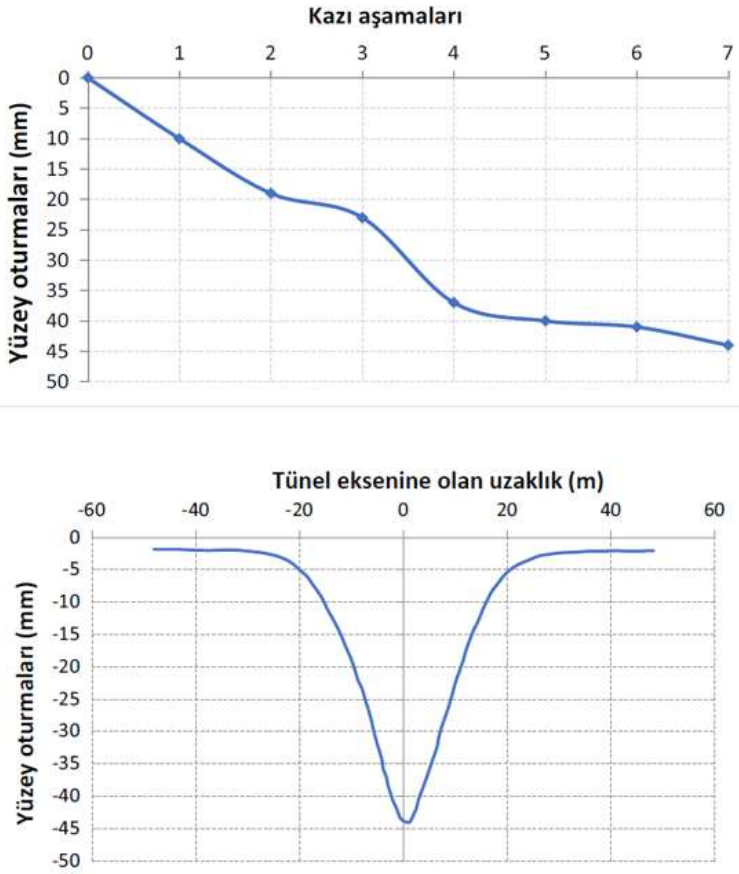
Parametre	Alan, A (%)	Elastisite modülü, E (kPa)	Kohezyon, c (kPa)	İçsel sürtünme açısı, φ (°)	Birim hacim ağırlık, γ (kN/ m^3)
Zemin	93.70	$2.60E^4$	30	26	18
Çelik boru	0.543	$2.00E^8$	–	–	78
Enjeksiyon	2.20	$9.00E^6$	–	–	24
İyileştirilmiş bölge	100	$1.31E^6$	300	30	18.47



Şekil 2.11: İyileştirilmiş bölgenin şematik gösterimi (Dehghan, 2020).

Yukarıdaki formülden anlaşılacağı üzere, iyileştirilmiş bölge parametresi, Hoek'un (2004) çalışmasında önerilen yöntem ile her bir bileşenin (kaya/zemin, çelik ve borular içine uygulanacak enjeksiyon harcı) mukavemetinin, her bileşenin kesit alanı ile çarpılması ve ardından bu çarpımların toplam alana bölünmesi ile elde edilmiştir.

Çalışmada 2 boyutlu analizler gerçekleştirilirken 3. boyut etkisinin modele yansıtılabilmesi için rahatlama faktörü hesaplanmıştır. Rahatlama faktörü her bir aşama için hesaplandıktan sonra 2 boyutlu modellere etki edilerek analizler tamamlanmıştır. Analizler 15 aşamada gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda farklı aşamalarda meydana gelen yüzey oturmaları değerleri Şekil 2.12'de yer alan grafikteki gibi elde edilmiştir.



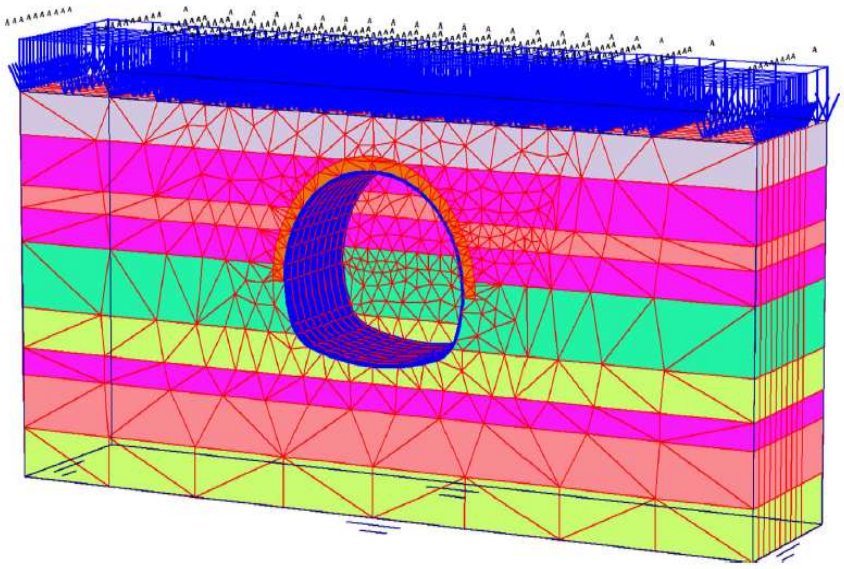
Şekil 2.12: Maksimum yüzey oturmaları (Dehghan, 2020).

Şekil 2.12'de yer alan grafiklerden anlaşılacağı üzere elde edilen maksimum yüzey oturmasının 44 mm olduğu gözükmektedir. Elde edilen bu değerin yerel yönetmeliklere göre izin verilen maksimum oturma değeri olan 43 mm 'nin üzerinde olduğu belirtilmiştir. Sahada yapılan ölçümler sonucunda ise maksimum yüzey oturması 30mm olarak raporlanmıştır. Sahadan ve nümerik analizlerden elde edilen yüzey oturma değerleri arasında bu denli fark olmasından dolayı problemin 3 boyutlu analizler ile incelenmesine karar verilmiştir.

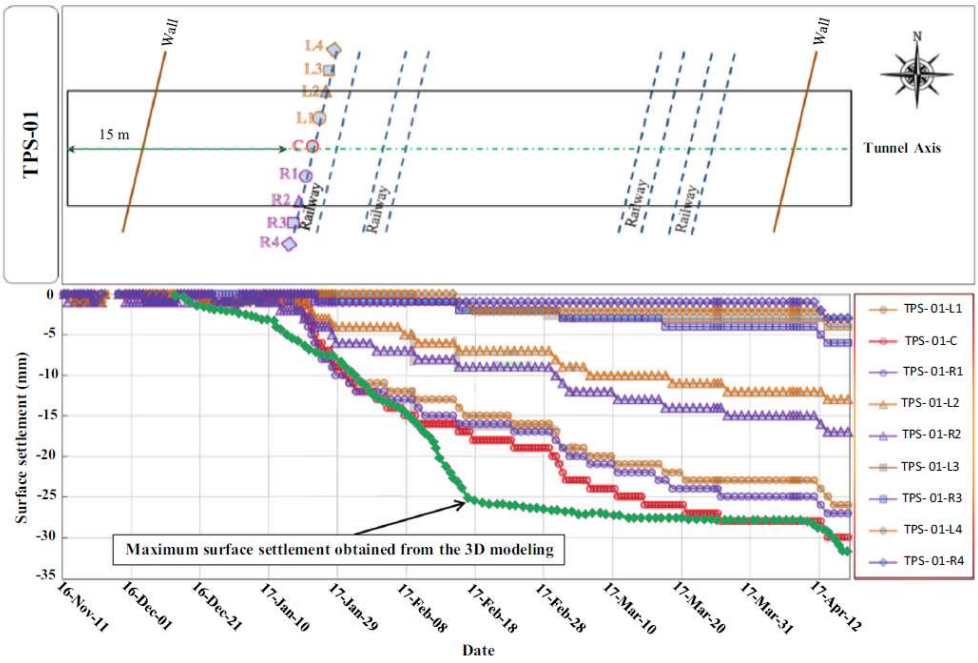
"Umbrella arch" yönteminin etkinliğinin anlaşılması açısından çalışmada 2 boyutlu modellerde iyileştirilmiş bölgenin elastisite modülü ve kohezyon parametreleri değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Tekrarlanan analizler sonucunda iyileştirilmiş bölgeye ait kohezyon parametresinin elastisite modülüne göre daha etkin rol oynadığı anlaşılmıştır. Kohezyonun yarıya indirilmesi ile yüzey oturmalarının %27 oranında arttığı raporlanmıştır.

Yukarıda da belirtildiği gibi sahadan elde edilen ölçüm verileri ile 2 boyutlu nümerik analiz sonuçları arasında fark olmasından dolayı ve *"Umbrella arch"* yönteminin yüzey oturmalarına etkisinin tam olarak belirlenebilmesi için problem ayrıca 3 boyutlu olarak modellenmiştir. 3 boyutlu modelleme sırasında bütün inşaat aşamaları olduğu gibi tanımlandığından 2 boyutlu modellemede olduğu gibi rahatlama faktörü kullanılmasına gerek bulunmadan analizler gerçekleştirilmiştir.

3 boyutlu modelleme alt yarı ve üst yarı kazıları takip mesafeleri dikkate alınarak tamamlanmıştır. (Şekil 2.13) 3 boyutlu analiz sonuçlarına göre, Şekil 2.14'te görülebileceği gibi maksimum yüzey oturması 32 mm olarak elde edilmiş ve bu değerin saha ölçümleriyle oldukça uyumlu olduğu raporlanmıştır.



Şekil 2.13: 3-Boyutlu sayısal analiz modeli (Dehghan, 2020).



Şekil 2.14: Yüzey oturma grafiği (Dehghan, 2020).

3 boyutlu analiz sonuçlarının saha ölçümleri ile elde edilen veriler ile uyumlu olması sonucunda araştırmacı, *"umbrella arch"* sisteminin neden olduğu iyileştirilmiş bölge parametrelerinin yüzey oturmalarına etkisini araştırma amacı ile 2 boyutlu analizlerde de yapmış olduğu gibi, iyileştirilmiş bölgenin ayrı ayrı kohezyon ve elastisite modülü değerlerini %50 azaltarak iki farklı analiz daha gerçekleştirmiştir. Yapılan bu parametrik çalışmalar sonucunda kohezyon değerinin yüzey oturmaları üzerinde daha etkin rol oynadığı görülmüştür. Çalışmaya göre kohezyon değerinin %50 oranında azalması yüzey oturmalarını %18 oranında arttırken elastisite modülünün %50 oranında azalması yüzey oturmalarını %11 oranında azaltmaktadır.

Dehghan (2020) Zarbalizadeh-Maddah tüneli üzerinde yapmış olduğu ve yukarıda özetlenen çalışma ile 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçlarını gerçek saha verileri ile karşılaştırmış ve yüzey oturmalarını etkileyen parametreler üzerinde parametrik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Araştırmacı, elde ettiği sonuçları göz önüne alarak; çalışmasına konu olan Zarbalizadeh-Maddah tünellerinde meydana gelen yüzey oturmalarının 3 boyutlu modelleme ile analiz edildiğinde gerçek durumla daha çok örtüştüğünü bu nedenle benzer çalışmalarda 3 boyutlu modellerin kullanılması gerektiğini önermiş, yapmış olduğu parametrik çalışmalar ile iyileştirilmiş bölge olarak tanımlanan bölgenin kohezyon parametresinin yüzey oturmaları

üzerinde en etkin parametre olduğunu tespit etmiş, gerçekleştirmiş olduğu vaka analizinde seçilen tahkimat sistemlerinin doğru olduğunu ve *"umbrella arch"* uygulamasının, tünel ve tünel aynasının stabilitesinde önemli rol oynadığını ve bu sebeplerle yüzey oturmalarını önemli ölçüde azalttığını belirtmiştir.

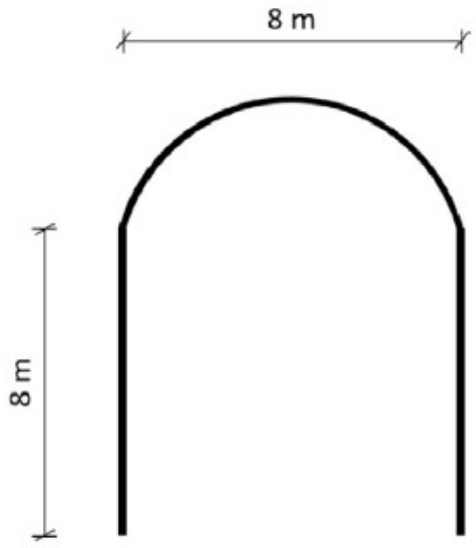
2.3.3 Morotvatdar ve diğ. (2020) Çalışması

Bir başka çalışmada ise Morotvatdar ve diğ. (2020), *"umbrella arch"* sisteminin modellenmesi esnasında yapılan basitleştirmeler ile borularda oluşan iç kuvvetlerin belirlenmesinin mümkün olmayacağını belirtmiştir. Bu nedenle yapmış olduğu çalışmada bir vaka analizi gerçekleştirmiş ve İran'da bulunan Kazvin-Reşt tünel projesini üç boyutlu olarak modellemiştir. Çalışmanın öncelikli amacının *"umbrella arch"* yönteminin yüzey oturmaları üzerine etkilerini doğru bir şekilde tayin etmek olduğu belirtilmiştir. Bu sebeple araştırmacı sahada karşılaşılan jeolojik koşulları ve tünel geometrisi gerçekte olduğu gibi modeline aktarmış ve birincil destek elemanları ile *"umbrella arch"* uygulamasını ayrı ayrı modellemiştir. Araştırmacı kendisinden önce yapılan çalışmalarda *"umbrella arch"* modellemesi ile ilgili yapılan kabullerin borularda oluşacak kuvvetlerin belirlenmesine imkân veremeyeceğini ve borulara ait geometrik ve fiziksel özelliklerin sisteme etkilerinin belirlenemeyeceğini belirterek önceki çalışmalardan farklı olarak *"umbrella arch"* borularını ve güçlendirilmiş bölgeyi ayrı ayrı modellemiştir. Çalışmanın devamında, *"umbrella arch"* borularının, boy, çap, bindirme boyu ve montaj açıları üzerinde çeşitli değişiklikler yapılarak bir dizi parametrik çalışma yapılmıştır. Çalışmada sonlu elemanlar analizleri ABAQUS programı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında incelenen Kazvin-Reşt tüneli İran'ın Kuzey Bölgesinde bulunan 1200 m uzunluğuna sahip bir demir yolu tünelidir. Tünel 8 m olup, tünel üzerinde maksimum örtü kalınlığı 20 m'dir. Tünele ait geometrik özellikler Tablo 2.5'te ve tünel geometri çizimi Şekil 2.15'te yer almaktadır.

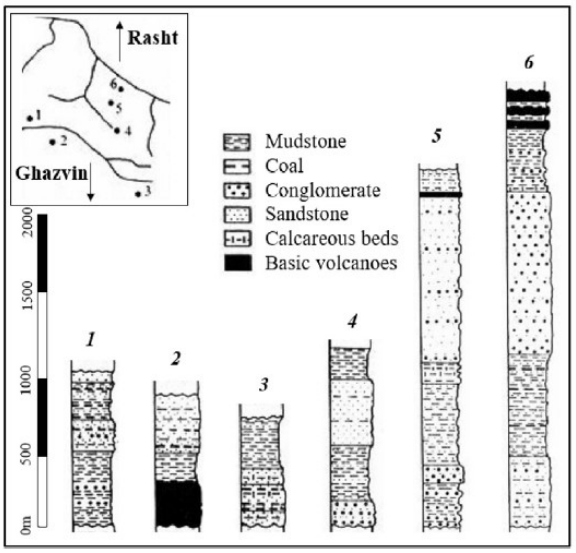
Tablo 2.5: Kazvin-Reşt tüneli geometrik özellikleri (Morotvatdar, ve diğ., 2020).

Geometrik Özellik	Birim	Değer
Uzunluk	m	1800
Eğim	%	-1.14
Maksimum örtü yüksekliği	m	20
Tünel genişliği	m	8
Tünel yüksekliği	m	8



Şekil 2.15: Kazvin-Raşt tüneli geometrisi (Morotvatdar, ve diğ., 2020).

İncelenen bölgenin jeolojik özelliklerinin belirlenebilmesi için mevcut sondaj loglarından ve laboratuvar deneylerinden yararlanılarak tünelin geçtiği bölgenin zemin profili; tünel girişi, tünel ortası ve tünel sonu olarak üç farklı bölgede sınıflandırılmıştır. Yapılan zemin araştırma çalışmalarına göre ise tünel etrafındaki mevcut zeminin nispeten zayıf olduğu ve tünelin büyük bir kısmının zayıf mekanik özelliklere sahip kum ve killi zemin birimleri ile çevreli olduğu raporlanmıştır. Proje bölgesinin jeolojik yapı haritası Şekil 2.16'da yer almaktadır.



Şekil 2.16: Tünel bölgesi jeolojik yapı haritası (Morotvatdar, ve diğ., 2020).

Bu üç bölgeye ait zemin birimlerinin yer aldığı idealize zemin profili tablosu Tablo 2.6'da yer almaktadır.

Tablo 2.6: Kazvin-Raşt tüneli idealize zemin profili (Morotvatdar, ve diğ., 2020).

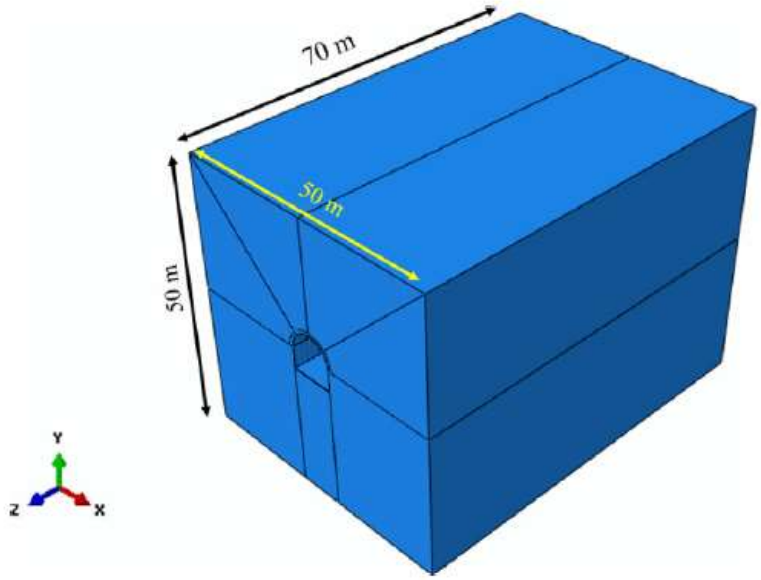
Bölge	Zemin birimi	Konum
1	Düşük mekanik özellikte killi kum	Tünel girişi
2	Düşük mekanik özellikte kil	Tünel ortası
3	Kumtaşı	Tünel sonu

2. Bölge olarak adlandırılan ve zayıf mekanik özelliklere sahip killi zeminlerin kazısı sırasında stabilitenin sağlanabilmesi için *"umbrella arch"* yönteminin kullanıldığı belirtilmiştir. *"Umbrella arch"* yöntemi ile tünel içi deformasyonların ve yüzey oturmalarının minimuma indirilmesi planlanmıştır. Kazvin-Raşt tünelinde kullanılan *"umbrella arch"* boruları 12m uzunluğunda, 12 cm çapında olup 30 cm aralıklarla ve 6 derecelik açıyla yerleştirilmişlerdir. Tünelde kullanılan *"umbrella arch"* borularına ait fiziksel özellikler Tablo 2.7'de özetlenmiştir.

Tablo 2.7: Projede kullanılan *"umbrella arch"* borularının fiziksel özellikleri (Rockwell, ve diğ., 2001).

Uzunluk, L_p (m)	Çap, D_p (m)	Yatay aralık, S_T (cm)	Uygulama açısı, θ_L (°)
12	12	30	6

Çalışmada 50m x 50m x 70m ölçülerinde bir model kullanılmıştır. Araştırmacı model boyutunu belirleyebilmek için bir dizi analizler gerçekleştirmiş ve tünel boyunun en az 70 m'lik kısmının modellenmesi ile daha gerçekçi sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir. Oluşturulan 3 boyutlu model Şekil 2.16'da yer almaktadır.



Şekil 2.17: 3 Boyutlu model (Morotvatdar, ve diğ., 2020).

Modelde zemin ve *"umbrella arch"* uygulamasının oluşturduğu iyileştirilmiş bölge için Mohr-Coulomb bünye modeli tanımlanmış, püskürtme beton, çelik iksalar ve *"umbrella arch"* boruları ayrı ayrı modellenmiştir. Çalışmada *"umbrella arch"* sisteminin oluşturduğu iyileştirilmiş bölge *"soilcrete"* olarak adlandırılmıştır. Bu bölgeye ait parametrelerin doğru bir şekilde tanımlanabilmesi için sahada karotlar alınmış ve bu şekilde parametreler belirlenmiştir. Püskürtme beton elastoplastik, çelik iksalar ve borular ise elastik elemanlar olarak

tanımlanmıştır. Modelde yer alan zemin ve iksa elemanlarının geoteknik ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 2.8 ve Tablo 2.9'da yer almaktadır.

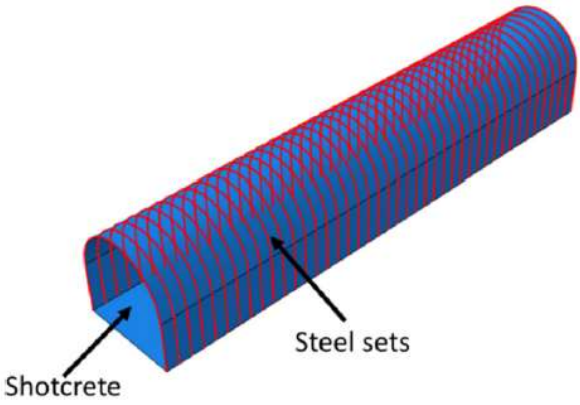
Tablo 2.8: Zemin ve iyileştirilmiş bölgeye ait geoteknik özellikler (Morotvatdar, et al., 2020).

Parametre	Birim	Malzeme	
		Zemin	*"Soilcrete"* İyileştirilmiş bölge
Yoğunluk, ρ	kg/m^3	1900	2300
Elastisite Modülü, E	MPa	5	2600
Poisson Oranı, ν		0.3	0.3
Kohezyon, c	kPa	40	4200
İçsel sürtünme açısı, φ	°	30	38

Tablo 2.9: İksa elemanlarının mekanik özellikleri (Morotvatdar, et al., 2020).

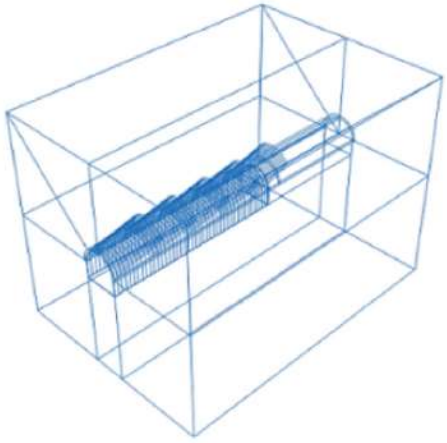
Destek elemanı	Yoğunluk (kg/m^3)	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı	28 günlük beton dayanımı (MPa)
Püskürtme beton (20cm)	2200	26	0.3	30
Çelik iksa (IPE180)	7800	200	0.25	
"Umbrella arch" boruları	3200	210	0.25	

Çalışma kapsamında incelenen tünellerde 20 cm püskürtme beton uygulaması yapılmış ve çelik iksalar olarak IPE 180 profiller tercih edilmiştir. Kazı ilerleme adımı 1m olarak belirlenmiş ve kazılar tam kesit olarak devam etmiştir. Tünel kazı aşamalarının 3 boyutlu gösterimi Şekil 2.18'de yer almaktadır.

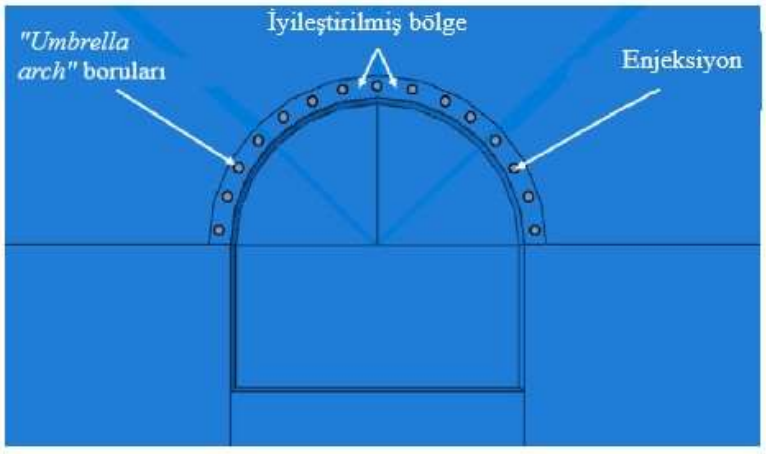


Şekil 2.18: Tünel kazı aşamalarının 3 boyutlu modeli (Morotvatdar, ve diğ., 2020).

Çalışmada *"umbrella arch"* sisteminde çelik borular, enjeksiyon ve boru etrafında oluşan iyileştirilmiş zemin bölgesi ayrı ayrı modellenmiştir. Bu sayede araştırmacı gerçek saha koşullarına en yakın ve en gerçekçi modellemeyi oluşturduğunu belirtmiştir. Araştırmacı ayrıca iyileştirilmiş zemin bölgesinin büyüklüğünün, bir diğer deyişle tünel üzerinde ne kadarlık bir alanda iyileştirme sağlayacağını, doğrudan enjeksiyon basıncına ve boruların arasındaki enine mesafeye bağlı olduğunu belirtmiştir. Şekil 2.19'da çalışma kapsamında oluşturulan *"umbrella arch"* sisteminin de modellendiği 3 boyutlu model ve Şekil 2.20'de *"umbrella arch"* sisteminin modellenmesi yer almaktadır.

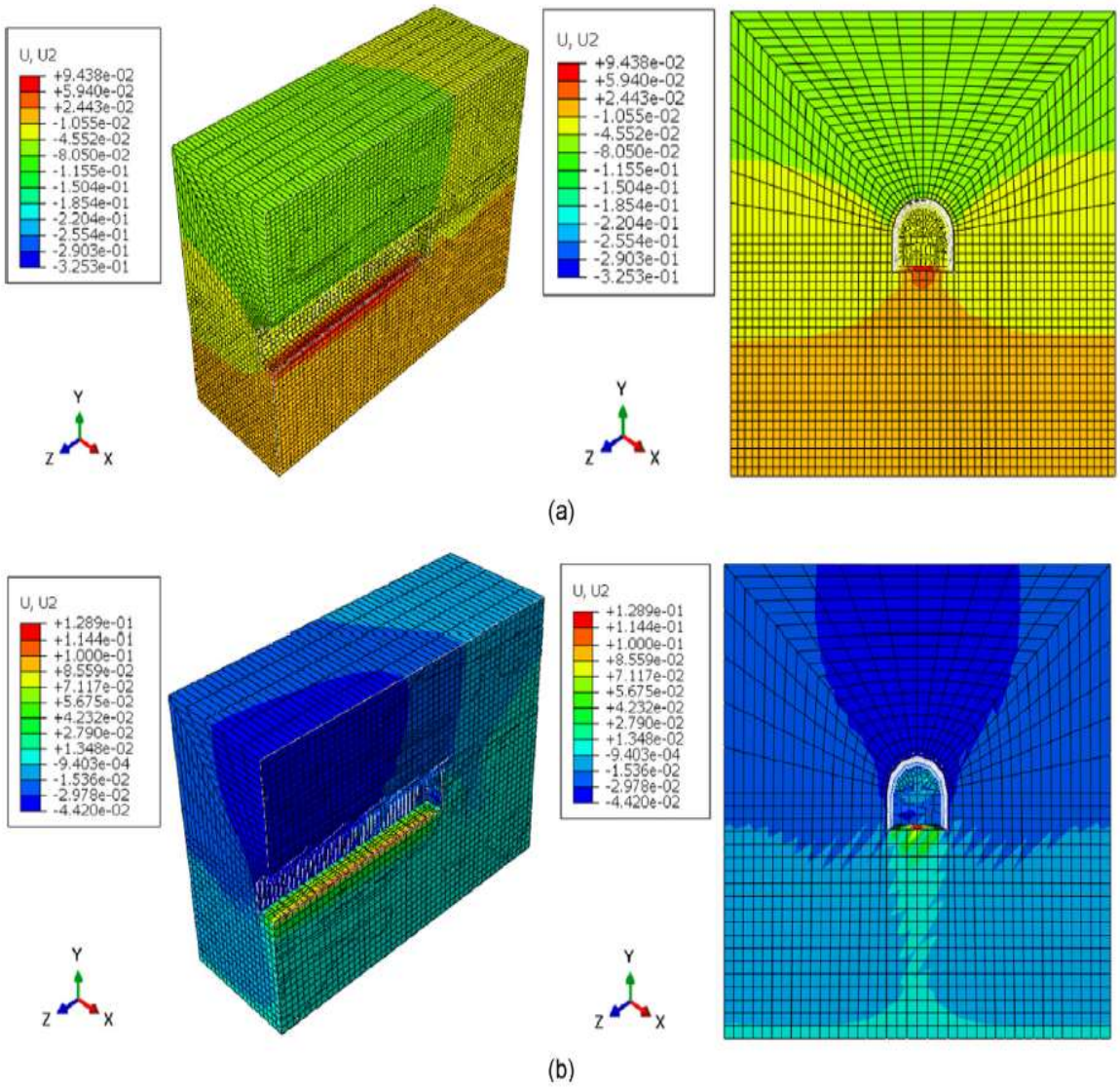


Şekil 2.19: *"Umbrella arch"* sisteminin yer aldığı 3 Boyutlu model (Morotvatdar, ve diğ., 2020).



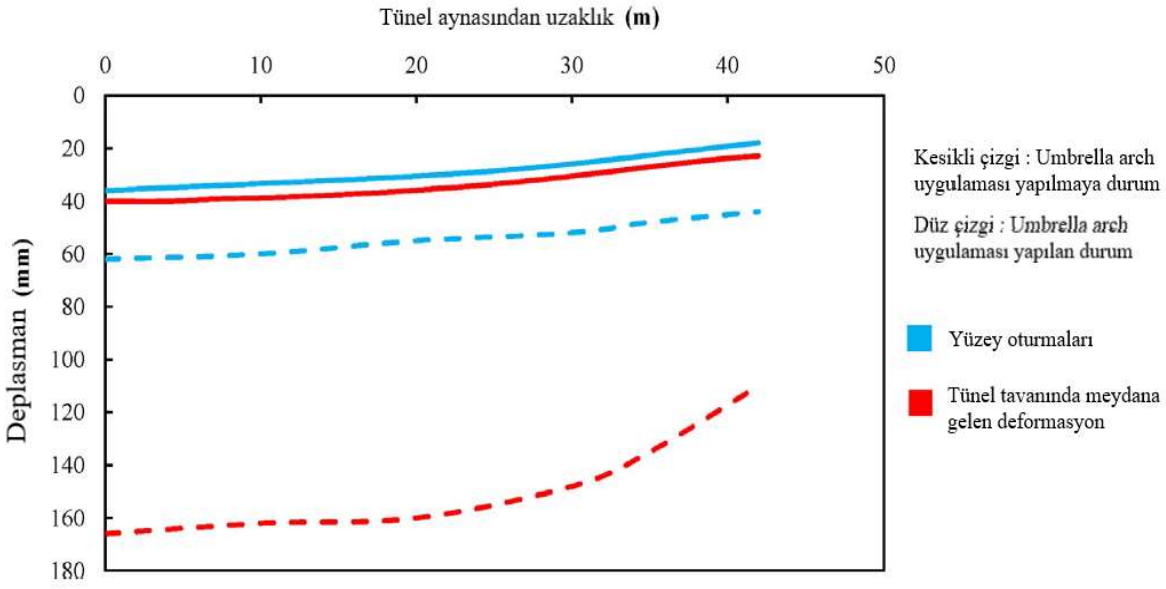
Şekil 2.20: 3 Boyutlu modelde *"umbrella arch"* sistemi kesiti (Morotvatdar, et al., 2020).

Araştırmacı çalışmasında ilk önce *"umbrella arch"* sisteminin modellenmediği modelin analizini gerçekleştirmiş ve sonrasında *"umbrella arch"* sistemini aktif ederek analizlerini tamamlamıştır. Daha sonra *"umbrella arch"* borularının, uzunluk, çap, bindirme boyu ve uygulama açısı değerlerinin değiştirildiği 16 farklı senaryo ile parametrik çalışmalar gerçekleştirmiş ve bu değerlerin değişiminin tünel kazısı sebebiyle oluşacak deformasyonlara olan etkilerini incelemiştir. Şekil 2.21'de *"umbrella arch"* sisteminin aktif olmadığı ve aktif olduğu analiz sonuçları yer almaktadır.



Şekil 2.21: *"Umbrella arch"* sisteminin aktif olmadığı (a) ve aktif olduğu (b) analiz çıktıları (Morotvatdar, ve diğ., 2020).

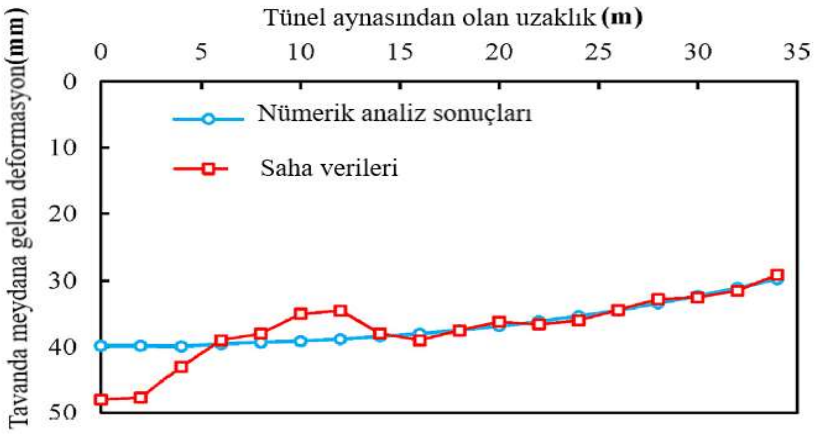
Çalışmada, yukarıda yer alan analiz sonuçlarına göre Şekil 2.22'de yer alan *"umbrella arch"* sistemi uygulanmayan ve *"umbrella arch"* sistemi uygulanan durumların karşılaştırıldığı, tünel tavan bölgesi deformasyonları ve tünel üzerinde meydana gelen yüzey oturmaları grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 2.22: *"Umbrella arch"* sisteminin uygulandığı ve uygulanmadığı durumlarda deformasyon karşılaştırması (Morotvatdar, ve diğ., 2020).

Grafik incelendiğinde, tünel tavanında ve yüzeyde meydana gelen deformasyonların maksimum değerlerine tünelin giriş bölgesinde (portal) ulaştığı gözükmektedir. *"Umbrella arch"* sisteminin varlığı grafiğe göre tünel tavanında meydana gelen 166 mm'lik deformasyonu 40 mm ile sınırlandırırken, meydana gelen 62 mm'lik yüzey oturmalarını ise 36 mm ile sınırlandırdığı gözükmektedir. Bir başka deyişle, çalışmaya göre, *"umbrella arch"* sisteminin varlığı tünel tavanında meydana gelen deplasmanları %76 oranında azaltırken, yüzey oturmalarının ise %42 oranında azalmasına sebep olduğu gözükmektedir.

Araştırmacı, 3 boyutlu modelin analizinden elde edilen verileri doğrulama amacı ile sahadan elde edilen ölçüm verileri ile analiz verilerini karşılaştırmıştır. Ancak sahada yüzey oturmalarına yönelik herhangi bir ölçüm yapılmamış olduğundan sadece tünel tavanında meydana gelen deformasyonlar karşılaştırılabilmiştir. Saha ölçümleri ile analizlerden elde edilen verilerin karşılaştırıldığı grafik Şekil 2.23'te yer almaktadır.



Şekil 2.23: Tünel tavanında meydana gelen deplasmanların saha verileri ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırması (Morotvatdar, ve diğ., 2020).

Şekil 2.23'te yer alan grafik incelendiğinde nümerik analiz sonuçlarının saha verileri ile uyum içerisinde olduğu gözükmektedir.

Araştırmacı model doğrulamasının ardından, *"umbrella arch"* sisteminde yer alan çelik boruların uzunluk, çap, bindirme boyu ve montaj açılarının değiştirilmesi ile 16 farklı senaryo oluşturmuş ve bu farklı senaryolar için de analizlerini gerçekleştirerek her bir değişkenin meydana gelen deplasmanlar üzerindeki etkisini incelemiştir. Her bir senaryoda kullanılan değiştirilmiş boru özellikleri Tablo 2.10'da yer almaktadır.

Tablo 2.10: Değiştirilmiş *"umbrella arch"* boru parametreleri (Morotvatdar, et al., 2020).

Senaryo No.	Uzunluk, L_p (m)	Çap, D_p (m)	Yatay aralık, S_T (cm)	Uygulama açısı, θ_L (°)
1	8	9	40	9
2	10			
3	12			
4	15			
5	6	12	40	9
6	9			
7	12			
8	15			
9	12	9	20	9
10			30	
11			40	
12			50	
13	12	9	40	3
14				6
15				9
16				12

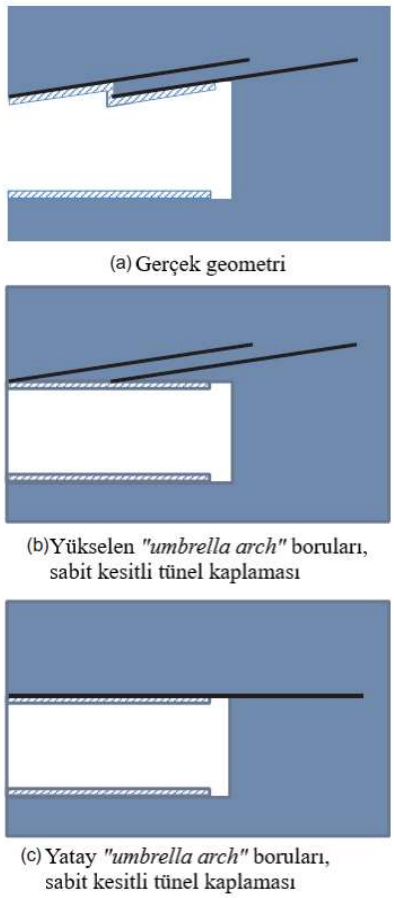
Araştırmacı Tablo 2.10'da yer alan *"umbrella arch"* borusuna ait değişkenler ile gerçekleştirdiği parametrik çalışma sonucunda, çalışmaya konu olan Kazvin-Raşt tüneli için optimum boru boyunun 12 m, boru çapının 12 cm, borular arası yatay mesafenin 30 cm ve uygulama açısının 6° olacağı sonucunda ulaşmıştır. Aynı zamanda optimum boru uzunluğunun tünel çapının 1.5 katı kadar ve optimum bindirme boyunun ise boru boyunun %25'i kadar olması gerektiğini belirtmiştir.

Yukarıda özetlenen, Morotvatdar ve diğ. (2020) yapmış olduğu çalışmadan da anlaşılacağı üzere *"umbrella arch"* uygulaması tünel çalışmaları nedeni ile yüzeyde meydana gelen oturmaları kontrol ederek kayda değer ölçülerde azaltmakta ve tünel tavanında meydana gelen deplasmanları sınırlayarak tünel stabilitesinin artmasını sağlamaktadır. Bunun dışında Morotvadar (Morotvatdar, ve diğ., 2020) kendisinden önceki çalışmalardan farklı olarak *"umbrella arch"* borularını, boruların etrafında oluşan iyileştirilmiş zemini ve boruların içerisine uygulanacak enjeksiyonun ayrı ayrı modellenebileceğini göstermiş ve bu sayede boru parametrelerinin tünel tavanında oluşan deplasmanlara ve yüzey oturmalarına etkilerini inceleyebilme fırsatı bulmuştur.

"Umbrella arch" yönteminin sayısal modellenmesinde bir başka basitleştirme de tünel kazı alanı geometrisi üzerine yapılmaktadır. Yukarıda yer alan bölümlerde de anlatıldığı gibi çelik borular, tünel üst yarısı üzerine açılı bir şekilde yerleştirildiğinden dolayı, boruların izdüşümü boyunca bir mesafede sürekli artan bir tünel kesiti bulunmaktadır. Bu durum modelde küçük boşluklar yaratmakta bu nedenle analizlerin yapılmasını zorlaştırmakta, söz konusu analizlerin oldukça uzun sürmesine neden olmakta ve hatta kimi zaman analizlerin çözüme ulaşmasını engellemektedir.

2.3.4 Klotoé ve Bourgeois (2019) Çalışması

Klotoé ve Bourgeois (2019) yapmış oldukları çalışmada, *"umbrella arch"* sisteminin gerçek geometrisinin karmaşıklığı nedeniyle modellenmesinin zor olduğundan ve sonlu elemanlar ağı oluşturulmasını zorlaştırdığından bahsederek, şimdiye kadar nispeten üzerinde daha az çalışma yapılmasının nedeninin, bu karmaşık geometri ile oluşturulan modellerin analizi için güçlü bilgisayarlar gerekmesi ve doğal olarak analiz maliyetlerinin artması olarak belirtmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma ile 3 boyutlu analizlerde, *"umbrella arch"* sistemi geometrisinde yapılacak basitleştirmelerin sonuçlara olan etkilerini ve uygulamanın yüzey oturmalarına olan etkilerini tartışmışlardır. Araştırmacılar literatürde yer alan çalışmalarda modellenen tünel geometrilerini Şekil 2.24'te yer aldığı gibi özetlemişlerdir.



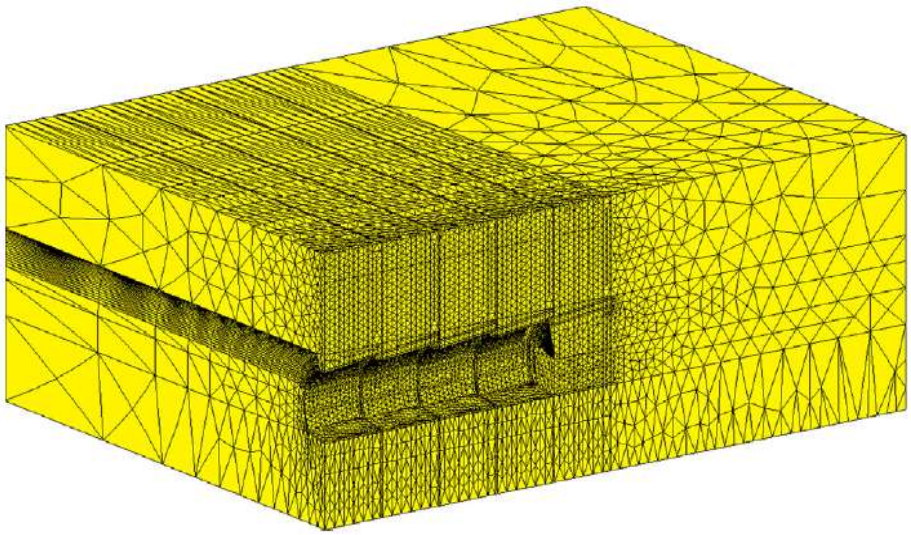
Şekil 2.24: 3 Boyutlu modellerde literatürde yer alan geometri kabulleri (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019).

Araştırmacılar çalışmalarında 3 boyutlu modellerinin analizlerini sonlu elemanlar yöntemi ile CESAR-LCPC yazılımı aracılığıyla gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca çalışmada, elde edilen sonuçlara göre Fransa'da bulunan Toulon tünelini de modelleyerek bir vaka analizi gerçekleştirmişlerdir.

Araştırmacılar ilk olarak, homojen bir zemin ortamında, yüzeyde bulunan yapı etkilerinin dikkate alınmadığı ve Oke ve diğ. (2014) çalışmasında *"çift sıra enjeksiyonlu umbrella arch"* olarak isimlendirilen sisteme sahip bir NATM tüneli modellemişlerdir. Oluşturulan bu modelde, geometri üzerinde herhangi bir basitleştirme yapılmamıştır. Araştırmacılar oluşturulan model geometrisi üzerinde kolayca değişiklik yapabilmek adına kendileri bir sonlu elemanlar ağ oluşturucusu geliştirmiş ve modellemelerinde bu ağ oluşturucuyu kullanmışlardır.

Oluşturulan model 70 m genişliğinde, 36 m derinliğindedir ve toplam yükseklik 91m'dir.

Modellenen tünelin en küçük kesitinde taç kısmı 4.5 m'lik, yan duvarlar ise 13.5 m'lik bir yarıçapa sahiptir ve toplam yükseklik 9.4 m'dir. Kazı adımı 1.5 m olarak belirlenen tünelde destek elemanları olarak, üst yarıda HEB 180, invert kısmında ise HEB 200 profil iksalar kullanılmıştır. Püskürtme beton kalınlığı üst yarıda 25 cm invertte ise 30 cm'dir. Bir kazı anosu 9 m olan tünelde, taç kısmında 18 m uzunluğunda ve 6 derece uygulama açısına sahip çift sıra olacak şekilde toplamda 76 adet *"umbrella arch"* borusu bulunmaktadır. Ayrıca tünel aynasında 18 m uzunluğunda 60 adet fiberglas zemin çivisi modellenmiştir. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 2.25'te yer almaktadır.



Şekil 2.25: 3 Boyutlu sonlu elemanlar modeli (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019).

Modelde kullanılan destek elemanlarına ait parametreler Tablo 2.11'de ve zemine ait parametreler Tablo 2.12'de yer almaktadır.

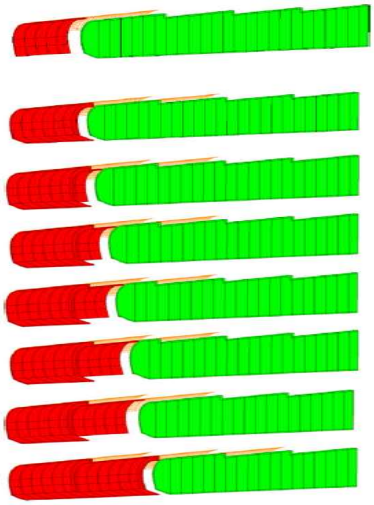
Tablo 2.11: Destek elemanlarına ait parametreler (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019).

Destek elemanı / Bölge	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı
İnvert (30cm püskürtme beton + HEB 220 profil)	20	
Kemer (25cm püskürtme beton + HEB 220 profil)	14	
Ayna zemin çivileri	40	
"Umbrella arch" boruları	210	0.2

Tablo 2.12: Modelde kullanılan zemin parametreleri (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019).

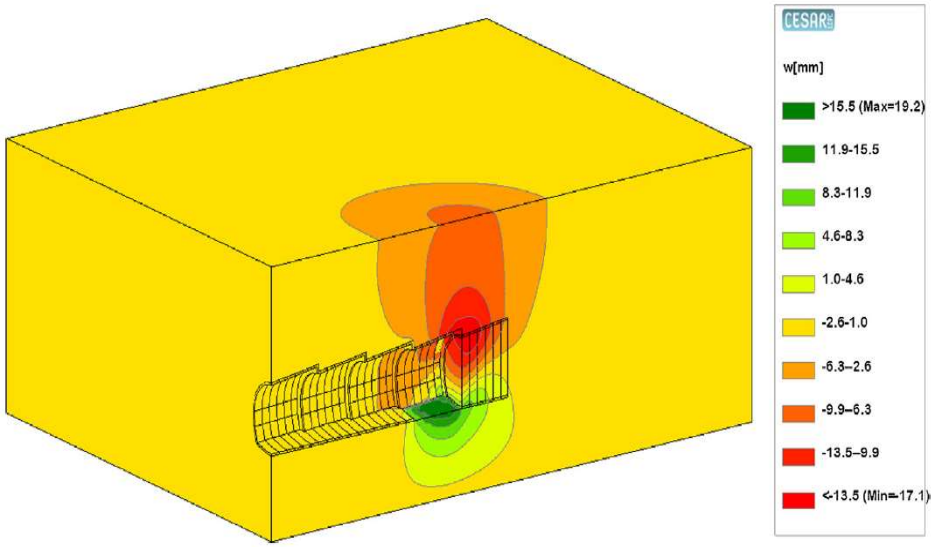
Katman	γ, kN/m3	E_{50}^{ref},mPa	E_{ur}^{ref},mPa	K_0	ψ, derece	φ', derece	c', kPa	ν_{ur}	m
1	20	40	120	0.577	0	25	40	0.3	0.5

Yukarıda da belirtildiği gibi her bir kazı anosu, 1.5m‘lik 6 adımdan oluşmaktadır. Adımlar sahada gerçek koşullarda gerçekleştiği gibi modellenmiştir. Önce *“umbrella arch”* boruları aktif edilmiş, daha sonra 1.5 m’lik kazı ile birlikte kemer bölgesinde bulunan tünel kaplaması (HEB 220 + 25 cm püskürtme beton) aktif edilmiştir. Her kazı anosu sonunda ise 9 m’lik invert kaplaması (HEB 220 + 30 cm) aktif edilmiştir. Bir diğer deyişle alt yarı-üst yarı takip mesafesi 9 m olarak kabul edilmiştir. Oluşturan 3 Boyutlu modelde inşaat aşamaları Şekil 2.26’da yer almaktadır.



Şekil 2.26: İnşaat aşamaları (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019).

Araştırmacılar, analizlerde daha güvenilir sonuçlar elde edilebilmesi için en az dört kazı anosunun modellenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Desteksiz durum için gerçekleştirilen analiz sonucunda Şekil 2.27’de yer alan sonuçlara ulaşılmıştır.



Şekil 2.27: Desteksiz durum için analiz sonuçları (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019).

Araştırmacılar sayısal modelin doğrulanması için oturma değerlerini literatürde yer alan ampirik yöntemlerden elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlar ve uyumluluk içerisinde olduklarını raporlamışlardır. Ancak öte yandan sayısal modelleme sonucunda elde edilen oturma alanı genişliği yaklaşık 13 m iken ampirik yöntemlerle bu değer 8.6 m olarak hesaplanmıştır. Çalışmalar sonucunda elde edilen maksimum oturma değerleri Tablo 2.13'te yer almaktadır.

Tablo 2.13: Maksimum oturuma değerleri (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019).

Destek sistemi	Maksimum oturma değeri (mm)
-	24.5
Sadece bulonlar	24.3
Sadece *"umbrella arch"*	22.5
"Umbrella arch" + ayna bulonları	22.5

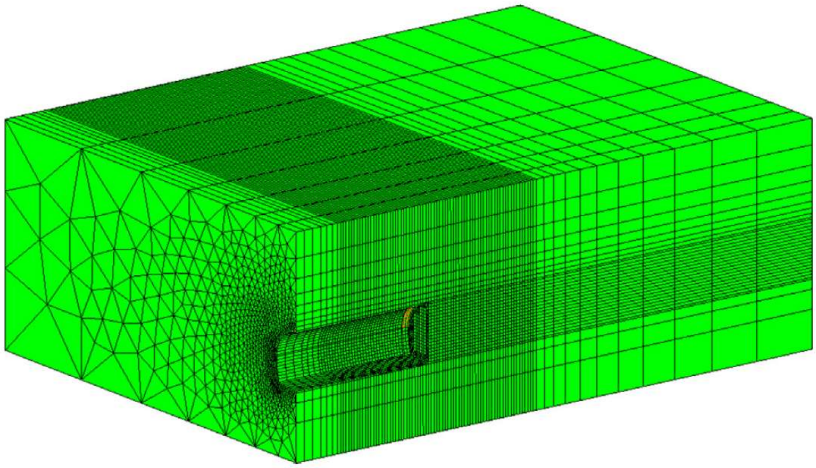
Tablo 2.13'te yer alan maksimum oturma değerlerine bakıldığında, *"umbrella arch"* sisteminin incelenen koşullarda, yüzey oturmalarını %7.4 oranında azalttığı ve yüzey oturmaları üzerinde kayda değer bir etkisinin bulunmadığı anlaşılmaktadır. Ayna bulonlarının ise yüzey oturmalarına hiçbir etkisinin olmadığı sonucuna varılmaktadır.

Araştırmacılar, Tablo 2.14'te yer alan daha düşük zemin parametreleri ile ikinci bir analiz gerçekleştirmişler ve bu analizler sonucunda da maksimum yüzey oturma değerini 38 mm olarak elde etmişlerdir. Bu durumda ise *"umbrella arch"* sisteminin oturmaları %9.3 oranında azalttığını ve dolayısı ile halihazırda mevcut yüzey oturmalarının çok düşük olduğu durumlarda (ilk durumdaki gibi) *"umbrella arch"* sisteminin efektif olmadığını, ancak daha yüksek yüzey oturması beklenen bölgelerde daha etkili olabileceğini raporlamışlardır.

Tablo 2.14: İkinci analiz için kullanılan zemin parametreleri (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019).

Katman	γ, kN/m3	E_{50}^{ref},mPa	E_{ur}^{ref},mPa	K_0	ψ, derece	φ', derece	c', kPa	ν_{ur}	m
1	20	30	90	0.577	0	25	30	0.3	0.5

Geometri basitleştirmesinin sonuçlara olan etkisinin anlaşılması amacı ile çalışmanın devamında, ikinci analizlerde kullanıla bütün parametreler sabit tutularak geometri basitleştirilmiş ve bir analiz daha gerçekleştirilmiştir. Bu analizde tünel geometrisi, sürekli artan bir kesit yerine Şekil 2.24 (c) 'te yer aldığı gibi yatay *"umbrella arch"* boruları ve sabit kesitli olarak modellenmiştir. Basitleştirilmiş geometri ile oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 2.28'de yer almaktadır.



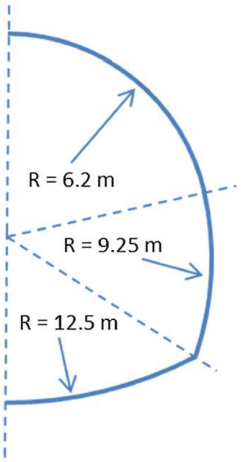
Şekil 2.28: Basitleştirilmiş geometri ile sonlu elemanlar modeli (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019).

Basitleştirilmiş geometri ile gerçekleştirilen analizler sonucunda desteksiz durum için maksimum oturma değeri 23.9 mm olarak elde edilmiştir. Tablo 2.13'te yer aldığı gibi bu değer, gerçek geometri ile oluşturulan modelde 24.5 mm olarak elde edilmiştir. Aynı analizler *"umbrella arch"* destek sistemi ile gerçekleştirildiğinde ise 21.7 mm maksimum oturma değeri elde edilmiştir. Bu değer ise gerçek geometri ile oluşturulan modelde 22.5 mm olarak elde edilmiştir.

Yukarıda yer alan sonuçlar incelendiğinde, hem gerçek tünel geometrisinin kullanıldığı analizlerde hem de basitleştirilmiş tünel geometrisinin kullanıldığı analizlerde maksimum yüzey oturması değerleri birbirlerine aradaki farklar ihmal edilebilecek derecede yakın bulunmuş ve her iki durum için de *"umbrella arch"* sisteminin maksimum yüzey oturmalarını % 9 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Dolayısı ile araştırmacılar, yukarıda elde edilen sonuçlar neticesinde basitleştirilmiş tünel geometrisinin analizlerde kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

Yukarıda bahsedilen sonuçlara ulaşan araştırmacılar, çalışmanın devamında, ulaşılan sonuçları değerlendirmek bir vaka analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, daha önce Janin ve diğ. (2015) tarafından incelenen, Fransa'da bulunan Güney Toulon Tüneli modellenmiştir.

Güney Toulon tüneli yerleşim bölgesinde bulunan 120 m²'lik kesit alanına sahip sığ bir karayolu tünelidir. Tünel yüksekliği 11.2 m ve genişliği 12.7 m'dir. Toulon tüneli geometrisi Şekil 2.29'da yer almaktadır.



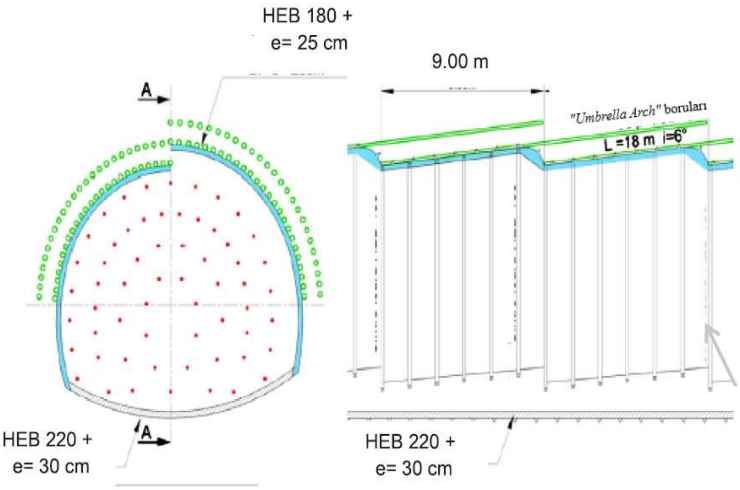
Şekil 2.29: Toulon Tüneli geometrisi (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019).

Modelde, Toulon Tüneli'nin geçtiği bölgeye ait zemin parametreleri, Janin ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmalarda kabul edildiği gibi değiştirilmeden kullanılmıştır. Modelde kullanılan zemin parametreleri Tablo 2.15'te yer almaktadır.

Toulon Tüneli'nde kazı adımı 1.5 m olup, tünel destek sistemi olarak; üst yarıda 20 cm kalınlığında püskürtme beton ve HEB 180 profil iksa, invertte 30 cm kalınlığında püskürtme beton ve HEB 220 profil iksa, 18 m uzunluğunda ayna bulonları ve 18 m uzunluğunda 6 derecelik uygulama açısına sahip *"umbrella arch"* sistemi kullanılmıştır. Kazı-destek sistemi kesit ve profil gösterimi Şekil 2.30'da yer almaktadır.

Tablo 2.15: Zemin parametreleri (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019).

Katman	γ, kN/m3	E_{50}^{ref} mPa	K_0	ψ, derece	φ', derece	c' kPa	ν_{ur}
Dolgu	19	1.6	1	0	20	2	0.2
Kolüvyon	20.8	40	1	0	30	10	0.2
Anakaya	24.2	240	1	0	25	40	0.2



Şekil 2.30: Toulon Tüneli kazı-destek sistemi (Hounyevou Klotoé & Bourgeois, 2019)

Gerçekleştirilen analizler sonucunda araştırmacılar, elde ettiklerin sonuçların Janin ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmada ulaşılan sonuçlarla oldukça uyum içinde olduğunu bildirmişlerdir. Ancak *"umbrella arch"* sisteminin desteksiz duruma göre yüzey oturmalarını sadece %3 oranında azalttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Araştırmacılar sonuç olarak, literatürde yer alan çalışmaları da göz önüne alarak *"umbrella arch"* sisteminin yüzey oturmalarına etkilerinin oldukça geniş bir aralıkta değişkenlik gösterdiğini ve kendi çalışma koşullarında yüzey oturmalarına çok da etkili olamadığını belirtmişlerdir. Ancak araştırmacılar bu sonucun nedenini, Oke ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışmadan yola çıkarak, *"umbrella arch"* metodunun belirli bir seviyenin üzerinde meydana gelen yüzey oturmaları için etkili olabileceği, bir başka deyişle inceledikleri Toulon tünelinde halihazırda mevcut oturmaların çok düşük miktarlarda olması ve bu nedenle *"umbrella arch"* yönteminin etkili olmamış olabileceği olarak açıklamışlardır.

Ülkemizde de özellikle son 15 yılda artan metro çalışmaları, araştırmacıları bu konuya yönlendirmiş ve özellikle kentsel alanlarda açılan metro tünelleri, *"umbrella arch"* yönteminin ve yüzey oturmalarının incelenmesine olanak sağlamıştır.

Ocak (2008) çalışmasında İstanbul'da bulunan Yenikapı-Taksim arası metro tünellerini incelemiştir. Çalışmada herhangi bir sayısal modelleme yapılmamış ve ampirik yöntemlerle tünel kazılarının sebep olduğu yüzey oturmaları incelenmiştir. Ayrıca aynı zemin koşulları

altında, aynı geometrik özelliklere sahip tünellerin, belirli bir uzunluğunun *"umbrella arch"* metodu kullanılarak ve diğer kısımların da *"umbrella arch"* yöntemi kullanılmadan açılması ve sahada düzenli ölçüm yapılması, metodun yüzey oturmalarına etkisinin incelenmesine olanak sağlamıştır. Yapılan çalışma sonucunda, *"umbrella arch"* yöntemi uygulanarak açılan bölgede, yöntemin uygulanmadığı bölgeye oranla üç kat daha az oturma gözlendiği belirtilmiştir.

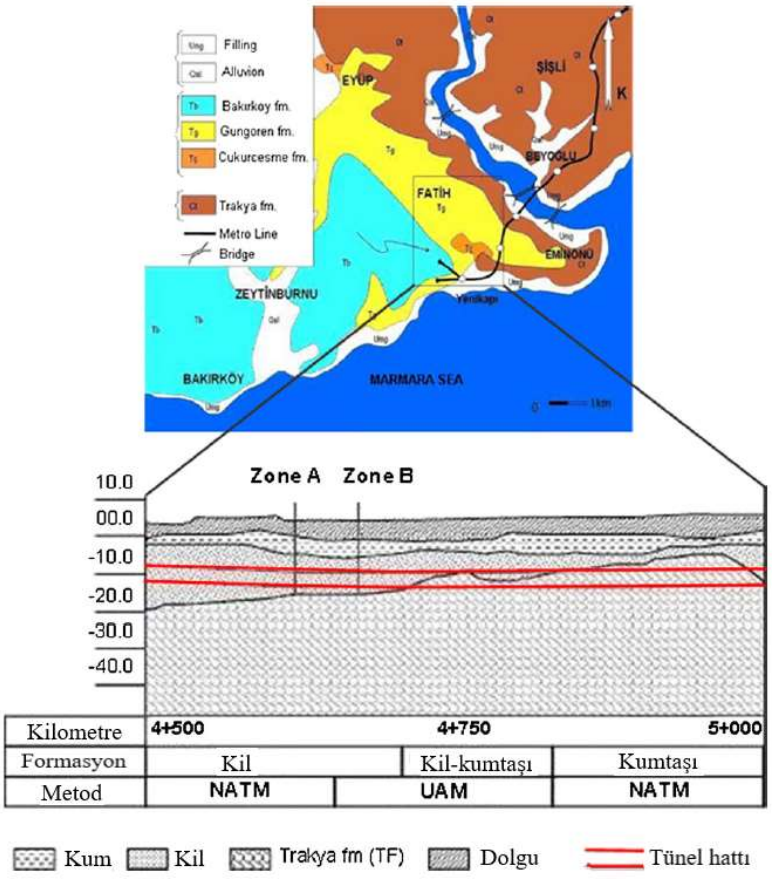
2.3.5 Yaşıtlı (2013) Çalışması

Yaşıtlı da (2013) aynı tüneller üzerinde yapmış olduğu çalışmada, *"umbrella arch"* yöntemi kullanılan ve kullanılmayan kesitlerin neden olduğu yüzey oturmalarını sayısal modelleme ile incelemiştir.

Çalışma kapsamında incelenen tüneller, günümüzde Hacıosman – Yenikapı hattının bir parçası olan Taksim – Yenikapı arasında bulunmaktadır. Hat uzunluğu 5.2 km'dir.

Zorlu zemin koşulları ile karşılaşılan bölgelerde yüzey oturmalarının önüne geçmek amacı ile projede ilk başlarda var olmayan *"umbrella arch"* sistemi kullanılması tercih edilmiştir. Özellikle hattın Yenikapı bölgesinde yer alan ve killi ortamda açılacak olan tünellerin imalatı sırasında *"umbrella arch"* ile birlikte tünel kazı aynasına zemin çivisi uygulamaları da gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada bölgenin jeolojik özelliklerini belirlemek amacı ile saha ve laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Tünellerin geçtiği bölgeye ait jeolojik profil Şekil 2.31'de ve idealize zemin profili ve zemin birimlerine ait geoteknik parametreler Tablo 2.16'da yer almaktadır.

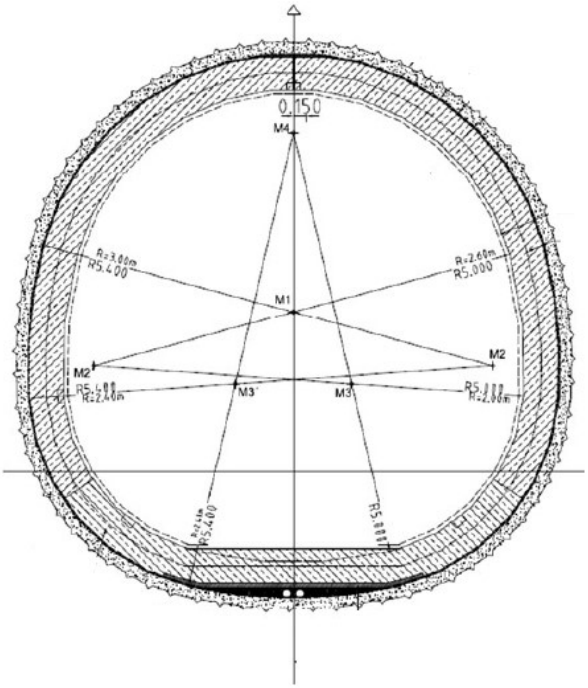


Şekil 2.31: Metro güzergahı ve jeolojik plan-profil. (Yaşıtlı, 2013)

Tablo 2.16: Tüneller etrafında bulunan bölgeye geoteknik parametreler (Ocak, 2008).

