

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZAYIF KAYA KÜTLELERİNDE EPBM
MAKİNASININ BASINÇ-KAZI ORTAMI
FORMÜLÜNÜN TÜRETİLMESİ**

Hasan Eray YAMAN

Haziran, 2024

İZMİR

**ZAYIF KAYA KÜTLELERİNDE EPBM
MAKİNASININ BASINÇ-KAZI ORTAMI
FORMÜLÜNÜN TÜRETİLMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Maden İşletme Programı**

Hasan Eray YAMAN

**Haziran, 2024
İZMİR**

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

HASAN ERAY YAMAN tarafından **PROF. DR. CEMALETTİN OKAY AKSOY** yönetiminde hazırlanan **“ZAYIF KAYA KÜTLELERİNDE EPBM MAKİNASININ BASINÇ-KAZI ORTAMI FORMÜLÜNÜN TÜRETİLMESİ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Cemalettin Okay AKSOY

Danışman

Prof. Dr. Kerim KÜÇÜK

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Talip GÜNGÖR

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Selim ALTUN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Avni GÜNEY

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Başta, tezime ve çalışmalarına yön veren, bilgisi ve tecrübesiyle bana yeni bakış açıları kazandıran, meslek hayatında ve günlük hayatta bana her daim destek olan çok değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Cemalettin Okay AKSOY'a,

Beni madencilğe yönlendiren, bu mesleği sevmemde büyük katkıları olan çok değerli hocam sayın Prof. Dr. Güzin Gülsev UYAR AKSOY'a,

Tezimi hazırlamamda yardımcı olan, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen çok değerli hocalarım sayın Prof. Dr. Kerim KÜÇÜK ve sayın Prof. Dr. Talip GÜNGÖR'e

Tez çalışmam boyunca özellikle matematiksel formül üretme aşamasında bilgisini yardımlarını hiç esirgemeyen çok değerli hocam sayın Doç. Dr. Süleyman ŞAFAK'a,

Maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen, beni yetiştirip bugünlere getiren, bana hep doğru yolu gösteren sevgili aileme,

Yardımlarını ve sevgisini benden esirgemeyen, her daim arkamda durup en büyük destekçim olan dünyanın en güzel annesi canım eşim Kübra YAMAN'a en içten saygı ve teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Hasan Eray YAMAN

ZAYIF KAYA KÜTLELERİNDE EPBM MAKİNASININ BASINÇ-KAZI ORTAMI FORMÜLÜNÜN TÜRETİLMESİ

ÖZ

Tünel Açma Makinaları (TBM), şehir içi tünel kazılarında en sık kullanılan makinalardır. Tünel kazısı sırasında veya sonrasında tünel güzergâhı üzerindeki yapıların hasar görmesi en önemli risklerden biridir. Genellikle zayıf ve zorlu zemin koşullarında kazılan şehir içi tünel kazılarında EPB yöntemi ile çalışan makineler kullanılmaktadır. Bu makineler, tünel aynasının içe doğru hareketini engellemekte ve tünel aynasına basınç uygulayarak zeminde oluşan oturma miktarını kontrol etmektedir. Buradaki en önemli sorun tünel aynasına uygulanacak basınç miktarının belirlenmesidir. Yüzey basıncının hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan birçok formül vardır ve bu formüller genellikle yeraltı suyu seviyesi, örtü kalınlığı, çevre kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri vb. parametreleri kullanarak zemindeki oturmaları sınırlamaya çalışır. Bu çalışmada yeni bir formül geliştirilmiştir. Bu yeni formül, sadece yüzeyde oturmaları engellemenin yanında tünel kazısından etkilenecek güzergâh üzerinde ve alan içerisinde yer alan bir yapının zarar görmemesi için EPB'nin tünel alnına uygulaması gereken ayna basıncını hesaplamaktadır.

Anahtar kelimeler: Yumuşak kaya tünelciliği, EPB, tünel kazısı, ayna basıncı, yeraltı kazıları

GENERATION OF THE PRESSURE-EXCAVATION MEDIA FORMULA OF EPBM MACHINE IN WEAKLY ROCK MASSES

ABSTRACT

Tunnel Boring Machines (TBM) are the most commonly used machines in the excavation of urban tunnels. Damage to the structures on the tunnel route during or after the tunnel excavation is one of the most important risks. In urban tunnel excavations, which are generally excavated in weak and difficult ground conditions, machines working with the Earth Pressure Balance method (EPB) are used. These machines, prevent the inward movement of the tunnel face and control the amount of settlement formed on the ground by applying pressure to the tunnel face. The most important question here is to determine the amount of pressure to be applied to the tunnel face. There are many widely accepted formulas used in the calculation of the face pressure and these formulas generally try to limit the settlements on the ground by using parameters such as groundwater level, overburden thickness, physical and mechanical properties of the surrounding rocks, etc. In this study, a new formula was developed. This new formula calculates the face pressure required to be applied by EPB to the tunnel face in order to prevent damage to a structure located on the route and within the area to be affected by tunnel excavation, instead of only preventing settlements on the surface.

Keywords: Soft rock tunneling, EPB, tunnel excavation, face pressure, underground excavations

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLOLAR LİSTESİ.....	xvi
KISALTMALAR.....	xviii
SEMBOLLER LİSTESİ	xix
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ - TBM'LERİN TANIMI VE TİPLERİ.....	3
2.1. TBM Gelişim Süreci	5
2.2. TBM Yapısı	6
2.3. TBM Tipleri	7
2.3.1. Kalkansız TBM Tipleri.....	9
2.3.2. Kalkanlı TBM Tipleri	10
2.3.3 Arazi Basıncını Dengeleme Makineleri (EPBM)	13
BÖLÜM ÜÇ - AYNA BASINCI FORMÜLLERİ.....	16
BÖLÜM DÖRT - ÇALIŞMA SAHASI BİLGİLERİ.....	22
4.1. Çalışma Alanının Coğrafi Konumu.....	22
4.2. Çalışma Alanının Jeolojisi.....	23
4.2.1. Bornova Karmaşığı.....	27
4.2.2. Neojen Volkano-Sedimanter Birimler	27
4.2.3. Kuvartöner Alüvyonel Çökeller	28
4.3. Çalışma Alanının Hidrojeolojisi.....	29

4.3.1 İklim.....	29
4.3.2. Akarsular.....	30
4.3.3. Kuyular	30
4.3.4. Barajlar ve Göller	31
4.3.5 Birimlerin Hidrojeolojik Karakterizasyonu	31
4.3.5.1. Bornova Karmaşığı	31
4.3.5.2. Kuvartenel Alüvyonel Birimler	32
4.4. Çalışma Alanı Güzergahı ve Jeoteknik Özellikler	32
4.4.1. RMR (Rock Mass Rating) Kaya Sınıflama Sistemi	37
4.4.2. GSI (Geological Strength Index)Sınıflama Sistemi	40
4.5. Sahada Yapılan Çalışmalar	43
4.5.1. Hidrojeoloji Çalışmaları	43
4.5.2. Yer Radarı (GPR) Çalışmaları.....	52
4.5.2.1. Yer Üstü Çalışmaları.....	52
4.5.3. LiDAR Yöntemi Kullanılarak Yüzey Deformasyonlarının Belirlenmesi	104
4.5.3.1. LiDAR Ölçüm Değerlendirmeleri	109

BÖLÜM BEŞ - ÖNGÖRÜLEN GERİLME VE DEFORMASYON DURUMLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ..... 112

5.1. Sığ Derinlikte Meydana Gelen Birincil Gerilmeler	112
5.2. Kazı Güzergahında Yer Alan Zeminin Sıkışabilirlik Özelliği	121
5.3. Tünel İnşası Sonucu Beklenen Yeryüzü Oturma (Sübsidans) Miktarları ve Etki Mesafeleri	121

BÖLÜM ALTI - AYNA BASINCI FORMÜLÜ İÇİN AMPİRİK FORMÜLÜN GELİŞTİRİLMESİ..... 126

6.1. Verilerin Hiperyüzey Yaklaşımları ve Nümerik Modelleri	126
---	-----

BÖLÜM YEDİ - NÜMERİK ANALİZLER..... 130

7.1. Plaxis 3D Numerik Modelleme Aracı	130
7.2. Kullanıcı Tanımlı Zemin Modelinin Oluşturulması.....	130
7.3. Kullanıcı Tanımlı 3 Boyutlu Nümerik Model Analizleri.....	136
BÖLÜM SEKİZ - SONUÇLAR.....	148
KAYNAKLAR	156



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1. TBM'in ana unsurları (Yüksel, 2014).....	7
Şekil 2. 2. TBM tipleri (Maidl vd., 2013)	8
Şekil 2. 3. Döner kafaya monteli keskiller (Zumsteg ve Langmaack, 2017).....	9
Şekil 2. 4. Kalkansız tbm'in kesiti (Guglielmetti vd. 2008)	10
Şekil 2. 5. Tek kalkanlı tbm'in kesiti (Guglielmetti vd., 2008)	10
Şekil 2. 6. Çift kalkanlı tbm'in kesiti (Guglielmetti vd., 2008)	11
Şekil 2. 7. Hava basınçlı kapalı kalkanlı tbm'in kesiti (Guglielmetti vd., 2008).....	12
Şekil 2. 8. EPBS'in kesiti (Guglielmetti vd., 2008)	12
Şekil 2. 9. Çamur basınç kalkanlı makinenin görünümü (Guglielmetti vd., 2008) ...	13
Şekil 2. 10. EPB makinesinin kesit görünümü (Zizka ve Thewes, 2016).....	14
Şekil 2. 11. EPB makinelerinin kullanım modları (Barbendererde ve diğ. 2005)	15
Şekil 3. 1. Tünel arınındaki basınçlar ve yüzey tasmanı (Arıoğlu vd., 2002).....	16
Şekil 3. 2. Horn'a göre kayma mekanizması (Horn, 1961; akt. Anagnostou ve Kovari,1996).....	19
Şekil 3. 3. Tünel aynası önündeki kama yüzeye etki eden kuvvetler (Anagnostou ve Kovari,1996).....	19
Şekil 3. 4. Bir EPB uygulamasında su sızıntı kuvveti f ve buna bağlı olarak oluşturulan efektif kuvvet s' (Anagnostou ve Kovari,1996).....	20
Şekil 3. 5. F_0 , F_1 , F_2 ve F_3 boyutsuz kat sayılarının kestirimi için kullanılan nomogramlar (Anagnostou ve Kovari,1996).....	21
Şekil 4. 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası	22

Şekil 4. 2. Çalışma alanı ve çevresinin basitleştirilmiş jeoloji haritası (Ramazanoğlu, 2008).....	23
Şekil 4. 3. İzmir ve yakın çevresinin tarihsel depremleri ile diri faylar arasındaki ilişkiyi gösteren diri fay haritası (Emre ve Özalp, 2011; Uzel vd., 2013). 25	
Şekil 4. 4. Çalışma bölgesinin stratigrafik kesiti (Savaşçın 1978; Kaya, 1979; İnci vd., 2003; Sözbilir vd. 2006).....	26
Şekil 4. 5. K-G yönlü kuvaterner çökellerin malzeme dağılımı (Ramazanoğlu, 2008)	29
Şekil 4. 6. Çalışma alanı drenaj ağı haritası.....	30
Şekil 4. 7. Çalışma alanındaki gözlem kuyularının durumu.....	31
Şekil 4. 8. Yapılan sondajlara ait yerbulduru haritaları	34
Şekil 4. 9. GSI abağı (Hoek, 1999).....	43
Şekil 4. 10. Seviye ölçümü yapılan kuyuların dağılımı	50
Şekil 4. 11. Nisan ayı yeraltı suyu kotu dağılım haritası	51
Şekil 4. 12. Eylül ayı yeraltı suyu kotu dağılım haritası	51
Şekil 4. 13. Balçova jeotermal sahasında yeraltısuyu sıcaklık dağılımı (Aksoy vd, 2009).....	52
Şekil 4. 14. Yer radarı ölçüm sistemi ve elemanları	53
Şekil 4. 15. Km: 0+000-0+400 arası 3 boyutlu katı model.....	54
Şekil 4. 16. 5 metre derinlik seviyesi haritası	55
Şekil 4. 17. 10 metre derinlik seviyesi haritası	55
Şekil 4. 18. 15 metre derinlik seviyesi haritası	56
Şekil 4. 19. 20 metre derinlik seviyesi haritası	56
Şekil 4. 20. Km:0+000-0+400 arası jeolojik kesit	57

Şekil 4. 21. Km:0+640-0+760 arası 3 boyutlu katı model.....	58
Şekil 4. 22. 5 metre derinlik seviyesi haritası	59
Şekil 4. 23. 10 metre derinlik seviyesi haritası	60
Şekil 4. 24. 15 metre derinlik seviyesi haritası	60
Şekil 4. 25. 20 metre derinlik seviyesi haritası	61
Şekil 4. 26. Km:0+640-0+760 arası jeolojik kesit	62
Şekil 4. 27. Km: 0+7601+500 arası 3 boyutlu katı model	63
Şekil 4. 28. 5 metre derinlik seviyesi haritası	64
Şekil 4. 29. 10 metre derinlik seviyesi haritası	64
Şekil 4. 30. 15 metre derinlik seviyesi haritası	65
Şekil 4. 31. 20 metre derinlik seviyesi haritası	65
Şekil 4. 32. Km:0+760-1+500 arası jeolojik kesit	66
Şekil 4. 33. Km: 1+720-2+780 arası 3 boyutlu katı model.....	68
Şekil 4. 34. 5 metre derinlik seviyesi haritası	69
Şekil 4. 35. 10 metre derinlik seviyesi haritası	69
Şekil 4. 36. 15 metre derinlik seviyesi haritası	69
Şekil 4. 37. 20 metre derinlik seviyesi haritası	70
Şekil 4. 38. Km:1+720-2+780 arası jeolojik kesit	71
Şekil 4. 39. Km: 3+380-3+760 arası 3 boyutlu katı model.....	72
Şekil 4. 40. 5 metre derinlik seviyesi haritası	73
Şekil 4. 41. 10 metre derinlik seviyesi haritası	73
Şekil 4. 42. 15 metre derinlik seviyesi haritası	74

Şekil 4. 43. 20 metre derinlik seviyesi haritası	74
Şekil 4. 44. Km:3+380-3+760 arası jeolojik kesit	75
Şekil 4. 45. Km: 4+980-5+460 arası 3 boyutlu katı model.....	76
Şekil 4. 46. 5 metre derinlik seviyesi haritası	77
Şekil 4. 47. 10 metre derinlik seviyesi haritası	77
Şekil 4. 48. 15 metre derinlik seviyesi haritası	78
Şekil 4. 49. 20 metre derinlik seviyesi haritası	78
Şekil 4. 50. Km:4+980-5+460 arası jeolojik kesit	79
Şekil 4. 51. Hat 1 geri sol yarı.....	80
Şekil 4. 52. Hat 2 ileri sağ yarı.....	81
Şekil 4. 53. Hat 1 ileri alt yarı	82
Şekil 4. 54. Hat 2 geri sağ yarı.....	83
Şekil 4. 55. T1 geri üst yarı.....	84
Şekil 4. 56. T1 ileri üst yarı.....	85
Şekil 4. 57. Hat 1 geri alt yarı	86
Şekil 4. 58. Hat 1 ileri sol yarı	87
Şekil 4. 59. Hat 2 geri ayna ortası	88
Şekil 4. 60. Hat 2 ileri sağ yarı.....	89
Şekil 4. 61. Hat 1 geri ayna ortası	90
Şekil 4. 62. Hat 1 ileri alt yarı	91
Şekil 4. 63. Hat 2 geri alt yarı	92
Şekil 4. 64. Hat 2 ileri üst yarı	93

Şekil 4. 65. Hat 1 ileri sol yarı	94
Şekil 4. 66. Hat 1 geri sağ yarı.....	95
Şekil 4. 67. Hat 2 geri ayna ortası	96
Şekil 4. 68. Hat 2 ileri sol yarı	97
Şekil 4. 69. Hat 1 geri üst yarı.....	98
Şekil 4. 70. Hat 1 ileri ayna ortası.....	99
Şekil 4. 71. Hat 2 ileri sol yarı	100
Şekil 4. 72. Hat 2 geri sol yarı.....	101
Şekil 4. 73. Hat 1 ileri ayna ortası.....	102
Şekil 4. 74. Hat 2 ileri alt yarı	103
Şekil 4. 75. Yüzey deformasyonlarının belirlenmesinde kullanılan tls tarama sistemi (Leica SS II).	105
Şekil 4. 76. Lidar ile üretilen nokta bulutlarının birleştirilmesi ve jeoreferanslama.	106
Şekil 4. 77. Yersel lazer tarama teknikleri ile izlenmesinde kullanılan işlem adımları.	107
Şekil 4. 78. Hedeflerin jeodezik koordinatlarının belirlenmesinde gnss sistemi kullanımı.....	108
Şekil 4. 79. Balçova segmenti yüzey deformasyonları (2018-2020-Aralık).....	109
Şekil 4. 80. Balçova segmenti yüzey deformasyonları (2020-Aralık-2021-Mayıs)	110
Şekil 4. 81. Balçova segmenti yüzey deformasyonları (2021-Mayıs-2021 Aasım)	110
Şekil 4. 82. Balçova segmenti pozitif ve negatif deformasyon alanları (2018-2020- Aralık)	110

Şekil 4. 83. Balçova segmenti pozitif ve negatif deformasyon alanları (2020-Aralık-2021-Mayıs)	111
Şekil 4. 84. Balçova segmenti pozitif ve negatif deformasyon alanları (2021-Mayıs-2021 Kasım)	111
Şekil 5. 1. Tünel açıklığı etrafında yenilme aşamaları ve mekanik davranış (Rabcewicz,1964)	116
Şekil 5. 2. Sığ tünellerde meydana gelen ön konverjans ve ayna kabarması.....	117
Şekil 5. 3. Yeni avusturya tünel açma yönteminin sığ şehir tünellerinde uygulanma zorluğu yaklaşımı	118
Şekil 5. 4. Tünel derinliği ile tünel yüksekliği arasındaki ilişkinin şematik olarak gösterimi	119
Şekil 5. 5. Tünel inşaatı kaynaklı oturma geometrisi ve çökme çanağı genişlikleri	123
Şekil 5. 6. Sübsidans (oturma) parametreleri	123
Şekil 5. 7. Çökme çanağı boyunca yeryüzünde meydana gelen oturmalar, yatay yer değiştirmeler ve yatay basınç gerilim alanları	124
Şekil 5. 8. Çalışma sahasında uygulanmakta olan epb yöntemi (avunduk ve çopur, 2018).....	125
Şekil 7. 1. Senaryoda oluşturulan model.....	136
Şekil 7. 2. Modelde tanımlanan formasyonlar ve yeraltı suyu durumu	137
Şekil 7. 3. Modelde oluşan toplam deformasyonlar.....	138
Şekil 7. 4. Modelde oluşan x-yönü yatay deformasyonlar	138
Şekil 7. 5. Modelde oluşan y-yönü yatay deformasyonlar	139
Şekil 7. 6. Modelde oluşan z-yönü düşey deformasyonlar	139
Şekil 7. 7. Modelde oluşan efektif gerilmeler	140

Şekil 7. 8. Modelde oluşan toplam gerilmeler	140
Şekil 7. 9 Bina temellerinde oluşan toplam deformasyonlar	141
Şekil 7. 10. Bina temellerinde oluşan x-yönü yatay deformasyonlar	141
Şekil 7. 11. Bina temellerinde oluşan y-yönü yatay deformasyonlar	142
Şekil 7. 12. Bina temellerinde oluşan z-yönü düşey deformasyonlar	142
Şekil 7. 13. Bina temellerine etki eden eksenel kuvvetler (n_1).....	143
şekil 7. 14. Bina temellerine etki eden eksenel kuvvetler (n_2)	143
Şekil 7. 15. Bina temellerine etki eden makaslama gerilmeleri (q_{12}).....	144
Şekil 7. 16. Bina temellerine etki eden makaslama gerilmeleri (q_{23}).....	144
Şekil 7. 17. Bina temellerine etki eden makaslama gerilmeleri (q_{13}).....	145
Şekil 7. 18. Bina temellerine etki eden eğilme momenti (m_{11}).....	145
Şekil 7. 19. Bina temellerine etki eden eğilme momenti (m_{22}).....	146
Şekil 7. 20. Bina temellerine etki eden burkulma momenti (m_{12})	146
Şekil 8. 1. Tünel güzergahı boyunca etki alanına giren yapılar	153
Şekil 8. 2. Ölçülen deformasyon verileri ile tahmin edilen deformasyon verilerin karşılaştırılması.....	154

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2. 1. Kazı ortamı cinsi ve jeomekanik özelliklerine göre kullanılması önerilen makine tipleri (Daub, 1997'den alıntılanarak Arıoğlu ve diğ., 2002).	5
Tablo 4. 1. Yapılan sondajların lokasyonları ve derinlikleri.....	35
Tablo 4. 2. Tek eksenli basınç dayanımına göre kayaların sınıflandırılması (Deere ve Miller, 1966)	36
Tablo 4. 3. Kayaların nokta yük direncine göre sınıflandırılması (Bieniawski, 1975)	36
Tablo 4. 4. RQD değerlerine göre kaya kalitesi sınıflaması (Deere 1964).	37
Tablo 4. 5. RMR puanlama sistemi (Bieniawski, 1989)	37
Tablo 4. 6. Kaya sınıfları ve puanlamaları (Bieniawski, 1989)	38
Tablo 4. 7. Çalışma alanındaki sondajlardan alınan örnekler üzerine uygulanan rmr tablosu.....	38
Tablo 4. 8. Jcond ₈₉ değerleri (Bieniawski, 1976).....	40
Tablo 4. 9. Çalışma alanındaki sondajlardan alınan örnekler üzerine uygulanan GSI tablosu.....	40
Tablo 4. 10. Araştırma kuyularının veri tabanı	44
Tablo 4. 11. Birimlerin derinlik bazı geçirgenlik değerleri	45
Tablo 4. 12. Birimlerin geçirgenlik değerleri.....	46
Tablo 4. 13. Lugeon değerlendirme tablosu (Şekercioğlu, 1993).....	47
Tablo 4. 14. Permeabilite değerinin sınıflaması (Terzaghi vd.,1998).....	47
Tablo 4. 15. Zeminlere göre permabilite değerleri (Terzaghi vd.,1998).....	49
Tablo 4. 16. Balçova segmenti lidar ölçüm tarihleri.....	109

Tablo 5. 1. Derinliğe bağlı yatay gerilmelerin değişimi (Berg, 2005).....	115
Tablo 5. 2. n stabilite sayısı ile tünel stabilite durumu arasındaki ilişki	120
Tablo 8. 1. Birimlerin ortalama geçirgenlik değerleri.....	150



KISALTMALAR

TBM	: Tünel açma makinası (Tunnel Boring Machine)
EPB	: Arazi basınç dengeleme (Earth Pressure Balance)
EPBM	: Arazi basınç dengeleme makinesi
EPBS	: Arazi basınç dengeleme kalkanlı
LiDAR	: Işık Algılama ve Mesafe Ölçer (Light Detection and Ranging)
ALS	: Hava platform temelli (airborne based)
TLS	: Yer temelli Lazer tarayıcı (ground based)
ICP	: Iterative Closest Point
EKKY	: En küçük kareler yöntemi

SEMBOLLER LİSTESİ

σ_a	:Tünel ayna basıncı
σ_{ek}	:Bina ve trafik yüklerinden kaynaklı sürşarj
σ_{su}	:Su basıncı
h_1	:Yeraltı suyu seviyesinin yüzeyden derinliği
γ	:Zeminin ortalama birim hacim ağırlığı
Z_0	:Tünel ekseninin derinliği
C_u	:Kazı yapılan formasyonun kohezyonu
E_m	:Kazı yapılan formasyonun elastisite modülü
S_{max}	:Tünel ekseninde yüzeyde ölçülen oturma değeri
i	:Dönüm noktasının tünel eksenine uzaklığı
A, n	:Formasyona ve uygulanan teknolojiye bağlı kat sayılar
G'	:Sürşarj ağırlığı
V'	:Kama-prizmanın ara CDEF arayüzünde oluşan düşey kuvvet
$F_x, F_y, F_z,$	:Sızıntı kuvvetleri
S'	:Tünel aynasındaki çamur desteğinden kaynaklı normal kuvvet
N'	:Eğimli kayma yüzeyinde oluşan normal stres
T	:Eğimli kayma yüzeyinde oluşan makaslama kuvveti
s'	:Sınır dengesinde bulunan efektif destek basıncı
D	:Tünel çapı
H	:Örtü tabakası derinliği
Δh	:Yeraltı suyu seviyesi
C	:Kohezyon
F_0, F_1, F_2 ve F_3 :	Formasyonun içsel sürtünme açısına bağlı parametreler
γ'	:Zeminin suya doymun birim hacim ağırlığı
D	: Deformasyon
$\sigma_{FP},$	:Ayna basıncı
σ_{VS}	:Düşey gerilme
E_{mass}	: Deformasyon modülü
Φ	: İçsel sürtünme açısı
HD	: Yatay mesafe

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Günümüz dünyasına bakacak olursak ülkelerin, şehirlerin, ilçelerin, kasabaların ve köylerin hızla artmakta olan nüfusu gözümüze çarpan önemli durumların başında gelmektedir. Artan nüfus daha fazla yaşama alanı ihtiyacını ve dolayısıyla da daha fazla enerji, ulaşım, alt yapı sistemleri gibi gereksinimleri beraberinde getirmektedir. Araştırmalara göre önümüzdeki yıllarda kentlerdeki nüfusun hızlı bir şekilde artacağı hatta küçük şehirlerin devasa kentlere dönüşeceği varsayılıyor (Guglielmetti vd., 2007).

Nüfus artışı ile oluşan kentsel tıkanıklık, başta enerji, ulaşım, iletişim ve alt yapı sistemleri gibi projelerin plansız yapılması sebebi ile şehirlerin ihtiyaçlarını karşılamak için yer altına alınması ihtiyacını doğurmuştur. Bu ihtiyaç beraberinde farklı tasarım ve uygulamalar getirmiş ve günlük sosyal hayatta tünel sistemlerinin önemi büyük ölçüde artmıştır. Tünel inşaatları ilerleyen çağa ve gelişen teknolojiye ayak uydurarak başta güvenlik olmak üzere inşaat, hizmete sunulma süresinde kısalma ve maliyetlerin azalması gibi birçok konuda sınıf atlamıştır. Tünel inşaatı sırasında kullanılan konvansiyonel yöntemler de yerlerini hızla gelişen mekanize kazı sistemlerine bırakmıştır. Bu sayede kazı yapılacak formasyonları tanıyan sistemler geliştirilmiş ve karşılaşılabilecek risklerin belirlenip önlem alınması daha kolay hale gelmiştir.

Ülkemize bakıldığında tünel inşaatlarında ilk akla gelen konvansiyonel kazı olsa da yukarıda belirtilen nedenlerden ötürü mekanize kazılar da tercih edilir duruma gelmiştir. Tünel açma makinelerinin (TBM) ülkemiz açısından daha geç kullanılmasının nedenleri arasında jeolojimizin elverişli olmaması başta gelmektedir. Bunun yanında konvansiyonel tünel açma metotlarına daha hakim olunması ve TBM'lere aşina olunmayışı da büyük rol oynamıştır. Fakat konvansiyonel tünel açma yöntemlerinin yeryüzündeki yapılara ve topografyaya zarar verme olasılığının mekanize kazılara oranla daha yüksek olması bu makinelere olan ilgiyi artırmıştır. Özellikle şehir içi tünelciliğinde karşı karşıya kaldığımız bu tarz sorunların önüne geçmek amacıyla mekanize kazılar tercih edilmeye başlanmıştır. Yüksek kazma kapasitesi ve emniyetli olması gibi önem arz eden özellikleri de bu makinelere olan

ilgiyi yüksek oranda artırmıştır. Bunun yanında ilk yatırım maliyeti ve hareket kabiliyetinin kısıtlı olması önemli dezavantajları arasındadır. Mekanize kazıyı etkileyen üç önemli etken vardır; jeolojik ve jeoteknik etkenler, operasyonel (mekanik) etkenler ve çevresel etkenler (Herrenknecht ve Watts, 1994; Çopur vd., 2001; Herrenknecht ve Rehm, 2005; Herrenknecht ve Bappler, 2007; Lovat, 2007; Rehm, 2007; Maidl ve Wingmann, 2009; Bilgin vd., 2013; Avunduk ve Çopur, 2018). Dolayısıyla mekanize kazı yöntemi ile kazı yapılacak bir tünel projesinde, proje alanının jeolojik ve jeofiziksel çalışmaların dikkatlice yapılması ayrıca bölgenin hidrojeolojik koşullarının iyi belirlenmesi, bu çalışmalar neticesine göre de makine tasarımının yapılması kritik önem taşır.

Son yıllarda tünel kazıları TBM ile yapılmaya başlanmış ve gelişen teknoloji ile hemen hemen her cins kayaçta tünel açma makinesi ile kazı yapmak mümkün hale gelmiştir (Ulusay ve Aydan, 1997).

BÖLÜM İKİ

TBM'LERİN TANIMI VE TİPLERİ

Tünel açma makineleri (Tunnel Boring Machine – TBM), genel olarak formasyonun jeolojik ve kaya kütlelerinin jeoteknik özelliklerinden ötürü klasik metotlar ile (delme – patlatma, aç-kapa vb.) çalışılamadığı durumlarda ve ilerleme hızının yüksek olması gereken projelerde tercih edilir. TBM tipik olarak kesici ve döner kafa itme ve yönlendirme silindirleri, kilitleme pabuçları, motor ve tahkimat elemanlarını yerleştiren erektörlerden oluşur (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Bunların yanında orta bölümde makineyi kontrol etmek için bir kumanda odası ve arka gövde bölümünde ise kazılan malzemeyi tünel dışına aktaran bir taşıma bandı yer alır. Bu yöntem ile açılacak tünelin çapı ile aynı çapta imal edilen TBM, tüneli ayna boyunca tam cephe olarak sürekli kazma sureti ile kesintisiz ilerleme sağlar. Zeminin sertliği ve doğal çimentolama durumuna göre TBM'ler bazen sadece kazıcı uçtan, bazen de zeminin çökmesini veya benzer sebeplerden ötürü inşaata zarar vermesini önlemek amacıyla kalkanlı olarak imal edilir. Bu kalkanlar tünel açma işleminden sonra yerleştirilecek olan iksa sistemi kurulana kadar, zemine geçici tahkimat sistemi sağlamak ve çalışanlar ile ekipmanları korumak amacı ile kullanılır.

Bir tünel projesinde TBM seçimi çok önemli ve kritiktir. Genel olarak seçim birkaç aşamadan oluşur ve bu aşamalar alınan kararlardan kaynaklanabilecek riskleri de içerir. Kazı makinesinin seçimi sırasında izlenecek aşamalar şu şekilde özetlenebilir (Fruguglietti vd., 1999):

- Tünel güzergahına ait detaylı jeolojik ve jeoteknik bilgilerin elde edilmesi
- Güzergahtaki kayaç birimlerinin incelenmesi, benzer davranış gösterecek birimlerin bölümlendirilmesi, beklenen jeolojik olumsuzluklar ve belirsizliklerin ortaya konması
- Kazı aynası stabilite durumu ve çevresel etkilerin (oturma, yer altı suyu vb.) incelenmesi
- Tünel inşaatı iş durumunun “maliyet-süre” optimizasyonu dikkate alınarak oluşturulması

- Makine seçimine etki eden proje koşullarının tanımlanması ve değerlendirilmesi.

Fruguglietti vd . (1999) seçilecek olan kalkanlı bir TBM'in aşağıdaki özelliklere sahip olması gerektiğini belirtmiştir:

- Sert kayalardan yumuşak zeminlere kadar geniş bir yelpazede kazı yapabilmelidir.
- TBM modundan EPB moduna kolaylıkla geçiş yapabilmelidir.
- Kazılan malzemenin atılmasını ve taşınmasını mekanik ve burgulu sistemle yapabilme alternatifine sahip olmalıdır.
- Beklenen zemin koşullarının tamamında kazı yapabilecek güç ve kapasiteye sahip olmalıdır.
- Kolay monte ve demonte edilebilir olmalıdır.
- Bütünleşik ve güvenilir bir ilerleme sistemi bulundurmalarıdır.

Genel hatları ile bakıldığında güzergâhtaki zayıf kaya kütleleri koşulları makine seçimini büyük ölçüde etkilemektedir. Alman Yeraltı İnşaatı Birliği (DAUB) tarafından kazı ortamının türüne ve sahip olduğu jeomekanik özelliklere göre kullanılması gereken makine tipleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2. 1 Kazı ortamı cinsi ve jeomekanik özelliklerine göre kullanılması önerilen makine tipleri (DAUB, 1997'den alıntılanarak Arıoğlu ve diğ., 2002).

Jeoteknik Koşullar Jeoteknik Parametreler		Kaya		Zemin		
		Kazıda Duraylı	Kazıda Duraysız	Kohezif Duraylı	Kohezif Duraysız	Karışık Zemin Kohezyon suz
Basınç Dayanımı, σ_c , MPa		300 - 50	50 - 5	1,0	0,1	
Çekme Dayanımı, σ_t , MPa		25 - 5	5 - 0,5			
Kaya Kalite Derecesi, RQD , %		100 - 50	50 - 10			
Çatlak Aralığı, m		>2,0 - 0,6	0,6 - 0,06			
Kohezyon, C_u , kPa				≥ 30	30 - 5	30 - 5
Dane Boyut <0,02 (%)				30	30	10
Dağılımı <0,06 (%)				≥ 30	≥ 30	
Makina Tipi	YAS	Kullanım Aralığı				
Açık Tip	-					
(Kalkansız) TBM	+					
Kalkanlı	-					
TBM	+					
Açık	-					
Kalkan	+					
Mekanik-Destekli	-					
Kalkan	+					
Mekanik-Basınçlı Hava	-					
Destekli Kalkan	+					
Çamur Basınçlı	-					
TBM (SPB)	+					
Pasa Basınçlı	-					
TBM (EPB)	+					
Açık Kalkan	-					
Parçalı Arın Kazısı	+					
Kısmî Destekli Kalkan	-					
Parçalı Arın Kazısı	+					
Basınçlı Hava Destekli	-					
Kalkan -Parçalı Arın Kazısı	+					
Bentonit Bulamaç Destekli	-					
Destekli-Parçalı Arın Kazısı	+					
YAS: Yeraltı suyu	-	Yok			Ana Uygulama Alanı	
Durumu	+	Var			Mümkün Uygulama	

2.1. TBM Gelişim Süreci

1856 yılında Herman Harput isimli inşaat mühendisi o tarihteki ilk TBM 'i Amerika'daki Hoosac Tüneli'nde kullanmıştır; fakat makine sert kayalarda çalışabilecek seviyede değildi ve o günün şartlarında bu makine ile 3 metrelik bir

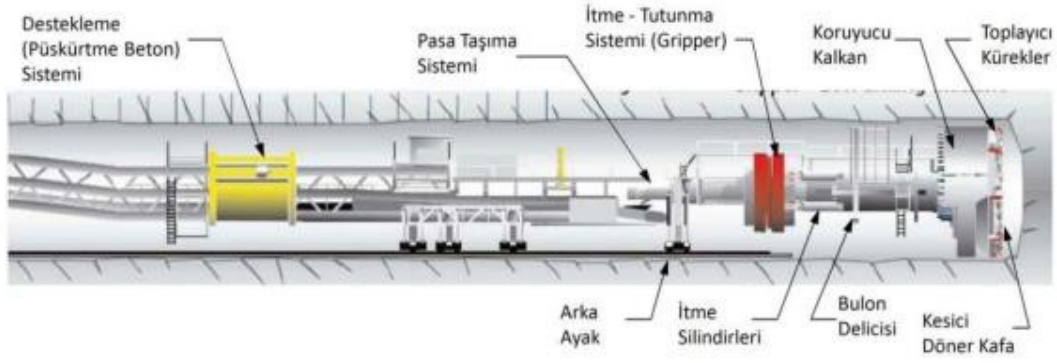
ilerleme kaydedilmişti (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). 1956'da döner kesicilerin kullanılma fikri ile Toronto'da günde 38 metre ilerleme kaydedilmiş ve bu uygulama tünel açma makinelerinin orta ve sert kayalarda kullanılma durumunun olduğuna ışık tutmuştur (Çınar ve Feridunoğlu, 2004). Yumuşak kayalarda kullanılan ilk kalkanlı tünel açma makinesi Times nehrini 1824-1840 yılları arasında geçen Brunei'dir ve bu kalkanlı TBM şimdilerde kullanılan "Arazi Basınç Dengeleme (EPB)" makinesinin temellerini oluşturmaktadır (Çınar ve Feridunoğlu, 2004).

2.2. TBM Yapısı

Tünel açma makineleri ön kısmı, kuyruk kısmı ve gövde kısmı olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Ön kısmında kesici kafa, kesici kafaya monteli kesici uçlar, operatör kabini ve motor bulunur (Arıoğlu, 2009). TBM'in gövde bölümünde operasyon çemberi, jeneratörler, dişliler, hidrolik ve elektrik sistemleri gibi bölümler bulunmaktadır ve makineye göre 2 ile 8 arasında değişen kitleme pabucu bulundurur (Arıoğlu, 2009). TBM'in kuyruk bölümünü ise tahkimat kurma kısmı (segment montajı), vantilatör, bant ve yardımcı motorlar oluşturur (Arıoğlu, 2009).

Genel hatlarıyla bakıldığında zaman TBM'i oluşturan ana unsurları dört başlık altında toplamak mümkündür (Şekil 2.1). Bunlar;

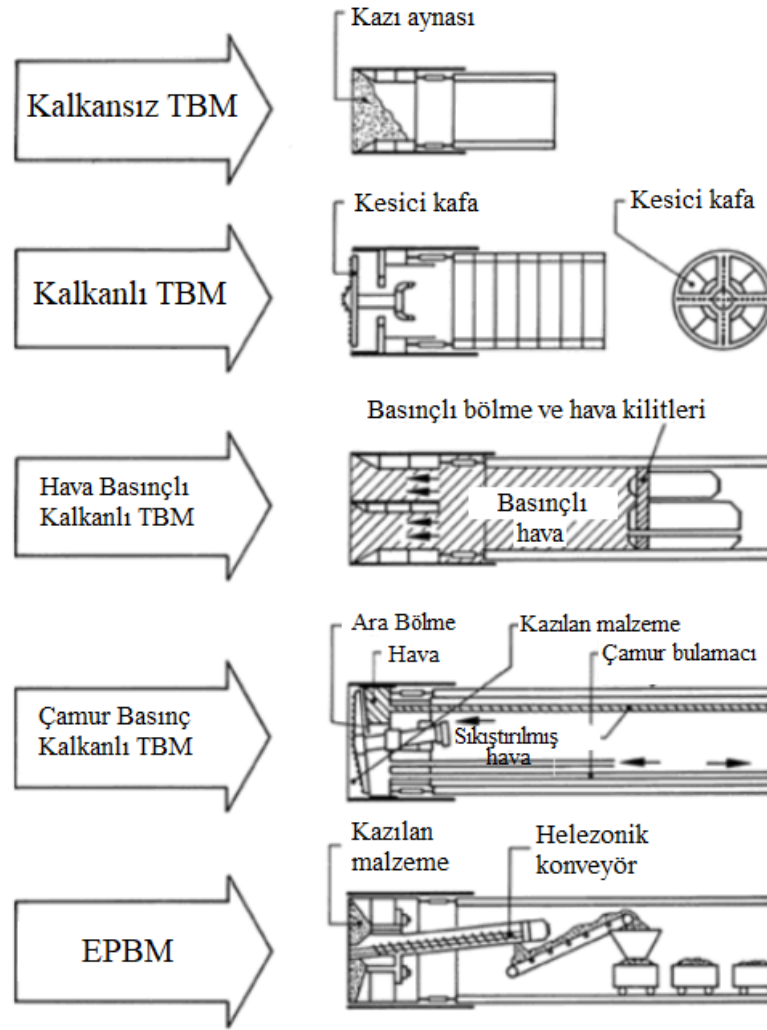
- Kazı sistemi
- Güç nakil, itme ve tutunma sistemi
- Pasa toplama ve iletme sistemi
- Destekleme sistemi



Şekil 2. 1 TBM'in ana unsurları (Yüksel, 2014).

2.3. TBM Tipleri

Uzun yıllar süren çalışmalar neticesinde TBM'ler hemen hemen her türlü kaya ve zemin tipinde mekanik kazı yapabilir hale gelmişlerdir. Yalnızca delme-patlatma yöntemi ile açılabilmesi mümkün olan formasyonlarda bile TBM'ler yardımıyla mekanik kazı yapılabilmesi mümkündür. Tam cephe kazı yapan makinelerde kazma işlemi iki temel kuvvet ile yapılır. Bu kuvvetler itme kuvveti ve kesme kuvvetidir. Kesici kafa aynaya doğru itilir ve bu itme sırasında kesici kafa dönmeye başlar. Kesici kafaya kazı yapılacak formasyonun cinsine göre entegre edilmiş kesiciler, kafanın dönmesi ile zemini veya kayayı kesmeye başlar. Bu sayede kazı olayı gerçekleşmiş olur. Tam cephe kazı yapan makineler, makine çapına göre ayarlanmış kazıları tek seferde yapar ve bu kazı sırasında pasa meydana gelir. Pasa kesici kafada bulunan kanatlar sayesinde arkadaki bölmeye alınır. Bu bölmede pasanın nakliyesini yapmak üzere konumlandırılmış bantlar bulunur. Eğer kazı yapan makine çamur esaslı çalışan bir makine ise, pasa tahliye hattındaki çelik borular vasıtasıyla nakliye yapılır. Kesici kafadaki kesicileri jeolojiye göre revize etmek gerekebilir. Çünkü çalışılan formasyona veya zemine göre kesici kafanın dizaynı değişir. Bu durumda kalifiye bir işçi keski değişikliği yapar.



Şekil 2. 2 TBM tipleri (Maidl vd., 2013)

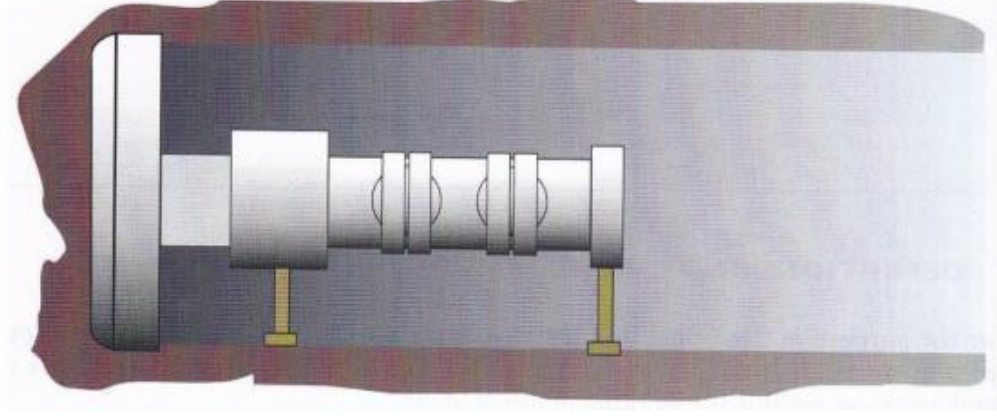
TBM'ler sert formasyonlarda, zayıf formasyonlarda ve bu ikisinin karışımından olan kompleks yapıdaki formasyonlarda kullanım durumuna göre farklılık gösterirler. Genel olarak yumuşak zemin ve formasyonlarda kazı yapan tünel açma makineleri için ripper dişler ve kalem keski kullanılır. Sert zemin ve formasyonlarda disk keski kullanılır. Kompleks formasyon ve zeminlerde kesici kafada hem ripperler hem de disk keski bulunur (Çınar ve Feridunoğlu, 1994). Şekil 2.3'te döner kafaya monteli kullanılan çeşitli keski verilmiştir.



Şekil 2. 3 Döner kafaya monteli keskiler (Zumsteg ve Langmaack, 2017)

2.3.1. Kalkansız TBM Tipleri

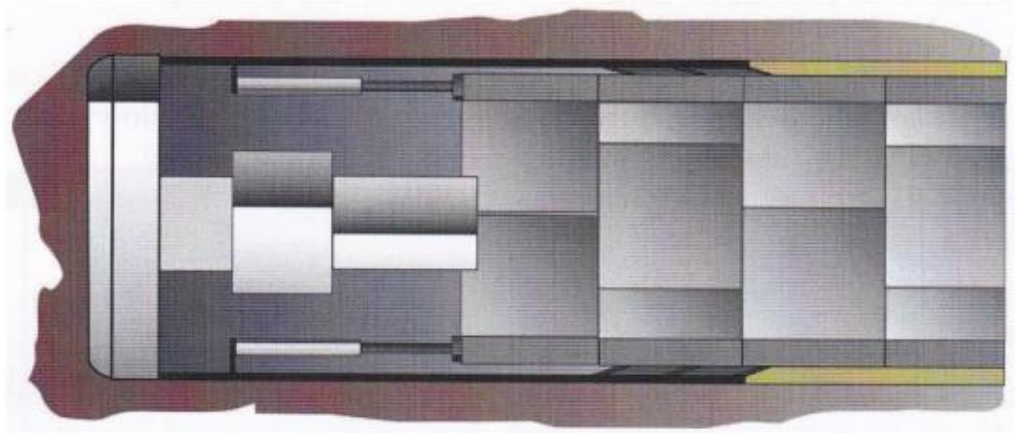
Kalkansız TBM'ler kazı işlemi sonrası kaya kütlelerinin kendini tutabildiği sağlam formasyonlarda tercih edilirler. Püskürtme beton, kaya saplaması ve çelik hasır gibi geleneksel yöntemlerde kullanılan tahkimat sistemleri kullanılarak kazı ilerlemesi gerçekleştirilir (Guglielmetti vd., 2008). Çok sağlam kaya kütlelerinde hiç tahkimat yapmadan ilerleme yapılması mümkün olmaktadır. Bu durumda tahkimat için ayrıca herhangi bir zaman harcanmadığından, günlük ilerleme miktarı fazladır.



Şekil 2. 4 Kalkansız TBM'in kesiti (Guglielmetti vd. 2008)

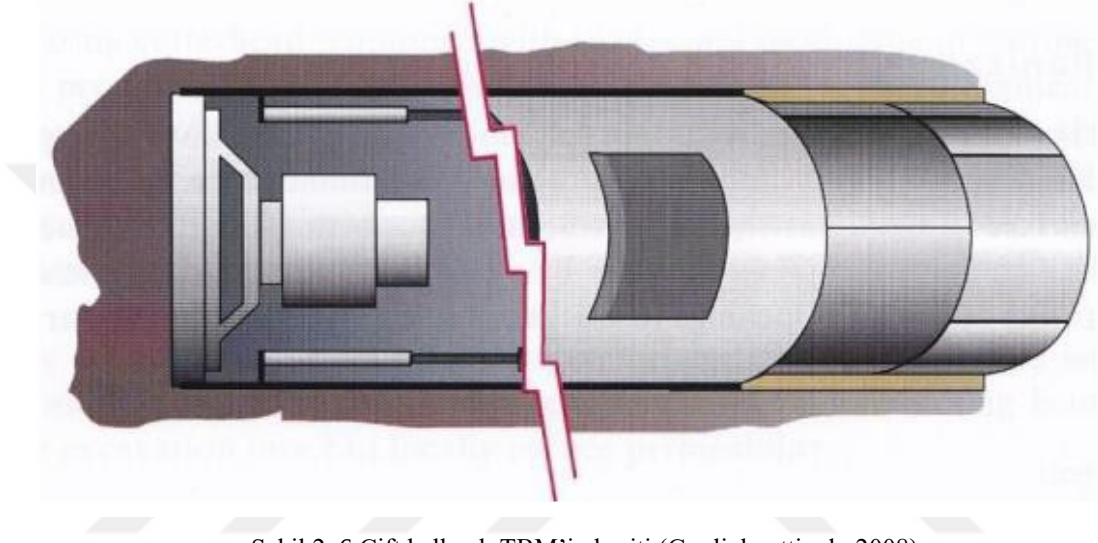
2.3.2. Kalkanlı TBM Tipleri

Son yıllarda teknolojinin gelişmesi ile birlikte birçok türde kalkanlı tünel açma makineleri imal edilmiş ve kullanıma sunulmuştur. Tek kalkanlı makinelerde segmentten alınan güç hidrolik pistonlar vasıtası ile tünel aynasına iletildiği ve kazılan malzeme kesici kafadaki açıklıktan direk nakliyat sistemine verildiği, bu döngünün sürekli tekrarlandığı bir kazı işlemi gerçekleştirilir (Guglielmetti vd. 2008). Tek kalkanlı tünel açma makineleri orta ve zayıf dayanımlı kaya kütlelerinde yaygın olarak kullanılır. Bu makinedeki ana prensip ikincil gerilmeler sonucu oluşabilecek deformasyonları kısa süreliğine engellemek ve nihayetinde yükün segmentlere dağıtılmasını sağlayabilmektir (Guglielmetti vd. 2008).



Şekil 2. 5 T ek Kalkanlı TBM'in kesiti (Guglielmetti vd., 2008)

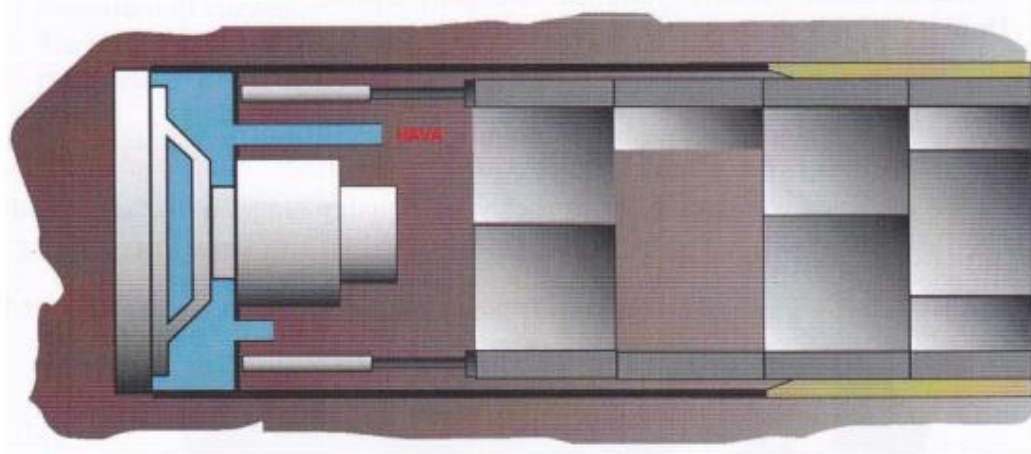
Çift kalkanlı TBM'ler tek kalkanlı makinelerde karşılaşılan sorunlara çözüm üretmek maksadı ile geliştirilmiş makinelerdir. Bu makinelerdeki temel prensip, yapılan kazı ile birlikte tahkimat sisteminin yerleştirilmesi işleminin birlikte yürütülmesi üzerine kuruludur (Guglielmetti vd. 2008). Hızlı ilerleme kaydedebilme özelliğine karşın daha çok orta kalitedeki kaya kütlelerinde tercih edilen makineler olmuşturlardır.



Şekil 2. 6 Çift kalkanlı TBM'in kesiti (Guglielmetti vd., 2008)

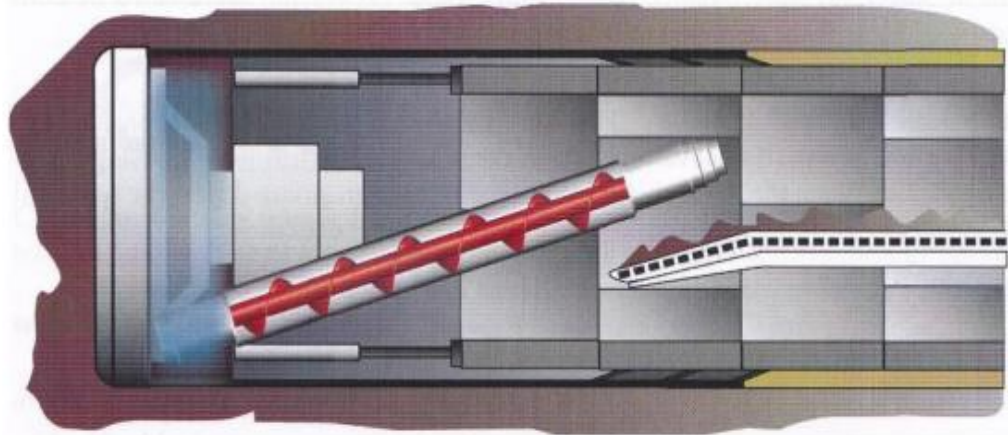
Mekanik destekli kapalı kalkanlı TBM'lerde tünel aynasının hemen arkasında koruyucu bir kalkan konumlandırılmıştır. Bu tip makinelerde kesici kafanın iki farklı görevi vardır. Bunlardan ilki hareketli plakalar vasıtasıyla aynanın desteklenmesi iken diğeri özel hidrolik krikolarla aynaya itme kuvvetinin oluşturulmasıdır. Kesici kafa kesme bıçağı ve dişli kesiciler ile donatılmış olup koruyucu kalkan bütün ekipmanı korur (Guglielmetti vd. 2008).

Hava basınçlı kapalı kalkanlı TBM'lerde hidrostatik basıncı dengelemek için basınçlı hava ile ayna desteği sağlanmaktadır. Bu tarz makinelerin kesici kafa arkasında basınçlı hava odası bulunur ve kazılan malzeme döner hazne kullanılarak basınçlı odadan çıkarılıp direk nakliyat sistemine aktarılır (Guglielmetti vd. 2008).



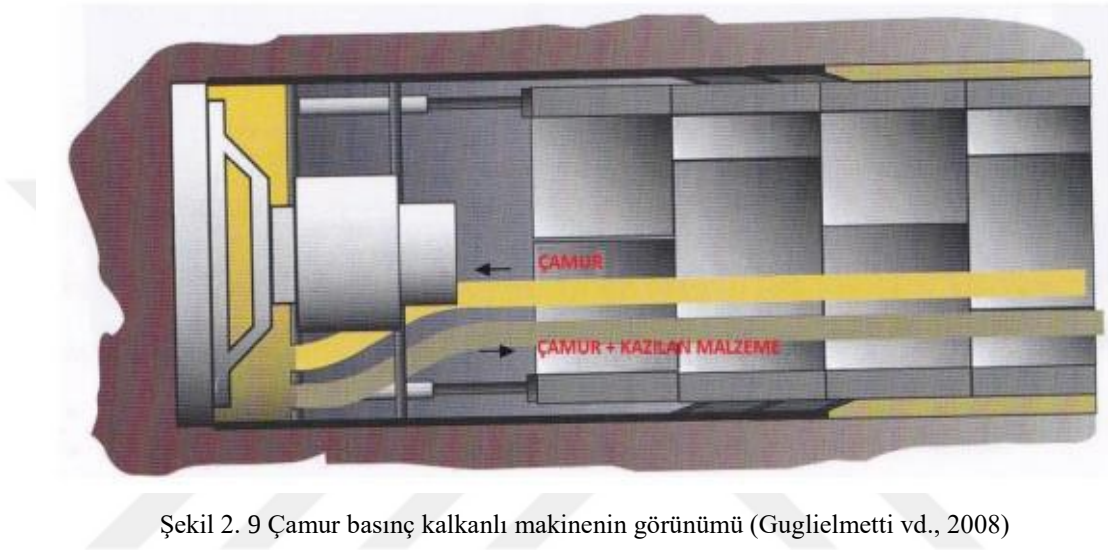
Şekil 2. 7 Hava basınçlı kapalı kalkanlı TBM'in kesiti (Guglielmetti vd., 2008)

Arazi dengeleme basınç kalkanlı makineler (EPBS – Earth Pressure Balance Shield) tünel aynasından kazılan malzemenin kullanılarak arazi basıncını dengelemesi prensibi ile çalışır. Basıncı dengelemek için kesici kafa arkasında basınç dengeleme odası bulunmaktadır. Buradaki malzeme sayesinde bir basınç oluşturulmakta ve aynaya dengeleyecek basınçta tutulmaktadır. Kazılan bu malzeme ayna ilerleme hızına paralel olarak helezonik konveyörlerle arka tarafa alınmaktadır. Buradan da farklı nakliyat sistemleriyle taşınmaktadır. Malzemenin basınç dengeleme odasına ve buradan da helezonik konveyöre geçişini kolaylaştırmak ve tıkanmaları önlemek amacıyla farklı kimyasalların kullanıldığı uygulamalar da vardır (Guglielmetti vd., 2008).



Şekil 2. 8 EPBS'in kesiti (Guglielmetti vd., 2008)

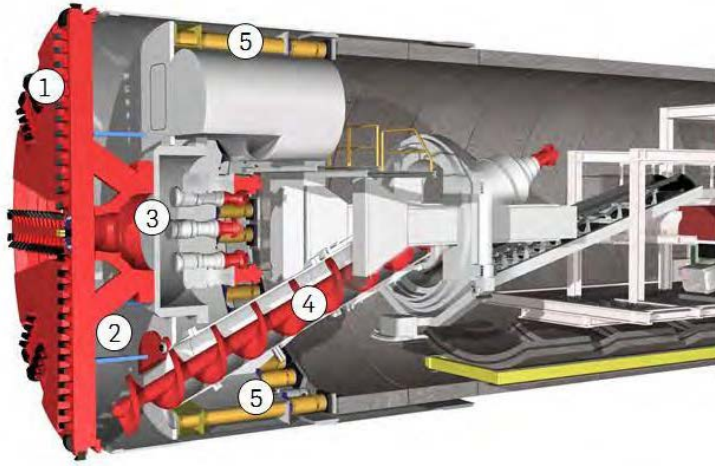
Kum ve çakıl ihtiva eden zeminlerde kullanılan çamur basıncılı TBM’lerde ayna basıncının dengelenmesi için tesisten gönderilen hazır çamur karışımı kullanılmaktadır. Buradaki amur karışımı su ve bentonitten oluşur. Kazılan malzeme kesici kafa arkasına gönderilen çamurla birlikte basınç oluşturmakta ve aynanın dengelenmesini sağlamaktadır. Malzeme kesici kafa arkasındaki bölümde bulamaç haline gelir ve borular vasıtasıyla nakli gerçekleştirilir (Guglielmetti vd., 2008).



şekil 2. 9 çamur basınç kalkanlı makinenin görünümü (Guglielmetti vd., 2008)

2.3.3 Arazi Basıncını Dengeleme Makineleri (EPBM)

Yeraltı suyu tablasının altında bulunan zeminlerde kazı sırasında kazı aynasında akımların oluşması ihtimali çok yüksektir. Arazi basıncını dengeleme makineleri (EPBM – Earth Pressure Balance Machine) bu tarz formasyonlarda yani kazı sırasında kendini az da olsa tutamayan kayaç ve zeminlerde kullanılmak üzere üretilmişlerdir. Bu makinelerde kazı aşamasında su gelirini veya formasyondaki akımların kontrol altına alınması hedeflenir. ınar ve Feridunoğlu (2004) bu makinelerin temel çalışma prensibini “su gelirini veya arazi akmasını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunun kapalı bir hacim haline getirilerek basınç altında tutulması, bizzat arazi içindeki su basıncı etkisiyle, kesme kafası ve ayna boşluğunda doğal bir basıncın oluşmasına imkn verilmesi” diye tanımlamıştır. Buradaki kritik nokta, ayna basıncını dengeleyerek akımları ve su gelirini kontrol altına alıp zemin üstünde tasman oluşumunu engellemektir.



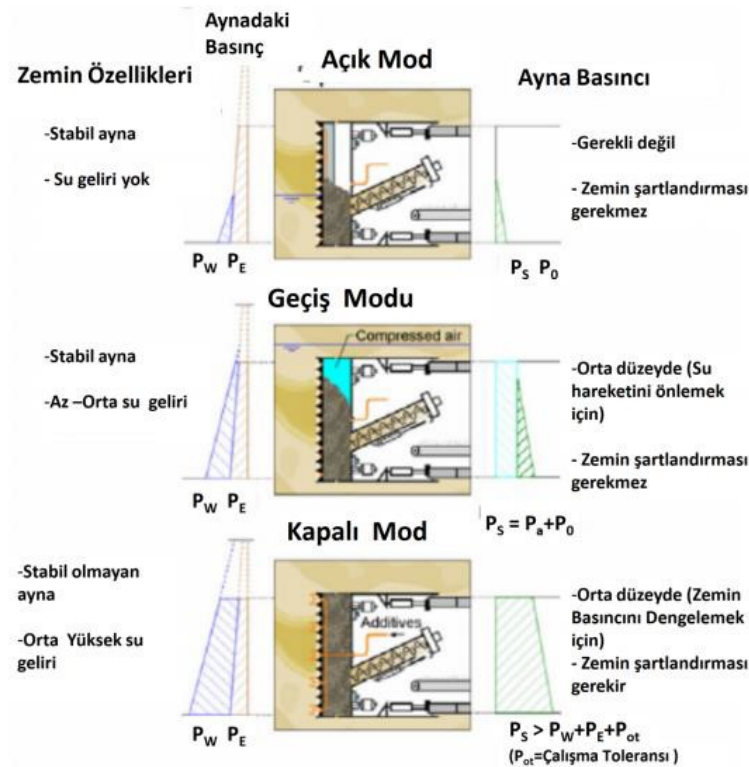
- 1) Kesici kafa
- 2) Kazı odası
- 3) Bölme
- 4) Helezonik konveyör
- 5) Hidrolik krikolar

Şekil 2. 10 EPB makinesinin kesit görünümü (Zizka ve Thewes, 2016)

EPB makineleri çok sert kayalardan yumuşak kayalara kadar geniş bir alanda kullanılmak üzere tasarlanabilirler fakat daha çok ince taneli malzemeler için kullanılır. Tünel aynası kesici kafa tarafından kazılır ve kazı odasına girer. Kazı odasına girecek malzemenin hacimsel akışı, makinenin kazı hızı ile orantılıdır. Malzemenin helezonik konveyörden çıkış hızı ile makinenin ilerleme hızı birbirine eşit olduğu takdirde güvenli ve dengeli bir kazı işlemi yapıldığı kanaatine ulaşılır. Çıkan malzeme makinenin ilerleme hızından fazla olursa zeminde istenmeyen oturmalar oluşabilir. Bu makinede kullanılan helezonik konveyörün en kritik görevi de budur. Helezonik konveyör aynada oluşturulan basıncı kontrollü olarak düzenler ve normal basınç düzeyine ulaştırır. EPB makineleri kullanım alanlarının geniş olmasından ve daha basit bir çalışma yapısı olmasından dolayı çamur basınç kalkanlı makinelerin yerini almaya başlamıştır. EPB makineleri kazı aynasındaki stabiliteye bağlı olarak farklı modlarda kullanılabilir (Barbendererde vd. 2005; Maidl vd., 2013). Bu modlar şu şekildedir;

- Açık mod – Bu modda kazı odası tamamen boştur. Bu nedenle kazı aynasına herhangi bir destek sağlanmamaktadır. Zemin koşulları stabil bir tünel aynası imkanı veriyor ve herhangi bir su gelirin olmadığı görülüyorsa makine bu modda çalıştırılabilir. Sağlam kayalarda kazı yapılırken özellikle açık modda çalıştırılması tercih edilmelidir.

- **Geçiş Modu** – Geçiş modu adından da anlaşılacağı üzere kazı ortamının nispeten daha çatlaklı ve su gelirinin orta-az miktarda olduğu ve bu durumların stabilite sorunu oluşturduğu koşullarda kullanılabilir. Buradaki temel nokta EPB kalkanının kapalı halde olması ve kısmen doldurulmuş bir kazı odası ile kazı işleminin gerçekleştirilmesidir. Kazı odasındaki malzeme basınçlı hava ile sıkıştırılabilir ve bu da su gelirinin azaltılmasına ya da tamamen kesilmesine yardımcı olur. Geçiş modunun temel amacı kazı işlemi boyunca su gelirinin kontrol altına almaktır. Geçiş modundan kapalı moda hızlı bir biçimde geçmek mümkündür.
- **Kapalı Mod** – Basınçlı mod olarak da adlandırılan bu modda kazı odası tamamen kazılan malzeme ile doldurulur. Burada uygulanan basınç arazi basıncını ve yer altı suyu basıncını dengeler. Dolayısıyla kazı aynasının stabil olarak tutulması ve zemin kayıplarının minimize edilerek deformasyonların kontrol altında tutulması hedeflenir. Bu çalışma modu yer altı suyu tablasının altındaki yumuşak formasyonlar için kullanıma uygundur. Ayrıca ayna basıncı yeterince yüksek olursa kazı esnasında su gelirinin tamamen önüne geçilebilir.



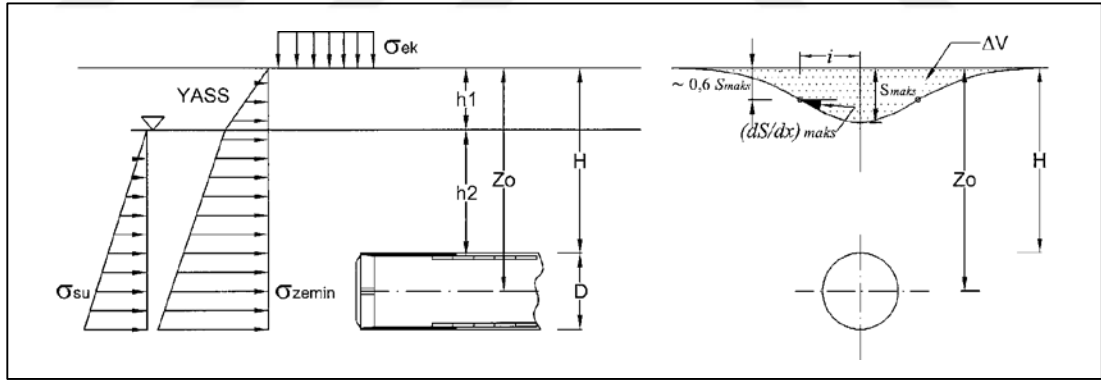
Şekil 2. 11 EPB makinelerinin kullanım modları (Barbendererde ve diğ. 2005)

BÖLÜM ÜÇ

AYNA BASINCI FORMÜLLERİ

EPB makineleri ile kazı yapılırken aynaya uygulanacak basıncın doğru hesaplanması hem iş güvenliği hem de yüzeydeki oturmaları önleme açısından kritik önem arz eder. Ayna basıncı kazı yapılan formasyonun durumuna göre çok farklılık gösterebilir. Kazı işlemi neticesinde kazı yapılan formasyonun kayaç özelliklerine bağlı olarak aynada akmalar ve buna bağlı olarak da yüzeyde oturmalar meydana gelir. Oturmaların çevredeki yapılarda hasara neden olmaması için kazı sonucu oluşan çökme eğrisinin belirli bir değerin altında kalması gerektiği ve bu değerin hafif hasar düzeyi için 1/500-1/250 aralığında olması gerektiği belirlenmiştir (Skempton vd., 1956).

Tüneldeki ayna basıncı formasyon basıncı, yer altı suyu basıncı ve yer yüzündeki trafik–bina yüklerinden kaynaklanan ek (sürşarj) yüklerinin toplamından oluşur (Arioğlu vd., 2002). Bu toplam basınç EPB makinasının kazı aynasına uygulayacağı basıncı belirler.



Şekil 3. 1 Tünel arınındaki basınçlar ve yüzey tasmanı (Arioğlu vd., 2002)

Ayna stabilite ölçüsü olarak bilinen “N” büyüklüğü

$$N = \frac{\sigma_{ek} + \gamma \cdot Z_o - \sigma_a}{C_u} \quad (3.1)$$

bağıntısı ile bulunur (Brooms, Bennermark, 1967; Peck, 1969).

N'nin aldığı değerlere göre ayna stabilitesi şu şekilde ayırt edilir;

- $0 < N < 2$ Az akma-elastik koşullar
- $2 < N < 4$ Sınırlı akma
- $4 < N < 6$ Plastik akma
- $N > 6$ Aynada ciddi stabilite problemleri

söz konusudur.

Bazı ayna basıncı hesapları için kullanılan bazı formüller aşağıda verilmiştir.

- Zemin kaybı oranı (Mitchell, 1993)

$$K = \frac{C_u}{E_m} \exp. \frac{\sigma_{ek} + \sigma_{su} + \gamma \cdot Z_0 - \sigma_a}{2C_u} \quad (3.2)$$

- Maksimum tasman miktarı (Schimdt, 1969)

$$S_{max} = 0,314 \cdot K \cdot \frac{D^2}{i} \quad (3.3)$$

- Dönüm noktası değeri (Yapı merkezi, 1992; Arıoğlu vd., 1992; Arıoğlu vd., 2002c).

$$\frac{2i}{D} = A \cdot \left[\frac{Z_0}{D} \right]^n \quad (3.4)$$

- Tasman eğrisinin maksimum eğimi (Arıoğlu, vd. 2002)

$$\left[\frac{dS}{dX} \right]_{max} = 0,606 \cdot \left[\frac{S_{max}}{i} \right] \quad (3.5)$$

Yukarıda verilen bağımlıları birleştirip gerekli sadeleştirmeler yapıldığında (Arioğlu, vd. 2002);

$$\sigma_a = (\sigma_{ek} + \sigma_{su} + \gamma \cdot Z_0) - 2C_u \cdot \left\{ \ln \left(2,544 \cdot \left[\frac{Z_0}{D} \right]^{-1,408} \cdot \left[\frac{dS}{dX} \right]_{max} - \ln \left(\frac{C_u}{E_m} \right) \right) \right\} \quad (3.6)$$

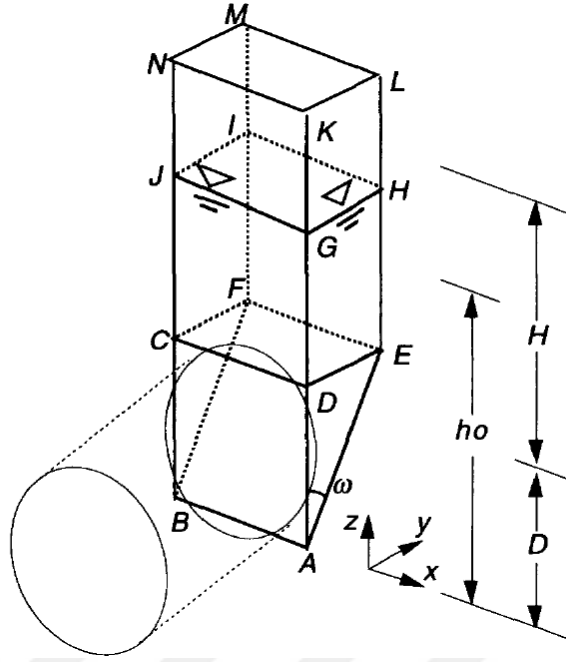
formülü elde edilir.

Burada:

σ_a	=	Tünel ayna basıncı
σ_{ek}	=	Bina ve trafik yüklerinden kaynaklı sürşarj
σ_{su}	=	Su basıncı
h_1	=	Yeraltı suyu seviyesinin yüzeyden derinliği
γ	=	Zeminin ortalama birim hacim ağırlığı
Z_0	=	Tünel ekseninin derinliği
C_u	=	Kazı yapılan formasyonun kohezyonu
E_m	=	Kazı yapılan formasyonun elastisite modülü
S_{max}	=	Tünel ekseninde yüzeyde ölçülen oturma değeri
i	=	Dönüm noktasının tünel eksenine uzaklığı
A, n	=	Formasyona ve uygulanan teknolojiye bağlı kat sayılar

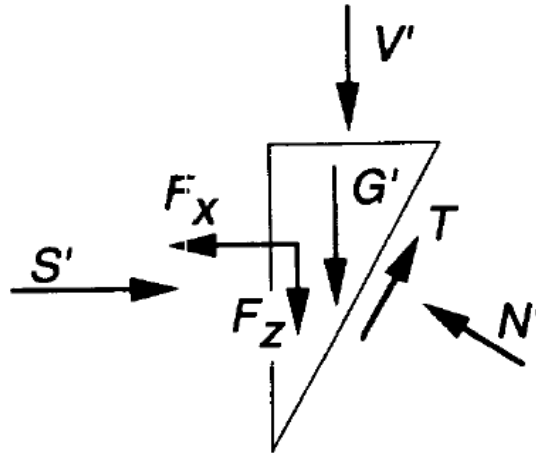
olarak belirtilmiştir.

Homojen zeminde ayna stabilitesi, prizmatik zemin kütlesi tarafından yüklenen bir kama şeklindeki kütlenin sınır dengesi dikkate alınarak değerlendirilir. Şekil 3.2’de verilen görsel bu durumu göstermektedir (Horn, 1961; akt. Anagnostou ve Kovari,1996). Horn (1961), bu kayma mekanizmasını öne sürerken sığ tünellerde çok sık meydana gelen ayna göçüklerinde gözlenen kayma yüzeylerinin oluşumunu dikkate alır. Bu durumun oluşumunda, Mohr-Coulomb yenilme kriteri ve drenajlı koşulların geçerli olduğu kabul edilir. Prizma yükü, aktif kama üzerine etkiyen düşey efektif gerilmeleri kemerlenme nedeniyle azaltıcı etkisi olan “Silo Teorisine” (Janssen, 1895) dayanarak hesaplanır.



Şekil 3. 2 Horn'a göre kayma mekanizması (Horn, 1961; akt. Anagnostou ve Kovari,1996).

Şekil 3.3'te ayna önündeki kama yüzeye etki eden kuvvetler verilmiştir (Anagnostou ve Kovari,1996).



Şekil 3. 3 Tünel aynası önündeki kama yüzeye etki eden kuvvetler (Anagnostou ve Kovari,1996).

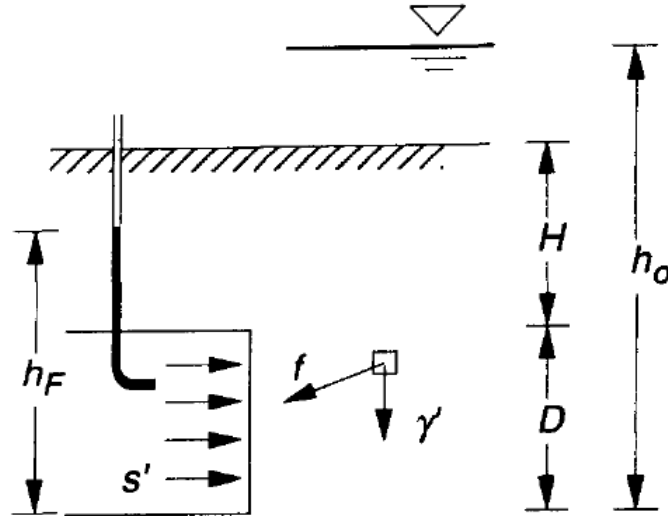
Burada;

- G' , sürşarj ağırlığı
- V' , efektif kuvvetten kaynaklanan kama-prizmanın ara CDEF arayüzünde oluşan düşey kuvvet

- F_x, F_y, F_z , sızıntı kuvvetleri, (Karşılıklı iki kamadaki F_y kuvvetleri birbirini sıfırlayacağından bu yöndeki kuvvet dikkate alınmaz)
- S' , tünel aynasındaki çamur desteğinden kaynaklı normal kuvvet
- N' , eğimli kayma yüzeyinde oluşan normal stres
- T , eğimli kayma yüzeyinde oluşan makaslama kuvveti

olarak belirtilir.

Bir EPBM'nin basınç odası, kazılan pasa ile basınçlı olarak doldurulmuş olduğundan, aynaya etki eden toplam ve efektif gerilmeler arasında bir ayırım olmalıdır. Eğer kazı odasındaki piezometrik basınç, zeminin örselenmemiş durumundaki piezometrik basınçtan daha düşükse, bu durumda yeraltı suyu tünel aynasından tünel içine sızacaktır. Bu durum kontrol edilmezse, aynada göçük olabilir. Sızıntı kuvveti ve buna bağlı olarak oluşturulan efektif kuvvet şekil 3.4'te verilmiştir (Anagnostou ve Kovari,1996).



Şekil 3. 4 Bir EPB uygulamasında su sızıntı kuvveti f ve buna bağlı olarak oluşturulan efektif kuvvet s' (Anagnostou ve Kovari,1996)

Sınır dengesinde bulunan efektif destek basıncı, tünel çapına, örtü tabakası derinliğine, basınç odasındaki piezometrik basınca, yeraltı suyu seviyesine, kesme mukavemeti parametrelerine ve zeminin suya doymun birim hacim ağırlığına bağlıdır. Anagnostou ve Kovari (1996), boyut analizi kullanarak ve denge ve yenilme

denklemlerinin doğrusallığını dikkate alarak, sınır denge durumu için aşağıdaki genel eşitliği önermiştir;

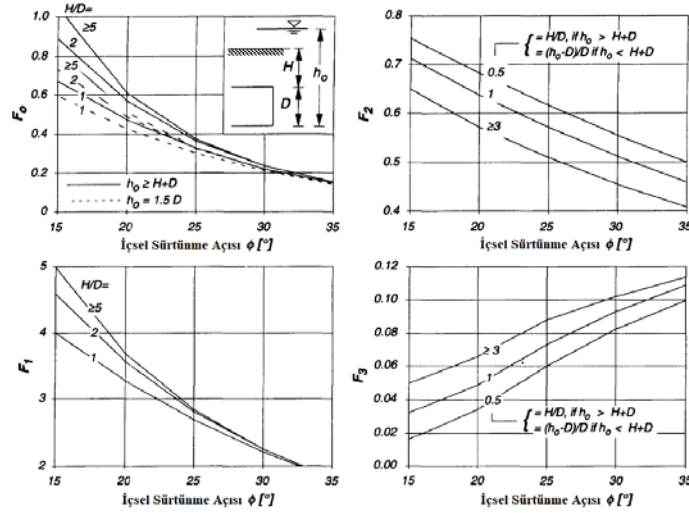
$$s' = F_0 \cdot \gamma' \cdot D - F_1 \cdot c + F_2 \gamma' \Delta h - F_3 \cdot c \cdot \Delta h / D \quad (3.7)$$

Burada;

- s' , sınır dengesinde bulunan efektif destek basıncı
- D , tünel çapı
- H , örtü tabakası derinliği
- Δh , yeraltı suyu seviyesi
- c , kohezyon
- F_0, F_1, F_2 ve F_3 , formasyonun içsel sürtünme açısına bağlı parametreler
- γ' , zeminin suya doygun birim hacim ağırlığı

olarak belirtilir.

F_0, F_1, F_2 ve F_3 boyutsuz kat sayılarının kestirimi için kullanılan nomogramlar şekil 3.5'te verilmiştir (Anagnostou ve Kovari,1996).



Şekil 3. 5 F_0, F_1, F_2 ve F_3 boyutsuz kat sayılarının kestirimi için kullanılan nomogramlar (Anagnostou ve Kovari,1996).

BÖLÜM DÖRT

ÇALIŞMA SAHASI BİLGİLERİ

4.1. Çalışma Alanının Coğrafi Konumu

Çalışma alanı İzmir İli'nin 10 km batısında yer alır. Çalışma alanı D-B yönlü uzanan bir alüvyonel düzlük üzerinde yer almaktadır. Alanın güneyi yüksek kesimlerle sınırlandırılmış olup kuzeyi ise Ege Denizi oluşturmaktadır. Çalışma alanının yer bulduru haritası Şekil 4.1'de sunulmuştur.



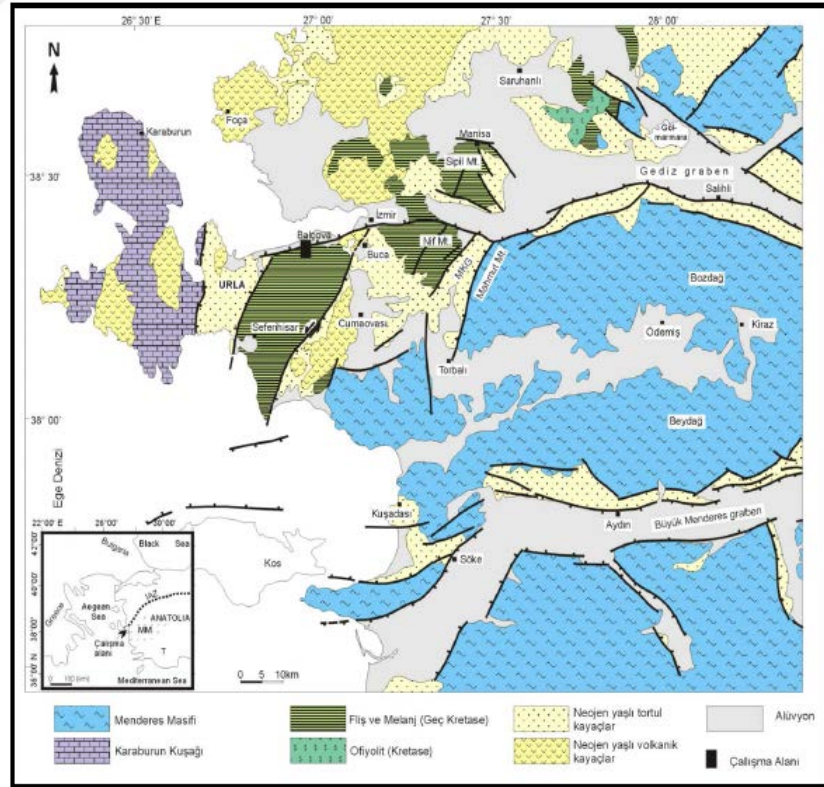
Şekil 4. 1 Çalışma alanının yer bulduru haritası

4.2. Çalışma Alanının Jeolojisi

Anadolu'nun batı kesmi tektonik kuşaklar açısından incelendiğinde, Şekil 4.2'de de görüldüğü üzere batı kesminde Karaburun Kuşağı, doğuda Menderes Masifi ismi ile bilinen metamorfik kayaçlar ve ortada ise İzmir-Ankara Zonu olduğu göze çarpar (Erdoğan, 1990). Metamorfik kayaçlardan oluşan Menderes Masifi'nin alt kısmında gnays ve mikaşistler, üst kısmında ise kalın bir karbonat yapısı vardır (Boray vd., 1973; Çağlayan vd., 1980; Konak vd., 1987). Menderes masifinin batı kısmında ofiyolit, mafik volkanit ve filiş türü kayaçlar bulunur.

İzmir-Ankara Zonu'nun batı tarafında Karaburun Kuşağı konumlanmıştır. Bu kuşağın en altında alt-orta karbonifer kireçtaşları vardır ve üzerinde Alt Triyas'dan Alt Kretase'ye kadar devamlılığı bulunan bir yığın bulunur (Birnkmann vd., 1972; Erdoğan vd., 1990; akt. Erdoğan 1990).

Bir çok araştırmacı İzmir-Ankara Zonu'nun Menderes Masifi üzerinde düşük açılı bindirme fayları boyunca itilmiş olduğunu belirtmiştir (Dürr, 1975; Dürr vd., 1978; Channel vd., 1979; Şengör ve Yılmaz, 1981; Akdeniz vd., 1982; Akkök, 1983).



Şekil 4. 2 Çalışma alanı ve çevresinin basitleştirilmiş jeoloji haritası (Ramazanoğlu, 2008)

Çalışma alanı ve çevresinde jeolojik çalışmalar yapılmış ve alanın genel jeolojisine ek olarak depremsellik analizleri de değerlendirilmiştir (Sözbilir vd., 2003; Ramazanoğlu, 2008). Yapılan çalışmalara göre, alanın güneyini Üst Kretase- Paleosen yaşlı Bornova Karmaşığı yayılım sunduğu ve birim üzerine açısız uyumsuzlukla Kuvaterner yaşlı birimler pekleşmemiş karasal çökeller ve bunlarla yanal-düşey yönde girik olan denizel çökellerden yapıları olduğu ortaya konulmuştur. Çalışma alanını yaklaşık D-B doğrultusunda ikiye bölen İzmir Fayının, Bornova Karmaşığı ile Kuvaterner yaşlı çökeller arasındaki yapısal dokanağı oluşturduğunu ve İzmir Fayının kuzey bloğu düşen, güney bloğu yükselen, bir normal fay olduğunu belirtmektedir.

Sözbilir vd. (2003) bölgenin kapsamlı depremselliğini çalışmıştır. Bu kapsamda, İzmir Fayı, Batı Anadolu genişleme bölgesinin batı ucunda yer alan İzmir Körfezi'ni güneyden sınırladığından bahsetmektedir. İzmir Fayı yaklaşık 40km uzunlukta, 500m genişlikte, baskın olarak D-B uzanımlı, az miktarda doğrultu atım bileşeni olan normal bir faydır. Balçova jeotermal sistemi bu fay zonu üzerinde yer aldığı belirtilmektedir. Fay zonu içerisinde yer alan en güneydeki segment, ana fayı oluşturur. Bu ana fayın önündeki düşen blokta, yanal yönde devamsız antitetik ve sentetik faylar ortaya konulmuştur. Fayın yükselen bloğunda Üst Kretase-Paleosen yaşlı Bornova Karmaşığı, düşen bloğunda ise Kuvaterner yaşlı alüvyonel, flüviyal ve denizel girdilerin gözlendiği çökeller ile Bornova Karmaşığı'na ait kumtaşı-şeyl yüzlekleri gözlenmiştir. Bornova Karmaşığı'nın, fayın tavan bloğunda yüzeylenmesi İzmir Fayı'nın tavan bloğundaki antitetik ve sentetik faylardan kaynaklandığı belirtilmektedir. Fayın yükselen bloğunda, KD-GB ve KB-GD gidişli faylar gözlenmiştir. Bu fay takımlarından KD doğrultulu olanlar, yüksek eğimlere ve düşük rake açılara sahiptir. KB uzanımlı hatlar ise, 20-300 lik rake açıları ile verrev atımlı fay karakterindedir. Taban bloğunda kalan yapısal süreksizliklerin hepsi İzmir Fayı tarafından kesilir. Çalışma alanında gözlenen jeomorfolojik indisler; dağ önü çizgisellikleri, alüvyal yelpazeler, ütü altı yapıları ve karakteristik drenaj ağları olduğu belirtilmiştir. İzmir ve çevresi için diri fayların haritası Şekil 4.2'de sunulmuştur (Uzel vd., 2013). Şekilde görüleceği üzere Balçova Narlıdere güney yükselti boyunca İzmir Fayının uzanımı yer almaktadır.

4.2.1. Bornova Karmaşığı

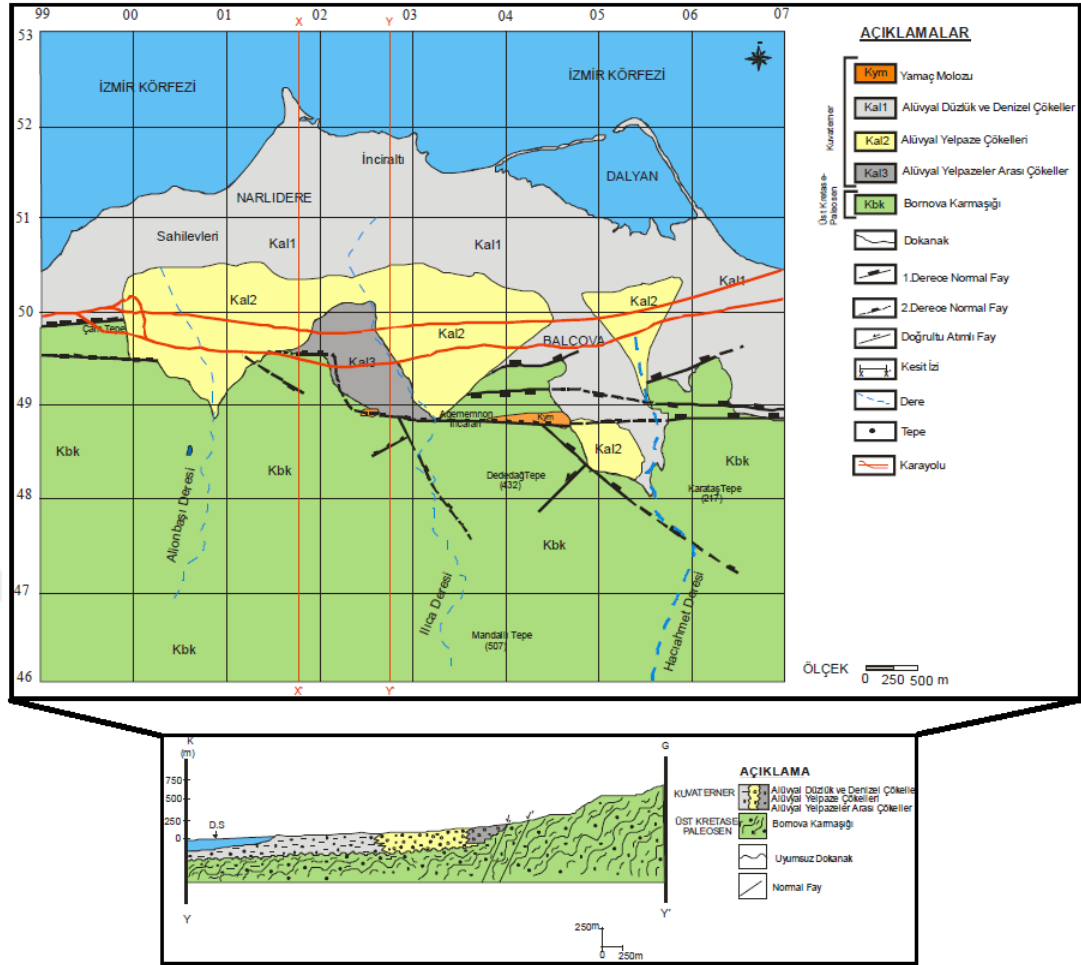
Bornova karmaşığı aşırı deforme olmuş kumtaşı-şeyl matriksten oluşmuş filiş fasiyesinde kayaçlar ve bu matriks içinde olistolit konumlu boyları 20 km'den fazla Karaburun kuşağına ait kireçtaşı bloklarından oluşmuştur (Erdoğan 1990). Bornova karmaşığının alt dokanağı, Paleozoyik yaşı birimler ile bindirme faylıdır. Bu yükselti D-B yönlü İzmir Fayı ile kesilerek kuzey bölümü normal fay ile graben alanını oluşturmuştur. Birim içerisinde serpantin ve diyabazlar lokal olarak yer almakta ve alanın güney kesiminde ise granodiyoritler ile kesilmektedir. Çalışma sahasında gözlenen kaya topluluğu çökelim sonrası gelişen tektonik kuvvetler nedeniyle deformasyona uğramış ve ilksel yapıları bozulmuştur. Bu birim Balçova – Narlıdere hattının güneyinden; Seferihisar, Gümlüdür ve Doğanbey'e kadar yüzlek vermektedir. Bölgede oldukça geniş bir alan kaplayan birim, baskın olarak kumtaşı,şeyl, çamurtaşları litolojisi ve kilttaşlarından oluşmaktadır. Birim litolojik özelliklerine bakıldığında, taze yüzey rengi kahverengimsi gri olan kumtaşlarının ayrışmalar sonucunda yüzeylerinde belirgin renk değişimleri gözlenir.

4.2.2. Neojen Volkano-Sedimanter Birimler

Çalışma alanının doğu kesimlerinde yer alan Bornova Karmaşığı Miyosen – Pliyosen yaşı volkanosedimanter birimler tarafından açısız uyumsuzlukla örtülür. Bu birimler tabanda baskın olarak çakıltaşlarından oluşan birim yanal ve düşey yönde çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşı ardalanmasından oluşan birimler ile geçişlidir. Birimler üst kesimlere doğru volkanoklastik çakıltaşı ve kumtaşlarından oluşan birimler ağırlıkla gözlenir. Volkanik birimler ise ağırlıkla Karşıyaka kesiminde gözlenir ve andezit ve aglomeralardan oluşmuştur. Andezitler koyu grimsi kırmızı renklidir. Genellikle dayanımlı masif yapı sunmasına rağmen akma yapıları ve bunlara dik olarak gelişen soğuma çatlakları gözlenmektedir. Neojen birimler ağırlıkla Konak ve doğu kesimlerde kendini gösterir iken, Balçova bölümünde Neojen birimler gözlenmez.

4.2.3. Kuvartöner Alüvyonel Çökeller

Kuvaterner çökeller, alanın kuzeyini oluşturan grabenlerle ilgili normal fayların çöken tavan blokları boyunca gözlenmektedir. Birimin kalınlığı alanın kuzey kesimine doğru 150 m'ye ulaşmaktadır. Kuvaterner yaşlı çökellerin alt dokanağı Üst Kretase-Paleosen yaşlı Bornova Karmaşığı ile aşısai uyumsuzdur. Çalışma alanında gözlenen Kuvaterner çökeller depolanma özelliklerine göre üç şekilde değerlendirilmiştir. Birincisi, alüvyonel yelpaze olarak adlandırılan ve güneydeki Hacıahmet Deresi, Ilıca Deresi ve Alionbaşı Deresi'nin taşıdığı iri daneli malzemelerden oluşan bölümdür. Bu bölüm çakıl ve kum malzemelerden zeminlerden oluşmaktadır. İkincisi ise alüvyonel düzlük ve denizel çökeltilerdir. Bunlar ise denize yakın kesimlerde genelde ince daneli kum, silt ve killerin egemen olduğu malzemelerdir. Üçüncüsü ise alanın güneyinde Bornova Filiş yükseltilerinin eteğinde gözlenen filiş malzemelerden oluşan yamaç molozlarıdır. Genelde blok, çakıl, kum ve siltlerden oluşan gevşek yapıli malzemelerden oluşmaktadır. Şekil 4.5'te K-G yönlü Kuvaterner çökellerin malzeme dağılımı verilmiştir. (Ramazanoğlu, 2008)



Şekil 4. 5 K-G yönlü Kuvaterner çökellerin malzeme dağılımı (Ramazanoğlu, 2008)

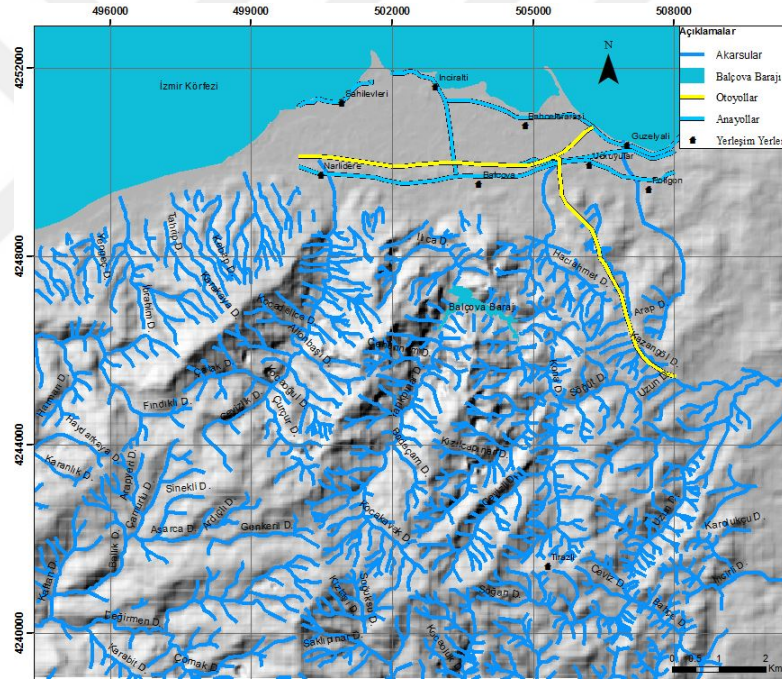
4.3. Çalışma Alanının Hidrojeolojisi

4.3.1 İklim

Çalışma alanı tipik Akdeniz iklimi altındadır. Bu bağlamda yazları sıcak ve nemi, kışları ise yağışlı ve ılık geçmektedir. Doğu-batı yönünde uzanan dağların deniz etkisini kestiği yerlerde, yer yer Akdeniz ve karasal iklim arasında geçişler gözlenmektedir. 1971-1995 yılları arası meteorolojik verilere göre, yöre yağışın ortalama yüksekliği 681,8 mm/yıl'dır. En fazla yağış düşen aylar; Aralık 152.6 mm, Ocak 134 mm ve Şubat 97.2 mm, en az yağış düşen aylar ise; Temmuz 2.1 mm ve Ağustos 2.4 mm aylarıdır. Genel olarak Ekim ayında başlayan yağışlı dönem, Mayıs ayında başlayarak Eylül ayı sonuna kadar süren bir kurak döneme geçmektedir. Buna göre, yıllık yağışın % 92 si yağışlı dönemde Ekim-Nisan, %8'i ise kurak dönemde Mayıs-Eylül aylarında gerçekleşmektedir.

4.3.2. Akarsular

Çalışma sahasında güneyden kuzeye doğru genelde kuru dere niteliğinde olan ancak aşırı yağışlarda akar durumdaki Hacıahmet Deresi, Ilıca Deresi ve Alionbaşı dereleri mevcuttur. Bu derelerden Ilıca deresi üzerinde Balçova barajı inşa edilmiş ve Balçova bölgesine içme suyu temin etmektedir. 32.8 km²'lik drenaj alanına sahip olan barajın 12 hm³'lik bir potansiyeli bulunmaktadır. Çalışma alanındaki drenaj ağı haritası şekil 4.6'da sunulmuştur. Çalışmanın yapılacağı Fahrettin Altay-Narlıdere hattı üzerinde yer alan Ilıca deresi yatağı betonla kaplanmıştır. Bu dere yatakları boyunca geçirimli ve iri malzemelerin baskın olacağı dikkate alınmalıdır.



Şekil 4. 6 Çalışma alanı drenaj ağı haritası

4.3.3. Kuyular

Fahrettin Altay-Narlıdere hattı üzerinde birçok zemin etüd sondajları yapılmıştır. Bu sondajlardan zemin sınıflaması, zemin dayanımı ve alüvyonel birimlerin kalınlıklarına yönelik araştırmalar yapılmasının yanısıra açılan sondajlar yeraltı suyu seviye izleme noktası olarak kullanılmakta olup dönemsel ölçümler alınmaktadır.

Açılan kuyular karot alındıktan sonra içerisine 50 mm'lik PVC boru indirilmiş ve seviyeler bu boru içerisinden ölçülmektedir. Şekil 4.7'de gözlem kuyularının durumu verilmiştir.



Şekil 4. 7 Çalışma alanındaki gözlem kuyularının durumu

4.3.4. Barajlar ve Göller

Çalışma sahasının güneyinde içme suyu amaçlı kullanılan Balçova Barajı yer almaktadır. Balçova barajı dışında sahada herhangi bir doğal göl ya da başka bir baraj bulunmamaktadır.

4.3.5 Birimlerin Hidrojeolojik Karakterizasyonu

4.3.5.1. Bornova Karmaşığı

Alanın güney kesimlerinde gözlenen birim ağırlıklı olarak geçirimsiz özellik sunan filiş fasiyesindeki birimlerden oluşmaktadır. Geçirimsiz özelliği nedeni ile yeraltı suyu sağlama potansiyeli açısından oldukça elverişsizdir. Lokal ölçekte kumtaşı tabakalarının egemen olduğu alanlarda düşük debili yeraltı suyu sağlanabilmektedir. İzmir ve çevresinde birim içerisindeki alloktan kireçtaşlarından önemli oranda yeraltı suyu sağlanmaktadır (Şimşek vd., 2008). Çalışma alanı ve çevresini oluşturan Balçova yöresinde ise alloktan kireçtaşları gözlenmemektedir. Buna karşılık, Bornova

Karmaşığı Balçova kaplıcaları olarak bilinen sahada jeotermal sistemin rezervuar kayasını oluşturmaktadır. Birim içerisinde Agememnon ana fayı ve bu faya koşut tali fayların oluşturduğu geçirimli zon boyunca hareket eden sıcak su sistemine açılan ve derinliği 1000 m'ye ulaşan sıcak su sondajları ile üretim yapılmaktadır. Bölgede konut ısıtmacılığında kullanılan sıcak sular daha sonra re-enjeksiyon kuyuları ile tekrar rezervuara basılmaktadır. Balçova jeotermal sahasında yapılan çalışmalarda, alüvyon tabanında sıcaklığı 50 derecenin üzerinde sıcak sulara rastlanmış ve sıcak suların soğu sular ile bir karışım mekanizmasına sahip olduğu belirtilmiştir (Aksoy vd., 2009).

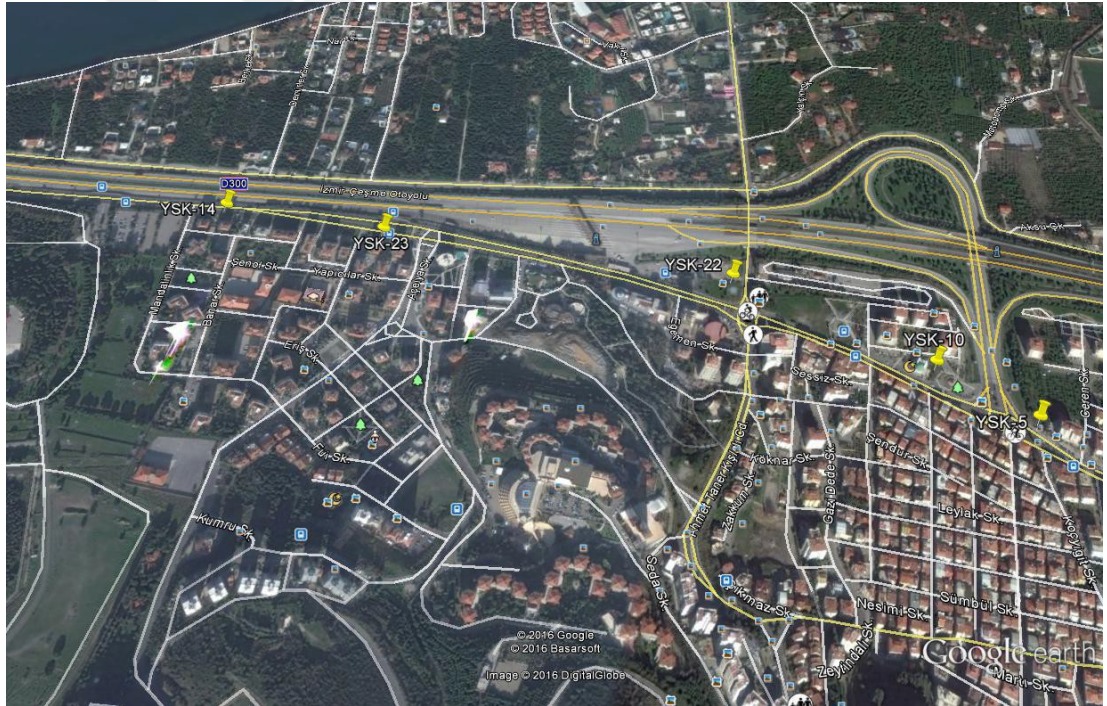
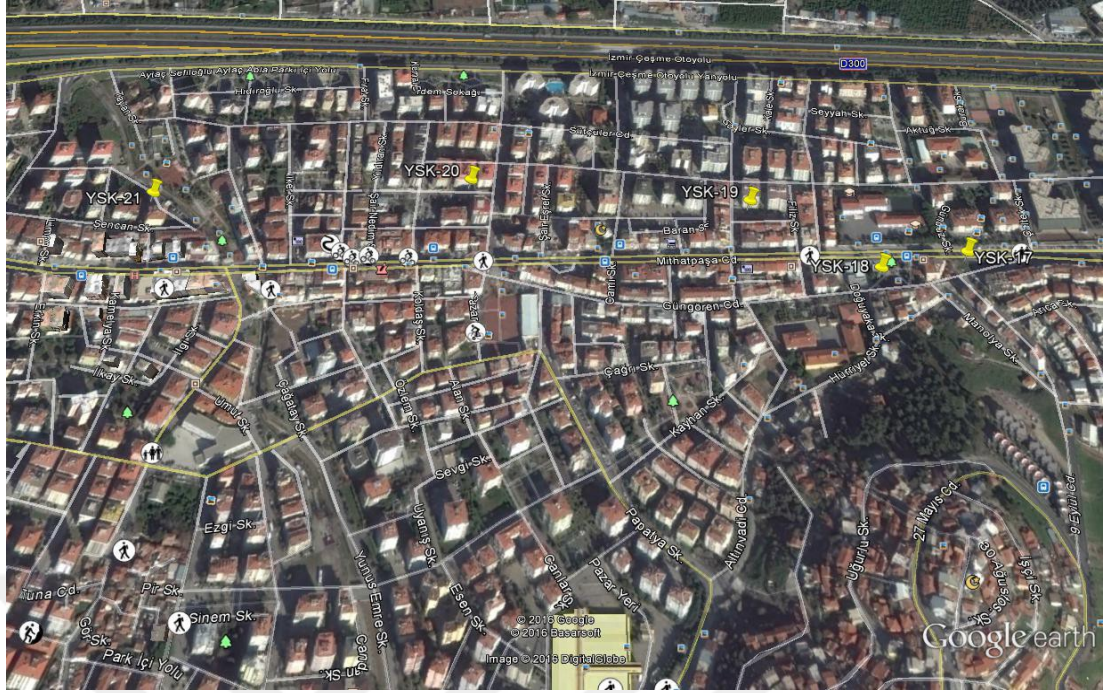
4.3.5.2. Kuvartenel Alüvyonel Birimler

Alüvyonel birimler çalışma sahasında serbest akifer özelliği taşıyan en önemli yeraltısuyu bulunduran birimi oluşturur. Ağırlıkla akıl, kum ve yer yer bloklı malzemelerden oluşan birim geçirimli olması nedeni ile bölgede ağırlıkla kullanma ve alanın kuzeyine doğru ise sulama amaçlı yeraltısuyu sağlamaktadır. Kalınlığı 50 ile 150 m arasında değişen akiferin kalınlığı kuzeye doğru artmakta ve malzeme özelliği ise ince taneli egemen olmaktadır.

4.4. Çalışma Alanı Güzergahı ve Jeoteknik zellikler

Çalışma güzergahı, Fahrettin Altay-Narlıdere Kaymakamlık arası güzergahındaki TBM yöntemi ile yapılacak olan tünel projesi güzergahıdır. Çalışma sahasında 3 adet temel sondaj makinesi ile temel sondaj çalışmaları yapılmıştır. Bu alışmalar sonucunda, jeolojik birimlerin kalınlıkları, litolojik özellikleri, jeomekanik özellikleri hakkında bilgi edinilmiştir. 1 adet 55.00 metre, 12 adet 50.00 metre, 5 adet 45m ve 5 adet 40.00 metre olmak üzere toplam 23 adet,1080 metre temel sondaj yapılmıştır. Sahada yapılan sondaj çalışmalarından yararlanarak yanal ve dūřey litolojik birimdeki değişimler tespit edilmiştir. Yapılan sondajlara ait yerbulduru haritası şekil 4.8'de verilmiştir.





Şekil 4. 8 Yapılan sondajlara ait yerbulduru haritaları

Yapılan sondajların lokasyonları ve derinlikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4. 1 Yapılan sondajların lokasyonları ve derinlikleri

Sondaj Kuyuları	Yeri (Km)	X	Y	Yeraltı Su Durumu	Sondaj Derinliği (m)
YSK-1	0+50	4251557,918	505499,8763	10,20	40
YSK-2	0+250	4251498,0596	505303,8537	7,30	40
YSK-3	0+490	4251454,2409	505070,2446	7,60	40
YSK-4	0+590	4251362,6512	504994,0849	8,50	45
YSK-5	5+480	4251394,6302	500155,6548	14,00	45
YSK-6	1+090	4251289,1955	504493,7193	8,50	50
YSK-7	1+230	4251411,1823	504361,3459	8,20	50
YSK-8	1+450	4251319,9815	504133,9929	12,00	45
YSK-9	1+590	4251304,3038	503992,4241	6,80	50
YSK-10	5+620	4251437,2809	500048,4639	15,00	50
YSK-11	2+090	4251320,696	503489,1835	19,50	50
YSK-12	2+360	4251242,4518	503233,4742	19,80	50
YSK-13	3+160	4251112,1241	502400,0872	21,00	50
YSK-14	6+750	4251452,5538	498927,8466	20,00	45
YSK-15	3+650	4251062,2798	501966,8079	10,00	55
YSK-16	3+870	4251088,3024	501751,9608	6,00	50
YSK-17	4+210	4251200,8325	501430,1836	9,00	50
YSK-18	4+350	4251200,7155	501296,6428	19,00	50
YSK-19	4+750	4251266,8132	501165,8097	20,00	40
YSK-20	4+870	4251312,5852	500767,2099	20,00	40
YSK-21	5+160	4251378,5247	500485,6147	16,00	45
YSK-22	5+950	4251500,1775	499717,6071	16,00	50
YSK-23	6+450	4251779,6812	499299,3057	15,00	50

Çalışma alanında faaliyet gösteren firmadan edinilen bilgilere göre, alanda yapılan sondaj çalışmalarında karasal kökenli alüvyonel çökeller ve Kretase yaşlı Kumtaşı şeyl ardalanmalı Filiş görülmüştür. Genel olarak sarımsı kahverenkli olarak gözlenen killi, kumlu, siltli kumtaşı çakıllı, Çakıl Bloktan oluşan Alüvyon birimi 1,00-50,00 metreler arasında değişen seviyelerde gözlenmektedir. Altta Krerase yaşlı, üst seviyeleri

sarımsı kahve-yeşilimsi renkli, alt seviyelere doğru grimsi siyah renkli, kırıklı, parçalı, kuvars damarlı, grafitli şeyler kırıklı yapraklı laminalı, Kumtaşı – Şeyl ardalanması şeklinde gözlenmektedir. Sondajlar sırasında kaya birimlerinden alınan karot örnekler üzerinde mukavemet özelliklerinin belirlenmesi amacıyla laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. İnceleme alanındaki mevcut kumtaşı biriminin tek eksenli basınç değerleri $q_u = 35,74-697,81 \text{ kg/cm}^2$ aralığında belirlenmiş olup, çok düşük – düşük - orta dayanımlı sınıfta yer aldığı gözlenmiştir (Tablo 4.2). Aynı biriminin nokta yük değeri $Is(50) = 12,83-38,12 \text{ kg/cm}^2$ aralığında belirlenmiş ve çok düşük - düşük - orta dayanımlı sınıfta yer aldığı gözlenmiştir (Tablo 4.3). Mevcut şeyl biriminin nokta yük değeri $Is(50) = 0,17-11,39 \text{ kg/cm}^2$ aralığında belirlenmiş ve çok düşük-düşük dayanımlı sınıfta yer aldığı gözlenmiştir. (Tablo 4.3).

Tablo 4. 2 Tek eksenli basınç dayanımına göre kayaçların sınıflandırılması (Deere ve Miller, 1966)

Kayaç Sınıfı	Tek eksenli basınç dayanımı (kg/cm^2)
Çok yüksek dayanımlı	>2000
Yüksek dayanımlı	2000-1000
Orta dayanımlı	1000-500
Düşük dayanımlı	500-250
Çok düşük dayanımlı	<250

Tablo 4. 3 Kayaçların nokta yük direncine göre sınıflandırılması (Bieniawski, 1975)

Kayaç Sınıfı	Nokta yük dayanımı (kg/cm^2)
Çok yüksek dayanımlı	>80
Yüksek dayanımlı	80-40
Orta dayanımlı	40-20
Düşük dayanımlı	20-10
Çok düşük dayanımlı	<10

Kumtaşı-şeyl ardalanması biriminin karot yüzdelere (CR) ve kaya kalitelerine (RQD) bakıldığı zaman; karot yüzdesi $CR = \%10-100$ aralığında ve kaya kalitesi $RQD = \%0-80$ aralığında değişmekte olup çok zayıf - zayıf - orta nitelikli kaya sınıfında yer almaktadır (Tablo 4.4).

Tablo 4. 4 RQD Değerlerine Göre Kaya Kalitesi Sınıflaması (Deere 1964).

RQD (%)	Kaya Kalitesi
< 25	Çok zayıf
25 < 50	Zayıf
50 < 75	Orta
72 < 90	İyi
90 < 100	Çok iyi

4.4.1. RMR (Rock Mass Rating) Kaya Sınıflama Sistemi

İnceleme alanında yer alan birimlerin mukavemet özellikleri, tek eksenli sıkışma dayanımı, RQD değerleri, çatlak aralığı – durumu ve yer altı suyu durumuna bakılarak elde edilen RMR parametreleri belirlenmiştir. Bieniawski (1989)' nin kaya kütle puanlama sistemi Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4. 5 RMR puanlama sistemi (Bieniawski, 1989)

1*	Kayaç Mlz Dayanımı	Nokta Yük İnd.	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Düşük Aralıklar İçin Tek Eksenli Dayanımı (MPa)		
		Tek Eks. Sıkışma Dayanımı	>250MPa	100-250MPa	50-100MPa	25-50MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	>1 MPa
	Puan		15	12	7	4	2	1	0
2*	Kayaç Kalite Göstergesi RQD		%90-%100	%75-%100	%50-%75	%25-%50	<%25		
	Puan		20	17	13	8	3		
3*	Süreksizlik Aralığı		> 2 m	0,6 - 2 m	200 - 600 m	60 - 200	< 60 mm		
	Puan		20	15	10	8	5		
4*	Süreksizliklerin Durumu		Çok kaba yüzeyler Sürekli değil ayrılma yok Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma<1m m Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma<1m m Yumuşak eklem yüzeyleri	Sürtünme izli yüzeyler veya fay dolgusu <5mmveya 1-5mm açık eklem, sürekli eklem	Yumuşak fay dolgusu >5mm kalınlıkta veya açık eklem >5mm devamlı süreksizlikler		
	Puan		30	25	20	10	0		
5*	Yer altı suyu	Tünelin 10m'lik kısmından gelen su		Yok	10lt/dk	25lt/dk	25-125lt/dk	>125lt/dk	
		Oran	Eklemdeki su basıncı	0	0,0 – 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5	
			Ana asal gerilme						
	Genel Koşullar		Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su Akışı		
Puan			15	10	7	4	0		

Tablo 4. 6 Kaya sınıfları ve puanlamaları (Bieniawski, 1989)

Sınıf No	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Puan	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Tablo 4.5'te verilen bilgilere dayanarak, sondajlardan alınan numuneler ışığında oluşturulan RMR parametreleri Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4. 7 Çalışma alanındaki sondajlardan alınan örnekler üzerine uygulanan RMR tablosu

Sondaj No	Manevra derinliği	RMR Puan(Tablo 4.5)					Toplam Puan	RMR Kaya Sınıflaması
		1	2	3	4	5		
YSK-1	14,50-15,00	4	3	5	10	7	29	Zayıf Kaya
YSK-1	16,00-16,50	4	3	5	10	7	29	Zayıf Kaya
YSK-1	17,50-18,00	7	3	8	20	7	45	Orta Kaya
YSK-1	44,50-45,00	4	13	5	20	7	49	Orta Kaya
YSK-2	28,50-30,00	7	3	5	20	7	42	Orta Kaya
YSK-2	36,00-39,00	4	3	5	10	7	29	Zayıf Kaya
YSK-2	39,00-40,00	7	3	5	10	7	32	Zayıf Kaya
YSK-3	30,00-33,00	4	3	5	10	7	29	Zayıf Kaya
YSK-3	39,00-40,00	12	3	5	10	7	37	Zayıf Kaya
YSK-4	27,00-30,00	4	3	5	10	7	29	Zayıf Kaya
YSK-4	32,00-33,00	4	3	5	10	7	29	Zayıf Kaya
YSK-6	35,00-36,00	4	3	5	10	7	29	Zayıf Kaya
YSK-6	39,00-40,00	7	8	5	10	7	37	Zayıf Kaya
YSK-6	40,00-41,00	4	20	5	10	7	46	Orta Kaya
YSK-6	42,00-45,00	2	13	10	20	7	52	Orta Kaya
YSK-6	45,00-48,00	12	3	5	10	7	37	Zayıf Kaya
YSK-6	48,00-50,00	4	3	5	10	7	26	Zayıf Kaya
YSK-7	28,00-30,00	7	3	8	10	7	35	Zayıf Kaya
YSK-7	30,33-50,00	4	3	8	10	7	32	Zayıf Kaya
YSK-8	25,50-45,00	4	3	8	10	7	32	Zayıf Kaya
YSK-9	39,00-42,00	4	3	15	20	7	49	Orta Kaya
YSK-9	42,00-45,00	4	3	8	10	7	32	Zayıf Kaya
YSK-10	33,00-36,00	2	3	8	10	7	30	Zayıf Kaya
YSK-10	36,00-50,00	2	3	8	10	7	30	Zayıf Kaya
YSK-12	27,00-30,00	2	3	8	10	7	30	Zayıf Kaya

Tablo 4.7 devamı

YSK-12	48,00-50,00	2	3	8	10	7	30	Zayıf Kaya
YSK-14	39,00-42,00	2	3	8	10	7	30	Zayıf Kaya
YSK-14	42,00-45,00	2	3	8	10	7	30	Zayıf Kaya
YSK-15	6,50-21,00	2	3	10	10	7	32	Zayıf Kaya
YSK-15	21,00-25,50	2	8	10	10	7	37	Zayıf Kaya
YSK-15	28,50-31,50	3	8	15	20	7	53	Orta Kaya
YSK-15	31,50-45,00	2	3	8	10	7	30	Zayıf Kaya
YSK-15	45,00-55,00	2	3	10	20	7	42	Orta Kaya
YSK-16	0,00-10,00	4	3	8	10	7	32	Zayıf Kaya
YSK-16	10,00-20,00	4	3	8	10	7	32	Zayıf Kaya
YSK-16	20,00-30,00	4	3	8	10	7	32	Zayıf Kaya
YSK-16	30,00-40,00	4	3	10	20	7	44	Orta Kaya
YSK-16	40,00-50,00	4	3	8	10	7	32	Zayıf Kaya
YSK-17	12,00-20,00	2	3	8	5	7	25	Zayıf Kaya
YSK-17	20,00-24,00	4	13	10	20	7	54	Orta Kaya
YSK-17	24,00-28,50	4	3	10	20	7	34	Zayıf Kaya
YSK-17	28,50-39,00	4	3	8	10	7	32	Zayıf Kaya
YSK-17	39,00-50,00	4	3	10	10	7	34	Zayıf Kaya
YSK-18	24,00-30,00	4	3	8	10	7	32	Zayıf Kaya
YSK-18	30,00-50,00	4	3	10	10	7	34	Zayıf Kaya
YSK-19	15,00-24,00	4	3	10	20	7	44	Orta Kaya
YSK-19	24,00-40,00	4	3	10	10	7	34	Zayıf Kaya
YSK-20	12,00-30,00	4	3	10	20	7	44	Orta Kaya
YSK-20	30,00-39,00	4	3	10	10	7	34	Zayıf Kaya
YSK-20	39,00-40,00	4	3	10	20	7	44	Orta Kaya
YSK-22	21,00-27,00	1	3	8	10	7	29	Zayıf Kaya
YSK-22	27,00-30,00	4	3	8	10	7	32	Zayıf Kaya
YSK-22	30,00-39,00	4	3	10	10	7	34	Zayıf Kaya
YSK-22	39,00-50,00	4	3	8	10	7	32	Zayıf Kaya
YSK-23	28,00-50,00	4	3	8	10	7	32	Zayıf Kaya

Tek eksenli basınç, nokta yükü deneyi değerleri, RQD ortalama değerleri, yeraltı su seviyesi, kayaç çatlak durumu ve aralığı göz önünde bulundurularak Bieniawski'nin ortaya koymuş olduğu geomekanik sınıflama tablosu ile RMR değeri 29-54 olarak (III-IV) hesaplanmış ve kumtaşı-şeyl ardalı biriminin zayıf-orta nitelikli, parçalı, çatlaklı kayaç olduğu kabul edilmiştir (Tablo 4.6).

4.4.2. GSI (Geological Strength Index) Sınıflama Sistemi

Çalışma alanındaki sondajlardaki numuneler ışığında GSI parametreleri belirlenmiştir. GSI parametreleri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır (Bieniawski, 1976).

$$GSI = 1,5JCond_{89} + RQD/2 \quad (4.1)$$

JCond₈₉ değerleri Tablo 4.8’den alınmıştır (Bieniawski, 1976).

Tablo 4. 8 JCond₈₉ değerleri (Bieniawski, 1976)

Süreksizliklerin Durumu	Çok kaba yüzeyler Sürekli değil ayrılma yok Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma<1mm Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma<1mm Yumuşak eklem yüzeyleri	Sürtünme izli yüzeyler veya fay dolgusu <5mm veya 1-5mm açık eklemler, sürekli eklemler	Yumuşak fay dolgusu >5mm kalınlıkta veya açık eklemler >5mm devamlı süreksizlikler
Puan	30	25	20	10	0

Tablo 4.9’da hesaplanan GSI değerleri verilmiştir.

Tablo 4. 9 Çalışma alanındaki sondajlardan alınan örnekler üzerine uygulanan GSI tablosu

Sonda j No	Manevra derinliği	JCond ₈₉	RQD/2	Toplam Puan	GSI Kaya Tanımlaması
YSK-1	12,00-15,00	10	3/2	22,5	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-1	15,00-18,00	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ
YSK-1	18,00-42,00	20	0/2	30	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-1	42,00-45,00	20	25/2	42,5	ÇOK BLOKLU
YSK-2	27,00-33,00	20	0/2	30	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-2	33,00-36,00	10	10/2	20	PARÇALANMIŞ
YSK-2	36,00-39,00	10	7/2	18,5	PARÇALANMIŞ
YSK-2	39,00-40,00	10	30/2	30	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-3	30,00-33,00	10	4/2	17	PARÇALANMIŞ

Tablo 4.9 devamı

YSK-3	33,00-36,00	10	6/2	18	PARÇALANMIŞ
YSK-3	36,00-40,00	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ
YSK-4	27,00-30,00	10	3/2	16,5	PARÇALANMIŞ
YSK-4	30,00-33,00	10	38/2	34	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-4	33,00-36,00	10	15/2	22,5	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-4	36,00-40,00	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ
YSK-6	33,00-36,00	10	3/2	16,5	PARÇALANMIŞ
YSK-6	36,00-39,00	10	15/2	22,5	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-6	39,00-42,00	10	39/2	34,5	BLOKLU / ÖRSELENMİŞ
YSK-6	42,00-45,00	20	60/2	60	ÇOK BLOKLU
YSK-6	45,00-50,00	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ
YSK-7	28,00-30,00	10	13/2	21,5	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-7	30,00-33,00	10	11/2	20,5	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-7	33,00-42,00	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ
YSK-7	42,00-45,00	10	10/2	20	PARÇALANMIŞ
YSK-8	25,50-45,00	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ
YSK-9	39,00-42,00	20	23/2	41,5	ÇOK BLOKLU
YSK-9	42,00-45,00	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ
YSK-10	30,00-50,00	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ
YSK-12	30,00-50,00	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ
YSK-14	21,00-45,00	10	3/2	16,5	PARÇALANMIŞ
YSK-15	6,50-13,50	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ
YSK-15	13,50-6,50	10	10/2	20	PARÇALANMIŞ
YSK-15	18,00-19,50	10	12/2	21	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-15	19,5-21,00	10	20/10	25	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-15	21,00-22,50	10	24/2	27	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-15	22,50-24,00	10	46/2	38	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-15	24,00-25,50	10	26/2	28	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-15	30,00-31,50	10	28/2	29	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-16	0,00-3,00	10	7/2	18,5	PARÇALANMIŞ
YSK-16	3,00-6,00	10	13/2	21,5	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-16	6,00-9,00	10	10/2	20	PARÇALANMIŞ
YSK-16	12,00-15,00	10	5/2	17,5	PARÇALANMIŞ
YSK-16	15,00-42,00	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ
YSK-16	42,00-45,00	20	13/2	21,5	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-16	48,00-50,00	10	8/2	19	PARÇALANMIŞ
YSK-17	12,00-19,50	10	0/2	7,5	PARÇALANMIŞ

Tablo 4.9 devamı

YSK-17	19,50-21,00	20	8/2	34	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-17	21,00-22,50	20	54/2	57	ÇOK BLOKLU
YSK-17	22,50-24,00	20	80/2	70	BLOKLU
YSK-17	24,00-25,50	20	20/2	40	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-17	25,50-27,00	20	33/2	46,5	ÇOK BLOKLU
YSK-17	27,00-30,00	10	7/2	18,5	PARÇALANMIŞ
YSK-17	30,00-42,00	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ
YSK-17	42,00-50,00	10	15/2	22,5	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-18	21,00-24,00	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ
YSK-18	24,50-27,00	10	33/2	31,5	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-18	48,00-50,00	10	6/2	18	PARÇALANMIŞ
YSK-19	15,00-24,00	20	7/2	33,50	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-19	24,00-40,00	10	0/2	20	PARÇALANMIŞ
YSK-20	12,00-30,00	20	7/2	33,50	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-20	30,00-39,00	10	0/2	20	PARÇALANMIŞ
YSK-20	39,00-40,00	20	7/2	33,50	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-22	21,00-30,00	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ
YSK-22	30,00-33,00	10	13/2	21,5	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ
YSK-22	33,00-36,00	10	3/2	16,5	PARÇALANMIŞ
YSK-22	42,00-50,00	10	5/2	17,5	PARÇALANMIŞ
YSK-23	28,00-50,00	10	0/2	15	PARÇALANMIŞ

Süreksizliklerin durumu (JCond₈₉) ve numunelerin RQD % leri göz önünde bulundurularak Bienawski (1976)'nın ortaya koymuş olduğu sınıflamaya göre GSI değerleri 15 - 57 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.9'da verilen GSI abağına göre genel olarak Parçalanmış – Bloklu /Örselenmiş - Çok Bloklu kaya sınıfını temsil etmektedir.

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

Şekil 4. 9 GSI abağı (Hoek, 1999)

4.5. Sahada Yapılan Çalışmalar

4.5.1. Hidrojeoloji Çalışmaları

Çalışma sahasında güzergâh boyunca açılan sondajlarda alüvyonlarda permeabilite değeri, filiş biriminde ise basınçlı su testi ile geçirgenlik değerleri belirlenmiştir. Bu veriler kullanılarak sahada açılan araştırma kuyularına göre kuyu bazlı ortalama değerleri belirlenmiştir (Tablo 4.11). Tablo 4.10'da araştırma kuyularının veri tabanı verilmiştir. Veriler jeoteknik kuyu loglarında zemin sınıfları ve litolojik değişimlerde ele alınarak her litoloji için ayrıca kuyu bazlı ortalama geçirgenlik değerleri de ayrıca hesaplanmıştır. Kuyu loglarında gözlenen alüvyon biriminin altındaki ayrılmış filiş

birimi olarak adlandırılan tabaka, alüvyon taban dolgusu özelliğinde olduğu ve geçirgenliğinde alüvyon biriminin geçirgenliği ile benzer mertebe olması nedeni ile bu litoloji alüvyon olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 4. 10 Araştırma kuyularının veri tabanı

Sondaj No	X	Y	YAS_derinlik (m)	Alüvyon Kalınlığı (m)	Zayıf Filiş Zonu Tabanı (m)	Zayıf Filiş Zonu Kalınlık (m)	Lugeon Filiş Zon (LU)	Alüvyon Permeabilite Testi (m/s)
YSK_1	505500	4251558	10.2	15	21	6	7.8	1.78E-04
YSK_2	505304	4251498	7.3	20	40	20		
YSK_3	505070	4251454	7.6	30	40	10		
YSK_4	504994	4251363	8.5	22	40	18		
YSK_5	500156	4251395	14	45				
YSK_6	504494	4251289	8.5	33	36	3		
YSK_7	504361	4251411	8.2	25	28	3		
YSK_8	504134	4251320	12	25.5	45	19.5		
YSK_9	503992	4251304	6.8	39	42	3		
YSK_10	500048	4251437	15	28	30	2	7.52	8.24E-04
YSK_11	503489	4251321	19.5	50				
YSK_12	503233	4251242	19.8	30	50	20		
YSK_13	502400	4251112	21	50				
YSK_14	498928	4251453	20	21	45	24		
YSK_15	501967	4251062	10	6.5	55	48.5		
YSK_16	501752	4251088	6.00		50.00	50		
YSK_17	501430	4251201	9.00	12.00	20.00	8		
YSK_18	501297	4251201	19.00	21.00	24.50	3.5		
YSK_19	501166	4251267	20.00	13.50	40.00	26.5		
YSK_20	500767	4251313	20.00	12.00	40.00	28		
YSK_21	499718	4251500	16.00	20.00	27.00	7		
YSK_22	499299	4251780	15.00	28.00	50.00	22		
USK-1	505385	4251542	10.00	18.00	26.00	8		9.16E-04
USK-3	504492	4251288	5.60	30.00	40.00	10	3.52	5.38E-04
USK-4	503945	4251277	19.80	27.00	36.00	9	3.52	5.93E-04
USK-5	503792	4251246	20.90	13.00	45.00	32		3.03E-04
USK-6	503477	4251288	21.40	42.00	48.00	6		5.13E-04

Tablo 4.10 devamı

USK-7	5032 71	42512 42	20.50	29.00	41.00	12		3.61E-04
USK-8	5025 51	42510 82	20.35	27.00	40.00	13		4.65E-04
USK-11	5020 72	42510 60	21.50	18.00	21.00	3	8.44	4.08E-04
USK-12	5016 44	42512 38	7.43	10.00	45.00	35	3.56	5.24E-04
USK-13	5013 12	42512 11	16.40	20.00	45.00	25	2.91	4.69E-04
USK-14	5005 49	42513 65	27.30	45.00				1.14E-03
USK-17	5001 33	42514 55	21.60	45.00				2.81E-04
USK-18	4991 43	42514 76	15.64	21.00	41.00	20		2.64E-04
Min			5.6	6.5	20	2	2.91	1.78E-04
Max			27.3	50	55	50	8.44	1.14E-03
Ort			14.91	26.22	38.38	16.50	5.32	5.18E-04

Tablo 4. 11. Birimlerin derinlik bazı geçirgenlik değerleri

Kuyu No	Litoloji	Zemin Sınıfı	Derinlik		Permeabilite (cm/s) LU	Ortalama (cm/s)	Ortalama (m/s)
			Başlangıç	Bitiş			
USK 1	Alüvyon	Çakıl	5	7	1.70E-04		
	Alüvyon	Çakıl	10	12	1.40E-04		
	Alüvyon	Çakıl	16	18	1.53E-05	9.16E-05	9.16E-07
	Alüvyon		18	26	4.09E-05		
	Filiş		26	33			
USK3	Alüvyon	Çakıl	6	8	5.89E-05		
	Alüvyon		13	15	1.65E-04		
	Alüvyon		18	20	6.01E-04	5.38E-04	5.38E-06
	Alüvyon		24	26	1.34E-03		
	Alüvyon		28	30	5.26E-04		
	Filiş				5.30		
	Filiş				1.73		
USK 4	Alüvyon	Çakıl	8	10	6.59E-04		
	Alüvyon	Çakıl	16	18	3.80E-04		
	Alüvyon	Çakıl	20	22	1.82E-04	5.93E-04	5.93E-06
	Alüvyon	Çakıl	25	27	1.44E-03		
	Alüvyon		32	34	3.03E-04		
	Filiş				3.99		
USK 5	Alüvyon	Çakıl	3	5	3.76E-04		
	Alüvyon	Çakıl	10	12	2.79E-04		
	Alüvyon		16	18	1.79E-04		
	Alüvyon		22	24	9.19E-04		
	Alüvyon		27	29	5.95E-05	3.03E-04	3.03E-06
	Alüvyon		33	35	2.23E-04		
	Alüvyon		39	41	1.89E-04		
	Alüvyon		43	45	1.99E-04		
USK 6	Alüvyon	Çakıl	4	6	1.45E-04		
	Alüvyon	Çakıl	10	12	1.49E-03		
	Alüvyon	Çakıl	14	16	1.17E-03		
	Alüvyon	Çakıl	25	27	9.70E-05	5.13E-04	5.13E-06
	Alüvyon	Çakıl	32	34	6.98E-05		
	Alüvyon	Çakıl	36	38	1.19E-04		
	Alüvyon		45	47	5.02E-04		
USK 7	Alüvyon	Çakıl	4	6	3.80E-04		
	Alüvyon	Çakıl	14	16	2.49E-04		
	Alüvyon	Çakıl	20	22	9.21E-04	3.61E-04	3.61E-06
	Alüvyon		30	32	1.87E-04		
	Alüvyon		36	38	6.81E-05		

Tablo4.11 devamı

USK 8	Alüvyon	Çakıl	6	8	1.43E-04		
	Alüvyon	Çakıl	14	16	3.86E-04		
	Alüvyon	Çakıl	20	22	1.53E-03	4.65E-04	4.65E-06
	Alüvyon	Çakıl	24	26	2.25E-04		
	Alüvyon		30	32	1.70E-04		
	Alüvyon		36	38	3.35E-04		
USK 11	Alüvyon	Çakıl	6	8	2.89E-05		
	Alüvyon	Çakıl	10	12	1.87E-04		
	Alüvyon	Çakıl	14	16	1.15E-03		
	Alüvyon	Çakıl	16	18	2.40E-04	4.08E-04	4.08E-06
	Alüvyon		22	24	4.36E-04		
	Filiş		21	40	7.60		
	Filiş				6.62	7.11	
USK 12	Alüvyon	Çakıl	6	8	8.78E-04		
	Alüvyon	Çakıl	12	14	1.69E-04	5.24E-04	
	Filiş				3.58		
	Filiş				2.73		
	Filiş				2.57	3.11	
	Filiş				3.54		
USK 13	Alüvyon	Çakıl	7	9	2.93E-04		
	Alüvyon	Çakıl	12	14	1.12E-03	4.69E-04	4.69E-06
	Alüvyon	Çakıl	18	20	3.90E-04		
	Alüvyon	Çakıl	22	24	7.49E-05		
	Filiş				2.30		
	Filiş				4.20		
	Filiş				2.12	2.91	
USK 15	Filiş				3.02		
	Alüvyon	Çakıl	6	8	7.07E-04		
	Alüvyon	Çakıl	12	14	5.06E-04		
	Alüvyon	Çakıl	16	18	1.20E-03		
	Alüvyon	Çakıl	20	21	1.99E-03		
	Alüvyon	Çakıl	26	28	1.34E-03	1.14E-03	1.14E-05
	Alüvyon	Çakıl	32	34	1.18E-03		
	Alüvyon	Çakıl	36	38	1.02E-03		
USK 17	Alüvyon	Çakıl	42	44	1.14E-03		
	Alüvyon	Çakıl	6	8	4.38E-04		
	Alüvyon	Çakıl	14	16	5.01E-04		
	Alüvyon	Çakıl	20	22	3.37E-04		
	Alüvyon	Çakıl	24	26	2.42E-04	2.81E-04	2.81E-06
	Alüvyon	Çakıl	30	32	1.92E-04		
	Alüvyon	Çakıl	36	38	2.33E-04		
USK 18	Alüvyon	Çakıl	42	44	2.72E-05		
	Alüvyon	Çakıl	6	8	2.55E-04		
	Alüvyon	Çakıl	12	14	3.52E-04	3.31E-04	
	Alüvyon	Çakıl	18	20	3.85E-04		
	Alüvyon	Çakıl	24	26	2.62E-04		
	Alüvyon	Çakıl	28	30	2.01E-04	2.13E-04	2.13E-06
	Alüvyon	Çakıl	34	36	2.71E-04		
	Alüvyon	Çakıl	38	40	1.19E-04		

Tablo 4. 12 Birimlerin geçirgenlik değerleri

	Filiş (LU)	Alüvyon (cm/s)
Min	1.73	9.16E-05
Max	7.60	1.14E-03
Ortalama	3.91	4.66E-04

Lugeon testi kayalarda yapılan basınçlı su deneyi olup, 10 atmosfer basınç altında 1 dakikada ve 1m deney zonu boyunca litre olarak basılan su miktarı olarak tanımlanır

(Şekercioğlu, 1993). Lugeon değerlendirme tablosu Tablo 4.13'te sunulmuştur (Şekercioğlu 1993). Tablo 4.12'de görüleceği üzere Filiş biriminin geçirgenliğini temsil eden lugeon(LU) değeri 1.73 ile 7.60 arasında değişmekte olup genel ortalaması ise 3.91'dir. Genel ortalamaya göre filiş birimi “Az Geçirimli” bir özelliğe sahiptir. Bölgesel olarak içerdiği meta-kumtaşlarındaki kırıklar ve çatlaklar geçirgenlik değerlerini arttırabilmektedir. USK-11 nolu kuyuda kesilen filiş birimi “Geçirimli” özellik sunmaktadır.

Tablo 4. 13 Lugeon değerlendirme tablosu (Şekercioğlu, 1993)

Lugeon (LU)	Değerlendirme
< 1.0	Geçirimsiz
1.0-5.0	Az Geçirimli
5.0-25.0	Geçirimli
25.0>	Çok Geçirimli

Alüvyonel birimlerde geçirgenlik değerleri basınçsız su deneyi (sabit seviyeli) ile yapılmıştır. Alüvyon birimi içerisinde istatistik elde edilebilecek sayıda geçirgenlik verisi bulunmaktadır. Bu verilere göre alüvyon biriminin geçirgenlik aralıkları 9.16×10^{-5} ile 1.14×10^{-3} cm/s arasında değişmekte olup ortalaması 4.66×10^{-4} cm/s'dir. Bu değerlere göre alüvyon birimi “Geçirimli ve Az Geçirimli” sınıfındadır. Alüvyon birimi içerisindeki kil ve silt oranları yatay ve düşey olarak değişkenlik gösterecek olup, içerdiği iri taneli zeminlerin ağırlığına göre geçirgenlik değerleri değişiklik gösterecektir. Hat üzerinde özellikle alüvyonel yelpazelerin olduğu dere yatakları ve çevresinde geçirimli olacağı dikkate alınmalıdır.

Tablo 4. 14 Permeabilite Değerinin Sınıflaması (Terzaghi vd.,1998).

Permeabilite Katsayısı (cm/s)	Değerlendirme
< 1.0×10^{-6}	Geçirimsiz
1.0×10^{-6} - 1.0×10^{-4}	Az Geçirimli
1.0×10^{-4} - 1.0×10^{-2}	Geçirimli
1.0×10^{-2} >	Çok Geçirimli

Çalışma sahasında açılan kuyularda basınçsız su deneyi (sabit seviyeli) yapılmıştır. Serbest akifer niteliğindeki alüvyonel birimler içerisinde yapılan basınçsız su deneyi zemine belli bir zamanda giden su miktarını ölçme prensibine dayanır. Deney yapmak için boru içerisindeki su seviyesini sabit tutacak şekilde kuyuya su verilir ve kuyu alışı debisi belirlenir. Su verme işlemi bir tanker yardımıyla ve saat ve vana sistemi ile kontrol edilir. Bu deney yöntemi ile belli zaman diliminde kuyuya verilen su debisi ölçülmüş ve kuyu özellikleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Basınçsız su deneyinde basit bir yöntem olarak önerilen aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır;

$$k = \frac{Q}{5,5 \cdot r \cdot h \cdot t} \quad (4.2)$$

Burada,

k= Permeabilite Katsayısı (m/sn)

Q= t zamanında kuyuya verilen su miktarı(m³)

t= Zaman(sn)

r= Muhafaza borusunun yarıçapı(m)

h= Deney yapılan bölgenin yüksekliği(m)

olarak belirtilmiştir.

Zeminlere göre permabilite değerleri Tablo 4.15'te verilmiştir (Terzaghi vd.,1998).

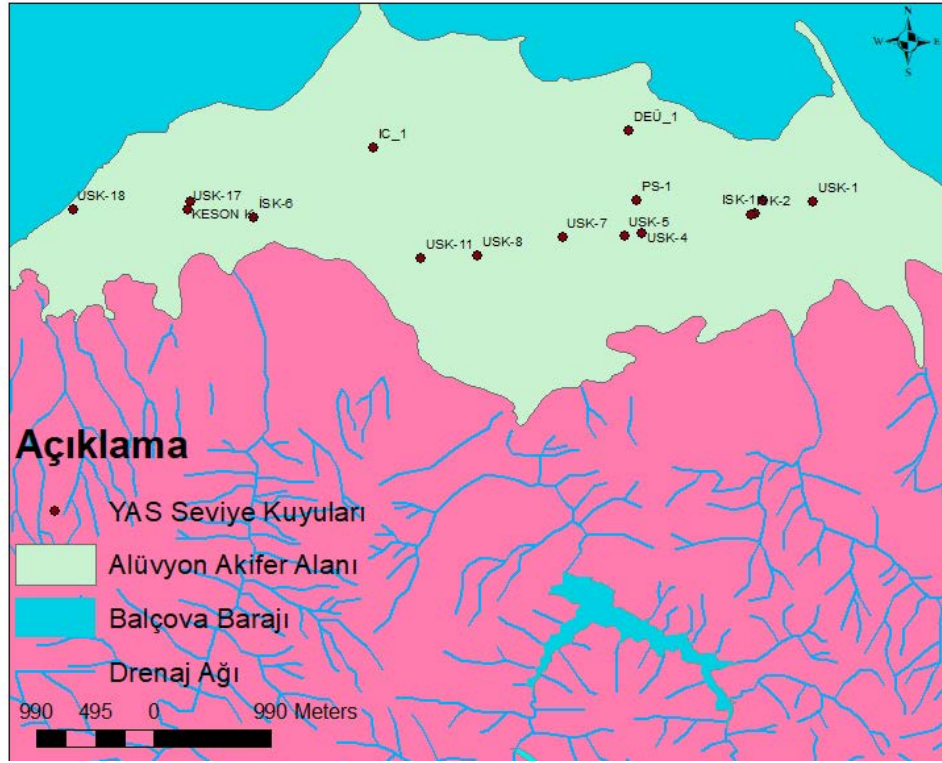
Tablo 4. 15 Zeminlere göre permabilite değerleri (Terzaghi vd.,1998).

Permeabilite Katsayısı k(m/sn)												
	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Dranaj	İyi						Zayıf		Hemen Hemen geçirimsiz			
Zemin Tipi	Temiz Çakıl (GW)	Temiz Kum, temiz kum ve kumlu Çakıl (SW, GP)					Çok ince kum, organik ve inorganik Silt, kumlu silt ve kil, düşük ve yüksek plastiteli Kil (SM, SC, ML, MH, CL, CH)			Geçirimsiz zeminler, yoğunlukla killi (CL, CH)		

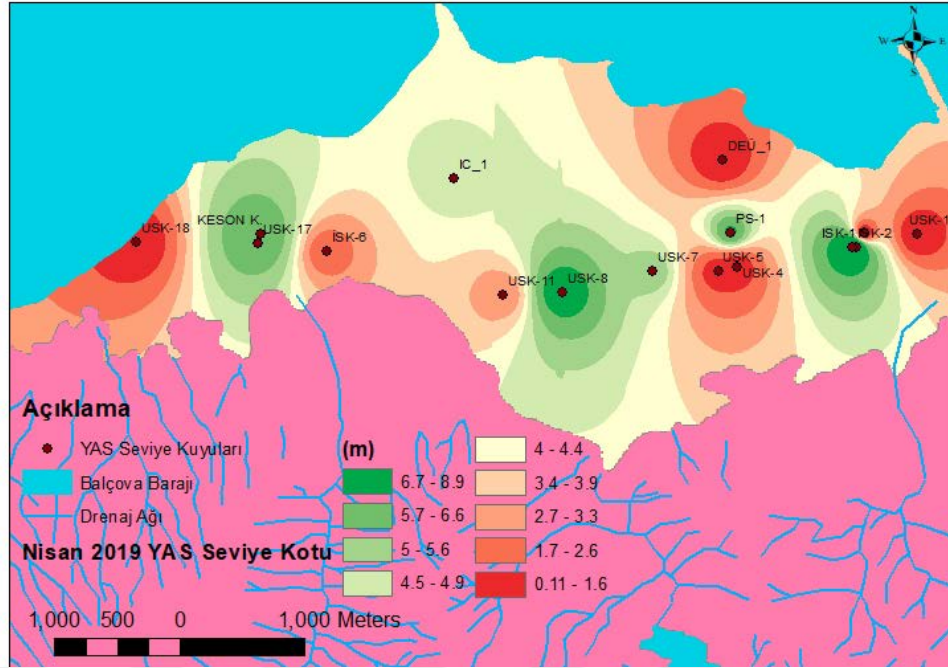
Çalışma sahasında önceden açılmış olan ve seviye izlemesi yapılan kuyularda yukarıda belirtilen yöntemle basınçsız su deneyi yapılmıştır. Bu test tüm kuyu derinliği boyunca yapıldığı için tüm kuyu boyunca elde edilen geçirgenliği ifade etmektedir. Kuyular içerisindeki borular tamamı filtreli olarak teçhiz edilmiştir. Tablo 4.15'te görüleceği üzere elde edilen permabilite katsayısı 9.83×10^{-6} ile 4.29×10^{-4} m/s arasında değişmekte olup ortalaması 1.65×10^{-4} m/s'dir. Bu değere göre alüvyonun "Geçirimli" olduğu görülmektedir (Tablo 4.14 ve 4.15).

Çalışma sahasında Kuvaterner yaşlı alüvyon birim en önemli akiferdir. Bölgedeki yeraltısuyunun büyük bir bölümü alüvyon akiferden su sağlamaktadır. Çekilen sular ağırlıklı olarak sulama suyu olarak kullanılmaktadır. Metro hattı güzergahı boyunca açılan izleme sondajlarında aylık seviye ölçümleri yapılmaktadır. Ayrıca mevsimsel değişimlerin izlenmesi için farklı noktalarda seviye ölçüm noktaları belirlenmiştir. Bu sayede alüvyon akiferdeki yeraltısuyu seviye dağılım haritası oluşturulmuştur. Seviye ölçümü yapılan noktalar alüvyon akiferi temsil edecek noktalarda açılmış kuyulardır (Şekil 4.10). Yağışlı dönemi temsil eden Nisan ayı ve kurak dönemi temsil eden Eylül aylarında yeraltısuyu kot haritası Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de sunulmuştur. Genel olarak yeraltısuyu akım yönünün kuzeye doğru yani denize doğrudur. Ancak hat boyunca açılan ana shaft ve çevresinde depresyon konilerinin oluştuğu görülmektedir. Bu alanlarda shaft içerisine süzülen suların yaratmış olacağı dinamik seviyeden kaynaklanmaktadır. Özellikle alanın güneyinden gelen dere yataklarının alüvyon

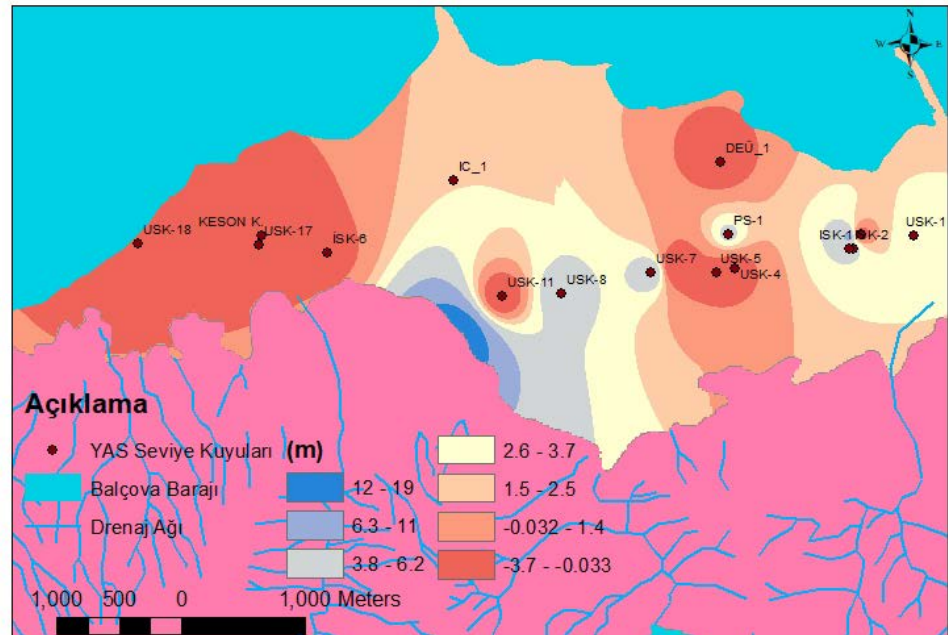
akifer üzerinde akışta olduğu kesimlerde yeraltısuyu seviyesinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu alanlar dere yataklarının taşıdığı geçirimli alüvyonel yelpazelerin dağılım sunduğu kesimlerdir.



Şekil 4. 10. Seviye Ölçümü yapılan kuyuların dağılımı



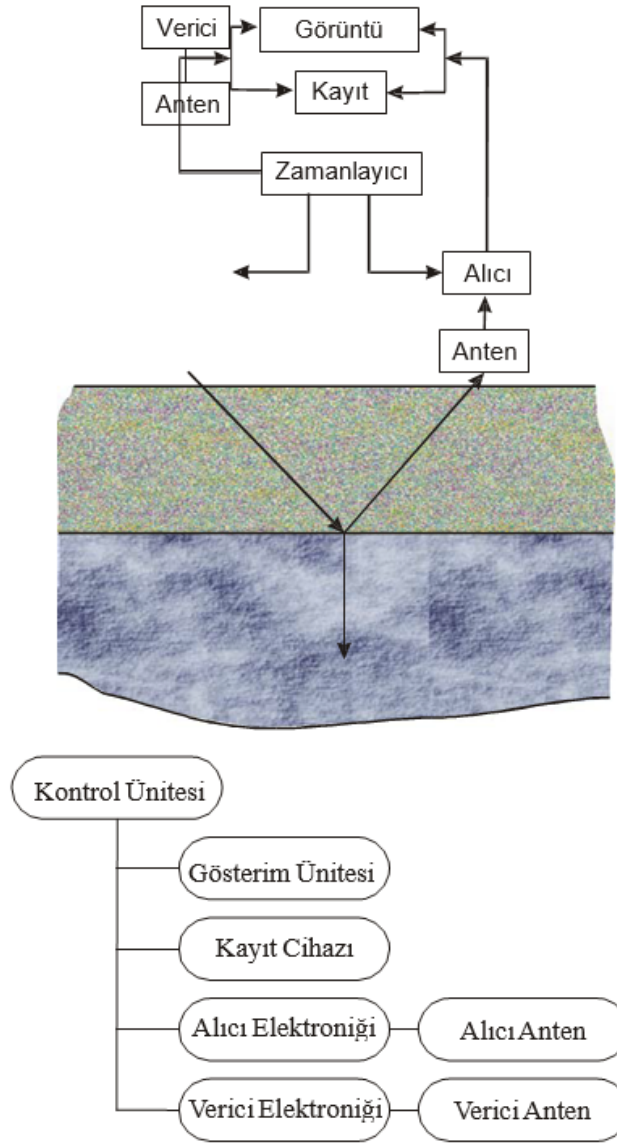
Şekil 4. 11. Nisan ayı yeraltı suyu kotu dağılım haritası



Şekil 4. 12. Eylül ayı yeraltı suyu kotu dağılım haritası

Çalışma sahası içerisinde İzmir ilinin en önemli jeotermal sahalarından biri olan Balçova jeotermal alanı bulunmaktadır. Balçova jeotermal sahası Bornova karmaşığını D-B yönlü kesen Agememnon fayı boyunca dolaşım sağlamaktadır. Bu fayı kesen 13 adet üretim kuyusunun sıcaklığı 104 ile 138 °C arasındadır. Bölgede konut

kayıt altında tutulur (Küçük, 2009). Şekil 4.14'te yer radarı ölçüm sisteminin şeması verilmiştir (Küçük, 2009).



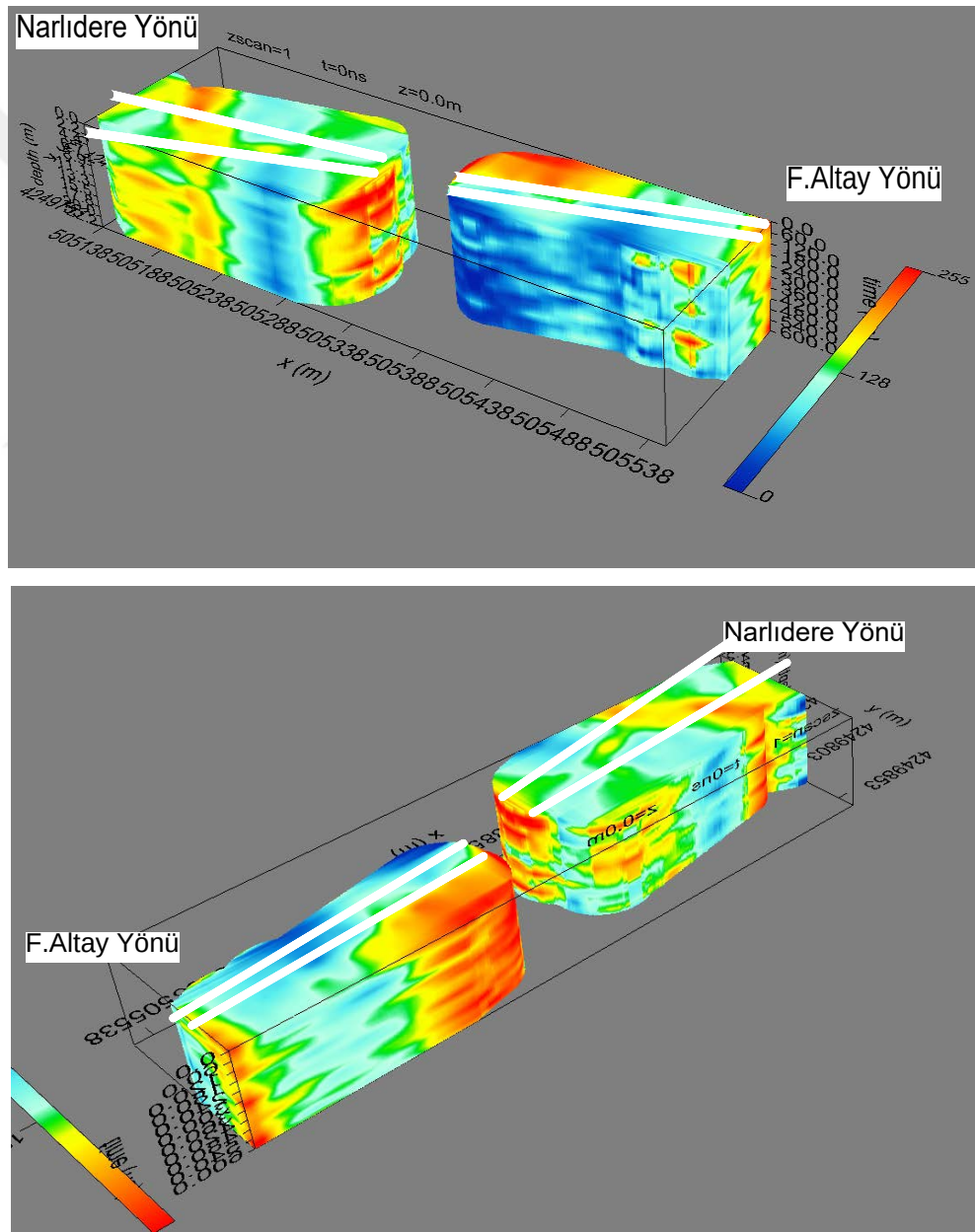
Şekil 4. 14 Yer radarı ölçüm sistemi ve elemanları

Yer radarı ile güzergahtaki birimlerin değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir.

- KM: 0+000-0+400:

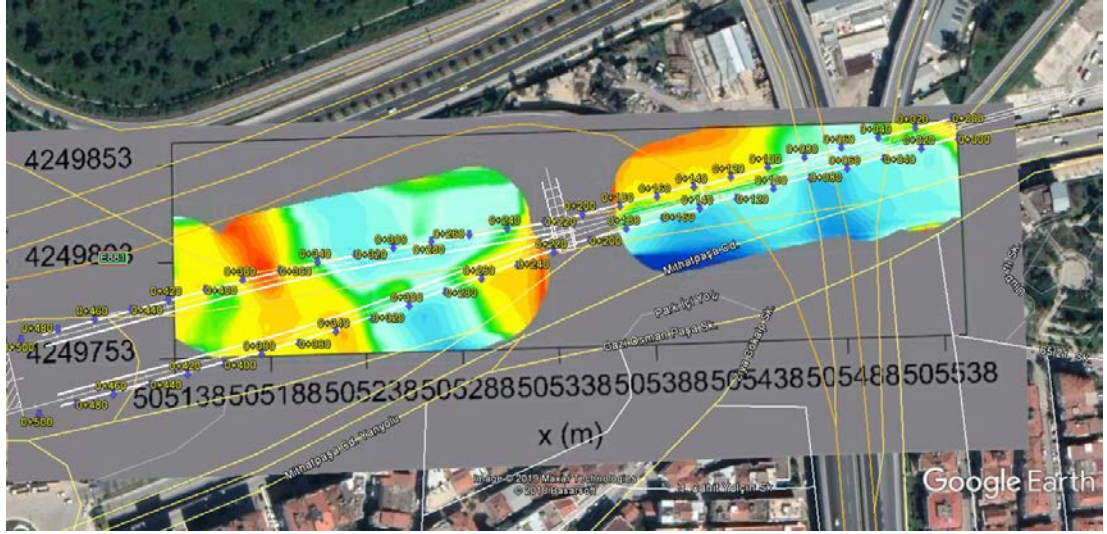
Güzergahın bu kesiminde alınan ölçümlerin birleştirilmesi ile elde edilen 3 boyutlu modelde yüksek genlikli yansımalar alüvyon içerisinde ki bloklu çakıllı birimler ile doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Renk skalasında kırmızı ve tonları ile

gösterilen kesimler yüzeyden beslenmenin fazla olduğu kesimlere karşılık gelirken mavi ve tonları ile gösterilen kesimler daha küçük boyutta kum ve çakıl içeren zemin özelliği kazanımı kesimler olarak yorumlanmıştır. Özellikle KM:0+320-0+420 kesimlerinde yağışlı dönem kazılarında alüvyonun geçirimli birimlerden oluşan bu kesimde yanal yönde yer altı suyu hareketleri beklenmelidir. Özellikle filişin ayrılmış kesimlerinde renk skalasında kırmızı ve tonları ile gösterilen kesimlerinde yer altı suyu akımının tünel aynasının stabilitesi üzerinde önemli etkiye bulunacaktır (Şekil 4.15).

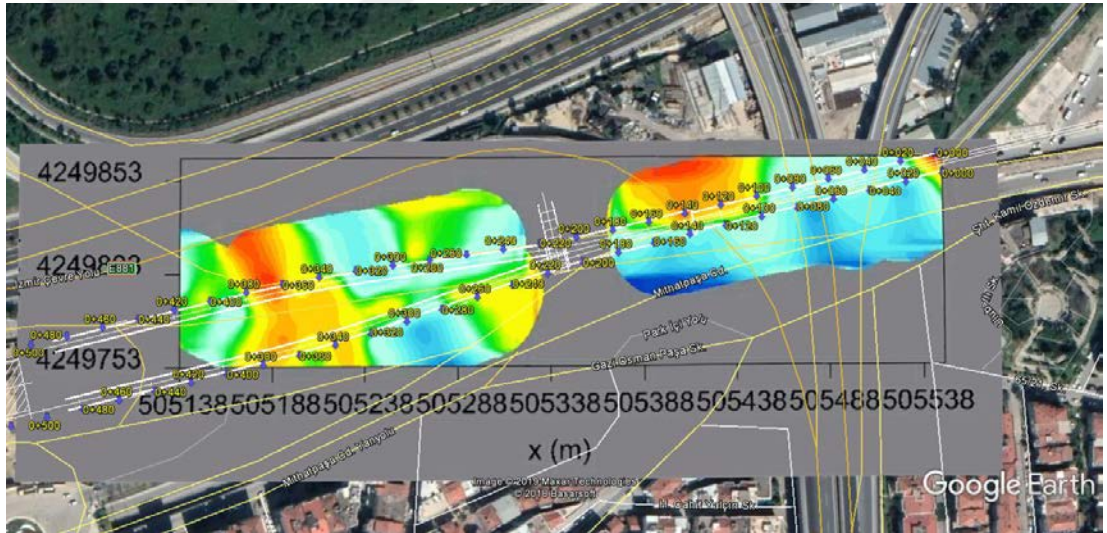


Şekil 4. 15 KM: 0+000-0+400 arası 3 boyutlu katı model

55

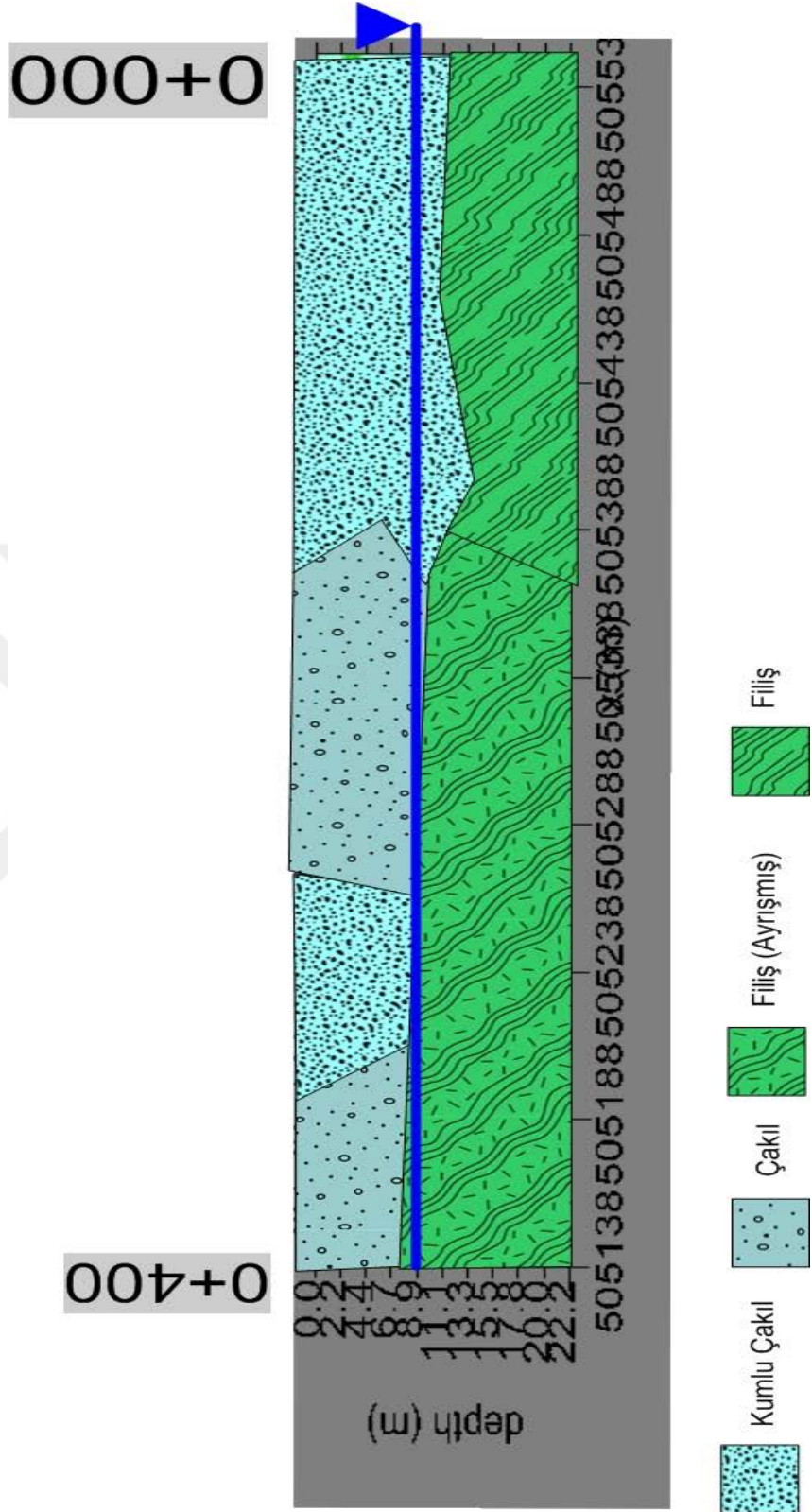


Şekil 4. 18 15 metre derinlik seviyesi haritası



Şekil 4. 19 20 metre derinlik seviyesi haritası

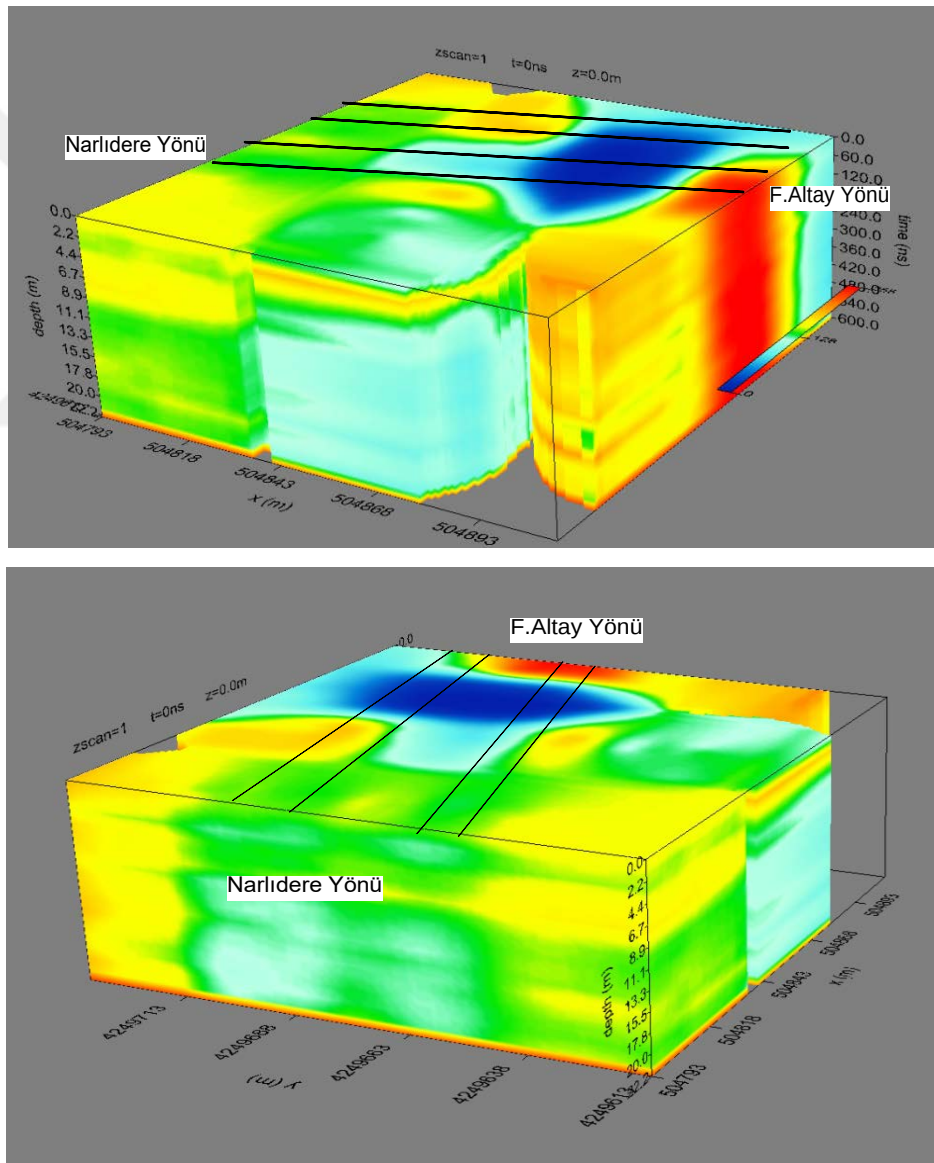
Yapılmış olan sondajların da göz önünde bulundurulması ile hazırlanan jeolojik modelde güzergahın bu kesiminin daha çok zemin koşulları altında olduğu görülmektedir. Alüvyon biriminin geçirimli olmasının yanında, ayrılmış fliş birimi yanal ve düşey yönde az olsa yer altı suyu hareketine imkan tanıyacaktır. Özellikle yağışlı dönemlerde yapılacak olan kazı çalışmalarında yer altı suyunun bu durumu göz önünde bulundurulmalıdır. Yer altı suyu seviyesi 8-10 metre aralığında yer almakla beraber kurak dönem de bu seviye jeolojik birimlerin geçirimli özelliğinden dolayı daha derinlerde olacaktır. Güzergahın bu kesiminde kazı çalışmalarını etkileyebilecek blok kaya yansıması elde edilememiştir



Şekil 4. 20 KM:0+000-0+400 arası jeolojik kesit

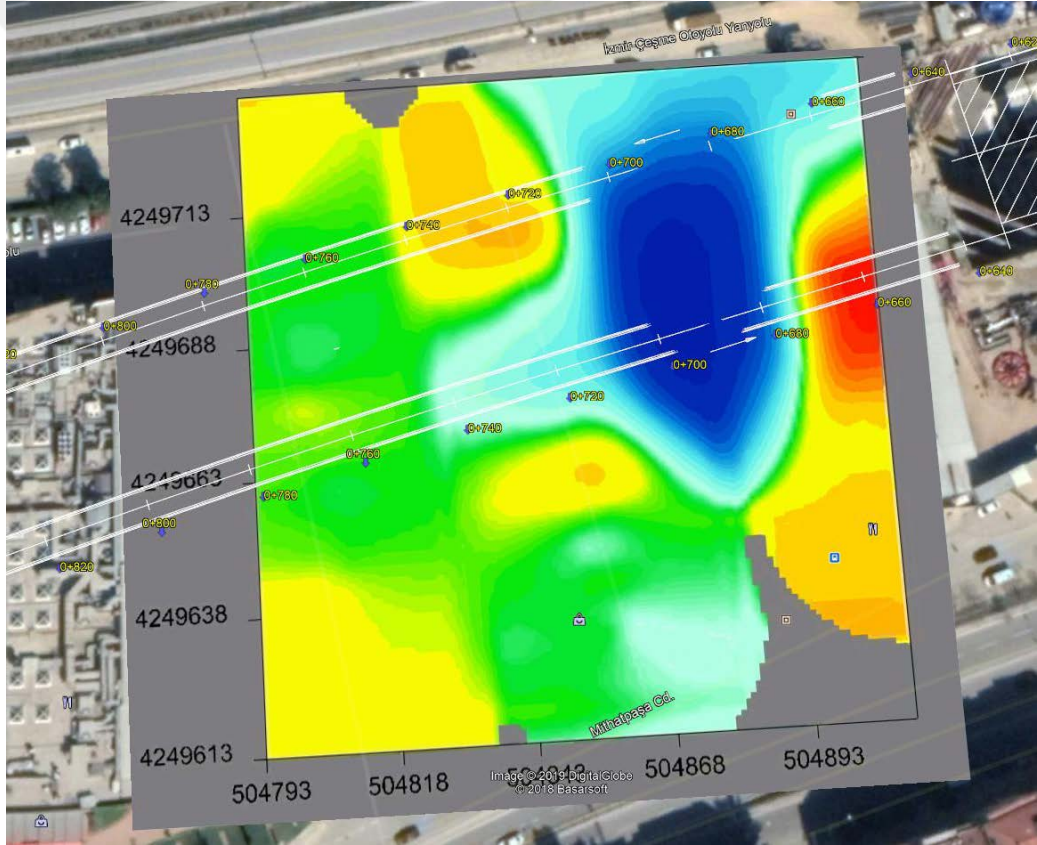
- KM: 0+640-0+760:

Güzergahın bu kesiminde alınan ölçümlerin birleştirilmesi ile elde edilen 3 boyutlu modelde yüksek genlikli yansımaların alüvyon içerisinde ki malzemelerin tane boyu ve sıklıkları ile doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Renk skalasında kırmızı ve tonları ile gösterilen kesimler tane boyu iri olan çakıllı ve kumlu kesimlere karşılık gelirken mavi ve tonları ile gösterilen kesimler daha ince taneli killi siltli kesimlere karşılık gelmektedir. İri taneli birimlerin yayılım şeklinde yer alması burada yanal ve düşey yönde yer altı suyu hareketliliği olasılığını arttırmaktadır. (Şekil 4.21)

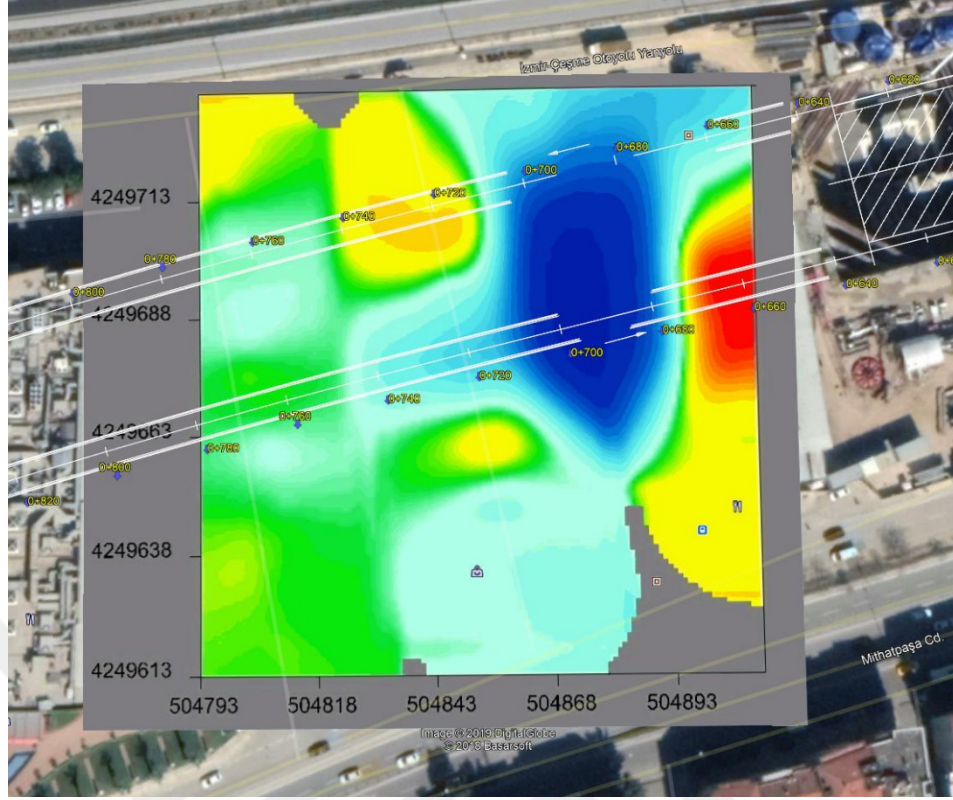


Şekil 4. 21 KM:0+640-0+760 arası 3 boyutlu katı model

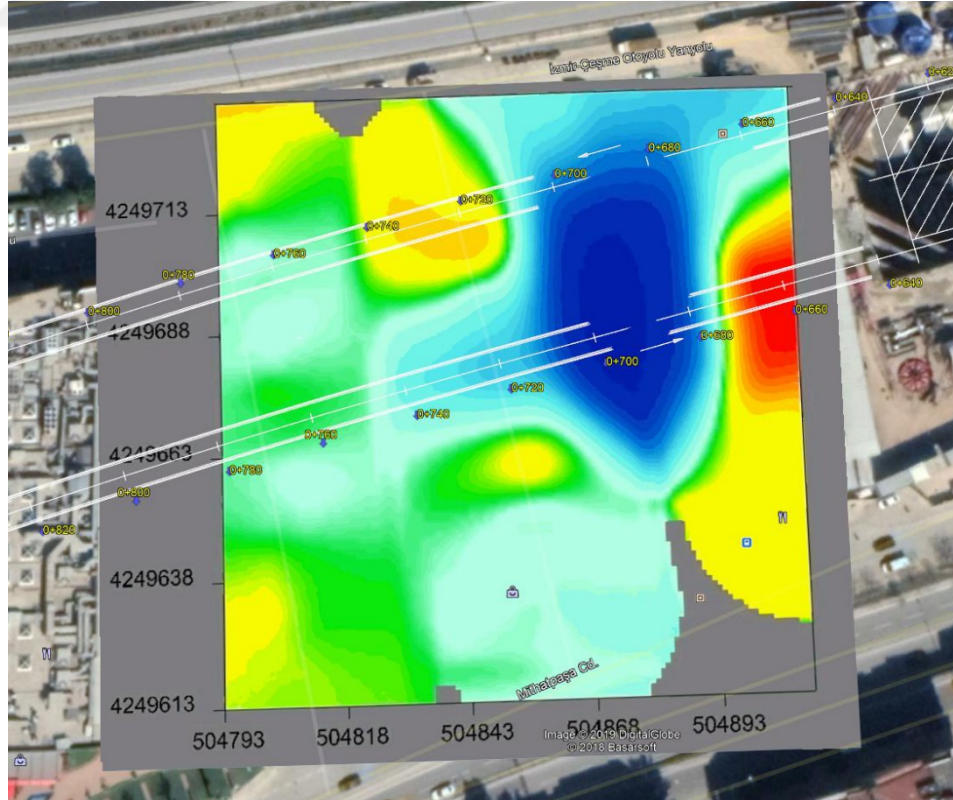
5, 10, 15 ve 20 metre derinlik seviyesi için hazırlanan haritada renk skalasında kırmızı ve tonları ile gösterilen iri taneli kesimler güzergahın KM:0+730-0+780 metreleri arasında yer aldığı görülmektedir. Geçirimliliği yüksek olan bu kesimler alt kesimlerin yüzeyden beslenmelerine olanak sağlayacaktır. Her ne kadar alanda ki yapılaşmanın bu birimlerin yüzeyden beslenmelerini önemli ölçüde azaltacağı düşünülse de akifer özelliği gösteren bu kesimlerin yanal yönde su hareketine imkan tanıyacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Yukarıda bahsedilen metreler arasında kazma aşamasında yanal yönde su hareketleri 20 metre derinliğe kadar beklenmelidir. Seviye haritalarında mavi ve tonları ile gösterilen kesimler ise suya doygun ancak geçirimsiz özellik gösterecektir.



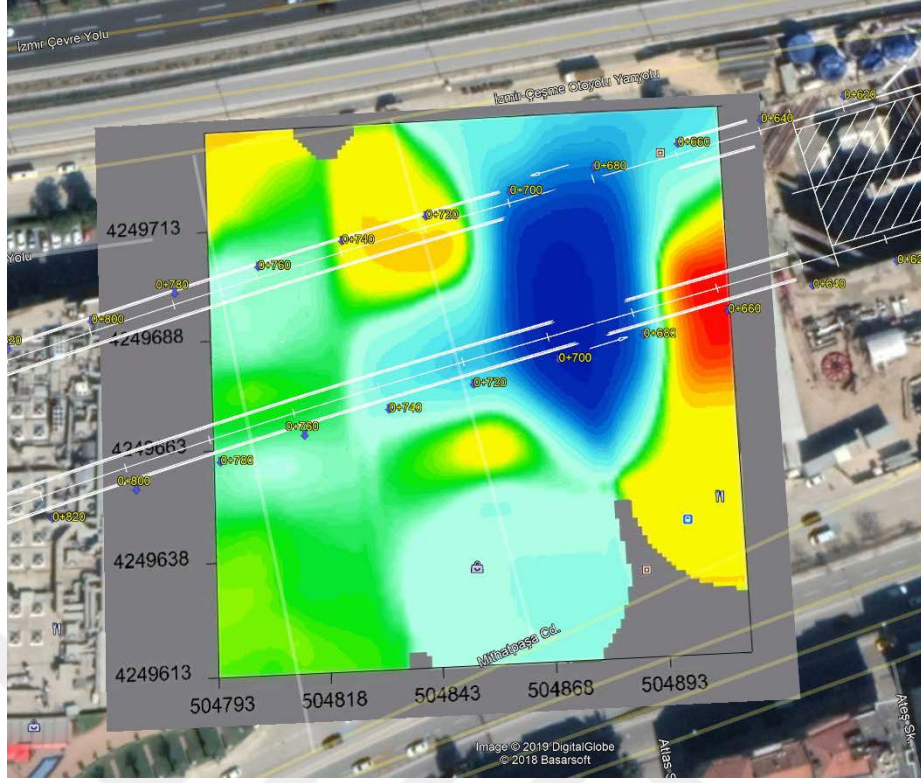
Şekil 4. 22 5 metre derinlik seviyesi haritası



Şekil 4. 23 10 metre derinlik seviyesi haritası

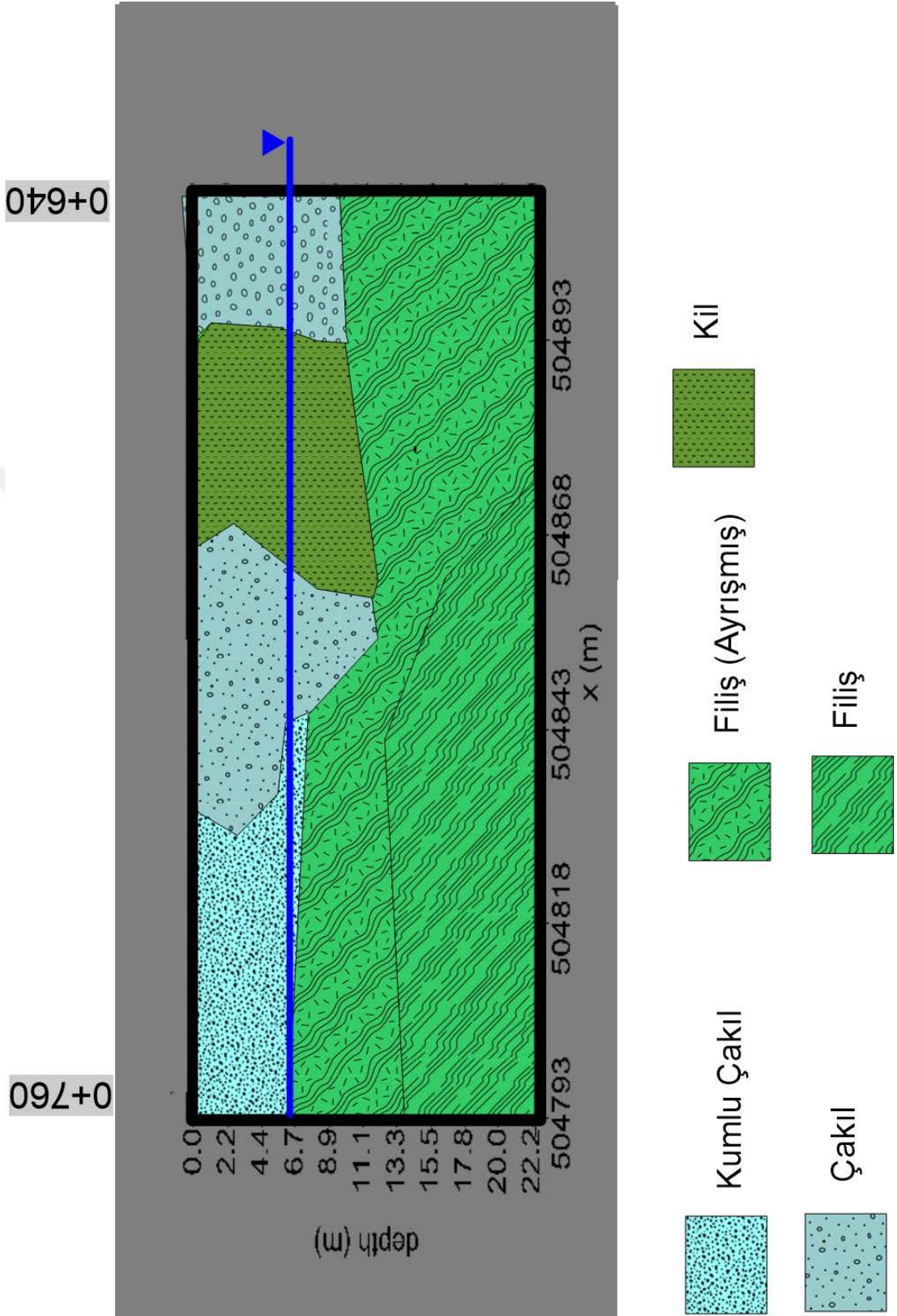


Şekil 4. 24 15 metre derinlik seviyesi haritası



Şekil 4. 25 20 metre derinlik seviyesi haritası

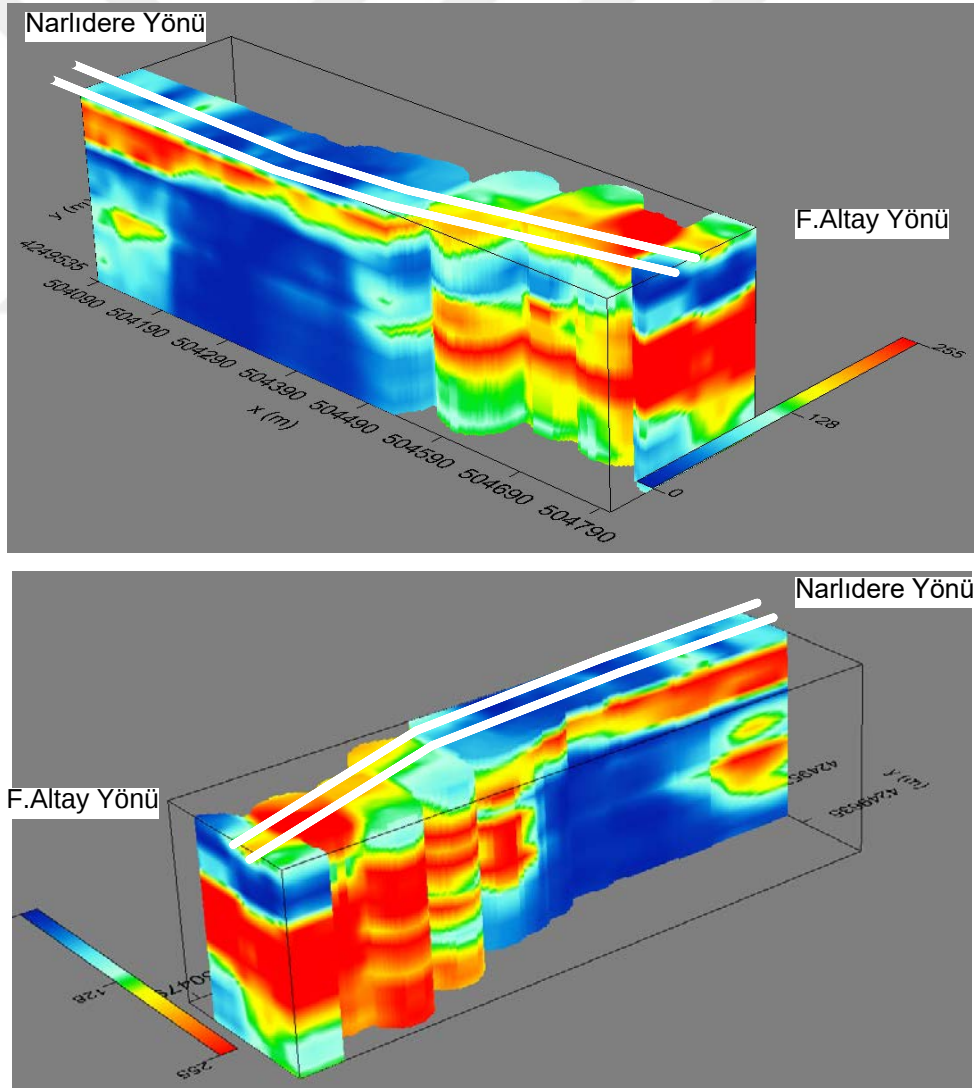
Yapılmış olan sondajların da göz önünde bulundurulması ile hazırlanan jeolojik modelde güzergahın bu kesiminin zemin koşulları altında olduğu görülmektedir. Özellikle ayrılmış fliş birimi yanal ve düşey yönde az olsa yer altı suyu hareketine imkan tanıyacaktır. Altta yer alan fliş birimi geçirimsiz özellik göstereceğinden kurak dönem kazılarında da yer altı suyu seviyelerinde önemli düşümler beklenmelidir. Güzergahın bu kesiminde kazı çalışmalarını etkileyebilecek blok kaya yansıması görülmemektedir.



