

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KIRIKLI, ÇATLAKLI KAYADA AÇILACAK DERİN YARMA ŞEVLERİN
TASARIMI: VAKA ANALİZİ, SUUDİ ARABİSTAN, RİYAD ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çiçek ÜSTÜN

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeoloji Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üy. Erkan BOZKURTOĞLU

HAZİRAN 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KIRIKLI, ÇATLAKLI KAYADA AÇILACAK DERİN YARMA ŞEVLERİN
TASARIMI: VAKA ANALİZİ, SUUDİ ARABİSTAN, RİYAD ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Çiçek ÜSTÜN
(505191306)**

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeoloji Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üy. Erkan BOZKURTOĞLU

HAZİRAN 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 505191306 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Çiçek ÜSTÜN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Kırıklı, Çatlaklı Kayada Açılacak Derin Yarın Şevlerin Tasarımı: Vaka Analizi, Suudi Arabistan, Riyad Örneği” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üy. Erkan BOZKURTOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Ömer ÜNDÜL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Abdullah Tolga ÖZER
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 26 Mayıs 2023
Savunma Tarihi : 12 Haziran 2023





Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca danışmalığımyı üstlenen tezimin her bir sayfasında emeği olan yardımını hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli hocam Dr. Öğr. Üy. Erkan BOZKURTOĞLU'na teşekkür ederim.

Bu araştırma kapsamında teknik bilgisi konusunda bana danışmanlık yaparak yol gösterdiği için Dr. Rasin DÜZCEER ve Yük. Müh. Alp GÖKALP'e teşekkür ederim.

Mühendislik jeolojisi konusunda ve tez sürecindeki sonsuz desteği için Arş. Gör. Gökhan ŞANŞ'a teşekkür ederim.

Tez sürecimde yardımlarımı esirgemeyen değerli iş arkadaşım Ahmet DİNÇ'e teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca her türlü desteği benden esirgemeyen her konuda arkamda duran sevgili ailem, Kevser ÜSTÜN, Faik ÜSTÜN, Mustafa Deniz ÜSTÜN, Güzin CÜRE, Demet CÜRE ve Veciha TAYLAN'a teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|-----------|
| ÖNSÖZ..... | vii |
| İÇİNDEKİLER..... | ix |
| KISALTMALAR..... | x |
| SEMBOLLER..... | xi |
| ÇİZELGE LİSTESİ..... | xiii |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | xv |
| ÖZET..... | xvii |
| SUMMARY..... | xix |
| 1. GENEL BİLGİLER..... | 1 |
| 1.1 Giriş..... | 1 |
| 1.2 Çalışmanın Amacı..... | 2 |
| 1.3 İnceleme Alanının Tanıtılması..... | 2 |
| 1.3.1 Coğrafi konum..... | 3 |
| 1.3.2 Jeomorfoloji..... | 4 |
| 1.3.3 İklim ve bitki örtüsü..... | 6 |
| 1.3.4 Nüfus ve yerleşim..... | 6 |
| 1.4 Önceki Çalışmalar..... | 7 |
| 2. GENEL JEOLJİ..... | 9 |
| 2.1 Stratigrafi..... | 9 |
| 2.2 Yapısal jeoloji..... | 11 |
| 3. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ..... | 15 |
| 3.1 Süreksizlik ölçümlerinin stereografik izdüşüm yöntemi ile incelenmesi..... | 15 |
| 3.2 Sondajlar..... | 19 |
| 3.3 Laboratuvar deneyleri..... | 28 |
| 3.4 Sondaj verileri ve laboratuvar deneylerine göre ortamın tanıtılması ve sınıflaması..... | 29 |
| 3.5 Kaya kütle sınıflamaları..... | 32 |
| 3.5.1 RMR sınıflaması..... | 33 |
| 3.5.2 Jeolojik dayanım indeksi..... | 35 |
| 3.5.3 Q sistem..... | 38 |
| 3.5.3.1 Q sistem sınıflamasına göre kazı destek ihtiyaçlarının değerlendirilmesi..... | 42 |
| 3.6 Şev stabilitesi için destek tasarımı..... | 43 |
| 3.6.1 Ankraj kök uzunluğu..... | 44 |
| 3.6.2 Test ankrajı halat sayılarının hesaplanması..... | 46 |
| 3.6.3 Test ankrajı tasarımı ve ankraj kabul testi..... | 47 |
| 3.6.4 İmalat ankrajları halat boyu ve sayısının hesaplanması..... | 49 |
| 3.6.5 Çelik ankraj plakası hesaplamaları..... | 50 |
| 3.6.6 İmalat ankrajlarının tasarımı..... | 52 |
| 4. ANALİZLER..... | 55 |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA | 71 |
| KAYNAKLAR..... | 75 |
| EKLER..... | 79 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 91 |



KISALTMALAR

| | |
|---------------------------|------------------------------------|
| c: | Kohezyon |
| D_e: | Eşdeğer Boyut |
| E: | Elastisite Modülü |
| ESR: | Kazı Destek Oranı |
| FEM: | Sonlu Elemanlar Metodu |
| FOS: | Güvenlik Sayısı |
| FR: | Çatlak Yüzdesi |
| GSI: | Jeolojik Dayanım İndeksi |
| YASS: | Yer Altı Su Seviyesi |
| J_a: | Eklem alterasyon puanı |
| J_n: | Eklem takım sayısı |
| J_r: | Eklem pürüzlülük puanı |
| J_v: | Çatlak sayısı |
| J_w: | Su azaltma faktörü |
| I_{s(50)}: | Nokta Yüğü Dayanım İndeksi |
| q_A: | İzin Verilebilir Taşıma Kapasitesi |
| R_f: | Pürüzlülük |
| R_i: | Dolgu |
| R_w: | Ayrışma |
| RMR: | Kaya Kütle Derecelendirme |
| RQD: | Kaya Kalite Göstergesi |
| SCR: | Sağlam Karot Verimi |
| SCR*: | Yüzey Koşulu Puanı |
| SR: | Yapı Puanı |
| SRF: | Gerilme İndirgeme Faktörü |
| TCR: | Toplam Karot Verimi |
| T_{ult}: | Nihai Birim Ankraj Kapasitesi |



SEMBOLLER

| | |
|----------------|-------------------------------|
| σ_B : | Tek Eksenli Basınç Dayanımı |
| λ_v : | Hacimsel Süreksizlik Frekansı |
| γ : | Birim Hacim Ağırlık |
| ω : | Su İçeriği |
| τ_{ult} : | Nihai Bağ Gerilimi |
| ϕ : | İçsel Sürtünme Açısı |
| $^{\circ}$: | Derece |
| $''$: | İnç |



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Çizelge 3.1 Sondaja ait genel bilgiler. | 19 |
| Çizelge 3.2 BH-R01 nolu sondaja ait ölçümler. | 21 |
| Çizelge 3.3 BH-R02 nolu sondaja ait ölçümler. | 23 |
| Çizelge 3.4 BH-R03 nolu sondaja ait ölçümler. | 25 |
| Çizelge 3.5 BH-R04 nolu sondaja ait ölçümler. | 28 |
| Çizelge 3.6 BH-R01 numunelerine yapılan laboratuvar deneyleri sonuçları. | 29 |
| Çizelge 3.7 BH-R02 numunelerine yapılan laboratuvar deneyleri sonuçları. | 29 |
| Çizelge 3.8 BH-R03 numunelerine yapılan laboratuvar deneyleri sonuçları. | 29 |
| Çizelge 3.9 BH-R04 numunelerine yapılan laboratuvar deneyleri sonuçları. | 29 |
| Çizelge 3.10 RMR puanlama sistemi (Bieniawski, 1989). | 34 |
| Çizelge 3.11 Çalışma alanındaki kayacın RMR sınıflaması. | 35 |
| Çizelge 3.12 Çalışma alanındaki kayacın GSI sınıflaması | 37 |
| Çizelge 3.13 Q sistemi parametreleri puanlamaları (Barton vd., 1974). | 38 |
| Çizelge 3.14 Q değerine bağlı kaya kütle sınıflaması (Barton vd., 1974). | 40 |
| Çizelge 3.15 Yapıya göre kazı destek oranı değerleri (Barton vd., 1974). | 41 |
| Çizelge 3.16 Çalışma alanındaki kayacın Q sistem sınıflaması. | 42 |
| Çizelge 3.17 Zemin ile enjeksiyon arasındaki tahmini ortalama ankraj kökü nihai çeper sürtünmesi değerleri (Sabatini vd., 1999). | 44 |
| Çizelge 3.18 Laboratuvarda gerçekleştirilen ankraj halatı çekme testi sonuçları. | 47 |
| Çizelge 3.19 BS (2015) ve BS (2018)'e göre test ankrajlarının halat sayısının hesaplanması. | 47 |
| Çizelge 3.20 BS (2015) ve BS (2018)'e göre imalat ankrajlarının halat sayısının hesaplanması. | 50 |
| Çizelge 3.21 Eklemlili kayalarda izin verilebilir taşıma kapasitesi. | 51 |
| Çizelge 3.22 Ankraj plakası hesaplamaları sonucu. | 52 |



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1 Proje yerleşim planı (Riyadh Digital City, 2023). | 2 |
| Şekil 1.2 Çalışma alanının yerbulduru haritası. | 3 |
| Şekil 1.3 Otoyol bağlantı viyadükleri. | 4 |
| Şekil 1.4 Çalışma güzergahı ve yakın çevresinin jeomorfolojik unsurlarını gösteren sayısal yükseklik modeli. | 5 |
| Şekil 1.5 Tuwaiq Yamaçları görselleri (Google Earth, t.y.). | 5 |
| Şekil 1.6 Çalışma alanı ve batısındaki kot farkını gösteren kesit. | 6 |
| Şekil 2.1 Stratigrafik kesit (ölçeksiz) (El-Sorogy vd. (2017)'den değiştirilerek alınmıştır). | 10 |
| Şekil 2.2 Afrika, Avrasya ve Arabistan Levhaları'nın konumları (Dünya Atlası, 2017). | 11 |
| Şekil 2.3 Orta Arabistan Yayı ve Tuwaiq Yamaçları'nın haritada konumunun gösterilmesi. | 12 |
| Şekil 2.4 Hicaz ve Asir Dağları'nın haritada konumunun gösterilmesi. | 13 |
| Şekil 2.5 Al-Qassim ve Al-Hassa Havzaları'nın konumu. | 14 |
| Şekil 3.1 Çalışma alanının 4+250 km'sindeki killi kireçtaşı tabakalarına ait görsel.. | 16 |
| Şekil 3.2 Çalışma alanının 4+361 km'sindeki killi kireçtaşı tabakalarına ait görsel.. | 16 |
| Şekil 3.3 Çalışma alanının 4+414 km'sindeki killi kireçtaşı tabakalarına ait görsel.. | 17 |
| Şekil 3.4 Tabakaların stereografik izdüşüm yöntemi ile gösterimi ve ana süreksizlik düzleminin belirlenmesi. | 18 |
| Şekil 3.5 Çalışma alanındaki süreksizliklerin düzlemsel kayma açısından analizi. .. | 18 |
| Şekil 3.6 Sondaj lokasyonları..... | 20 |
| Şekil 3.7 BH-R01 sondajında RQD değerinin derinlikle değişimi. | 21 |
| Şekil 3.8 BH-R02 sondajında RQD değerinin derinlikle değişimi. | 23 |
| Şekil 3.9 BH-R03 sondajında RQD değerinin derinlikle değişimi. | 25 |
| Şekil 3.10 BH-R04 sondajında RQD değerinin derinlikle değişimi. | 27 |
| Şekil 3.11 Sondaj verileri ve laboratuvar deneylerine göre ortamın sınıflaması. | 32 |
| Şekil 3.12 Jeolojik dayanım indeksi abağı (Sönmez ve Ulusay, 2002). | 36 |
| Şekil 3.13 GSI sınıflamasına göre Sönmez ve Ulusay (2002)'in önerdiği abağın kullanımı. | 37 |
| Şekil 3.14 D_e ve Q değerine göre yer altı açıklığının destek gereksinimi (Grimstad ve Barton, 1993). | 41 |
| Şekil 3.15 Q sistem sınıflamasına göre kazı açıklığının destek ihtiyacının belirlenmesi. | 43 |
| Şekil 3.16 Ankraj kabul testi genel görünümü..... | 48 |
| Şekil 3.17 Ankraj kabul testi uygulaması. | 48 |
| Şekil 3.18 Eklemlenmiş kayalarda, kayanın RQD değeri ile kayanın izin verilebilir taşıma kapasitesini gösteren grafik (Peck vd., 1974). | 51 |
| Şekil 3.19 İmalat ankrajlarına ait tasarımın boy ve en kesitleri. | 53 |
| Şekil 4.1 Roclab programında hesaplanan kaya kütlelerine ait parametreler. | 58 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.2 Desteksiz şev kazısının SRF = 1,39 olduğu durumda RS2 programında analizi. | 59 |
| Şekil 4.3 Topoğrafik koordinatları belirlenen alan içinde tasarlanan şev ve palye sistemi..... | 59 |
| Şekil 4.4 Şev tasarımının kazı aşamaları..... | 60 |
| Şekil 4.5 Destekli şev tasarımında yapılan birinci kademe kazının RS2 programında SRF analizi. | 61 |
| Şekil 4.6 Destekli şev tasarımında yapılan ikinci kademe kazının RS2 programında SRF analizi. | 61 |
| Şekil 4.7 Destekli şev tasarımında yapılan üçüncü kademe kazının RS2 programında SRF analizi. | 62 |
| Şekil 4.8 Destekli şev tasarımında yapılan dördüncü kademe kazının RS2 programında SRF analizi..... | 63 |
| Şekil 4.9 Destekli şev tasarımında yapılan beşinci kademe kazının RS2 programında SRF analizi. | 64 |
| Şekil 4.10 Destekli şev tasarımında yapılan altıncı kademe kazının RS2 programında SRF analizi. | 64 |
| Şekil 4.11 Destekli şev tasarımında yapılan yedinci kademe kazının RS2 programında SRF analizi..... | 65 |
| Şekil 4.12 Destekli şev tasarımında yapılan sekizinci kademe kazının RS2 programında SRF analizi..... | 66 |
| Şekil 4.13 Son durum için şev tasarımının RS2 programında kritik SRF analizi. | 67 |
| Şekil 4.14 Revize ankraj boyları ile şev tasarımının RS2 programında kritik SRF analizi. | 68 |

KIRIKLI, ÇATLAKLI KAYADA AÇILACAK DERİN YARMA ŞEVLERİN TASARIMI: VAKA ANALİZİ, SUUDİ ARABİSTAN, RİYAD ÖRNEĞİ

ÖZET

Suudi Arabistan'ın başkenti Riyad'a 45 km uzaklıkta yeni bir şehir ve eğlence merkezi kurulması planlanmaktadır. Proje kapsamında şehre ulaşım için inşa edilecek otoyol güzergâhı, bölgenin jeomorfolojik özellikleri nedeni ile 200 metreye varan bir kot farkına rastlamaktadır. Kot farkının azaltılması ve otoyolun güvenli bir şekilde inşa edilebilmesi için bölgede yol yarması yapılması planlanmıştır.

Çalışma alanında yapılacak yol yarması için saha araştırmaları yapılmıştır. Bu kapsamda yol yarmasının çevresinde dört adet sondaj gerçekleştirilmiş, sondajdan çıkarılan kaya numuneleri incelenmiş ve numuneler üzerinde saha ve laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemeler ve deneyler sonucunda çalışma alanındaki kırıklı, çatlaklı killi kireçtaşı kayasının ortalama tek eksenli basınç mukavemetinin (σ_B) 18,7 MPa ve elastisite modülünün (E) 6300 MPa olduğu anlaşılmıştır. Sahada yapılan deneyler ile elde edilemeyen diğer jeomekanik parametreler ise taştan kayaya yaklaşımı çerçevesinde RocLab (2015) bilgisayar programı ile saptanmıştır. Buna göre; kayacın kohezyonu (c) 230 kPa ve içsel sürtünme açısı (ϕ) 25° olarak bulunmuştur.

Sahada yapılan ölçümlerden elde edilen veriler ile bölgedeki kayaçlar, kaya kütle derecelendirme, jeolojik dayanım indeksi ve Q sisteme göre sınıflandırılmıştır. Her üç sınıflama sonucuna göre çalışma sahasındaki kaya kütlesi orta kaliteli olarak tayin edilmiştir. Ayrıca Q sistem sınıflamasına göre bu tip kayaçta gerçekleştirilecek kazılarda şev stabilitesinin sağlanması için destek sistemi, ilgili abaklar vasıtasıyla bulunmuştur. Açılacak şevin gerçekten desteğe ihtiyaç duyup duymadığını kontrol etmek adına yapılması planlanan desteksiz palyeli şev sistemi, Rocscience RS2 (2023) bilgisayar programında analiz edilmiştir. Analiz sonucuna göre kritik SRF değeri 1,4 olarak bulunmuştur. Şevlerin desteksiz duraylılığı için minimum 1,5 güvenlik sayısı gerektiğinden şevlerin desteklenmemesi durumunda duraylı olmayacağı ve kazının güvenli yapılamayacağı anlaşılmıştır.

Çalışma alanında yapılacak şev kazısı için destek sistemi tasarlanmıştır. Literatürde önerilen yöntemlere göre ankrajlı şev sistemi tasarlanarak yol yarmasının yapılmasına karar verilmiştir. Ankrajlar, 7 halatlı, 10 m serbest boy, 6 m kök boy ve 3 m aralıklarla olacak şekilde tasarlanmıştır. Ankrajların bu parametrelerle şev yüzeylerindeki çalışma yükünü taşıyabileceğini saptamak adına sahada ankraj testi gerçekleştirilmiştir. Test sonucuna göre ankraj halatlarında gözlenen uzama değerleri izin verilen sınırlar içinde kalmaktadır. Böylece ankrajların çalışma yükünü karşılayabildiği saptanmıştır.

Yapılan bu ankrajlı şev tasarımının, şevde duraylılığı sağladığını kanıtlamak adına Rocscience RS2 programında analizler yapılmasına karar verilmiştir. Proje tasarımına göre güvenlik sayısını arttırmak için kazı kademeli olarak yapılacaktır. Buna göre her kademedeki kazı tamamlandıktan sonra aynı kademedeki ankraj imalatları yapılacak,

ardından bir alt kademede ki kazıya geçilebilecektir. Bu proje tasarımına göre her kademe, Rocscience RS2 programında analiz edilmiş ve her bir kademedenin minimum SRF değerini sağlayıp sağlamadığı irdelenmiştir. Ankrajlar ile desteklenmiş şev sistemi, Rocscience RS2 programında incelendiğinde her bir kazı kademesinde minimum SRF değeri sağlanmıştır. Kazının en alt kademesinde yapılan analiz sonucu kritik SRF değeri 1,52 olarak tayin edilmiştir. Ancak yapılan analiz sonucunda bazı kazı kademelerinde ankraj köklerinin deformasyon zonu içinde kaldığı saptanmıştır. Bu nedenle literatürde önerilen analitik yöntemlerle tasarlanan ankrajlar güvenlik sayısı bakımından yeterli görünse de yapılan analizler sonucu ankraj köklerinin deformasyon zonunun içinde kaldığı durumlarda analitik yöntemlerin tasarımda yetersiz kaldığı belirlenmiş ve bu durumlarda ankraj boylarının uzatılması önerilmiştir.



DESIGN OF DEEP CUT SLOPES IN FRACTURED, JOINTED ROCKS: CASE STUDY OF RIYADH, SAUDI ARABIA

SUMMARY

A new city and entertainment centre are planned to be established 45 km away from Riyadh, the capital of Saudi Arabia. By creating a modern urban hub catering to the needs of residents and visitors, Saudi Arabia aims to overcome the dependency on petrol. The new city consists of entertainment parks and accommodation areas. One of the key aspects of the project is the construction of a highway route that connects the new city to Riyadh and surrounding areas. However, the region's geomorphological characteristics present a significant challenge, as the highway encounters an elevation difference of up to 200 meters due to the natural terrain variations. To address this challenge, decrease the elevation difference and ensure the safe construction of the highway, a road cut is planned for the area. The road cut will involve the removal of a significant amount of rock to reduce the elevation difference. Before commencing such a task, it is essential to gather detailed information about the geological conditions and the properties of the rock mass in the working area.

To obtain this information, thorough field investigations have been conducted. Four boreholes have been drilled around the road cut site, allowing geological engineers to extract rock samples for examination. These samples have been subjected to field and laboratory tests to determine their geomechanical properties. The rock in the work area has been identified as fractured, jointed soft clayey limestone, with an average uniaxial compressive strength (σ_B) of 18.7 MPa and an elastic modulus (E) of 6300 MPa. These parameters provide crucial insights into the strength and stiffness of the rock, which are vital for designing the road cut and support systems.

In addition to the field and laboratory tests, certain geomechanical parameters that cannot be obtained directly from the samples have been determined using specialized computer programs. The RocLab (2015) program has been utilized to determine the cohesion (c) of the rock, which has been found to be 230 kPa. The internal friction angle (ϕ) has also been determined through the program, yielding a value of 25°. These parameters play a significant role in understanding the behaviour of the rock mass and its stability under different loading conditions.

The data obtained from field measurements and laboratory tests have then been used to classify the rock masses in the area according to three widely used systems: the Rock Mass Rating (RMR), Geological Strength Index (GSI), and Q system. These classification systems consider various geological and geomechanical parameters to assess the quality and stability of the rock mass. In this case, all three systems have indicated that the rock mass in the study area is of fair quality. This information is crucial for further design considerations and support system selection.

The Q system classification, in particular, has provided valuable guidance for determining the appropriate support system required for the excavation in this type of rock. Through the use of charts and empirical relationships, the Q system helps

engineers to evaluate the stability and design suitable support measures for excavation projects. The charts have suggested the need for an anchored slope system to ensure the stability of the slopes during the construction of the road cut.

To assess whether the slope truly requires a support system to be excavated safely, the unsupported bench slope design has been analysed in the Rocscience RS2 (2023) computer program. According to the results of the analysis, the critical strength reducing factor (SRF) value has been found to be 1.4. Since a minimum safety number of 1.5 is required for the stability of the slopes without a support system, it is concluded that if the slopes are not supported, there will be stability problems during rock cut excavation.

Considering the recommendations found in the literature, an anchored slope system has been chosen for the excavation of slopes in the study area. The design involves the installation of anchors with specific parameters, including 7 strands, 16 meters of total length, 10 meters of free length, 6 meters of bond length, and 3 meters of out-of-plane spacing. These parameters have been carefully selected in accordance with the suggested analytical methods to ensure the stability of the cut slopes and the capacity of the anchors to withstand the working load.

To validate the suitability of the designed anchors and their ability to bear the working load on the slope surfaces, an anchor test has been conducted in the field. During the test, the elongation values in the anchor strands have been monitored and compared against the allowed limits. The results of the test have indicated that the observed elongation values have remained within the acceptable range, confirming that the anchors can effectively withstand the working load and provide the necessary support to the slopes.

To further demonstrate the stability of the designed anchored slope, analyses have been performed using specialized computer program, Rocscience RS2. This program utilizes finite element method to simulate the behaviour of the slopes under different loading and boundary conditions. In the case of this project, the excavation has been planned to be carried out in stages, allowing for increased factor of safety throughout the process. After completing the excavation at each stage, anchor installations will be performed, followed by the excavation of the lower stage.

Each stage has been separately analysed in the Rocscience RS2 program based on this project design to evaluate the minimum SRF value and assess the stability of the slopes. The analysis results for the anchored slope system have confirmed that each stage meets the minimum SRF value. In the Rocscience RS2 program analysis for the lowest stage of excavation, the critical SRF value has been determined to be 1.52. However, as a result of the analysis, it has been determined that the anchor bonds remain within the deformation zone at some excavation levels. Therefore, although the anchor lengths designed with the analytical methods proposed in the literature appear to be sufficient, it has been determined that analytical method may be insufficient in cases where the anchor bonds remain within the deformation zone. In such cases, it is recommended to extend the anchor lengths in design.

In conclusion, the establishment of a new city and entertainment centre near Riyadh, Saudi Arabia, has necessitated the construction of a highway route that encounters significant elevation differences. Through careful field investigations, geological engineers have been able to determine the properties of the rock mass in the work area and classify it as soft clayey limestone. The geomechanical data obtained from field tests, laboratory experiments, and specialized computer programs have played a

crucial role in designing an appropriate support system for the excavation of slopes. The chosen support system has involved the installation of anchors, and a field anchor test has confirmed their suitability and ability to withstand the working load. Analyses using specialized computer program have verified the stability of the designed anchored slope at each stage of excavation. The results have indicated that the critical SRF values have been met, ensuring the stability and safety of the slopes throughout the construction process. However, depending on the analysis, the anchor bonds have remained in the deformation zone, concluding that the designed anchor lengths should be extended to move the anchor bonds away from the deformation zone even if the results meet the minimum SRF value.





1. GENEL BİLGİLER

1.1 Giriş

İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tez çalışması kapsamında hazırlanan bu çalışmada, otoyol yapımının planlama ve projelendirme aşamalarında yönlendirici olması amacı ile kurgulanan mühendislik jeolojisi modeli ile kırıklı, çatlaklı kayada yapılacak yol yarmasında tasarlanan şevlerin sonlu elemanlar yöntemi ile duraylılıklarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede, Suudi Arabistan'da Vision 2030 programı kapsamında başkent Riyad'a 45 km uzaklıktaki proje kapsamında yapılacak otoyol inşaatı için tasarlanan yol yarması şevlerinin duraylılığı çalışılmıştır.

Saudi Vision 2030, Suudi Arabistan Krallığı tarafından ekonomiyi çeşitlendirmek için tasarlanmış stratejik bir programdır. Suudi Arabistan'ın gelir kaynağının büyük bölümünün sadece petrole bağlı olması nedeniyle bu yenilikçi programa ihtiyaç duyulmuştur. Amaç, yeni şehirler kurarak daha fazla turist çekmek, canlı bir toplum yaratmak ve ekonomiyi çeşitlendirmektir. Ülke çapında birçok bölgede kurulacak yeni şehir merkezleri sayesinde hem yerli hem de turistik nüfusun artırılması hedeflenmektedir. Bu sayede istihdamın artırılmasının yanı sıra turizmden elde edilen gelir de büyük ölçüde artmış olacaktır. Bu dönüşüm planının hedeflerine ulaşmak için bu proje (Şekil 1.1) gibi onlarca devasa proje tasarlanmış ve bunların inşaatlarına başlanmıştır (Vision Realization Program, t.y.).

Çalışmaya konu olan proje, Saudi Vision 2030 kapsamında inşaatına ilk başlanan kamu yatırımlarından biridir. 2019'da inşaatına başlanan proje, 334 km²'lik alana yayılmakta olup içinde birçok eğlence alanı, park ve konaklama merkezi içeren 5 ana fazdan oluşmaktadır. Projenin ilk fazı olan eğlence merkezi içerisinde 45 ayrı proje barındırmakta olup ilk faz inşaatının 2023'te tamamlanarak açılması planlanmaktadır. Projenin 2030 itibarıyla dünyanın en büyük turizm destinasyonlarından birisi olması beklenmektedir (Riyadh Digital City, 2023).

Çalışma alanı ve çevresinin jeomorfolojik koşulları nedeni ile proje alanında inşa edilecek otoyolun yapılabilmesi için güzergahın belli bölümünde yol yarması

yapılması gerekmiştir. Çöl ortamında tamamen sıfırdan kurulan bu Şehir için inşa edilen bu yol hattı, bÖlgeye Riyad ve King Khalid Uluslararası Havaalanı'ndan direk ulaşımı sağlayacaktır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Proje yerleşim planı (Riyadh Digital City, 2023).

AŐađıda sunulan alt baŐlıklar tezin amaçlanan doğrultuda yÖrÖtÖlmesi için seçilmiş olan yÖntemi açıklamakta ve incelenen gÖzergâh ve etkileŐimde olduğu çevreyi başlıca coğrafik, jeomorfolojik, iklim ve bitki Örtüsü niteliklerinde tanımlamaktadır.

1.2 Çalışmanın Amacı

Bu tez çalıŐmasının amacı, Riyad'da yapılacak otoyol gÖzergâhında kırıklı, çatlaklı kayalarda tasarlanan yol yarması Şevlerinin duraylılığını sonlu elemanlar yÖntemi ile incelemektir. Bu inceleme yÖntem bÖtÖnlÖğünde Őevlerde duraysızlık oluŐması durumunda en güvenli ve en ekonomik Şekilde yapılabilecek tasarım için Önerileri de kapsamaktadır.

1.3 İnceleme Alanının Tanıtılması

Bu bÖlÖmde çalışma alanının coğrafik konumu, en yakın yerleşim yerleri, çevresinin nüfusu, iklim ve bitki Örtüsü ve jeomorfolojik yapısından bahsedilecektir.

1.3.1 Coğrafi konum

Çalışma sahası, Riyad şehir merkezinin 45 km batısındadır. 16,5 km batıda Dhurma (Zurma) en yakın kasabadır. Ayrıca 18,0 km güneyde Qusour Al Moukbel ve 27,0 km doğuda Dhahrat Laban en yakın diğer kasabalardır. Şekil 1.2, çalışma alanı ve güzergâhının Google Earth görüntüsünü göstermektedir. Çalışmaya konu olan yol güzergâhı, Km: 4+041 ile Km: 5+175 arasında kalmaktadır.



Şekil 1.2 Çalışma alanının yerbulduru haritası.

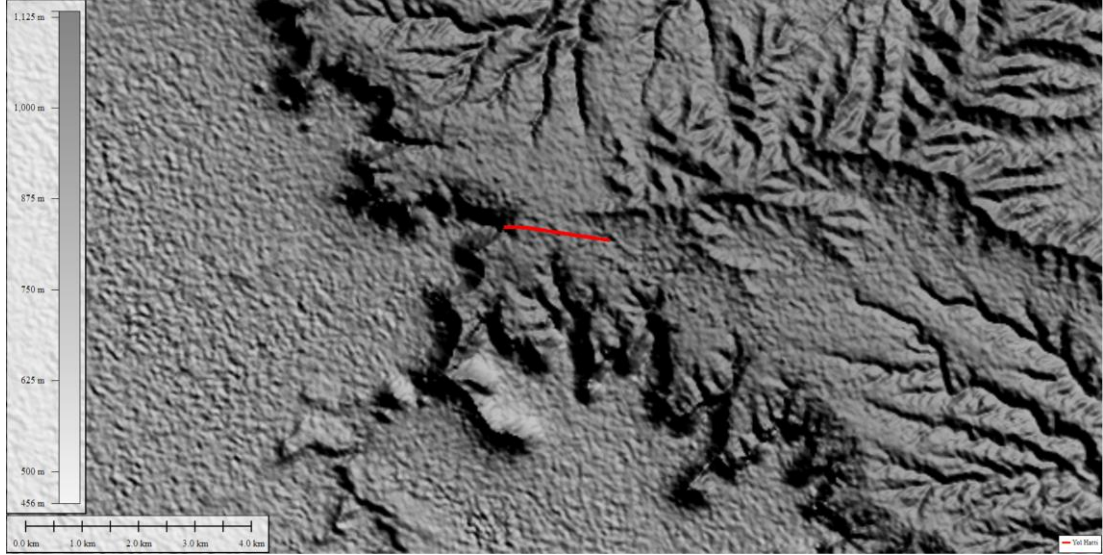
1.3.2 Jeomorfoloji

Çalışma alanı genel olarak engebelidir. Çalışılan yol güzergahının başlangıcı olan Km: 4+041'in hemen batısında kot farkı görülmektedir. Güzergâh boyunca Batı'dan Doğu'ya giderken yaklaşık 800 metrelik mesafede kot, +750'den +950'ye çıkmaktadır. Bu ani kot değişimi nedeniyle projede yol yarması yapılarak aradaki kot farkı düşürülmüş ve çalışma alanının başlangıcı olan Km: 4+041'in batısında inşa edilen viyadüklere, projedeki otoyolun bağlantısının daha rahat yapılması amaçlanmıştır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 Otoyol bağlantı viyadükleri.

Çalışma alanı ve çevresini gösteren sayısal yükseklik modeli, Şekil 1.4'te görülmektedir. Burada görüldüğü üzere sadece çalışma alanı değil bütün saha boyunca Kuzeybatı – Güneydoğu doğrultulu bir kot farkı görülmektedir. Bu yapı Tuwaiq Yamaçları olarak adlandırılmaktadır ve Arabistan levhasının geçirdiği tektonik hareketler sonucu oluşmuştur. Tuwaiq Yamaçları'nın çalışma alanında yarattığı kot farkı, proje kapsamında yapılacak otoyolun inşaatını zorlaştıran etmendir. Tuwaiq Yamaçları'nın Google Earth (t.y.)'ten alınmış görselleri, Şekil 1.5'te gösterilmektedir.

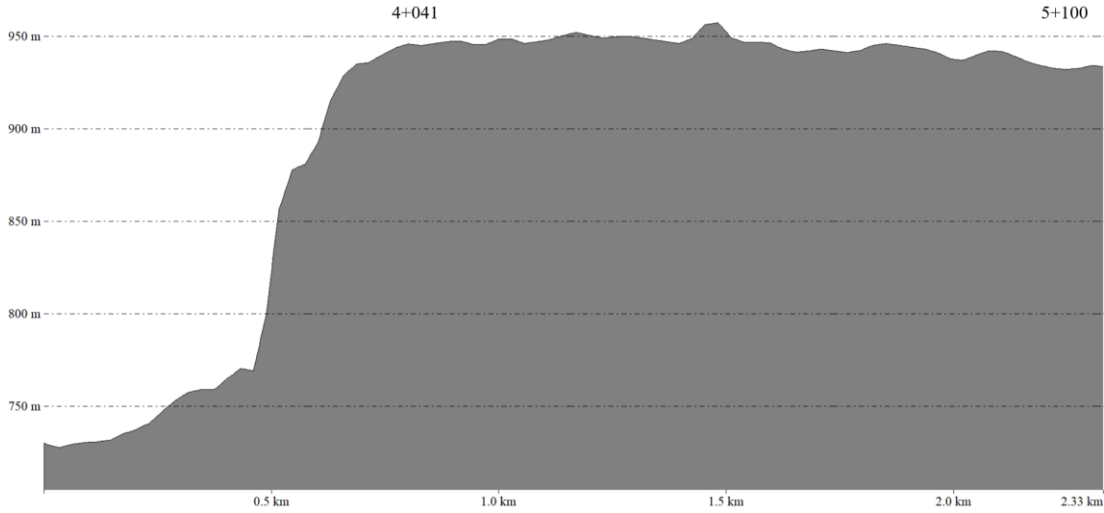


Şekil 1.4 Çalışma güzergahı ve yakın çevresinin jeomorfolojik unsurlarını gösteren sayısal yükseklik modeli.



Şekil 1.5 Tuwaiq Yamaçları görselleri (Google Earth, t.y.).

Tuwaiq Yamaçları nedeni ile çalışma alanına dahil olan ve yol yarmasının yapılacağı otoyol hattı boyunca kot, +925 ile +975 arasında değişmektedir. Çalışma alanında yol yarması yapılmadan önceki ve batısındaki yükseklik değişikliğini gösteren kesit, Şekil 1.6'da verilmektedir.



Şekil 1.6 Çalışma alanı ve batısındaki kot farkını gösteren kesit.

1.3.3 İklim ve bitki örtüsü

Riyad'da çöl iklimi hâkimdir. Neredeyse hiç bitki örtüsü görülmemektedir. Yıllık ortalama sıcaklık 26°C'dir. Ortalama 36°C sıcaklıkla en sıcak ay Temmuz'dur. Ortalama 14°C sıcaklıkla en soğuk ay Ocak'tır (Climate Data, t.y.).