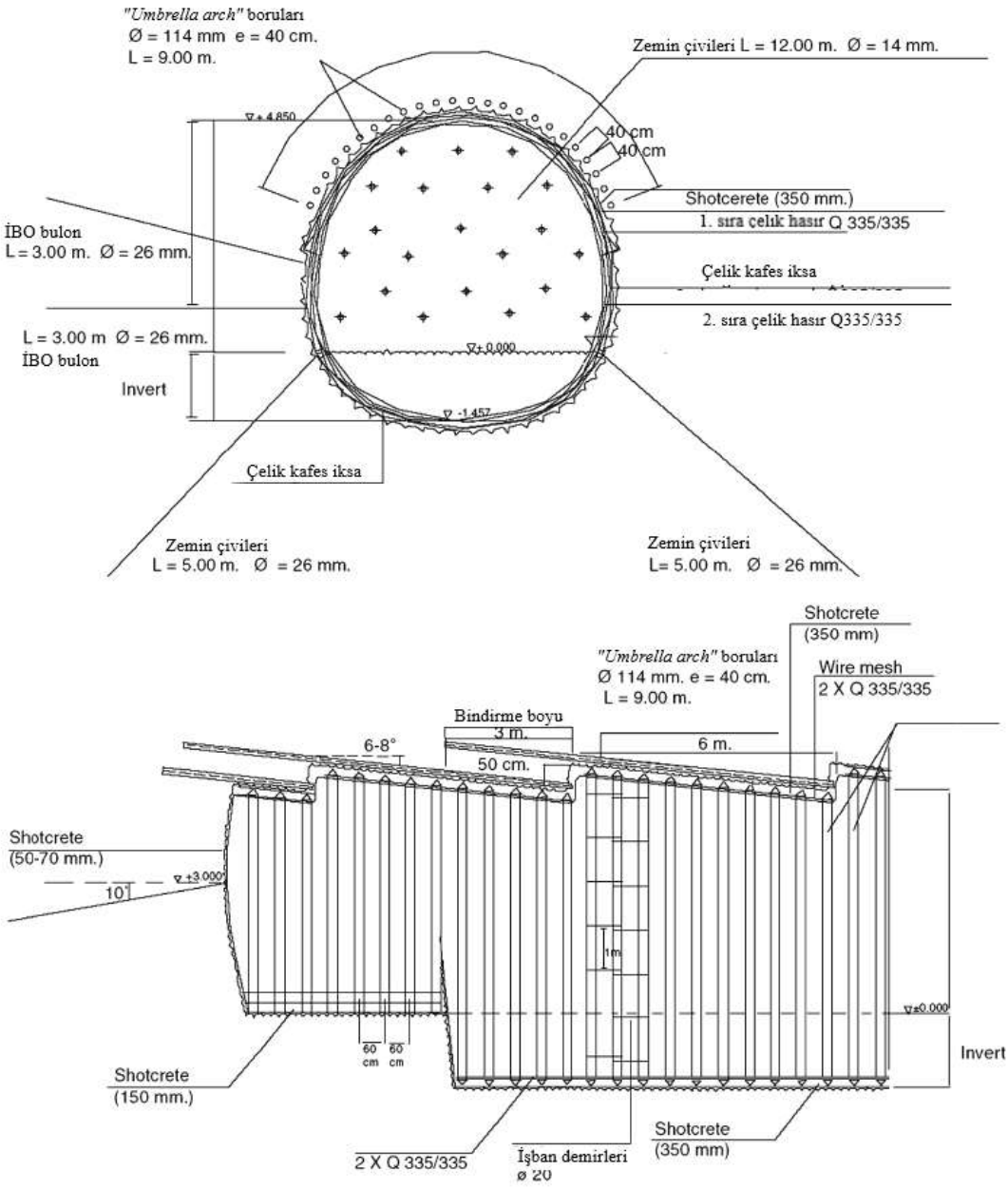
Katman	γ , kN/m3	E , kPa	c', kPa	ν	φ' , derece
Dolgu	18	5000	1	0.4	10
Kum	17	15000	1	0.35	25
Güngören formasyonu	18.9	38000	20	0.33	14
Trakya formasyonu	25	60000	80	0.2	25

Çalışma kapsamında incelenen tüneller toplamda 36 m²'lik bir kesit alanına sahiptir. Tünellerde alt yarı ve üst yarı arasındaki takip mesafesi 2.4 m'dir. Tüneller üzerindeki örtü kalınlığı 11 ila 42 m arasında değişiklik göstermekte ve iki tüp arasındaki mesafe de 30 -32 m arasındadır. İncelenen tünel geometrisi Şekil 2.32'de yer almaktadır.



Şekil 2.32: Tünel geometrisi (Ocak, 2008).

Çalışmada incelenen tünellerin geçeceği zeminin özelliklerine göre ilk olarak belirlenen destek sistemi, 25-35 cm kalınlığında püskürtme beton, 7/8 düzeninde imal edilen 9 m uzunluğunda kaya bulonları ve 12 m uzunluğundaki ayna çivilerinden oluşmaktadır. Yenikapı – Unkapanı güzergahında devam eden çalışmalarda tünel içi deformasyonlarının fazla olması ve yüzey oturmalarının beklenen değerlerin üzerinde olması sebebiyle *"umbrella arch"* metodunun uygulanması kararı alınmıştır. 9 m uzunluğunda 24 adet *"umbrella arch"* borusu, aralarında 30-40cm olacak şekilde 6 derecelik açıyla uygulanmıştır. Deformasyonların artışıyla uygulanmasına karar verilen kazı-destek sistemi Şekil 2.33'de yer almaktadır.



Şekil 2.33: Deformasyon sonrası kullanılan kazı-destek sistemi (Ocak, 2008).

Çalışma kapsamında incelenecek tüneller 3 boyutlu olarak modellenmiş ve FLAC 3D yazılımı ile sonlu farklar analizleri yapılmıştır. Modelleme aşamaları araştırmacı tarafından aşağıdaki şekilde sıralanmıştır:

A. Sınırların ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi.
B. Model geometrisinin oluşturulması, sonlu farklar ağı oluşturulması ve model davranışının belirlenmesi.

C. Sınır ve başlangıç koşullarının belirlenmesi ve programın ilk kez çalıştırılması.
D. Modelin değerlendirilmesi ve modifikasyonların yapılması.
E. Nihai sonuçların elde edilmesi.

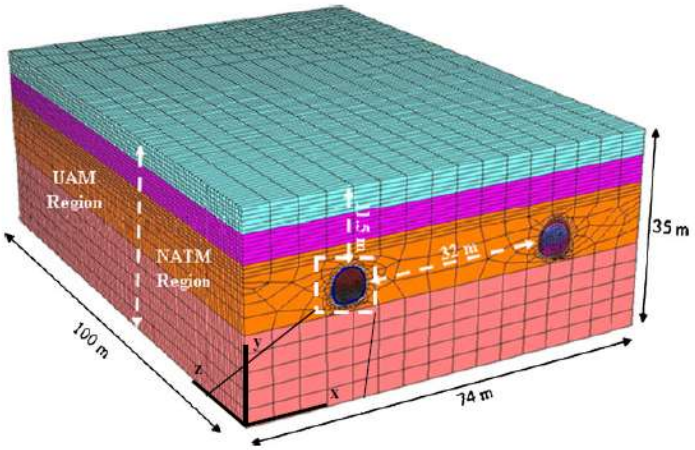
Çalışmada model boyutları 74 m x 35 m x 100 m olarak belirlenmiştir. Tünelin toplam uzunluğu 2611 m olmasına rağmen analiz süresi de düşünülerek en kritik 100 m'nin modellendiği görülmektedir. Modelde tüneller arası mesafenin 32 m, ortalama örtü kalınlığının 11.5 ve yüzeyde bulunan bina ve trafik yükünün de 100 kPa olarak kabul edildiği belirtilmiştir.

Çalışmada, püskürtme betonun kabuk eleman olarak iki aşamada modellendiği bildirilmiş ve bu iki aşama:

1- Tünel yüzeyine 5cm kalınlığında ilk püskürtme beton tabakası
2- 30 cm kalınlığında ikinci kat püskürtme beton tabakası

Şeklinde açıklanmıştır.

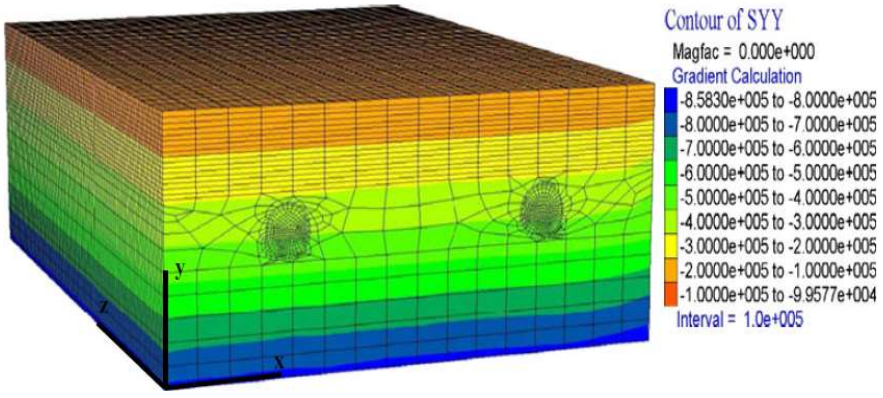
Modelde, kaya bulonları, zemin çivileri ve *"umbrella arch"* boruları kablo elemanlar olarak modellenmiştir. Toplam 8 adet kaya bulonu, 24 zemin çivisi ve 24 adet *"umbrella arch"* borusu modele eklenmiştir. Modelde, saha ortamında gerçekleştiği gibi önce *"umbrella arch"* uygulamasının yapılmadığı kısım ve daha sonra deformasyonların artmasıyla uygulanmasına karar verilen *"umbrella arch"* sistemli kısım arka arkaya modellenmiştir. Dolayısı ile önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışma ile *"umbrella arch"* sisteminin etkinliği tek model üzerinde tartışılmıştır. Oluşturulan 3 boyutlu sayısal model Şekil 2.34'te yer almaktadır.



Şekil 2.34: 3 Boyutlu sayısal model (Yaşıtlı, 2013).

Çalışmada, *"umbrella arch"* sistemi, herhangi bir basitleştirme yapılmadan, geometri ve kazı kesiti olduğu gibi kabul edilerek ve *"umbrella arch"* sistemi için iyileştirilmiş bölge tanımlanmadan, doğrudan çelik borular ve içerisine uygulanan enjeksiyonlar ayrı ayrı modellenmiştir.

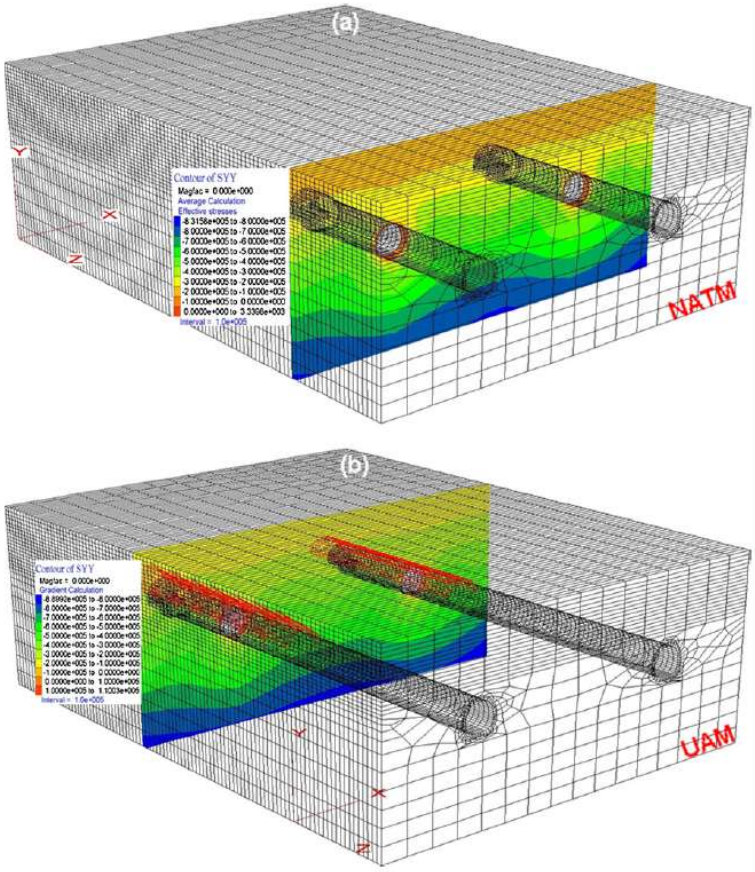
Çalışmada, analizlerin başında, herhangi bir tünel kazısı yapılmadan model çalıştırılmış ve ilk yerinde gerilmeler elde edilmiştir (Şekil 2.35). Daha sonra her yönde deplasmanlar sıfırlanmış ve inşaat aşamalarının modellenmesine geçilmiştir.



Şekil 2.35: Başlangıç koşulu gerilmeleri (Yaşıtlı, 2013).

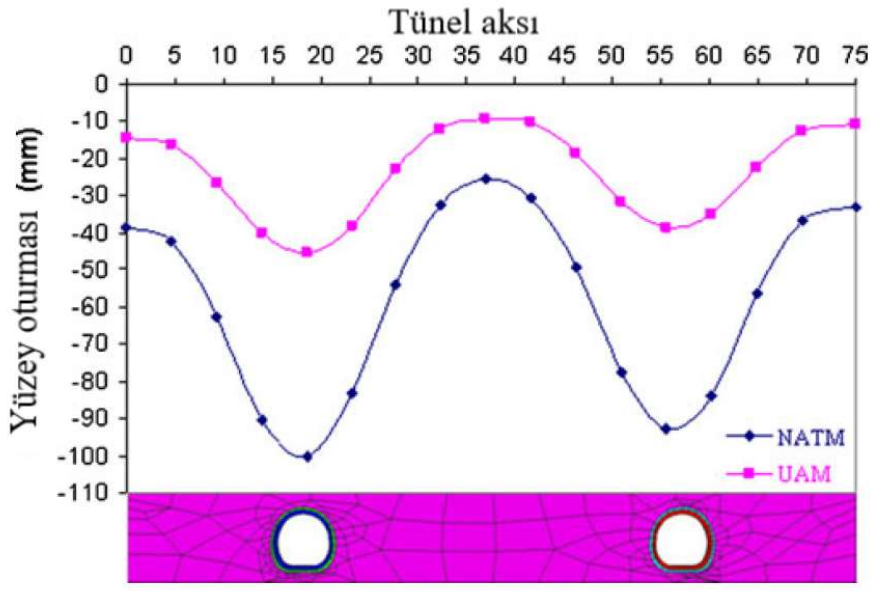
Çalışmada, sahada uygulanan her bir adım olduğu gibi ayrı ayrı modellenmiştir. *"Umbrella arch"* yönteminin kullanılmadığı bölümler için, önce tünel yüzü kazılmış ve ardından püskürtme beton imalatı, kaya bulonu ve zemin çivisi imalatları modellenmiştir. Araştırmacı tarafından *"UAM"* olarak adlandırılan *"umbrella arch"* yönteminin kullanıldığı bölgelerde ise yukarıdaki adımlara ek olarak *"umbrella arch"* boruları eklenmiştir. Modelde kazı adımı 1m olarak belirlenmiştir.

Analizler sonucunda düşey gerilme dağılımları Şekil 2.36'da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Şekil 2.36 incelendiğinde sol tüp üzerindeki düşey gerilme *"umbrella arch"* sistemi kullanılmayan bölgede 0.25 MPa, *"umbrella arch"* sisteminin kullanıldığı bölgede ise 0.30 MPa olarak görülmektedir. Araştırmacı tarafından aradaki farkı nedeni, *"umbrella arch"* sisteminin uygulandığı bölgeye ekstra bir mukavemet kazandırması olarak açıklanmıştır.



Şekil 2.36: Düşey gerilme dağılımı (Yaşıtlı, 2013).

Analiz sonuçlarından elde edilen veriler ile Şekil 2.37'de yer alan yüzey oturmaları profili oluşturulmuştur. Yüzey oturmaları profili incelendiğinde, yüzey oturmalarının beklenildiği gibi maksimum değerlerine tünellerin üst bölgelerinde ulaşmıştır. Minimum yüzey oturması değerleri ise iki tünel arasında kalan bölgede okunmaktadır. Oluşturulan yüzey oturması profili, *"umbrella arch"* sistemi uygulanan bölgede uygulanmayan bölgeye oranla çok daha az yüzey oturması meydana geldiğini ve dolayısıyla *"umbrella arch"* sisteminin yüzey oturmaları üzerinde oldukça olumlu bir etkiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 2.37: Nümerik analiz sonucu elde edilen yüzey oturması profili (Yaşıtlı, 2013).

Araştırmacı, çalışmanın devamında modelinin doğruluğunu incelemek amacıyla analizlerden elde ettiği sonuçları saha ölçümleri ile doğrulamıştır. Araştırmacı *"umbrella arch"* sistemi uygulanmayan ve uygulanan bölgeler için saha verileri ile analiz sonuçlarından elde edilen yüzey oturma değerlerini karşılaştırdığında, sonuçlarının doğruluk oranlarını sırasıyla, %86 ve %79,5 olarak hesaplamıştır. Bir başka hesaplama ile de sahadan elde edilen verilere göre *"umbrella arch"* sisteminin yüzey oturmalarını %71 oranında azalttığı, bu değerin sayısal modelde %63 olduğu sonucuna ulaşmıştır. Tüm elde edilen bu sonuçlara göre ise analizlerin doğru sonuçlar verdiği, gerçek saha ölçümleri ile analizlerden elde edilen değerler arasındaki farkların ihmal edilebilecek düzeyde olduğu belirtilmiştir. Analiz sonuçları ile saha ölçüm değerlerinin karşılaştırılması Tablo 2.17'de yer almaktadır.

Tablo 2.17: Yüzey oturma değerlerinin analiz sonuçları ile karşılaştırılması (Yaşıtlı, 2013).

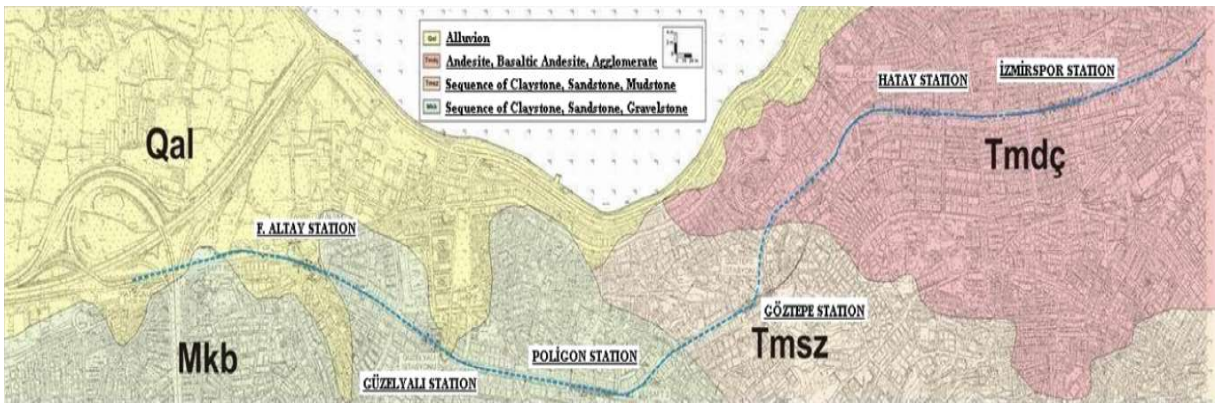
Maksimum Yüzey Oturması (mm)			Maksimum Yüzey Oturması (mm)		
NATM			UAM		
Saha ölçümü	Analiz sonucu	Doğruluk oranı	Saha ölçümü	Analiz sonucu	Doğruluk oranı
138	109.7	79.5%	40	45.6	86.0%

Yukarıda özetlenen çalışmada (Yaşıtlı, 2013) görülebileceği üzere, *"umbrella arch"* yönteminin uygulandığı ve uygulanmadığı bölgeler için tüneller üzerine etkiyen düşey gerilmeler incelendiğinde, *"umbrella arch"* yöntemi uygulanan tünellerde %20 daha fazla gerilme görülmüştür. Buradan da *"umbrella arch"* yönteminin uygulandığı bölgede güçlendirilmiş bir zemin/kaya bölgesi oluşturduğu ve zemin/kayaya ekstra mukavemet kazandırdığı sonucuna varılmıştır. Dolayısı ile Yaşıtlı'nın (2013) çalışması da yukarıdaki çalışmalar gibi, açık bir şekilde *"umbrella arch"* yöntemi uygulanan tünellerin yüzeyde daha az oturmaya sebep olduğunu göstermektedir.

2.3.6 Aksoy ve Onargan (2010) Çalışması

Ülkemizde yapılan bir başka çalışmada ise Aksoy ve Onargan (2010) İzmir Metrosu'nun ikinci etabı kapsamında inşa edilen Poligon bölgesinde bulunan tünelleri incelemişlerdir. Zayıf-çok zayıf kaya birimi içerisinde inşa edilen tünellerde *"umbrella arch"* yönteminin ve ayna bulonlarının yüzey oturmalarına olan etkileri incelenmiştir.

Tünellerin geçtiği bölge zayıf-çok zayıf kaya birimi olarak tanımlanmıştır. Kaya parametrelerinin belirlenmesinde, tünellerin geçtiği bölgede daha önceden yapılmış olan sondaj çalışmaları, saha deneyleri ve laboratuvar deneylerinden yararlanılmıştır. Tünel güzergahının geçtiği bölgeye ait jeolojik harita Şekil 2.38'de ve sayısal modellerde kullanılan, kayaya ait geomekanik parametreler Tablo 2.18'de yer almaktadır.



Şekil 2.38: Jeolojik harita (Aksoy & Onargan, 2010).

Tablo 2.18: Kaya birimlerin mekanik özellikleri (Aksoy & Onargan, 2010).

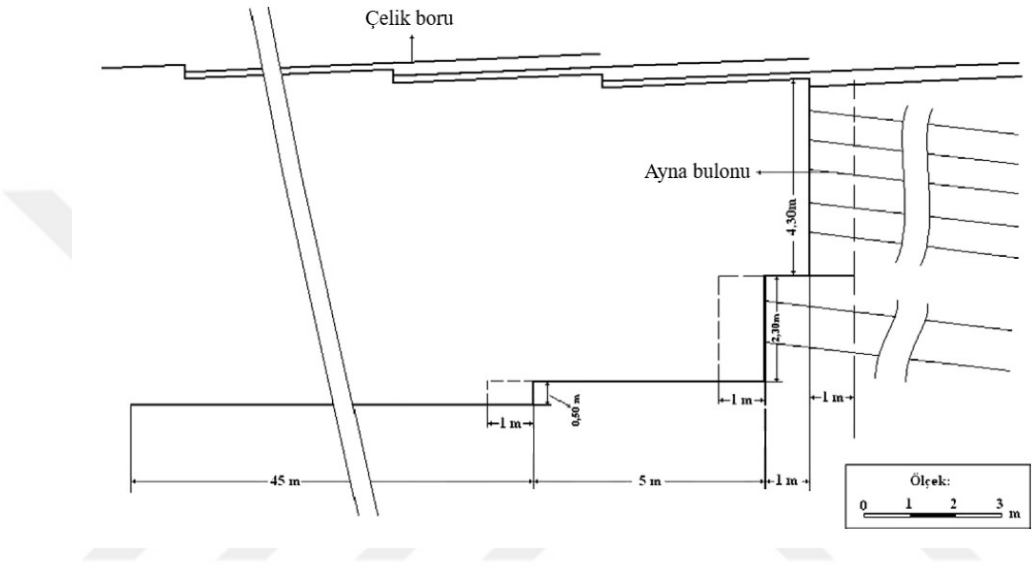
Parametre	Alüvyon	Sarımsı kahverengi filiş	Grimsi siyah filiş
γunsat, kN/m^3	20	26.3	26.8
γsat, kN/m^3	20	26.3	26.8
Eref, kN/m2	90000	49000	1210000
Poisson oranı, ν	0.35	0.3	0.27
Kohezyon, c (kN/m^2)	130	180	320
İçsel sürtünme açısı, φ (°)	12	16	19

Çalışma kapsamında incelenen tünellerin bulunduğu bölge eski binaların çokça olduğu, yoğun bir yerleşim alanıdır. Bu sebeple, yüzeyde meydana gelebilecek herhangi bir deplasman, doğrudan binalarda hasara sebep olacaktır. Hasarların önüne geçebilmek amacı ile tünellerin oluşturduğu etki, proje süresince düzenli olarak incelenmiştir. Tünel içerisinde her 5 m'de bir ve yüzeyde ,se her 20 m'de bir ölçümler alınmıştır.

Tünellerin üzerinden de şehrin en yoğun trafik akışının bulunduğu Hatay Caddesi'nin geçtiği düşünülerek, kazı-destek sisteminin oldukça rijit ve güvenlikli olmasına karar verilmiştir. Tünellerde kaya bulonları, çelik iksalar ve püskürtme beton dışında deplasmanları en aza indirebilme amacı ile ayna bulonu ve *"umbrella arch"* uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Projede, kazı adımı 1m olarak belirlenmiştir. Yanlarda sistematik olarak kaya bulonu imalatları yapılmış, 30 cm püskürtme beton uygulanmış ve 2 sıra çelik hasır kullanılmıştır. Tünelin üst

kısmında *"umbrella arch"* yöntemi uygulanmıştır. "*Umbrella arch"* sistemi 26 adet 9 m uzunluğunda 4.5 m bindirmeli çelik borulardan oluşmaktadır. Ayrıca ayna stabiletisini sağlamak amacı ile de aynaya, 6 m bindirmeli olacak şekilde 12 adet kaya bulonu uygulaması gerçekleştirilmiştir. Kazı destek sistemi kesiti ve inşaat aşamaları Şekil 2.39'da yer almaktadır.



Şekil 2.39: Tünel kazı-destek sistemi kesiti ve inşaat aşamaları (Aksoy & Onargan, 2010).

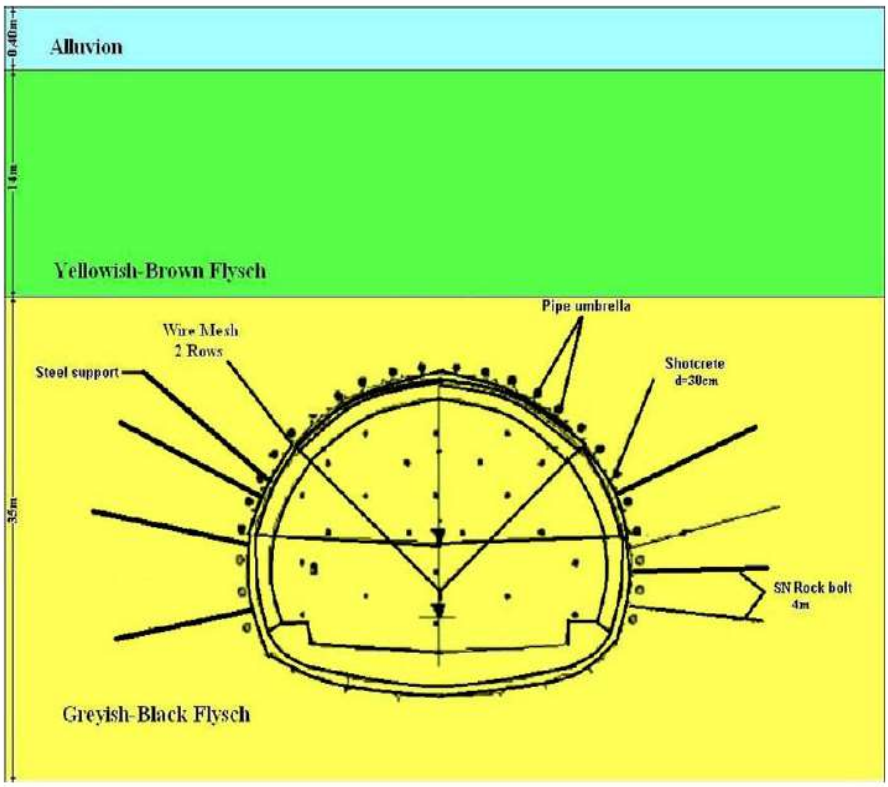
Çalışmada kullanılan kazı-destek sistemi elemanlarının dayanım özellikleri Tablo 2.19'da yer almaktadır.

Tablo 2.19: Tünel kazı-destek sisteminde kullanılan yapısal elemanların dayanım özellikleri (Aksoy & Onargan, 2010).

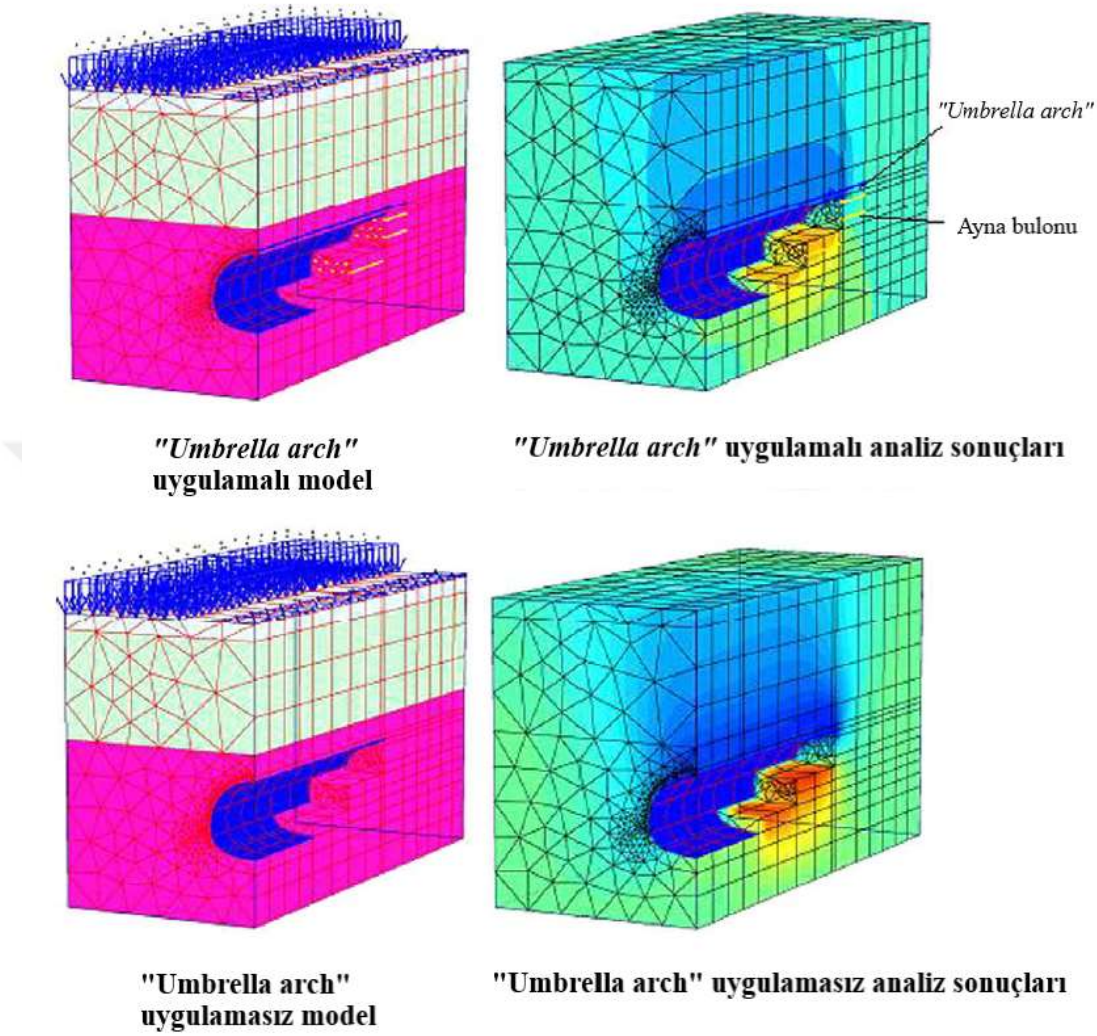
Yapısal eleman	EA (kN/m)	EI (kNm^2/m)	ν
Püskürtme beton	7.39E+06	5.55E+04	0.1
Çelik boru	2.69E+07	8.95E+04	0.12
Kaya bulonu	2.00E+05	-	-
Ayna bulonu	9.55E+04	-	-

Çalışma kapsamında incelenen tünel Plaxis 3D programı ile modellenmiştir. Kazı aşamaları ve kazı-destek sistemleri sahada uygulandığı şekliyle modele aktarılmıştır. Oluşturulan sayısal

model Şekil 2.40'ta yer almaktadır. Analizler sonucunda elde edilen tünel içi deplasman ve yüzey oturmaları değerleri saha verileri ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra araştırmacılar, *"umbrella arch"* yönteminin ve ayna bulonlarının yüzey oturmalarını tayin etmek amacı ile aynı modelleri, *"umbrella arch"* borularını ve ayna bulonlarını deaktif ederek ikinci bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Her iki durum için de oluşturulan 3 boyutlu sayısal modeller ve analiz sonuçları Şekil 2.41'de yer almaktadır.

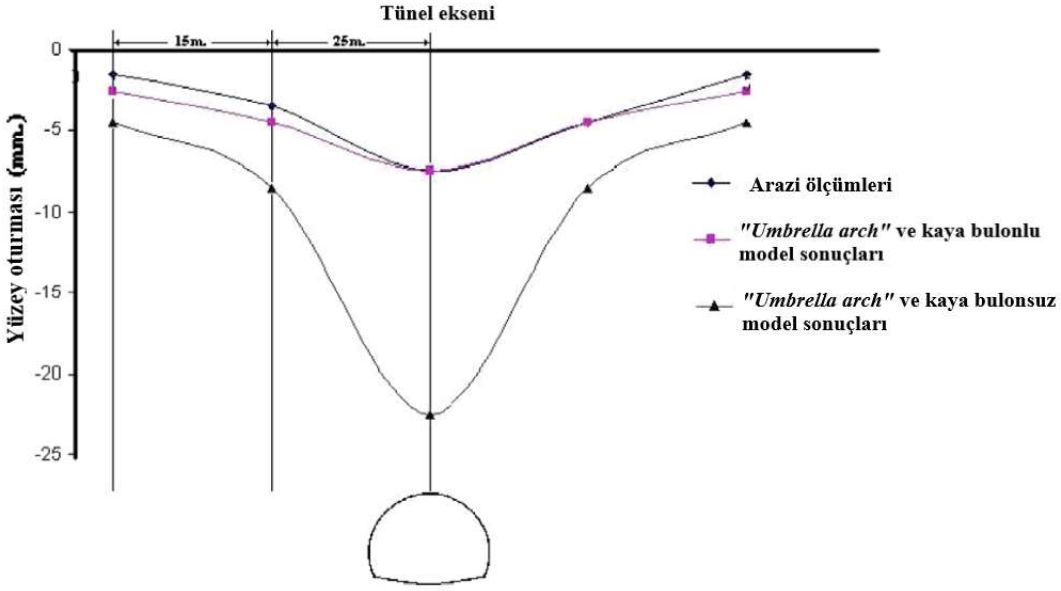


Şekil 2.40: Kazı-destek sistemi kesiti, sayısal model görüntüsü (Aksoy, 2008) (Aksoy, 2009) (Aksoy, ve diğ., 2010)

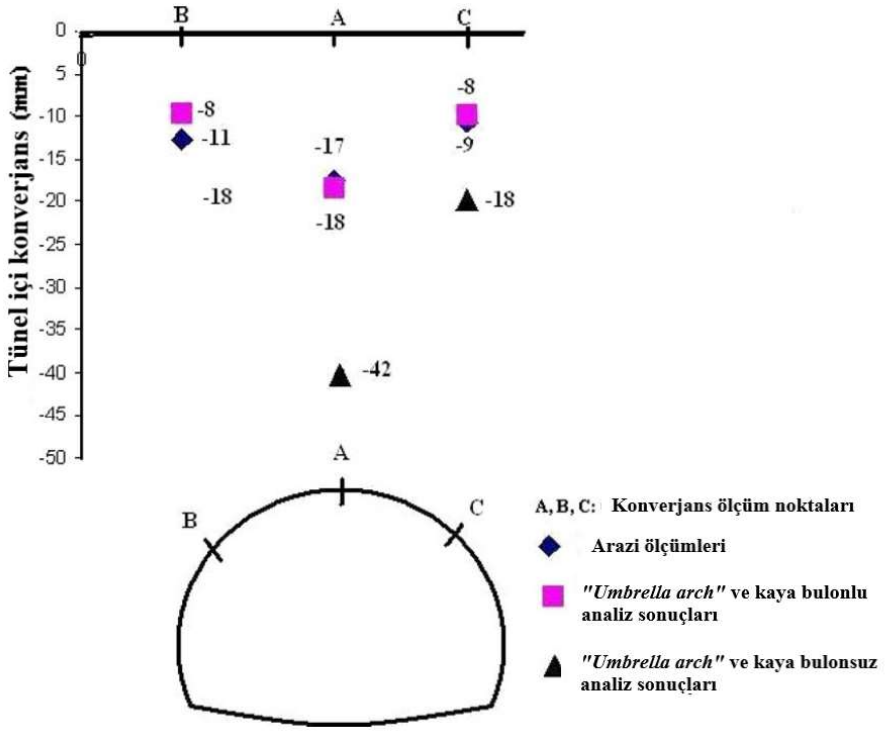


Şekil 2.41: 3 Boyutlu model ve analiz sonuçları (Aksoy & Onargan, 2010).

Yukarıda bahsedilen her iki durum için de analiz sonuçlarından elde edilen değerler ve sahadan alınan ölçümler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Şekil 2.42 ve 2.43 'te yer alan grafikler oluşturulmuştur.



Şekil 2.42: Yüzey oturmalarının karşılaştırılması (Aksoy & Onargan, 2010).



Şekil 2.43: Konverjans değerlerinin karşılaştırılması (Aksoy & Onargan, 2010).

Şekil 2.42 ve Şekil 2.43'te yer alan grafikler incelendiğinde, sahadan elde edilen ölçüm sonuçları ile nümerik analiz sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Sahada, tünel

ekseninin ortasında meydana gelen maksimum yüzey oturma değeri 7mm olarak ölçülmüşken, nümerik analizde elde edilen değer 6.88 mm'dir. Aynı koşullar altında *"umbrella arch"* uygulaması ve kaya bulonu kullanılmayan nümerik analizlerde ise maksimum yüzey oturma değerinin 23 mm olduğu görülmektedir. Analiz sonuçlarından anlaşılacağı üzere *"umbrella arch"* uygulaması tünel çalışmalarından dolayı yüzeyde meydana gelebilecek yüzey oturmalarını %69 oranında azaltmıştır. Şekil 2.43'te yer alan konverjans değerleri incelendiğinde ise, A, B ve C noktaları için sahada, tünel taç bölgesinde (A) ölçülen maksimum deplasman 17 mm'dir. Nümerik analiz sonucunda ise bu değer 18 mm olarak elde edilmiştir. Aynı koşullar altında *"umbrella arch"* uygulaması ve kaya bulonları olmadan gerçekleştirilen analizlerde ise bu değer 42 mm olarak elde edilmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere *"umbrella arch"* uygulaması tünel içinde meydana gelebilecek deplasmanları %57 oranında azaltmıştır.

Yukarıda özetlenen çalışmada (Aksoy & Onargan, 2010) araştırmacılar, İzmir'de yoğun yapılaşma ve trafik yükü altında inşa edilen, Poligon bölgesi metro tünelini 3 boyutlu ortamda sayısal olarak modellemiş ve analiz etmişlerdir. Sonuçlarını saha ölçümleri ile karşılaştıran araştırmacılar, modellerini doğruladıktan sonra, *"umbrella arch"* sisteminin tünel içerisinde ve yüzeyde meydana gelebilecek olan deplasmanlara olan etkisini inceleyebilmek amacıyla bir analiz daha gerçekleştirmiş ve bu konu ile ilgili literatürde yer alan çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile benzer sonuçlar elde ederek, *"umbrella arch"* sisteminin yüzey oturmalarını ve tünel içinde meydana gelebilecek deplasmanları önemli ölçüde azalttığını bildirmişlerdir.

Literatürde yer alan ve yukarıda özetlenen tüm bu çalışmalara bakıldığında, *"umbrella arch"* yönteminin, tünel içi deformasyonların yanı sıra, özellikle zayıf zemin koşullarında, sığ tünellerde ve halihazırda yüksek yüzey oturmalarının gözlemlendiği bölgelerde, yüzey oturmalarını ciddi oranda azaltabildiği görülmektedir.

"Umbrella arch" yönteminin sayısal modellemesi hakkında farklı görüşler olsa da literatürde yer alan hemen hemen bütün çalışmalarda, *"umbrella arch"* uygulanan zemin/kaya ortamların güçlendirilmiş bir zemin/kaya bölgesi olarak modellendiği görülmektedir. Çalışmaların yine çoğunda basitleştirilmiş geometri kabulü ile modelleme yapılmış ve bu kabulün sonuçları ihmal edilebilecek düzeyde etkilediği Klotoé ve Bourgeois (2019) tarafından açıkça belirtilmiştir.

Bu çalışmada, literatürde yer alan araştırmaların ışığında ve araştırmacıların önerileri doğrultusunda, NATM ile açılacak tünellerin inşası sırasında meydana gelebilecek yüzey oturmalarının önlenebilmesi için kullanılan şemsiye boru yönteminin etkinliğinin incelenmesi amacıyla, sonlu elemanlar yöntemi ile analizler gerçekleştirilmiş olup, şemsiye boru uygulamasının tünel içerisinde meydana gelebilecek deformasyonlara etkisi incelenmiştir. Çalışmada, Kocaeli ilinde 2018 yılında yapımına başlanan ve yapımı halen devam etmekte olan Gebze-Darıca Metro Projesi'nde, inşası sırasında şemsiye boru uygulaması yapılan ve tünel içerisinde kritik deformasyon değerlerinin okunduğu tüneller, Midas GTS NX programı aracılığı ile modellenmiş ve yapılmış olan analizler sonucunda, söz konusu tünellerde meydana gelen deformasyonlar, sahadan elde edilen veriler ile karşılaştırılarak şemsiye boru yönteminin bu deformasyonlara olan etkinliği tartışılmıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 GEBZE-DARICA METRO PROJESİ

3.1.1 Projeye Ait Genel Bilgiler

Gebze- Darıca Metro Projesi, yapımına 2018 yılında başlanan, 15.4 km uzunluğunda, 11 istasyon ve 1 araç bakım atölyesi ve depo sahasından oluşan bir metro projesidir. Proje Kocaeli ilinin bir sahil ilçesi olan Darıca ilçesini, Gebze ilçesinin kuzeyinde yer alan Organize Sanayi Bölgesi'ne bağlayacak ve Gebze Gar İstasyonu'nda Marmaray Hattı'na entegre olarak, İstanbul ile Gebze ve Darıca ilçelerinin bağlantısını sağlayacaktır.

Projede bulunan istasyonlardan 5'i aç-kapa tipinde, 6'sı ise tünel tipinde istasyonlardır. Hat tünellerinin toplam uzunluğu 12.8 olup, 9.4 km'si NATM yöntemi ile, 3.4 km'si ise TBM ile açılacaktır. NATM yöntemi ile açılacak hat tünellerinde çalışma imkanının sağlanabilmesi açısından toplam 8 adet çalışma şaftı projelendirilmiştir. Bu çalışma şaftlarından 6 tanesi geçici çalışma şaftı, 2 tanesi ise işletme sürecinde acil kaçış şaftı olarak kullanılmak üzere projelendirilmiştir. Proje güzergahı Şekil 3.1'de yer almaktadır.



Şekil 3.1: Proje güzergahı.

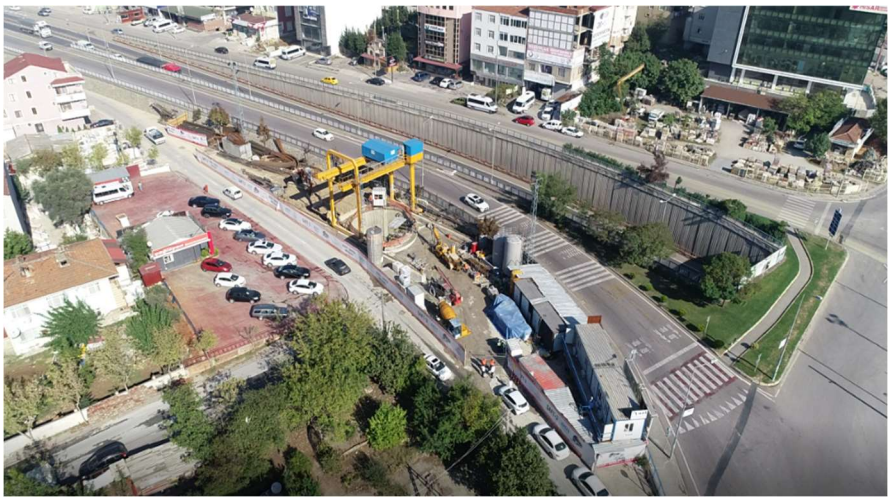
3.1.2 Çalışma Sırasında Karşılaşılan Problemler

Gebze- Darıca Metro Projesi kapsamında inşa edilen, işletme döneminde acil kaçış şaftlarından biri olarak kullanılacak olan ŞAFT-3, Kocaeli İli, Gebze İlçesi, İstasyon Mahallesi 1461. Sokak üzerinde bulunmaktadır. Şaftın güzergâh üzerindeki konumu Şekil 3.2'de yer almaktadır.



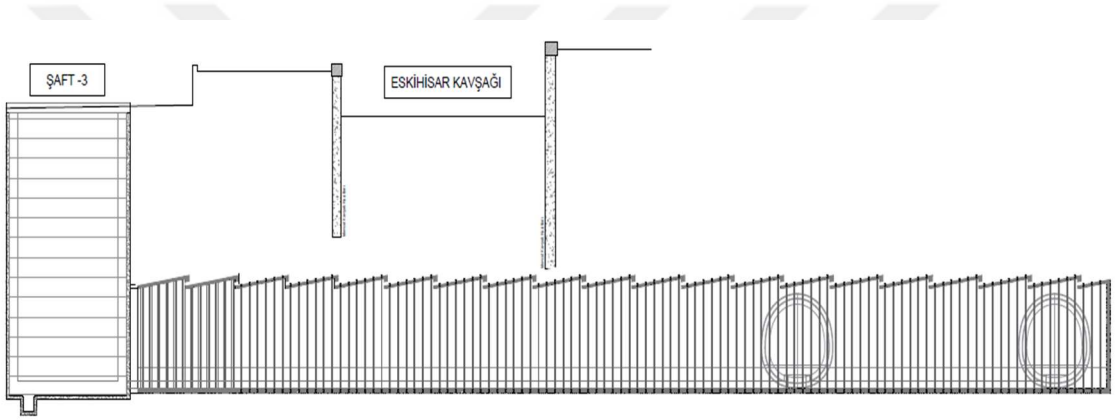
Şekil 3.2: Şaft-3 güzergâh üzerindeki konumu.

Şaftın bulunduğu arazide güncel kotlar +88.50 ile +93.50 arasında değişmektedir. Şaft- 3'ün kazı taban kotu ~+66.00 olarak belirlenmiştir. Şaft-3'ün şantiye yerleşim planı Şekil 3.3'te yer almaktadır.



Şekil 3.3: Şaft-3 şantiye yerleşimi fotoğrafı.

Çalışma kapsamında incelenmiş olan tünel, şaftı hat tünellerine bağlayan, 93m uzunluğunda B5 tip kesitli ve 56.67m^2'lik kesit alanına sahip bir yaklaşım tünelidir. Yaklaşım tüneli Gebze'yi Eskihisar'a bağlayan Eskihisar Kavşağının altından geçmektedir. Tünel güzergahı, 18.65.m'de Eskihisar Kavşağı'na ait doğu iksa kazıklarının ve 38.55.m'de ise batı iksa kazıklarının altından geçmektedir. Doğu iksa kazıklarının alt kotu ile yaklaşım tüneli üst yarı kazı kotu arasındaki mesafe 3.70m ve batı iksa kazıklarının alt kotu ile yaklaşım tüneli üst yarı kazı kotu arasındaki mesafe 2.30m'dir. Eskihisar Kavşağı kazıkları ile Şaft-3 B5 Yaklaşım Tüneli'nin etkileşimini gösteren, Şaft-3 B5 Yaklaşım Tüneli Boykesiti Şekil 3.4'te yer almaktadır.



Şekil 3.4: Şaft-3 B5 yaklaşım tüneli boykesiti.

Örtü kalınlığının oldukça az olması, tünelin geçeceği bölgede trafik yükünün fazla olması ve bölgenin düşük mukavemet değerlerine sahip zemin formasyonu sebebiyle, yaklaşım tünelinin *"umbrella arch"* yöntemi kullanılarak açılmasına karar verilmiş ve tasarımlar bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir.

Uygulama sırasında her ne kadar gerekli önlemler alınmış olsa da kullanılan tahkimatlar yeterli olmamış ve tünel kazısına başlandığı andan itibaren tünel içerisinde ise konverjans meydana gelmiştir. Tünel kazısı ilerledikçe tünel içerisindeki deformasyon ve kapanma eğilimi devam etmiştir. Tünel kazısının ilk metrelerinde, beklenilen zemin profili ile karşılaşılmadığından dolayı önlem olarak tünelin 9.10.m'sinden itibaren kafes iksa yerine daha rijit bir sistem olan profil iksalar destek amaçlı kullanılmaya başlanmıştır. Ancak tünel kazısının ilerlemesiyle tünel içi deformasyonlar hızlı bir şekilde artmaya başlamış, tünel kazısı 19.50.m'de iken tünel tavanında 44 mm olarak ölçülen deformasyon aniden hızlanarak tünel kazısının 23.50. m'sinde

75 mm' ye ulaşmıştır. Bu sebeple yapılan tasarım değişikliği ile birlikte önceden tek sıra uygulanan umbrella boruları, tünel ilerlemesinin 19.50.m'sinden sonra iki sıraya çıkartılmış, kafes iksa yerine daha rijit bir yapıya sahip olan profil iksa kullanılmış, ayna zemin çivilerinin ve yan zemin çivilerinin adet ve boyu artırılmıştır. Tüm bu artırılmış tahkimatlara ilave olarak tünel başlangıcından itibaren geçici invert imalatlarına başlanarak kemerlenme sağlanmıştır. Bütün bu önlemler ile birlikte kazıklardaki oturma değerleri sabit değerlere ulaşmış ve bölgede herhangi bir göçük yaşanmadan tünel inşaatı tamamlanmıştır.

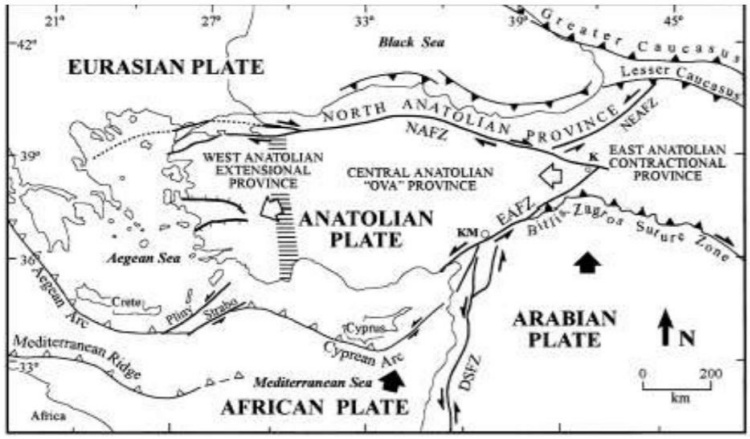
3.2 ZEMİN PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE GEOTEKNİK KARAKTERİZASYON

3.2.1 Bölgenin Genel Jeolojisi ve Tektonizma

İnceleme alanı 1/50 000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası İstanbul Paftası içinde yer almaktadır. Kocaeli ili, kuzeyde Kocaeli yarımadası ile güneyde Armutlu yarımadası üzerinde kurulu önemli bir yerleşim alanı olup, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun kuzey ve güneyinde yer alan iki farklı tektonik birliğe ait litolojik birimlerle temsil edilmektedir.

Kurtköy Formasyonu (Oku), Gözdağ Formasyonu (OSg), Kartal formasyonu, Sancaktepe Graniti (Psg), Akveren formasyonu, Meşetepe formasyonu (Tomm), Karapürçek formasyonu (TQk) çalışma alanı çevresinde gözlenebilen birimlerdir.

Şekil 3.5'te görülebileceği gibi Türkiye, Anadolu levhası üzerinde olup oturduğu coğrafya üzerinde belli başlı olarak Arap levhası, Avrasya levhası ve Afrika levhası yer almaktadır.



Şekil 3.5: Türkiye'nin tektonik yapısı. (Altınoğlu, 2005)

Bölge depremsellik açısından incelendiğinde, bölgenin en önemli yapısal unsuru olan ve Anadolu levhası ile Avrasya levhasını birbirinden ayıran Kuzey Anadolu Fayı (KAF) bölgede daha önce olmuş ve günümüzde olabilecek depremleri denetlemektedir. Çalışma alanı da Kuzey Anadolu Fay Zonu içerisinde yer almaktadır.

3.2.2 Bölgenin Yerel Jeolojisi

Proje alanında 2 farklı sondaj çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu sondajlar PRT-GÜZ-SK-03 ve AYGM-SK-14 olarak kodlandırılmıştır. Proje alanı için oluşturulan jeolojik profil ve tünelin yapılacağı alana ait geoteknik parametrelere esas olan PRT-GÜZ-SK-03 ve AYGM-SK-14 sondaj lokasyonları Şekil 3.6'da yer almaktadır.



Şekil 3.6: Sondaj lokasyonları.

PRT-GÜZ-SK-03 sondajında mevcut yüzey seviyesinde itibaren 3.00m kalınlığında dolgu ile karşılaşılmıştır. Dolgu birimini altında 16.50 m kalınlığında sarımsı kahve yeşilimsi alacaklı renkli, yer yer karbonat topraklı çok katı-sert kil gözlemlenmiştir. Sert kil birimi geçildikten sonra sondaj sonuna kadar sarımsı kahve-bej renkli, tamamen ayrışmış killeşmiş dayk birimi kesilerek sondaj tamamlanmıştır. Yeraltı su seviyesi 3.90m olarak tespit edilmiştir.

AYGM-SK-14 sondajında 1.00m dolgu tabakası geçildikten sonra sondaj sonuna kadar sert kil tabakası gözlemlenmiştir. Yeraltı su seviyesi 5.60m olarak tespit edilmiştir.

3.2.3 İdealize Zemin Profili

Proje alanı jeolojik profili incelendiğinde inceleme alanı olan ŞAFT-3 B5 Yaklaşım tünelinin inşası için yapılacak kazı boyunca geçilecek olan birimlerin tanımlanması için, PRT-GUZ-SK-03 ve AYGM-SK-14 sondajları esas alınmıştır. Konu sondaj logları Ek-1'de yer almaktadır. Sondajlardan elde edilen bilgilere göre bölgede karşılaşılacak zemin birimler ve derinlikleri Tablo 3.1'de yer almaktadır.

Tablo 3.1: İdealize zemin profili.

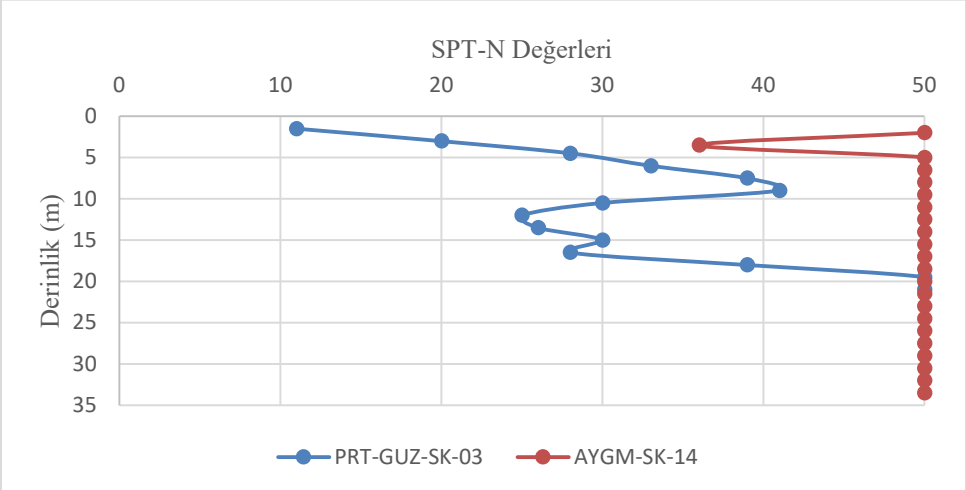
Litoloji	Tabaka Kalınlığı (m)
Kontrolsüz Dolgu	0 - 3.00 m
TQk Sert Kil	3.00 - Kesit Sonuna Kadar

Proje bölgesinde gerçekleştirilen PRT-GUZ-SK-03 ve AYGM-SK-14 sondaj kuyularında Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Presiyometre Testleri yapılmıştır. Alınan numuneler üzerinde ise laboratuvar ortamında *"Atterberg Likit Limit"* deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneylerden elde edilen sonuçlar, zemin birimlerin mühendislik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Arazi deneylerinin sonuçları başlıklar halinde aşağıda yer almaktadır.

3.2.3.1 SPT Deney Sonuçları

PRT-GUZ-SK-03 ve AYGM-SK-14 sondaj kuyularında gerçekleştirilen SPT deney sonuçları Tablo 3.2'de yer almaktadır.

Tablo 3.2: SPT-N – Derinlik tablosu.

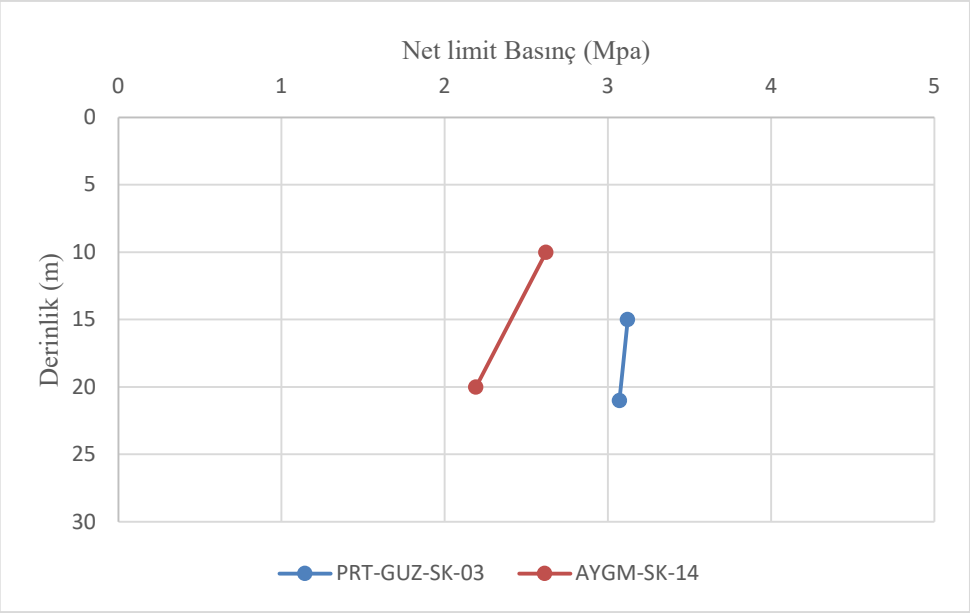


3.2.3.2 Presiyometre Deneyi Sonuçları

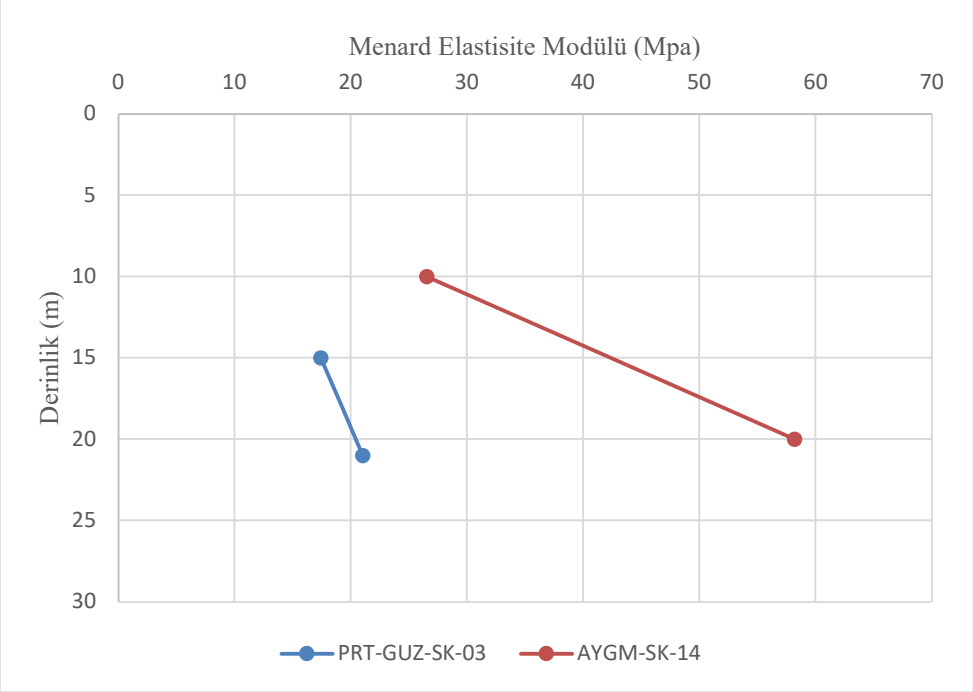
Arazide, PRT-GUZ-SK-03 sondaj kuyusunda, 15.m'de ve 21.m'de, AYGM-SK-14 sondaj kuyusunda ise 10.m'de ve 20.m'de Presiyometre deneyleri yapılmıştır. Presiyometre deney

sonuçlarından elde edilen veriler ile Net Limit Basınç ve Menard Elastisite Modülü değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerler sırasıyla Tablo 3.3 ve Tablo 3.4'te yer almaktadır.

Tablo 3.3: Net Limit Basınç değerleri.



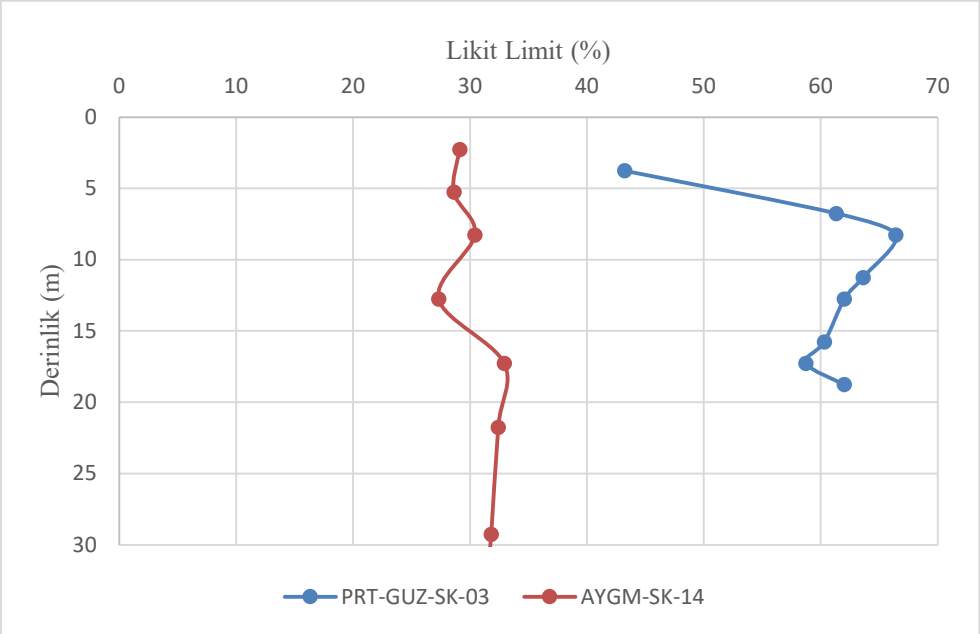
Tablo 3.4: Menard Elastisite Modülü değerleri.



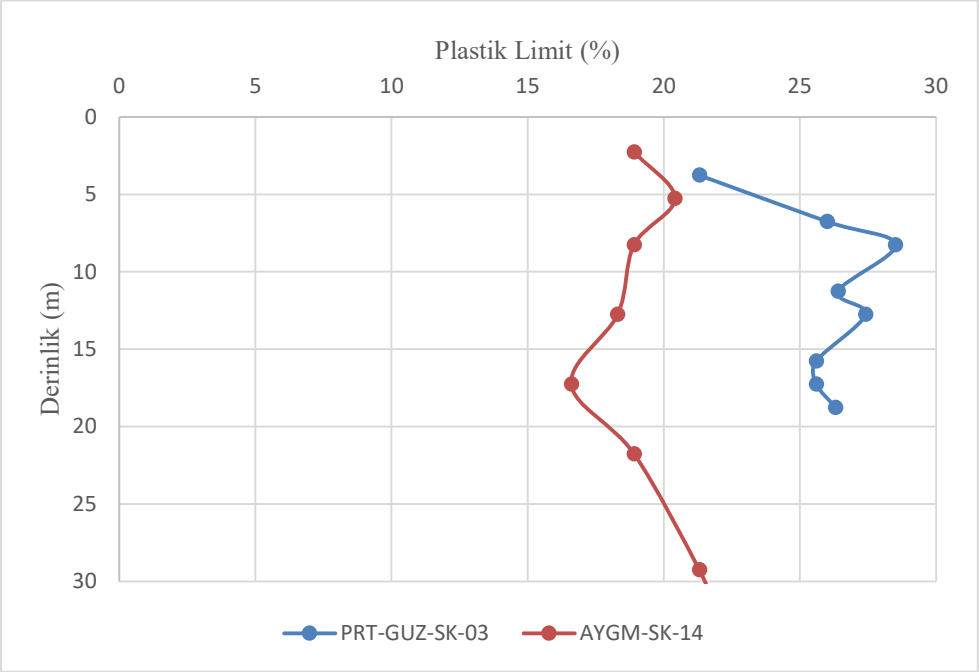
3.2.3.3 Atterberg Likit Limit Deneyi

Arazide, PRT-GUZ-SK-03 ve AYGM-SK-14 sondaj kuyularından numuneler üzerine, laboratuvarda *"Atterberg Likit Limit Deneyi"* gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen Derinlik-Likit Limit, Derinlik-Plastik Limit ve Derinlik-Plastisite İndisi ilişkilerini gösteren grafikler sırasıyla Tablo 3.5, Tablo 3.6 ve Tablo 3.7' de aşağıda yer almaktadır.

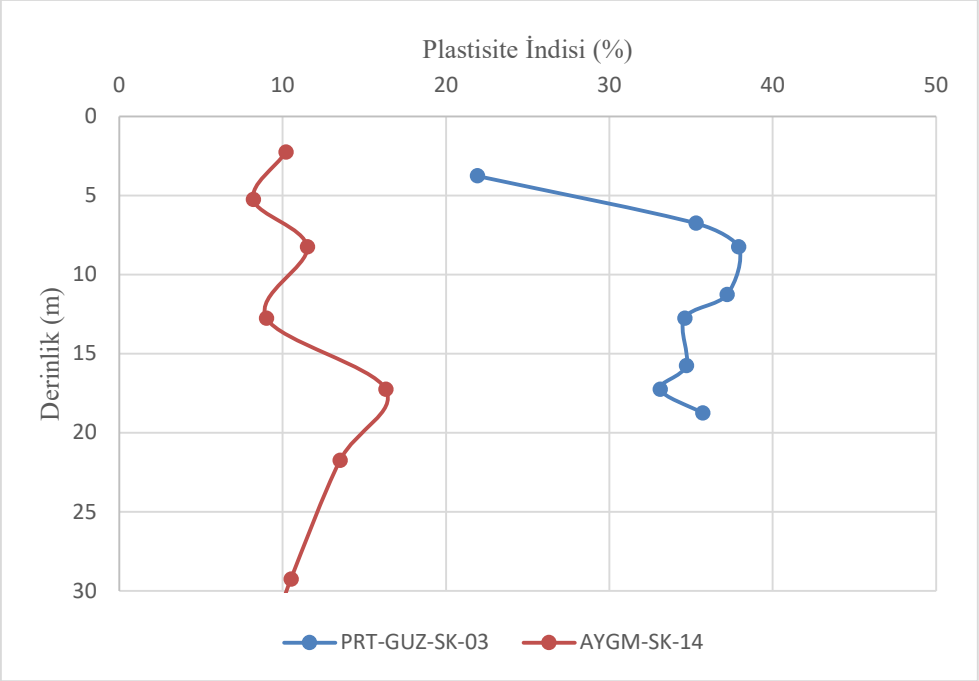
Tablo 3.5: Derinlik-Likit Limit ilişkisi (%).



Tablo 3.6: Derinlik-Plastik Limit ilişkisi (%).



Tablo 3.7: Derinlik-Plastisite İndisi ilişkisi.



3.2.4 TASARIM PARAMETRELERİ

Tasarım parametrelerinin seçiminde sahada yapılan PRT-GUZ-SK-03 ve AYGM-SK-14sondaj çalışmaları, arazide yapılan SPT ve Presiyometre deneyleri ve sondaj numuneleri üzerinde, laboratuvarda gerçekleştirilen Atterberg Likit Limit Deneyleri esas alınmıştır. Bu doğrultuda ilgili sondaj çalışmalarında gözlenen tüm zemin birimlerine ait mühendislik parametreleri başlıklar halinde aşağıda özetlenmiştir. Birimler için seçilen mühendislik parametreleri saha, laboratuvar ve literatür verileri kullanılarak belirlenmiştir.

