

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KABATAŞ – MECİDİYEKÖY (İSTANBUL) METRO
TÜNELİNDE YAPILAN JEOTEKNİK ÇALIŞMALARIN VE
TÜNEL JEOLJİSİNİN 3D YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ**

Fatih TUZLU

**Danışman
Doç. Dr. Mehmet ÖZÇELİK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İSPARTA - 2019**



© 2019 [Fatih TUZLU]

TEZ ONAYI

Fatih TUZLU tarafından hazırlanan "**Kabataş – Mecidiyeköy (İstanbul) Metro Tünelinde Yapılan Jeoteknik Çalışmaların ve Tünel Jeolojisinin 3D Yöntemiyle Modellenmesi**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Doç. Dr. Mehmet ÖZÇELİK
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Ayşen DAVRAZ
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi İ. İskender SOYASLAN
Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Şule Sultan UĞUR

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Fatih TUZLU



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. İncelemenin Amacı	2
1.2. Çalışma Alanı.....	3
1.3. Nüfus Yerleşim	4
1.4. İklim ve Bitki Örtüsü.....	4
2. LİTERATÜR ÖZETİ	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM	7
4. JEOLJİK ÖZELLİKLER	7
4.1. Çalışma Alanının Jeolojik Özellikleri.....	7
4.1.1. Dolgu Malzemesi	9
4.1.2. Trakya Formasyonu	9
4.1.3. Kuşdili Formasyonu.....	10
4.1.4. Eski Alüvyon.....	11
4.2. Çalışma Alanının Tektonik Özellikleri	11
5. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ	13
5.1. İnceleme Yöntemleri.....	13
5.2. Arazi Çalışmaları	13
5.2.1. Kuyu içinde yapılan testler.....	15
5.2.1.1. Standart Penetrasyon Testleri (SPT).....	15
5.2.1.2. Presiyometri testleri	19
5.2.1.3. Basınçlı Su Testleri (BST, Paket Testi)	20
5.3. Laboratuvar Deneyleri ve Analizleri.....	23
5.4. Zemin Ve Kaya Birimlerinin Mühendislik Özellikleri	27
5.5. Yeraltı Suyu Durumu	29
6. KABATAŞ-MECİDİYEKÖY METRO HATTININ TEKNİK ÖZELLİKLERİ..	30
6.1. Kabataş – Mecidiyeköy Metrosu	30
6.2. Kabataş – Mecidiyeköy Metrosunun Teknik Özellikleri.....	30
6.3. Tünel Hattı Jeolojisi	32
6.4. NATM Kazı Destekleme Yöntemi	32
6.5. Zemin Türlerine Göre Yapılan Kazı Çalışmaları.....	33
6.5.1. Zayıf zeminde kazı	33
6.5.2. Orta sertlikteki zeminde kazı	33
6.5.3. Sert zeminde kazı	33
6.6. Çelik İksa Montajı.....	33
6.7. Süren Montajı.....	34
6.8. Umbrella Arch Uygulaması	35
6.9. Boru İtme Uygulaması	37
6.10. Püskürtme Beton Uygulaması.....	37
6.11. Hasır Çelik Uygulaması	38
6.12. Bulon Uygulaması.....	38

7. ÜÇ BOYUTLU MODELLEMEDE VE ANALİZDE KULLANILAN METOTLAR.....	39
7.1. Kullanılan Programlar.....	39
7.2. Modelin Tasarımı.....	41
7.3. Veri.....	42
7.3.1. Yüzey verisi.....	44
7.3.2. Jeolojik Veri.....	45
8. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	47
8.1. Model Ve Modelleme.....	47
8.1.1. Global Mapper.....	48
8.1.2. Rockworks.....	55
8.1.3. SketchUp.....	63
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	79



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KABATAŞ – MECİDİYEKÖY (İSTANBUL) METRO TÜNELİNDE YAPILAN JEOTEKNİK ÇALIŞMALARIN VE TÜNEL JEOLJİSİNİN 3D YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ

Fatih TUZLU

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Özçelik

Bu çalışma, Kabataş – Mecidiyeköy metro güzergahının jeolojik özelliklerinin incelenmesi ve bu incelemelere bağlı olarak hem jeolojik ortamın hem de yüzey morfolojisinin üç boyutlu modellenmesini kapsamaktadır.

Yapılan çalışmanın amacı, elde edilen çeşitli sayıda jeolojik ve yüzey verilerinin sayısallaştırılması ve sonuç olarak bu verilerle tümleşik bir modelin oluşturulmasını amaçlamaktadır.

Güzergahın jeolojik özelliklerini incelemek ve mühendislik deneyleri yapabilmek için 20 adet araştırma kuyusu firma tarafından açılmıştır. Çalışmada elde edilen tüm bilgilerden tez kapsamında faydalanılmıştır. Kuyuların jeolojik ve yapısal özelliklerinin incelenmesi sonucunda, model için veri oluşturma aşaması başlanmıştır. Bu veriler sayısallaştırılarak üç boyutlu jeolojik model oluşturulmuştur.

Çalışma sonucunda elde edilecek olan tümleşik modelde, ortamın jeolojik ve yüzeysel özelliklerini barındırması amaçlanmaktadır. Model oluşturulduktan sonra, modelin analizleri yapılarak, oluşturulan modelden yeni veri elde edilebilmiştir. Çalışma sonucunda sondaj kuyu lokasyon haritası, jeolojik korelasyon modeli, yüzey modeli elde edilmiştir.

Sonuç olarak, çeşitli programlar yardımıyla hazırlanan model, jeolojik ve yüzey özelliklerini içeriğinde bulunduracak hale getirilmiştir. Oluşturulan bu model çeşitli bilgisayar uygulamalarında model dosyası olarak kullanılabilir ve bu modelden gerçek konumsal veriler de elde edilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Jeolojik modelleme, Düzensiz üçgen yüzey modeli, Jeoloji, Sketchup model.

2019, 79 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

MODELING OF GEOTECHNICAL STUDIES AND TUNNEL GEOLOGY WITH 3D METHODS IN KABATAŞ - MECİDİYEKÖY (İSTANBUL) METRO) TUNNEL

Fatih TUZLU

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geological Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet ÖZÇELİK

This study includes the geological characteristics of the Kabataş - Mecidiyeköy metro line, the three-dimensional modeling of the geological environment and the surface morphology within these boundaries.

The main purpose of the study is to digitize a number of obtained geological and surface data and ultimately to form an integrated model with these data.

The constructive company of this project has opened 20 drillings in order to obtain preliminary information about the ground of the project area and to conduct ground tests. In this study, all borehole information was used. After examining the geological and structural properties of these boreholes, the data creation phase for the model was started. Three-dimensional geological model was created by digitizing data.

The integrated model to be obtained as a result of the study is intended to accommodate the geological and superficial characteristics of the environment. After the model was formed, the model was analyzed and new data could be obtained from the model. As a result of the study, drilling well location map, geological correlation model, surface model were obtained.

As a result, this model, which has been prepared with the help of various programs, has been made to contain geological and surface features. This model can be used as a model file in various computer applications and real spatial data can be obtained from this model.

Keywords: Geological modeling, triangle irregular surface model, geology, Sketchup model.

2019, 79 pages

TEŞEKKÜR

Hayatımın ilk gününden bu güne kadar yaşadığım tüm iyi ve kötü tecrübelerimde yanımda olan, beni ben olduğum için seven ve bana maddi manevi her konuda desteğini esirgemeyen değerli anneme, babama ve kardeşlerime bana inandıkları ve güvendikleri için sonsuz teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatımda, zorluklara karşı bakış açımı, bilgi ve tecrübesi yardımıyla aşmamda yardımcı olan ayrıca akademik hayatımda karşılaşacağım tüm zorluklarla nasıl baş edebileceğimi bana öğreten ve hiçbir yardımını esirgemeyen saygıdeğer Danışman Hocam Doç. Dr. Mehmet ÖZÇELİK'e saygı ve teşekkürlerimi borç bilirim.

Çalışma verilerinin temin edilmesinde yardımcı olan EMAY Sondaj Araştırma ve İnşaat A.Ş ve ARTSON Geoteknik personeline sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Fatih TUZLU
ISPARTA, 2019

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Çalışma alanının üzerinde, temel sondaj noktaları ve tünel güzergâhı lokasyonunun gösterilmesi.	3
Şekil 1.2. Çalışma alanının yer bulduru haritası	4
Şekil 4.1. İstanbul Avrupa yakasının genel jeoloji haritası.....	8
Şekil 4.2. İstanbul'un genel stratigrafisi	12
Şekil 6.1. Natm kesit örneği	31
Şekil 6.2. Tbm tünel en kesiti	31
Şekil 6.3. Umbrella boruları kabataş-mecidiyeköy metro uygulaması	35
Şekil 6.4. Umbrella kesit görseli	36
Şekil 6.5. Umbrella uygulaması kabataş- mecidiyeköy metro hattı.....	37
Şekil 7.1. Model tasarım aşamalarının şematik gösterimi	42
Şekil 7.2. Vektör verinin geometrisinin gösterimi	43
Şekil 7.3. Vektör veri elemanlarının raster veride görünümü	44
Şekil 8.1. İşlenmemiş yükseklik haritası (aster-gdem)	50
Şekil 8.2. Eş yükselti haritası modeli görseli	51
Şekil 8.3. Yükseklik profil kesiti ve kuyuların gösterimi	52
Şekil 8.4. Düzensiz üçgen yüzeyleri modelinin 2 boyutlu görseli	53
Şekil 8.5. Yükseklik modeli ile düzensiz üçgen yüzey modelinin birleştirilmiş hali	54
Şekil 8.6. Üç boyutlu korelasyon mantık modeli	56
Şekil 8.7. Kuyu lokasyon haritası	58
Şekil 8.8. Veri giriş ekranı görseli	59
Şekil 8.9. Korelasyon model mantığı	60
Şekil 8.10. Üç boyutlu kuyu lokasyonu	61
Şekil 8.11. Üç boyutlu korelasyon modeli	62
Şekil 8.12. Üç boyutlu modelleme ve modelin çıkartılması şeması	66
Şekil 8.13. Düzensiz üçgen yüzeyleri ile oluşturulmuş yüzey modeli.....	66
Şekil 8.14. Uydu görüntüsünün yüzey modeline uygulanmış hali	67
Şekil 8.15. Yüzey modelinden deniz alanının çıkarılmış hali.....	68
Şekil 8.16. Jeolojik ve yüzey modelinin birleştirilmiş hali.....	68
Şekil 8.17. Jeolojik ve yüzey modelinin birleştirilmiş hali.....	69
Şekil 8.18. Jeolojik ve yüzey modelinin birleştirilmiş hali.....	69
Şekil 8.19. Tünel güzergâhının ve istasyon noktalarının model üzerinde gösterimi .	70
Şekil 8.20. Tünel güzergâhının model üzerinde gösterimi	70
Şekil 8.21. Tünel güzergâhının model üzerinde gösterimi	71
Şekil 8.22. Tünel güzergâhının model üzerinde gösterimi	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 5.1. Tünel güzergâhında yapılan sondajlara ait özet bilgiler	14
Çizelge 5.2. Sondaj çalışmaları kapsamında kuyu başında yapılan testler	15
Çizelge 5.3. Tünel güzergâhında zemin ve tamamen ayrıışmış kaya kısımlarda yapılan Penetrasyon Testlerine (SPT) ait özet bilgiler	16
Çizelge 5.4. Tünel güzergâhı sondaj kuyularında yapılan Presiyometre Deneyleri ve sonuçları.....	19
Çizelge 5.5. Lugeon değerleri ve geçirimliliği.....	21
Çizelge 5.6. Basınçlı Su Deneyleri (BST) ve sonuçlarına ait veriler.....	21
Çizelge 5.7. Kuyu numunelerinin genel ortam parametreleri	23
Çizelge 5.8. Kuyuların litolojik ve yapısal özellikleri	24
Çizelge 5.9. Tamamen ayrıışmış kaya (çakıllı killi kum ve kumlu kil) tabakasına ait arazi ve laboratuvar (mühendislik) verileri.....	29
Çizelge 8.1. Yüzey modelinin nokta sınır koordinatları	49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Ard	Ardalanma
BST	Basınçlı Su Testi (Lugeon Deneyi)
DEM	Dijital yükseklik haritasın
DXF	Model Dosya Uzantısı
Em	Elastisite Modülü
kN/m ³	Kilo Newton / Metre Küp
kPa	Kilo Pascal
LL	Likit Limit
M	Metre
Mpa	Mega Pascal
N	SPT Direnci
NATM	Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi
P1	Plastisite İndisi
PL	Plastik Limit
PMT	Presiyometre Deneyi
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi
TBM	Tünel Kazma Makinası
TIN	Düzensiz Üçgen Ağ
UD	Örselenmemiş Numune
Ø	Boru Çapı
Φ	Kayma Direnci Açısı
γ _n	Birim Hacim Ağırlık
~	Yaklaşık İşareti

1. GİRİŞ

Günümüzde yeraltı ulaşım sistemleri tüm dünyada oluğu gibi ülkemizde de altyapı gelişimi açısından önemli görülmektedir. Metro hattının projelendirilmesi ve yer seçimi ile ilgili yapılan çalışmalar tünel güzergâhında karşılaşılabilecek sorunların belirlenmesi ve çözümlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar ile tünelin açılması için gerekli olan teçhizatın, maliyetin, çevresel ve yapısal faktörlerin, inşa sürecinin belirlenmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, yapım aşamasındaki uygulamalar fizibilite raporları ile kontrol edilerek projenin maliyetinin yapılacak yapıyı karşılayıp karşılamadığı kontrol edilmektedir. Teknik değerlendirmeler sonucunda tünel yapımı uygun ise tünel inşasına başlanılır. Eğer uygun değil ise tünel inşası yapılmaz ve yapılabilir hale geldiğinde inşa edilir. Fakat bu işlemler yapılırken zaman kaybı ve maliyeti de ortaya çıkarmaktadır.

Günümüzde mühendislik tasarımlarında hızlı gelişen teknoloji ile birlikte üç boyutlu modellerden yararlanılmaktadır. Tünel mühendisliğinde zemin ve yüzey özelliklerinin belirlendiğı bir ortamda, yüzey ve zemin modeli oluşturulabilmektedir. Bu modellerin yardımı ile tünelin üç boyutlu konumunun belirlenmesi, sayısallaştırılmış ortamın analizlerce kontrolü ve çeşitli deney verileri ile birlikte bilgisayar ortamında gerçekleştirilebilmektedir.

Günümüzde üç boyutlu (3D) modelleme için çeşitli yöntemler ve teknolojiler geliştirilmektedir. Yapılacak olan mühendislik yapısının işlevselliğini ve duraylılığını test edebilmek için çok sayıda deney ve analiz gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu deneylerin yapılabilmesi için de proje maliyetinin artması göz önünde bulundurulmaktadır. Fakat 3D modelleme ile modellenmiş olan bir yapının, yüksek maliyet unsurunu ortadan kaldırarak çok çeşitli deneylerin ve analizlerin yapılmasına imkân sağlamaktadır. Bu oluşturulan 3D modeller, projede değışim söz konusu olduğunda geliştirilebilmekte ve tekrar analiz edilebilmektedir. Bu da çok yönlü kullanım ve yenilenebilirliğine açık olduğunu göstermektedir. Tünel hattının duraylılık seviyelerinin belirlenmesi, bunlara yapılacak inşa işlemleri sonucu duraylılığının ne seviyeye yükseleceğı de oluşturulan 3D modelin analizi ile mümkündür. Modelin oluşturulmasında en önemli faktör yeterli ve doğru verinin

kullanılmasıyla mümkün görülmektedir. Yüzey ve zemin modellerinde detaylılık da bu faktörlerle sağlanabilmektedir.

Bu çalışmada, “Kabataş – Mecidiyeköy Metro Hattı” ortam verileri kullanılarak yüzey ve zemin modellerinin oluşturulması amaçlanmaktadır. Elde edilen modellerin tek bir bütün haline getirilmesi işlemi sonucunda çalışma amacına ulaşılmış olacaktır. Ayrıca oluşturulan bu model üzerinden ne tür veriler alınabileceği de gözlenecek ve belirlenecektir. Çalışmada, “Kabataş – Mecidiyeköy Metro Hattı” inşası için elde edilen kuyu verilerinden faydalanılarak jeolojik kesit oluşturulmuştur. Bu kesit korelasyon yöntemi ile hazırlanmış ve birbirleri arasındaki bağıntılar modele aktarılmıştır. Yüzey modeli; uydu fotoğrafları ve yükseklik haritalarından faydalanılarak modellenmiştir. Yüzey yükseklik modeli; düzensiz üçgen yüzey modeli yöntemi ile oluşturulmuş ve model jeolojik modelle birleştirilmek üzere dışa aktarılmıştır. Modeller oluşturulduktan, jeolojik ve yüzey modeli birleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar sonuç bölümünde belirtilmiştir.

1.1. İncelemenin Amacı

Bu çalışma, İstanbul’un Avrupa yakasında yapımına başlanan metro ağının bir parçası olan, “Kabataş - Mecidiyeköy Metro Hattı Projesi” güzergahının sayısallaştırılarak 3D modelin oluşturulmasını amaçlamaktadır. Jeolojik modelin oluşturulması için gereken jeoloji verileri çalışma alanında yapılan temel sondaj kuyusu verilerinden elde edilmiştir.

Yüzey modeli ise uydu görüntülerinin işlenmesi sonucu düzensiz üçgen yüzey modellemesi yöntemiyle elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen verilerin haricinde modelin oluşturulması sonucunda elde edilen analiz verilerinden de faydalanılmıştır.

Mühendislik amaçlı kullanılan verilerin çoğunluğu EMAY Sondaj Araştırma ve İnşaat A.Ş ve ARTSON Geoteknik tarafından elde edilen veriler sayesinde gerçekleştirilmiştir.

1.2. Çalışma Alanı

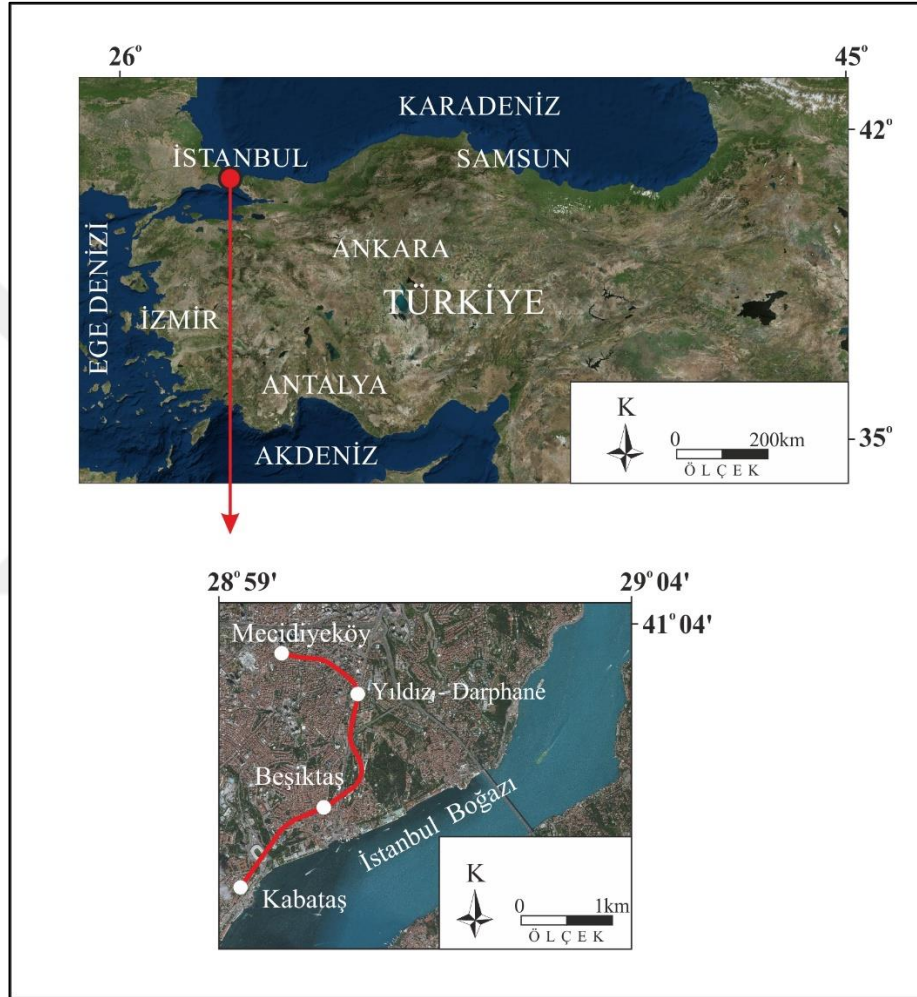
Çalışma alanının üzerinde, temel sondajı noktaları ve tünel güzergâhı lokasyonunun gösterilmiştir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Çalışma alanının üzerinde, temel sondaj noktaları ve tünel güzergâhı lokasyonunun gösterilmesi.

1.3. Nüfus Yerleşim

Çalışma alanı yoğun yapılaşma ile birlikte yerleşim ve iş merkezlerinin kesiştiği bir kesimde bulunmaktadır. Bölgede çok sayıda turistik otel ve pek çok iş merkezi bulunmaktadır. Günün her saatinde araç ve nüfus yoğunluğu gözlenmektedir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Çalışma alanının yer bulduru haritası (Özçelik, 2018)

1.4. İklim ve Bitki Örtüsü

Çalışma alanında, Marmara iklimi etkindir. Marmara iklimi, Karadeniz ve Akdeniz iklim bölgeleri arasında geçit alanıdır. Genel olarak, yazlar batıda Akdeniz ikliminde görüldüğü gibi daha sıcak ve kurak veya kurakça, doğuda Karadeniz iklimini

andıracak ölçüde az sıcak ve kurak denmeyecek ölçüde yağışlıdır. En bol yağışlı mevsim kıştır. Batı kesimlerinde ilkbahar sonbahardan daha fazla yağışlıdır.

İnceleme alanı yerleşim bölgesi olması nedeni ile bitki örtüsü bakımından fakirdir. Ancak park ve bahçelerde çevre düzenlemesi çerçevesinde yetiştirilen bitkiler yeterli olmasa da çevreye güzellik katmaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bilgisayar grafikleri teknolojisine dayanan 3D modelleme, insanlara sezgisel bir his verebilmektedir. Bilgisayar teknolojisi, iletişim teknolojisi, sensör ve ölçüm teknolojisi, simülasyon teknolojisi vb. ile sanal gerçeklik teknolojisi sanal bir ortam yaratabilmektedir. Görsel duyu, işitsel duyu ve dokunma duyusunun ortak etkisi, kullanıcıların sanal ortamda, gerçekte yaşadıkları gibi hissetmelerini sağlayabilmektedir. 3D görselleştirme teknolojisi ve sanal gerçeklik teknolojisi, insanların dünyayı gözlemlemesi ve analiz etmesi için uygun bir araç olarak görülmektedir. 3D modelleme, 3D görselleştirme teknolojisinin ve sanal gerçeklik teknolojisinin temelini oluşturmaktadır. 1970'lerde, I.E. Massachusetts Institute of Technology'de bulunan Massachusetts Üniversitesi laboratuvarındaki Sutherland, insan-makine iletişimine ait bir grafik sistemi hakkında doktora tezi hazırlamıştır. O zamandan itibaren, 3D modelleme teorileri ve yöntemleri sürekli olarak geliştirilmiş ve 3D modelleme yazılımları da hızla geliştirilmiştir. 3D modellemeyi destekleyen yazılımlar arasında AutoCAD, 3DS Marks, SolidWorks, SketchUp, MDT, Pro / Mühendis, SkyLine vb. yaygın şekilde kullanılmaktadır (Chen ve Zhang, 2004.)

3D modelleme teknolojisi, askeri, toprak ve kaynaklar, kentsel inşaat, karayolu trafiği, mimari tasarım, makine tasarımı, tıbbi arıtma ve diğer bazı endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel jeolojik haritalar, jeolojik profiller ve planlar gibi jeolojik araştırmaların sonuçları 2D haritalarla gösterilmektedir. Buradaki öz, katman, yapı ve yeryüzü gibi 3D alanda jeolojik olayları bir düzlem üzerine yansıtmak, böylece uzaysal bilginin kaybedilmesine ve bozulmasına neden olacaktır (Wu vd., 2006; Wang vd., 2010). Farklı modelleme objelerine göre, 3D modelleme yöntemi coğrafi modelleme ve 3D jeolojik modelleme ayrılmıştır (Wang vd., 2007)

1994 yılında, 3D jeolojik modelleme teknolojisi ilk olarak Kanada'dan Simon W. Houlding tarafından geliştirilmiş ve jeoloji araştırma sonuçlarının ifadesi olarak tanıtılmıştır (Zhang vd., 2009). 3D jeolojik modelleme ve 3D görselleştirme teknolojileri sayesinde jeolojik yapı ve jeolojik çevre doğrudan 3D alan açısından anlaşılabilir ve ifade edilebilir hale getirilmiştir (Zeng vd., 2004). Dolayısıyla bu teknoloji canlılık, doğruluk, hassasiyet, dinamik, bolluk ile karakterize edilebilmektedir. 3D jeolojik modelleme teknolojisi, jeolojik veri toplama, saklama, işleme ve görüntüleme yöntemlerinde büyük değişiklikler getirecektir (Wu ve Xu, 2004). Son yıllarda, 3D modelleme teknolojisi hızlı bir şekilde gelişmekte ve her türlü modelleme teorisi ve yöntemi sürekli olarak ortaya konmaktadır. Genel olarak, modelleme yöntemleri iki kategoriye ayrılabilir. Bunlar; yüzey modeline dayalı modelleme yöntemi ve hacimsel modele dayalı modelleme yöntemi şeklinde tanımlanmaktadır. Bu iki modelleme metodunun da kendi içinde avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır (Bi vd., 2010). Yüksek hassasiyetli bir 3D jeolojik modelin oluşturulabilmesi için, makul modelleme sürecinin tasarlanması ve jeolojik cismin özelliklerine uygun modelleme yönteminin seçilmesi gerekmektedir. Yüzey modeline ve hacimsel modele dayalı modelleme yöntemlerinin avantajlarını tam olarak ortaya koymak için, çalışılabilir bir karma jeolojik modelleme yöntemi sunmaktadır. Bu yöntemle oluşturulan 3D jeolojik model düzlemsel jeolojik gövdeleri doğru şekilde gösterebilmekte ve tortul fasiyes ve petrofizik modeller dâhil olmak üzere katı modelleri etkili bir şekilde karakterize edebilmektedir. Bu yöntem, yapısal koşulların, tortul ortamın ve anizotropinin petrofizik dağılım üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır.

Bir tünelin kazılması, özellikle tünel yüzeyinde üç boyutlu bir problemdir; Bu sorunun niteliği, tünel yüzündeki stres yolunun analizine dayanarak Barla ve Barla, 2004 tarafından açıkça gösterilmiştir. Bu nedenle bu olguyu tüm karmaşıklığı içinde incelemek için üç boyutlu sayısal modelleme gerekmektedir (Mollon vd., 2011).

Bu yaklaşımla, tünel geometrisi, başlangıç gerilme durumu (anizotropik olsa bile), tünel açma yöntemi ve işin aşaması düşünülebilir. Günümüzde, yazılım ve donanım gelişmeleri bu aracın yeraltı projelerinde kullanılmasına izin veriyor; Bununla birlikte, iki boyutlu modelleme yaklaşımı, azaltılmış hesaplama süresi ve göreceli basitliği nedeniyle mevcut tünel projelerinin tasarım hesaplamaları uygulamasında halen en

yaygın araç olarak görülmektedir. 2D simülasyonların farklı olasılıkları arasında en yaygın olarak kullanılan, yakınsama hapsi metodu ile birleştirilen düzlem içi deformasyonlara sahip bir kesitte iki boyutlu bir analizdir (Panet, 1995).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada, tünelin fizibilite incelemeleri için kullanılan temel sondaj kuyu verileri incelenmiş ve modelin oluşturulabilmesi için kullanılacak parametreler belirlendikten sonra bu veriler modeli oluşturabilmek için kullanılmıştır. Sondaj verilerinin derlenmesi (yeraltısuyu, birimlerin kalınlıkları, konumlar, zemin özellikleri gibi verilerin ayrıştırılması) ve kullanılabilir hale getirilmesi aşaması sonrasında arazinin dijital yükseklik haritası ve uydu görüntüleri Global Mapper programından temin edilmiş ve modele uygun geliştirilerek dışa aktarılmıştır.

Jeolojik bilgilerin yer aldığı litolojik bilgiler, litostratigrafik korelasyon yöntemi ile korele edilmiştir. Daha sonra oluşturulan kesitlerden elde edilen sonuçlara göre jeolojik model modellenmiştir. Burada elde edilen verilerle oluşturulmuş olan modele tünelin kazı aynasında karşılaşılan süreksizlikler eklenmiş ve jeolojik modelin oluşturulma aşaması tamamlanmıştır.