Yıl boyunca çok az yağmur görülmektedir. Yıllık ortalama yağış miktarı yaklaşık 100 mm'dir. Ancak yıl boyunca düzenli şekilde neredeyse hiç yağış görülmemesine rağmen Riyad'da zaman zaman bölgesel olarak ani sel baskınlarına rastlanmaktadır. Bu tür sel baskınlarında Riyad'da birkaç saat içerisinde neredeyse tüm yıl boyunca düşen miktarda yağmur görülmektedir. Riyad'da yaşanan sel durumlarında can kayıpları dahi yaşanmaktadır (Hill, 2013).

1.3.4 Nüfus ve yerleşim

Çalışma alanı Riyad şehri içerisinde, ancak şehir merkezine 45 km uzaklıktadır. Çalışma alanı kapsamında yerleşim yeri bulunmamaktadır. Riyad ise 1973 km²'lik bir yüzölçümüne sahiptir (Riyadh, 2023). 2023 yılında yaklaşık 9 milyon kişilik bir nüfus bulunmaktadır (World Population Review, t.y.).

Saudi Vision 2030 programı kapsamında inşa edilecek proje ile Riyad ve çevresinde hem yerli hem de turistik nüfus artırılarak istihdamın ve gelirin artırılması hedeflenmektedir (Vision Realization Program, t.y.).

1.4 Önceki Çalışmalar

Suudi Arabistan'da ilk jeolojik araştırmalar, Philby tarafından I. Dünya Savaşı sırasında yapılmıştır. Philby'nin ülkenin iç kesimlerinde sarp kayalıklarda yaptığı ilk araştırmalar, denizel karbonatlı kayaçların bölgede bolca olduğunu göstermiştir. Philby'nin araştırmaları sırasında karşılaştığı kayaçlar bölgede petrol olabileceğini göstermiştir. Bunun üzerine Suudi Arabistan hükümeti, 1933'te Amerika'yla bir anlaşma imzalamış ve iki jeolog, Steineke ve Bramkamp, petrol araştırmaları için ülkenin kıyı hattı boyunca yüzey haritalamasına başlamıştır. Günümüzde Suudi Arabistan jeolojisiyle ilgili bildiğimiz çoğu veri, Aramco Firması'nın bu iki jeoloğu tarafından ortaya çıkarılmıştır (Powers vd., 1966).

1937'de Orta Kretase yaşlı kayaçların olduğu derinliğe kadar gerçekleştirilen sondajla ilk defa sahada petrole rastlanmıştır. Dokuz saha ekibiyle yüzey haritalaması, sismografik araştırmalar ve petrol arama sondajları 1940'a kadar hızlanarak devam etmiştir. İkinci Dünya Savaşı'nın bitmesinden sonra araştırma çalışmaları eski hızına kavuşmuş zaman içinde açık denizde de sondaj çalışmaları yapılmıştır. 1963 yılı sonunda Aramco, ülke geneline yayılmış 11 farklı bölgede 16 adet verimli petrol rezervuarı keşfetmiştir (Powers vd., 1966).

Suudi Arabistan Plakası, Prekambriyen yaşlı magmatik ve metamorfik kaya kompleksinden oluşmaktadır. Arabistan Yarımadası'nın tamamının tabanında bu Prekambriyen yaşlı kayaçlar gözlenmektedir. Arap Kalkanı adı verilen bu Prekambriyen yaşlı kayaç kompleksi, Paleozoyik Dönemi'nin başlangıcından beri oldukça durağan kalmakla birlikte sadece hafif bir epirojenik harekete maruz kalmıştır. Bunun sonucunda bu sağlam kaya kütleleri üzerine; yataya yakın kalın bir kıtasal ve sığ denizel tortul kayaçlar çökelmıştir. Kambriyen ile Pliyosen arasında yaşları değişen bu tortul kayaçlar, Arabistan Yarımadası'nın orta ve doğusunda gözlenmekte ve ülkenin yaklaşık 2/3'ünde yüzlek vermektedir. Bu bölgelerde yer yüzeyi yapısı, kuzey-güney doğrultulu ve yüksek dayanımlı bantlar şeklinde kireçtaşları ile örtülmüş yamaçlardan oluşmaktadır. Buralardaki kaya birimleri yer yer 500 ila 1000 km boyunca hiç kesinti olmadan yüzlek vermektedir (Powers vd., 1966).

Arabistan Yarımadası'ndaki tortul kayaçlar, litolojik farklılıklar ve belirgin uyumsuzluklar nedeniyle 8'e ayrılmaktadır: Alt Paleozoyik klastik kayaçları, Permilen ve Triyas klastik kayaçları, Alt ve Orta Jura klastik ve karbonat kayaçları, Üst Jura ve erken Alt Kretase karbonat kayaçları, geç Alt Kretase klastik kayaçları,

Orta Kretase klastik kayaçları, Üst Kretase ve Eosen karbonat kayaçları ve Miyosen ve Pliyosen klastik kayaçları (Brown ve Jackson, 1953).

Orta Arabistan'da yüzlek veren Jura yaşlı kayaçların en önemli özelliği, evaporit koşulları, karbonat çökmesini kesintiye uğratarak anhidrit ve kalkeranitin düzenli birikimlerine neden olmuştur. Bunların sonucunda oluşan Arap Formasyonu, gözenekli karbonat birimlerinin içinde milyarlarca varillik petrol rezervi barındırmaktadır (Steineke vd., 1958).



2. GENEL JEOLJİ

Bu bölümde çalışma alanı ve çevresinde görülen kayaçların jeolojik özellikleri, stratigrafisi ve yapısal jeolojisi anlatılacaktır.

2.1 Stratigrafi

Dhruma Formasyonu, ilk defa Max Steineke tarafından 1937'de Marrat, Tuwaiq Dağı, Hanifa, Jubaila, Arab ve Hith üyeleri ile birlikte Tuwaiq Formasyonu'nun bir üyesi olarak tanımlanmıştır. 1945'te R. A. Bramkamp, her bir üyeyi formasyona yükseltmiş ve Dhruma Formasyonu ilk defa tanımlanmıştır (Steineke vd., 1958).

Powers (1966) vd., Jura yaşlı Dhruma Formasyonu'nda yapmış oldukları çalışmalar sonucunda formasyonu, litostratigrafik ve fosil farklılıklar doğrultusunda Alt, Orta ve Üst olmak 3 üye ve 7 birime (D1-D7) ayırmıştır.


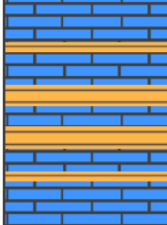
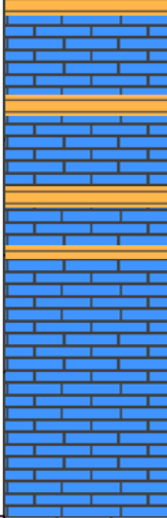
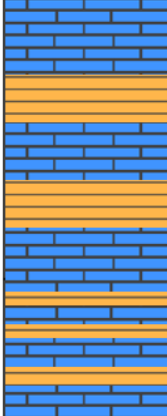

Alt Dhruma birliği D1 ve D2 birimlerinden oluşmaktadır. İstifin yaklaşık kalınlığı 150 m olup Marrat Formasyonu'nun üzerinde yer alır. D1 birimi 50 metre kalınlığa sahiptir. Genellikle Ammonitli kil taşları, laminalı dolomitlere ve kalkarenitlerden oluşur. D2 birimi ise 100 m kalınlıkta olup yeşil kil taşları ile fosilli kireçtaşlarından oluşmaktadır (Al-Husseini, 1997).

Orta Dhruma birliği D3-D4-D5-D6 birimlerinden oluşmaktadır. D3 birimi yaklaşık 50 m kalınlığında olup, iri taneli kalkarenit, Scleractinia mercan ve Ekinoid fosilleri içeren kireçtaşından oluşmaktadır. D4 birimi yaklaşık 40 m kalınlığa sahiptir. Bu birim ise fosilli kalsirüdit, iri taneli kalkarenit, çamurtaşları ve nodüler kireçtaşından oluşur. D5 birimi ise yaklaşık 40 m kalınlıkta fosilli (Ammonit) ve killi kireçtaşlarıdır. D6 birimi Orta Dhruma birliğinin son üyesi olup 50 m istif kalınlığına sahiptir. Bu birimin en önemli özelliği daha önceki birimlerde gözlenmeyen kabuklu fosil ailesi üyeleri Brakiyopodlar ve Gastropodlar'a sıkça rastlanmasıdır (Arkell, 1952).

Üst Dhruma formasyonunun en üst seviyesinde yer alan D7 birimi, 2 üye içerir. Bunlar, Atash ve Hisyan Üyeleridir. Atash Üyesi yaklaşık 20 metre istif kalınlığına sahiptir. Spari kalkarenitli mercan ve foraminifera ve stromatoporoid içeren mikritik

kireçtaşlarından oluşmaktadır. Hisyan, Atash Üyesi'ni üzerleyerek istifin en üst noktasını oluşturur. Yaklaşık 60 metre kalınlığı sahip olan üye genellikle killi mercan içeren miktirik kireçtaşlarından ve istiridye ve Brakiyopod içeren sparitik kireçtaşlarından oluşmaktadır (Le Nindre vd., 1990).

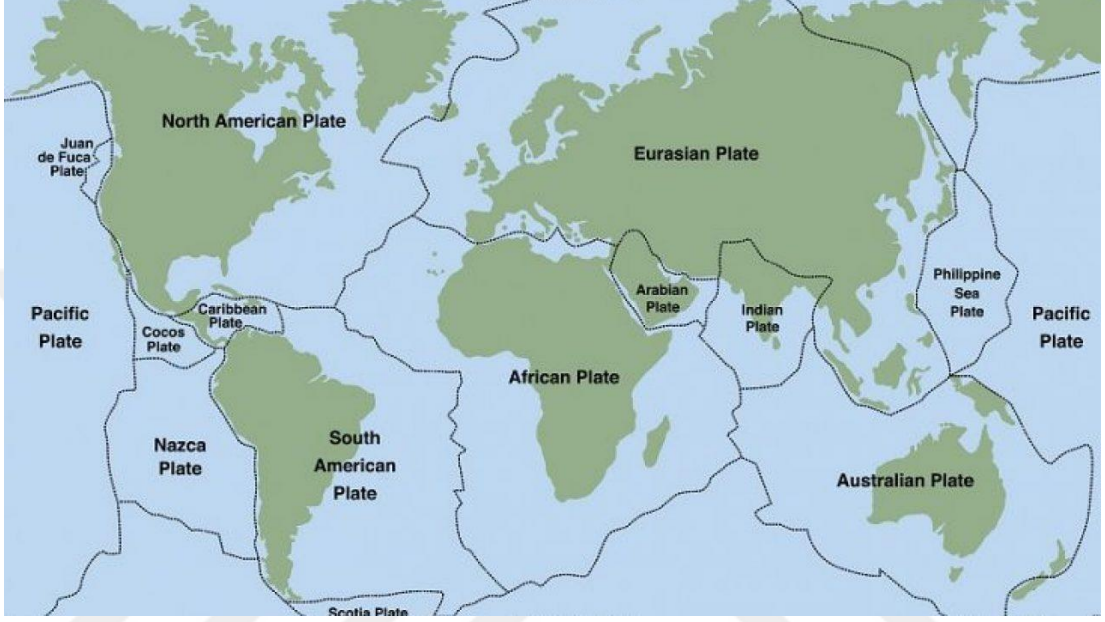
Çalışma alanına ait genelleştirilmiş stratigrafik kesit Şekil 2.1'de verilmiştir.

| Yaş | Formasyon | Üye | Birim | Litoloji | Tanım | | | | | | | |
|-----------|-----------|------------|-------|---|--|--|---|---|---|------------|---|-----------------------------|
| Orta Jura | Dhruma | Tuwaiq | T1 |  | Masif kireçtaşı | | | | | | | |
| | | Üst Dhruma | D7 |  | Mercan fosilleri içeren Kalkemit, foraminifera içeren kireçtaşı, iri stromatopoid içeren killi kireçtaşı ve istiridye ve brakiyopod içeren kireçtaşı | | | | | | | |
| | | | | Orta | D6, D5, D4, D3 |  | Kalkemit, mercan fosilleri içeren kireçtaşı, killi kireçtaşı ve ammonit – kabuklu fosiller içeren kireçtaşı | | | | | |
| | | | | | | Alt Dhruma | D2, D1 |  | Ammonitli kiltaşları, laminalı dolomitler ve yeşil kiltaşları ile ardalanmalı fosilli kireçtaşı | | | |
| | | | | | | | | Erken Jura | Marrat | Üst Marrat |  | Tabakalı karbonatlı kayalar |

Şekil 2.1 Stratigrafik kesit (ölçeksiz) (El-Sorogy vd. (2017)'den değiştirilerek alınmıştır).

2.2 Yapısal jeoloji

Suudi Arabistan, Afrika, Avrasya ve Arabistan levhaları olmak üzere üç tektonik levhanın kesiştiği noktada bulunmaktadır. Levha sınırları siyah çizgilerle Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Ülke genelinde görülen karmaşık jeolojik yapıların tümü bu levhaların hareketi nedeni ile oluşmuştur.



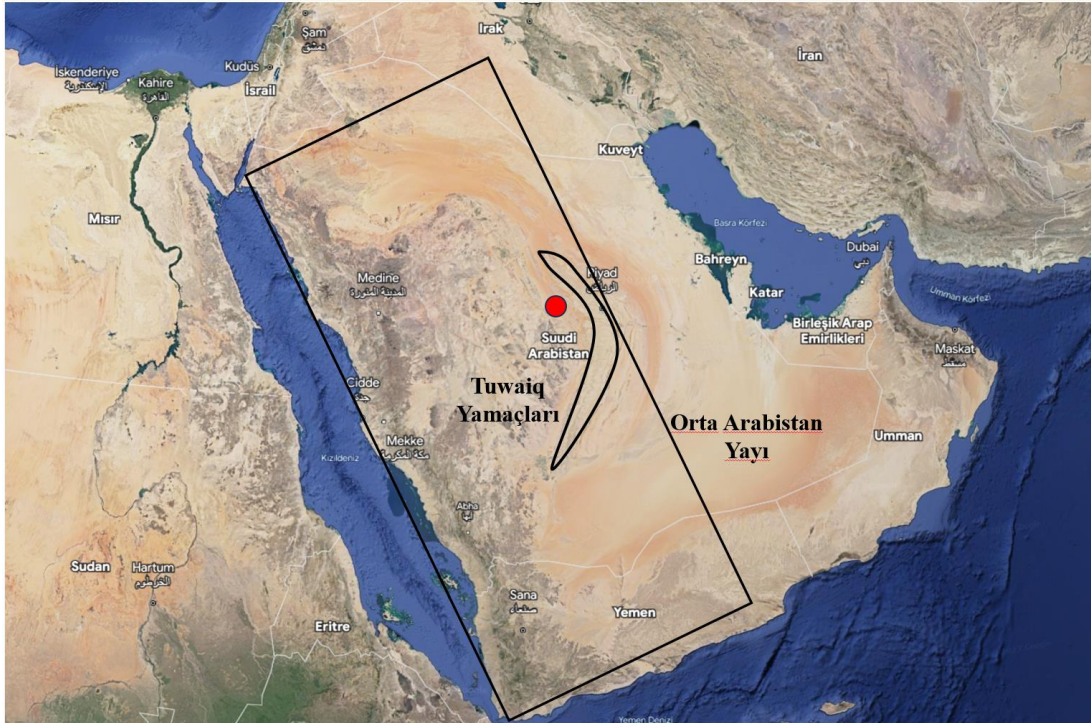
Şekil 2.2 Afrika, Avrasya ve Arabistan Levhaları'nın konumları (Dünya Atlası, 2017).

Suudi Arabistan'ın topoğrafyasını milyonlarca yıl boyunca şekillendiren jeolojik süreçlerin sonucu olarak birçok yapı oluşmuştur. Geç Devonyen döneminde Gondwana ve Lavrasya kıtalarının çarpışması sonucu gerçekleşen Hersiniyen Orojenezi, Orta Arabistan Yayı (Central Arabian Arch) adında bir jeolojik yapıyı oluşturmaya başlamıştır. Yayın oluşumu, Jura döneminde de devam etmiştir. Bu yay, 2000 km uzunluğunda ve 200 km genişliğinde olup Suudi Arabistan'da görülen en önemli ve büyük jeolojik yapılardan biridir. Yay, tektonik kuvvetler nedeni ile birçok büyük fay içermekte olup yüksek bir rakıma sahiptir. Afrika ve Arabistan Levhaları'nın çarpışması sonucu oluşan sıkışma kuvvetleri, kayalarda kıvrımlanmalara neden olmuştur. Ayrıca Suudi Arabistan coğrafyasında dik kayalıklarının ve engebeli arazisinin oluşmasını sağlamıştır. Orta Arabistan Yayı, bu tektonik aktivite sonucu oluşan en önemli yapılardan biridir (Brown ve Kellogg, 1979). Şekil 2.3’de Orta Arabistan Yayı ve kırmızı nokta ile çalışma alanının konumu görülmektedir.

Orta Arabistan Yayı ayrıca Kızıl Deniz Rifti'nden de etkilenmektedir. Yayın batısında bulunan Kızıl Deniz Rifti ayrılan levha sınırıdır. Kızıl Deniz'deki bu riftleşme, Arap Yarımadası'nda kuzey-güney doğrultulu faylanmaların oluşmasının başlıca nedenidir (Powers vd., 1966).

Orta Arabistan Yayı'nın en önemli bölümlerinden biri, 800 km uzunluğunda Tuwaiq Yamaçları'dır (Tuwaiq Escarpment) (Şekil 2.3). Bu yamaç, Mesozoyik'te sığ bir denizel ortamda çökelmiş tortul kayaların yükselmesiyle oluşmuştur. Arazinin yükselerek tortul kayaların açığa çıkması, Arabistan ve Avrasya levhalarının çarpışması sonucu olup bu durum kayalarda kıvrımlanmalara neden olmuştur. Bunun sonucunda oluşan antiklinal ve senklinaller, yamaçtaki mostralarda gözlenir. Tuwaiq Yamaçları'nın yaklaşık 145 ila 65 milyon yıl önce, Kretase döneminde oluştuğu düşünülmektedir (Powers vd., 1966).

Tuwaiq Yamaçları'nın kuzeybatısında bulunan ve kalın bir karbonat kaya dizisi olan Triyas-Permiyen yaşlı Al-Khuff Formasyonu da benzer şekilde Arabistan Levhası'nın ve Avrasya Levhası'na doğru itilerek oluşan sıkışma sonucu yüzeye çıkmıştır. Bu tektonik hareket, formasyonda kıvrım ve bindirme fayları oluşmasına neden olmuştur.



Şekil 2.3 Orta Arabistan Yayı ve Tuwaiq Yamaçları'nın haritada konumunun gösterilmesi.

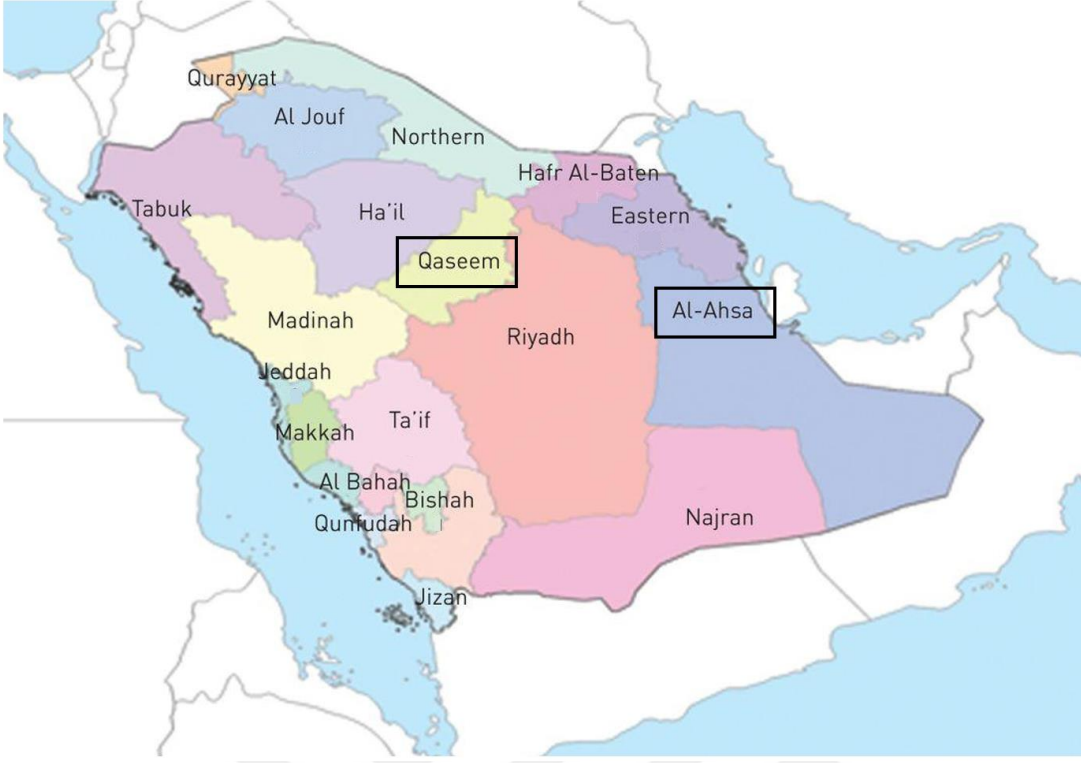
Tuwaiq Yamaçları'nın batısında bulunan Hicaz ve Asir Dağları'nın oluşumu yine Arabistan ve Avrasya Levhaları'nın çarpışması sonucu oluşmuştur. Tektonik etkiler sonucu, kayalar yükselmiş, kıvrılmış ve dağları oluşturmuştur (Brown ve Kellogg, 1979). Hicaz ve Asir Dağları Şekil 2.4'te görülmektedir.



Şekil 2.4 Hicaz ve Asir Dağları'nın haritada konumunun gösterilmesi.

Suudi Arabistan'ın kuzey ve doğusunda, levha hareketleri sonucu Al-Qassim ve Al-Ahsa Havzaları da dâhil olmak üzere bir dizi rift vadisi oluşmuştur (Şekil 2.5). Senozoyik dönemde, Avrasya Levhası ile çarpışması sonucu oluşan etki ile Arabistan Levhası ayrılmaya başlamıştır. Ayrılan levhalar sonucu rift vadileri bölgede oluşmuştur. Zaman içinde bu havzalarda oluşan antik göller ve nehirlerde tortul kayalar birikmiştir. Bu tortul kayalarda biriken organik materyaller nedeni ile önemli miktarda petrol ve doğalgaz içermektedir (Robertson vd., 2009).

Genel olarak, Suudi Arabistan'ın yapısal jeolojisindeki çeşitlilik ülkenin üç tektonik levhanın kesiştiği noktada yer almasından kaynaklanır. Bu levhaların hareketinden kaynaklanan kuvvetler; yamaçlar, kıvrımlar, bindirme fayları ve rift vadileri olmak üzere çeşitli jeolojik yapıların oluşmasına neden olmuştur. Bu yapılar aynı zamanda ülkenin petrol ve gaz rezervlerinin oluşumunda da rol oynamıştır (Powers vd., 1966).



Şekil 2.5 Al-Qassim ve Al-Hassa Havzaları'nın konumu.

3. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ

Bu bölümde, çalışma alanı kapsamında yapılan süreksizlik ölçümleri, sondajlar, sondaj kuyuları içinde yapılan saha deneyleri, sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri ve bölgesini su durumu anlatılacak ve bunlar mühendislik jeolojisi modelinin kurulması için değerlendirilecektir.

3.1 Süreksizlik ölçümlerinin stereografik izdüşüm yöntemi ile incelenmesi

Kinematik analiz, süreksizliklerin yönelimi ve şev yüzeyi arasındaki yapısal ilişkiye bağlı olarak, olası yenilme türünü tanımlamak için kullanılan bir yöntemdir. Kinematik analiz, eklemli bir kaya kütleindeki olası yenilme türünü görselleştirmeye izin veren tamamen geometrik bir tekniktir. Kayalarda kinematik analiz kullanılarak üç ana yenilme mekanizması tanımlanmıştır. Bunlar düzlemsel kayma, kama tipi kayma ve devrilme türü duraysızlıktır (Wyllie ve Mah, 2004).

Çalışma alanındaki süreksizlikleri, tabakalar oluşturmaktadır. Süreksizliklerden sahada 2266 adet eğim yönü ve eğim açısı ölçümü alınmıştır. Ölçümlere göre tabakalar yataya yakındır, eğim açıları 2-12° arasında; eğim yönleri ise 125-187° (K35, 2-12GD ve K83B, 2-12GB) arasında değişmektedir. Çalışma alanından alınan 4+250, 4+361 ve 4+414 km'lerindeki tabakalara ait görseller Şekil 3.1 – Şekil 3.3 arasında görülmektedir.

Süreksizliklerden alınan eğim yönü ve eğim açısı ölçümleri, Rocscience Dips (2023) programında stereografik izdüşüm yöntemi ile çizilmiştir. Ardından eğim yönü ve eğim açısı ölçümlerinin vektörlerinin konumlarına göre süreksizlik setleri ve ana süreksizlik düzlemleri belirlenmiştir. Rocscience Dips programının analizine göre çalışma alanında 1 adet süreksizlik seti bulunmaktadır ve ortalama tabaka eğim açısı 7° ve eğim yönü 160°'dir (K70D, 7GD) (Şekil 3.4).

Ana süreksizlik düzlemi belirlendikten sonra çalışma alanında yapılması planlanan yol yarması için kinematik analiz incelemesi yapılmıştır.

Sta. 4+250.47



Şekil 3.1 Çalışma alanının 4+250 km'sindeki killi kireçtaşı tabakalarına ait görsel.

Sta. 4+361.07

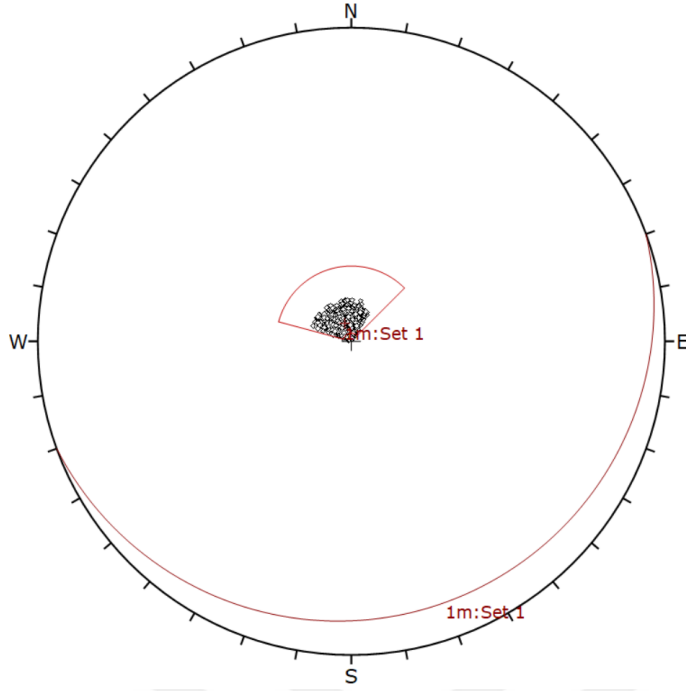


Şekil 3.2 Çalışma alanının 4+361 km'sindeki killi kireçtaşı tabakalarına ait görsel.



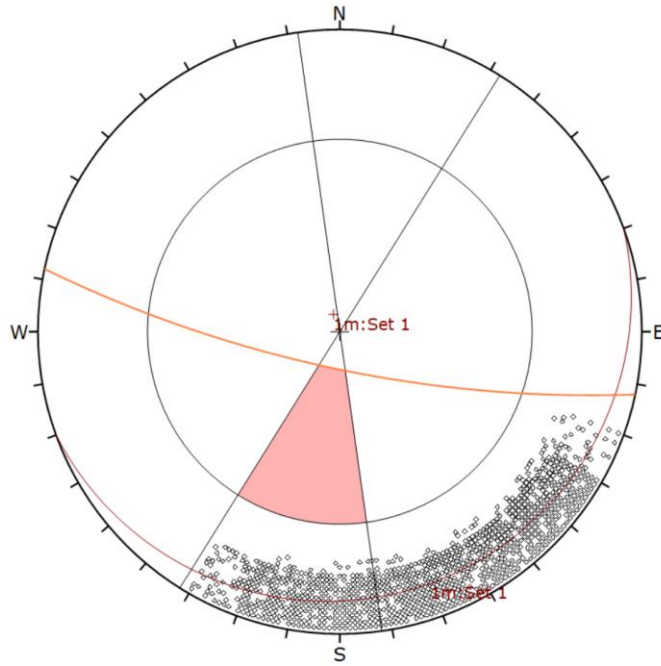
Şekil 3.3 Çalışma alanının 4+414 km'sindeki killi kireçtaşı tabakalarına ait görsel.

Kinematik analiz için süreksizliklere ait eğim yönü ve eğim açısı ölçümleri, eğim vektörleri cinsinden Rocscience Dips programında çizilmiştir. Ardından çalışma alanında yapılması planlanan yol yarmasına ait şevin eğim yönü ve eğim açısı Rocscience Dips programına işlenmiştir. İşverenden gelen veriye göre şevin, 192° eğim yönü ve 76° (K78B, 76GB) eğim açısı ile kazılması planlanmaktadır. Bu veriler Rocscience Dips programına girildikten sonra şev, düzlemsel kayma açısından analiz edilmiştir (Şekil 3.5). Burada görülen turuncu çizgi, yapılması planlanan şev aynasının büyük dairesini temsil etmektedir. Kırmızı alan ise kritik bölgeyi göstermektedir. Yani süreksizliklerden alınan ölçümlerin, bu kırmızı alana düşmesi durumunda düzlemsel kayma olasılığının olduğunu gösterir. Ancak çalışma alanından alınan ölçümlerden hiçbirinin kritik alana düşmemesi nedeniyle burada yapılacak 76° eğim açılı bir şev kazısının düzlemsel kayma açısından duraysızlık oluşturmayacağı anlaşılmıştır.



| Symbol | Feature | | | |
|-----------------|--------------|---------------------|---------------|-------|
| o | Pole Vectors | | | |
| | Color | Dip | Dip Direction | Label |
| Mean Set Planes | | | | |
| 1m | ■ | 7 | 160 | Set 1 |
| Plot Mode | | Pole Vectors | | |
| Vector Count | | 2266 (2266 Entries) | | |
| Hemisphere | | Lower | | |
| Projection | | Equal Angle | | |

Şekil 3.4 Tabakaların stereografik izdüşüm yöntemi ile gösterimi ve ana süreksizlik düzleminin belirlenmesi.



| Symbol | Feature | | | |
|----------------------|-------------|---------------------|---------------|-------|
| o | Dip Vectors | | | |
| Kinematic Analysis | | Planar Sliding | | |
| Slope Dip | | 76 | | |
| Slope Dip Direction | | 192 | | |
| Friction Angle | | 25° | | |
| Lateral Limits | | 20° | | |
| Planar Sliding (All) | | Critical | Total | % |
| | | 0 | 2266 | 0.00% |
| | Color | Dip | Dip Direction | Label |
| Mean Set Planes | | | | |
| 1m | ■ | 7 | 160 | Set 1 |
| Plot Mode | | Dip Vectors | | |
| Vector Count | | 2266 (2266 Entries) | | |
| Hemisphere | | Lower | | |
| Projection | | Equal Angle | | |

Şekil 3.5 Çalışma alanındaki süreksizliklerin düzlemsel kayma açısından analizi.

Wyllie ve Mah (2004)'a göre bir kaya kütesinde düzlemsel kayma olabilmesi için şevin eğim yönü ile süreksizlik setinin eğim yönünün aynı olması, şevin eğim açısının süreksizlik seti eğim açısından büyük olması ve süreksizlik seti eğim açısının kayaya ait içsel sürtünme açısı değerinden büyük olması gerekmektedir. Çalışma alanında, süreksizlikler ile şevin eğim yönü aynı olmasına ve şevin eğim açısının süreksizlik

eğim açısından büyük olmasına rağmen kayaya ait içsel sürtünme açısı (25°), süreksizlik eğim açısından (7°) büyük olduğundan düzlemsel kayma görülmemektedir.

3.2 Sondajlar

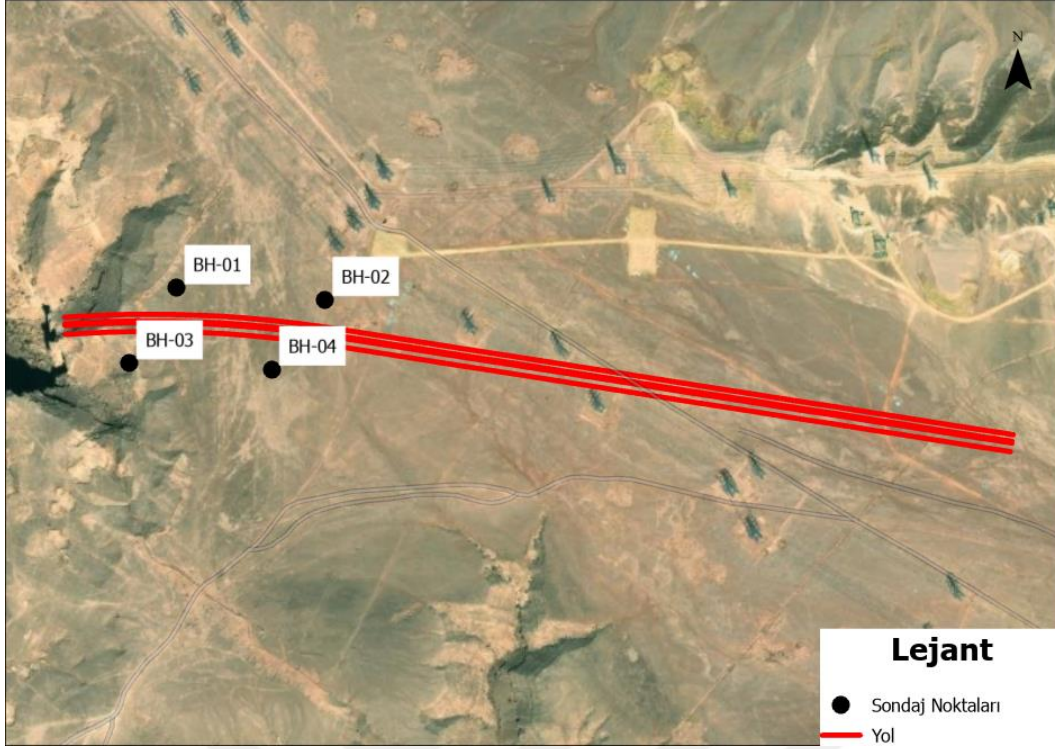
Kayada sürekli karot alma, PQ3 tipi üç tüplü karotiyer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numune alımı wireline sistemiyle yapılmıştır. Delgi, herhangi bir yıkıntıyı önlemek için muhafaza borusu ile yapılmıştır.

Çalışma sahasındaki kayaçların jeomekanik özelliklerinin tayinin amacıyla 4 adet sondaj gerçekleştirilmiştir. Bu sondajlar sırasında ve sondajlardan alınan numuneler üzerinde çeşitli saha ve laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Sahada elde edilen veriler ile sondajlardan çıkarılan karotların toplam karot verimi (TCR), sağlam karot verimi (SCR), kaya kalite göstergesi (RQD) ve çatlak yüzdesi (FR) ölçümleri yapılmıştır. Sondajlar tamamlandıktan sonra ise seçilen karotlar laboratuvara gönderilerek birim hacim ağırlık, su içeriği, nokta yükleme, tek eksenli basınç mukavemeti ve elastisite modülü deneyleri yapılmıştır.