3.2.4.1 Kontrolsüz Dolgu

Çalışma alanında karşılaşılan çakıllı killi kontrolsüz dolgu ile ilgili olarak analizlerde kullanılacak zemin parametreleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$\gamma = 20$ kN/m^3

$c' = 5$ kPa

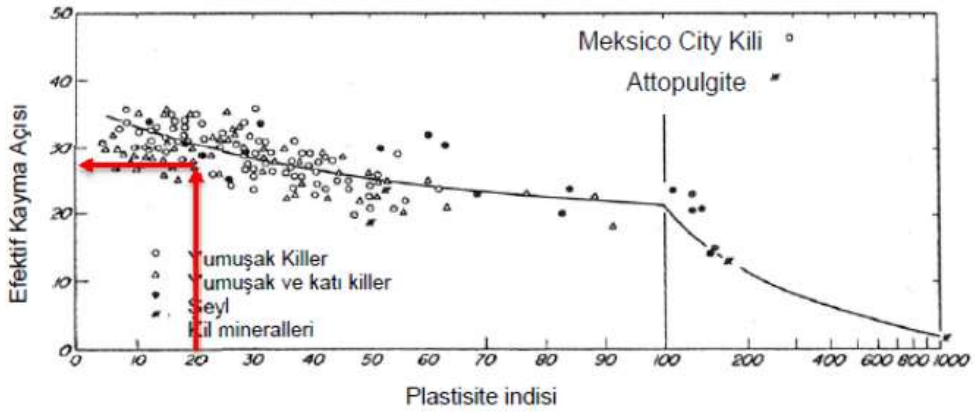
$\phi' = 30°$

$E = 20.000$ kPa

3.2.4.2 TQk Katı Kil

Çalışma alanında karşılaşılan çakıllı killi kontrolsüz dolgu birimi geçildikten sonra çok katı-PRT-GUZ-SK-03 ve AYGM-SK-14 sondaj kuyularının sonuna kadar orta sertlikte katı kil birimi ile karşılaşılmıştır.

Literatürde killi zeminlerin efektif içsel sürtünme açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişki için Terzaghi ve diğ. (1996) tarafından önerilen grafik Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.7: Efektif Kayma Direnci ile Plastisite Arasındaki İlişki (Terzaghi, ve diğ., 1996).

Buna göre;

Şekil 3.6'ya göre ortalama Plastisite İndisi 20 (%) olarak belirlenmiş ve PI_{ort} = 20 (%) için; ϕ'=27° olarak belirlenmiştir.

Literatürde efektif kohezyonun belirlenebilmesi için Lunne ve diğ. (1997) tarafından aşağıdaki korelasyon önerilmiştir.

$$c' = \alpha \; x \; tan\phi' \tag{3.1}$$

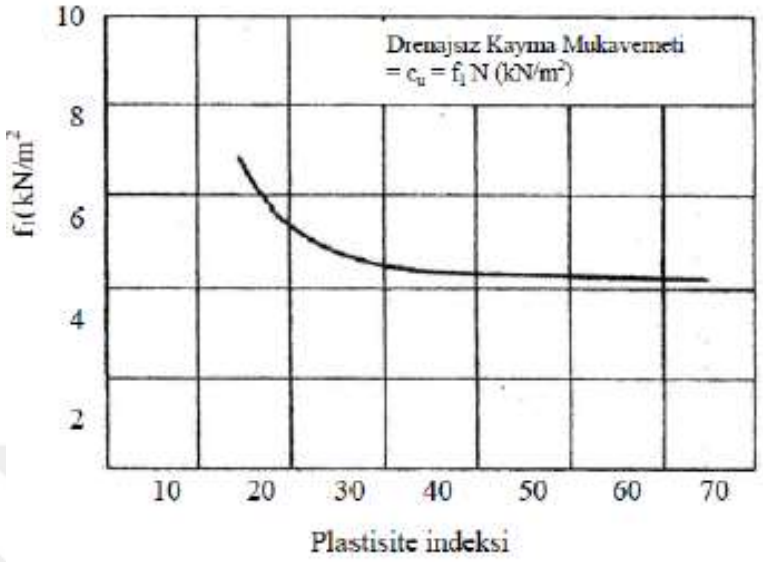
Tablo 3.8: Değişik zemin türlerinde α faktörünün değerleri (Lunne, ve diğ., 1997).

Zemin Cinsi	*α*	*tan ϕ'*
Yumuşak kil	*5-10*	*0,35 – 0,45*
Orta katı kil	*10 – 20*	*0,40 – 0,55*
Katı Kil	*20 – 50*	*0,50 – 0,60*

ϕ' = 27° için α=20 olarak seçildiğinde;

c'= 10 kPa olarak belirlenir.

Drenajsız kayma dayanımı için Stroud (1974) tarafından önerilen grafiğe bakılarak;



Şekil 3.8: SPT-N Plastisite İndisi Arasındaki İlişki (Stroud, 1974).

PI_{ort} = 20 (%) için, f_1= 5 olarak belirlenmiş ve Şekil 3.2'ye bakılarak SPT-$N_{ortalama}$ = 40 olarak alınmıştır. Bu durumda;

$$c_u = f_1 \, x \, N \tag{3.2}$$

formülü ile Drenajsız Kayma Dayanımı c_u= 200 kPa olarak hesaplanmıştır.

Kohezyonlu zeminler için Elastisite Modülü değeri için Bowles (1996) tarafından aşağıdaki formül önerilmiştir;

$$E_u = (300\sim500)x \, c_u \tag{3.3}$$

Buradan;

$$E_u = 400 \, x \, 200 = 80 \, mPa$$

olarak elde edilmiştir.

Yukarıda, Şaft-3 B5 yaklaşım tüneli bölgesinde yapılan zemin araştırmalar, sahanın mevcut zemin profili ve jeolojik özellikleri, laboratuvar ve arazi deneyleri irdelenerek, analizlerde

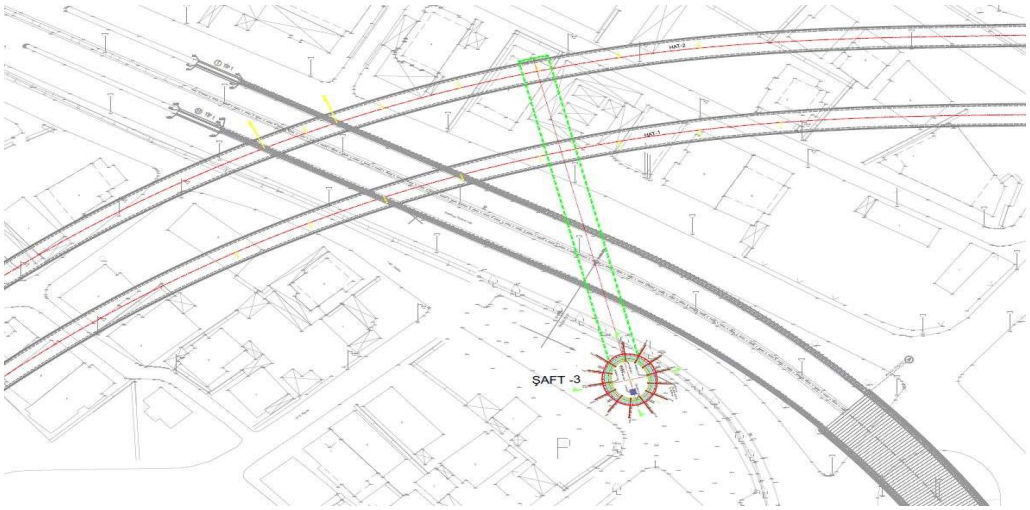
kullanılacak olan geoteknik tasarım parametrelerine ilişkin değerlendirmelere yer verilmiştir. Analizlerde kullanılacak olan parametreler Tablo 3.9'da özetlenmiştir.

Tablo 3.9: Analizlerde kullanılacak zemin parametreleri.

Litoloji	Tabaka Kalınlığı (m)	Kohezyon, c' (kPa)	Kayma Direnci Açısı, ϕ	Doğal Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	Elastisite Modülü, E_s (Mpa)	Poisson Oranı, ν
Kontrolsüz Dolgu	0 - 3.00 m	5	30	20	20	0.3
TQk Sert Kil	3.00 - Kesit Sonuna Kadar	10	27	19	80	0.35

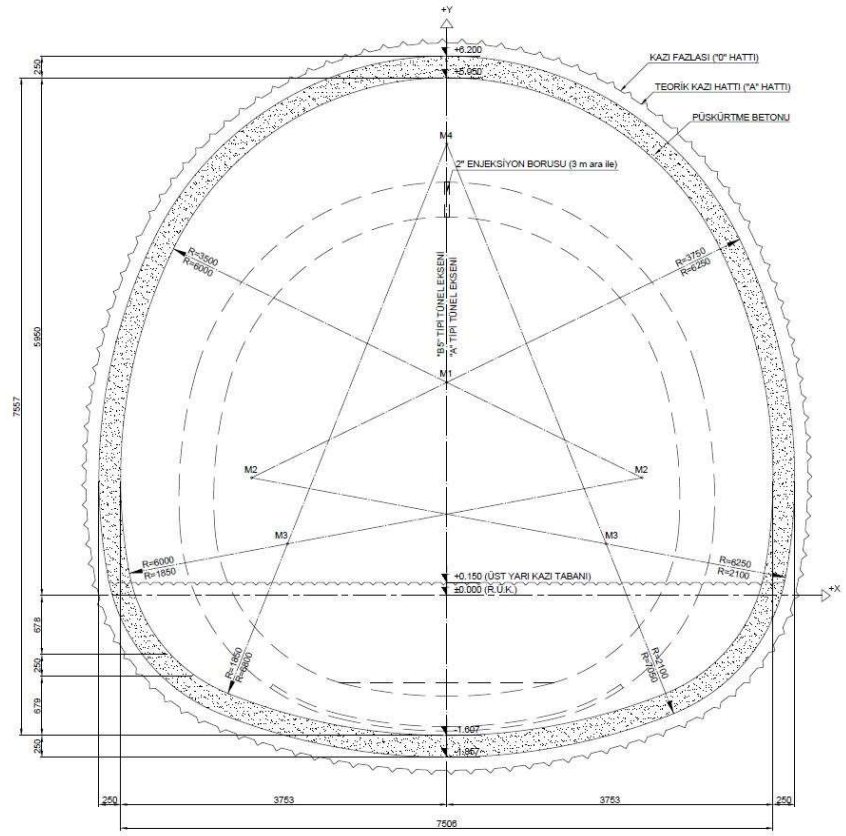
3.2.5 ŞAFT-3 B5 YAKLAŞIM TÜNELİ

Şaft-3 B5 yaklaşım tüneli, hat tünellerindeki NATM çalışmaları için ve sonrasında acil çıkış şaftı kullanılması amacıyla açılan Şaft-3'ü hat tünellerine bağlayan tüneldir. Şaft-3 'ün derinliği 22.3m ve B5 yaklaşım tünelinin uzunluğu 93m'dir. Tünel planı Şekil 3.9'da yer almaktadır.



Şekil 3.9: Şaft -3 B5 Yaklaşım Tüneli planı.

B5 Yaklaşım tüneli kesit alanı 57.67 m^2'dir. Tünel geometrisi Şekil 3.10'da yer almaktadır.



Şekil 3.10: B5 Yaklaşım Tüneli geometrisi.

3.2.5.1 Şaft-3 B5 Yaklaşım Tüneli Kazı-Destek Sistemleri

Tünel kazısının TQk (sert kil) formasyonundan geçeceği öngörülmüş ve kazı-destek sistemi seçimleri bu doğrulta gerçekleştirilmiştir.

Kazının yapıldığı bölgede, TQk formasyonu sert kil malzemesi elastoplastik-plastik davranış göstermektedir. Bu nedenle tünel aynasında jeolojik duruma bağlı olarak oluşabilecek stabilite sorununu kontrol altına almak için hem üst yarı (sistematik) hem de alt yarı (gerektiğinde) aynasına zemin çivisi yerleştirilmiştir.

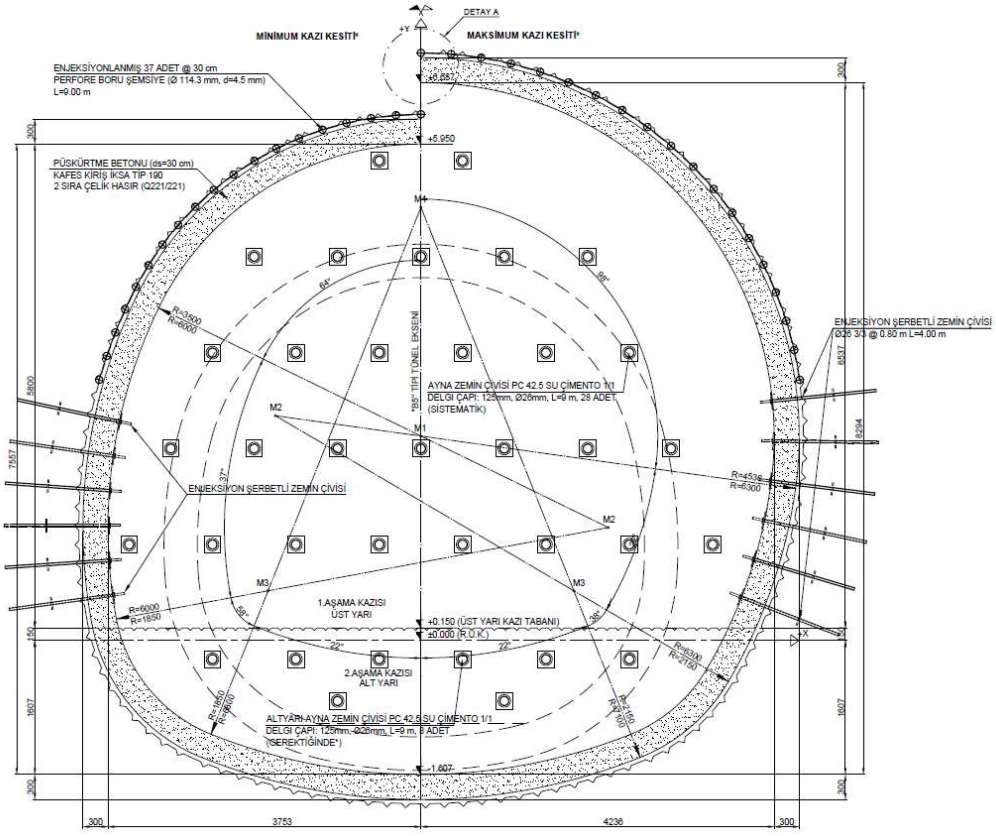
Zemin koşulunda yapılacak bu tünel kazısında güvenli kazıyı sağlayabilmek için kalot (üst yarı) etrafında *"umbrella arch"* uygulanmıştır. *"Umbrella arch"* sistemi sayesinde verilen basınçlı enjeksiyon ile o bölgede güçlendirilmiş bir bölge oluşması sağlanmıştır. Bu kazı destek sistemi 2 aşamalı kazı şeklinde uygulanmış ve alt yarı ile üst yarı arasında limit 4 ano boyu ile sınırlandırılmıştır. Tünel cidarında tahkimat olarak kafes iksa kullanılması öngörülmüştür.

Tünelde deformasyon öncesi kullanılan kazı-destek sistemi elemanlarının özellikleri Tablo 3.10'da ve kazı destek sistemi çizimi Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de yer almaktadır.

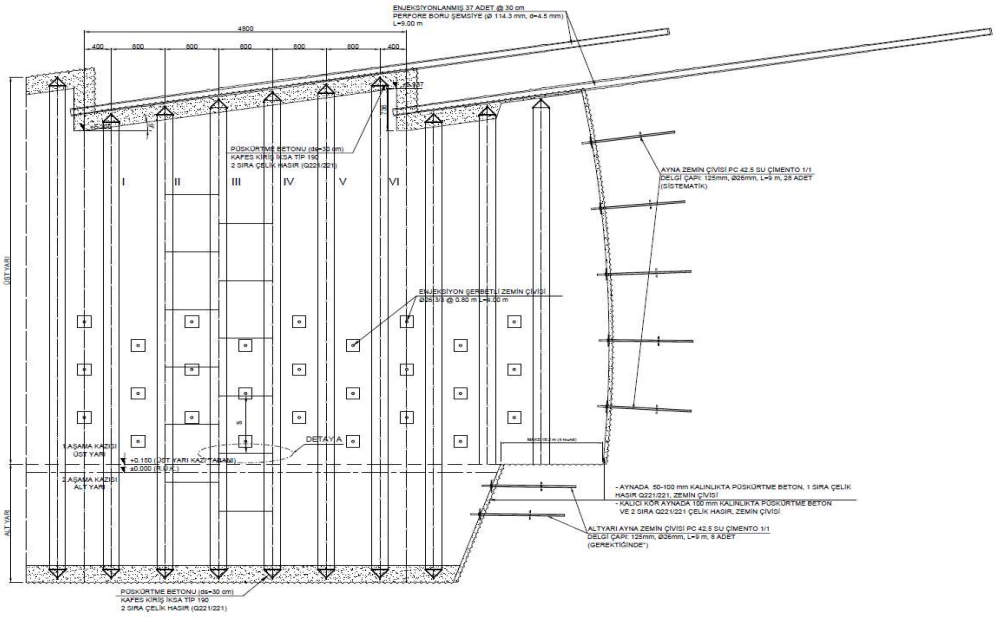
Tablo 3.10 : Deformasyon öncesi tünellerde kullanılan kazı destek sistemi elemanları.

Destek Elemanı	Özellikler	Malzeme Özellikleri
Püskürtme Beton	300 mm	$f_{ck,silindir}$ = 21MPa
Çelik Hasır	2 Sıra Q221/221	f_{yk}= 500MPa
Üst Yarı İksa Çeliği	TİP 190 Kafes Çelik	f_{yk}= 420MPa
Alt Yarı İksa Çeliği	TİP 190 Kafes Çelik	f_{yk}= 420MPa
Boru Şemsiye	Enjeksiyonlanmış 37 Adet, 30 cm aralıklarla, L=9m, ϕ=114.3mm, d=4.5mm	f_{yk}= 420MPa, Enjeksiyon şerbetinin 3 günlük basınç dayanımı 340 kg/cm^2'dir.
Zemin Çivisi	Enjeksiyonlanmış 3/3, ϕ26mm, 30 cm aralıklarla, L=9m	f_{yk}= 420MPa
Aynada Zemin Çivisi	Enjeksiyonlanmış Üst yarıda 28 adet, L=9m, ϕ26mm	f_{yk}= 420MPa

Tünel kazı çalışmaları devam ederken sahada yapılan ölçümler sonucunda hem tünel içi deformasyonların hem de yüzey oturmalarının belirlenen sınırları geçmesi sebebiyle uygulanan kazı-destek sistemi değiştirilmiştir. Üst yarıdaki *"umbrella arch"* uygulaması yüzey oturmalarını azaltacağı ve tünel taç kısmında meydana gelen deformasyonun artmasını engelleyeceği düşünülerek iki sıraya çıkartılmış, yan zemin çivilerinin adetleri ve boyları arttırılmış ve kafes iksaya göre daha yüksek rijitliğe sahip profil iksa kullanımına geçilmiştir. Değiştirilen kazı-destek sistemi tünel kazısının 9.10.m'sinden itibaren uygulanmaya başlanmıştır. Kafes iksalardan sonra 1 kazı anosu mesafede IPE 160 ve tünel sonuna kadar da IPN 200 profil iksalar kullanılmıştır.



Şekil 3.11 : Deformasyon öncesi kazı-destek sistemi en kesiti.

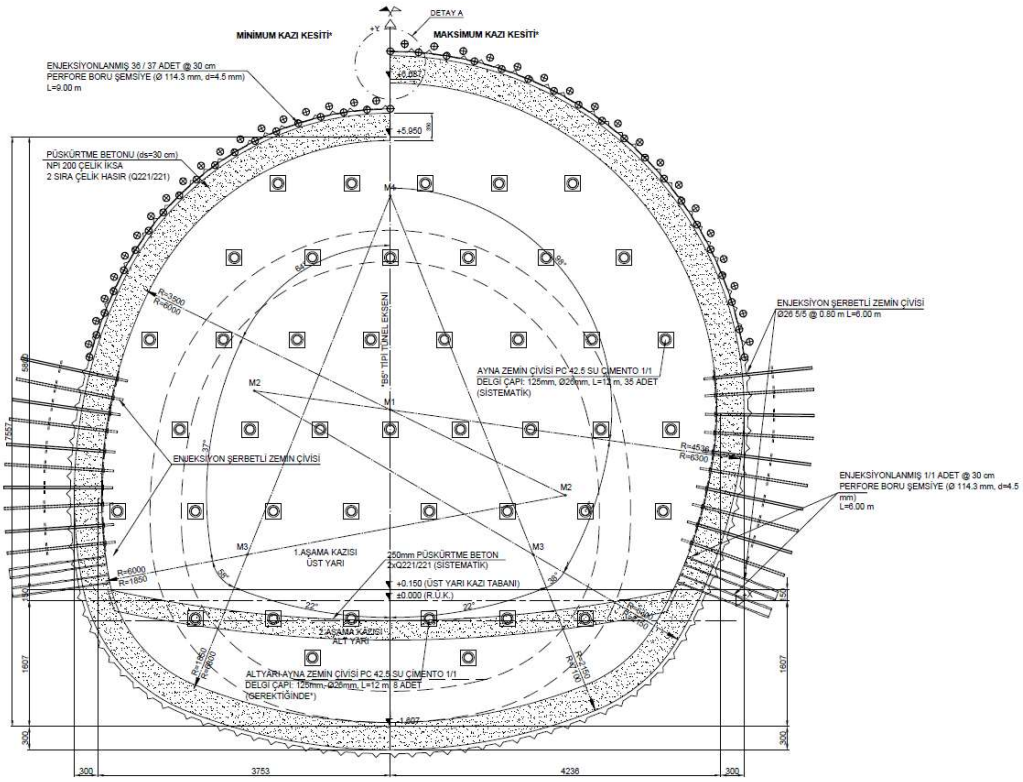


Şekil 3.12 : Deformasyon öncesi kazı-destek sistemi boy kesiti.

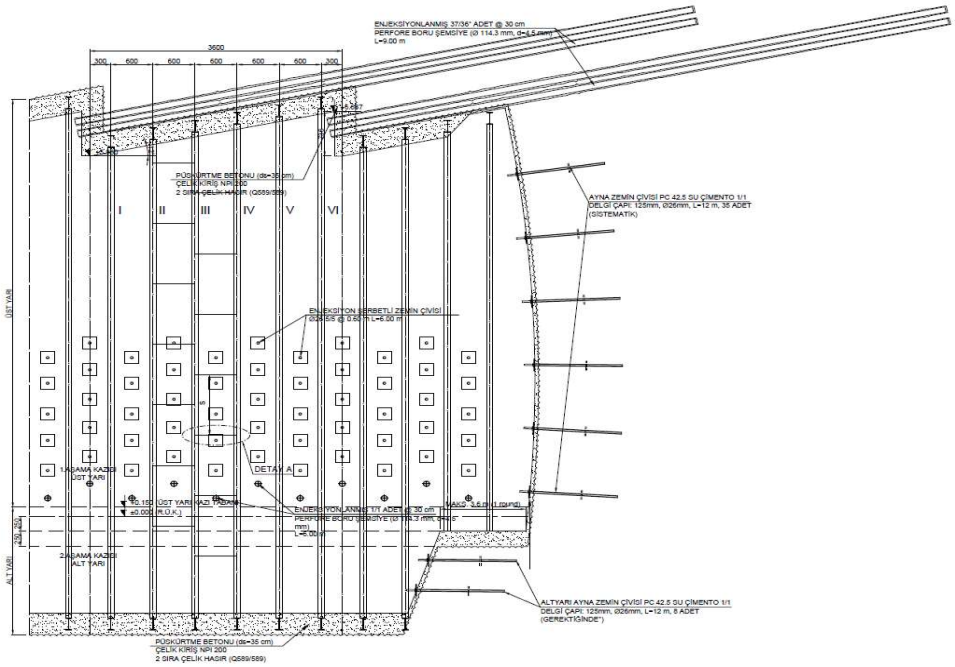
Deformasyon sonrası değiştirilen kazı-destek sistemi elemanlarının özellikleri Tablo 3.11'de ve kazı destek sistemi çizimi Şekil 3.13 ve 3.14'de yer almaktadır.

Tablo 3.11: Deformasyon sonrası tünellerde kullanılan kazı destek sistemi elemanları.

Destek Elemanı	Özellikler	Malzeme Özellikleri
Püskürtme Beton	300 mm	$f_{ck,silindir}$ = 21MPa
Çelik Hasır	2 Sıra Q221/221	f_{yk}= 500MPa
Üst Yarı İksa Çeliği	IPE 160 IPN 200	f_{yk}= 275MPa f_{yk}= 275MPa
Alt Yarı İksa Çeliği	IPE 160 IPN 200	f_{yk}= 275MPa f_{yk}= 235MPa
Boru Şemsiye	Enjeksiyonlanmış 73 Adet, 30 cm aralıklarla, L=9m, ϕ=114.3mm, d=4.5mm	f_{yk}= 420MPa, Enjeksiyon şerbetinin 3 günlük basınç dayanımı 340 kg/cm²'dir.
Zemin Çivisi	Enjeksiyonlanmış 5/5, ϕ26mm, 30 cm aralıklarla, L=9m	f_{yk}= 420MPa
Aynada Zemin Çivisi	Enjeksiyonlanmış Üst yarıda 35 adet, L=12m, ϕ26mm	f_{yk}= 420MPa



Şekil 3.13 : Deformasyon sonrası kazı-destek sistemi en kesiti.

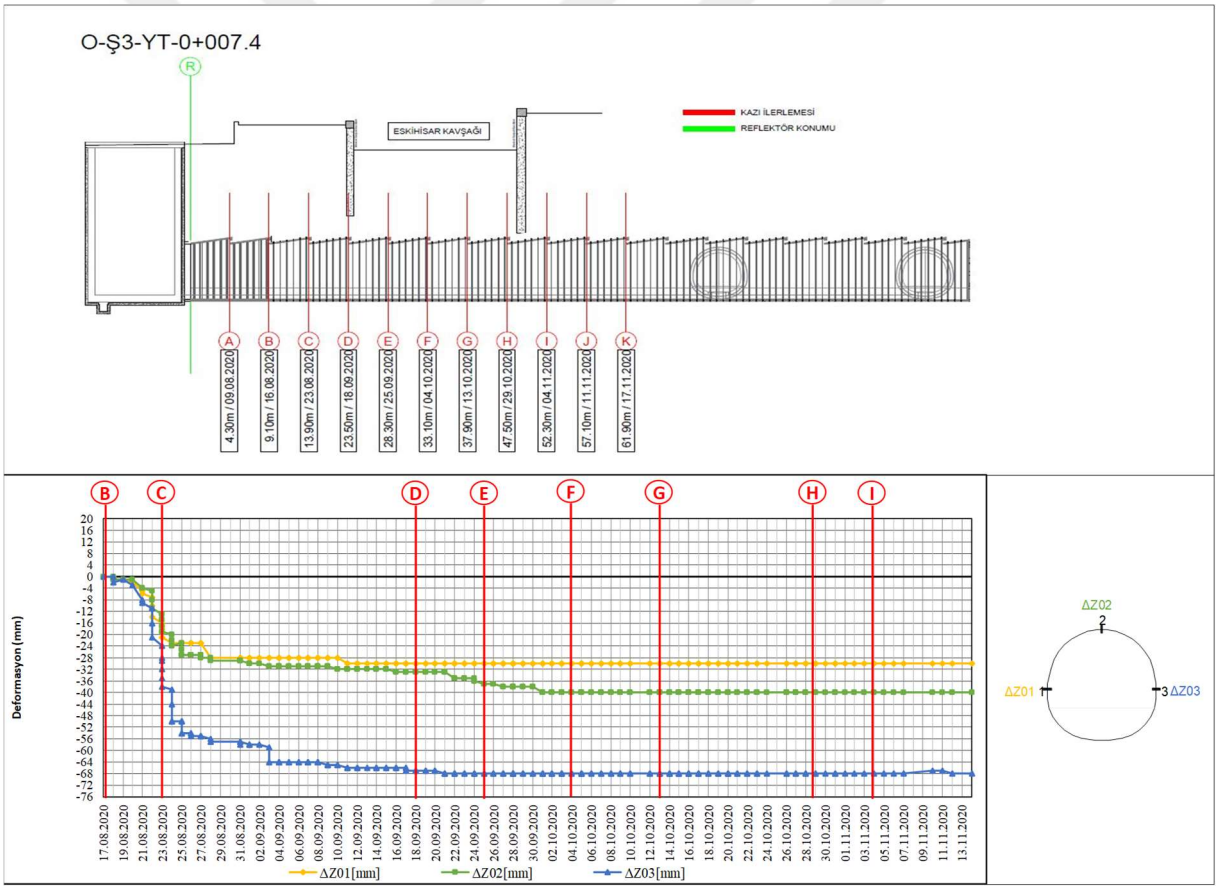


Şekil 3.14 : Deformasyon sonrası kazı-destek sistemi boy kesiti.

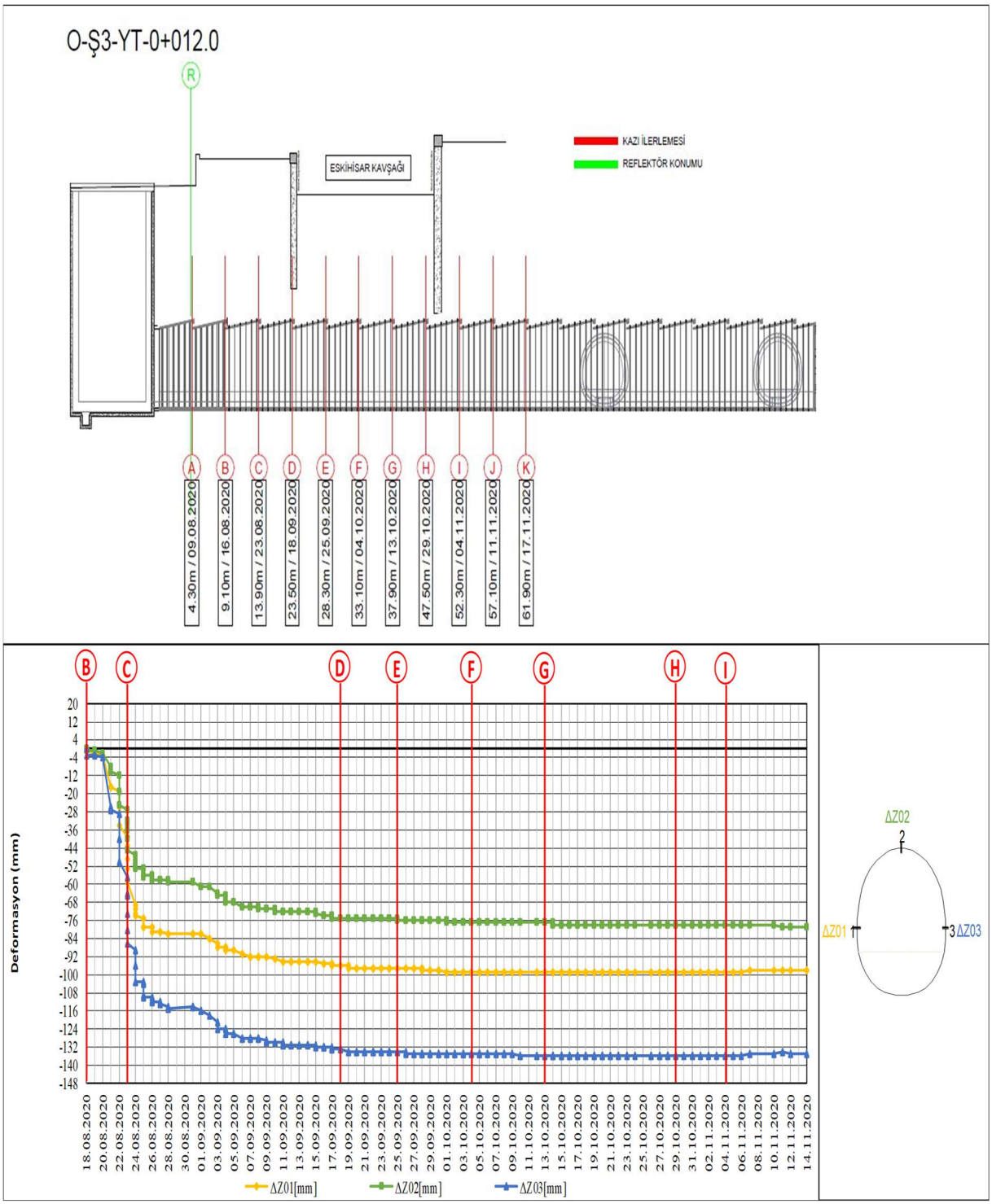
3.3 SAHA ÖLÇÜMLERİ

Çalışma kapsamında incelenen bölgede, Şaft-3 B5 yaklaşım tüneli içerisine ve Eskihisar Kavşağı iksa kazıklarına, deformasyonları kontrol edebilmek ve olası tehlikeleri önceden fark ederek önüne geçilmesini sağlamak amacı ile reflektörler ve oturma bulonları yerleştirilmiştir.

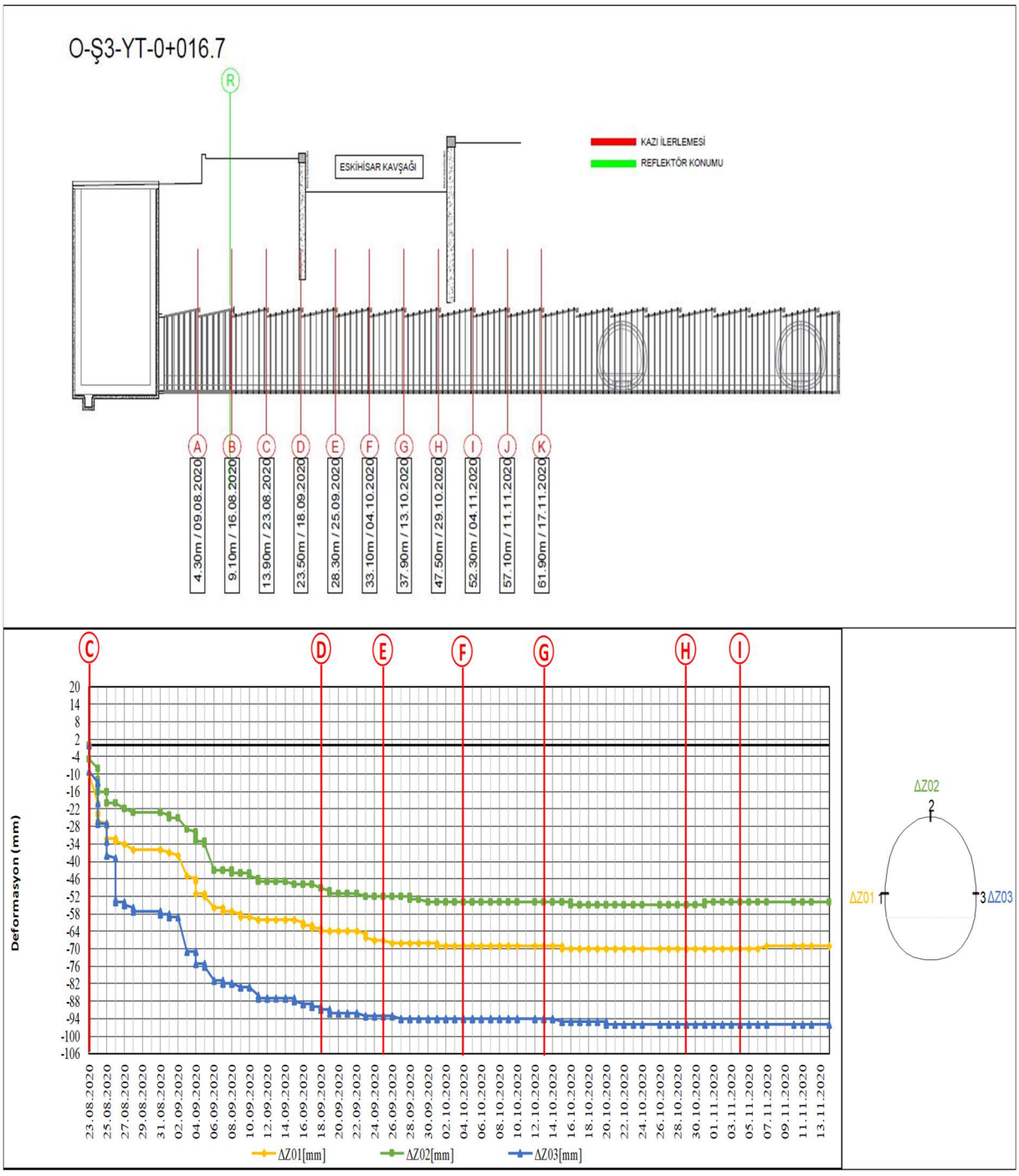
Reflektörler tünelin taç ve yan bölgeleri olmak üzere her bir ano başlangıcında 3 adet yerleştirilmiş ve belirlenen tarihlerde bu reflektörlerden deformasyon değerleri okunmuştur. Kazı ilerlemesine göre tünel içerisinde oluşan deformasyonları gösteren grafikler aşağıda yer almaktadır.



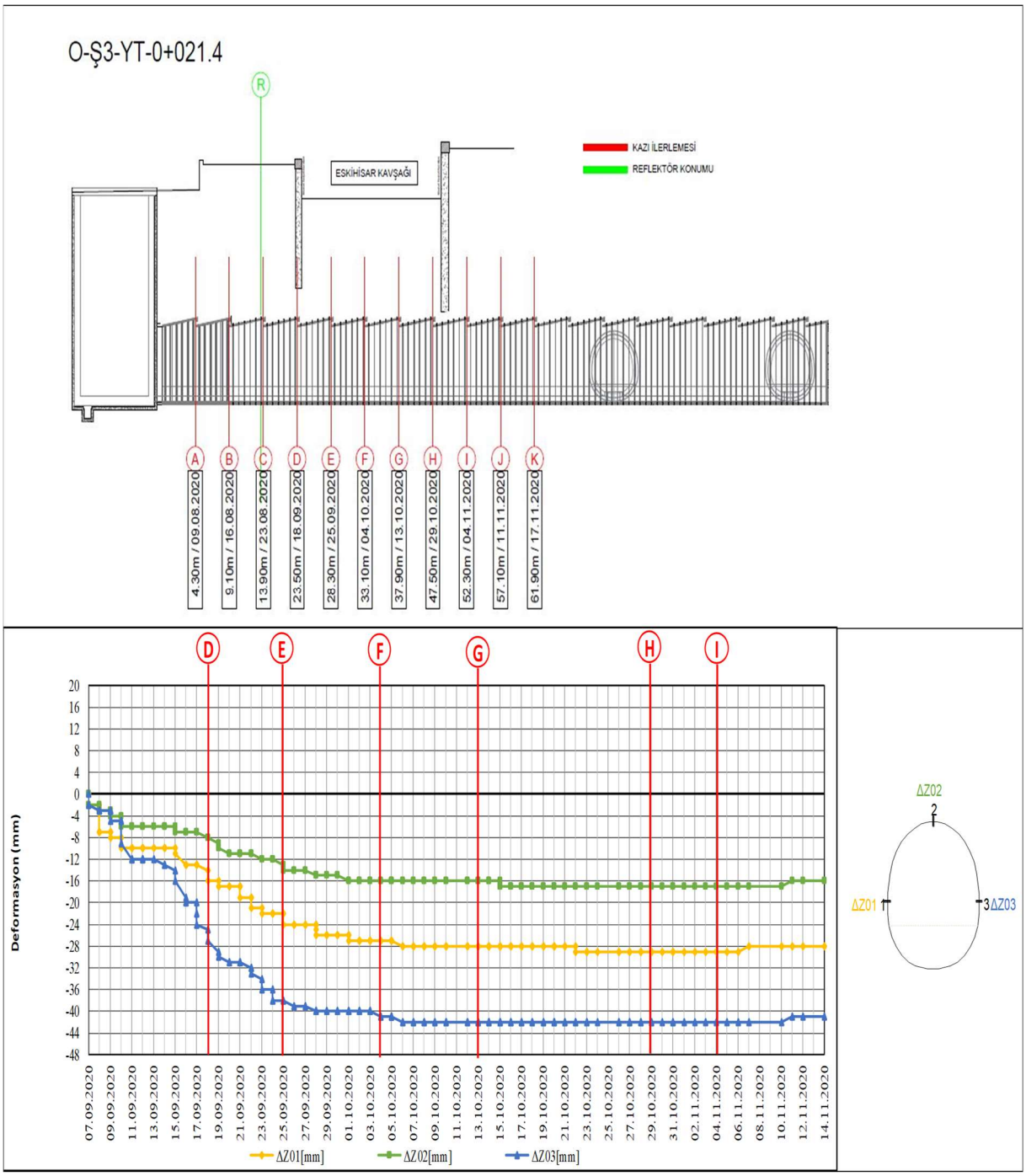
Şekil 3.15: O-Ş3-YT-0+007.4 No'lu reflektör ölçümleri.



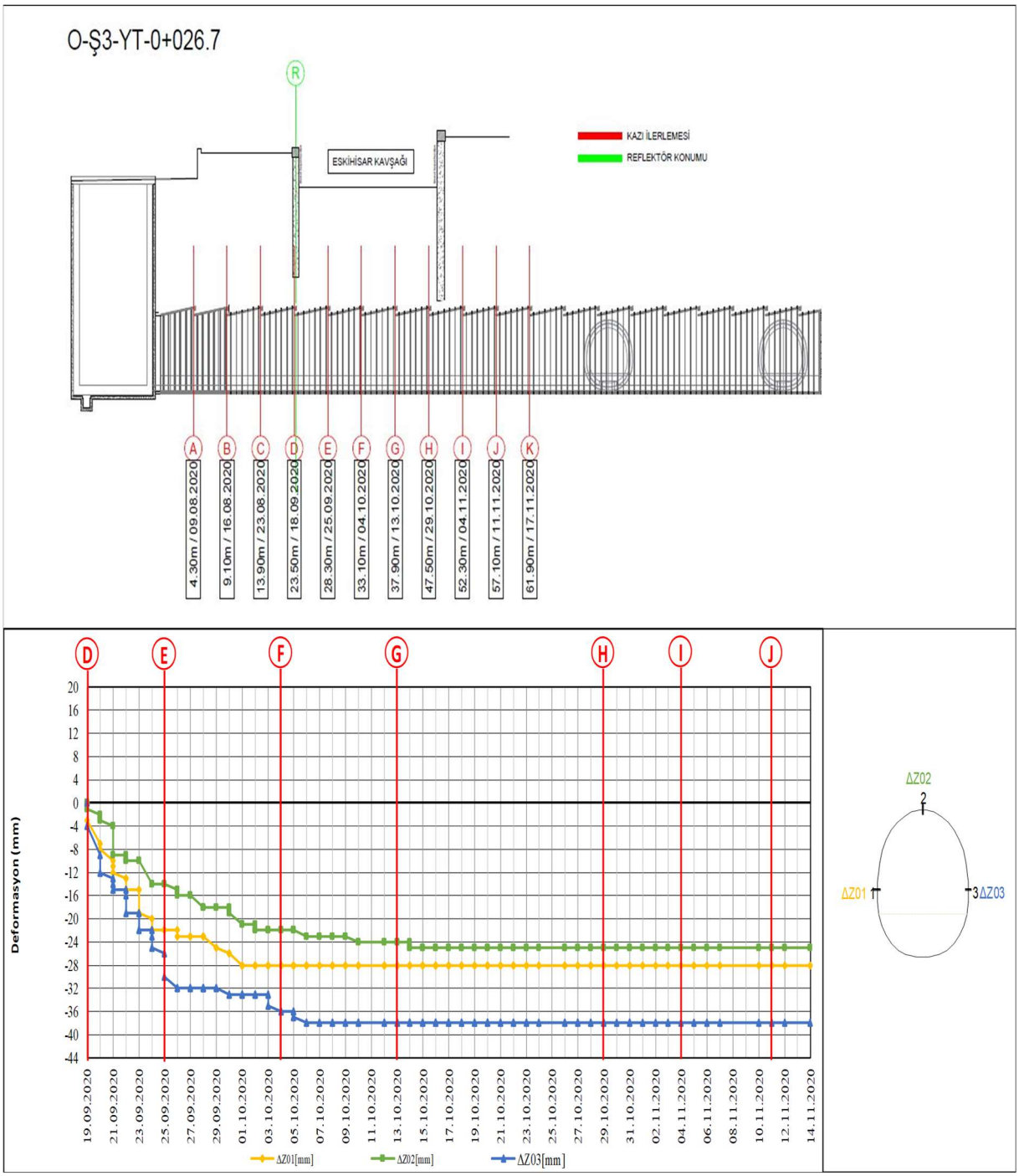
Şekil 3.16: O-Ş3-YT-0+012.0 No'lu reflektör ölçümleri.



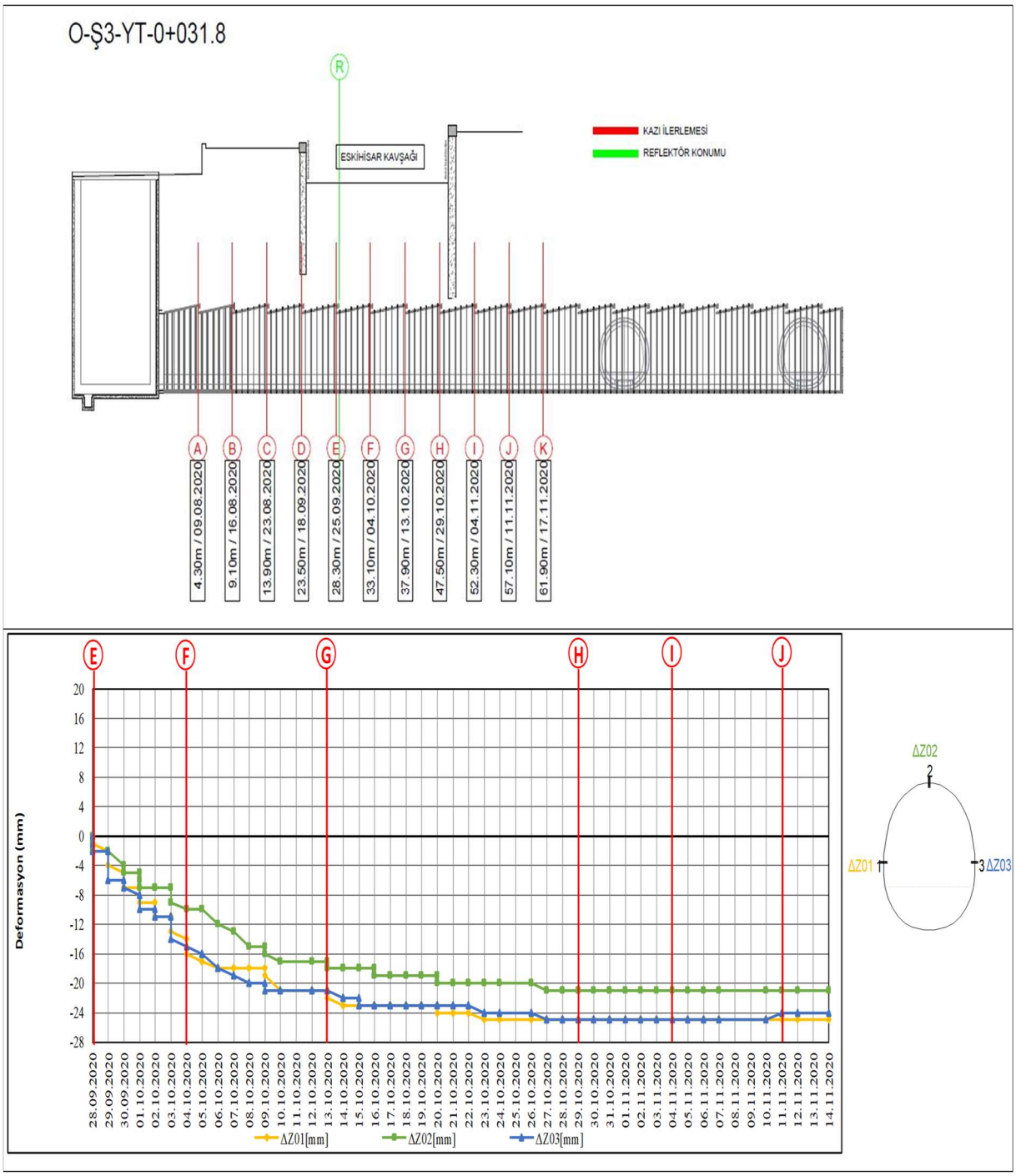
Şekil 3.17: O-Ş3-YT-0+016.7 No'lu reflektör ölçümleri.



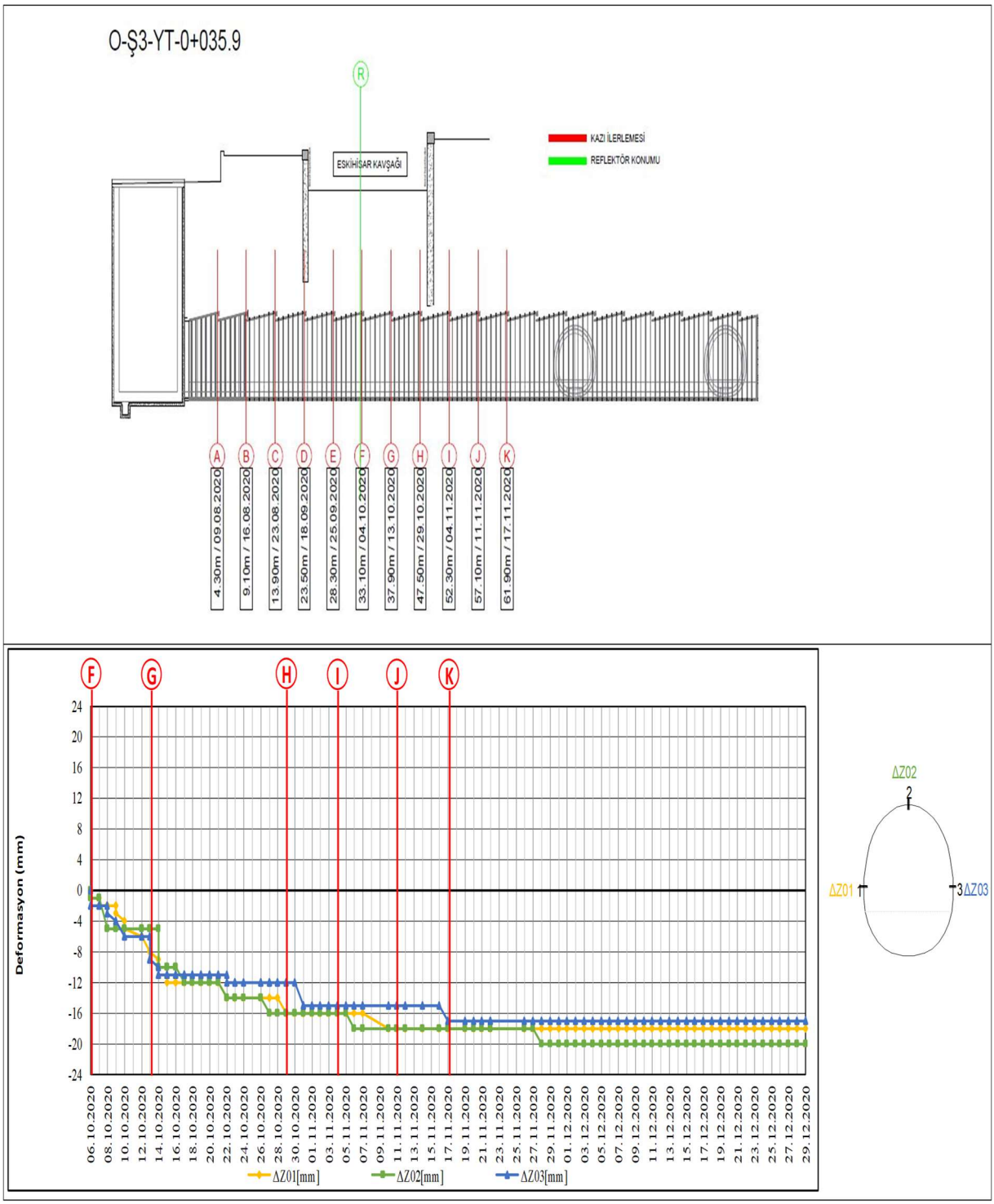
Şekil 3.18: O-Ş3-YT-0+021.4 No'lu reflektör ölçümleri.



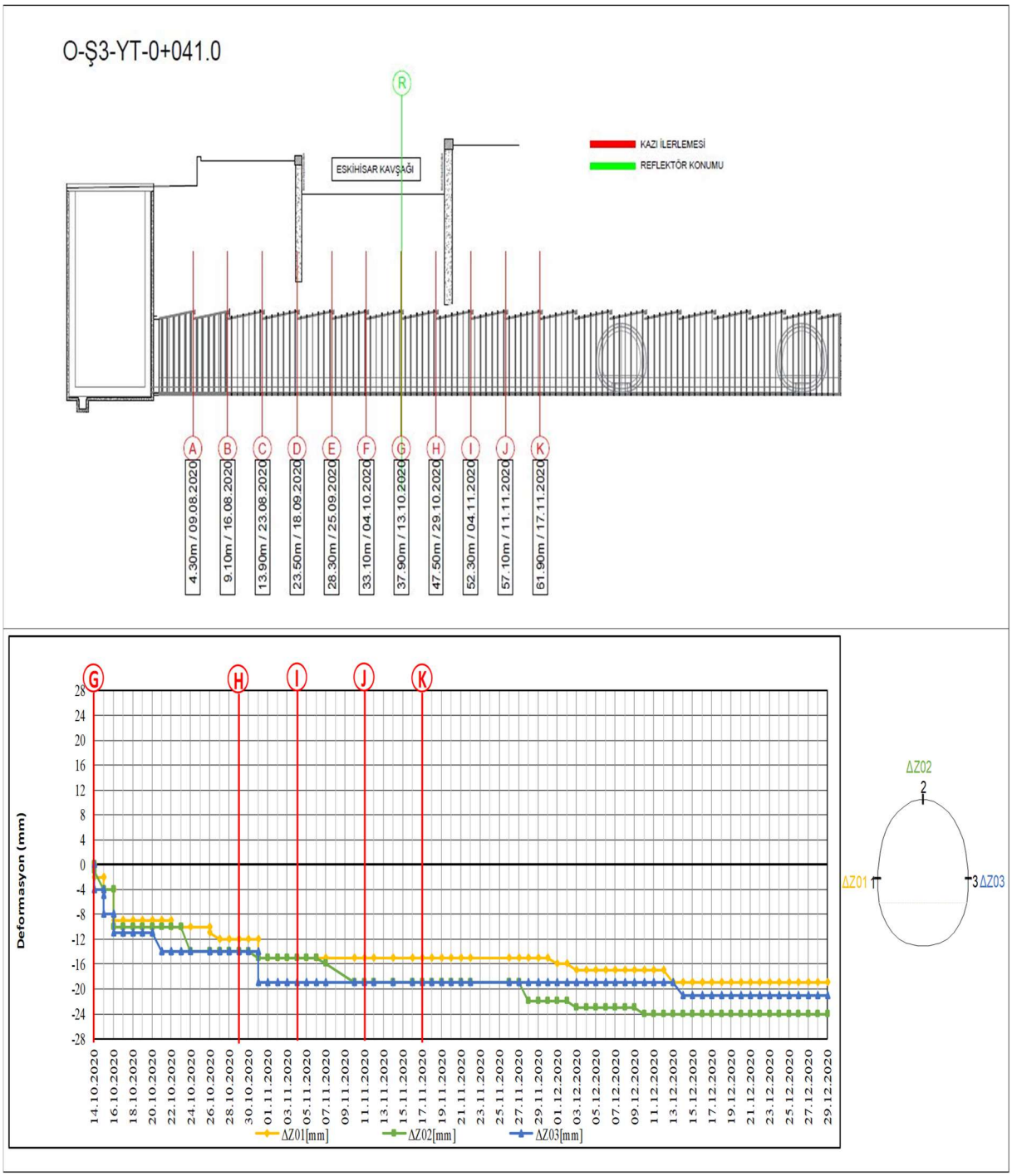
Şekil 3.19: O-Ş3-YT-0+026.7 No'lu reflektör ölçümleri.



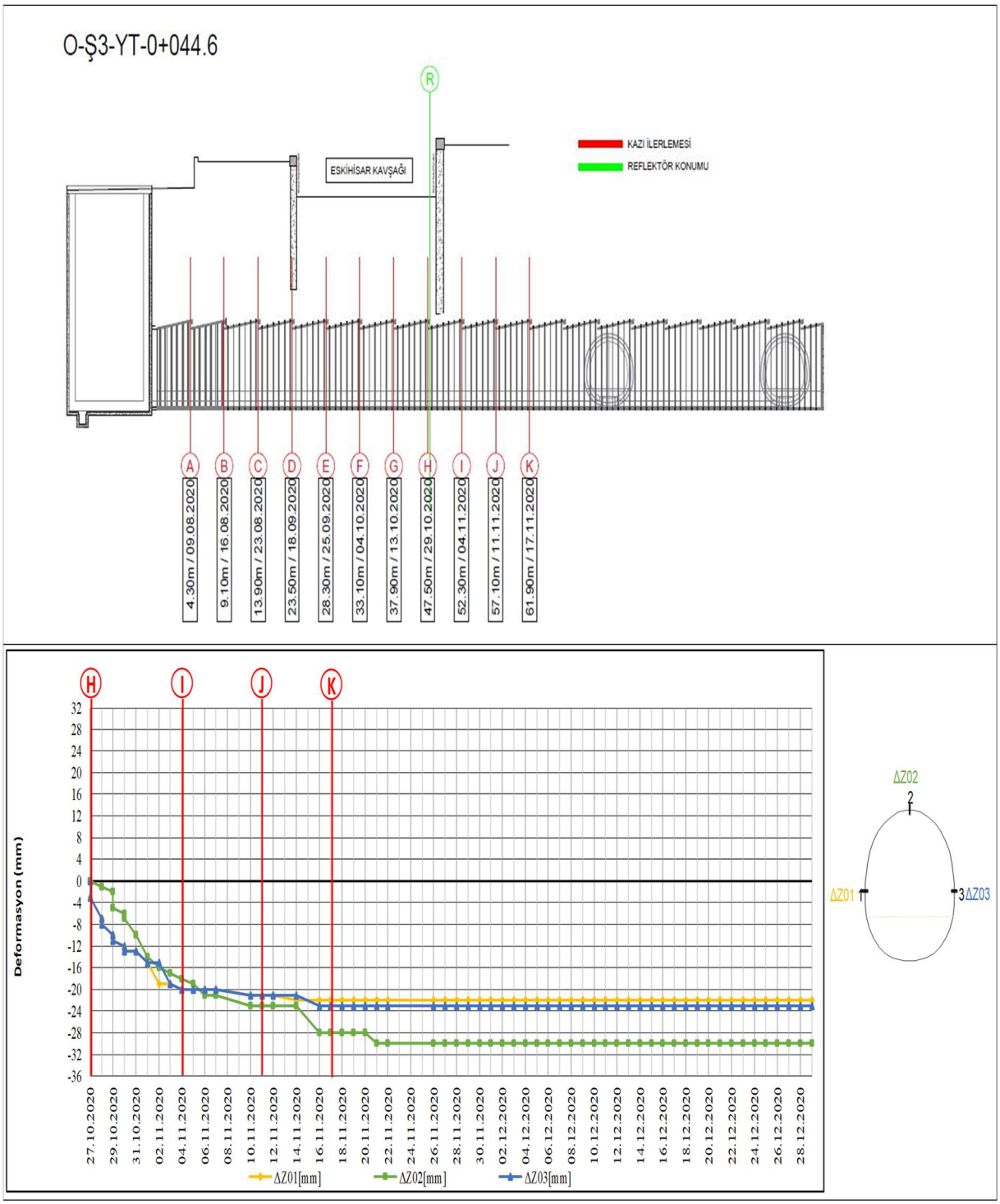
Şekil 3.20: O-Ş3-YT-0+031.8 No'lu reflektör ölçümleri.



Şekil 3.21: O-Ş3-YT-0+035.9 No'lu reflektör ölçümleri.



Şekil 3.22: O-Ş3-YT-0+041.0 No'lu reflektör ölçümleri.

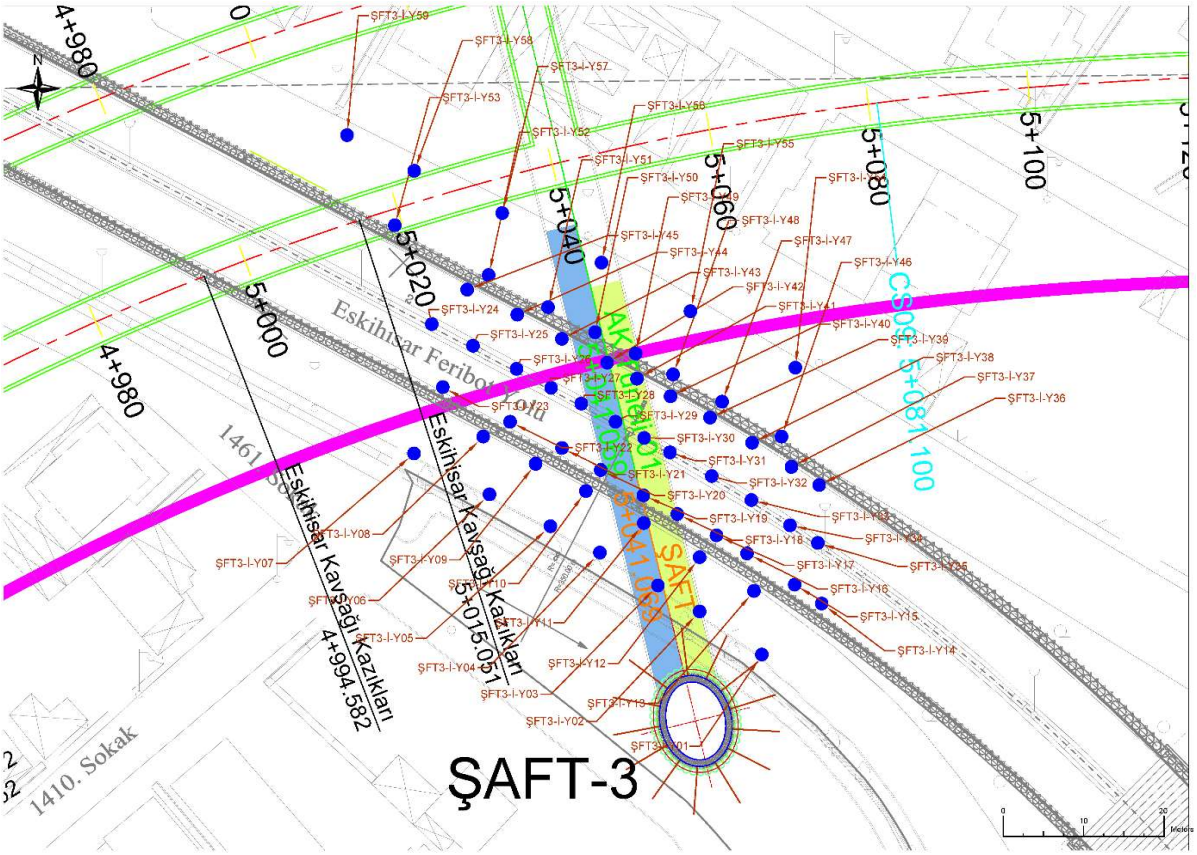


Şekil 3.23: O-Ş3-YT-0+044.6 No'lu reflektör ölçümleri.

Yukarıda yer alan grafikler, her bir kazı anosu başlangıcına yerleştirilen reflektörlerden, tünel kazı ilerlemesine göre okunan deformasyon değerlerini göstermektedir.

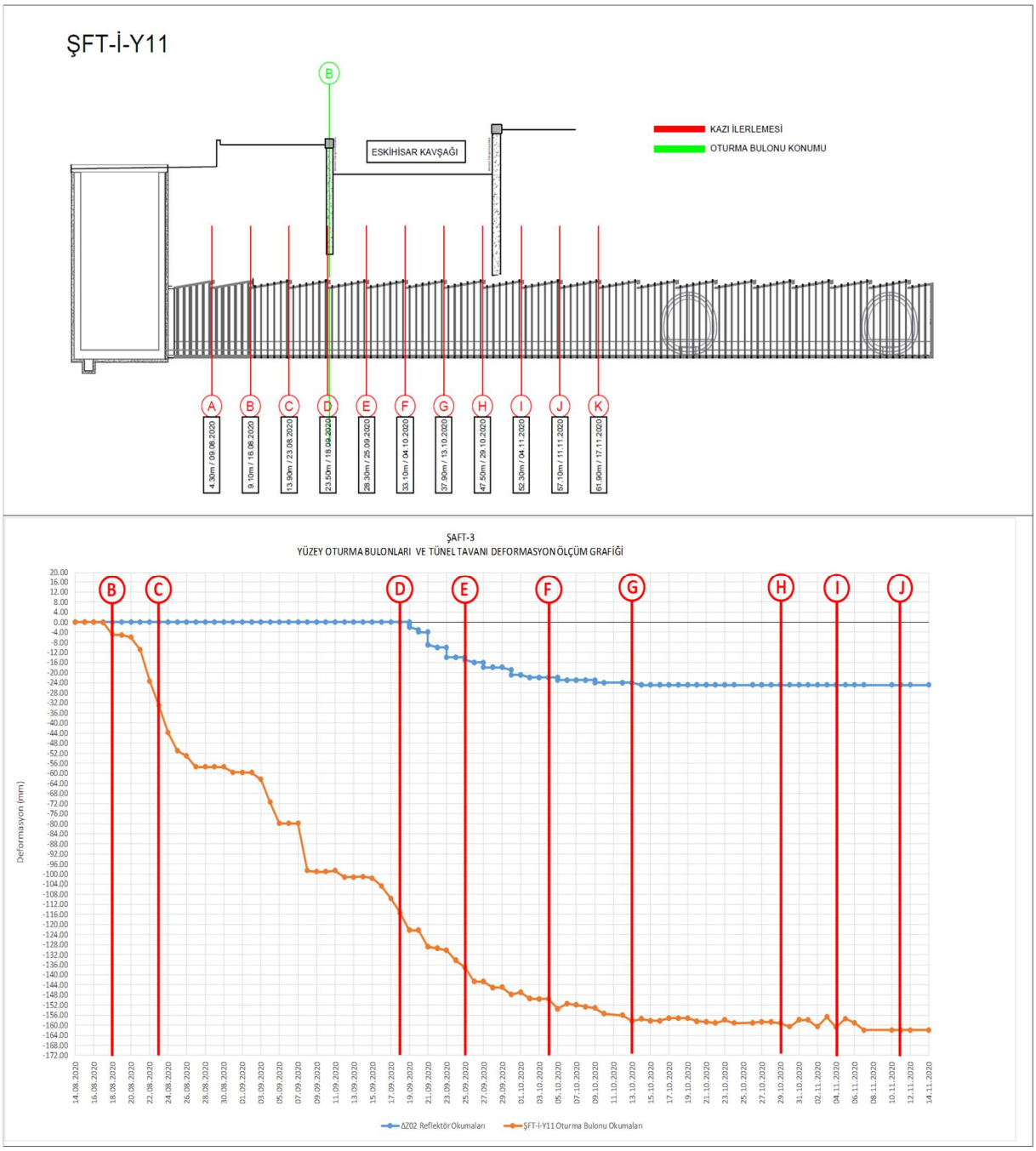
Şekil 3.15'te yer alan O-Ş3-YT-0+007.4 No'lu reflektör, ilk kazı anosu tamamlandıktan sonra tünel girişine yerleştirilmiş reflektördür. Grafiğe göre, tünel kazısı 2. kazı anosu ve 3. kazı anosu arasında iken, bir başka deyişle "B" ve "C" noktaları arasında iken, reflektörden okunan deformasyon değerleri ani bir artış göstererek, tünel tavanında 20 mm 'ye ulaşmıştır. Aynı kazı aşamasında, Şekil 3.16'da yer alan O-Ş3-YT-0+012.0 No'lu reflektör (2. kazı anosunun başına yerleştirilen reflektör) ölçümlerinde de benzer bir ani deformasyon artışı gözlemlenmiş ve bu değer 45 mm olarak okunmuştur. Aynı durumlar için maksimum deplasmanlar ise tünel omzunun sağ tarafında yer alan ΔZ03 reflektörlerinde sırasıyla 40 mm ve 84 mm olarak okunmuştur. Sahada gözlemlenen bu ani deformasyon artışlarına önlem olarak, yukarıdaki bölümlerde de bahsedildiği gibi daha rijit bir kazı-destek sistemi uygulanmasına karar verilmiştir. Tünel kazısı, kazı adımları sabit kalacak şekilde, yavaşlatılarak devam etmiştir.