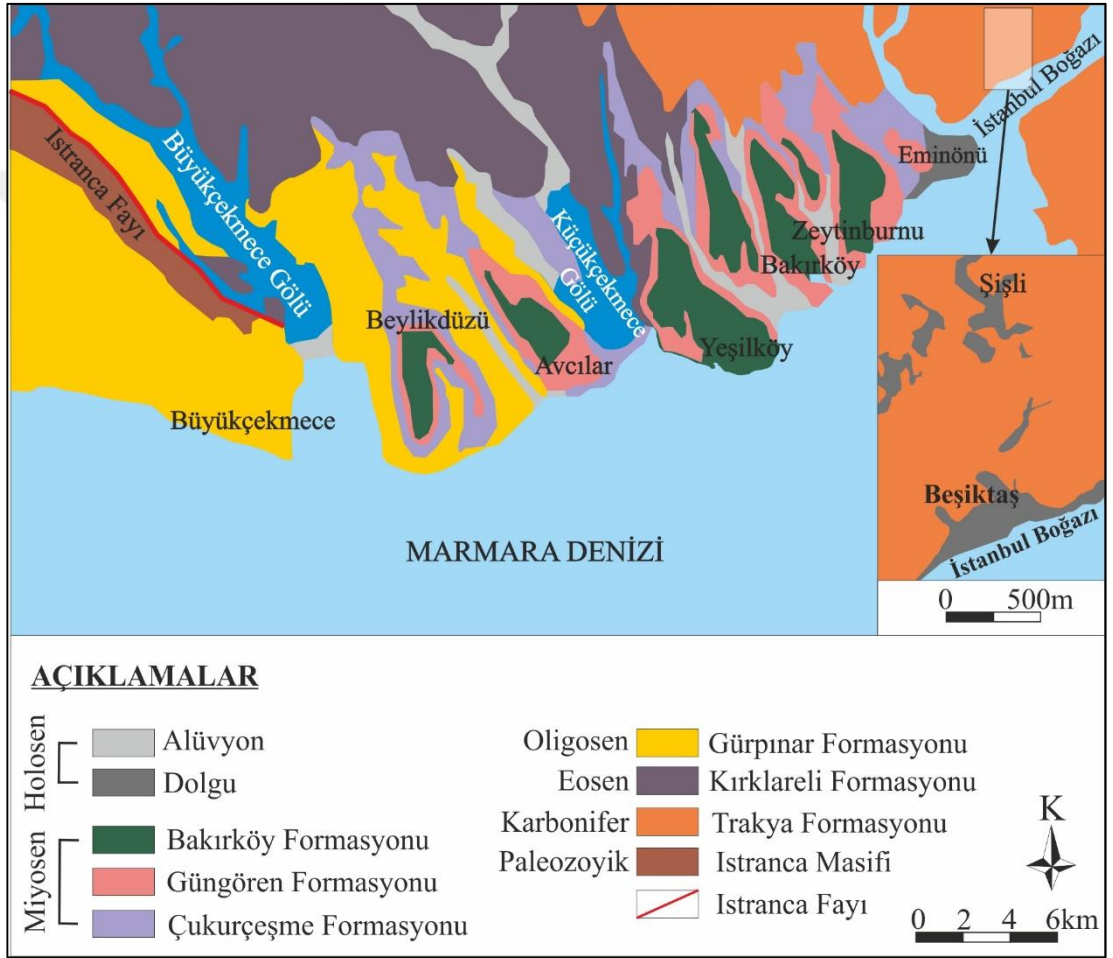
Yüzey modeli ise düzensiz üçgen yüzey modelleri (delaunay üçgenlemesi) kullanılarak modellenmiş ve bu iki model tümleşik bir model haline getirilmiştir. Bu modellerle birlikte istenilen noktadan istenilen genişlik ve yükseklikte (model sınırları içinde) jeolojik kesit alınabilme imkânı ve noktasal yükseklik verisi alınabilecek hale getirilmiştir.

4. JEOLojİK ÖZELLİKLER

4.1. Çalışma Alanının Jeolojik Özellikleri

İstanbul kenti ve yakın çevresi; çok faylı, kıvrımlı ve bindirmeli Paleozoyik, Mesozoyik kaya birimleri ile bunlar üzerinde yer alan düzensiz Tersiyer çökellerinden oluşmaktadır. Paleozoyik birimlerin Karbonifer ve Kretase 'de magmatik sokulumlar tarafından kesildiği gözlenilmektedir. Magmatizma olayları sırasında, kaya birimleri

içine yaygın olarak diyabaz daykları yerleşmiştir. İstanbul bölgesinde Paleozoyik temeli, özellikle Anadolu yakasında yaygın olan Ordovisiyen Silüriyen ve Devoniyen yaşlı kaya toplulukları ile Rumeli yakasında yaygın olan Karbonifer serileri oluşturmaktadır. Jeoloji literatüründe bu birimlere birlikte “İstanbul Paleozoyik İstifi” adı verilmektedir. İstif, Ordovisiyen ’den Karbonifer’e kadar birkaç bin metre kalınlığa sahip olduğu bilinmektedir (ARTSON 2016 a,b). İstanbul Avrupa yakasının Genel Jeoloji Haritası Şekil 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.1. İstanbul Avrupa yakasının Genel Jeoloji Haritası (Özçelik, 2018)

Mesozoyik (Kretase) birimleri, İstanbul’un her iki yakasında, yalnızca Karadeniz’e yakın kesimlerde bulunmaktadır. Genellikle güney sınırı boyunca tektonik bir dokanağa sahip olduğu bilinmektedir.

İstanbul’un batı yakasında daha yaygın olmak üzere, her iki yakada, ağırlıklı olarak Oligo - Miyosen’e tarihlenen kırıntılı Tersiyer (Neojen) çökelleri, Paleozoyik temel

üzerine uyumsuz şekilde gelmektedir. Ayrıca Tersiyer serileri içinde de uyumsuzluklar mevcuttur (Ketin, 1991; Seymen, 1995).

Buzul dönemlerinde denizlerdeki su seviyesinin düşmesi sonucu, Marmara Denizi'ne ulaşan dereler, geçmişte, günümüze oranla daha derin kazılmışlardır. Buzul dönemi sonrası deniz seviyesinin yükselmesi ile birlikte bu derelerin denize yakın kesimleri haliç halini almış ve kalın Haliç çökelleri ile dolmuşlardır. Derelerin denize uzak kesimlerinde ise alüvyonal çökeller birikmiştir.

İstanbul ile ilgili literatürde verilen jeolojik haritalara göre tümü ile Trakya Formasyonu'nun dan oluşmaktadır. Ancak bu çalışma kapsamında yapılan saha gözlemleri ve sondajlarda, sahanın batı tarafında ince bir seviye halinde, Eosen döneme ait kalkerli kil seviyeleri kesilmiştir. Söz konusu seviyenin Ceylan Formasyonu olduğu düşünülmüştür (ARTSON, 2016 a,b).

4.1.1. Dolgu Malzemesi

Çevre kayaçların alterasyonu sonucunda ve çevresel atıkların yığılması/bozulması ile birlikte oluşmuştur. Birim kalınlıkları 0.5-12 m arasında değişmektedir. Dolgu içeriğinde kum, kil, nebati toprak, kentsel atıklar ve inşaat atıkları bulunmaktadır.

4.1.2. Trakya Formasyonu

Trakya Formasyonu, esas olarak silttaşı (çamurtaşı), kumtaşı ve kiltası tabakalarının ardalaşmasından oluşmuştur. Bazı araştırmacılar tarafından kumtaşı - şeyl ardalaşması olarak isimlendirilmektedir. (Ketin, 1991; Seymen, 1995).

Birimin ilksel rengi açık - koyu gri arasında değişim gösterir. Çok ayrılmış kesimlerde hâkim renk sarı, kahverengi; orta derecede ayrılmış kesimlerde sarımsı gri, zeytin yeşili, boz; az ayrılmış kesimlerde ise gri, açık gri ve koyu gri renklidir. Ayrışma genel olarak derinlik yönünde azalmaktadır. Ancak birimi kesen fay ve makaslama zonları ile volkanik dayk sınırlarında derinliğe bağlı olmaksızın ileri derecede ayrılmış seviyeler ile karşılaşılabilir.

Kumtaşı seviyeleri orta-kalın tabakalı, sert, orta sert, genellikle orta-ince taneli, kötü boylanmış, bol mika, kuvars ve kayaç kırıntılarında oluşmaktadır. Taneler demirli ve silisli çimento ile bağlanmıştır. Çok ayrılmış kesimleri sarı, orta ayrılmış kesimleri boz, sarımsı boz ve ayrışmamış kesimlerde açık gri, mavimsi gri renkli görülmektedir. Silttaşı seviyeleri genellikle ince - orta tabakalı, ayrışmamış halde gri - koyu gri renkli, orta derecede ayrışmış kesimlerde zeytin yeşili, grimsi sarı veya sarımsı gri, çok ayrışmış kesimlerde ise sarı, kahve renkli görülmektedir. Kiltası seviyeleri, genellikle ince tabakalı, ayrışmamış halde koyu gri, orta düzeyde ayrıştığı kesimlerde zeytin yeşili-sarımsı gri, çok ayrıştığı kesimlerde ise sarı - kahve renkli görülmektedir (ARTSON 2016 a,b).

Trakya Formasyonu genel olarak kiltası - silttaşı - kumtaşı ardalanması şeklinde olmakla birlikte, kazılar sırasında yer yer bu litolojilerden her hangi birinin baskın olduğu kesimler ile de karşılaşılabilir.

4.1.3. Kuşdili Formasyonu

Kuşdili biriminin taban kısmında çakıl ve yanal yüzeylerde değişken kumlar ile gri siyah renkli kil ve çamurlardan oluşmaktadır. Büyükçekmece gölü, Küçükçekmece gölü, Haliç mevki, Veliefendi, Ayamama, Aksaray vadilerinde yer yer bulunmaktadır. Taban kısmında çakıllı seviyenin hâkim olduğu ve birimin üstünde yanal devamlılığı fazla olmayan kum ve siltlere geçtiği gözlenmektedir. Üst kısmında ise siyah renkli bol kavkılı kil ve çamurtaşları yer almaktadır. Birimlerin birbirleri arasındaki geçişleri düzensiz olup sık sık değişmektedir. Kuşdili Formasyonu, Avrupa yakasında bulunan diğer birimleri aşıl uyumsuzlukla örtmektedir. Formasyon da güncel alüvyon ve dolgular tarafından örtülmektedir (ARTSON, 2016 a,b).

Birim hakkında ilk inceleme Meriç vd. (1991) tarafından yapılmıştır. Kadıköy-Kurbağalı dere mansabında detaylı şekilde Kuşdili Formasyonu üzerine çalışılmış ve tanımlanmıştır. Alüvyon, geç Kuvaterner'de İstanbul yarımadasında var olan, çeşitli akarsu ortamlarında gevşek blok – çakıl – kum – kilin depolanması sonucunda oluşmuştur.

4.1.4. Eski Alüvyon

Eski Alüvyon, geç Kuvaterner döneminde çevredeki çeşitli akarsularda depolanmış olan, gevşek blok-çakıl-kum-kil malzemelerinin toplanıp yığılması sonucu oluşmuştur. Genel olarak çapraz tabakalı ve devresel çökeller şeklinde olmakla birlikte, kalınlıkları ve kendilerini oluşturan malzemeler oluşum ortamına ve akarsuların özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Bu birim de Holosen yaşlıdır.

4.2. Çalışma Alanının Tektonik Özellikleri

İstanbul'un jeolojik yapısı oldukça karmaşık ve yer yer farklılık göstermektedir. Bunun başlıca nedenleri; stratigrafik istifin birbirine çok benzeyen yapıların tekrarlanması, kılavuz seviyelerin seyrek ve zor tanınır olması, üstlenen orojenik hareketler, çok sayıda fay ile andezit / diyabaz dayklarının sokulum yapması şekilde tanımlanabilmektedir. Ek olarak yerleşim bölgelerindeki dolgular da yapısal unsurların gözlemlenmesini zorlaştırmaktadır. Farklı doğrultulardaki kıvrımlar veya interferans kıvrımlanmayla yatay ve düşey kesitte, oluşan geometri oldukça karmaşıktır (Özçelik, 2018).

Konkordan istif oluşturan İstanbul Paleozoik çökelleri Hersinyen orojenezi ile birlikte kıvrımlanmıştır. Hersinyen kıvrımları sıkışık, kapalı, asimetric ve konsantrik tipte görülmektedirler. Yerel olarak diapirik olanları da bulunmaktadır. İstanbul Paleozoik istifleri içerisinde, göreceli şekilde daha dayanımlı birimlerin bulunduğu alanlarda kıvrımlar ise daha geniş ve konsantrik olarak görülmektedir. Tersine daha az dayanımlı düzeylerinde ise sıkışık kıvrımlar görülmektedir (ARTSON, 2018 a,b).

Bölge üzerinde etkili olan Alpin orojenezi, tüm yaşlı birimler (Üst Kretase-Paleosen ve Alt Eosen) yaşlı birimler üzerine itilmişlerdir. Bu hareketlerle Paleozoyik yaşlı birimler tekrar, Mesozoyik-Alt Tersiyer yaşlı birimler ise ilk kez kıvrımlanmışlardır. Alt Eosen sonrasında günümüze kadar gelişen sedimentler alttaki temelin kırılmalarına bağlı olarak açık kıvrımlar oluşturmuşlardır (Ariç, 1955).

Paleozoik birimleri açısız diskordansla örten Eosen, Oligosen ve Miyosen çökelleri, çoğu yerde az eğik veya yataya yakın gözlenmektedir. Bakırköy, Ceylan, Çukurçeşme,

Gürpınar, Güngören, Karaburun ve Soğucak Formasyonları olarak ayrılan bu istiflerde genellikle epirojenez etkili olmuştur. Eosen, Oligosen ve Miyosen çökelleri, tabandaki Trakya Formasyonunun paleojeolojik konumundan büyük ölçüde etkilenmiştir.

Pliyosen 'den itibaren sıyrılma tektoniğine bağlı olarak gelişen Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun neden olduğu deformasyonlar, İstanbul Yarımadası güneyindeki Neojen istifinde açık kıvrımlanmalara ve faylanmalara neden olmuştur.

Trakya Formasyonu, geçmiş dönemde hem doğu-batı, hem de kuzey-güney sıkışmaya maruz kalmıştır. Bunun sonucu olarak, yaygın şekilde eklemli, çatlaklı ve kıvrımlı olmanın yanı sıra, sıkça makaslanma ve fay zonları ile kesilmiştir. Fay zonları genellikle paralanmış-milonitleşmiş, bazen killeleşmiştir. Bazen de bu fay zonlarına, ince-orta kalınlıklı, kabaca doğu-batı doğrultulu ve düşeye yakın eğimde, andezit-diyabaz daykları yerleşmiştir. Çalışma alanına ait stratigrafik kesit Şekil 4.2 de verilmiştir.

Zaman	Devir	Alt Devir	Litoloji	Litolojik Özellik
SENOZOYİK	Kuvaterner			Alüvyon Çakıl, kum, silt ve kil
	TERSİYER	Pliyosen		Belgrad Formasyonu Kuvars çakıllı kil ve silt
		Miyosen		Bakırköy Formasyonu Mactralı kireçtaşı
				Güngören Formasyonu Marn aratabakalı kil
				Çukurçeşme Formasyonu Siltli, killi kum, kum
PALEOZOYİK	Orta - Üst Eosen		Ceylan Formasyonu (e2) Kıvrıntılı kireçtaşı ara tabakalı çamur ve kil	
			Kırıklareli Kireçtaşı (e3-e4) Resifal kireçtaşı, marnlı kireçtaşı	
	KARBONİFER			Trakya Formasyonu Mikalı kumtaşı, kiltası, siltaşı

Şekil 4.2. İstanbul'un genel stratigrafisi (Özçelik, 2018)

5. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ

5.1. İnceleme Yöntemleri

Zemin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla sondaj ve laboratuvar çalışmaları ARTSON (2016 a,b) Jeoteknik yapılmıştır. İstasyon alanlarının jeolojik profilleri, profili oluşturan zemin katmanlarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve yeraltısuyu seviyesinin tespiti amacıyla zemin etüt sondajları yapılmıştır. Sondaj aralıkları ve derinlikleri yapı özelliklerine, zemin profilinin değişkenliğine ve zeminlerin kıvam/sıklığına bağlı olarak belirlenmiştir. Sondajlar esnasında her 1.50 m derinlikte bir adet Standart Penetrasyon deneyi (SPT) ve/veya uygun zemin koşullarında, özellikle zayıf kaya birimlerinde Presiyometre (PMT) deneyleri yapılmış, kohezyonlu birimlerden ince cidarlı numune alıcılar (shelby tüpler) kullanılarak örselenmemiş (UD) zemin örnekleri alınmıştır (ARTSON, 2016 a,b).

Zeminin geçirgenlik özellikleri sondajlar esnasında yapılacak yerinde permeabilite ölçümleri ile ARTSON (2016 a,b) Jeoteknik tarafından belirlenmiştir. Örselenmiş ve örselenmemiş zemin örnekleri ile kayalardan alınan karotlar üzerinde jeolojik profili oluşturan birimlerin indeks özellikleri, kayma dayanımı ve deformasyon parametreleri ile geçirgenlik özelliklerini belirlemek amacıyla yeterli sayıda zemin mekaniği ve kaya mekaniği laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Zemin koşullarının örselenmemiş örnek alınmasına ve öngörülen laboratuvar deneylerinin yapımına uygun olmaması durumunda tasarım için gerekli zemin parametreleri literatürde mevcut zemin indeks özellikleri / arazi deneyleri / mukavemet-deformasyon parametreleri arasında verilen ampirik korelasyonlardan yararlanarak belirlenmiştir.

5.2. Arazi Çalışmaları

Mühendislik çalışmalarının bir bölümünde, jeolojik yapıyı ortaya çıkarmak, birimlerin yatay ve düşey yönde değişimlerini inceleyerek birimleri tanımlamak, yerinde deneyler yapmak amacıyla zemin araştırma sondajı yapılmaktadır.

İnceleme kapsamında Alsim Alarko Sanayi Tesisleri ve Ticaret A.Ş. Kabataş - Mecidiyeköy Metro Müessesesi tarafından, Metro hattı güzergâhı boyunca 30 m ile 85 m arasında değişen (ortalama derinlik 47 m) 20 adet zemin araştırma sondajı yaptırılmıştır. Ayrıca, tünel güzergâhında daha önce yapılan sondajlardan da yararlanılmıştır. Sondaj yerleri mühendislik jeolojisi haritası üzerinde gösterilmiştir. Sondajlara ait özet bilgiler aşağıda Çizelge 5.1’ de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Tünel güzergâhında yapılan sondajlara ait özet bilgiler

Sondaj No	X	Y	Kot (m)	Kuyu Derinliği (m)
TSK-01A	4544182,00	667303,00	6	47
TSK-03	4544523,04	667506,07	14	50
TSK-05	4544793,75	667629,48	21	49
TSK-06	4544895,49	667694,19	8	45
TSK-06A	4545010,35	667757,98	14	41
TSK-07	4545306,22	668124,67	28	65
TSK-08	4545282,80	668343,30	12	39
TSK-08A	4545398,96	668385,68	13	39
TSK-09	4545381,47	668569,06	10	40
TSK-10	4545424,69	668621,67	11	32
TSK-12	4545680,43	668970,50	53	72
TSK-14	4546175,02	668978,06	84	80
TSK-15	4546580,98	668805,11	86	74
TSK-18	4546971,56	668912,21	107	81.5
TSK-19	4547443,87	668831,47	109	63
TSK-19A	4547575,78	668691,99	99	58
TSK-20	4547645,15	668622,42	99	31.2
TSK-20A	4547671,83	668621,91	103	47
TSK-21	4547750,74	668231,94	101	33.5
TSK-22	4547795,16	667955,18	109	41

Sondaj çalışmaları Crealius 500 ve 750 tipi sondaj makineleri ile rotari - sulu düzende yapılmıştır. Kaya ortamda delgiler sürekli karot örnek alınarak yapılmıştır. Karotlu delgiler klasik yöntemde, T tipi (T76), ince cidarlı çift tüplü karotiyerler ile gerçekleştirilmiştir. Zemin niteliğindeki ortamlarda ise delgiler tek tüplü karotiyerler ile yapılmış ve karot şeklinde örselenmiş zemin örnekleri alınmıştır. Tamamen ayrılmış kaya dâhil zemin niteliğindeki kısımlarda 1,5m, 3m ve yer yer 4,5m aralıklarla Penetrasyon Testleri yapılmış ve testler sırasında SPT (örselenmiş zemin) numuneleri alınmıştır. Örselenmemiş örnek alınmasına uygun kıvamda zemin olmaması nedeniyle örselenmemiş (UD) örnek alınmamıştır.

5.2.1. Kuyu içinde yapılan testler

Delgiler sırasında kuyu içinde 87 adet Standart Penetrasyon Testi (SPT), 27 adet Presiyometre Deneyi (PMT) ve 18 adet Basıncılı Su Testi (BST) yapılmıştır. Yapılan testlerin kuyulara göre dağılımları Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Sondaj çalışmaları kapsamında kuyu başında yapılan testler

Sondaj No	SPT	PMT	BST
TSK-01A	5	1	1
TSK-03	3	1	1
TSK-05	1	1	1
TSK-06	17	3	-
TSK-06A	1	1	1
TSK-07	1	1	1
TSK-08	-	1	1
TSK-08A	11	3	1
TSK-09	21	4	1
TSK-10	4	1	1
TSK-12	-	1	1
TSK-14	-	1	1
TSK-15	6	1	1
TSK-18	-	1	1
TSK-19	-	1	1
TSK-19A	-	1	1
TSK-20	4	1	1
TSK-20A	9	1	1
TSK-21	2	1	-
TSK-22	2	1	1

5.2.1.1. Standart Penetrasyon Testleri (SPT)

Delgiler sırasında yüzeye yakın kesimde yer alan zemin ve tamamen ayrılmış kaya niteliğindeki kısımların mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile toplam 87 adet SPT yapılmıştır. Testlerde elde edilen Penetrasyon direnci (N30) değerleri ve derinlikleri sondaj logları üzerinde gösterilmiş ve özet bilgiler halinde Çizelge 5.3 ’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Tünel güzergâhında zemin ve tamamen ayrılmış kaya kısımlarda yapılan penetrasyon testlerine (SPT) ait özet bilgiler

Sondaj No	Derinlik (m)	SPT NX	Zemin Türü	Formasyon	
TSK-01A	2.7	N30	9	Çok-orta derecede ayrılmış kaya (kumtaşı - şeyl ardalanması)	
	4.2		23		
	5.7		7		
	7.2		7		
	8.7		9		
TSK-03	3	N30	19	Dolgu (Killi Kum)	
	4.5		>50	Az ayrılmış-ayrışmamış kaya (kumtaşı -şeyl ardalanması)	
	7.5		>50		
TSK-05	3.2	N30	>50	Kuşdili Formasyonu (haliç çökelleri) kumlu kil	
TSK-06	4	N30	4	Dolgu (killi kum)	
	5.5		11	Kuşdili Formasyonu (haliç çökelleri) kumlu kil	
	7		13		
	8.5		5		
	10		3		
	11.5		2		
	13		3		
	14.5		5		
	16		5		
	17.5		3		
	19		4		
	20.5		2		
	23.5		38		
	25		35		Eski alüvyon çakıllı killi kum-çakıllı kumlu kil
	26.5		32		
28	31				
29.5	35	Çok-orta derecede ayrılmış kaya (kumtaşı - şeyl ardalanması)			
TSK-06A	3.5	N30	>50	Çok-orta derecede ayrılmış kaya (kumtaşı-şeyl ardalanması)	
TSK-07	8	N30	>50	Dolgu (killi kum)	
TSK-08	-	-	-	-	

Çizelge 5.3. Tünel güzergâhında zemin ve tamamen ayrılmış kaya kısımlarda yapılan Penetrasyon Testlerine (SPT) ait özet bilgiler (Devam)

TSK-08A	3	N30	5	Dolgu (killi kum)	
	4.5		4		
	6		7	Kuşdili Formasyonu (Haliç Çökelleri) kumlu kil	
	9		9		
	10.5		7		
	12		7		
	13.5		8		
	15		4		
	16.5		3		
	18		3		
	21		10		
TSK-09	3.3	N30	7		Dolgu (killi kum)
	4.8		10		
	6.3		4	Eski alüvyon çakıllı killi kum - çakıllı kumlu kil	
	7.8		30		
	9.3		16		
	10.8		30		
	12.3		35		
	13.8		19		
	15.3		31		
	16.8		32		
	18.3		34		
	19.8		29		
	22.8		36		
	24.3		32		
	25.8		50		Az ayrılmış-ayrışmamış kaya (kumtaşı - şeyl ardalanması)
	27.3		20		Eski alüvyon çakıllı killi kum - çakıllı kumlu kil
	30.3		21		Az ayrılmış-ayrışmamış kaya (kumtaşı - şeyl ardalanması)
	31.8		25		
	33.3		26		
34.8	33				
36.3	>50				
TSK-10	4.5	N30	7	Dolgu (killi kum)	
	6		7		
	7.5		4	Çok - orta derecede ayrılmış kaya (kumtaşı - şeyl ardalanması)	
	9		>50		
TSK-12	-	-	-	-	
TSK-14	-	-	-	-	

Çizelge 5.3 Tünel güzergâhında zemin ve tamamen ayrılmış kaya kısımlarda yapılan Penetrasyon Testlerine (SPT) ait özet bilgiler (Devam)

TSK-15	3	N30	12	Dolgu (killi kum)
	4.5		21	Tamamen ayrılmış kaya (çakıllı siltli kum)
	6		18	
	7.5		14	
	9		5	
	10.5		7	Çok-orta derecede ayrılmış kaya (kumtaşı- şeyl ardalanması)
TSK-18	-	-	-	-
TSK-19	-	-	-	-
TSK-19A	-	-	-	-
TSK-20	2	N30	4	Tamamen ayrılmış kaya (çakıllı siltli kum)
	3.5		8	Çok - orta derecede ayrılmış kaya (kumtaşı - şeyl ardalanması)
	5		22	
	6.5		>50	
TSK-20A	3.7	N30	12	Tamamen ayrılmış kaya (çakıllı siltli kum)
	5.2		20	Çok-orta derecede ayrılmış kaya (kumtaşı- şeyl ardalanması)
	6.7		>50	
	11.2		>50	
	12.7		>50	
	14.2		>50	
	17.2		>50	Az ayrılmış - ayrılmamış kaya (kumtaşı-şeyl ardalanması)
	18.7		>50	
	20.2		>50	
TSK-21	3.2	N30	37	Tamamen ayrılmış kaya (çakıllı siltli kum)
	4.7		>50	Dolgu (killi kum)
TSK-22	3.5	N30	15	Tamamen ayrılmış kaya (çakıllı siltli kum)
	5		>50	Çok-orta derecede ayrılmış kaya (kumtaşı - şeyl ardalanması)

Çalışma alanı güzergâhında yapılan sondajların bir kısmında doğrudan kayaya (Trakya Formasyonu) girildiği için hiç SPT yapılamamıştır. Trakya Formasyonunun tamamen ayrılmış kısımlarında yapılan testlerde N30 değerleri 2 ile >50 arasında değişim göstermektedir. Ancak, 2-8 gibi düşük değerlerin hatalı testlerden kaynaklanabileceği, 50 den büyük değerlerin ise kaya kısımlara karşılık geldiği düşünülmektedir.

Dolayısıyla, zemin kısımlara ait N30 değerleri 10 ile 50 arasında tünel güzergâhında doğru sonuç olarak kabul edilmektedir. Penetrasyon testleri sırasında alınan örselenmiş numunelerden, temsilci ve deney yapılabilir nitelikteki olanlar, standartlara uygun şekilde ambalajlanmış ve etiketlenerek laboratuvara nakledilmiştir.

Laboratuvara gönderilmeyen SPT örnekleri ise karot örnekler ile birlikte Alarko A.Ş. ye ait Maslaktaki depoya taşınmıştır (ARTSON, 2016 a,b).