Sondajların iki tanesi yapılacak olan yol yarmasının kuzeyinde, iki tanesi ise güneyinde olacak şekilde planlanmıştır. Sondajların konumları Şekil 3.6'da, sondaja ait koordinat, yükseklik ve derinlik bilgileri ise Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

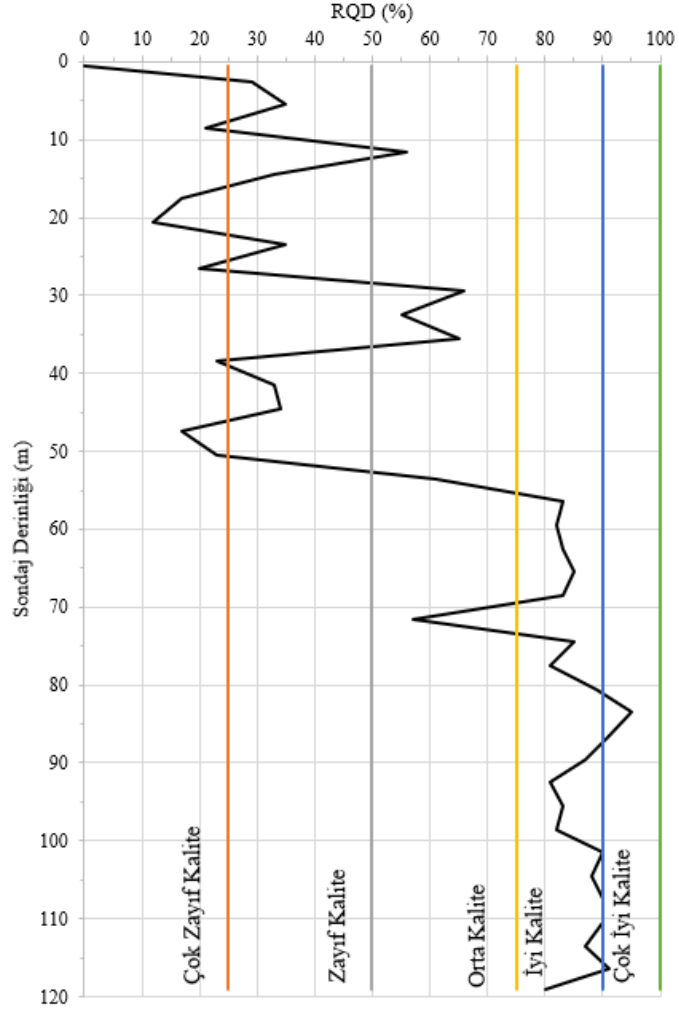
Çizelge 3.1 Sondaja ait genel bilgiler.

| Sondaj No | Başlangıç Tarihi | Bitiş Tarihi | Doğu (m UTM) | Kuzey (m UTM) | Yükseklik | Derinlik (m) |
|-----------|------------------|--------------|--------------|---------------|-----------|--------------|
| BH-R01 | 18.12.2020 | 23.12.2020 | 629355,7 | 2726666,3 | 939,4 | 120 |
| BH-R02 | 14.12.2020 | 17.12.2020 | 629620,4 | 2726644,9 | 942,3 | 100 |
| BH-R03 | 11.01.2021 | 14.01.2021 | 629270,3 | 2726532,0 | 925,5 | 120 |
| BH-R04 | 24.12.2020 | 27.12.2020 | 629.525,1 | 2726521,3 | 940,9 | 90 |



Şekil 3.6 Sondaj lokasyonları.

BH-R01 kuyu delgisi, 18.12.2020 tarihinde başlamış olup 23.12.2020 tarihinde tamamlanmıştır. Sondaj kapsamında 120 metre delgi yapılmış olup kuyu boyunca Dhruma Formasyonu kesilmiştir. 0 ile 2,3 m kotları arasında Ayrışmış Kireçtaşı birimi bulunmaktadır. 2,3 m ile 120 m arasında düşük – orta mukavemetli, açık sarımsı kahve ile açık gri renkli, az bozunmuş ve az çatlaklı Kireçtaşı birimi bulunmaktadır. Çatlaklar, dar – çok dar aralıklıdır (International Society of Rock Mechanics [ISRM], 2007). Geoteknik loglamalarda kuyunun ortalama TCR değeri %97 ve SCR değeri %77'dir. Kuyunun 0 m ile 52 metresi arasında ortalama RQD değeri %32 iken; 52 m ile 120 metresi arasında bu değer %84'e çıkmaktadır. Ortalama RQD, %62'dir (orta kalite). BH-R01 sondajında, RQD değerinin derinlikle değişimi Şekil 3.7'de görülmektedir. Kuyuda, 1 m ile 7 m arasında çatlak yüzdesi ortalama değeri %73'tür, 7 metreden sonra çatlak gözlenmemektedir. Kuyu boyunca yeraltısuyu gözlenmemiştir. Sondajlarda kuyu başında alınan ölçümlere ait sonuçlar Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 BH-R01 sondajında RQD değerinin derinlikle değişimi.

Çizelge 3.2 BH-R01 nolu sondaja ait ölçümler.

| Numune No | Sondaj Başlangıç (m) | Sondaj Bitiş (m) | TCR (%) | SCR (%) | RQD (%) | FR (%) | YASS |
|-----------|----------------------|------------------|---------|---------|---------|--------|------|
| C-1 | 0 | 1 | 97 | 14 | 0 | 100 | - |
| C-2 | 1 | 4 | 97 | 57 | 29 | 70 | - |
| C-3 | 4 | 7 | 97 | 74 | 35 | 50 | - |
| C-4 | 7 | 10 | 96 | 60 | 21 | 0 | - |
| C-5 | 10 | 13 | 98 | 77 | 56 | 0 | - |
| C-6 | 13 | 16 | 98 | 74 | 33 | 0 | - |
| C-7 | 16 | 19 | 96 | 50 | 17 | 0 | - |
| C-8 | 19 | 22 | 97 | 68 | 12 | 0 | - |
| C-9 | 22 | 25 | 98 | 69 | 35 | 0 | - |
| C-10 | 25 | 28 | 97 | 59 | 20 | 0 | - |
| C-11 | 28 | 31 | 97 | 69 | 66 | 0 | - |
| C-12 | 31 | 34 | 97 | 71 | 55 | 0 | - |
| C-13 | 34 | 37 | 96 | 88 | 65 | 0 | - |
| C-14 | 37 | 40 | 97 | 62 | 23 | 0 | - |

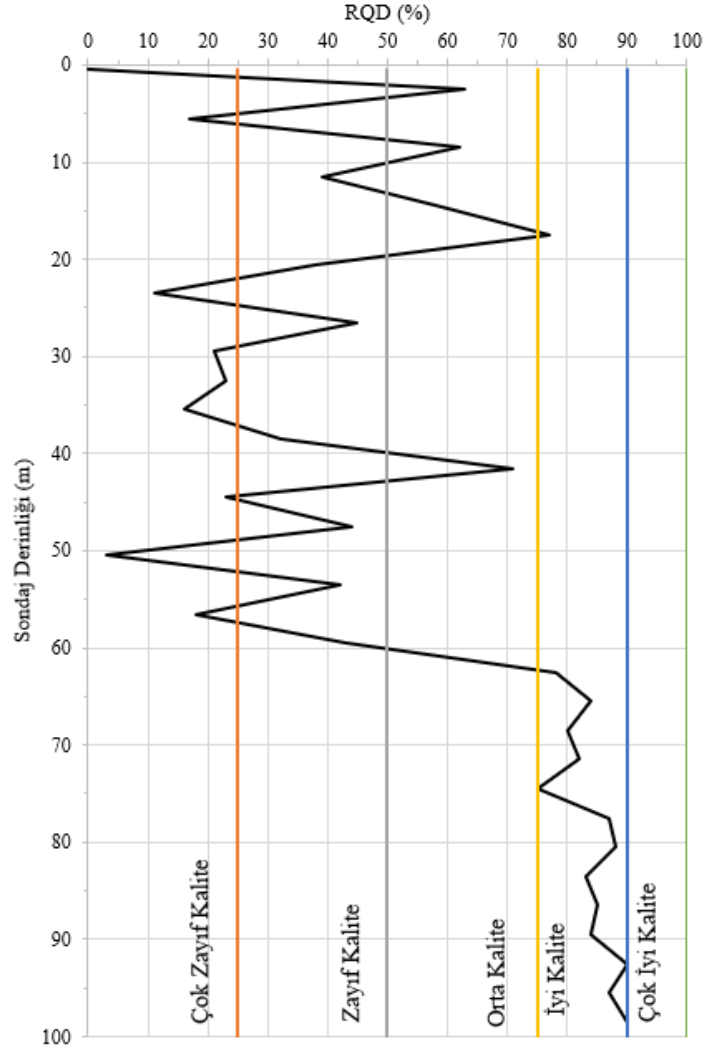
Çizelge 3.2 (devam) BH-R01 nolu sondaja ait ölçümler.

| Numune No | Sondaj Başlangıç (m) | Sondaj Bitiş (m) | TCR (%) | SCR (%) | RQD (%) | FR (%) | YASS |
|-----------|----------------------|------------------|---------|---------|---------|--------|------|
| C-15 | 40 | 43 | 98 | 78 | 33 | 0 | - |
| C-16 | 43 | 46 | 97 | 66 | 34 | 0 | - |
| C-17 | 46 | 49 | 97 | 41 | 17 | 0 | - |
| C-18 | 49 | 52 | 96 | 57 | 23 | 0 | - |
| C-19 | 52 | 55 | 96 | 81 | 61 | 0 | - |
| C-20 | 55 | 58 | 97 | 87 | 83 | 0 | - |
| C-21 | 58 | 61 | 96 | 89 | 82 | 0 | - |
| C-22 | 61 | 64 | 98 | 85 | 83 | 0 | - |
| C-23 | 64 | 67 | 98 | 90 | 85 | 0 | - |
| C-24 | 67 | 70 | 98 | 85 | 83 | 0 | - |
| C-25 | 70 | 73 | 98 | 60 | 57 | 0 | - |
| C-26 | 73 | 76 | 98 | 87 | 85 | 0 | - |
| C-27 | 76 | 79 | 99 | 85 | 81 | 0 | - |
| C-28 | 79 | 82 | 98 | 95 | 89 | 0 | - |
| C-29 | 82 | 85 | 99 | 95 | 95 | 0 | - |
| C-30 | 85 | 88 | 98 | 93 | 91 | 0 | - |
| C-31 | 88 | 91 | 98 | 91 | 87 | 0 | - |
| C-32 | 91 | 94 | 97 | 85 | 81 | 0 | - |
| C-33 | 94 | 97 | 82 | 89 | 83 | 0 | - |
| C-34 | 97 | 100 | 97 | 88 | 82 | 0 | - |
| C-35 | 100 | 103 | 95 | 93 | 90 | 0 | - |
| C-36 | 103 | 106 | 97 | 93 | 88 | 0 | - |
| C-37 | 106 | 109 | 97 | 96 | 90 | 0 | - |
| C-38 | 109 | 112 | 97 | 91 | 90 | 0 | - |
| C-39 | 112 | 115 | 96 | 87 | 87 | 0 | - |
| C-40 | 115 | 118 | 97 | 91 | 91 | 0 | - |
| C-41 | 118 | 120 | 95 | 88 | 80 | 0 | - |

TCR: Toplam karot yüzdesi, SCR: Katı karot yüzdesi, RQD: Kaya kalitesi göstergesi, FR: Çatlak oranı, YASS: Yeraltı su seviyesi, σ_B : Tek eksenli basınç dayanımı, $I_{s(50)}$: Nokta yükü dayanım indeksi

BH-R02 kuyu delgisi, 14.12.2020 tarihinde başlamış olup 17.12.2020 tarihinde tamamlanmıştır. Sondaj kapsamında 100 metre delgi yapılmış olup kuyu boyunca Dhruma Formasyonu kesilmiştir. 0 ile 1 m kotları arasında Ayrışmış Kireçtaşı birimi bulunur. 1 m ile 100 m arasında düşük – orta mukavemetli, açık sarımsı kahve ile açık gri renkli, az bozunmuş ve az çatlaklı Kireçtaşı birimi bulunmaktadır. Çatlaklar, dar – çok dar aralıklıdır (ISRM, 2007). Geoteknik loglamalarda kuyunun ortalama TCR değeri %98 ve SCR değeri %75'tir. Kuyunun 0 m ile 65 metresi arasında ortalama RQD değeri %36 iken; 65 m ile 100 metresi arasında bu değer %84'e çıkmaktadır. Ortalama RQD, %56'dır (orta kalite). BH-R02 sondajında, RQD değerinin derinlikle

değişimi Şekil 3.8’de görülmektedir. Kuyuda, 1 m ile 7 m arasında çatlak yüzdesi değeri %73’tür, 7 metreden sonra çatlak gözlenmemektedir. Kuyu boyunca yeraltısuyu gözlenmemiştir. Sondajlarda kuyu başında alınan ölçümlere ait sonuçlar Çizelge 3.3’te gösterilmektedir.



Şekil 3.8 BH-R02 sondajında RQD değerinin derinlikle değişimi.

Çizelge 3.3 BH-R02 nolu sondaja ait ölçümler.

| Numune No | Sondaj Başlangıç (m) | Sondaj Bitiş (m) | TCR (%) | SCR (%) | RQD (%) | FR (%) | YASS |
|-----------|----------------------|------------------|---------|---------|---------|--------|------|
| C-1 | 0 | 1 | 100 | 12 | 0 | 100 | - |
| C-2 | 1 | 4 | 98 | 77 | 63 | 70 | - |
| C-3 | 4 | 7 | 97 | 50 | 17 | 50 | - |
| C-4 | 7 | 10 | 98 | 69 | 62 | 0 | - |
| C-5 | 10 | 13 | 98 | 70 | 39 | 0 | - |
| C-6 | 13 | 16 | 98 | 73 | 58 | 0 | - |
| C-7 | 16 | 19 | 99 | 87 | 77 | 0 | - |

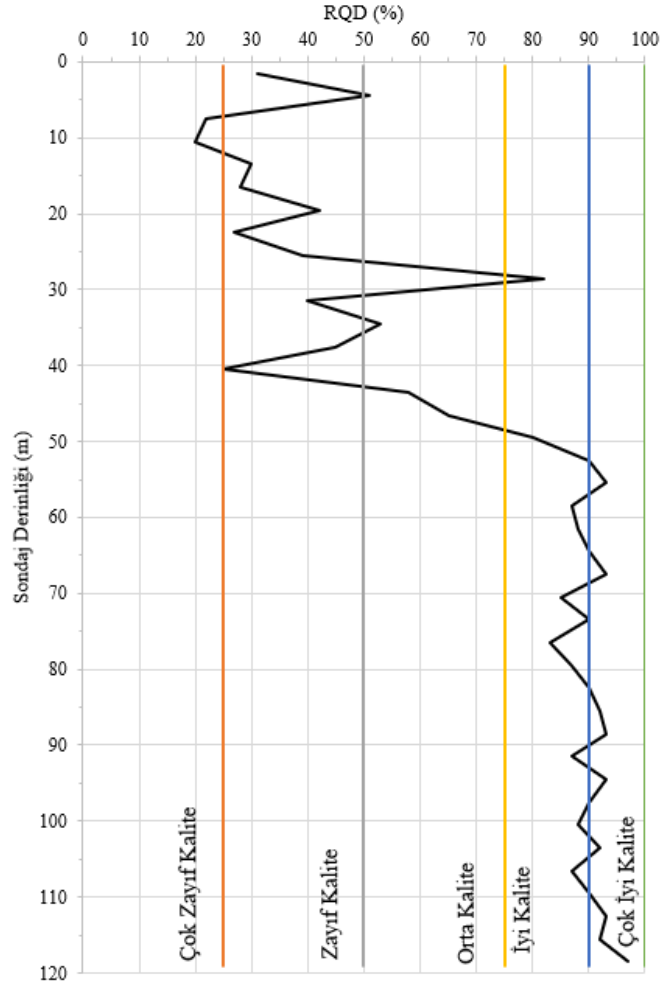
Çizelge 3.3 (devam) BH-R02 nolu sondaja ait ölçümler.

| Numune No | Sondaj Başlangıç (m) | Sondaj Bitiş (m) | TCR (%) | SCR (%) | RQD (%) | FR (%) | YASS |
|-----------|----------------------|------------------|---------|---------|---------|--------|------|
| C-8 | 19 | 22 | 98 | 62 | 38 | 0 | - |
| C-9 | 22 | 25 | 98 | 82 | 11 | 0 | - |
| C-10 | 25 | 28 | 98 | 73 | 45 | 0 | - |
| C-11 | 28 | 31 | 97 | 83 | 21 | 0 | - |
| C-12 | 31 | 34 | 97 | 84 | 23 | 0 | - |
| C-13 | 34 | 37 | 98 | 53 | 16 | 0 | - |
| C-14 | 37 | 40 | 98 | 56 | 32 | 0 | - |
| C-15 | 40 | 43 | 98 | 83 | 71 | 0 | - |
| C-16 | 43 | 46 | 98 | 64 | 23 | 0 | - |
| C-17 | 46 | 49 | 98 | 80 | 44 | 0 | - |
| C-18 | 49 | 52 | 96 | 32 | 3 | 0 | - |
| C-19 | 52 | 55 | 97 | 63 | 42 | 0 | - |
| C-20 | 55 | 58 | 96 | 48 | 18 | 0 | - |
| C-21 | 58 | 61 | 98 | 63 | 43 | 0 | - |
| C-22 | 61 | 64 | 99 | 87 | 78 | 0 | - |
| C-23 | 64 | 67 | 99 | 88 | 84 | 0 | - |
| C-24 | 67 | 70 | 98 | 93 | 80 | 0 | - |
| C-25 | 70 | 73 | 99 | 89 | 82 | 0 | - |
| C-26 | 73 | 76 | 98 | 87 | 75 | 0 | - |
| C-27 | 76 | 79 | 98 | 92 | 87 | 0 | - |
| C-28 | 79 | 82 | 98 | 91 | 88 | 0 | - |
| C-29 | 82 | 85 | 97 | 91 | 83 | 0 | - |
| C-30 | 85 | 88 | 97 | 91 | 85 | 0 | - |
| C-31 | 88 | 91 | 97 | 92 | 84 | 0 | - |
| C-32 | 91 | 94 | 98 | 94 | 90 | 0 | - |
| C-33 | 94 | 97 | 98 | 91 | 87 | 0 | - |
| C-34 | 97 | 100 | 98 | 94 | 90 | 0 | - |

TCR: Toplam karot yüzdesi, SCR: Katı karot yüzdesi, RQD: Kaya kalitesi göstergesi, FR: Çatlak oranı, YASS: Yeraltı su seviyesi, σ_B : Tek eksenli basınç dayanımı, $I_{s(50)}$: Nokta yükü dayanım indeksi.

BH-R03 kuyu delgisi, 11.01.2021 tarihinde başlamış olup 14.01.2021 tarihinde tamamlanmıştır. Sondaj kapsamında 120 metre delgi yapılmış olup kuyu boyunca Dhruma Formasyonu kesilmiştir. Kuyu boyunca açık kremi kahve renkli düşük – orta mukavemetli, az bozunmuş – taze ve az çatlaklı Kireçtaşı birimi bulunmaktadır. Birimin üst seviyelerinde çatlaklar, dar – çok dar aralıklyken birimin alt seviyelerinde çatlaklar yakın aralıklıdır (ISRM, 2007). Geoteknik loglamalarda kuyunun ortalama TCR değeri %97 ve SCR değeri %88’dir. Kuyunun 0 m ile 42 metresi arasında ortalama RQD değeri %38 iken; 42 m ile 120 metresi arasında bu değer %87’ye çıkmaktadır. Ortalama RQD, %70’tir (orta kalite). BH-R03 sondajında, RQD

değerinin derinlikle değişimi Şekil 3.9’da görülmektedir. Kuyuda ortalama çatlak yüzdesi değeri %82 ölçülmüştür. Kuyu boyunca yeraltısuyu gözlenmemiştir. Sondajlarda kuyu başında alınan ölçümlere ait sonuçlar Çizelge 3.4’te gösterilmektedir.



Şekil 3.9 BH-R03 sondajında RQD değerinin derinlikle değişimi.

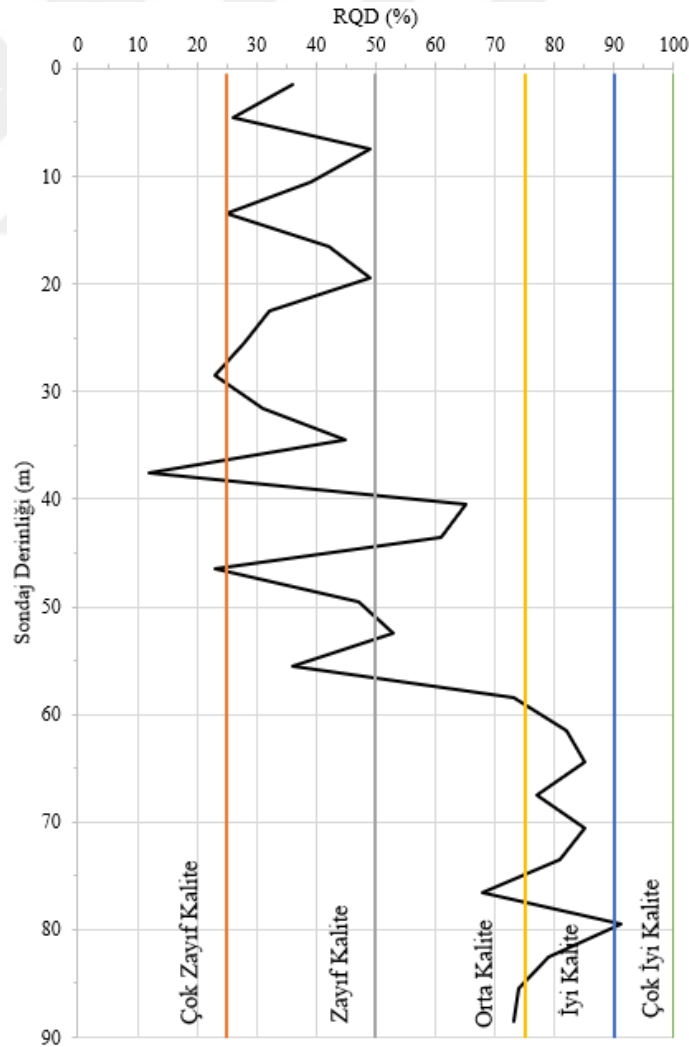
Çizelge 3.4 BH-R03 nolu sondaja ait ölçümler.

| Numune No | Sondaj Başlangıç (m) | Sondaj Bitiş (m) | TCR (%) | SCR (%) | RQD (%) | FR (%) | YASS |
|-----------|----------------------|------------------|---------|---------|---------|--------|------|
| C-1 | 0 | 3 | 96 | 55 | 31 | 90 | - |
| C-2 | 3 | 6 | 97 | 71 | 51 | 80 | - |
| C-3 | 6 | 9 | 98 | 63 | 22 | 75 | - |
| C-4 | 9 | 12 | 96 | 70 | 20 | 80 | - |
| C-5 | 12 | 15 | 95 | 73 | 30 | 70 | - |
| C-6 | 15 | 18 | 96 | 80 | 28 | 80 | - |
| C-7 | 18 | 21 | 97 | 87 | 42 | 70 | - |
| C-8 | 21 | 24 | 96 | 60 | 27 | 70 | - |
| C-9 | 24 | 27 | 97 | 73 | 39 | 70 | - |

Çizelge 3.4 (devam) BH-R03 nolu sondaja ait ölçümler.

| Numune No | Sondaj Başlangıç (m) | Sondaj Bitiş (m) | TCR (%) | SCR (%) | RQD (%) | FR (%) | YASS |
|-----------|----------------------|------------------|---------|---------|---------|--------|------|
| C-1 | 0 | 3 | 96 | 55 | 31 | 90 | - |
| C-2 | 3 | 6 | 97 | 71 | 51 | 80 | - |
| C-3 | 6 | 9 | 98 | 63 | 22 | 75 | - |
| C-4 | 9 | 12 | 96 | 70 | 20 | 80 | - |
| C-5 | 12 | 15 | 95 | 73 | 30 | 70 | - |
| C-6 | 15 | 18 | 96 | 80 | 28 | 80 | - |
| C-7 | 18 | 21 | 97 | 87 | 42 | 70 | - |
| C-8 | 21 | 24 | 96 | 60 | 27 | 70 | - |
| C-9 | 24 | 27 | 97 | 73 | 39 | 70 | - |
| C-10 | 27 | 30 | 98 | 97 | 82 | 80 | - |
| C-11 | 30 | 33 | 97 | 70 | 40 | 75 | - |
| C-12 | 33 | 36 | 98 | 92 | 53 | 80 | - |
| C-13 | 36 | 39 | 97 | 93 | 45 | 85 | - |
| C-14 | 39 | 42 | 98 | 77 | 25 | 80 | - |
| C-15 | 42 | 45 | 98 | 83 | 58 | 80 | - |
| C-16 | 45 | 48 | 98 | 83 | 65 | 90 | - |
| C-17 | 48 | 51 | 98 | 93 | 80 | 85 | - |
| C-18 | 51 | 54 | 98 | 93 | 90 | 90 | - |
| C-19 | 54 | 57 | 98 | 95 | 93 | 80 | - |
| C-20 | 57 | 60 | 97 | 93 | 87 | 90 | - |
| C-21 | 60 | 63 | 97 | 94 | 88 | 90 | - |
| C-22 | 63 | 66 | 98 | 93 | 90 | 85 | - |
| C-23 | 66 | 69 | 97 | 97 | 93 | 90 | - |
| C-24 | 69 | 72 | 98 | 97 | 85 | 80 | - |
| C-25 | 72 | 75 | 97 | 93 | 90 | 90 | - |
| C-26 | 75 | 78 | 98 | 95 | 83 | 80 | - |
| C-27 | 78 | 81 | 98 | 93 | 87 | 85 | - |
| C-28 | 81 | 84 | 98 | 95 | 90 | 80 | - |
| C-29 | 84 | 87 | 97 | 97 | 92 | 90 | - |
| C-30 | 87 | 90 | 98 | 97 | 93 | 80 | - |
| C-31 | 90 | 93 | 98 | 97 | 87 | 90 | - |
| C-32 | 93 | 96 | 99 | 97 | 93 | 80 | - |
| C-33 | 96 | 99 | 97 | 93 | 90 | 85 | - |
| C-34 | 99 | 102 | 96 | 92 | 88 | 75 | - |
| C-35 | 102 | 105 | 97 | 95 | 92 | 85 | - |
| C-36 | 105 | 108 | 98 | 95 | 87 | 80 | - |
| C-37 | 108 | 111 | 98 | 98 | 90 | 90 | - |
| C-38 | 111 | 114 | 97 | 97 | 93 | 80 | - |
| C-39 | 114 | 117 | 98 | 97 | 92 | 85 | - |
| C-40 | 117 | 120 | 98 | 98 | 97 | 75 | - |

BH-R04 kuyu delgisi, 24.12.2020 tarihinde başlamış olup 27.12.2020 tarihinde tamamlanmıştır. Sondaj kapsamında 90 metre delgi yapılmış olup kuyu boyunca Dhurma Formasyonu kesilmiştir. Kuyu boyunca düşük – orta mukavemetli, açık sarımsı kahve ile açık gri renkli, az ile orta derecede bozunmuş ve az çatlaklı Kireçtaşı birimi bulunmaktadır. Çatlaklar, dar – çok dar aralıklıdır (ISRM, 2007). Geoteknik loglamalarda kuyunun ortalama TCR değeri %97 ve SCR değeri %71’dir. Kuyunun 0 m ile 54 metresi arasında ortalama RQD değeri %38 iken; 54 m ile 90 metresi arasında bu değer %79’a çıkmaktadır. Ortalama RQD, %53’tür (orta kalite). BH-R04 sondajında, RQD değerinin derinlikle değişimi Şekil 3.10’da görülmektedir. Kuyuda, 3 m ile 6 metre arasında çatlak yüzdesi %70’tir, 6 metreden sonra çatlak gözlenmemektedir. Kuyu boyunca yeraltısuyu gözlenmemiştir. Sondajlarda kuyu başında alınan ölçümlere ait sonuçlar Çizelge 3.5’te gösterilmektedir. BH-R04 nolu sondaja ait karot sandığı görselleri EK B’de verilmektedir.



Şekil 3.10 BH-R04 sondajında RQD değerinin derinlikle değişimi.

Çizelge 3.5 BH-R04 nolu sondaja ait ölçümler.

| Numune No | Sondaj Başlangıç (m) | Sondaj Bitiş (m) | TCR (%) | SCR (%) | RQD (%) | FR (%) | YASS |
|-----------|----------------------|------------------|---------|---------|---------|--------|------|
| C-1 | 0 | 3 | 96 | 49 | 36 | 100 | - |
| C-2 | 3 | 6 | 96 | 58 | 26 | 70 | - |
| C-3 | 6 | 9 | 97 | 78 | 49 | 0 | - |
| C-4 | 9 | 12 | 96 | 59 | 39 | 0 | - |
| C-5 | 12 | 15 | 97 | 61 | 25 | 0 | - |
| C-6 | 15 | 18 | 96 | 63 | 42 | 0 | - |
| C-7 | 18 | 21 | 97 | 68 | 49 | 0 | - |
| C-8 | 21 | 24 | 97 | 52 | 32 | 0 | - |
| C-9 | 24 | 27 | 96 | 53 | 28 | 0 | - |
| C-10 | 27 | 30 | 96 | 59 | 23 | 0 | - |
| C-11 | 30 | 33 | 99 | 56 | 31 | 0 | - |
| C-12 | 33 | 36 | 98 | 65 | 45 | 0 | - |
| C-13 | 36 | 39 | 97 | 35 | 12 | 0 | - |
| C-14 | 39 | 42 | 98 | 82 | 65 | 0 | - |
| C-15 | 42 | 45 | 99 | 79 | 61 | 0 | - |
| C-16 | 45 | 48 | 99 | 54 | 23 | 0 | - |
| C-17 | 48 | 51 | 98 | 66 | 47 | 0 | - |
| C-18 | 51 | 54 | 98 | 65 | 53 | 0 | - |
| C-19 | 54 | 57 | 99 | 63 | 36 | 0 | - |
| C-20 | 57 | 60 | 99 | 86 | 73 | 0 | - |
| C-21 | 60 | 63 | 97 | 92 | 82 | 0 | - |
| C-22 | 63 | 66 | 98 | 90 | 85 | 0 | - |
| C-23 | 66 | 69 | 99 | 87 | 77 | 0 | - |
| C-24 | 69 | 72 | 98 | 90 | 85 | 0 | - |
| C-25 | 72 | 75 | 98 | 91 | 81 | 0 | - |
| C-26 | 75 | 78 | 97 | 90 | 68 | 0 | - |
| C-27 | 78 | 81 | 97 | 94 | 91 | 0 | - |
| C-28 | 81 | 84 | 98 | 81 | 79 | 0 | - |
| C-29 | 84 | 87 | 96 | 87 | 74 | 0 | - |
| C-30 | 87 | 90 | 98 | 84 | 73 | 0 | - |

TCR: Toplam karot yüzdesi, SCR: Katı karot yüzdesi, RQD: Kaya kalitesi göstergesi, FR: Çatlak oranı, YASS: Yeraltı su seviyesi, σ_B : Tek eksenli basınç dayanımı, $I_{s(50)}$: Nokta yükü dayanım indeksi.

3.3 Laboratuvar deneyleri

Sondajlardan alınan numuneler üzerinde laboratuvarda birim hacim ağırlık, su içeriği, nokta yükleme, tek eksenli basınç mukavemeti ve elastisite modülü deneyleri gerçekleştirilmiştir. BH-R01, BH-R02, BH-R03 ve BH-R04'ten alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar, minimum, maksimum,

ortalama ve standart sapma değerleri olarak izelge 3.6, izelge 3.7, izelge 3.8 ve izelge 3.9’da gösterilmektedir.

Çizelge 3.6 BH-R01 numunelerine yapılan laboratuvar deneyleri sonuçları.

| Deney Adı | Birim | Gerçekleştirilen Deney Sayısı | Min. Değer | Maks. Değer | Ortalama | Standart Sapma |
|------------|-------------------|-------------------------------|------------|-------------|----------|----------------|
| γ | kg/m ³ | 25 | 2195 | 2514 | 2341,08 | 89,06 |
| ω | % | 30 | 0 | 2,1 | 0,66 | 0,53 |
| $I_s(50)$ | MPa | 5 | 1,9 | 2,99 | 2,49 | 0,44 |
| σ_B | MPa | 25 | 6,3 | 33,5 | 17,02 | 6,59 |
| E | GPa | 14 | 1,7 | 11,4 | 5,81 | 2,66 |

Çizelge 3.7 BH-R02 numunelerine yapılan laboratuvar deneyleri sonuçları.

| Deney Adı | Birim | Gerçekleştirilen Deney Sayısı | Min. Değer | Maks. Değer | Ortalama | Standart Sapma |
|------------|-------------------|-------------------------------|------------|-------------|----------|----------------|
| γ | kg/m ³ | 23 | 2038 | 2593 | 2334,35 | 153,23 |
| ω | % | 27 | 0,2 | 2,3 | 0,82 | 0,63 |
| $I_s(50)$ | MPa | 4 | 1,51 | 2,46 | 1,77 | 0,46 |
| σ_B | MPa | 23 | 5,2 | 64,9 | 21,17 | 16,01 |
| E | GPa | 10 | 2,3 | 20,6 | 6,36 | 5,22 |

Çizelge 3.8 BH-R03 numunelerine yapılan laboratuvar deneyleri sonuçları.

| Deney Adı | Birim | Gerçekleştirilen Deney Sayısı | Min. Değer | Maks. Değer | Ortalama | Standart Sapma |
|------------|-------------------|-------------------------------|------------|-------------|----------|----------------|
| γ | kg/m ³ | 21 | 2157 | 2494 | 2333,62 | 96,47 |
| ω | % | 18 | 0 | 1,5 | 0,41 | 0,45 |
| $I_s(50)$ | MPa | 5 | 1,54 | 5,36 | 3,1 | 2,01 |
| σ_B | MPa | 21 | 7,3 | 28,8 | 17,82 | 6,14 |
| E | GPa | 13 | 3,8 | 9,1 | 6,19 | 1,39 |

Çizelge 3.9 BH-R04 numunelerine yapılan laboratuvar deneyleri sonuçları.

| Deney Adı | Birim | Gerçekleştirilen Deney Sayısı | Min. Değer | Maks. Değer | Ortalama | Standart Sapma |
|------------|-------------------|-------------------------------|------------|-------------|----------|----------------|
| γ | kg/m ³ | 23 | 2097 | 2509 | 2381,61 | 107,48 |
| ω | % | 26 | 0 | 1,1 | 0,33 | 0,3 |
| $I_s(50)$ | MPa | 3 | 1,54 | 3,39 | 2,7 | 1,01 |
| σ_B | MPa | 23 | 7,4 | 30,5 | 18,73 | 6,75 |
| E | GPa | 12 | 4,2 | 10,6 | 6,79 | 2,06 |

3.4 Sondaj verileri ve laboratuvar deneylerine göre ortamın tanıtılması ve sınıflaması

Sondajlardan elde edilen karotlar ile RQD değeri hesaplanmış, ardından karot numuneleri laboratuvara gönderilerek tek eksenli basınç dayanımı (σ_B) ve nokta

yükleme dayanımı ($I_{s(50)}$) ölçülmüştür. Elde edilen bu değerler ile ISRM (2007)'ye göre derinlik bazlı kaya kütlelerinin kalitesi tanımlanmaya çalışılmıştır.

BH-R01 nolu sondaj için RQD değerine göre;

- 0 – 30 m arası %32 (zayıf kaliteli kaya),
- 30 – 60 m arası %48 (zayıf kaliteli kaya),
- 60 – 90 m arası %84 (iyi kaliteli kaya) ve
- 90 – 120 m arası %86'dır (iyi kaliteli kaya).