Şaft-3 B5 yaklaşım tüneli imalatları sırasında, tünel güzergahının halihazırda araç trafiğine açık olan Eskihisar Kavşağı'nın altından geçmesi sebebiyle, yüzeyde oluşabilecek deformasyonların tayini için ise kavşağın iksa kazıklarına toplam 59 adet oturma bulonu yerleştirilmiştir. Belirli tarihlerde alınan okumalar sayesinde yüzey oturmaları takip edilebilmiş ve büyük problemler ile karşılaşılmadan gerekli önlemler alınabilmiştir. Oturma bulonlarının montaj planını gösteren çizim Şekil 3.24'de yer almaktadır.

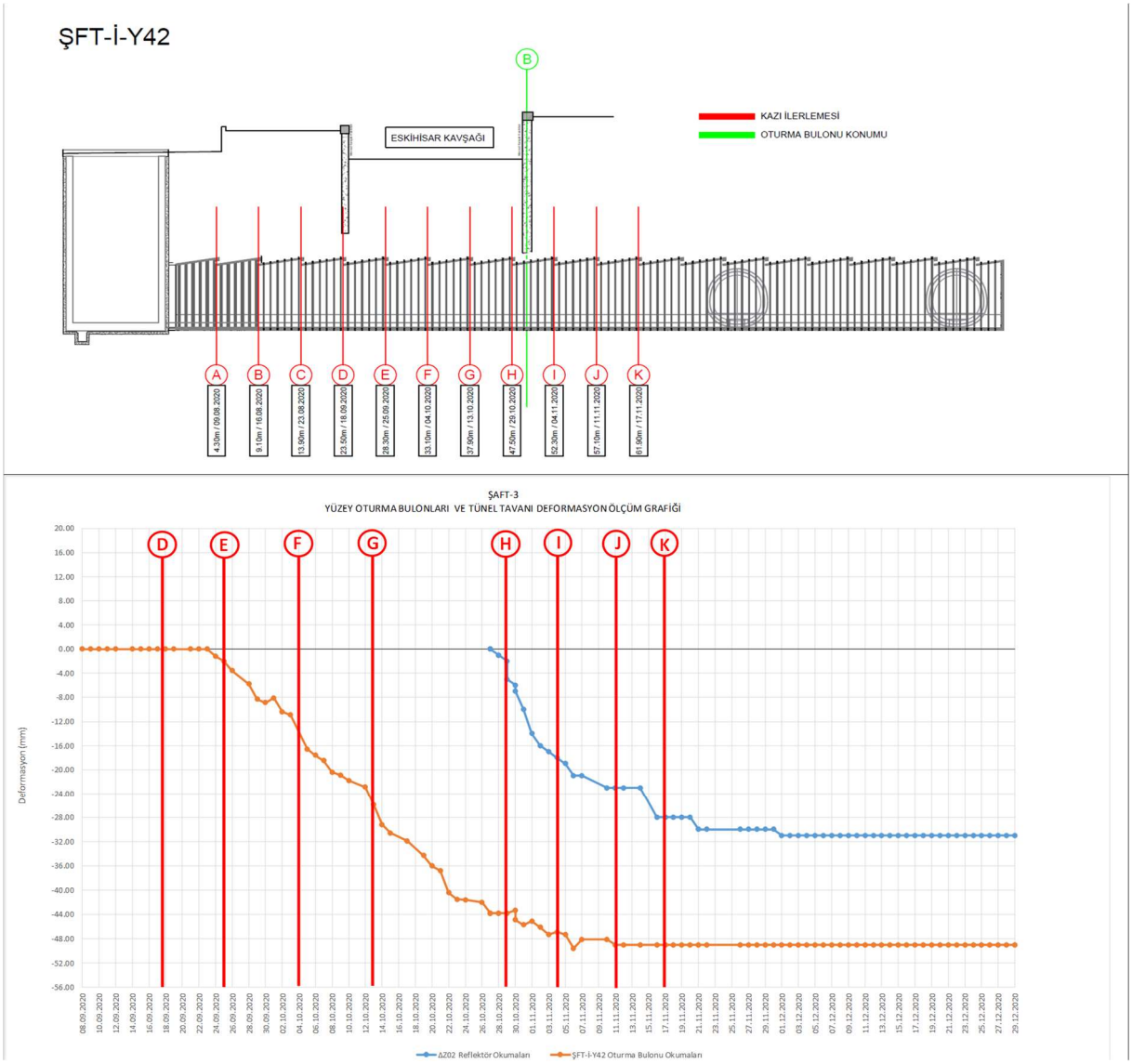


Şekil 3.24: Oturma bulonları montaj planı.

Yerleştirilen oturma bulonlarından en kritik oturma değerleri, Eskihisar Kavşağı iksa kazıklarına denk gelen ŞFT3-İ-Y09, ŞFT3-İ-Y10, ŞFT3-İ-Y11 ve ŞFT3-İ-Y12 ‘de okunmuştur. Bu dört bulon arasında daha yüksek değerlere ulaşılan ŞFT3-İ-Y11 numaralı bulona ait, kazı ilerlemesine göre oturma-zaman grafiği ile O-Ş3-YT-0+026.7 No'lu reflektöre ait deformasyon-zaman grafiği Şekil 3.25’de yer almaktadır.



Şekil 3.25: Kazı ilerlemesine göre ŞFT3-İ-Y11 oturma-zaman ve O-Ş3-YT-0+026.7 deformasyon – zaman grafiği.



Şekil 3.26: Kazı ilerlemesine göre ŞFT3-İ-Y42 oturma-zaman ve O-Ş3-YT-0+044.6 deformasyon – zaman grafiği.

Yukarıda yer alan grafiklerden de anlaşılacağı üzere, tünel içerisinde ve yüzeyde gözlemlenen deformasyonların ardından kullanılması kararlaştırılan kazı-destek sistemi sayesinde söz konusu deformasyonlar sönümlenebilmiştir. Bu deformasyon artışlarının önüne geçilmesinde en önemli faktörlerden birinin ilk başlarda tek sıra uygulanan *"umbrella arch"* sisteminin çift sıra olarak uygulanmaya başlanması olduğu anlaşılmaktadır.

3.4 SAYISAL MODELLEME

Karmaşık mühendislik problemlerinin çözümlerinde çoğu zaman analitik yöntemler yeterli kalmamaktadır. Bu nedenle çeşitli sayısal yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Günümüzde ilerleyen teknoloji sayesinde mühendislik problemlerinin çözümünde çeşitli yazılımlar aracılığı ile sayısal yöntemler kullanılabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi de karmaşık mühendislik problemlerinde analitik yöntemlerin yeterliği kalmadığı durumlarda, başvurulan sayısal yöntemlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminde yapının bulunduğu ortam sürekli ortam olarak tanımlanmakta, ortamda bulunan süreksizlikler ayrıca modele dahil edilebilmektedir. Ortamda bulunan her malzemeye gerilme-şekil değiştirme davranışı tanımlandıktan sonra ortam, birbirlerine düğüm noktası adı verilen bölgelerden bağlanan, küçük parçalara bölünmektedir. Düğüm noktalarından bağlanan bu küçük parçalar birleşerek *"mesh"* adı verilen bir ağ oluşturmaktadırlar. Her bir elemana gerilme-şekil değiştirme etkitilmekte ve bünye bağıntıları ile komşu elemanlara iletilmektedir. Bu sayede her bir düğüm noktasında ki yer değiştirme hesaplanabilmektedir.

Çalışma kapsamında incelenen bölge Midas GTS NX programında hem 3 boyutlu hem de 2 boyutlu olarak modellenmiş ve modeller üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile analizler gerçekleştirilerek sonuçlar saha ölçümleri ile karşılaştırılmıştır.

Midas GTS NX, zemin ve kaya deformasyonu ve stabilitesinin yanı sıra yeraltı suyu akışı, dinamik titreşimler ve zemin-yapı etkileşiminin 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak gelişmiş geoteknik analizlerinin yapılabildiği sonlu elemanlar analiz yazılımıdır.

Çalışma kapsamında Şaft-3 B5 yaklaşım tünelinin ilk 60 m'lik bölümü deformasyonların en yüksek değerlere ulaştığı kısım olduğundan 2 boyutlu ve 3 boyutlu analizler bu bölgenin modellenmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Nümerik olarak Midas GTS NX programında kazı destek sistemi simüle edilirken elastik davranış gösteren *"beam"* materyali seçilmiştir. Modeller üzerinde kazı destek sistemi için tanımlanan bu *"beam"* materyaller, kullanılan beton tipi, kalınlığı ve kullanılan iksa tipine göre

dayanımı değişiklik gösteren materyallerdir. Kazı adımı ve püskürtme betonun maturasyonuna bağlı olarak (2 günlük, 4 günlük ve 28 günlük olmak üzere) modelde 3 farklı *"beam"* materyal kullanılmıştır.

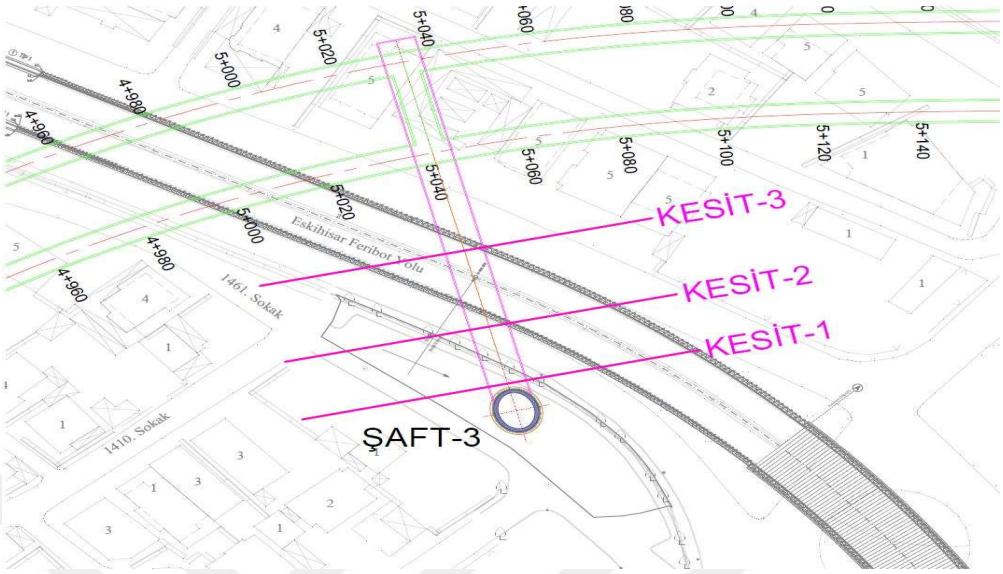
Tünel aynasına ve yanlarına uygulanan zemin çivileri ise *"embedded truss"* (nodal birleşim gerektirmeyen, çekme kuvveti alabilen 2 boyutlu yapısal eleman) olarak modellenmiştir.

3.4.1 2 Boyutlu Sayısal Modelleme

Çalışma kapsamında, Şaft-3 B5 yaklaşım tünelinin ilk 60 m'lik kısmında, saha okumalarından elde edilen grafikler ve 3 boyutlu analizler ile bir karşılaştırma yapabilmek adına 3 farklı kesit için 2 boyutlu analiz gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.19) Kesit -1 şaft imalatının tamamlanıp B5 yaklaşım tünelinin ilk metrelerini temsil etmektedir. Kesit-2, Eskihisar Kavşağı altından geçilen ve iksa kazıklarında maksimum deformasyon değerlerinin okunduğu kesit olup Kesit-3 tünelin ilerleyen metrelerinde deformasyonların sönümlendiği bölümü temsil etmektedir.

Midas GTS NX programı ile oluşturulan 2 Boyutlu sayısal modellerin tamamında 14.0m'lik örtü tabakası bulunmaktadır. Zemin-kaya ortamı 150 m yatay ve 75 m düşey olarak sınırlandırılmıştır.

Modellerin en üst katmanını oluşturan dolgu malzemesinin kalınlığı 6.5 m olarak kabul edilmiştir. Bu katmanın altındaki Sert kil tabakasının kalınlığı ise 68.5 m'dir. Yeraltı suyu seviyesi yaklaşık 9.5 m derinliktedir. B5 Yaklaşım tüneli boyunca zemin formasyonunda değişiklik gözlemlenmediğinden dolayı her 3 kesit için de aynı zemin parametreleri kullanılmıştır.



Şekil 3.27: 2 Boyutlu analiz kesitleri.

Kontrol edilecek kazı kesitinin tünel ayna yüzeyinden olan uzaklığı ile destek sistemlerinin yerleştirilmesinin simülasyonu için iki boyutlu analizlerde kullanılan yöntemlerden biri "eşdeğer kazı kuvvetleri" olmaktadır. Bu "eşdeğer kuvvetler" orijinal durumundaki tünel kazı çevresine uygulanan litostatik yük nedeniyle oluşan kuvvetlerdir.

Hesaplamadaki "ayna etkisini" belirlemek için tünel çekirdeğine ait serbest bırakım yasasının tanımlanması gerektirmektedir. Bu serbest bırakım yasası tünel kavitesinin deformasyon artışları ile buna karşın destek sistemi üzerine gelecek basınçta azalmayı simüle edebilecek nitelikte olmalıdır. Bu amaçla analizlerde belirli bir rahatlama katsayısı kullanılarak üç boyutlu davranıştan düzlemsel davranışa geçiş sağlanmaktadır.

Panet ve Guenot (1982) yapmış olduğu çalışmada rahatlama katsayısı aşağıdaki formülle ifade etmişlerdir.

$$\lambda(x) = 0.28 + 0.72[1 - \left(\frac{0.84R}{x+0.84}\right)^2] \quad (3.4)$$

Burada;

R: Eşdeğer tünel yarıçapı

x: Tünel ilerleme adımı

olup ilerleme adımları saha koşullarında olduğu gibi arttırılarak, elde edilen rahatlama katsayıları her bir aşama için ayrı ayrı belirlenmektedir. Formülde de görülebileceği gibi rahatlama katsayısı tünel ilerleme adımı (x) ve eşdeğer tünel yarıçapına (R) bağlı bir katsayıdır. Kesit-1, Kesit-2 ve Kesit-3 modellerinde tünel geometrisinde ve tünel kazıları sırasında sahada ilerleme adımlarında herhangi bir değişiklik olmadığından dolayı, 3 analiz kesiti için de aşamalara bağlı olarak değişiklik gösterecek ferahlama katsayıları aynı olacaktır. 3 Kesit için de kullanılabilecek, her bir aşama için belirlenen rahatlama katsayıları ve kazı aşamaları Tablo 3.12'de yer almaktadır.

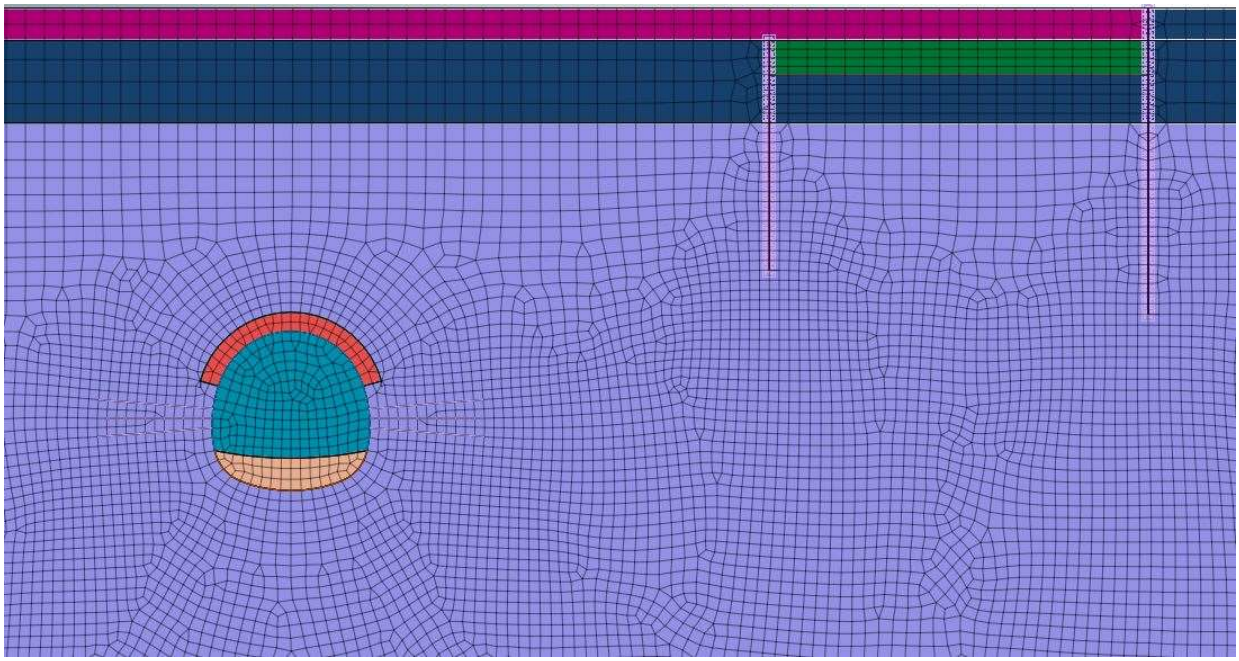
Rahatlama katsayıları Midas GTS NX programında, inşaat aşamaları tanımlanırken LDF (Load Distribution Factor) seçeneği ile her bir aşamaya ayrı ayrı tanımlanmıştır.

Tablo 3.12: Kazı aşamaları tanımı ve rahatlama katsayıları.

Kazı Aşaması	Aşama Tanımı	Toplam Tünel Aynası İlerlemesi (m)	Rahatlama Oranı, λ (%)	Püskürtme Beton Maturasyonu
Başlangıç	Geostatik durum	0	0	-
Aşama 1	Yol kazıklarının modellenmesi	0	0	-
Aşama 2	Yol kazıklarının aktif edilmesi ve sürşarj yükleri	0	0	-
Aşama 3	B5 tünel üst yarı kazısı + *"umbrella arch"* imalatları	0	30	-
Aşama 4	B5 tünel üst yarı 0.8m ilerleme	0.8	56	-
Aşama 5	B5 tünel üst yarı 0.8m ilerleme + zemin çivisi imalatları ve püskürtme beton ile iksa sisteminin aktif edilmesi.	1.6	70	2 gün
Aşama 6	B5 tünel üst yarı 1.6m ilerleme ve püskürtme beton ile iksa sisteminin aktif edilmesi.	3.2	83	4 gün
Aşama 7	B5 tünel üst yarı iç basıncının tamamen serbest bırakılması	30	100	28 gün
Aşama 8	B5 tünel alt yarı kazı + 1.6 m ilerleme ve püskürtme beton ile	1.6	100	2 gün
Aşama 9	B5 tünel alt yarı iç basıncının tamamen serbest bırakılması	30	100	28 gün

Kesit-1 Analizleri

Kesit -1, Şaft-3 kazı destek imalatlarının tamamlanıp B5 yaklaşım tüneli imalatlarının başlangıcı ile Eskihisar Kavşağı iksa kazıklarına kadar olan 19.2m'lik bölgeyi temsil etmektedir. Midas GTS NX programı aracılığı ile Kesit-1 için oluşturulan analiz modeli Şekil 3.20'de yer almaktadır.



Şekil 3.28: Kesit-1 analiz modeli.

Bölgede yer alan dolgu tabakası Mohr-Coulomb, altında yer alan TQk (sert kil) tabakasının davranışını simüle etmek içinse Hardening Soil malzeme modelleri kullanılmıştır. *"Umbrella arch"* imalatlarının oluşturduğu iyileştirilmiş bölge ise Mohr-Coulomb malzeme modeli ile modellenmiştir.

Modelde zemine ait parametrelerin belirlenmesi için Bölüm 3.2'de anlatıldığı gibi, sahada yapılan sondaj çalışmalarından ve deney sonuçlarından ve laboratuvar deneyleri sonuçlarından yararlanılmıştır. Zemin parametreleri Tablo 3.9'da yer aldığı gibi modellere tanımlanmıştır.

"Umbrella arch" sisteminin etkisiyle oluşan iyileştirilmiş bölgenin parametreleri ise Bölüm 2.3'de özetlenen literatür çalışmalarından faydalanarak belirlenmiştir. İyileştirilmiş bölgeye ait parametreler Tablo 3.13'te yer almaktadır.

Tablo 3.13: İyileştirilmiş bölge parametreleri.

γ, kN/m3	E ,mPa	E_oedref ,mPa	E_urref ,mPa	k_0	ψ, derece	φ , derece	c, kPa	ν
22	800	500	500	0.5	0	36	40	0.25

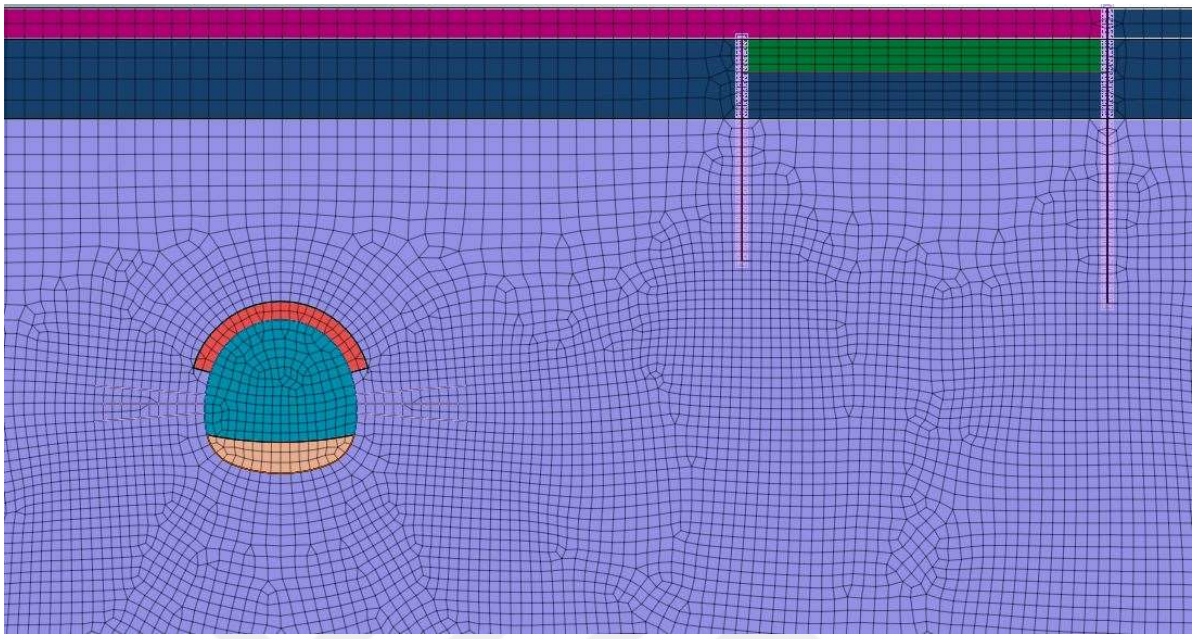
Kesit-1 için oluşturulan modelde tanımlanan yapısal elemanlara ait parametreler ise Tablo 3.14'te yer almaktadır.

Tablo 3.14: 2 Boyutlu modelde yapısal eleman parametreleri.

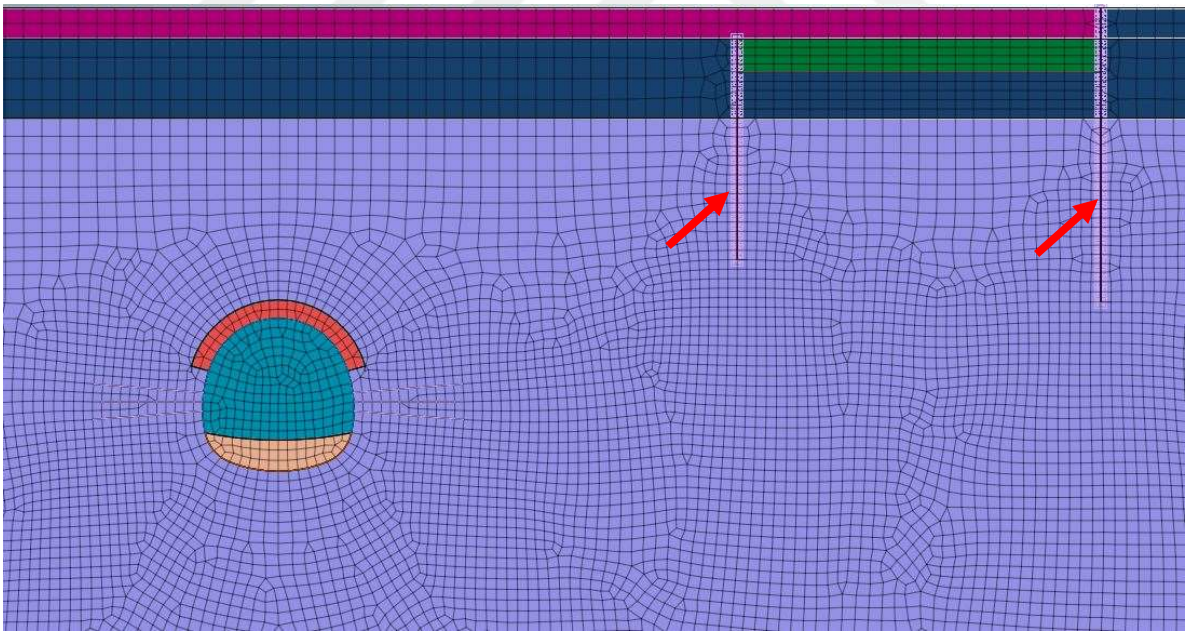
Yapısal eleman	EA kN/m	EI (kN m^2/m)	ν
Püskürtme beton (2 günlük maturasyon)	3.983E6	29.87E3	0.2
Püskürtme beton (4 günlük maturasyon)	5.730E6	42.97E3	0.2
Püskürtme beton (28 günlük maturasyon)	6.988E6	52.41E3	0.2
Kaya Bulonu (D=16mm)	111489	4.7103	0.15

Yukarıdaki bölümde de belirtildiği gibi rahatlama katsayıları Midas GTS NX programında, inşaat aşamaları tanımlanırken LDF (Load Distribution Factor) seçeneği ile her bir aşamaya Tablo 3.12'de yer alan değerler ile tanımlanmıştır.

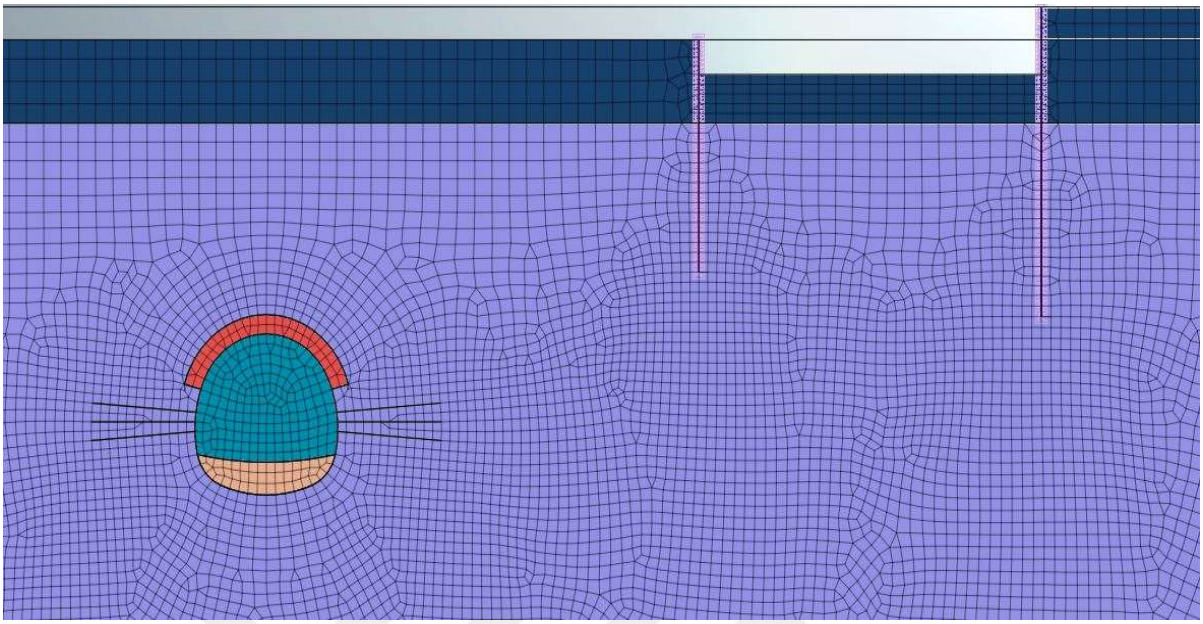
Yukarıda açıklanan parametreler ile oluşturulmuş 2 boyutlu sonlu elemanlar modelinde inşaat aşamaları saha çalışmalarına paralel olacak şekilde modellenmiştir. İnşaat aşamaları model görünüşleri sırasıyla aşağıda yer almaktadır.



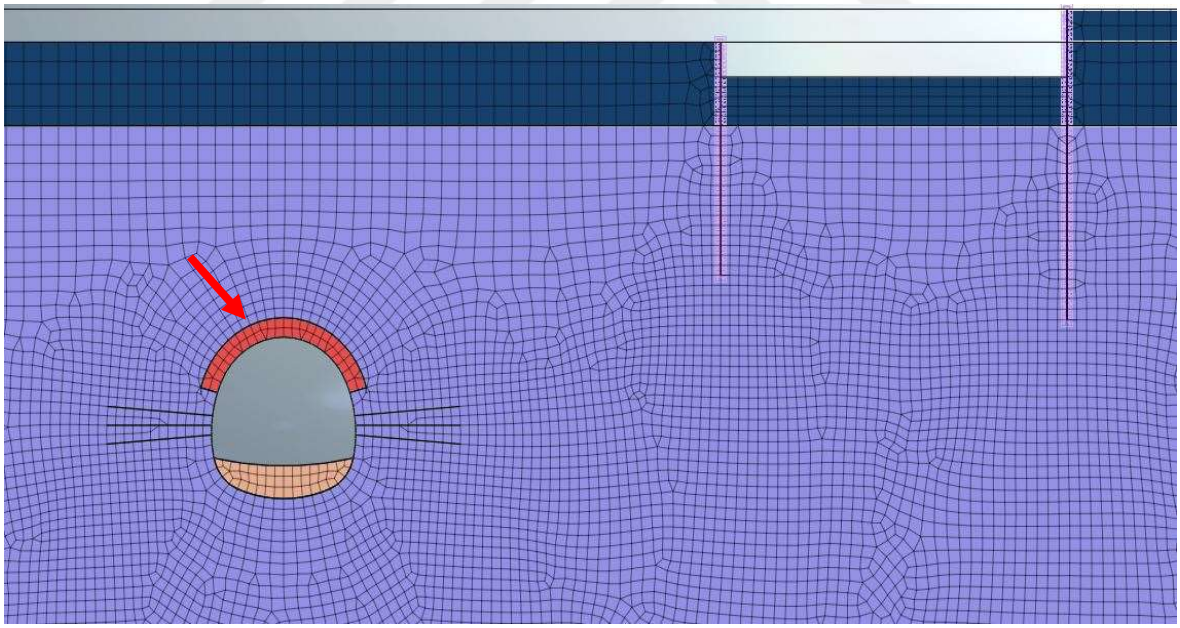
Şekil 3.29: Başlangıç aşaması, geostatik durum.



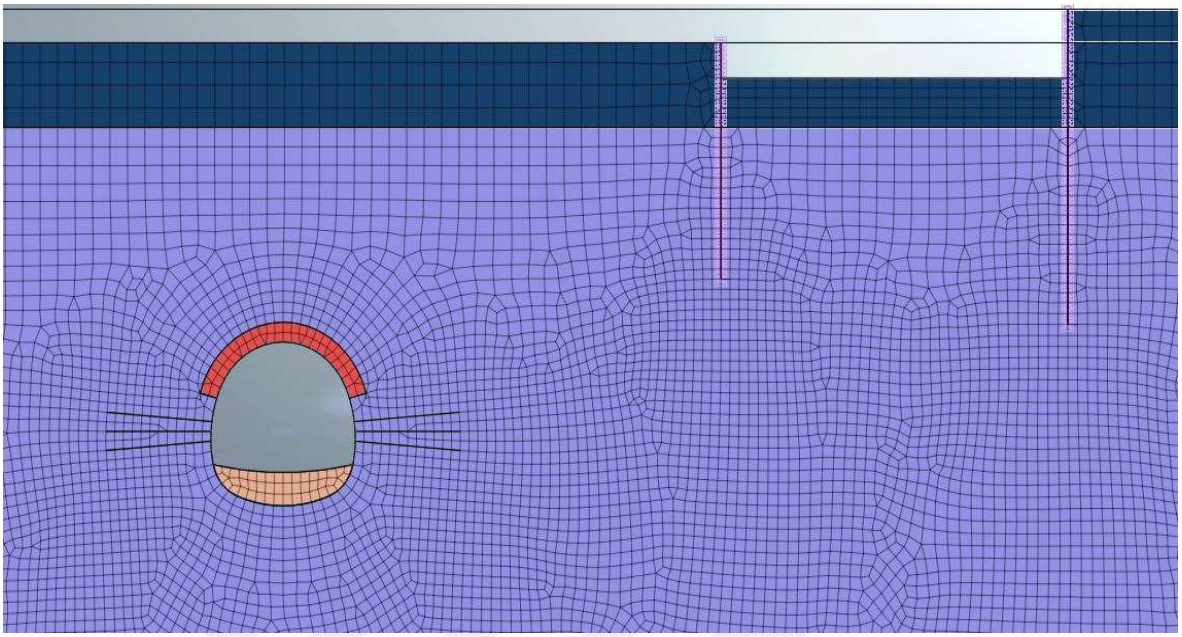
Şekil 3.30 : 1. aşama, yol kazıklarının modellenmesi.



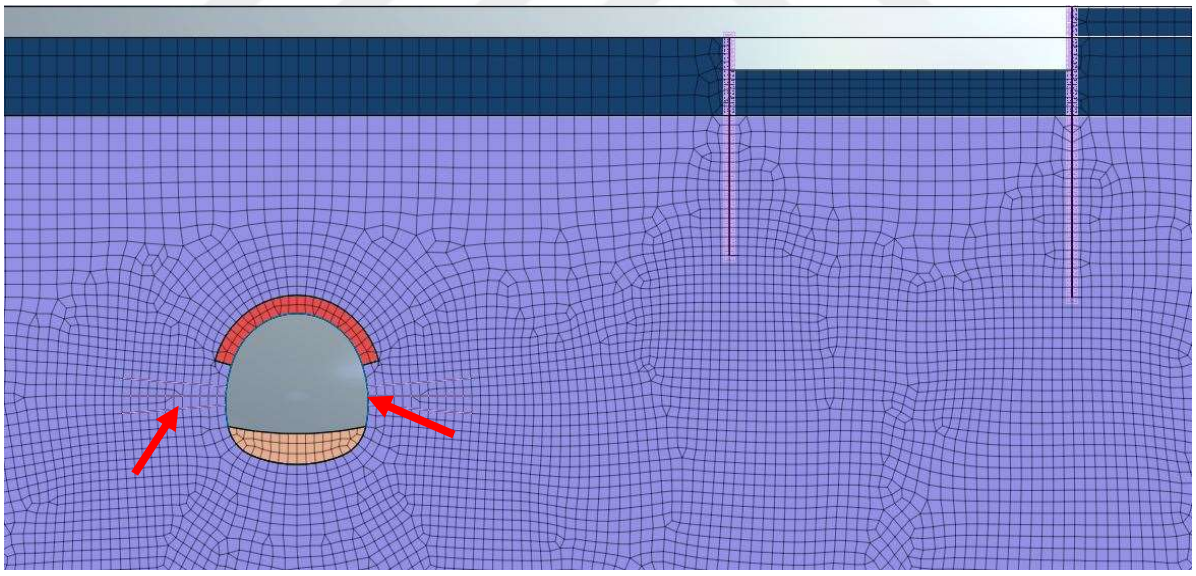
Şekil 3.31: 2. aşama, yol kazısının yapılması ve sürşarj yüklerinin aktif edilmesi.



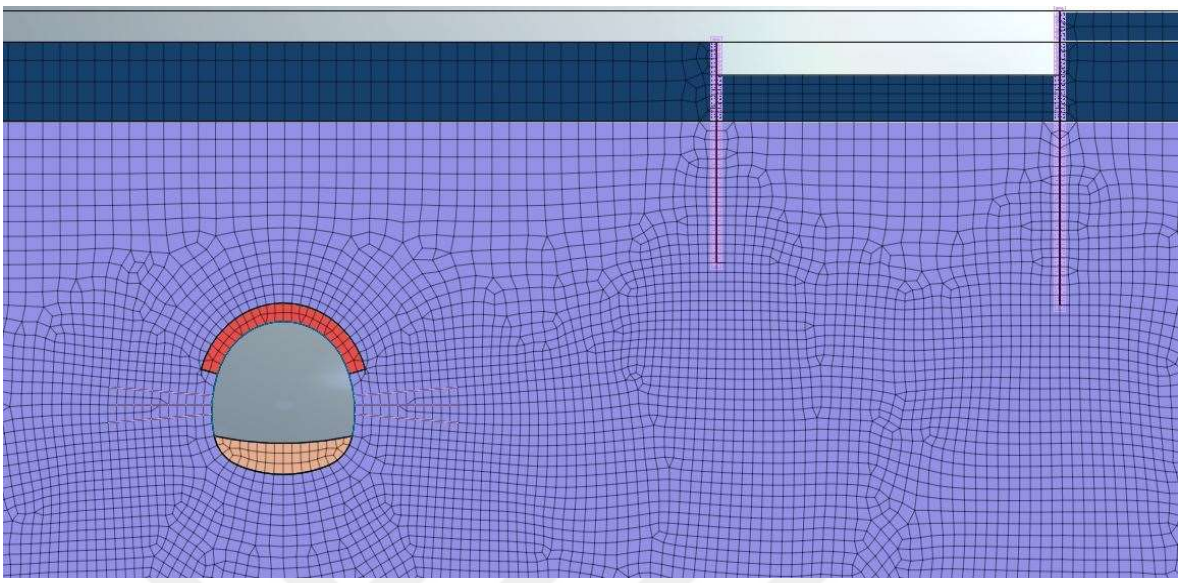
Şekil 3.32: 3. aşama, B5 tünel üst yarı kazısı + *"umbrella arch"* imalatı yapılması.



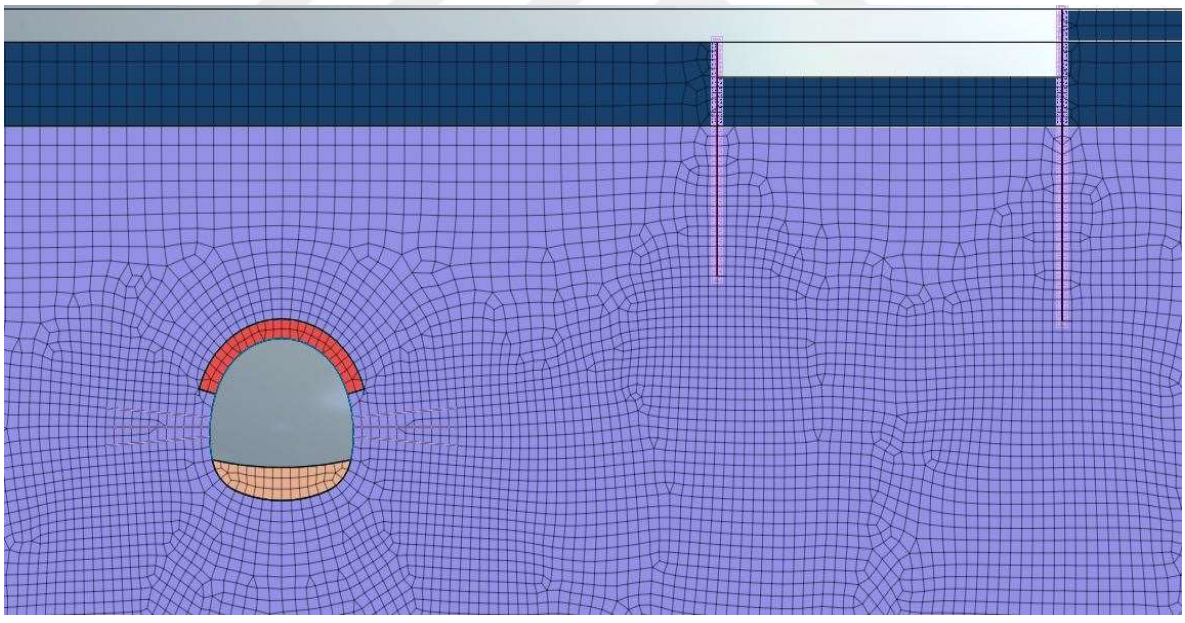
Şekil 3.33: 4.aşama, B5 tüneli üst yarı ilerlemesi (0.8m)



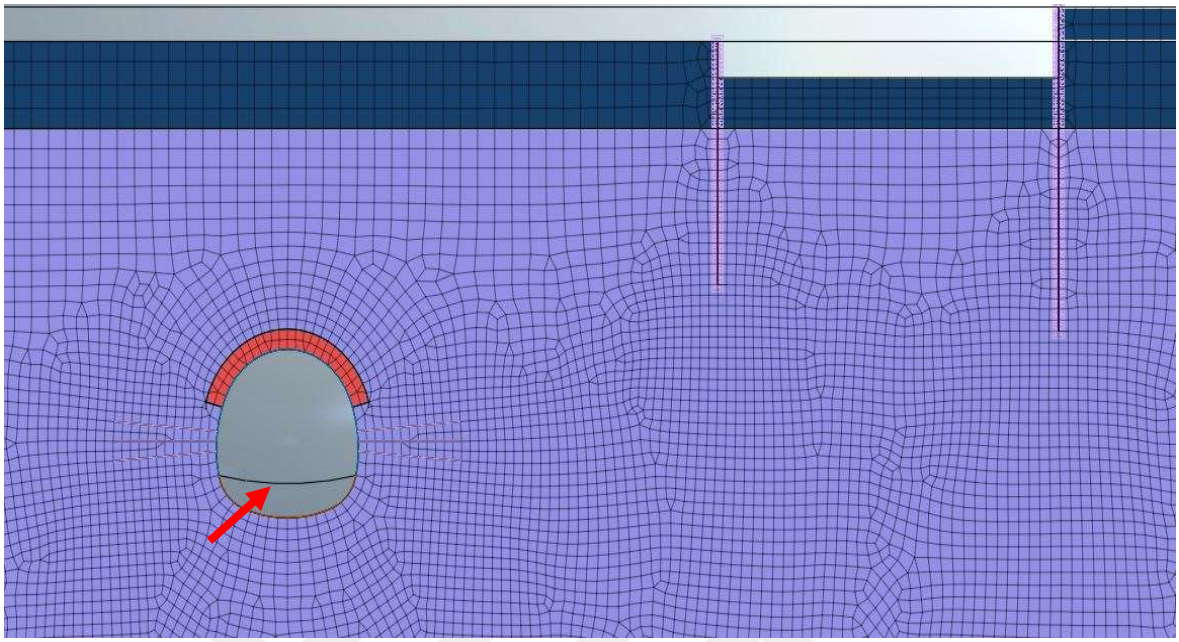
Şekil 3.34: 5. aşama, tünel üst yarı kafes iksa sistemi imalatı ve zemin çivisi imalatları.



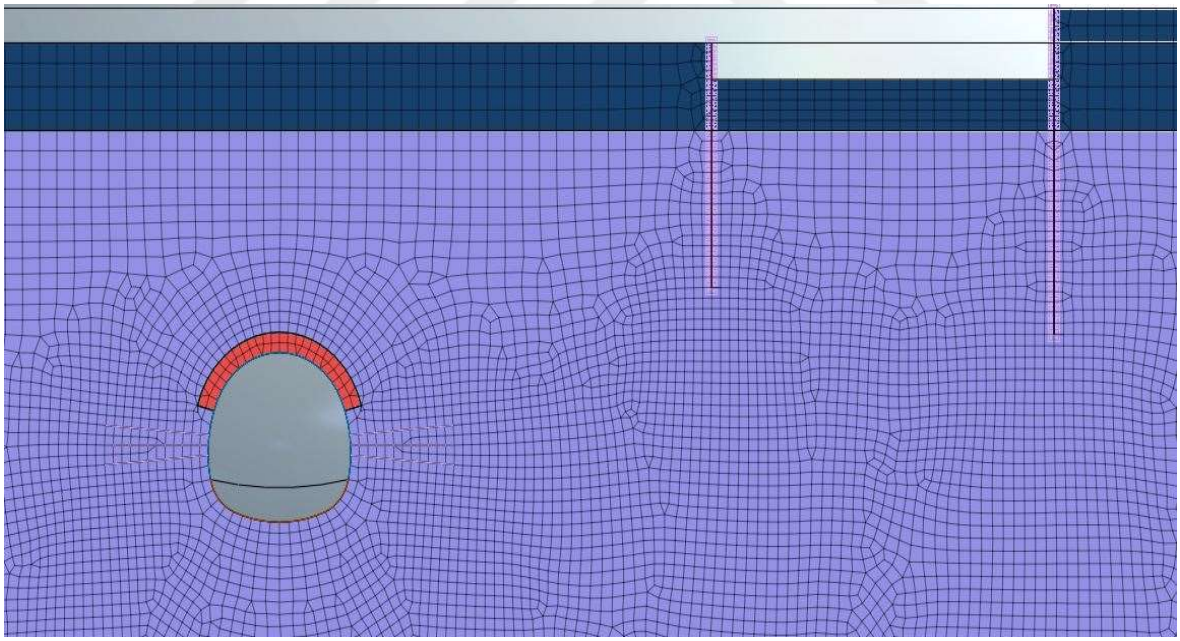
Şekil 3.35: 6. aşama, B5 tünel üst yarı kazı destek sistemi uygulaması. (4 günlük maturasyon)



Şekil 3.36: 7. aşama, üst yarı basıncının serbest bırakılması. (28 günlük maturasyon)



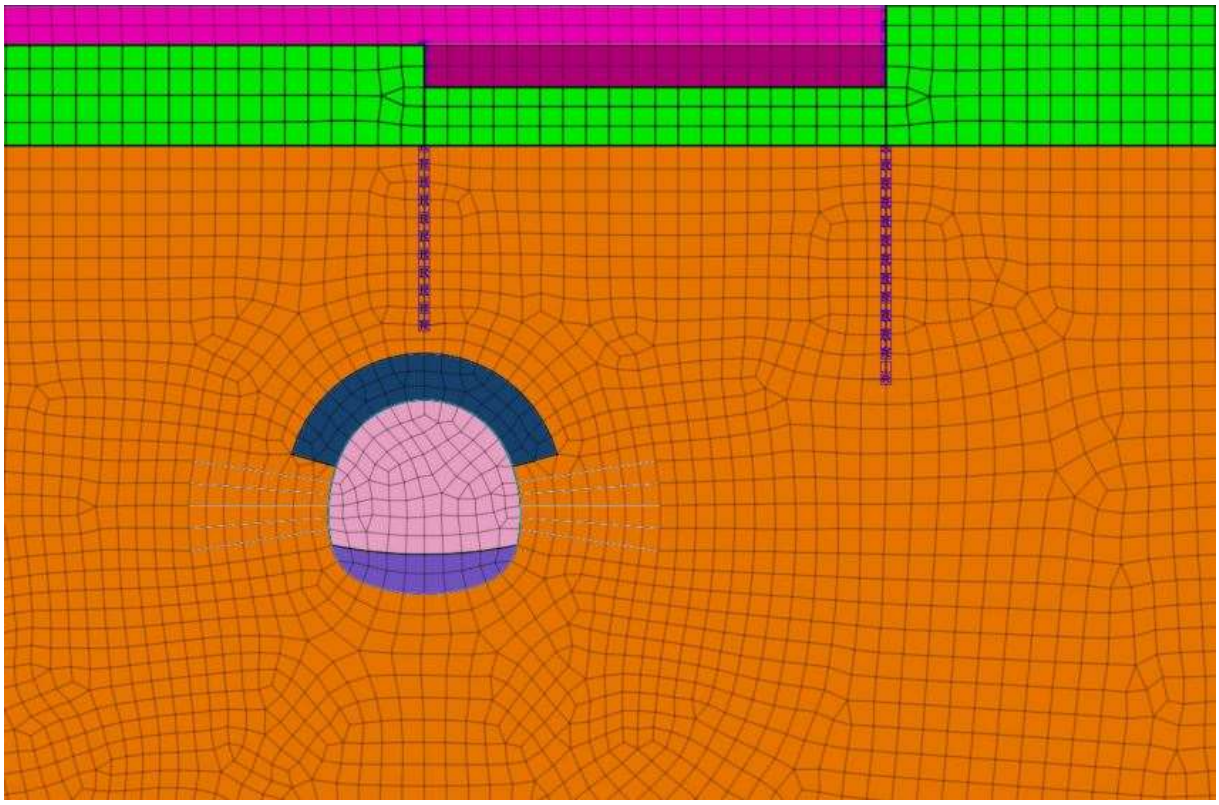
Şekil 3.37: 8. aşama, alt yarı kazısı ve kazı destek sistemi imalatları.



Şekil 3.38: 9. aşama, alt yarı iç basıncının tamamen serbest bırakılması. (28 günlük maturasyon)

Kesit -2 Analizleri

Kesit-2, B5 Yaklaşım Tüneli'nin Eskihisar Kavşağı iksa kazıkları ile ilk olarak etkileşime girdiği bölgede yer almaktadır. Kesit-2 için oluşturulan analiz modeli Şekil 3.31'de yer almaktadır.



Şekil 3.39: Kesit-2 analiz modeli.

Kesit-2 için oluşturulan modelde zemin parametreleri Tablo 3.9'da yer aldığı gibi modellere tanımlanmıştır.

Rahatlama katsayıları Kesit-1'de olduğu gibi inşaat aşamaları tanımlanırken LDF (Load Distribution Factor) seçeneği ile her bir aşamaya Tablo 3.12'de yer alan değerler ile tanımlanmıştır.

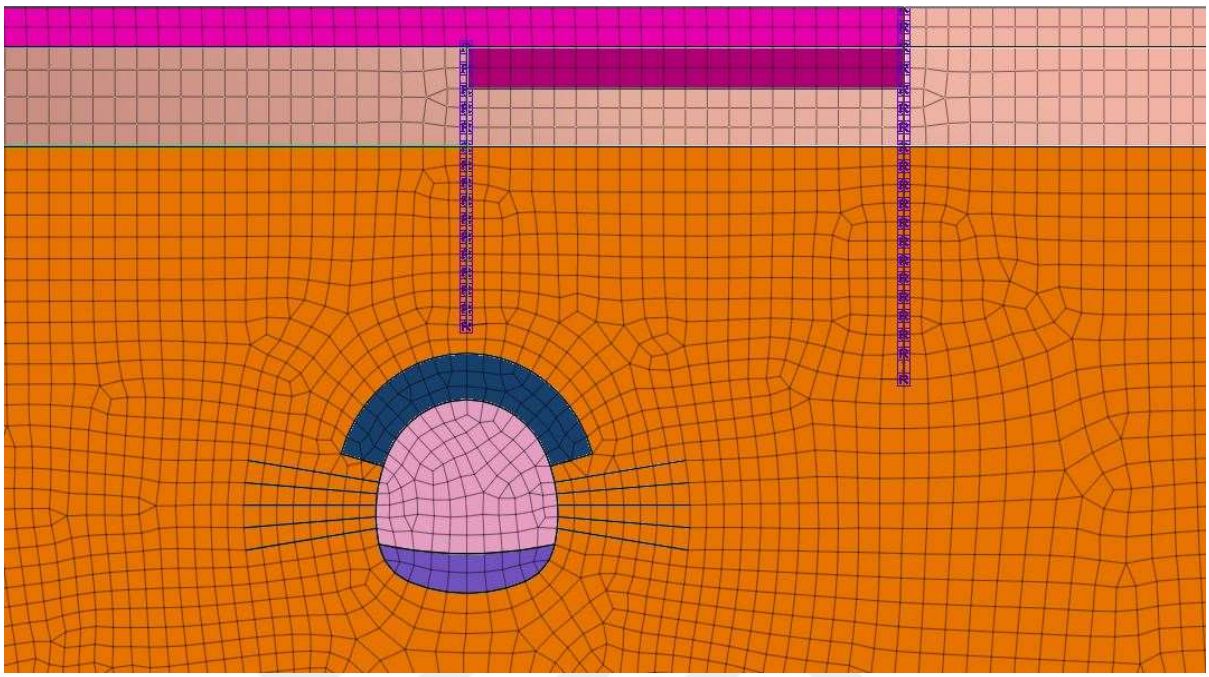
Tünel ekseni üzerinde yer alan iksa kazıklarının tünele çok yakın olması ve sahada gözlenen deformasyonların kritik seviyelere ulaşması nedeniyle yukarıdaki bölümlerde de anlatıldığı gibi tünel tahkimat sistemlerinde birtakım değişikliklere gidilmiştir. Kesit -1 bölgesinde kullanılan kafes iksalar yerine daha rijit bir tahkimat sistemi olan profil iksalar tercih edilmiş ve *"umbrella*

arch" uygulaması çift sıra olarak devam etmiştir. Bu nedenle modelde *"umbrella arch"* imalatlarının sağladığı iyileştirilmiş bölge, Kesit-1 modellerinden, genişletilmiş etki alanının yansıtılması amacı ile daha büyük olacak şekilde modellenmiştir. Modelde tanımlanan yapısal elemanlara ait parametreler Tablo 3.14'te yer almaktadır.

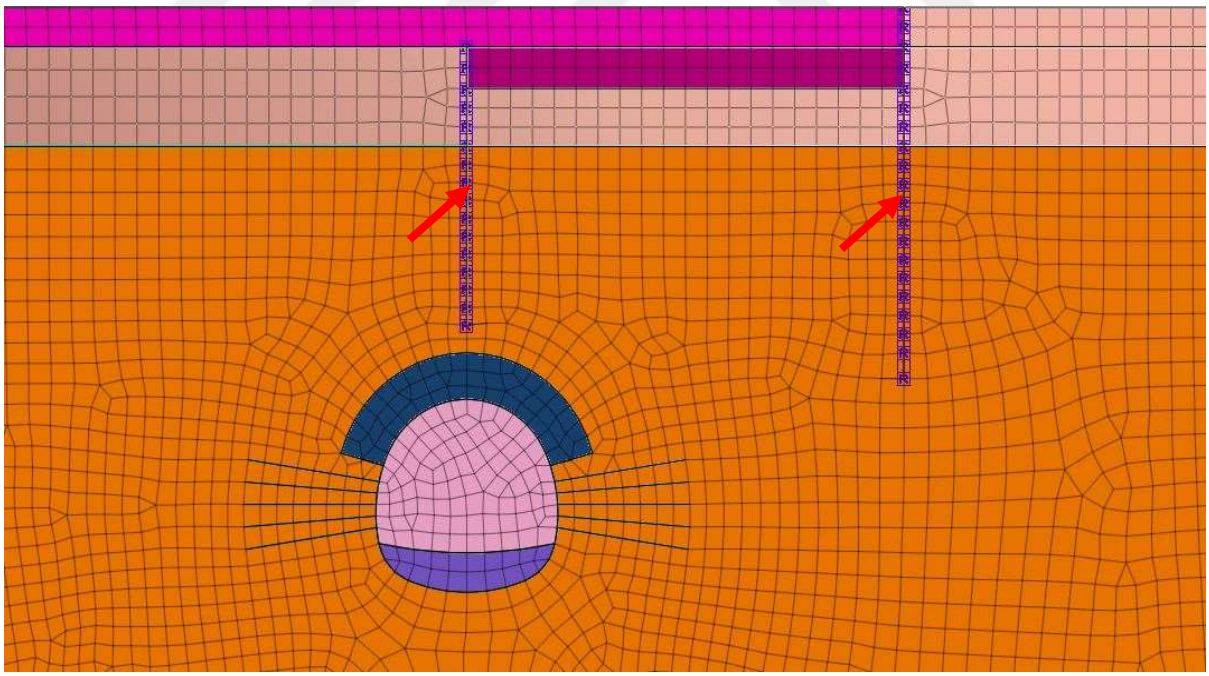
Tablo 3.15: 2 Boyutlu modelde yapısal eleman parametreleri.

Yapısal eleman	EA kN/m	EI (kN m^2/m)	ν
Püskürtme beton (2 günlük maturasyon)	5.523E6	53.05E3	0.2
Püskürtme beton (4 günlük maturasyon)	7.561E6	73.86E3	0.2
Püskürtme beton (28 günlük maturasyon)	9.029E6	88.84E3	0.2
Kaya Bulonu (D=16mm)	111489	4.7103	0.15

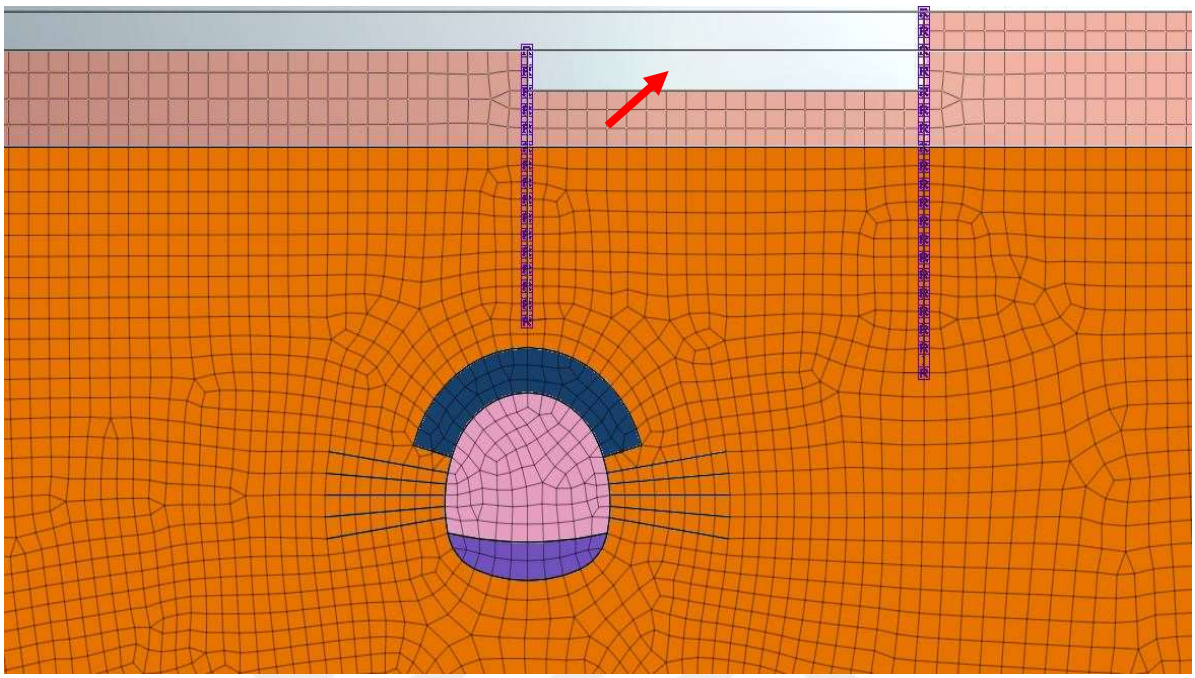
Yukarıda yer açıklanan parametreler ile Kesit-2 için oluşturulmuş 2 boyutlu sonlu elemanlar modelinde inşaat aşamaları saha çalışmalarına paralel olacak şekilde modellenmiştir. İnşaat aşamaları model görünüşleri sırasıyla aşağıda yer almaktadır.



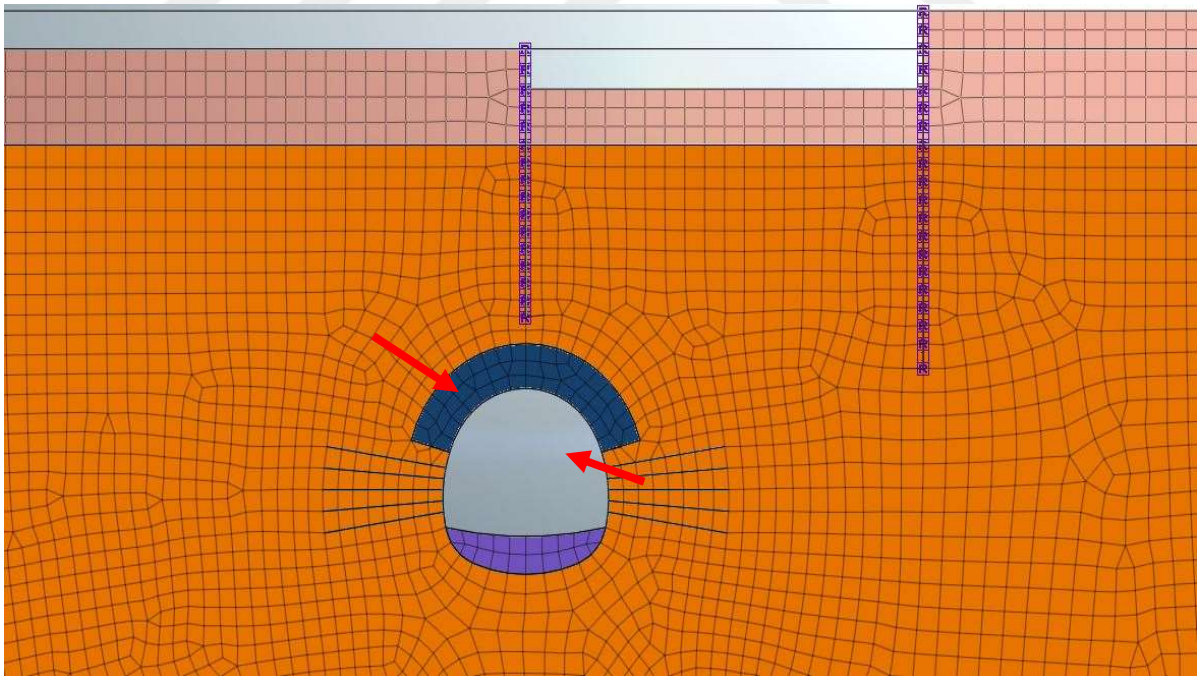
Şekil 3.40: Kesit-2 başlangıç aşaması, geostatik durum.



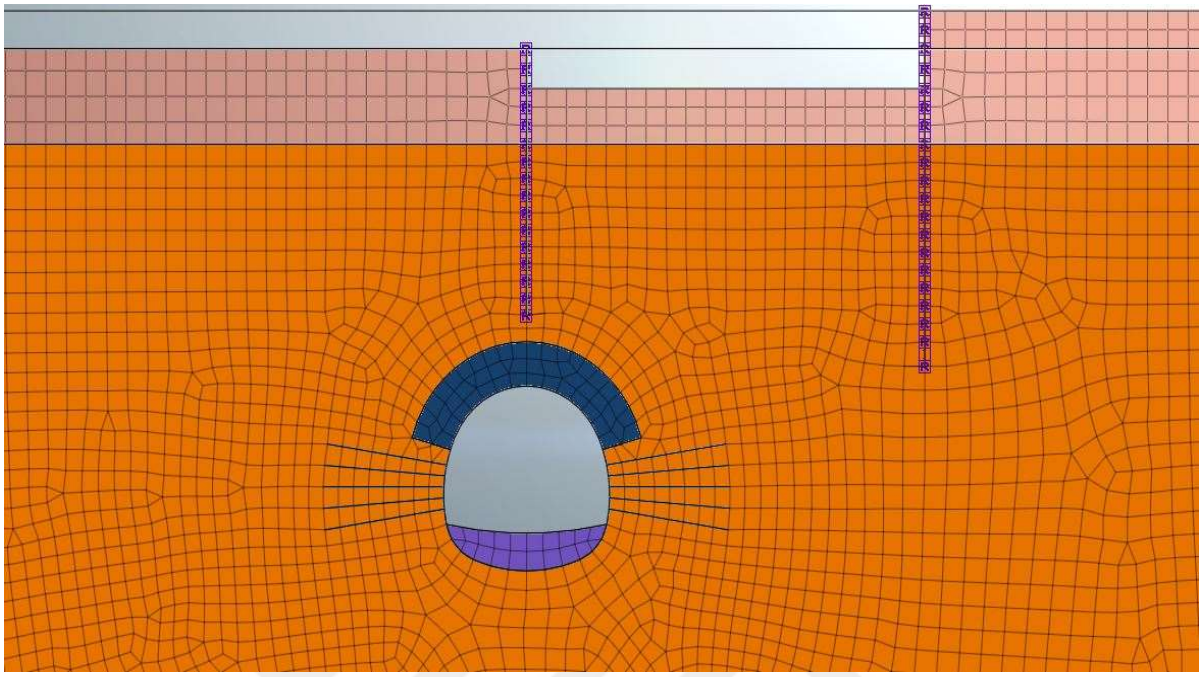
Şekil 3.41 : Kesit-2 1. aşama, yol kazıklarının modellenmesi.



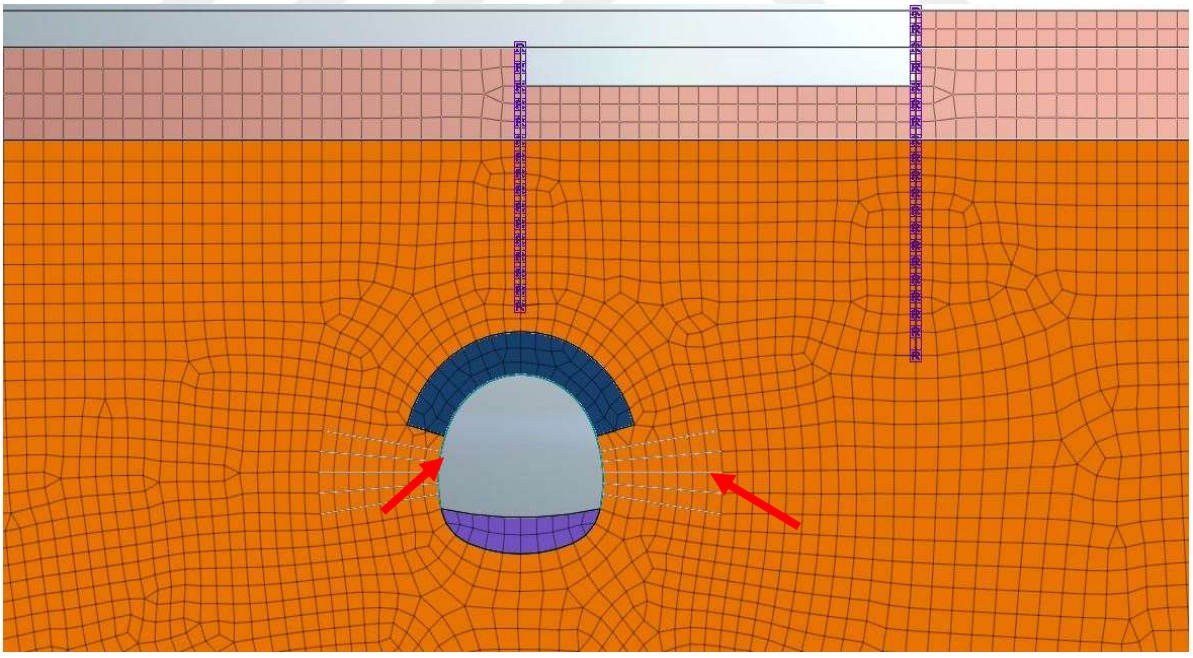
Şekil 3.42: Kesit-2 2. aşama, yol kazısının yapılması ve sürşarj yüklerinin aktif edilmesi.



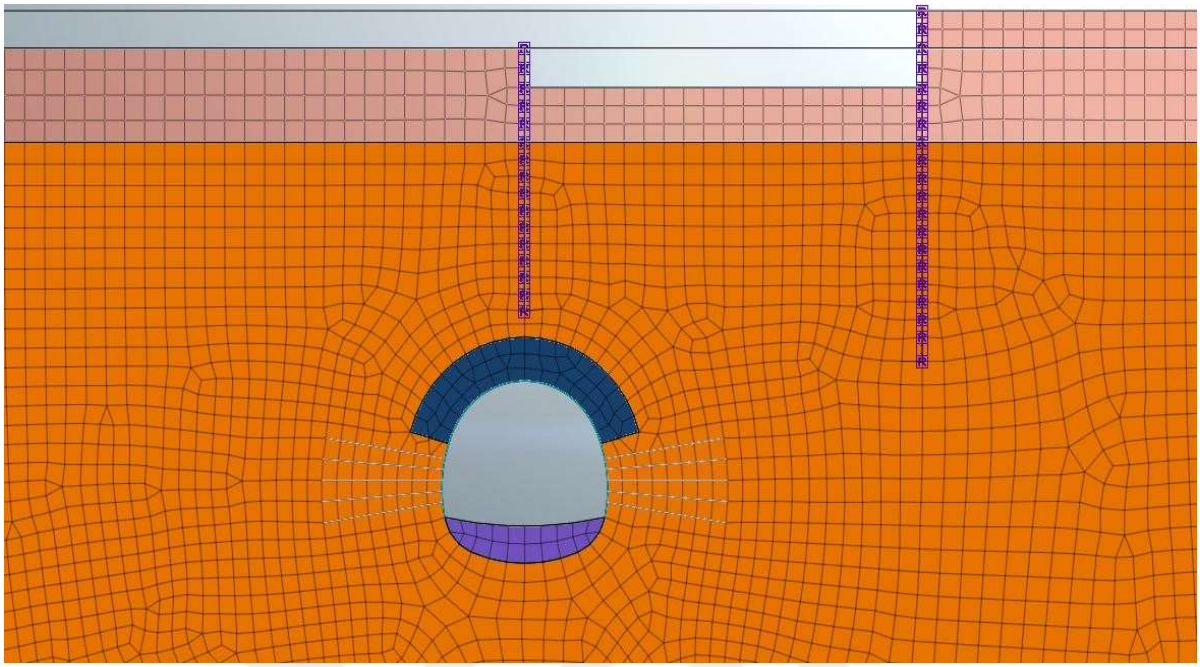
Şekil 3.43: Kesit-2 3. aşama, B5 tünel üst yarı kazısı + *"umbrella arch"* imalatı yapılması.



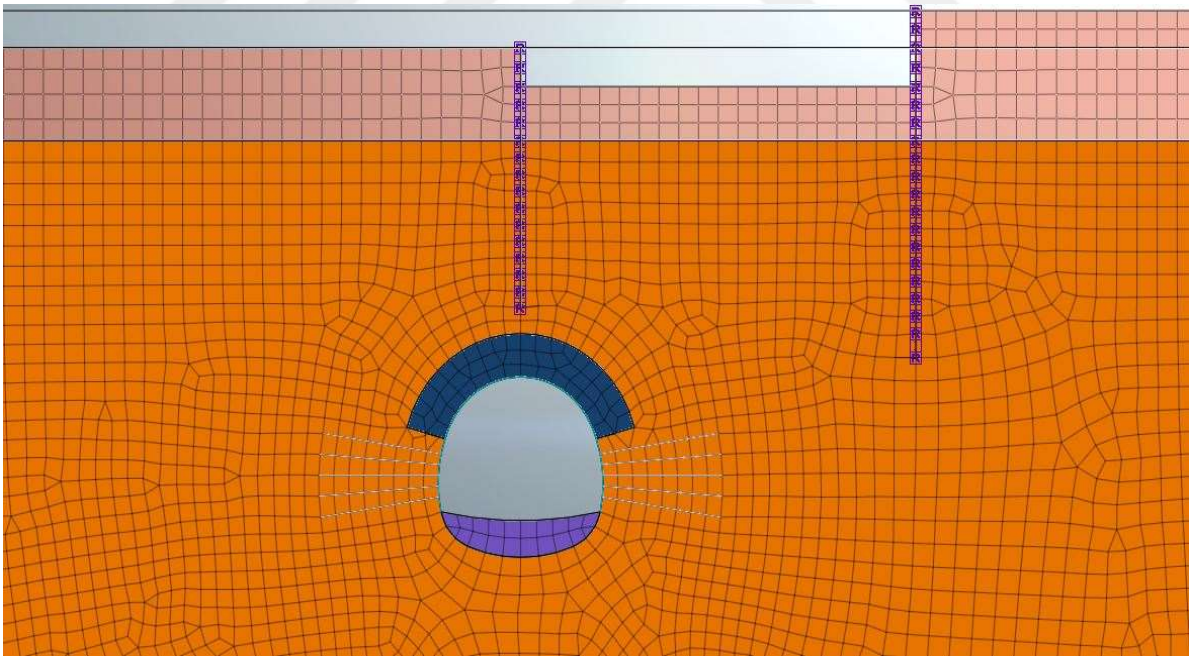
Şekil 3.44: Kesit-2 4.aşama, B5 tüneli üst yarı ilerlemesi (0.8m)



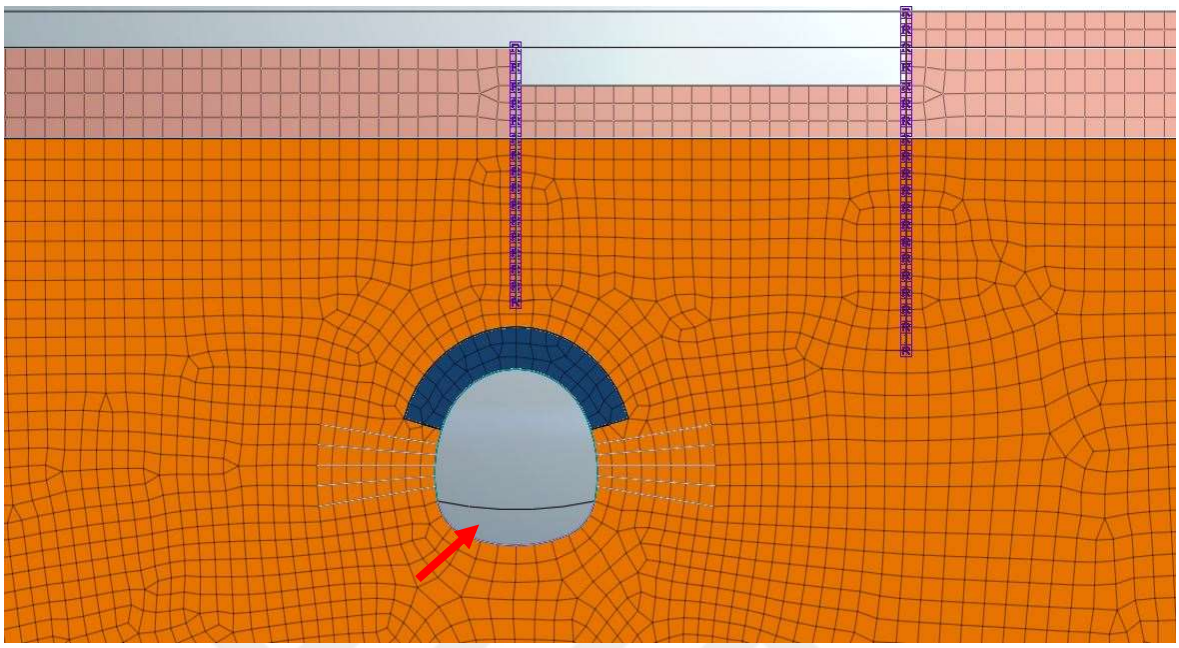
Şekil 3.45: Kesit-2 5. aşama, tünel üst yarı kafes iksa sistemi imalatı ve zemin çivisi imalatları.



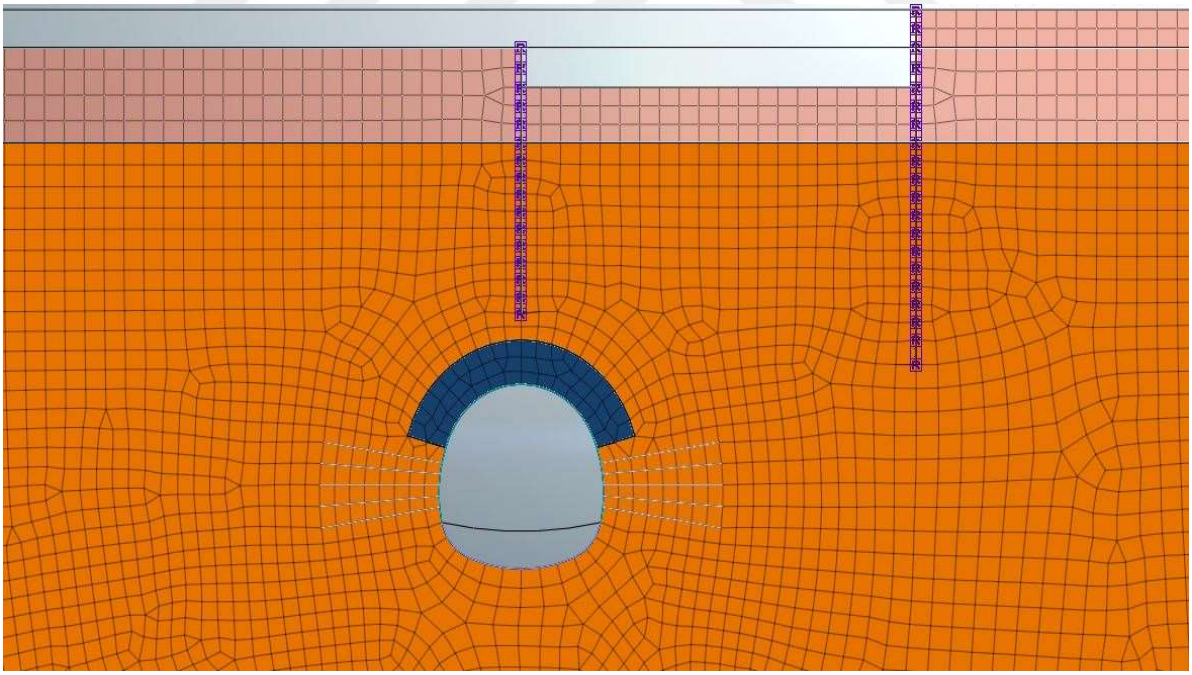
Şekil 3.46: Kesit-2 6. aşama, B5 tünel üst yarı kazı destek sistemi uygulaması. (4 günlük maturasyon)



Şekil 3.47: Kesit-2 7. aşama, üst yarı basıncının serbest bırakılması. (28 günlük maturasyon)



Şekil 3.48: Kesit-2 8. aşama, alt yarı kazısı ve kazı destek sistemi imalatları.

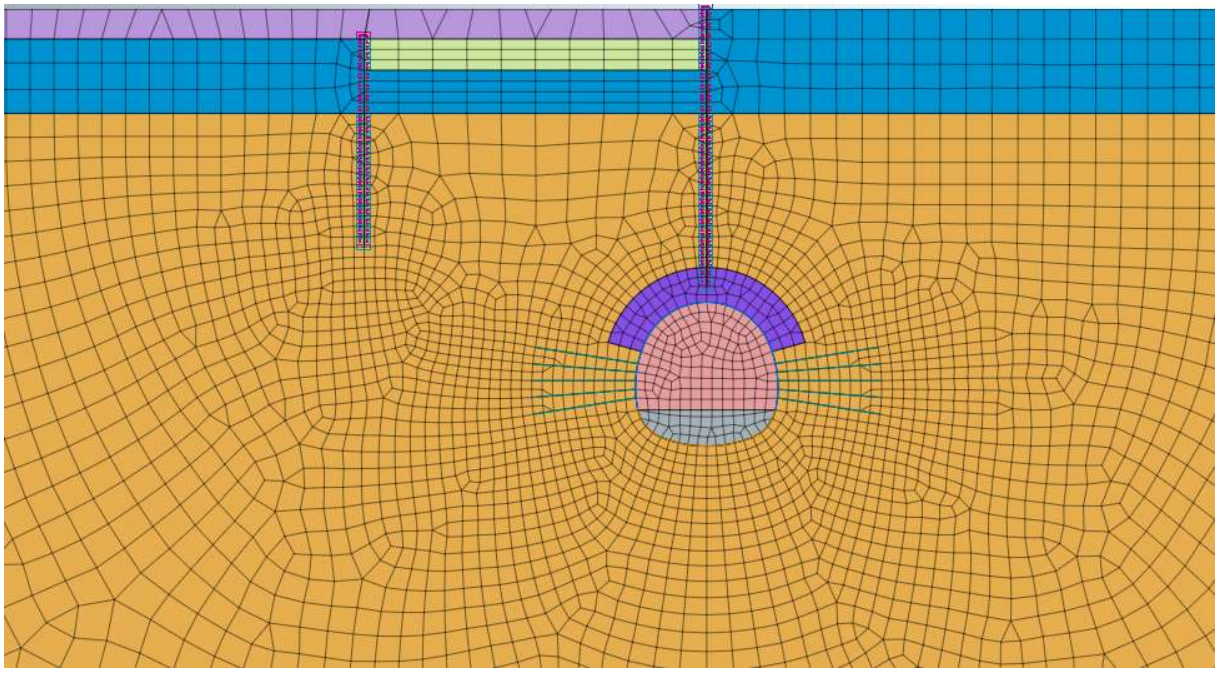


Şekil 3.49: Kesit-2 9. aşama, alt yarı iç basıncının tamamen serbest bırakılması. (28 günlük maturasyon)

Kesit-3 Analizleri

Kesit-3, B5 yaklaşım tünelinin Eskihisar Kavşağı doğusunda bulunan iksa kazıklarının altından geçtiği kısmı temsil etmektedir.

Kesit-3 için oluşturulmuş 2 Boyutlu analiz modeli Şekil 3.20'de yer almaktadır.

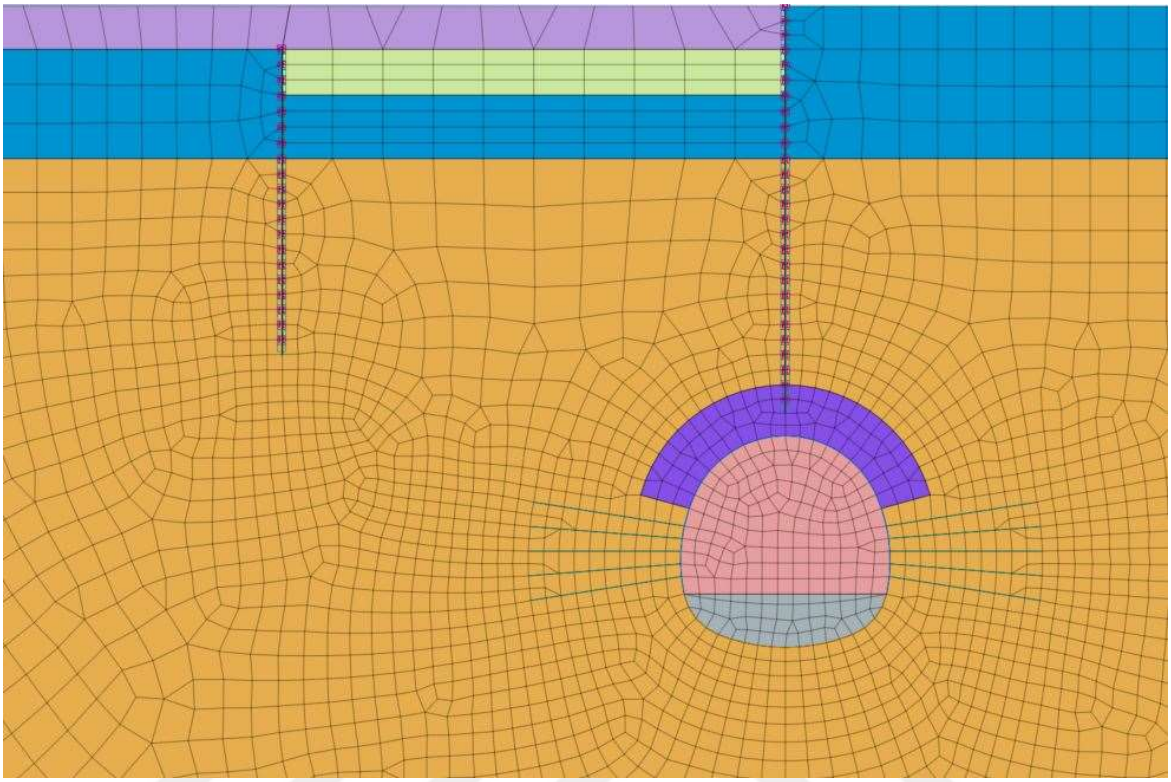


Şekil 3.50: Kesit-3 analiz kesiti.

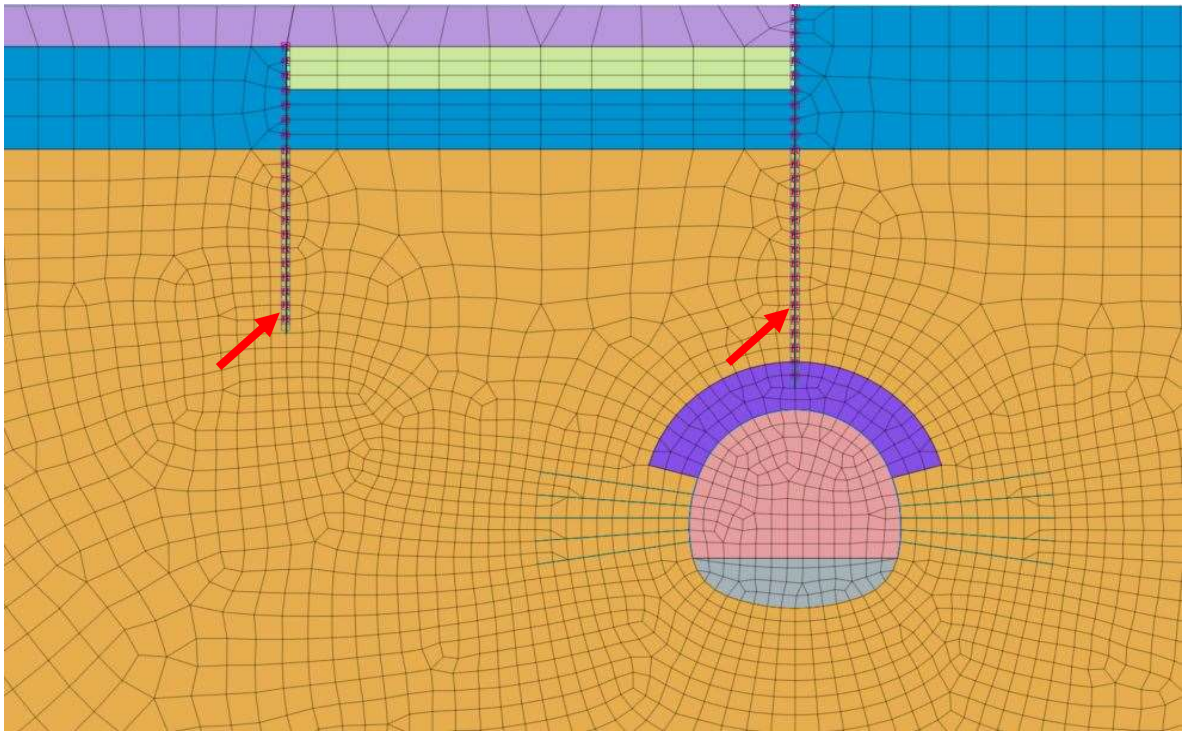
Modelde, zemine ait parametreler Kesit-1 ve Kesit-2 için gerçekleştirilen analizlerde kullanılan parametrelerle aynı olarak seçilmiştir.

"Umbrella arch" sisteminin etkisiyle oluşan iyileştirilmiş bölge ve yapısal eleman parametreleri ise Kesit-2 analizlerinde kullanılan parametrelerle aynı olacak şekilde tanımlanmıştır.

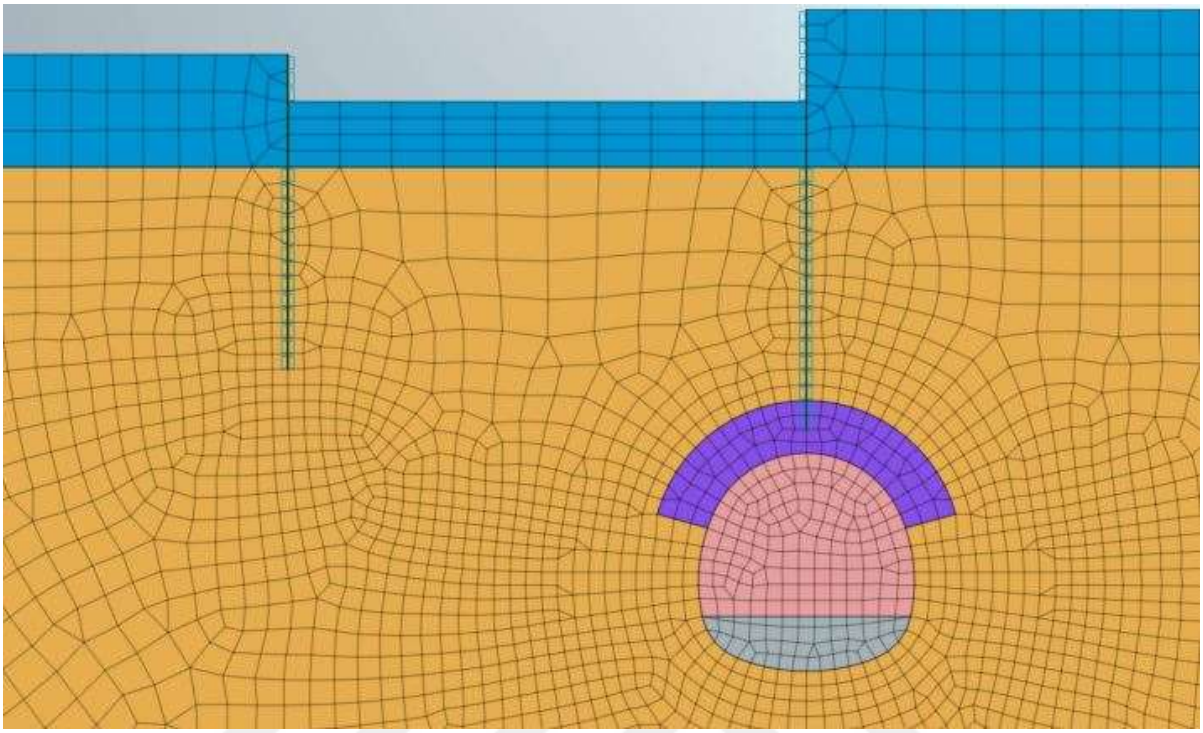
Yukarıda yer açıklanan parametreler ile oluşturulmuş 2 boyutlu sonlu elemanlar modelinde inşaat aşamaları saha çalışmalarına paralel olacak şekilde modellenmiştir. İnşaat aşamaları model görünüşleri sırasıyla aşağıda yer almaktadır.



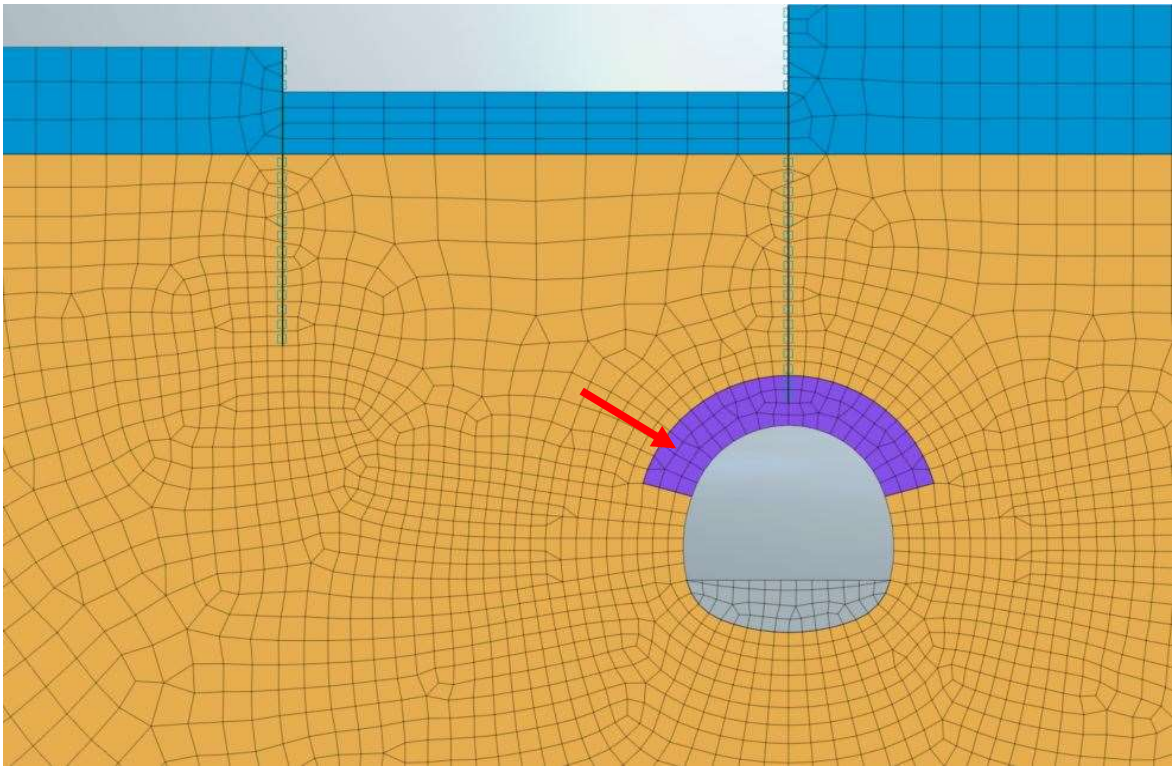
Şekil 3.51: Kesit-3 Başlangıç aşaması, geostatik durum.



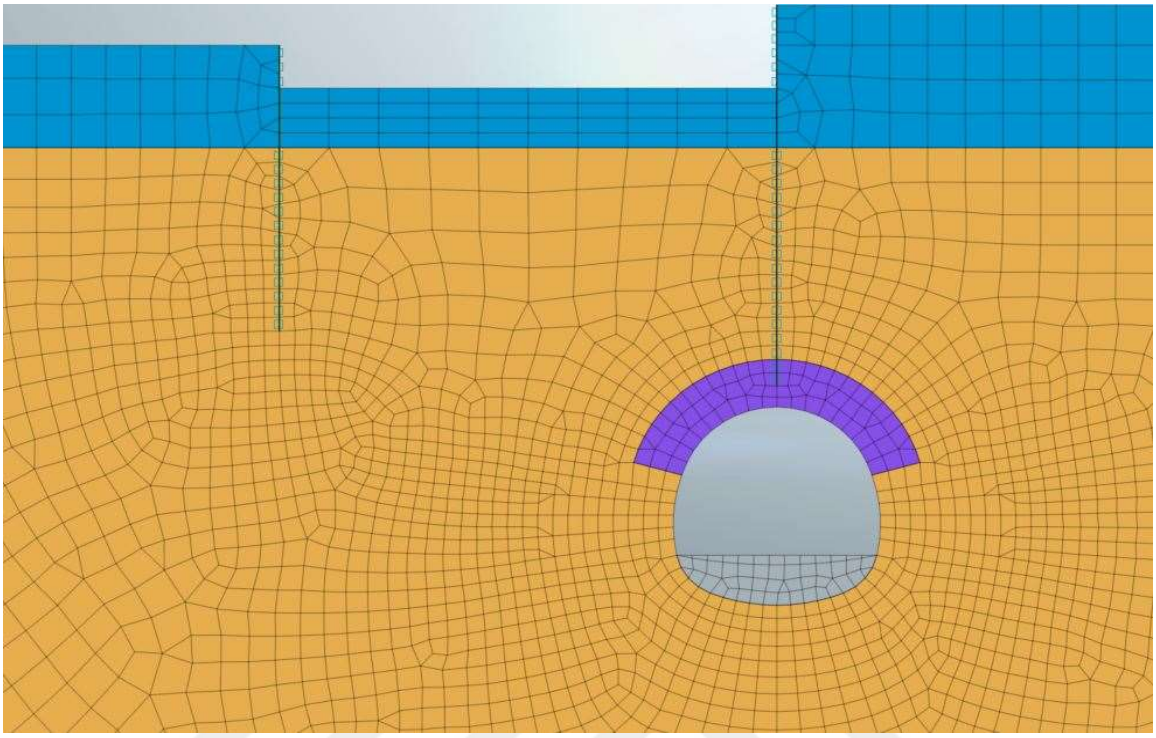
Şekil 3.52 : Kesit-3 1. aşama, yol kazıklarının modellenmesi.



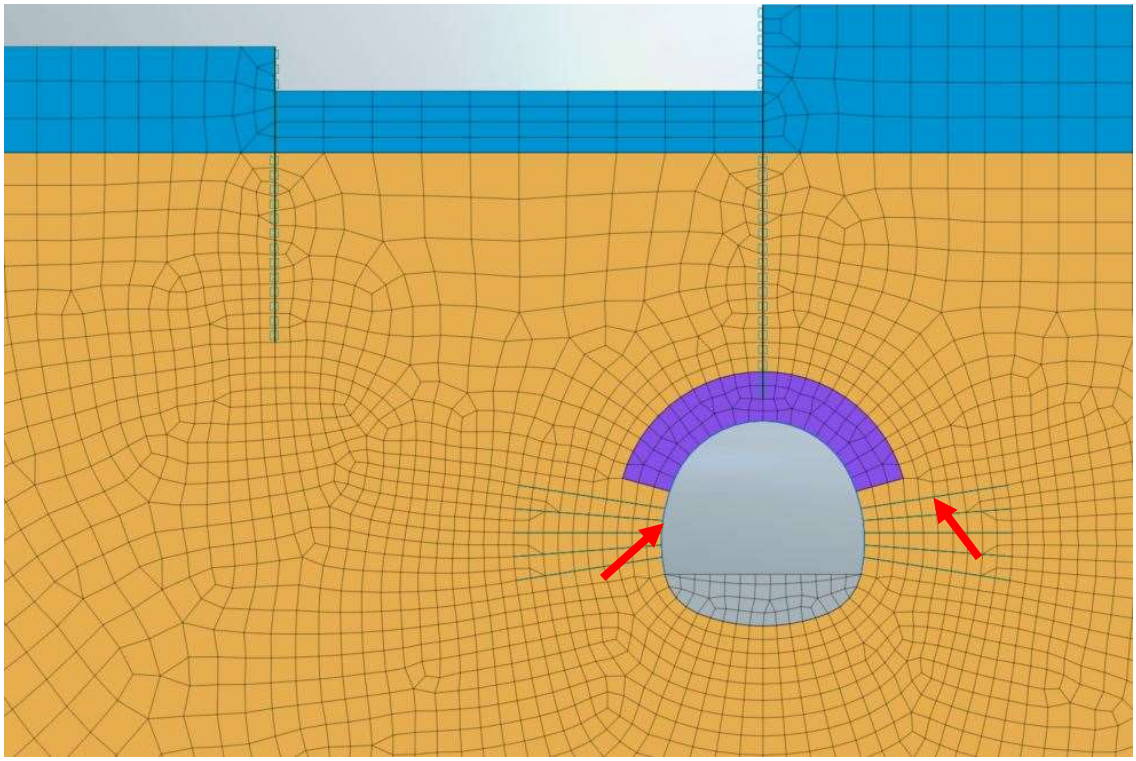
Şekil 3.53: Kesit-3 2. aşama, yol kazısının yapılması ve sürşarj yüklerinin aktif edilmesi.



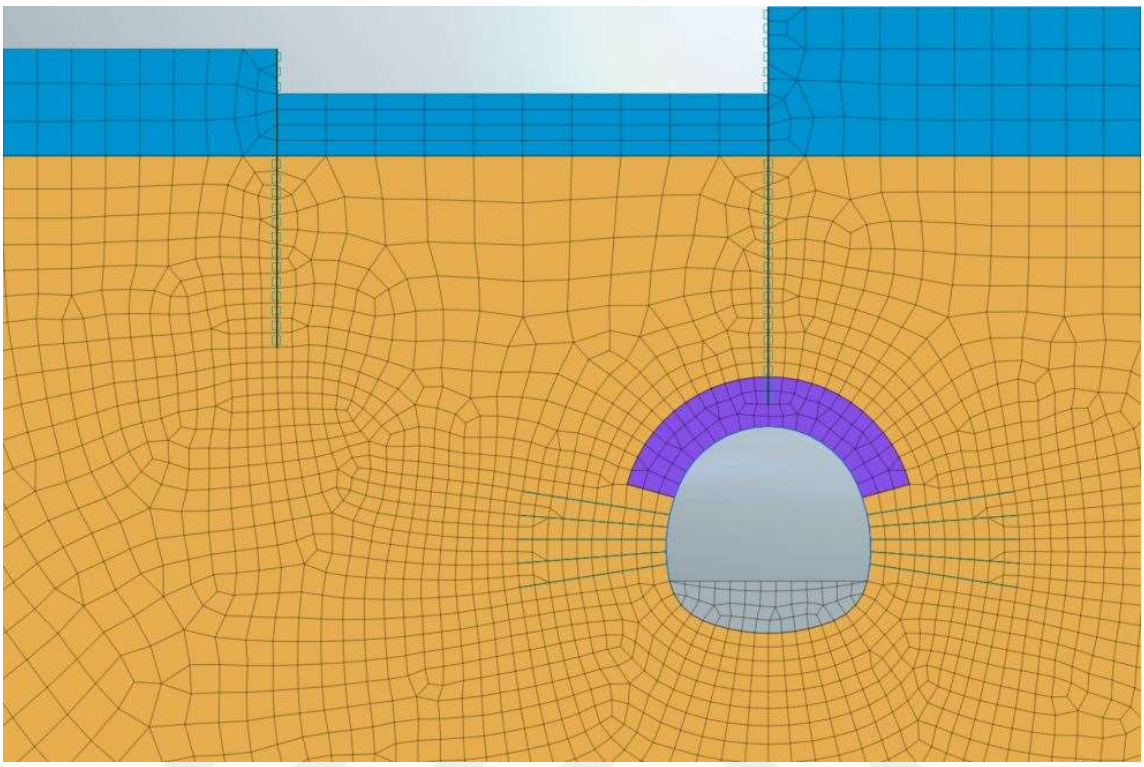
Şekil 3.54: Kesit-3 3. aşama, B5 tünel üst yarı kazısı + *"umbrella arch"* imalatı yapılması**.**



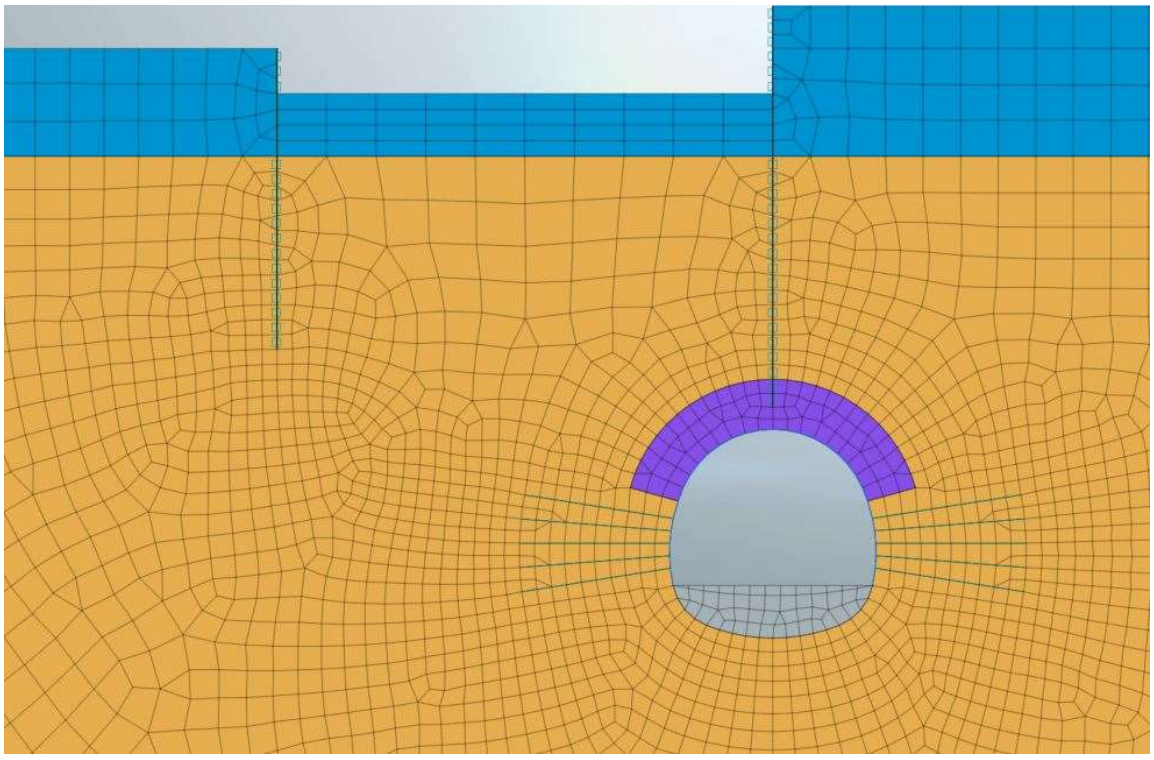
Şekil 3.55: Kesit-3 4.aşama, B5 tüneli üst yarı ilerlemesi (0.8m)



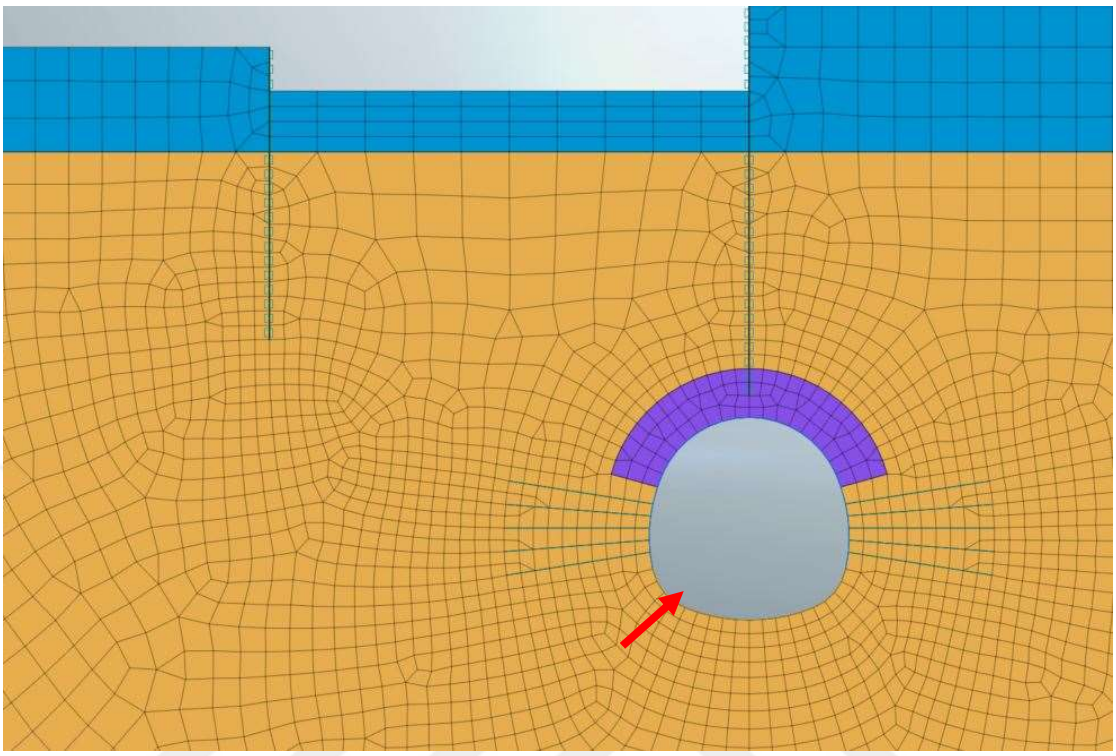
Şekil 3.56: Kesit-3 5. aşama, tünel üst yarı kafes iksa sistemi imalatı ve zemin çivisi imalatları.



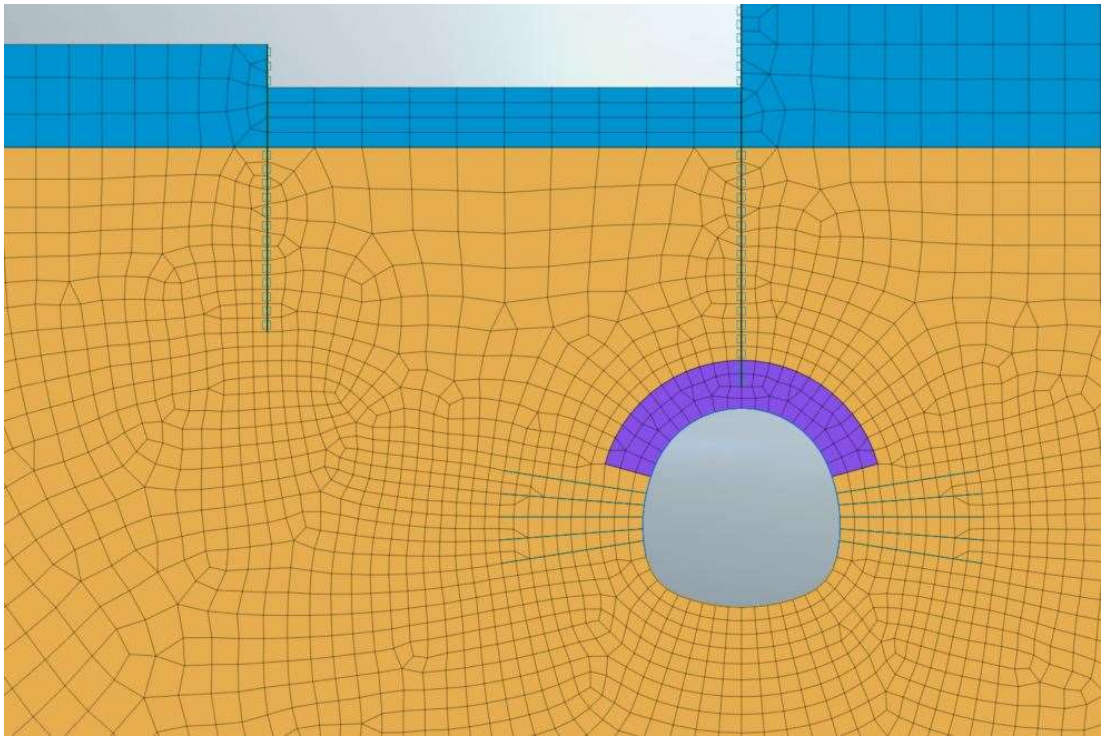
Şekil 3.57: Kesit-3 6. aşama, B5 tünel üst yarı kazı destek sistemi uygulaması. (4 günlük maturasyon)



Şekil 3.58: Kesit-3 7. aşama, üst yarı basıncının serbest bırakılması. (28 günlük maturasyon)



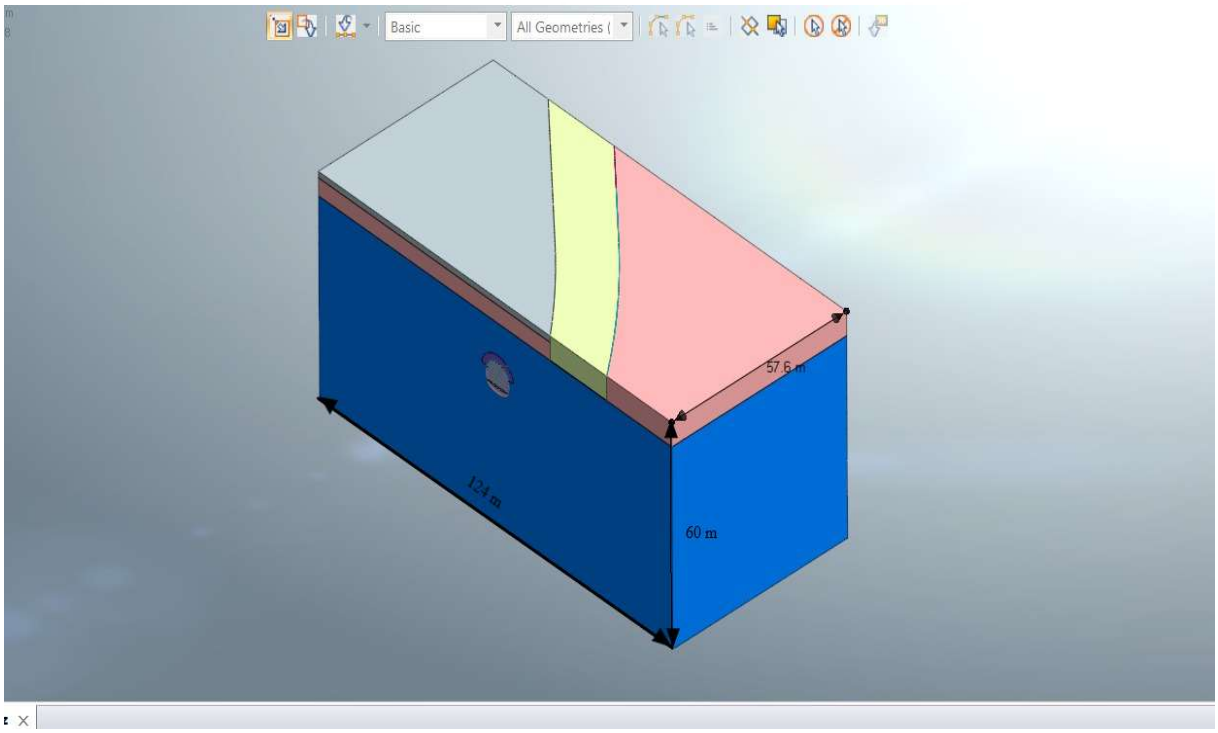
Şekil 3.59: Kesit-3 8. aşama, alt yarı kazısı ve kazı destek sistemi imalatları.



Şekil 3.60: Kesit-3 9. aşama, alt yarı iç basıncının tamamen serbest bırakılması. (28 günlük maturasyon)

3.4.2 3 Boyutlu Sayısal Modelleme

Yukarıdaki bölümlerde yer alan literatür çalışmaları ışığında 2 boyutlu analiz sonuçlarının kontrol edilebilmesi ve daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek adına inceleme bölgesi ayrıca 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Model sınırları 57.6 m x 60 m x 124 m olarak tanımlanmıştır. Arazi 3 boyutlu modele saha gerçekte olduğu gibi aktarılmıştır. Analizlerde hesap yükü oluşturmaması adına, 93 m uzunluğa sahip Şaft -3 B5 yaklaşım tünelinin 57.6 m'si modele dahil edilmiştir. (Şekil 3.15)



Şekil 3.61: 3 Boyutlu sonlu elemanlar modeli boyutları.

Oluşturulan modelde mesh tipi olarak *"tetra mesh"* kullanılmıştır. Model, toplam 595774 eleman ve 123914 düğüm noktasından oluşmaktadır.

Modelde zemine ait parametrelerin belirlenmesi için Bölüm 3.2'de anlatıldığı gibi, sahada yapılan sondaj çalışmalarından ve deney sonuçlarından ve laboratuvar deneyleri sonuçlarından yararlanılmıştır. *"Umbrella arch"* sisteminin etkisiyle oluşan iyileştirilmiş bölgenin parametreleri ise Bölüm 2.3'de özetlenen literatür çalışmalarından faydalanarak belirlenmiştir. İyileştirilmiş bölgeye ait parametreler Tablo 3.15'te yer almaktadır.

Tablo 3.16: İyileştirilmiş bölge parametreleri**.**

γ, kN/m3	E ,mPa	E_{oed}^{ref} ,mPa	E_{ur}^{ref} ,mPa	k_0	ψ , derece	φ , derece	c, kPa	ν
22	800	500	500	0.5	0	36	40	0.25

Modelde başlangıç koşullarında Şaft-3 imalatının bittiği kabul edilmiş ve Şaft-3, kazısı modele dahil edilmemiştir. Halihazırda var olan Eskihisar Kavşağı'nın iksa kazıkları ve başlık kirişi *"beam"* (nodal birleşim gerektiren, eğilme ve çekme kuvveti alabilen tek boyutlu yapısal eleman) elemanlar olarak modele dahil edilmiştir.

"*Umbrella arch"* sistemi modellenirken Morotvatdar'ın (2020) önerisi göz önüne alınarak, borularda oluşan iç kuvvetlerin belirlenebilmesi için, borular *"embedded beam"* (nodal birleşim gerektirmeyen, eğilme ve çekme kuvveti alabilen tek boyutlu yapısal eleman) elemanlar olarak, *"umbrella arch"* sisteminin uygulandığı kısımda oluşan güçlendirilmiş zemin bölgesinden ayrı olarak modellenmiştir.

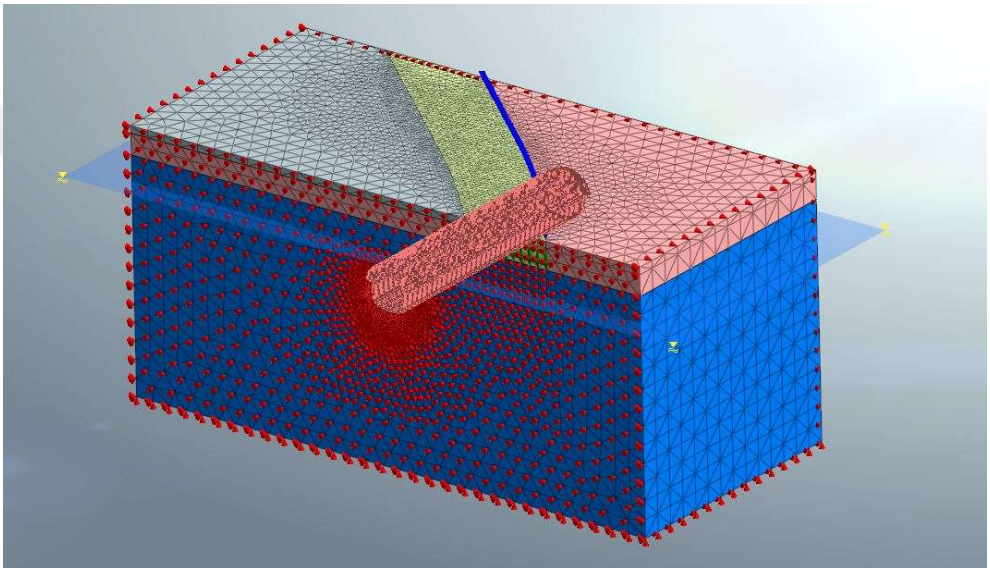
Modelde, püskürtme beton ve çelik iksalardan oluşan tünel kaplaması 2 boyutlu *"Shell"* (kabuk) eleman olarak tanımlanmıştır. Tünel aynasına ve yanlarına uygulanan zemin çivileri ise *"embedded truss"* (nodal birleşim gerektirmeyen, çekme kuvveti alabilen 2 boyutlu yapısal eleman) olarak modellenmiştir. Modelde tanımlanan yapısal elemanlara ait parametreler Tablo 3.16'da yer almaktadır.

Tablo 3.17: 3 Boyutlu Modelde yapısal eleman parametreleri.

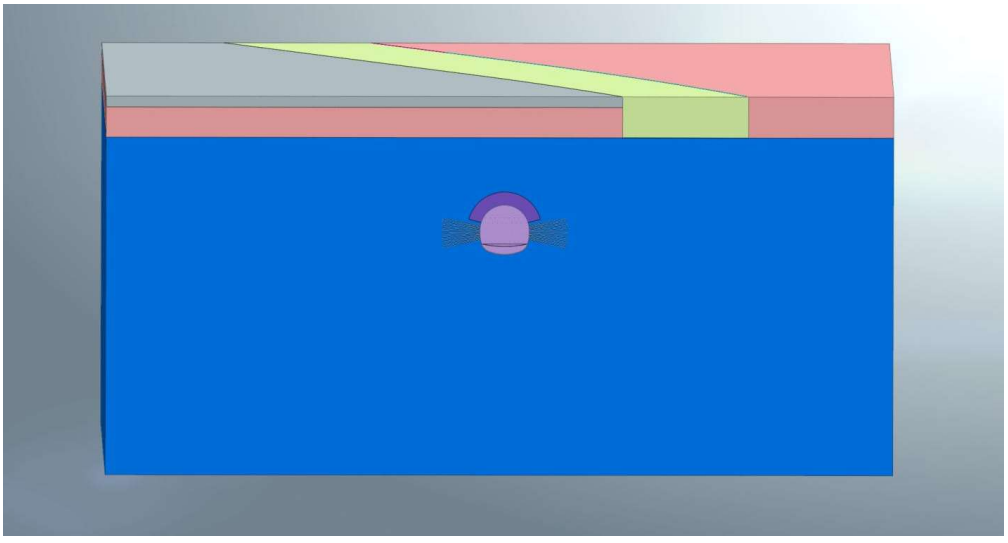
Yapısal eleman	E kN/m²	EA (kN/m)	EI (kNm²/m)	ν
Püskürtme beton	4903325	-	-	0.2
Püskürtme beton (28 günlük maturasyon)	14709975	-	-	0.2
Çelik boru (D=114.5 mm)	200000000	3.11E+05	4.71E+02	0.15
Tip 190 Kafes İksa	200000000	9.48E+05	2.98E+03	0.15
IPE 160	200000000	3.88E+05	5.55E+00	0.15
IPN 200	200000000	6.73E+05	2.76E+02	0.15
Kaya bulonu (D=16mm)	200000000	1.06E+05	-	0.15

Tünel geometrisi olduğu gibi modellenmiş, bir başka deyişle *"umbrella arch"* sisteminden dolayı sürekli artan tünel kesiti göz önüne alınmıştır.

Çalışma kapsamında Midas GTS NX programı aracılığı ile oluşturulan 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'de yer almaktadır.



Şekil 3.62: Şaft-3 B5 Yaklaşım Tüneli sonlu elemanlar modeli.



Şekil 3.63: Şaft-3 B5 Yaklaşım Tüneli sonlu elemanlar model kesiti.

4. BULGULAR

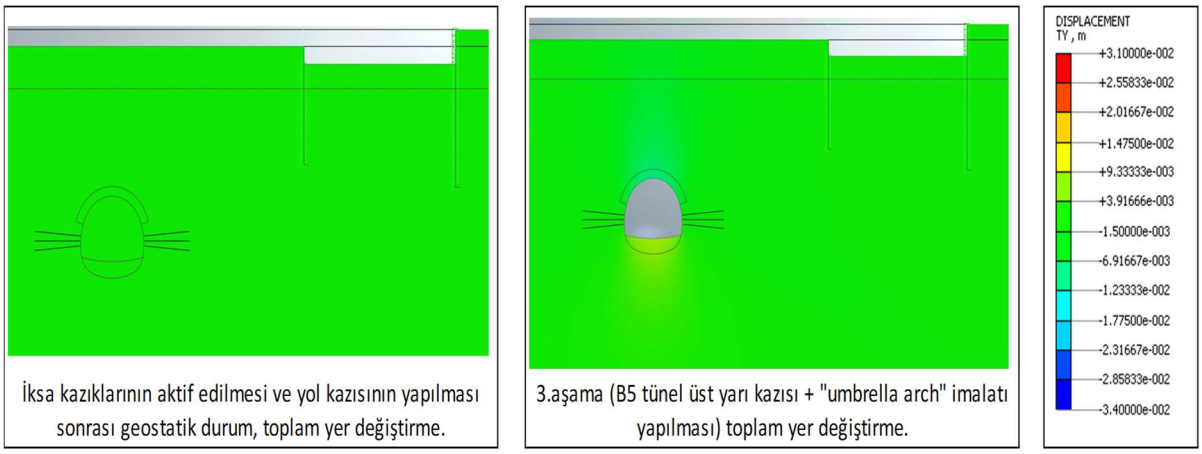
Bölüm 3.4'te açıklanan 2 boyutlu ve 3 boyutlu sayısal modellemeler tamamlandıktan sonra, Midas GTS NX ortamında sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları Bölüm 4.1 ve Bölüm 4.2'de yer almaktadır.

4.1 2 BOYUTLU ANALİZ SONUÇLARI

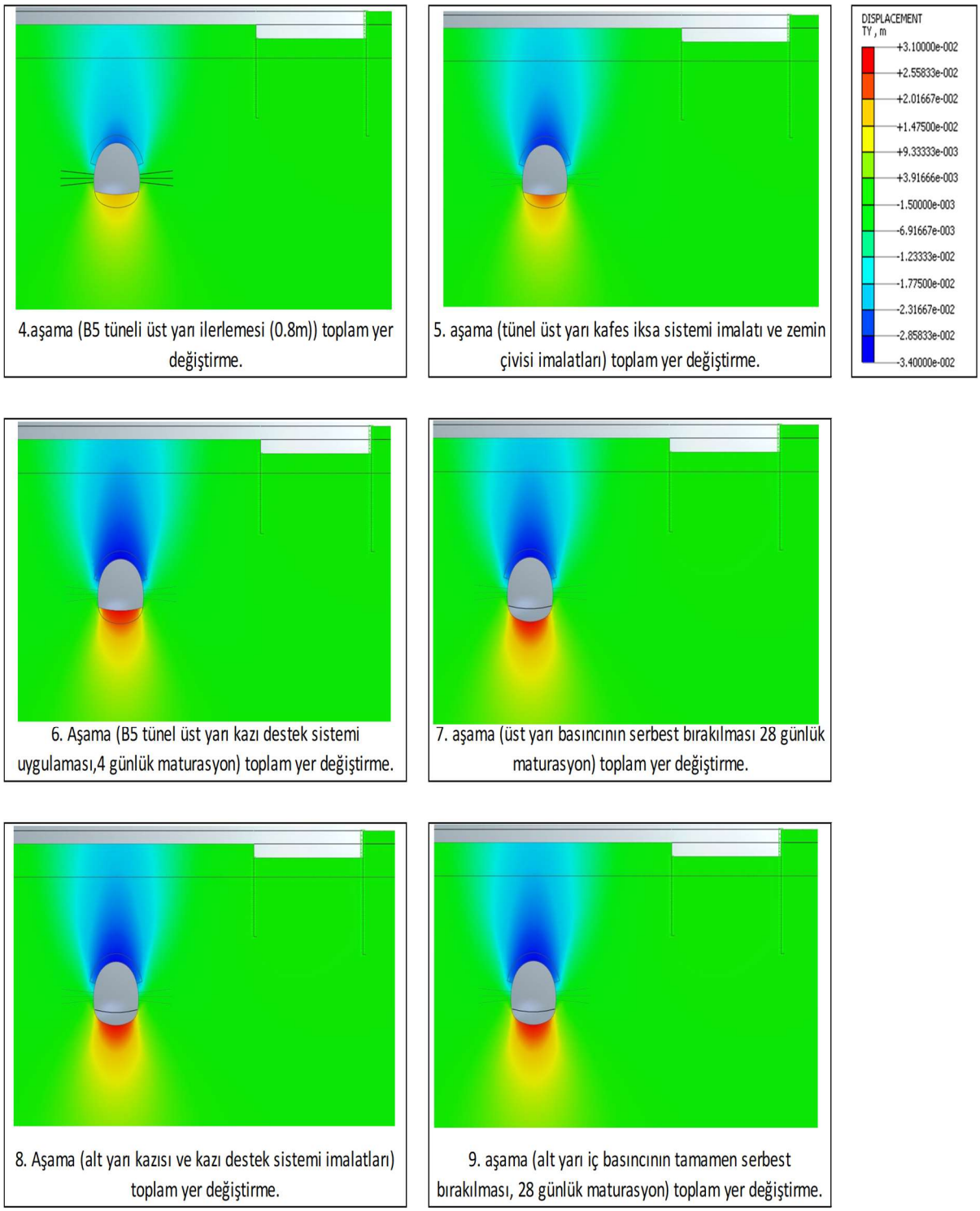
Yukarıda yer alan bölümlerde anlatıldığı üzere, Kesit-1, Kesit-2 ve Kesit-3 için oluşturulan 2 modeller üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucu elde edilen veriler aşağıda yer alan bölümlerde değerlendirilmiştir.

4.1.1 Kesit-1 Analiz Sonuçları

Kesit-1 üzerinde gerçekleştirilen 2 boyutlu analizler sonucu her bir aşama için elde edilen toplam yer değiştirme miktarları aşağıdaki şekillerde yer almaktadır.



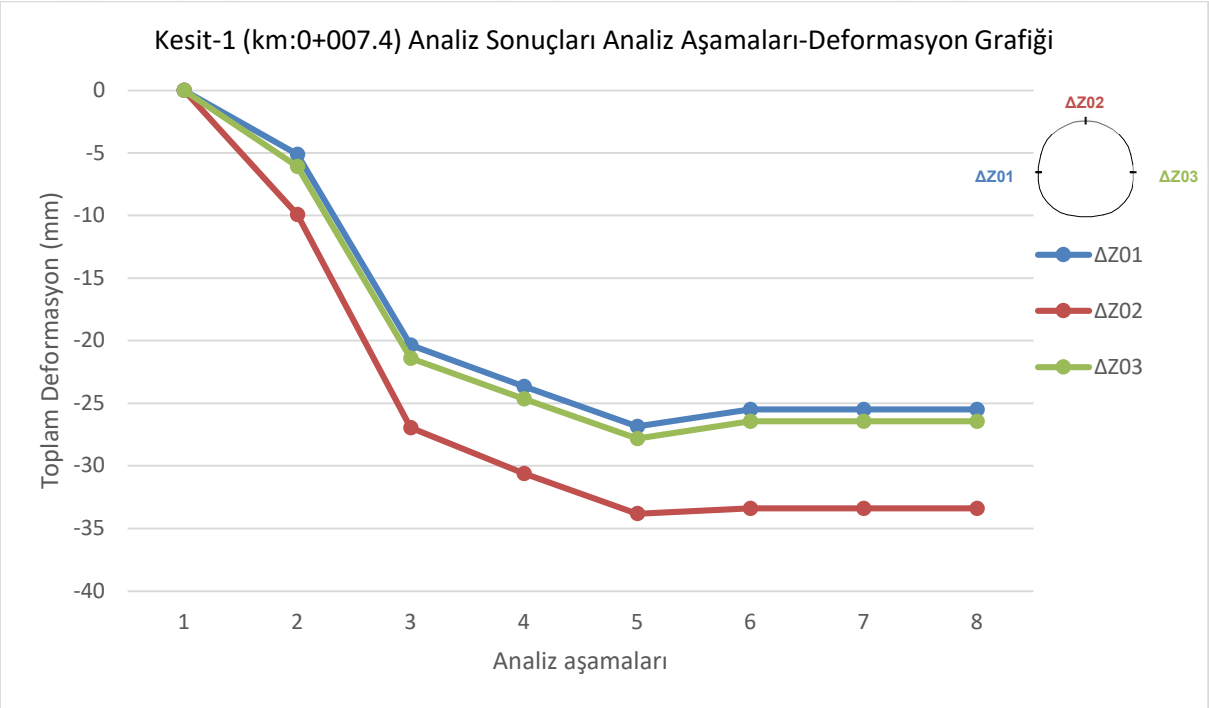
Şekil 4.1: Kesit-1 Geostatik durum ve 3. aşama analiz sonuçları.



Şekil 4.2: Kesit-1 4. ve 9. aşamalar arası analiz çıktıları.

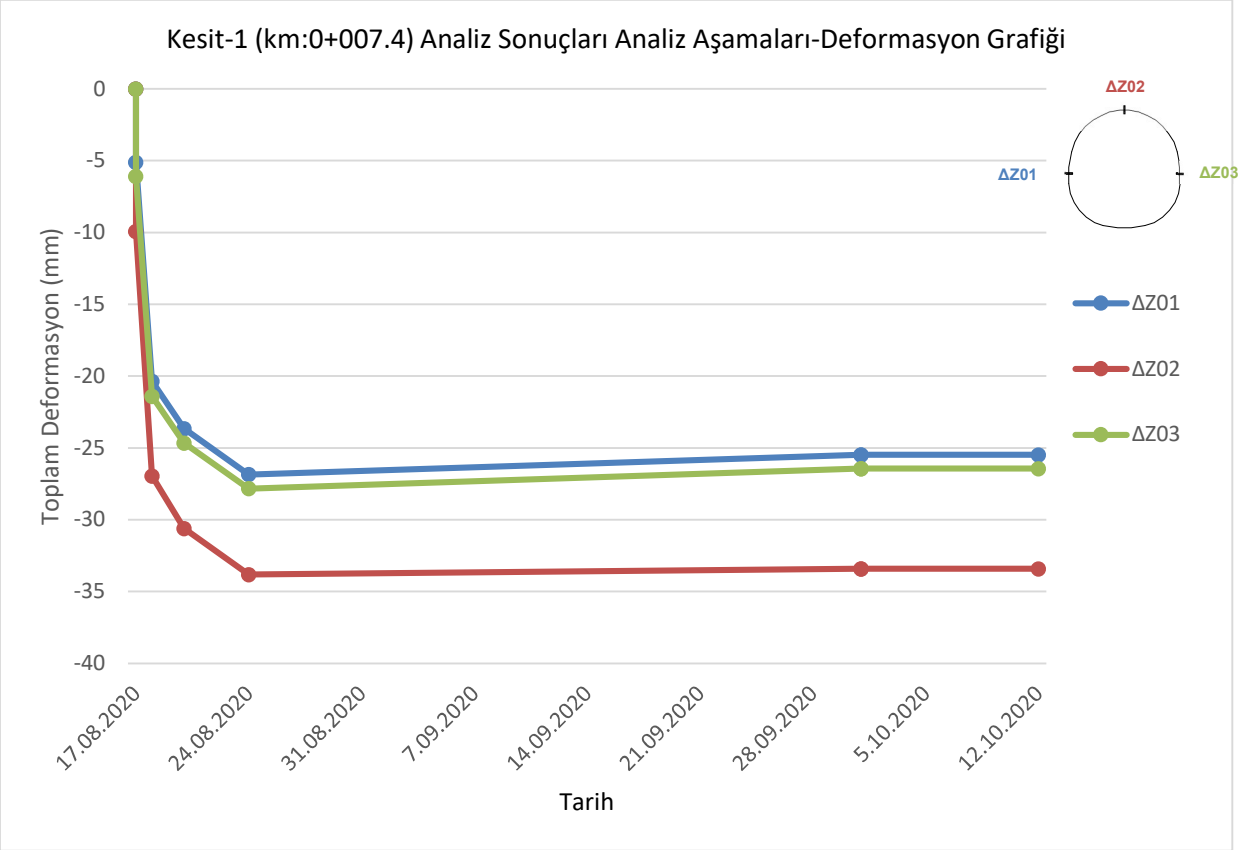
Yukarıda yer alan analiz sonuçları incelendiğinde maksimum deformasyonların tünel tabanında kil kabarması şeklinde gerçekleştiği görülmektedir. Tünel üst yarısında oluşan deformasyonlara bakıldığında ise maksimum deformasyon, altyarı kazılarına başlanmadan önce tünelin taç bölgesinde yaklaşık 3.5 cm olarak okunmaktadır.

Analizler sonucunda, sahada reflektör bulunan ve konverjans ölçümlerinin alındığı noktalara (tünel tavanı ve tünel omuzlarında) denk gelen noktalardan deformasyon değerleri okunmuştur. Her bir tünel ilerleme adımı için elde edilen bu grafikler aşağıda yer almaktadır.



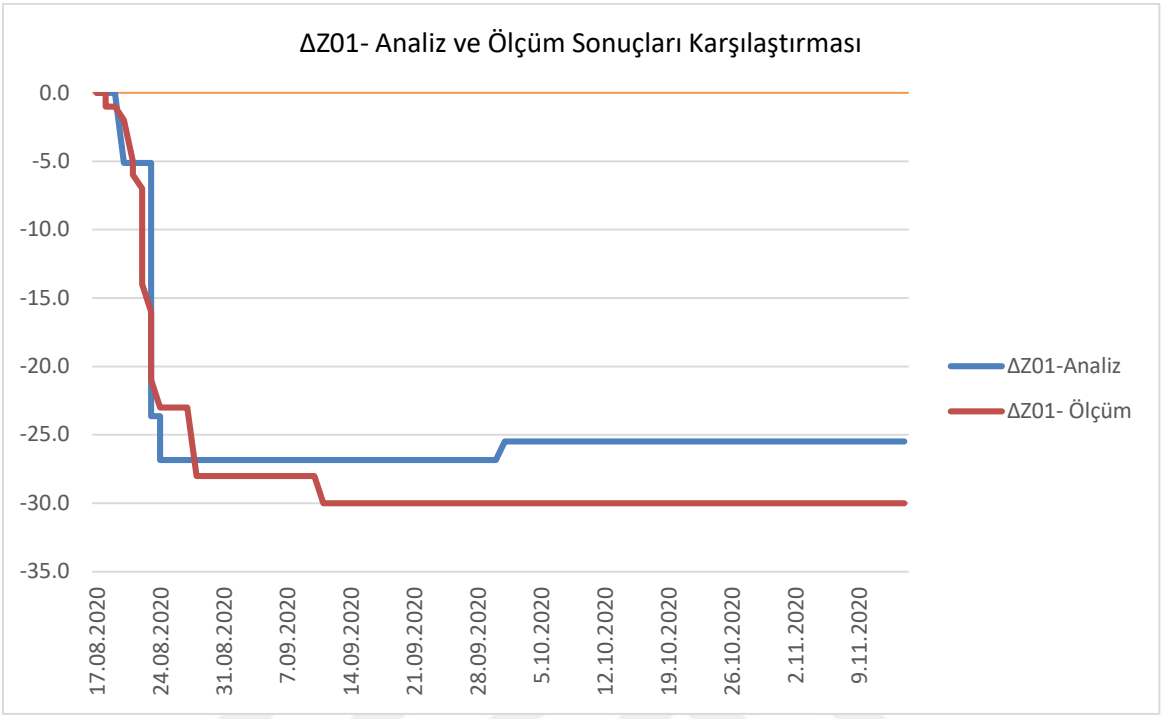
Şekil 4.3: Kesit-1 analizi tünel içi deformasyon-analiz aşamaları grafiği.

Deformasyon eğrilerinin saha ölçüm sonuçları ile daha net şekilde kıyaslanabilmesi adına, yeni bir deformasyon grafiği oluşturulmuştur. Yatay eksene yapım aşamaları yerine her bir yapım aşamasına karşılık gelen ilerleme tarihlerinin yazıldığı grafik Şekil 4.10'da yer almaktadır.

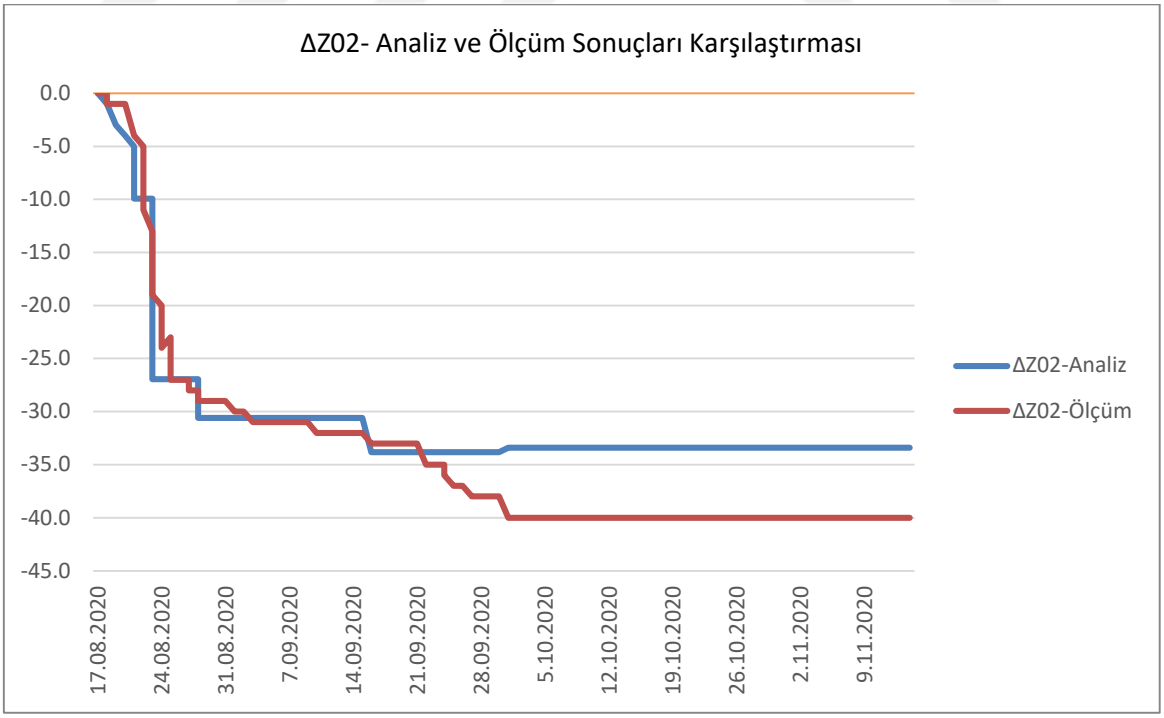


Şekil 4.4: Tünel içi deformasyon- tarih grafiği.

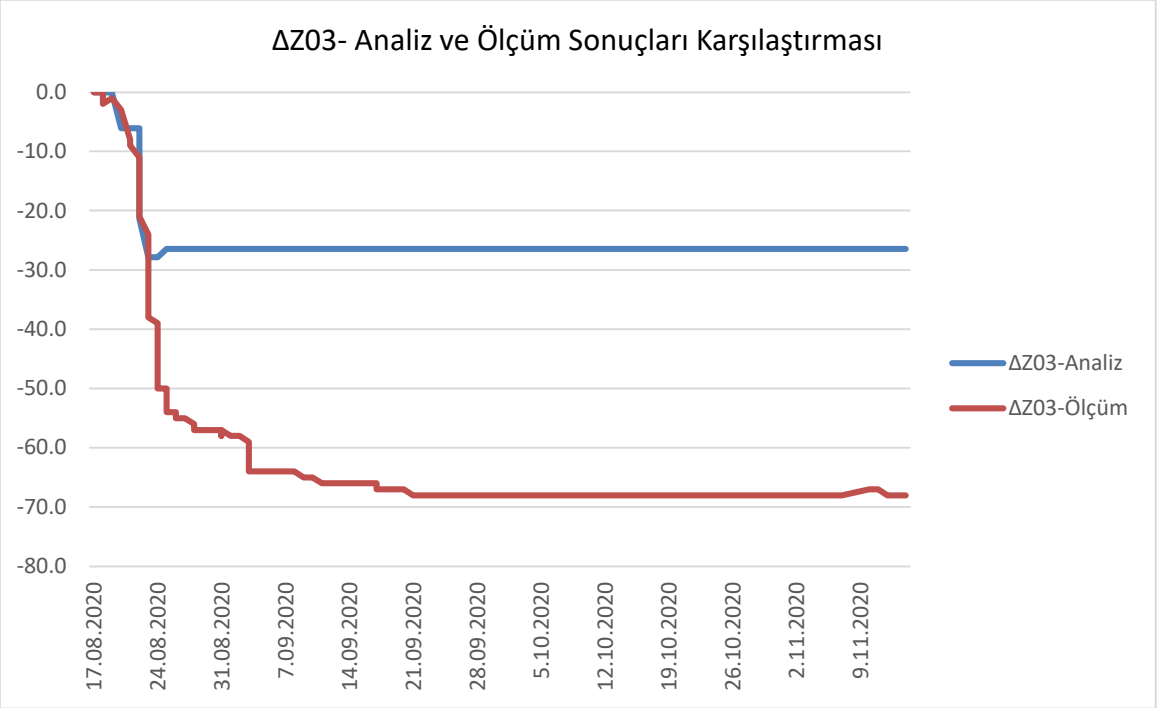
ΔZ01, ΔZ02 ve ΔZ03 reflektörlerini temsil eden her bir eğrinin saha ölçüm grafikleri ile süperpoze edilmiş grafikleri sırasıyla Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te yer almaktadır.



Şekil 4.5 : ΔZ01 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.



Şekil 4.6: ΔZ02 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

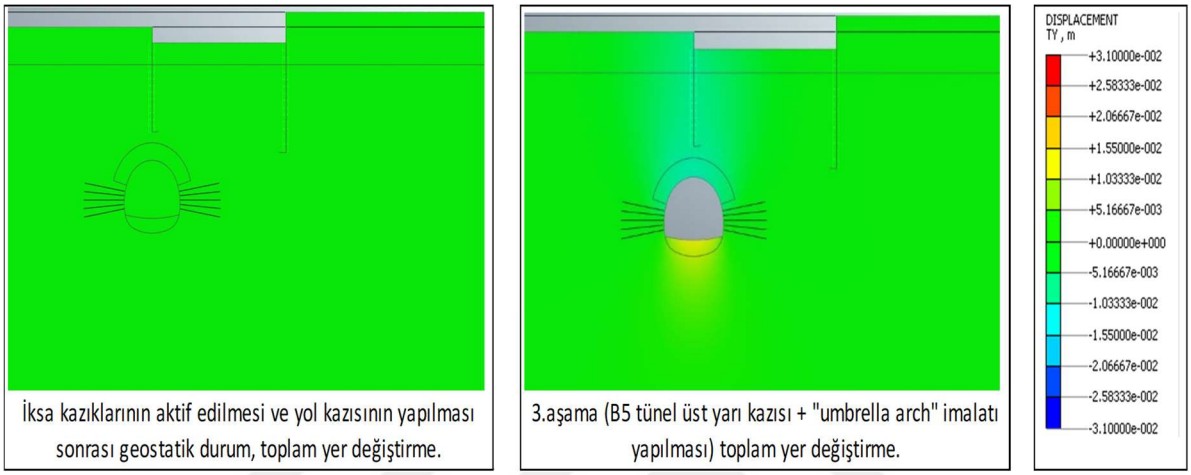


Şekil 4.7: ΔZ03 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

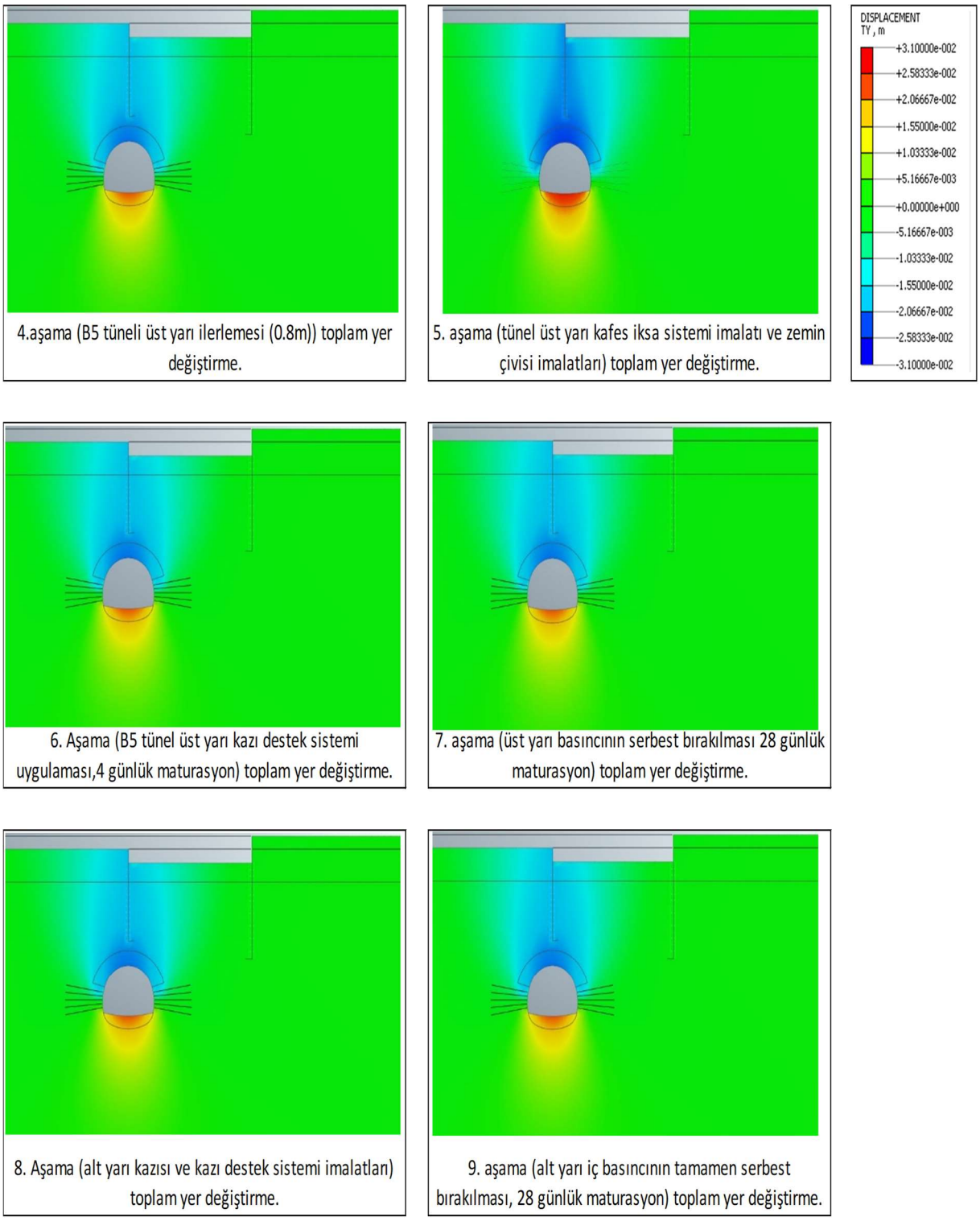
Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 incelendiğinde, ΔZ01 ve ΔZ02 no'lu reflektörü temsil eden ΔZ01 ve ΔZ02 eğrilerinin saha ölçümleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak ΔZ03 eğrisinin, eğilimleri saha ölçümleri ile aynı doğrultuda olsa da ulaşılan maksimum değerlerin ölçüm değerlerinin oldukça altında kaldığı görülmektedir.

4.1.2 Kesit-2 Analiz Sonuçları

Kesit-2 üzerinde gerçekleştirilen 2 boyutlu analizler sonucu her bir aşama için elde edilen toplam yer değiştirme miktarları aşağıdaki şekillerde yer almaktadır.



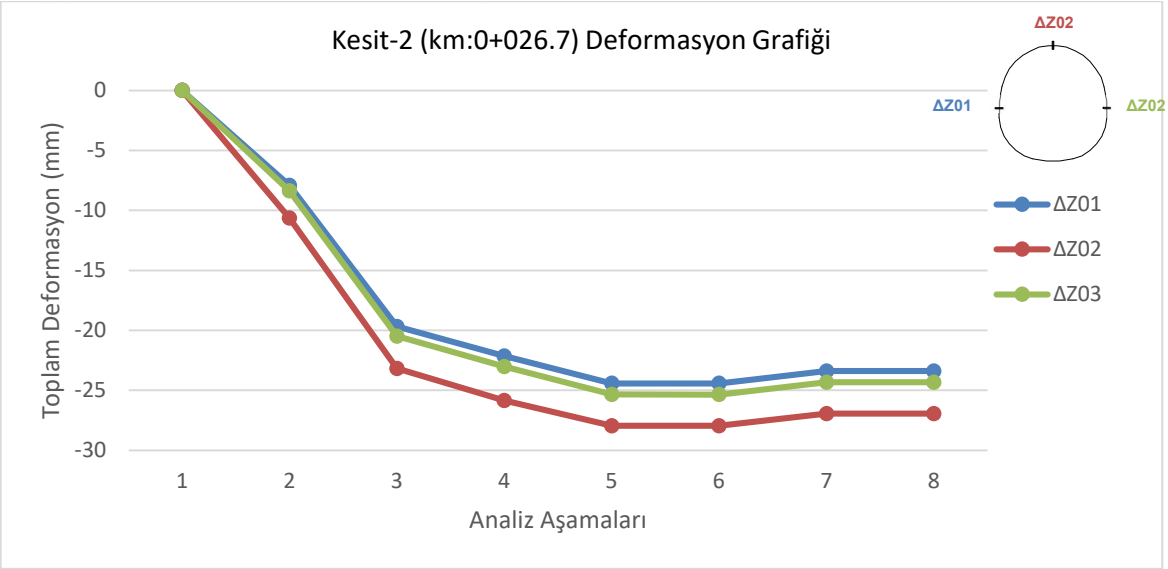
Şekil 4.8: Kesit-2 Geostatik durum ve 3. aşama analiz sonuçları.



Şekil 4.9: Kesit -2 4. aşama ve 9. aşama arası analiz sonuçları.

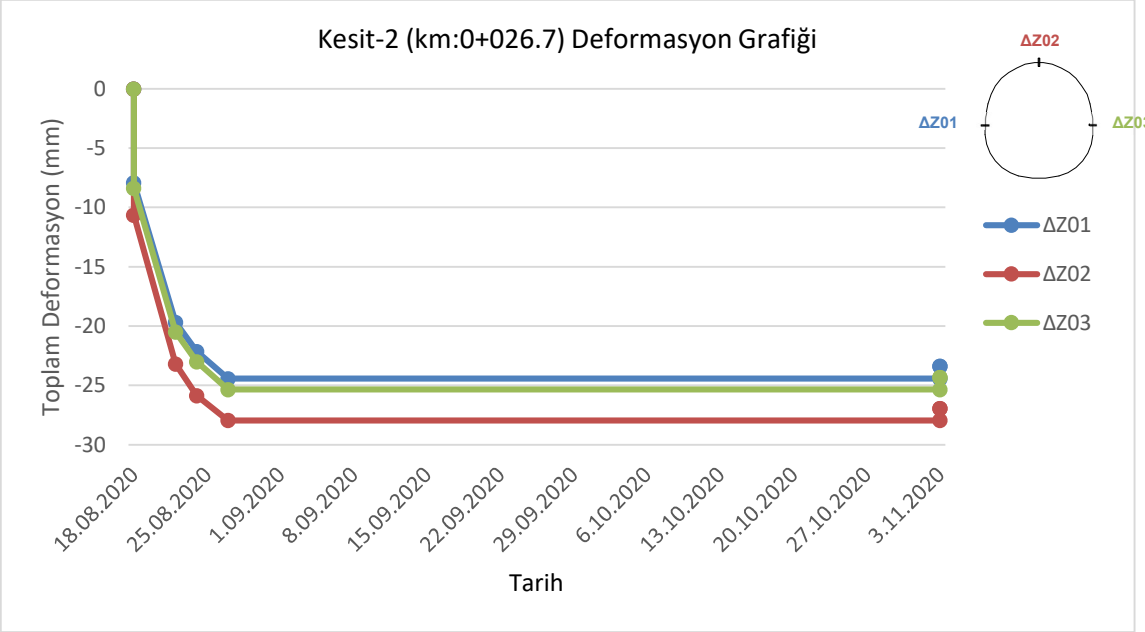
Yukarıda yer alan analiz sonuçları incelendiğinde maksimum deformasyonların tünelin taç bölgesinde, Eskihisar Kavşağı iksa kazıklarına en yakın olduğu bölgede yaklaşık 2.8 cm olduğu görülmektedir. Tünel tabanında ise Kesit-1 sonuçlarında olduğu gibi yaklaşık 3 cm'lik bir kil kabarması söz konusudur.

Analizler sonucunda, sahada reflektör bulunan ve konverjans ölçümlerinin alındığı noktalara (tünel tavanı ve tünel omuzlarında) denk gelen noktalardan deformasyon değerleri okunmuştur. Her bir tünel ilerleme adımı için elde edilen bu grafikler aşağıda yer almaktadır.



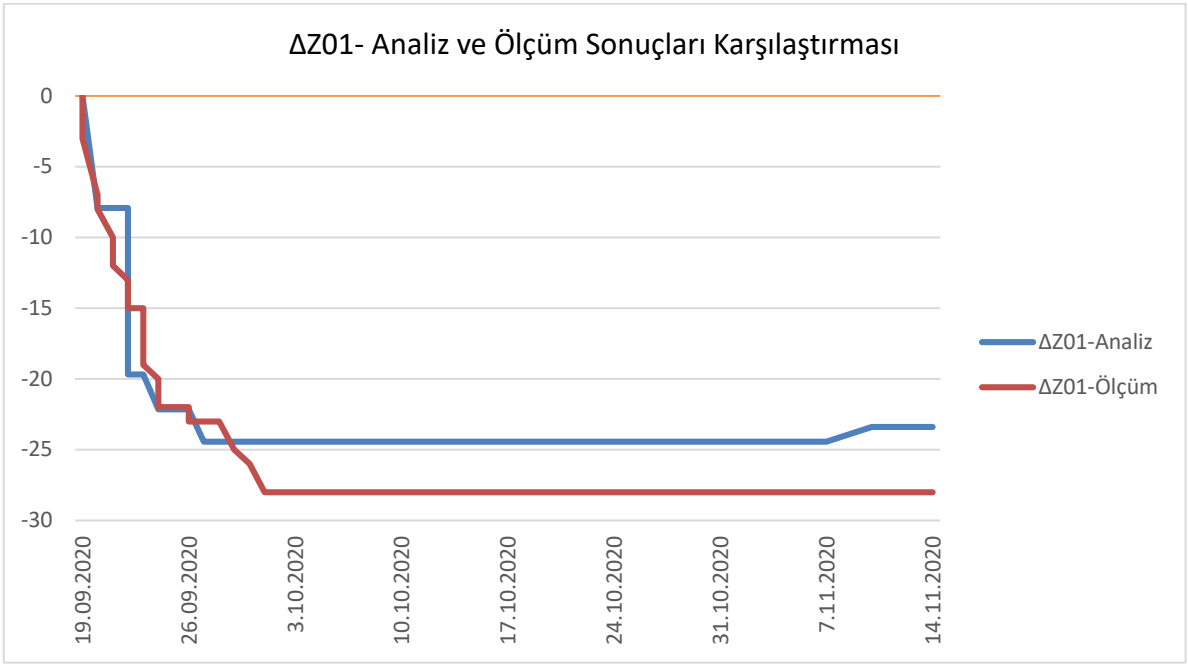
Şekil 4.10: Kesit-2 analizi tünel içi deformasyon-yapım aşamaları grafiği.

Kesit-1 analiz sonuçlarında da yapıldığı gibi deformasyon eğrilerinin saha ölçüm sonuçları ile daha net şekilde kıyaslanabilmesi adına, yeni bir deformasyon grafiği oluşturulmuştur. Yatay eksene yapım aşamaları yerine her bir yapım aşamasına karşılık gelen ilerleme tarihlerinin yazıldığı grafik Şekil 4.23'te yer almaktadır.

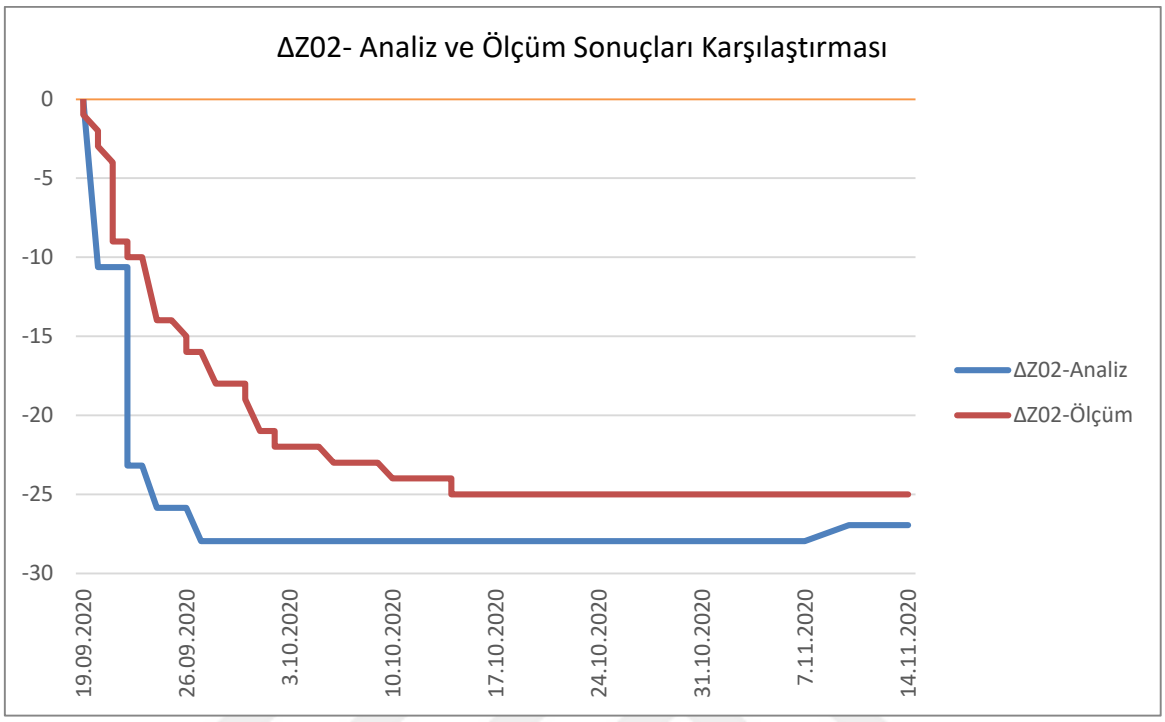


Şekil 4.11: Kesit-2 analizi tünel içi deformasyon-tarih grafiği.

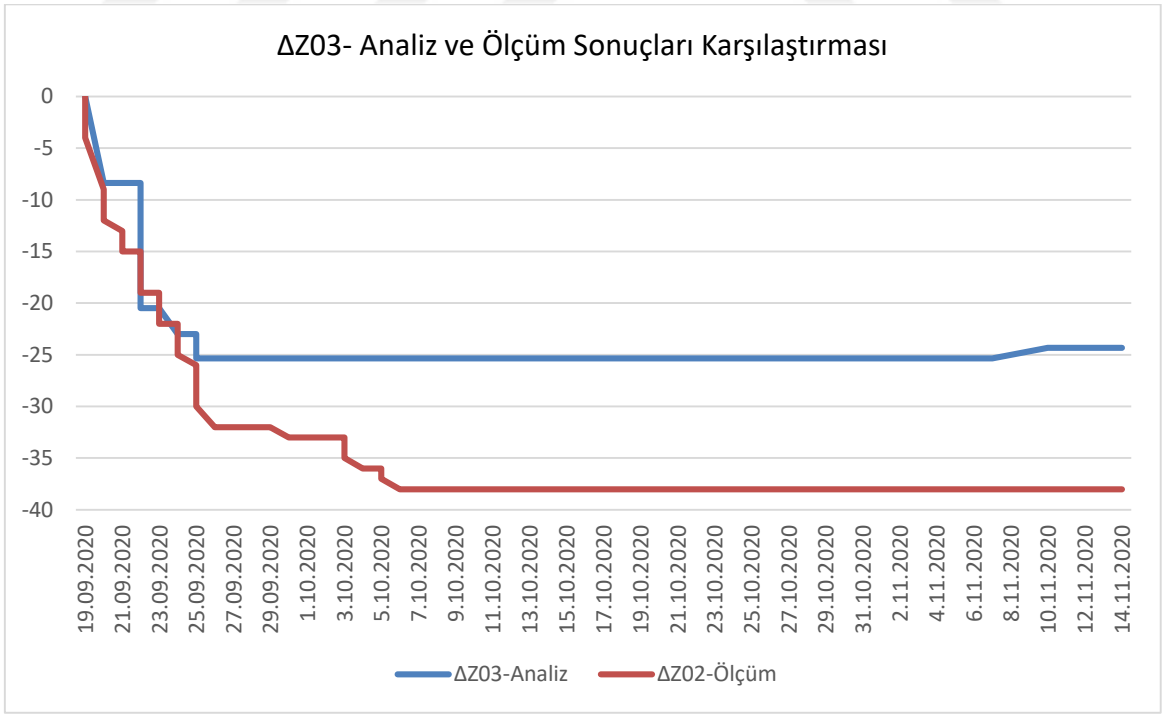
ΔZ01, ΔZ02 ve ΔZ03 reflektörlerini temsil eden her bir eğrinin saha ölçüm grafikleri ile süperpoze edilmiş grafikleri sırasıyla Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da yer almaktadır.



Şekil 4.12: ΔZ01 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.



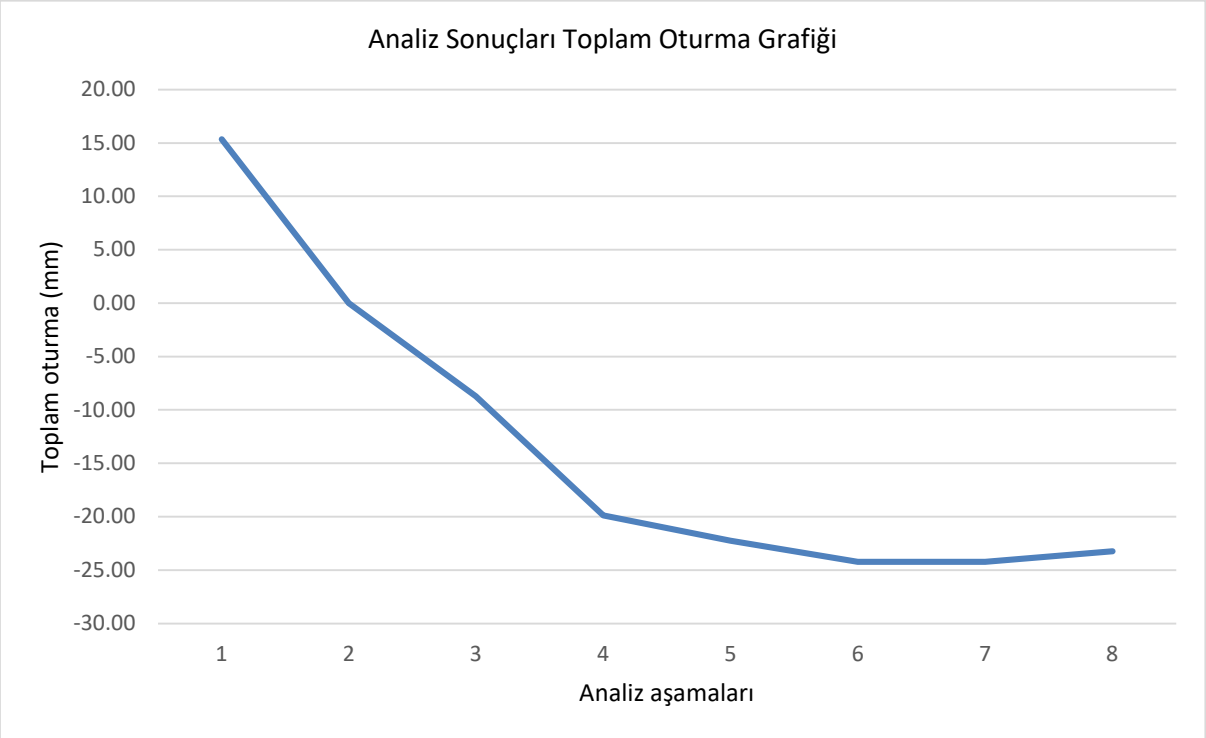
Şekil 4.13: ΔZ02 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.



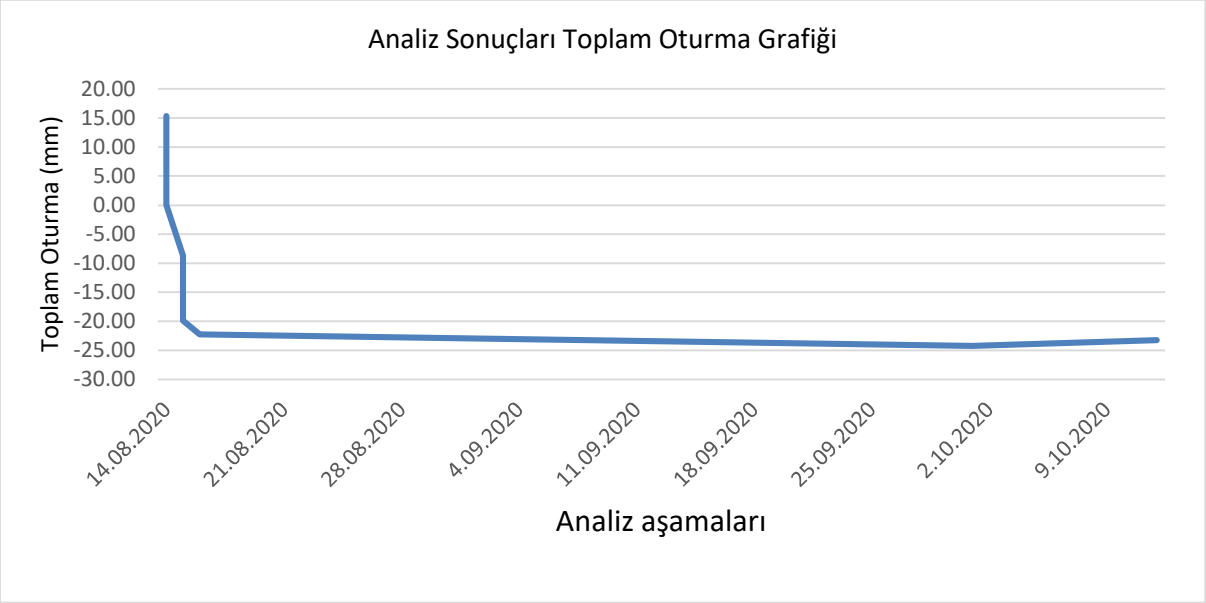
Şekil 4.14: ΔZ03 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.26 incelendiğinde, Kesit-1 Analizlerinde de olduğu gibi, ΔZ01 ve ΔZ02 no'lu reflektörü temsil eden ΔZ01 ve ΔZ02 eğrilerinin saha ölçümleriyle uyumlu olduğu ancak ΔZ03 eğrisinin eğilimi saha ölçümleri ile aynı doğrultuda olsa da ulaşılan maksimum değerlerin ölçüm değerlerinin oldukça altında kaldığı görülmektedir.

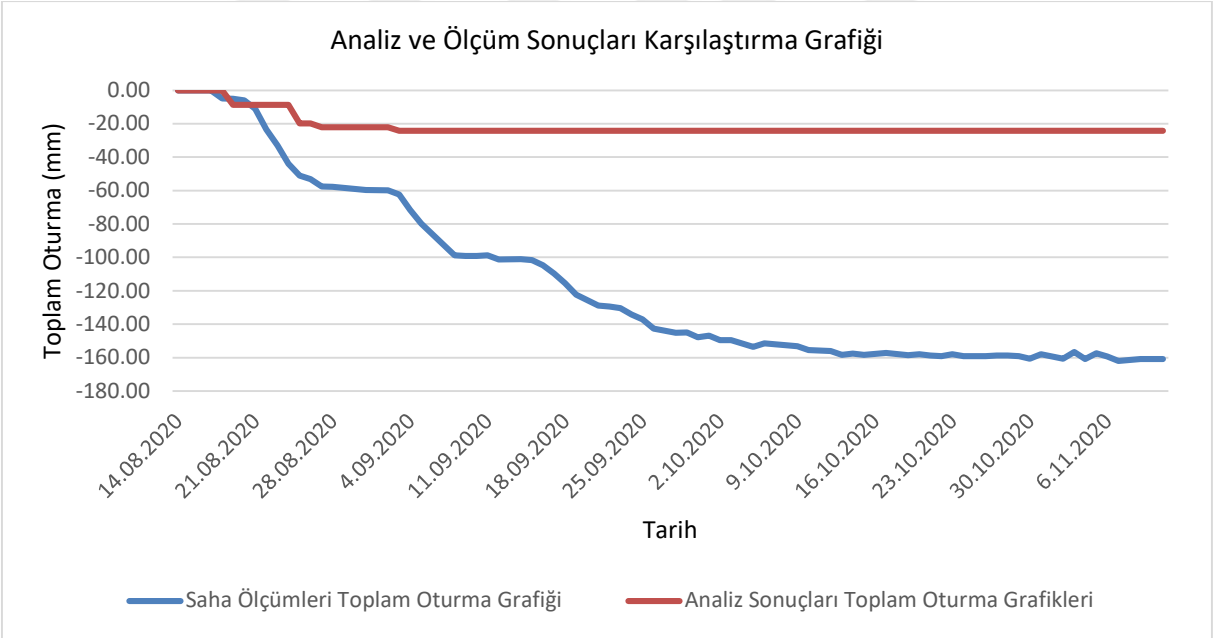
Analiz sonuçlarından ve saha ölçümlerinden de anlaşılacağı üzere Kesit-2 için bir diğer önemli husus da Eskihisar Kavşağı iksa kazıklarında gözlemlenen oturmalardır. Analiz sonuçlarından elde edilen oturma değerleri Şekil 4.27 ve 4.28'de ve saha ölçümlerinden elde edilen süperpoze edilmiş karşılaştırma grafiği ise Şekil 4.29'te yer almaktadır.



Şekil 4.15: Analiz sonuçları toplam oturma-analiz aşamaları grafiği.



Şekil 4.16: Analiz sonuçları toplam oturma-tarih grafiği.

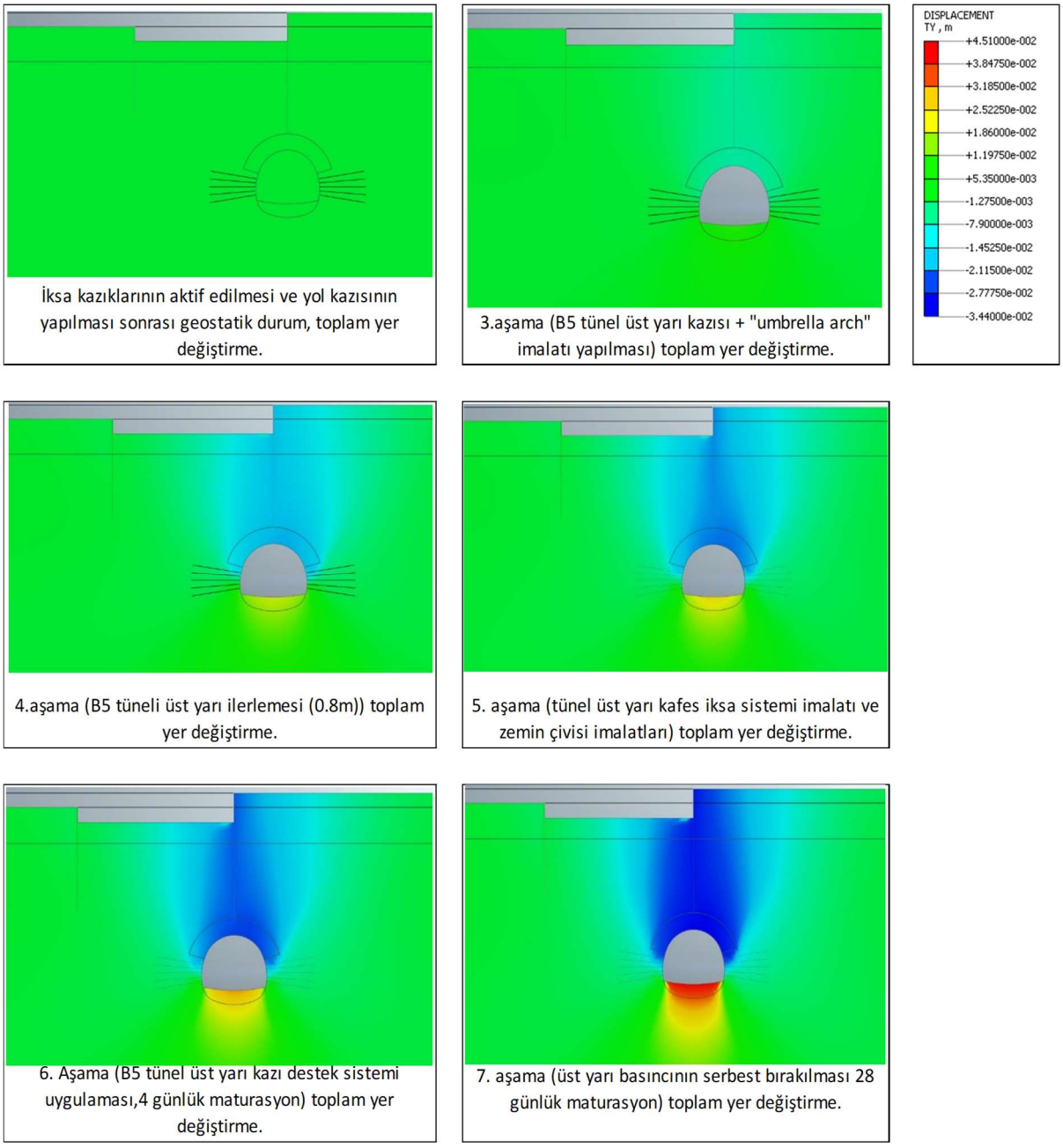


Şekil 4.17: Analiz sonuçları ve ölçüm sonuçları oturma değerleri karşılaştırma grafiği.

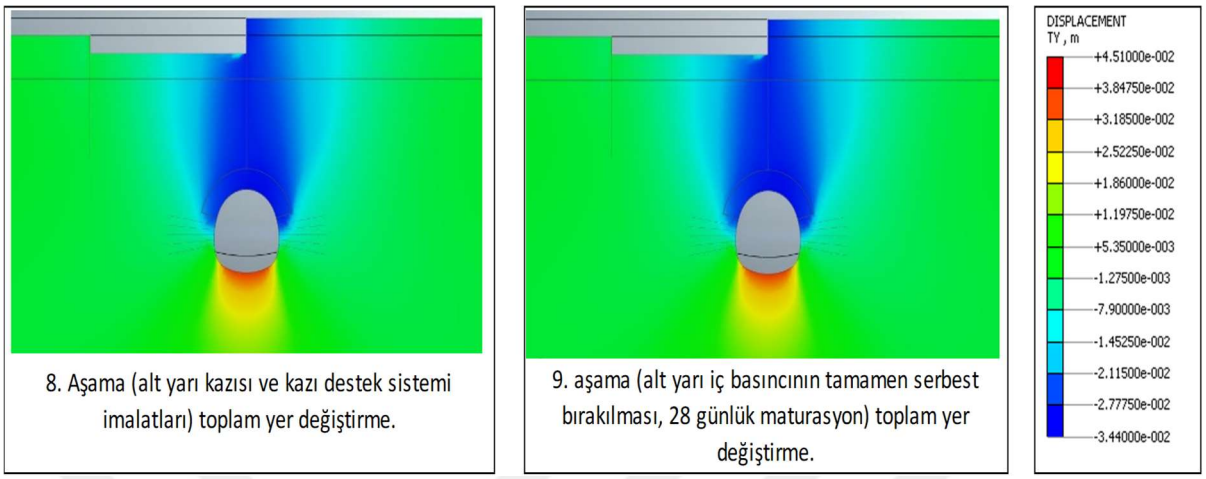
Şekil 4.29 incelendiğinde analiz sonuçlarından elde edilen oturma değerlerinin maksimum 35mm ‘ye ulaştığı görülmektedir. Ancak saha ölçümlerine bakıldığında aynı oturma değerlerinin 162 mm’lere ulaştığı görülmektedir.

4.1.3 Kesit-3 Analiz Sonuçları

Kesit-3 üzerinde gerçekleştirilen 2 boyutlu analizler sonucu her bir aşama için elde edilen toplam yer değiştirme miktarları aşağıdaki şekillerde yer almaktadır.



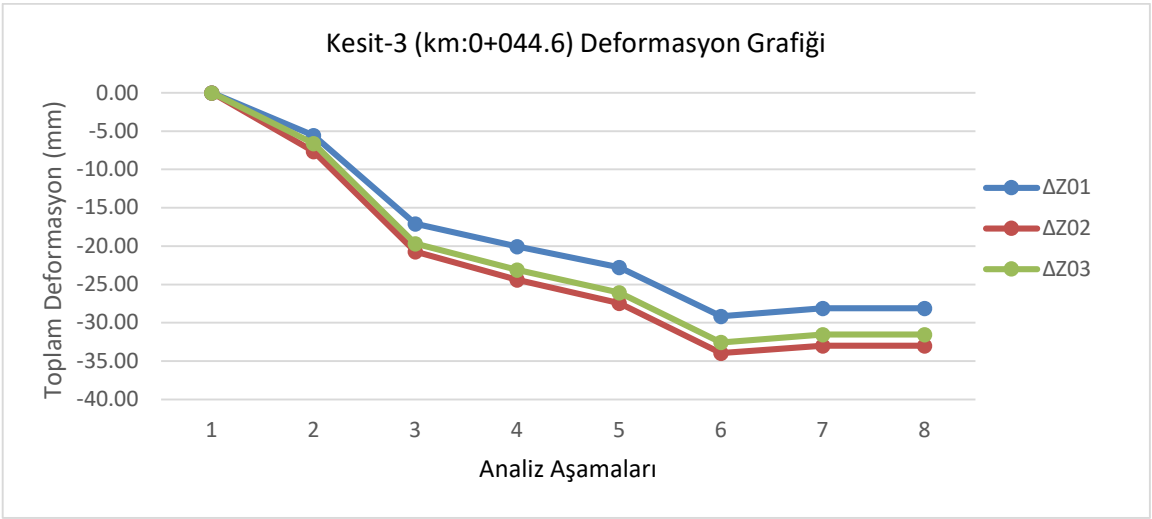
Şekil 4.18: Kesit-3 Geostatik durum ve 7.aşama arası analiz sonuçları.



Şekil 4.19: Kesit-3 8. ve 9.aşama analiz sonuçları.

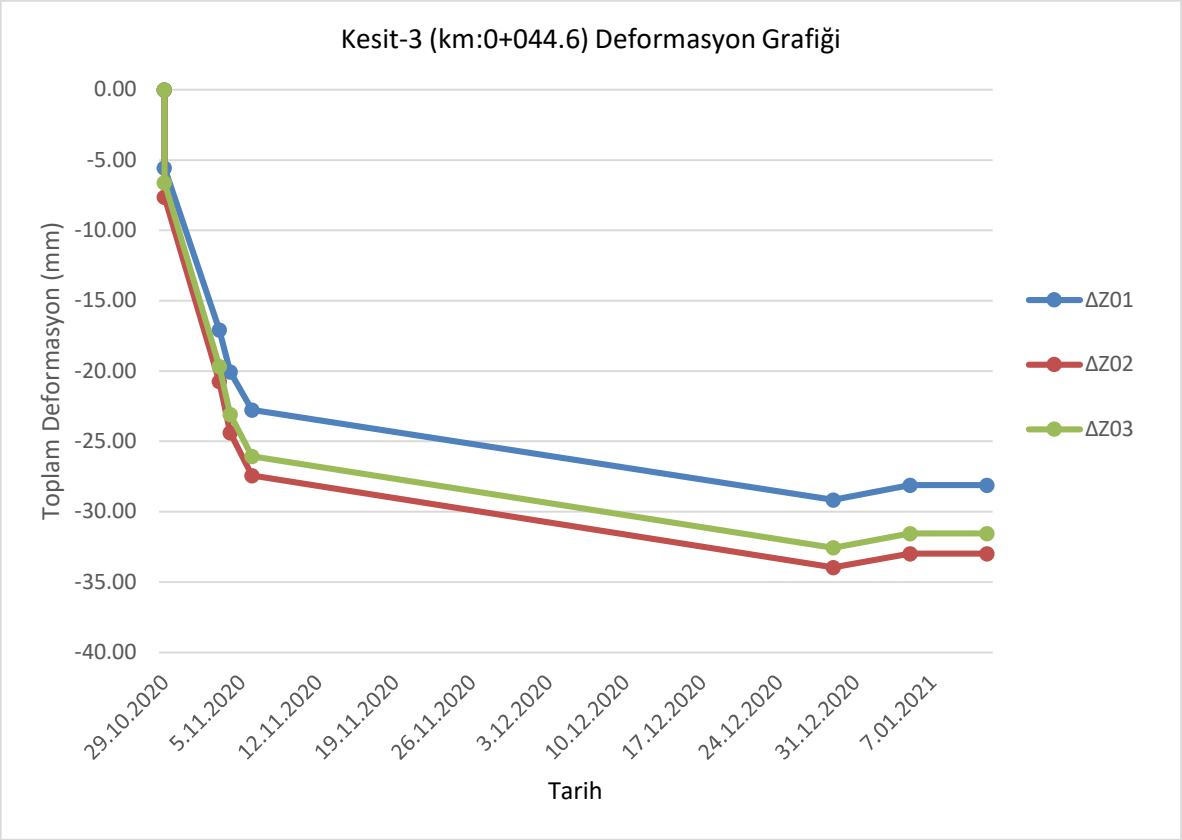
Yukarıda yer alan analiz sonuçları incelendiğinde maksimum deformasyonların tünelin taç bölgesinde, Eskihisar Kavşağı iksa kazıklarına en yakın olduğu bölgede yaklaşık 3.5 cm olduğu görülmektedir. Tünel tabanında ise Kesit-1 ve Kesit-2 sonuçlarında olduğu gibi yaklaşık 3 cm'lik bir kil kabarması söz konusudur.

Analizler sonucunda, sahada reflektör bulunan ve konverjans ölçümlerinin alındığı noktalara (tünel tavanı ve tünel omuzlarında) denk gelen noktalardan deformasyon değerleri okunmuştur. Her bir tünel ilerleme adımı için elde edilen bu grafikler aşağıda yer almaktadır.



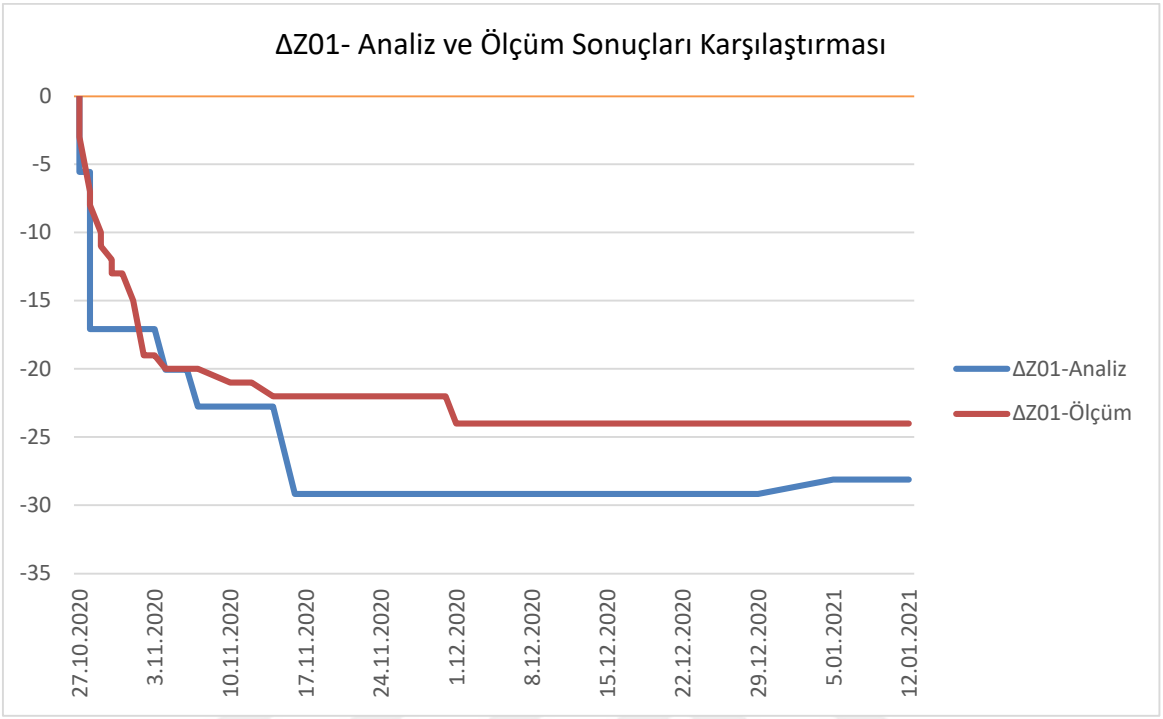
Şekil 4.20: Kesit-3 analizi tünel içi deformasyon-analiz aşamaları grafiği.

Kesit-1 ve Kesit-2 analiz sonuçlarında da yapıldığı gibi deformasyon eğrilerinin saha ölçüm sonuçları ile daha net şekilde kıyaslanabilmesi adına, yeni bir deformasyon grafiği oluşturulmuştur. Yatay eksene yapım aşamaları yerine her bir yapım aşamasına karşılık gelen ilerleme tarihlerinin yazıldığı grafik Şekil 4.39'da yer almaktadır.

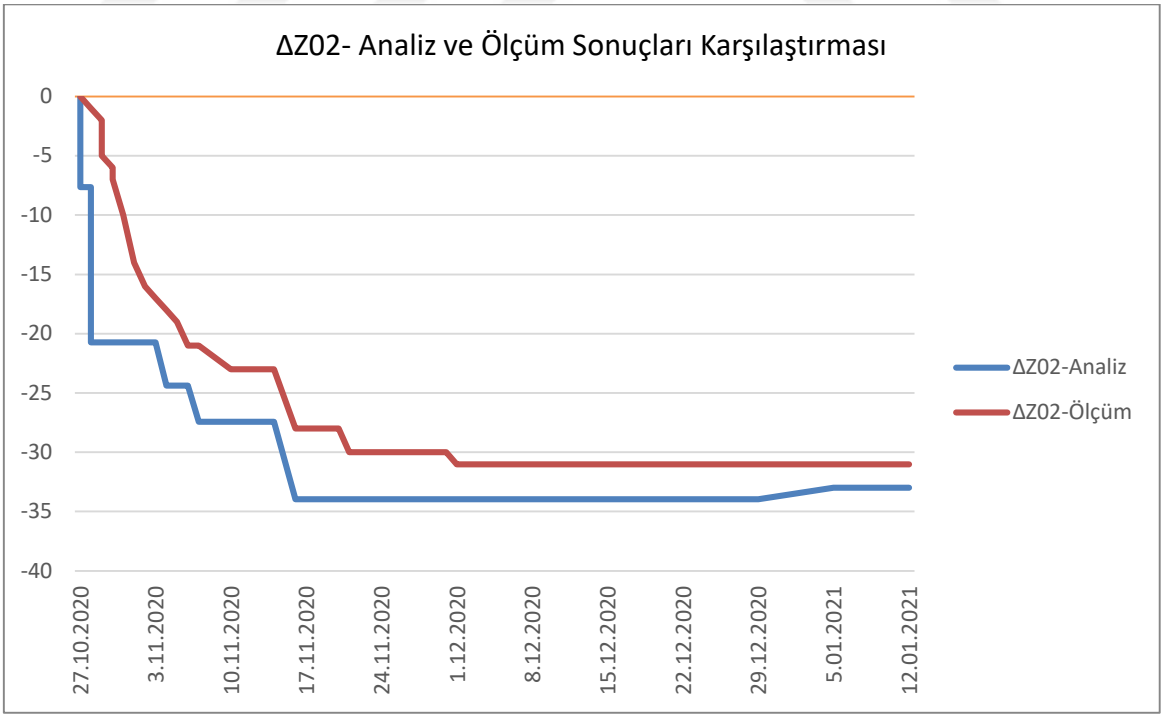


Şekil 4.21: Kesit-3 analizi tünel içi deformasyon-tarih grafiği.

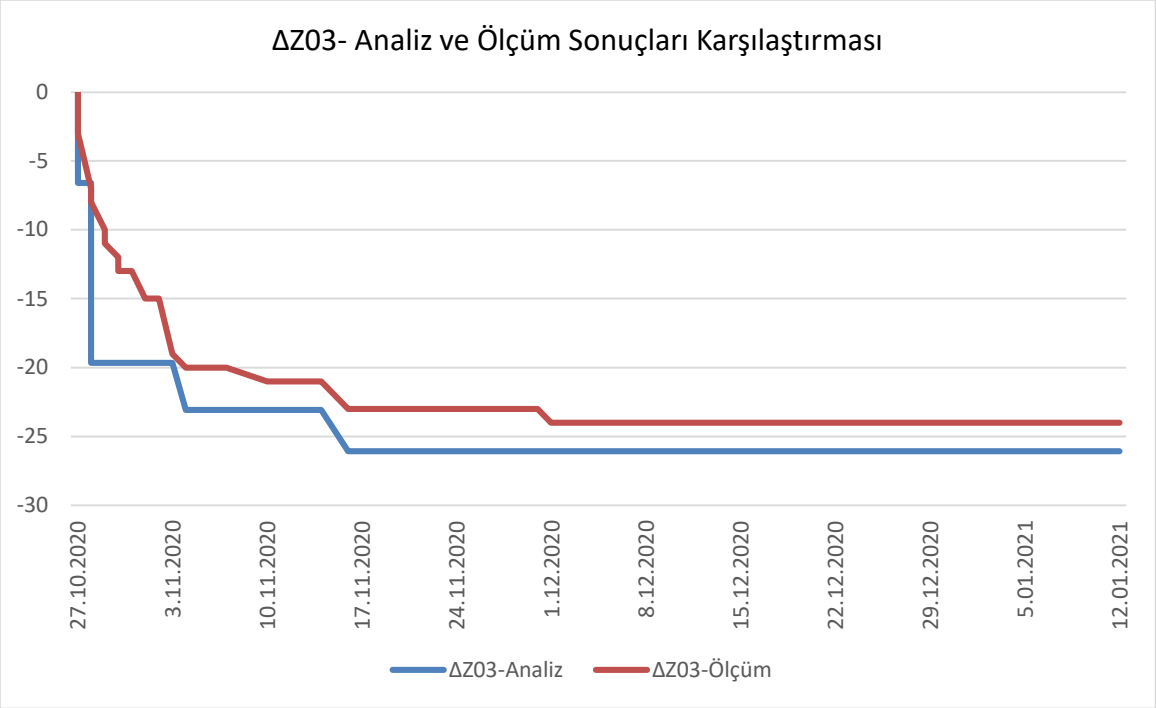
ΔZ01, ΔZ02 ve ΔZ03 reflektörlerini temsil eden her bir eğrinin saha ölçüm grafikleri ile süperpoze edilmiş grafikleri sırasıyla Şekil 4.40, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'de yer almaktadır.



Şekil 4.22: ΔZ01 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

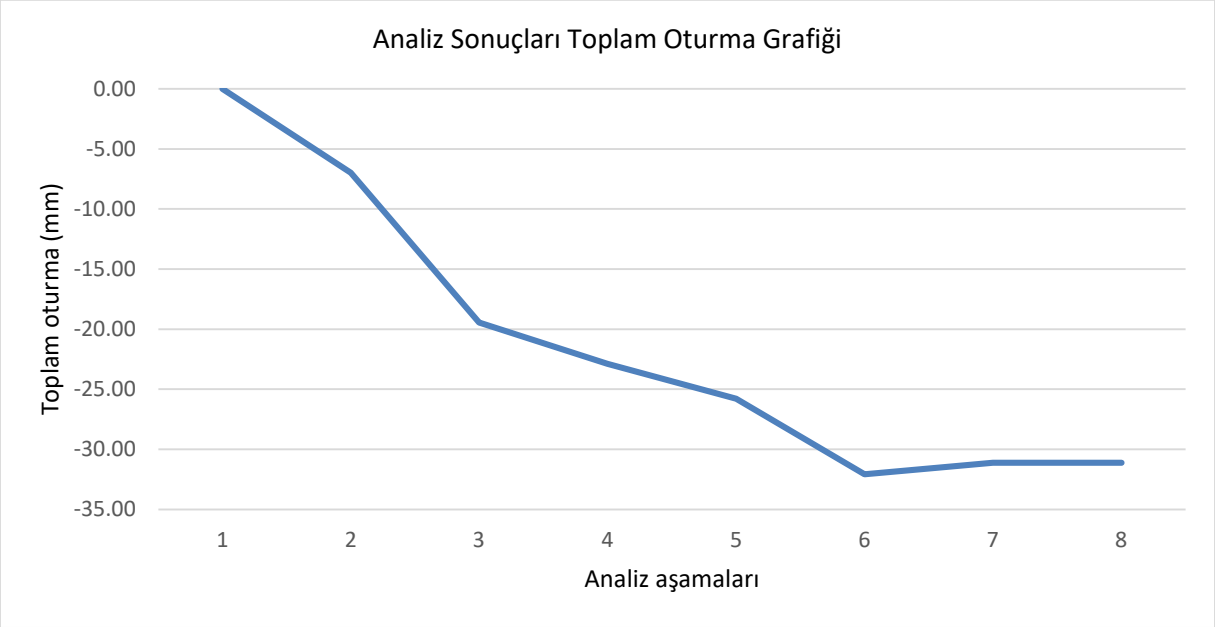


Şekil 4.23: ΔZ02 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

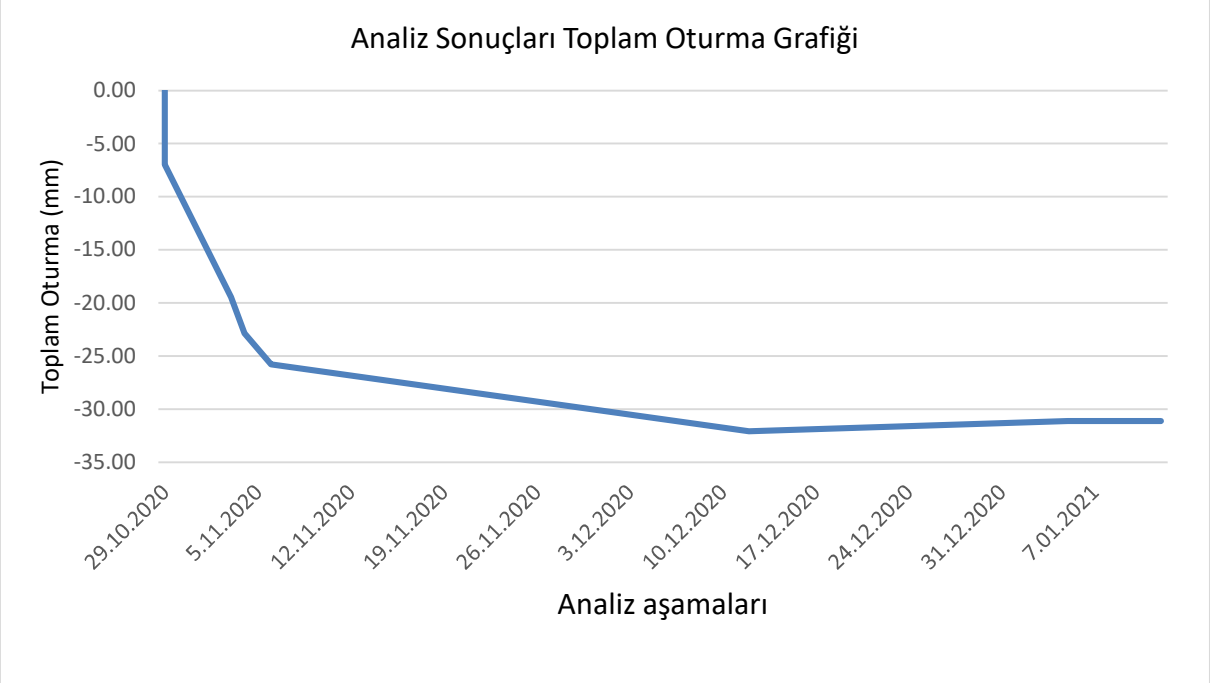


Şekil 4.24: ΔZ03 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

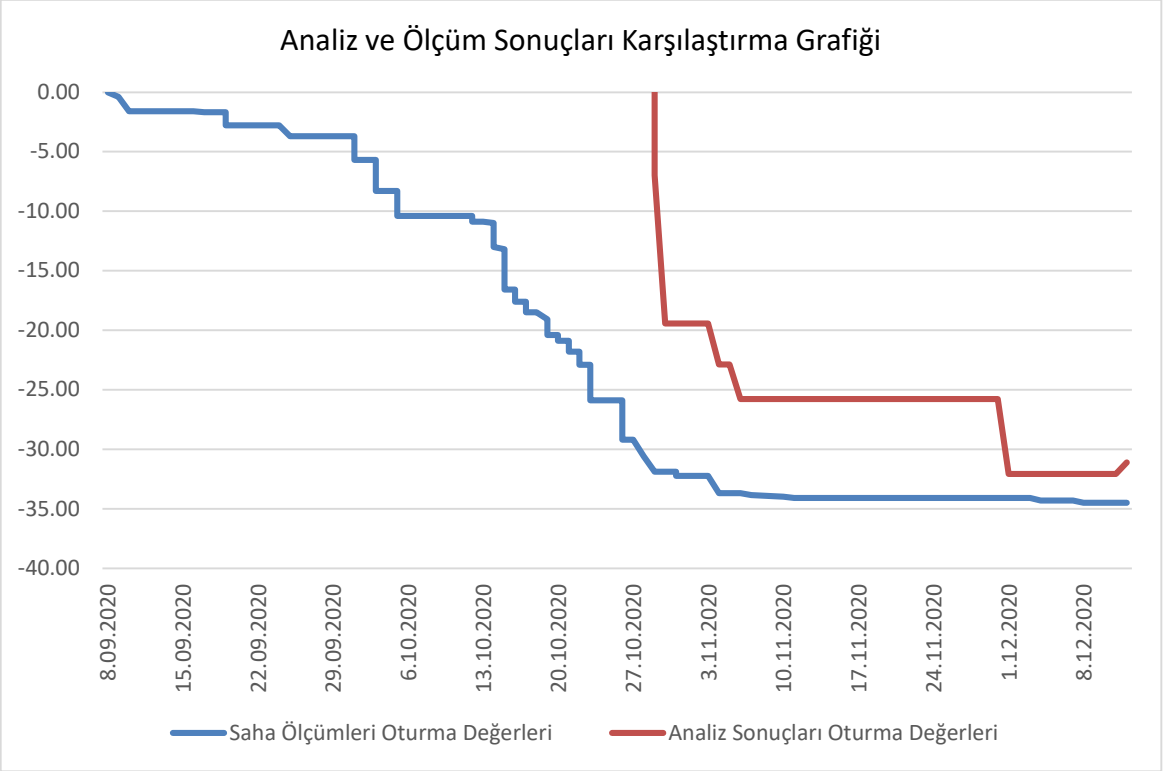
Kesit-3 için de tünel ekseninin Eskihisar Kavşağı iksa kazıklarının tam altında yer aldığı düşünülecek olursa, Kesit-2'de olduğu gibi bir diğer önemli husus da bu kazıklarda gözlemlenen oturmalardır. Analiz sonuçlarından elde edilen oturma değerleri Şekil 4.43 ve 4.44'de ve saha ölçümlerinden elde edilen süperpoze edilmiş karşılaştırma grafiği ise Tablo 4.45'te yer almaktadır.



Şekil 4.25: Analiz sonuçları toplam oturma-analiz aşamaları grafiği.



Şekil 4.26: Analiz sonuçları toplam oturma-tarih grafiği.

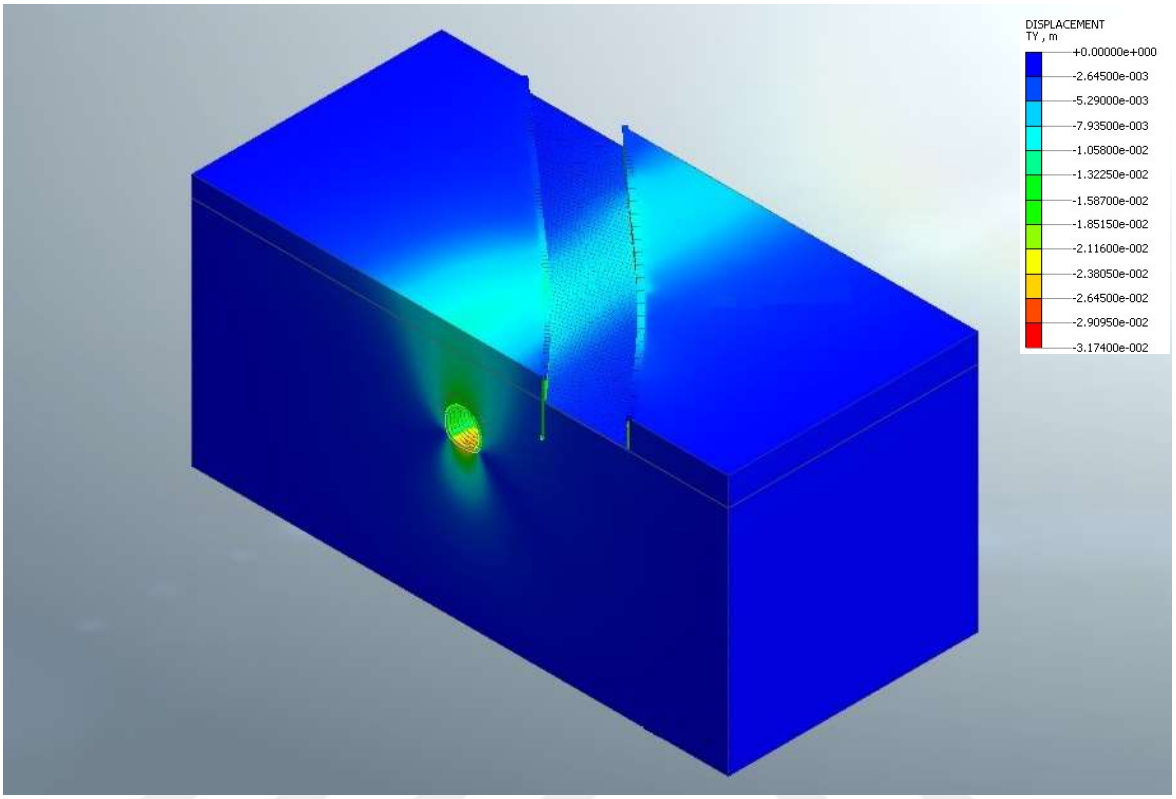


Şekil 4.27: Analiz sonuçları ve ölçüm sonuçları oturma değerleri karşılaştırma grafiği.

4.2 3 BOYUTLU ANALİZ SONUÇLARI

Bölüm 3.4'te özetlenen 3 boyutlu sayısal modellemeler tamamlandıktan sonra, Midas GTS NX ortamında analizler gerçekleştirilmiştir. 58 aşamadan oluşan analizin sonuçlar çıktısı ekran görüntüsü Şekil 4.1'de yer almaktadır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, tünel tavanında oluşan deplasmanlar 2 boyutlu analiz sonuçları ve sahadan elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır.

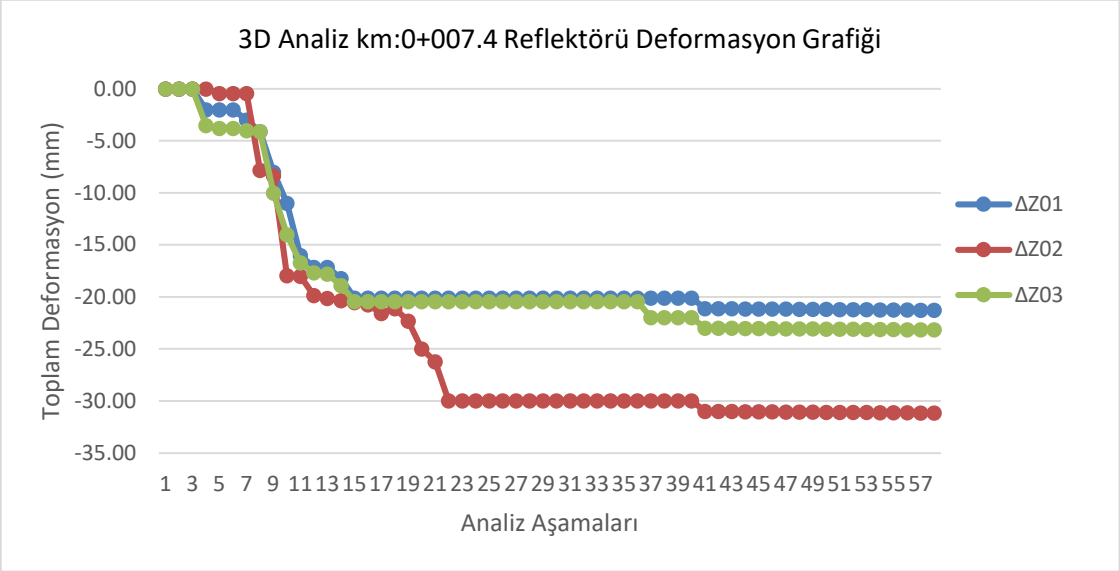
2 boyutlu analiz kesitlerine denk gelen bölgelerden kazı aşamasına göre deformasyonlar okunmuş ve okunan her bir noktadan elde edilen grafikler ile reflektör grafikleri karşılaştırılmıştır. Grafikler oluşturulurken, saha ölçümleri ile kıyaslama yapabilmek adına, saha ilerlemelerinden faydalanılarak her bir analiz aşamasına karşılık gelen tarih belirlenmiştir.



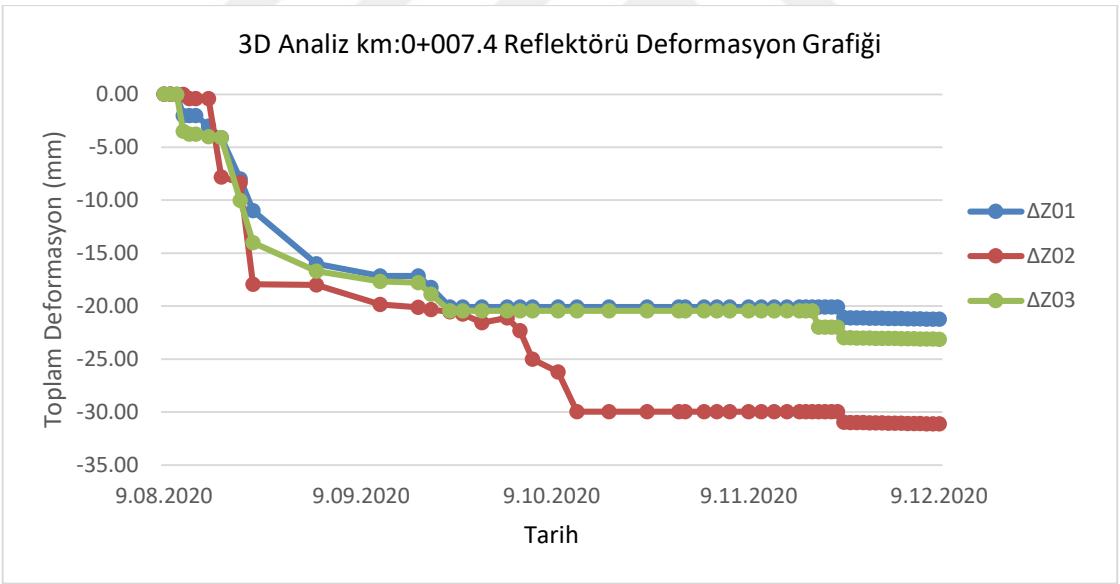
Şekil 4.28: 3 Boyutlu analiz ekran çıktısı.

4.2.1 km: 0+007.40 Analiz Sonuçları İncelemesi

2 Boyutlu analizlerde Kesit-1 olarak adlandırılan ve sahada 0+007.40 reflektörüne denk gelen bölgeye ait deformasyon grafikleri Şekil 4.47 ve Şekil 4.48'de yer almaktadır.

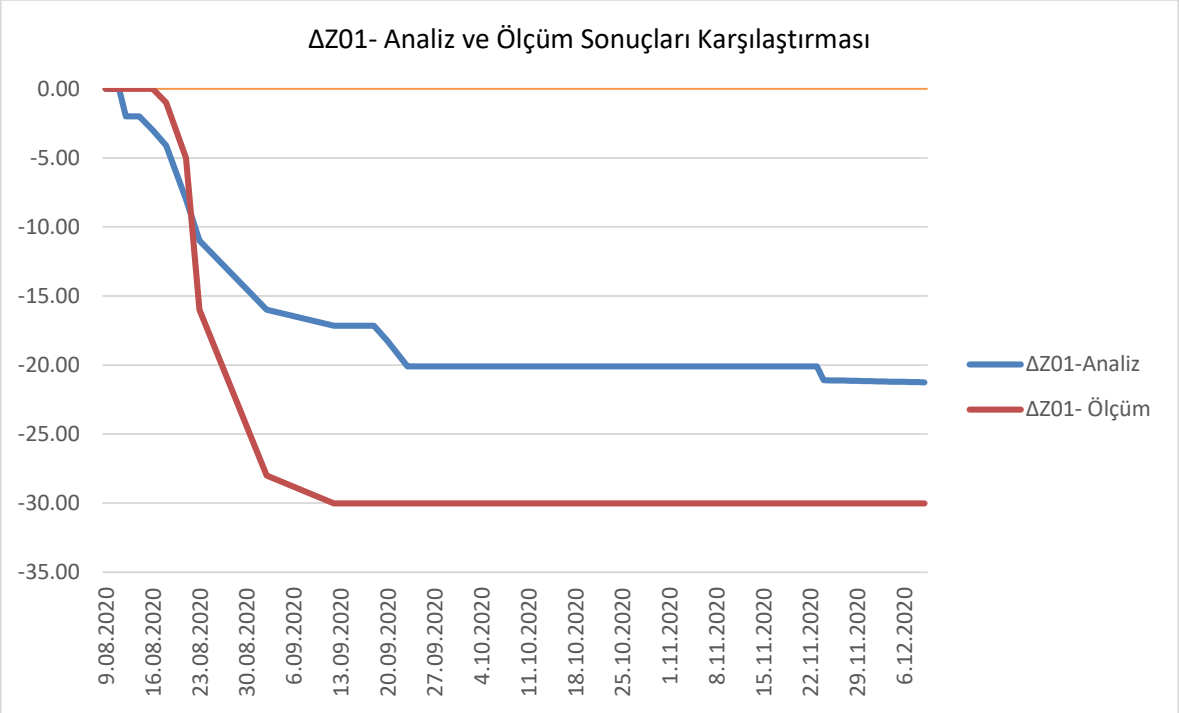


Şekil 4.29: 3 Boyutlu analiz, Kesit-1 deformasyon- analiz aşamaları grafiği.

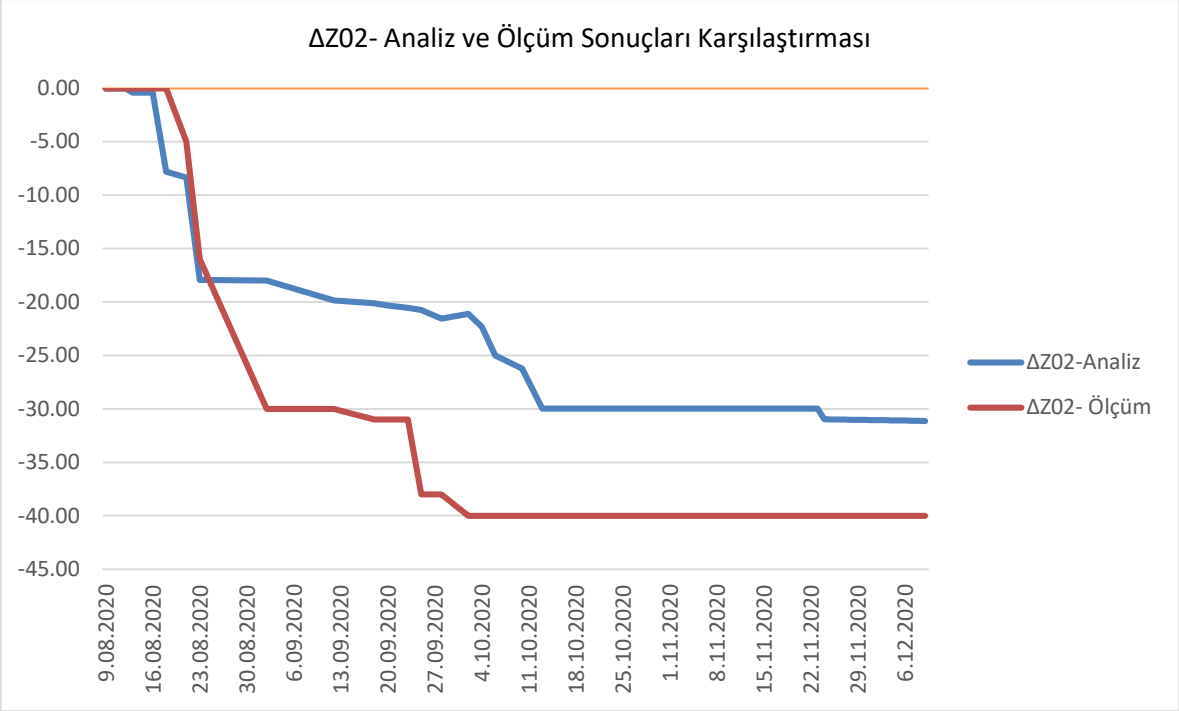


Şekil 4.30: 3 Boyutlu analiz, Kesit-1 deformasyon-tarih grafiği.

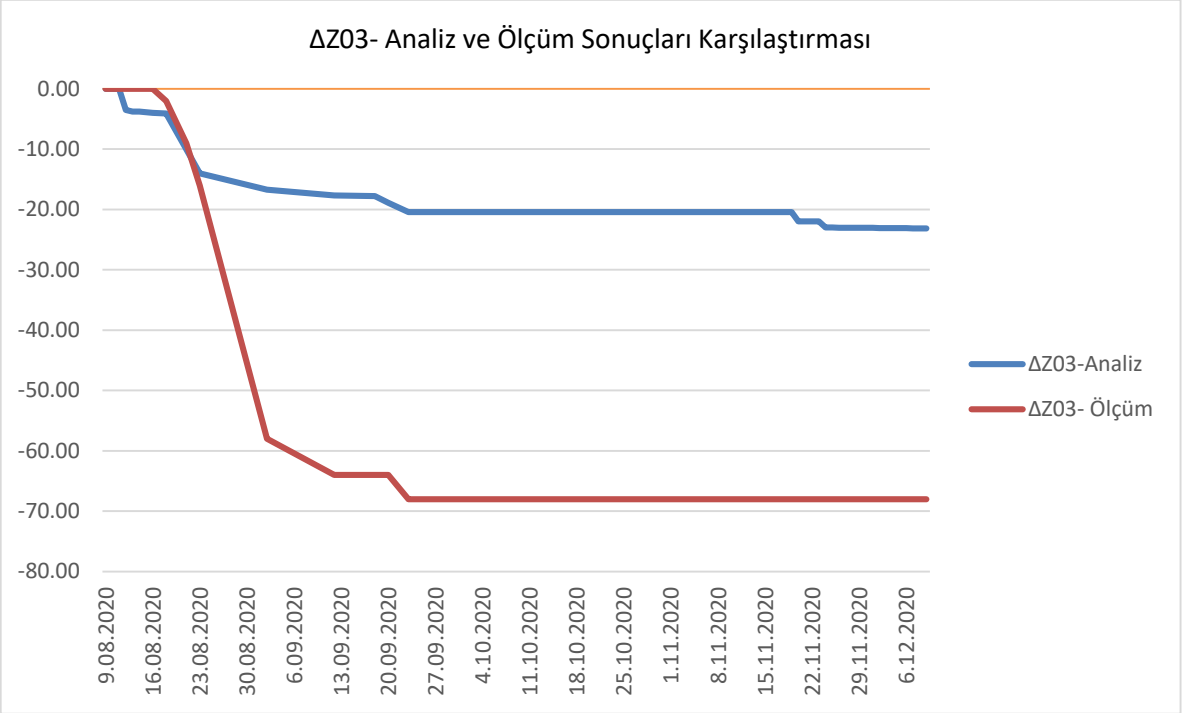
Aynı bölge için, ΔZ01, ΔZ02 ve ΔZ03 reflektörlerini temsil eden her bir eğrinin saha ölçüm grafikleri ile süperpoze edilmiş grafikleri sırasıyla Şekil 4.49, Şekil 4.50 ve Şekil 4.51'de yer almaktadır.



Şekil 4.31: ΔZ01 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

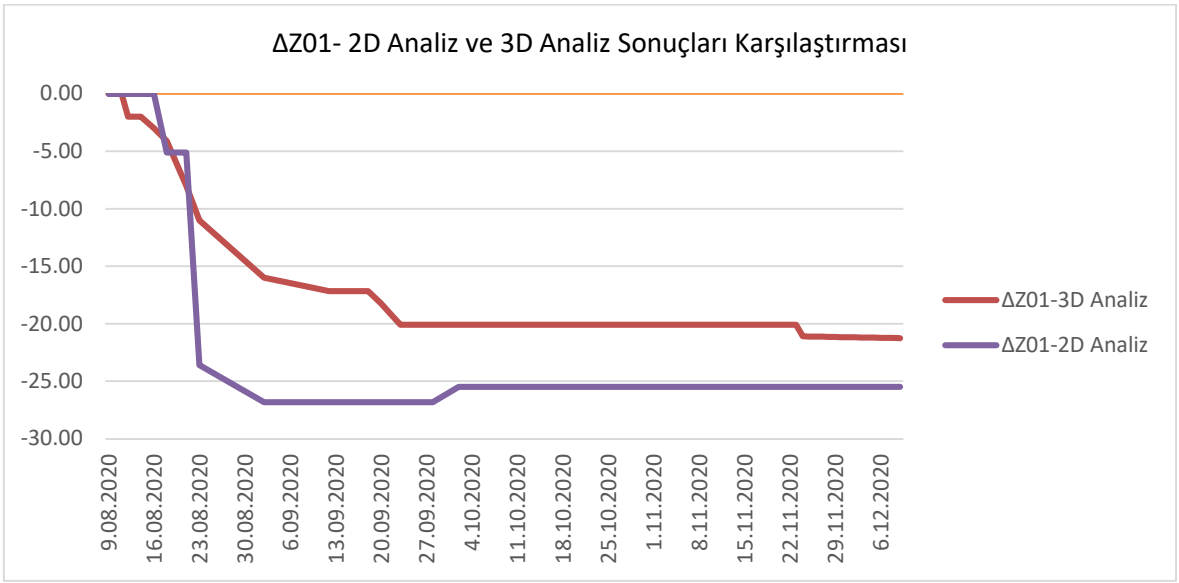


Şekil 4.32: ΔZ02 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

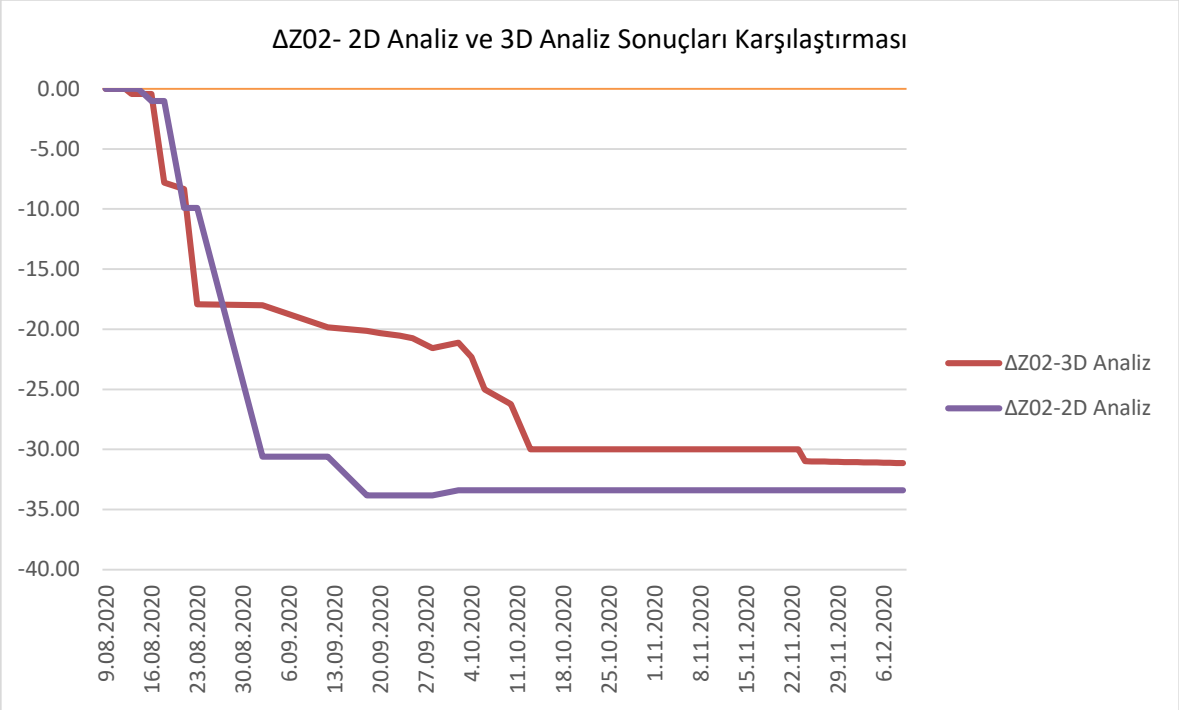


Şekil 4.33: ΔZ03 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

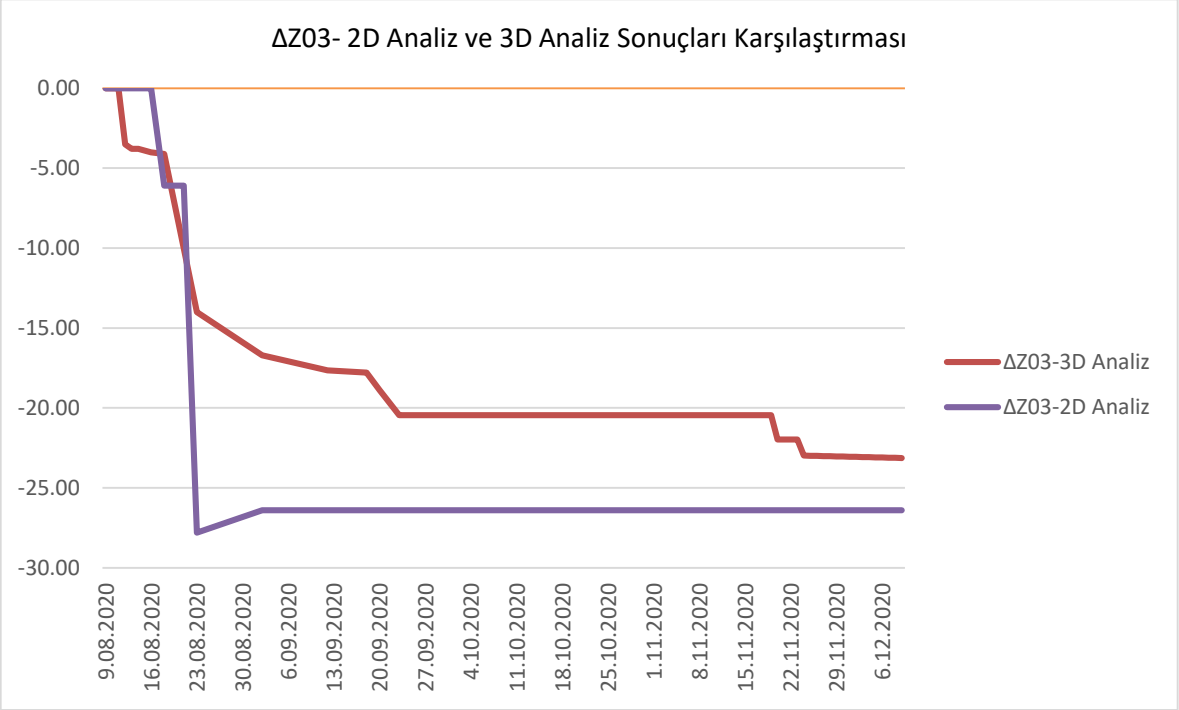
Aynı bölge için 3 boyutlu analiz sonuçları ile 2 boyutları karşılaştırıldığında ise Şekil 4.52, Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'de yer alan grafikler elde edilmiştir.



Şekil 4.34: ΔZ01 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği.



Şekil 4.35: ΔZ02 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği.



Şekil 4.36: ΔZ03 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği**.**

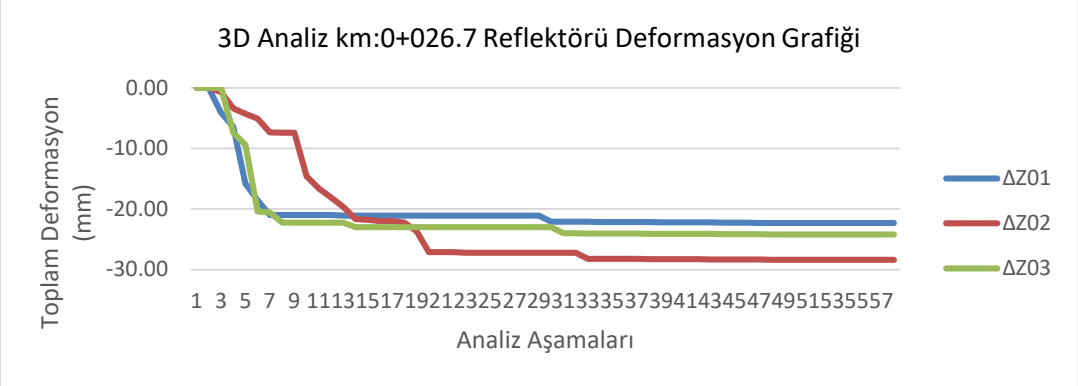
Yukarıda yer alan grafikler incelendiğinde, Şaft-3 B5 Yaklaşım Tüneli'nin hemen başlarında yer alan bölgedeki kesiti temsil eden ve 2 boyutlu analizlerde Kesit-1 olarak adlandırılan, sahada 0+007.4 reflektörlerinin bulunduğu bölge için gerçekleştirilen 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçlarının tünelin taç bölgesi için 2mm'lik bir fark olduğu omuz bölgelerindeki noktalar için ise sırasıyla 4 ve 3 mm'lik bir fark olduğu gözükmektedir. Oluşan bu farkların tolere edilebilecek kadar küçük olduğu görülmektedir.

Diğer bir yandan bu bölge için 3 boyutlu analizlerin saha ölçümleri ile genel olarak uyumlu olduğu ancak 2 boyutlu analizler kadar yaklaşamadığı görülmektedir.

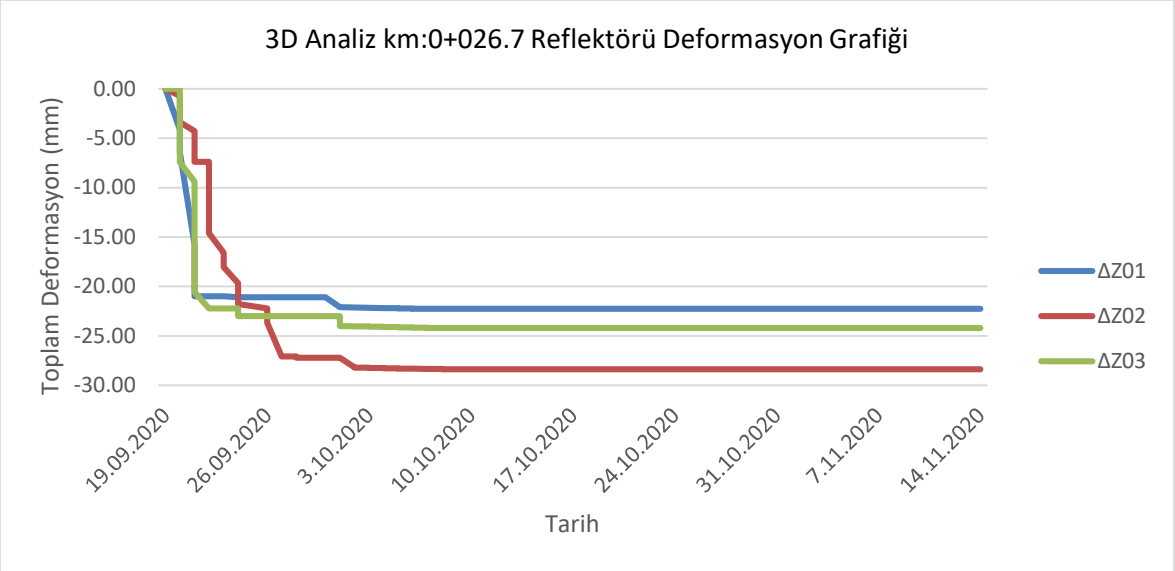
Ayrıca ΔZ03 reflektörü için analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafikleri incelendiğinde, tünelin sağ tarafında oluşan maksimum deplasmanların 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçları ile oldukça uyumsuz olduğu görülmektedir. 2 Boyutlu analiz sonuçlarında maksimum -27.8 mm deplasman ve 3 boyutlu analiz sonuçlarında ise maksimum -23.2 mm'lik deplasman okunurken sahada okunan maksimum deplasman değeri -68mm'dir. Analiz sonuçlarının birbirini doğruladığı göz önüne alınırsa sahada gerçekleşen imalatlar sırasında lokal olarak bir problem oluştuğu söylenebilir.

4.2.2 km: 0+0026.70 Analiz Sonuçları İncelemesi

2 Boyutlu analizlerde Kesit-2 olarak adlandırılan ve sahada 0+026.70 reflektörüne denk gelen bölgeye ait deformasyon grafikleri Şekil 4.55 ve Şekil 4.56'da yer almaktadır.

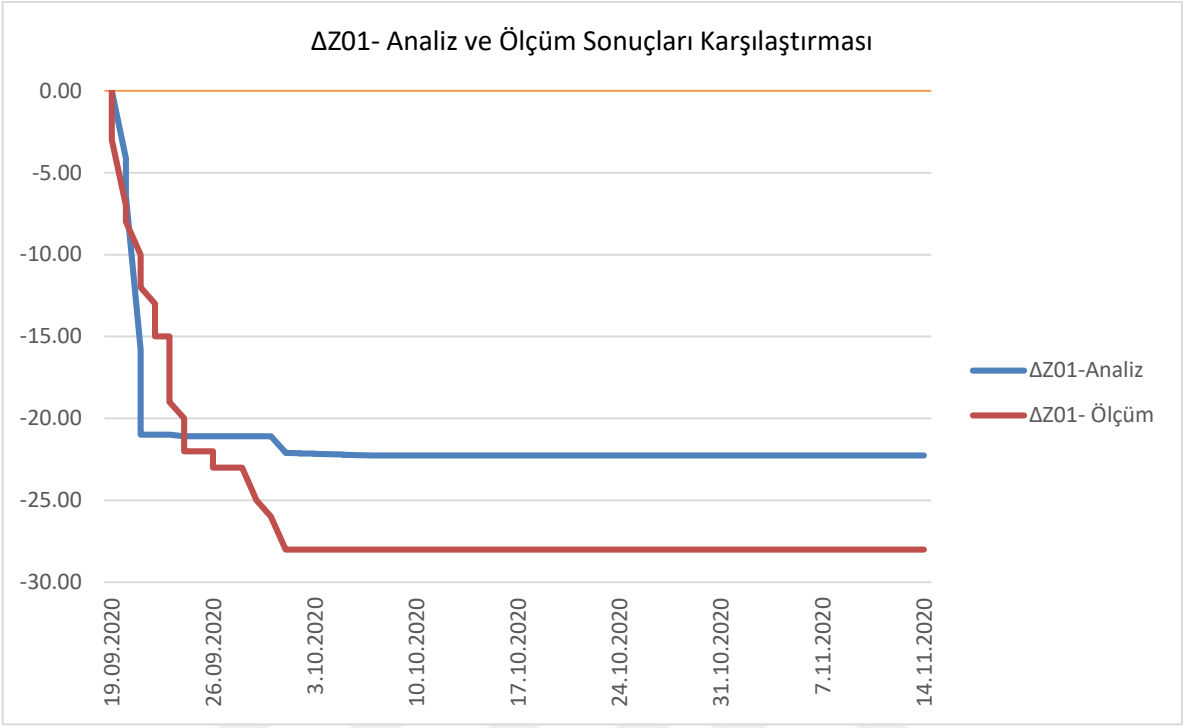


Şekil 4.37: 3 Boyutlu analiz, Kesit-2 deformasyon- analiz aşamaları grafiği.

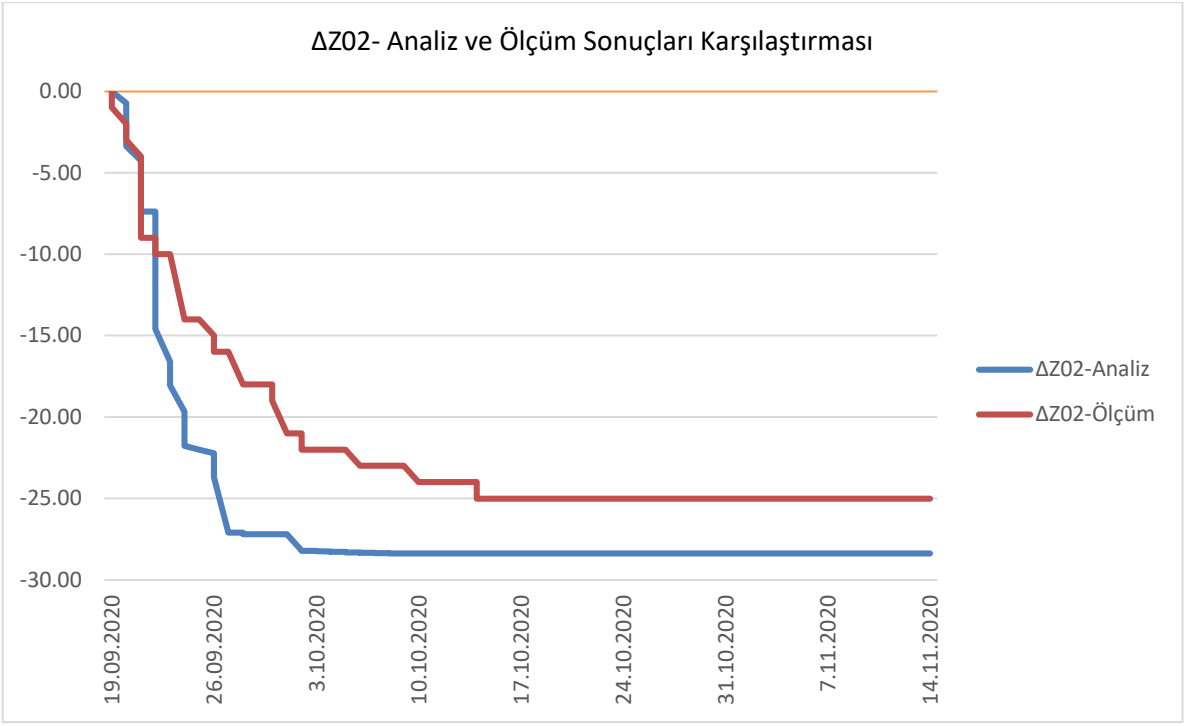


Şekil 4.38: 3 Boyutlu analiz, Kesit-2 deformasyon- analiz aşamaları grafiği.

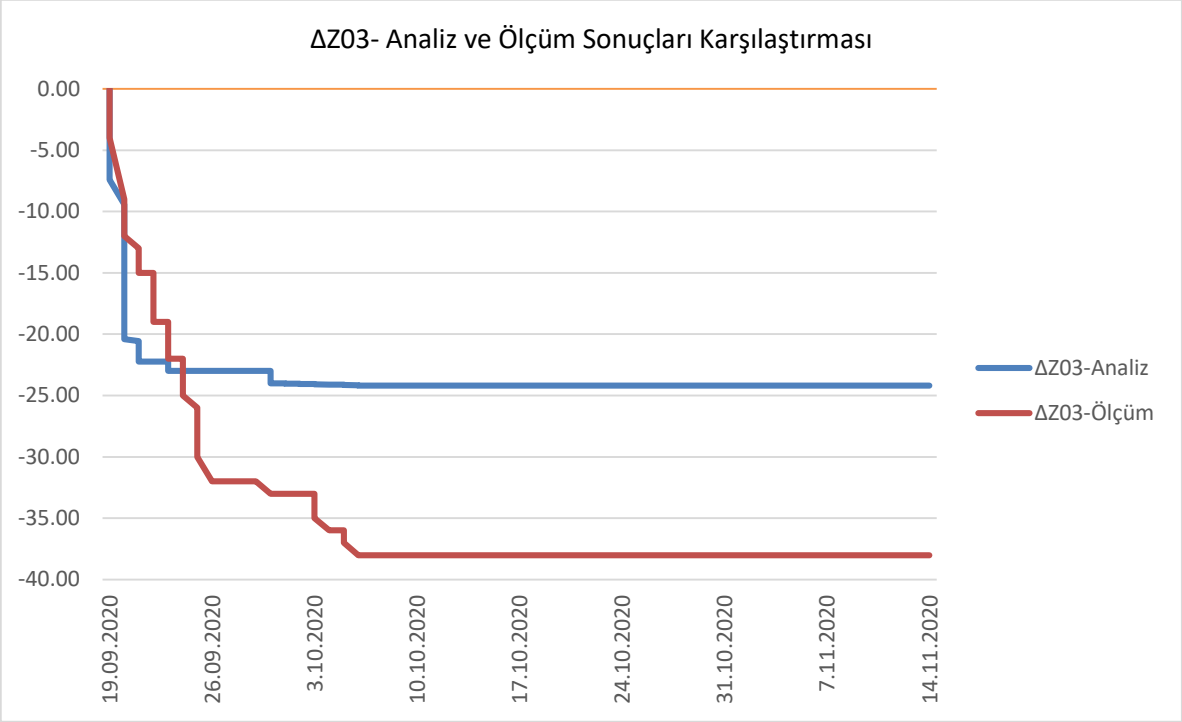
Aynı bölge için, ΔZ01, ΔZ02 ve ΔZ03 reflektörlerini temsil eden her bir eğrinin saha ölçüm grafikleri ile süperpoze edilmiş grafikleri sırasıyla Şekil 4.57, Şekil 4.58 ve Şekil 4.59'da yer almaktadır.



Şekil 4.39: ΔZ01 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

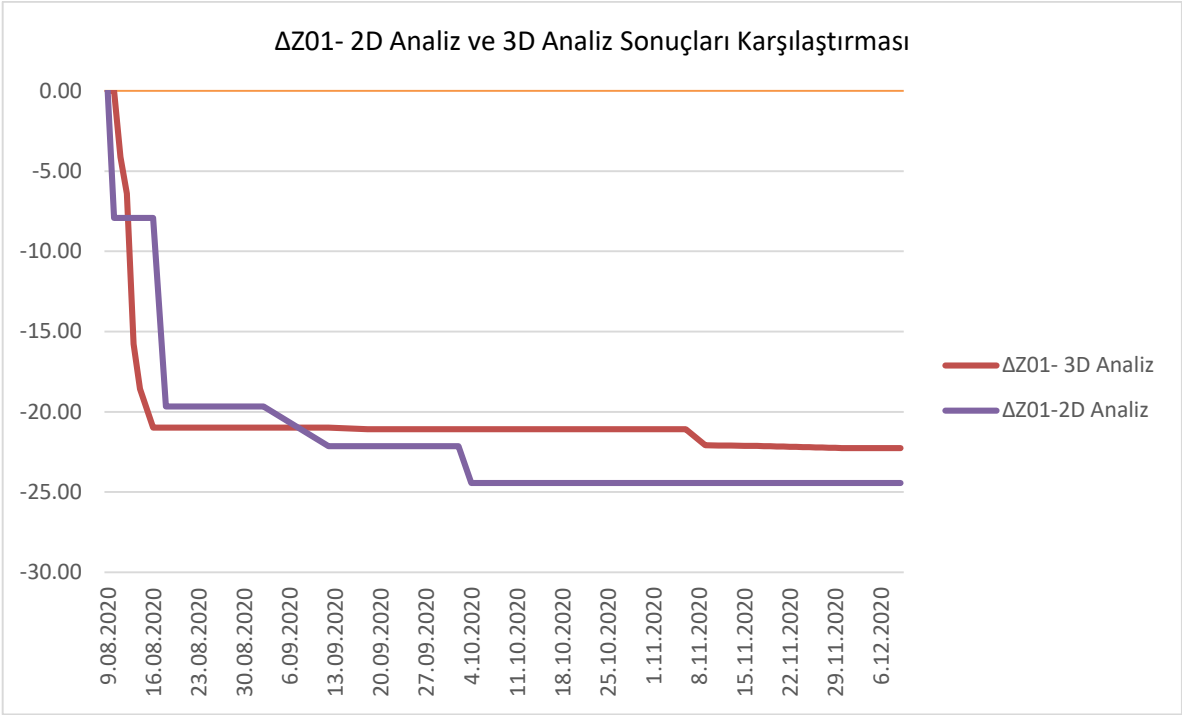


Şekil 4.40: ΔZ02 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

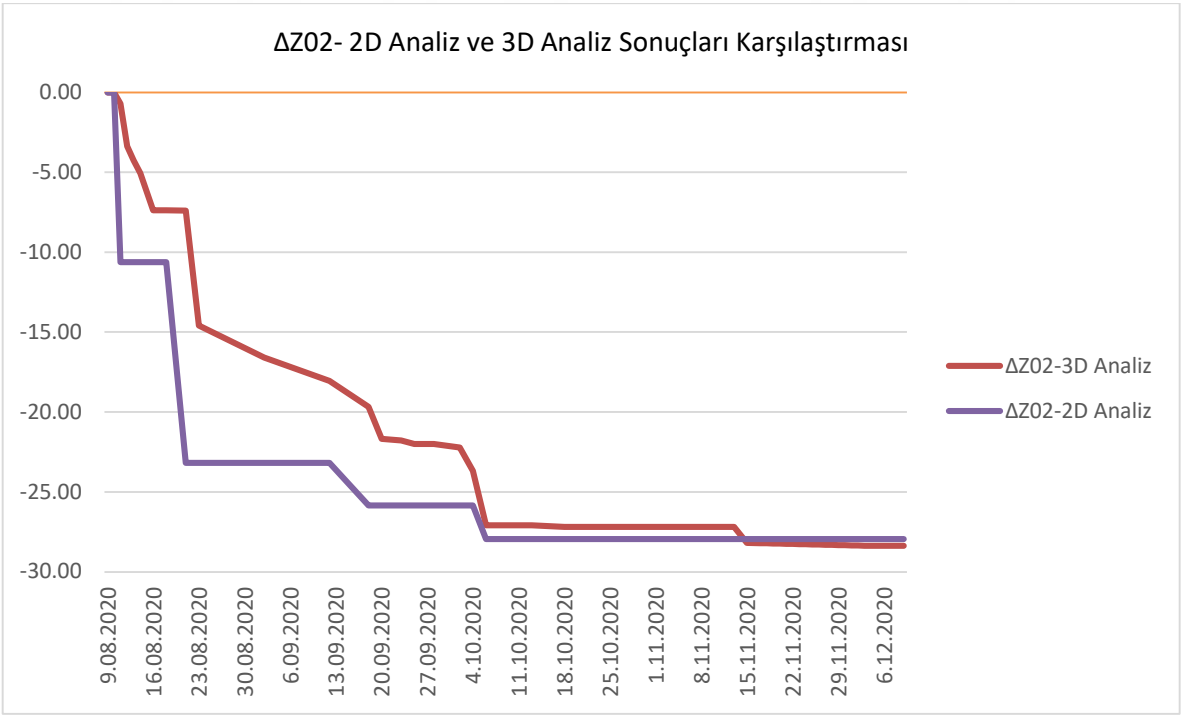


Şekil 4.41: ΔZ03 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

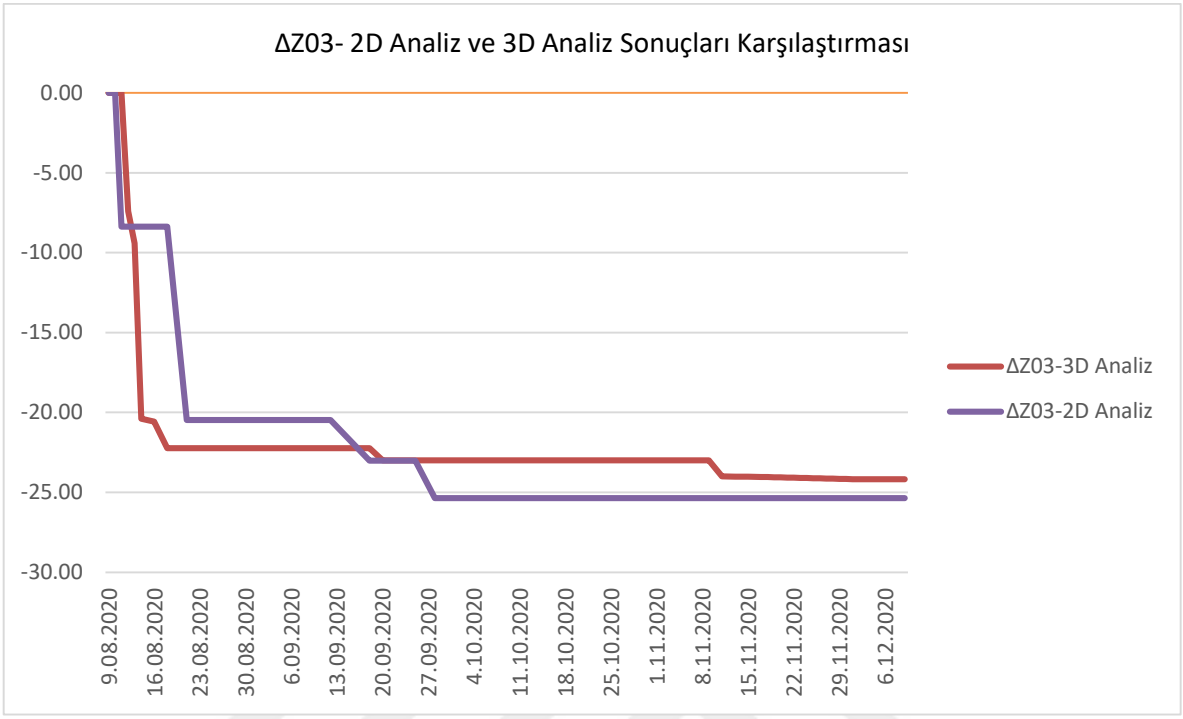
Aynı bölge için 3 boyutlu analiz sonuçları ile 2 boyutları karşılaştırıldığında ise Şekil 4.60, Şekil 4.61 ve Şekil 4.62'de yer alan grafikler elde edilmiştir.



Şekil 4.42: ΔZ01 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği.



Şekil 4.43: ΔZ02 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği.



Şekil 4.44: ΔZ03 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği.

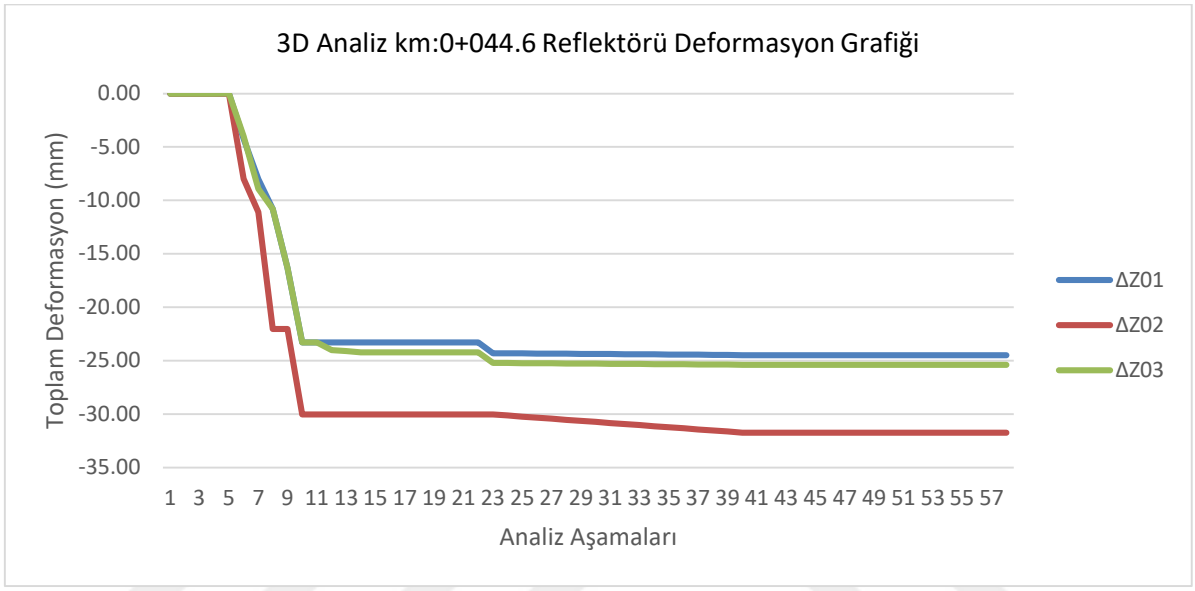
Yukarıda yer alan grafikler incelendiğinde, Şaft-3 B5 Yaklaşım Tüneli'nin Eskihisar Kavşağı ile kesiştiği bölgedeki kesiti temsil eden ve 2 boyutlu analizlerde Kesit-2 olarak adlandırılan, sahada 0+0026.7 reflektörlerinin bulunduğu bölge için gerçekleştirilen 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçlarının tünelin taç bölgesinde birebir aynı sonuçları verdiği ve tünelin sol ve sağ omuz bölgelerindeki noktalar için ise sırasıyla 1 ve 2 mm gibi çok küçük bir fark olduğu gözükmektedir.

Diğer bir yandan bu bölge için 3 boyutlu analizlerin saha ölçümleri ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir.

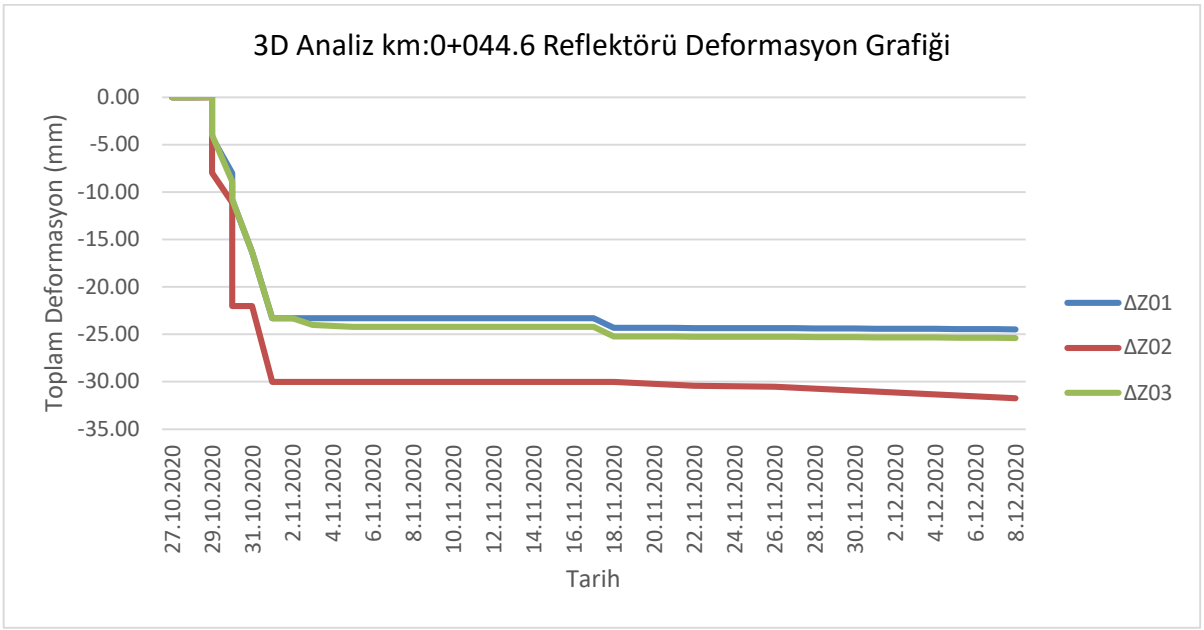
Ayrıca ΔZ03 reflektörü için analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafikleri incelendiğinde, Kesit-1'de olduğu gibi tünelin sağ tarafında oluşan maksimum deplasmanların 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçları ile oldukça uyumsuz olduğu görülmektedir. 2 Boyutlu analiz sonuçlarında maksimum -26 mm deplasman ve 3 boyutlu analiz sonuçlarında ise maksimum -23 mm'lik deplasman okunurken sahada okunan maksimum deplasman değeri -38mm'dir. Analiz sonuçlarının birbirini doğruladığı göz önüne alınırsa sahada gerçekleşen imalatlar sırasında lokal olarak yaşmış olabilen problemin bu bölgelerde de devam ettiği söylenebilir.

4.2.3 km: 0+0044.6 Analiz Sonuçları İncelemesi

2 Boyutlu analizlerde Kesit-3 olarak adlandırılan ve sahada 0+044.60 reflektörüne denk gelen bölgeye ait deformasyon grafikleri Şekil 4.63 ve Şekil 4.64'de yer almaktadır.

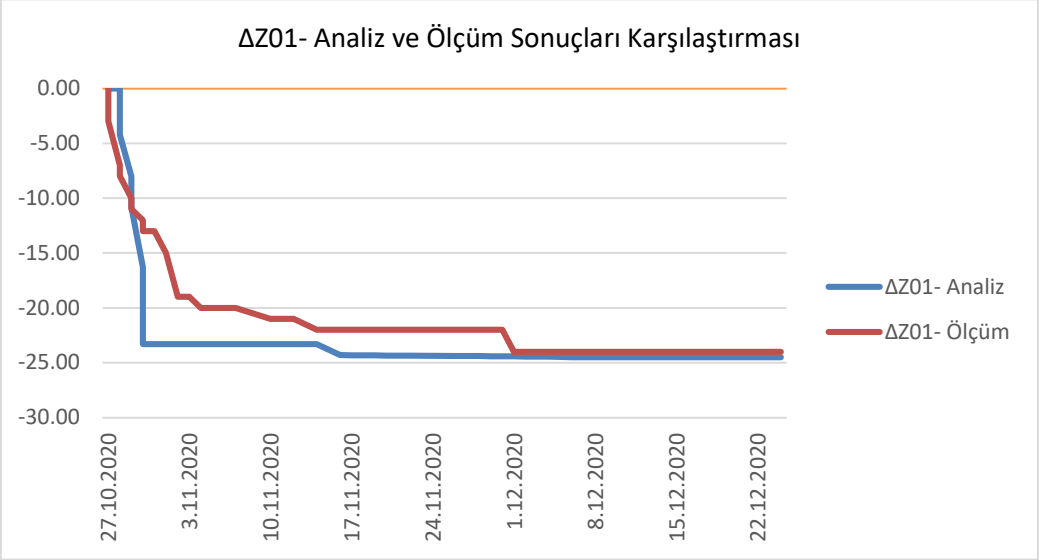


Şekil 4.45: 3 Boyutlu analiz, Kesit-3 deformasyon- analiz aşamaları grafiği

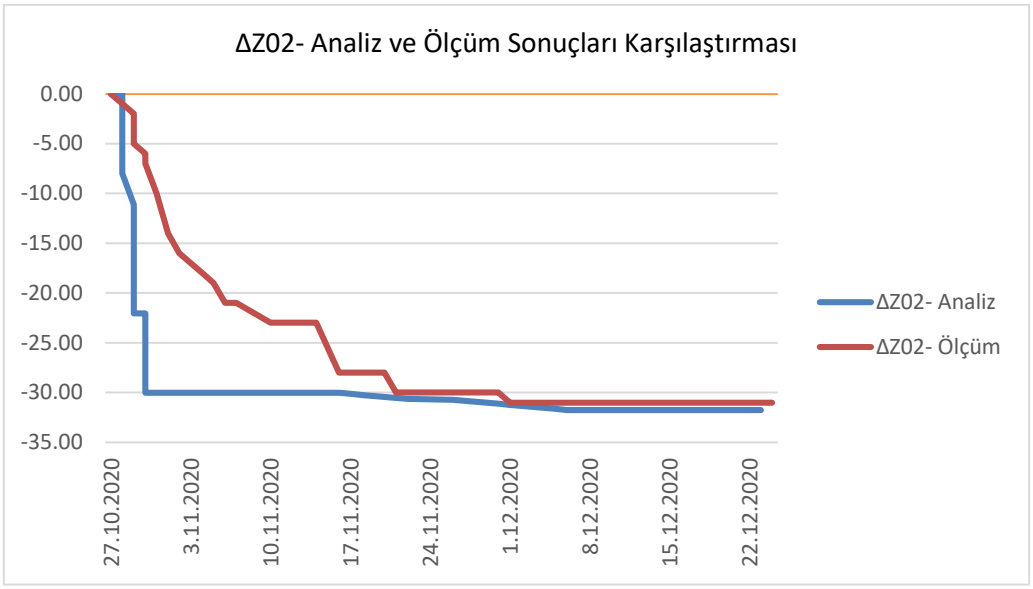


Şekil 4.46: 3 Boyutlu analiz, Kesit-3 deformasyon- tarih grafiği

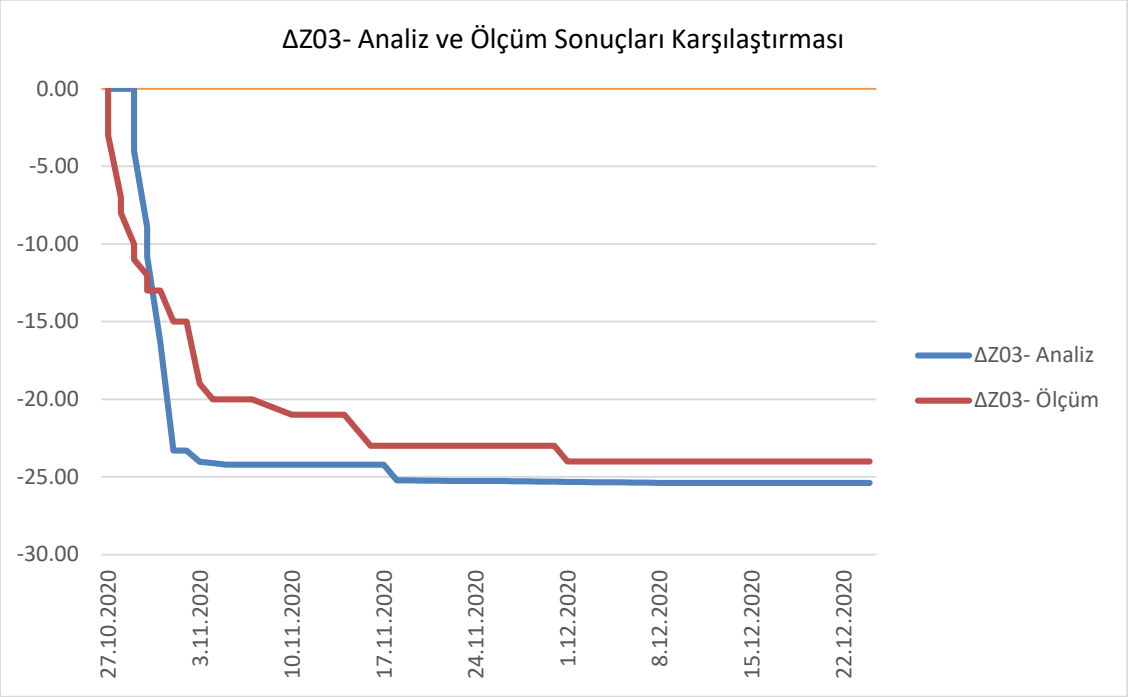
Aynı bölge için, ΔZ01, ΔZ02 ve ΔZ03 reflektörlerini temsil eden her bir eğrinin saha ölçüm grafikleri ile süperpoze edilmiş grafikleri sırasıyla Şekil 4.65, Şekil 4.66 ve Şekil 4.67'de yer almaktadır.



Şekil 4.47: ΔZ01 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

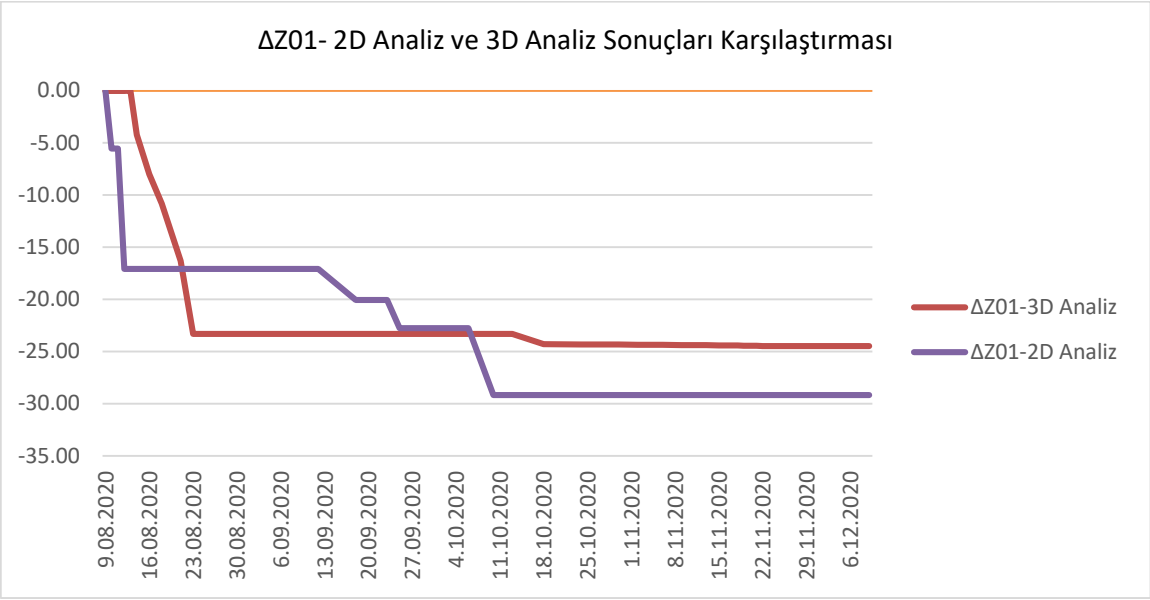


Şekil 4.48: ΔZ02 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

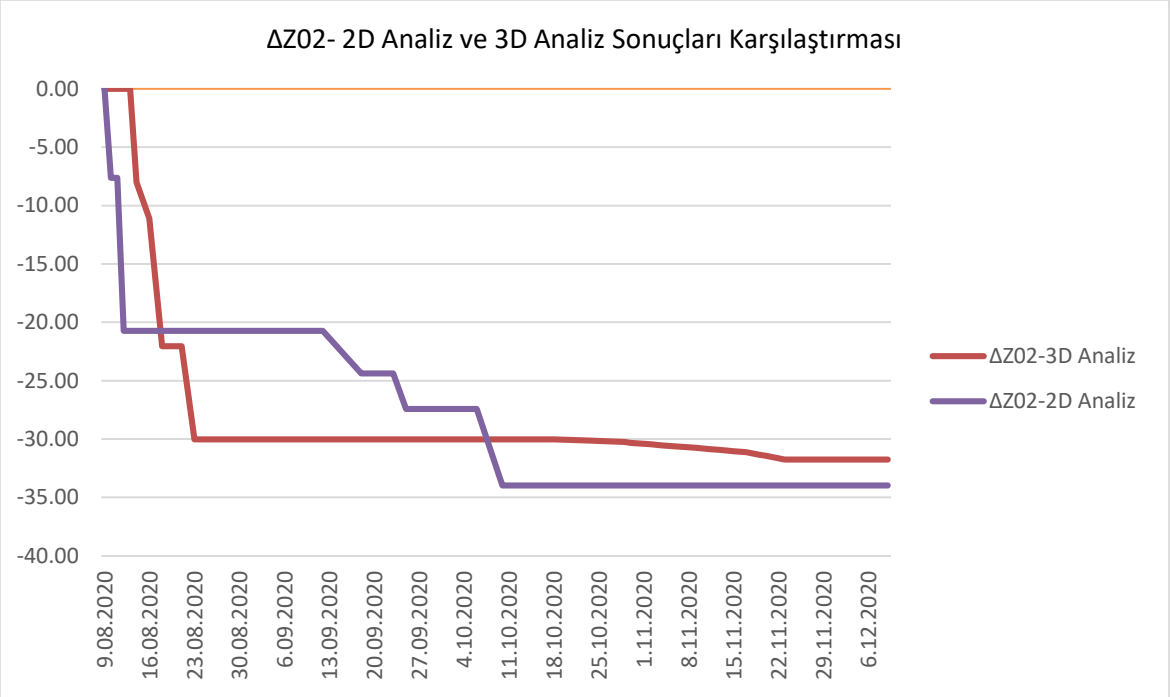


Şekil 4.49: ΔZ03 analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafiği.

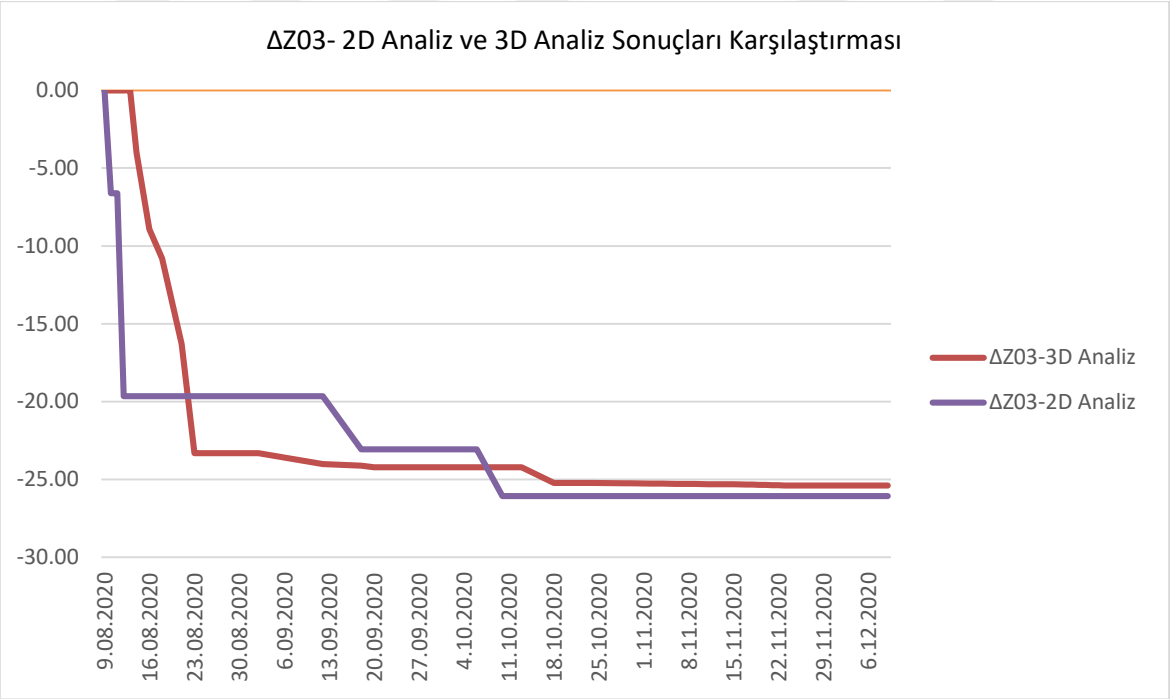
Aynı bölge için 3 boyutlu analiz sonuçları ile 2 boyutları karşılaştırıldığında ise Şekil 4.68, Şekil 4.69 ve Şekil 4.70'de yer alan grafikler elde edilmiştir.



Şekil 4.50: ΔZ01 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği.



Şekil 4.51: ΔZ02 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği.



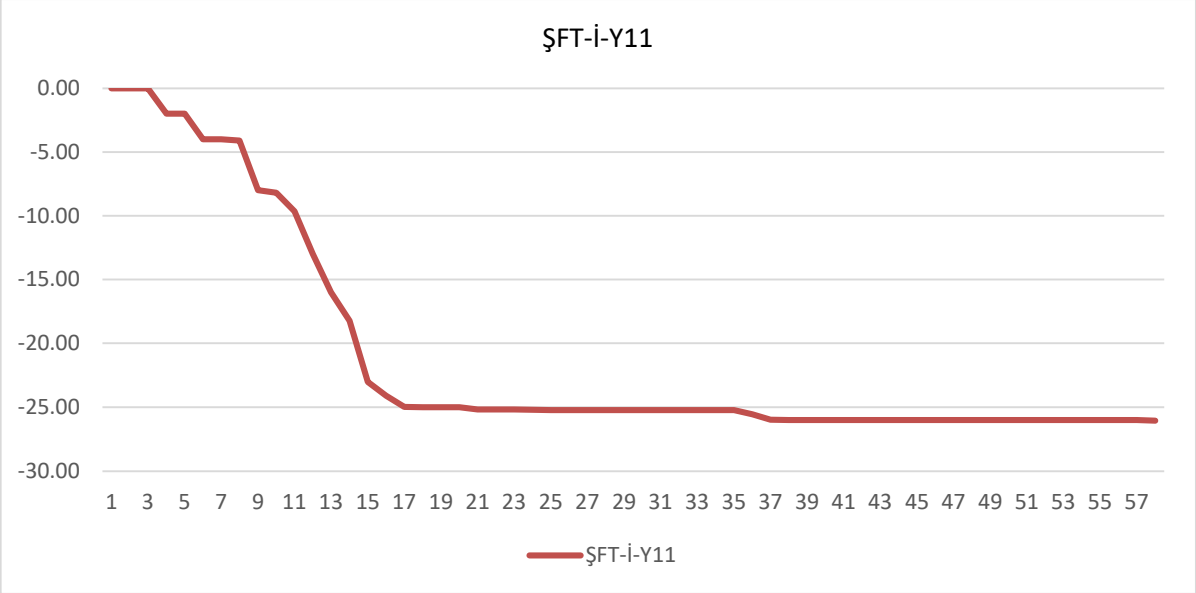
Şekil 4.52: ΔZ03 2D ve 3D analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafiği.

Yukarıda yer alan grafikler incelendiğinde, Şaft-3 B5 Yaklaşım Tüneli'nin Eskihisar Kavşağı doğu iksa kazıkları ile kesiştiği bölgedeki kesiti temsil eden ve 2 boyutlu analizlerde Kesit-3 olarak adlandırılan, sahada 0+0044.6 reflektörlerinin bulunduğu bölge için gerçekleştirilen 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçlarının tünel kesitinin her üç noktası için de neredeyse birebir aynı sonuçları verdiği görülmektedir.

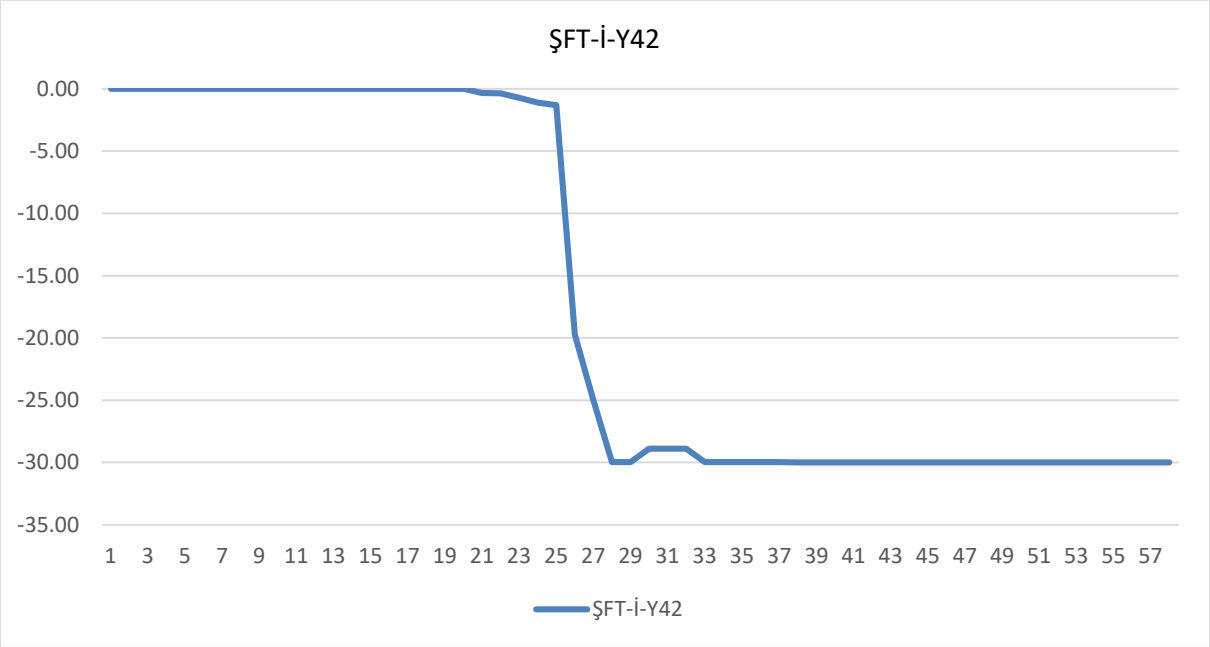
Diğer bir yandan bu bölge için 3 boyutlu analizlerin saha ölçümleri ile oldukça uyumlu olduğu ve 2 boyutlu analizlere göre çok daha gerçekçi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Ayrıca ΔZ03 reflektörü için analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması grafikleri incelendiğinde, tünelin sağ omuz kısmında, Kesit-1 ve Kesit-2'de gözlemlenen analiz sonuçları ile uyumsuz aşırı deplasmanların bu bölgede görülmediği sonucuna varılmaktadır. Dolayısı ile tünelin önceki kısımlarında yaşanmış olduğu düşünülen imalat problemlerinin bu bölgede giderildiği sonucu çıkarılabilmektedir.

2 Boyutlu analizlerde de olduğu gibi 3 boyutlu analiz sonuçları doğrultusunda da Eskihisar Kavşağı iksa kazıklarında meydana gelen deplasmanlar her bir kazı aşaması için incelenmiştir. Oluşturulan grafikler Şekil 4.71 ve Şekil 4.72'de yer almaktadır.

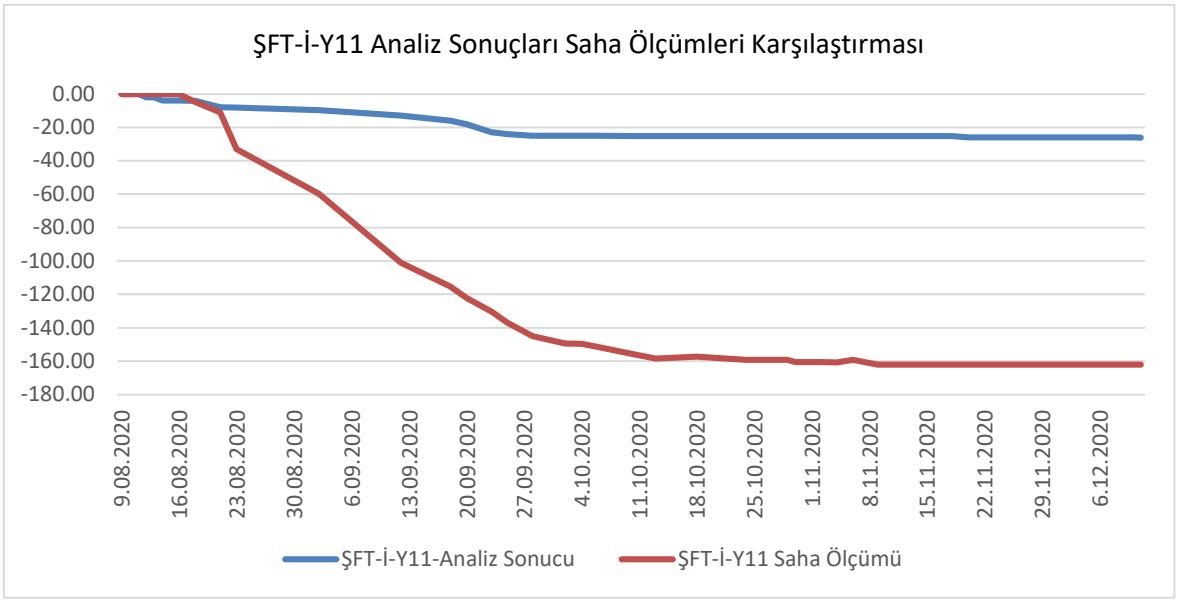


Şekil 4.53: ŞFT-İ-Y11, Toplam oturma-Analiz aşamaları grafiği.

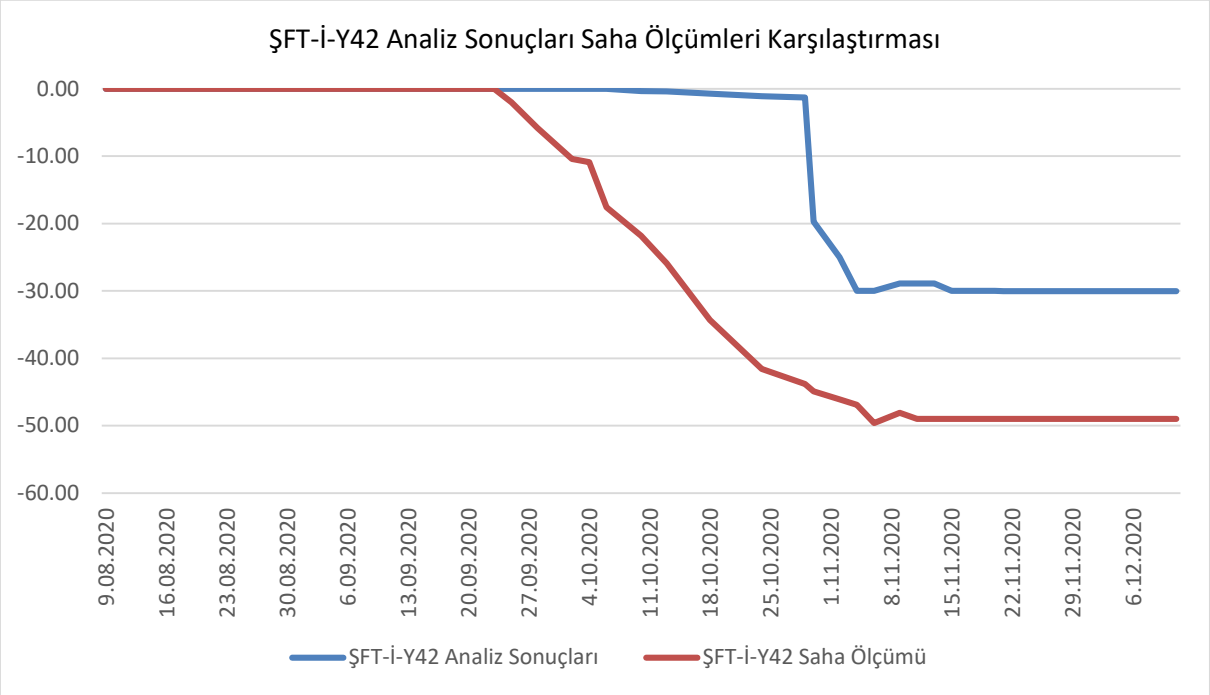


Şekil 4.54: ŞFT-İ-Y42, Toplam oturma-Analiz aşamaları grafiği.

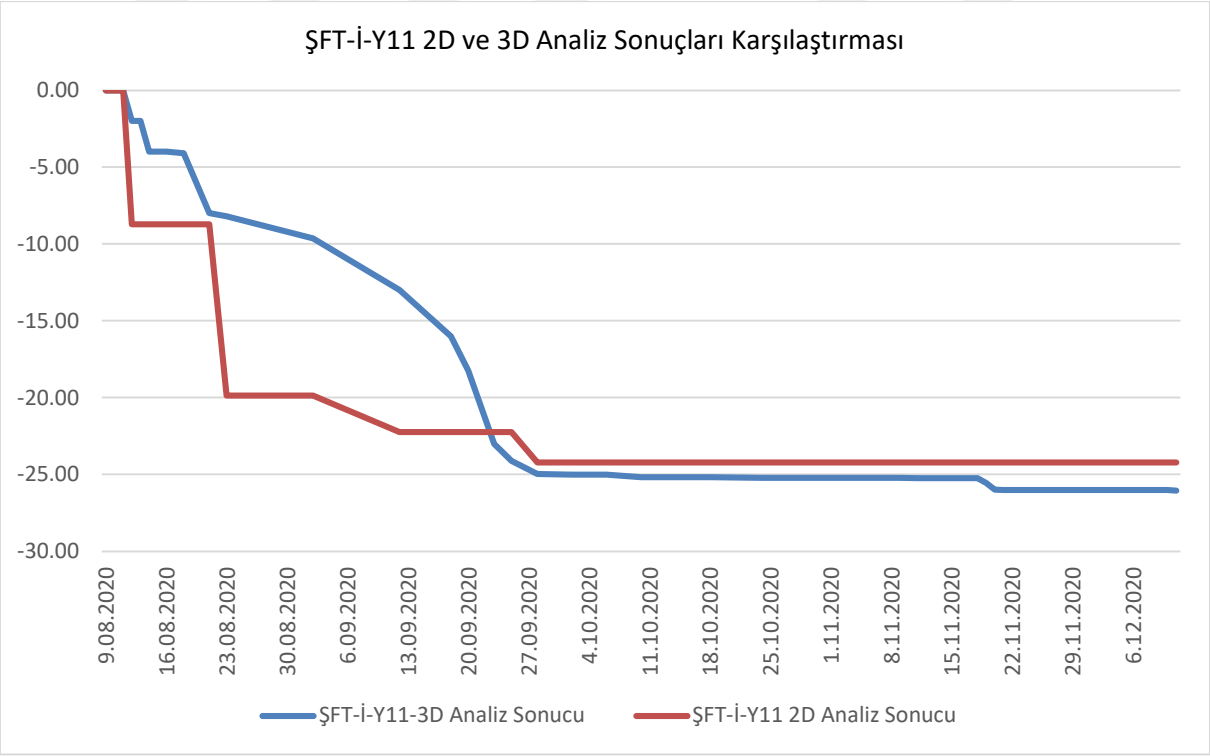
3 boyutlu analizler sonucunda Eskihisar Kavşağı iksa kazıklarında okunan deplasmanlar saha ölçümleri ve 2 boyutlu analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma grafikleri aşağıdaki şekillerde yer almaktadır.



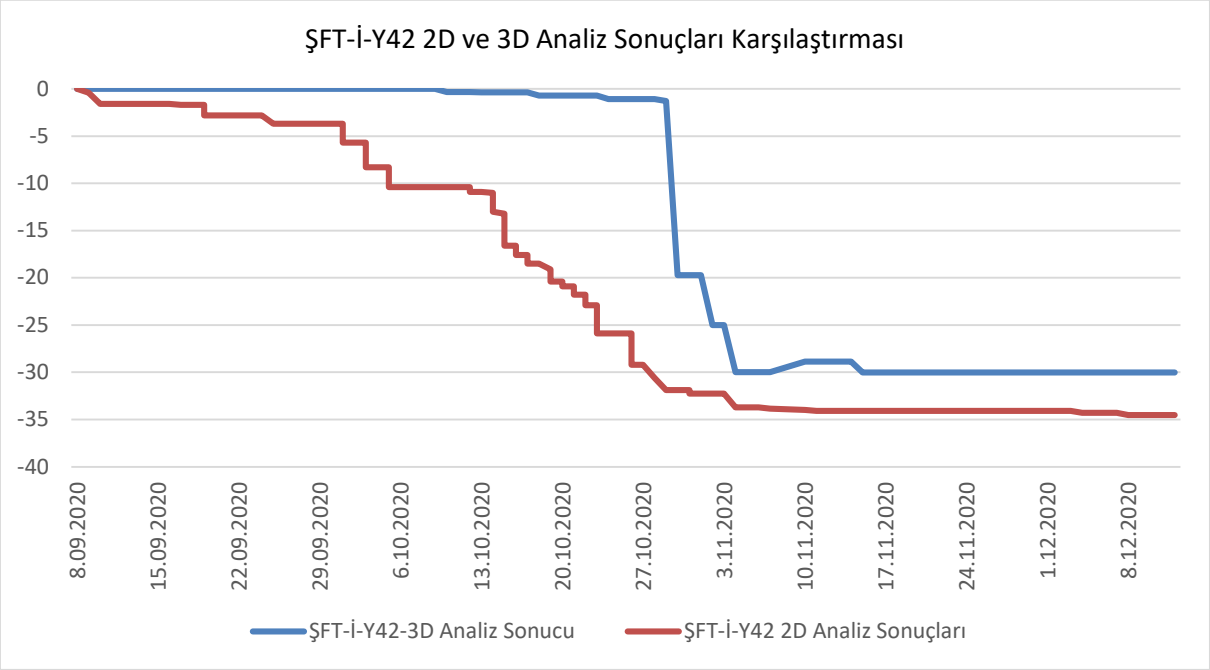
Şekil 4.55: ŞFT-İ-Y11 Analiz sonuçları saha ölçümleri karşılaştırma grafiği



Şekil 4.56 : ŞFT-İ-Y42 Analiz sonuçları saha ölçümleri karşılaştırma grafiği.



Şekil 4.57: ŞFT-İ-Y11 2D ve 3D analiz sonuçları karşılaştırma grafiği.



Şekil 4.58: ŞFT-İ-Y42 2D ve 3D analiz sonuçları karşılaştırma grafiği.

Yukarıda yer alan oturma grafikleri incelendiğinde 2 boyutlu analiz ve 3 boyutlu analiz sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu ama özellikle ŞFT-İ-Y11 no'lu oturma bulonunun deplasmanlarına bakıldığında, sahada yapılan ölçümlerden oldukça uzak olduğu görülmektedir. Söz konusu bulonda sahada yapılan ölçümlerde yaklaşık 160 mm'lik bir oturma okunurken 2 boyutlu analizlerde bu değer 24 mm ve 3 boyutlu analizlerde ise 26 mm olarak görülmektedir. Bu durum sahada tümel imalatları esnasında ön görülemeyen bir engelle karşılaşıldığını ya da imalat kalitesinde problemler olabileceğini göstermektedir.

ŞFT-İ-Y42 no'lu oturma bulonunda meydana gelen deplasmanlar incelendiğinde ise sahada -49 mm olarak ölçülen deplasman değerinin 2 boyutlu analizler sonucunda -35 mm ve 3 boyutlu analizler sonucunda da – 30 mm olduğu görülmektedir.

Bölüm 4.2.1, Bölüm 4.2.2 ve Bölüm 4.2.3'te yer alan analiz sonuçları ve grafiklerin göstergesinde aşağıda yer alan toplam deplasmanlar özet tabloları oluşturulmuştur.

Tablo 4.1: Maksimum deplasmanlar özet tabloları.

	Maksimum Deplasman [mm]		
	ΔZ01	**ΔZ02**	**ΔZ03**
Kesit-1 (0+007.4)			
2D Analiz Sonucu	-26.8	-33.8	-27.8
3D Analiz Sonucu	-21.3	-31.2	-23.2
Saha Ölçümleri	-30.0	-40.0	-68.0
Kesit-2 (0+026.7)			
2D Analiz Sonucu	-24.42	-27.95	-25.35
3D Analiz Sonucu	-22.26	-28.37	-24.17
Saha Ölçümleri	-28.0	-25.0	-38.0
Kesit-3 (0+044.4)			
2D Analiz Sonucu	-29.2	-34.0	-26.1
3D Analiz Sonucu	-24.5	-31.7	-25.4
Saha Ölçümleri	-24.0	-31.0	-24.0

İksa Kazıklarında Okunan Maksimum Deplasmanlar [mm]	
ŞFT-İ-Y11	
2D Analiz Sonucu	-24.2
3D Analiz Sonucu	-26.1
Saha Ölçümleri	-162.0
ŞFT-İ-Y42	
2D Analiz Sonucu	-31.12
3D Analiz Sonucu	-29.99
Saha Ölçümleri	-49.0

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, yapımına 2018 yılında başlanan Gebze-Darıca Metro Projesi kapsamında çalışma şaftı olarak kullanılan Şaft-3'ü hat tünellerine bağlayan yaklaşım tünellerinin inşası sırasında karşılaşılan mühendislik problemleri incelenmiştir. Yaklaşım tünelinin inşası sırasında, yaklaşık ilk 9 metrelik ilerleme sonrası meydana gelen tünel içi deformasyonlar sonucu, bu bölgede ilave önlemler ile tünel ilerlemesine devam edilmesi kararı alınmıştır. Projede öngörülen tek sıra *"umbrella arch"* uygulaması iki sıraya çıkartılarak tünel üzerinde daha fazla zemin bölgesinde iyileştirme sağlanmıştır. Ayrıca çelik kafes iksa yerine daha rijit bir sistem olan çelik profil iksa kullanılmaya başlanmış ve yan zemin çivileri adedi iki kat arttırılmıştır. Tüm bu alınan önlemler sayesinde herhangi bir can ve mal kaybı yaşanmadan tünel imalatları tamamlanmıştır.

Yukarıda belirtilen ilave tedbirler, literatürde yer alan benzer araştırmalar doğrultusunda 2 ve 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemleriyle modellenmiş bu çalışma kapsamında analiz edilmiştir. Sayısal modelde kullanılan zemin parametreleri, arazide daha önceden yapılmış olan sondaj çalışmaları ve laboratuvar deneyleri ile literatürde yer alan kaynaklardan yararlanılarak belirlenmiştir.

Saha ölçümleri ve tarafımızca yapılan analiz sonuçları bir arada değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Çalışma kapsamında incelenen bölge için, kritik kesitler olarak kabul edilen Kesit-1, Kesit-2 ve Kesit-3 göz önüne alındığında, bu kesitlerde tünel içerisinde meydana gelen deplasmanlar, literatürde yer alan çalışmalarda da bahsedildiği gibi, kesiti takip eden dört kazı anosunda gerçekleştirilen (19.2 m) tünel kazısı sonucu maksimum değerlerine ulaşmış ve bundan sonra yapılan tünel çalışmaları, deplasmanları önemli ölçüde etkilememiştir.
- İncelenen bölgede tünel çalışmalarının başlaması ile birlikte tünel içinde meydana gelen ve lokal olarak yaklaşık 7 cm'ye kadar ulaşan deplasmanlar, Kesit-2'de daha rijit bir tahkimat sistemine geçilmesiyle 3-4 cm ile sınırlandırılmış ve takip eden kazı aşamalarında maksimum 2.5 cm ile kontrol altına alınmıştır. Dolayısıyla çalışma

kapsamında incelenen bölge için, imalatların başlamasıyla tünel içerisinde ani artış gösteren deplasmanlar, tahkimatların arttırılması sayesinde sönümlenmiştir.

- İncelenen bölgede yer alan Eskihisar Kavşağı iksa kazıklarında, çalışmaların başlamasıyla birlikte, tünel inşasının ilk 19.2 m'lik kısmında yapılan çalışmalar nedeniyle 11 cm civarında oturma gözlemlenmiştir. Bu sebeple tahkimat sistemi ağırlaştırılmış, *"umbrella arch"* uygulaması çift sıraya çıkarılmış ve yan zemin çivilerinin adedi arttırılmıştır. Bu sayede iksa kazıklarının tam altından geçilirken oturma değerleri 2 cm ile sınırlandırılabilmiştir. Aynı durumun farklı deplasman değerleri ile 2 boyutlu ve 3 boyutlu analizlerle de doğrulandığı göz önünde bulundurularak, tünellin taç kısmına uygulanan *"umbrella arch"* imalatlarının ve yan zemin çivilerinin adetlerinin artırılması ve kazı destek sistemi olarak daha rijit elemanlar kullanılması, tünel inşaatından kaynaklı olarak, meydana gelmiş olan yüzey oturmalarının sönümlenmesinde önemli rol oynadığı tespit edilmiştir.
- Literatürde yer alan çalışmaların çoğunda da bahsedildiği gibi *"umbrella arch"* sisteminin zayıf zeminlerde, tünel imalatları sırasında kazı ve yapım güvenliğini sağlamasının dışında, hali hazırda var olan tünel içerisinde meydana gelmiş deformasyonları ve yüzeyde meydana gelen oturmaların artışını da önemli oranda azaltabilmiştir.
- Çalışma kapsamında incelenen bölgede, tünelin ilk metrelerinde, özellikle de tünelin sağ omuz kısmında oluşan aşırı deplasmanların beklenen değerlerden çok farklı olmasının nedeni, 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçlarına bakılarak, imalatlar sırasında oluşan problemlerden veya lokal olarak zeminin belirlenenden farklı parametrelere sahip olması sebebiyle meydana gelmiş olabileceği olarak değerlendirilmektedir.
- Benzer şekilde Eskihisar Kavşağı iksa kazıklarında meydana gelen oturma değerlerinin, hem 2 boyutlu hem de 3 boyutlu analiz sonuçlarından oldukça farklı olmasının, imalatlar sırasında oluşan problemlerden veya lokal olarak zeminin belirlenenden farklı parametrelere sahip olması sebebiyle meydana gelmiş olabileceği olarak değerlendirilmektedir.
- Çalışma kapsamında gerçekleştirilen 2 boyutlu analizler ile 3 boyutlu analiz sonuçlarının genel olarak birbirleri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bu

sebeple 2 boyutlu modellemede yapılan bazı kabullerin (*"umbrella arch"* imalatlarının uygulandığı bölgenin iyileştirilmiş bir bölge olarak tanımlanması, 3. boyutta ilerleme etkisinin verilebilmesi için belirlenen rahatlama oranları tanımlanması) doğru kabuller olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

- *"Umbrella arch"* sisteminin sayısal modelleme sürecinde, sahip olduğu karışık geometriden dolayı, çeşitli basitleştirmeler ve kabuller yapılmadığında analizlerin çok uzun süreler sonunda ancak tamamlanabildiği ve hatta kimi zaman çözüme ulaşamadığı tespit edilmiştir.
- Literatürde bu konu ile ilgili yer alan çalışmalardan da hareketle, model geometrisi üzerinde ve özellikle "*umbrella arch"* sisteminde bazı basitleştirmelerin yapılmasının, sonuçları ciddi ölçüde etkilemeyeceği ancak zaman kayıplarının önüne geçilmesini sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuç olarak bu çalışma, günümüzde sayıları oldukça hızlı bir şekilde artan tünel projelerinin tasarım ve uygulama aşamalarında, herhangi bir can ve mal kaybına sebebiyet verilmemesi açısından, modellemelerin sağlıklı bir şekilde yapılması, kazı-destek elemanlarının doğru biçimde tanımlanması, uygulama aşamasında imalatların düzenli bir şekilde kalite kontrolünden geçirilmesi ve olası deformasyonların erken tespiti için, tünel içerisinden ve yüzeyden düzenli olarak deformasyon okumalarının alınması gerektiğini ve kritik seviyelerde deformasyonlar gözlemlendiğinde alınacak tedbirlerin ne denli etki olabileceğini göstermiştir.

6. KAYNAKLAR

Aksoy, C., Kantarcı, O. & Özacar, V., 2010. An example for estimation of rock mass deformations around an underground opening by using numerical modeling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science,* 43(2), pp. 166-178.

Aksoy, C. O., 2008. Chemical injection application at tunnel service shaft to prevent ground settlement induced by ground water drainage: a case study.. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* 45(3), pp. 376-383.

Aksoy, C. O., 2009. *The investigation of the applicability of block punch index in the rock mass classification systems for weak rocks and the application of shallow..* TÜBİTAK Projesi: Numara:108M151.

Aksoy, C. O. & Onargan, T., 2010. The role of umbrella arch and face bolt. *Tunneling and Underground Space Technology.,* Issue 25, pp. 552-559.

Altınoğlu, F. F., 2005. *Denizli ve Yöresinin Depremselliği ve Kabuk Yapısının Araştırılması.* Denizli: T.C. Pamukkale Üniversitesi .

Arıoğlu, E., Yüksel, A. & Yılmaz, A., 2008. *Püskürtme Beton Bilgi Föyler- Çözümlü Problemler.* İstanbul: TMMOB Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi.

Attewell, R., Yeates, J. & Selby, A., 1986. *Soil Movements Induced by Tunnelling and Their Effects on Pipelines and Structures.* Glasgow: Thomson Science and Professional.

Barka, A., 1992. The North Anatolian Fault Zone. *Annales Tectonicae 6,* Issue 174-195.

Barla, M. & Bzowka, J., 2013. Comparing Numerical Alternatives to Model Jet Grouting in Tunnels. *Electronical Journal of Geotechincal Engineering,* Cilt 18, pp. 2997-3008.

Birön, C. & Arıoğlu, E., 1980. *Madenlerde Tahkimat İşleri ve Tasarımı.* İstanbul: Birsen Kitabevi.

Bowles, J., 1996. *Foundation Analysis and Design.* 5th Edition dü. New York: McGraw-Hill.

Çeçen, E., 2007. *Kent İçi Tünellerinde Uygulanan Şemsiye-Kemer ve Ayna Donatılama Tekniklerinin Gerilme-Deformasyon Üzerine Etkilerinin Sayısal Analizi.* Doktora Tezi: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Değirmenci, S., 2019. *Oruçlu Tüneli Göçük Bölgesinin Şemsiye Kemer Yöntemi ile Desteklenmesi.* Yüksek Lisans: Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Dehghan, A., 2020. Influence of Forepoling Umbrella on the Settlements Induced by Shallow Urban Tunelling. *Geotechnical and Geological Engineering,* 38(5).

Hoek, E., 2004. *Numerical Modelling for Shallow Tunnels in Weak Rock.* basım yeri bilinmiyor:Unpublished Notes.

Hounyevou Klotoé , C. & Bourgeois, E., 2019. Three Dimensional Finite Element Analysis of the Influence of Umbrella Arch on the Settlements Induced by Shallow Tunneling. *Computers and Geotechnics,* 110(114-121).

Janin, J. ve diğerleri, 2015. Numerical Back-Analysis of the Southern Toulon Tunnel Measurements: A comparison of 3D and 2D Approaches. *Engineering Geology,* Issue 195, pp. 42-52.

Lunne, T., Robertson, P. & Powell, J., 1997. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Engineering.* New York: Blackie Academic and Professional.

Morotvatdar, A., Palassi, M. & Ashtiani, R., 2020. Effect of Pipe Characteristics in Umbrella Arch Method on Controlling Tunelling Induced Settlements in Soft Grounds. *Journal of Rock Mechanics and Geotechincal Engineering,* 5(12), pp. 984-1000.

Ocak, İ., 2008. Control of Surface Settlements With Umbrella Arch Method in Second Stage Excavations of Istanbul Metro. *Tunelling and Underground Space Technology,* Cilt 23, pp. 674-681.

Oke, J., Vlachopoulos, N. & Marinos, V., 2014. Umbrella Arch Nomenclature and Selection Methodology for Temporary Support Systems for the Design and Construction of Tunnels. *Geotechnical and Geological Engineering,* Cilt 32, pp. 97-130.

Panet M., G. A., 1982. *Analysis of convergence behind the face of a tunnel.* Londra, Proceedings of the 3rd international symposium, 197-204.

Panet, M., 1993. Understanding Deformations in Tunnels. %1 içindeJ. Hudson, E. Brown, C. Fairhurst & E. Hoek, düz. *Comprehensive Rock Engineering.* London: Pergamon, pp. 663-690.

Peck, R. B., 1969. *Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground.* Mexico City, In Proc. of the 7th International Conferance on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art Volume, 225-290 .

Polat, D., 2010. *NATM Metodu Kullanılarak Tünel Tasarımı ve Modellemesi.* Yüksek Lisans Tezi: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Rockwell, T. ve diğerleri, 2001. Paleoseismology of the Gazikoy-Sarosseg-ment of the North Anatolia Fault. *Northwestern Turkey Comparison of the Historical and Paleoseismic Records, Implications of Regional Seismic Hazard, and Models of Earthquake Recurrence, Int J Seismol,* 5(3), pp. 433-448.

Satıcı, Ö. & Topal, T., 2015. Tünel Açma Yöntemlerinin Mühendislik Jeolojisi ve Kaya Sınıflama Sistemleri ile Değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi,* 39(1), p. 49.

Stroud, M., 1974. "The Standart Penetration test in Sensitive Clays and Soft Rocks". *In Proc. of European Symposium on Penetration Testing, Stockholm,* 2(2), pp. 367-375.

Şengör, A. & Görür, N., 1985. Strike-Slip Faulting and Related Basin Formation in Zones of Tectonic Escape: Turkey as a Case Study.. %1 içindeK. a. C. N. Biddle, dü. *Strike-Slip Deformation, Basin Deformation and Sedimentation.* Tulsa: SEPM, pp. 227-264.

Terzaghi, K., Peck, R. & Mesri , G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice Third Edition.* New York: John Wiley & Sons,Inc..

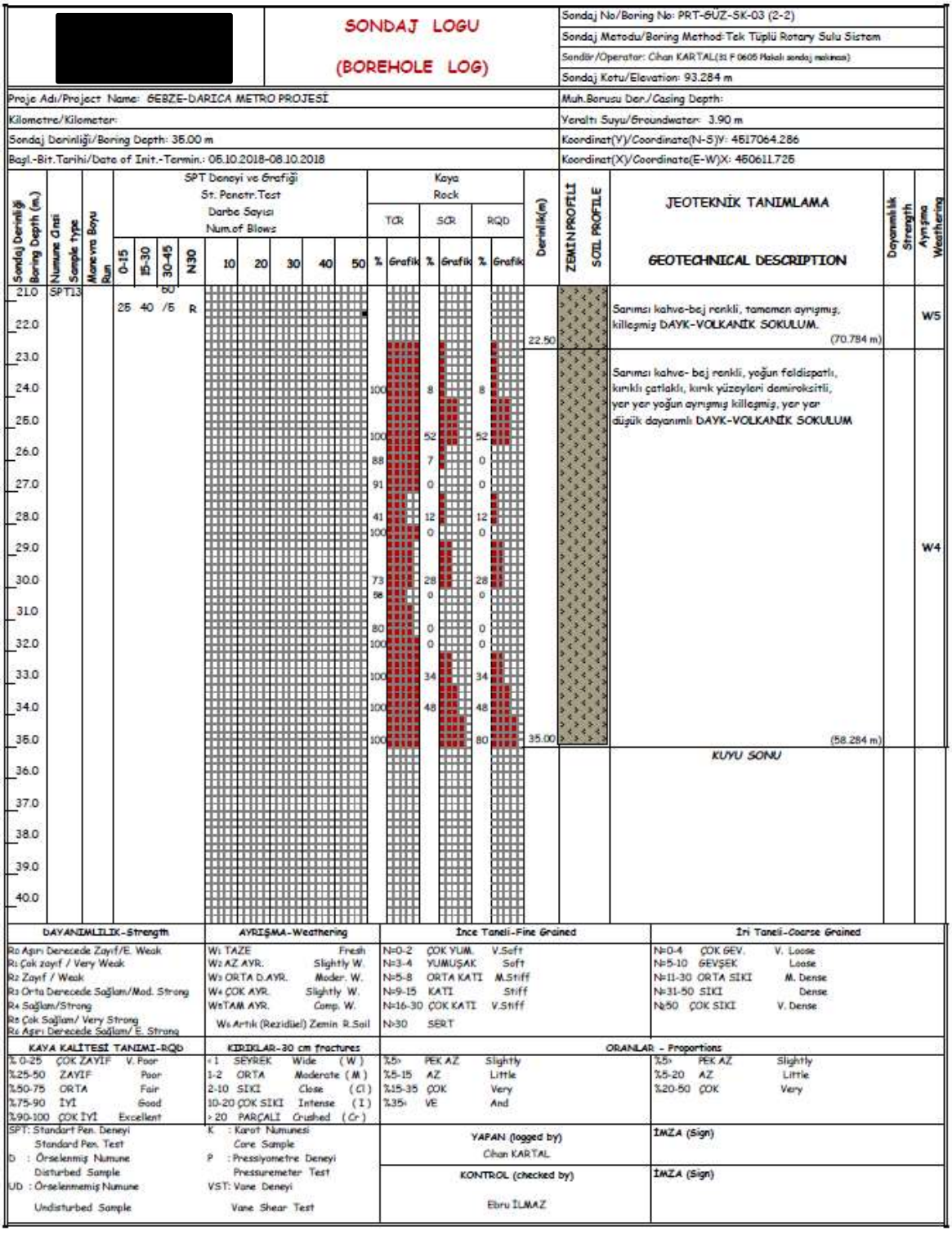
Yaşıtlı, N. E., 2013. Numerical Modeling of Surface Settlements at the Zone Excavated by New Austrian Tunneling Method and Umbrella Arch Method in Weak Rock. *Numerical Modeling of Surface Settlements at the Zone Excavated by NeArabian Journal of Geosciences,* Cilt 6, pp. 2699-2708.

Yoluk, M. Ş., 2020. *zmir Göztepe Metro İstasyonu Bölgesindeki Fay Zonundan Geçen Ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi Kullanılarak Açılan Tünelin Radye Temel Performansına Etkisi.* Şanlıurfa: T.C. Harran Üniversitesi : Yüksek Lisans Tezi.

Zhang, Z. ve diğerleri, 2014. Zhang, Z., Li, H., Liu, Load Transferring Mechanism of Pipe Umbrella Support in Shallow-Buried Tunnels. *Zhang, Z., Li, H., Liu, H., Li, G., Shi, X., 2014, Load Transferring Mechanism ofTunelling and Underground Space Technology,* Cilt 43, pp. 213-221.

7. EKLER

EK 1. PRT-GUZ-SK-03 sondaj logu ve karot sandığı fotoğrafları



SONDAJ LOGU

(BOREHOLE LOG)

Sondaj No/Boring No: PRT-GUZ-SK-03 (2-2)
Sondaj Metodu/Boring Method: Tek Tüplü Rotary Sulu Sistem
Sondör/Operator: Cihan KARTAL(31 F 0605 Plakalı sondaj makinası)
Sondaj Kotu/Elevation: 93.284 m

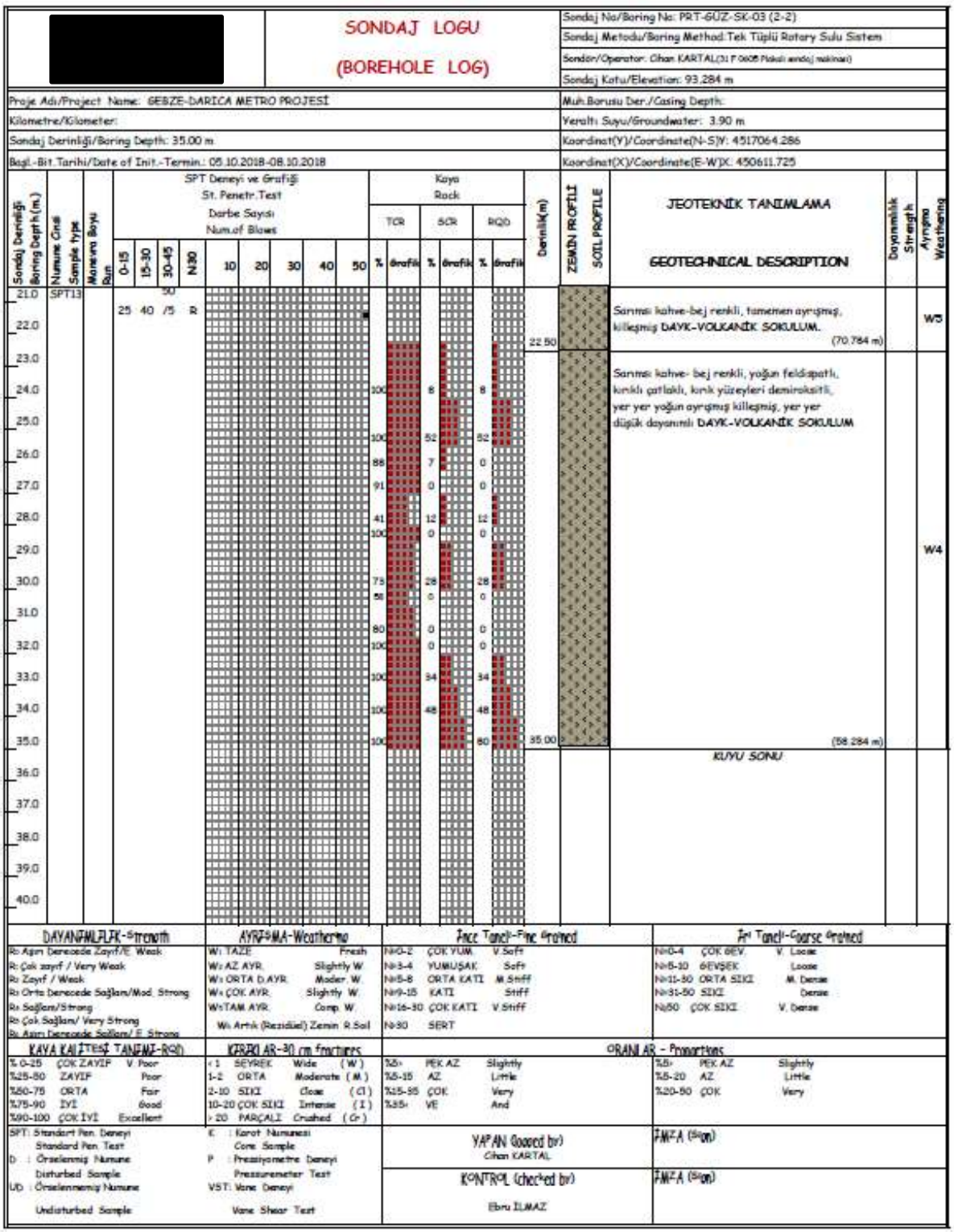
Proje Adı/Project Name: GEBZE-DARICA METRO PROJESİ
Muh.Borusu Der./Casing Depth:
Kilometre/Kilometer:
Yeraltı Suyu/Groundwater: 3.90 m
Sondaj Derinliği/Boring Depth: 35.00 m
Koordinat(Y)/Coordinate(N-S)Y: 4517064.286
Başl.-Bit.Tarihi/Date of Init.-Termin.: 05.10.2018-08.10.2018
Koordinat(X)/Coordinate(E-W)X: 460611.726

Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample type	Manevra Boyu Run	SPT Deneyi ve Grafiği St. Penetr.Test Darbe Sayısı Num.of Blows 0-15 / 15-30 / 30-45 / N30	Grafik 10 20 30 40 50	Kaya Rock TCR %	TCR Grafik	SCR %	SCR Grafik	RQD %	RQD Grafik	Derinlik(m)	ZEMİN PROFİLİ SOIL PROFILE	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Dayanımlılık Strength	Ayrışma Weathering
21.0	SPT13		25 40 /5 R												
22.0											22.50		Sarımsı kahve-bej renkli, tamamen ayrışmış, killeşmiş DAYK-VOLKANİK SOKULUM. (70.784 m)		W5
23.0															
24.0					100		8		8						
25.0					100		52		52						
26.0					88		7		0						
27.0					91		0		0						
28.0					41		12		12						
29.0					100		0		0						W4
30.0					73		28		28						
31.0					98		0		0						
32.0					80		0		0						
33.0					100		0		0						
34.0					100		34		34						
35.0					100		48		48						
36.0					100				80		35.00		Sarımsı kahve- bej renkli, yoğun feldispatlı, kırıklı çatlaklı, kırık yüzeyleri demiroksitli, yer yer yoğun ayrışmış killeşmiş, yer yer düşük dayanımlı DAYK-VOLKANİK SOKULUM (58.284 m)		
36.0													KUYU SONU		
37.0															
38.0															
39.0															
40.0															

DAYANIMLILIK-Strength	AYRIŞMA-Weathering	İnce Taneli-Fine Grained	İri Taneli-Coarse Grained
R0 Aşırı Derecede Zayıf/E. Weak	W1 TAZE Fresh	N=0-2 ÇOK YUM. V.Soft	N=0-4 ÇOK GEV. V. Loose
R1 Çok zayıf / Very Weak	W2 AZ AYR. Slightly W.	N=3-4 YUMUŞAK Soft	N=5-10 GEVŞEK Loose
R2 Zayıf / Weak	W3 ORTA D.AYR. Moder. W.	N=5-8 ORTA KATI M.Stiff	N=11-30 ORTA SIKI M. Dense
R3 Orta Derecede Sağlam/Mod. Strong	W4 ÇOK AYR. Slightly W.	N=9-15 KATI Stiff	N=31-50 SIKI Dense
R4 Sağlam/Strong	W5 TAM AYR. Comp. W.	N=16-30 ÇOK KATI V.Stiff	N>50 ÇOK SIKI V. Dense
R5 Çok Sağlam/ Very Strong	W6 Artık (Rezidüel) Zemin R.Soil	N>30 SERT	
R6 Aşırı Derecede Sağlam/ E. Strong			

KAYA KALİTESİ TANIMI-RQD	KIRIKLAR-30 cm fractures	ORANLAR - Proportions
% 0-25 ÇOK ZAYIF V. Poor	<1 SEYREK Wide (W)	%5> PEK AZ Slightly
%25-50 ZAYIF Poor	1-2 ORTA Moderate (M)	%5-15 AZ Little
%50-75 ORTA Fair	2-10 SIKI Close (Cl)	%15-35 ÇOK Very
%75-90 İYİ Good	10-20 ÇOK SIKI Intense (I)	%35< VE And
%90-100 ÇOK İYİ Excellent	>20 PARÇALI Crushed (Cr)	

SPT: Standart Pen. Deneyi Standard Pen. Test	K : Karot Numunesi Core Sample	YAPAN (logged by) Cihan KARTAL	İMZA (Sign)
D : Örselenmiş Numune Disturbed Sample	P : Pressiyometre Deneyi Pressuremeter Test	KONTROL (checked by) Ebru İLMAZ	İMZA (Sign)
UD : Örselenmemiş Numune Undisturbed Sample	VST: Vane Deneyi Vane Shear Test		


SONDAJ LOGU
(BOREHOLE LOG)
Sondaj No/Boring No: PRT-GÜZ-SK-03 (2-2)
Sondaj Metodu/Boring Method: Tek Tüplü Rotary Sulu Sistem
Sondör/Operator: Cihan KARTAL(Sİ F 0608 Nolulu sondaj makinası)
Sondaj Kotu/Elevation: 93.284 m
Proje Adı/Project Name: GEBZE-DARICA METRO PROJESİ
Muh.Borusu Der./Casing Depth:
Kilometre/Kilometer:
Yeraltı Suyu/Groundwater: 3.90 m
Sondaj Derinliği/Boring Depth: 35.00 m
Koordinat(Y)/Coordinate(N-S)Y: 4517064.286
Bşl.-Bit.Tarihi/Date of Init.-Termin.: 05.10.2018-08.10.2018
Koordinat(X)/Coordinate(E-W)X: 450611.725
Sondaj Derinliği/Boring Depth (m)
Numune Cinsi/Sample type
Manevra Boyu/Run
SPT Deneyi ve Grafiği
St. Penetr.Test
Darbe Sayısı
Num.of Blows
0-15
15-30
30-45
N30
10
20
30
40
50
Kaya
Rock
TCR
SCR
RQD
%
Grafik
Derinlik(m)
ZEMİN PROFİLİ
SOİL PROFİLE
JEOTEKNİK TANIMLAMA
GEOTECHNICAL DESCRIPTION
Dayanımlık
Strength
Ayrışma
Weathering
SPT13
25 40 /5 R
22.50
35.00
Sarımsı kahve-bej renkli, tamamen ayrışmış, killeşmiş DAYK-VOLKANİK SOKULUM.
(70.784 m)
Sarımsı kahve- bej renkli, yoğun feldispatlı, koyu renkli çatlaklı, kırık yüzeyleri demiroksitli, yer yer yoğun ayrışmış killeşmiş, yer yer düşük dayanımlı DAYK-VOLKANİK SOKULUM
(58.284 m)
W3
W4
KUYU SONU
DAYANIMLILIK-Strength
R: Aşırı Derecede Zayıf/E. Weak
R: Çok zayıf / Very Weak
R: Zayıf / Weak
R: Orta Derecede Sağlam/Mod. Strong
R: Sağlam/Strong
R: Çok Sağlam/ Very Strong
R: Aşırı Derecede Sağlam/ E. Strong
AYRIŞMA-Weathering
W: TAZE Fresh
W: AZ AYR. Slightly W
W: ORTA D.AYR. Moder. W
W: ÇOK AYR. Slightly W
W: TAM AYR. Comp. W
W: Artık (Rezidüel) Zemin R.Soil
İnce Taneli-Fine Grained
N=0-2 ÇOK YUM. V.Soft
N=3-4 YUMUŞAK Soft
N=5-8 ORTA KATI M.Stiff
N=9-15 KATI Stiff
N=16-30 ÇOK KATI V.Stiff
N>30 SERT
İri Taneli-Coarse Grained
N=0-4 ÇOK GEV. V. Loose
N=5-10 GEVŞEK Loose
N=11-30 ORTA SIKI M. Dense
N=31-50 SIKI Dense
N>50 ÇOK SIKI V. Dense
KAYA KALİTESİ TANIMI-RQD
% 0-25 ÇOK ZAYIF V. Poor
%25-50 ZAYIF Poor
%50-75 ORTA Fair
%75-90 İYİ Good
%90-100 ÇOK İYİ Excellent
KIRIKLAR-30 cm fractures
< 1 SEYREK Wide (W)
1-2 ORTA Moderate (M)
2-10 SIKI Close (Cl)
10-20 ÇOK SIKI Intense (I)
> 20 PARÇALI Crushed (Cr)
ORANLAR - Proportions
%5> PEK AZ Slightly
%5-15 AZ Little
%15-35 ÇOK Very
%35> VE And
%5> PEK AZ Slightly
%5-20 AZ Little
%20-50 ÇOK Very
SPT: Standart Pen. Deneyi
Standard Pen. Test
D : Örselenmiş Numune
Disturbed Sample
UD : Örselenmemiş Numune
Undisturbed Sample
K : Karot Numunesi
Core Sample
P : Presiyometre Deneyi
Pressuremeter Test
VST: Vane Deneyi
Vane Shear Test
YAPAN (Logged by)
Cihan KARTAL
İMZA (Sign)
KONTROL (checked by)
Ebru ILMAZ
İMZA (Sign)

PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ		
İŞVEREN	[redacted]		
YÜKLENİCİ	[redacted]	ALT YÜKLENİCİ	[redacted]
SONDAJ NO:	PRT-GÜZ-SK-03	DERİNLİK (m) : 0.00-5.15	
SONDAJ TARİHİ:	05.10.2018-08.10.2018		
KOORDİNAT(X,Y):	450611.7250	4517064.2860 SANDIK NO: 1/8	

0 [redacted] 1 m



PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ		
İŞVEREN	[redacted]		
YÜKLENİCİ	[redacted]	ALT YÜKLENİCİ	[redacted]
SONDAJ NO:	PRT-GÜZ-SK-03	DERİNLİK (m) : 5.15-10.05	
SONDAJ TARİHİ:	05.10.2018-08.10.2018		
KOORDİNAT(X,Y):	450611.7250	4517064.2860 SANDIK NO: 2/8	

0 [redacted] 1 m



PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ		
İŞVEREN	[redacted]		
YÜKLENİCİ	[redacted]	ALT YÜKLENİCİ	[redacted]
SONDAJ NO:	PRT-GÜZ-SK-03	DERİNLİK (m) : 10.05-14.80	
SONDAJ TARİHİ:	05.10.2018-08.10.2018		
KOORDİNAT(X,Y):	450611.7250	4517064.2860 SANDIK NO: 3/8	

0 1 m



PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ		
İŞVEREN	[redacted]		
YÜKLENİCİ	[redacted]	ALT YÜKLENİCİ	[redacted]
SONDAJ NO:	PRT-GÜZ-SK-03	DERİNLİK (m) : 14.80-19.30	
SONDAJ TARİHİ:	05.10.2018-08.10.2018		
KOORDİNAT(X,Y):	450611.7250	4517064.2860 SANDIK NO: 4/8	

0 1 m



PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ		
İŞVEREN	[redacted]		
YÜKLENİCİ	[redacted]	ALT YÜKLENİCİ	[redacted]
SONDAJ NO:	PRT-GÜZ-SK-03	DERİNLİK (m) : 19.80-23.65	
SONDAJ TARİHİ:	05.10.2018-08.10.2018		
KOORDİNAT(X,Y):	450611.7250	4517064.2860 SANDIK NO: 5/8	

0 1 m



PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ		
İŞVEREN	[redacted]		
YÜKLENİCİ	[redacted]	ALT YÜKLENİCİ	[redacted]
SONDAJ NO:	PRT-GÜZ-SK-03	DERİNLİK (m) : 23.65-28.20	
SONDAJ TARİHİ:	05.10.2018-08.10.2018		
KOORDİNAT(X,Y):	450611.7250	4517064.2860 SANDIK NO: 6/8	

0 1 m



PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ
İŞVEREN	[redacted]
YÜKLENİCİ	[redacted]
ALT YÜKLENİCİ	[redacted]

SONDAJ NO:	PRT-GÜZ-SK-03	DERİNLİK (m) : 28.20-33.00	
SONDAJ TARİHİ:	05.10.2018-08.10.2018		
KOORDİNAT(X,Y):	450611.7250	4517064.2860	SANDIK NO: 7/8

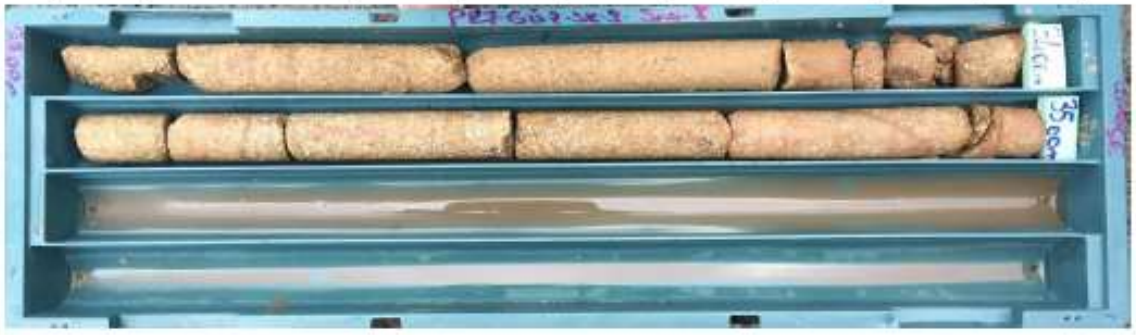
0 1 m



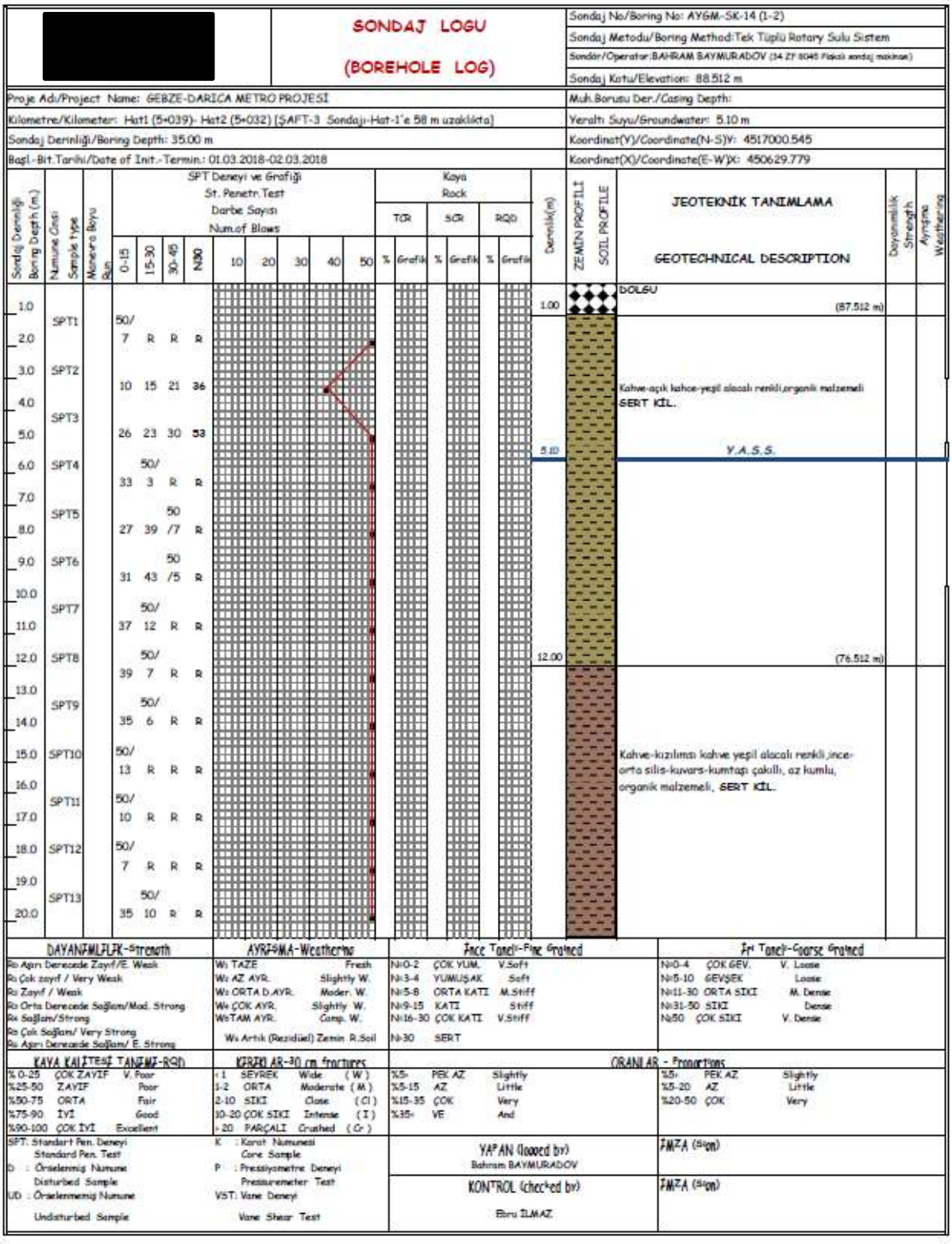
PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ
İŞVEREN	[redacted]
YÜKLENİCİ	[redacted]
ALT YÜKLENİCİ	[redacted]

SONDAJ NO:	PRT-GÜZ-SK-03	DERİNLİK (m) : 33.00-35.00	
SONDAJ TARİHİ:	05.10.2018-08.10.2018		
KOORDİNAT(X,Y):	450611.7250	4517064.2860	SANDIK NO: 8/8

0 1 m



EK 2. AYGM-SK-14 sondaj logu ve karot sandığı fotoğrafları



[redacted]

SONDAJ LOGU

(BOREHOLE LOG)

Sondaj No/Boring No: AYGM-SK-14 (2-2)	
Sondaj Metodu/Boring Method: Tek Tüplü Rotary Sulu Sistem	
Sondör/Operator: BAHRAM BAYMURADOV (34 ZF 8045 Nakliyeli sondaj makinası)	
Sondaj Kotu/Elevation: 88.512 m	
Proje Adı/Project Name: GEBZE-DARICA METRO PROJESİ	Muh.Borusu Der./Casing Depth:
Kilometre/Kilometer: Hat1 (5+045)- Hat2 (5+038)	Yeraltı Suyu/Groundwater: 5.10 m
Sondaj Derinliği/Boring Depth: 35.00 m	Koordinat(Y)/Coordinate(N-S)Y: 4517000.545
Başl.-Bit.Tarihi/Date of Init.-Termin.: 01.03.2018-02.03.2018	Koordinat(X)/Coordinate(E-W)X: 450629.779

Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample type	Manevra Boyu Run	SPT Deneyi ve Grafiği St. Penetr.Test Darbe Sayısı Num.of Blows 0-15	15-30	30-45	N30	10	20	30	40	50	Kaya Rock TCR %	TCR Grafik	SCR %	SCR Grafik	RQD %	RQD Grafik	Derinlik(m)	ZEMİN PROFİLİ SOIL PROFILE	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Dayanımlık Strength	Ayrışma Weathering
21.0	SPT14		50/																			
			39	9	R	R																
22.0																						
	SPT15		50/1																			
23.0			37	1	R	R																
24.0	SPT16		50/																			
			36	9	R	R																
25.0																						
	SPT17		50/																			
26.0			40	7	R	R																
27.0	SPT18		50/																			
			38	8	R	R																
28.0																						
	SPT19		50/1																			
29.0			35	1	R	R																
30.0	SPT20		50/1																			
			37	0	R	R													30.00		Kahve-kızılımsı kahve yeşil alacalı renkli,ince-orta silis-kuvars-kumtaşı çakıllı, az kumlu, organik malzemeli, SERT KİL. (58.512 m)		
31.0																						
	SPT21		50																			
32.0			/9	R	R	R																
33.0	SPT22		50																			
			/11	R	R	R																
34.0																						
35.0																			35.00		Kahve-açık kahve-yeşil-bej alacalı renkli, çakıllı, organik malzemeli kumlu SERT KİL-killi SIKI KUM. (53.512 m)		
36.0																					KUYU SONU		
37.0																						
38.0																						
39.0																						
40.0																						

DAYANIMLILIK-Strength

Rs Aşırı Derecede Zayıf/E. Weak	
Rs Çok zayıf / Very Weak	
Rz Zayıf / Weak	
Rs Orta Derecede Sağlam/Mod. Strong	
Rs Sağlam/Strong	
Rs Çok Sağlam/ Very Strong	
Rs Aşırı Derecede Sağlam/ E. Strong	

AYRIŞMA-Weathering

W1 TAZE	Fresh
W2 AZ AYR.	Slightly W.
W3 ORTA D.AYR.	Moder. W.
W4 ÇOK AYR.	Slightly W.
W5TAM AYR.	Comp. W.
W6 Artık (Rezidüel) Zemin	R.Soil

İnce Taneli-Fine Grained

N=0-2	ÇOK YUM.	V.Soft
N=3-4	YUMUŞAK	Soft
N=5-8	ORTA KATI	M.Stiff
N=9-15	KATI	Stiff
N=16-30	ÇOK KATI	V.Stiff
N>30	SERT	

İri Taneli-Coarse Grained

N=0-4	ÇOK GEV.	V. Loose
N=5-10	GEVŞEK	Loose
N=11-30	ORTA SIKI	M. Dense
N=31-50	SIKI	Dense
N>50	ÇOK SIKI	V. Dense

KAYA KALİTESİ TANIMI-RQD

% 0-25	ÇOK ZAYIF	V. Poor
%25-50	ZAYIF	Poor
%50-75	ORTA	Fair
%75-90	İYİ	Good
%90-100	ÇOK İYİ	Excellent

KIRIKLAR-30 cm fractures

>1	SEYREK	Wide	(W)
1-2	ORTA	Moderate	(M)
2-10	SIKI	Close	(Cl)
10-20	ÇOK SIKI	Intense	(I)
>20	PARÇALI	Crushed	(Cr)

ORANLAR - Proportions

%5>	PEK AZ	Slightly
%5-15	AZ	Little
%15-35	ÇOK	Very
%35<	VE	And

%5>	PEK AZ	Slightly	
%5-20	AZ	Little	
%20-50	ÇOK	Very	

SPT: Standart Pen. Deneyi
Standard Pen. Test
D : Örselenmiş Numune
Disturbed Sample
UD : Örselenmemiş Numune
Undisturbed Sample

K : Karot Numunesi
Core Sample
P : Pressiyometre Deneyi
Pressuremeter Test
VST: Vane Deneyi
Vane Shear Test

YAPAN (logged by)
Bahram BAYMURADOV

İMZA (Sign)

KONTROL (checked by)
Ebru İLMAZ

İMZA (Sign)

PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ	
İŞVEREN	[redacted]	
YÜKLENİCİ	[redacted]	ALT YÜKLENİCİ [redacted]

SONDAJ NO:	AYGM-SK-14	DERİNLİK (m) : 0.00-5.80	
SONDAJ TARİHİ:	01.03.2020-02.03.2020		
KOORDİNAT(X,Y):	450629.7790	4517000.5450	SANDIK NO: 1/7

0 [redacted] 1 m



PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ	
İŞVEREN	[redacted]	
YÜKLENİCİ	[redacted]	ALT YÜKLENİCİ [redacted]

SONDAJ NO:	AYGM-SK-14	DERİNLİK (m) : 5.80-11.20	
SONDAJ TARİHİ:	01.03.2020-02.03.2020		
KOORDİNAT(X,Y):	450629.7790	4517000.5450	SANDIK NO: 2/7

0 [redacted] 1 m



PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ		
İŞVEREN	[redacted]		
YÜKLENİCİ	[redacted]	ALT YÜKLENİCİ	[redacted]
SONDAJ NO:	AYGM-SK-14	DERİNLİK (m) : 11.20-16.20	
SONDAJ TARİHİ:	01.03.2020-02.03.2020		
KOORDİNAT(X,Y):	450629.7790	4517000.5450 SANDIK NO: 3/7	

0 1 m



PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ		
İŞVEREN	[redacted]		
YÜKLENİCİ	[redacted]	ALT YÜKLENİCİ	[redacted]
SONDAJ NO:	AYGM-SK-14	DERİNLİK (m) : 16.20-21.70	
SONDAJ TARİHİ:	01.03.2020-02.03.2020		
KOORDİNAT(X,Y):	450629.7790	4517000.5450 SANDIK NO: 4/7	

0 1 m



PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ		
İŞVEREN	[redacted]		
YÜKLENİCİ	[redacted]	ALT YÜKLENİCİ	[redacted]
SONDAJ NO:	AYGM-SK-14	DERİNLİK (m) : 21.70-26.70	
SONDAJ TARİHİ:	01.03.2020-02.03.2020		
KOORDİNAT(X,Y):	450629.7790	4517000.5450 SANDIK NO: 5/7	

0 1 m



PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ		
İŞVEREN	[redacted]		
YÜKLENİCİ	[redacted]	ALT YÜKLENİCİ	[redacted]
SONDAJ NO:	AYGM-SK-14	DERİNLİK (m) : 26.70-32.50	
SONDAJ TARİHİ:	01.03.2020-02.03.2020		
KOORDİNAT(X,Y):	450629.7790	4517000.5450 SANDIK NO: 6/7	

0 1 m



PROJE ADI	GEBZE-DARICA METRO PROJESİ
İŞVEREN	[redacted]
YÜKLENİCİ	[redacted]
ALT YÜKLENİCİ	[redacted]

SONDAJ NO:	AYGM-SK-14	DERİNLİK (m) : 32.50-35.00	
SONDAJ TARİHİ:	01.03.2020-02.03.2020		
KOORDİNAT(X,Y):	450629.7790	4517000.5450	SANDIK NO: 7/7

0 [redacted] 1 m