5.2.1.2.Presiyometri testleri

Zemin ve kaya birimlerinin mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile delgiler sırasında kuyularda 4 ile 7 metre arasında değişen aralıklarla toplam 27 adet PMT deneyi yapılmıştır. Alsim Alarko tarafından verilen bilgiye göre, deneylerde 6 MPa ya kadar basınç uygulayabilen Menard Apageo marka cihaz kullanılmıştır. Deneyler kuyulardaki ilerlemeye paralel (delgiyi müteakip) olarak, sondaj kuyusunun test zonuna kadar muhafaza borusu ile emniyete alınmasından sonra prob deney seviyesine kadar indirilerek deney yapılmıştır. Test sonuçları Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Tünel güzergâhı sondaj kuyularında yapılan presiyometre deneyleri ve sonuçları

Sondaj No	Kuyu Derinliği (m)	Presiyometrik Em(MPa)	Litoloji -Ayrışma	Ayrışma
TSK-01A	47	650	Silttaşı, kumtaşı ara seviyeli, silttaşı	W1-W2-W3
TSK-03	50	750	Kumtaşı-silttaşı araldanması	W1-W2
TSK-05	49	750	Kumtaşı	W1
TSK-06	45	6	Kumlu kil	W5
		20	Çakıllı kumlu kil-çakıllı killi kum	W1-W2
		150	Kumtaşı-şeyl araldanması	W3-W4
TSK-06A	41	150	Kumtaşı	W1-W2
TSK-07	65	500	Ağırlıklı kumtaşı	W1-W2
TSK-08	39	500	Kumtaşı	W1-W2
TSK-08A	39	10	Siltli kil, kumtaşı-silttaşı	W1-W2
		6		
		450		
TSK-09	40	650	Kumtaşı-kiltaşı-silttaşı	W1-W2-W3-W4
		10		
		6		
		20		

Çizelge 5.4. Tünel güzergâhı sondaj kuyularında yapılan presiyometre deneyleri ve sonuçları

TSK-10	32	650	Kumtaşı-kiltaşı-silttaşı	W1-W2- W3-W4
TSK-12	72	1000	Kiltaşı-silttaşı ardalanması + volkanik damar kayası	W1-W2
TSK-14	80	1000	Kumtaşı- silttaşı ardalanması sık kırıklı, yer yer parçalı	W1-W2
TSK-15	74	600	Ağırlıklı kumtaşı, az silttaşı-kiltaşı ve diyabaz, sık kırıklı	W1-W2
TSK-18	81.5	550	Kumtaşı	W1-W2
TSK-19	63	550	Ağırlıklı silttaşı, kısmen kumtaşı	W1-W2
TSK-19A	58	550	Ağırlıklı silttaşı, kısmen kumtaşı	W1-W2
TSK-20	31.2	64	Kumtaşı ara seviyeli, silttaşı, diyabaz, kumtaşı ve kiltaşı	W1-W2
TSK-20A	47	1000	Kumtaşı-kiltaşı- silttaşı ardalanması (kumtaşı baskın)	%75 W1-W2 %25 W3-W4
TSK-21	33.5	1000	Kumtaşı-kiltaşı- silttaşı, sık kırıklı - parçalı	%85 W1- W2, %15 W3-W4
TSK-22	41	1000	Kumtaşı, sık kırıklı-parçalı	%35 W3-W4 %65 W1-W2

5.2.1.3. Basınçlı Su Testleri (BST, Paket Testi)

Sondajlarda karşılaşılan kaya biriminin (Trakya Formasyonu) geçirgenlik özelliklerini belirlemek amacı ile delgiler sırasında kuyularda birer adet BST yapılmıştır (Çizelge 5.5).

Çizelge 5.5. Lugeon değerleri ve geçirimsizliği (Şekercioğlu, 1998)

Lugeon Değeri (l/dakika/m)	Geçirimsizlik
< 1	Geçirimsiz
1 -5	Az geçirimli
5-25	Geçirimli
>25	Çok geçirimli

Alsim Alarko Sanayi Tesisleri ve Ticaret A.Ş. Kabataş - Mecidiyeköy Metro Müessesesi tarafından verilen bilgiye göre, basınçlı su deneyleri (BST, Paker Testi) tünel etki zonu içinde, uygun görülen derinliklerde yapılmıştır. Testlerde yüksek basınca ulaşabilen, değişik akım ve basınç aralıklarına sahip pompalar ve ölçme hassasiyeti uygun araçlar (manometreler) kullanıldığı belirtilmiştir. Paker yerleştirilmeden önce ölçümlerde hata olmaması amacıyla dışarıda şişirilerek deney öncesi sağlamlığı ve paker hortumlarındaki olası kaçaklar izlenmiştir. Deneyler tek lastikli paker ile delgiyi müteakip yukarıdan aşağıya bir düzen içinde 3-6-10-6-3 basınç kademelerinde yapılmıştır. Her basınç kademesinde deney zonlarına 10 dakika süre ile su verilmiştir. Bu aralar sırasında elde edilen su kaybı değerleri, sahada tutulan formlara işlenmiş ve değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde Lugeon yöntemi kullanılmıştır.

Deneylerde elde edilen her bir Lugeon değeri o kuyunun genelinde yapılan minimum ve maksimum aralığını belirtmektedir. Deneylerde kuyulardan elde edilen Lugeon değerleri, ayrışma değerleri ve geçirimsizlik bilgisi Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Basınçlı Su Deneyleri (BST) ve sonuçlarına ait veriler

Sondaj No	Kuyu Derinliği (m)	Geçirimsizlik (Lugeon lt/dk/m)	Ayrışma	Geçirimsizlik
TSK-01A	47	1.25	W1-W2	Az Geçirimli
		2.14	W2-W3	
TSK-03	50	0.61	W1-W2	Geçirimsiz
		2.06		Az Geçirimli
TSK-05	49	2.01	W1	Az Geçirimli
		5.65		Geçirimli

Çizelge 5.6. Basınçlı Su Deneyleri (BST) ve sonuçlarına ait veriler (Devam)

TSK-06	45	-	W5	-
			W1-W2	
			W3-W4	
TSK-06A	41	1.04	W1-W2	Az Geçirimli
TSK-07	65	0.66	W1-W2	Geçirimsiz
		6.51		Geçirimli
TSK-08	39	6.39	W1-W2	Geçirimli
		9.69		
TSK-08A	39	6.5	W1-W2	Geçirimli
		19.5		
TSK-09	40	8.28	W1-W2	Geçirimli
		11.50	W3-W4	
TSK-10	32	8.28	W1-W2	Geçirimli
		11.50	W3-W4	
TSK-12	72	1.05	W1-W2	Az Geçirimli
		1.20		
TSK-14	80	0.11	W1-W2	Geçirimsiz
		0.26		
TSK-15	74	0.11	W1-W2	Geçirimsiz
		0.34		
TSK-18	81.5	1.61	W1-W2	Az Geçirimli
		1.65		
TSK-19	63	2.55	W1-W2	Az Geçirimli
		2.76		
TSK-19A	58	2.55	W1-W2	Az Geçirimli
		2.76		
TSK-20	31.2	0.55	W1-W2	Geçirimsiz
		7.06		Geçirimli
TSK-20A	47	0.1	%75 W1-W2	Geçirimsiz
			%25 W3-W4	
TSK-21	33.5	-	%85 W1-W2,	-
			%15 W3-W4	
TSK-22	41	0.1	%35 W3-W4	Geçirimsiz
			%65 W1-W2	

Çizelge 5.6' da gördürüldüğü üzere ortamın Lugeon değerlerinin %75 i geçirimsiz-az geçirimli olarak tespit sınıflandırılmış olup, geri kalan %25 ise geçirimli olarak tespit edilmiştir. Deneyler çok ağırlıklı olarak Trakya Formasyonun' da yapılmıştır. Trakya Formasyonu az geçirimli olarak belirtilmiştir (Özgül vd., 2011).

Tünel kazısının yapılacağı derinlikte Trakya Formasyonun hâkim olduğu bilinmektedir. Bu bakımdan yukarıda verilen geçirimsiz değerler Trakya Formasyonunun genel geçirimsizlik düzeyi ile uyumludur.

5.3. Laboratuvar Deneyleri ve Analizleri

Kuyu numunelerine yapılan deneyler sonucunda, genel ortam parametreleri elde edilmiştir. Bu kuyu verileri ARTSON Jeoteknik tarafından açılan 20 adet sondaj kuyusundan elde edilmiştir.

Yapılan deneylere ve sonuçlarına ait özet bilgiler aşağıda Çizelge 5.7’de, laboratuvar tarafından verilen deney sonuçları özet çizelgeleri, deney formları verilmiştir.

Çizelge 5.7. Kuyu numunelerinin genel ortam parametreleri (ARTSON 2016, a,b)

Sondaj No	Kuyu Derinliği (m)	Genel Ortam Parametreleri			
		γ_n (kN/m ³)	Φ	C (kPa)	Em (Mpa)
TSK-01A	47	25	37°	70	650
TSK-03	50	25	37°	75	750
TSK-05	49	25	37°	75	750
TSK-06	45	17	3°	20	6
		20	32°	3	20
		24	33°	20	150
TSK-06A	41	24	33°	20	150
TSK-07	65	25	38°	40	500
TSK-08	39	25	38°	40	500
TSK-08A	39	17	27°	2	10
		17	3°	20	6
		24	37°	50	450
TSK-09	40	25	38°	65	650
		17	27°	2	10
		17	3°	20	6
		21	10°	50	20
TSK-10	32	25	38°	65	650
TSK-12	72	25	28°	175	1000
TSK-14	80	25	28°	175	1000
TSK-15	74	25	32°	60	600
TSK-18	81.5	25	24°	120	550
TSK-19	63	25	24°	120	550

Çizelge 5.7. Kuyu numunelerinin genel ortam parametreleri (ARTSON 2016, a,b)
(Devam)

TSK-19A	58	25	24°	120	550
TSK-20	31.2	24	34°	7	64
TSK-20A	47	25	37°	100	1000
TSK-21	33.5	25	37°	100	1000
TSK-22	41	25	37°	100	1000

Kuyulara ait litojik özellikler ve bu birimlerin yapısal özellikleri de incelenmiştir. Kuyu bilgilerinden yapısal özellikler, litolojik özellikler ve ayrışma seviyesi metrelere göre düzenlenerek Çizelge 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Kuyuların litolojik ve yapısal özellikleri (ARTSON, 2016 a,b)

Sondaj No	Kuyu Derinliği (m)	Birim Derinliği (m)	Litoloji ve Ayrışma Seviyesi	Yapısal Jeoloji	
TSK-01A	47	0	Dolgu (killi kum)	Zemin	
		3.5			
		3.5	Çakıllı siltli kum, (W5)	Tamamen ayrılmış kaya	
		16.4			
		16.4	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	Az ayrılmış kaya	
		47		Ayrılmamış kaya	
TSK-03	50	0	Dolgu (killi kum)	Zemin	
		4.5			
		4.5	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	Az ayrılmış kaya	
		50		Ayrılmamış kaya	
TSK-05	49	0	Dolgu (killi kum)	Zemin	
		1.8			
		1.8	Çakıllı siltli kum, (W5)	Tamamen ayrılmış kaya	
		15			
		15	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	Az ayrılmış kaya	
		49		Ayrılmamış kaya	
TSK-06	45	0	Dolgu (killi kum)	Zemin	
		4.4			
		4.4	Haliç çökelleri, kumlu kil	Zemin	
		20.85			
		20.85	Çakıllı killi kum - çakıllı kumlu kil	-	
		30		30-39.5m arasında ezik zon ve muhtemel fay	Zemin
		30	Çok ayrılmış kaya		
		45	Kumtaşı şeyl ard. (W3-W4)	Orta ayrılmış kaya	

Çizelge 5.8. Kuyuların litolojik ve yapısal özellikleri (ARTSON, 2016 a,b)(Devam)

TSK-06A	41	0	Dolgu (killi kum)	Zemin		
		0.5				
		0.5	Haliç çökelleri, kumlu kil	3.5m'de muhtemel fay	Zemin	
		3.5				
		3.5	Kumtaşı şeyl ard. (W3-W4)	-	Çok ayrılmış kaya	
		18			Orta ayrılmış kaya	
		18	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	32-36.5m ezik zon	Az ayrılmış kaya	
		41			Ayrılmamış kaya	
TSK-07	65	0	Dolgu (killi kum)	Zemin		
		1.5				
		1.5	Kumtaşı şeyl ard. (W3-W4)	Çok ayrılmış kaya		
		15.5		Orta ayrılmış kaya		
		15.5	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	Az ayrılmış kaya		
65	Ayrılmamış kaya					
TSK-08	39	0	Dolgu (killi kum)	Zemin		
		0.5				
		0.5	Kumtaşı-şeyl ard. (W3-W4)	Çok ayrılmış kaya		
		9		Orta ayrılmış kaya		
		9	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	Az ayrılmış kaya		
39	Ayrılmamış kaya					
TSK-08A	39	0	Dolgu (killi kum)	Zemin		
		4.5				
		4.5	Haliç çökelleri, kumlu kil	Zemin		
		22.7				
		22.7	Kumtaşı-şeyl ard. (W3-W4)	Çok ayrılmış kaya		
		28.6		Orta ayrılmış kaya		
		28.6	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	Az ayrılmış kaya		
39	Ayrılmamış kaya					
TSK-09	40	0	Dolgu (killi kum)	Zemin		
		6.5				
		6.5	Çakıllı killi, kum - çakıllı kumlu kil	Zemin		
		37				
		37	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	Az ayrılmış kaya		
40	Ayrılmamış kaya					
TSK-10	32	0	Dolgu (killi kum)	Zemin		
		5				
		5	Çakıllı killi, kum - çakıllı kumlu kil	Zemin		
		6.5				
		6.5	Kumtaşı-şeyl ard. (W3-W4)	Çok ayrılmış kaya		
		22		Orta ayrılmış kaya		
		22	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	Az ayrılmış kaya		
32	Ayrılmamış kaya					

Çizelge 5.8. Kuyuların litolojik ve yapısal özellikleri (ARTSON, 2016 a,b)(Devam)

TSK-12	72	0	Dolgu (killi kum)	Zemin	
		1.5			
		1.5	Kumtaşı-şeyl ard. (W3-W4)	Çok ayrılmış kaya	
		20.5		Orta ayrılmış kaya	
		20.5	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	Az ayrılmış kaya	
72	Ayrılmamış kaya				
TSK-14	80	0	Dolgu (killi kum)	Zemin	
		0.5			
		0.5	Kumtaşı-şeyl ard. (W3-W4)	Çok ayrılmış kaya	
		17.5		Orta ayrılmış kaya	
		17.5	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	Az ayrılmış kaya	
80	Ayrılmamış kaya				
TSK-15	74	0	Dolgu (killi kum)	Zemin	
		6			
		6	Kumtaşı-şeyl ard. (W3-W4)	Çok ayrılmış kaya	
		16.5		Orta ayrılmış kaya	
		16.5	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	Az ayrılmış kaya	
74	Ayrılmamış kaya				
TSK-18	81.5	0	Dolgu (killi kum)	Zemin	
		1.5			
		1.5	Kumtaşı-şeyl ard. (W3-W4)	Çok ayrılmış kaya	
		24		Orta ayrılmış kaya	
		24	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	Az ayrılmış kaya	
81.5	Ayrılmamış kaya				
TSK-19	63	0	Çakıllı siltli kum, (W5)	Tamamen ayrılmış kaya	
		6			
		6	Kumtaşı-şeyl ard. (W3-W4)	Çok ayrılmış kaya	
		20		Orta ayrılmış kaya	
		20	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	Az ayrılmış kaya	
63	Ayrılmamış kaya				
TSK-19A	58	0	Çakıllı siltli kum, (W5)	Tamamen ayrılmış kaya	
		3			
		3	Kumtaşı-şeyl ard. (W3-W4)	Çok ayrılmış kaya	
		15		Orta ayrılmış kaya	
		15	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)	Az ayrılmış kaya	
58	Ayrılmamış kaya				
TSK-20	31.2	0	Dolgu (killi kum)	-	Zemin
		2			
		2	Çakıllı siltli kum, (W5)	2-10.5m aralığında muhtemel fay ve 5-31.2m aralığında ezik zon	Tamamen ayrılmış kaya
		10.5			Az ayrılmış kaya
		10.5	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)		Ayrılmamış kaya
31.2					

Çizelge 5.8. Kuyuların litolojik ve yapısal özellikleri (ARTSON, 2016 a,b)(Devam)

TSK-20A	47	0	Dolgu (killi kum)	4-47m aralığında ezik zon, 8-20.5 m aralığında fay hattı ve 6.5-10.5m aralığında volkanik dayk	Zemin
		4			
		4	Çakıllı siltli kum, (W5)		Tamamen ayrılmış kaya
		6.5			
		6.5	Kumtaşı-şeyl ard. (W3-W4)		Çok ayrılmış kaya
		20.5			Orta ayrılmış kaya
		20.5	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)		Az ayrılmış kaya
		47			Ayrılmamış kaya
TSK-21	33.5	0	Dolgu (killi kum)		Zemin
		1.5			
		1.5	Çakıllı siltli kum, (W5)		Tamamen ayrılmış kaya
		3			
		3	Kumtaşı-şeyl ard. (W3-W4)		Çok ayrılmış kaya
		13.5			Orta ayrılmış kaya
		13.5	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)		Az ayrılmış kaya
		33.5			Ayrılmamış kaya
TSK-22	41	0	Dolgu (killi kum)		Zemin
		0.5			
		0.5	Çakıllı siltli kum, (W5)		Tamamen ayrılmış kaya
		5			
		5	Kumtaşı-şeyl ard. (W3-W4)		Çok ayrılmış kaya
		15.75			Orta ayrılmış kaya
		15.75	Kumtaşı-şeyl ard. (W1-W2)		Az ayrılmış kaya
		41			Ayrılmamış kaya

5.4. Zemin Ve Kaya Birimlerinin Mühendislik Özellikleri

Genel Jeoloji bölümünde belirtildiği üzere inceleme alanında esas olarak Trakya Formasyonu bulunmaktadır. Trakya Formasyonunu genel olarak siltaşı, kumtaşı ve kilaşı seviyelerinin ardalaşması şeklinde olup bu farklı litolojilerin her biri, yer yer daha baskın görülmektedir.

Çalışma alanında yapılan sondaj çalışmaları sonucunda ortamda; dolgu (killi kum), Kuşdili Formasyonu (kumlu kil), eski alüvyon (çakıllı killi kum-çakıllı kumlu kil), tamamen ayrılmış kaya (çakıllı siltli kum), çok - orta derecede ayrılmış kaya (kumtaşı-şeyl ardalanması), az ayrılmış – ayrılmamış kaya (kumtaşı-şeyl ardalanması) ve volkanik dayk gözlemlenmiştir.

Çalışma alanında, Trakya Formasyonu üyesi olan ve ayrışma türüne göre değişiklik gösteren kumtaşı-şeyl ardalanması baskın şekilde görülmektedir. Formasyonun taban kısmında daha az ayrılmış-ayrışmamış kumtaşı-şeyl ardalanması mevcut iken formasyonun hemen üst kısmında çok-orta derecede ayrılmış kumtaşı-şeyl ardalanması gözlemlenmektedir. Bu birimlerin mühendislik özellikleri açısından litolojiye dayalı bir ayırım (gruplama) yapmak yerine, ayrışma seviyesine dayalı bir ayırım yapılmıştır. Yani, Trakya Formasyonu ayrışma seviyesine göre gruplandırılmıştır.

Trakya Formasyonu mühendislik özellikleri açısından, tamamen ayrılmış (W5), çok - orta derecede ayrılmış (W3-W4) ve az ayrılmış - ayrılmamış (W1-W2) kaya olmak üzere 3 seviye halinde ele alınmıştır. Tamamen ayrılmış (W5) birim seviyesi zemin özelliğinde çakıllı siltli kumdan oluşmaktadır. Çalışma alanını kapsayan Formasyonu oluşturan diğer iki seviyede ise, kumtaşı-şeyl ardalanması üstten alta doğru çok - orta derecede ayrılmış (W3-W4) ve az ayrılmış - ayrılmamış (W1-W2) kaya şeklinde değerlendirilmiştir.

Eski Alüvyon, karot sandıklarında ilk metrelerde yer alan sarı renkli örnekler eski alüvyona aittir. Ağırlıklı olarak sarı - kirli beyaz renkli, kalkerli sert kil veya yumuşak kil taşlarından, kısmen de sarı - kahve renkli, zayıf tutturulmuş çakıllı kumlu kil veya killi kumlardan oluşur. Çakıllar genellikle köşeli veya yarı köşeli grovak ile yuvarlak kuvars ve diğer metamorfik kaya kökenlidir. Yumuşak kaya veya sert zemin olarak sınıflandırılabilir.

Tamamen Ayrılmış Kaya (Çakıllı Killi Kum ve Kumlu Kil); Sarı, kahve renkli bu seviye, tabanında yer alan ana kaya biriminin atmosferik koşulların etkisi ile ayrılarak zemin haline gelmesi sonucu oluşmuştur. Kil, silt boyu ara malzeme ile kum ve çakıl boyutunda kalıntı kayaç parçalarından oluşmaktadır. Bu seviyeye ait arazi ve laboratuvar verileri Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Tamamen ayrıışmış kaya (çakıllı killi kum ve kumlu kil) tabakasına ait arazi ve laboratuvar (mühendislik) verileri (ARTSON, 2016 a,b)

Parametre	Test Sayısı	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama	Zemin Grubu	Tanım
Penetrasyon direnci	13	6	>50	20	%40 CL, %40SC, %10CH,%10Gc- GP	Orta sıkı killi kum ve çok katı kumlu kil
Çakıl oranı %	10	0	54	11		
Kum oranı %		19	65	42		
Kil+silt oranı %		11	74	47		
Likit limit (ll)%		27	51	35		
Plastik limit (pl)%		12	19	16		
Plastisite indisi (pl)%		11	32	19		

Çizelge 5.9’da sunulan verilere göre, tamamen ayrıışmış kaya tabakası orta sıkı çakıllı killi kum ve çok katı kumlu kil olarak değerlendirilebilmektedir. Genelde yüzeyde ince bir seviye halinde bulunan bu tabakayla, tünel kazısında karşılaşılmamıştır. Fakat açık kazılarda yüzeyde yaygın şekilde karşılaşılmıştır.

Çok - Orta Derecede Ayrıışmış (W3-W4) Kumtaşı-Şeyl; Çok ayrıışmış kısımlar sarı, kahve, yer yer zeytin yeşili renkli olup, süreksizlikler kısmen belirgin, kısmen belirsiz, genellikle kil dolgulu olduğu belirtilmiştir. Orta derecede ayrıışmış kısımlar ise genelde sarımsı gri, zeytin yeşili, kumtaşı seviyeleri boz renkli olduğu belirtilmiştir. Bazı kısımları seyrek kırıklı, nispeten sağlam, bazı kısımları ise çok parçalı, yaygın killeşmiş olarak belirtilmiştir. Gerek tünel kazısı, gerekse açık kazıların önemli ölçüde bu kaya seviyesi içinde gerçekleşmiştir.

5.5. Yeraltı Suyu Durumu

Güzergâhın çok önemli kısmını oluşturan Trakya Formasyonu genel olarak geçirimsiz - az geçirimli - geçirimli olup, kayda değer yeraltı suyu taşınması beklenmemektedir. Ancak taban kısımları çakıl ve kum katkılı olup nispeten geçirimli olabilir.

Trakya Formasyonu içinde yapılan basınçlı su deneylerinde Lugeon değerleri kazı alanının ağırlıklı olarak birden küçük (geçirimsiz), az bir kısmı ise 1 ile 5 arasında (az geçirimli) geri kalan çok az kısımda ise 6 ile 19 arasında (geçirimli) elde edilmiştir.

Kazı sırasında genel olarak çalışmalar güçleştirecek bir yeraltısu ile karşılaşılacaktır. Ancak, başta kumtaşı baskın kesimlerde olmak üzere, kayanın çok kırıklı veya parçalı olduğu zayıflık (fay zonu vb.) zonlarında beklenilenin üzerinde yeraltısu sızıntıları ile karşılaşılacaktır ve kazı sırasında buralarda gerekli önlemler alınmıştır. Özellikle tünelin 1+760 m ile 1+980 metresi arasında bulunan eski alüvyon, Kuşdili Formasyonu ve tünelin 4+500 m'de bulunan muhtemel fay bu sızıntıların gerçekleşebileceği alanlar olarak düşünülmektedir.

Bağlantı tünelleri güzergâhını oluşturan kaya biriminin genel geçirimsizlik özellikleri ve tünellerin sığ derinlikte yer alıyor olması nedeniyle, tünel kazılarında genel olarak damlama ve zayıf sızıntılar halinde yeraltısu ile karşılaşılacaktır.

6. KABATAŞ-MECİDİYEKÖY METRO HATTININ TEKNİK ÖZELLİKLERİ

6.1. Kabataş – Mecidiyeköy Metrosu

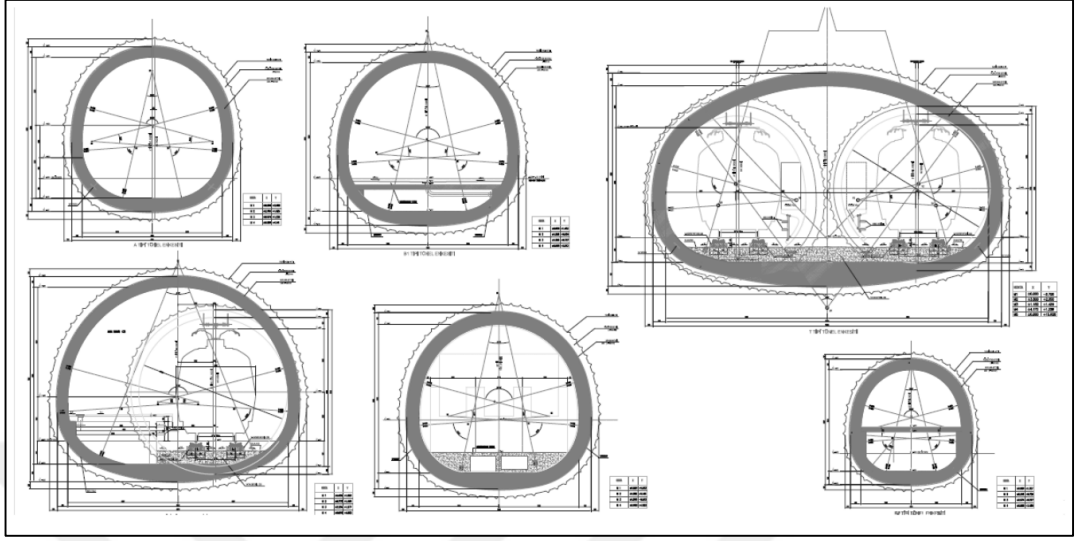
Kabataş - Mecidiyeköy metro hattı inşaatının hat uzunluğu 5220m'dir. Bu hat üzerinde 4 istasyon (Kabataş, Beşiktaş, Yıldız - Darphane, Mecidiyeköy) bulunmaktadır.

6.2. Kabataş – Mecidiyeköy Metrounun Teknik Özellikleri

Takribi 6 km uzunluğundaki Kabataş-Mecidiyeköy Raylı Toplu taşıma güzergâhında 4 istasyon bulunmaktadır. İlave olarak muhtelif lokasyonlarda inşaat şaftları, TBM giriş şaftları gibi yapılar bulunmaktadır. İstasyonların tamamı yüzeye yakın olmakla birlikte konumsal olarak yeraltında bulunmaktadır. Genel olarak ray hattı, peron seviyesi ile bunlara bağlanan merdiven grupları delme tüneline bulunmaktadır. Peron ile bilet holü arasındaki ara katları aç-kapa yöntemiyle yapılması planlanmaktadır. Bilet holü seviyesi aç-kapa inşaat yöntemi kapsamındadır.

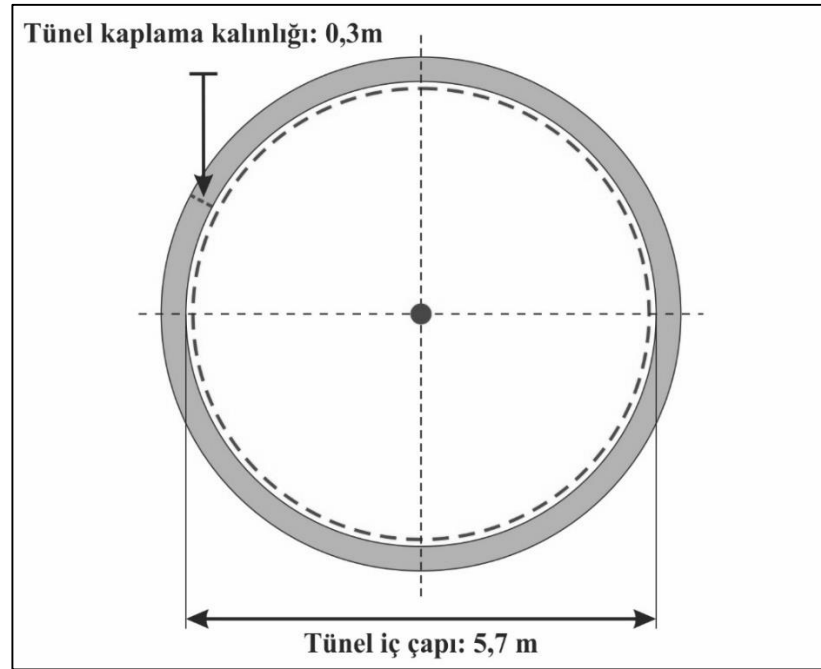
Kabataş - Mecidiyeköy istasyonları arasındaki İstanbul Metro Projesi TBM ve klasik delme tünel olmak üzere iki tünel içermektedir. Çalışma alanı boyunca tünelin toplam uzunluğu 5220 m olup, tünelin haricinde klasik tünel delme yöntemi kullanılarak açılacak olan tünelleri de dâhil edildiğinde tünelin toplam uzunluğu 6180 m olmaktadır.

Yeni Avusturya Tünel Metodu ile açılan tünellerin aşağıdaki şekilde görüleceği gibi değişik kesit tipleri bulunmaktadır (Şekil 6.1) .