BH-R01 nolu sondaj için σ_B değerine göre;

- 0 – 30 m arası 12,9 MPa (zayıf kaya),
- 30 – 60 m arası 13,5 MPa (zayıf kaya),
- 60 – 90 m arası 19,3 MPa (zayıf kaya) ve
- 90 – 120 m arası 22,1 MPa'dır (zayıf kaya).

BH-R01 nolu sondaj için $I_{s(50)}$ değerine göre;

- 0 – 30 m arası 1,9 MPa (sağlam kaya),
- 30 – 60 m arası 2,4 MPa (sağlam kaya),
- 60 – 90 m arası 2,9 MPa (sağlam kaya) ve
- 90 – 120 m arası 2,7 MPa'dır (sağlam kaya).

BH-R02 nolu sondaj için RQD değerine göre;

- 0 – 30 m arası %43 (zayıf kaliteli kaya),
- 30 – 60 m arası %32 (zayıf kaliteli kaya),
- 60 – 90 m arası %83 (iyi kaliteli kaya) ve
- 90 – 100 m arası %89'dur (iyi kaliteli kaya).

BH-R02 nolu sondaj için σ_B değerine göre;

- 0 – 30 m arası 15,1 MPa (zayıf kaya),
- 30 – 60 m arası 18,0 MPa (zayıf kaya),
- 60 – 90 m arası 30,1 MPa (orta derecede sağlam kaya) ve

- 90 – 100 m arası 18,2 MPa'dır (zayıf kaya).

BH-R02 nolu sondaj için $I_{s(50)}$ değerine göre;

- 0 – 30 m arası 1,5 MPa (sağlam kaya),
- 30 – 60 m arası 2,5 MPa (sağlam kaya) ve
- 60 – 90 m arası 1,6 MPa'dır (sağlam kaya).

BH-R03 nolu sondaj için RQD değerine göre;

- 0 – 30 m arası %37 (zayıf kaliteli kaya),
- 30 – 60 m arası %64 (orta kaliteli kaya),
- 60 – 90 m arası %89 (iyi kaliteli kaya) ve
- 90 – 120 m arası %91'dir (çok iyi kaliteli kaya).

BH-R03 nolu sondaj için σ_B değerine göre;

- 0 – 30 m arası 19,3 MPa (zayıf kaya),
- 30 – 60 m arası 14,6 MPa (zayıf kaya),
- 60 – 90 m arası 21,6 MPa (zayıf kaya) ve
- 90 – 120 m arası 15,7 MPa'dır (zayıf kaya).

BH-R03 nolu sondaj için $I_{s(50)}$ değerine göre;

- 0 – 30 m arası 3,5 MPa (çok sağlam kaya) ve
- 30 – 60 m arası 1,5 MPa'dır (sağlam kaya).

BH-R04 nolu sondaj için RQD değerine göre;

- 0 – 30 m arası %35 (zayıf kaliteli kaya),
- 30 – 60 m arası %45 (zayıf kaliteli kaya) ve
- 60 – 90 m arası %80'dir (iyi kaliteli kaya).

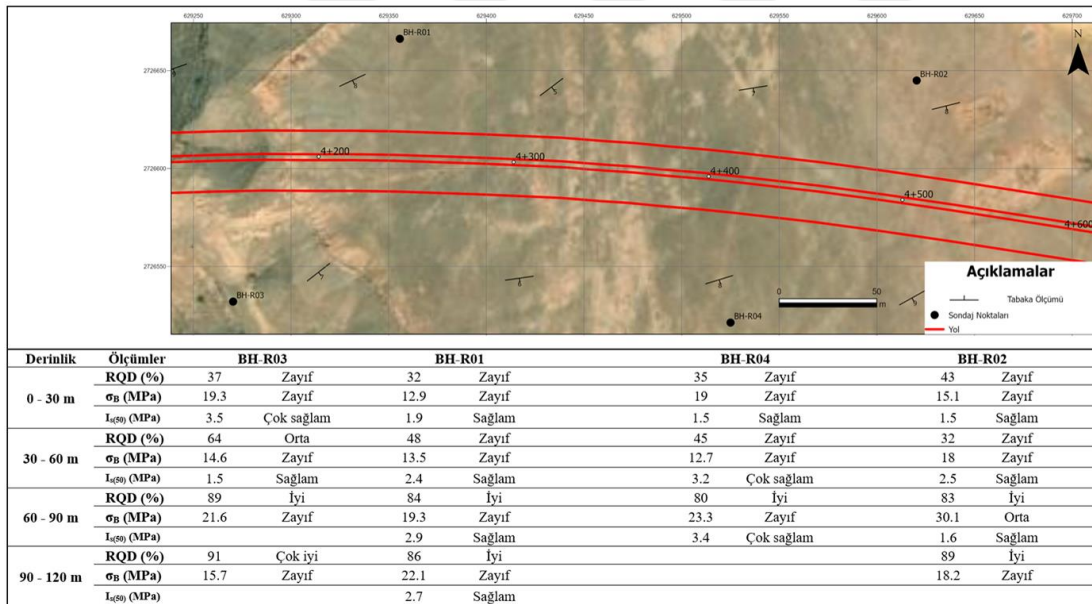
BH-R04 nolu sondaj için σ_B değerine göre;

- 0 – 30 m arası 19,0 MPa (zayıf kaya),
- 30 – 60 m arası 12,7 MPa (zayıf kaya) ve
- 60 – 90 m arası 23,3 MPa'dır (zayıf kaya).

BH-R04 nolu sondaj için $I_{s(50)}$ değerine göre;

- 0 – 30 m arası 1,5 MPa (sağlam kaya),
- 30 – 60 m arası 3,2 MPa (çok sağlam kaya) ve
- 60 – 90 m arası 3,4 MPa'dır (çok sağlam kaya).

Sonuç olarak, sondajlar için yaklaşık ilk 60 metrede RQD değerleri nispeten düşük çıksa da kuyuların devamında bu değer artmaktadır. ISRM (2007) kaya ortam tanımlamasına göre RQD değerine bakıldığında kayalar 0 – 60 m arası zayıf – orta kaliteli iken 60 metreden sonra iyi – çok iyi kaliteli olarak sınıflanmaktadır. Çalışma alanındaki kaya mukavemetine göre sınıflamak istendiğinde ise σ_B değerleri göz önüne alındığında zayıf kaya olarak; $I_{s(50)}$ değerleri göz önüne alındığında ise sağlam – çok sağlam olarak tanımlanmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



Şekil 3.11 Sondaj verileri ve laboratuvar deneylerine göre ortamın sınıflaması.

3.5 Kaya kütle sınıflamaları

Bu bölümde, çalışma alanında gerçekleştirilen saha ve laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar ile kaya kütleleri RMR, GSI ve Q sistem'e göre sınıflandırılmaya çalışılacaktır. Kaya kütleleri sınıflamalarının yapılabilmesi için öncelikle literatür

araştırması yapılmış, ardından ilgili formüller ve abaklar kullanılarak kaya kütleleri kalitelerine göre sınıflandırılmıştır.

İlk kaya kütle sınıflaması, Terzaghi (1946) tarafından tünel destek sistemleri tasarımında kullanılmıştır. Destek sistemlerinin tasarımı kapsamında çelik yapılar tarafından taşınan kaya yükleri, Terzaghi'nin oluşturduğu kaya sınıflandırması ile hesaplanmaya çalışılmıştır. Terzaghi, kayaları sert ve sağlam, sert tabakalı veya şistoz, masif veya kısmen çatlaklı, kısmen bloklu, çok bloklu, tamamen parçalanmış ama kimyasal olarak sağlam, sıkışan ve şişen olmak üzere sınıflamıştır.

Deere vd. (1967), sondajlardan çıkarılan karot numuneleri kantitatif şekilde sınıflandırmak için RQD, 100 mm'den uzun sağlam karot parçalarının toplam uzunluğunun, manevra uzunluğuna oranının yüzdesi olarak tanımlanmaktadır. RQD, sahada yapılan sayısal bir hesaplama olduğundan en önemli kaya kütle sınıflamalarından biridir.

3.5.1 RMR sınıflaması

Bieniawski ilk defa 1973 yılında jeomekanik açıdan kaya kütle derecelendirme (RMR) adıyla bir kaya sınıflandırma sistemi yayınlamıştır. Yıllar içerisinde RMR birçok değişikliğe uğramış ve 1989'da son halini almıştır. RMR, kayacın mukavemetine göre sınıflandırma yapan bir sistemdir. RMR sisteminde sınıflandırma yapmak için kayacın, tek eksenli basınç dayanımı, kaya kalite göstergesi (RQD), süreksizliklerin açıklığı, süreksizliklerin durumu, süreksizliklerin yönelimi ve yeraltı su durumu parametreleri kullanılmaktadır. Daha önceki kaya kütle sınıflamalarına kıyasla RMR'de, kayacın süreksizlik verilerinin yanı sıra kayaca ait kazı öncesi başka parametreler de değerlendirilmiş olmaktadır. Bu sayede uygulama alanı daha çeşitlidir. Tünellerin yanı sıra madencilik, şevler ve temeller gibi uygulama alanlarında kullanılabilir.

RMR değeri, Bieniawski'nin hazırladığı tabloda her parametrede kayacın özelliklerine göre uygun puan seçilir ve bunların toplamıyla hesaplanır. RMR sınıflandırma sistemi puanlama tablosu Çizelge 3.10'da verilmiştir (Bieniawski, 1989).

Çizelge 3.10 RMR puanlama sistemi (Bieniawski, 1989).

| A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ VE PUANLARI | | | | | | | |
|--|----------------------------------|-----------------------------|--------------|--------------------|------------------------|-----------------|------------------------------------|
| 1 | Kayacın Dayanımı (MPa) | Nokta Yüklü Dayanım İndeksi | >10 | 4-10 | 2-4 | 1-2 | Daha düşük değerler için önerilmez |
| | | Tek Eksenli Basınç Dayanımı | >250 | 100-250 | 50-100 | 25-50 | 5-25 |
| | <i>Puan</i> | | 15 | 12 | 7 | 4 | 2 1 0 |
| 2 | Kayaç Kalite Göstergesi, RQD (%) | | 90-100 | 75-90 | 50-75 | 25-50 | <25 |
| | | <i>Puan</i> | 20 | 17 | 13 | 8 | 5 |
| 3 | Süreksizlik Ara Uzaklığı (cm) | | >200 | 60-200 | 20-60 | 6-20 | <6 |
| | | <i>Puan</i> | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 |
| 4 | Süreksizlik Durumu | Devamlılık (m) | <1 | 1-3 | 3-10 | 10-20 | >20 |
| | | <i>Puan</i> | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| | | Açıklık (mm) | Yok | <0,1 | 0,1-1 | 1-5 | >5 |
| | | <i>Puan</i> | 6 | 5 | 4 | 1 | 0 |
| | | Pürüzlülük | Çok pürüzlü | Pürüzlü | Az pürüzlü | Düz | Kaygan |
| | | <i>Puan</i> | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |
| | | Dolgu | Yok | <5 mm (sert) | >5 mm (sert) | <5 mm (yumuşak) | >5 mm (yumuşak) |
| | | <i>Puan</i> | 6 | 4 | 2 | 2 | 0 |
| | | Ayrışma | Ayrışmamış | Az Ayrışmış | Orta Derecede Ayrışmış | Ayrışmış | Çok Ayrışmış |
| | | <i>Puan</i> | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |
| 5 | Yeraltısuyu (lt/dk) | 10 m'lik kısımdan gelen su | Yok | 10 | 25 | 25-125 | >125 |
| | | Genel Koşullar | Tamamen kuru | Nemli | Islak | Damlama | Akışkan |
| | | <i>Puan</i> | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 |
| B. SÜREKSİZLİK YÖNELİMLERİ İÇİN PUANLAMA DÜZELTMELERİ | | | | | | | |
| Süreksizliklerin Yönelimi | | Çok uygun | Uygun | Orta | Uygun değil | Hiç uygun değil | |
| Tünel ve Madenler | | 0 | -2 | -5 | -10 | -12 | |
| Temeller | | 0 | -2 | -7 | -15 | -25 | |
| Şevler | | 0 | -5 | -25 | -50 | -60 | |
| C. TOPLAM PUANLAMAYA GÖRE KAYA KÜTLESİ SINIFI | | | | | | | |
| Puanlama | | 100 – 81 | 80 – 61 | 60 – 41 | 40 – 21 | <20 | |
| Sınıf | | I | II | III | IV | V | |
| Tanım | | Çok iyi kaya | İyi kaya | Orta kaliteli kaya | Kötü kaya | Çok kötü kaya | |

Çizelge 3.10 (devam) RMR puanlama sistemi (Bieniawski, 1989).

| D. KAYA KÜTLE SINIFLARININ ANLAMI | | | | | |
|--|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Sınıf No | I | II | III | IV | V |
| Ortalama Kemerlenme Süresi | 15 m açıklık için 20 yıl | 10 m açıklık için 1 yıl | 5 m açıklık için 1 hafta | 2,5 m açıklık için 10 saat | 1 m açıklık için 30 dk. |
| Kaya Kütlelerinin Kohezyonu (kPa) | >400 | 300 – 400 | 200 – 300 | 100 – 200 | <100 |
| Kaya Kütlelerinin Sürtünme Açısı (°) | >45 | 35 – 45 | 25 – 35 | 15 – 25 | <15 |

Sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılan saha ve laboratuvar deneyleri sonucu elde edilen veriler, kaya kütlelerini RMR yöntemi ile Çizelge 3.10 kullanılarak sınıflamak için kullanılmıştır. Sınıflandırma yapılırken, 4 sondajdan elde edilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen saha ve laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin ortalamaları alınmıştır. Kayacın gösterdiği özelliklere göre toplam puanı Çizelge 3.11’de görülmektedir. RMR sınıflamasına göre kayacın, orta kaliteli kayacık ortam olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3.11 Çalışma alanındaki kayacık RMR sınıflaması.

| Parametre | Değer | Puan | |
|-----------------------------------|----------------|------------|---|
| Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa) | 18,7 | 2 | |
| RQD (%) | 60 | 13 | |
| Süreksizlik Aralığı (mm) | 90 | 15 | |
| Süreksizlik Durumu | Devamlılık (m) | 5,9 | 2 |
| | Açıklık (mm) | 6 | 0 |
| | Pürüzlülük | Az Pürüzlü | 3 |
| | Dolgu (mm) | 0,5 | 4 |
| | Ayrışma | Az – Orta | 4 |
| Yeraltısuyu Durumu | Kuru | 15 | |
| | Şev Düzeltmesi | -5 | |
| | Toplam | 53 | |

3.5.2 Jeolojik dayanım indeksi

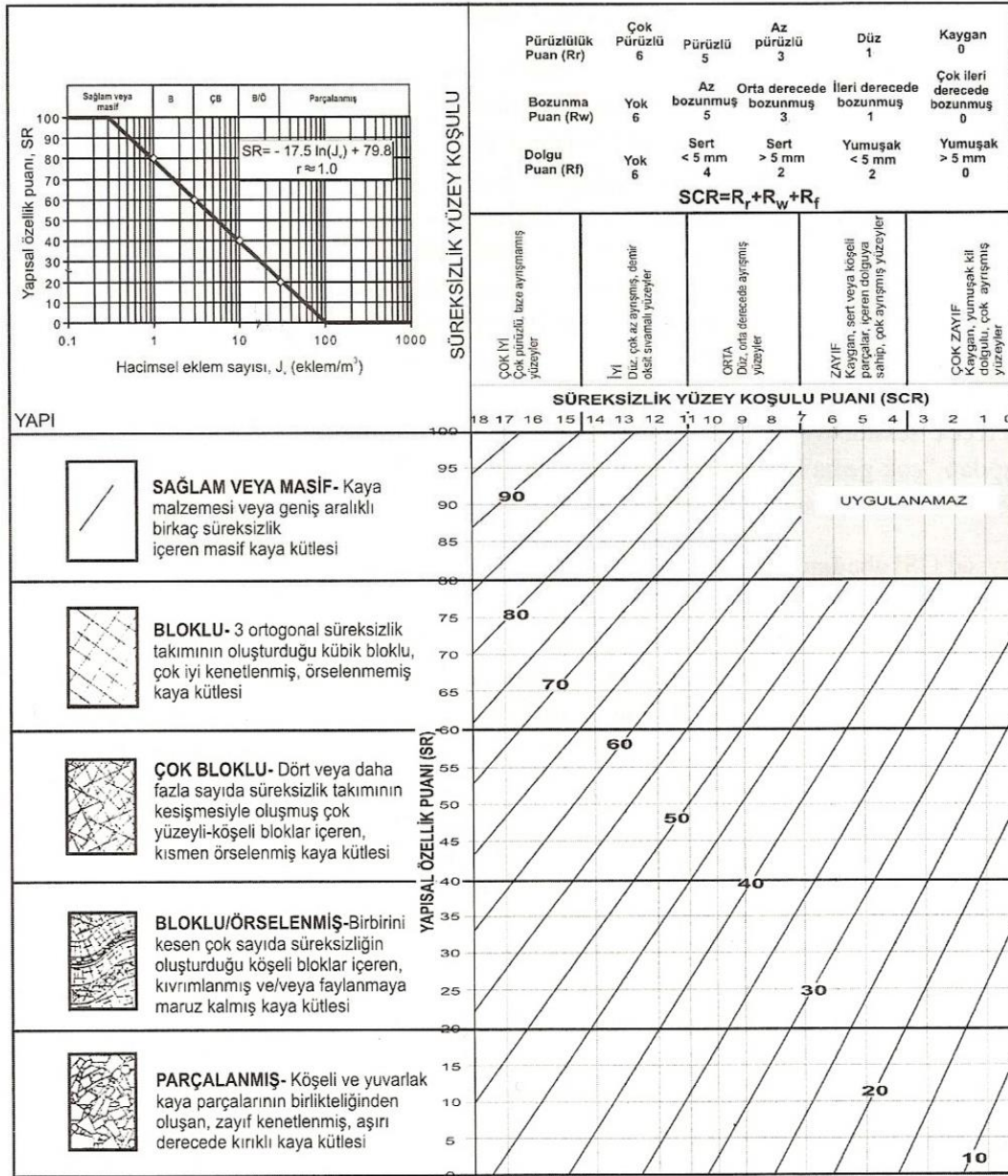
Hoek ve Brown (1997), RMR’nin düşük kalite kaya kütlelerini tanımlamadaki yetersizliği nedeniyle kayaların görsel özelliklerine sınıflama yapılabilecek jeolojik dayanım indeksini (GSI) önermiştir. Ancak GSI ölçülebilecek sayısal değerler içermediğinden farklı sonuçlar bulunmasına neden olmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar, kaya kütlelerinin süreksizlik ve yüzey koşullarını sayısal ölçülebilecek şekilde GSI’yı geliştirmiştir. Sönmez ve Ulusay (1999), yapı puanı (SR) ve yüzey koşulu puanını (SCR*) önererek sayısal GSI abağını oluşturmuştur. Bu çalışmaya göre kaya kütle yapısını tanımlamak için hacimsel süreksizlik frekansına (λ_v) dayanan yapı puanı tanıtılmıştır. Süreksizlik yüzey koşullarını tanımlamak için pürüzlülük (R_f),

ayırışma (R_w) ve dolgu (R_i) koşullarına göre hesaplanan yüzey koşulu puanı önerilmiştir. Günümüzde kullanılan sayısal GSI abağı (Şekil 3.12), Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından hazırlanmıştır. Bu abakta geçen SR ve SCR*,

$$SR = -17,5 \ln(\lambda_v) + 79,8 \quad 3.1$$

$$SCR^* = R_f + R_w + R_i \quad 3.2$$

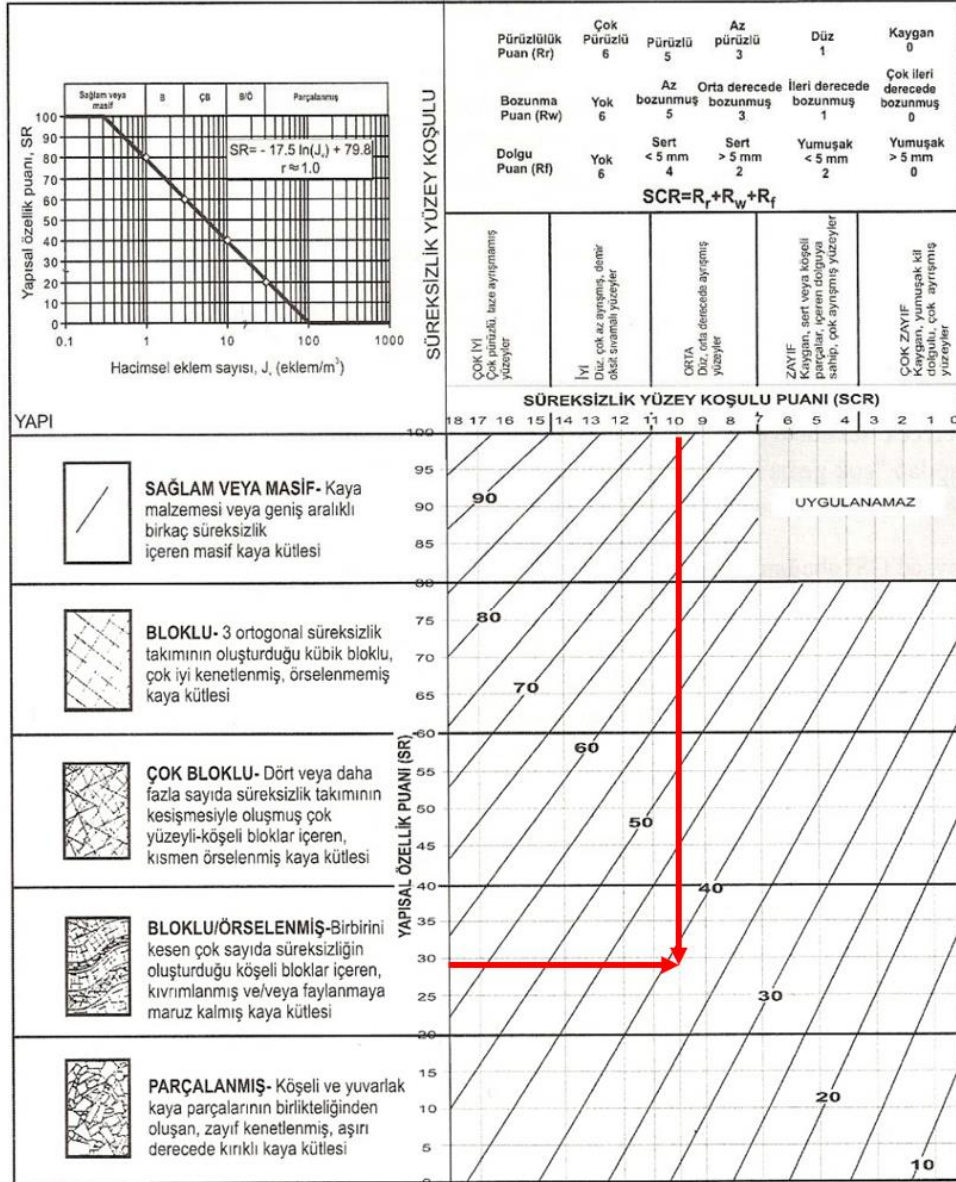
eşitlikleriyle hesaplanmaktadır.



Şekil 3.12 Jeolojik dayanım indeksi abağı (Sönmez ve Ulusay, 2002).

Sahada kayaya ait ölçülen süreksizlik frekansı ve süreksizlik yüzey koşulları, jeolojik dayanım indeksini hesaplamada kullanılmıştır. Kayacın özelliklerine göre önce Eşitlik 3.2 ile SCR puanı hesaplanmıştır. Ardından toplamda ölçülen 2266 adet λ_v değerinin

ortalaması alınmış ve SR değeri Eşitlik 3.1'e göre hesaplanmıştır. Hesaplanan SCR ve SR değerleri, Şekil 3.12'teki abağa yerleştirilmiş ve GSI değeri bulunmuştur. Abağın kullanımı Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Kayacın gösterdiği özelliklere göre aldığı puan Çizelge 3.12'de görülmektedir. GSI sınıflamasına göre kayacın, orta kaliteli kayaç ortam olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.13 GSI sınıflamasına göre Sönmez ve Ulusay (2002)'ın önerdiği abağın kullanımı.

Çizelge 3.12 Çalışma alanındaki kayacın GSI sınıflaması

| SCR Puanı | | | SCR | λ_v | SR | GSI |
|-----------------|----------------------------|--------------------|-----|-------------|----|---------|
| R _f | R _w | R _i | | | | |
| Az Pürüzlü 4 | Az – Orta Bozunmuş 4 | Yumuşak <5 mm 2 | 10 | 18 | 29 | 40 Orta |

3.5.3 Q sistem

Barton vd. (1974), kaya kütle değerlendirmeleri ve tünelcilikte destek elemanları gereksinimlerini bulmak için Q sistemini önermiştir. Q sistemi;

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad 3.3$$

eşitliğiyle hesaplanmaktadır. Altı parametrenin fonksiyonu olan bu eşitlik basitçe kaya kütesinin yapısı ve blok boyutu, blok içi kesme mukavemeti ve aktif gerilme koşullarına bağlıdır. Q sistemi parametrelerinin puanlaması, Çizelge 3.13'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.13 Q sistemi parametreleri puanlamaları (Barton vd., 1974).

| 1. Kaya Tanımı | RDQ (%) | Notlar |
|--|----------------------|---|
| Çok Zayıf | 0 - 25 | 0<RQD<10 olduğu durumlarda RQD değeri 10 olarak alınır. |
| Zayıf | 25 - 50 | |
| Orta | 50 - 75 | |
| İyi | 75 - 90 | |
| Çok İyi | 90 - 100 | |
| 2. Eklem Takımı Sayısı | J_n | Notlar |
| A. Masif, eklem çok az veya hiç yok | 0,5 - 1,0 | Kesişen tüneller için 3J _n , tünel girişleri için 2J _n değeri kullanılır. |
| B. Bir eklem takımı | 2 | |
| C. Bir eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler | 3 | |
| D. İki eklem takımı | 4 | |
| E. İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler | 6 | |
| F. Üç eklem takımı | 9 | |
| G. Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler | 12 | |
| H. Dört veya daha fazla eklem takımı, Gelişigüzel çok fazla sayıda eklemeler | 15 | |
| I. Parçalanmış kaya, toprak görünümünde | 20 | |
| 3. Eklem Pürüzlülük Sayısı | J_r | Notlar |
| <i>Eklem yüzeyleri temasta veya temas 10 cm'den az bir makaslanma ile sağlanıyorsa</i> | | |
| A. Süreksiz eklemeler | 4 | Ortalama eklem aralığı 3 metreden fazla ise değerlere 1 eklenir. |
| B. Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı | 3 | |
| C. Düz, dalgalı | 2 | |
| D. Kaygan, dalgalı | 1,5 | |
| E. Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel | 1,5 | |
| F. Düz, düzlemsel | 1 | Makaslanma izleri olan düzlemsel cıvalı eklemelerde J _r değeri 1,5 alınabilir. |
| G. Kaygan, düzlemsel | 0,5 | |
| <i>Makaslamada duvarla temas yok ise</i> | | |
| H. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıkta kil minerali, içeren zon | 1 | |
| I. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıktaki kumlu, çakıllı ya da parçalanmış zon | 1 | |

Çizelge 3.13 (devam) Q sistemi parametreleri puanlamaları (Barton vd., 1974).

| 4. Eklem Alterasyon Sayısı | Ja | Φ |
|---|----------------------|---|
| <i>Kaya Süreksizlik Dokanağı (mineral dolgu yok, sadece yüzey kaplaması)</i> | | |
| A. Yüzeyler sıkı, sert, yumuşamayan geçirimsiz dolgu | 0,75 | - |
| B. Eklem yüzeyinde değişim yok, sadece yüzey sıvaması var | 1 | 25 - 35 |
| C. Çok az ayrışmaya uğramış süreksizlik yüzeyleri. Yumuşamayan mineral kaplamaları, kum taneleri, kil içermeyen ayrışmamış kaya vb. | 2 | 25 - 30 |
| D. Siltli veya kumlu kil kaplamaları, çok az ve yumuşamayan kil içeriği | 3 | 20 - 25 |
| E. Yumuşamayan veya düşük sürtünmeye sahip kil kaplama. Ayrıca az miktarda şişen killer | 4 | 8 - 10 |
| <i>Temas 10 cm bir makaslama ile sağlanmışsa (ince mineral dolgu)</i> | | |
| F. Kumlu parçalar, kilsiz ayrılmış kaya vb. | 4 | 25 - 30 |
| G. Yüksek derecede aşırı konsolide yumuşamayan tip kil mineralli dolgu (5 mm'den ince, sürekli) | 6 | 16 - 24 |
| H. Orta veya az derecede aşırı konsolide kil, yumuşamayan tip kil mineralli dolgu (5 mm'den ince, sürekli) | 8 | 12 - 16 |
| J. Şişen killi dolgu, montmorillonit vb. (5 mm'den ince, sürekli) | 8 - 12 | 6 - 12 |
| <i>Makaslamada duvarla temas yok ise:</i> | | |
| K. Ayrılmış veya ezilmiş | 6 | - |
| L. Bölgeler, bantlar veya ufalanmış kaya veya kil | 8 | - |
| M. G, H ve J maddelerine bakınız | 8 - 12 | 6 - 24 |
| N. Siltli veya kumlu kil, az miktarda ince taneli malzeme, bölgesel veya bant şeklinde | 5 | - |
| O. Kalın, sürekli kil bölgeleri veya bantları (kil için) | 10 - 13 | 6 - 24 |
| P. G, H ve J maddelerine bakınız | 13 - 20 | 6 - 24 |
| 5. Eklem Suyu Azaltma Faktörü | J_w | Su Basıncı (MPa) |
| A. Kuru kazı veya çok az su gelimi, (örneğin 5 l/dk) | 1 | <0,1 |
| B. Orta derecede su gelimi, eklem dolgularında yıkanma | 0,66 | 0,1 - 0,25 |
| C. Sağlam kayada fazla su gelimi ve basıncı, dolgunsuz eklemler | 0,5 | 0,25 - 1 |
| D. Fazla su gelimi ve basıncı, dolgularda belirgin yıkanma | 0,33 | 0,25 - 1 |
| E. Patlama aşamasında fazla su gelimi ve basıncı, zamanla azalacak şekilde | 0,2 - 0,1 | >1 |
| F. Patlama aşamasında fazla su gelimi ve basıncı, zamanla azalma yok | 0,1 - 0,55 | >1 |
| 6. Gerilme İndirgeme Faktörü | SRF | σ_c/σ₁ σ_θ/σ_c |
| <i>Tünel kazısı sırasında kaya kütlelerinde gevşeme oluşturabilecek ve kazıyı kesen zayıflık zonları</i> | | |
| A. Killi zon oluşumları, çok zayıf çevre kayası (herhangi bir derinlikte) | 10 | |
| B. Kimyasal olarak parçalanmış veya killi tek zayıflık zonu içeren kaya (kazı derinliği <50 m) | 5 | |
| C. Kimyasal olarak parçalanmış veya killi tek zayıflık zonu içeren kaya (kazı derinliği >50 m) | 2,5 | |
| D. Sağlam kayada birçok makaslama zonu, zayıf çevre kayası (herhangi bir derinlikte) | 7,5 | |

Çizelge 3.13 (devam) Q sistemi parametreleri puanlamaları (Barton vd., 1974).

| | | | |
|---|-----------|----------|------------|
| E. Sağlam kayada tek makaslama zonu, (kazı derinliği >50 m) | 5 | | |
| F. Sağlam kayada tek makaslama zonu, (kazı derinliği >50 m) | 2,5 | | |
| G. Gevşek, açık eklemler, yoğun eklemler (herhangi bir derinlikte) | 5 | | |
| Sağlam kaya, kayada gerilme problemleri | | | |
| H. Düşük gerilme, yüzeye yakın, açık eklemler | 2,5 | >200 | <0,01 |
| J. Orta gerilme, gerilme koşulları elverişli | 1 | 200 - 10 | 0,01 - 0,3 |
| K. Yüksek oranda gerilme, çok yakın yapı. Tünel duvarlarının stabilitesinde problemler olabilir | 0,5 - 2 | 10 - 5 | 0,3 - 0,4 |
| L. Masif kayada 1 saat içinde orta derecede dilimlenme | 5 - 50 | 5 - 3 | 0,5 - 0,65 |
| M. Masif kayada birkaç dakika içinde kaya patlaması ve dilimlenme | 50 - 200 | 3 - 2 | 0,65 - 1 |
| N. Sağlam kayada yamulma şeklinde kaya patlaması ve ani dinamik deformasyon | 200 - 400 | <2 | >1 |
| <i>Sıkışan kaya: Yüksek gerilme altında yumuşayan kayanın plastik</i> | | | |
| O. Orta derecede sıkıştıran kaya basıncı | 5 - 10 | | 1 - 5 |
| P. Yüksek derecede sıkıştıran kaya basıncı | 200 - 400 | | >5 |
| <i>Şişen kaya: Su içeriğine bağlı olarak kimyasal şişme</i> | | | |
| R. Düşük kaya basıncında şişme | 5 - 10 | | |
| S. Yüksek kaya basıncında şişme | 10 - 15 | | |

Bu puanlamalara göre bulunan Q değeri ile kaya, Çizelge 3.14'teki gibi sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 3.14 Q değerine bağlı kaya kütle sınıflaması (Barton vd., 1974).

| Q Değeri | Kaya Kütle Sınıfı |
|--------------|-------------------|
| 1000 - 400 | Son derece iyi |
| 400 - 100 | Pek çok iyi |
| 100 - 40 | Çok iyi |
| 40 - 10 | İyi |
| 10 - 4 | Orta |
| 4 - 1 | Zayıf |
| 1 - 0,1 | Çok zayıf |
| 0,1 - 0,01 | Çok fazla zayıf |
| 0,01 - 0,001 | Son derece zayıf |

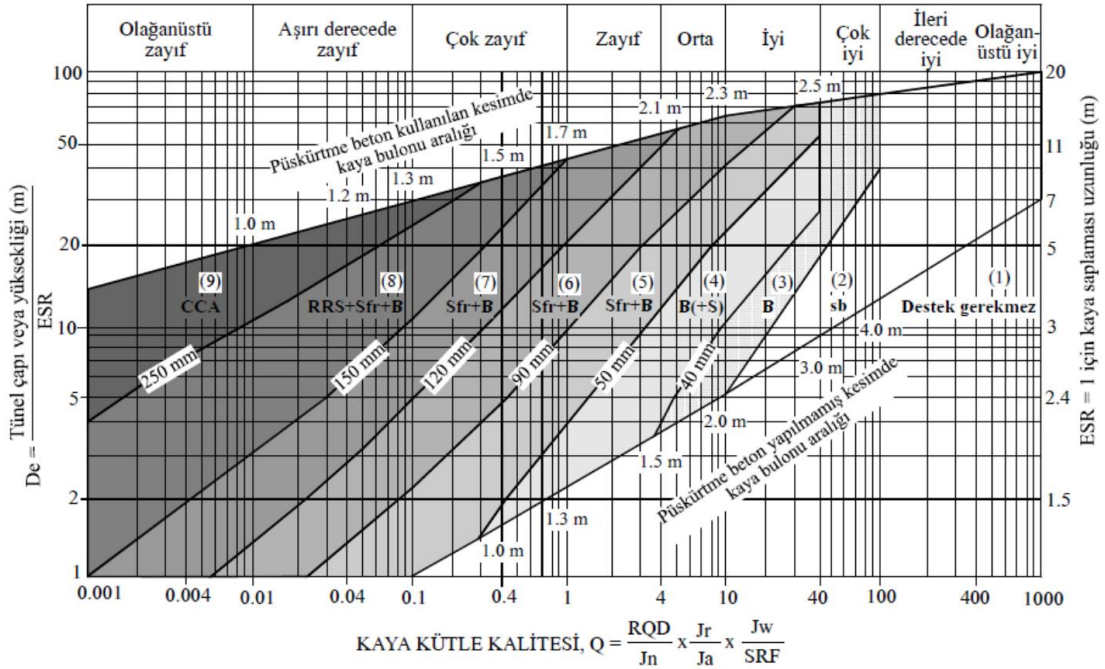
Q sistemi sınıflamasının önemli özelliklerinden biri, kazı destek oranı (ESR) ile gerekli destek tasarımının hesaplanabilmesidir. ESR değeri, kazılacak yapının tipine göre değişkenlik göstermekte olup kazı duraylılığı için bir güvenlik katsayısı olarak tanımlanabilmektedir (Çizelge 3.15) (Barton vd., 1974). Yer altı açıklıklarının duraylılığı ve ihtiyaç duyduğu destek sistemi için eşdeğer boyut (D_e) kavramı tanımlanmıştır ve

$$D_e = \frac{En, \text{ çap veya yükseklik}}{ESR} \quad 3.4$$

formülü ile hesaplanmaktadır (Barton, 1976). Hesaplanan D_e ve Q değerleri, Şekil 3.14'teki grafiğe yerleştirilerek sistemin desteğe ihtiyaç duyup duymadığı belirlenmektedir (Grimstad ve Barton, 1993).