Şekil 4. 26 KM:0+640-0+760 arası jeolojik kesit

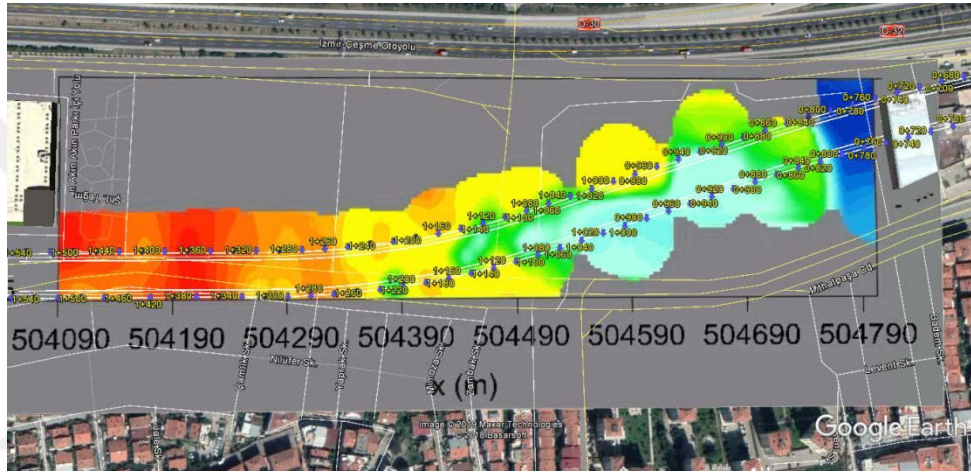
- KM: 0+760-1+500:

Güzergahın bu kesiminde alınan ölçümlerin birleştirilmesi ile elde edilen 3 boyutlu modelde yüksek genlikli yansımaların alüvyon içerisinde ki malzemelerin tane boyu ve sıklıkları ile doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Renk skalasında kırmızı ve tonları ile gösterilen kesimler tane boyu iri olan çakıllı ve kumlu kesimlere karşılık gelirken mavi ve tonları ile gösterilen kesimler daha ince taneli killi siltli kesimlere karşılık gelmektedir. KM:0+860-1+020 metreleri arasında yer alan güzergahın kuzey kesiminde ki iri taneli birimlerin yatay tabakalanma şeklinde yansımaları burada özellikle kuzey kesiminden kazı aşamasında güzergaha yer altı suyu hareketliliği olasılığını arttırmaktadır. (Şekil 4.27)

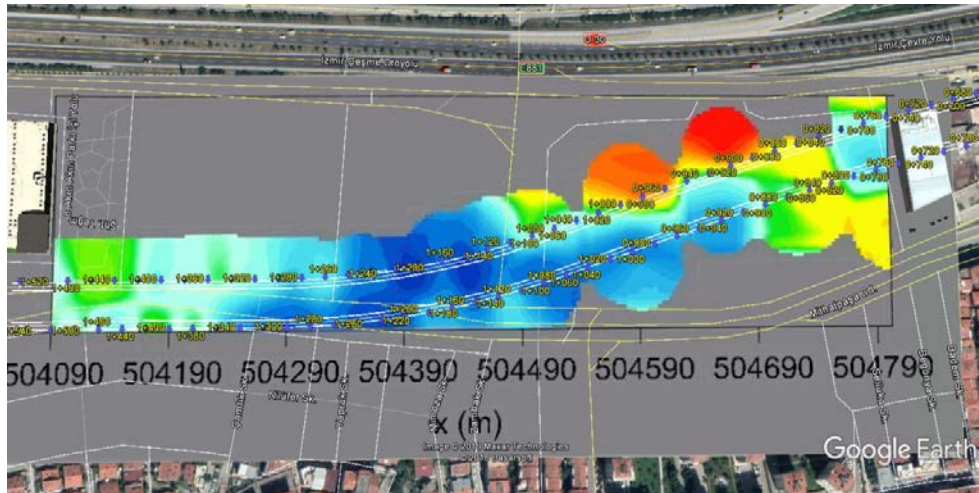


Şekil 4. 27 KM: 0+7601+500 arası 3 boyutlu katı model

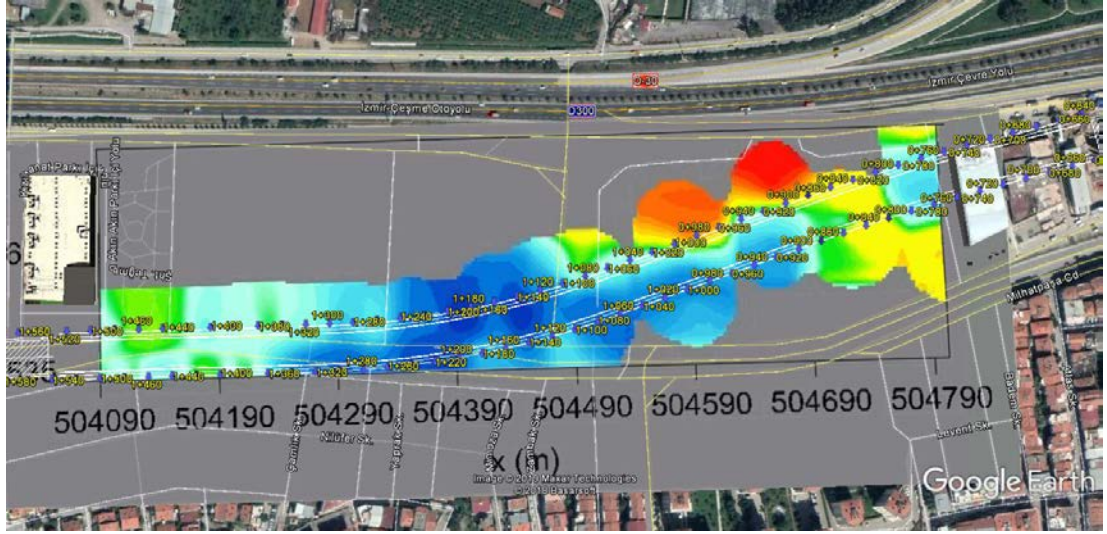
5, 10, 15 ve 20 metre derinlik seviyesi için hazırlanan haritada renk skalasında kırmızı ve tonları ile gösterilen iri taneli kesimler güzergahın KM:0+820-1+090 metreleri arasında yer aldığı görülmektedir. Geçirimsizliği yüksek olan bu kesimler alt kesimlerin yüzeyden beslenmelerine olanak sağlayacaktır. Akifer özelliği gösteren bu kesimlerin yanal yönde su hareketine imkan tanıyacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Yukarıda bahsedilen metreler arasında kazma aşamasında yanal yönde su hareketleri kazı derinliğine kadar beklenmelidir. Seviye haritalarında mavi ve tonları ile gösterilen kesimler ise suya doygun ancak geçirimsiz özellik gösterecektir.



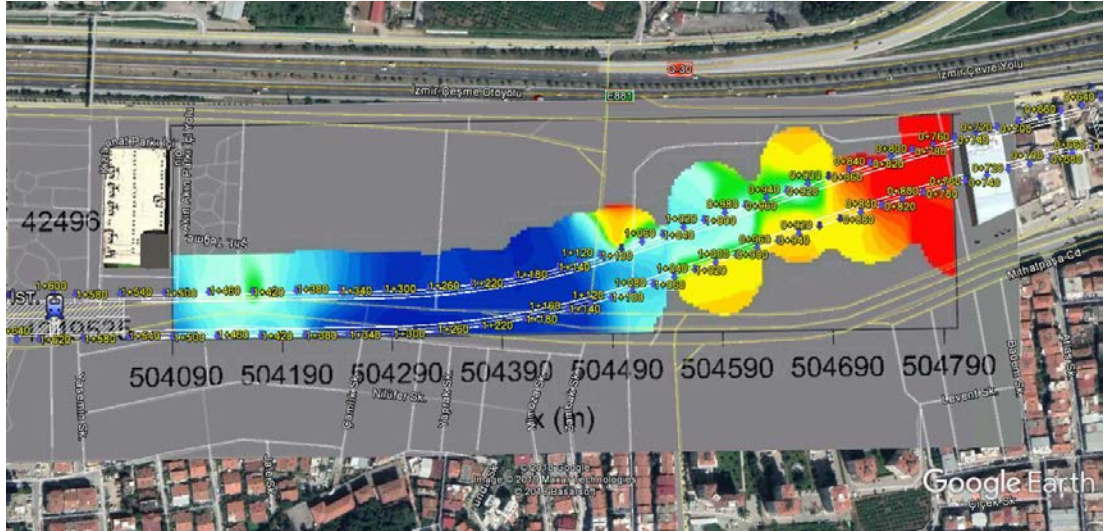
Şekil 4. 28 5 metre derinlik seviyesi haritası



Şekil 4. 29 10 metre derinlik seviyesi haritası

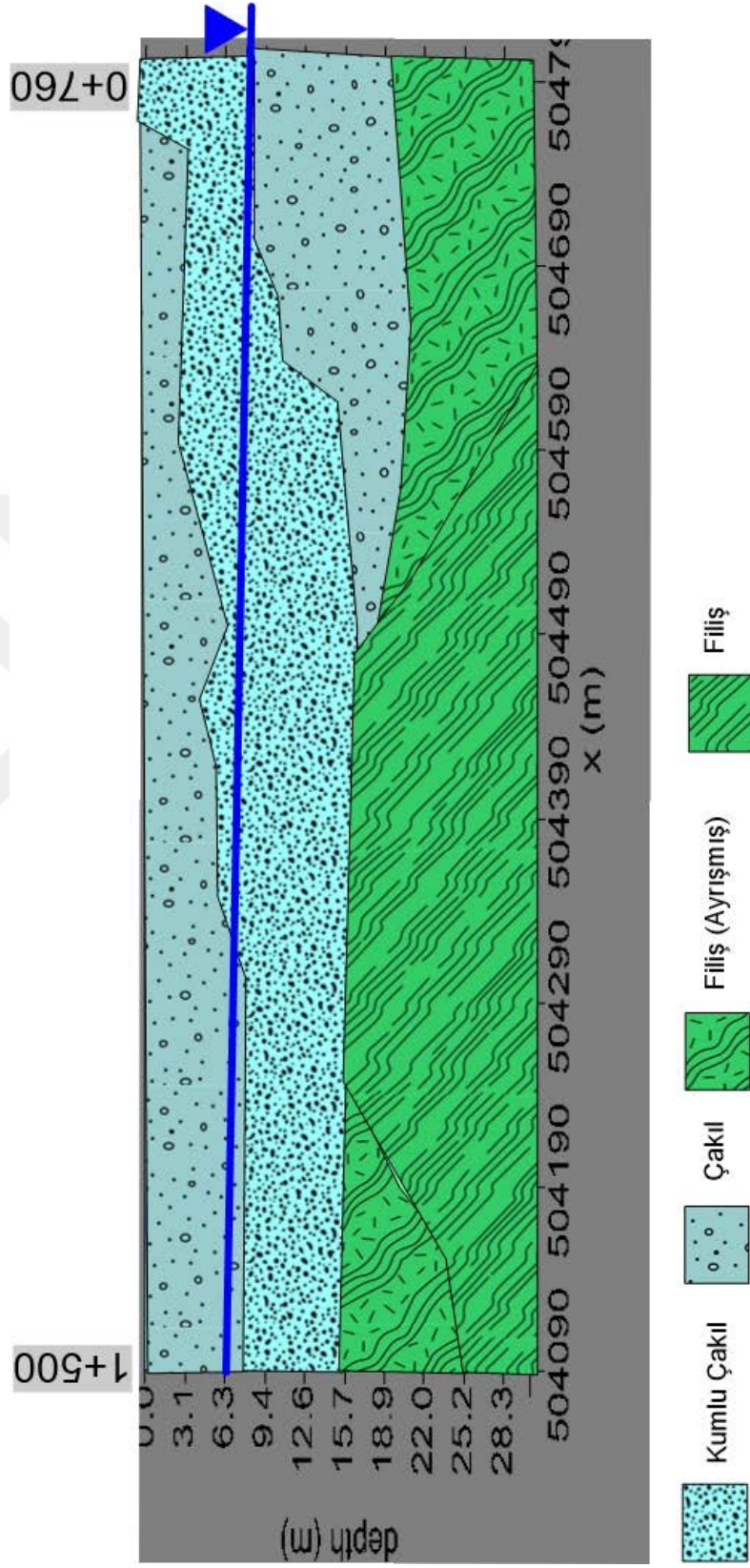


Şekil 4. 30 15 metre derinlik seviyesi haritası



Şekil 4. 31 20 metre derinlik seviyesi haritası

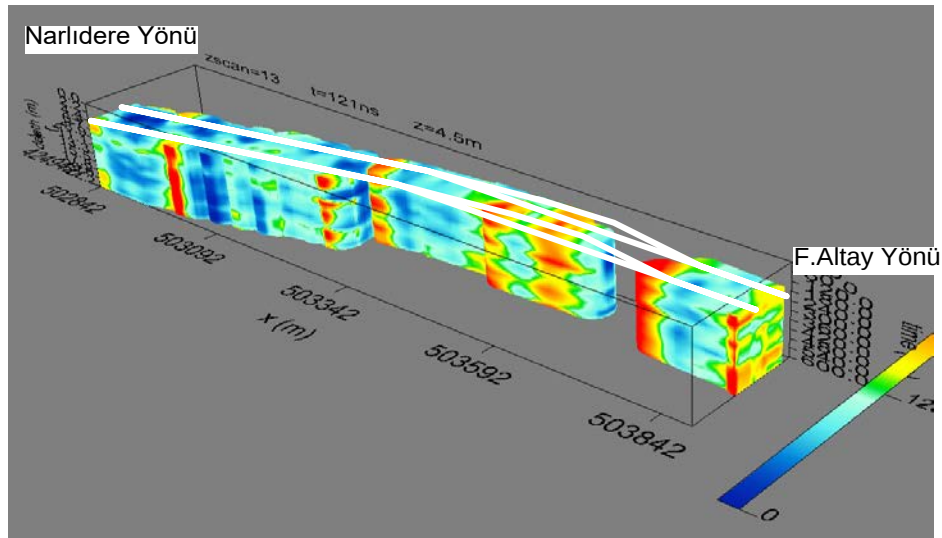
Yapılmış olan sondajların da göz önünde bulundurulması ile hazırlanan jeolojik modelde güzergahın bu kesiminin ayrışmış filiş birimi içinde olacağı görülmektedir. Özellikle ayrışmış filiş birimi yanal ve düşey yönde az olsa yer altı suyu hareketine imkan tanıyacaktır. Yer altı suyu içeren ayrışmış filiş birimi tünel aynasında gevşek özellik gösterecektir. Altta yer alan filiş birimi geçirimsiz özellik göstereceğinden kurak dönem kazılarında da yer altı suyu seviyelerinde önemli düşümler beklenmemelidir. Yer altı suyu seviyesi 6-7 metre seviyelerinde görülmektedir. Güzergahın bu kesiminde blok olarak yorumlanan yansımalar gözlenme birlikte kazı çalışmalarını etkileyebilecek büyük blok kaya yansıması görülmemektedir.

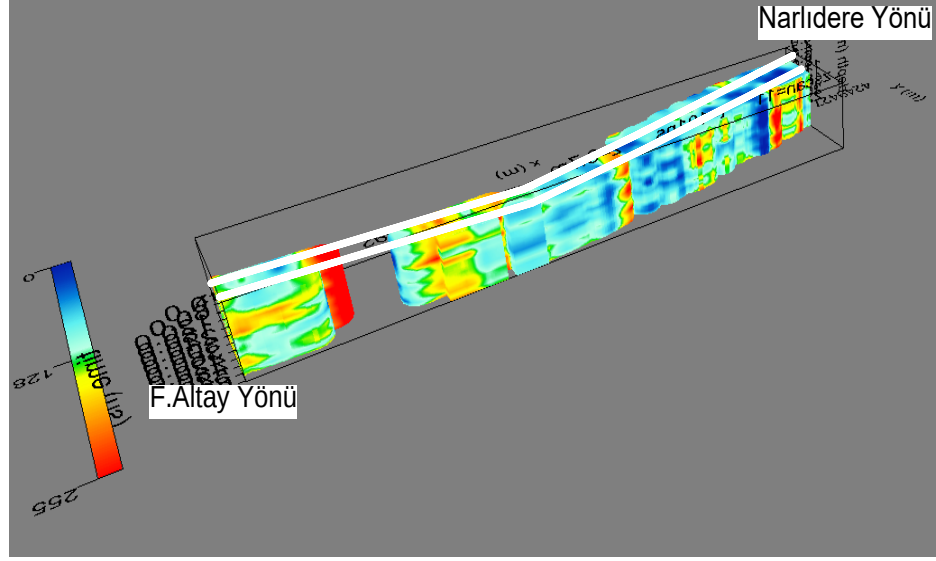


Şekil 4. 32 KM:0+760-1+500 arası jeolojik kesit

- KM: 1+720-2+780:

Güzergahın Dokuz Eylül istasyonun da yer aldığı bu kesiminde alınan ölçümlerin birleştirilmesi ile elde edilen 3 boyutlu modelde yüksek genlikli yansımaların yüzeyde yer alan yapılaşma sık olduğu kesimlerde görülmektedir. Renk skalasında kırmızı ve tonları ile gösterilen kesimler yüzeyden beslenmenin az olduğu kesimlere karşılık gelirken mavi ve tonları ile gösterilen kesimler ise yapılaşmanın olmadığı ve yüzeyden beslenmeye olanak sağlayan açık alan ve park olan kesimlere karşılık gelmektedir. Renk skalasında kırmızı ve tonları ile gösterilen kesimlerin derine doğru uzanımlarının olması yüzeyden daha az beslenmenin etkisinin derinlere etkisinin olduğunu göstermektedir. Özellikle KM:1+800-2+120 metreleri arası güzergahın diğer kesimlerine oranla daha az yer altı suyu bulunduracaktır. Bu kesimlerin bitiminde yer alacak olan tünel aynalarından suya doymun kesimlerden yer altı suyu hareketi beklenebilir. KM:2+320-2+760 metreleri arasında elde edilen yansıma kayıtlarında burada ki alüvyon biriminin kumlu çakıllı ve ince taneli siltli killi birimlerin yer alması yanal yönde yer altı suyu hareketine neden olacaktır. Özellikle 3B modelde de görüldüğü gibi güzergahın güney kesimi açık mavi tonlarında çakıllı ve kumlu gelen akifer özelliği gösteren birimlere karşılık gelmektedir. Özellikle yağışlı dönemlerde yapılacak olan kazı çalışmalarında yanal yönden su hareketi olacaktır (Şekil 4.33).

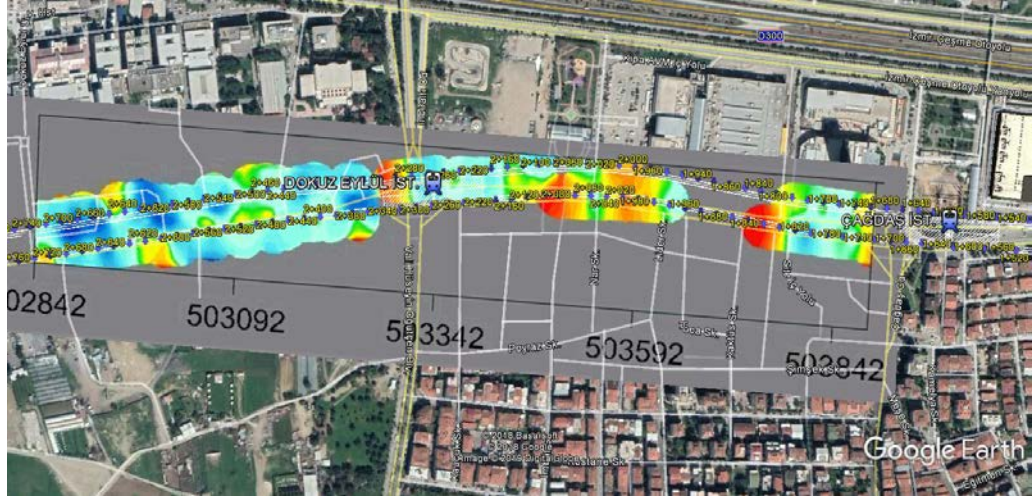




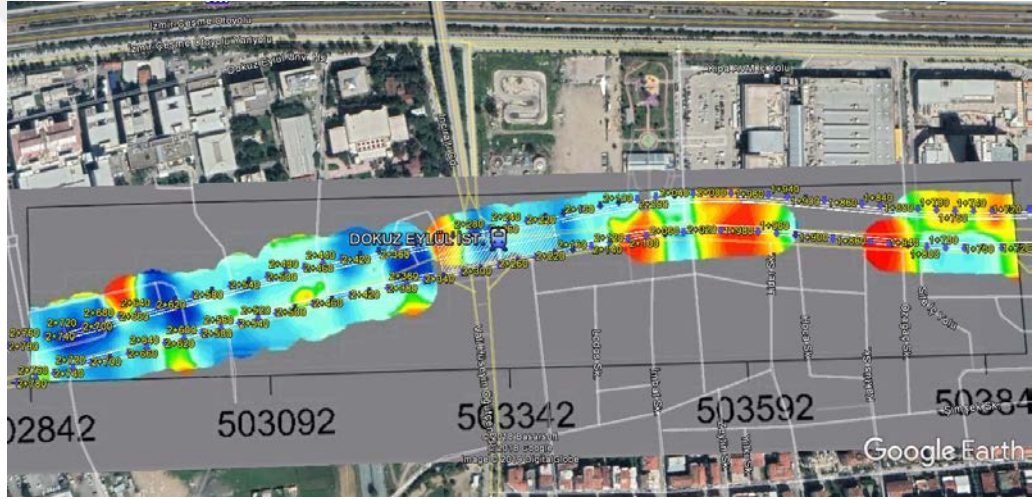
Şekil 4. 33 KM: 1+720-2+780 arası 3 boyutlu katı model

5, 10, 15 ve 20 metre derinlik seviyesi için hazırlanan haritada renk skalasında kırmızı ve tonları ile gösterilen kesimlerde yapılaşmanın yoğun olduğu metrelere karşılık gelmektedir. Derine doğru etkisi ise azalarak devam etmektedir. Güzergahın bu kesiminde geçirimli ve geçirimsiz birimler aralanmalı şekilde yer almakta ve yağışlı dönemlerde yapılacak olan kazılarda geçirimli birimlere karşılık gelen kesimlerde kazı aynasında stabilite sorunlarına neden olacaktır. Özellikle 1+720-2+400 metreleri arasında sondajlarda ayrılmış olarak yorumlanan filiş birimi radar kesitlerinde kayaktan ziyade daha çok zemin özelliği göstermektedir.

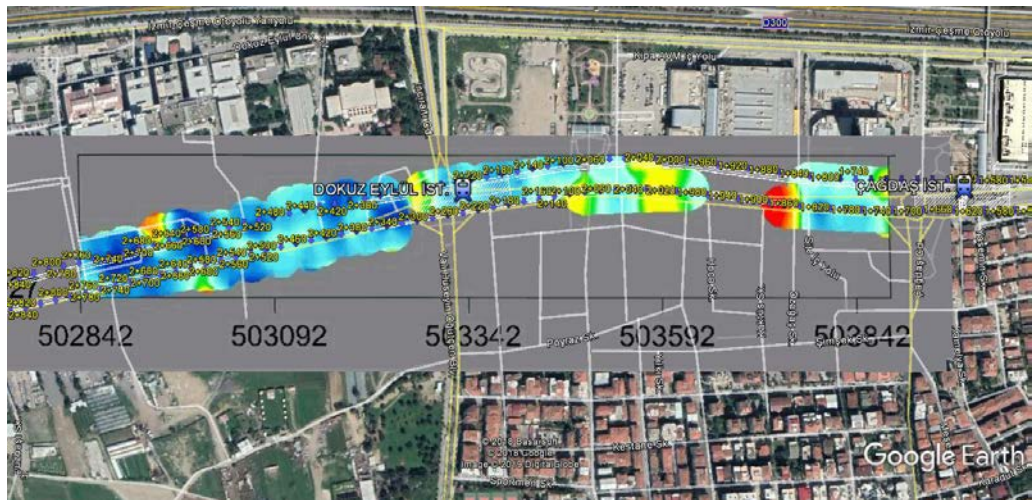
Keson ve derin kuyuların kullanımı sırasında kuyu civarında ince taneli malzemelerin temizleneceği için permeabilitesi yüksek ve iri taneli birimlerin seviye haritalarında kapanım şeklinde yer alması beklenir.



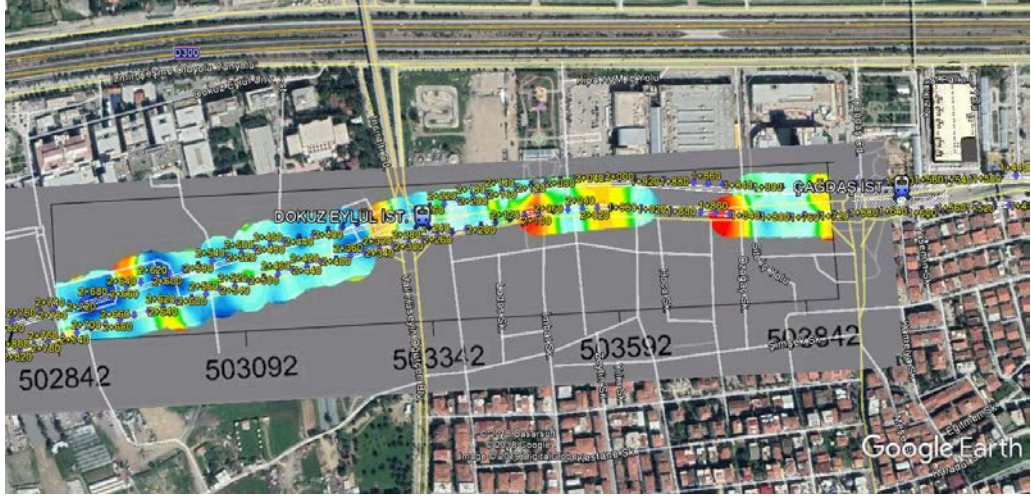
Şekil 4. 34 5 metre derinlik seviyesi haritası



Şekil 4. 35 10 metre derinlik seviyesi haritası



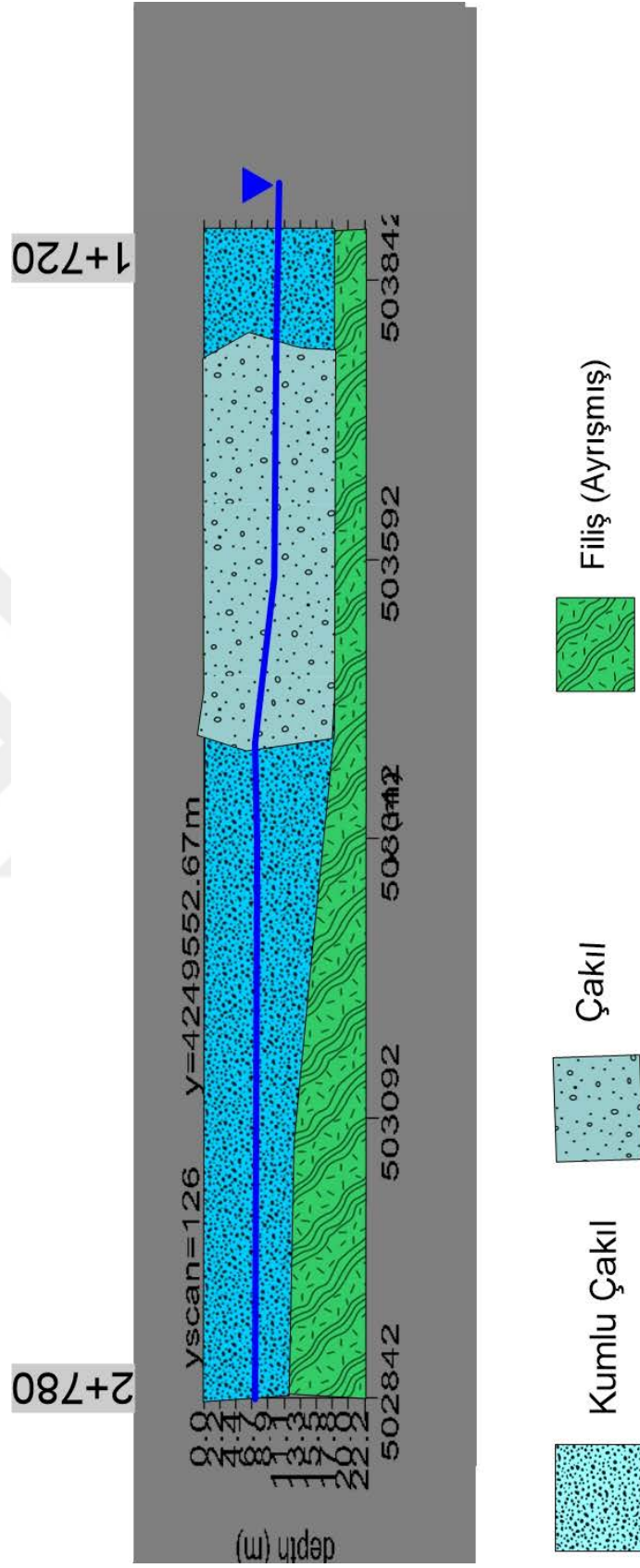
Şekil 4. 36 15 metre derinlik seviyesi haritası



Şekil 4. 37 20 metre derinlik seviyesi haritası

Yapılmış olan sondajların da göz önünde bulundurulması ile hazırlanan jeolojik modelde güzergahın bu kesiminin daha çok ayrılmış filiş ve zemin koşulları altında olduğu görülmektedir. Örtü birim ve ayrılmış filiş birimi yer altı suyunun hareket edebileceği özellik gösterecektir. Özellikle ayrılmış filiş birimi yanal ve düşey yönde az olsa yer altı suyu hareketine imkan tanıyacaktır. Yer altı suyu seviyesi öncel yapılmış olan sondajlar ile farklılık göstermektedir. Bu farklılık jeofizik çalışmaların yağışlı dönemde yapılmış olmasından kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır. Ancak sondajlarda ki yer altı suyu seviyesinin daha derinlerde yer alması altta yer alan birimlerin geçirimsizliklerinin yüksek olması ve geçirimsiz seviyenin daha derin kotlarda yer almasından kaynaklanmaktadır.

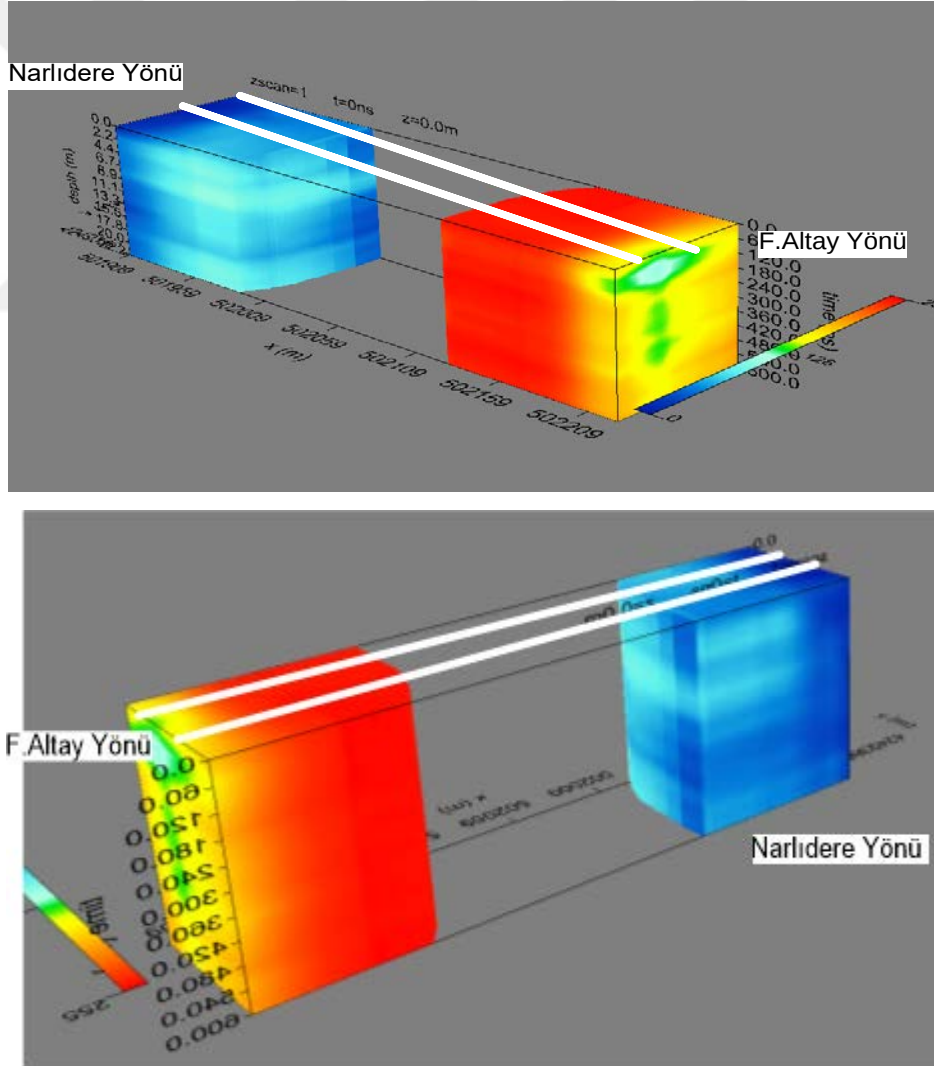
Özellikle yağışlı dönemlerde yapılacak olan kazı çalışmalarında yer altı suyunun bu durumu göz önünde bulundurulmalıdır. Güzergahın bu kesiminde kazı çalışmalarını etkileyebilecek blok kaya olarak yorumlanacak yansımalar elde edilememiştir.



Şekil 4. 38 KM:1+720-2+780 arası jeolojik kesit

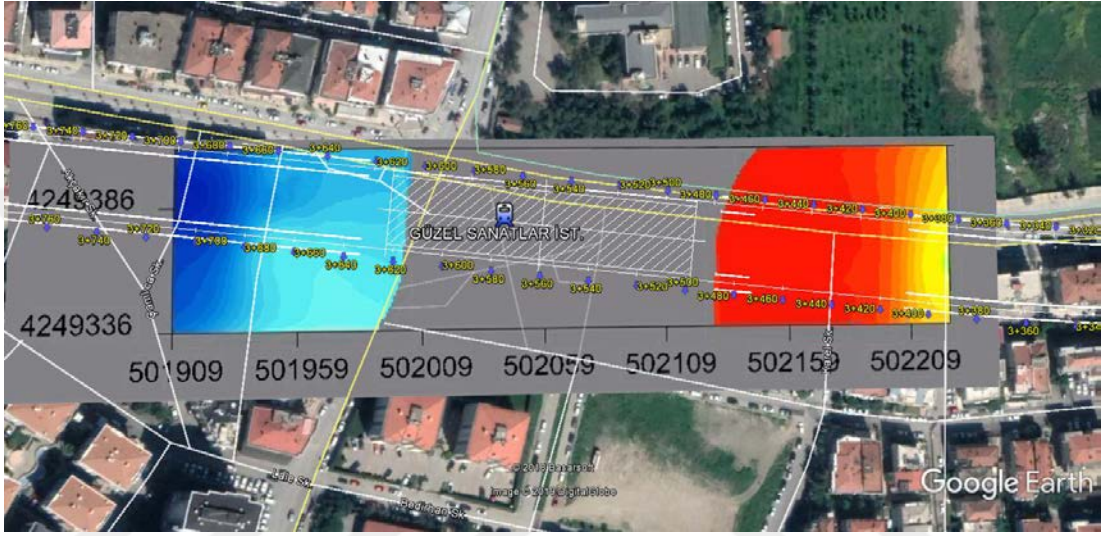
- KM: 3+380-3+760:

Güzergahın bu kesiminde alınan ölçümlerin birleştirilmesi ile elde edilen 3 boyutlu modelde yüksek genlikli yansımaların alüvyonun iri taneli geçirimli seviyelerinden kaynaklanmaktadır. Renk skalasında kırmızı ve tonları ile gösterilen kesimlerin derine doğru uzanımlarının olması bu yapının kalınlığının derine doğru devam etmesi olarak değerlendirilmelidir. KM:3+380-3+480 metreleri arasında yer alan bu birim kazı aşamasında yer altı suyunun yanal ve düşey yönde hareketine imkan tanıyacaktır. Renk skalasında koyu mavi ve mavi tonları ile ifade edilen kesimler KM:3+620-3+680 metreleri arasında yer almaktadır. Çatlak ve kırıklardan kaynaklı yansımaların yer almadığı bu kesimde fliş birimi geçirimsiz özellik gösterecektir (Şekil 4.39).

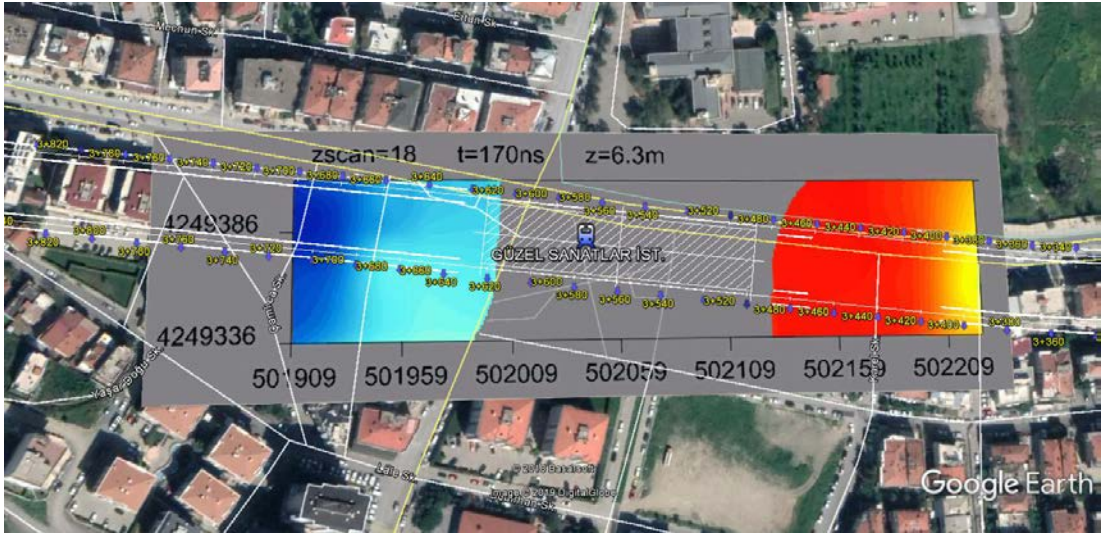


Şekil 4. 39 KM: 3+380-3+760 arası 3 boyutlu katı model

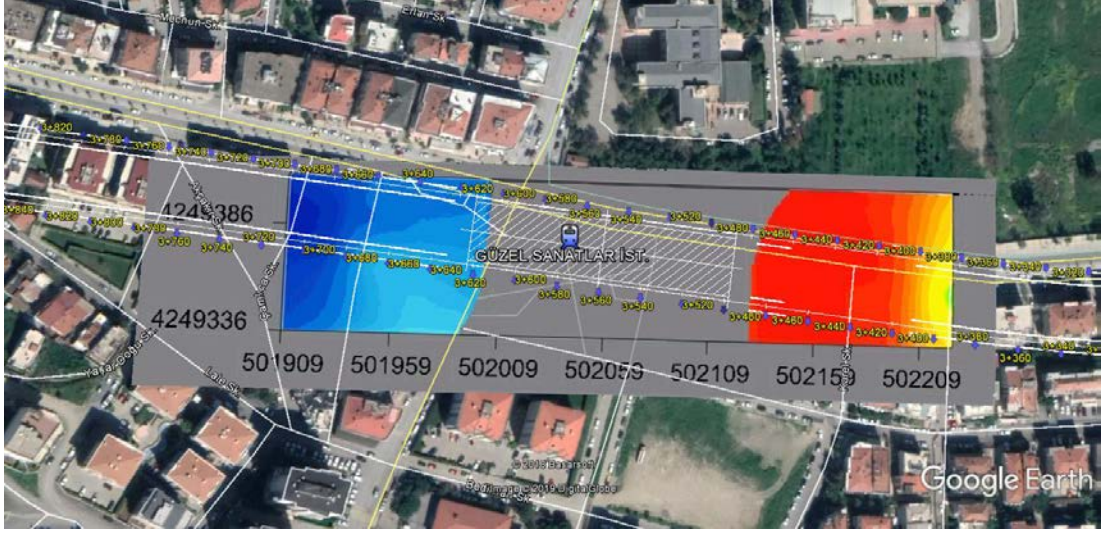
5, 10, 15 ve 20 metre derinlik seviyesi için hazırlanan haritada renk skalasında kırmızı ve tonları ile gösterilen kesimler alüvyonun akifer özelliği gösterebilecek geçirimsizliği yüksek olan kesimlere karşılık gelmektedir. KM:3+380-3+480 metreleri arasında yer alan kesimlerin derine doğru devam ettiği gözlenmektedir. KM:3+360-3+380 metreleri arasında yer alan kapanım yapısının olası kuyu ihtimaline karşı kontrol edilmesi yerinde olacaktır.



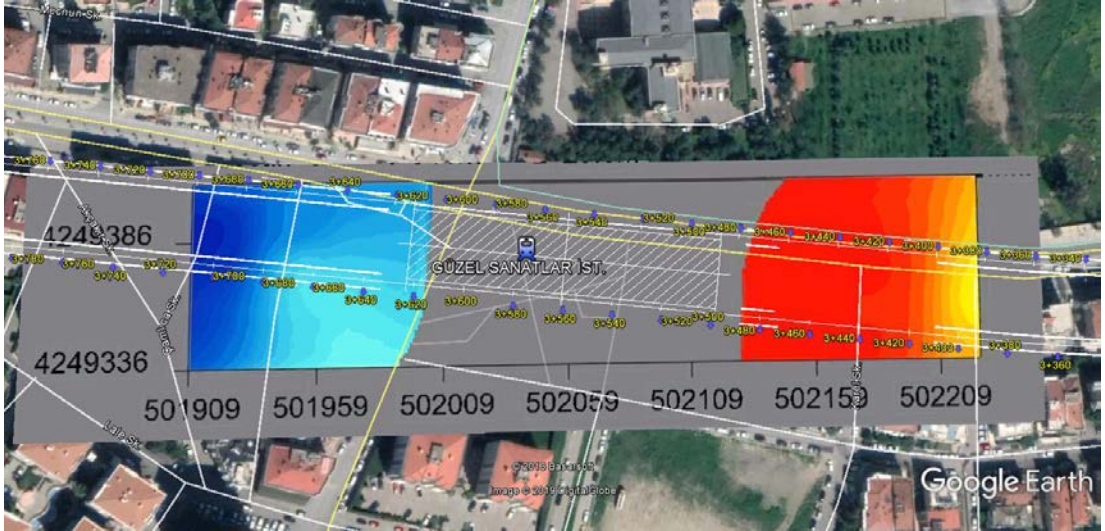
Şekil 4. 40.5 metre derinlik seviyesi haritası



Şekil 4. 41.10 metre derinlik seviyesi haritası

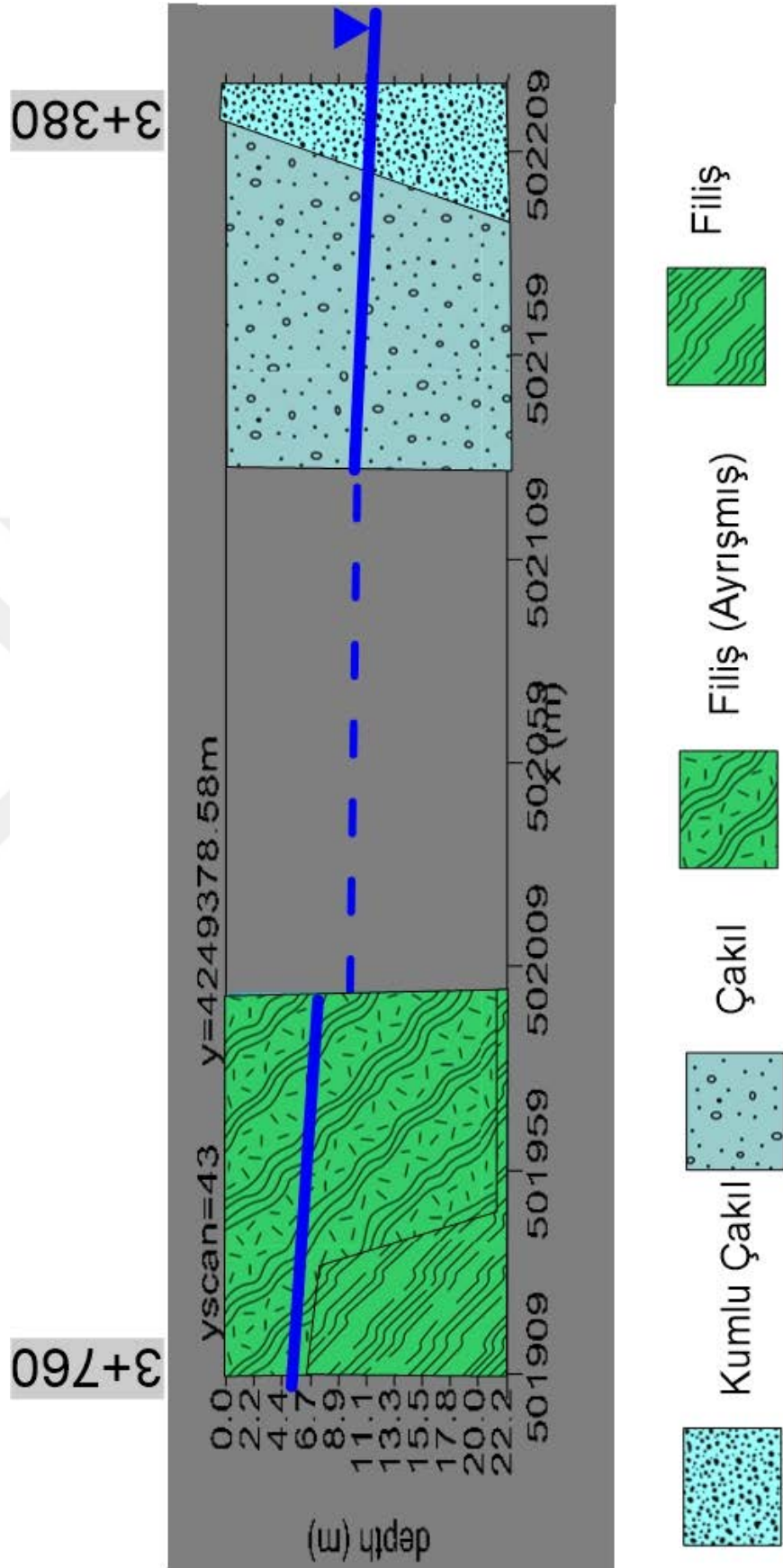


Şekil 4. 42 15 metre derinlik seviyesi haritası



Şekil 4. 43 20 metre derinlik seviyesi haritası

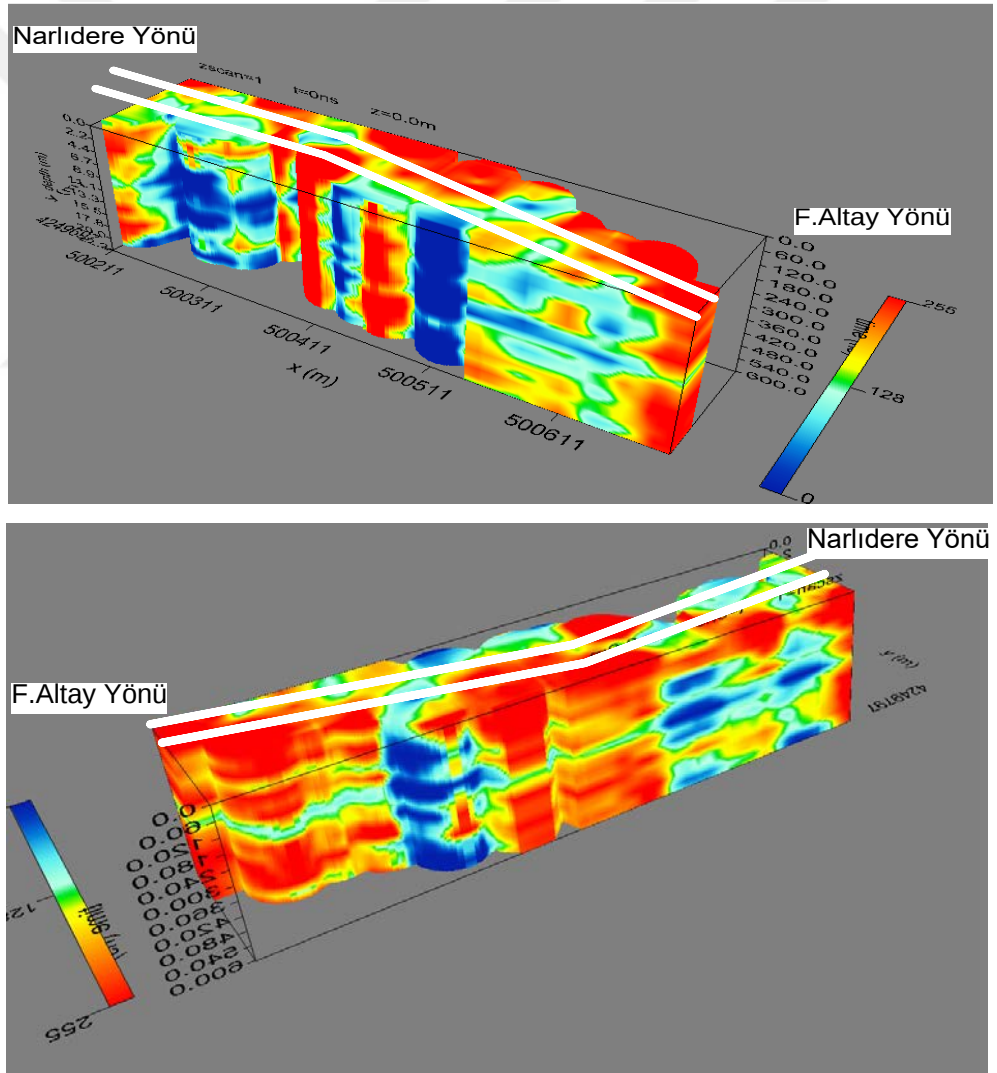
Yer altı su seviyesinin 5-10 aralığının da yer aldığı bu kesimde kumlu çakıllı seviyeler yer altı suyunu yanal ve düşey yönde hareket edebileceği akifer ortamlardır. Yapılaşmanın sık olmadığı bu kesimde yüzeyden beslenme yüksek olacaktır. Filiş birimi ise ayrılmış yapıda ve geçirimsizliği düşük olacaktır (Şekil 4.44).



Şekil 4. 44 KM:3+380-3+760 arası jeolojik kesit

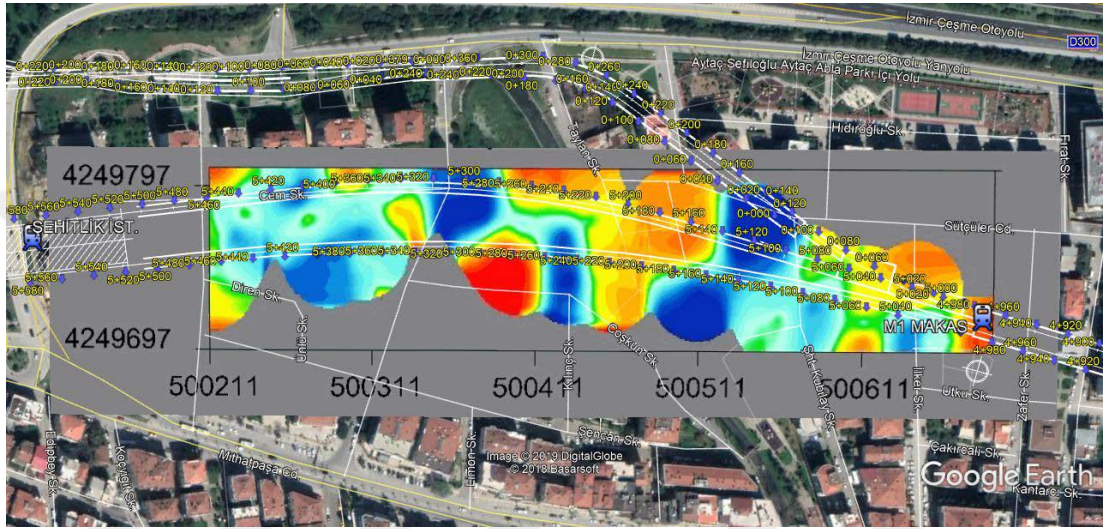
- KM: 4+980-5+460:

Güzergahın Dokuz Eylül istasyonun da yer aldığı bu kesiminde alınan ölçümlerin birleştirilmesi ile elde edilen 3 boyutlu modelde yüksek genlikli yansımaların KM:5+200-5+220 metreleri arasında yer alan akarsuyun olduğu kesimlerde görülmektedir. Renk skalasında kırmızı ve tonları ile gösterilen kesimler akarsuyun getirdiği çökeller ve olasılıkla eski yatakları olarak değerlendirilmelidir. KM:5+260-5+300 arasında yer alan yansımalar yine akarsuyun eski yatağı olarak yorumlanmıştır. Alüvyonun bu kesimi geçirgen birimlerden oluşmakta ve yanal ve düşey yönde yer altı suyu hareketine olanak tanımaktadır (Şekil 4.45).

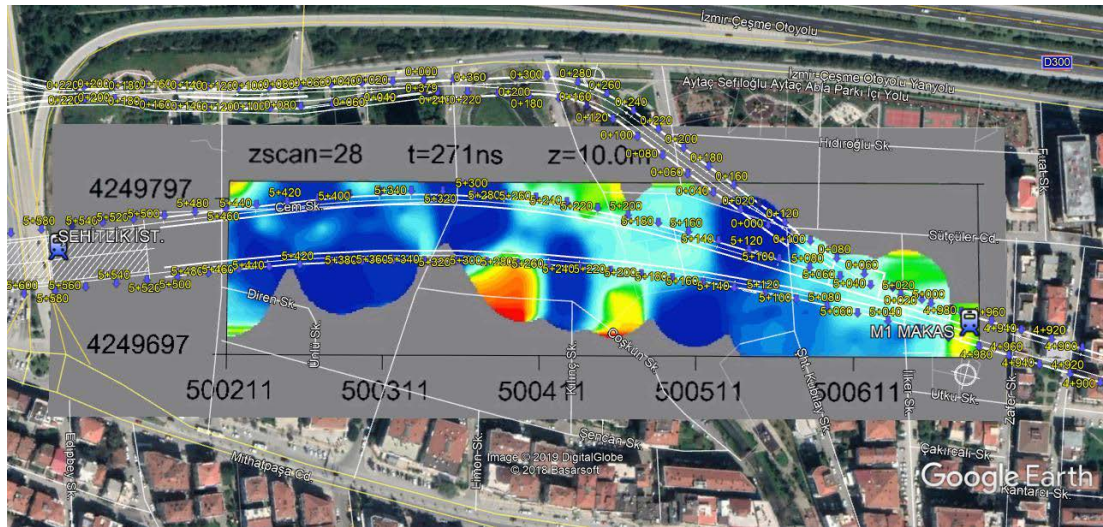


Şekil 4. 45 KM: 4+980-5+460 arası 3 boyutlu katı model

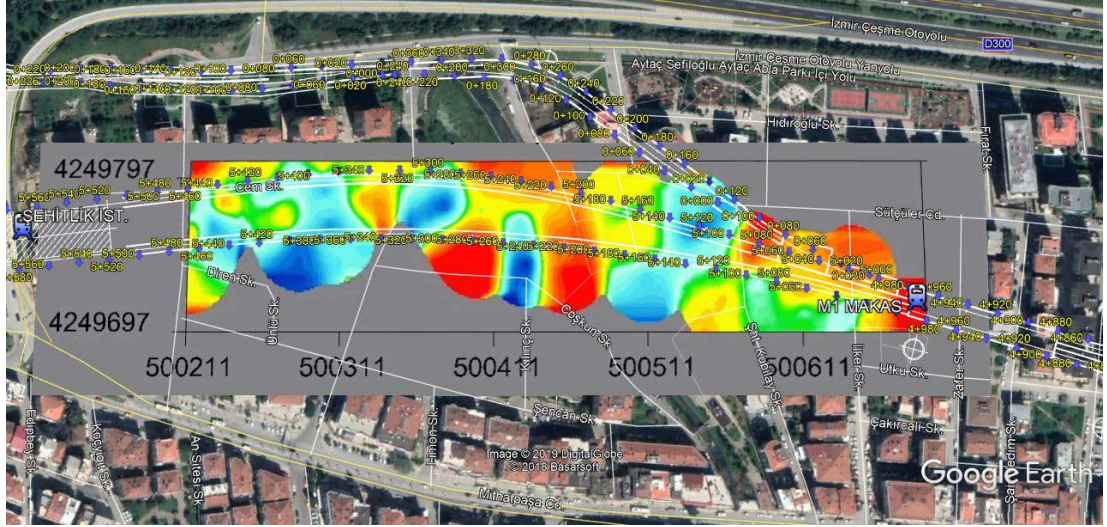
5, 10, 15 ve 20 metre derinlik seviyesi için hazırlanan haritada renk skalasında kırmızı ve tonları ile gösterilen kesimlerde akifer özelliği gösterebilecek geçirimsizliği yüksek olan kesimlere karşılık gelmektedir. Güzergahın kestiği akarsuyun etkisi KM:5+140-5+300 metreleri arasında yer alan kesimde kendini göstermektedir. Bu kesimde akarsuyun taşıdığı malzemelerin etkisi 20 metre derinlik seviyesinde de gözlenmektedir.



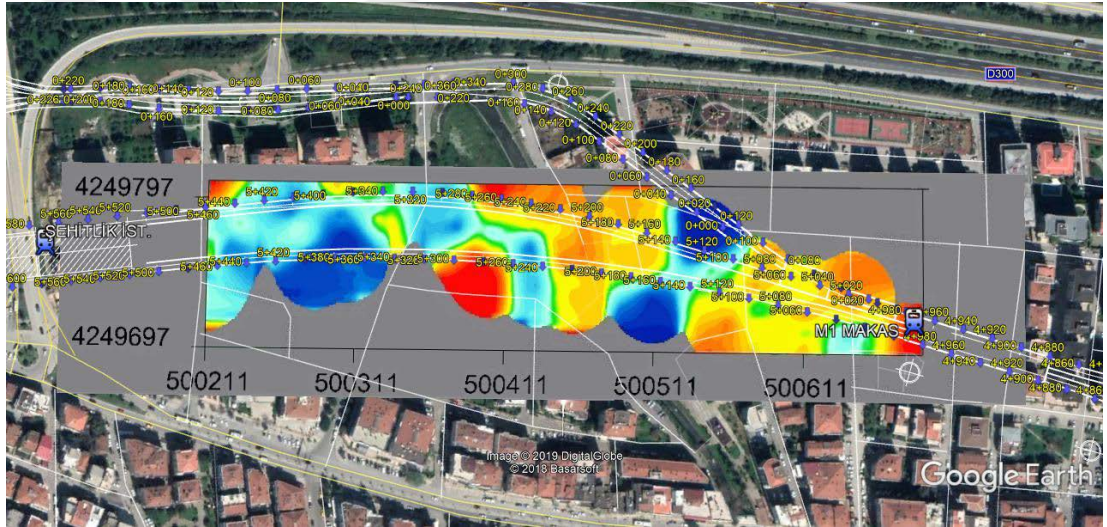
Şekil 4. 46 5 metre derinlik seviyesi haritası



Şekil 4. 47 10 metre derinlik seviyesi haritası

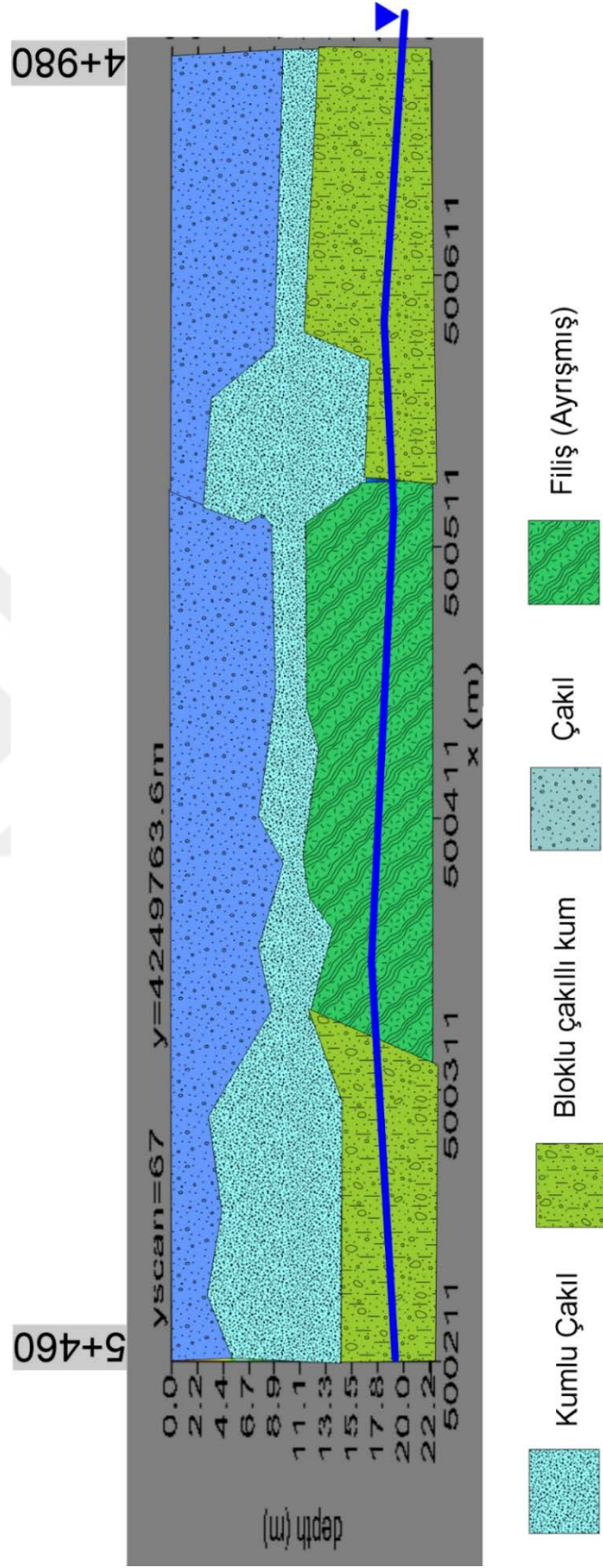


Şekil 4. 48 15 metre derinlik seviyesi haritası



Şekil 4. 49 20 metre derinlik seviyesi haritası

Yer altı su seviyesinin 20 metre civarında olduğu bu kesim yer altı suyunun yanal ve düşey yönde hareketine imkan tanıyan geçirimli birimlerden oluşmaktadır. Özellikle 10-13 metre arasında ki akifer özelliğinde ki birim yer altı suyunun tünel derinliğine hareketine olanak sağlamaktadır. KM:5+200-5+220 arasında yer alan akarsuyun bu akifer ortamı besleme ve yanal yönde güzergaha etkisi olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Şekil 4.50).

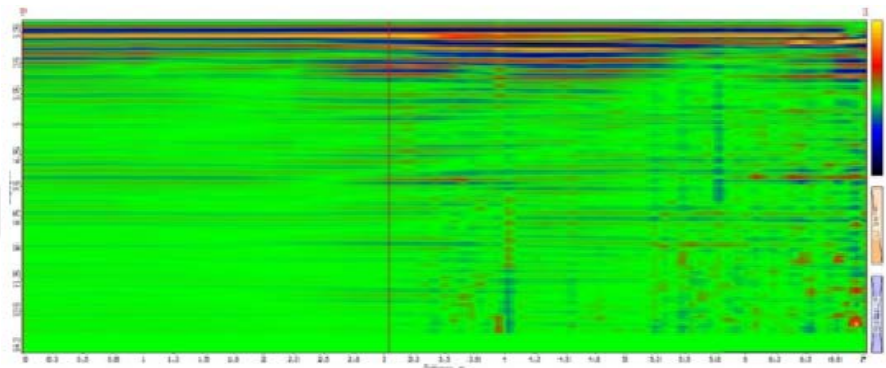


Şekil 4. 50 KM:4+980-5+460 arası jeolojik kesit

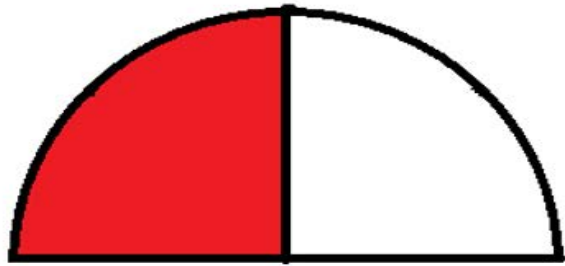
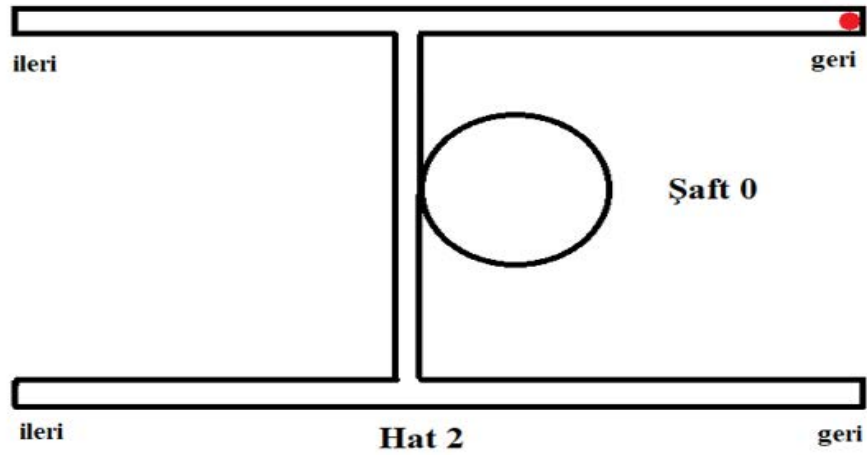
Yer radarı ile yapılan yer üstü uygulamaları tamamlandıktan sonra, tünel aynalarındaki uygulamalar yapılmıştır. Tünel aynalarındaki yer radarı uygulamaları aşağıda verilmiştir.

- Şaft 0 Yer Radarı Görüntülerinin Değerlendirilmesi:

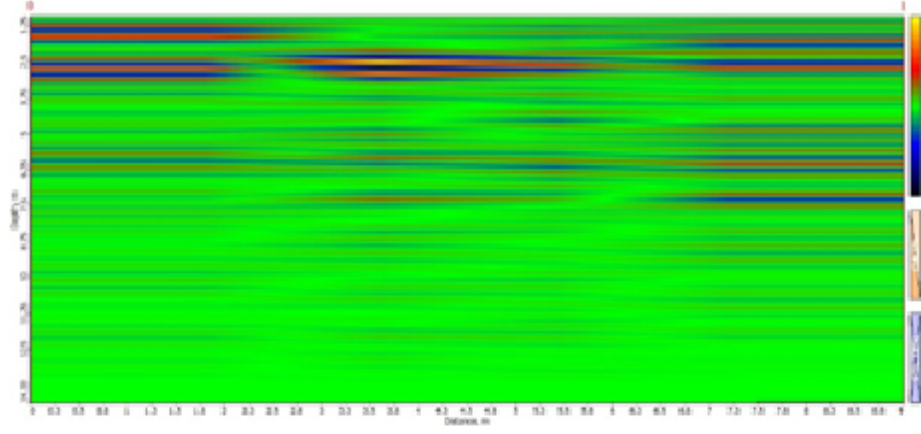
Şaft 0 Hat 1 ve Hat 2’de alınan yer radarı görüntüleri aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



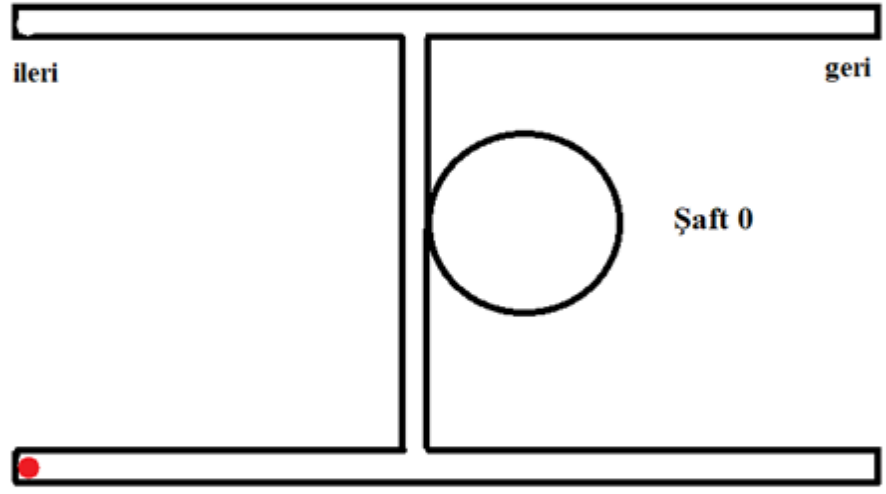
Hat1



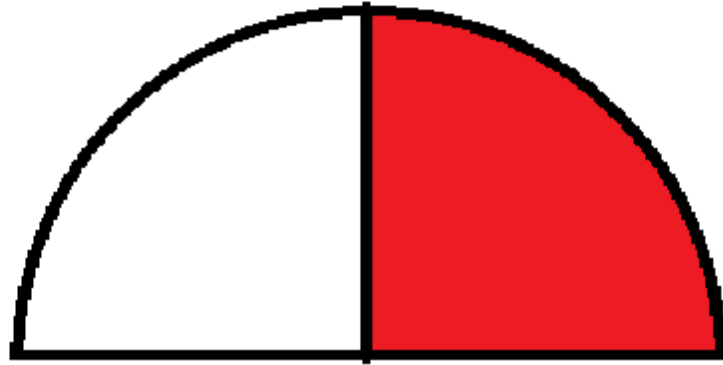
Şekil 4. 51 Hat 1 geri sol yarı



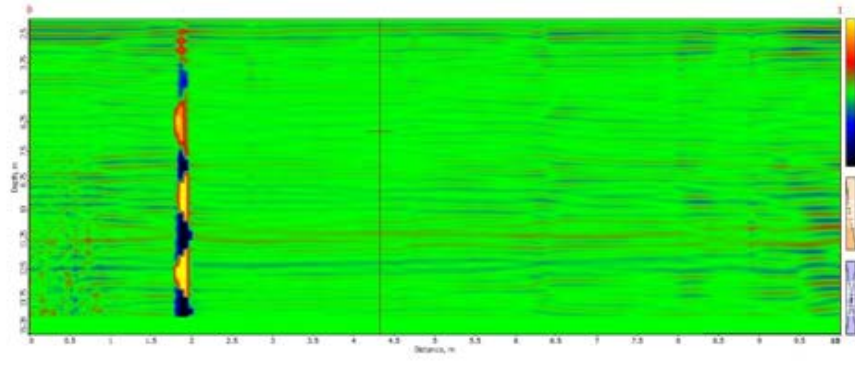
Hat1



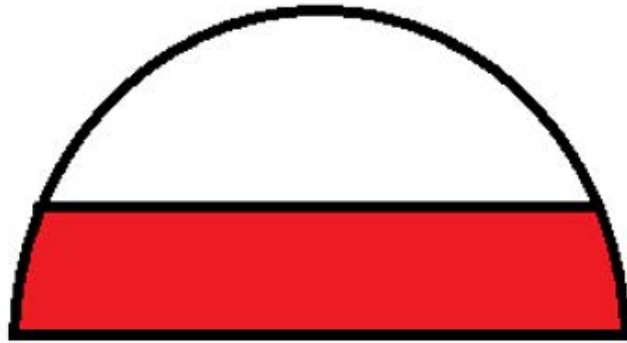
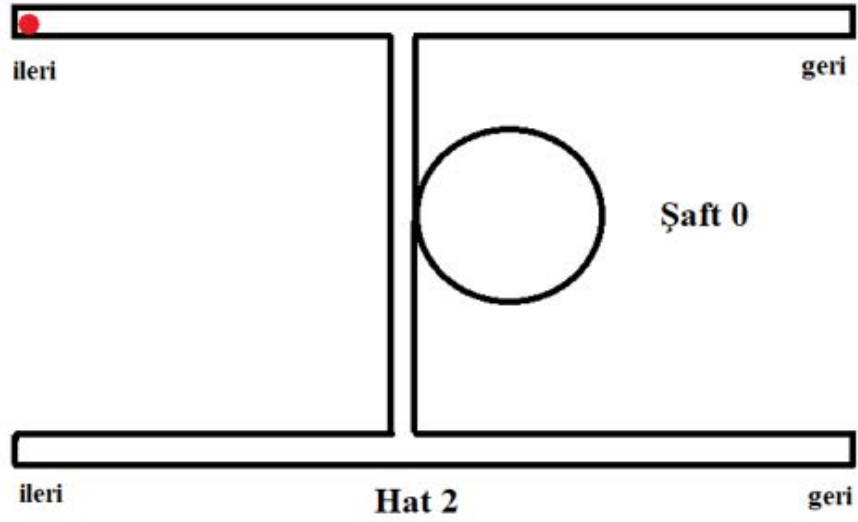
Hat 2



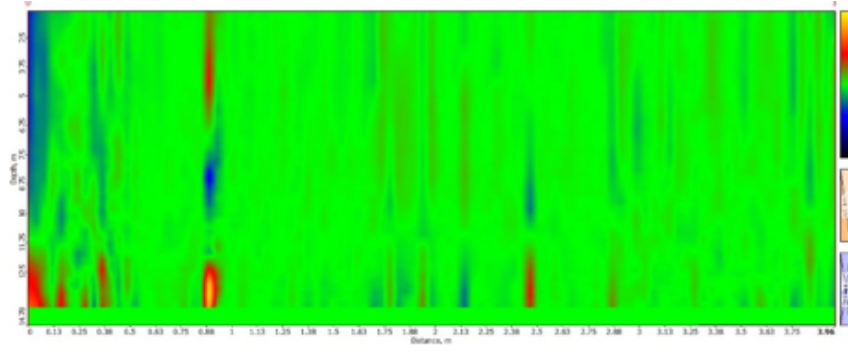
Şekil 4. 52 Hat 2 ileri sağ yarı



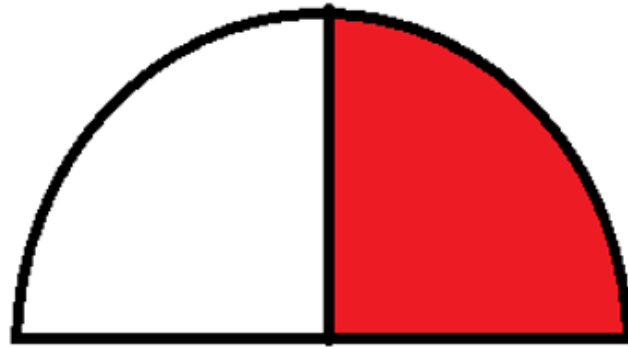
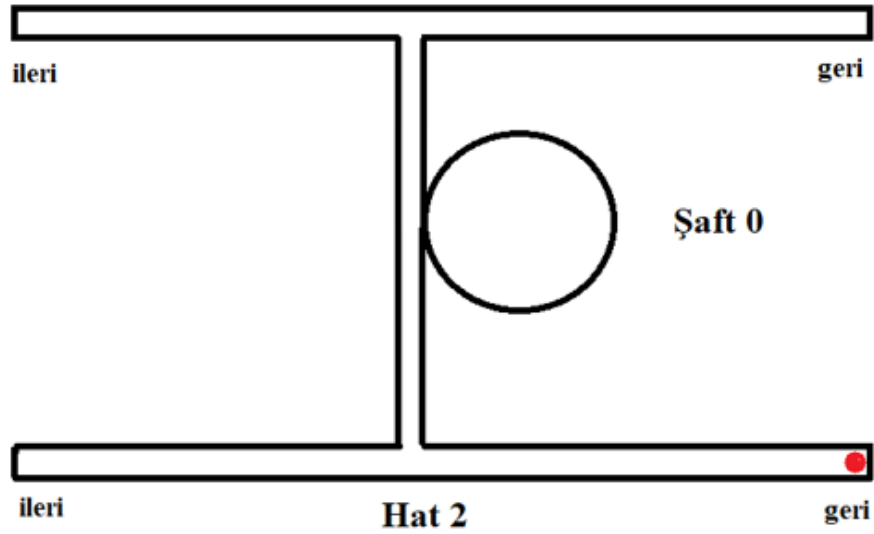
Hat1



Şekil 4. 53 Hat 1 ileri alt yarı



Hat1

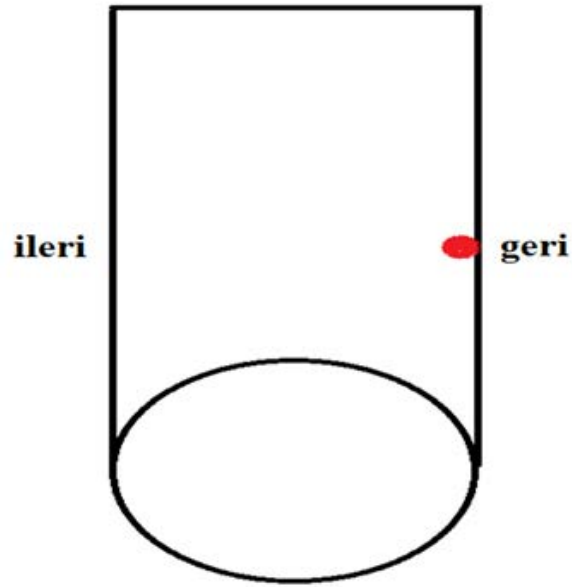
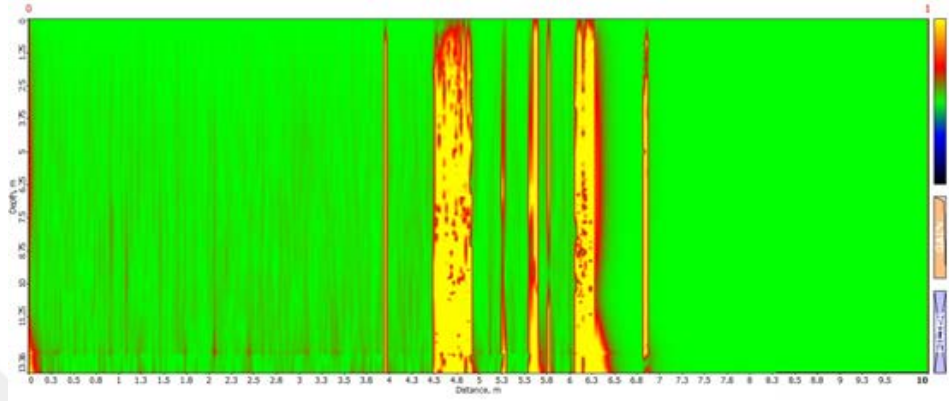


Şekil 4. 54 Hat 2 geri sağ yarı

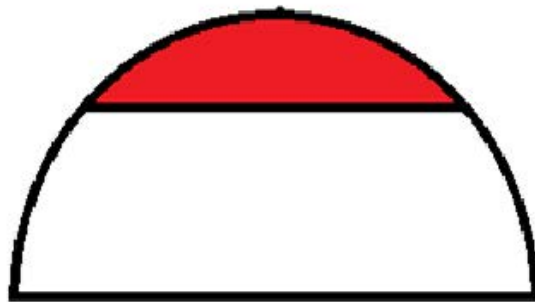
Alınan ham görüntüler filtreleme aşamalarından geçirilmiş olup; aynalardan yaklaşık 15 metre içeriye kadar herhangi bir yeraltı boşluğu görülmemektedir.

- Makas Şaftı 1 Yer Radarı Görüntülerinin Değerlendirilmesi:

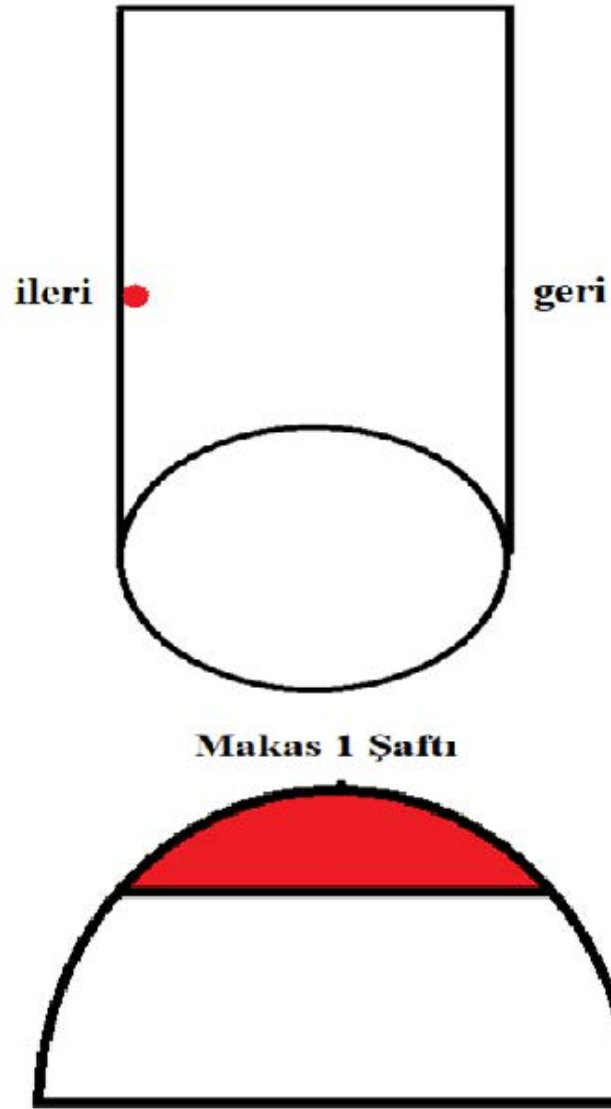
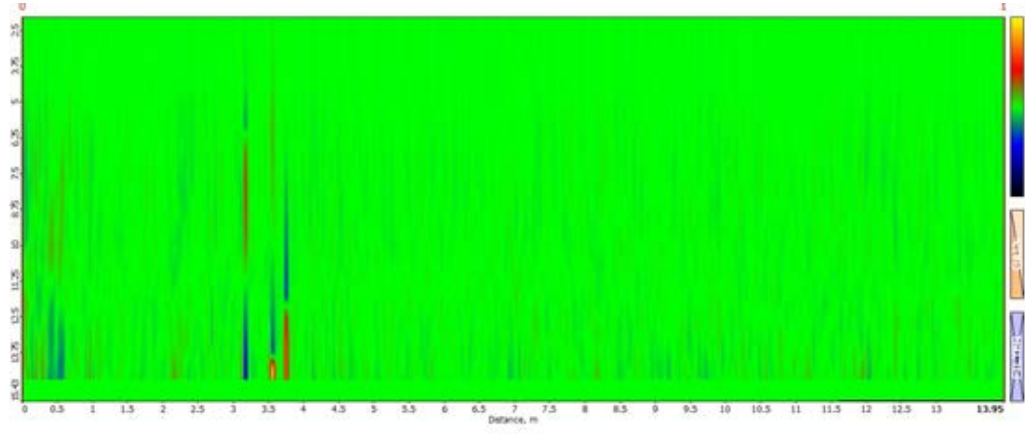
Makas Şaftı 1 T1'de alınan yer radarı görüntüleri aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



Makas 1 Şaftı



Şekil 4. 55 T1 geri üst yarı

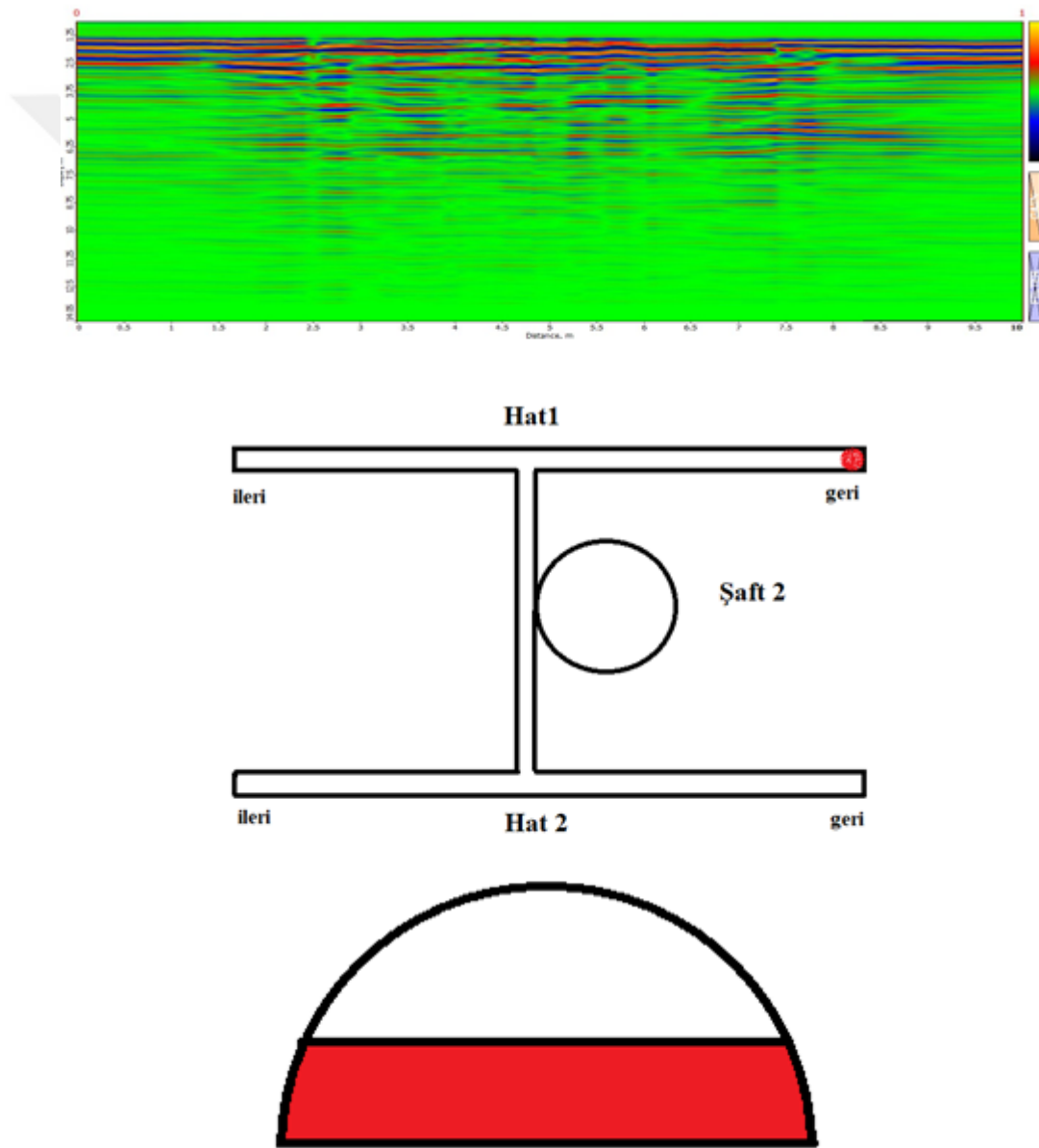


Şekil 4. 56 T1 ileri üst yarı

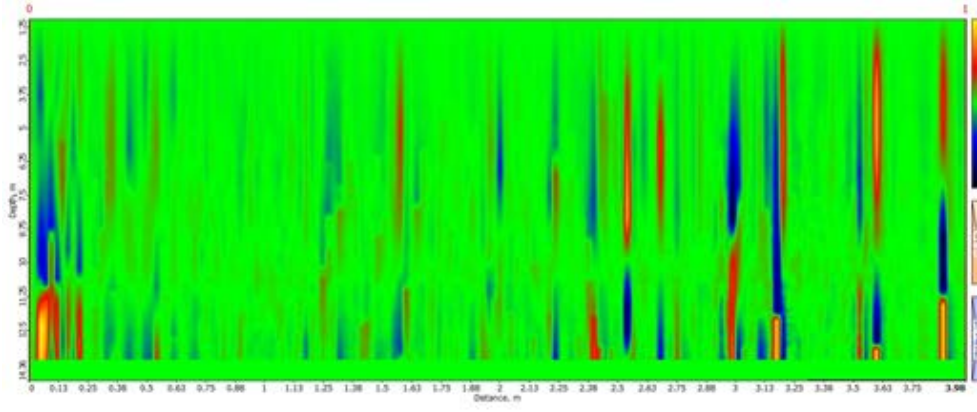
Alınan ham görüntüler filtreleme aşamalarından geçirilmiş olup; aynalardan yaklaşık 15 metre içeriye kadar herhangi bir yeraltı boşluğu görülmemektedir. Yer radarı görüntülerinde aynaya çakılan ayna çivileri görülmektedir.

- Şaft 2 Yer Radarı Görüntülerinin Değerlendirilmesi:

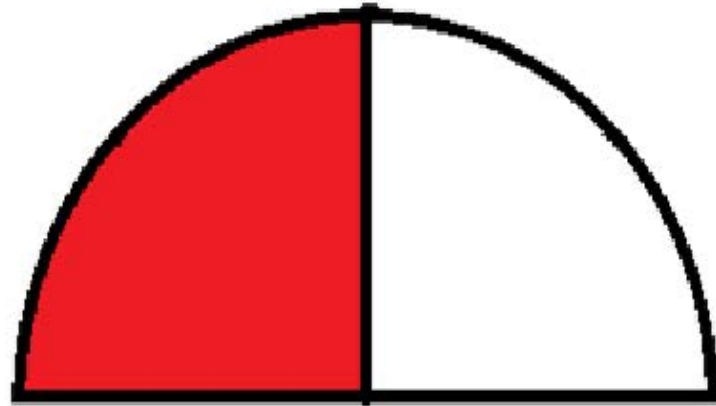
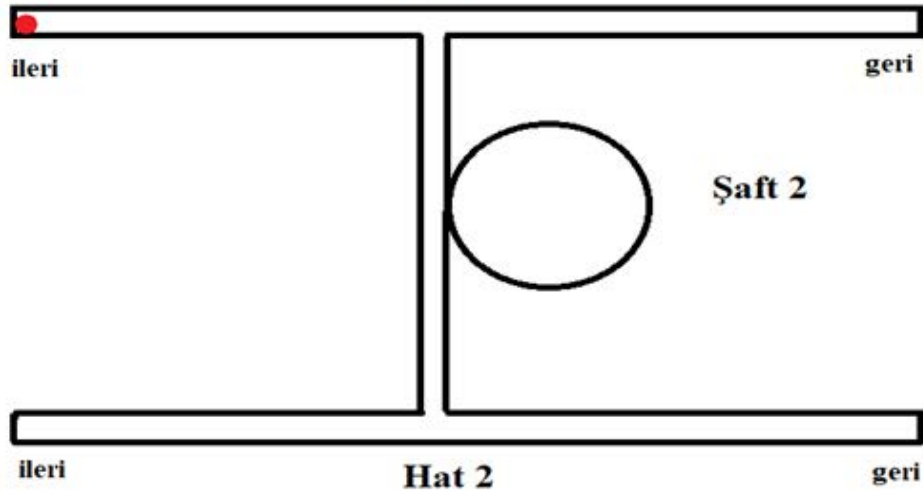
Şaft 2 Hat 1 ve Hat 2’de alınan yer radarı görüntüleri aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



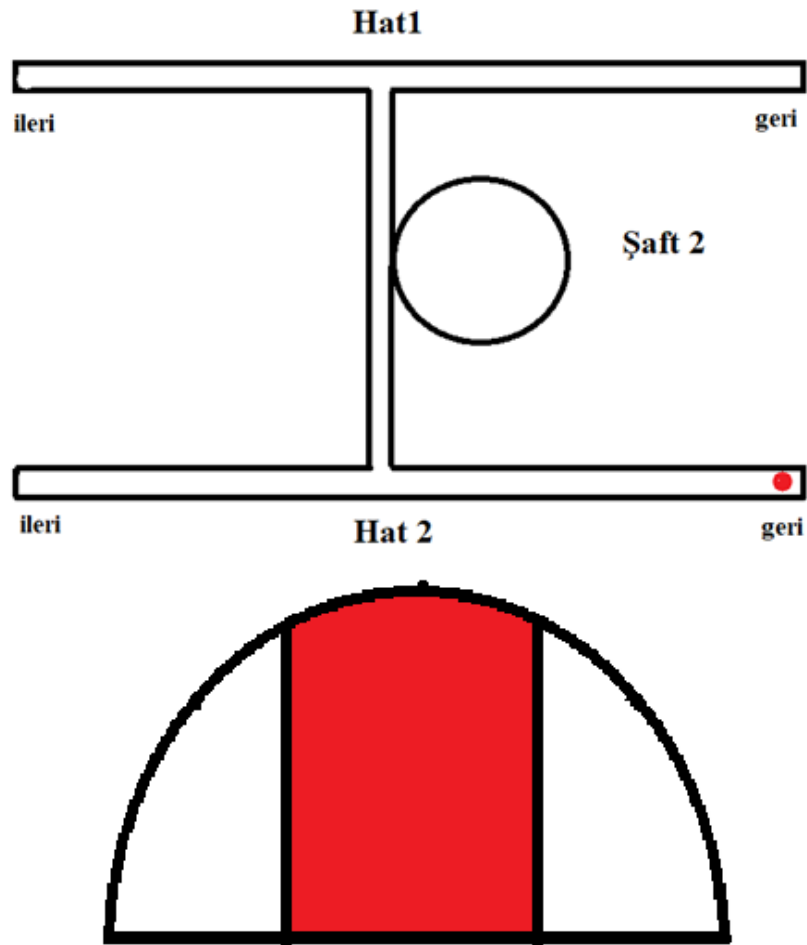
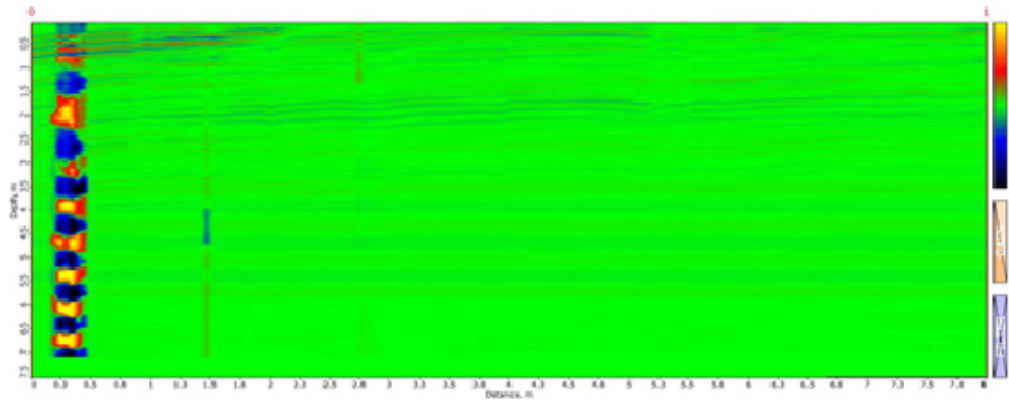
Şekil 4. 57 Hat 1 geri alt yarı



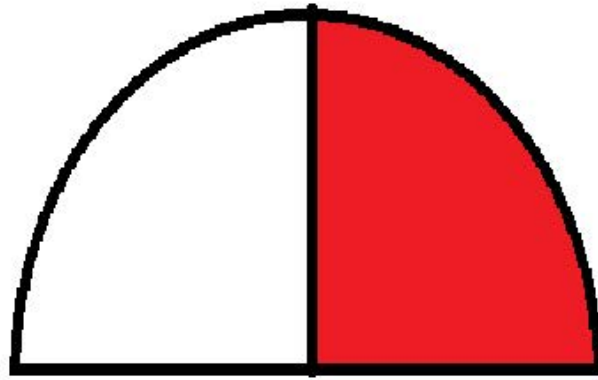
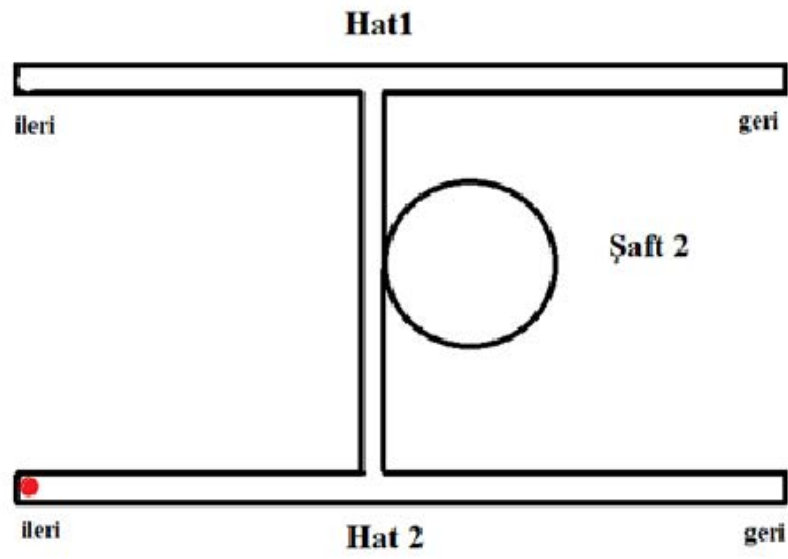
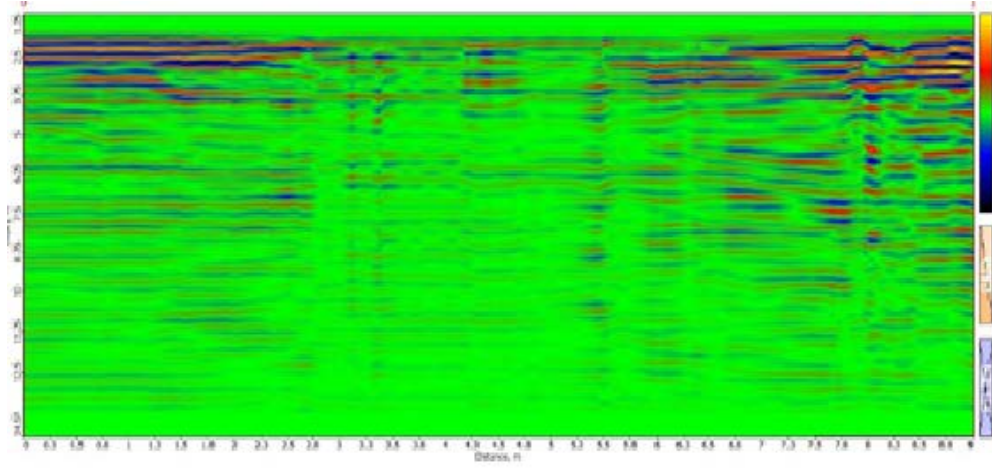
Hat1



Şekil 4. 58 Hat 1 ileri sol yarı



Şekil 4. 59 Hat 2 geri ayna ortası

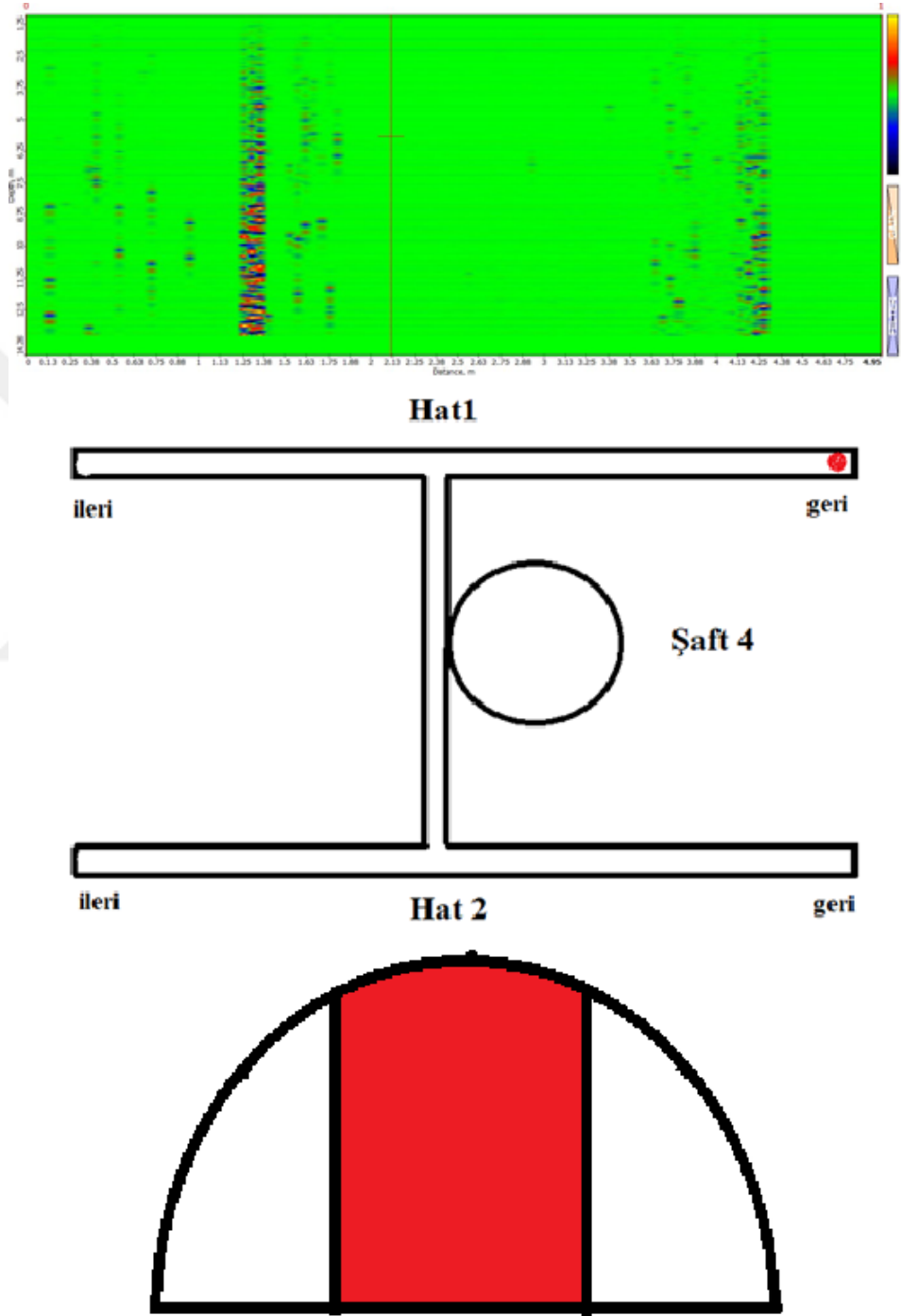


Şekil 4. 60 Hat 2 ileri sağ yarı

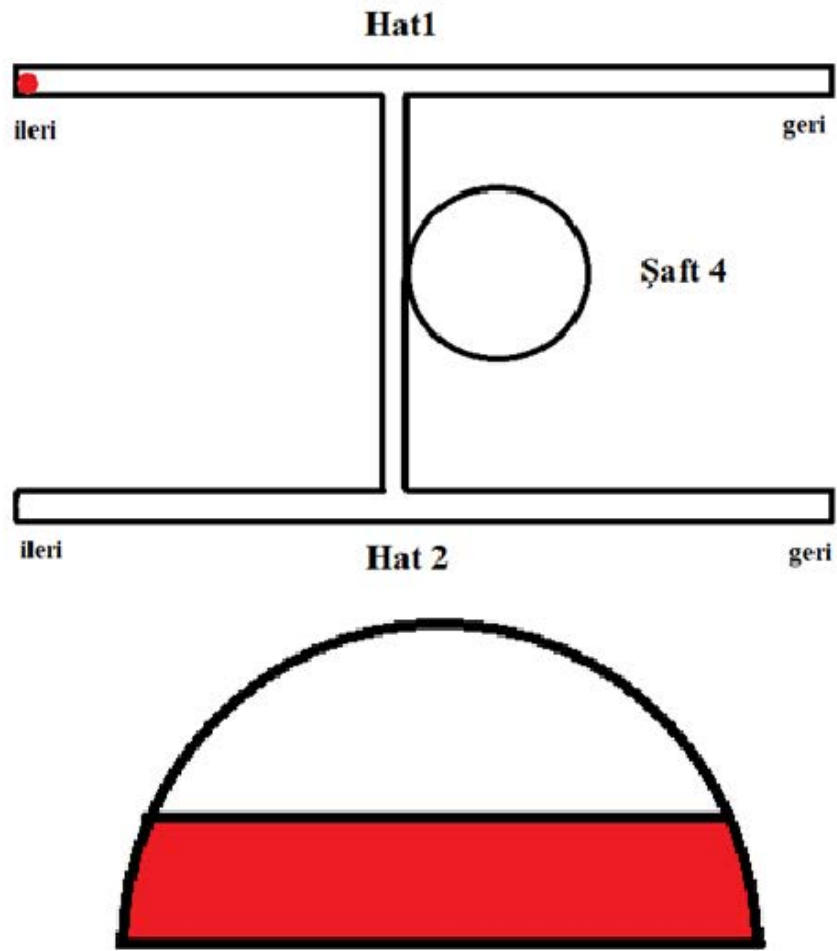
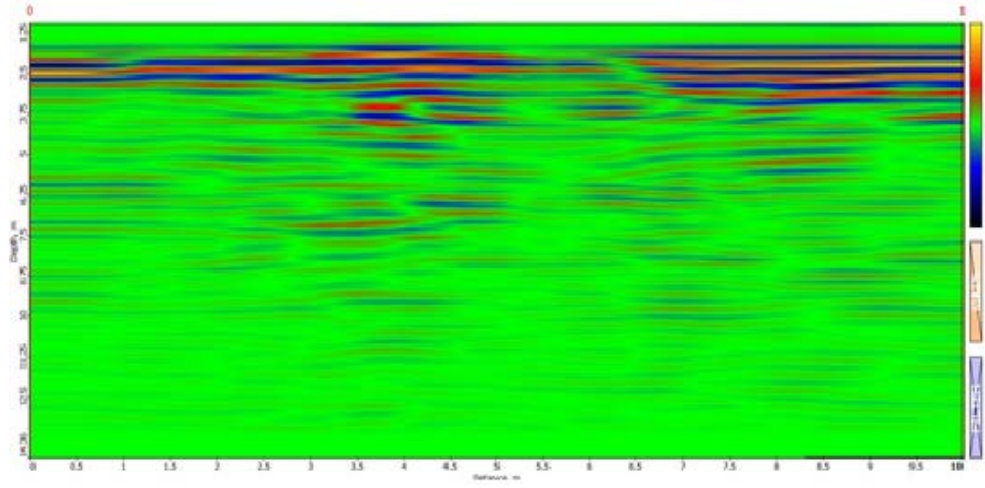
Alınan ham görüntüler filtreleme aşamalarından geçirilmiş olup; aynalardan yaklaşık 15 metre içeriye kadar herhangi bir yeraltı boşluğu görülmemektedir. Yer radarı görüntülerinde aynaya çakılan ayna çivileri görülmektedir.

- Şaft 4 Yer Radarı Görüntülerinin Değerlendirilmesi:

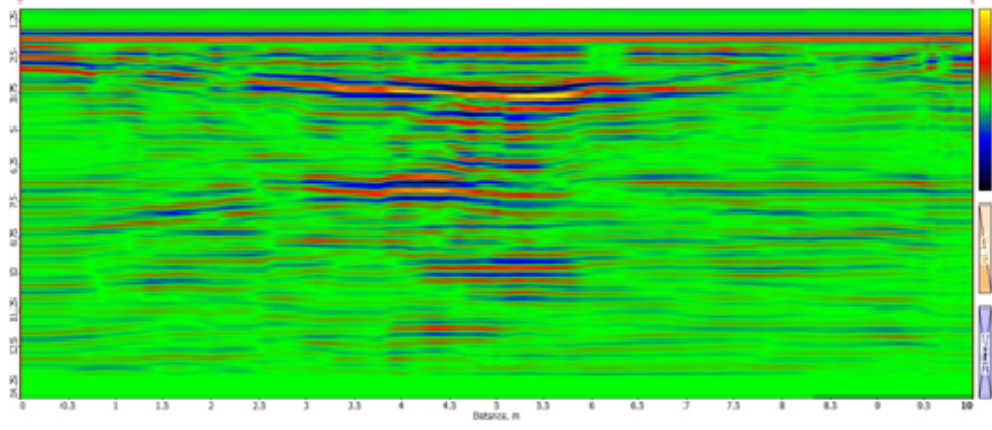
Şaft 4 Hat 1 ve Hat 2’de alınan yer radarı görüntüleri aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



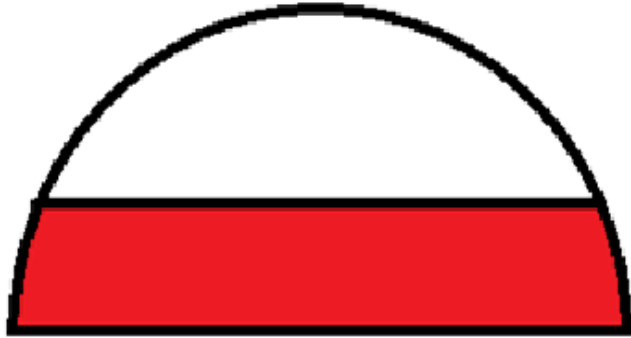
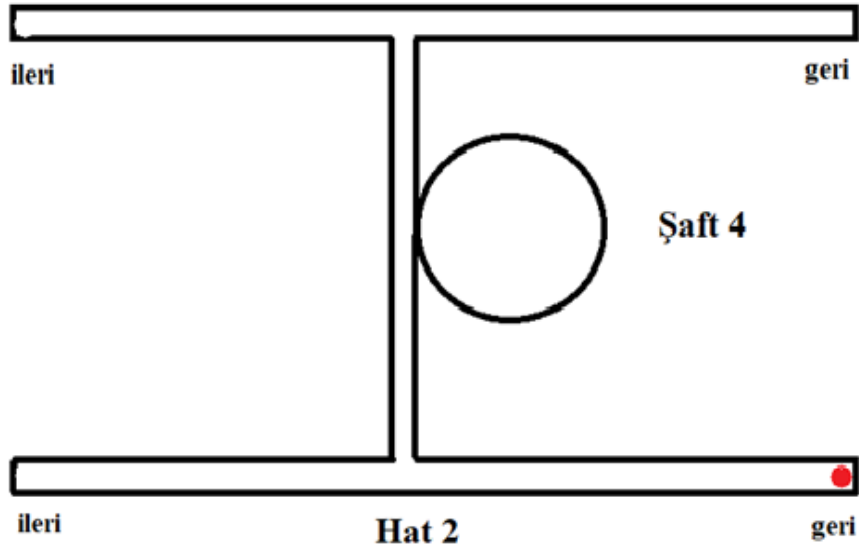
Şekil 4. 61 Hat 1 geri ayna ortası



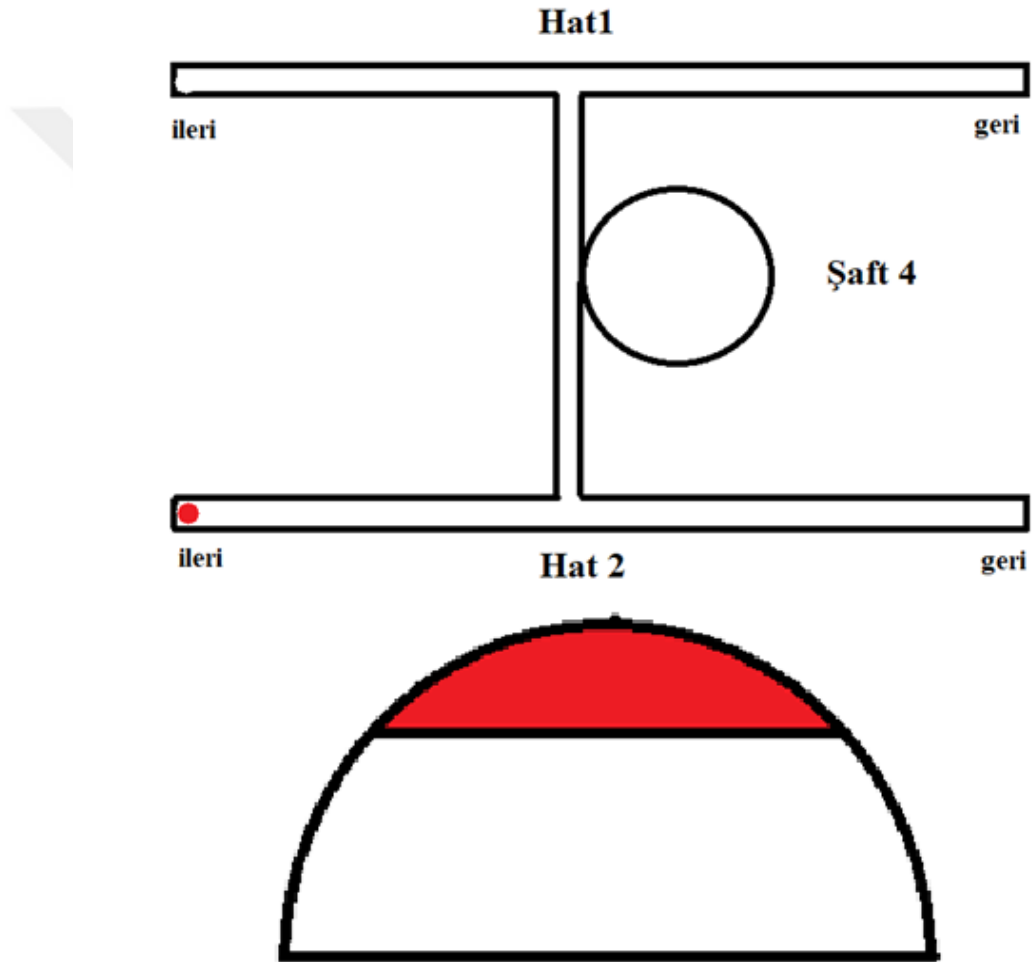
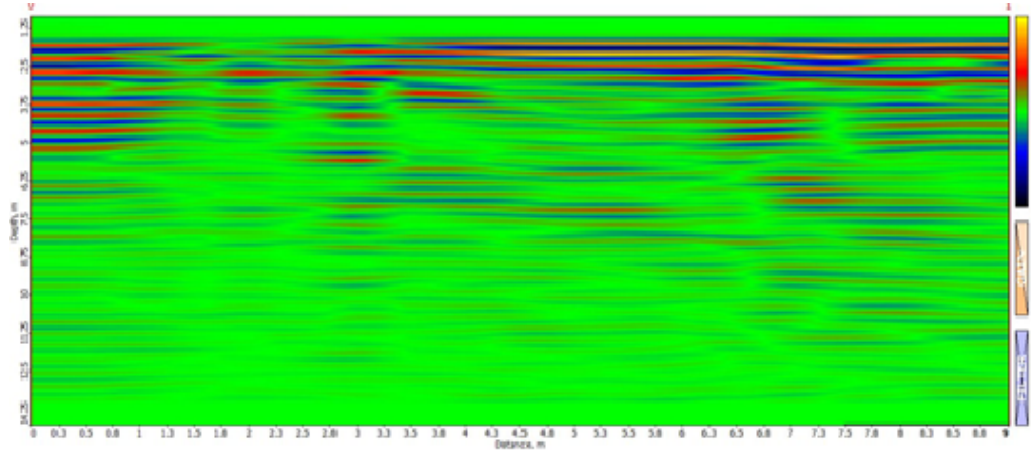
Şekil 4. 62 Hat 1 ileri alt yarı



Hat1



Şekil 4. 63 Hat 2 geri alt yarı

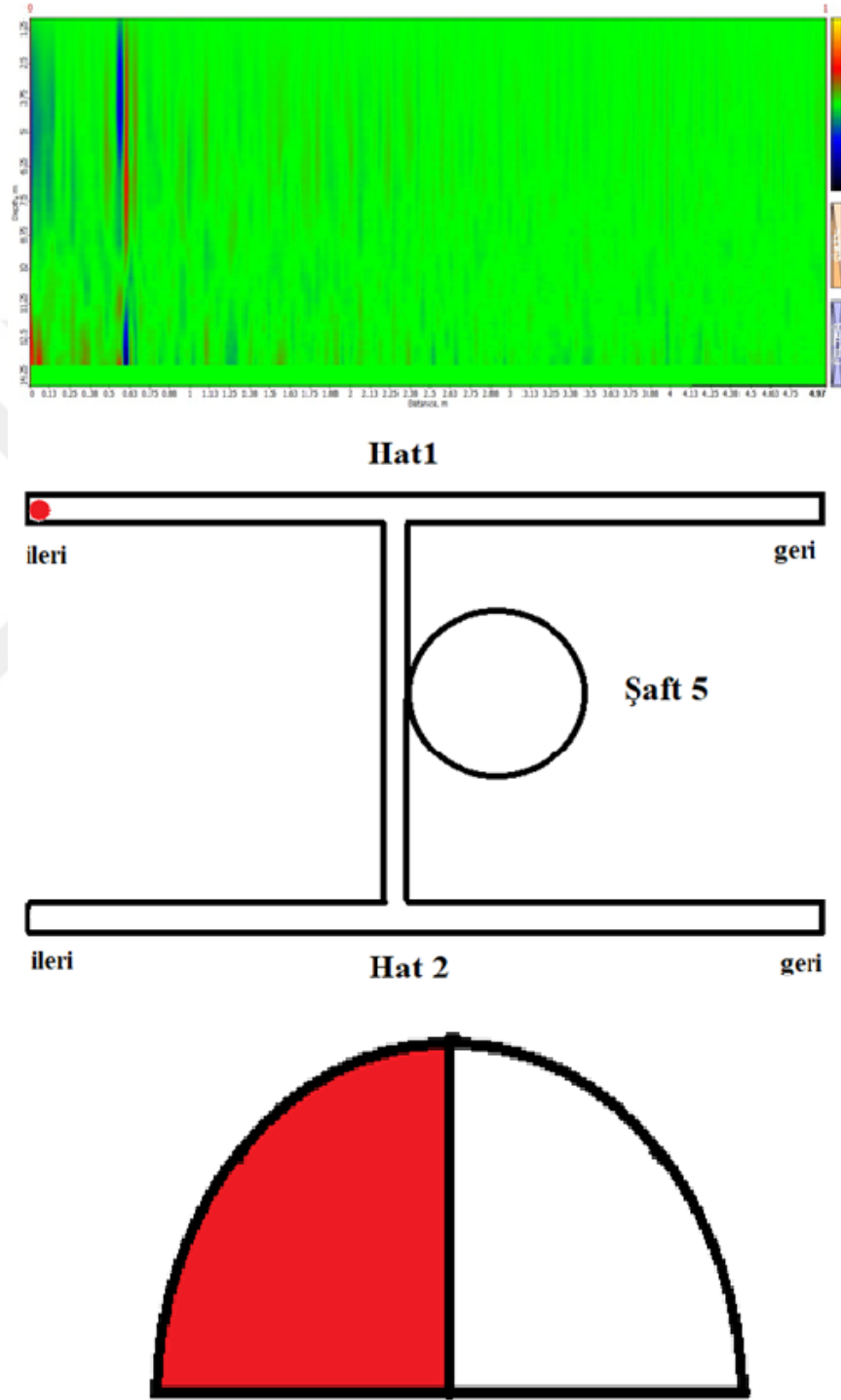


Şekil 4. 64 Hat 2 ileri üst yarı

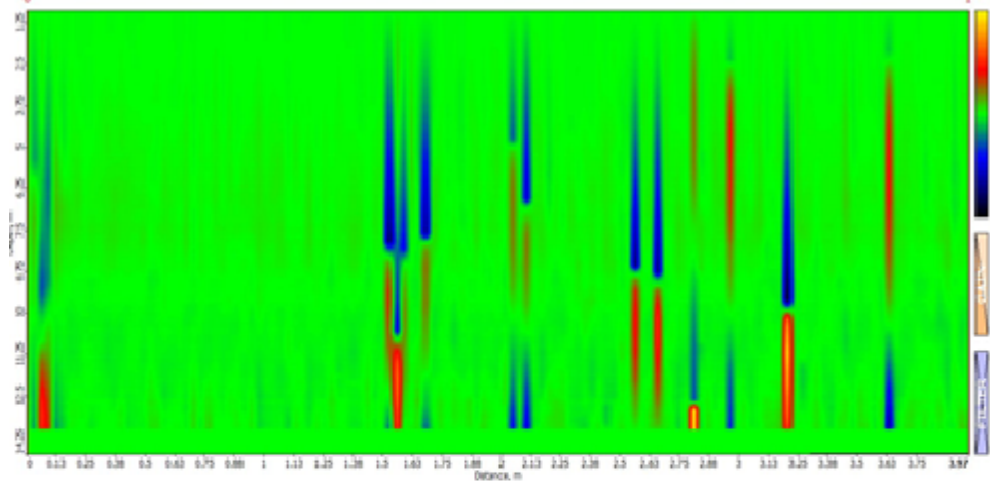
Alınan ham görüntüler filtreleme aşamalarından geçirilmiş olup; aynalardan yaklaşık 15 metre içeriye kadar herhangi bir yeraltı boşluğu görülmemektedir.

- Şaft 5 Yer Radarı Görüntülerinin Değerlendirilmesi:

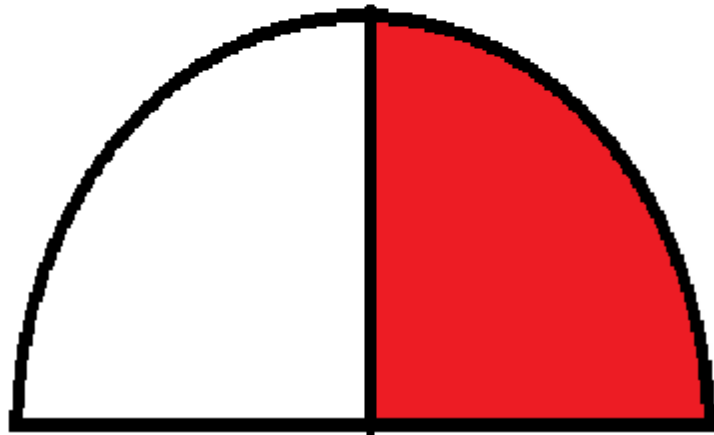
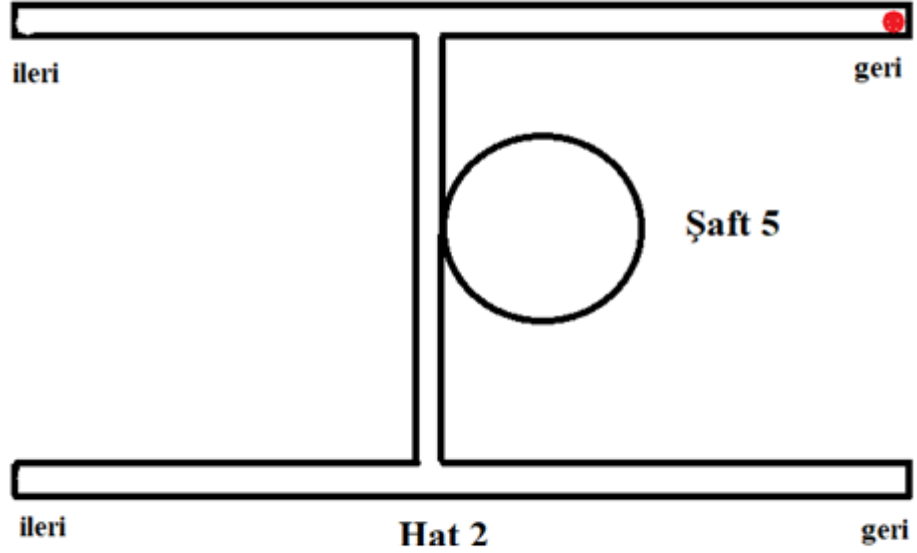
Şaft 5 Hat 1 ve Hat 2’de alınan yer radarı görüntüleri aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



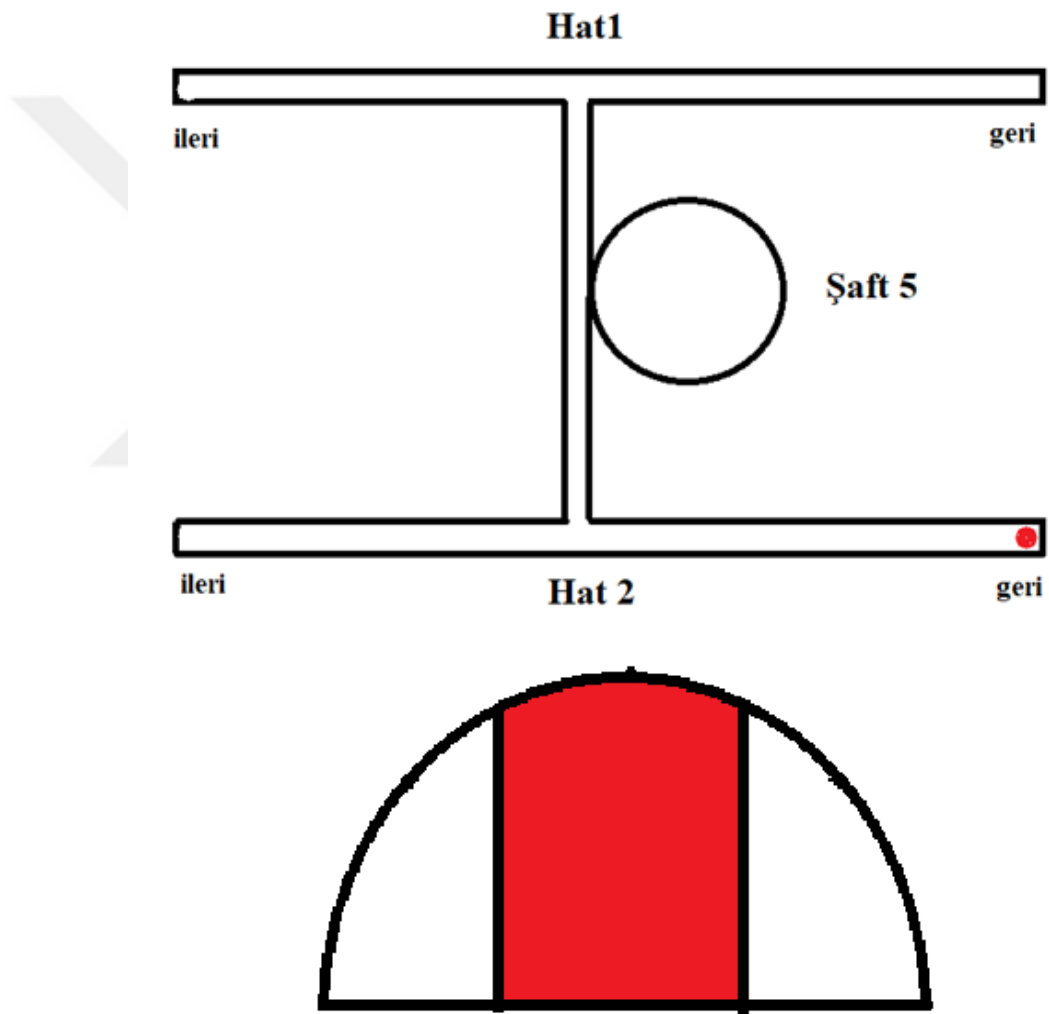
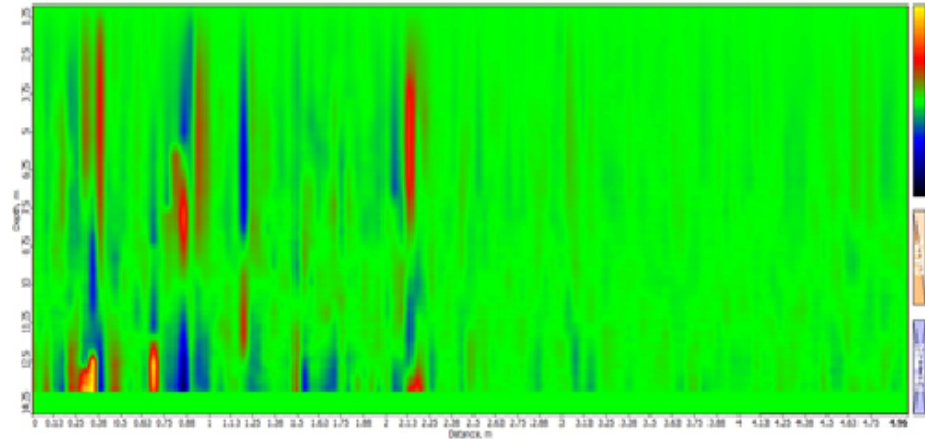
Şekil 4. 65 Hat 1 ileri sol yarı



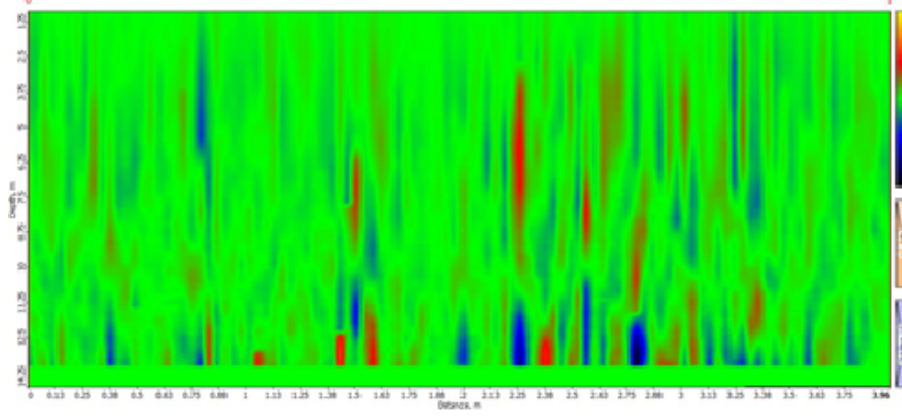
Hat1



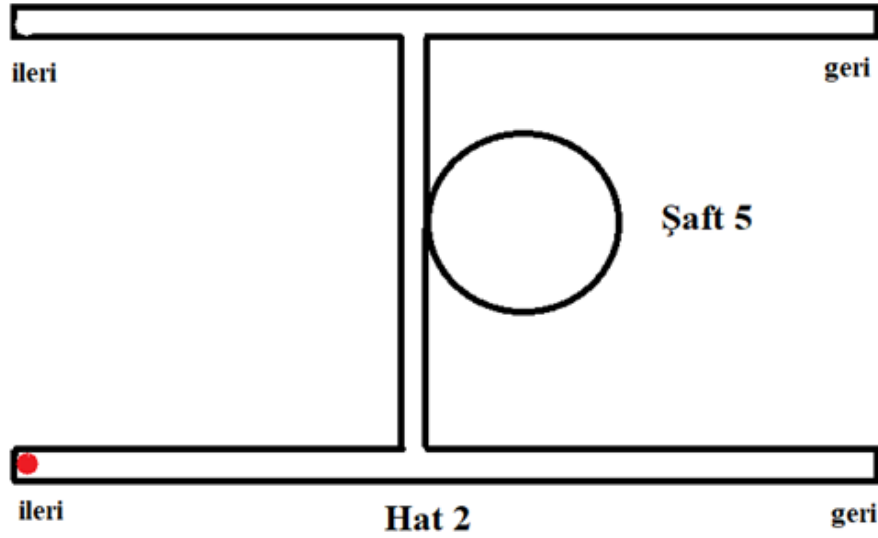
Şekil 4. 66 Hat 1 geri sağ yarı



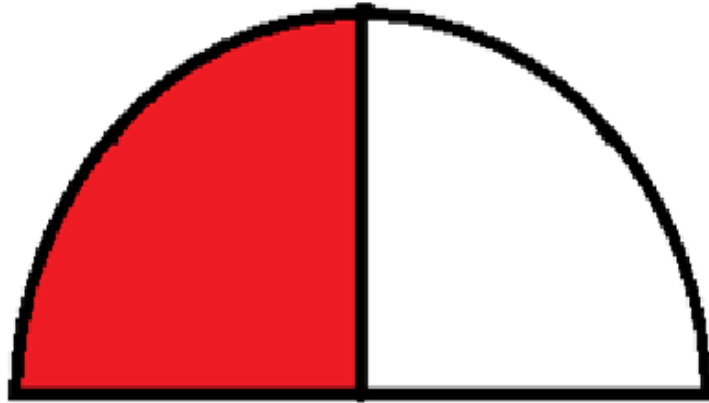
Şekil 4. 67 Hat 2 geri ayna ortası



Hat1



Hat 2

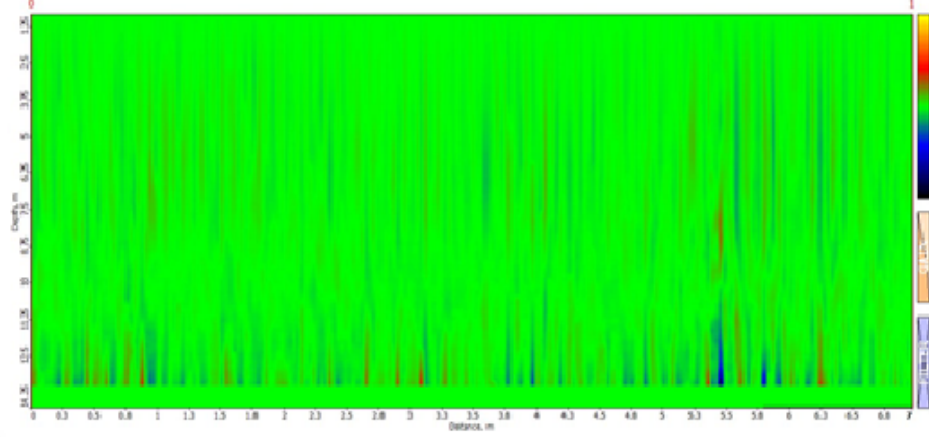


Şekil 4. 68 Hat 2 ileri sol yarı

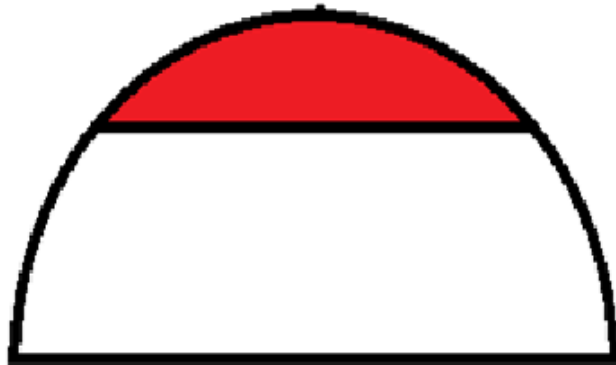
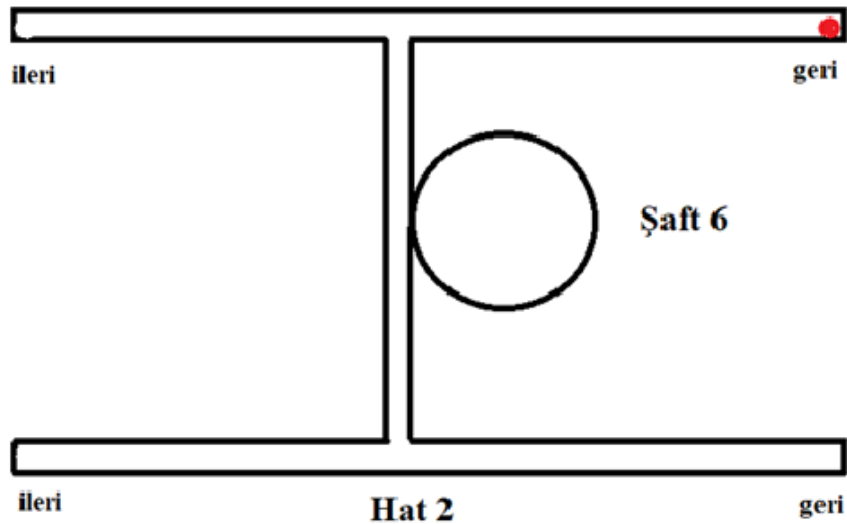
Alınan ham görüntüler filtreleme aşamalarından geçirilmiş olup; aynalardan yaklaşık 15 metre içeriye kadar herhangi bir yeraltı boşluğu görülmemektedir. Yer radarı görüntülerinde aynaya çakılan ayna çivileri görülmektedir.

- Şaft 6 Yer Radarı Görüntülerinin Değerlendirilmesi:

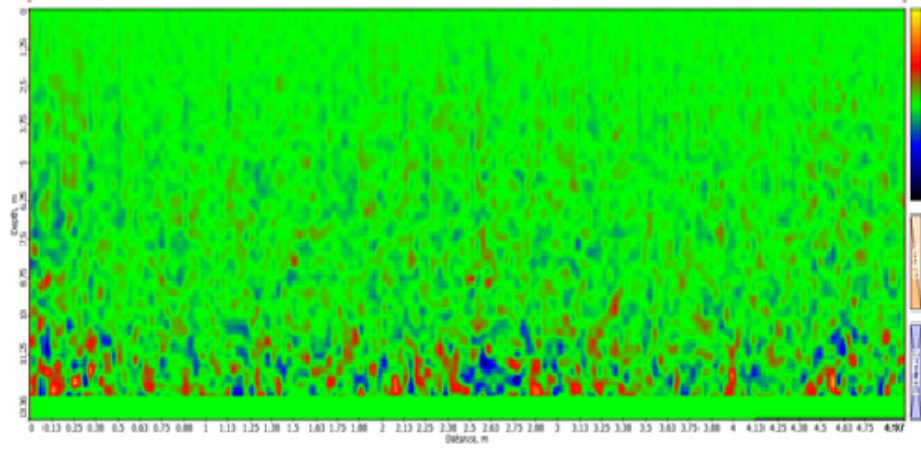
Şaft 6 Hat 1 ve Hat 2’de alınan yer radarı görüntüleri aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



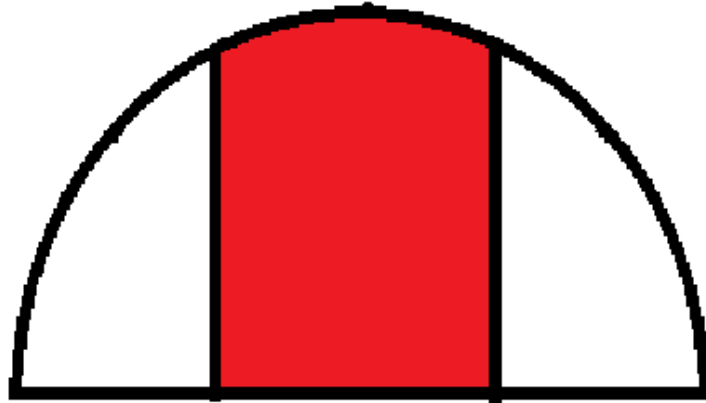
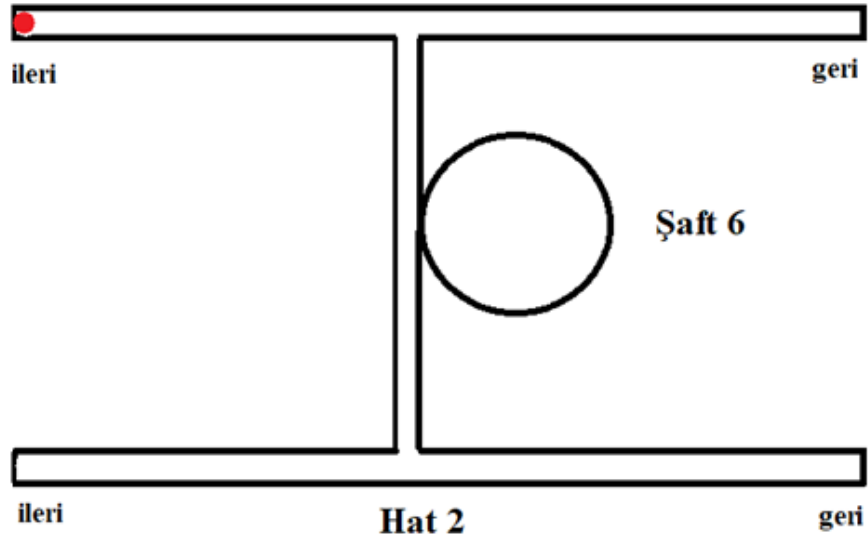
Hat1



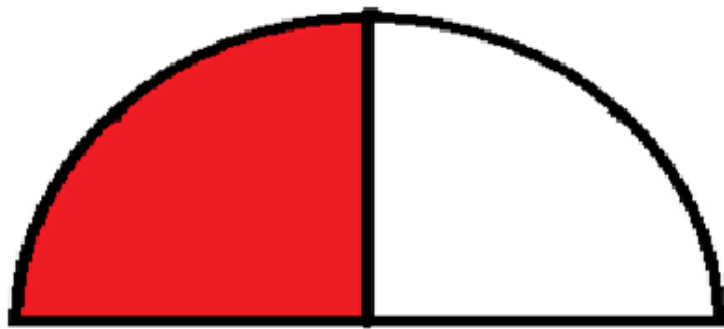
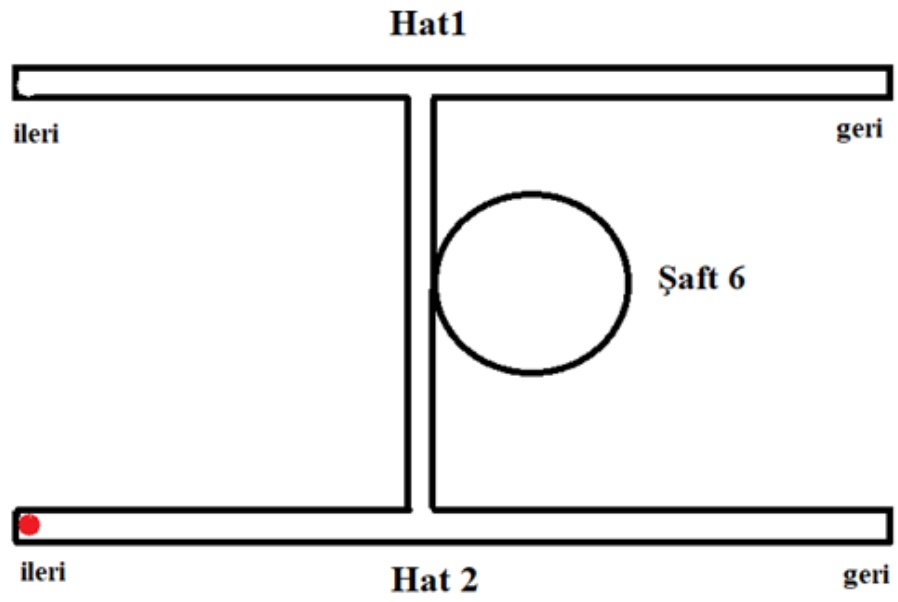
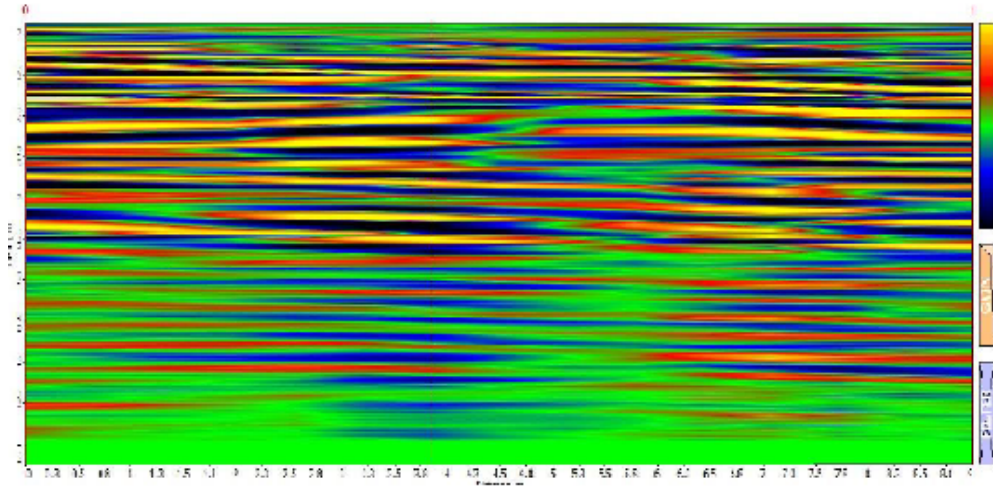
Şekil 4. 69 Hat 1 geri üst yarı



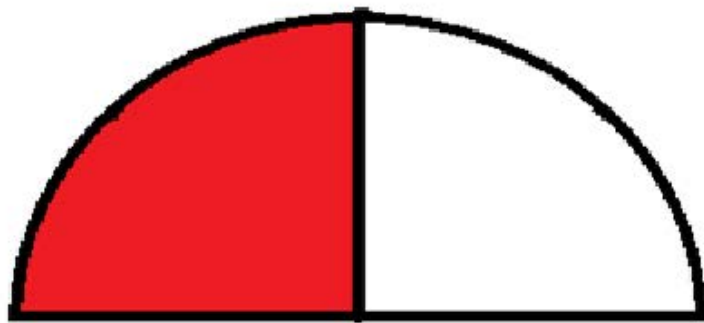
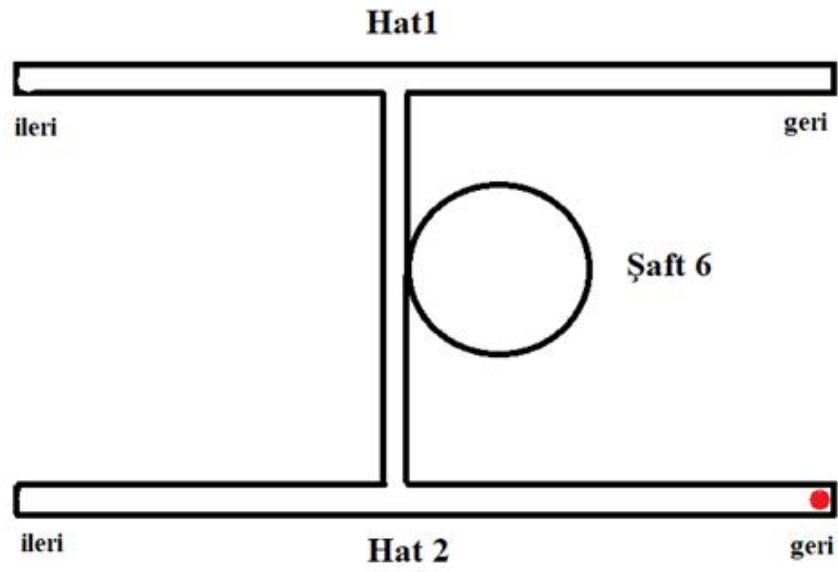
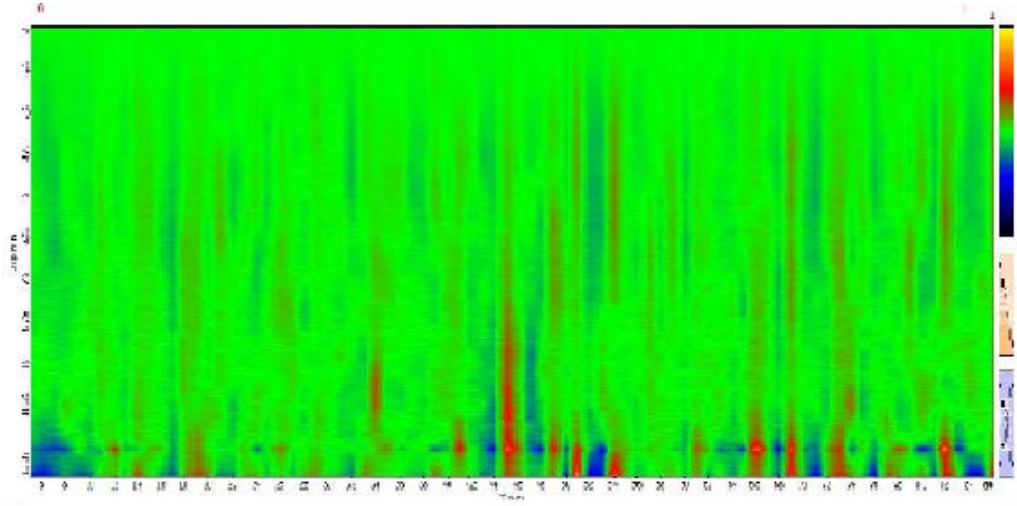
Hat1



Şekil 4. 70 Hat 1 ileri ayna ortası



Şekil 4. 71 Hat 2 ileri sol yarı

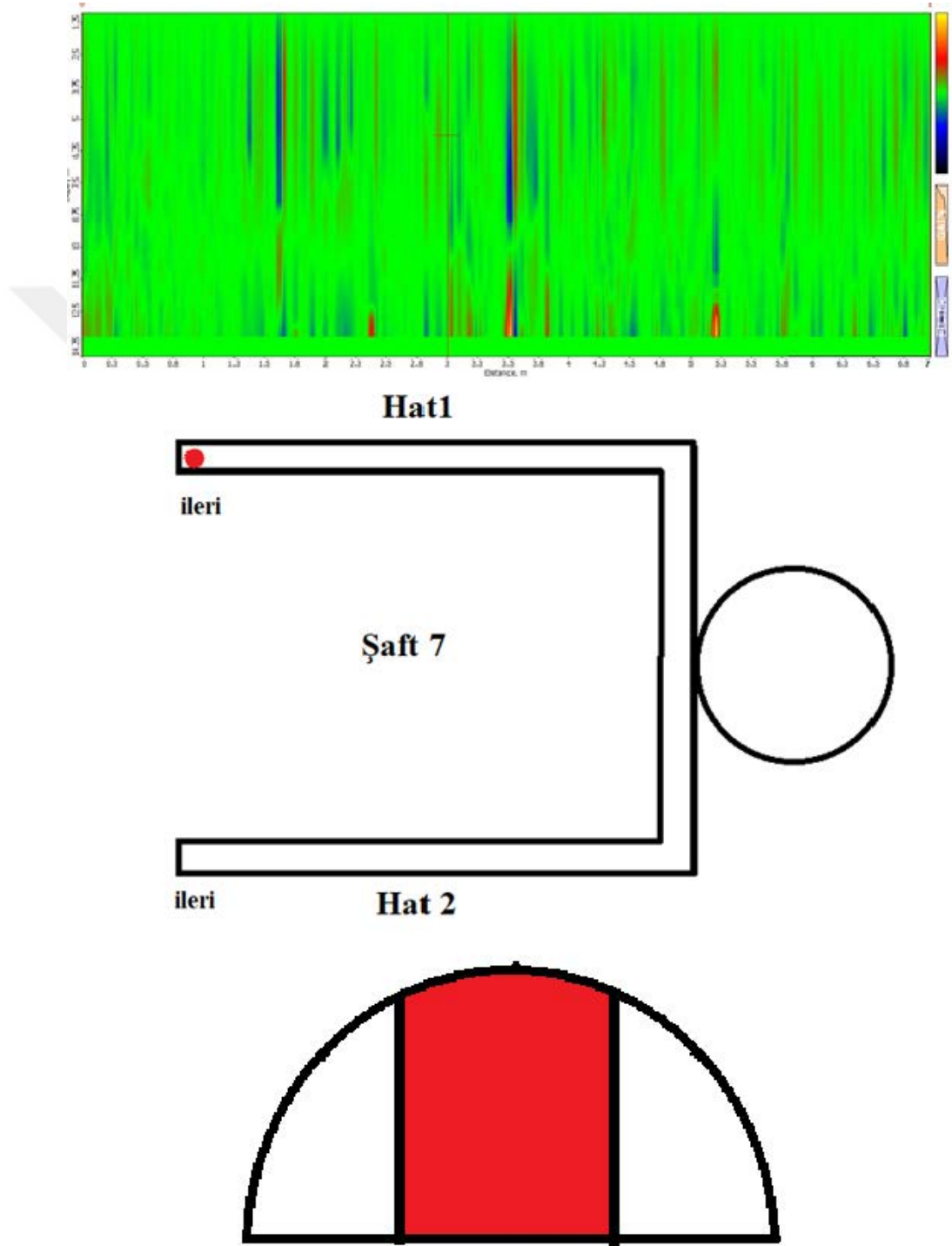


Şekil 4. 72 Hat 2 geri sol yarı

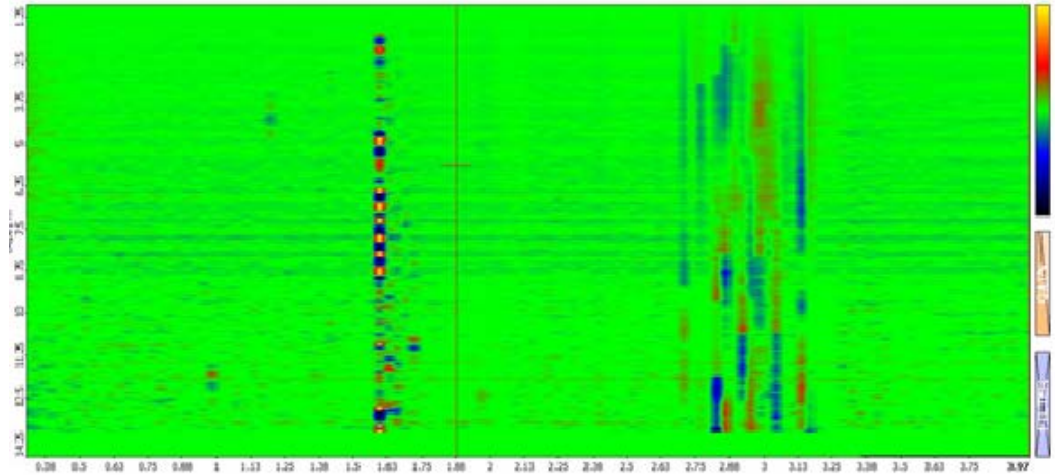
Alınan ham görüntüler filtreleme aşamalarından geçirilmiş olup; aynalardan yaklaşık 15 metre içeriye kadar herhangi bir yeraltı boşluğunun olmadığı ancak zeminin su içeriğinin yüksek olduğu görülmektedir.

- Şaft 7 Yer Radarı Görüntülerinin Değerlendirilmesi:

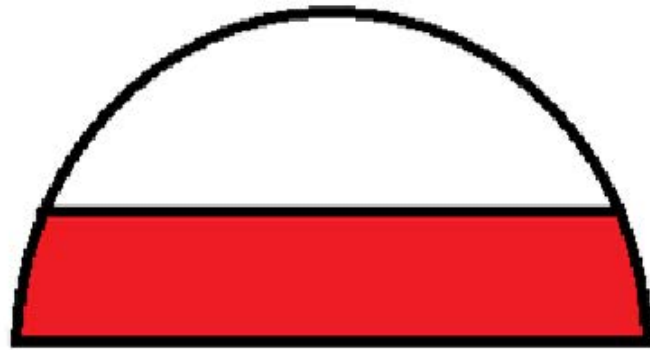
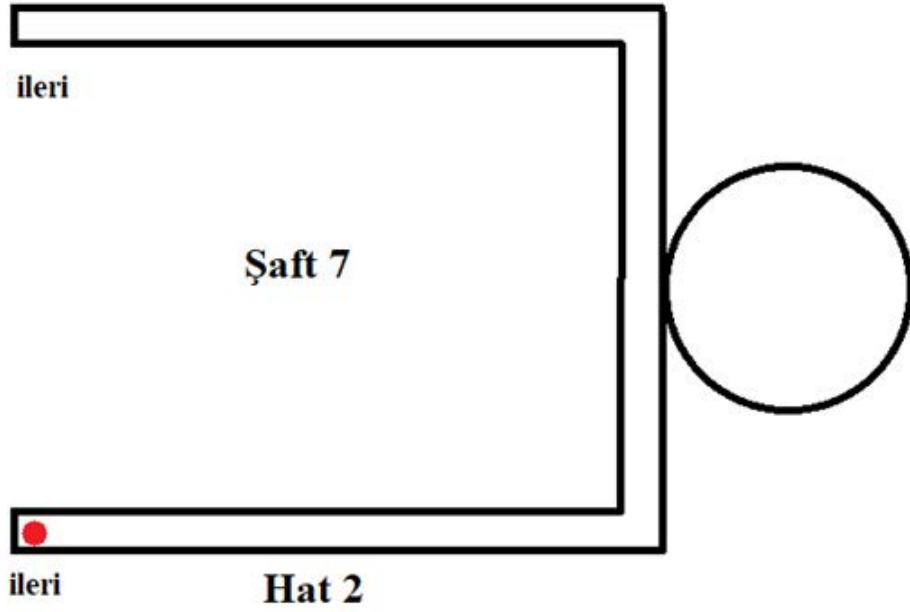
Şaft 7 Hat 1 ve Hat 2’de alınan yer radarı görüntüleri aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



Şekil 4. 73 Hat 1 ileri ayna ortası



Hat1



Şekil 4. 74 Hat 2 ileri alt yarı

Alınan ham görüntüler filtreleme aşamalarından geçirilmiş olup; aynalardan yaklaşık 15 metre içeriye kadar herhangi bir yeraltı boşluğunun olmadığı

görülmektedir. Aynalarda uygulanan yer radarı işlemi kapsamında kaya kütlesi içinde boşluk olmadığı, bazı aynalarda yumuşak zemin yapısı ve yoğun su varlığı tespit edilmiştir.

4.5.3. LiDAR Yöntemi Kullanılarak Yüzey Deformasyonlarının Belirlenmesi

Çalışma kapsamında metro hattı boyunca oluşan bölgenin yüzey hareketlerinin ortaya koymak için teknolojik gelişmeler doğrultusunda mühendislik uygulamalarına yeni bir boyut kazandıran lazer tarayıcı sistemleri kullanılmıştır.

Lazer cihazı yüksek seviyede ayarlanmış doğrusal, uyumlu ve faz elektromanyetik radyasyon üreten ve geri alan bir cihazdır. Genel tanımlaması LiDAR (LightDetectionandRanging-Işık Algılama ve Mesafe Ölçer) olan bu sistemler iki farklı türde geliştirilmiştir. Bu iki farklı sınıflandırma, cihazın konumu baz alınarak yapılmıştır. Bunlar ALS (airborne-based-hava platform temelli) ve TLS (ground-based, yer temelli Lazer tarayıcı) olarak adlandırılmaktadır (Pirotti vd., 2012). Çalışmada TLS tabanlı yersel lazer tarama cihazı LeicaScan Station II modeli kullanılmıştır (Şekil 4.75).

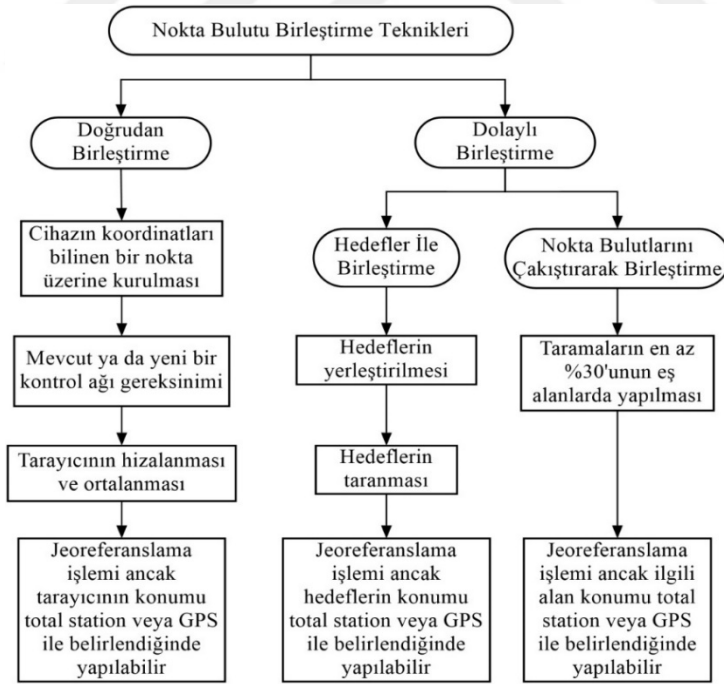


Şekil 4. 75 Yüzey deformasyonlarının belirlenmesinde kullanılan TLS tarama sistemi (Leica SS II).

3 boyutlu (x,y,z) yersel lazer tarama teknolojisi, taranmış bir yapı veya yeryüzü üzerinden elde edilen nokta bulutları yardımıyla, taranmış alanların gerçeğe yakın görüntülerinin oluşturulduğu, modellerinin elde edildiği veri toplama teknolojisi olarak isimlendirilebilir. Bu teknoloji ile yeryüzünde, büyük ölçekli araştırmalarda, karmaşık alanlarda ve düzensiz yüzeylerle birlikte, standart veya standart olmayan yapıların 3 boyutlu verileri doğrudan toplanabilmektedir. Yüzey deformasyonlarının karmaşık ve ölçülmesi oldukça zor bölgelerde meydana geldiği durumlarda bu teknolojiye etkin bir şekilde faydalanılması, araştırmalarda büyük kolaylıklar sağlayabilmektedir. Bu sistemler sayesinde arazi yüzeylerinde çok yoğun ve fazla miktarda, hızlı 3 boyutlu konum bilgisi elde edilmektedir (Deliormanlı vd., 2014). Lazer tarayıcılardaki çözünürlük kavramı, taraması yapılacak olan bölgeye ait nokta bulutları verisinin nokta aralığı ve istenilen detay derecesine bağlı olarak değişen bir parametre olarak tanımlanabilir. Açısal çözünürlük ve obje ile tarayıcı arasındaki mesafe, isteğe bağlı olarak değiştirilebilir. Bu parametreler genellikle nokta aralığı ve

ışık huzmesinin genişliği (tarayıcı ve obje arasındaki mesafe)olarak adlandırılabilir. Tarama yoğunlukları TLS sistemlerinde genellikle 50 ile 10000 nokta/m²'dir. Bunlara ek olarak konuma bağlı olarak yansıyan sinyalin elde edilmesine bağlıdır. Parametreler esasen ışığın dalgaboyu, objenin türü (yansıyan yüzeyin rengi ve pürüzlülüğü), toprağın nem derecesi ve görüş açısı ile doğrudan ilgilidir.

Nokta bulutlarının birleştirilmesi işlemi iki adımda gerçekleştirilebilir: nokta bulutları elde edinimi sırasında birbirleri üzerine örtülü şekilde tarandığından dolayı eş noktalar bulundurmaktadır. Bu noktalar yardımıyla yaklaşık olarak nokta bulutları çakıştırma işlemine tabi tutulur. İkinci aşamada isedaha hassas bir şekilde birleştirmek için ICP (Iterative Closest Point) algoritmasıyla optimizasyonu sağlanır ve bu sayede farklı taramalar arasında en az hata oranıyla birleştirilmesi sağlanmış olur. Bu birleştirme teknikleri ile alansal ölçümlerin genişliği artabilmektedir. Nokta bulutu birleştirme teknikleri Şekil 4.76'da verilmiştir. Yapılan ölçümlerde farklı istasyon noktalarından elde edilen nokta bulutu verileri hedefler ile birleştirme yöntemi ile tek bir nokta bulutu verisi haline dönüştürülmüştür.



Şekil 4. 76 LiDAR ile üretilen nokta bulutlarının birleştirilmesi ve jeoreferanslama.

Nokta bulutlarının birleştirilmesinde kullanılabilecek özel hedefler konum duyarlılığını artırsa da arazi yüzeylerinden manuel olarak belirlenen eş noktaların da

konum duyarlılığını sağlayabilir. Hedef noktaların yapısı kullanılan yazılımlara bağlı olmakla birlikte küre, düzlem veya silindir şeklinde olabilmektedir. Bu özel yapıların dışı reflektif folyo ile kaplanarak yansıtıcılık oranı yükseltilir. Lazer tarama sonucu elde edilen nokta bulutları içerisinde belirlenen bu hedeflerin merkezleri gerçek jeodezik koordinatlarına total station veya GPS yardımıyla getirilir. Bu işlemten sonra gerekli filtreleme algoritmalarından geçirilerek nokta bulutları içindeki gürültülü-aykırı (noise) noktalar silinebilir. Aykırı noktalardan arındırılmış nokta bulutları 3 boyutlu noktalar arasında farklı periyotlarda elde edilen eş bölgelerde heyelan hareketlerinin belirlenmesinde kullanılabilir (Zeybek ve Şanlıoğlu, 2015; Özdoğan ve Deliormanlı, 2019) Bu karşılaştırmalar genellikle 3 farklı yöntemle yapılmaktadır. Nokta bulutlarının karşılaştırılması, 3 boyutlu üçgen modellerinin karşılaştırılması ve hacim karşılaştırmaları olarak yapılmaktadır. Heyelan ve deformasyon hareketlerinin izlenmesinde kullanılan TLS tekniği genellikle Şekil 4.77’de verilen iş akışı ile uygulanmaktadır.



Şekil 4. 77 Yersel Lazer tarama teknikleri ile izlenmesinde kullanılan işlem adımları.

Ölçme planlaması yüzey deformasyonunun meydana geldiği bölgede genel görünüm, sabit ve hareketli alanların tespit edilmesi, TLS cihazının iyi görüşüne sahip

istasyon yerlerinin belirlenmesi gibi bir ön çalışmayı kapsamaktadır. Çalışmalar genellikle iki veya daha fazla çok-zamanlı yapılmalıdır ve hareketlerin belirlenmesi için periyotlar arasındaki zamanın iyi ayarlanması oldukça önemlidir. Ayrıca yer kontrol noktası olarak kullanılması planlanan noktaların yerlerinin belirlenmesi, GPS veya total station gibi sistemleri kullanarak jeodezik koordinatlarının hesaplanması gerekir. Hedeflerin jeodezik koordinatlarının belirlenmesinde GNSS sistemi kullanılmıştır (Şekil 4.78). Yer noktası olarak kullanılan noktalara özel hedefler yerleştirilmiştir. Bu hedefler aynı zamanda istasyon ölçümlerinde elde edilen nokta bulutu görüntülerin birleştirilmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 4. 78 Hedeflerin jeodezik koordinatlarının belirlenmesinde GNSS sistemi kullanımı

Çalışmada tarama cihazı olarak LeicaScan Station II modeli kullanılmıştır. Tarama, 4 istasyon kurularak gerçekleştirilmiştir. Tarama yoğunluğu 80-120m mesafede 7cm duyarlılıkla gerçekleştirilmiştir. Tarama sonucu elde edilen 3 istasyona ait nokta bulutlarının değerleri 3 hedef kullanılarak birleştirilmiştir. Ölçümlerde hedefler 2 mm x 2 mm duyarlılıkla taranmıştır. Daha sonra hedeflerin merkezinden GNSS ile elde edilen jeodezik koordinat değerleri kullanılarak birleştirilmiş olan nokta bulut değerleri jeodezik koordinatlara dönüştürülmüştür. Çalışma bölgesinin nokta bulutu olarak daha belirgin olarak belirlenmesi için çalışma alanı dışı bölgelere ait olan veriler temizlenmiştir. LiDAR ölçüm sonuçlarından elde edilen nokta bulutu verilerinin değerlendirilmesinde düşey deformasyon değişim miktarları eski ve yeni veriler baz alınarak değerlendirilmiştir. Bu analizler hem nokta bulutu verileri kullanılarak hemde nokta bulutu verilerinden elde edilen katı model temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Analizler 3DRESHAPER yazılımı ile yapılmıştır.

4.5.3.1. LiDAR Ölçüm Değerlendirmeleri

Elde edilen LiDAR ölçüm analiz sonuçları çalışma bölgesi için değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler ölçüm tarihlerine bağlı nokta bulutu görüntülerinin alındıkları tarihler temel alınarak bir zaman serisi oluşturularak yapılmıştır. Yine değerlendirme temelinde incelenen alanların zamana bağlı pozitif ve negatif deformasyon değişimleri iki farklı şekilde incelenmiştir. Bunlar;

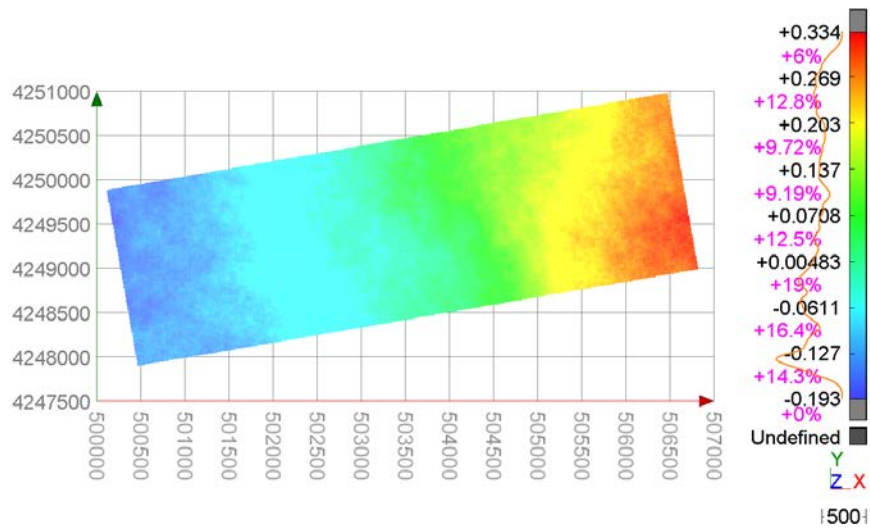
- Alansal olarak yüzey deformasyonlarının belirlenmesi
- Alansal olarak belirlenen deformasyonların pozitif ve negatif olarak çift bölge olarak belirlenmesi

Tablo 4. 16 Balçova Segmenti LiDAR Ölçüm Tarihleri.

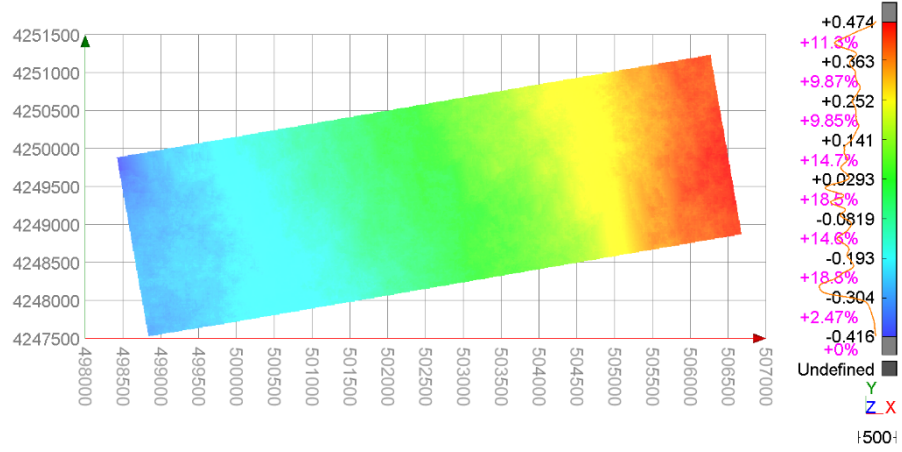
Ölçüm No	Tarih
1*	Temmuz 2018
2	Aralık 2020
3	Mayıs 2021
4	Kasım 2021

*1nolu görüntü sahada ön ölçümlerin yapıldığı tarihtir

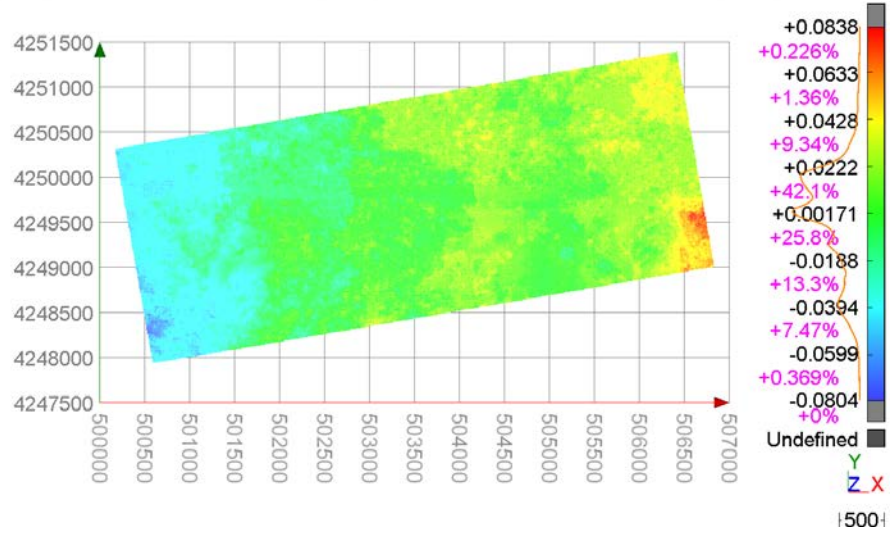
LİDAR ölçümlerine yönelik görseller aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



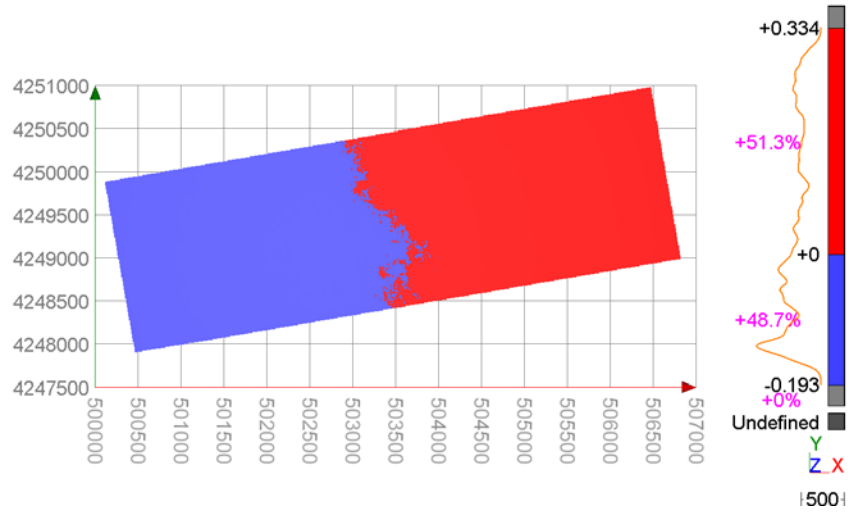
Şekil 4. 79 Balçova segmenti yüzey deformasyonları (2018-2020-Aralık)



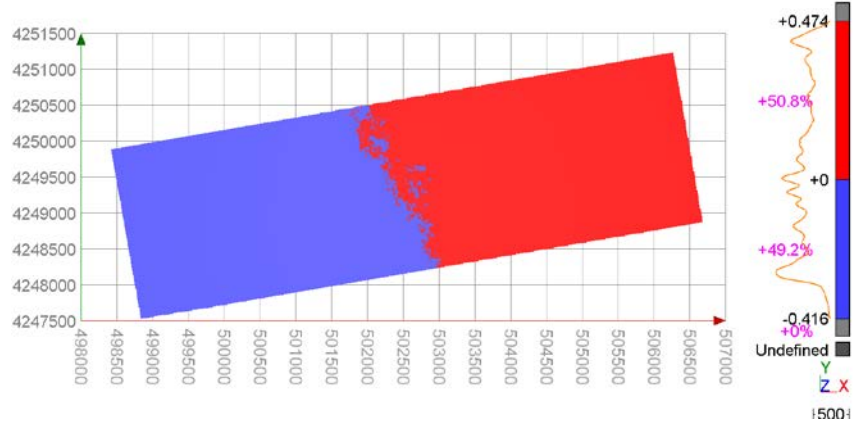
Şekil 4. 80 Balçova segmenti yüzey deformasyonları (2020-Aralık-2021-Mayıs)



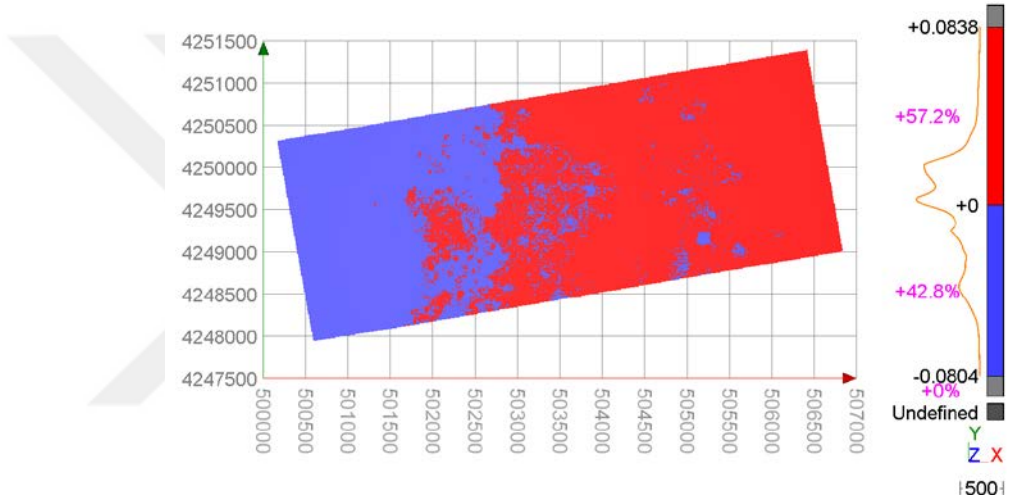
Şekil 4. 81 Balçova segmenti yüzey deformasyonları (2021-Mayıs-2021 Kasım)



Şekil 4. 82 Balçova segmenti pozitif ve negatif deformasyon alanları (2018-2020-Aralık)



Şekil 4. 83 Balçova segmenti pozitif ve negatif deformasyon alanları (2020-Aralık-2021-Mayıs)



Şekil 4. 84 Balçova segmenti pozitif ve negatif deformasyon alanları (2021-Mayıs-2021 Kasım)

BÖLÜM BEŞ

ÖNGÖRÜLEN GERİLME VE DEFORMASYON DURUMLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Sığ derinlikte açılmakta olan istasyon tünellerin mekaniği derin koşullarda açılan tünellerden farklı durumlar göstermektedir. Sığ tünellerin stabilitesi ve davranışı sadece açılan tünelin parametrelerine bağlı olmayıp içinde açılan kaya/zeminin stabilitesine ve davranışına da bağlı olabilmektedir. Yeryüzü zemininde meydana gelecek deformasyonların tünelin yeryüzüne yakınlığı içindeki binalar ve alt yapılar için büyük bir önem taşıdığı da bir gerçektir.

5.1. Sığ Derinlikte Meydana Gelen Birincil Gerilmeler

Birincil gerilme alanının yeraltı açıklıklarının duraylılığı üzerindeki önemli rolü çok iyi bilinmektedir. Bir yeraltı açıklığı çevresinde oluşan ikincil gerilme alanının neden olabileceği aşırı gerilme ya da yenilme bölgesi; birincil gerilme alanına, açıklık geometrisine ve çevre kayacın mekanik özelliklerine bağlıdır. Tasarımcı, seçenekleri arasında olan değişkenlerde olanaklar çerçevesinde düzenlemeler yaparak mevcut koşullardaki en uygun tasarımı gerçekleştirmek zorundadır. Bu bağlamda, açıklık şekli ve konumu tasarım sınırlamaları arasında olmadığı zaman, mevcut birincil gerilme alanına en uygun seçenekleri belirlemek hem kuramcılar hem de uygulayıcıları meşgul eden konular arasındadır.

Dünyanın çeşitli bölgelerinde yapılan birincil gerilme ölçümü sonuçlarına göre, birincil gerilmelerin asal bileşenlerinin;

- düşey ve yatay konumlarda olması,
- birbirinden farklı değerler alması ve
- büyüklük sıralarının değişiklikler göstermesi

oldukça yaygın karşılaşılan bir olgudur (Amadei ve Stephansson, 1997). Birincil gerilme alanının yönlerle bağlı (anizotropik) özellikte olması durumunda düşey birincil gerilme bazen en büyük, bazen ortanca bazen de en küçük asal birincil gerilme olabilmektedir. Genelde düşey birincil gerilmenin en küçük asal birincil gerilme

olduğu (İngiltere, Avustralya vb.) bazı bölgelerde yeraltı açıklığının uzun ekseninin en büyük yatay birincil gerilmeye paralel olacak şekilde konumlandırılmasının duraylılık açısından daha olumlu olacağı kuramsal çalışmalarla olduğu kadar, arazi gözlem ve deneyimleriyle de ortaya konmuştur (Gale, 1991; Siddall and Gale, 1992). Benzer şekilde, Pan ve Brown (1996), eksenel birincil gerilme bileşeninin dairesel açıklık çevresindeki yenilmeye ve ikincil gerilmelerin dağılımına etkisini ortaya koymaya çalışmışlardır. Ayrıca, Hoek ve Brown (1980) da bir yeraltı açıklığının şeklinin (eksenler oranının) seçiminde birincil gerilmelerin oranının göz önünde bulundurulması gerektiğini tartışmıştır. Özetle, bir yeraltı açıklığının şekli ve konumunun, mühendislik sınırlamaları çerçevesinde, mevcut birincil gerilme alanına göre en uygun olacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Sığ derinlikte meydana gelen birincil gerilmeler genellikle kompleks olup gerilme büyüklükleri hakkında bilgi yok denecek kadar azdır. Literatürdeki bilgiler genelde 50 metreden daha derin mesafeler için verilmiş değerler olup sığ derinlikler için genelde enterpolasyon yoluyla belirlenmeye çalışılmaktadır.

Sığ derinliklerdeki herhangi bir derinlikte meydana gelen birincil gerilme (Virgin Stress) genellikle aşağıdaki parametrelere bağlı olarak oluşmaktadır. Bunlar;

- Ayırışma
- Düzensiz topoğrafya
- Kalıcı gerilmeler
- Erozyon, buzulların erimesi v.b.

Yukarıda sayılan parametrelerden ayırışma genellikle gerilme düzeyini düşürürken, düzensiz topoğrafya gerilme yönlerinin doğrultularını etkileyebilmektedir. Kalıcı gerilmeler (residual stress) ise genelde gerilme dağılımında anomalilerin oluşmasına neden olabilmektedir.

Oluşacak olan yatay ve düşey gerilmelerin oranı sığ derinlikte derin olan yerlere göre daha fazla olabilmektedir. Bunun bir parça nedeni tektonik gerilmelerin sığ derinliklerde yerçekimsel gerilmelere göre daha fazla olabilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle erozyon, buzulların erimesi vb. dış etkenlerde yatay ve düşey gerilme oranının artmasına katkıda bulunabilmektedir.

Kaya kütlesi içerisinde oluşan gerilmeler örtü tabakasının ağırlığına ve jeolojik tarihçeye bağlı olarak meydana gelmektedir. Kaya kütlesi içerisinde meydana gelen birincil gerilmelerin büyüklüğü derinlikle artmaktadır. Yeraltı açıklıklarında da gerilmeye bağlı problemler (yenilme gibi) de derinliğin artmasıyla artmaktadır. Bununla birlikte sığ derinlikte açılan açıklıklarda düşey gerilmelere karşı yüksek değerli yatay gerilmeler meydana gelebilmektedir (Amadei ve Stephansson, 1977). Sığ derinliklerde meydana gelen birincil gerilmeler normal olarak 1 düşey gerilme (σ_v) 2 adet de yatay gerilme (σ_h , σ_H) ile ifade edilmektedir.

σ_v = düşey gerilme

σ_h = Minimum yatay gerilme

σ_H = Maksimum yatay gerilme

$$\sigma_v = \rho \cdot g \cdot z \quad (5.1)$$

Burada,

- z = derinlik (m)
- ρ = Kaya kütlesi yoğunluğu (MN/m^3)
- g = Yer çekimi ivmesi (m/s^2)

dir. Eğer malzeme lineer- elastik ve izotropik ve tek boyutlu gerilme şartları taşıyorsa yatay gerilme ile düşey gerilme arasında aşağıdaki ilişki dikkate alınmaktadır,

$$\sigma_H = \frac{\vartheta}{1 - \vartheta} \sigma_v \quad (5.2)$$

Burada,

- ϑ = Poisson oranı (0,15-0,40)

dır. Yeraltı açıklıklarının açıldığı kaya/zemin kütlelerinde şistozite düzlemleri eklem ve eklem takımları, dizilim nedeniyle anizotropi sık görülen bir durum arz etmektedir.

Açılmakta olan tünel güzergahındaki jeolojik yapı içerisindeki kaya/zemin kütleleri de anizotropik bir yapı sunmaktadır.

Sığ derinliklerde meydana gelen birincil gerilmeler hakkında son yıllarda hidrolik çatlatma ve laboratuvar testlerine dayalı yapılan çalışmalar sonucu elde edilen bağıntılar sonucunda oluşan düşey gerilmelere karşılık meydana gelen minimum ve maksimum yatay gerilmeler derinliğe bağlı fonksiyonlarla değişik araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir (Stephansson, 1993). Berg (2005) İsveç'te 4 değişik lokasyonda sığ derinliklerde (10-50 m) yaptığı deneysel çalışmalarla yatay gerilmelerin birincil düşey gerilmelere göre daha fazla olduğunu göstermiştir (Tablo 5.1).

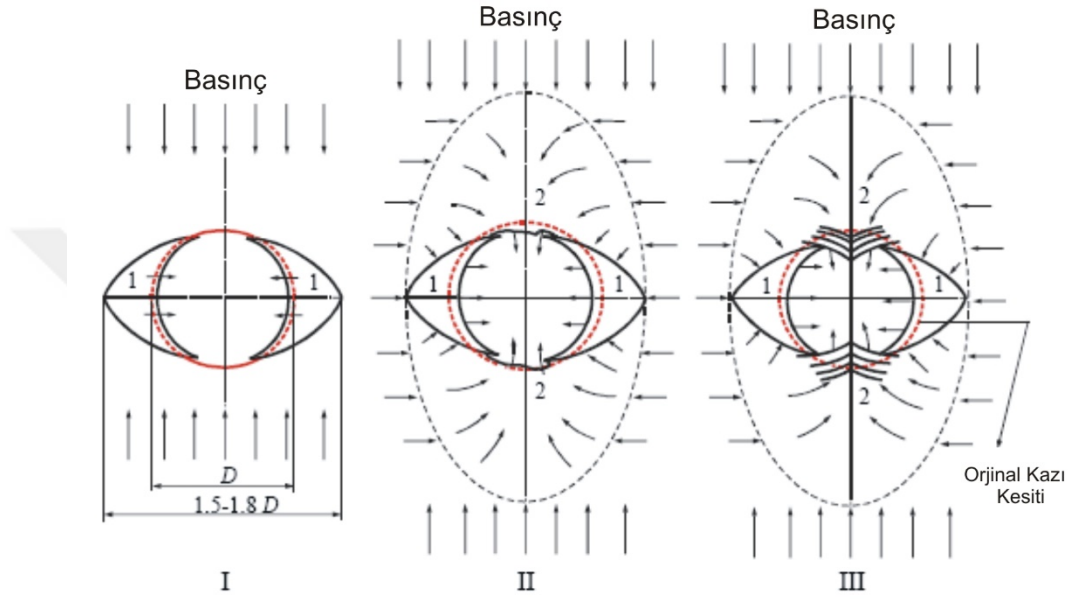
Tablo 5. 1 Derinliğe bağlı yatay gerilmelerin değişimi (Berg, 2005)

Derinliğe(m) bağlı σ_H ve σ_h (Mpa) değişimi	Ölçüm yöntemi ve derinlik aralığı
1 $\sigma_H = 10,4 + 0,046 \cdot z$ $\sigma_h = 5 + 0,0286 \cdot z$	Leeman-Hiltscher lab test (0-700)
2 $\sigma_H = 6,7 + 0,0444 \cdot z$ $\sigma_h = 0,8 + 0,0399 \cdot z$	Leeman-tip lab test (0 – 1000)
3 $\sigma_H = 2,8 + 0,04 \cdot z$ $\sigma_h = 2,2 + 0,024 \cdot z$	Hidrolik çatlatma (0-1000)

Tünel etrafında gerilme konsantrasyonunun artmasına neden olan düzensiz topoğrafya gibi etkenler sonucunda gerilmeye bağlı yenilmeler meydana gelebilmektedir. Düşük gerilme durumlarında süreksizlik içeren ve gevrek kaya ortamlarında kama ve blok düşmeleri tipinde yenilmeler meydana gelebilirken, zemin ve yumuşak kaya ortamlarında ayna akmaları ve dökülmeler düşük gerilme şartlarında meydana gelebilmektedir. Yüksek gerilmelerin meydana geldiği daha derin, gevrek ve süreksizlik içeren kaya ortamlarında ise kaya patlaması, dökülme ve gerilmeye bağlı yenilmeler meydana gelebilmektedir.

Metro hattı boyunca açılan tünel güzergahının sahip olduğu jeolojik ve jeoteknik koşullar düşük gerilme koşullarına uyan sığ derinlikli süreksizlik içeren zemin ve yumuşak kaya ortamı koşullarını taşımaktadır. Tablo 5.1'de verilen fonksiyonel ifadelerden 3 no'lu formülün kullanılmasının yerel şartlara daha uygun olacağı

düşünülmektedir. Ortalama 20-30 metre derinlikte açılacak olan Tip 2 ve Tip 3 tünellerinde meydana gelecek düşey ve yatay gerilmeler Berg (2005) e göre yapılan değerlendirmeler sonucunda maksimum yatay gerilmelerin 3 MPa a minimum yatay gerilmelerinde 2 MPa a kadar çıkacağı belirlenmiştir. Şekil 5.1. de sıg tünelde oluşan gerilmelere bağlı yenilme mekanizması şematik olarak verilmektedir (Rabcewicz, 1964).

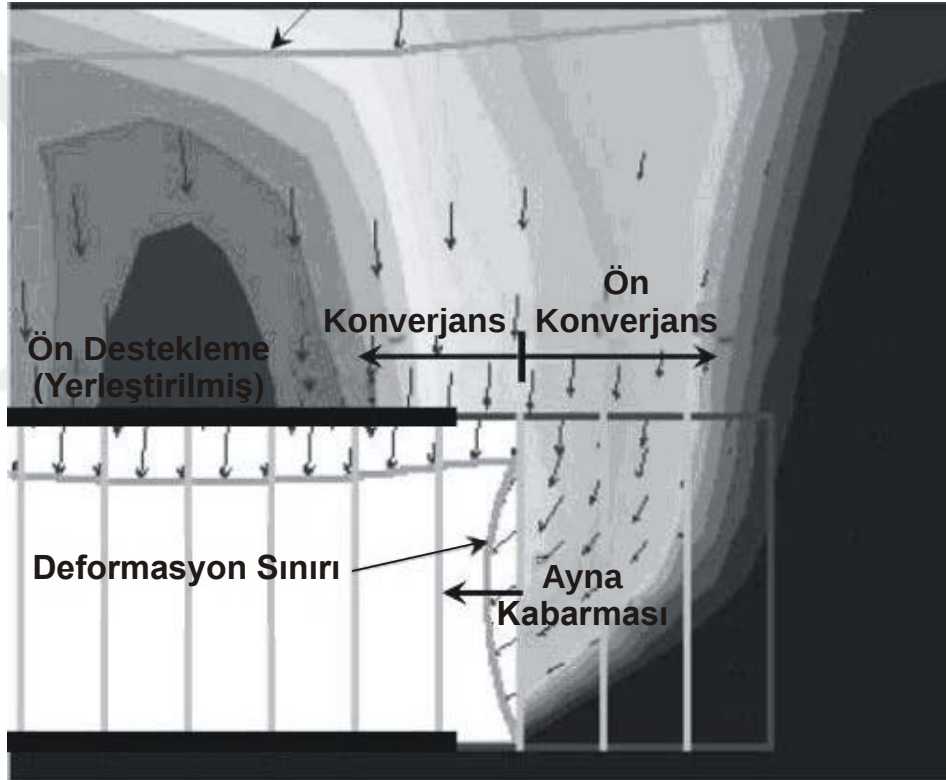


Şekil 5. 1 Tünel açıklığı etrafında yenilme aşamaları ve mekanik davranış (Rabcewicz,1964)

Son yıllarda yapılan çalışmalarda sıg tünellerde kazı yönünde bir yer değiştirme vektör yönelimi değeri gözlendiğinde sağlam kaya kütlesi koşullarına yaklaşıldığı, kazı yönüne karşı bir yer değiştirme vektör yönelimi değeri gözlendiğinde daha zayıf bir kaya kütlesi koşuluna yaklaşıldığı şeklinde bir ön tahminde bulunulabilmektedir. Yer değiştirme vektör yönlenmeleri ile tünel kazı aynasının ilerisindeki kaya koşulları tahmin edilerek tünel inşası sırasında yerinde ve zamanında destek elemanlarının seçilmesiyle zaman, para kaybı en aza indirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

“Kaya kütlesinin düşük dayanımı, yüksek deformasyona uğrama özelliği ve heterojenliği, tünel performansının tahminini zorlaştırmaktadır” (Schubert ve Steindorfer, 1995). Tünel inşasında tünel sıralı kazı adımları (üstyarı, altıyarı ve invert) yapılırken tünel üzerine etkiyen gerilmeler oluşan yeni şartlara uygun olarak yeniden bir dağılım gösterecektir. Oluşan yeni gerilme koşullarında tünel içerisinde oluşacak

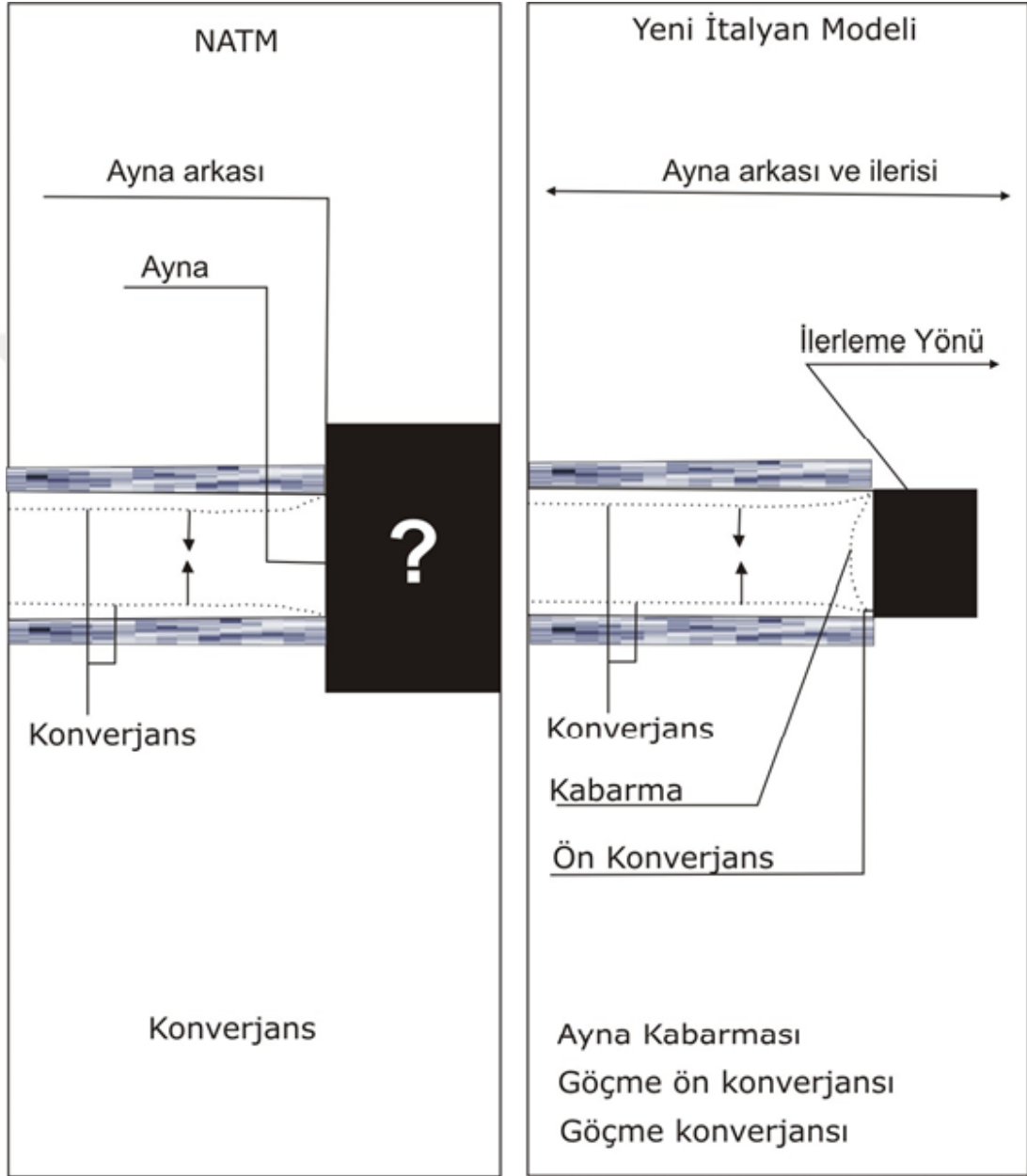
deformasyonların hızlı ve doğru bir şekilde izlenmesi, ölçülmesi ve değerlendirilmesiyle tünel üzerine etkiyen deformasyon miktarı ile tünel kazısı ilerisindeki kaya koşullarının tahminini sağlanabilmektedir (Schubert ve Steindorfer, 1996). Sığ tünel koşullarında son yıllarda yapılan çalışmalarda açılan boşluğun hızla ön destekleme elemanları ile desteklenmesine kadar ve sonraki dönemde ayna önündeki kütlenin ilerleme yönüne ters yönde belirli bir oranda kabarak yönelmesi sonucu ön konverjansların meydana geldiğini ve bu sürede yeryüzünde de toplam sübsidans miktarının % 70'nin bu dönemde olduğu ileri sürülmektedir (Şekil 5.2.). Yapılan saha gözlemleri de bu fikri destekler niteliktedir.



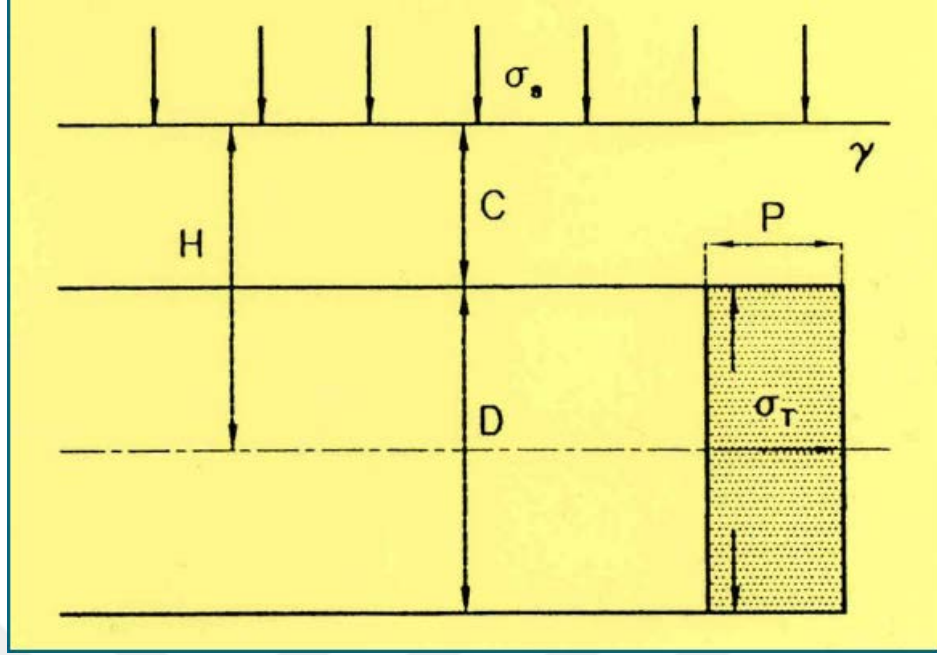
Şekil 5. 2 Sığ tünellerde meydana gelen ön konverjans ve ayna kabarması

Klasik yöntem olarak bilinen Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi(NATM)'nin ana prensibi olan açıklığın açıldığı jeolojik ortamın kendi kendisini göçmeden tutabilir hale getirme düşüncesi ön destekleme elemanlarının kazıdan hemen sonra uygulanmasını gerektirmektedir. Özellikle şehir tünelleri (Urban Tunnel) niteliğindeki metro tünellerinde yapılan ön desteklemenin de yerüstü yapılarında ve tünel üzerindeki tabakalarda deformasyona izin vermeden ilerleme yapma zorunluluğu

nedeniyle yeterli olmadığı da İtalyan tünelcileri tarafından ifade edilmektedir (Şekil 5.3). Bu nedenle deformasyon önleyici tünel açma yöntemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır.



Şekil 5. 3 Yeni Avusturya Tünel Açma yönteminin sık şehir tünellerinde uygulanma zorluğu yaklaşımı



Şekil 5. 4 Tünel derinliği ile tünel yüksekliği arasındaki ilişkinin şematik olarak gösterimi

Tünellerde tünel üst cidarının yeryüzüne olan mesafesi (C) nin (Şekil 5.4) tünel yüksekliği (D) ye oranı 2 ve altında olması durumunda ayna stabilitesinin analizinin zorunlu olduğu durum ortaya çıkmaktadır. Metro İstasyon Tünellerinde de yaklaşık olarak durum $(C/D) < 2$ şeklindedir. Bu durumda ;

$$\frac{\rho \cdot H}{C_u} > 4 \quad (5.3)$$

olması durumunda da lokal olarak ayna yenilmeleri ve stabilite problemleri yaşanması kaçınılmaz olmaktadır. Burada ρ ort. kayaç yoğunluğu, H tünel aksının yeryüzüne olan düşey mesafesi, C_u ise killi formasyonlarda drenajsız kesme dayanımı değeri olmaktadır. Tünel içi ve üzerinde bulunan tabakaların deformasyonu sonucunda yüzeyde çökme ve kaymalar (sübsidans) sonucu oturmalar (settlement) meydana gelebilmektedir. Yeraltı açıklığının açıldığı lokasyonlarda tüm sübsidans parametrelerini (tünel geometrik boyutları, dönüm noktası apsisi, i_x , stabilite sayısı, N, hacimsel zemin kaybı yüzdesi, V_L , yüzeyde gözlenen maksimum çökme (tasman) miktarı, S_{max}) tümünün kestiriminin zorluğu nedeniyle bazı ampirik eşitlikler

türetilmiştir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı maksimum sübsidans (S_{max}) ile N stabilite sayısı (N) arasındaki ilişkidir (Arıoğlu vd., 1992).

$$S_{max} = 4,9 \cdot N^{1,29} \quad (5.4)$$

Burada,

- S_{max} = Maksimum sübsidans (mm)
- N = Stablite sayısı

dır. Bu formülde kullanılan stabilite sayısı birçok literatürde farklı ifadelerle tanımlansa da en yaygın olarak kullanılanı üst örtü basıncı, tahkimat basıncı ve drenajsız kesme dayanımına bağlı hesaplanan formüldür. Buna göre;

$$N = \sigma_z / C_u \quad (5.5)$$

Burada,

- σ_z = Tünel aksı üzerindeki üst örtü basıncı (MPa)
- C_u = Kilin drenajsız kesme direnci (MPa)

dır. N stabilite sayısı büyüklüğü ile beklenen tünel stabilite durumları da aşağıda Tablo 5.2. de verilmiştir.

Tablo 5. 2 N stabilite sayısı ile tünel stabilite durumu arasındaki ilişki

Stabilite Sayısı N	Beklenen Stabilite Durumu ve Problemler
$N \leq 3$	Tüm stabilite hakkında belirsizlik
$3 < N < 6$	Düşük oranlı sübsidans ve tünel içinde sınırlı akma problemi

Tablo 5.2 devamı

N ≥ 5	Ayna önünde birçok göçme ve akma problemi, aşırı plastikleşme
N ≥ 6	Tümüyle stabil olmayan durum ve aynada çok ciddi stabilite problemleri

Yukarıda yapılan değerlendirmeler ışığında özellikle Tip 2, Tip 3 ve Tip 4 tünel kazılarında özellikle Bornova Karmaşığı formasyonlarındaki yer altı suyu ile yıkanmış ve suya yarı doymuş ve doymuş Kıltaşı-Silttaşı-Kumtaşı aralanmalarında ve kazı aynasının hemen üzerinde yer alan alüvyal çökeller olan Çakıllı killi kum, Çakıllı Siltli Kil özelliğindeki görsel tortul oluşumları sıkışma özelliğine ve zayıf kıltaşı-silttaşı ve şeyllerin suyla temasta suda dağılma özelliğine sahip olup önlem alınmaması halinde, tünel aynası önünde birçok göçme ve akma problemi ile aşırı plastikleşme gibi olumsuzlukların meydana gelmesi olası görülmektedir.

5.2. Kazı Güzergahında Yer Alan Zeminin Sıkışabilirlik Özelliği

Literatürde kayaç ve zeminlerin sıkışabilirliği ile ilgili bir çok yaklaşım ve formüller yer almaktadır. İstasyon tünel kazılarında da kazı kotu ve üzerinde yer alan zeminlerin sıkışma kapasitelerinin belirlenmesi için laboratuvar testleri dışında ampirik olarak da sıkışma özelliği değerlendirilmiştir. Zayıf ve yumuşak kaya ve zeminin sıkışabilirliği incelendiğinde kazıda karşılaşılabilecek yumuşak kayaç formasyonları ve zeminler “Düşük sıkışma özelliği olan zeminler ” ve “Sıkışma özelliği olmayan bozunmuş yumuşak kayaçlar“ sınıfında değerlendirilmiştir.

5.3. Tünel İnşası Sonucu Beklenen Yeryüzü Oturma (Sübsidans) Miktarları ve Etki Mesafeleri

Metro tüneli kazılarında, kazı sonrası tünel duvarlarında oluşan konverjans ve yeryüzünde oluşan ve yüzeyde bulunan yapılara hasar veren, hatta yıkılmalarına neden olan oturmaların(tasmanın), müsaade edilebilir değerler arasında tutulabilmesi çok önemlidir.

Çökme çanağı genişliği parametresi (i) derinliğin bir fonksiyonu olup yapılan çalışmalarda elde edilen fonksiyonel bağıntı halinde aşağıda verilmektedir,

$$i = 0,43Z_0 + 1,1 \quad (5.6)$$

Burada i çökme çanağı genişliği parametresi olup bu mesafede çökmeye bağlı maksimum eğimler meydana gelmektedir ve derinliğe bağlı olarak değişmektedir. Z_0 ise tünel derinliğidir. i_x ve i_y x ve y eksenleri doğrultusunda meydana gelen çökme çanağı genişlikleri parametresi olarak ifade edilmektedir. Bazı araştırmalarda $i_x = 1,3$ i_y olarak belirlenmiş olsa da literatürde genelde $i_x = i_y$ alındığından çökme çanağı genişliği parametresi genelde sadece i ile gösterilmektedir. Çökme çanağı genişliği ise (i) mesafesinin 2.5 – 3 katı olarak genelde alınmaktadır. Pratikte $i = K \cdot Z_0$ formülü kullanılmakta ve $K = 0,5$ alınmaktadır. Çökme çanağı içerisinde herhangi bir noktada meydana gelen oturma miktarını veren formülde aşağıda verilmektedir,

$$S_v(x) = S_{v,max} e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}} \quad (5.7)$$

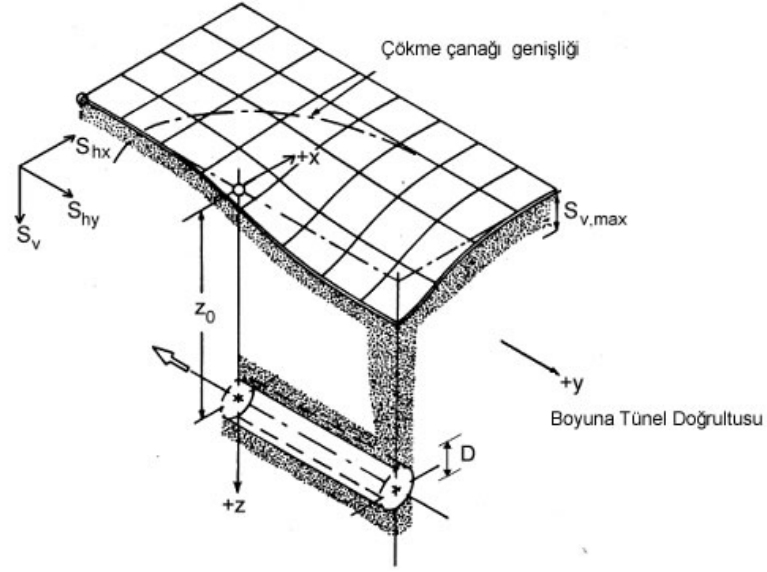
Burada;

- $S_v(x)$ = Çökme çanağı içerisinde herhangi bir noktadaki çökme miktarı (mm)
- $S_{v,max}$ = Maksimum çökme miktarı (mm)
- i_x = Çökme çanağı genişliği

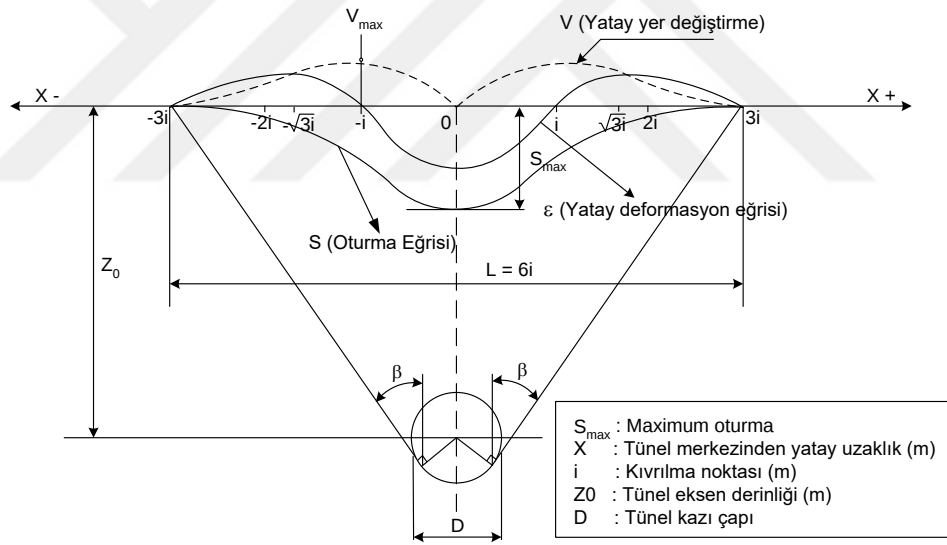
$$V_s = \int_{-\infty}^{\infty} S_v dx = \sqrt{2\pi} i_x \cdot S_{v,max} \quad (5.8)$$

Burada,

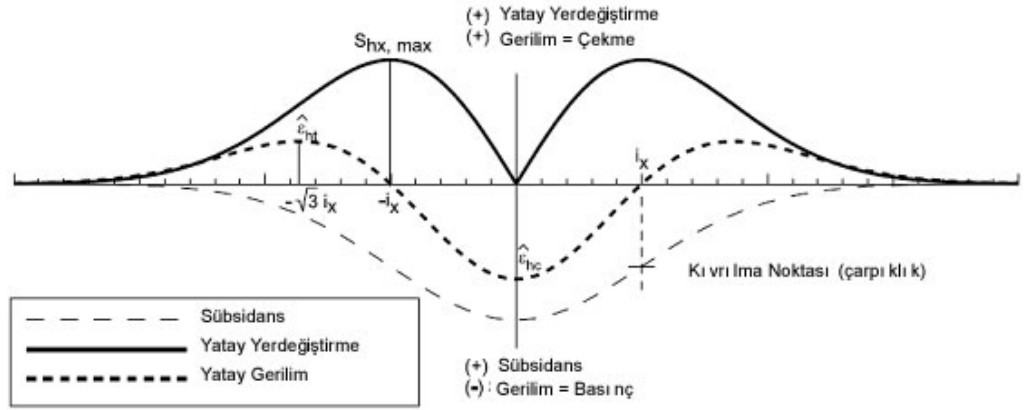
- V_s = Birim uzunluktaki çökme çanağı hacmi



Şekil 5. 5 Tünel inşaatı kaynaklı oturma geometrisi ve çökme çanağı genişlikleri



Şekil 5. 6 Sübsidans (Oturma) Parametreleri



Şekil 5. 7 Çökme çanağı boyunca yeryüzünde meydana gelen oturmalar, yatay yer değiştirmeler ve yatay basınç gerilim alanları

$$V_L = \frac{V_S}{\pi \frac{D^2}{4}} \quad (5.9)$$

Burada,

- $V_L = D$ çaplı tünelde meydana gelen hacimsel kayıp (%)

Çalışma sahasında tünel açma yöntemi olarak seçilen EPB methodunun dayandığı ilkeler genel olarak iki başlık altında toplanabilir. Buna göre bu ilkeler;

- Kazı bölgesi civarında, üç boyutta gerilme dağılımını kontrol altına almak ve,
- Kazı sırasında ve kazı sonrasında oluşan “gevşeme ve deformasyonların minimize edilmesi”, “kayaç- zemin dayanımının korunması”

olarak açıklanabilir. Bu ilkelerin gerçekleştirilebilmesi için kazı sırasında erken taşıyıcılık sağlayabilecek ve çevre ortamı ile birlikte çalışabilecek tahkimat sistemi kullanmak ve kazı faaliyetleri sırasında ve sonrasında oluşan tünel içi deformasyonların ve yüzey hareketlerinin devamlı ölçülmesi ve değerlendirilmesini

zorunlu kılmaktadır. Bu koşulların gerçekleştirildiği temsili görsel Şekil 5.8’de verilmiştir (Avunduk ve Çopur, 2018).



Şekil 5. 8 Çalışma sahasında uygulanmakta olan EPB yöntemi (Avunduk ve Çopur, 2018).

BÖLÜM ALTI

AYNA BASINCI FORMÜLÜ İÇİN AMPİRİK FORMÜLÜN GELİŞTİRİLMESİ

6.1. Verilerin Hiperyüzey Yaklaşımları ve Nümerik Modelleri

Bu kısımda; deformasyon (D), ayna basıncı (σ_{FP}), düşey gerilme (σ_{VS}), deformasyon modülü (E_{mass}), içsel sürtünme açısı (Φ) ve deformasyonun ölçüldüğü yer ile tünel eksenindeki yatay mesafe (HD) arasındaki ilişkiler incelenmiştir. D, σ_{FP} , σ_{VS} , E_{mass} , Φ ve HD'ye bağlı oluşan ayna basınçlarının en uygun hiperyüzeyi bilinen “En Küçük Kareler Yöntemi” (EKKY) ile bulunması araştırılmış ve en uygun doğrusal olmayan hiperyüzey saptanmıştır. Bu doğrusal olmayan hiperyüzey aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. Ayna basıncı ile ilgili hiperyüzey, Oluşan

$$\sigma_{FP} = \cos(\Phi) * e^{\left(a \frac{\sigma_{VS}}{E_{mass}} + b \frac{D}{HD} + c\right)} \quad (6.1)$$

dir. Burada a,b ve c katsayılarıdır.

Bu formülle tanımlanan hiperyüzey fonksiyonunda a,b ve c katsayılarının en uygunları bulunabilmesi için, doğrusallaştırılması ve EKKY ile hesaplanması gerekmektedir. Bu hiperyüzey doğrusallaştırıldığında,

$$\ln(\sigma_{FP}) = \ln(\cos \Phi) + a \frac{\sigma_{VS}}{E_{mass}} + b \frac{D}{HD} + c \quad (6.2)$$

oluşur. Burada kısaca,

$$a \frac{\sigma_{VS}}{E_{mass}} + b \frac{D}{HD} + c = \ln(\sigma_{FP}) - \ln(\cos \Phi) \quad (6.3)$$

Ve,

$$a \frac{\sigma_{VS_i}}{E_{mass_i}} + b \frac{D_i}{HD_i} + c = \ln(\sigma_{FP_i}) - \ln(\cos \Phi_i) + \varepsilon_i \quad (6.4)$$

Denklemlerini gözlemleyebiliriz. Burada ε_i hata terimidir.

Sonlu sayılardaki deneysel verilerde hatanın en aza indirilmesi için yeterli sayıda veri bulunmalıdır. 6.3 denklemini ile 6.4'te verilen doğrusal denklem sistemi EKKY ile

$$f(a, b, c) = \sum_{i=1}^n \left[a \frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} + b \frac{D_i}{HD_i} + c - \ln(\sigma_{FP_i}) + \ln(\cos \Phi_i) \right]^2 \quad (6.5)$$

fonksiyonuna minimize edilirse,

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial a} &= 2 \sum_{i=1}^n \left[a \frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} + b \frac{D_i}{HD_i} + c - \ln(\sigma_{FP_i}) + \ln(\cos \Phi_i) \right] \frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} \\ &= 0 \\ \frac{\partial f}{\partial b} &= 2 \sum_{i=1}^n \left[a \frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} + b \frac{D_i}{HD_i} + c - \ln(\sigma_{FP_i}) + \ln(\cos \Phi_i) \right] \frac{D_i}{HD_i} = 0 \quad (6.6) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial f}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^n \left[a \frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} + b \frac{D_i}{HD_i} + c - \ln(\sigma_{FP_i}) + \ln(\cos \Phi_i) \right] * 1 = 0$$

buradan ,

$$\begin{aligned} &a \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} \right)^2 + b \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i}{HD_i} * \frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} \right) + c \left(\frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} \right) \\ &= \sum_{i=1}^n \left[\ln(\sigma_{FP_i}) - \ln(\cos \Phi_i) \right] \frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} \\ &a \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} * \frac{D_i}{HD_i} \right) + b \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i}{HD_i} \right)^2 + c \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i}{HD_i} \right) \\ &= \sum_{i=1}^n \left[\ln(\sigma_{FP_i}) - \ln(\cos \Phi_i) \right] * \frac{D_i}{HD_i} \\ &a \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} \right) + b \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i}{HD_i} \right) + c \sum_{i=1}^n 1 \\ &= \sum_{i=1}^n \left[\ln(\sigma_{FP_i}) - \ln(\cos \Phi_i) \right] \end{aligned} \quad (6.7)$$

elde edilir. Matematiksel olarak yeniden yazılırsa,

$$\begin{bmatrix} \sum \left(\frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} \right)^2 & \sum \left(\frac{D_i}{HD_i} * \frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} \right) & \sum \left(\frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} \right) \\ \sum \left(\frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} * \frac{D_i}{HD_i} \right) & \sum \left(\frac{D_i}{HD_i} \right)^2 & \sum \left(\frac{D_i}{HD_i} \right) \\ \sum \frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} & \sum \left(\frac{D_i}{HD_i} \right) & \sum 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

$$= \begin{bmatrix} \sum \ln(\sigma_{FP_i}) - \ln(\cos \Phi_i) * \frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} \\ \sum \ln(\sigma_{FP_i}) - \ln(\cos \Phi_i) * \frac{D_i}{HD_i} \\ \sum \ln(\sigma_{FP_i}) - \ln(\cos \Phi_i) \end{bmatrix}$$

elde edilir. Buradan,

$$A = \begin{bmatrix} \sum \left(\frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} \right)^2 & \sum \left(\frac{D_i}{HD_i} * \frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} \right) & \sum \left(\frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} \right) \\ \sum \left(\frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} * \frac{D_i}{HD_i} \right) & \sum \left(\frac{D_i}{HD_i} \right)^2 & \sum \left(\frac{D_i}{HD_i} \right) \\ \sum \frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} & \sum \left(\frac{D_i}{HD_i} \right) & \sum 1 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Ve,

$$B = \begin{bmatrix} \sum \ln(\sigma_{FP_i}) - \ln(\cos \Phi_i) * \frac{\sigma_{vs_i}}{E_{mass_i}} \\ \sum \ln(\sigma_{FP_i}) - \ln(\cos \Phi_i) * \frac{D_i}{HD_i} \\ \sum \ln(\sigma_{FP_i}) - \ln(\cos \Phi_i) \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

$$x = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

Elde edilir. Doğrusal denklem sisteminin $\det(A) \neq 0$ olduğundan dolayı tek çözümü vardır. Dolayısıyla,

$$x = A^{-1}B = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

elde edilir. Çalışma alanından elde edilen veriler uygulanırsa;

$$A = 10^2 \begin{bmatrix} 0.000421995442265 & 0.000007730749270 & 0.03918470896200 \\ 0.000007730749270 & 0.000000210357016 & 0.000631972065900 \\ 0.039184708960200 & 0.000631972065900 & 4.060000000000000 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

$$B = 10^3 \begin{bmatrix} 0.019991246624049 \\ 0.000328923466693 \\ 2.033244966839170 \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

elde edilir. Denklem 6.12'de yerine koyarsak

$$x = A^{-1}.B = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = 10^2 \begin{bmatrix} 0.930303066642273 \\ -2.450307027024828 \\ 0.041482602799684 \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

Oluşur.Bu durumda hiperyüzey,

$$\sigma_{FP} = \cos(\Phi) * e^{\left(93.030303066642273 \frac{\sigma_{vs}}{E_{mass}} - 245.0307027024828 \frac{D}{HD} + 4.1482602799684\right)} \quad (6.16)$$

olarak yazılabilir.

Gerçek veriler ile tahmin edilen veriler karşılaştırıldığında $R^2 \approx 0,9451$ regrasyonu elde edilmiştir.

BÖLÜM YEDİ

NÜMERİK ANALİZLER

7.1. Plaxis 3D Numerik Modelleme Aracı

Yapılan çalışmalar kapsamında oluşturulan veri tabanı doğrultusunda üç boyutlu nümerik bir model oluşturulmuştur. Bu nümerik model oluşturulurken Plaxis 3D yazılımı kullanılmıştır. Plaxis 3D yazılımı, “Sonlu Elamanlar Yöntemi” methodunu kullanan bir yazılımdır. Sonlu Elemanlar Yöntemi, matematiksel olarak ilk geliştirilen yöntem olduğu için diğer metodlara nazaran oldukça daha iyi performans sergiler. Bu yazılımın tercih edilmesinin önemli nedenlerinin başında, yazılımın bize sunduğu “Kullanıcı Tanımlı” (User Defined) 3 boyutlu modellerin oluşturulmasına imkan vermesidir. Yani kendi oluşturduğumuz bir formülü veya kaya kütle sınıflaması gibi verileri yazılıma tanıtır analiz yapabilmemize imkan sağlar.

7.2. Kullanıcı Tanımlı Zemin Modelinin Oluşturulması

Plaxis numerik modelleme aracında, ilk olarak literatür taraması ve Plaxis'in kendi web sitesindeki dokümanlardan ve diğer makalelerden yararlanılmıştır. Mevcutta kullanılan derleyiciler ve ortamlar araştırılarak numerik modelleme sürecinin gerçekleştirilmesinde başarılı olacak en uygun olan ortam ve derleyici seçilmiştir. Derleyici olarak, Plaxis'in de önermiş olduğu iki derleyiciden birisi olan " Intel Parallel Studio XE 2017 Intel® Visual Fortran Compiler" seçilerek yazılım geliştirme sürecinde faydalanılmıştır. Kod editor olarak "Geany" kullanılmıştır. Fortran programlama dilinin genel özellikleri kuralları ve kullanımı incelenerek ilgili örnekler de araştırmalar yapılarak inceleme yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda DLL'in kodlanma aşamasına geçilmiştir. Bu kapsamda deneyler sonucu oluşturulan formüller fonksiyonlar halinde getirilerek işleyiş algoritması oluşturulmuştur. Test sürecinde geliştirilen DLL Plaxis yazılımına eklenerek örnek model farklı parametreler ile test edilerek sonuçları değerlendirilmiş ve başarı ile sürecin tamamlandığı değerlendirilmiştir. Süreç kapsamında geliştirilen formüller aşağıda verilen parametreler ve formüller çerçevesinde Fortran programlama dili ile oluşturularak uygulamaya eklenmiştir.

Geliştirilen DLL temel olarak 8 aşamalı döngüsel bir yapıda çalışmaktadır. Süreç içerisinde,

- Model Oluşturulmakta, parametre değerleri girilerek Plaxis hesaplama işlemine başlamaktadır. İlk olarak stres hesabı yapılır.
- Stres hesabından sonuç olarak çıkan değer, seçilen .txt uzantılı bir dosyadan kontrol edilir. Süreç için geliştirilen kod aşağıdaki şekildedir.

```
1      subroutine find_load(target_mass, near_load, e_i, v, fileIndex)
2      implicit none
3      REAL*4, intent(in)                :: target_mass
4      REAL*4, intent(out)               :: e_i, v, near_load
5      REAL, DIMENSION(2000, 3)         :: dat_arr
6      REAL*4                           :: load, e_modulus, poission
7      integer                          :: num = 2000, i, j, row
8      integer, dimension(:), allocatable :: temp_arr
9      integer                          :: location
10     Character*255                     :: path, fullPath, fileName
11     REAL*4                           :: a, b, c, d, e, f
12     logical                          :: itsopen
13     integer(kind=4) fileIndex
14
15     path = 'C:\PlaxisDataFiles\
16
17     select case (fileIndex)
18     case(1)
19         fileName = 'Face Pressure.txt'
20     case(2)
```

```

21     fileName = 'custom_data.txt'
22     case default
23     end select
24     fullPath= trim(path)//fileName
25     if (.not. allocated(temp_arr)) allocate(temp_arr(num))
26
27     OPEN (unit=99, file=fullPath, status='old', action='read')
28
29     row = 1
30     DO
31
32         read(99, *, end=20) f, load, a, b, c, e_modulus, poisson
33         dat_arr(row, 1) = load
34         dat_arr(row, 2) = e_modulus
35         dat_arr(row, 3) = poisson
36         row = row + 1
37
38     END DO
39
40 20 CONTINUE
41
42     CLOSE(99)
43
44     forall (i=1:num) temp_arr(i)=abs(dat_arr(i, 1)-target_mass)
45     location = minloc(temp_arr, 1)
46

```

```

47     near_load= dat_arr(location,1)
48     e_i = dat_arr(location,2)
49     v    = dat_arr(location,3)
50
51     DeAllocate(temp_arr)
52     end subroutine

```

```

1     function erm_gsi(ei,gsi) result(e_mass) !GSI
2     REAL*4,intent(in) :: ei
3     REAL*4,intent(in) :: gsi
4     REAL*4 :: e_mass
5     REAL*4 :: s, a
6     REAL*4 , PARAMETER :: sbt= -20d0/3d0
7     s = EXP((gsi-100d0)/9d0)
8
9     a = REAL(1d0/2d0) + REAL(1d0/6d0) * (EXP(REAL(-gsi/15d0))
10    *                                     - EXP(REAL(sbt)))
11
12     e_mass = (ei * ((s**a)**0.4d0)) !/1000d0
13     return
14     end function erm_gsi

```

```

1     function erm_q(rmr,ei,q) result(e_mass)
2     implicit none
3     REAL*4,intent(in) ::rmr, ei, q
4     REAL*4              ::e_mass

```

```

5
6     e_mass= (q**(1d0/3d0))
7
8     return
9     end function erm_q

```

```

1     function erm_rmr(rmr, ei) result(e_mass)
2
3     implicit none
4
5     REAL*4, intent(in) :: rmr
6     REAL*4, intent(in) :: ei
7     REAL*4              :: e_mass
8
9     e_mass = ei/(100d0*(0.0028d0*(rmr**2d0)
10    *              + 0.9d0* EXP(REAL(rmr/22.82d0))))
11
12    return
13
14    end function erm_rmr

```

```

1     function calculate_bulk_modulus(e_mass,v) result (bulk_modulus)
2
3     REAL*4, intent(in) :: e_mass,v
4     REAL*4              :: bulk_modulus
5
6     bulk_modulus= e_mass / (3d0*(1d0- ( 2d0 * v )))
7
8     return
9
10    end

```

```

1     function calculate_shear_modulus(e_mass,v) result (shear_modulus)

```

```

2
3     REAL*4 :: e_mass, v, shear_modulus
4
5     shear_modulus= e_mass / (2 * (1 + v))
6
7     return
8     end

```

```

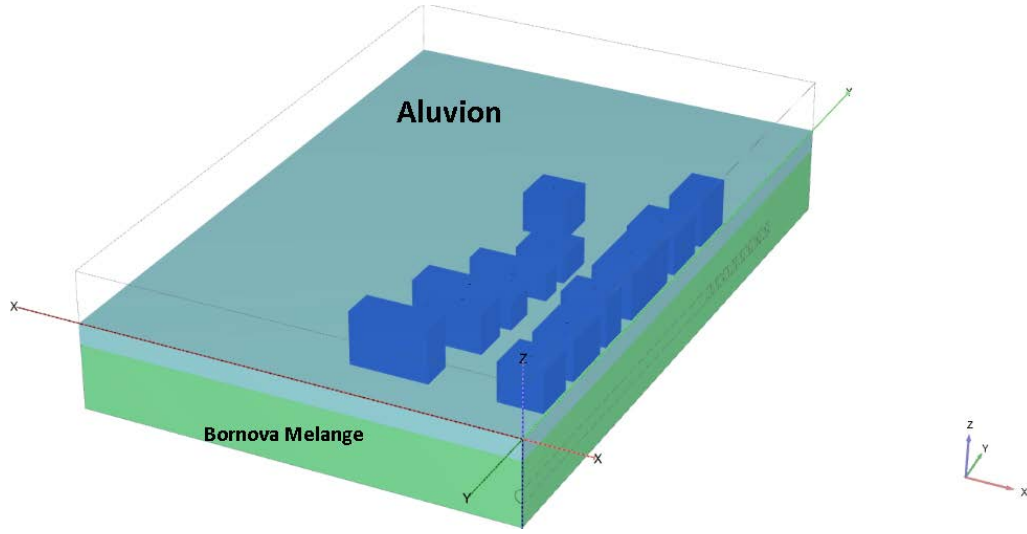
1
2     function defo_zz(a,b,c,d,p,t,gsi,rmr,mIndex,a_i) result(retval)
3
4     REAL*4      :: a, b, c, d, p, t, a_mass
5     REAL*4      :: gsi, rmr, a_i
6     REAL*4      :: retval
7     INTEGER     :: mIndex
8     REAL*4      :: tresult=0d0
9
10    select case (mIndex)
11    case(1)
12        a_mass = Hook(gsi, a_i)
13    case(2)
14        a_mass = KalamarisBienaswski(a_i, rmr)
15    end select
16
17    tresult = (a*(abs(p)**b)*c*(t**d)*a_mass)/10d9
18
19    retval = tresult
20    return
21    end function defo_zz
22

```

Aynı işlemler hesaplama boyunca döngüsel olarak sonuca ulaşıncaya kadar devam eder.

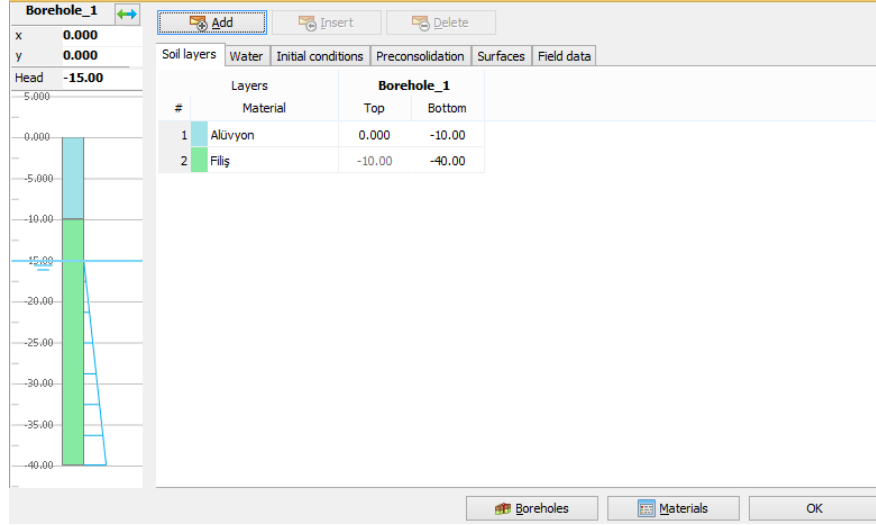
7.3. Kullanıcı Tanımlı 3 Boyutlu Nümerik Model Analizleri

Tez çalışması boyunca elde edilen veriler neticesinde Bölüm 6’da elde edilen formülün 3 boyutlu nümerik modelleme yazılımına tanımlanması edilmesi akabinde, yazılımda EPBM ile açılmış bir tünel ve yeryüzünde açılan tünelin etki alanına giren yapıların olduğu bir senaryo oluşturulmuştur. Oluşturulan senaryo, da kullanılan kaya, zemin ve yeryüzü yapıları parametreleri tez çalışması kapsamında belirlenmiş ve bu veriler modele tanımlanmıştır. Senaryo kapsamında oluşturulan model Şekil 7.1’de verilmiştir.



Şekil 7. 1 Senaryoda oluşturulan model

İlk 10 metrede alüvyon örtüsü ve bunu takip eden 30 metrede fiş tabakası modele tanımlanmıştır. Bunların yanında ölçümlerden elde edilen yeraltı suyu seviyesi de modele tanımlanmıştır. Şekil 7.1’de de görüldüğü gibi çalışma alanındaki yeryüzü yapılarını temsil eden yapılar modele eklenmiştir. Şekil 7.2’de modelde tanımlanan formasyonlar ve yeraltı suyu verilmiştir.

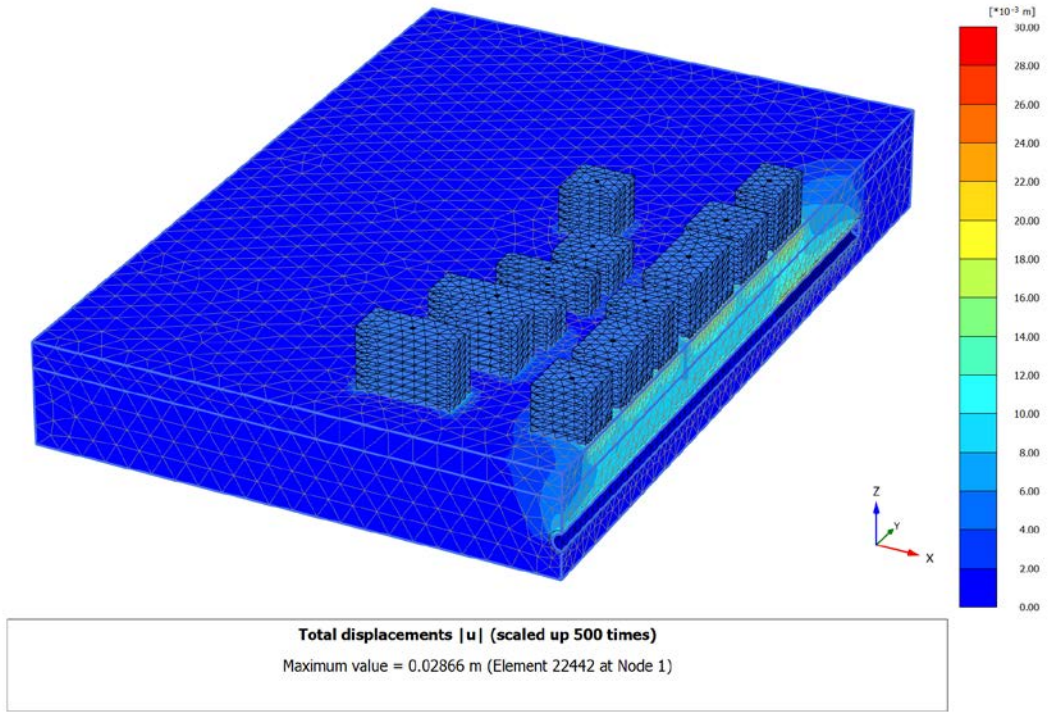


Şekil 7. 2 Modelde tanımlanan formasyonlar ve yeraltı suyu durumu

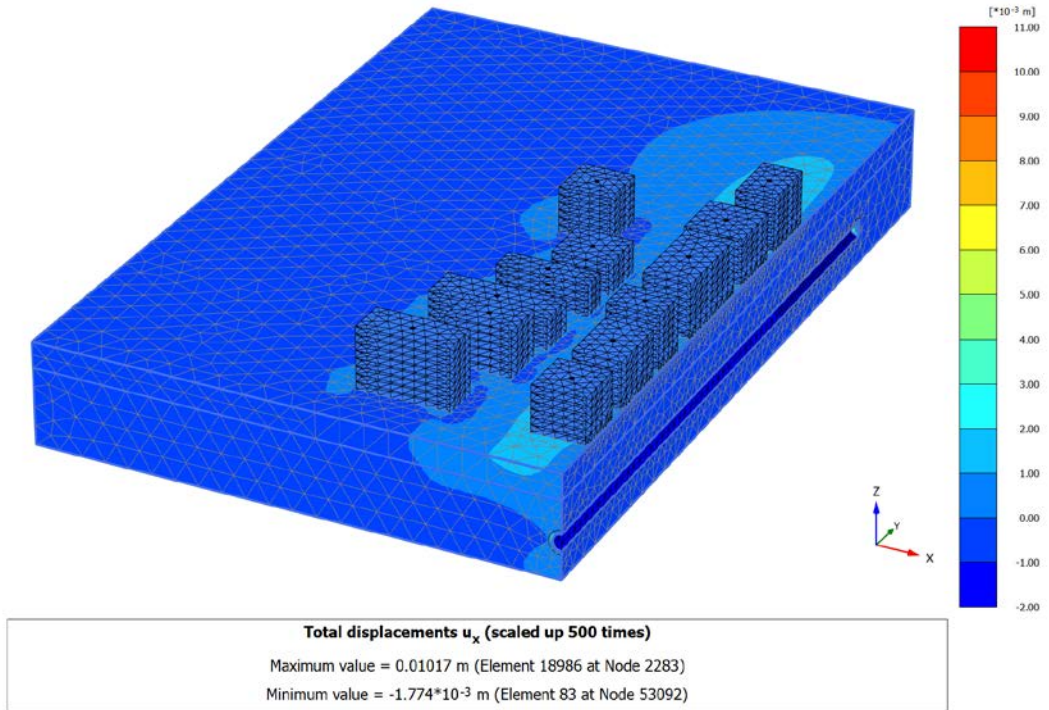
Oluşturulan senaryoda toplamda 13 aşama tanımlanmıştır. Bunlar,

- Initial phase : Modelin durağan hali ve ilk yükleme koşullarının olduğu aşama
- Phase 1 : Modelin yerüstü yapılarını yüklendiği aşama
- Phase 2-13 : EPBM ile tünel açma işlemi

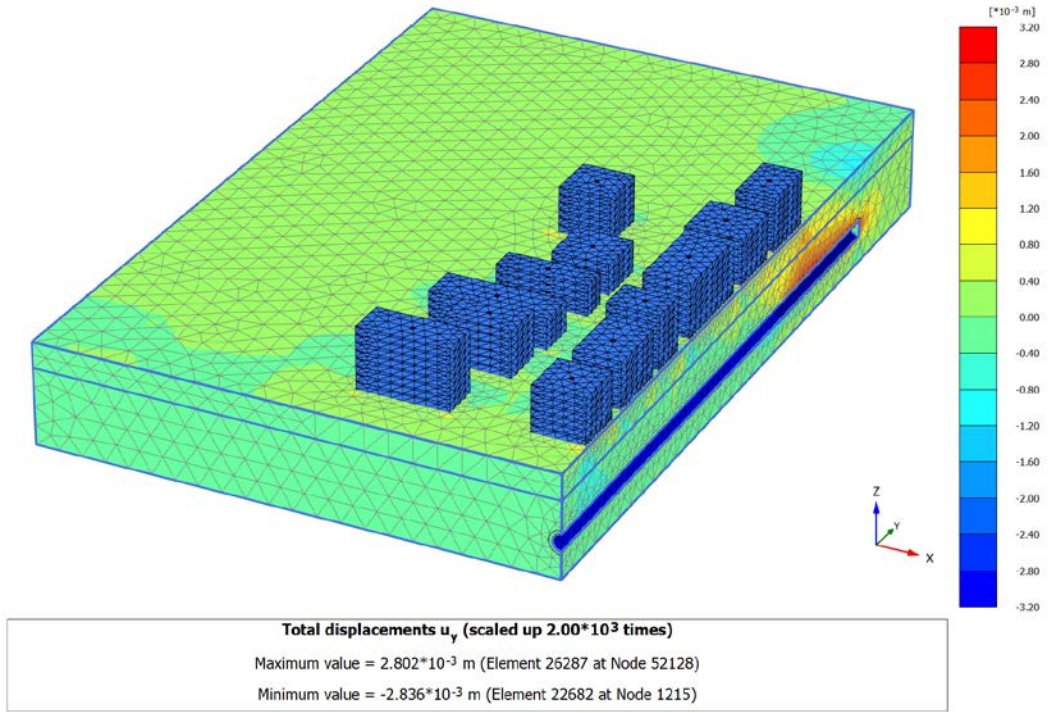
Kazı işlemleri sonucu modelde oluşan toplam, yatay ve düşey deformasyonlar ile efektif ve toplam gerilmeler aşağıdaki şekillerde paylaşılmıştır.



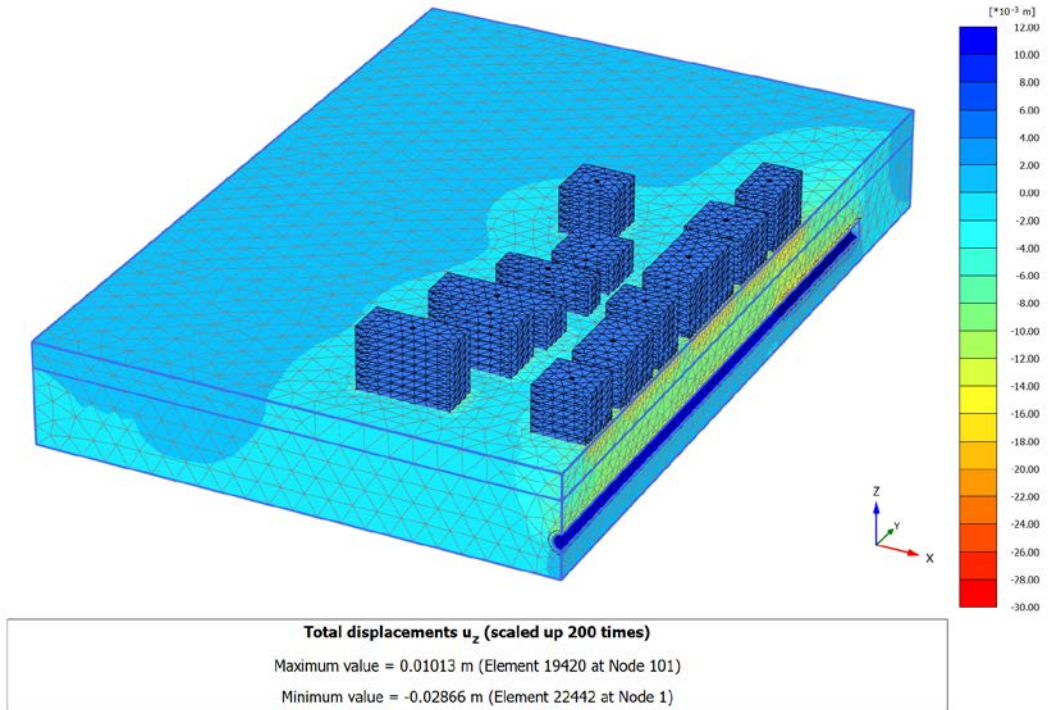
Şekil 7. 3 Modelde oluşan toplam deformasyonlar



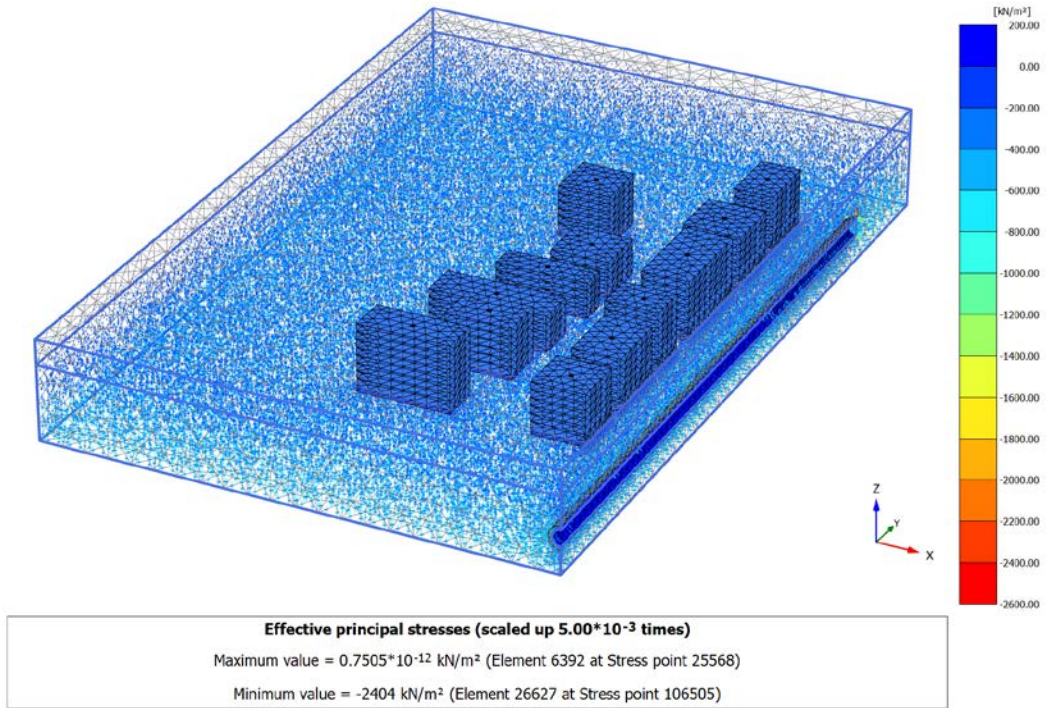
Şekil 7. 4 Modelde oluşan x-yönü yatay deformasyonlar



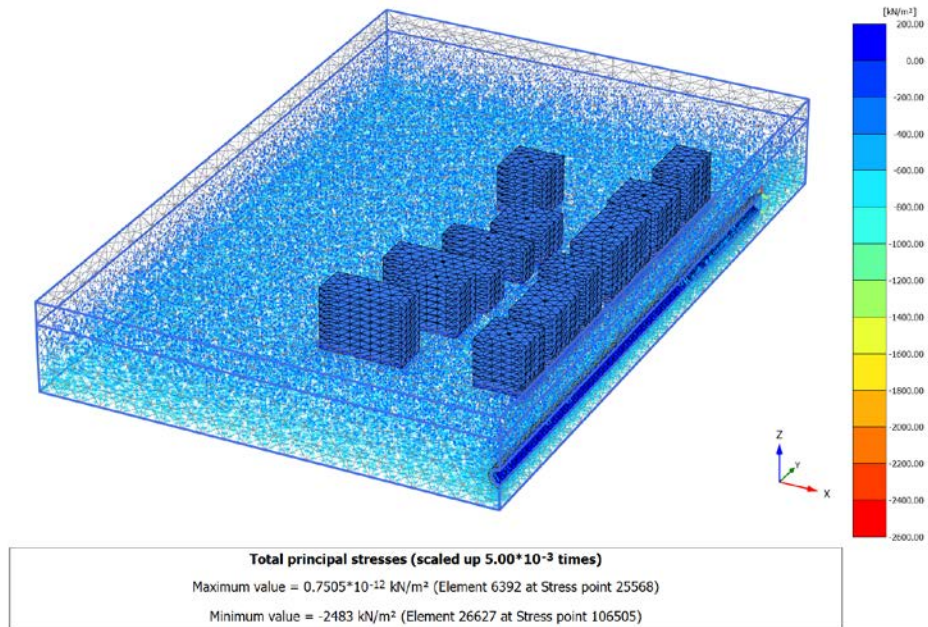
Şekil 7. 5 Modelde oluşan y-yönü yatay deformasyonlar



Şekil 7. 6 Modelde oluşan z-yönü düşey deformasyonlar

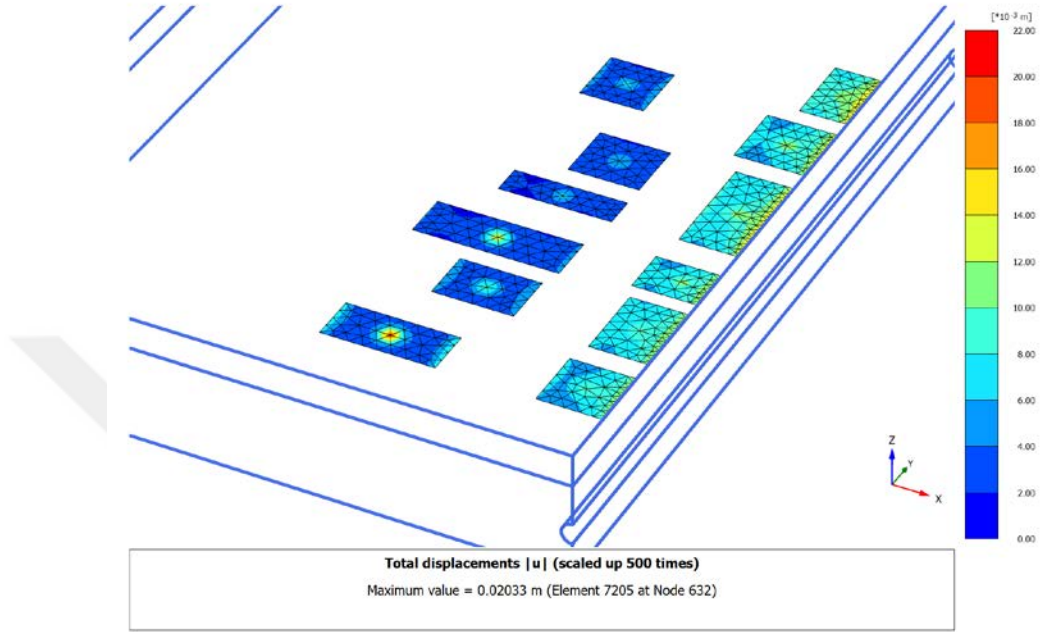


Şekil 7. 7 Modelde oluşan efektif gerilmeler

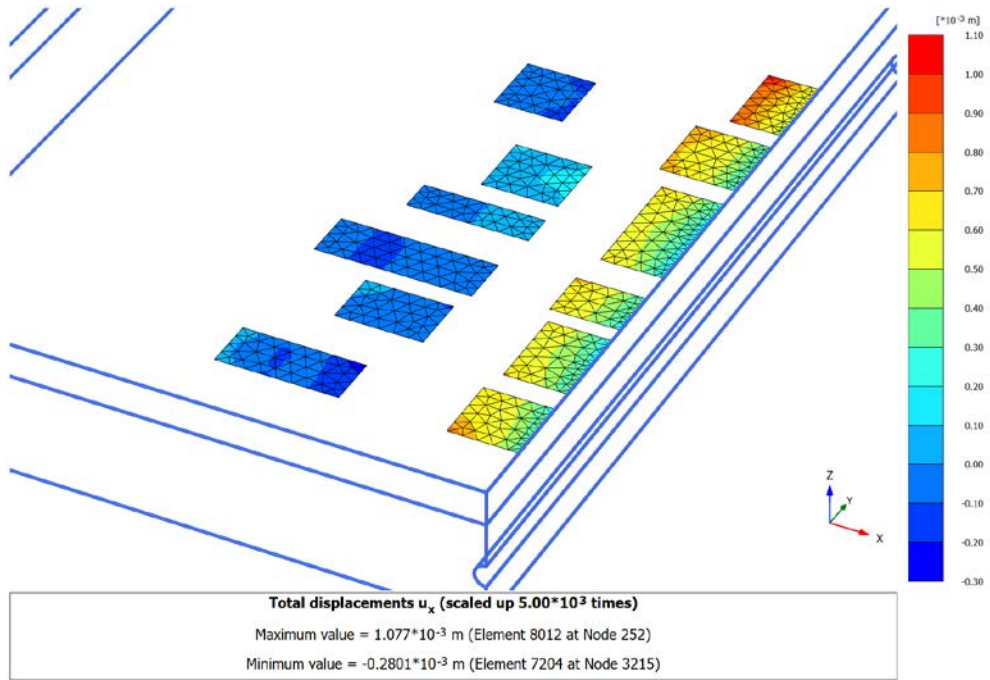


Şekil 7. 8. Modelde oluşan toplam gerilmeler

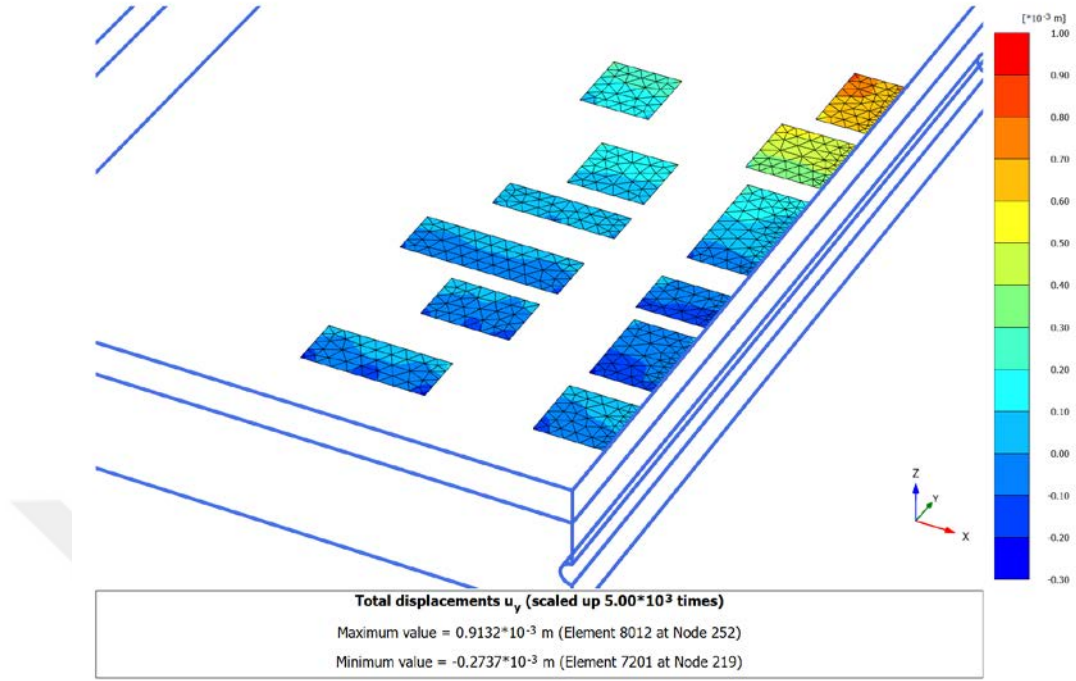
3 boyutlu nümerik analizlerde oluşturulan senaryo sonucu tüm binaların temellerinde gerçekleşen deformasyonlar, aksenal kuvvetler, kesme kuvvetleri, eğilme momentleri ve burkulma momentleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



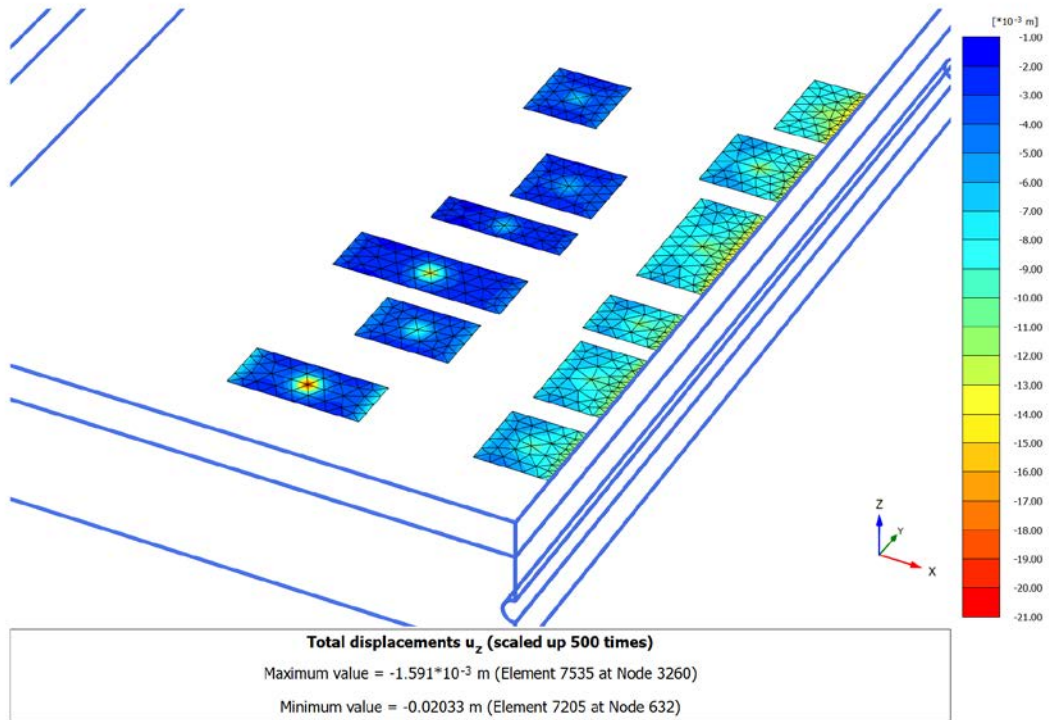
Şekil 7. 9 Bina temellerinde oluşan toplam deformasyonlar



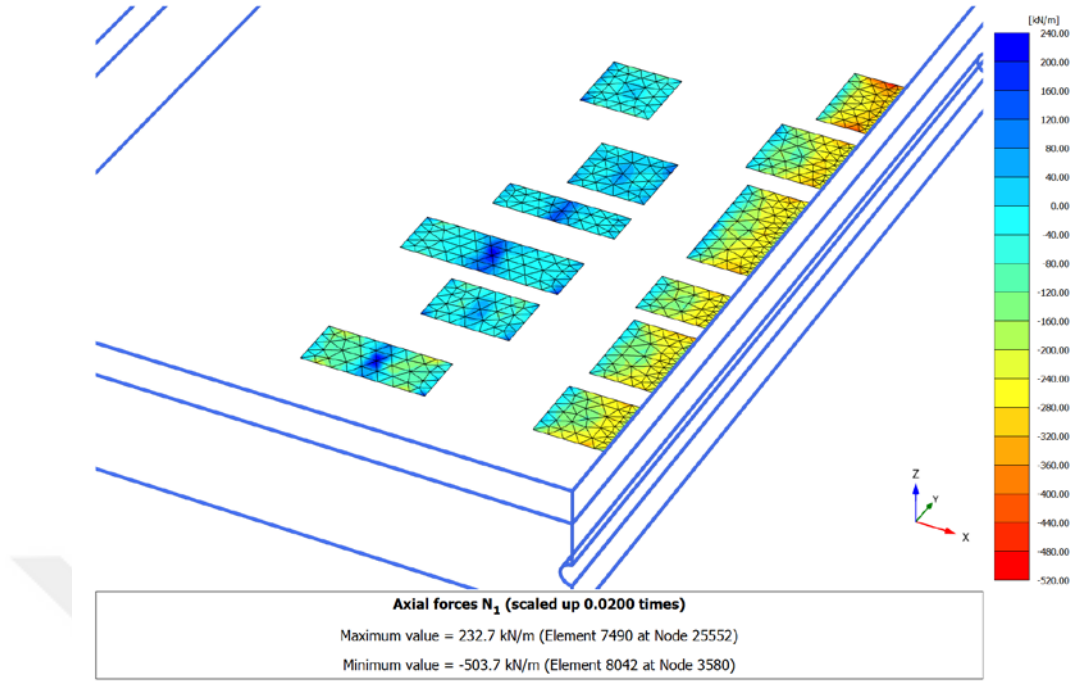
Şekil 7. 10 Bina temellerinde oluşan x-yönü yatay deformasyonlar



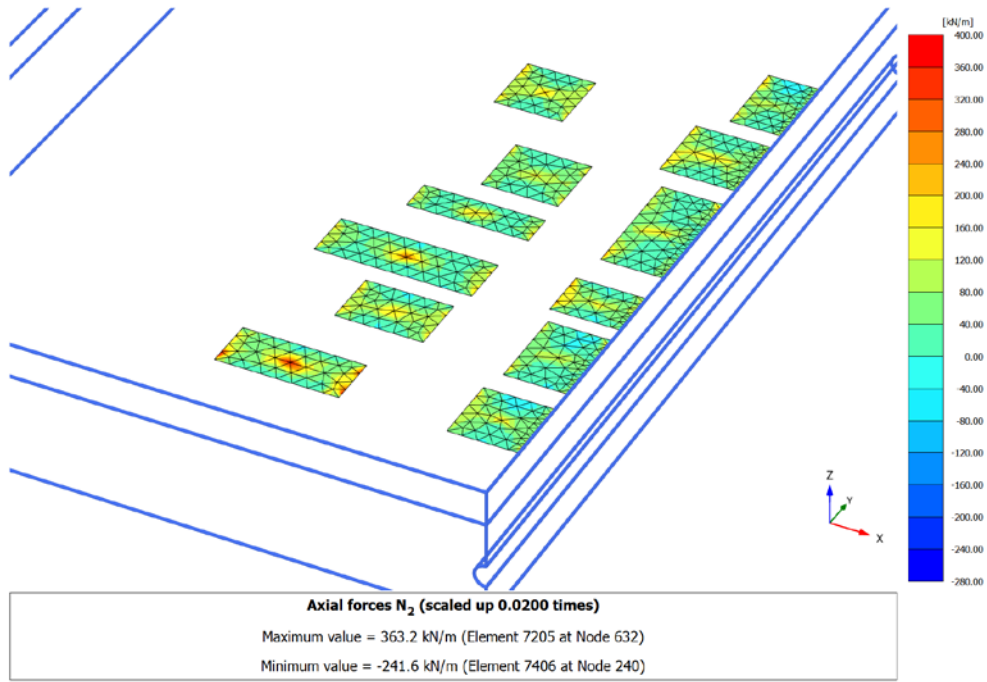
Şekil 7. 11 Bina temellerinde oluşan y-yönü yatay deformasyonlar



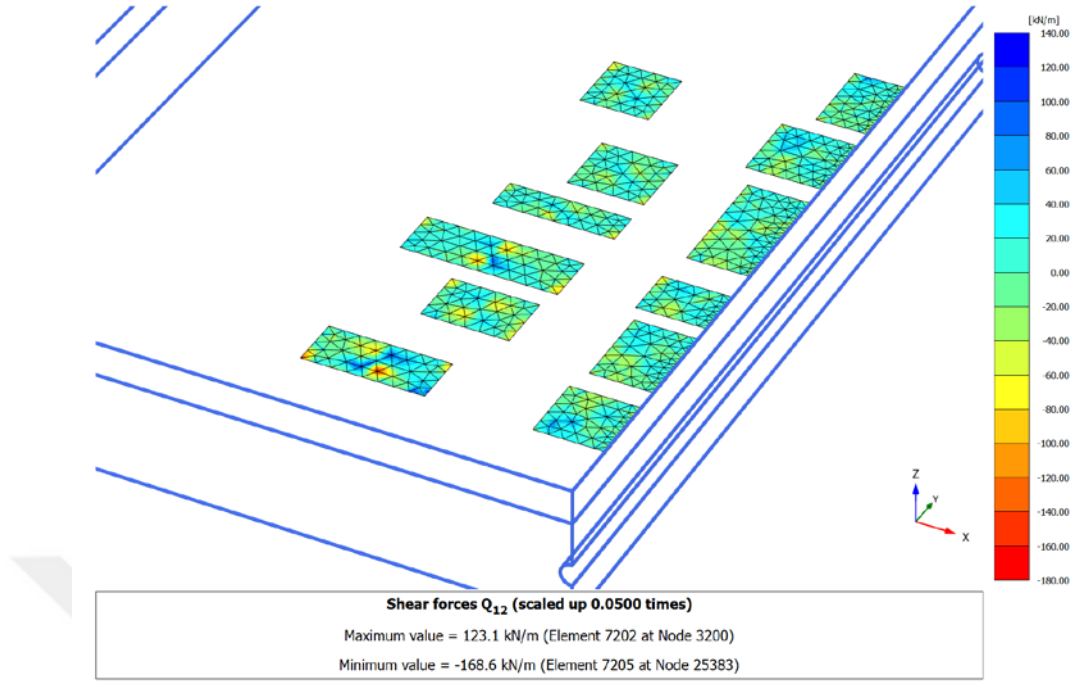
Şekil 7. 12 Bina temellerinde oluşan z-yönü düşey deformasyonlar



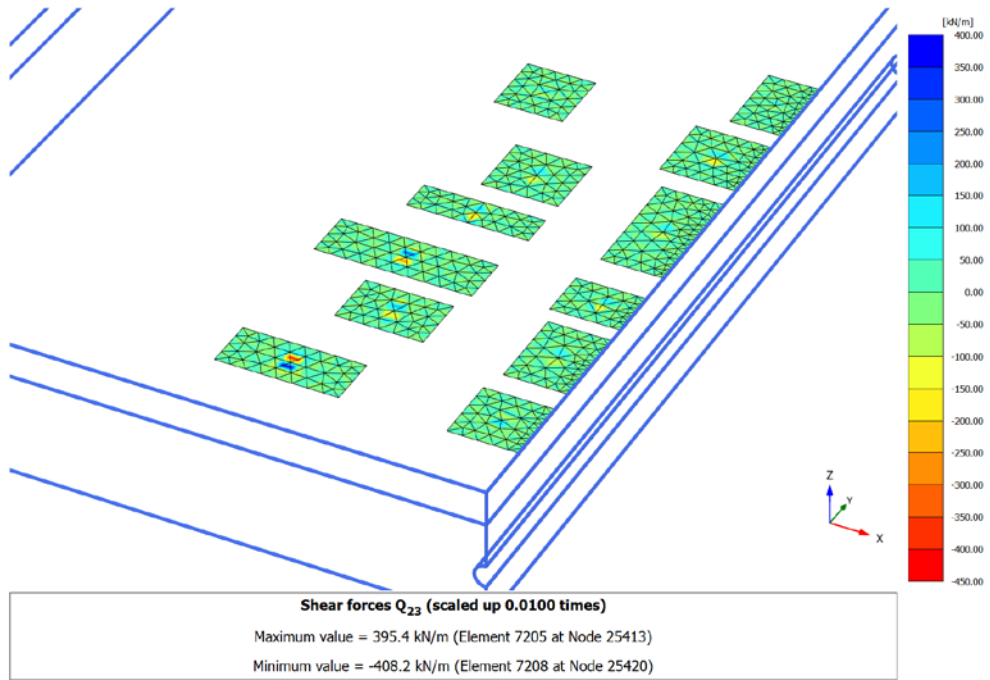
Şekil 7. 13 Bina temellerine etki eden eksenel kuvvetler (N_1)



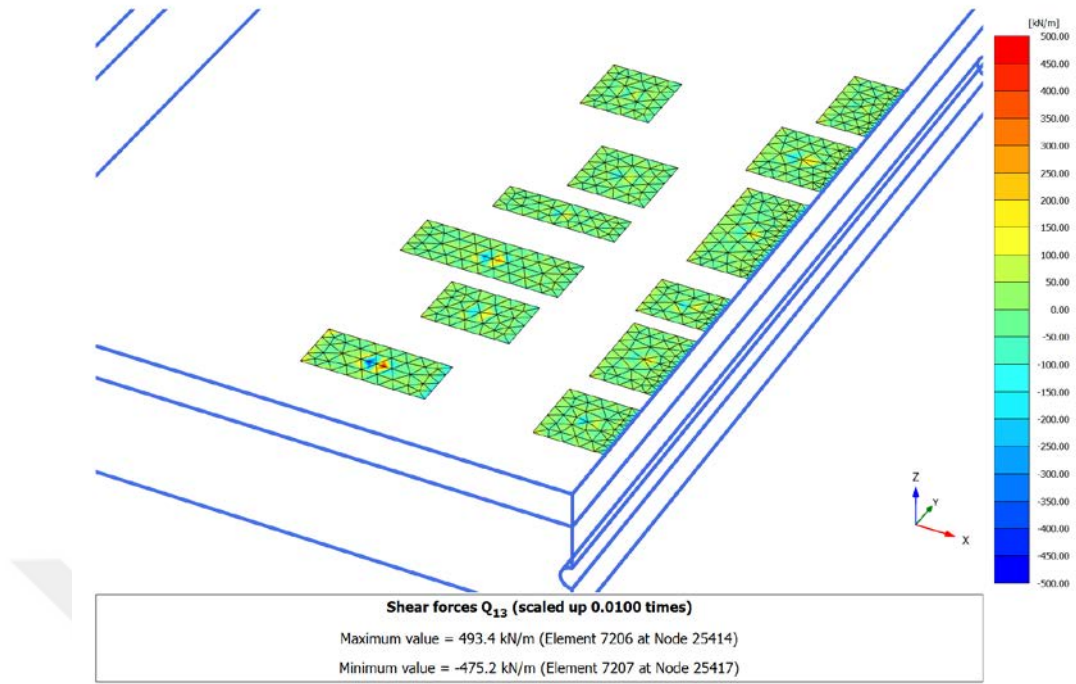
Şekil 7. 14 Bina temellerine etki eden eksenel kuvvetler (N_2)



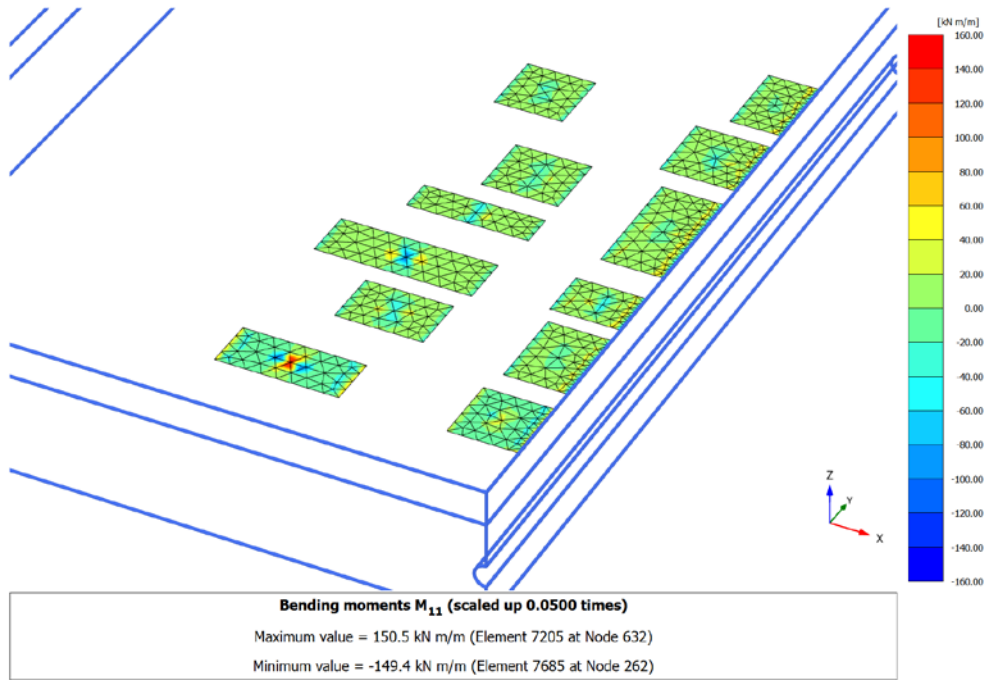
Şekil 7. 15 Bina temellerine etki eden makaslama gerilmeleri (Q_{12})



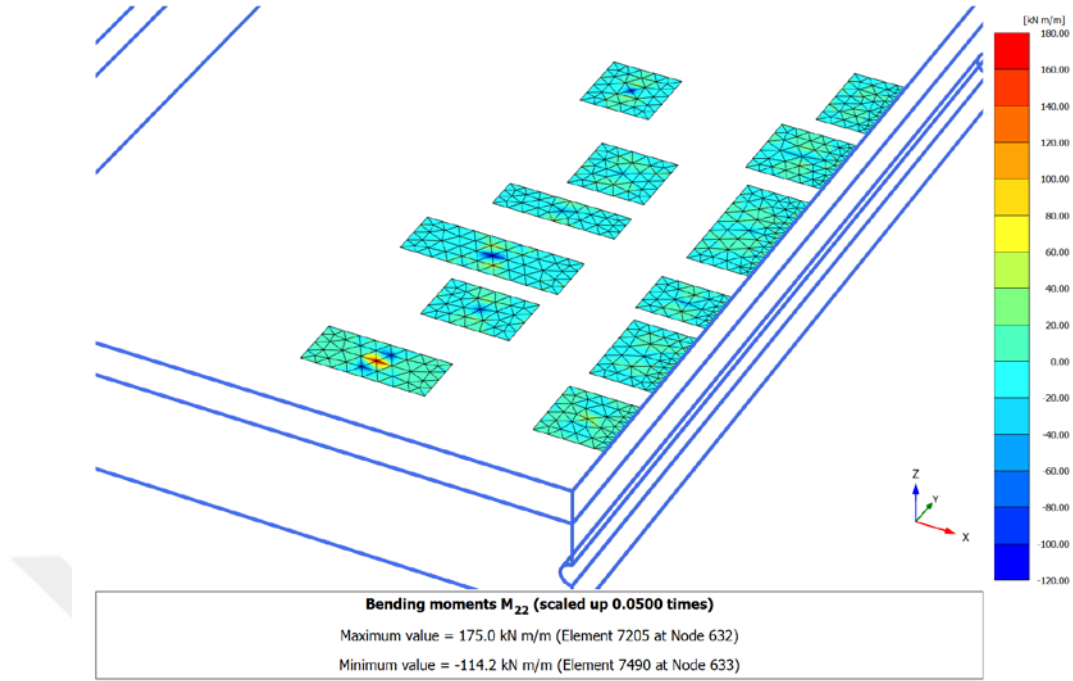
Şekil 7. 16 Bina temellerine etki eden makaslama gerilmeleri (Q_{23})



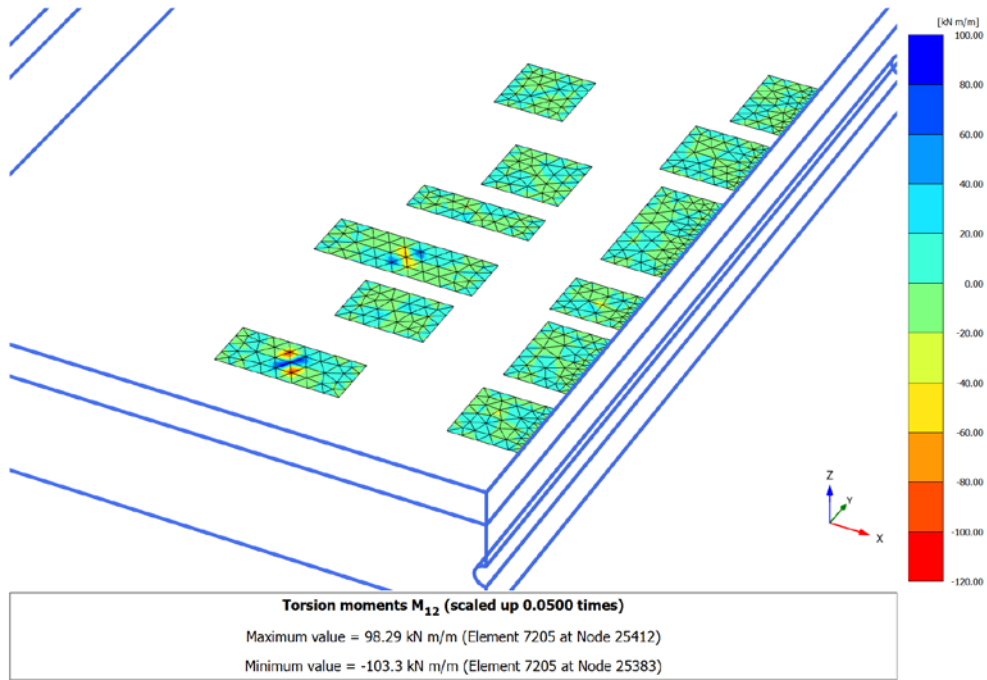
Şekil 7. 17 Bina temellerine etki eden makaslama gerilmeleri (Q_{13})



Şekil 7. 18 Bina temellerine etki eden eğilme momenti (M_{11})



Şekil 7. 19 Bina temellerine etki eden eğilme momenti (M_{22})



Şekil 7. 20 Bina temellerine etki eden burkulma momenti (M_{12})

Yukarıda verilen yeni formülün entegre edildiği sayısal modelleme sonucunda kazı sonrasında oluşan toplam deformasyonlara bakıldığında modelde maksimum 0.028m

'lik bir deformasyon olduğu tahmin edilmiştir. 28mm'lik deformasyon için ayna basıncı şu şekilde hesaplanır,

$$\sigma_{FP} = \cos(0.473) * e^{\left(93.03 \frac{923.704 kN/m^2}{65087.86108 kN/m^2} - 245.03 \frac{0.028 m}{54.94 m} + 4.149\right)}$$

[7.1]

$$\sigma_{FP} = 186,3036 \text{ } kN/m^2$$

$$\sigma_{FP} = 1.863036 \text{ Bar}$$

BÖLÜM SEKİZ

SONUÇLAR

Fahrettin Altay – Narlıdere Kaymakamlık Metro Hattı’nda jeoteknik çalışmalar, hidrojeolojik çalışmalar, yer radarı çalışmaları, deformasyon ölçümleri çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar nihayetinde elde edilen veri tabanı kullanılarak bir EPBM Basınç-Kazı Ortamı Formülü geliştirilmiştir. Bu formül, sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir 3 boyutlu nümerik modelleme yazılımına tanımlanmıştır. Metro hattı senaryosu bu 3 boyutlu nümerik modelleme yazılımında oluşturulmuş ve sonuçlar paylaşılmıştır. Tüm bu yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- İzmir fayı Balçova segmenti ve metro güzegahı için yapılan yüzey deformasyonlarının zaman serisi olarak analiz edildiğinde 2018-2020 (Aralık) yılları arasında deformasyon değeri +0.334m ile -0.193m arasında değişim göstermektedir. Belirlenen deformasyon değişimi bu aralıkta homojen bir dağılım göstermektedir. Deformasyonlardaki değişim alan içerisinde belirgin değişim hatlarına sahiptir. Deformasyon bu zaman aralığı içerisinde %51.3 oranında pozitif %48.7 negatif olarak alansal bir değişim göstermiştir.
- Balçova segmentinde 2020 (Aralık)–2021 (Mayıs) tarihleri arasında meydana gelen deformasyon değişim değerleri +0.474m ile -0.416m olarak belirlenmiştir. Deformasyondaki değişim bu zaman aralığında yine homojen bir dağılım göstermektedir. Pozitif ve negatif deformasyon değişim oranları yüzdesel olarak sırasıyla %50.8 ve %49.2 olarak hesaplanmıştır. Bu dönem içinde de deformasyon bölgeleri belirgin olarak bir ayırım gösterdiği görülmektedir. Alansal olarak deformasyon hareketinin değerlendirildiğinde 2018-2020(Aralık) yılı analiz sonuçlarına göre pozitif deformasyonun batı yönünde artış gösterdiği görülmektedir.
- 2021 (Mayıs)–2021 (Kasım) tarihleri arasında ise Balçova segmentinde belirlenen deformasyon değişimleri +0.0838m ile -0.0804m arasında değişim göstermiştir. Önceki iki zaman serisine bağlı olarak belirlenen deformasyon değerlerinden daha düşük bir yüzey deformasyonunun olduğu görülmektedir.

Ancak önceki iki zaman serisinden farklı olarak bu dönem aralığında pozitif yöndeki deformasyon negatif yöndeki deformasyondan daha fazladır (%57 pozitif, %43 negatif). Bu zaman aralığındaki analizlerde de görüldüğü üzere pozitif deformasyon batı yönünde ilerleme göstermektedir.

- 2021 (Mayıs)-2021 (Kasım) tarihleri arasında ise Balçova segmentinde belirlenen deformasyon değişimleri +0.0838m ile -0.0804m arasında değişim göstermiştir. Önceki iki zaman serisine bağlı olarak belirlenen deformasyon değerlerinden daha düşük bir yüzey deformasyonunun olduğu görülmektedir. Ancak önceki iki zaman serisinden farklı olarak bu dönem aralığında pozitif yöndeki deformasyon negatif yöndeki deformasyondan daha fazladır (%57 pozitif, %43 negatif). Bu zaman aralığındaki analizlerde de görüldüğü üzere pozitif deformasyon batı yönünde ilerleme göstermektedir.
- Elde edilen sonuçlar neticesinde Balçova segmenti için yapılan yüzey deformasyonlarının alansal değişimleri zaman serisi olarak incelendiğinde doğudan batı yönüne pozitif bir deformasyonun olduğu görülmektedir. Pozitif yöndeki deformasyon zamana bağlı olarak negatif deformasyonun yerini almaktadır. Aynı uydu radar görüntüleri ile deformasyonların pozitif ve negatif olarak çift bölge olarak yapılan analizlerde bu ilerleme şeklindeki deformasyon hareketi daha belirgin olarak belirlenmiştir.
- Elde edilen sonuçlara göre deformasyon hareketi çalışma alanında daha önce belirlenen İzmir fayına dik yönde hareket etmektedir. Bu durum normal fay deformasyonu ile uyumlu görülmemektedir. Yüzey deformasyonun bu karakteristiği heyelan mekanizmaları ile daha uyumlu olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, bölgesel ölçekte Seferihisar ve Tuzla fayları (Doğrultu atımlı faylar) arasında kalan 1. Bölgede İzmir Fayı'nın hem yükselen bloğunda ve hem de düşen bloğunda kuzey-güney ve KB-GD doğrultulu fayların varlığı bilinmektedir. Bu durumda güncel deformasyonun İzmir fayının varlığından çok heyelanın geometrisine bağlı olarak eski zayıflık zonlarını izlediği söylenebilir.
- Deformasyon miktarlarının fazla değişiminde 1999 30 Ekim'de meydana gelen Samos depreminin etkileri de gözükmemektedir. Bununla birlikte metro kazı

sahasının deformasyon bazında temel alındığında hareketli bir bölge olduğu görülmektedir.

- Metro güzergahı ve çevresinin jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalar ışığında, metro kazı güzergahını Bornova Filiş birimi oluşturmaktadır.
- Çalışma alanı güzergahı boyunca yapılan araştırma sondajlarında filiş birimi iki ayrı zon olarak sınıflandırılmıştır. Bunlardan biri alüvyon biriminin hemen alt dokunağında gözlenen “sarımsı kahve-gri renkli kırıklı, parçalı, kumtaşı-şeyl” olarak adlandırılan Zayıf Filiş Zonu’nun gelmekte olup ortalama kalınlığı 16.50 m olarak karşımıza çıkmaktadır.
- Genel olarak geçirimsiz özellik sunan filiş birimi, güzergah boyunca yapılan Lugeon testlerine göre 1.73 ile 7.60 LU arasında değişmekte olup genel ortalaması ise 3.91 LU’dur. Bu verilere göre lokal olarak geçirimli zonlar içermekle birlikte az geçirimli bir özelliğe sahip olduğu görülmektedir.
- Sahada önceki jeoteknik ve güzergah zemin etüdlerinde belli aralıklarda yapılmış olan geçirgenlik değerleri ile tüm kuyu boyunca yapılan geçirgenlik değerleri Tablo 8.1’de istatistiki verileri sunulmuştur.

Tablo 8. 1 Birimlerin ortalama geçirgenlik değerleri

	Filiş (LU)	Belli aralıklarda belirlenen ve Ortalamaları Alınan Alüvyon Geçirgenlik Değeri (cm/s)	Tüm Kuyu Boyunca Belirlenen ve Ortalamaları Alınan Geçirgenlik Değeri (cm/s)
Min	1.73	9.16E-05	9.83E-04
Max	7.60	1.14E-03	4.29E-02
Ortalama	3.91	4.66E-04	1.65E-02

- Çalışma alanında en önemli akifer olan alüvyonel birim tünel güzergahı boyunca en önemli yeraltı suyu problemine neden olacak birim olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çerçevede güzergah boyunca açılan sondajlardan elde edilen geçirgenlik değerlerinin kuyu bazında daha sonra birim bazında istatistiki verileri elde edilmiştir.

- Zemin etüdlerinde elde edilen geçirgenlik değerleri 9.16×10^{-5} ile 1.14×10^{-3} cm/s arasında değişmektedir. Bu aralığı göre “Az Geçirimli ve Geçirimli” özelliktedir. Sahada açılmış olan seviye izleme kuyularında tüm kuyu derinliği boyunca yapılan basınçsız su deneyinde ise 9.83×10^{-4} ile 4.29×10^{-2} cm/s arasında geçirgenlik değeri elde edilmiştir.
- Çalışma sahasında yapılan çalışmalarda alüvyon akiferdeki yeraltı suyunun yağışlardan hızlı etkilendiği, yağışlı dönemler yükseldiği ve kurak dönemlere doğru seviyelerde azalma izlenmiştir. Yapılan ölçümlerde, Ocak, Nisan ve Eylül ayları ortalama su kotlarına bakıldığında, su seviyesinin Ocak ayında ortalama 7.84 m, Nisan ayında 4.56 m ve Eylül ayında ise 4.23 m olarak kaydedilmiştir.
- Akiferdeki yeraltı suyu akım yönünün güneyden kuzeye doğru olduğu ve yağışlı ve kurak dönemlerde akım yönünde bir değişiklik olmadığı izlenmiştir. Ancak, metro tünel güzergahı boyunca bazı depresyon konilerinin olduğu, tünel içerisine yeraltı suyu sızmalarının bu konilere neden olduğu anlaşılmaktadır.
- Yer radarı ölçümleri, özellikle yerleşim yerlerinin uygun olan kesimlerinde güzergaha dik ve paralel hatlar boyunca 3 boyutlu değerlendirme yapılacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Güzergah veri toplama geometrisi ve sondaja dayalı oluşturulan jeoloji yapı göz önünde bulundurularak incelenmiştir.
- Üç boyutlu değerlendirmeler güzergahın jeolojik yapısının dağılımı derinliği ve kalınlıkları hakkında bilgi edinmek amacı ile gerçekleştirilmiştir. Seviye haritala çalışmalarında amaç ise bu jeolojik birimlerin dört farklı derinlik seviyesinde iki boyutlu dağılımlarının yanı sıra şehir metro çalışmalarının en önemli sorunlarından olan olası kuyu lokasyonlarının belirlenmesi hedeflenmiştir.
- İki boyutlu değerlendirme çalışmaları ile mevcut sondaj bilgileri ve radagram analizlerinin birlikte yorumu ile jeolojik kesitler oluşturulmuştur. Bu jeolojik kesitler de yer altı suyu seviyesinin yanında örtü kalınlığı ve özellikle alüvyon birimi içerisinde ki geçirimli ve geçirimsiz birimlerin ayrımı yapılmıştır.
- Güzergahın KM:0+000-0+400 kesiminin daha çok zemin koşulları altında olduğu görülmektedir. Yer altı suyu seviyesi 8-10 metre aralığında yer almakla

beraber kurak dönem de bu seviye jeolojik birimlerin geçirimli özelliğinden dolayı daha derinlerde olacaktır. Güzergahın bu kesiminde kazı çalışmalarını etkileyebilecek blok kaya yansıması elde edilememiştir.

- Güzergahın KM:0+640-0+760 kesiminde EPBM zemin özelliği kazanmış birimler içerisinde ilerleyecektir. Özellikle ayrılmış filiş birimi yanal ve düşey yönde az olsa yer altı suyu hareketine imkan tanıyacaktır. Güzergahın bu kesiminde kazı çalışmalarını etkileyebilecek blok kaya yansıması görülmemektedir.
- Güzergahın KM:0+760-1+500 kesiminin ayrılmış filiş birimi içerisinde olacağı görülmektedir. Yer altı suyu seviyesi 6-7 metre seviyelerinde görülmektedir. Güzergahın bu kesiminde blok olarak yorumlanan yansımalar gözlenme birlikte kazı çalışmalarını etkileyebilecek büyük blok kaya yansıması görülmemektedir.
- Güzergahın KM: 1+720-2+780 kesiminin ayrılmış filiş ve zemin özelliği kazanmış birimler olduğu görülmektedir. Güzergahın bu kesiminde yer altı suyu seviyesi öncel yapılmış olan sondajlar ile farklılık göstermektedir. Bu farklılık jeofizik çalışmaların yağışlı dönemde yapılmış olmasından kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır.
- Güzergahın KM: 3+380-3+760 kesminde yeraltı su seviyesinin 5-10 aralığında yer aldığı ve kumlu çakıllı seviyelerin bulunduğu görülmüştür. Yapılaşmanın sık olmadığı bu kesimde yüzeyden beslenme yüksek olacağı tahmin edilmektedir.
- Güzergahın KM: 4+980-5+460 kesminde yeraltı su seviyesinin 20 metre civarında olduğu görülmüştür. Güzergahın kestiği akarsuyun etkisi KM:5+140-5+300 metreleri arasında yer alan kesimde kendini göstermektedir.
- Çalışma kapsamında yapılan tünel aynalarının yer radarı ile incelenmesinde kaya kütlesi içinde boşluk olmadığı, kil içeriği yüksek olan aynalarda yumuşak zemin yapısı ve yoğun su varlığı tespit edilmiştir.
- Yapılan çalışmalar neticesinde tünel kazısında ayna stabilitesi ve kazının üst yapılara zarar vermemesi için alınması gerekli önlemler belirenmiştir. Tablo 5.7’de ölçüm kontrollerine bağlı eylem planı verilmiştir.

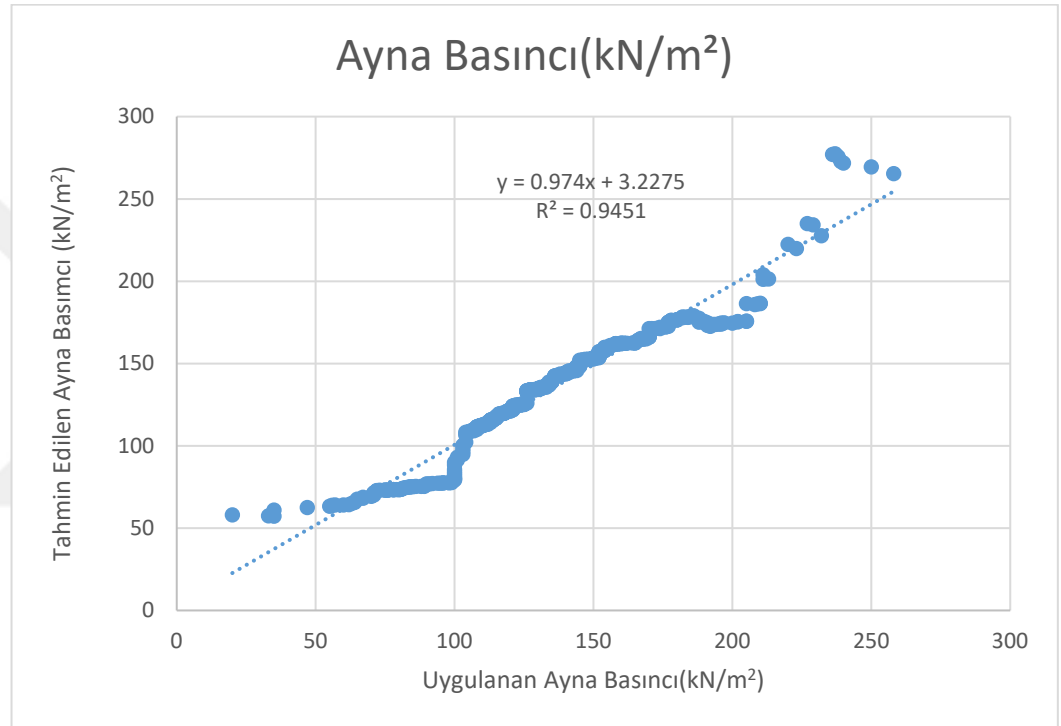
- Bu kapsamda tünel güzergahının yeryüzüne etki alanı 70 metre olarak belirlenmiştir. Çalışma alanındaki tünel güzergahı boyunca etki alanına giren yeryüzü yapıları şekil 8.1’de verilmiştir.



şekil 8. 1 Tünel güzergahı boyunca etki alanına giren yapılar

- Yapılan alışmalar sonucu EPBM basınç-kazı ortamı formülü oluşturulması için bir veri tabanı hazırlanmıştır. Deformasyon (D), ayna basıncı (σ_{FP}), düşey

gerilme (σ_{vs}), içsel sürtünme açısı (Φ), deformasyonun ölçüldüğü yer ile tünekl eksenindeki yatay mesafe (HD) ve deformasyon modülü (E_{mass}) verilerinden oluşan veri tabanında toplamda 4900 veri ile çalışılmıştır. Oluşturulan veri tabanı ışığında EPBM basınç-kazı ortamı formülü geliştirilmiştir. Formül neticesinde oluşacak tahmin edilen deformasyon verileri ile ölçülen deformasyon verileri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda %94'luk bir regresyon elde edilmiştir (Şekil 8.2).



Şekil 8. 2 Ölçülen deformasyon verileri ile tahmin edilen deformasyon verilerinin karşılaştırılması

- Yukarıdaki regresyon doğrultusunda 3 boyutlu nümerik modelleme analizlerinde kullanılacak formül belirlenmiştir. Bu formül 6. bölümde formül 6.16 olarak verilmiştir.
- Oluşturulan formül sonlu elemanlar yöntemi kullanan 3 boyutlu bir nümerik modelleme yazılımına tanımlanmıştır. Bu yazılımda metro güzergahını temsil eden bir model oluşturulmuş ve oluşturulan bu senaryoda EPBM ile kazı yapılması sağlanmıştır. Kazı sonrası yeryüzünde oluşan deformasyonlar, efektif gerilmeler ve toplam gerilmeler Bölüm 7'de verilmiştir.. Ayrıca

yeryüzündeki yapıların zeminlerinde oluşacak deformasyonlar, eksenel gerilmeler, eğilme momentleri ve burkulma momentleri de Bölüm 7’de verilmiştir.

- Oluşturulan senaryo sonucunda yeryüzünde maksimum 2,86cm’lik bir toplam deformasyon olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca x-yatay yönünde 1,01cm’lik deformasyon olduğu, y-yatay yönünde 2.83mm’lik bir deformasyon olduğu ve z-düşey yönde de yaklaşık 2.86cm’lik bir deformasyon olduğu görülmüştür. Görülen bu sonuçlar neticesinde oluşturulan formülün çalıştığı belirlenmiştir.
- Oluşturulan senaryo sonucunda yeryüzünde maksimum 2404 kN/m²’lik efektif gerilme ve 2483 kN/m²’lik toplam gerilme olduğu görülmüştür.
- Binaların temellerine baktığımız zaman burada maksimum 20,3cm’lik toplam deformasyonların olduğu görülmüştür. Ayrıca x-yatay yönünde maksimum 1,07mm’lik deformasyon olduğu, y-yatay yönünde maksimum 0,91mm’lik bir deformasyon olduğu ve z-düşey yönde de maksimum yaklaşık 20,3cm’lik bir deformasyon olduğu görülmüştür. Bina temellerinin maruz kaldığı eksenel kuvvetler, eğilme ve burkulma momentleri Bölüm 7’deki görsellerde paylaşılmıştır.
- Tüm bu sonuçlar ışığında elde edilen formülün yeterli ölçüde çalıştığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Akdeniz, N., Öztürk, Z., Konak, N., Çakır, H.M., Serdaroğlu, M., Armağan, F., ve Çatal, E., (1982). İzmir Manisa dolaylarının stratigrafî ve yapısal özellikleri: Türkiye Jeoloji Kongresi, Bildiri Özetleri, 49-50.
- Akkök, R. (1983). Structural and metamorphic evolution of the northern part of the Menderes massif: new data from the Derbent area and their implication for the tectonics of the massif. *The Journal of Geology*, 91(3), 342-350.
- Aksoy, N., Şimşek, C., ve Gunduz, O. (2009). Groundwater contamination mechanism in a geothermal field: a case study of Balçova, Turkey. *Journal of Contaminant Hydrology*, 103(1-2), 13-28.
- Amadei, B., ve Stephansson, O. (1997). *Rock stress and its measurement*. Springer Science ve Business Media.
- Anagnostou, G., ve Kovári, K. (1996). Face stability in slurry and EPB shield tunnelling. *Tunnels ve Tunnelling International*, 28(12).
- Anagnostou, G., ve Kovári, K. (1996). Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields. *Tunnelling and underground space technology*, 11(2), 165-173.
- Arıoğlu, B., Yüksel, A., Ve Arıoğlu, E. (2002). İzmir metrosu ümmühan ana tüneli'nde zemin basıncı dengeleme tünel metodu (EPBM) uygulaması, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi.
- Arıoğlu Ergin, Arıoğlu Erdem, Odbay, O., (1992). "Sığ ve Orta Derin Yeraltı Mühendislik Yapılarının Açılmasından Kaynaklanan Yüzey Tasmanına ait Parametrelerin Kestirimi", 4. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, 22-23 Ekim, İstanbul.
- Attewell, P. B., Yeates, J., ve Selby, A. R. (1986). Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures, United States.
- Avunduk, E., ve Copur, H. (2018). Empirical modeling for predicting excavation performance of EPB TBM based on soil properties. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 340-353.
- Babendererde, S., Hoek, E., Marinos, P. G., ve Cardoso, A. S. (2005). EPB-TBM face support control in the Metro do Porto project, Portugal. In Proceedings 2005 Rapid Excavation ve Tunneling Conference, Seattle, USA (pp. 1-12).
- Balci, C. (2009). Correlation of rock cutting tests with field performance of a TBM in a highly fractured rock formation: a case study in Kozyatagi-Kadikoy metro tunnel, Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(4), 423-435.
- Bieniawski, Z. T. (1975). The point-load test in geotechnical practice. *Engineering Geology*, 9(1), 1-11.

- Bieniawski, Z. T. (1979, September). The geomechanics classification in rock engineering applications. In *4th ISRM Congress*. OnePetro.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley ve Sons.
- Bilgin, N., Copur, H., ve Balci, C. (2013). *Mechanical excavation in mining and civil industries*. CRC press.
- Boray, A., Akat, U., Akdeniz, N., Akçören, Z., Çağlayan, A., Günay, E., ... ve Sav, H. (1973). Menderes Masifinin güney kenarı boyunca bazı önemli sorunlar ve bunların muhtemel çözümleri. *Cumhuriyetin*, 50, 11-20.
- Brinkmann, R. (1972). Mesozoic troughs and crustal structure in Anatolia. *Geological Society of America Bulletin*, 83(3), 819-826.
- Broms, B. B., ve Bennermark, H. (1967). Stability of clay at vertical opening. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(1), 71-94.
- Burland, J. B., Standing, J. R., ve Jardine, F. M. (Eds.). (2001). *Building response to tunnelling: case studies from construction of the Jubilee Line Extension, London* (Vol. 2). Thomas Telford.
- Burland, J. B., Mair, R. J., & Standing, J. R. (2004). Ground performance and building response due to tunnelling. In *Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference: Proceedings of a three day conference on advances in geotechnical engineering, organised by the Institution of Civil Engineers and held at the Royal Geographical Society, London, UK, on 29–31 March 2004* (pp. 291-342). Thomas Telford Publishing.
- Çağlayan, A., Öztürk, E., Öztürk, Z., Sav, H., Ve Akat, U., (1980). Menderes Masifi güneyine ait bulgular ve yapısal yorum. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 4(1), 9-18.
- Channell, J. E. T., d'Argenio, B., ve Horvath, F. (1979). Adria, the African promontory, in Mesozoic Mediterranean palaeogeography. *Earth-Science Reviews*, 15(3), 213-292.
- Çınar, M. Feridunoğlu, C. (20.Kasım.2021) *Tünel Açma Makineleri (TBM)*. <https://www.scribd.com/document/448633334/Tunel-Acma-Makineleri-TBM>
- Çopur, H., Tunçdemir, H., Bilgin, N., ve Dincer, T. (2001). Specific energy as a criterion for the use of rapid excavation systems in Turkish mines. *Mining Technology*, 110(3), 149-157.
- Deere, D. U. (1964). Technical description of rock cores for engineering purpose. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1(1), 17-22.
- Deere, D. U., ve Miller, R. P. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock*. Illinois Univ At Urbana Dept Of Civil Engineering.

- Deliormanli, A. H., Maerz, N. H., & Otoo, J. N. (2014). Using terrestrial 3D laser scanning and optical methods to determine orientations of discontinuities at a granite quarry, *International journal of rock mechanics and mining science*, (66),41-48.
- Dürr, S. H. (1975). *Über Alter und geotektonische Stellung des Menderes-Kristallins/SW-Anatolien und seine Aequivalente in der mittleren Aegaeis* (Doktora Tezi).
- Dürr, S., Altherr, R., Keller, J., Okrusch, M., Seidel, E., Cloos, H., et. all. (1978). Alps, Apennines, Hellenides, Schweizerbart, Stuttgart.
- Emre, Ö., Özalp, S., (2011). 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, *İzmir (NJ 35-7) Paftası, Seri No:6, Maden Tetkik veArama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye*.
- Emre, Ö., Özalp, S., (2011). 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, *Urla (NJ 35-6) Paftası, Seri No:5, Maden Tetkik veArama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye*.
- Erdogan, B. (1990). İzmir-Ankara Zonu'nun İzmir ile Seferihisar arasındaki bölgede stratigrafi özellikleri ve Tektonik Evrimi. *TPDJ Bulteni*, 2, 1-20.
- Fruguglietti, A., Guglielmetti, V., Grasso, P., Carrieri, G., ve Xu, S. (1999). Selection of the right TBM to excavate weathered rocks and soils. In *Proceedings Conference: Challenges for the 21st Century* (pp. 839-947).
- Gale, W. J. (1991). Strata control utilising rock reinforcement techniques and stress control methods, in Australian coal mines. *Mining Engineer (London);(UK)*, 150(352).
- Guglielmetti V., Grasso. P., Mahtap. A. ve Xu. S. (2007).*Mechanized Tunnelling in Urban AreasDesign Methodology and Construction Control*.Taylor and Francis.
- Herrenknecht, M., ve WATTS, D. (1994). EPB or slurry machine= the choice. *Tunnels ve tunnelling*, 26(6), 35-36.
- Herrenknecht, M., ve Rehm, U. (2005). Mechanized full face tunneling. In *ITA/AITES-Training Course, World Tunnel Congress in Istanbul, February*.
- Herrenknecht, M., ve Bappler, K. (2007). Latest technologies in mechanized tunneling. In *TBM Conference Organized by BASF* (pp. 7-9).
- Hoek, E. (1999). Putting numbers to geology—an engineer's viewpoint. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 32(1), 1-19.
- Hoek, E., ve Brown, E. T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of the geotechnical engineering division*, 106(9), 1013-1035.
- Horn, M. (1961). Alagutak homlokbiztosítására hat6 vizszintes földnyomasvizsgalat néhány eredménye. Az országos mélyé~ pitéipari konferencia eloadasai, Kdzlekedési Dokumentacios Vallalat, Budapest (in Hungarian). See also"

- Horizontaler Erddruck auf senkrechte Abschlussflächen von Tunneln. *Landeskonferenz der ungarischen Tiefbauindustrie, Budapest (German translation, STUVA, Dusseldorf).*
- İnci, U., Sözbilir, H., Sümer, Ö., ve Erkül, F. (2003). Urla-Balıkesir arası depremlerin nedeni fosil bir fay. *Cumhuriyet Bilim ve Teknik Dergisi*, 21, 7-8.
- Janssen, H. A. (1895). Versuche Über Getreidedruck in Silozellen Vol. 39. *Zeitschrift. Verein Deutcher Ingenieure, Dusseldorf. Germany.*
- Kadioğlu, S. (2004). Yer radarı (GPR) yöntemi. *Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ekim, Ankara.*
- Kaya, O. (1979). Ortadoğu Ege çöküntüsünün (Neojen) stratigrafisi ve tektoniği. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 22(1), 35-58.
- Konak, N., Akdeniz, N., Öztürk, E. M., ve Doyuran, S. (1987). Geology of the south of Menderes Massif. *IGCP project*, 5, 42-53.
- Küçük, K. (2009). Mermer sahalarından alınabilecek blok boyutlarının belirlenmesinde yeni bir kayaç kütle sınıflama yönteminin geliştirilmesi (Doktora Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi
- Lovat, R. P., ve Eng, P. (2007). TBM design considerations: selection of earth pressure balance or slurry pressure balance tunnel boring machines. *New Advanced Methods of Tunnel Engineering, TeE, Athens.*
- Maidl, U., ve Wingmann, J. (2009). Predicting the performance of earth pressure shields in loose rock. *Geomechanics and Tunnelling*, 2(2), 189-197.
- Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., ve Wehrmeyer, G. (2013). *Mechanised shield tunnelling*. John Wiley ve Sons.
- Merkezi, Y. (1992). İstanbul Metrosunda Yeryüzü Hareketlerinin Kestirimi. *Yayınlanmamış Rapor, Yapı Merkezi.*
- Ocañoğlu, N., Demirbağ, E., ve Kuşçu, İ. (2005). Neotectonic structures in İzmir Gulf and surrounding regions (western Turkey): evidences of strike-slip faulting with compression in the Aegean extensional regime. *Marine Geology*, 219(2-3), 155-171.
- Ongur, T. (2001). Geology of İzmir Agamemnon hot springs-Balcova geothermal area and new conceptual geological model. *Report (unpublished), Balcova Jeothermal Ltd., İzmir.*
- Ozdoğan, M. V., ve Deliormanlı, A. H. (2019). Landslide detection and characterization using terrestrial 3d laser scanning (lidar). *Acta Geodyn. Geomater*, 16, 379-392.
- Pan, X. D., ve Brown, E. T. (1996). Influence of axial stress and dilatancy on rock tunnel stability. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(2), 139-146.

- Peck, R. B. (1969). Deep excavations and tunneling in soft ground. *Proc. 7th ICSMFE*, 1969, 225-290.
- Pirotti, F., Grigolato, S., Lingua, E., Sitzia, T., ve Tarolli, P. (2012). Laser scanner applications in forest and environmental sciences. *Italian Journal of Remote Sensing/Rivista Italiana di Telerilevamento*, 44(1).
- Rabcewicz, L., 1964, The New Austrian Tunneling Method. *Water Power*, 453-457
- Ramazanoğlu, İ. (2008). Balçova ilçesi ve çevresinin aktif tektoniği ve depremselliği: Jeolojik ve sismolojik verilerin karşılaştırılması (Doktora Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi
- Rehm, U. (2007). Big challenges in Turkey for mechanized tunneling. In *The 2nd Underground Excavation Symposium for Transportation* (pp. 17-24).
- Savaşçın, Y. (1978). Foça-Urla Neojen Volkanitlerinin Mineralojik ve Jeokimyasal İncelenmesi ve Kökensel Yorumu (Doktora Tezi)
- Schmidt, B. (1969). *Settlements and ground movements associated with tunneling in soil*. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Schubert, W., ve Steindorfer, A. (1998). Advanced monitoring data evaluation and display for tunnels. In *Tunnels and Metropolises* (pp. 1205-1208). AA Balkema.
- Schubert, W., ve Steindorfer, A. (1996). Selective displacement monitoring during tunnel excavation. *Felsbau*, 14(2), 93-97.
- Serpen, U. (2004). Hydrogeological investigations on Balçova geothermal system in Turkey. *Geothermics*, 33(3), 309-335.
- Siddall, R. G., ve Gale, W. J. (1992). Strata control-A new science for an old problem. *Mining Engineer (London);(United Kingdom)*, 151(369).
- Skempton, A. W., ve MacDonald, D. H. (1956). The allowable settlements of buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 5(6), 727-768.
- Sözbilir, H., Erkül, F., ve Sümer, Ö. (2003). Gümüldür (İzmir) ve Bigadiç (Balıkesir) arasında uzanan Miyosen sonrası yaşlı KD-Doğrultulu accommodation zonuna ait saha verileri, Batı Anadolu [Field evidence for post-Miocene NE-trending accommodation zone lying between Gümüldür (İzmir) and Bigadiç (Balıkesir), west Anatolia]. *Jeoloji Kongresi Ankara, Türkiye, Abstracts* (pp. 85-86).
- Sözbilir, H., Koçer, T., Demİrtaş, R., Uzel, B., Ersoy, Y., Akgün, M., ve Özkaymak, Ç. (2006). Seferihisar-Yelki Fay zonunda paleosismolojik çalışmalar: doğrultu atımlı fay zonunda eğim atımlı aktif normal faylanmaya ait veriler [Paleoseismological studies on Seferihisar-Yelki Fault Zone: evidence for active normal faulting on strike-slip fault zone]. In *10th Meeting of Active Tectonics Research Group, Abstracts* (pp. 76-77).
- Stephansson, O. (1993). Rock stress in the Fennoscandian shield. In *Rock Testing and Site Characterization* (pp. 445-459). Pergamon.

- Şengör, A. C., ve Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75(3-4), 181-241.
- Şimsek, C., Elçi, A., Gündüz, O., ve Erdoğan, B. (2008). Hydrogeological and hydrogeochemical characterization of a karstic mountain region. *Environmental Geology*, 54(2), 291-308.
- Sekercioglu, E. (1993). Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi. *TMMOB. Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını*, 28, 216.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., Mesri, G., Jefferson, I., ve Smalley, I. (1998). Soil mechanics in engineering practice. *Engineering Geology*, 48(1), 149-150.
- Timoshenko, S. P. (1957). History of the Science of Strength of Materials. *Moscow: GITTL*.
- Ulusay, R., Ve Aydan, Ö. (1997). Tünel açma makinalarıyla yapılan kazı işlemlerinin olumlu ve olumsuz yönlerinin değerlendirilmesi: Takisato Tüneli (Japonya) örneği. *Sayı, 51*, 51-61.
- Uzel, B., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Kaymakçı, N. ve Langeris, C.G. (2013). Structural evidence for strike-slip deformation in the İzmir-Balıkesir Transfer Zone and consequences for late Cenozoic evolution of western Anatolia (Turkey). *Journal of Geodynamics* 65, 94–116, doi: 10.1016/j.jog.2012.06.009.
- Yüksel, A. (2014). TBM makinelerinde kayaç özellikleri ve makro süreksizliklerin kazı performansına etkileri (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Zeybek, M., & Şanlıoğlu, İ. (2015). Accurate determination of the Taşkent (Konya, Turkey) landslide using a long-range terrestrial laser scanner. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(1), 61-76.
- Zizka, Z., ve Thewes, M. (2016). Recommendations for face support pressure calculations for shield tunnelling in soft ground. *Deutscher Ausschuss für unterirdisches Baue (DAUB)—German Tunnelling Committee (ITA-AITES)*.
- Zumsteg, R., ve Langmaack, L. (2017). Mechanized tunneling in soft soils: choice of excavation mode and application of soil-conditioning additives in glacial deposits. *Engineering*, 3(6), 863-870.