Şekil 6.1. NATM kesit örneği (ARTSON 2016 a,b)

TBM ile açılacak tünelin iç çapı 5,7 m ve tünel kaplamasının kalınlığı 30 cm olarak belirlenmiştir. Kabataş - Mecidiyeköy arasındaki tüneller için seçilen TBM modeli aşağıda bulunmaktadır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. TBM tünel en kesiti

6.3. Tünel Hattı Jeolojisi

Çalışma alanının yoğun bir alanını kapsayan Trakya formasyonu ve üyeleri baskın şekilde ortamda görülmektedir (Çizelge 6.1, 6.2).

Çizelge 6. 1. Kabataş - Mecidiyeköy Metro hattı arasındaki genel jeolojik açıklama. Başlangıçtan Kabataş istasyonu kadar olan bölüm (Klasik delme tünel)

Mesafeden	Mesafeye	Aradaki Uzunluk (m)	Jeoloji
0+000	0+240	240	Kumtaşı – şeyl (Trakya Fm.)
0+240	0+460	220	Kumtaşı – şeyl (Trakya Fm.)
4+437	4+658	221	Kumtaşı – şeyl (Trakya Fm.)
4+658	5+365	707	Kumtaşı – şeyl (Trakya Fm.)

Çizelge 6. 2. Mecidiyeköy - Kabataş Metro Hattı Genel jeolojik açıklama. Kabataş İstasyonu – Mecidiyeköy shaftı arasındaki tünel bölümü (TBM tünel)

Mesafeden	Mesafeye	Aradaki Uzunluk (m)	Jeoloji
0+460	2+079	1619	Kumtaşı – şeyl (Trakya Fm.)
2+079	2+300	221	Kumtaşı – şeyl (Trakya Fm.)
2+300	3+425	1125	Kumtaşı – şeyl (Trakya Fm.)
3+425	3+646	221	Kumtaşı – şeyl (Trakya Fm.)
3+646	4+437	791	Kumtaşı – şeyl (Trakya Fm.)

6.4. NATM Kazı Destekleme Yöntemi

Kabataş – Mecidiyeköy Metrosu tüneller kazı destekleme işleri “Yeni Avusturya Tünel Metodu” ile yapılmıştır. NATM prensip olarak, tüneli çevreleyen toprağın gücünü mobilize ederek kayanın veya zeminin taşıma gücü kapasitesini arttırmaya dayandırılmaktadır. Tünel kazısı bu yöntemde bölüm bölüm, aşama aşama yapılmaktadır.

A tipi, P tipi, B tipi, tipi tünellerde kazılar üst yarı ve alt yarı kazı olmak üzere iki kademede açılmıştır. Ancak, T tipi, C tipi tünellerde üst yarı kazısı 2 kademe, alt yarı kazısı 1 kademe olmak üzere üç kademede açılmıştır. Kazının bu şekilde yapılması, T tipi tünelin oval kesiti ve zemin cinsinin gerekliliğinden öngörülmüştür.

6.5. Zemin Türlerine Göre Yapılan Kazı Çalışmaları

6.5.1. Zayıf zeminde kazı

Zemin, enjeksiyon veya uygun olan bir başka yöntemle (Jet Grouting) ile sağlamlaştırılmış ve geçirimsiz hale getirilmiştir. Kazı, kırıcı uçlu makinalar ile (Jack Hammer) yapılmıştır. Ancak Kalot – Stros – Radye kademeleri halinde ve kontrollü halde yürütülmüştür.

6.5.2. Orta sertlikteki zeminde kazı

Kazı kırıcı uçlu makinalarla (Jack Hammer) yapılmıştır. İki aynada bir kazı makinası ve delici makina (Jumbo) kullanılmıştır. Bir aynada kazı ve kazı malzemesi nakli yapılırken, ikinci aynada çelik hasır, iksa, shotcrete ve bulonlama ile destekleme yapılmıştır. Bu durum ulaşım yönünden büyük kolaylık sağlamaktır. Olumsuz koşullarda zemin kademeli kazılmış ve halka en kısa zamanda tamamlanmıştır. Günlük ilerleme hızı ortalama 1 – 1.5 m arasında değişmektedir.

6.5.3. Sert zeminde kazı

Tünellerde Jack Hammer ile kazılmaya müsait olmayan zeminlerde, zemin kontrollü olarak dinamit ile kazılmıştır. Günlük ilerleme hızı 2-2.5 m arasında değişmektedir.

6.6. Çelik İksa Montajı

Tünel içerisine önceden hazırlanmış halde getirilen çelik iksaların, flanşları üzerinde açılan dört delik içinden cıvata + somun yardımıyla birbirlerine bağlanması şeklinde yapılmaktadır. İksa montajında özellikle iksa pabuçlarının her iki yanda sağlam zemine basmasının sağlanmasına ve her iksada mutlaka topoğrafik ölçüm yapılmasına dikkat edilmiştir.

Tünele kafes giriş iksalar ile destekleme yapılmıştır. Ancak çok zayıf zeminlerde profil çelik iksalar da kullanılmıştır. İksa aralıkları zemin şartlarına göre 0.50 – 2.00 m arasında yapılmıştır. İksanın arkasına gerektiği yerlerde çelik hasır konulmuştur.

Çelik iksanın görevlerini şu şekilde sıralanabilmektedir.

- Kazı sonrasında oluşabilecek küçük kütle hareketlerini engelleyerek, çalışma alanının güvenliğini kontrol etmektedir.
- Sürgü çubuğunun dayanımı arttırmaktadır.
- Bulonların ön gerilme kuvvetlerini (yumuşak püskürtme betonunu ezmeden) dağıtmaktadır.
- Püskürtme beton priz alana kadar, kayanın gevşemesini engellemektir.
- Tünel kesitini, düşey ve yanal basınçlara karşı korumaktadır.
- Örselenmiş ya da hareket halindeki zemin / kayanın ağırlığını arttırmaktadır.
- Kısmen dengeleme basıncı sağlamaktır.
- Kırılma ve genleşme tehlikesini önlemektedir.

6.7. Süren Montajı

Bu uygulama zayıf ve çok zayıf zemin türlerinde, kazı sonrası kayanın duraylılığını kaybetmesi ve genellikle su içeren bölgelerde kazı öncesi kazılacak alana uygulanmaktadır.

Tünelde, tavandan omuzlara kadar olan bölümde, kazı yönünde şemsiye şeklinde uygulanmaktadır. Bu sayede bir sonraki kazı tavanı duraylı hale getirilmektedir. Bu işlem bulon uygulamasındaki gibi yapılmaktadır. Çelik iksa üzerinden yatayla max. 5-100 açı yapacak biçimde çakılırlar ve adetleri kazı destek türlerine göre değişmektedir. Bu malzemelerden en az iki ilerleme mesafesi için yeterli miktarda sürgü çubuğu (Ø 26) tünelin içindeki aynaya en yakın ve uygun yerde depolanmaktadır.

Sürgü çubukları üst yarı kazısı sırasında jumbo ile açılan deliklerden ayna eksenine paralele yakın ve aynanın üst ve yan kısımlarına şemsiye biçiminde konulmuştur. Konulacağı yerler genellikle zeminin çok olumsuz olduğu ve boşalma göstereceği bölgelere uygulanmaktadır. Daha güçlü destek gerektiren yerlerde Ø 32 – 38 mm. borular aynı amaç için kullanılması uygun görülmektedir. Çok zayıf zeminlerde ise Jet-Grouting ile sağlamlaştırma yapılmaktadır.

6.8. Umbrella Arch Uygulaması

Bu uygulama çok zayıf zemin cinslerinde veya tünel üst kotu ile yüzey kotu arasındaki mesafenin çok az olduğu yapılması şart olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Klasik NATM'nin yetersiz kaldığı zayıf jeolojik koşullarda, tünel kazısını güvenli bir şekilde yapmak için tünel cidarında kesik koni inşa edilerek, birincil zemin ve kaya sağlamlaştırma işlemi olarak tasarlanmıştır.

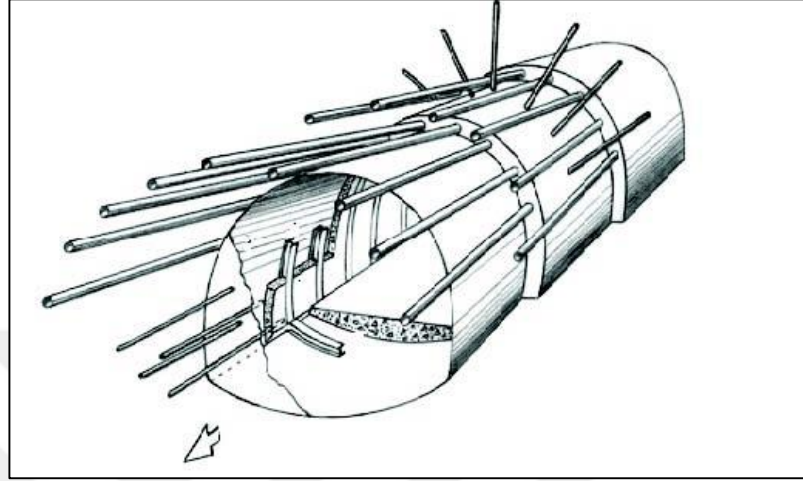
Umbrella Arch uygulaması yapılmadan önce umbrella delgisi yapılabilmesi için mevcut ayna alanının daha büyük bir kazı yapılarak yaklaşık 50 cm genişletilmesi gerekmektedir. Kazı alanı genişletildikten sonra aynaya çelik hasır ve shotcrete uygulanarak kazı yapılacak bölge istikrarlı hale getirilmektedir. Umbrella boruları 114 mm genişliğinde, 9 metre boyunda ve 6,3 mm et kalınlığına sahip demir borulardır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. Umbrella boruları Kabataş-Mecidiyeköy Metro uygulaması

Bu demir boruların montajının yapılabilmesi kaya delici makinası ile 130 mm genişliğinde 6-8 derece eğimli 9 metre boyunda delgiler yapılmaktadır. Delgi işlemi tamamlandıktan sonra umbrella boruları bu deliklerin içine sürülmektedir. Borular

sürülmeden önce boruların içine uygulanacak enjeksiyonun zemin ile boruların arasındaki boşlukları da doldurması için belirlenen aralıklarla delikler açılması gerekmektedir. Boru sürme işlemi tamamlandıktan sonra bu boruların içine enjeksiyon vermek için plastik hortumlar konulmaktadır (Şekil 6.4) .



Şekil 6.4. Umbrella kesit görseli (Onargan ve Aksoy, 2008)

Uygulanan enjeksiyonun borunun içini tamamen doldurması için borunun ağzı alçı ile kapatılmaktadır. Bütün umbrella boruları enjeksiyon ile doldurulduktan sonra enjeksiyonun priz alma süresi beklenip kazıya başlanılmaktadır. Üst yarı kazıları bir sonraki umbrella ringinde tekrardan delgi yapabilmek için yükselerek yapılmaktadır. 4.80 metre kazı yapıldıktan sonra ayna tekrardan çelik hasır ve shotcrete ile kapatılıp umbrella delgisine başlanılmaktadır. Umbrella borularının geriye kalan 4.20 metrelik kısmı ise umbrella borularının bir sonraki ring ile beraber çalışması için bırakılmaktadır. Çift sıra umbrella uygulamalarında ise imalat sıraları aynı şekilde olup sadece daha geniş bir kazı yapılarak delinecek çift sıra boru delgilerinin kazı kesitine girmemesi sağlanmaktadır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5. Umbrella uygulaması Kabataş- Mecidiyeköy metro hattı

6.9. Boru İtme Uygulaması

Bu uygulama çok zayıf zemin türlerinde ya da tünel üst kotuyla yüzey kotu arasındaki katmanın çok az olduğu mecburi durumlarda tercih edilmektedir. Kazıya başlanmadan önce kazı alanının üst kısmına 60 cm'lik borular ittirilmektedir. Boru itirme işlemi tamamlandıktan sonra kazıya girilerek boruların altından tünel açılmaktadır.

6.10. Püskürtme Beton Uygulaması

Püskürtme beton, uygulanacağı alana göre kuru karışım ve ıslak karışım olmak üzere 2 şekilde uygulanmaktadır. Uygulama yapılan yerin özelliklerine, uygulama hızına ve istenen beton kalitesine bağlı olarak bu 2 sistemden birisi tercih edilmektedir. Kapalı alan içindeki toz uçuşunu azaltmak ve havanın kirlenmesini engellemek amacıyla, ıslak shotcrete kullanımı tercih edilmektedir.

Sağlam zemin cinslerinde püskürtme beton uygulaması, zeminin hava ile temasını kesip, kavlak yapmasını engellemek ve kemer oluşturmak için uygulanmaktadır.

Geçici tahkimatın en önemli elemanı olan püskürtme beton, projesine uygun olarak kullanım yeri ve amacına göre farklı kalınlıklarda uygulanmaktadır (Deere vd., 1969).

6.11. Hasır Çelik Uygulaması

Hasır çelik uygulamasının yapılmasının amacı bütünlüğü sağlayarak, betonu püskürtme sırasında sarkma olmasını önlemektir. Uygulamada dikkat edilecek en önemli husus, donatının kaya yüzeyine mümkün olduğunca yakın olmasını sağlamaktır (ARTSON, 2016 a,b).

Çelik hasırın sağlamlaştırma işlemindeki başlıca görevi kazı sonrası sağlamlaştırma işlemi sırasında düşebilecek kaya parçalarının düşmesini önlemek ve zayıf formasyonlarda desteklemeyi arttırmayı amaçlamaktadır. Hasır çelik uygulaması zemin durumuna göre belirlenmektedir. Tavan ve yan cidarlara, hasır çelik montajı yapılmaktadır.

Montajı yapılmış hasır çelik yüzeyine püskürtme beton uygulaması yapılması sonucunda sağlamlaştırılmış bir yüzey alanı elde edilmektedir.

6.12. Bulon Uygulaması

Bulonlar, tünelin tavan ve duvarlarının herhangi bir destek ile desteklenmemesi halinde, düşebilecek olan kaya bloklarının duraylılığının artırılması amacıyla kullanılmaktadır.

Bulonlar temel olarak 1,3–4,0 cm çaplı ve uzunlukları tünel açıklığına göre değişebilen çelik çubuklar olarak tanımlanmaktadır. Bulon boyları, çapları, aralıkları ve adetleri tünel kesitine, zemin cinsine, statığe bağlı olarak değişmektedir.

Tünelin kazısı sırasında, duraysız kaya kütlelerinin duraylı hale getirilebilmesi amacıyla tünel tavan ve duvarlarına delikler açılır ve bulonlar bu delikler içine yerleştirilirler ve enjeksiyon uygulanarak bulonlar gergin hale getirilmektedir.

Bulonlar tünel zayıf kaya kütlelerine gerekli duraylılığını sağlamak üzere bir modele uygun şekilde yerleştirilerek, sağlamlaştırılmış sürekli kaya kemerlerini oluşturmaktadırlar.

Kaya bulonları tek başına güçlendirici eleman olarak kullanılacağı gibi, tünellerde, iksa, hasırçelik ve shotcrete ile oluşturulan güçlendiricilere tamamlayıcı eleman olarak kullanılabilir. Taşıyıcı plakaları shotcrete kabuğunun yüzeyine basacak biçimde, kabuğun kaya kemeri ile birlikte çalışmasını sağlamaktadır (ARTSON 2016 a,b).

7. ÜÇ BOYUTLU MODELLEMEDE VE ANALİZDE KULLANILAN METOTLAR

7.1. Kullanılan Programlar

Günümüz teknolojisi sürekli ilerlemekte ve meslek grupları bu teknolojik gelişim ile birlikte zamandan, insan gücünden ve en önemlisi maliyetten kâr elde etmektedir. Jeoloji mühendisliği diğer mühendislik dalları gibi günden güne teknolojik ilerlemeleri takip etmekte gerekli donanım ve yazılımlara gelişimi yakalamayı amaçlamaktadır.

Mühendislik yapılarının üç boyutlu modellenmesi ve bu modellerin çeşitli analizler ile kontrollerinin yapılması günümüzde uygulanmaktadır. Bu analizlerden elde edilen veriler ile oluşturulan modelin eksik yönleri saptanabilmektedir. Bu çalışmalar sonucunda ise gerekli geliştirilmeler yapılarak nihai model oluşturulmakta ve projede bu modele göre geliştirilmektedir.

Çalışmaların bu denli kolaylaşması yazılımların geliştirilmesi ile mümkün bir hal almıştır. Kullanılan mühendislik yazılımlarına yakından bakıldığında ise algoritmalarının mühendislik derslerinde verilen derslerin formüllerinden oluştuğu görülmektedir. Yazılımların insan gücü ile kıyaslaması yapıldığında insan gücünün bilgisayar yazılımları karşısında yavaş kaldığı gözlenmektedir. Ayrıca insanların yazılım yardımı olmadan elde edilecekleri analiz sonuçlarında hata yapma oranı daha yüksek görülmektedir. Sonuç olarak günümüzde yazılım yardımıyla oluşturulan model analizlerinin daha kısa sürede ve daha ucuz bir şekilde elde edildiği görülmektedir.

Jeoloji alanında birimlerin konumlarının, kütle hesaplarının ve çevresel unsurlarla etkileşimlerinin üç boyutlu modellenmesi ile elde edilen veriler çok geniş bir alanda kullanılabilir. Bu veriler sayesinde yeni fikirlerin geliştirilmesi ve üç boyutlu modelde işlenmesi de mümkün bir hal almıştır. Oluşturulan jeolojik modeller, geometrik şekiller ve matematiksel denklemler yardımıyla sayısallaştırılmaktadır. Bu sayısallaştırılmış modeller çeşitli analiz yazılımlarının yardımıyla meydana gelebilecek olası sorunlara ve önceden önlem alınması gereken noktaların belirlenmesine yardım edebilmektedir. Daha geliştirme safhasında olan bir projenin bütün risk analizleri yapılabilen ve buradan elde edilen verilerle var olan problemlerin geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Bu sayede en zorlu projeler bile hayata geçirilebilmekte ve bu projelerin gerçekleştirilmesinde karşılaşılabilecek olan büyük sorunların çözümüne daha kolay ulaşılabilir.

Mühendislik yazılımlarının çalışma prensibine bakıldığında, geçmişten günümüze mühendislikte kullanılan ampirik yöntemlerin, bu yazılımların algoritmasını aktarıldığı görülmektedir. Bu yazılımlar mühendislik derslerinde verilen eğitimin temel matematik işlemlerini ve geometriyi üç boyutlu uzay ortamında milisaniyelik zaman içerisinde işleyebilmekte ve bu işlemleri görselleştirebilmektedir. Bu programlar sayesinde saatlerce sürece ve hata payı kabul etmeyecek hesaplamalar saniyeler ya da dakikalar içerisinde yapılabilir.

Bilgisayar yazılımlarının mühendislik alanında kullanımından elde edilecek modellerin doğruluğunu etkileyecek en önemli faktör, doğru veriye sahip olmak ve bu veriyi doğru modeli oluşturmak için kullanmaktır. Bu gereksinim karşılandığında sonuçlara doğru, çeşitli (farklı metotların kullanılabilirliği) ve hızlı bir şekilde ulaşılabilir.

Bu çalışmada Global Mapper, Rockworks ve SketchUp gibi üç boyutlu modelleme ve analiz yazılımlarından faydalanılmıştır. Bu çalışmanın modellenmesi üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar yüzeyin modellenmesi, jeolojik modelin oluşturulması ve bu modellerin birleştirilmesi ile sonlanmaktadır.

Rockworks programı çeşitli jeolojik, topoğrafik, hidrolojik, yapısal ve fiziksel parametreler girilerek bu girilen parametrelerin analizini ve modellenmesini sağlayan bir istatistiksel modelleme programıdır. Çalışmada bu program korelasyon modellerini oluşturmak için kullanılmıştır.

Global Mapper programı ise coğrafi bilgi sistemleri yazılımı olarak tanımlanabilmektedir. Bu yazılım ile yükseklik modelleri, bakı haritaları, yüzey yükseklik haritaları ve çeşitli analizler yapılabilmektedir. Çalışmada bu program yüzey modelinin oluşturulması için kullanılmıştır.

SketchUp programı, 3D modellerin yapılması ve geliştirebilmesi için tasarlanmış basit ve kolay öğrenime imkân sağlayan 3D modelleme programıdır. Çalışmada bu program, Rockworks programında oluşturulan korelasyon modelinin 3D modele dönüştürülmesinde ve elde edilen modellerin birleştirilmesinde kullanılmıştır.

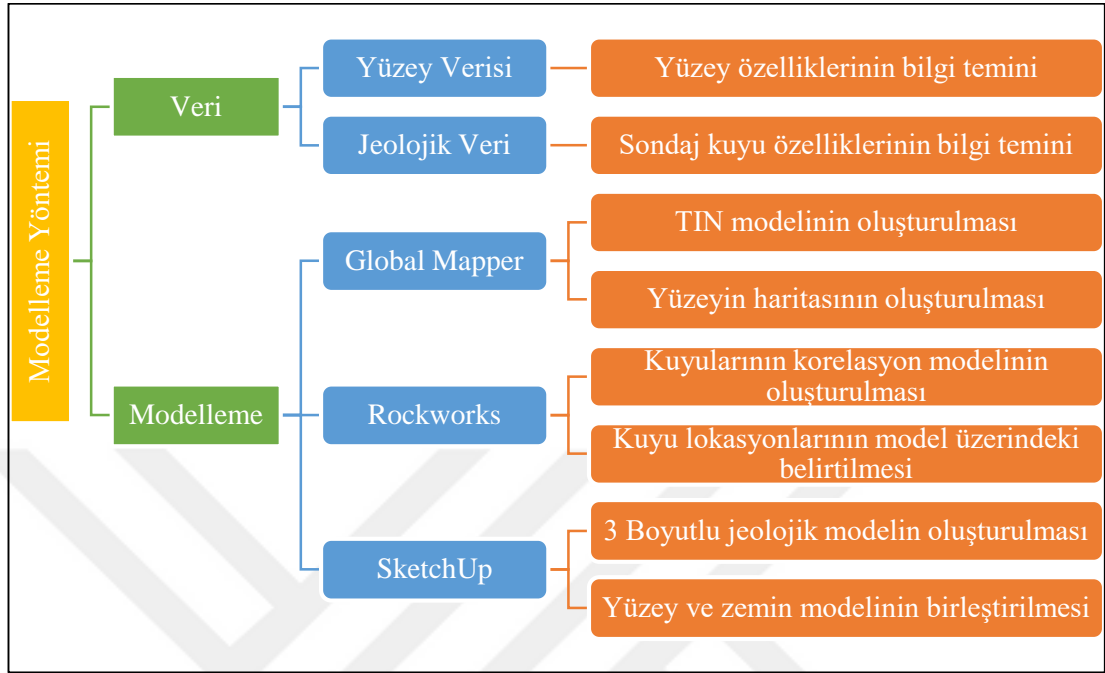
7.2. Modelin Tasarımı

Bu çalışmada modeli oluşturan bütün veriler ölçüm sonucu elde edilmiştir. Verilerin incelenmesi ve kullanılacağı alana göre ayrıştırılması gerekmektedir. Bunun için iyi tespit ve ortam hakkında bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Bu tespit sonucunda gerekli veriler derlenmiş ve işlem sırasına göre düzenlenmiştir. Kuyu verilerinden; kuyu koordinatları, kuyu yüzey yükseklikleri, kuyu derinliği, litolojik özellikler, birimlerin kuyu derinlik ölçüleri ve yeraltı süreksizliklerinden faydalanılmıştır.

Çalışma modelinin oluşturulabilmesi için öncelikle bu verilerin kullanılabilir hale getirilmesi gerekmektedir. Çünkü yüzey verileri yüzey modelinin oluşturulmasını, zemin verileri ise jeolojik modelin oluşturulmasını sağlayacaktır. Bu modellerin oluşturulması sonrasında ise bu modeller birleştirilerek ana modelin oluşturulması işlemi gerçekleştirilecektir.

Aşamalı bir şekilde oluşturulması gereken modelin detaylı ve yüksek çözünürlüklü olabilmesi için veri miktarının da bu oranda olması gerekmektedir. Ana modelin detayını onu oluşturacak olan yüzey ve jeolojik modelin detayı belirleyecektir. Oluşturulan modelin daha detaylı olması doğrultusunda, elde edilen sonuçlarda bu

oranla detaylı olacak ayrıca modelin yorumlanma evresini daha basit bir şekilde gerçekleştirecektir. Model tasarım şeması Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 7.1. Model tasarım aşamalarının şematik gösterimi

7.3. Veri

Veri, var olan bir nesnenin ölçülerek, sayılarak ya da araştırılarak fiziksel bir nesnenin sayılarla ya da yazılarla ifade edilmesine denilmektedir. Ölçülerek ya da sayılarak elde edilen ve sayısal bir değere sahip olan veriler nicel veriler, sayısal bir değer bildirmeyen veriler ise nitel veriler olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca veri, herhangi bir nesne hakkındaki tanımlayıcı özelliktir. Modellleme ve coğrafi bilgi sistemlerinde veri, yapısına göre iki gruba ayrılır.

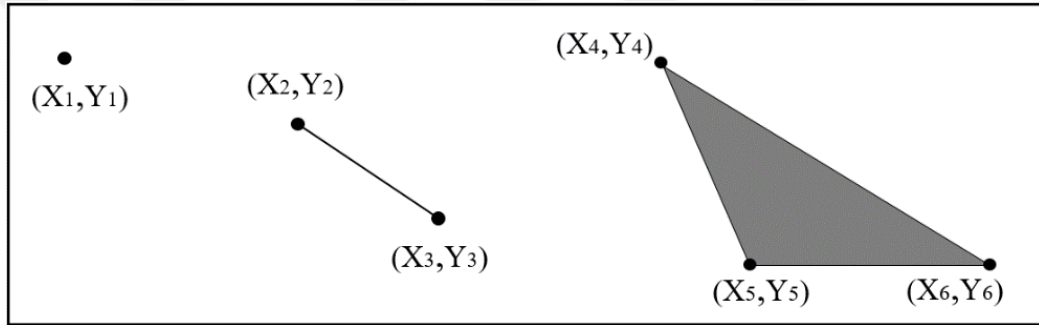
- Mekânsal veri; Coğrafi koordinat bilgisine sahip olan veri türüdür. Örneğin; yerleşim yeri, bina, sondaj kuyusu vb.
- Mekânsal olmayan veri; Coğrafi koordinat bilgisine sahip olmayan veri türüdür. Örneğin; tünel uzunluğu, sondaj kuyu sayısı vb.

Veri, modelin oluşturulabilmesi için gereken en önemli bileşen olarak görülmektedir. Model için gerekli olan verinin temini çeşitli ölçümler sonucu elde edilebilmektedir.

Verinin elde edilmesi için kullanılan ölçüm cihazlarının kalibre edilmiş olması, verinin ölçümünün doğru olarak elde edilmesini sağlamaktadır.

Ölçüm doğruluğu modelin doğruluğu ile doğru orantılı olarak görülmektedir. Bu sebeple elde edilecek verilerin doğru olması modelin fiziksel özelliklerinin doğru olmasını sağlayacaktır. Buda modelin yüksek doğruluk oranına ve istenilen analizlerin gerçeğe yakın sonuçlar verebilmesine olanak sağlamaktadır.

Vektör veri, dünya üzerindeki konumu bilinen, koordinat bilgisine sahip verilerdir. Noktaların birleştirilmesi sonucu oluşan, üç farklı geometriye sahip (nokta, çizgi, alan) verilere denilmektedir (Şekil 7.2).



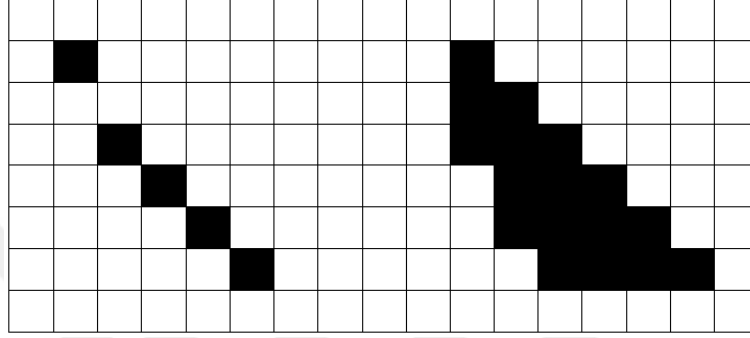
Şekil 7.2. Vektör verinin geometrisinin gösterimi

Nokta, X ve Y koordinatlarına sahip bir nesnenin konumunu belirten veri olarak tanımlanmaktadır.

Çizgi, X_1 ve Y_1 koordinatları ile başlayan bir noktanın X_2 ve Y_2 noktalarıyla sonlandırılması sonucu oluşan geometrik şekil olarak tanımlanmaktadır. Genel tanım itibari ile konumu olan iki noktanın arasındaki doğru parçasına verilen isim olarak adlandırılmaktadır.

Alan, Koordinatları farklı başlangıç ve bitiş koordinatları aynı olan üç ya da üçten fazla noktanın, doğrular ile birleştirilmesi sonucu meydana gelen geometrik şeklin uzayda kapladığı yere alan adı verilmektedir.

Raster veri, hücrelerden (piksellerden) oluşan mekânsal verilere denir. Hücrelerin üzerinde bulunan renkler hücrelere ait bilgileri kapsamaktadır. Kamera ve görsel algılayıcıların kullanılmasıyla oluşturulan her veri raster veri olarak adlandırılır. Elde edilen raster verinin çözünürlüğü verinin ayrıntısını arttırmaktadır. Yani verinin yüksek çözünürlükte olması verinin çok daha detaylı bilgi barındırdığı anlamına gelmektedir (Şekil 7.3).



Şekil 7.3. Vektör veri elemanlarının raster veride görünümü

7.3.1. Yüzey verisi

Yüzey verisi, yüzeyi oluşturan üç eksendeki konumsal noktaların, fiziksel özelliklerinin ve birbirlerine olan uzaklıklarının ölçümü ile ortaya çıkarılan veri türü olarak adlandırılmaktadır. Yüzey verisi çeşitli kaynak ve ölçüm yöntemleri (Lidar, fotogrametri, yersel vb.) sonucunda elde edilebilmektedir. Ayrıca var olan haritaların sayısallaştırılması ve geliştirilmesi sonucunda da bu verilere sahip olunabilmektedir.

Sayısallaştırma, kâğıt üzerinde ya da dijital ortamda var olan fakat koordinatlandırılmamış olan bir haritanın koordinatlarının bilgisayar ortamında haritaya referanslanması işlemine denilmektedir. Bu konumlandırma işlemi haritanın var olduğu konumda gösterimini sağlamaktadır. Bu sayede harita üzerinde herhangi bir noktanın konumu anlık öğrenilebilmektedir. Buna ek olarak konumlandırma işlemi yapılırken, harita üzerinde ne kadar çok referans noktası belirtilirse harita daha hassas konum doğruluğuna sahip olmaktadır. Bu haritalara sayısal ya da dijital haritalar da denilebilmektedir. Sayısal haritalar, ölçüm (alan, uzunluk vb.) işlemlerinin hızlı bir şekilde yapılmasına imkân sağlamaktadır. Sayısal haritaların analog haritalara göre

saklanması ve kullanımı çok daha kolaylaştırmıştır. Bu sayede günler sürecektir işlemler ve hesaplama çalışmaları dakikalar içinde tamamlanabilmektedir.

Yüzey üzerindeki çeşitli koordinat noktalarından alınan yükseklik değerlerinin kullanılması ile geri kalan yüzeyin bu değerlerle enterpole edilmesi sonucunda yüzey topoğrafyasının oluşturulduğu dijital haritalara dijital yükseklik haritası denilmektedir. Günümüzde dijital yükseklik haritaları yüzey verisinin en kolay elde edildiği kaynak olarak görülmektedir. Dijital yükseklik haritasından (dem) eğim/bakı haritaları, sayısal yüzey modelleri, yüzey analizleri, görünürlük haritaları, sel/taşkın analizleri, hacim hesaplamaları, belirlenen iki nokta arasındaki yükseklik profilinin oluşturulmasına imkân sağlamaktadır.

Düzensiz üçgen yüzey modeli üç ve üçten fazla koordinatı ve yükseklik verisi bulunan noktanın bulanık mantık metodu ile birleştirilme işlemi sonrası elde edilen alanların birleştirilmesiyle oluşan geometrik yüzeye verilen addır. Bu yüzeyler üzerine modelleme işlemi yapılabilir ya da var olan modelin değişimi gerçekleştirilebilmektedir.

Yüzey verilerinin detayı, yüzey ile yüzeyin verisini oluşturacak olan cihaz (lazer tarayıcı, kamera, lidar vb.) arasındaki mesafeye göre değişim göstermektedir. Mesafe ne kadar az olursa alan için alınacak veri detayı o kadar fazla olmaktadır. Mesafe arttığında ise veri detayı azalacak ve oluşturulacak model için de ayrıntı azalacaktır.

7.3.2. Jeolojik Veri

Jeolojik veri, herhangi bir amaçla açılmış olan sondaj kuyulardan elde edilen bilgiye denilmektedir. Jeolojik veri litoloji, stratigrafi, yeraltısuyu kimyası, yeraltısuyu seviyesi, yapısal unsurlar, jeoteknik özellikler, sondaj kuyusundan elde edilen ve daha sonra bu verilerin işlenmesi ile elde edilebilecek olan verileri içermektedir. Bu verilerin verimli şekilde modele aktarılabilmesi için çalışma alanı içerisinde açılmış olan sondaj kuyularının, kuyu bilgilerinin kontrollü ve detaylı şekilde hazırlanmış olması gerekmektedir.

Ortam özelliklerini yansıtan bir modelin oluşturulabilmesi için elde edilen verilerin doğruluğunun incelenmesi gerekmektedir. Modellenecek olan ortam verilerinde anomaliler mevcut ise bu değerlerin kanıtlanabilir olması gerekmektedir. Eğer bu anomali değerleri kanıtlanamaz ise oluşturulacak jeolojik model için kiritetici bir unsur olacaktır. Bu sebeple oluşturulacak modelde olmaması gereken fakat olduğu iddia edilen veriler eğer deneyler sonucunda kanıtlanamaz nitelikte ise bu verilerin girişi yapılmamalıdır ve bu verilerin kullanılmama sebeplerinin de belirtilmesi gerekmektedir.

Kuyu verilerinin içerdiği bilgiler ile çok çeşitli amaca uygun jeolojik model elde edilebilmektedir. Eğer oluşturulması planlanan model, ortamın jeolojik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılıyorsa başlıca kullanılacak veri bilgileri; kuyu litolojisi, konum bilgisi, birim kalınlığı ve zemin özelliklerini içermektedir. Jeolojik modelin oluşturulabilmesi için bu birimlerin model alanında yeterli şekilde araştırması yapılmalıdır. Jeolojik birimlerin birbirleriyle olan ilişkisinin tam anlamıyla yapılabilmesi için yani korelasyon yöntemi ile kesitlerinin oluşturulması için sondaj sayısının ve konumlarının doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Model detayının yüksek olması istenildiğinde, sondaj kuyularının birbirine yakın ve çok miktarda olması gerekmektedir. Çok sayıda ve yakın mesafede yapılmış olan sondajlar sonucunda elde edilecek çok sayıda veri, ortamı tam anlamıyla tanımlanabilmesine imkân sağlayabilmektedir.

Jeolojik veri, jeolojik modelin oluşturulması için gereken başlıca veri türüdür. Bu veriler ile çeşitli jeolojik model türü oluşturulabilmektedir. Bunlara litolojik model, hidrolojik model, kütle modeli, fay ve süreksizliklerin modeli ve jeoteknik modeller örnek olarak gösterilebilmektedir. Veri içeriğinin önemi bu modellerin oluşturulabileceği verilere sahip olması ile mümkün olacaktır. Çünkü jeolojik verinin niteliği, jeoloji ile alakalı olan modellerin çeşitliliğini sağlamaktadır. Veri detayı ve veri sayısı modelin gerçeği yansıtması açısından önem teşkil etmektedir.

Sonuç olarak jeolojik modelin oluşturulmasında kullanılan; kuyu konumu, kuyuların sayısı, kuyudan elde edilen verilerin detayı ve verinin doğruluğu modelin oluşturulmasında önemli etken olarak görülmektedir.

8. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

8.1. Model Ve Modelleme

Uzayda mikro boyutlardan makro boyutlara kadar var olan tüm nesnelerin, çeşitli cihazlarla ölçülmesi sonucunda elde edilen verilerinin kullanılmasıyla, basit ve anlaşılabilir bir hale getirilebilmesi için yapılan nesneye model denilmektedir.

Var olan ya da var olmayan bir nesnenin, çeşitli ölçüm metotlarına uyularak uzayda oluşturulmasına modelleme denilmektedir. Bu işlemler bütünü sayesinde oluşturulan nesnenin deneylere maruz bırakılarak farklı ihtiyaçlara cevaplar bulunabilmektedir. Modelleme bizlere modellenecek nesnelere daha iyi analiz edebilmemizi ve gelecekte ortaya çıkabilecek sorunları daha önceden gözlemleyebilmemizi sağlamaktadır. Örneğin yapılması planlanan bir projenin oluşturulmadan önce modellenmesi sayesinde elde edilecek proje yapısının kullanımda ortaya çıkabilecek negatif ve pozitif yönleri görselleştirilebilmektedir. Bu sayede oluşturulacak projenin hatalarının önceden keşfedilebilmesi ve bu hataların nasıl giderilebileceği hakkında fikir yürütmeye imkân sağlamaktadır.

Modelleme işlemi tek bir programla yapılabileceği gibi ayrıca birden fazla program kullanılarak da yapılabilmektedir. Tek bir programdan elde edilen modeller daha basit ve tek amaca hizmet edebilecekken, birbiriyle uyumlu programların yardımıyla daha detaylı ve daha çok amaca uygun modeller geliştirilebilmektedir.

Çalışmamızın modelleme aşaması maddeler eşliğinde şu şekilde anlatılabilmektedir;

- Modellenecek alanın belirlenmesi
- Modellemede kullanılacak programların tespit edilmesi
- Modellenecek alanın veri ihtiyacının karşılanması
- Model için verilerin yalın bir hale getirilmesi
- Global Mapper programında;
 - Çalışma alanının görsellerinin elde edilmesi
 - Çalışma alanının yüzey geometrisinin (dem haritasının) oluşturulması
 - Elde edilen verilerin dışa aktarımı

- Yüzey görselinin dışa aktarılması
- Rockworks programında;
 - Sondaj kuyularının koordinatlarının girilmesi
 - Sondaj kuyularının litolojik bilgilerinin girilmesi
 - Kuyuların lokasyon haritasının oluşturulması
 - Kuyuların litolojik korelasyon haritasının oluşturulması
 - 3D model için kullanılacak litolojik kuyu modelinin hazırlanması
 - Oluşturulan modellerin ve görsellerin dışa aktarımının yapılması
- SketchUp Programında;
 - Dışa aktarılmış olan verilerin birleştirilmesi
 - Elde edilen görsellerin dışa aktarılması

Yukarıdaki maddelerde model yapısının nasıl oluşturulacağı anlatılmaktadır.

8.1.1. Global Mapper

Genel olarak Global Mapper, harita sayısallaştırma, analiz, ölçüm gibi işlemlerin yapılabileceği bir coğrafi bilgi sistemi yazılımı olarak tanımlanabilmektedir. Global Mapper coğrafi verilerin işlenmesiyle elde edilecek sonuçlara ihtiyaç duyan tüm bilim dallarında kullanılmaktadır. Bu program sayesinde ihtiyaç duyulan coğrafi bilgilerin elde edilmesi ve bu verilerin sayısallaştırılması işlemini (boyutlandırma, kodlama, konumlandırma, bölme, birleştirme, analiz yapma, verileri işleme, haritalara yeni bilgiler ekleme ve detaylandırma, raster ve vektör analizleri yapma bunları dışa aktarma) çok kolayla indirmektedir. Ayrıca elde edilen verinin Global Mapper programı dışına başka programlarda kullanılabilmesi için veriler dışa aktarılabilir.

Global Mapper programı coğrafi bilgi sistemleri analizlerinin basit bir şekilde uygulanmasına ve verilerin sayısallaştırılmasına yarayan bir programdır. Bu program analiz algoritmaları, arazi modelleri, havza modeli, saha modeli, elde edilen ortamın kısmi ya da tüm hacim ölçüm işlemleri, çalışma alanı içerisinde kesitlerin alınması, kontur üretimi ve istenilen ölçülere uygun gridleme çalışmaları için kullanılmaktadır.

Ayrıca bu elde edilen veriler yardımıyla çeşitli analiz uygulamaları ve modellemeleri oluşturulabilmektedir.

Global Mapper yazılımı yaklaşık 250'den fazla dosya uzantısını açabilen ve bu açılan verileri işleyerek dışa aktarabilen bir yazılımdır. Yani ihtiyaç duyulan ve diğer programlar ile oluşturulmuş çok sayıda dosya uzantısını kendi içeriğinde çalıştırabilmekte ve bu dosyaların işleme süreçlerini kendi bünyesinde yaptıktan sonra dışa istenilen formatta aktarabilmektedir. Çoğu mühendislik yazılımı ile uyumluluğu da bu programı kullanımda öne çıkarmaktadır (Global Mapper, 2018).

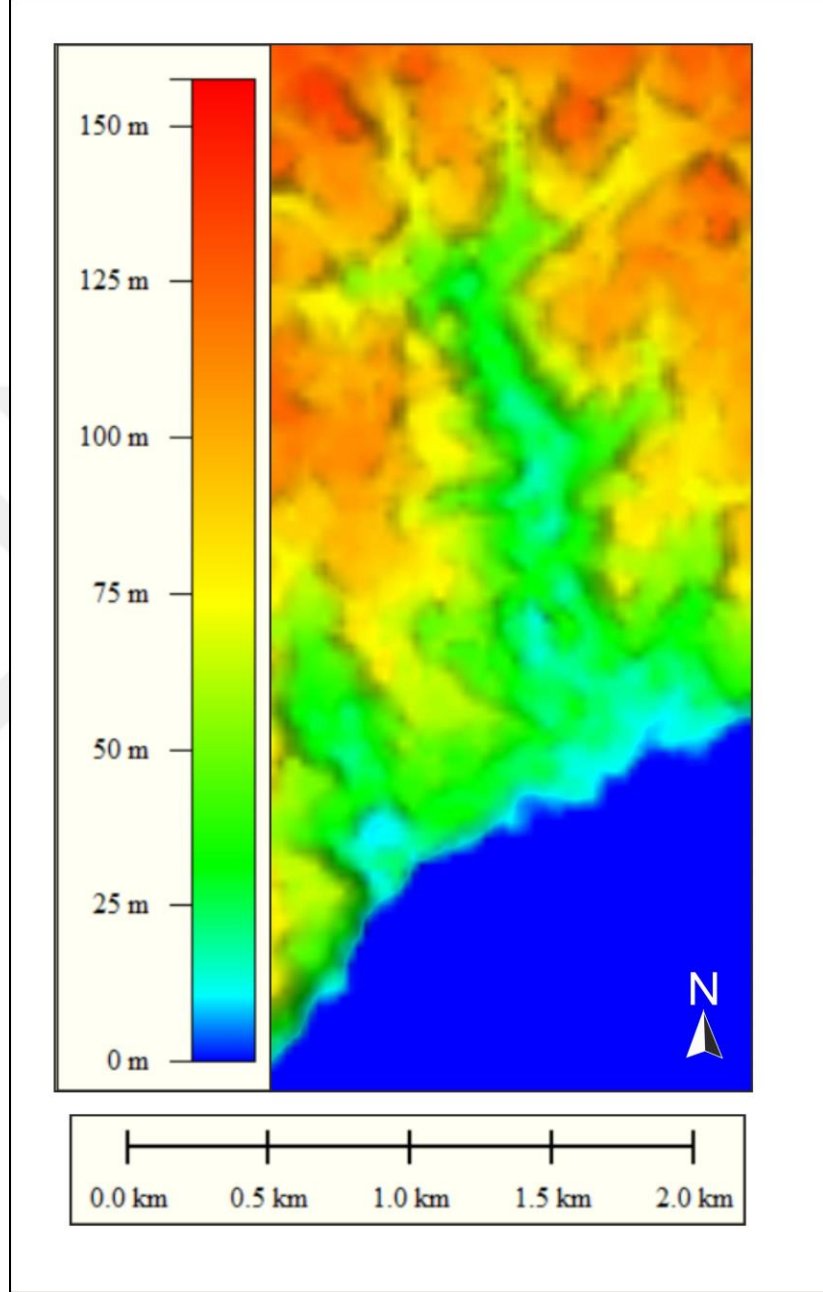
Global Mapper çevrimiçi harita modülü yardımıyla, genellikle mühendislik ve ölçüm için kullanıma uygun yüksek çözünürlüklü raster ve vektör haritalara çevrimiçi erişim ve indirme imkânı sağlamaktadır. Bu çevrimiçi haritaların yardımı ile belirlenen alanlar için harita indirmeleri gerçekleştirilebilmektedir. İhtiyaca göre değişken olan haritalardan dijital derinlik haritaları, topoğrafya haritaları ve fiziki haritalar istenilen projeksiyona uygun şekilde programa aktarılabilir. Ayrıca bu program ile nokta bulutları olarak adlandırılan dijital ortamda fotogrametrinin temellerini oluşturan yapılandırmalara da imkân sağlamaktadır.

Global Mapper, oluşturulan model veya konumlandırılmış olan iki boyutlu vektör verileri Google Earth haritası üzerinde konumlandırılabilir. Bu özellik daha çok noktasal verilerin elde edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Google Earth amaç olarak yüzey verilerinin gösterimi için uygun olduğundan üç boyutlu zemin modelleri Google Earth haritalarında görüntülenemeyecektir. Bu doğrultuda bu özellik, çalışmada kuyu konum noktalarının görselleştirilmesi için uygun nitelikte olduğu gözlenmiştir. Fakat kuyu konum verileri Rockworks programında girilmiş olduğu için bu kuyu verileri Rockworks programı ile harita üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 8.1. Yüzey modelinin nokta sınır koordinatları

Nokta No	Enlem	Boylam
1	41° 03' 55.3310" K	28° 59' 22.8323" D
2	41° 03' 53.6141" K	29° 00' 57.8509" D
3	41° 01' 48.9585" K	28° 59' 19.4105" D
4	41° 01' 48.3838" K	29° 00' 54.0709" D

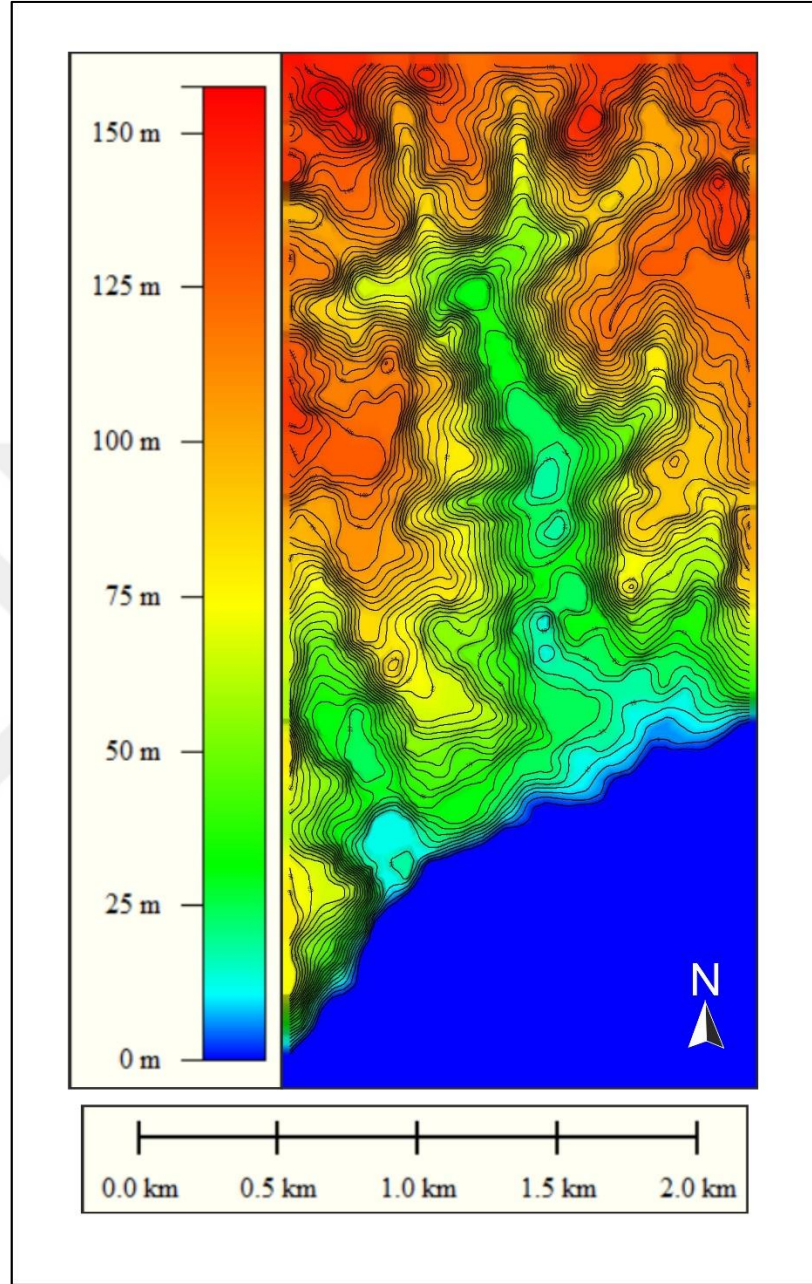
Bu çalışmada Marmara bölgesinde yukarıda Çizelge 8.1 de verilen koordinatların içindeki alanda yer alan, yükseklik haritası (ASTER-GDEM) ve uydu görseli verileri Global Mapper programından elde edilmiştir (Şekil 8.1).



Şekil 8.1. İşlenmemiş yükseklik haritası (ASTER-GDEM)

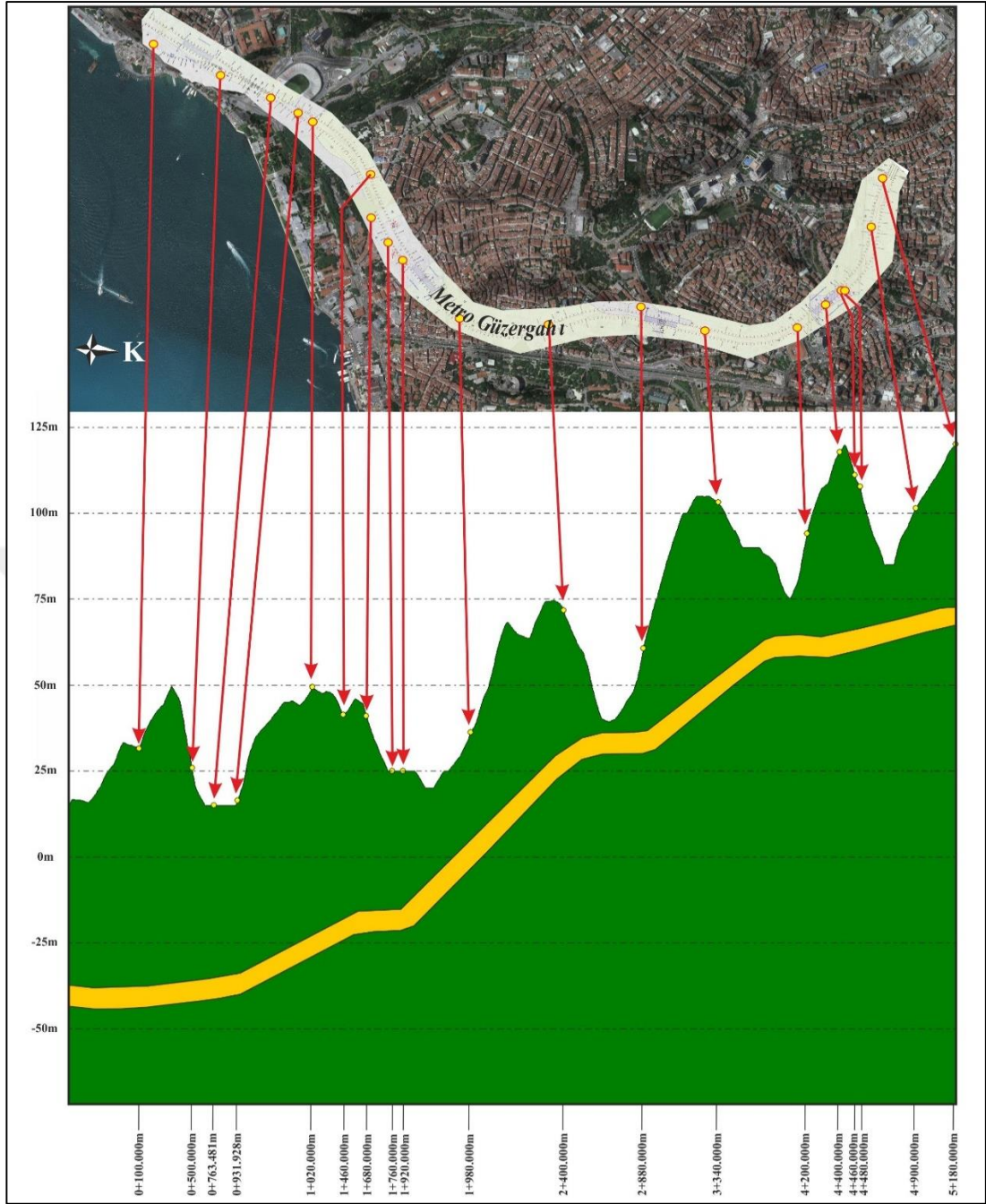
Dijital yükseklik haritası içerdiği yükseklik ve koordinat bilgileri sayesinde haritanın çözünürlüğüne bağlı olarak her noktasının koordinatlandırılmasına ve bunun sonucunda da eş yükselti haritası ve yüzey modeli için öneme sahip olan, düzensiz

üçgen yüzeylerini oluşturmak için kullanılmıştır. Bu verilerin işlenmesi ile topoğrafya haritası ve düzensiz üçgen yüzeyleri oluşturulmuştur (Şekil 8.2).



Şekil 8.2. Eş yükselti haritası modeli görseli

Topoğrafya haritasından ayrıca tünel güzergahının yükseklik profil kesiti de elde edilmiştir. Bu kesit üzerine tünel kesiti de yerleştirilmiş ve kuyuların noktaları ilişkilendirilmiştir (Şekil 8.3) .

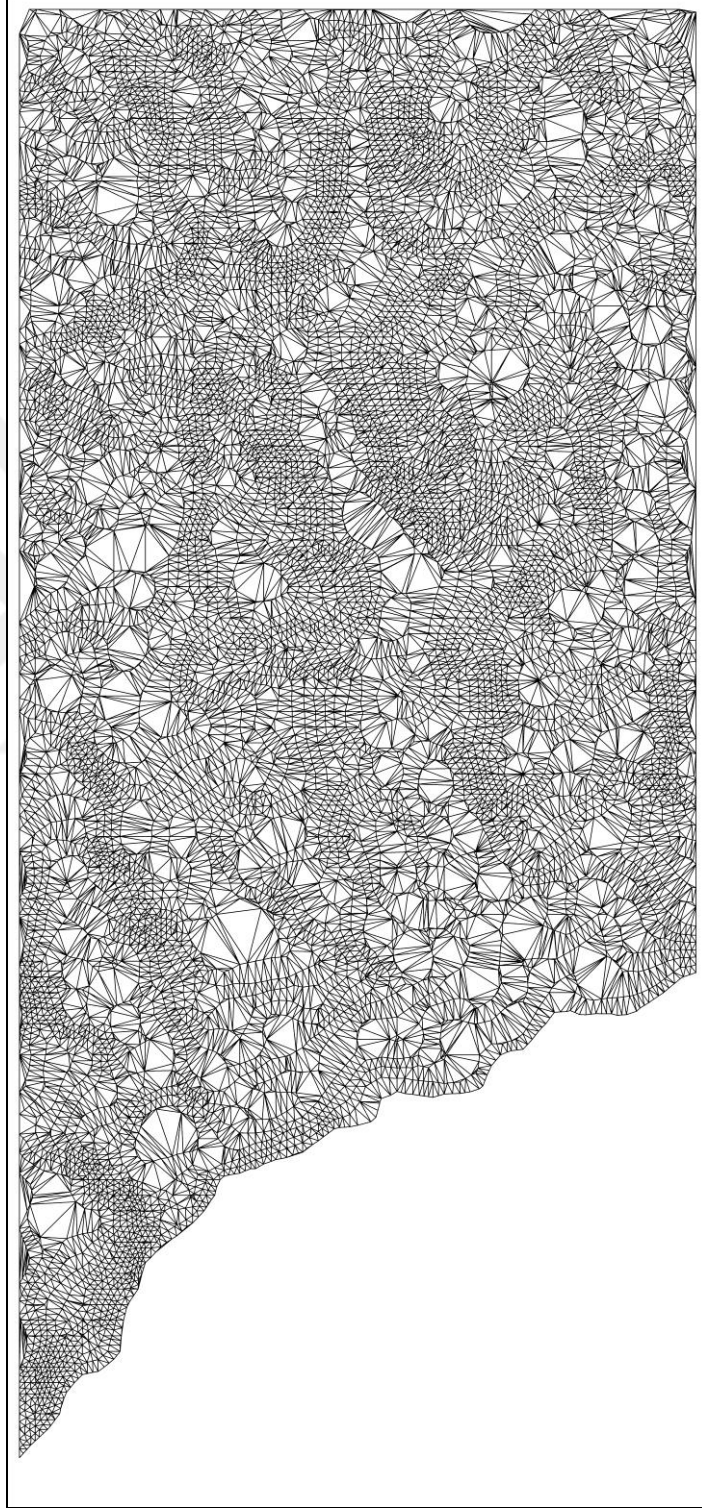


Şekil 8.3. Yükseklik profili kesiti ve kuyuların gösterimi

Yüzey modelini oluşturabilmek için ihtiyaç duyulan düzensiz üçgen yüzey modeli de global mapper programında oluşturulmuştur. Bu modelin jeolojik birim ile birleştirilebilmesi için dxf formatında dışa aktarılmış ve tümleşik modelin oluşturulması için gerekli kontroller yapılmıştır.

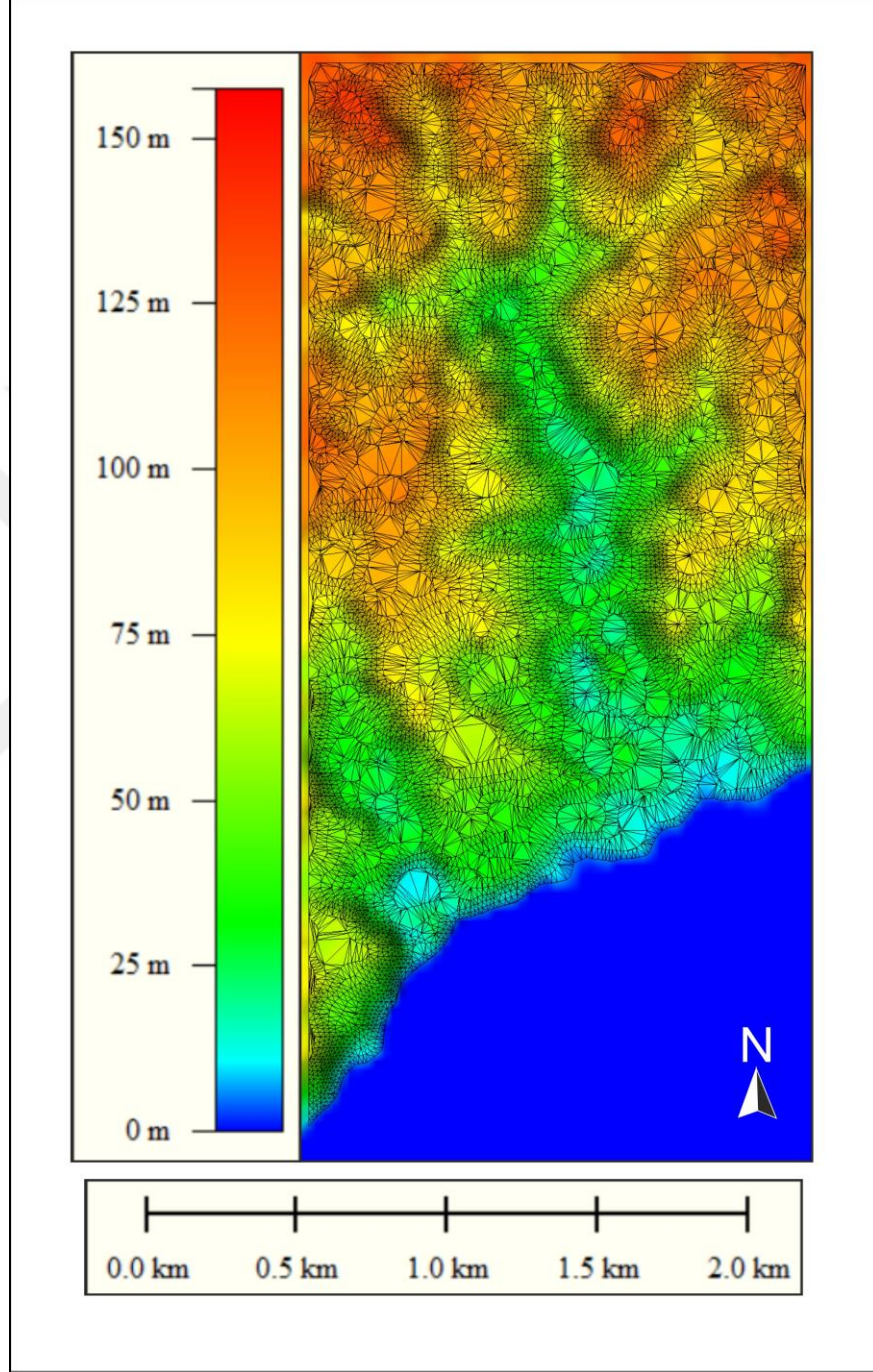
Bu aşamada en önemli parametre ise model ile yüzey modelinin aynı sınır nokta koordinatlarına sahip olmasını sağlamaktır. Dışa aktarılmış olan model

koordinatlarının birbirleri ile uyumsuz olması durumunda modeller birbirleriyle örtüşmeyecek ve model gerçeği yansıtmayacaktır. Düzensiz üçgen modelinin aktarımı bitirildikten sonra diğer geliştirme aşamaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 8.4).



Şekil 8.4. Düzensiz üçgen yüzeyleri modelinin 2 boyutlu görseli

Ayrıca düzensiz üçgen yüzey modeli ile işlenmemiş yükseklik haritasının üst üste bindirilmesiyle modelin geometrik yüzey birleştirme işlemi tamamlanmıştır (Şekil 8.5).



Şekil 8.5. Yükseklik modeli ile düzensiz üçgen yüzey modelinin birleştirilmiş hali

Düzensiz üçgen yüzeylerinin birbirleriyle birleşmesi sonucu model üzerinde derinlik algısı oluşmaktadır. Bu algı, iki boyutlu ortamda tam anlamıyla anlaşılmasına

rağmen, üç boyutlu modelleme programları için dışa aktarımı gerçekleştirildiğinde modelin üç boyutlu şekilde görselleştirilebilmesine imkan sağlamaktadır.

Yüzey modelinin detaylı olması için dijital yükseklik haritasının çözünürlüğünün yüksek olması gerekmektedir. Dijital yükseklik haritası bir raster veridir. Yüksek çözünürlüğe sahip raster veri detayı arttırmaktadır. Yani detaylılık ve raster verinin çözünürlüğü birbiriyle doğru orantı göstermektedir. Aynı şekilde modelin detayının artması için, düzensiz üçgen yüzeylerinin daha fazla noktasal konum ile oluşturulması gerekmektedir. Bu da modelin çözünürlüğünün yüksek olmasına ve modelin yüzey alanlarını daha hassas gerçeklik oranında yansıtmasına imkan sağlamaktadır.

8.1.2. Rockworks

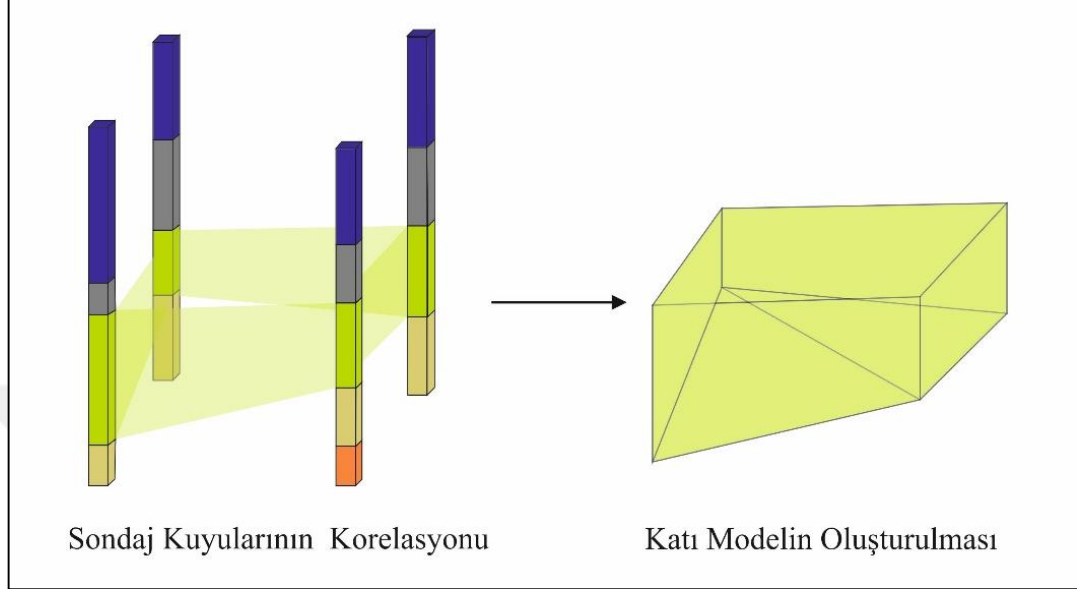
Rockworks çeşitli jeolojik ve topoğrafik parametreler girilerek bu verilerin birbiriyle ilişkilendirilmesi (korelasyon), girilen parametrelerin analizi ve modellenmesini sağlayan jeolojik istatistiksel modelleme programıdır.

Rockworks programı kullanılarak hidrojeoloji, jeoteknik, genel jeoloji, maden yatakları ve mineroloji-petrografi alanlarında gerekli verilerin var olmasına bağlı olarak çeşitli çalışmalar yapılabilmektedir. Örneğin bir havzanın su kimyasının incelenmesini, yeraltısuyunun dağılımını ve dinamik statik seviyelerinin yıllara göre değişiminin modellenmesi sonucunda kirletici ve problem çıkaran unsurların belirlenmesine yardımcı olabilmektedir. Maden yataklarında tenör oranlarının yüksek olduğu derinliklerin belirlenmesi bunların dağılımları ve yatak tipleri bu program yardımıyla modellenmektedir.

Bu program maden rezervlerinin kütle hesaplarının yapımında, yıllara göre yeraltısuyu modellerinin değişiminin gösterilmesinde, madenin işletilmesi sırasında karşılaşılabilecek sorunların tahmin edilmesinde ve çeşitli stratigrafik litolojik modellerin yapılmasında kullanılmaktadır.

Programın modelleme mantığına bakıldığında, jeoloji mühendisliği disiplinlerinin kullandığı görülmektedir. Program konumları belli olan kuyuların arasındaki boşlukta var olan kesitleri korelasyon yöntemi kullanarak tanımlamaktadır. Elde edilen

kesitlerin birim sınırları birbirleriyle korele edilerek, 2 boyutlu modelden 3 boyutlu derinliği bulunan modellerin oluşturulmasını da mümkün hale getirmektedir. Aslında programın iki aşamada, 3 boyutlu korelasyon yaptığı anlaşılmaktadır (Şekil 8.6).



Şekil 8.6. Üç boyutlu korelasyon mantık modeli

Programın modeli oluşturabilmesi için gereken parametrelerin girilmesi gerekmektedir. Programın içeriğindeki 3 boyutlu ve anlamlı birleştirme korelasyon algoritması yardımıyla girilen verilerin birbiriyle anlamlı bütünü oluşturulması sağlanmaktadır.

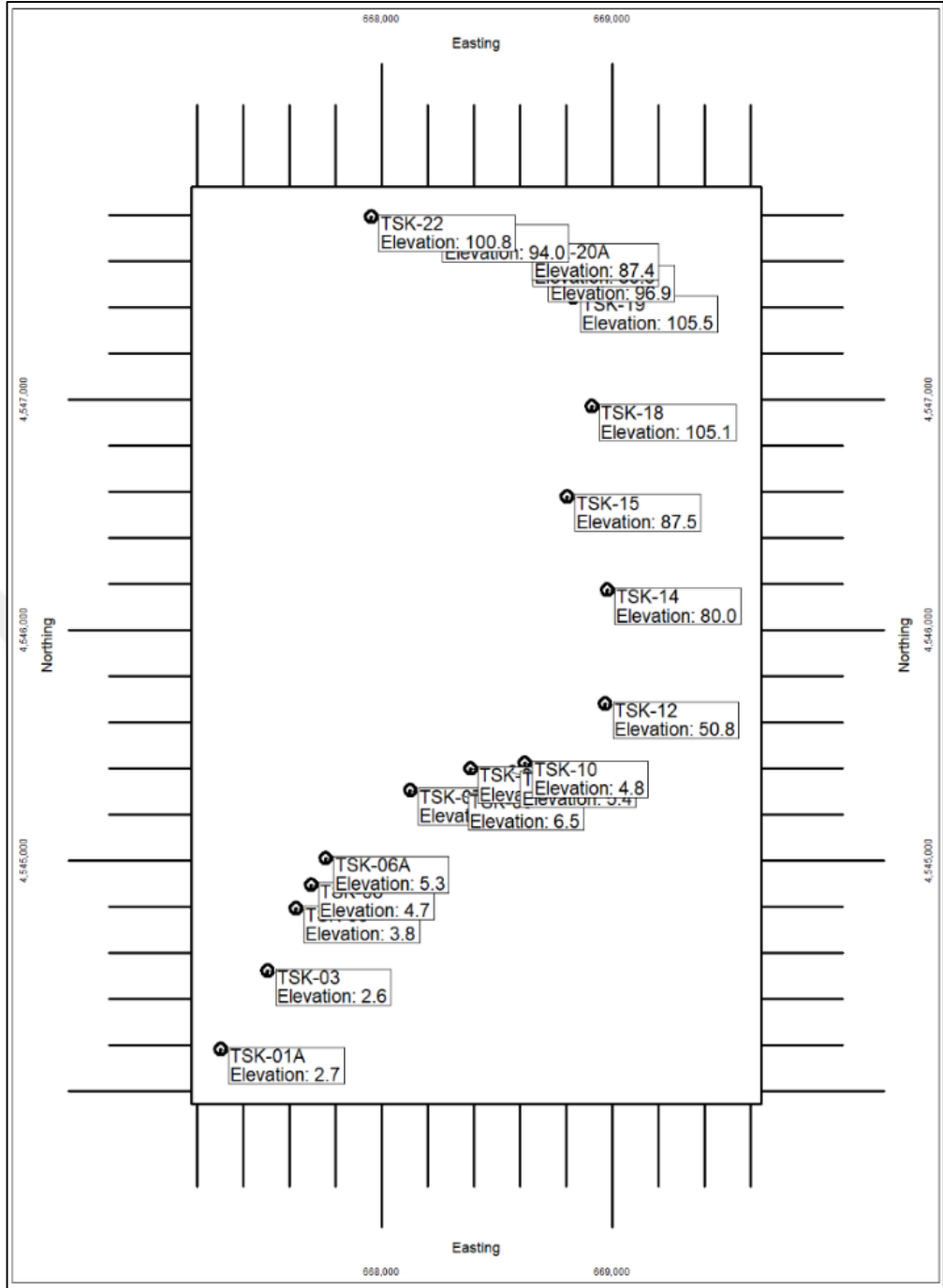
Girilen verilerin adedi ve birbirine olan konumsal yakınlığı da modelin doğruluğunu ve detayını önemli ölçüde etkilemektedir. Eğer girilen kuyu konumları birbirinden uzakta ise aralarında oluşturulacak olan her hücre çevresindeki en yakın litolojik özelliği temel alacağından dolayı daha detaysız bir model oluşacaktır. Örneğin bir fay hattının birimi keskin şekilde düşürdüğünü anlayabilmek için kuyuların konumsal mesafesinin kısa olması gerekmektedir. Aksi takdirde model gerçek ortamı yansıtmayacaktır. Buda model için açılacak kuyularda dikkatli ve titiz çalışılması gerektiğini kanıtlamaktadır. Model için gereken sondaj noktalarının sık ve birbirine yakın konumda bulunması gerekmektedir. Ayrıca modelde anlamlandırılmayacak alanların belirlenmesi ve bu alanlarda sondaj kuyularının açılması gerekmektedir. Bu verinin elde edilmesinden, yani kuyunun açılmasından önce kuyu noktalarının nerelere açılacağı kontrol edilmelidir. Bu sayede elde edilecek model daha kapsamlı bir sonucu

yardımcı olacaktır ve birimlerin ilişkilerinin daha kolay yorumlanmasına yardımcı olacaktır. Bu kontrollerin gerçekleşmesi durumunda, oluşturulacak olan modelden elde edilecek veriler en hassas doğruluğa sahip olacaktır.

Rockworks programında verilerin bilgisayar ortamına girişi yapılmadan önce koordinatlarının da kontrol edilmesi gerekmektedir. Konumsal anomali oluşturabilecek bir veri var ise, düzenlenme ihtimali göz önünde bulundurularak düzenlenmesi, eğer düzenlenemeyecek veri ise tekrar ölçüm yapılması gerekmektedir. Konumsal anomali değerleri eğer kuyu koordinatlarının hatalı şekilde alınması sebebiyle oluşuyorsa bu anomali koordinatlarının kontrol edilmesi ve kuyu bilgilerinin güncellenmesi gerekmektedir. Doğru ve gerçeğe yakın modeli elde edebilmek için kuyular arası mesafenin az, verilerin ise bol olması gerekmektedir. Bu da verilerin verimli kullanımı ve kontrolü ile mümkün kılınabilmektedir. Elde edilen verilerin hatalı girişleri, oluşturulacak modelin ortamı yansıtmamasına sebep olacağından modellemede veri kontrolü en önemli parametre olarak düşünülmektedir.

Model tasarımının projelendirilmesi bu gibi sorun teşkil edecek parametrelerin engellenmesini ve gerçekçi modellerin oluşturulabilmesine olanak sağlamaktadır. Modelin proje aşamalarının belirlenmesi ve bunun için yapılacak bir plan çizelgesi bu gibi titizlik gerektirecek parametrelerin kontrolü için gerekmektedir. Yapılan her aşamanın kontrollü yapılması oluşturulacak olan model çalışmasının daha kapsamlı ve daha düzenli şekilde oluşturulmasını sağlamaktadır. Elde edilen verilerin doğruluğunun sorgulanması ve veri kontrolü, modelin oluşturulması için harcanacak zamanda herhangi bir kaybın önüne geçmeyi amaçlamaktadır.

Rockworks programı sondaj kuyularını konumları nokta şeklinde algılamaktadır. Yani uzay ortamında bulunan, koordinatlara sahip noktalarının birbirleri arasındaki mesafeye göre kuyu lokasyon haritalarını oluşturmaktadır. Bu kuyuların arasındaki mesafelerin bu harita üzerinden belirlenmesine de imkân sağlamaktadır. Kuyu lokasyon haritası içerisinde kuyuların isimlerini, kuyuların konumsal noktalarını, kuyunun yüzey yüksekliklerini ve kuyuların derinliklerini göstermektedir. Bu gösterilen özellikler istenildiği durumda kapatılabilmektedir. Haritanın yön tanımlarını da yine program tanımlamaktadır. Yani program kuyuların bulunduğu konuma göre otomatik haritalama işlemi yapmaktadır (Şekil 8.7).



Şekil 8.7. Kuyu lokasyon haritası

Verilerin koordinat kontrol aşaması sonrası her kuyu numaralandırılmakta ve modeli oluşturacak olan verilerin girişleri yapılmaktadır. Her kuyu, kendi sekmesinin altında farklı veri türü (kuyu lokasyon bilgileri, litoloji, stratigrafi, su seviyesi vb.) giriş sekmeleri bulunmaktadır. Bu sayede tek kuyu adı altında çok fazla jeolojik, hidrolojik ve sismik veri girişi yapılabilmektedir. Her kuyuya farklı başlangıç ve bitiş noktasında litolojik veri girişi yapılabilmektedir.

Litoloji verileri birimlerin ilk kesildiği ve son kesildiği metrelerde birimin isimlerini girilerek yapılmaktadır. Bu işlemler eldeki verilerle oluşturulan her kuyunun litolojik birimleri arasındaki anlamlı bütünü, programın algılaması için gereklidir (Şekil 8.8).

The screenshot displays the Borehole Manager software interface. The main window is titled 'Borehole Manager' and features a menu bar with 'File', 'Edit', and 'View'. Below the menu bar is a toolbar with various icons for different data types: Intro, Map, StripLogs, Lithology, Stratigraphy, I-Data, T-Data, P-Data, Fractures, Aquifers, Colors, and Vectors. On the left side, there is a tree view showing a list of boreholes from TSK-01A to TSK-22, with checkboxes next to each. The main area is divided into two panes. The left pane is titled 'Location' and contains a list of categories: Orientation, Lithology, Stratigraphy, I-Data (Intervals), I-Text (Interval Te...), T-Data (Time Int...), P-Data (Points), P-Text (Point Text), Colors, Fractures, Water Levels, Symbols, Patterns, Bitmaps, Vectors, and Well Construction. The right pane is titled 'Borehole Location Information' and contains several input fields and buttons. The 'Borehole Name' field is set to 'TSK-01A'. Below this, there are buttons for 'Symbol', 'Raster Symbol', and 'Other Coords'. The 'Collar Coordinates' section shows 'Horizontal: UTM Meters, Datum: WGS-84 1984 (NAD-83), Zone: 35'. The 'Easting' field is set to '667,303.0 Meters' and the 'Northing' field is set to '4,544,182.0 Meters'. The 'Vertical: Meters' section shows 'Z (Elevation)*' set to '2.74 Meters', 'Collar Elevation*' set to '2.74 Meters', and 'Total Depth*' set to '47.0 Meters'. At the bottom of the interface, there are two tables. The first table is 'Project Coordinates' and the second is 'Output (Model) Dimensions'. The 'Project Coordinates' table has columns for 'Minimum', 'Maximum', 'Spacing', 'Nodes', and 'Range'. The 'Output (Model) Dimensions' table has columns for 'Minimum', 'Maximum', 'Spacing', 'Nodes', and 'Range'. The 'Units' section shows 'Adjustable Units' with 'Area: m²', 'Mass: kg', and 'Volume: m³'. There are also buttons for 'Optional Fields' and 'Show Location in Google Earth'.

coordinates	Minimum	Maximum	Spacing	Nodes	Range	Units
X: WGS-84 1984 (NAD-83)	667,300	669,000	100	18	1,700	Meters
Y: 35 (Northern Hemisphere)	4,544,100	4,547,800	100	38	3,700	
Z:	-48	106	2	78	154	

Şekil 8.8. Veri giriş ekranı görseli

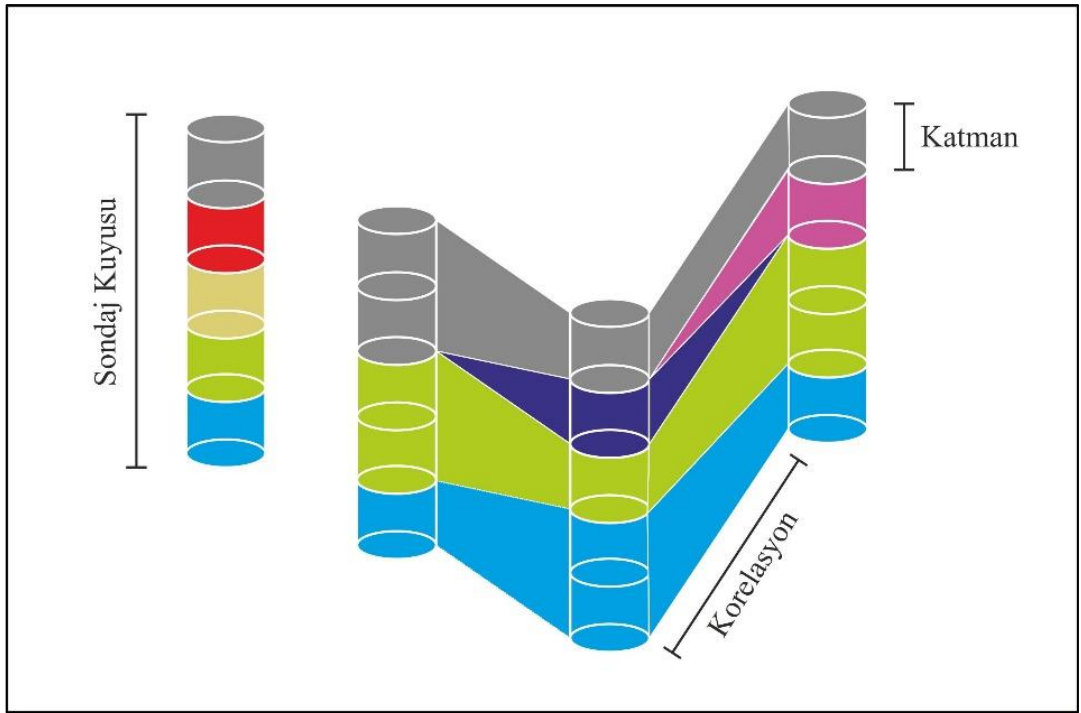
Program bu korelasyonu kendi algoritması sayesinde otomatik şekilde gerçekleştirmektedir. Metrelere göre değişim gösteren litolojik birimler birbirleriyle birleşerek tümsel görünümü yani korelasyon görselini elde etmektedir. Program bu birleştirme işlemini yaparken sınır noktalarının belirlenmesini ve modelin oluşturulmasında gereken yöntemlerin belirlenmesini istemektedir. Yani programda belirlenen yöntemlere göre modelin oluşumunu sağlanmaktadır (RockWare, 2018).

Çalışmada kullanılan Rockworks programının veri girişi bölümüne sondaj kuyularının verileri girilmiştir. Bu veriler; sondaj yüksekliği, sondaj yüzey kotu, sondaj kuyusundaki litolojik bilgiler, birimlerin derinlikleri gibi jeolojik verilerin girişleri yapılarak modelin oluşturulma safhasına başlanmıştır.

Girilen her bir kuyu verisinin koordinatları da girilerek kuyular arasındaki anlamlı modelin oluşturulması program tarafından gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda model ve modelden jeolojik kesitler elde edilebilecek hale gelmektedir.

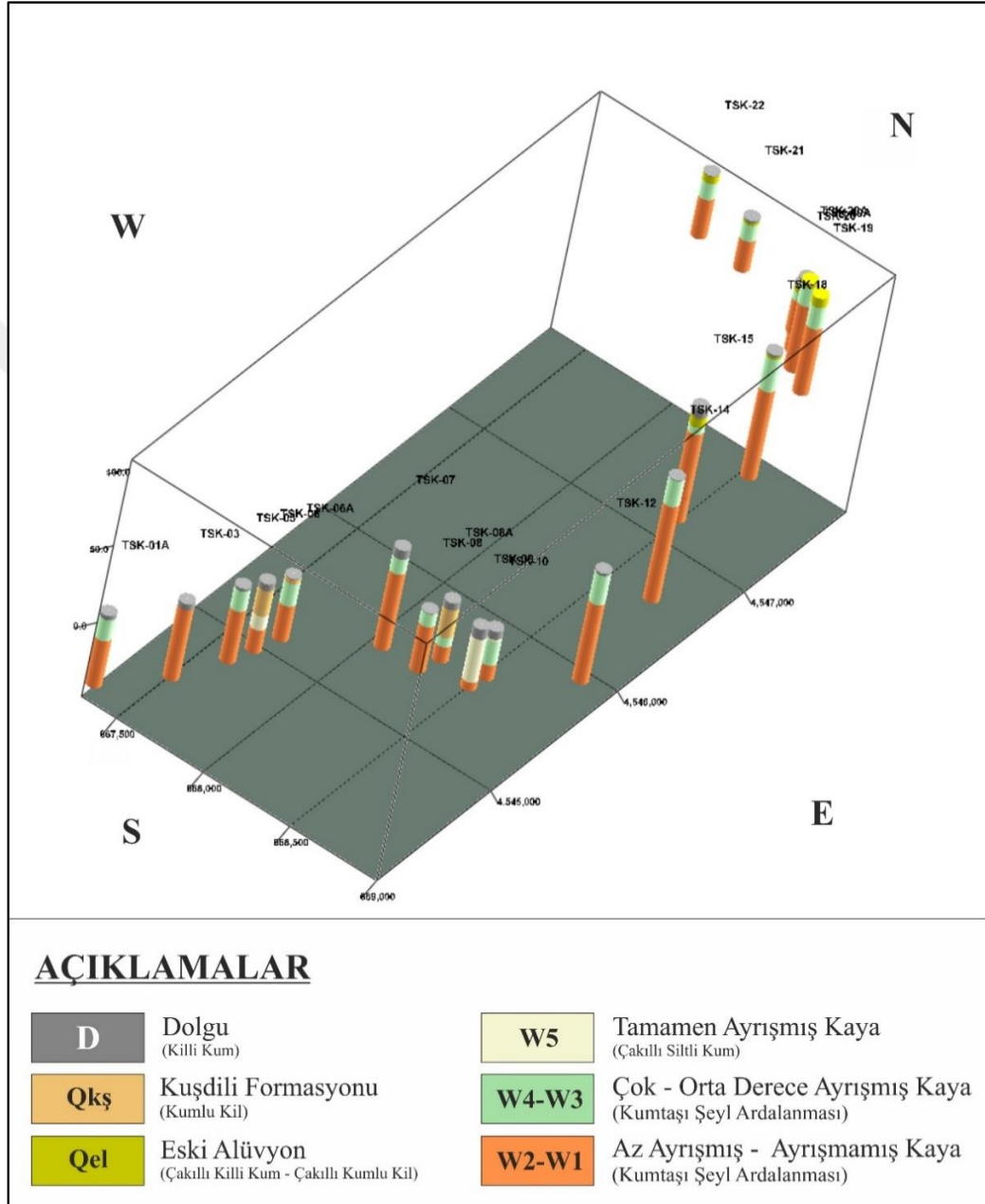
Veri giriş aşaması bitirildikten sonra programa girilen verilerin koordinatları sayesinde model sınırları güncellenmektedir. Güncelleme işlemi ile modelin oluşturulacağı sınırlar belirlenecektir. Bu sınır koordinatları, yüzey haritasının koordinatlarını da belirlemektedir. Farklı model sınırları ile modelin oluşturulması imkânsızlaşacağından jeolojik modelin sınırları ile yüzey modelinin sınırlarının aynı olması gerekmektedir. Sınırların aynı olmaması durumunda iki modelin birleşmesi ile oluşturulacak bütünleşik modelin altını oluşturan jeolojik modelle, üst kısmını oluşturacak yüzey modelinin üst üste uyumlu bir model oluşturması nerdeyse imkânsızdır.

Programda girilen her kuyunun ait ayrı ayrı loglama işlemi yapılabilmektedir. Ayrıca kuyular arasındaki litolojik ilişkiler, korelasyon yöntemi ile elde edilebilmektedir. Bu işlem sonucunda jeolojik kesit elde edilmiş olacaktır (Şekil 8.9).



Şekil 8.9. Korelasyon model mantığı

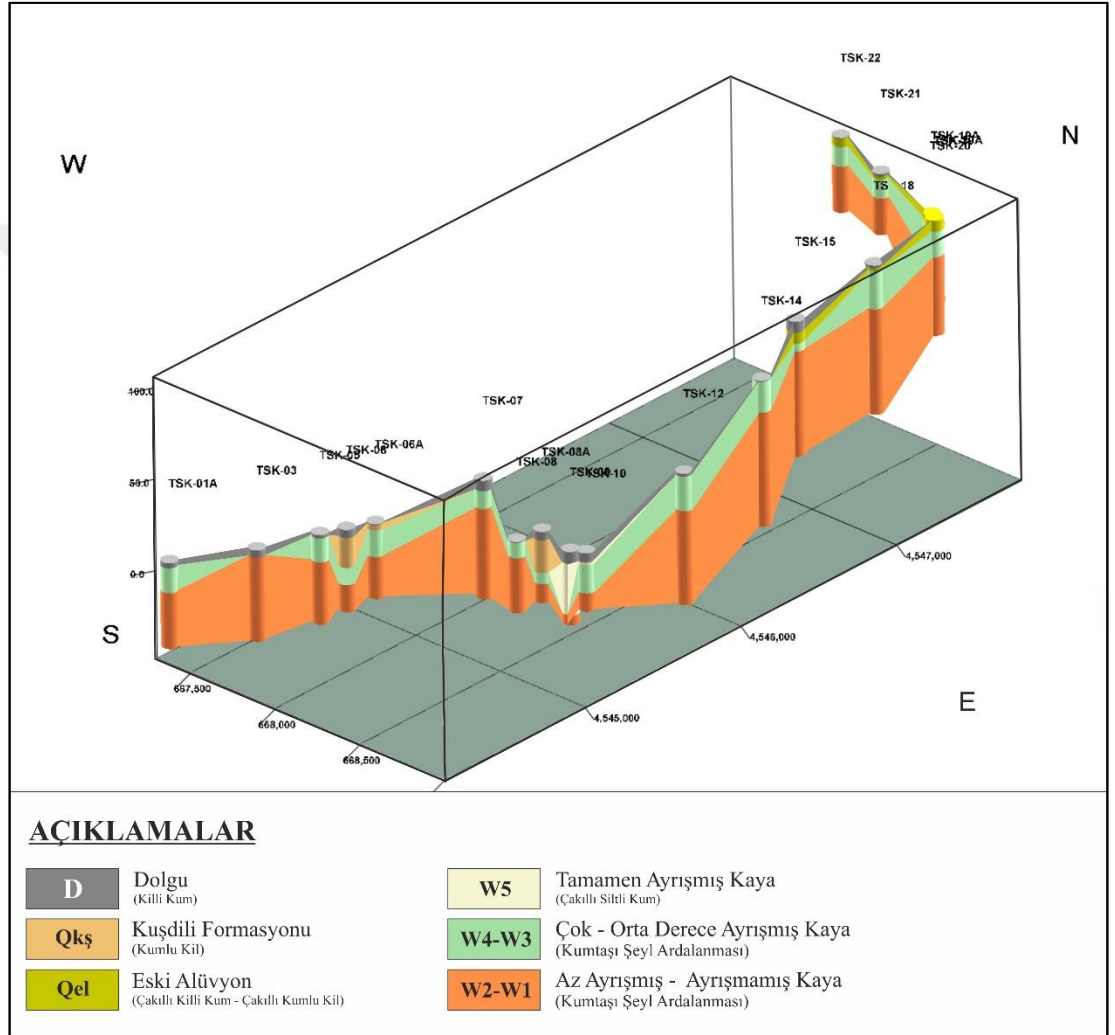
Modelden ayrıca kesitlerde alınabileceği gibi ayrıca üç boyutlu kuyu lokasyon haritası ve birimlerin kütle modelleri de çıkarılabilmektedir. Fakat kütle modellerinin gerçeği yansıtabilmesi için çok sayıda ve sık sondaj kuyu verisine ihtiyaç duyulacaktır. Kütle modeli genellikle maden rezerv hesabında kullanılmaktadır (Şekil 8.10).



Şekil 8.10. Üç boyutlu kuyu lokasyonu

Oluşturulan 3D kuyu lokasyon modeli gibi bu kuyular arasındaki jeolojik birimleri belirlenmesinde yardımcı olacak olan korelasyon modeli de Rockworks programından çıkarılabilmektedir. Modelin jeolojik kesitlerinin oluşturulması işleminde, kuyular

arası korelasyon kesitleri alınarak jeolojik modelin altlığı oluşturulmaktadır. Program, bu işlemi kuyular arasındaki mesafenin bu kuyuların litolojik bilgileriyle ilişkilendirmesini sağlayarak elde etmektedir. Bu işlem sonucunda program, girilen verilerin en mantıklı şekilde ilişkilendirilmesi sağlayarak, sayısal verileri görsel hale getirmektedir. Bunun sonucunda da korelasyon modelini ortaya çıkarmaktadır (Şekil 8.11).



Şekil 8.11. Üç boyutlu korelasyon modeli

Jeolojik katı model için gerekli olan korelasyon modelinin oluşturulması ile birlikte litolojik modelleme işlemi tamamlanmaktadır. Elde edilen kesitlerin yorumlanması sonucunda kesitten katı model oluşturulabilecek ve bu oluşturulan katı modele sondaj verilerinde elde edilen yapısal unsurlar (fay, magmatik sokulumlar) eklenerek modelin oluşumu tamamlanacaktır.

Programa girişi yapılan verilerin kontrolleri ve yorumlamaları sonucunda elde edilen veriler ile bir sonraki aşamaya yani modelin üç boyutlu katı modellenmesi aşamasına geçilmesine olanak sağlamaktadır.

Jeoloji mühendislerinin bu programı çeşitli alanlarda kullanabilmesi programın çok yönlü oluşunu ve gelecekte daha fazla parametre girişiyle ve teknolojik ilerlemelerle birlikte programın daha birçok alanda anlık veri modellemesinde kullanılacağından kuşku duyulmamaktadır. Programın diğer programlarla etkileşimi ve oluşturulan verilerin farklı programlarda kullanılabilirliğine kısmi destek vermesi de Rockworks programının kullanımını diğer programlardan daha iyi bir seçenek haline getirmektedir.

Elde edilen bu verilere bakıldığında elle çizilen kesit ve modellerin analiz uygulamalarında kullanılamaması da baz alındığında artık üç boyutlu modelleme ve analiz uygulamaları mühendislik alanında önemli bir yer teşkil etmektedir. Bu şekilde oluşturulan haritalar hem daha etkileşime açık, hem de daha “açıklayıcı” olabilmektedir. Bu da kullanıcının ortam hakkındaki zihinsel haritasını çok daha kolay oluşturmasına olanak sağlamaktadır.

Rockworks ve benzeri jeolojik modelleme programları, uzun zaman zarfında yapılan çalışmalarını, görüldüğü üzere daha kısa zamanda yapılabilineceğini ve daha kolay yapılabildiğini kanıtlamaktadır. İşleme ve görselleştirme süreçlerini daha kısa süre zarfına indirgeyen bu programlar sayesinde modelin yorumlanması ve oluşturulan modelin geliştirmesine daha fazla zaman harcayabilmek mümkün hale gelmektedir. Bu faktörler eski işlem metodunun aksine bilgisayar programları yardımıyla işlem yapmayı tercih edilir hale getirmektedir.

8.1.3. SketchUp

SketchUp programını çeşitli alanda kullanılabilir ve bastırılabilir modellerin oluşturulması için yaygın kullanıma sahip bir modelleme programıdır. Günümüzde modeller daha karmaşık ortamların tanımlanmasında ve analiz edilmesinde kullanılmaktadır. Bu gelişimle birlikte modellerin elde edildiği verilerin detaylılığı, bilgisayar ortamında kapladıkları alanlar ve sistemin donanım ihtiyacı artmış fakat bu

verilerin analizi ile birlikte de bu analizlerden, çok büyük öneme sahip veriler elde etmek mümkün hale gelmiştir. Oluşturulan bir modelin ortama dayanımı, çevre ile etkileşimi ve çeşitli konuların cevaplanması için kullanılacak olan verinin elde edilmesine duyulan ihtiyacı karşılayabilecek analizlerin yapılabilmesi de günümüzde mümkün hale gelmiştir.

Bu gelişimlerin sayesinde yapılması planlanan bir projenin yapılmadan önce eksileri ve artıları saptanabilmekte ve tartışılabilmektedir. Bir yapının yapım süreci öncesi tüm deneylere tabii tutulması ve bu deneylerden elde edilen verilerin yorumlanması sonucunda istenilen amaca uygun nitelikte olup olmadığı da tespit edilebilmektedir. Programların bu olanakları sağlaması, çoğu projenin hatalarının belirlenmesinde ve projenin iyileştirilmesinde yardımcı olmaktadır. Bu sayede oluşabilecek büyük bir facianın önüne geçilerek, mühendislik yapılarının daha uzun ömürlü ve sağlam yapılar olmasına imkân sağlamaktadır. Ayrıca bu modellerin analizleri sayesinde proje bütçesi de hesaplanabilmektedir. Yani modelleme ve analiz etme programlarına girilen veriler sayesinde, bu yazılımlar mühendislik çalışmalarının yapımında ve sonrasında olabilecekleri insanlar gibi eş zamanlı değil, önceden saptayabilmektedir. Kamu kurumlarının projelerin onaylanması aşamasında, bu tür program analizlerinin proje dosyalarının içinde olmasını istemesi de bu programların gerekliliğini kanıtlamaktadır.

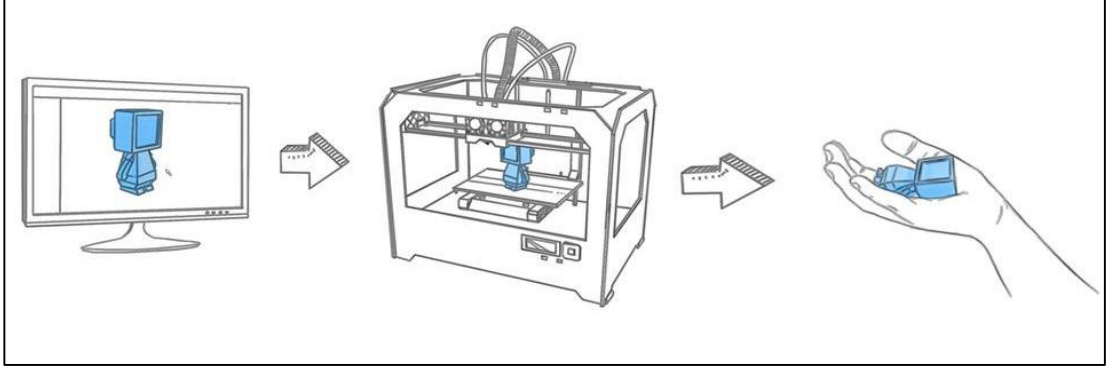
Herhangi bir programda oluşturulan modellerin, diğer programlar içinde açılabilmesi ve düzenlenebilmesi de modellerin daha karmaşık analizlere yani daha fazla sonuç verisinin elde edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Programların birbirleriyle olan bu uyumu sayesinde, modeller daha karmaşık soruların cevaplarını bulabileceğimiz sonuç verilerini verebilecek hale gelmiştir. Modellerin oluşturulma amaçları günümüzde evrilererek, sadece görsel objesi olarak oluşturulmayı amaçlamamaktadır. Artık modeller sayısal karmaşıklığa ve yüksek ayrıntılı modellerin analizlerinin sonuçlarında veri elde etmek amacıyla oluşturulmaktadır. Bu amaç ile üretilen modeller yüksek ayrıntıya sahip, içeriğinde çok fazla veri içeren ve bunları birbirleriyle anlamlandırabilen modeller ortaya çıkarmaktadır. Asıl önemli nokta ise herhangi bir programın hangi amaç için kullanılacağını ve programın hangi verilerle hangi analizleri yapabileceği bilgisine sahip olabilmektir. Bu sayede sorulan soruların ve ihtiyaç duyulan verilerin temini kolay hale getirilebilmektedir.

Jeoloji mühendisliğinin ana görevlerinden biri olan yeryüzeyini ve yeraltının tanımlanması ilkesi, karmaşık verilerin analizi ve ilgileşimi ile mümkündür. Bilişim çağı öncesinde elde edilen verilerin ilkel yöntemlerle işlenmesi için harcanan zamanın, günümüzde yorumlama amacıyla harcanması çok daha gelişmiş modelleri elde etmemize imkân sağlamaktadır. İki boyutlu harita ve kesitlerin çalışma verimliliği ve yorumlama için uzun zaman harcamaya sebep olması da negatif yönleri olarak gösterilebilmektedir.

Üç boyutlu modelleme ve coğrafi bilgi sistemleri için ilk TIN programı 1975 yılında Rveolph Franklin tarafından Simon Fraser Üniversitesi'nde oluşturulmuştur. Gerçekliğin simülasyonu 1975 yılında, Dr. Benoit Mveelbrot'un "Kırıklı setler üzerine bir Teori" (A Theory of Fractal Sets) adlı makalesinden sonra büyük bir gelişim sağladığı da gözlemlenmektedir. Coğrafi bilgi sistemlerinde üç boyutlu modeller pek çok alanda (jeoloji mühendisliği, inşaat mühendisliği, coğrafya, şehir bölge planlama, mimarlık vb.) kendisine kullanım alanı bulabilmektedir (Lancelle ve Fellner, 2003; 2004).

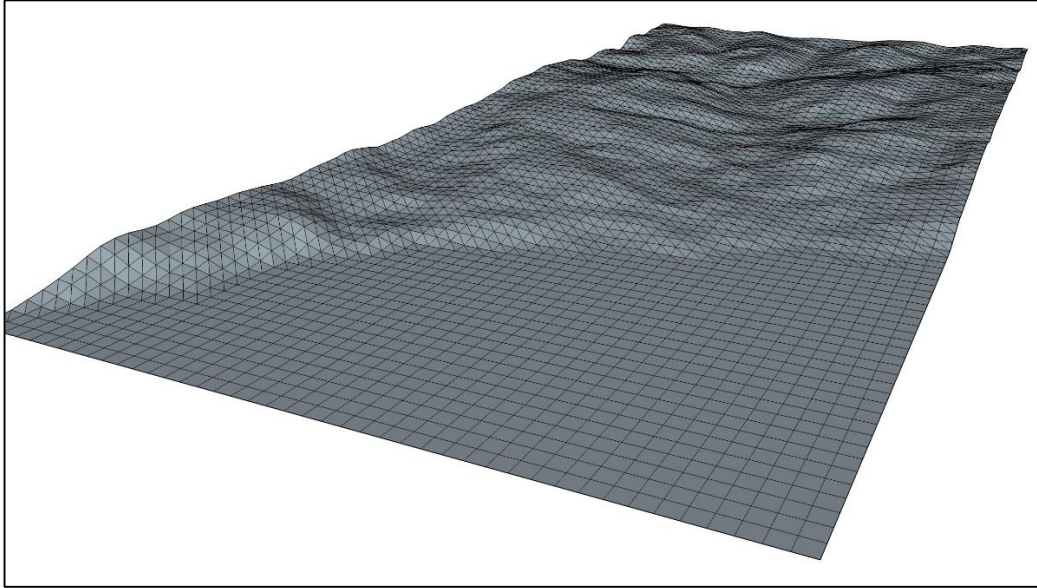
Coğrafi Bilgi Sistemlerinin modellerle etkileşimli kullanımı sonucunda konumsal verinin elde edilmesinin yanı sıra hacimsel verinin analiz edilebilirliği, kolayca anlaşılabilmesi ve yorumlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu gelişimler çalışma metotlarını tamamen dijitalleştirmiş ve sistemlerin vazgeçilmez öğeleri haline gelmişlerdir. Üç boyutlu modellerin kullanıcıya sağladığı bir başka gelişim de belirlenen bir alanın verilerinin, o alanın modelinin oluşturulmasında kullanılmasıyla elde edilen modelin analiz edilebilirliğe izin vermesi ve istatistik sonuçlar alınmasına olanak sağlaması olarak belirtilmektedir. Bu sonuçlardan yola çıkılarak alan hakkında kullanılacak kaynakların optimizasyonuna yardımcı olmasıdır (Batty, 2007).

Modelleme gelişimlerinde bir diğer yenilik ise modellerin istenilen ölçek oranında, 3 boyutlu modellerinin 3 boyutlu yazıcılar yardımıyla çıktılarının alınabilmesine imkân sağlamasıdır (Şekil 8.12).



Şekil 8.12. Üç boyutlu modelleme ve modelin çıkartılması şeması (3dlink, 2018)

Global Mapper programı ile elde edilen yüzey modeli SketchUp programına aktarılmıştır. Bu model 4085 adet düzensiz üçgen yüzeyinin birleşmesi sonucu elde edilmiştir. Yüzey modelini alan hesabı yapıldığında yüzeylerin alanı ~ 6.08 km² olarak gözlemlenmiştir (Şekil 8.13).



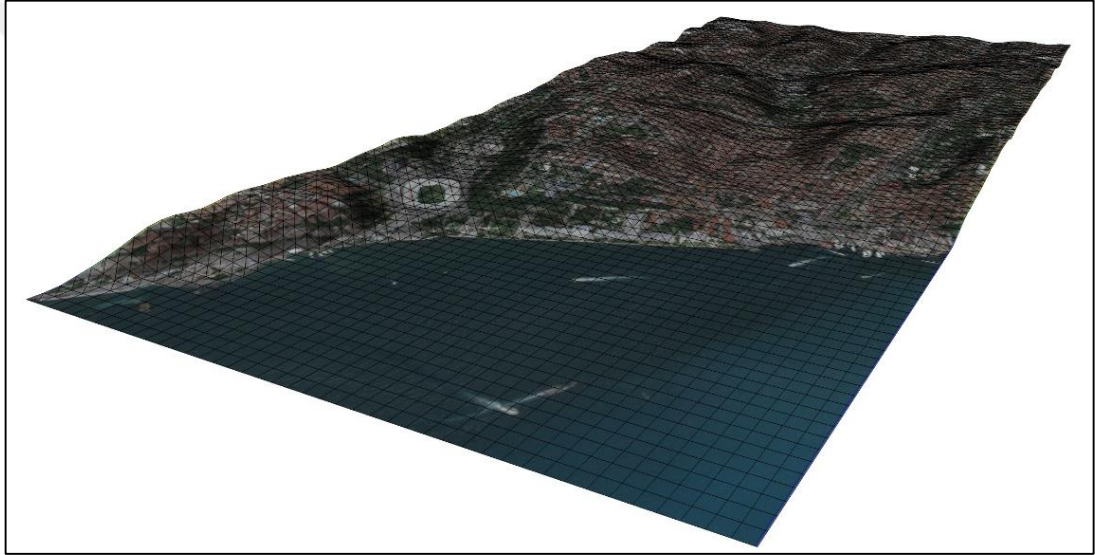
Şekil 8.13. Düzensiz üçgen yüzeyleri ile oluşturulmuş yüzey modeli

Çalışma alanının yüzey dokusunu modele bindirebilmek için yüzeyin gerçek görüntülerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sayede elde edilecek olan model görseli var olan ortama daha yakın gerçeklik sunmuş olacaktır. Yüzey görselleri çeşitli kaynaklardan (Uydu görüntüleri, drone ile görüntü alımı vb.) elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada yüksek çözünürlükte uydu görüntüsü tercih edilmiştir. Çalışma alanının çok geniş bir alana sahip olması nedeniyle, uydu görüntüsünün de yüksek çözünürlükte

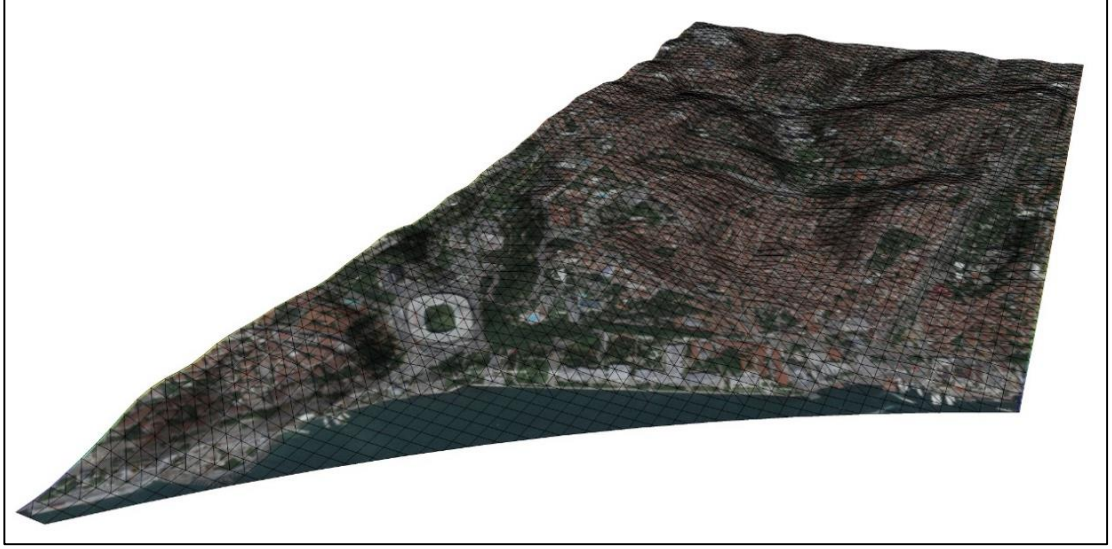
olması gerekmektedir. Bu seçimin amacı oluşturulan modelin görsel olarak iyi gözükmesini ve yüksek detaya sahip modelin elde edilmesi sağlamayı amaçlamaktadır. Uydu görüntüsünün temin edilmesinde en dikkat edilmesi gereken nokta, yüzey modelinin koordinatlarıyla, uydu görüntüsünün koordinatlarının aynı olabildiğini sağlamaktır. Elde edilecek olan uydu görseli modelin koordinatlarıyla farklılık göstermesi durumunda uydu görseli model üzerine uyumsuz olacaktır.

Global Mapper programına indirilen uydu görüntüsü yine Global Mapper programında yüzey koordinatları sınırında kırılarak yüzey modelinde kullanılabilir hale getirilmiştir (Şekil 8.14).



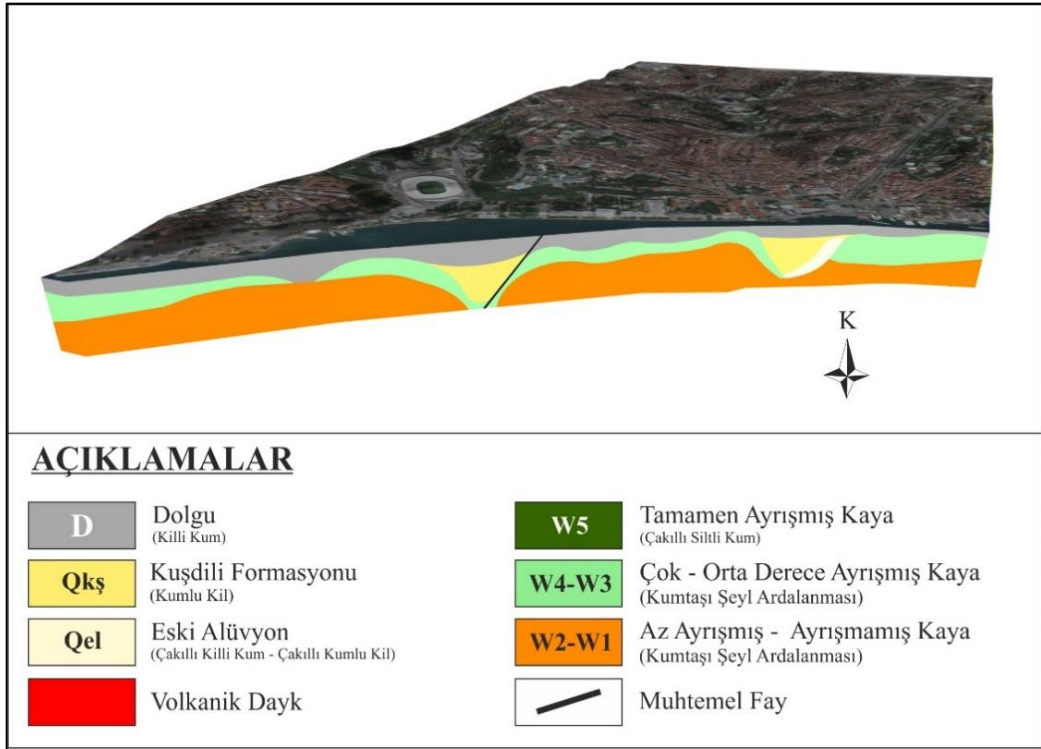
Şekil 8.14. Uydu görüntüsünün yüzey modeline uygulanmış hali

Yüzey modelinde deniz alanına denk gelen kısımlar koordinatlarınca belirlenmiş ve jeolojik modelin koordinatlara uyumlu olacak şekilde düzensiz üçgen yüzey modelinden çıkarılmıştır. Bu işlem sonucunda üçgen sayısı 3426 üçgen alanına indiği gözlemlenmiştir. Yüzey modelinin alanı, çıkarma işlemi yapıldıktan sonra hesaplandığında yüzeylerin alanı $\sim 5.21 \text{ km}^2$ olarak gözlemlenmiştir (Şekil 8.15).

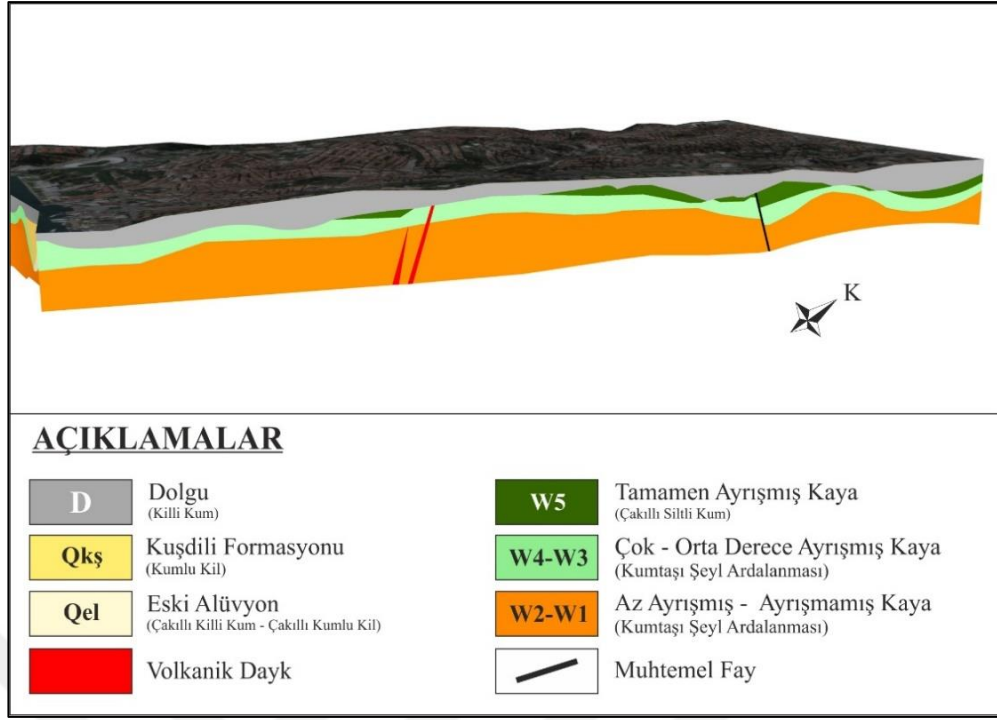


Şekil 8.15. Yüzey modelinden deniz alanının çıkarılmış hali

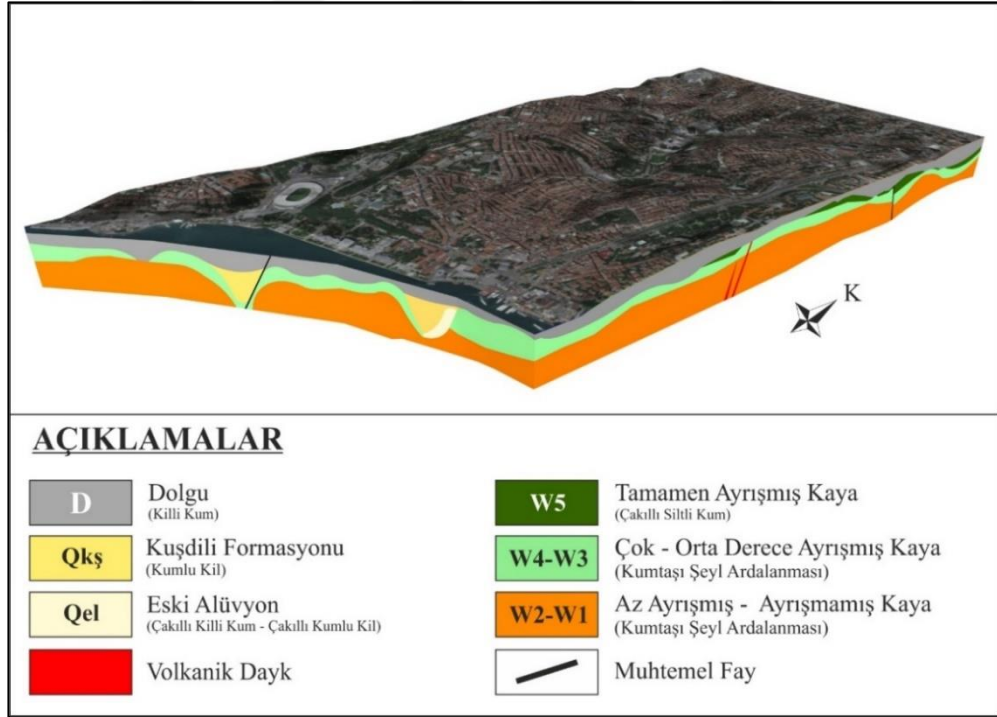
Kabataş- Mecidiyeköy metro hattı güzergahının modellenmesi 3D modelinin jeolojik modelinin oluşturulabilmesi için Rockworks programında oluşturulan korelasyon modelinden faydalanılmıştır. Bu modelin üzerine ayrıca sondaj verilerinden elde edilen muhtemel faylar ve magmatik sokulumlar da eklenmiştir (Şekil 8.16, 8.17, 8.18).



Şekil 8.16. Jeolojik ve yüzey modelinin birleştirilmiş hali



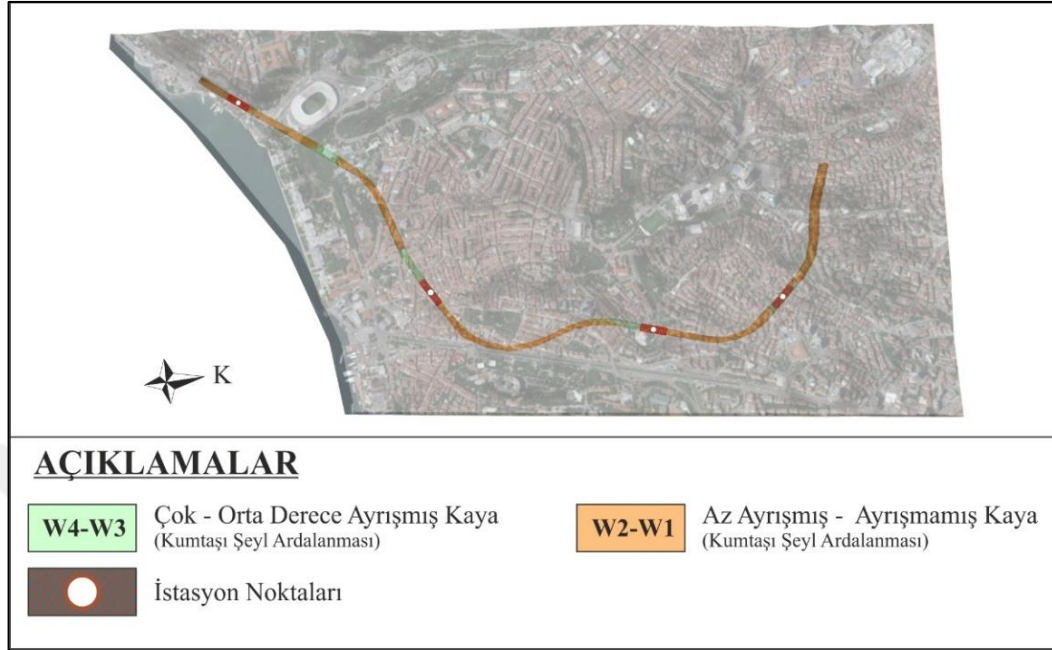
Şekil 8.17. Jeolojik ve yüzey modelinin birleştirilmiş hali



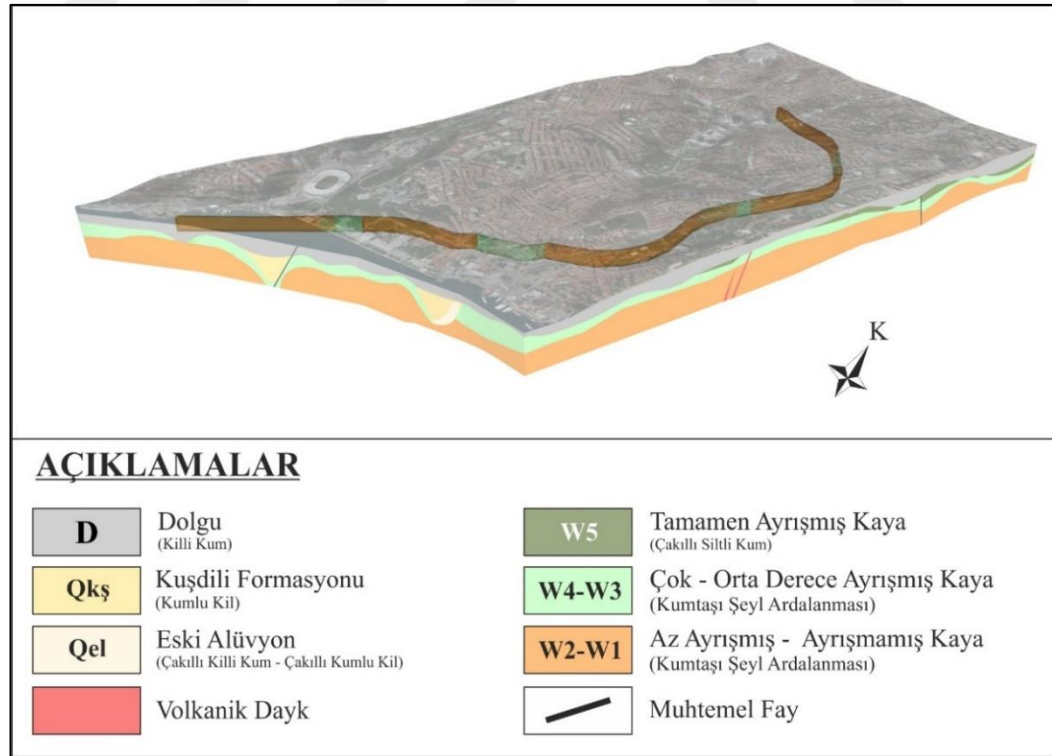
Şekil 8.18. Jeolojik ve yüzey modelinin birleştirilmiş hali

Modellerin birleştirilmesi sonucunda, yüzey ve jeoloji modelleme işlemi tamamlanmıştır. Bu modellere ek olarak tünel modeli de eklenmiştir. Bu model oluşturulurken jeolojik modelin yüzey kesitlerinden faydalanılmıştır. Elde edilen

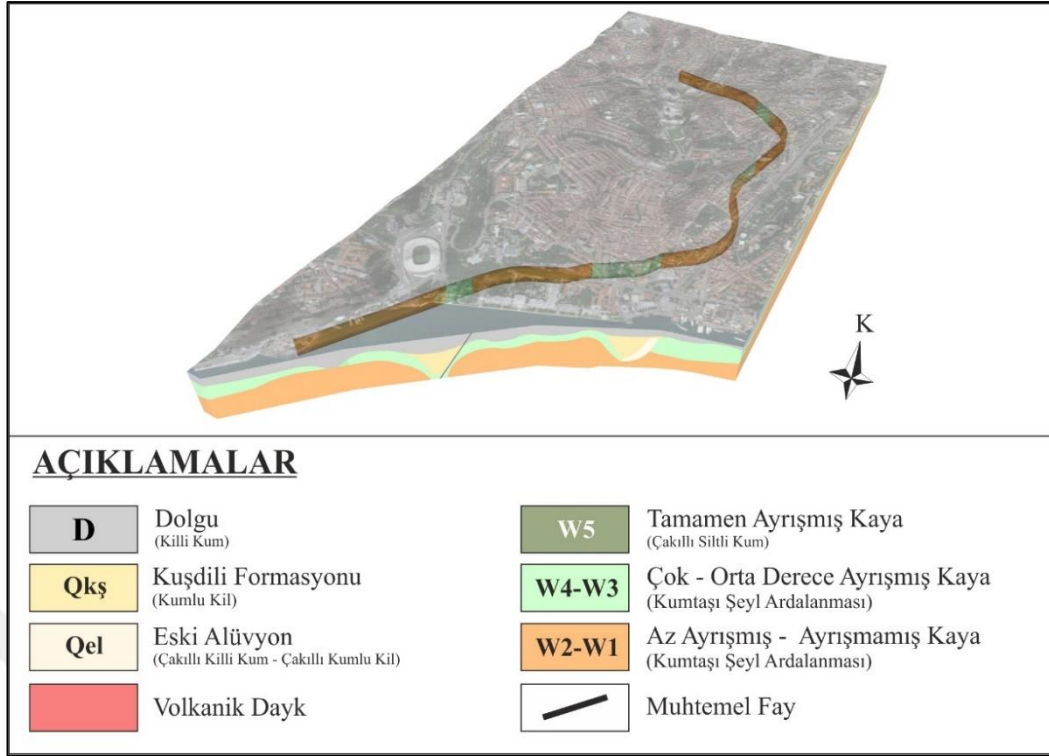
kesitler sayesinde tünelin kesiti ve tünelin kestiği birimlerde model üzerine eklenmiştir (Şekil 8.19, 8.20, 8.21, 8.22).



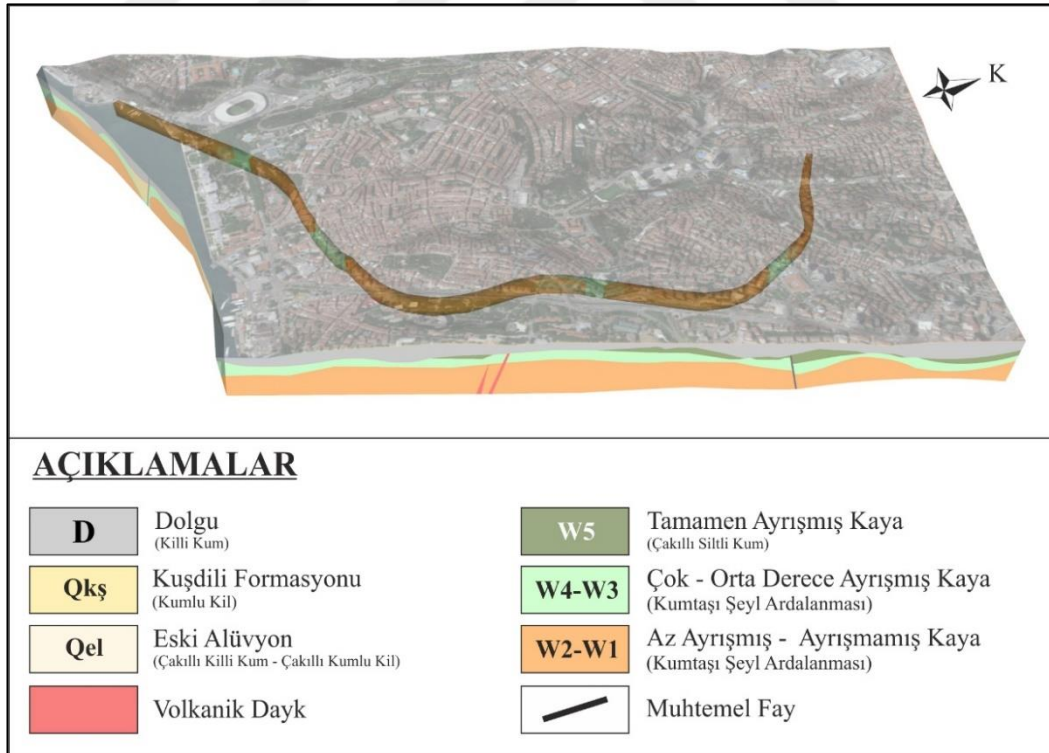
Şekil 8.19. Tünel güzergâhının ve istasyon noktalarının model üzerinde gösterimi



Şekil 8.20. Tünel güzergâhının model üzerinde gösterimi



Şekil 8.21. Tünel güzergâhının model üzerinde gösterimi



Şekil 8.22. Tünel güzergâhının model üzerinde gösterimi

Çalışma alanının modellenmesi için elde edilen tüm verilerin kullanılması sonucunda jeolojik modelin ve yüzey modelinin oluşturulması tamamlanmıştır. Modelin oluşturulması aşamasında tüm parametreler titizlikle kontrol edilmiştir. Jeolojik model oluşturulurken gerçek ortam verisine göre, -y yönünde 16 kat büyütülerek görselin model üzerinde görünebilirliği sağlanmıştır. Yani oluşturulan model gerçek derinliğe göre 16 kat büyütülmüştür. Bu sayede modelin jeolojik birimlerinin görsel anlamda görüntülenebilirliğini sağlamıştır. Büyütme işlemi yapılmadan oluşturulacak olan modelde ise programda yakınlaştırma işlemi yapılmadan, jeolojik birimlerinin görünebilir olması muhtemel değildir. Buda modelin detaylılığının gösterilmesini engellemektedir. Bu amaçla diğer hiçbir boyutta büyütme işlemi yapılmadan sadece -y yönünde gerçek oranları değiştirmeyecek şekilde değişim yapılmış ve bu belirtilmiştir.

Modele eklenen tünel kazı modeli jeolojik model içinde modellenmesinden dolayı gerçek ortamdaki derinlik seviyesinden 16 kat büyütülerek oluşturulmuştur. Tünelin kazı üst kot sınırı, kazı alt kot sınırı ve -y yönünde yapılan büyütme değeri tünel kazı modelinin sınırlarını ve konumunu belirlemektedir. Tünel kazı alanının yüzeyi dış yüzey modelinden faydalanılmadan modellenmiştir. Eğer jeolojik modelden faydalanılarak kazı modeli elde edilirse, bu model iç kısımda bulunan kazı alanını temsil etmeyecektir. Çünkü model yüzeyi ile kazı modeli arasında konumuna göre değişken bir ara boşluk bulunmaktadır. Bu boşluk model programı yardımıyla bakıldığında ~120 - 500 m arasında değişmektedir. Tünel kazı modelinin yüzey birimleri, yapıcı firmanın kazı güzergâhının jeolojik özelliklerinin belirlendiği rapordan elde edilerek yüzeye modellenmiştir.

Oluşturulan model içeriğinde çalışma alanının jeolojik birimlerini, yüzey yükseklik modelini, tünel kazı modelini bulundurmaktadır ve ölçümler sonucu elde edilen veriler ile kıyaslama yapıldığında jeolojik model, yüzey modeli ve tünel kazı modeli birbirlerinin sağlamasını yapmakta ve verilerle örtüşmektedir.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında yapımı devam eden Kabataş – Mecidiyeköy metro hattına ait verilerin bilgisayar ortamına çeşitli programlara aktarılarak yüzey ve jeoloji modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin birleştirilmesi ve analizi sonucunda da tümleşik 3D model oluşturulmuştur.

Çalışma alanında açılmış olan 20 sondaj kuyusunun koordinatları ile üç boyutlu modelin sınırları belirlenmiştir. Bu sınır koordinatlarına uyumlu olacak şekilde, yüzey modelini oluşturacak olan uydu görüntüleri ve yükseklik haritaları Global Mapper platformundan elde edilmiştir.

Yüzey modelini iki boyutlu ortamdaki üç boyutlu ortama aktarabilmek için yükseklik haritası, düzensiz üçgen yüzey modeli yöntemi ile 3.boyut için anlamlandırılmış ve dışa aktarımı gerçekleştirilmiştir.

Metro güzergâhının yükseklik profili de Global Mapper programında oluşturulmuştur. Yükseklik profili, tünelin yüzey alt ve üst kotunun yeryüzüne olan uzaklıkları hesaplanarak yapılmış ve tünelin gerçek konumunu yansıtacak şekilde oluşturulmuştur. Tünelin bulunduğu derinlik noktaları, tünel hattının metrelerce göre konumları da bu modele eklenmiştir. Bu aşamada elde edilen veriler bir sonraki model tümleştirme aşaması için hazır hale getirilmiştir. Yani modelin yüzey kısmı tamamlanmıştır.

Jeolojik modelin oluşturulmasından önce, bu modelin oluşturulabilmesi için ihtiyaç duyulan korelasyon modeli Rockworks programında 20 sondaj kuyu verisi girilerek oluşturulmuştur. Korelasyon modeli kuyu verilerinin birbiriyle olan ilişkileri analiz edilerek elde edilmiştir. Bu modele ek olarak Rockworks programında kuyu lokasyon haritası da oluşturulmuştur. Korelasyon modeli 2 boyutlu gösterime uygun ve konum verisi içeren bir dosya halinde dışa aktarılmıştır. Bu aşamanın sonlandırılmasıyla birlikte modelin alt kısmının oluşturulmasında yardımcı olacak model de elde edilmiştir.

Çalışma alanının jeolojik modelinde Trakya Formasyonun hâkim olup, bunun yanında killi kum, Kuşdili Formasyonu, eski alüvyon ve volkanik dayklar da görülmektedir. Tünel kazı modelinde ise ayrışma türlerine göre (en yaygın; az ayrışmış- ayrışmamış, az miktarda; çok – orta ayrışmış) farklılık gösteren kumtaşı – şeyl ardalanması hâkimdir.

Tümsel model SketchUp programına aktarılan yüzey modeli ve jeolojik modelin birleştirilmesi ve bu modellere tünel kazı modelinin eklenmesi sonucunda tamamlanmıştır.

Modelin oluşturulması için uygulanan yöntemin doğruluğu, eldeki verileri ve raporları yansıtması sonucunda kanıtlanmıştır. Bu metot yardımıyla çeşitli alanlarda jeoloji ve yüzey modelinin, gerekli verilerin yardımıyla oluşturulabileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan tüm veriler Kabataş-Mecidiyeköy metro hattının inşası amacıyla elde edilmiş ve tünelin inşası için gerekli ölçümlerin yardımıyla inşa için gereken hesapların yapılmasında kullanılmıştır.

3D modelde jeolojik birimlerin ve yapısal unsurların bilgisayar ortamında gösteriminin ve detaylarının incelemesinin kolay olmasına rağmen, modelin kâğıt üzerine aktarımı sonucunda modelin detayları ve modelin gösterimi zorlaştırmaktadır. Bu sorun jeolojik modelin derinliğinin –y yönünde 16 kat büyütülmesi sonucunda, modelin detay gösteriminin ve incelenebilmesinin mümkün hale getirilmesiyle ortadan kaldırılmıştır.

Yüzey ve jeoloji modellerinin birleştirilmesi aşamasında modellerin birbirleriyle uyumlu olabilmesi için koordinat sistemlerinin ve modelin sınır koordinatlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu incelemelerin yapılmaması sonucunda elde edilecek modellerin birbiriyle uyumu mümkün değildir ve uyumsuz modellerin uyumlu hale getirilebilmesi jeolojik model temel alınarak tekrar modelleme işlemi yapılmalıdır. Bu işlem gereksiz zaman kaybına sebep olmaktadır.

Model tasarımı ve oluşturulması sürecinde belirlenmiş bir yöntem yardımıyla, modelin her aşamasının not edilerek tekrarlanabilirliğinin ve doğruluğunun kontrolü modelde var olabilecek herhangi bir sorunun belirlenmesinde yardımcı olabilmektedir.

Modelin oluşturulmasında kullanılan her verinin kontrol edilmesi ve tekrarlanabilirliğinin kontrolü de daha gerçekçi modellerin oluşturulabilmesine yardımcı olabilmektedir.

Modeli oluşturulan çalışma alanının doğruluğu eldeki verilerin sayesinde kontrol edilmiş ve modelin her aşamasında bu verilerin doğrulanırlığına bakılmıştır. Doğrulayan veri, modelin oluşturulması için kullanılan verinin modelin oluşturulması sonucunda modelin bu verileri yansıtip yansıtmamasının kontrolüne denilmektedir.

KAYNAKLAR

- 3DLink, 2018. Erişim Tarihi: 15.10.2018. <https://3dlink.me/2018/05/proceso-general-de-la-impresion-3d/>
- Arıç, C., 1955. Haliç-Küçükçekmece Gölü Bölgesinin Jeolojisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Doktora Tezi, 48s, İstanbul.
- ARTSON Geoteknik (Artson Araştırma Sondajları Mühendislik Ticaret Limitet Şirketi), 2016. İstanbul Metrosu Kabataş-Mecidiyeköy Arası Jeolojik-Geoteknik Etüd Raporu. Cilt 1, İstanbul (yayımlanmamış).
- ARTSON Geoteknik (Artson Araştırma Sondajları Mühendislik Ticaret Limitet Şirketi), 2016b. İstanbul Metrosu Kabataş-Mecidiyeköy arası Jeolojik-Geoteknik etüd raporu. Cilt 2, İstanbul (yayımlanmamış).
- Barla, G., Barla, M., 2004. Discussion on the Full Face Method. FELSBAU, 22 (4), 26–30.
- Barton, N.R., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mechanics and Rock Engineering, 6 (4), 189–236.
- Batty, M., 2009, Urban Modeling. International Encyclopedia of Human Geography, 12, 51-58.
- Bi, S.B., Zhang, G.J., Hou, R.T., Liang, J.T., 2010. Comparing Research on 3D Modeling Technology & Its Implement Methods. Journal of Wuhan University of Technology, 32(16), 26-30.
- Bieniawski, ZT., 1993. Classification of Rock Masses for Engineering: The RMR System and Future Trends. Comprehensive Rock Engineering Pergamon, 3, 553.
- Chen, J.G., Zhang, L., 2004. The Developing of 3D Modeling Technology. Mechanical & Electrical Technology, 33(4), 141-145.
- Dalgıç, S., 2004. Factors Affecting the Greater Damage in the Avcılar Area of Istanbul During the 17 August 1999 Izmit Earthquake. Bulletin of the International Association for Engineering Geology and the Environment, Bull. Eng. Geol. Env. 63, 221 – 232.
- Deere, D.U., Merritt, A.H., and Cording, E.J., 1974. Engineering Geology and Underground Construction. 2nd International Congress of Engineering Geology, Sao Paulo, Brazil, 1974, 1-26.
- Deere, D.U., Peck, R.B., Monsees, J.E., Schmidt, B., 1969. Design of Tunnel Liners and Support Systems. U.S. Department of Transportation. PB 183799, 181s.

- Global Mapper, 2018. Tools and Features in Global Mapper. Erişim Tarihi: 17.08.2018. <https://www.bluemarblegeo.com/products/global-mapper-features.php>
- Güven, G., 2009. İstanbul Metrosu Otogar-Kirazlı Arasının Mühendislik Jeolojisi ve Tünel Kazılarına Bağlı Oluşan Deformasyonların Değerlendirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul (yayımlanmamış).
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980. Underground Excavations in Rock. Institutions of Mining and Metallurgy, 382, London.
- Ketin, İ., 1991. İstanbul ve Dolayının Jeoloji Haritası. İSKİ, İstanbul (yayımlanmamış).
- Lancelle, M., Fellner, D. W., 2004. Current Issues on 3D City Models, Computer Graphics. University of Technology at Braunschweig Mineral Resources and Geology, 18(6), 598-603.
- Mollon, G., Phoon, K.K., Dias, D., Soubra, A.H., 2011. Validation of a New 2D Failure Mechanism for the Stability Analysis of a Pressurized Tunnel Face in a Spatially Varying Sand. Journal of Engineering Mechanics, 137 (1), 8-21.
- Onargan, T., ve Aksoy. CO.,2008; İzmir Metrosu II. Aşama İnşaatı İstasyon Tünel Kazıları Değerlendirme Raporu, 6s.
- Özçelik, M.,2018. Kabataş-Mecidiyeköy Metro (İstanbul) Tünellerinde Zor Zemin Koşullarının Tünel Kazısına Etkisi. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 42 (2017), 33-48.
- Özgül, N., Özcan, İ., Akmeşe, İ., Üner, K., Bilgin, İ., Korkmaz, R., Yıldırım, Ü., Yıldız, Z., Akdağ, Ö., Tekin, M., 2011. İstanbul İl Alanının Jeolojisi. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, İstanbul Kent Jeolojisi Projesi, 76s.
- Panet, M., 1995. Le Calcul Des Tunnels Par La Méthode Convergence-Confinement. Presse De l'Ecole Nationale Des Ponts Et Chaussées, 187, France.
- RockWare, 2018. Rockworks. Erişim Tarihi: 20.05.2018. <https://www.rockware.com/downloads/documentation/rockworks/rockworks17.pdf>
- Seymen, İ., 1995. İzmit Körfezi ve Çevresinin Jeolojisi. Meriç, E. (Ed.) İzmit Körfezi Kuvaterner İstifi İçinde (1-22). Kocaeli Valiliği Çevre Koruma Vakfı, Kocaeli.
- Şekercioğlu, E., 2007. Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, 286, Ankara.

- Ulusay, R., Sönmez, H., 2000. Hoek-Brown Yenilme Ölçütüne İlişkin Değişiklik Önerileri ve Bunların Uygulanabilirliği. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 23/24 (1), 1-21.
- Wang, H.T., Li, Y.B., Xi, J.H., 2010. Three-Dimensional Geological Modeling Technology and the Application in City Construction. Science of Surveying and Mapping, 35(5), 220-222.
- Wang, Y.B., Wu, L.X., Li, X.J., 2007. On 3D GIS Spatial Modeling. Journal of Image and Graphics, 12(8), 1430-1434.
- Wang, Z.T., 2004. 3D Geological Modeling Technology and Method. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources, 20(4), 22-23.
- Wu, C.L., Mao, X.P., Tian Y.P., Et al., 2006. Digital Basins and Their 3D Visualization Modeling. Geological Science and Technology Information, 25(4), 1-8.
- Wu, Q., Xu, H., 2004. On Three-Dimensional Geological Modeling and Visualization. Science in China, Series D, Earth Sciences, 47(8), 739-748.
- Zeng, X.P., Wu, J.S., Zheng, Y.P., Et al. 2004. Geological Body 3D Visualization System Design Used for Solid Mineral Exploration and Mining Based on a Mixed Data Model. Mineral Resources and Geology, 18(6), 598-603.
- Zhang, S.K., Ni, J.Y., Gao, W.L., Et al., 2009. Study on the Technology and Method of 3D Geological Modeling: A Case Study of the East Kunlun Orogenic Belt. Journal Of Geomechanics, 15(2), 201-208.
- Zhang, W.J., Wang, W.K., 2006. 3D Modeling and Visualization of Geological Layers Based on Borehole Data. Geotectonica Et Metallogenia. 30(1), 108-113.
- Zhu, C, X.D., Cao, D.Y., Et al., 2001. Typical Mode of 3D Visualization for 3D Geology Model. 20th International Cartographic Conference: Mapping The 21st Century, 4, 2600-2604.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fatih TUZLU
Doğum Yeri ve Yılı : Berlin/Almanya, 1992
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : fatihtuzlu@gmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Samsun Atakum Teknik Lise, 2010
Lisans : SDÜ, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği

Yayınlar

- Ozcelik, M., Tuzlu, F., 2017. Leakage Analysis of Deriner Dam (Artvin-Turkey) Using 3D Modeling. KSCCE Journal of Civil Engineering, 22(8), 1-7.
- Tuzlu, F., Ozcelik, M., 2018. Analysis of Uncertainties in Kabatas-Mecidiyekoy Metro (Istanbul) Tunnels With 3D Model. 9th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology, Antalya, 07th-11 May, 2018.
- Tuzlu, F., Özçelik M., 2017. Piroklastik Kayaçların Endüstriyel Hammadde Özelliklerinin 3D Jeolojik Modelleme İle Araştırılması. 70. Türkiye Jeoloji Sempozyumu. Ankara, 166-167.
- Tuzlu, F., Abubakar, İ.İ., Özçelik, M., 2016. Kentsel Dönüşüm Açısından Isparta Yerleşim Alanının Jeolojik ve Jeoteknik Özelliklerinin İncelenmesi (Gb-Türkiye). 69. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 11-15 Nisan 2016, Ankara, 436-437.
- Tuzlu, F., Özçelik M., 2016. 3D Modelleme Kullanarak Deriner Barajının Olası Kaçak Analizi. 6. Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu (Uzal-Cbs 2016), 5-7 Ekim 2016, Adana, 1073-1077.
- Tuzlu, F., Özçelik, M., 2018. Jeolojide Fotogrametrinin Kullanımı ve Yakın Resim Fotogrametri Yöntemi ile Kayaçların Modellenmesi. VII. Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu (Uzal-Cbs 2018), 18-21 Eylül 2018, Eskişehir, 273-278.