Çizelge 3.15 Yapıya göre kazı destek oranı değerleri (Barton vd., 1974).

| Kazı Tipi | ESR |
|--|-------|
| Geçici maden kazıları | 3 – 5 |
| Düşey bacalar | 2,5 |
| i. Düşey kesitli | 2,0 |
| ii. Kare/daire kesitli | 2,0 |
| Kalıcı maden kazıları, hidroelektrik santralleri, su tünelleri (çok yüksek basınçlı olanlar hariç), pilot tüneller, geniş kazılarda giriş galerileri, deneme ve yaklaşım tünelleri | 1,6 |
| Depolama odaları, su arıtma tesisleri, ufak yol ve demiryolu tünelleri | 1,3 |
| Santral binası, ana yol ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları, kapılar ve kesişme yerleri, tünel portalları ve kesişim yerleri | 1,0 |
| Nükleer yeraltı santralleri, metro istasyonları, fabrika ve halka açık tesisler, spor tesisleri | 0,8 |



1. Destek gerekmez
2. Lokal kaya bulonlama (sb)
3. Sistematik kaya bulonlama (B)
4. Sistematik kaya bulonlama ve 4-5 cm kalınlığında desteksiz püskürtme beton (B+(S))
5. Kaya bulonlu, çelik kafes takviyeli 5-9 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B)
6. Kaya bulonlu, kafes takviyeli 9-12 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B)
7. Kaya bulonlu, kafes takviyeli 12-15 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B)
8. Kaya bulonlu, çelik iksali, kafes takviyeli 15-25 cm kalınlığında püskürtme beton (RRS+Sfr+B)
9. Beton kemerli (CCA)

Şekil 3.14 D_e ve Q değerine göre yer altı açıklığının destek gereksinimi (Grimstad ve Barton, 1993).

Destek gereksinimi olan yer altı açıklıkları yan duvarı ve açık kazılar için destek tasarımında kaya saptaması ve ankraj boylarının belirlenmesi,

$$L = 2 + 0,15 \times \frac{H}{ESR} \quad 3.5$$

formülü ile hesaplanmaktadır. L , ankrajın boyunu, H ise kazının yüksekliğini temsil etmektedir (Barton vd.,1974).

Kaya kütlelerinin özellikleri ile ilgili sahada ölçülen değerler Barton vd. (1974)'nin önerdiği abak ve formülde yerine yazılarak kayaca ait Q değeri, Çizelge 3.13 vasıtasıyla hesaplanmıştır. Kayacın gösterdiği özelliklere göre aldığı puan Çizelge 3.16'da görülmektedir. Q sistem sınıflamasına göre kayacın orta kaliteli kaya ortam olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 3.16 Çalışma alanındaki kayacın Q sistem sınıflaması.

| | |
|---|-----|
| 1. RQD Değeri | |
| Orta | 60 |
| 2. Eklem Takım Sayısı (J_n) | |
| B. Bir eklem takımı | 2 |
| 3. Eklem Pürüzlülük Sayısı (J_r) | |
| E. Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel | 1,5 |
| 4. Eklem Alterasyon Sayısı (J_a) | |
| F. Kumlu parçalar, kilsiz ayrılmış kaya | 4 |
| 5. Eklem Suyu Azaltma Faktörü (J_w) | |
| A. Kuru kazı veya çok az su gelimi | 1 |
| 6. Gerilme İndirgeme Faktörü (SRF) | |
| H. Düşük gerilme, yüzeye yakın, açık eklemli | 2,5 |
| $Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$ | 4,5 |

3.5.3.1 Q sistem sınıflamasına göre kazı destek ihtiyaçlarının değerlendirilmesi

Yapılacak kazının destek gereksiniminin olup olmadığını saptamak için D_e değeri hesaplanmıştır. D_e değeri hesaplamak için Eşitlik 3.4 kullanılmıştır. Projede en derin kazı 84 metredir. İnşa edilecek yapı ana yol olduğundan ESR değeri, 1,0'dır (Çizelge 3.15). Buna göre D_e değeri, 84 olarak hesaplanmaktadır.

Bu bölümde hesaplanan D_e ve önceki bölümde hesaplanan Q değeri, kaya kütlelerinin kazı esnasında desteğe gereksinimi irdelemek için Şekil 3.14'teki abağa yerleştirilmiştir ve sonucu Şekil 3.15'te kırmızı işaret ile gösterilmiştir.

Şekil 3.15'ten çıkarılan sonuca göre kazı açıklığının desteğe ihtiyaç duyduğu bulunmaktadır. Q sistem sınıflamasına göre bu özellikleri gösteren kaya kütlelerinde yapılacak 84 metrelik kazı için kayada ankraj tasarlanması gerektiği bulunmaktadır.

boyu ve aralıkları bulunmuştur. Bu bölümde ise literatürde önerilen eşitliklerle ankraj için minimum kök uzunluğu ve halat sayısı hesaplanacaktır.

3.6.1 Ankraj kök uzunluğu

Kaya ile ankraj arasındaki kuvveti oluşturan bölge, ankrajın kök bölgesi olduğundan kök uzunluğu ankraj kapasitesini etkileyen en önemli parametredir. Bu nedenle Sabatini vd. (1999), tipik olarak kaya kütlesi ile enjeksiyon yüzeyi arasında oluşan ortalama ankraj kökü nihai çeper sürtünmesi değerlerini hesaplamış ve Çizelge 3.17’de vermiştir. Ayrıca alternatif olarak maksimum 3,1 MPa değerine kadar, ortalama ankraj kökü nihai çeper sürtünmesinin, kayanın serbest basınç dayanımının %10’u olarak tahmin edilebileceği önerilmektedir (Post Tensioning Institute [PTI], 1996).

Çizelge 3.17 Zemin ile enjeksiyon arasındaki tahmini ortalama ankraj kökü nihai çeper sürtünmesi değerleri (Sabatini vd., 1999).

| Kaya | | Kohezyonlu Zemin | | Kohezyonsuz Zemin | |
|---------------------|---|--|---|--|---|
| Kaya Tipi | Ortalama Ankraj Kökü Nihai Çeper Sürtünmesi (MPa) | Zemin Tipi | Ortalama Ankraj Kökü Nihai Çeper Sürtünmesi (MPa) | Zemin Tipi | Ortalama Ankraj Kökü Nihai Çeper Sürtünmesi (MPa) |
| Granit ve bazalt | 1,7 - 3,1 | Yumuşak siltli kil | 0,03 - 0,07 | İnce - orta kum, orta sıkı - sıkı | 0,08 - 0,38 |
| Dolomitik kireçtaşı | 1,4 - 2,1 | Siltli kil | 0,03 - 0,07 | Orta - kaba kum (çakıllı), orta sıkı | 0,11 - 0,66 |
| Yumuşak kireçtaşı | 1,0 - 1,4 | Sert kil, orta - yüksek plastisite | 0,03 - 0,10 | Orta - kaba kum (çakıllı), sıkı - çok sıkı | 0,25 - 0,97 |
| Sleyt ve sert şeyl | 0,8 - 1,4 | Çok sert kil, orta - yüksek plastisite | 0,07 - 0,17 | Siltli kum | 0,17 - 0,41 |
| Yumuşak şeyl | 0,2 - 0,8 | Sert kil, orta plastisite | 0,10 - 0,25 | Buzul çökeli | 0,30 - 0,52 |
| Kumtaşı | 0,8 - 1,7 | Çok sert kil, orta plastisite | 0,14 - 0,35 | Kumlu çakıl, orta sıkı - sıkı | 0,21 - 1,38 |
| Ayrıışmış kumtaşı | 0,7 - 0,8 | Çok sert kumlu silt, orta plastisite | 0,28 - 0,38 | Kumlu çakıl, sıkı - çok sıkı | 0,28 - 1,38 |
| Kalker | 0,2 - 1,1 | Çok sert kumlu silt, orta plastisite | 0,28 - 0,38 | Kumlu çakıl, sıkı - çok sıkı | 0,28 - 1,38 |
| Ayrıışmış marn | 0,15 - 0,25 | Çok sert kumlu silt, orta plastisite | 0,28 - 0,38 | Kumlu çakıl, sıkı - çok sıkı | 0,28 - 1,38 |
| Beton | 1,4 - 2,8 | | | | |

Laboratuvarda yapılan tek eksenli basınç dayanım testlerine göre kayacın ortalama serbest basınç dayanımı 18,7 MPa’dır. PTI (1996)’nın önerisi göz önüne alındığında, ortalama ankraj kökü nihai çeper sürtünmesi 1,8 MPa olacaktır.

Bunun yanı sıra Sabatini vd. (1991), zemin ile enjeksiyon arasındaki tahmini ortalama ankraj kökü nihai çeper sürtünmesi değerleri için kireçtaşlarını dolomitik ve yumuşak olmak üzere ikiye ayırmıştır (Çizelge 3.17). Çalışma sahasında bulunan kayaya, çekiç ile çizildiğinde kayacın yüzeyinde iz kaldığından yumuşak kaya olarak sınıflandırılmıştır. Yumuşak kireçtaşları için ortalama ankraj kökü nihai çeper sürtünmesi, 1,0 ila 1,4 MPa arasında değişmektedir. Yani yumuşak kireçtaşlarındaki ortalama ankraj kökü nihai çeper sürtünmesi, önerilen bu değerlerin ortalaması olan 1,2 MPa olarak kabul edilebilir.

Sabatini vd. (1991)'nin önerdiği 1,2 MPa değerindeki ortalama ankraj kökü nihai çeper sürtünmesi, PTI (1996)'nın önerdiği 1,8 MPa ortalama ankraj kökü nihai çeper sürtünmesinden daha düşük olduğundan güvenli tarafta kalmak adına 1,2 MPa değeri ile hesaplama yapılacaktır.

Nihai birim ankraj kökü kapasitesi

$$T_{ult} = \pi \times d \times L \times \tau_{ult} \quad 3.6$$

formülü ile hesaplanmaktadır (Sabatini vd., 1999). Eşitlikte T_{ult} nihai birim ankraj kökü kapasitesi, d ankraj delgisi çapı, L birim ankraj boyu ve τ_{ult} ortalama ankraj kökü nihai çeper sürtünmesini temsil etmektedir. τ_{ult} değeri, Çizelge 3.17'te önerilen yumuşak kireçtaşları için ortalama değer olarak alınmış olup 1200 kPa değerindedir. Ankraj delgisi çapı 127 mm olarak uygulanacaktır. Literatürde kayalarda yapılan ankrajların minimum kök boyu 6 m olarak önerilmektedir (Sabatini vd., 1999). Buna göre ankraj kök boyu 6 m olarak seçilirse nihai birim ankraj kökü kapasitesi Eşitlik 3.6'dan;

$$T_{ult} = \pi \times 0,127 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 1200 \text{ kPa} = 2873 \text{ kN}$$

olarak hesaplanır.

The British Standards Institution (BS, 2015), kaya ile enjeksiyon arasında oluşan ankraj kökü nihai çeper sürtünmesi için 3,0 güvenlik katsayısı (FOS) önermektedir. FOS ile birim başına izin verilen çalışma yükü hesaplanmaktadır. Buna göre 6 m kök boyuna sahip bir ankrajın çalışma kapasitesi $2873 \text{ kN} / 3 = 958 \text{ kN}$ olarak hesaplanmaktadır. Ankrajlar için tasarım yükü 900 kN olarak proje tasarımında belirlenmiştir. Kök boyu 6 m olan ankrajlar için nihai birim ankraj kökü çalışma kapasitesi BS (2015)'ye göre 958 kN olarak hesaplandığından, 900 kN tasarım yükü uygundur.

3.6.2 Test ankraji halat sayılarının hesaplanması

Ankrajların talep edilen yükü karşıladığını kanıtlamak için imalatlardan önce kabul testi yapılacaktır. The British Standards Institution (BS, 2018)'in önerdiğine göre kabul testinde yük, ankrajların projedeki çalışma kapasitesinin 2 katı olacaktır. Halat sayıları öncelikle kabul testi için hesaplanacak ve sahada kabul testi gerçekleştirilecektir. Eğer ankrajlar kabul testinde izin verilen uzama değerleri içinde kalıyorsa, imalat ankrajları için ayrıca halat sayısı hesaplanacaktır.

Projedeki ankrajların hem statik tasarım yükü hem de kabul testi yükünü taşıması gerektiğinden her iki durum için de gerekli ankraj halatı sayısını hesaplamak gerekmektedir. Ankrajların her iki yükü de taşıması için hesaplanan sayılardan büyük olanı ankraj halat sayısı olarak seçilmelidir. Gerekli ankraj halatı sayısını hesaplamak için BS (2015) ve BS (2018)'nin önerdiği eşitlikler kullanılmaktadır. Statik tasarım yükü için gerekli halat sayısı,

$$N_{st} = \frac{\text{Tasarım yükü} \times FOS}{\text{Halat kopma yükü}} \quad 3.7$$

kabul testi yükü için gerekli halat sayısı ise

$$N_{at} = \frac{\text{Kabul testi yükü}}{0,8 \times \text{Halat kopma yükü}} \quad 3.8$$

eşitliğiyle hesaplanmaktadır.

Gerekli halat sayıları hesaplamalarını yapmak için öncelikle halatın kopma yükünü belirlemek gerekmektedir. American Society for Testing and Materials [ASTM] (2018), 15,2 mm (0,6") çapındaki Grade 270 tip ankraj halatları için bir adet halatın kopma yükünü 261 kN olarak belirlemiştir. Bunu kontrol etmek adına laboratuvar ortamında 6 adet halat çekme testi gerçekleştirilmiştir. Bu test sonuçlarına göre halat kopma yükü minimum 265,8 kN; maksimum 278,9 kN ölçülmüştür (Çizelge 3.18). Tüm test sonuçları, ASTM (2018)'nin önerdiği değer üzerinde çıkarak minimum gereksinimi karşılamıştır. Ancak ankraj halatı hesaplamaları yapılırken güvenli tarafta kalmak adına ASTM (2018)'nin önerdiği 261 kN değeri alınacaktır.

BS (2015)'e göre statik tasarım yükü için gerekli halat sayısı, Eşitlik 3.7'de $FOS = 2$ alınarak hesaplanır. Buna göre halat sayısı $900 \text{ kN} \times 2 / 261 \text{ kN} = 6,90$ olarak bulunur.

BS (2018)'e göre kabul testi yükü için gerekli halat sayısı, halat kopma yükünün 0,8 katına göre hesaplanır. Kabul testinde ankrajlar mm^2 'ye 1800 kN'a test edileceğinden gerekli halat sayısı Eşitlik 3.8'den $1800 \text{ kN} / 0,8 \times 261 \text{ kN} = 8,62$ olarak hesaplanır.

Çizelge 3.18 Laboratuvarda gerçekleştirilen ankraj halatı çekme testi sonuçları.

| No | Halat Çapı (mm) | Kopma Yüğü (kN) |
|----|-----------------|-----------------|
| 1 | 15,2 | 268,9 |
| 2 | 15,2 | 265,8 |
| 3 | 15,2 | 278,9 |
| 4 | 15,2 | 266,4 |
| 5 | 15,2 | 266,4 |
| 6 | 15,2 | 266,4 |

Tasarım yükü ve kabul testi yüküne göre hesaplanan halat sayıları tamsayıya yuvarlanmış ve arasından en büyüğü halat sayısı olarak seçilmiştir. Buna göre test ankrajları için 9 halatlı ankraj imalatı yapılması gerekmektedir. Kabul testi ankrajı için BS (2015) ve BS (2018)'nin önerilerine göre hesaplanan ankraj halat sayıları Çizelge 3.19'da gösterilmektedir.

Çizelge 3.19 BS (2015) ve BS (2018)'e göre test ankrajlarının halat sayısının hesaplanması.

| Ankraj Tipi | Tasarım Yüğü (kN) | Kabul Testi Yüğü (Statik) (kN) | Halat Çapı (mm) | Halat Kopma Yüğü (kN) | Statik Tasarım Yüğü için Gerekli Halat Sayısı (FOS = 2) | Kabul Testi Yüğü için Gerekli Halat Sayısı (0.8×Halat Kopma Yüğü) | Seçilen Halat Sayısı |
|--------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------------|---|---|----------------------|
| Test Ankrajı | 900 | 1800 | 15,2 | 261 | 6,90 | 8,62 | 9 |

3.6.3 Test ankrajı tasarımı ve ankraj kabul testi

Önceki bölümlerde belirlenen ankraj kök boyu ve halat sayısının, tasarımı desteklediğini kanıtlamak için bir adet ankraj testi gerçekleştirilmiştir. Kabul testi için ankraj halat sayısı ve ankraj kök boyu önceki bölümlerde hesaplanmıştır. Buna göre kabul testinde ankrajlar 6 m kök boyunda ve 9 adet halatlı olacak şekilde imal edilmiştir. Ankraj serbest boyu olarak 10 m seçilmiş ve kabul testi bu ankraj parametrelerine göre gerçekleştirilmiştir. Test, BS (2015)'ye göre uygulanmıştır.

Çalışma sahasında gerçekleştirilen test ankrajı kabul testine ait görseller Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.16 Ankraj kabul testi genel görünümü.



Şekil 3.17 Ankraj kabul testi uygulaması.

Ankrajlar için tasarım yükü 900 kN'dir. Kabul testinde ankrajlar, BS (2015)'de önerildiği şekilde tasarım yükünün iki katına (1800 kN) test edilmiştir. Test ankraji kabul testi sonuçları Ek C'de verilmektedir. Ankrajların tasarım yükünü taşıdığını irdelemek adına kabul testinden elde edilen veriler ile ankraj kök bölgesi yük – uzama grafiği, ankraj serbest boyu yük – görünür uzama grafiği ve ankraj kök bölgesi sıyrıлма grafiği hazırlanmıştır.

Kabul testinde ölçülen test ankrajına ait uzama miktarları Çizelge C.1'de verilmiştir.

Ankraj kök bölgesine ait yük ve uzama miktarları, Çizelge C.2'de görülmektedir. Bu veriler ile hazırlanan yük – deplasman eğrisi Şekil C.1'de görülmektedir. Ankraj kök bölgesine ait uzamaların, BS (2015)'nin izin verdiği sınırlar içinde olduğu tespit edilmiştir.

Ankraj serbest boyuna ait yük ve görünür uzama miktarları Çizelge C.3'te görülmektedir. Bu veriler ile hazırlanan yük – görünür uzama eğrisi Şekil C.2'de görülmektedir. Yüke karşı ankraj serbest boyu uzaması, BS (2015)'nin önerdiği minimum ve maksimum değerler arasında kalmaktadır.

Ankrajın kök bölgesindeki sıyrıлма oranı Şekil C.3'te hazırlanan grafik ile gösterilmektedir. Grafikte 15 dakikalık süre boyunca ölçülen deplasman yani sıyrıлма miktarı gösterilmektedir. Test sonucuna göre uzama miktarı sıfırdır. BS (2015)'e göre uzama miktarı 2 mm altında ise ankraj kökü sıyrılmamış olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle yapılan kabul testinde kök bölgesinde sıyrıлма olmadığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak bu test sonuçlarına göre 1800 kN'lik maksimum test yüküne başarıyla çıkmış ve ankraj bu yükü başarıyla taşımıştır. Yani belirlenen ankraj parametrelerinin gerekli yükleri taşıyabildiği saptanmış ve bu parametrelerin imalat ankrajları için uygun olduğuna karar verilmiştir.

3.6.4 İmalat ankrajları halat boyu ve sayısının hesaplanması

Test ankrajları, kabul testini başarıyla geçtiğinden imalat ankrajları için BS (2015) ve BS (2018)'nin önerdiği Eşitlik 3.7 ve 3.8 ile gerekli halat sayısı belirlenmiştir (Çizelge 3.20). İmalat ankrajları için kabul testi yükü, tasarım yükünün 1,5 katı (1350 kN) olarak önerilmektedir (BS, 2015). Sonuç olarak imalat ankrajlarının, 16 m toplam boy, 10 m serbest boy, 6 m kök boy ve 7 halatlı olacak şekilde tasarlanmasına karar verilmiştir.

Ankraj boyu ve halatları hesaplamaları neticesinde yapılan tasarımın uygunluğu daha sonraki analiz bölümünde sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar programında incelenecek ve doğrulanacaktır.

Çizelge 3.20 BS (2015) ve BS (2018)'e göre imalat ankrajlarının halat sayısının hesaplanması.

| Ankraj Tipi | Tasarım Yüğü (kN) | Kabul Testi Yüğü (Statik) (kN) | Halat Çapı (mm) | Halat Kopma Yüğü (kN) | Statik Tasarım Yüğü için Gereklı Halat Sayısı (FOS = 2) | Kabul Testi Yüğü için Gereklı Halat Sayısı (0.8×Halat Kopma Yüğü) | Seçilen Halat Sayısı |
|----------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------------|---|---|----------------------|
| İmalat Ankrağı | 900 | 1350 | 15,2 | 261 | 6,90 | 6,47 | 7 |

Daha önceki bölümlerde Grimstad ve Barton (1993)'un önerilerine göre minimum toplam ankraj boyu 15 m olarak belirlenmiştir. Ancak gerçekleştirilen ankraj kabul testinde toplam ankraj boyu 16 m olarak imal edilmiş ve test sonucu başarı ile sonuçlanmıştır. Bu nedenle imalat ankrajları da 16 m toplam boyda olacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak ankraj boyları uzadığından daha önce Grimstad ve Barton (1993)'un önerdiği gibi ankrajları 2,1 – 2,3 m aralıklar ile yerleştirmek yerine aralık mesafeleri arttırılmış ve 3 m olacak şekilde tasarlanmıştır. Yapılan bu tasarım daha sonraki analiz bölümünde sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar programında analiz edilecektir.

3.6.5 Çelik ankraj plakası hesaplamaları

Ankraj plakası, ankrajın bağlı olduğu yüzeye uyguladığı yükleri dağıtmak için tasarlanmıştır. Ankraj plakası, ankraj ile bağlı olduğu yüzey arasında yük taşıyan bir arayüz olarak görev yapar. Ankraj plakasının temel amacı, yüzeyde artan yük taşıma kapasitesi sağlamak ve yükü plaka boyunca her noktaya eşit bir şekilde dağıtmaktır. Yüğü daha geniş bir alana yayarak ankraj plakası, bağlı olduğu yüzeydeki zemin malzemesinin çatlaması, kırılması veya bozulması riskini azaltmaya yardımcı olur.

Ankraj plakasının uygun boyutlarını hesaplamadan önce plakanın bağlı olduğu kayanın izin verilebilir taşıma kapasitesinin hesaplanması gerekmektedir. Peck vd. (1974), eklemlı kayalarda izin verilebilir taşıma kapasitesini Çizelge 3.21'deki gibi önermektedir.

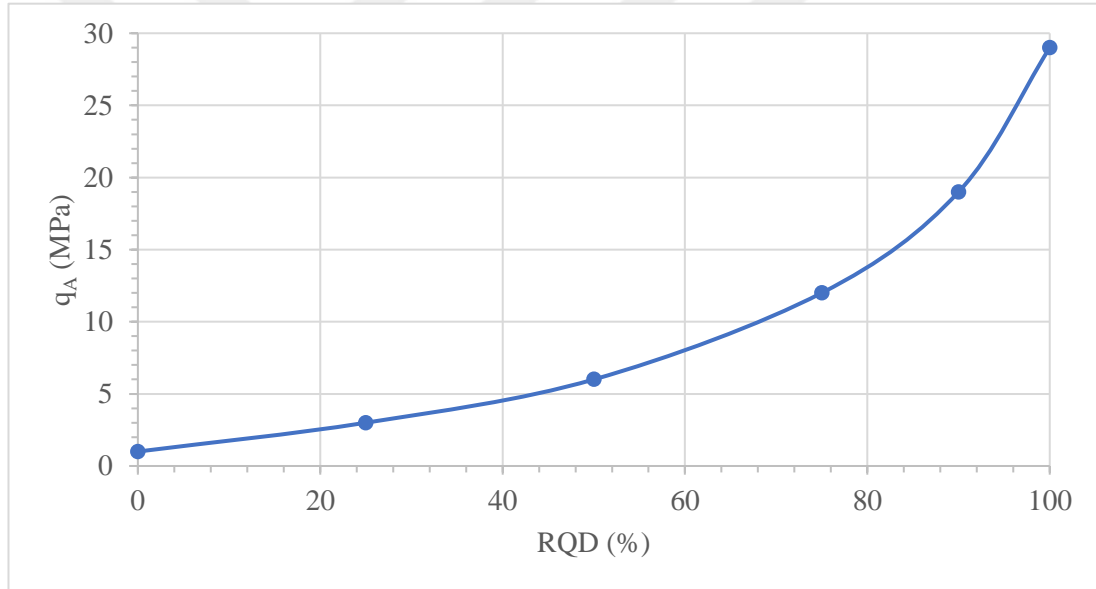
Peck vd. (1974)'nin Çizelge 3.21'de önerdiği değerler ile Şekil 3.18'deki grafik çizilmektedir ve bu grafikten elde edilen kayanın RQD değeri ile taşıma kapasitesinin arasındaki bağıntı,

$$q_A \approx 1 + \frac{RQD/16}{1 - (RQD/130)} \quad 3.9$$

eşitliği ile formüle edilmektedir.

Çizelge 3.21 Eklemlili kayalarda izin verilebilir taşıma kapasitesi.

| RQD (%) | q _A (MPa) |
|---------|----------------------|
| 100 | 29 |
| 90 | 19 |
| 75 | 12 |
| 50 | 6,25 |
| 25 | 3 |
| 0 | 0,96 |



Şekil 3.18 Eklemlili kayalarda, kayanın RQD değeri ile kayanın izin verilebilir taşıma kapasitesini gösteren grafik (Peck vd., 1974).

Sondajlardan elde edilen RQD değerlerinin ortalaması %60 olarak bulunmaktadır. Eşitlik 3.9'da RQD değerleri girilmiş ve çıkan sonuç alt tamsayıya yuvarlanmıştır. Buna göre kayanın izin verilebilir taşıma kapasitesi (q_A) değeri 7 MPa olarak hesaplanmaktadır.

Çalışma sahasında 45x45 cm taban boyutlarında çelik ankraj plakası kullanılması planlanmaktadır. Bu boyutlardaki ankraj plakasına uygunluğunu hesaplamak için plakaya ankraj tarafından aktarılan yükün, yüzeydeki kaya tarafından taşınabilir olup olmadığı hesaplanmalıdır. Ankraj tarafından plakaya aktarılan yük, plaka yüzeyi

boyunca eşit şekilde dağılmaktadır. Buna göre ankrajın plakaya uygulayacağı maksimum yük, plakanın alanına bölüldüğünde, plaka yüzeyi boyunca oluşan birim yük hesaplanmaktadır. Kullanılması planlanan ankraj plakasının taban boyutları 45x45 cm'dir, alanı ise yaklaşık 0,2025 m²'dir. Ankrajların taşıdığı maksimum yük, 1350 kN ile kabul testi yüküdür. Bu değerlere göre ankraj plakası yüzeyi boyunca oluşan birim yük $1,35/0,2025 = 6,67 \text{ MPa}$ olarak hesaplanmaktadır.

Kaya için izin verilebilir taşıma yükü ve ankraj plakası yüzeyinde oluşan birim yük için hazırlanan özet tablo Çizelge 3.22'de görülmektedir.

Çizelge 3.22 Ankraj plakası hesaplamaları sonucu.

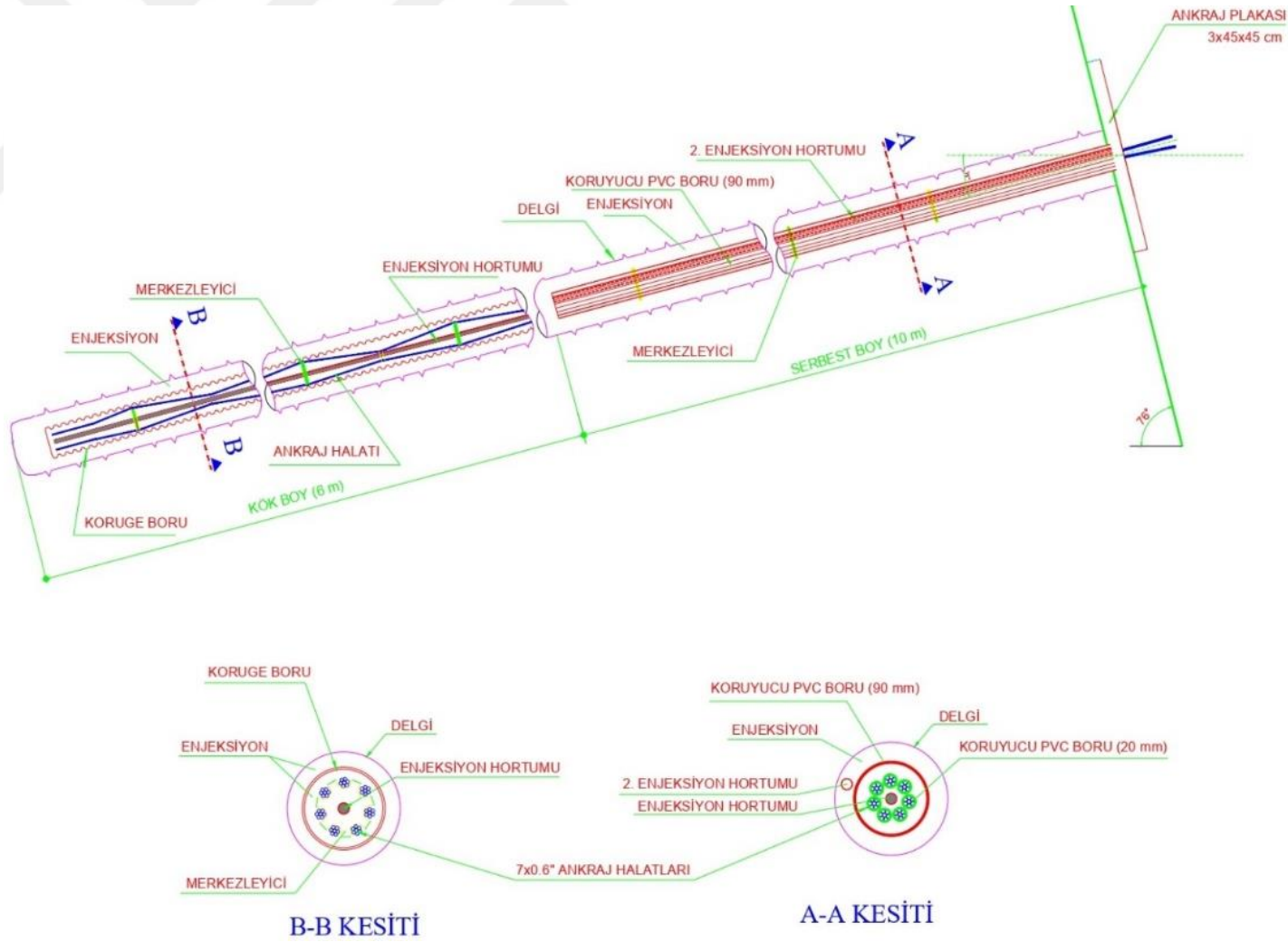
| Ankraj Plakası | | | | Kabul Testi Yükü (kN) | RQD (%) | Ankraj Plakası Yüzeyindeki Birim Yük (MPa) | Eklemli Kayaçta İzin Verilebilir Yük (MPa) |
|----------------|----------|----------------|------------------------|-----------------------|---------|--|--|
| En (mm) | Boy (mm) | Yükseklik (mm) | Alan (m ²) | | | | |
| 450 | 450 | 30 | 0,2025 | 1350 | 60 | 6,67 | 7 |

Peck vd. (1974)'nin önerdiği kayanın izin verilebilir taşıma kapasitesi (7 MPa), plaka yüzeyi boyunca oluşan birim yükten (6,67 MPa) büyük olduğundan 45x45 cm taban boyutlarına sahip ankraj plakasının tasarımının uygun olduğuna karar verilmiştir.

3.6.6 İmalat ankrajlarının tasarımı

Önceki bölümlerde belirlenen ankraj kök boyu, serbest boyu, halat sayısı ve plakası parametreleri belirlenmiştir. Ankrajın gerektirdiği geri kalan parametreler ise BS (2015)'nin önerilerine göre kararlaştırılmıştır. Buna göre imalat ankrajı tasarımının boy ve en kesitleri Şekil 3.19'de görülmektedir.

BS (2015)'te belirlenen standartlara göre yapılan ankraj tasarımı şunları içermektedir. Halatlarının dış etkenlere karşı korunması ve korozyonun önlenmesi için ankraj halatları, koruge ve PVC borular ile kaplanmıştır. Ankraj halatlarının birbirinden eş mesafelerde konumlanabilmesi için merkezleyiciler yerleştirilmiştir. Merkezleyiciler yerleştirilirken ankraj kök boyunda minimum 3 adet olmasına dikkat edilmiştir. İlk ve ikinci enjeksiyonlar için iki farklı enjeksiyon hortumu yerleştirilmiştir.



Şekil 3.19 İmalat ankrajlarına ait tasarımın boy ve en kesitleri.



4. ANALİZLER

Şev stabilitesi tartışması ilk defa Coulomb (1776) tarafından önerilmiştir. Coulomb'un teorisine göre herhangi eğimli bir duvarda, duvar sürtünmesi ve dolgunun eğimi için istinat sistemi üzerinde ortaya çıkan yatay kuvveti veren bir analiz yöntemi vardır. Bu teori, zemin kayma direncinin duvar ve göçme düzlemi boyunca geliştiği varsayımına dayanmaktadır.

Daha sonra bu teori, Hoek ve Bray (1981) tarafından geliştirilmiş ve kaya şevinin malzeme özellikleri, yüksekliği, yüzey açısı ve kayadaki eklemlerin durum ve yönelimlerinin, yol yarmalarında ve şev duraysızlık problemlerinde önemli bir rol oynadığını söylemiştir.

Şev duraysızlık problemlerinin çözümlenmesi için birçok teknik önerilmiştir. Bunlardan biri ilk defa Fellenius (1927)'un öne sürdüğü Limit Denge Metodu'dur (LEM). Daha sonra Bishop (1955), Morgenstern ve Price (1965), Spencer (1967) ve Janbu (1973), LEM için farklı çözüm yöntemleri önermiştir. LEM, şev stabilitesi analizlerinde basitleştirilmiş ve yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yöntem, şevin kritik bir yüzey boyunca yenileceği varsayımına dayanmaktadır. LEM, şev stabilitesini değerlendirmek için direnç kuvvetlerinin sürükleyici kuvvetlere oranı olarak tanımlanan güvenlik faktörünü (FOS) hesaplamaktadır. Yöntem, yenilmenin tanımlanan yenilme yüzeyi boyunca aniden meydana geldiğini varsaymaktadır. LEM, düzlem gerilme koşullarını varsayarak problemin basitleştirildiği iki boyutlu bir yöntemdir.

Ancak Coggan vd. (1998), LEM'in eklemlili kaya kütlelerinin şev stabilitesi analizlerinde yetersiz kaldığını öne sürmüştü ve bu durumlar için kaya şevlerinde Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) ile stabilite analizini önermiştir. FEM, şevi küçük elemanlara bölerek davranışını analiz etmek için matematiksel modeller kullanan sayısal bir yöntemdir. Yani FEM, şevi sonlu elemanlara böler ve bitişik elemanlar arasındaki etkileşimleri dikkate alır. Şevin içindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımlarını belirlemek için denklem sistemi çözer. FEM ile karmaşık geometriler ve

sınır koşulları ele alınabilir ve doğrusal olmayan malzeme davranışı ve gözenekli su basıncı etkileri hesaplanabilir.

Çalışmaya konu olan proje, Suudi Arabistan'da Vision 2030 projeleri kapsamında inşa edilen en prestijli projelerden biridir. Suudi Arabistan hükümeti bu bölgede yeni bir şehir ve eğlence merkezi kurmayı planlamaktadır. Tamamen yeni bir şehir kurulması ve çevresinin bakir olması nedeniyle bölgeye yeni otoyollar inşa edilecektir. Riyad bölgesinden gelerek proje kapsamında yeni inşa edilen şehrin içinden geçip batıya doğru devam eden otoyollardan bir tanesinin güzergahı üzerinde büyük bir kot farkına rastlanmaktadır. Çalışma kapsamına konu olan yol yarmasının amacı, otoyolun güvenli inşa edilebilmesi için otoyolun doğu ve batısındaki kot farkının azaltılmasıdır. Bu nedenle bölgede birçok inceleme ve analiz gerçekleştirilmiştir. Bölgedeki kayaçlar incelendiğinde, tamamen killi kireçtaşlarından oluştuğu, düşük mukavemet ve elastisite gösterdiği ve tabakaların yataya yakın olduğu saptanmıştır. Bu bilgiler doğrultusunda kaya kütlelerinin özellikleri mühendislik parametreleri açısından incelenmiş ve yol yarması için tasarım ve analizler yapılmıştır. Bölgeye ulaşımı sağlamak için inşa edilen yollar kalıcı yapılar olduğundan yollar, minimum 50 yıl boyunca hiçbir bakım ve iyileştirmeye ihtiyaç duymayacak şekilde tasarım ve analizler yapılarak projelendirilmiştir. Bu nedenle gelecekte gerçekleşme ihtimali olan mühendislik problemlerini de elimine ederek güvenli bir yol yarması tasarlanması amaçlanmıştır. Özellikle zaman zaman Riyad bölgesinde ani ve yoğun sel baskınlarının yaşanması ve yeni bir şehir inşa edilmesi nedeniyle bölgeye yapay su getirilmesi ve bu nedenle bölgede iklimin gözlenebilmesi nedeniyle zaman içinde şevlerin suya doymun bir ortama dönüşmesi beklenmektedir. Bu nedenle şevler suya doymun bir ortam gibi analiz edilmiş ve gelecekte karşılaşılabilecek mühendislik sorunlarına karşı yapının güvenliği artırılmıştır.

Çalışma alanında yapılması planlanan, 84 m kazı derinliğine ulaşan yol yarması için saha gözlemleri, ölçümleri ve laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu ölçümler sonucunda çalışma alanındaki kayalar için farklı kaya kütle sınıflamaları yapılmıştır. Q sistem sınıflamasına göre kaya kütlelerinin orta kaliteli olduğu ve kazı yapılması durumunda desteğe ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir. Buna göre şevin ankrajlarla desteklenmesi gerektiği saptanmıştır. Bu durumu irdelemek adına işverenden gelen palyeli şev sistemi, Rocscience RS2 programında sonlu elemanlar yöntemiyle gerilim

indirgeme faktörü (SRF) açısından incelenmiştir. Rocscience RS2 programı, SRF metodunu kullanarak şev için dolaylı yoldan bir güvenlik katsayısı belirlemektedir. SRF parametresi, yapılan bir kazı sırasında kaya kütlelerinin kayma bölgeleri boyunca gevşeme basıncının bir ölçüsü olarak tanımlanabilmektedir. SRF, ortamın kırılma dayanımı değerinin, kalıntı dayanım değerine oranıdır. SRF değeri arttıkça ortam daha rijit ve mukavim, azaldıkça daha plastik davranır.

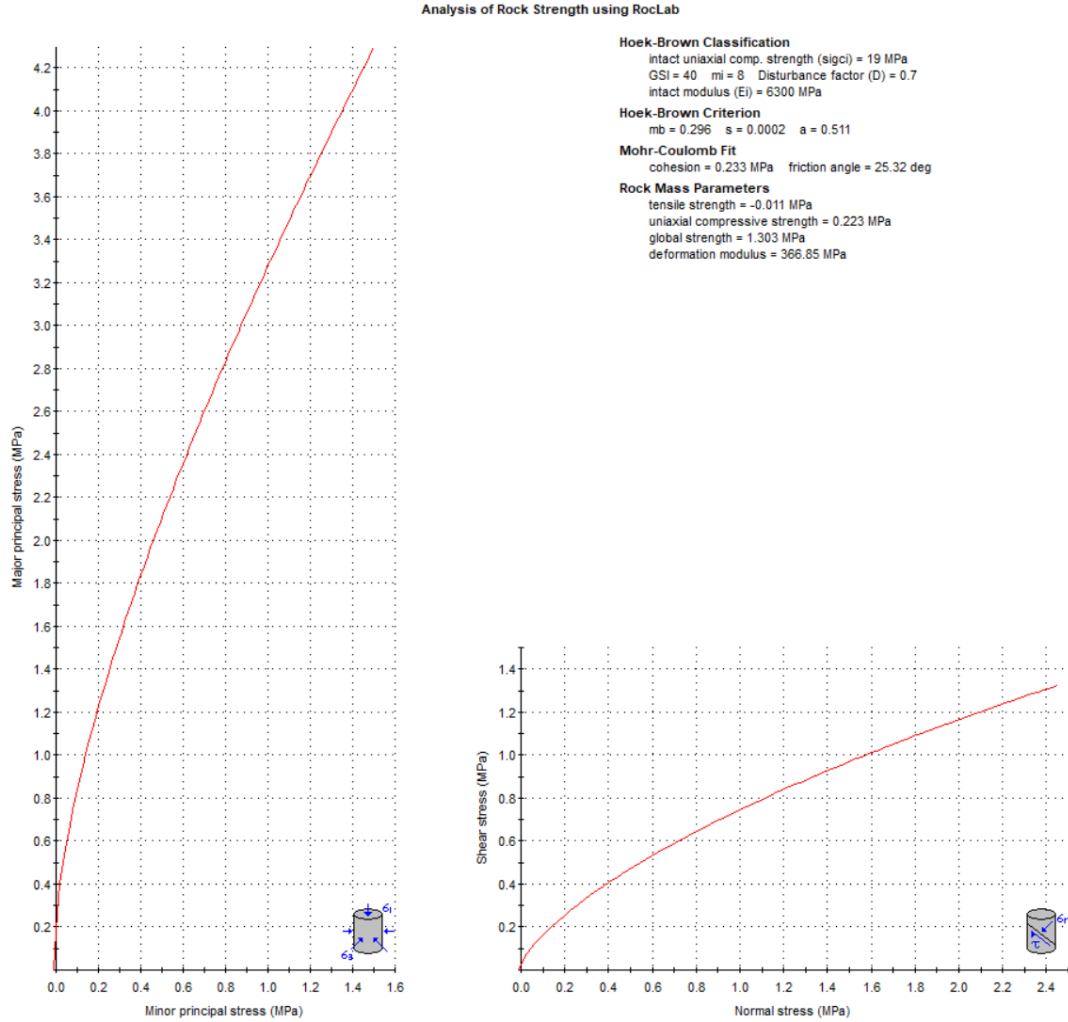
Kayacın mukavemeti azaldıkça maksimum deplasman artmaktadır. Bir noktada şev yenilecek, deformasyonlar hızla artacak ve sonlu eleman analizi yakınsamayacaktır. Bu nokta, kritik SRF'yi tanımlamaktadır. Sabatini vd. (1999), kalıcı şev yapılarının duraylı olabilmesi için kritik SRF değerinin minimum 1,5 olması gerektiğini önermektedir.

İlk önce şevin, desteksiz olarak güvenli bir şekilde kazılıp kazılamayacağı Rocscience RS2 programında incelenmiştir. Bunun için analizin yapılabilmesi için bilgisayar programına kaya kütlelerine ait bazı jeomekanik parametrelerin girilmesi gerekmektedir. Sahada ve laboratuvarında kaya kütleleri üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar RocLab programına girilerek bu deneyler sonucunda kayaya ait belirlenmemiş parametreler saptanmıştır. Buna göre kayanın kohezyonu (c) 0,233 MPa ve içsel sürtünme açısı (ϕ) 25° olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.1).

RocLab programından ve diğer deneylerden kayaya ait elde edilen bu veriler, Rocscience RS2 programına girilerek desteksiz şekilde kazı yapıldığı durumda kritik SRF değeri hesaplanmıştır. Rocscience RS2 programı desteksiz kazı yapıldığı durumda kritik SRF'yi 1,39 olarak hesaplamıştır ve maksimum deplasman 6,81 cm olarak görülmektedir (Şekil 4.2). Literatürde kalıcı yapılar için minimum 1,5 SRF önerildiğinden (Sabatini vd., 1999) ve desteksiz şev analizinde kritik SRF 1,39 hesaplandığından şev kazısının desteksiz olarak yapılması durumunda duraysızlık oluşma riski olduğu anlaşılmıştır.

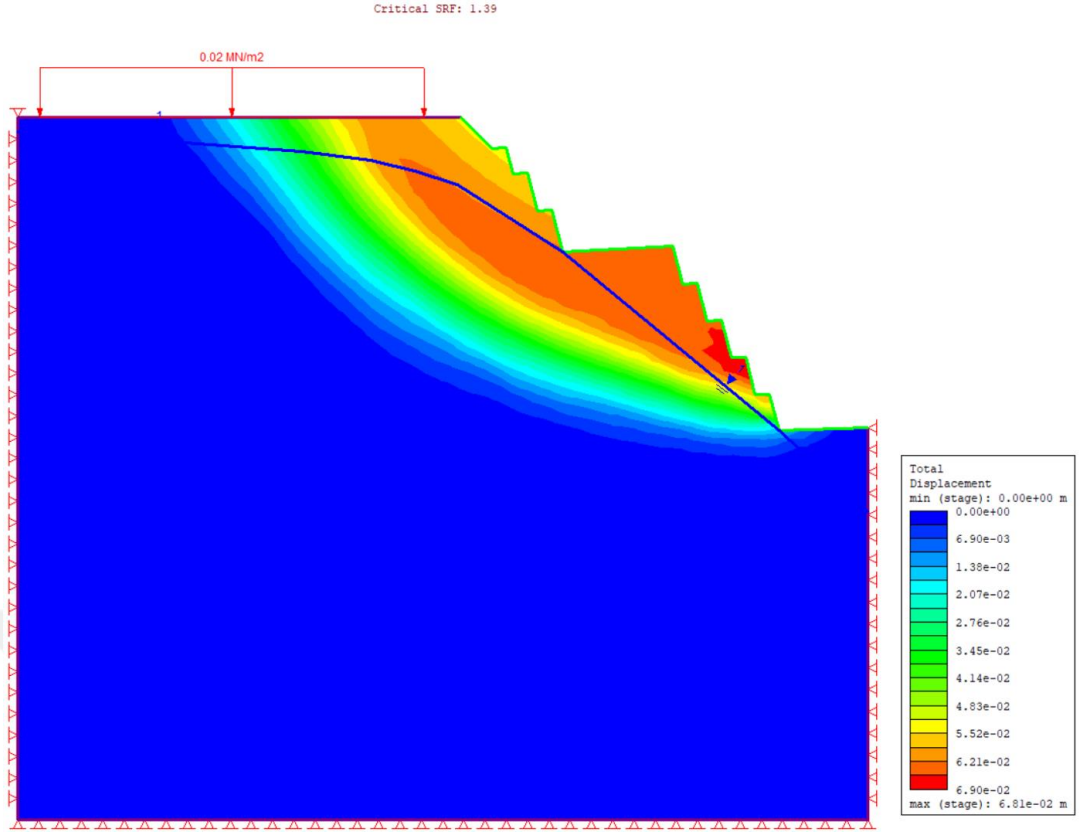
Rocscience RS2 programı ile desteksiz şev kazısı için kritik SRF değeri literatürde önerilenden düşük kaldığından ankraj sistemi tasarlanarak, kayma zonunun şevin daha gerisine taşınması hedeflenmiş ve minimum 1,5 SRF değeri sağlanmaya çalışılmıştır. Ankraj tasarımları yapılırken topoğrafik koordinatları belirlenen alan içinde yapılan şev ve palyelendirme tasarımı (Şekil 4.3) göz önüne alınmış ve 3 metrelik ankraj aralıkları buna göre şev yüzeylerine yerleştirilmiştir. Daha önceki bölümlerde

literatüre göre imalat ankrajları, 10 m serbest boy, 6 m kök boy ve 7 halatlı olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca yapılan ankraj kabul testi ile bu parametreler ile ankrajın istenen şekilde çalıştığı belirlenmiştir.

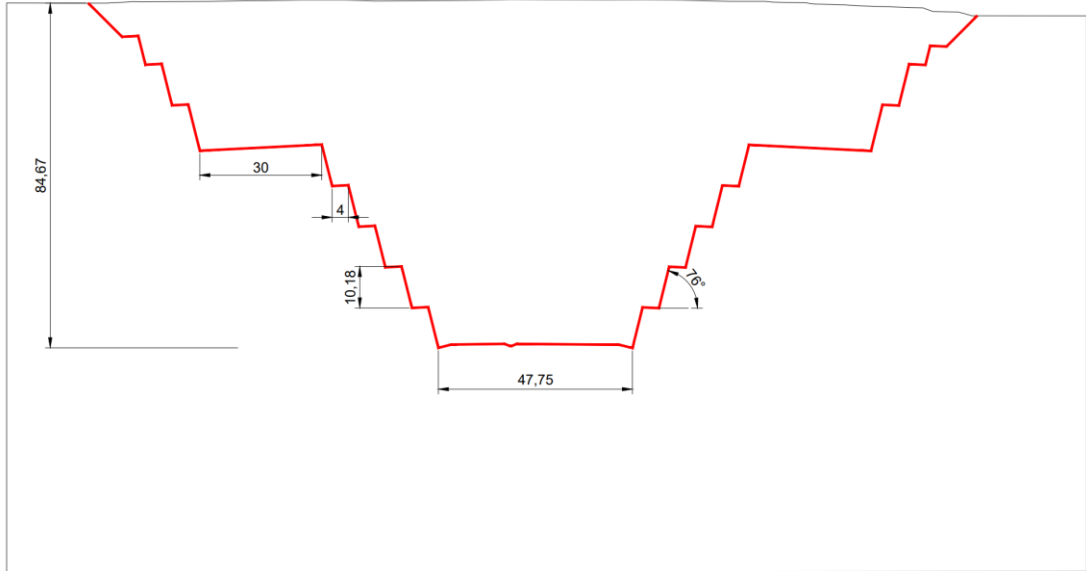


Şekil 4.1 Roclab programında hesaplanan kaya kütesine ait parametreler.

Boy ve halat sayıları hesaplanan ankrajlar, şev yüzeyi boyunca düşeyde 3 m aralıklarla yerleştirilmiştir. Ayrıca maksimum güvenliği sağlamak adına her kazının kademeli olarak yapılması planlanmıştır. Buna göre her kademedeki kazı tamamlandıktan sonra, aynı kademede bulunan ankrajların imalatı tamamlanacak, ardından bir alttaki kademenin kazısına başlanacaktır. Böylece proje, 8 adımda kazı ve ankrajlar tamamlanacak şekilde Rocscience RS2 programında organize edilmiştir (Şekil 4.4).



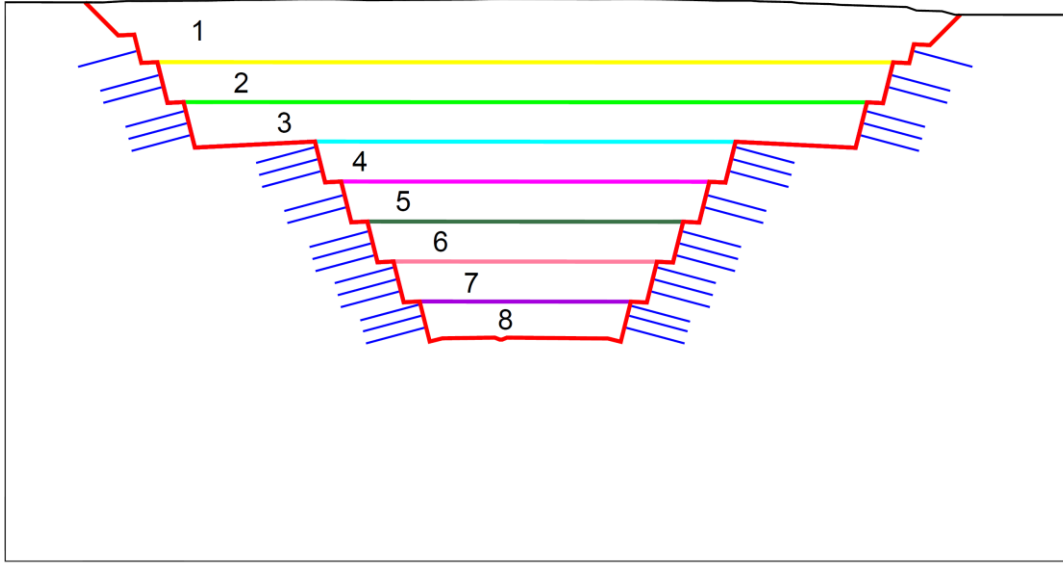
Şekil 4.2 Desteksiz şev kazısının SRF = 1,39 olduğu durumda RS2 programında analizi.



Şekil 4.3 Topoğrafik koordinatları belirlenen alan içinde tasarlanan şev ve palye sistemi.

Literatürde önerilen analitik hesaplamalara göre bu tez çalışması kapsamında tasarlanan ankrajların, şev sistemini güvenli şekilde taşıması gerekmektedir. Ancak bunu doğrulayabilmek adına tasarlanan proje, sonlu elemanlar yöntemi ile

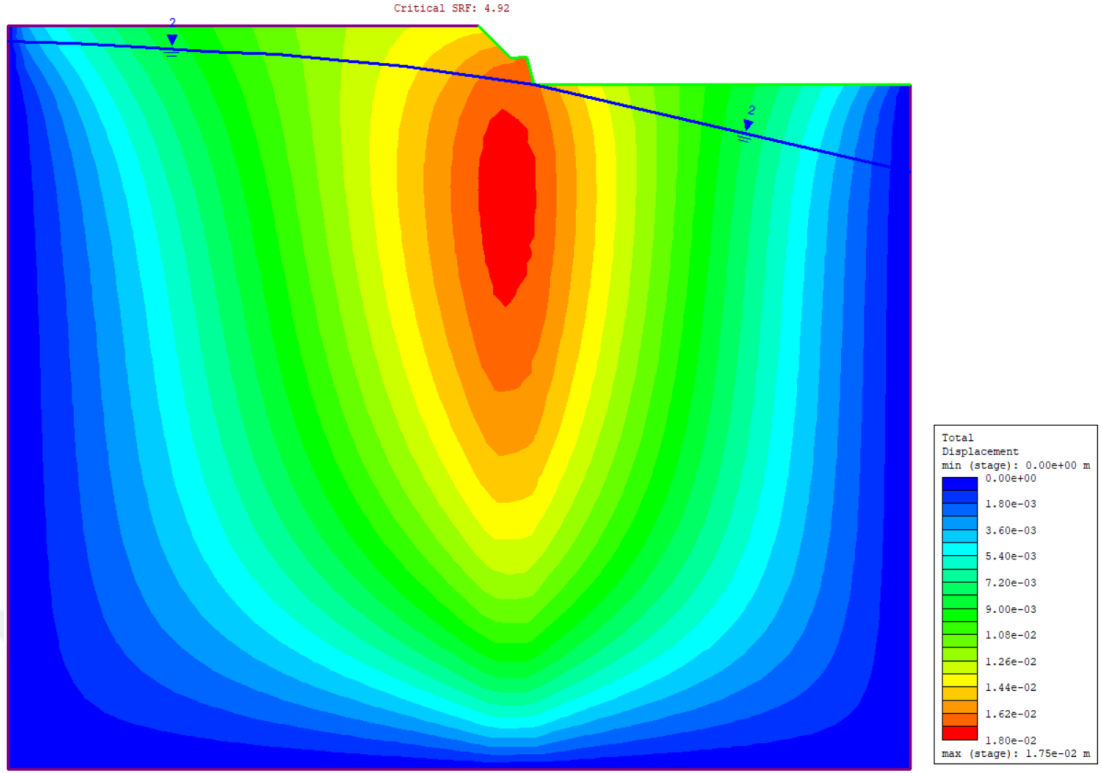
incelenecektir. Bunun için kaya ve ankraj parametreleri belirlenen ve şev tasarımı yapılan projenin destekli şekilde kritik SRF değerini belirlemek ve literatürde değeri sağladığını belirlemek adına proje çizimleri, Rocscience RS2 programına aktarılmıştır. Her bir kazı kademesinin kritik SRF değerini ayrı olarak hesaplamak ve herhangi birinde duraylılık açısından riskli bir durum olup oluşmadığını saptamak adına her kazı kademesi Rocscience RS2 programında ayrı olarak çizilmiş ve analiz edilmiştir.



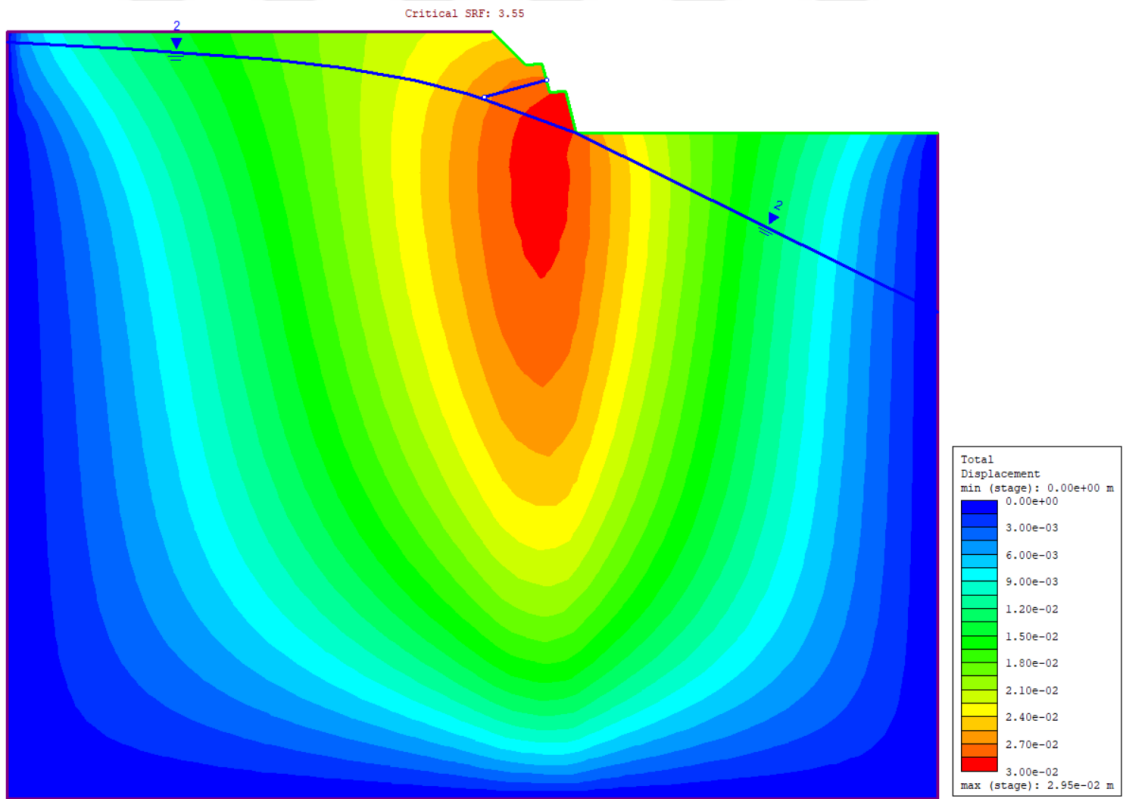
Şekil 4.4 Şev tasarımının kazı aşamaları.

Çalışma kapsamında birinci kademe kazısı yapılmış ve Rocscience RS2 programında kritik SRF analiz edilmiştir. Buna göre birinci kademe kazı yapıldıktan sonra kritik SRF değeri 4,92 ve maksimum deplasman 1,75 cm olarak hesaplanmıştır. Analizdeki kritik SRF değeri, önerilen minimum 1,5 SRF'yi geçtiği için bu kazı kademesinde duraysızlık açısından riskli bir durum olmadığı saptanmıştır. Birinci kademe kazısı için Rocscience RS2 programında yapılan kritik SRF analizi Şekil 4.5'de görülmektedir.

Çalışma kapsamında ikinci kademe kazısı yapılmış ve Rocscience RS2 programında kritik SRF analiz edilmiştir. Buna göre ikinci kademe kazı yapıldıktan sonra kritik SRF değeri 3,55 ve maksimum deplasman 2,95 cm olarak hesaplanmıştır. Analizdeki kritik SRF değeri, önerilen minimum 1,5 SRF'yi geçtiği için bu kazı kademesinde duraysızlık açısından riskli bir durum olmadığı saptanmıştır. İkinci kademe kazısı için Rocscience RS2 programında yapılan kritik SRF analizi Şekil 4.6'da görülmektedir.

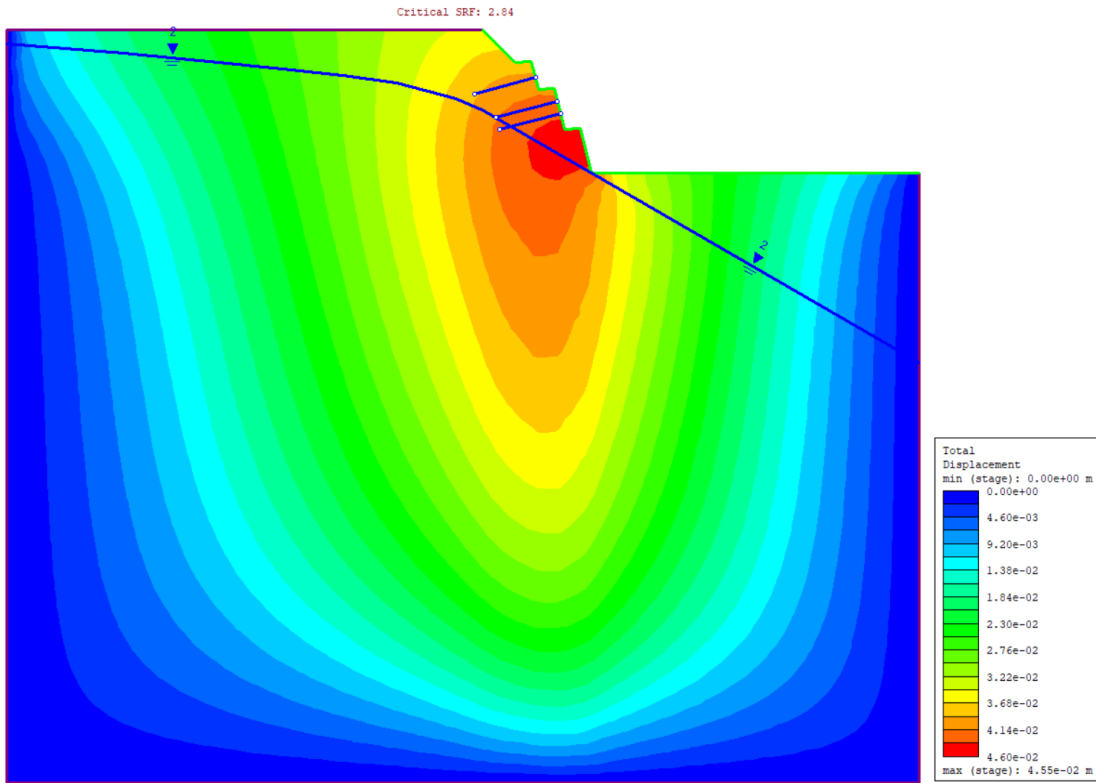


Şekil 4.5 Destekli şev tasarımında yapılan birinci kademe kazının RS2 programında SRF analizi.



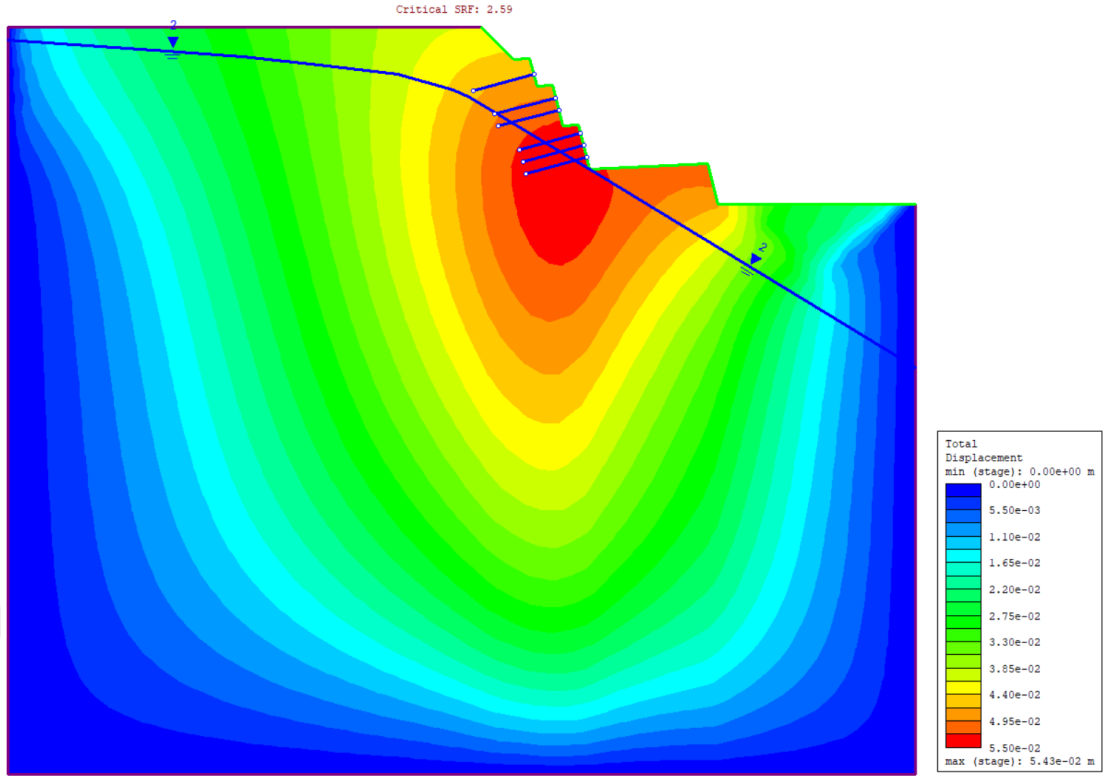
Şekil 4.6 Destekli şev tasarımında yapılan ikinci kademe kazının RS2 programında SRF analizi.

Çalışma kapsamında üçüncü kademe kazısı yapılmış ve Rocscience RS2 programında kritik SRF analiz edilmiştir. Buna göre üçüncü kademe kazı yapıldıktan sonra kritik SRF değeri 2,84 ve maksimum deplasman 4,55 cm olarak hesaplanmıştır. Analizdeki kritik SRF değeri, önerilen minimum 1,5 SRF'yi geçtiği için bu kazı kademesinde duraysızlık açısından riskli bir durum olmadığı saptanmıştır. Üçüncü kademe kazısı için Rocscience RS2 programında yapılan kritik SRF analizi Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7 Destekli şev tasarımında yapılan üçüncü kademe kazısının RS2 programında SRF analizi.

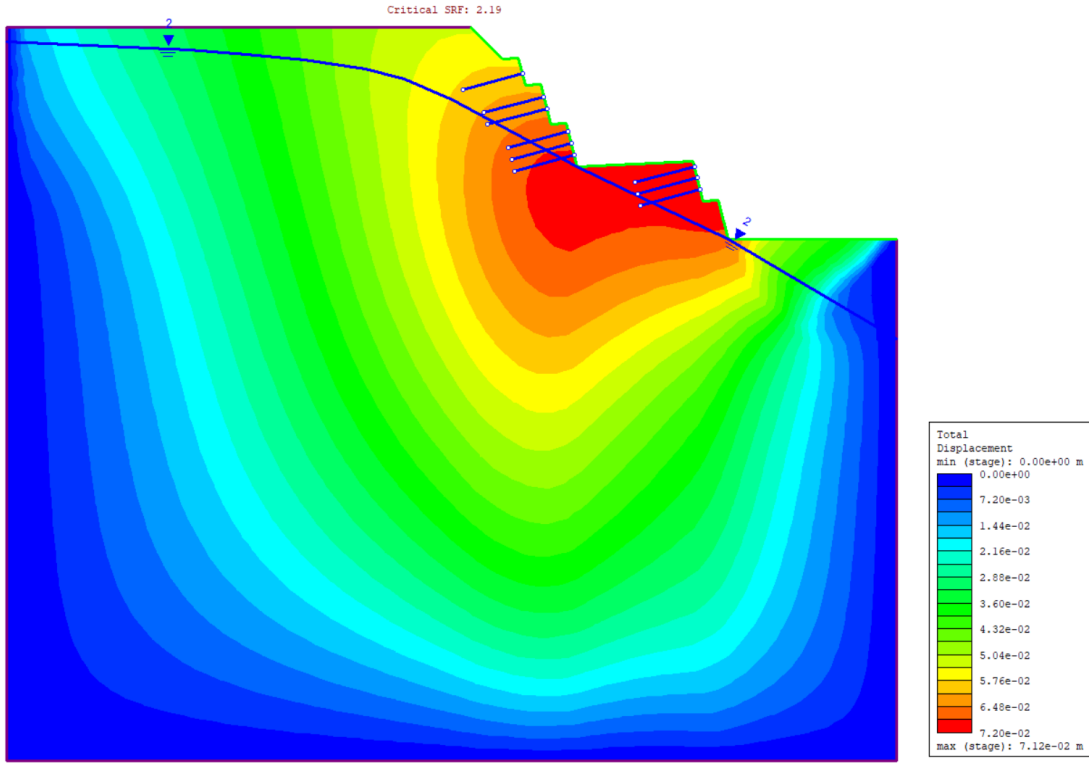
Çalışma kapsamında dördüncü kademe kazısı yapılmış ve Rocscience RS2 programında kritik SRF analiz edilmiştir. Buna göre dördüncü kademe kazı yapıldıktan sonra kritik SRF değeri 2,59 ve maksimum deplasman 5,43 cm olarak hesaplanmıştır. Analizdeki kritik SRF değeri, önerilen minimum 1,5 SRF'yi geçtiği için bu kazı kademesinde duraysızlık açısından riskli bir durum olmadığı düşünülmüştür. Ancak dördüncü kademe kazı sonrasında yapılan analizde üçüncü seviyeye yerleştirilen ankraj köklerinin maksimum deformasyon zonu içinde kaldığı görülmektedir. Bu nedenle yapılan analiz sonucuna göre üçüncü seviyeye yerleştirilen ankrajların çalışmayacağı tayin edilmiştir. Dördüncü kademe kazısı için Rocscience RS2 programında yapılan kritik SRF analizi Şekil 4.8'te görülmektedir.



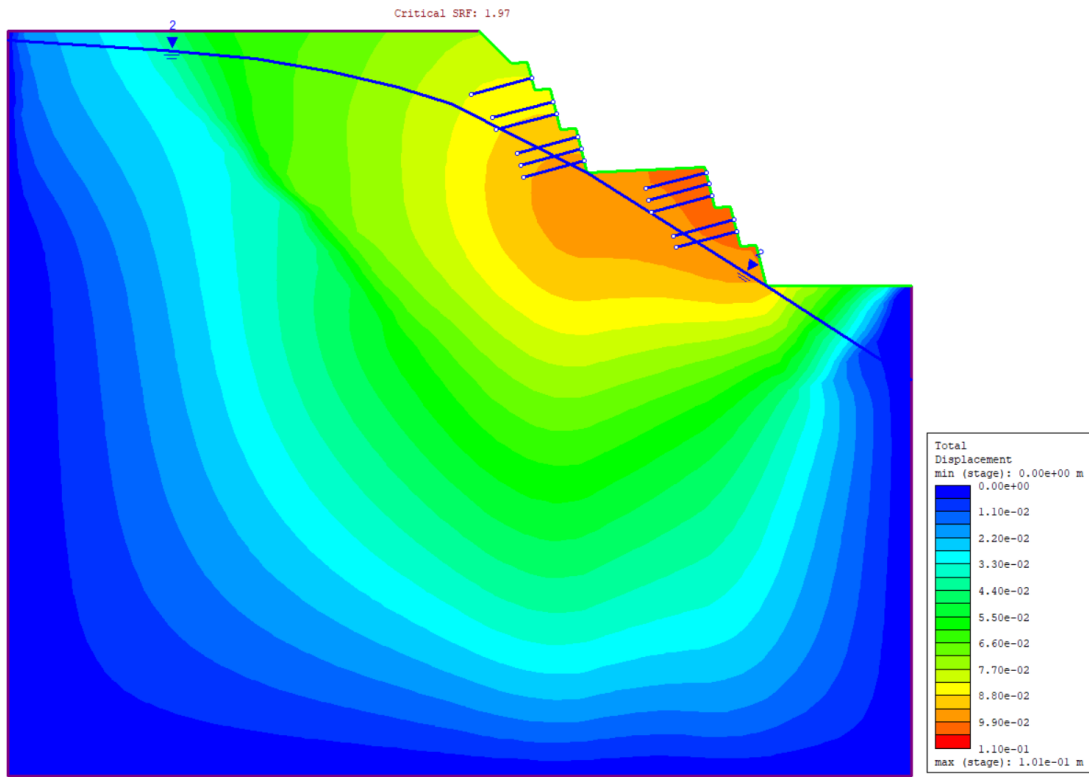
Şekil 4.8 Destekli şev tasarımında yapılan dördüncü kademe kazının RS2 programında SRF analizi.

Çalışma kapsamında beşinci kademe kazısı yapılmış ve Rocscience RS2 programında kritik SRF analiz edilmiştir. Buna göre beşinci kademe kazı yapıldıktan sonra kritik SRF değeri 2,19 ve maksimum deplasman 7,12 cm olarak hesaplanmıştır. Analizdeki kritik SRF değeri, önerilen minimum 1,5 SRF'yi geçtiği için bu kazı kademesinde duraysızlık açısından riskli bir durum olmadığı düşünülmüştür. Ancak beşinci kademe kazı sonrasında yapılan analizde dördüncü seviyeye yerleştirilen ankraj köklerinin maksimum deformasyon zonu içinde kaldığı görülmektedir. Bu nedenle yapılan analiz sonucuna göre dördüncü seviyeye yerleştirilen ankrajların çalışmayacağı tayin edilmiştir. Beşinci kademe kazısı için Rocscience RS2 programında yapılan kritik SRF analizi Şekil 4.9'te görülmektedir.

Çalışma kapsamında altıncı kademe kazısı yapılmış ve Rocscience RS2 programında kritik SRF analiz edilmiştir. Buna göre altıncı kademe kazı yapıldıktan sonra kritik SRF değeri 1,97 ve maksimum deplasman 10,1 cm olarak hesaplanmıştır. Analizdeki kritik SRF değeri, önerilen minimum 1,5 SRF'yi geçtiği için bu kazı kademesinde duraysızlık açısından riskli bir durum olmadığı saptanmıştır. Altıncı kademe kazısı için Rocscience RS2 programında yapılan kritik SRF analizi Şekil 4.10'de görülmektedir.

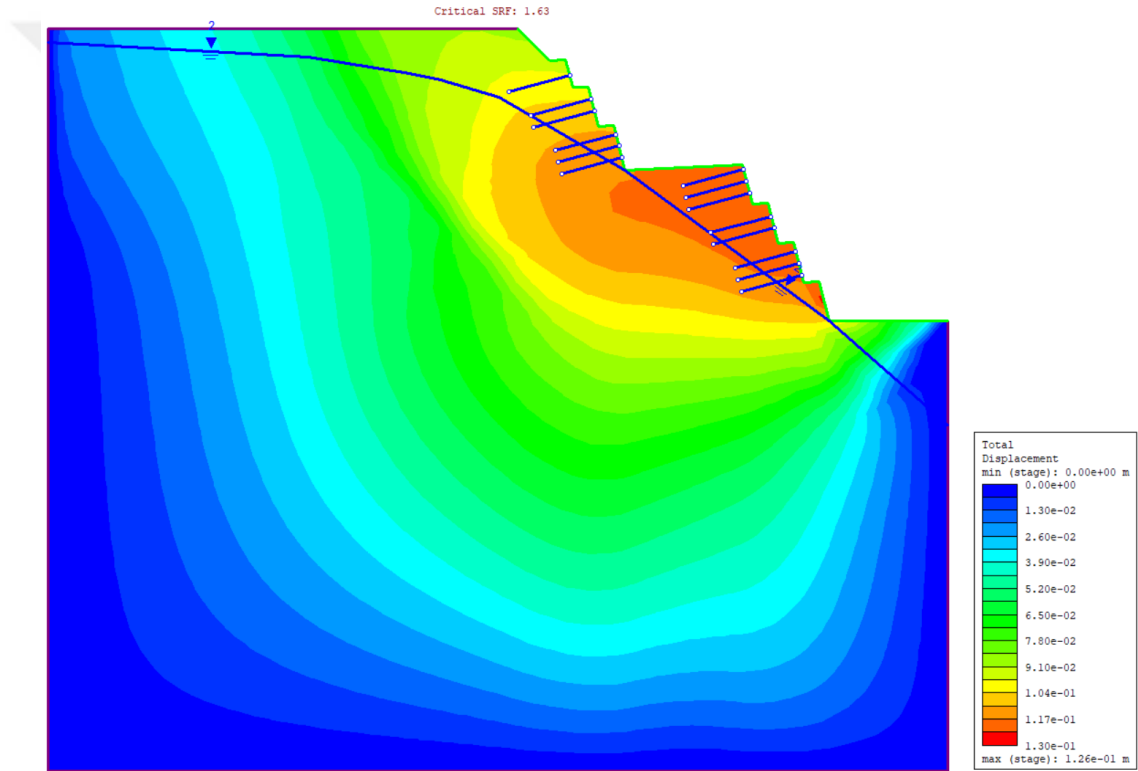


Şekil 4.9 Destekli şev tasarımında yapılan beşinci kademe kazının RS2 programında SRF analizi.



Şekil 4.10 Destekli şev tasarımında yapılan altıncı kademe kazının RS2 programında SRF analizi.

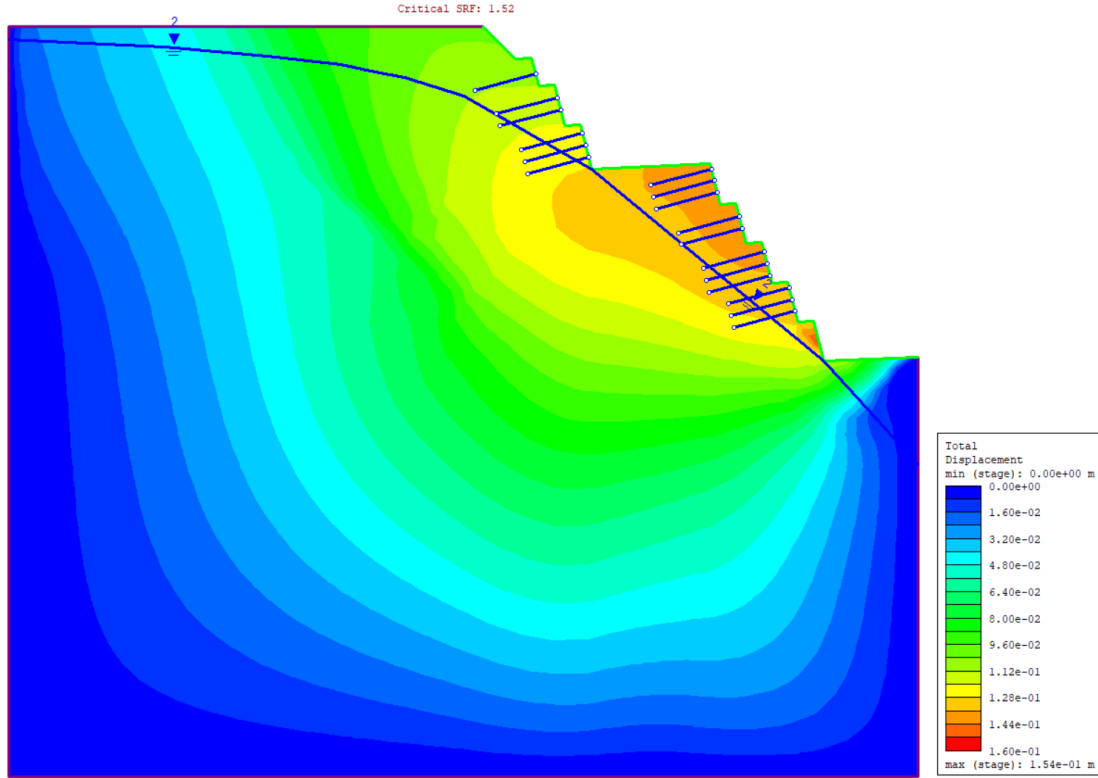
Çalışma kapsamında yedinci kademe kazısı yapılmış ve Rocscience RS2 programında kritik SRF analiz edilmiştir. Buna göre yedinci kademe kazı yapıldıktan sonra kritik SRF değeri 1,63 ve maksimum deplasman 12,6 cm olarak hesaplanmıştır. Analizdeki kritik SRF değeri, önerilen minimum 1,5 SRF'yi geçtiği için bu kazı kademesinde duraysızlık açısından riskli bir durum olmadığı düşünülmüştür. Ancak yedinci kademe kazı sonrasında yapılan analizde dördüncü ve beşinci seviyeye yerleştirilen ankraj köklerinin maksimum deformasyon zonu içinde kaldığı görülmektedir. Bu nedenle yapılan analiz sonucuna göre dördüncü ve beşinci seviyeye yerleştirilen ankrajların çalışmayacağı tayin edilmiştir. Yedinci kademe kazısı için Rocscience RS2 programında yapılan kritik SRF analizi Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11 Destekli şev tasarımında yapılan yedinci kademe kazının RS2 programında SRF analizi.

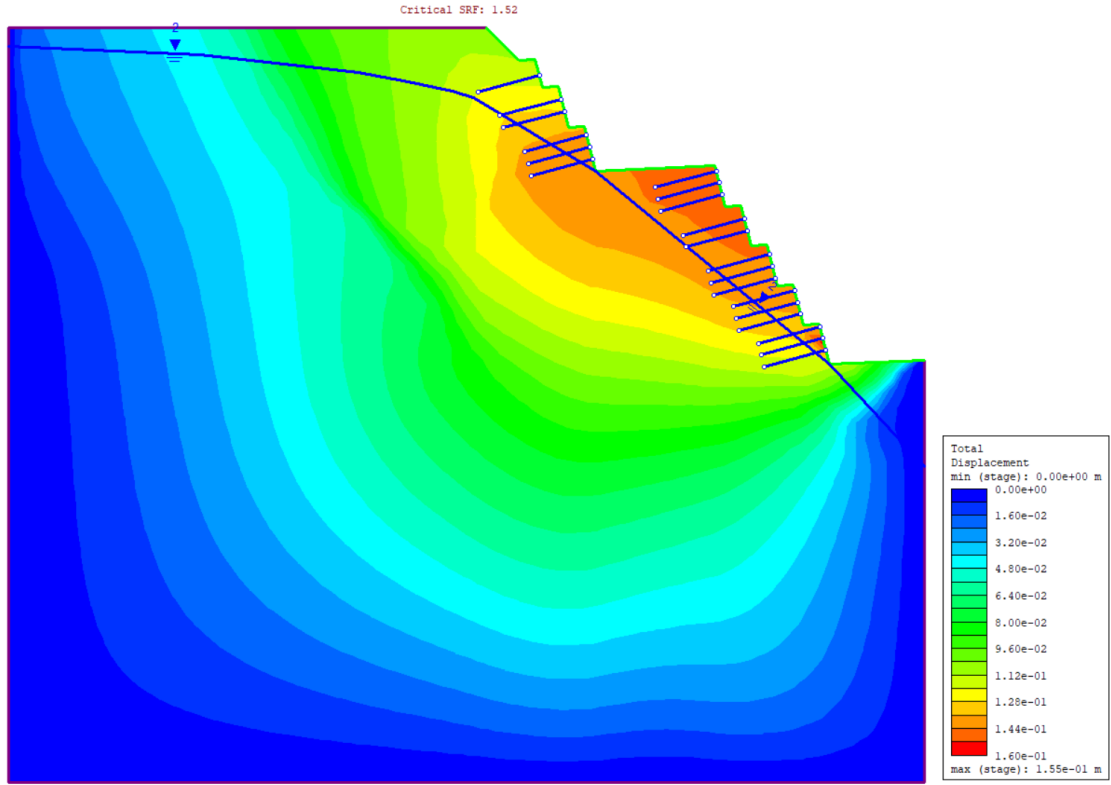
Çalışma kapsamında sekizinci ve son kademe kazısı yapılmış ve Rocscience RS2 programında kritik SRF analiz edilmiştir. Buna göre sekizinci kademe kazı yapıldıktan sonra kritik SRF değeri 1,52 ve maksimum deplasman 15,4 cm olarak hesaplanmıştır. Analizdeki kritik SRF değeri, önerilen minimum 1,5 SRF'yi karşıladığından bu kazı kademesinde duraysızlık açısından riskli bir durum olmadığı düşünülmüştür. Ancak sekizinci kademe kazı sonrasında yapılan analizde dördüncü seviyeye yerleştirilen ankraj köklerinin maksimum deformasyon zonu içinde kaldığı görülmektedir. Bu

nedenle yapılan analiz sonucuna göre dördüncü seviyeye yerleştirilen ankrajların çalışmayacağı tayin edilmiştir. Sekizinci kademe kazısı için Rocscience RS2 programında yapılan kritik SRF analizi Şekil 4.12’de görülmektedir.



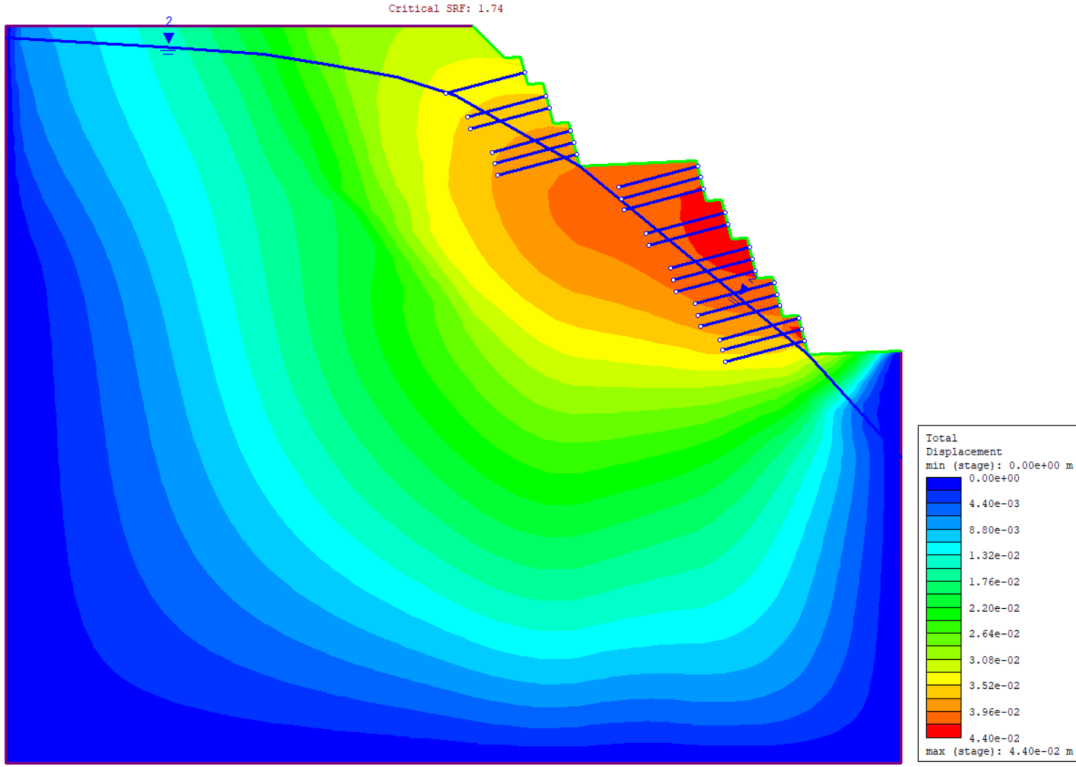
Şekil 4.12 Destekli şev tasarımında yapılan sekizinci kademe kazısının RS2 programında SRF analizi.

Son olarak sekizinci kademe kazı tamamlandıktan sonra ankrajlar imal edilmiş ve Rocscience RS2 programında şev tasarımının kritik SRF değeri analiz edilmiştir. Kazı ve ankraj imalatlarının tamamen tamamlandığı duruma göre kritik SRF değeri 1,52 ve maksimum deplasman 15,5 cm olarak hesaplanmıştır. Kritik SRF değeri, duraylılık için önerilen minimum 1,5 SRF değerini sağladığı için son ve kalıcı durumda şev sisteminin duraysızlık açısından riskli olmadığı düşünülmüştür. Ancak sekizinci kademedeki ankraj imalatlarının yapılmasından sonra yapılan analizde dördüncü seviyeye yerleştirilen ankraj köklerinin maksimum deformasyon zonu içinde kaldığı görülmektedir. Bu nedenle yapılan analiz sonucuna göre nihai kazı ve ankraj durumunda dördüncü seviyeye yerleştirilen ankrajların çalışmayacağı tayin edilmiştir. Son durumun RS2 programında yapılan kritik SRF analizi Şekil 4.13’te görülmektedir.



Şekil 4.13 Son durum için şev tasarımının RS2 programında kritik SRF analizi.

Rocscience RS2 programında yapılan analiz sonuçlarına göre bazı kazı kademelerinde ankraj köklerinin maksimum deformasyon zonu içinde kaldığı gözlenmiştir. Bu nedenle Rocscience RS2 programında farklı ankraj kök ve serbest boyları ile denemeler yapılmıştır. Çeşitli denemeler sonucunda ankraj kök boyunun 8 m ve serbest boyunun 13 m olması durumunda optimum çözüme ulaşıldığı görülmüştür. Bu ankraj parametrelerine göre Rocscience RS2 programında yapılan analiz sonucunda kritik SRF 1,74 ve maksimum deplasman 4,40 cm olarak saptanmıştır. Kritik SRF değeri, minimum 1,5 güvenlik sayısını sağladığı için revize ankraj parametreleri ile son ve kalıcı durumda şev sisteminin duraysızlık açısından riskli olmadığı saptanmıştır. Ayrıca revize ankraj boyları ile yapılan çözümde her bir ankraj kademesinde ankraj köklerinin, maksimum deformasyon zonunun daha gerisinde kaldığı görülmüştür. Uzatılan ankraj boyları ile hem literatürde önerilen SRF değerinin sağlandığı hem de deformasyon zonunun dışında kalarak ankraj köklerinin çalıştığı kanıtlanmış ve proje için en uygun çözüme ulaşılmıştır. Uzatılan ankraj boyları ile nihai durumun Rocscience RS2 programında yapılan kritik SRF analizi Şekil 4.14'te görülmektedir.



Şekil 4.14 Revize ankraj boyları ile şev tasarımının RS2 programında kritik SRF analizi.

Sonuç olarak, teorik bilgi araştırmaları ve hesaplamaları sonucunda yapılması planlanan yol yarması için kazının desteksiz yapılması, şev stabilitesinde sorun oluşturmaktadır. Bunun kontrolü için şev sistemi, Rocscience RS2 bilgisayar programında sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiştir. Buna göre desteksiz şekilde kazı gerçekleştirildiğinde şev sistemi literatürde önerilen kritik SRF değerini sağlayamamakta ve duraysızlık riski oluşmaktadır. Bu nedenle kazı sırasında şevde oluşacak kritik kayma zonunu, şevin daha geri bölgesine taşımayı hedefleyen şevi destekleyecek elemanlar tasarlanmış ve bunun için gerekli parametreler hesaplanmıştır. Tasarlanan şev sistemi, sekiz kazı kademesinden ve her kademeyle belli aralıklar ile yerleştirilmiş ankrajlardan oluşmaktadır. Her bir kazı kademesi ayrı olarak sonlu elemanlar metodu ile Rocscience RS2 bilgisayar programında değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda ankrajlar ile desteklenmiş en son kazı kademesindeki kritik SRF değeri minimum 1,52 bulunmuş ve şev sistemi için tasarlanan destek yapısının uygun olduğu düşünülmüştür. Ancak yapılan analizlerde bazı kazı kademelerinde yerleştirilen ankraj köklerinin maksimum deformasyon zonunun içinde kalması nedeni ile kritik SRF sağlanmış olsa dahi bazı ankrajların

Çalışmadığı ve ankraj boylarının yetersiz olduğu saptanmıştır. Bu nedenle literatürde önerilen analitik yöntemlerle hesaplanan ankrajların yeterli boyda olmadığı kararlaştırılmış ve Rocscience RS2 programında yapılan daha uzun ankraj boyu denemeleri ile optimum ankraj boyu çözümlü elde edilmiştir. Ankraj kök ve serbest boyu uzatılarak Rocscience RS2 programında yapılan analiz sonuçlarına göre kritik SRF değeri sağlanmakta ve ankraj kökleri deformasyon zonunun dışında kalmaktadır. Yani literatürde önerilen analitik yöntemlerle tasarlanan destek sistemi, şevlerde yeterli SRF değerini sağlamış olsa bile duraylılık analizleri için sadece SRF kontrolü yeterli değildir. Destek sisteminin hesaplandığı şekilde çalışabilmesi için yapılan analizlerde destek elemanlarının, deformasyon zonunun dışında kaldığından emin olunmalıdır.





5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Suudi Arabistan'ın Riyad şehrine 45 km uzaklıkta yeni bir eğlence şehri kurulması planlanmaktadır. Proje kapsamında yeni bir şehir inşa edilmesinin yanı sıra şehir içi ve şehre ulaşım olmak üzere otobanlar yapılmaktadır. Ancak projenin inşa edildiği bölge, Arabistan ile Avrasya plakalarının tektonik hareketler nedeni ile çarpışması sonucu oluşan sıkışma zonu olan Orta Arabistan Yayı'na denk gelmektedir. Bu nedenle proje kapsamında jeomorfolojik farklılıklar gözlenmektedir. Orta Arabistan Yayı'nın bir parçası olan Tuwaiq Yamaçları, bölgede 200 metreyi bulan kot farkları sergilemektedir. Projenin doğusundaki Riyad bölgesinden başlayarak proje bölgesine kadar inşa edilen otoban, Tuwaiq Yamaçları'ndan geçerek batıya doğru devam etmektedir. Bu kot farkı nedeniyle hem yamaçların hemen batısına viyadük ayakları tasarlamıştır hem de yamaçların hemen doğusunda yol yarması yapılmasını planlamıştır.

Çalışma alanında yapılacak olan yol yarmasının yöntemini belirlemek amacıyla bir dizi gözlem ve ölçüm yapılmıştır. İlk önce bölgedeki kayaçların süreksizlikleri belirlenmiştir. Buna göre kayaçların süreksizliklerini tabakalar oluşturmaktadır. Tabakalar, yamaç içine ortalama 7°'lik eğim açısı göstermektedir. Ön gözlem olarak herhangi bir şev kazısında süreksizlikler nedeniyle kaya kütlelerinin kayması beklenmemektedir.

Süreksizlik gözlem ve ölçümlerinden sonra çalışma alanındaki kaya kütlelerinin jeomekanik özelliklerini belirleyebilmek için sondajlar, in-situ ve çeşitli laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sondajlardan elde edilen karotların RQD, TSR, SCR ve FR değerleri hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra kayacın tanımlaması ve formasyonu tayin edilmiştir. Çalışma alanındaki kayaç, Dhurma Formasyonu'na ait olup killi kireçtaşı özelliği göstermektedir.

Sondajlardan alınan karot numuneleri laboratuvara gönderilmiş ve kuru birim hacim ağırlığı, su içeriği, basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri tayin edilmiştir.

Buna göre kayacın ortalama kuru birim hacim ağırlığı 2300 kg/m^3 ($23,56 \text{ kN/m}^3$), tek eksenli basınç mukavemeti $18,7 \text{ MPa}$ ve elastisite modülü 6300 MPa 'dır.

Yapılan saha ve laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen veriler ile kaya kütlesi sınıflandırılmaya çalışılmıştır. Literatürde en sık kullanılan kaya kütlesi sınıflamalarından olan RMR, GSI ve Q sistemlerine göre sınıflandırma yapılmıştır. Bu sınıflamalar sonucunda kaya kütlesi, gösterdiği özelliklere göre her üç sınıflama siteminde de orta kaliteli kaya olarak belirlenmiştir.

Çalışma alanındaki kaya kütlesinin Q değerine göre bölgede yapılacak 84 m derinliğindeki yol yarmasının desteksiz kazılması durumunda duraylı olmayacağı saptanmıştır. Grimstad ve Barton (1993), kayacın gösterdiği D_e ve Q değerlerine göre şev ankrāj ile desteklenmesini önermektedir. Bunun doğruluğunu saptamak adına, şev sistemi herhangi bir destek konmadan Rocscience RS2 programına çizilmiş ve sonlu elemanlar metoduyla analiz edilmiş ve kritik SRF değeri 1,39 bulunmuştur. Analiz sonucu, Sabatini vd. (1999)'nin önerdiği minimum 1,5 SRF değerinin altında kaldığından şev kazısının desteksiz gerçekleştirilemeyeceği saptanmıştır.

Ankrāj boylarının uygulanabilir parametrelerini hesaplamak için PTI (1996), BS (2015) ve BS (2018)'in önerileri kullanılmıştır. Tasarım yükü 900 kN olan ankrājlar için önerilen eşitlikler ile 6 m kök boyunun sistemi desteklediği hesaplanmıştır. Ardından BS (2015) ve BS (2018)'in önerilerine göre test ankrājları için gerekli halat sayısı hesaplanmıştır. Ankrāj kabul testi, tasarım yükünün iki katına yapılacağından kabul testi için gerekli halat sayısı 9 olarak belirlenmiştir. Bulunan bu parametrelerle bir adet ankrāj testi gerçekleştirilmiştir. Test sonucuna göre ankrāj halatlarının uzamaları, BS (2015)'te izin verilen değerler içinde kaldığından tasarlanan ankrāj parametrelerinin, talep edilen yükü taşıdığı belirlenmiştir. Bu veriler göz önüne alınarak imalat ankrājları için ankrāj parametreleri yine aynı eşitlikler kullanılarak hesaplanmış ve gerekli ankrāj halatı sayısı 7 olarak belirlenmiştir. Toplam ankrāj boyu olarak ise 16 m seçilmiştir.

Şev sisteminin ve ankrājların belirlenmesiyle şev tasarımı tamamlanmış ve analiz edilmeye hazır hale getirilmiştir. Analiz yapılması için ankrājlarla desteklenmiş şev tasarımı Rocscience RS2 programında çizilmiştir. Daha önce laboratuvar deneyleri ve RocLab programından elde edilen kayaya ait jeomekanik parametreler, Rocscience RS2 programına girilmiştir. Veriler programa girildikten sonra kazı ve ankrāj

imalatları sonrasında şev sisteminin kritik SRF değeri hesaplanmıştır. Literatürde destekli şev sistemlerinde minimum SRF değerinin 1,5 olması önerilmektedir (Sabatini vd., 1999). Sekiz kazı kademesi bulunan şev tasarımında her bir kademe için ayrı olarak Rocscience RS2 programında kritik SRF değeri hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda her kazı kademesi için SRF değeri 1,5 üzerinde bulunmuştur. Ancak bazı kazı kademelerinde ankraj köklerinin deformasyon zonu içinde kaldığı analiz sonucunda görülmüştür. Yani analiz sonuçlarına göre destek tasarımı gerekli SRF değerini sağlıyor olsa dahi ankrajların boylarının yetersiz kaldığı anlaşılmıştır. Bu nedenle ankraj boyları arttırılarak analizler tekrarlanmış ve optimum ankraj boyu saptanmıştır. Analizler sonucu karar verilen ideal ankrajlar 8 m kök boy, 13 m serbest boy ve 21 m toplam boydan oluşmaktadır.

Kısacası derin yarma şevlerinde desteksiz şekilde kazının yapıldığı durumda yenilen şev için literatürde önerilen yöntemlerle tasarlanmış olan ankrajların yetersiz kalabileceği görülmüş ve bu nedenle yapılan tasarımların ilgili bilgisayar programları ile analiz edilmesi gerektiği bir kez daha anlaşılmıştır.

Sonuç olarak, bir şev tasarımı yapılırken kaya kütesinin süreksizlik düzlemlerine bakarak değerlendirme yapmak yanıltıcı sonuçlar verebilir. Örneğin çalışma sahasında süreksizlik düzlemlerinin eğimi yataya yakın olan kaya kütesinde kazı yapılması durumunda duraysızlık olmayacağı düşünülebilir. Ancak kaya kütesinin özellikleri tayin edilmeli ve buna göre daha detaylı ve bilgisayar destekli analizler yapılmalıdır. Burada kaya kütle sınıflamalarının önemi görülmektedir. Sahada yapılan doğru gözlem ve ölçümler, kaya kütesinin kalitesinin doğru şekilde tayin edilebilmesi açısından oldukça önemlidir; çünkü buna göre kaya ortamında yapılacak kazılarda herhangi bir destek gereksinimi olup olmadığı belirlenecektir. Çalışma sahasında yapılan sondajlar, saha ve laboratuvar deneyleri neticesinde kaya kütesinin jeomekanik parametreleri, alışılmış kireçtaşlarına göre daha düşük çıkmıştır ve bu nedenle kazı yapılırken bir destek sistemine ihtiyaç duyma ihtimali ortaya çıkmıştır. Bu durumda literatürde önerilen eşitliklerle uygun destek sistemleri ve parametreleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre tasarlanan destekli şev sistemi, çeşitli bilgisayar programları ile analiz edilmelidir. Buna göre bu yüksek lisans tezi çalışması kapsamında tasarlanan ankrajlar, sonlu elemanlar metodu ile çözüm sunan Rocscience RS2 programında analiz edilmiştir. Analiz sonucuna göre literatürde önerilen analitik

yöntemlerle hesaplanan ankraj boylarının yetersiz kaldığı görülmüş ve ankrajlar buna göre revize edilmiştir.

Yapılan sondaj ve saha ve laboratuvar deneyleri sayılarını arttırma, şev tasarımındaki güvenlik sayısı analizlerini iyileştirmek adına fayda sağlayacaktır. Şevin yenilme kriteri, kaya kütlelerinin jeomekanik parametreleri ile doğrudan bağlantılı olduğundan yeterli sayıda gözlem ve deneyler gerçekleştirilerek kayaca ait doğru sonuçlar elde etmek önemlidir. Bu nedenle şev tasarımı öncesi sondaj ve deney sayılarının arttırılması daha doğru sonuçlar sağlayacaktır.

Çalışma alanında yapılan kazı çalışması patlatma yöntemiyle yapılmaktadır. Bölgedeki kayaç, yumuşak kireçtaşı olduğundan patlatmanın hem sahadaki sağlam kayanın mukavemetini etkileme ihtimali hem de imalatı tamamlanan ankrajlı şev bölgesini etkileme ihtimali bulunmaktadır. Bu nedenle patlatmaların kayaçlarda ve ankrajlarda olumsuz bir etki yaratıp yaratmadığının ayrıca irdelenmesi önemlidir.

Yapılan şev ve ankraj tasarımlarının beklendiği şekilde çalıştığının denetlenmesi adına aletsel gözlemler yapılmalıdır. Hem kazı süresince hem de tüm imalatlar tamamlandıktan sonra şevin hareket edip etmediği, tesis edilen inklinometre veya reflektör noktaları ile gözlemlenebilir. Ayrıca ankrajlara tesis edilen yük hücreleri ile ankrajlara gelen yüklerde değişim olup olmadığı gözlenerek imalatların tasarlandığı şekilde çalıştığı incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Al-Husseini, M.** (1997). Jurassic sequence stratigraphy of the western and southern Arabian Gulf. *GeoArabia Special Publication*, 2, 361–380.
- American Society for Testing and Materials.** (2018). *Standard specification for low-relaxation, seven-wire steel strand for prestressed concrete*. ASTM A416/A416M-18.
- Arkell, W. J.** (1952). Jurassic ammonites from jebel Tuwaiq, Central Arabia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 633(236), 241–313.
- Barton, N. R., Lien, R. ve Lunde, I.** (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports. *Rock Mechanics*, 6 (4), 189-239.
- Barton, N.** (1976). Recent experiences with the Q-system of tunnel support design. *Proceedings on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg*.
- Bieniawski, Z. T.** (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. John Willey and Sons, 237.
- Bishop, A. W.** (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slope. *Geotechnique*, 10, 129 – 150.
- Brown, R. J. ve Kellogg, J. N.** (1979). Structural style and evolution of the Central Arabian Arch. *Geological Society of America Bulletin*, 90, 829-846.
- Brown, G. F. ve Jackson, A. A.** (1953). Geology of the Arabian Peninsula: Sedimentary rocks of the Arabian Peninsula. *United States Geological Survey*.
- Climate Data.** (t.y.). *Riyadh Climate*. Erişim 16 Mart 2023. <https://en.climate-data.org/asia/saudi-arabia/riyadh-region/riyadh-3883/>
- Coggan, J. S., Stead, D. ve Eyre, J. M.** (1998). *Evaluation of techniques for quarry slope stability assessment*. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section B: Applied Earth Science.
- Coulomb, C. A.** (1776). Essai sur une application des regles de maximis et minimis quelques problemes de statique, relatits a l’architecture. *Memoires de Mathematique de l’Academie Royale de Science 7, Paris*.

- Deere, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D. ve Cording, E. J.** (1967). Design of surface and near surface construction in rock. *Failure and Breakage of Rock, Proceedings of 8th US Symposium of Rock Mechanics, New York*, 237–302.
- Dünya Atlası.** (30 Ekim 2017). *Dünya'nın Büyük Tektonik Plakaları*. Erişim 25 Mayıs 2023. <https://www.dunyaatlası.com/dunyanin-buyuk-tektonik-plakalari/>
- El-Sorogy, A. S., Galmed, M. A., Al-Kahtany, K. ve Al-Zahrani, A.** (2017). Microfacies and diagenesis of the Middle Jurassic Dhurma carbonates, southwest Riyadh, Saudi Arabia. *Journal of African Earth Sciences*.
- Fellenius, W.** (1927). *Erdstatische berechnungen mit reibung und kohasion (adhasion) und unter annahmekreiszyllindrischer gleitflachen*. Ernst & Sohn.
- Google Earth.** (t.y.). [Tuwaiq Yamaçları Google Earth Görseli]. Erişim 25 Mayıs 2023.
- Grimstad, E. ve Barton, N.** (1993). Updating the Q-System for NMT. *Proceedings of the international symposium on sprayed concrete – modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Fagernes*, 46–66.
- Hill, E.** (2013, Kasım 20). *Flooding in Riyadh*. <https://floodlist.com/asia/flooding-in-riyadh>
- Hoek, E., ve Bray, J. W.** (1981). *Rock slope engineering* (3rd ed.). The Institution of Mining and Metallurgy.
- Hoek, E. ve Brown, E. T.** (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal Rock Mechanics Mining Science*, 34, 1165–1186.
- International Society for Rock Mechanics.** (2007). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014*, Türkiye.
- Janbu, N.** (1973). Slope stability computations, *Embankment and Dam Engineering, Cassagrande Memorial Volume*, 47-86.
- Le Nindre, Y. M., Manivit, J., Manivit, H. ve Vaslet, D.** (1990). Stratigraphie sequentielle du Jurassique et du Cretace en Arabie Saoudite. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 8, 1025–1034.
- Morgenstern, N. R. ve Price, V. E.** (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 15, 79-93.
- Peck, R. B., Hanson, W. E. ve Thornburn, T. H.** (1974). *Foundation Engineering*. John Wiley & Sons.
- Post Tensioning Institute.** (2004). Recommendations for prestressed rock and soil anchors.

- Powers, R. W., Ramirez, L. F., Redmond, C. D. ve Elberg Jr., E. L.** (1966). *Geology of the arabian peninsula*. United States Government Printing Office.
- Riyadh Digital City.** (2023). *Qiddiya*. Erişim 16 Mart 2023.
<https://qiddiya.com/en/about-qiddiya/location/>
- Robertson, A. H. F., Hall, C. M. P. ve Searle M.** (2009). Tectonic evolution and hydrocarbon habitat of the Arabian Plate. *Geological Society, London, Special Publications*, 326, 5-55.
- Sabatini, P. J., Pass, D. G., ve Bachus, R. C.** (1999). *Ground anchors and anchored systems*. U.S. Dept. of Transportation Federal Highway Administration.
- Sönmez, H. ve Ulusay, R.** (1999). Modification to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 743–760.
- Sönmez, H. ve Ulusay, R.** (2002). A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modification to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri*, 26, 77–99.
- Spencer, E.** (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, 17, 11-26.
- Steineke, M., Bramkamp, R. A. ve Hughes, T. H.** (1958). Geology and ground-water resources of the Riyadh area, Kingdom of Saudi Arabia. *United States Geological Survey*.
- Terzaghi, K.** (1946). Rock defects and loads on tunnel supports. *Rock Tunnelling eith Steel Supports*.
- The British Standards Institution.** (2015). *Code of practice for grouted anchors*. BS 8081:2015.
- The British Standards Institution.** (2018). *Geotechnical investigation and testing - Testing of geotechnical structures - Part 5: Testing of grouted anchors*. BS 22477-5:2018.
- Vision Realisation Program.** (t.y.). *Vision 2030*. Erişim 13 Mayıs 2023.
<https://www.vision2030.gov.sa/v2030/vrps/>
- World Population Review.** (t.y.) *Riyadh population 2023*. Erişim 16 Mart 2023.
<https://worldpopulationreview.com/world-cities/riyadh-population>
- Wyllie, D. C. ve Mah, C. W.** (2004). *Rock Slope Engineering Civil and Mining*. Spon Press.



EKLER

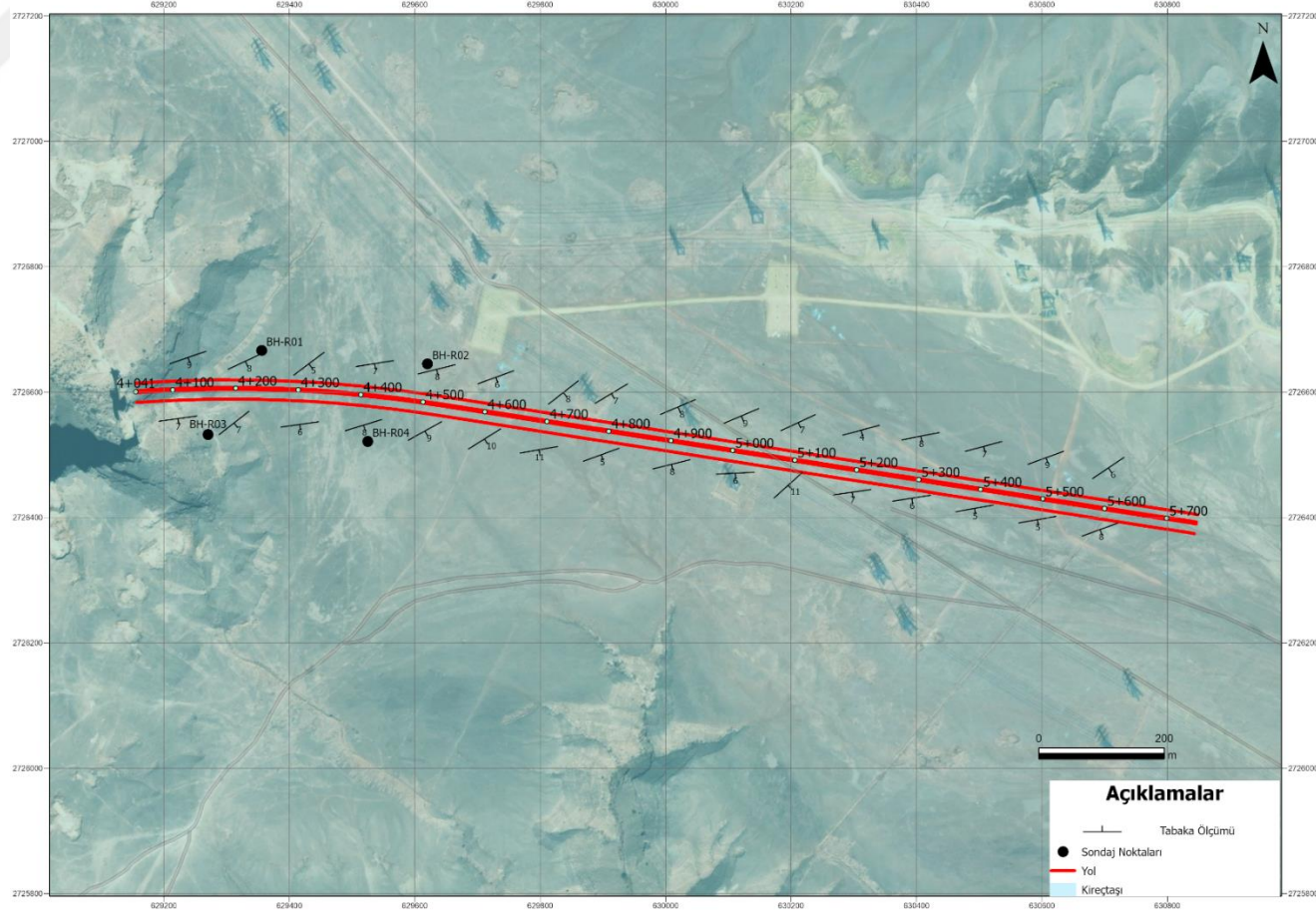
EK A Çalışma alanının 1/25000 ölçekli jeolojik haritası

EK B BH-R04 nolu sondaja ait karot sandıkları

EK C Test ankrajı kabul testi verileri

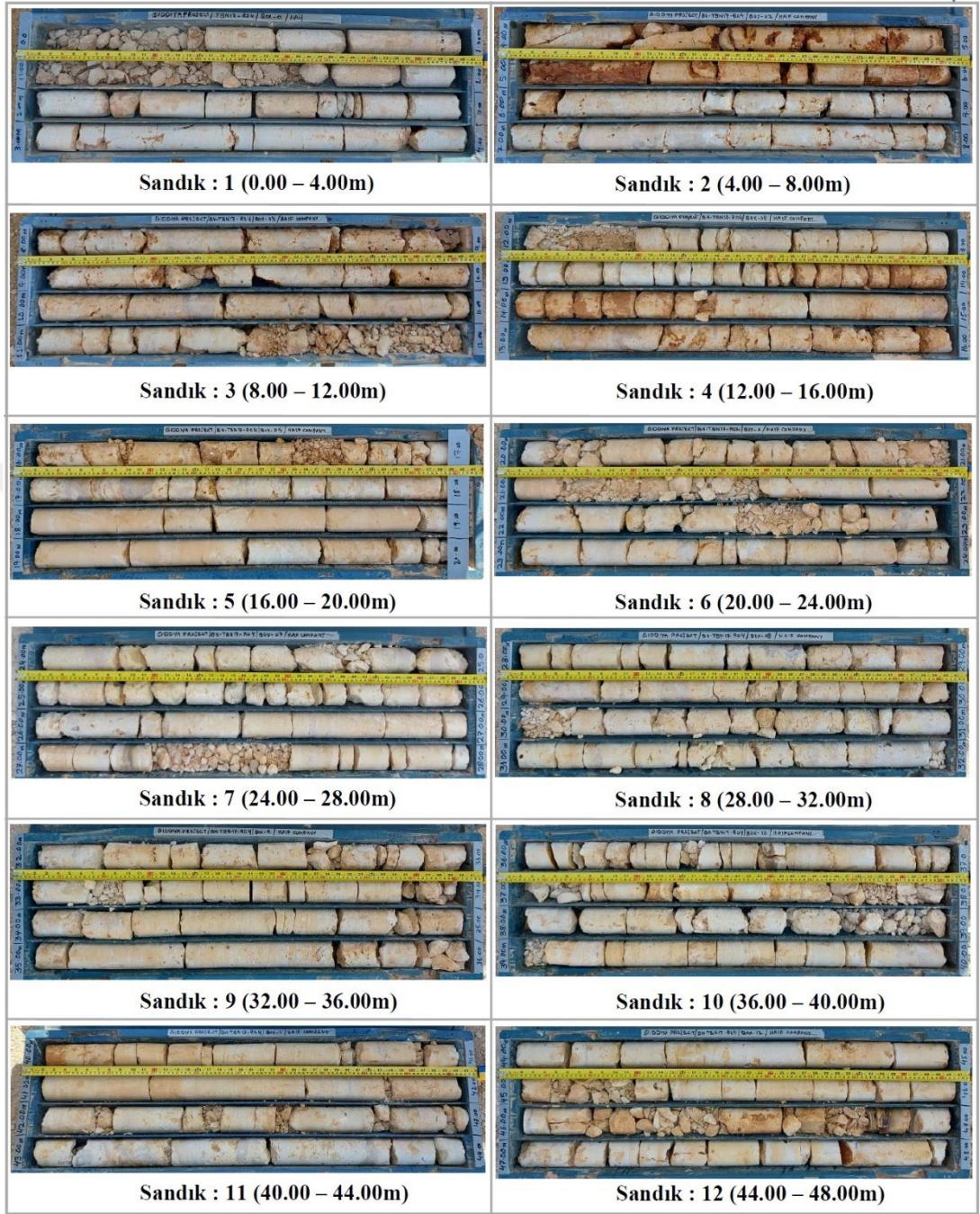


EK A: Çalışma alanının 1/5000 ölçekli jeolojik haritası

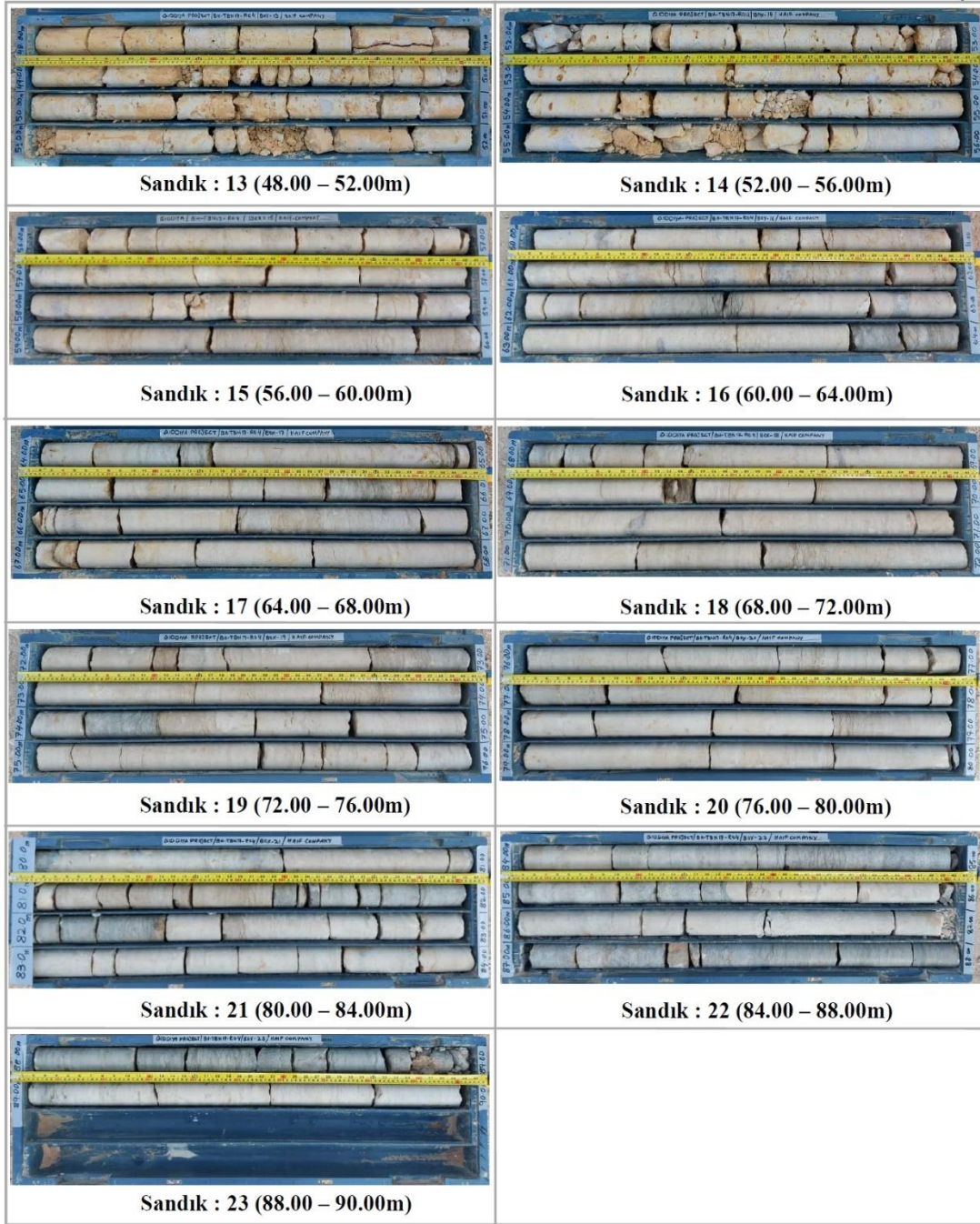


Şekil A.1 Çalışma alanının 1/5000 ölçekli jeolojik haritası.

EK B: BH-R04 nolu sondaja ait karot sandıkları



Şekil B.1 BH-R04 nolu sondaja ait karot sandıkları.



Şekil B.1 (devam) BH-R04 nolu sondaja ait karot sandıkları.

EK C: Test ankraji kabul testi verileri

Çizelge C.1 Test ankraji kabul testi ankraj uzama miktarları.

| Adım | Döngü | Basınç (bar) | Yük (kN) | Yük (%) | Gözlem süresi (dk) boyunca ankraj uzama miktarı (mm) | | | | | | | | | | | | | Akma (ks) (mm) | | |
|------|-------|-----------------|-------------|------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|----|----|----------------------|-----------|---|
| | | | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 10 | 15 | 20 | 30 | 45 | 60 | | ks < 2.00 | |
| Ön | | 29 | 117 | 5% | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 61 | 234 | 10% | 4.58 | 4.58 | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | 94 | 351 | 15% | 9.94 | 9.94 | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | 126 | 468 | 20% | 16.76 | 16.76 | 16.76 | 16.76 | 16.76 | 16.76 | 16.76 | 16.76 | 16.76 | 16.76 | | | | | | 0 |
| 4 | | 94 | 351 | 15% | 12.56 | 12.56 | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | 61 | 234 | 10% | 10.92 | 10.92 | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | 29 | 117 | 5% | 6.65 | 6.65 | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | 126 | 468 | 20% | 17.06 | 17.06 | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 2 | 159 | 585 | 25% | 23.29 | 23.29 | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | 191 | 702 | 30% | 28.97 | 28.97 | 28.97 | 28.97 | 28.97 | 28.97 | 28.97 | 28.97 | 28.97 | 28.97 | | | | | | 0 |
| 10 | | 126 | 468 | 20% | 20.87 | 20.87 | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | 61 | 234 | 10% | 17.16 | 17.16 | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 3 | 29 | 117 | 5% | 7.77 | 7.77 | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | 191 | 702 | 30% | 28.82 | 28.82 | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | 224 | 819 | 35% | 35.37 | 35.37 | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | 256 | 936 | 40% | 41.13 | 41.13 | 41.13 | 41.13 | 41.13 | 41.13 | 41.13 | 41.13 | 41.13 | 41.13 | | | | | | 0 |
| 16 | | 191 | 702 | 30% | 39.36 | 39.36 | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | 94 | 351 | 15% | 21.01 | 21.01 | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 29 | 117 | 5% | 9.2 | 9.2 | | | | | | | | | | | | | | | |

Çizelge C.1 (devam) Test ankrajı kabul testi ankraj uzama miktarları.

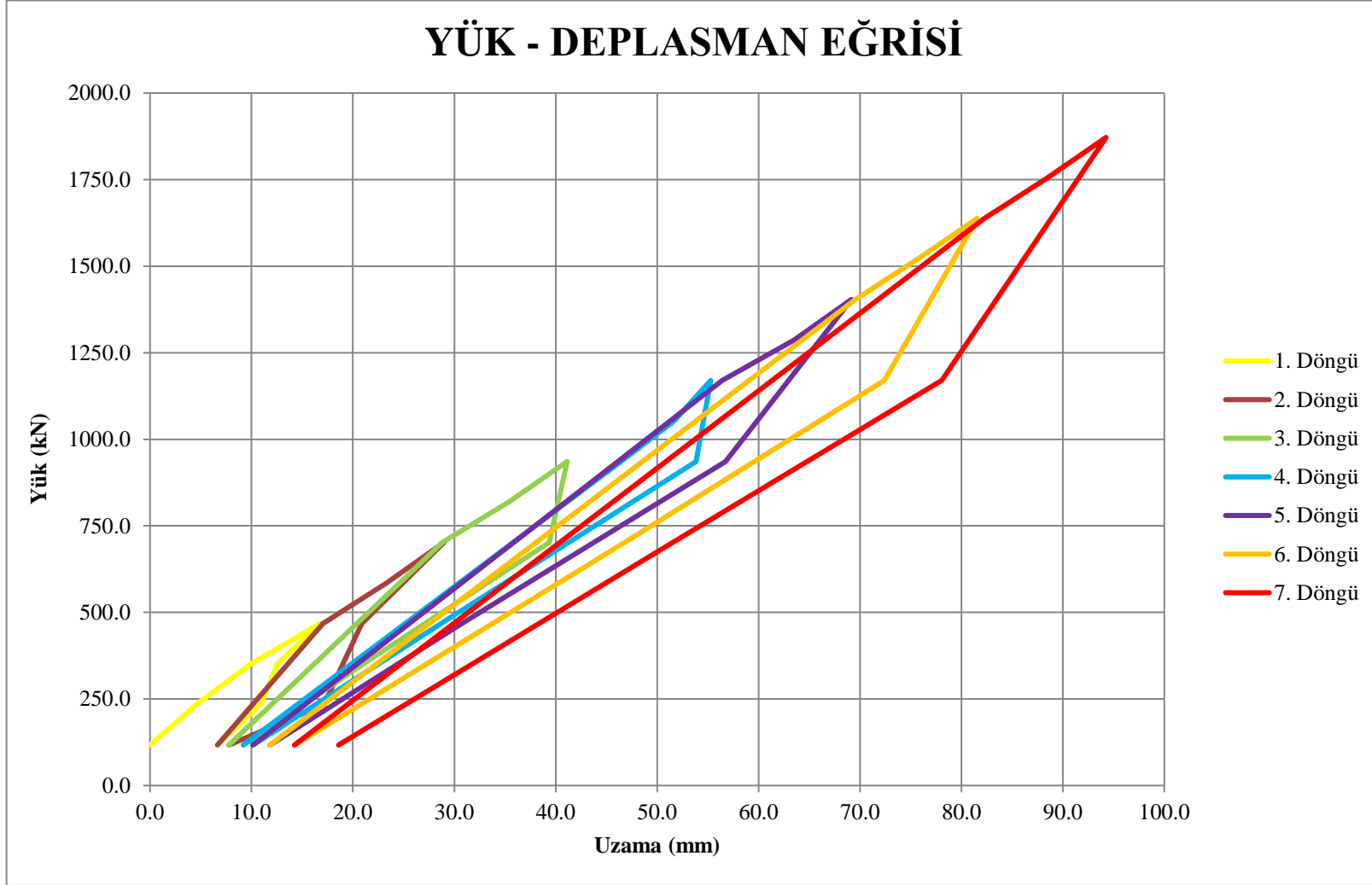
| Adım | Döngü | Basınç (bar) | Yük (kN) | Yük (%) | Gözlem süresi (dk) boyunca ankraj uzama miktarı (mm) | | | | | | | | | | | | | Akma (ks) (mm) | | |
|------|-------|-----------------|-------------|------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|----|----|----------------------|--|---|
| | | | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 10 | 15 | 20 | 30 | 45 | 60 | ks < 2.00 | | |
| 19 | 4 | 256 | 936 | 40% | 46.42 | 46.42 | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | 289 | 1053 | 45% | 51.67 | 51.67 | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | 321 | 1170 | 50% | 55.28 | 55.28 | 55.28 | 55.28 | 55.28 | 55.28 | 55.28 | 55.28 | 55.28 | 55.28 | | | | | | 0 |
| 22 | | 256 | 936 | 40% | 53.84 | 53.84 | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | | 126 | 468 | 20% | 28.7 | 28.7 | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | | 29 | 117 | 5% | 10.14 | 10.14 | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | 321 | 1170 | 50% | 56.43 | 56.43 | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 5 | 354 | 1287 | 55% | 63.51 | 63.51 | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | 386 | 1404 | 60% | 69.16 | 69.16 | 69.16 | 69.16 | 69.16 | 69.16 | 69.16 | 69.16 | 69.16 | 69.16 | | | | | | 0 |
| 28 | | 256 | 936 | 40% | 56.74 | 56.74 | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | 126 | 468 | 20% | 30.74 | 30.74 | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | 29 | 117 | 5% | 11.82 | 11.82 | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | | 386 | 1404 | 60% | 69.53 | 69.53 | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | 6 | 419 | 1521 | 65% | 75.71 | 75.71 | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | | 451 | 1638 | 70% | 81.56 | 81.56 | 81.56 | 81.56 | 81.56 | 81.56 | 81.56 | 81.56 | 81.56 | 81.56 | | | | | | 0 |
| 34 | | 321 | 1170 | 50% | 72.39 | 72.39 | | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | | 191 | 702 | 30% | 46.8 | 46.8 | | | | | | | | | | | | | | |
| 36 | | 29 | 117 | 5% | 14.24 | 14.24 | | | | | | | | | | | | | | |

Çizelge C.1 (devam) Test ankrajı kabul testi ankraj uzama miktarları.

| Adım | Döngü | Basınç (bar) | Yük (kN) | Yük (%) | Gözlem süresi (dk) boyunca ankraj uzama miktarı (mm) | | | | | | | | | | | | | Akma (ks) (mm) | |
|------|-------|-----------------|-------------|------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|----|----|----------------------|---|
| | | | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 10 | 15 | 20 | 30 | 45 | 60 | ks < 2.00 | |
| 37 | | 451 | 1638 | 70% | 82.25 | 82.25 | | | | | | | | | | | | | |
| 38 | | 484 | 1755 | 75% | 88.45 | 88.45 | | | | | | | | | | | | | |
| 39 | 7 | 516 | 1872 | 80% | 94.26 | 94.26 | 94.26 | 94.26 | 94.26 | 94.26 | 94.26 | 94.26 | 94.26 | 94.26 | | | | | 0 |
| 40 | | 321 | 1170 | 50% | 78.05 | 78.05 | | | | | | | | | | | | | |
| 41 | | 191 | 702 | 30% | 51.54 | 51.54 | | | | | | | | | | | | | |
| 42 | | 29 | 117 | 5% | 18.58 | 18.58 | | | | | | | | | | | | | |
| 43 | | 516 | 1872 | 80% | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44 | 8 | 567 | 2052.2 | 87.70% | | | | | | | | | | | | | | | 0 |
| 45 | | 581 | 2106 | 90% | | | | | | | | | | | | | | | |
| 46 | | 614 | 2223 | 95% | | | | | | | | | | | | | | | |
| 47 | | 646 | 2340 | 100% | | | | | | | | | | | | | | | |

Çizelge C.2 Ankraj kök bölgesine ait yük ve uzama miktarları.

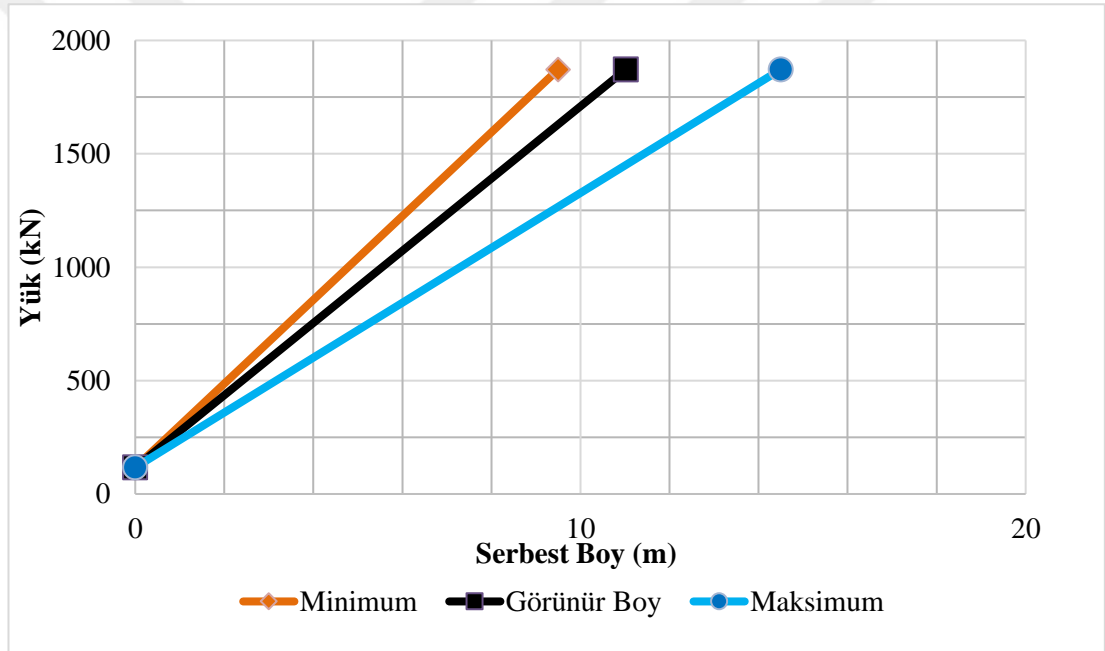
| | | | | | | | | | | |
|----------|------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1. Döngü | Yük (kN) | 117.0 | 234.0 | 351.0 | 468.0 | 468.0 | 468.0 | 351.0 | 234.0 | 117.0 |
| | Uzama (mm) | 0.00 | 4.58 | 9.94 | 16.76 | 16.76 | 16.76 | 12.56 | 10.92 | 6.65 |
| 2. Döngü | Yük (kN) | 117.0 | 468.0 | 585.0 | 702.0 | 702.0 | 702.0 | 468.0 | 234.0 | 117.0 |
| | Uzama (mm) | 6.65 | 17.06 | 23.29 | 28.97 | 28.97 | 28.97 | 20.87 | 17.16 | 7.77 |
| 3. Döngü | Yük (kN) | 117.0 | 702.0 | 819.0 | 936.0 | 936.0 | 936.0 | 702.0 | 351.0 | 117.0 |
| | Uzama (mm) | 7.77 | 28.82 | 35.37 | 41.13 | 41.13 | 41.13 | 39.36 | 21.01 | 9.20 |
| 4. Döngü | Yük (kN) | 117.0 | 936.0 | 1053.0 | 1170.0 | 1170.0 | 1170.0 | 936.0 | 468.0 | 117.0 |
| | Uzama (mm) | 9.20 | 46.42 | 51.67 | 55.28 | 55.28 | 55.28 | 53.84 | 28.70 | 10.14 |
| 5. Döngü | Yük (kN) | 117.0 | 1170.0 | 1287.0 | 1404.0 | 1404.0 | 1404.0 | 936.0 | 468.0 | 117.0 |
| | Uzama (mm) | 10.14 | 56.43 | 63.51 | 69.16 | 69.16 | 69.16 | 56.74 | 30.74 | 11.82 |
| 6. Döngü | Yük (kN) | 117.0 | 1404.0 | 1521.0 | 1638.0 | 1638.0 | 1638.0 | 1170.0 | 702.0 | 117.0 |
| | Uzama (mm) | 11.82 | 69.53 | 75.71 | 81.56 | 81.56 | 81.56 | 72.39 | 46.80 | 14.24 |
| 7. Döngü | Yük (kN) | 117.0 | 1638.0 | 1755.0 | 1872.0 | 1872.0 | 1872.0 | 1170.0 | 702.0 | 117.0 |
| | Uzama (mm) | 14.24 | 82.25 | 88.45 | 94.26 | 94.26 | 94.26 | 78.05 | 51.54 | 18.58 |
| 8. Döngü | Yük (kN) | 117.0 | 1872.0 | 2052.2 | 2106.0 | 2106.0 | 2106.0 | 2106.0 | 2223.0 | 2340.0 |
| | Uzama (mm) | 18.58 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |



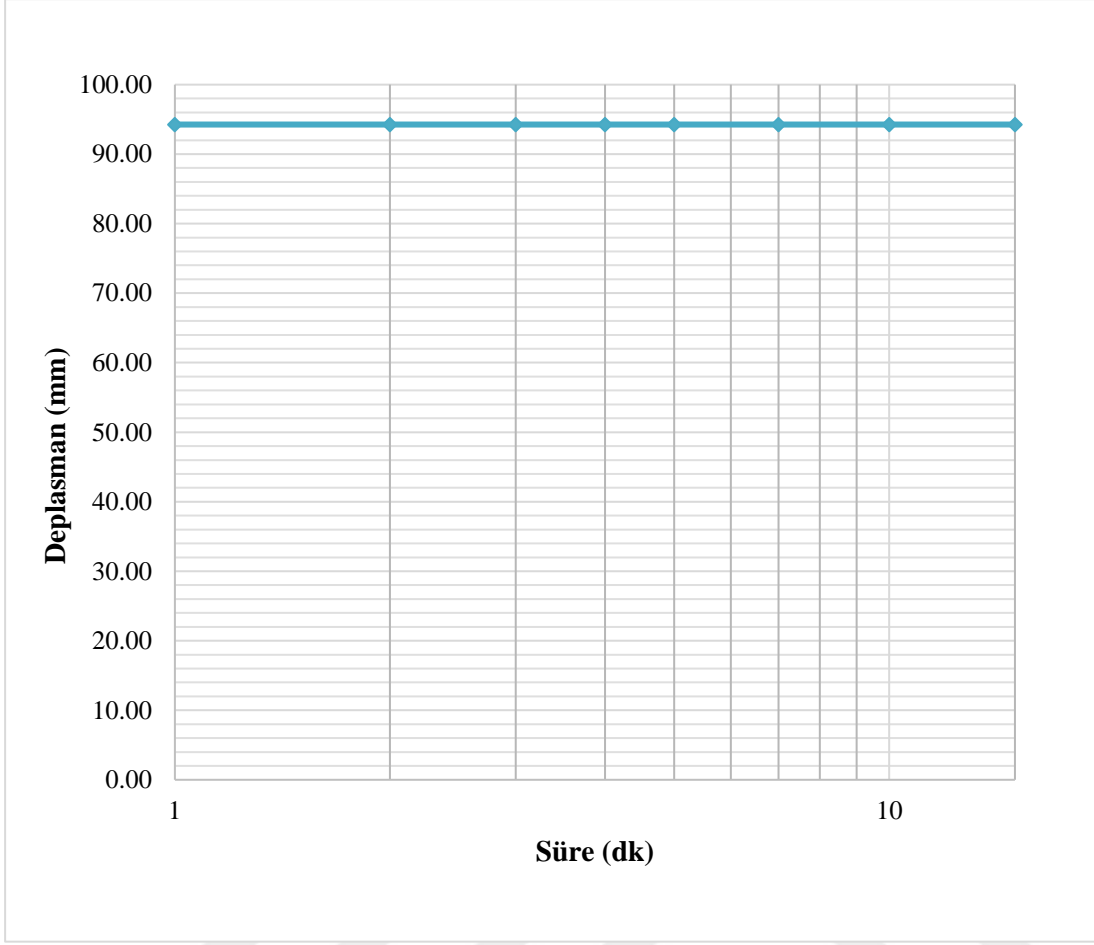
Şekil C.1 Ankraj kök bölgesine ait yük – deplasman eğrisi.

Çizelge C.3 Ankraj serbest boyu yük ve görünür uzama miktarları.

| Test Yüğü (kN) | Serbest Boy (m) | Uzama (mm) | | | Görünür Serbest Boy (m) | İzin Verilebilir Serbest Boy (m) |
|----------------|-----------------|------------|--------|---------|-------------------------|----------------------------------|
| | | Toplam | Kalıcı | Elastik | | |
| 117 | 10.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | Minimum: | |
| 468 | 10.0 | 16.76 | 6.65 | 10.11 | | |
| 702 | 10.0 | 28.97 | 7.77 | 21.20 | 9.50 | |
| 936 | 10.0 | 41.13 | 9.20 | 31.93 | Maksimum: | |
| 1170 | 10.0 | 55.28 | 10.14 | 45.14 | | |
| 1404 | 10.0 | 69.16 | 11.82 | 57.34 | 14.50 | |
| 1638 | 10.0 | 81.56 | 14.24 | 67.32 | | |
| 1872 | 10.0 | 94.26 | 18.58 | 75.68 | | |
| 2052 | 10.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | |



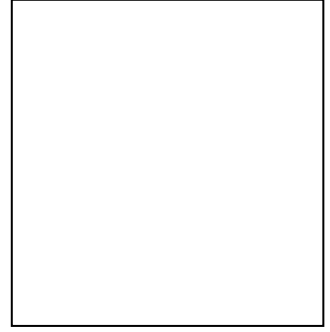
Şekil C.2 Ankraj serbest boyu yük – görünür uzama eğrisi.



Şekil C.3 Ankrajın kök bölgesindeki sıyrılma oranı.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad

: Çiçek ÜSTÜN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü