



BATMAN-HASANKEYF-GERCÜŞ-MİDYAT KARAYOLU GÜZERGÂHINDAKİ YÜKSEK ŞEVLERİN DURAYLILIKLARININ FARKLI ANALİZ PROGRAMLARIYLA DEĞERLENDİRİLMESİ

Aykut EKE¹, Atiye TUĞRUL², Murat YILMAZ^{2*}

¹ Yayalar Mah., Barbaros Hayrettin Paşa Cad., Dumankaya Yenişehir Evleri, E3, D6, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Kaya Mekaniği,
Plaxis,
RS2,
Şev Duraylılığı,
Hoek ve Brown.*

Öz

Anadolu topografyası geçirdiği jeolojik evrimi sebebiyle engebeli bir morfolojiye sahip olup mühendislik yapılarının çalışıldığı alanlarda şev yarmalarının oluşmasına sebebiyet vermektedir. Bu bağlamda, Batman ili sınırları içerisinde kalan Batman-Mardin Yolu üzerindeki yüksek kaya şevleri farklı analiz programlarıyla çalışılmış olup programlar karşılaştırılarak kaya ortamındaki şev duraylılığının ortaya konması amaçlanmıştır. Kaya ortamında çalışılması sebebiyle analizlerde Hoek ve Brown yenilme modeli kullanılmıştır. Analizler Plaxis BV tarafından geliştirilen Plaxis2D v2018.01 ve Rocscience tarafından geliştirilen RS2 v8.005 programlarında yapılmış olup her iki program da sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile çalışmakta olan 2 boyutlu yazılımlardır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda programların Hoek ve Brown yenilme modeli ile çalışmaları kıyaslanmıştır. Ayrıca, bu kıyası çeşitlendirmek adına kaya ortamının duraylılık analizi Plaxis programında Hardening Soil yenilme modeli kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. Hoek ve Brown yenilme modeli kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları değerlendirilmiş olup bölgedeki yüksek şevlerin uzun dönem duraylılık şartlarını Plaxis analizlerine göre sağlamadığı, RS2 analizlerine göre ise sağladığı görülmektedir. Ayrıca, Plaxis programındaki Hardening Soil yenilme modelinde rezidüel kaya parametreleri kullanılarak duraylılık analizleri gerçekleştirilmiş ve bu analiz sonuçlarının RS2 analiz sonuçlarıyla benzerlik gösterdiği gözlenmiştir.

ASSESSMENT OF STABILITIES OF STEEP ALONG THE BATMAN-HASANKEYF-GERCUS-MIDYAT HIGHWAY

Keywords

*Rock Mechanics,
Plaxis,
RS2,
Slope Stability,
Hoek and Brown.*

Abstract

Anatolian topography has a very rugged morphology due to its geological evolution. For this reason, slopes are formed in the areas where engineering structures are studied. In this sense, the stabilities of the high rock slopes on the Batman-Mardin Highway within the borders of the province of Batman have been studied by using different analyzes programs. Hoek and Brown failure model has been used in the analyzes due to study in the rock environment. The analyzes have been performed with the programs of Plaxis v2018.01 developed by Plaxis BV and RS2 v8.005 developed by Rocscience. Both programs are 2-dimensional software working with the finite element method (FEM). The Benchmarking study has been performed between the studies made with Hoek and Brown failure model and the programs. In addition to this, the stability analysis in the rock environment has been performed in Plaxis program by using Hardening Soil failure model in order to diversify this benchmarking study. The results have been assessed, and it is seen that the high slopes in the territory do not meet the long-term stability requirements according to the Plaxis analysis, but according to the analysis of RS2, do meet. In addition to this, the stability analysis has been performed by using residual rock parameters in the Hardening Soil failure model in the Plaxis program, and it is observed that these analysis results are similar with the ones obtained from the RS2 analysis.

* İlgili yazar / Corresponding author: yilmazm@istanbul.edu.tr, +90-532-466-4168

Alıntı / Cite

Eke, A., Tuğrul, A., Yılmaz, M., (2021). Batman-Hasankeyf-Gercüş-Midyat Karayolu Güzergâhındaki Yüksek Şevlerin Duraylılıklarının Farklı Analiz Programlarıyla Değerlendirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(2), 666-682.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Eke, 0000-0002-0157-7704
A. Tuğrul, 0000-0002-5988-5689
M. Yılmaz, 0000-0002-9598-1408

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	17.03.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	25.03.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	30.03.2021
Yayın Tarihi / Published Date	20.06.2021

1. Giriş (Introduction)

Genel anlamda şev “yatay ya da mevcut arazi yüzeyi ile belirli bir açı yapan kütle” olarak tarif edilebilir (Cernica, 1995; Taşkıran vd., 2015). Kitle hareketleri, yerkürenin eğimli yüzeylerinde (yamaç) veya insanlar tarafından gerçekleştirilen şevlerde meydana gelmekte olup mühendislik yapılarında şevlerin duraylılığı söz konusu olmaktadır (Vardar vd., 1990). Kaya şevlerinin duraylılıkları, karayolları ve açık ocak maden işletmeleri gibi birçok mühendislik yapılarında oluşturabileceği can ve mal kaybı riskinden dolayı önem arz etmekte olup şevlerdeki yenilmeler ve duraylılığa etki eden parametrelerin incelenmesi jeoteknik alanda oldukça önemlidir.

Bir şevin duraylılığına etki eden birden fazla parametre söz konusudur. Duraylılık analizlerinde hesaplanan güvenlik katsayısı (SRF) değeri üzerinde en etkili parametreler sırasıyla; şev açısı, GSI, su tablası seviyesi, sismik katsayı ve şev yüksekliğidir (Koca vd., 2014). Bir kaya şevinin duraylılığında tüm bu değişkenler direkt olarak etki etmektedir.

Doğal ya da yapay olarak oluşturulan tüm şevler kendi ağırlıkları, üzerindeki yükler vb. etkiler altında yerçekimine karşı davranış göstermeye eğilimlidir. Şev kütlelerine etki eden kaydırıcı ve direnen kuvvetler arasındaki ilişki ise şevin duraylılığını belirler. Bu bağlamda; kaya şev duraylılığının değerlendirilmesinde kullanılan farklı yöntemler mevcuttur. Şev duraylılığı genellikle; kinematik analizler, limit denge analizleri, sayısal analizler (nümerik) ve Şev Kütle Puanlaması (SMR) gibi kaya kütle sınıflandırma sistemleri ile değerlendirilmektedir. (Hoek vd., 1981; Hoek, 1999; Ulusay vd., 2001; Pantelidis, 2009; Alejano vd., 2011; Karaman, 2013).

Limit denge yaklaşımında kayma düzleminin yeri, şekli ve kayan kütlelerin davranışı ile ilgili kabuller yapılmakta olup gerilme-şekil değiştirme ilişkisi göz önüne alınmamakta ve deplasmanlar hesaplanmamaktadır (Taşkıran vd., 2015). Kaya şev duraylılığının değerlendirilmesinde limit denge yaklaşımına göre daha detaylı analiz gerektiğinde Finite Element Method/Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile çalışan programlar kullanılarak sayısal (nümerik) analizler gerçekleştirilir. Sonlu elemanlar yaklaşımında, sürekli bir ortam sonlu elemanlara bölünerek sistem denklemleri elde edilir ve lineer bir denklem takımına indirgenerek çözüm yapılır. Düğüm noktaları adı verilen noktalarla birleşen elemanlar ile sürekliliği tanımlamayı amaçlayan sonlu elemanlar yöntemi, yenilmenin gerçekleştiği şev modelindeki gerilme ve deformasyonları limit-denge analizlerinin aksine (sadece kayma düzleminin üstündeki alan için dilimlere bölerek değil) tüm modeli kapsayan ağ elemanı içerisinde gerçekleştirerek sonuca varmaktadır (Karaman, 2013; Arkun vd., 2014). Bu sebeple şev duraylılığı incelenirken sonlu elemanlar yöntemi (FEM) yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu incelemede üzerinde çalışılmak üzere; Batman ili sınırları içerisinde konumlanan Hasankeyf bölgesindeki Üçyol köyünün güneybatısındaki Batman-Mardin Yolu üzerinde yer alan yüksek (66m) kaya şevleri seçilmiştir. Hasankeyf, doğuda Siirt'in Erüh ve Kurtalan ilçeleriyle, güneyde Gercüş ilçesi, batıda Batman'ın merkeziyle, kuzeyde ise Beşirici ilçesi ile çevrilidir (Şekil 1).

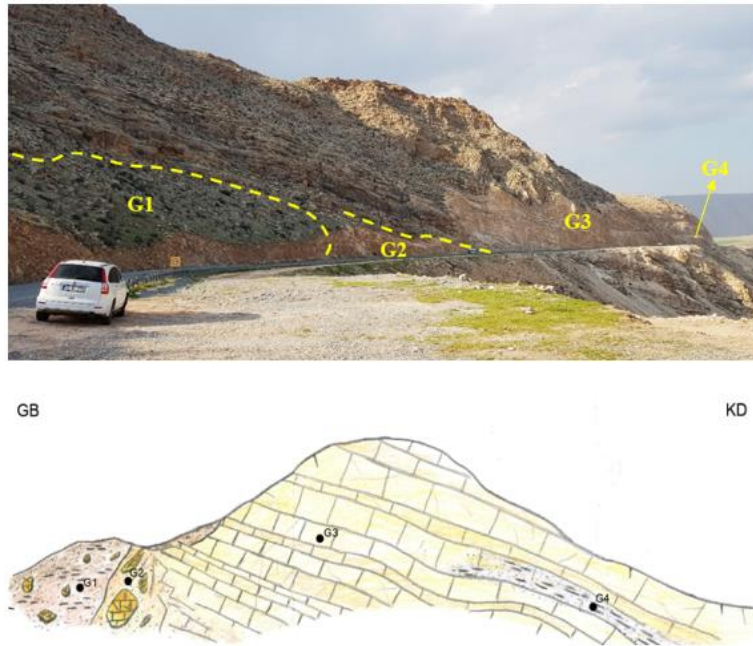


Şekil 1. Çalışma Alanının Google Earth Üzerinde Yer Bulduru Haritası (Site Location Map of the Study Area on Google Earth)

Bu çalışmadaki amaç, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile çalışma alanındaki kaya ortamının şev duraylılığını belirlemektir. Ayrıca geliştirilmiş Hoek ve Brown yenilme modeli ve Hardening Soil yenilme modeli arasındaki ilişkinin Plaxis2D v2018.01 ve RS2 v8.005 bilgisayar programlarında gerçekleştirilen analiz sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda Batman-Mardin yolu üzerinde analizi gerçekleştirilecek olan kesimde detaylı jeolojik incelemeler yapılmıştır. Güzergâha ait jeolojik birimlerin yapısal ve mühendislik özellikleri ile yeraltı suyu durumunu tespit etmek amacıyla karotlu sondaj çalışmaları gerçekleştirilmiş, . sondajlardan alınan sağlam kaya numunelerinde kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerini öğrenmek amacıyla tek eksenli sıkışma dayanımı, elastisite modülü gibi laboratuvar testleri yapılmıştır. Buna ek olarak GSI belirlemede kullanılan kaya süreksizlik özelliklerinin bazıları (Dolgu, ayrışma, pürüzlülük, açıklık vb.) ISRM (2007) tanımlama kriterine göre tanımlanmıştır.

1.2. Jeolojik Ortam (Geological Environment)

Çalışma alanında tabandan üste doğru Midyat grubu kireçtaşları, yamaç molozu, alüvyon ve yapay dolgu birimleri gözlenmiştir. Duraylılığın incelendiği jeolojik birim Eosen yaşlı Midyat grubu kireçtaşlarından oluşmakta olup arazide sarı, kahverengimsi sarı, bej, gri, sarımsı gri renklerde gözlenmektedir. Karasal olarak çökelmiş olan kireçtaşı birimi kendi içerisinde farklı kaya kalitesinde gözlenmekte olup yüksek şevlerin yer aldığı (analizi yapılacak) kesim sağlam kireçtaşı (G3 kesimi, Şekil 2) birimlerinden oluşmaktadır. Çalışma alanını tarifleyen ve yaklaşık 1 kilometrelik karayolu boyunca gözlenen mostranın genel görünümü ve jeoloji taslak enkesiti Şekil 2’de verilmiştir.

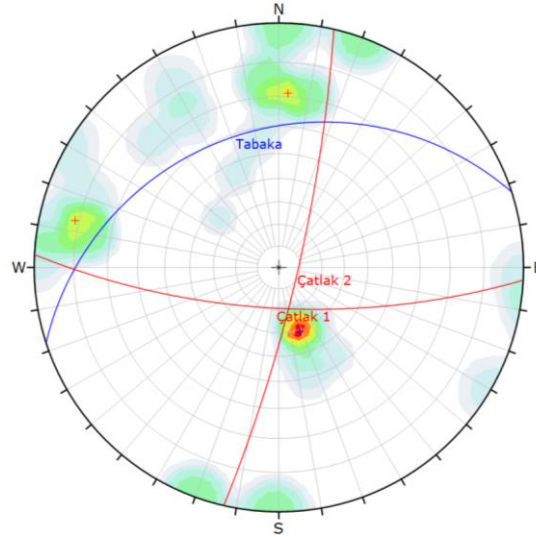


Şekil 2. Çalışma Alanı Genel Mostra Görünümü ve Çalışma Alanı Ölçeksiz Taslak Enkesit Çizimi (G1: Kireçtaşı Birimlerini Üzerleyen Yamaç Molozu G2: Zayıf Kireçtaşı G3: Sağlam Kireçtaşı G4: Kireç, Tebeşirleşmiş Kireçtaşı) (The Study Area General Crop View and the Study Area off Scale Layout Cross Section Drawing (G1: Slope Wash Overlying Limestone Elements G2: Weak Limestone G3: Hard Limestone G4: Lime, Chalky Limestone))

1.3. Kireçtaşının Kaya Kütleleri Özellikleri (Rock Mass Characteristics of Limestone)

Süreksizlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kireçtaşında ISRM (2007) tanımlama kriterine göre alan taraması yapılmıştır. Kireçtaşı kaya kütlelerinde tabaka kalınlıkları 1 metreden 4-5 metreye kadar çıkmaktadır. Tabakaların arası kil, silt dolguludur olup dolgu kalınlığı 1-3 cm arasında değişmektedir. Çatlak sistemlerinin açıklığı kapalı (sıkı) olarak gözlenmiştir. Tabakaların devamlılıkları ise >20m olup çok yüksek devamlılık göstermektedir.

Süreksizliklerin hakim yönelimlerini bulmak için DIPS 6.0 yazılımı kullanılmıştır (Şekil 3). Kaya kütlelerinin parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan hakim süreksizliklerin özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur.



Şekil 3. Çalışma Alanına Ait Hâkim Süreksizliklerin Dağılımı (2D Stereonet Üzerinde; Dips 6.0) (Distribution of Dominant Discontinuity of the Study Area (on 2D Stereonet; Dips 6.0))

Tablo 1. Çalışma Alanı İçin Belirlenen Hâkim Süreksizlikler ve Genel Özellikleri (Dominant Discontinuity and General Characteristics Determined for the Study Area)

Süreksizlik Türü	Aralık (m)	Devamlılık	Dolgu özellikleri	Pürüzlülük	Eğim / Eğim yönü
Çatlak 1	50 cm.'den	min. >1 m , max 3-10 m	çoğunlukla ezik malzeme; kil, silt	genelde düz-az dalgalı, az	71 / 183
Çatlak 2	birkaç metreye kadar	düşük devamlı- orta devamlı	kalsit dolgulu (1-3 cm)	miktarda dalgalı- yer yer pürüzlü	81 / 103
Tabaka 1					31 / 342

1.4. Hidrojeoloji (Hydrogeology)

Çalışma alanında analizi gerçekleştirilecek kaya birimlerinde yapılan sondajlarda yeraltı suyu seviyesine rastlanılmamış olup mevsimsel su gelimleri muhtemeldir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Kaya kütlelerinin şev duraylılığı ve nümerik analizler konularında literatürde birçok örnek mevcuttur. Buna karşın farklı analiz programlarının karşılaştırıldığı örnekler sınırlıdır. Bu bağlamda, çalışmada kullanılan kaynaklar makale içerisinde atıfta bulunularak verilmiş olup bazı çalışmalar aşağıdaki gibidir.

Hoek ve Bray (1981), Rock Slope Engineering çalışmasında açık ocak işletmelerinde şev duraylılığı problemlerine yönelik olarak süreksizliklerin (çatlak, tabaka, fay vb.) kaya kütlelerinin davranışını etkilediğini ve kaya davranışı incelenirken süreksizliklerin de dikkate alınması gerektiğinden bahsetmiştir.

Ulusay ve diğ. (1995), Türkiye Kömür İşletmeleri'ne ait Muğla'da yer alan Eskihisar köyündeki kömür işletmesinde döküm sahasının duraylılığını çalışmışlardır. Döküm sahasında meydana gelen riskin araştırılması sonucunda şev eğimi ile döküm malzemesinin içsel sürtünme açısının eşit olduğunu tespit ederek dairesel kaymanın gerçekleştiği sonucuna varmışlardır. Çözüm önerisi olarak genel şev eğiminin ve yüksekliğinin azaltılması gerekliliğinden bahsedilmiştir.

Sönmez ve diğ. (1998), yaptıkları çalışmada doğrusal yenilme vermeyen ve eklem takımlarının gözlemlendiği bir kaya ortamında kayanın parametreleri yapılan gözlemler doğrultusunda ve bilgisayar programı kullanılarak tayin edilmeye çalışılmıştır. Hoek ve Brown sabitleri (mb, s, a) kullanılarak türetilen RMR parametrelerini kullanmışlar ve kesitler üzerinde limit dengeye ulaşmaya çalışmışlardır.

Taşkıran ve diğ. (2015), Şev duraylılığının iki ve üç boyutlu analiz programları ile çözülebilirliğini kıyaslayarak bulmayı amaçlamışlardır. Bir şev örneğinde iki ve üç boyutlu programlarda yaptıkları analizlerde elde ettikleri sonuç değerlerini kıyaslamışlar ve üç boyutlu şev modeli ile elde edilen güvenlik katsayı değerinin iki boyutlu durumda elde edilen değerden daha büyük olduğu sonucuna varmışlardır.

Rocscience'ın internet sitesinde bulunan makalede Kunst (2017)'nin yüksek lisans tezi çalışmasına atıfta bulunarak RS2, Plaxis2D ve Displacement Analyser/Deplasman Analizci (DIANA) programları sonlu eleman analiz sonuçları kıyaslanmıştır. TBM ile bir tünel kazısı modelinde yapılan analizlerin sonucunda RS2 analizlerinin tutarlı ve doğru olduğu sonucuna varmışlardır.

Ceryan ve diğ. (2018), Kaya şev duraylılığının değerlendirilmesinde farklı yazarların kullandığı yöntemlere değinerek hesaplamalardaki belirsizliklere değinmişlerdir. Girdi parametreleri ve analiz programlarındaki belirsizlikleri en aza indirmek adına kendi örnek çalışmalarında olasılıksal geri analiz yöntemi kullanarak kaya şev stabilite analizi gerçekleştirmişlerdir.

Conrado-Palafox ve diğ. (2019), Plaxis2D ve RS2 yazılımları kullanılarak Yucatecan bölgesindeki bir yol yükünü simüle eden ve arazi yüzeyinde boşluklar nedeniyle oluşan yer değiştirmeleri belirleyen sonlu elemanlarla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında yolun duraylılık sorununu analiz etmişler ve Plaxis2D ve RS2'de elde edilen sonuçların karşılaştırmasını sunmuşlardır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Nümerik analizi gerçekleştirilecek kireçtaşı biriminin analizlerde kullanılacak parametre tayin yöntemleri ve şev geometrisi aşağıdaki başlıklarda bahsedilmiştir.

3.1. Kaya Malzemesinde Yapılan Çalışmalar (Studies in Rock Material)

Çalışma alanındaki kireçtaşı birimlerinin jeoteknik değerlendirmede kullanılmak üzere arazi çalışmaları gerçekleştirilmiş ve süreksizlik özelliklerine dair incelemeler yapılmıştır (Tablo 1).

Bunun yanı sıra arazide toplam 211 metre uzunluğunda ve derinlikleri 10,00 m ile 25,00 m arasında değişen 11 adet karotlu sondaj gerçekleştirilmiştir. Sondaj sandıklarından alınan kayaç numunelerinde parametre tayininde kullanılmak üzere kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiş, kireçtaşının kaya kalite göstergesi yapılan sondaj çalışmalarından tayin edilmiştir.

3.2. Nümerik Analizlere Dair (About Numerical Analysis)

Batman-Mardin yolu üzerindeki kireçtaşı biriminden oluşan yüksek şevlerin duraylılıkları sayısal analizler ile değerlendirilmiş olup sonlu elemanlar yaklaşımı ile çalışan Plaxis v2018.01 ve RS2 v8.005 bilgisayar programları kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) avantajlarının yanı sıra kendi içinde dezavantajlarını da bulundurmaktadır. Kurulan modeller kabuller doğrultusunda kurulduğu için eğer doğru kabuller yapılırsa doğru sonuçlar elde edilebilir. Bunun yanı sıra doğru parametreler kullanılsa dahi ağ tipi, element tipi ve element sayısı doğru verilmediği takdirde her defasında çok farklı sonuçlar elde edilebilir. Bu durumda en doğru modeli oluşturabilmek adına çalışma alanının gerçek topografyası ile kayanın mevcut durumu ile ön çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sonrasında şev modelinin uygulandığı kesitlerde istikrarlı sonucu elde edinceye kadar denemeler yapılmış ve nihayetinde gerçeğe en yakın sonucu vereceği düşünülen analiz modeli oluşturulmuştur.

Kaya kütlelerinin davranışı sadece kaya malzemesi ile değil yapısında bulunan süreksizliklerin de dahil edildiği kaya kütleleri ile açıklanabilir (Ulusay ve Sönmez, 2007). Kaya kütlelerinin dayanım özellikleri, kaya malzemesinin yanı sıra, süreksizlik özellikleri de dikkate alınarak belirlenmelidir. Bu bağlamda 2 boyutlu (2D) analizlerde kullanılacak olan kaya parametrelerinin belirlenmesi, kaya ortamının süreksizlik ve zayıflıklarını da dikkate alarak, kaya kütleleri için geliştirilmiş olan genelleştirilmiş Hoek ve Brown (Hoek, 2006) yenilme modeline uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kaya ortamının 'elasto-birttle-plastic (elastik-gevrek-plastik)' davranacağı öngörüldüğünden ve çalışılan alanda daha önce kazı gerçekleştirilmiş olması sebebiyle analizlerde doruk ve rezidüel parametrelerin kullanılması amaçlanmıştır.

Analiz programlarında kullanılacak tasarım parametrelerinin hesap edilmesinde laboratuvar deneyleri, sondaj çalışmaları ve arazi gözlemleri kullanılmıştır. Arazide kireçtaşı kaya kütlesi, birden fazla kaya kalitesinde gözlenmekte olup yapılan kaya mekaniği laboratuvar deney sonuçlarından bu durum idrak edilebilir. Buna rağmen kaya malzemesini tanımlayan deney sonuçlarının ortalama değerleri analizi yapılacak kaya kütlelerini tanımlamak için kullanılmıştır. Bunun sebebi, yapılan 11 adet sondajdan sadece 1 tanesinin (SK-2 Numaralı Sondaj) analizi yapılacak en yüksek şev eğimine sahip kritik kesime denk gelmesi ve bu sondajdan (SK-2) alınan verilerin genel ortalamayla uyum sağlamasıdır. Ayrıca en yüksek değerleri seçmeyip genel görünüme göre güvenli tarafta kalmak amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) hesabı yapılırken tüm mostra göz önünde bulundurulmamış, sadece analizi yapılacak kesimin süreksizlik özellikleri dikkate alınmıştır. Böylece analiz programlarında kullanılacak tasarım parametreleri hesaplanırken farklı süreksizlik özellikleri gösteren zonlar için

farklı parametre setleri üretilebilir. Bu bağlamda çalışma alanındaki kireçtaşı birimi süreksizlikleri bakımından homojen olarak kabul edilmemiş, yerel olarak değerlendirilmiştir.

Genelleştirilmiş Hoek ve Brown yenilme modeli RS2 v8.005 programında aynı isimle yer almakta iken Plaxis v2018.01 programının bu sürümünde sadece Hoek ve Brown adıyla mevcuttur. Her iki programda da GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi), Hoek ve Brown sabitleri (mb, s ve a) gibi kaya kütlelerini tanımlamaya yönelik parametreler kullanılmaktadır.

RS2 v8.005 programının Hoek ve Brown yenilme modelinde doruk ve rezidüel parametreler aynı anda girilebilir olduğu için parametre takımı olduğu gibi kabul edilmiştir. Bu kabulden önce plastik malzeme modeli için rezidüel ve doruk parametreler eşit tutularak analizler gerçekleştirilmiş ancak farklı rezidüel parametrelerin girildiği ilk durum analizlerine göre daha yüksek değerler verdiği tespit edildiğinden güvenli tarafta kalan ilk durum (rezidüel ve doruk parametrelerin ayrı olduğu) hesaplamaları kullanılmıştır.

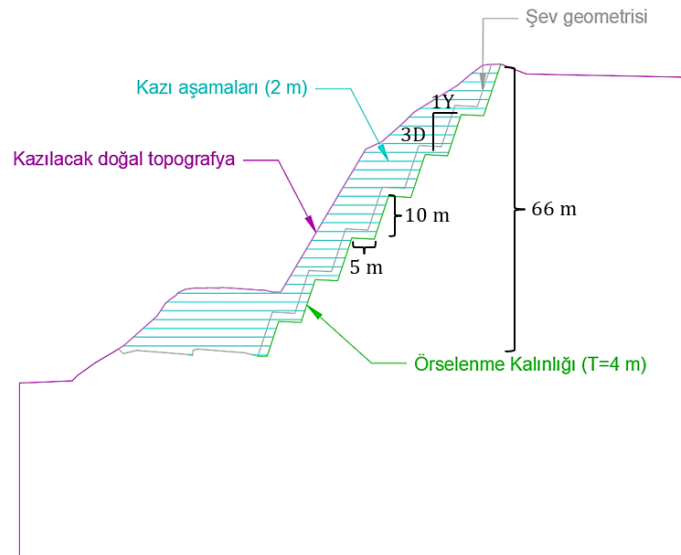
Plaxis v2018.01 programının genelleştirilmiş Hoek ve Brown yenilme modeli kayanın doruk ve rezidüel parametrelerini aynı anda girmeye olanak tanımadığı için parametre takımında doruk parametre takımı seçilerek kullanılmıştır. Bunun sebebi; rezidüel parametrelerle yapılan analizlerde doruk parametre analizlerine göre daha düşük değer çıkmış olması ve doruk parametre ile yapılan analiz sonuçlarının zaten duraylılık şartlarını sağlamamış olmasıdır.

Bunun yanı sıra, Plaxis v2018.01 programında gerçek değerlere yakın sonuçlar hesaplaması nedeniyle önerilen Hardening Soil yenilme modeli üzerinde de duraylılık analizi gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda doruk Mohr-Coulomb parametreleri ile yapılan analizlerin çok yüksek sonuç vermesi sebebiyle güvenli tarafta kalarak rezidüel parametreler kullanılmıştır.

Çalışmalarda statik durum toplam yer değiştirme, statik durum güvenlik sayısı – maksimum makaslama yer değiştirmesi ve sismik durum güvenlik sayısı – maksimum makaslama yer değiştirmesi analizleri gerçekleştirilmiştir. Sismik analizlerde yatay deprem katsayısı çalışılan alan için AFAD Türkiye deprem tehlike haritasından belirlenerek $k_h=0.066$ kullanılmıştır. Örselenme faktörü (D) için şev kazılarında önerilen (Hoek, 2012) 0.7 değeri alınmış olup analizlerde kazı aşamaları 2 metre olarak tasarlanmış ve örselenme kalınlığı (T) Hoek, 2012'ye göre 4 metre olarak belirlenmiştir.

3.3. Şev Tasarımının ve Analiz Kesitinin Belirlenmesi (Determination of Slope Design and Analysis Section)

Çalışma alanındaki kireçtaşı birimleri doğal şev eğimi ile duraylı olup belli bir kazı geometrisine sahip değildir. Mevcut karayolunun genişletilmesi dahilinde çalışma alanında birçok şev geometrisi oluşacaktır. Analizlerde 1Y/3D şev geometrisinin uygulandığı ve genel şev yüksekliği 66 metre olan kritik kesit kullanılmıştır. Tekil şev yüksekliği 10 metre ve palye genişliği 5 metre olarak tasarlanan analiz kesiti Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Kritik Kesit Analiz Modeli (Analysis Model of Critical Cross Section)

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Kireçtaşının süreksizlik özellikleri için yapılan arazi gözlemleri '1.3. Kireçtaşının Kaya Kütleli Özellikleri (Rock Mass Characteristics of Limestone)' başlığında verilmiştir. Tasarlanan şev geometrisinde yüksekliği 66 metre olan kireçtaşının duraylılık analizleri için yapılan deneysel çalışmalar aşağıdaki başlıklarda verilmiştir.

4.1. Sondaj Çalışmaları (Borehole Tests)

Analizi yapılacak kireçtaşı kaya kütlelerinin yapısal ve mühendislik özellikleri ile yeraltı suyu durumunu tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen sondajların özet tablosu Tablo 2'de verilmiş olup analiz kesitinin olduğu kesime en yakın sondaj olan SK-2 numaralı sondaja ait numune fotoğrafı Şekil 5'teki gibidir.

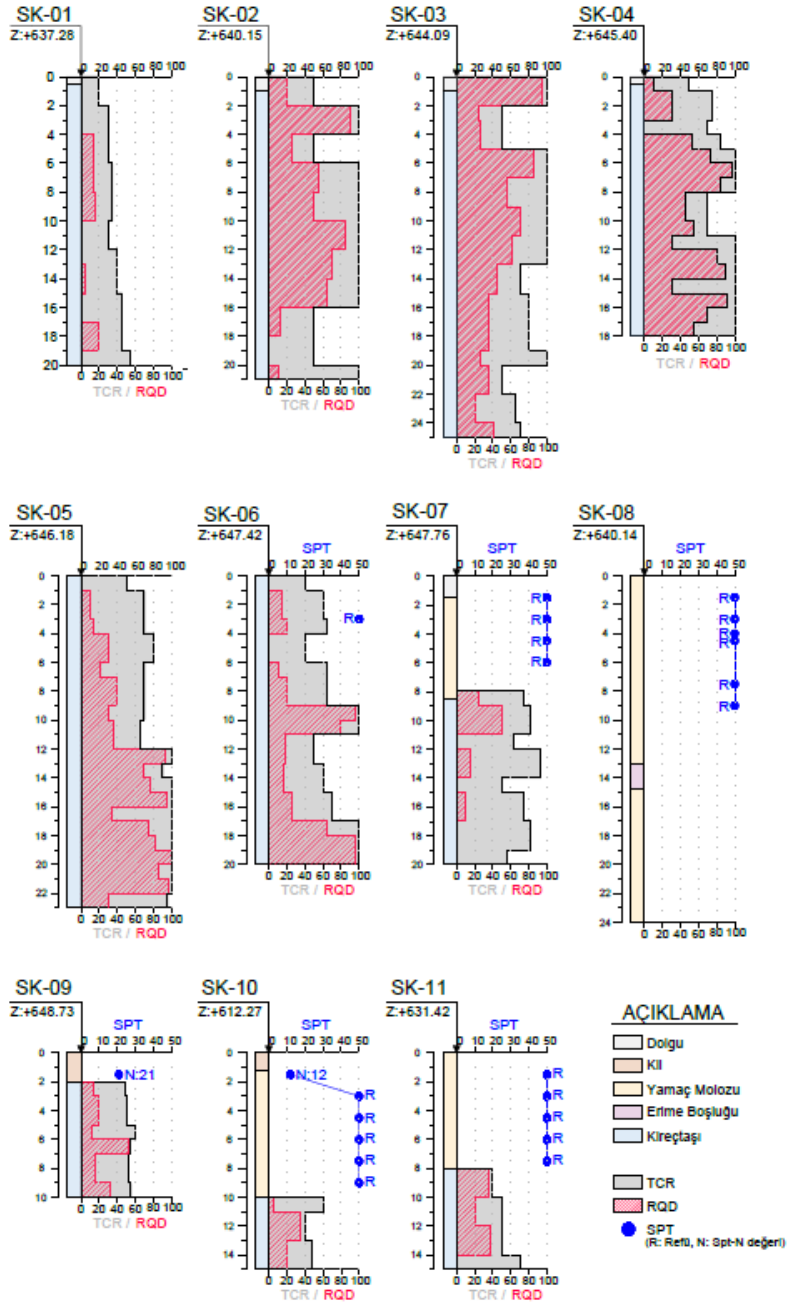
Tablo 2. Kireçtaşı Biriminde Yapılan Sondajların Özet Tablosu (Summary Table of Boreholes in the Limestone Unit)

No	Sondaj No	Derinlik [m]	Yeraltı Suyu Seviyesi (YASS)
1	SK-1	20	Gözlenmedi
2	SK-2	21	Gözlenmedi
3	SK-3	25	Gözlenmedi
4	SK-4	18	Gözlenmedi
5	SK-5	23	Gözlenmedi
6	SK-6	20	Gözlenmedi
7	SK-7	20	Gözlenmedi
8	SK-8	24	Gözlenmedi
9	SK-9	10	Gözlenmedi
10	SK-10	15	Gözlenmedi
11	SK-11	15	Gözlenmedi



Şekil 5. SK-2 Sondajı 6-10m Arası Numune Fotoğrafi (Sample Photograph of SK-2 Borehole From 6 to 10m)

Yapılan sondaj çalışmalarında yeraltı suyu seviyesine rastlanmamıştır. Kireçtaşının kaya kalite göstergesi sondaj çalışmalarından tayin edilmiş olup Rock Quality Designation/Kaya Kalite Göstergesi (RQD), Total Core Recovery/Toplam Karot Yüzdesi (TCR) verilerini gösteren sondaj grafikleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Kireçtaşında Yapılan Sondajların TCR ve RQD Grafikleri (TCR and RQD Graphics of Boreholes in the Limestone)

4.2. Laboratuvar Deneyleri (Laboratory Tests)

Analizi yapılacak kireçtaşı kaya malzemesinin jeoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla ve parametre tayininde kullanılmak üzere sondaj sandıklarından alınan kayaç numunelerinde kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler TS/EN ISO17025 standartına uygun yapılmış olup kaya mekaniği deneyleri özeti Tablo 3'te, istatistiksel sonuçları Tablo 4'teki gibidir.

Tablo 3. Kaya Mekanik Deneyleri Özet Tablosu (Summary Table of Rock Mechanics Tests)

Sondaj No	Derinlik		Birim Hacim	Tek Eksenli	Elas.	Nokta
	Baş.	Bitiş	Ağırlık	Sıkışma D.	Modülü	Yükleme
	[m]	[m]	γ_n [kN/m ³]	σ_{ci} [MPa]	E_i [GPa]	I_{S50} [MPa]
SK-1	4	4.15	22.5	21.8	-	-
SK-1	9.85	9.95	22.34	-	-	0.4
SK-1	11.5	11.55	20.88	-	-	0.3
SK-1	14.9	15	22.78	-	-	0.6
SK-1	18.5	18.7	21.94	13.5	4.098	-
SK-1	19.75	19.8	19.95	-	-	0.3
SK-2	2.5	2.75	22.47	26.1	-	-
SK-2	8.7	9	21.97	16.7	5.149	-
SK-2	9.5	9.55	23.39	-	-	2.9
SK-2	12.9	12.95	22.75	-	-	0.6
SK-2	20.85	20.9	24.81	-	-	3.6
SK-3	5	5.05	23.33	-	-	1.5
SK-3	6.8	7	23.58	35.1	-	-
SK-3	7.25	7.3	23.6	-	-	3.8
SK-3	7.8	8	24.08	26.8	-	-
SK-3	11.3	11.35	22.63	-	-	0.8
SK-3	12.1	12.5	24.4	34.6	10.279	-
SK-3	16.5	16.55	23.17	24.8	-	-
SK-3	21.8	21.85	23.06	-	-	1.6
SK-3	24.1	24.25	23.07	33.4	-	-
SK-4	7.5	7.78	22.6	15.5	-	-
SK-4	12.4	12.45	23.53	-	-	1.3
SK-4	12.8	13	22.99	23.8	-	-
SK-4	17.85	17.9	23.98	38.1	-	-
SK-5	5	5.1	21.04	19.5	-	-
SK-5	7.2	7.25	20.67	-	-	1.6
SK-5	10	10.1	22.43	27.7	8.637	-
SK-5	11.1	11.2	23.72	38.7	-	-
SK-5	18.5	18.7	20.27	-	-	0.5
SK-5	22.7	22.75	20.74	-	-	0.7
SK-6	1.7	1.75	23.64	-	-	2.5
SK-6	6.5	6.6	21.64	12.6	-	-
SK-6	10.6	10.7	21.52	11.9	3.528	-
SK-6	13.6	13.65	21.66	-	-	0.8
SK-6	16.55	16.6	20.59	-	-	0.3
SK-6	17	17.35	22.47	10.7	-	-
SK-7	2.5	2.6	22.09	-	-	1.4
SK-7	7.1	7.2	22.74	18.3	-	-
SK-7	7.7	7.75	22.83	-	-	2.1
SK-7	8.3	8.4	23.04	16.4	5.003	-
SK-7	17.1	17.2	21.82	-	-	0.7
SK-7	18.5	18.55	20.67	-	-	0.3
SK-8	3.1	3.15	22.33	-	-	1.5
SK-8	7.5	7.55	23.56	-	-	2.8
SK-8	9.2	9.25	23.82	-	-	2.5
SK-8	11.5	11.55	23.48	-	-	2.5
SK-8	19.8	19.85	20.91	-	-	1.8
SK-9	4.8	4.9	22.13	21.7	-	-
SK-9	6.2	6.4	23.05	25.5	7.74	-
SK-9	7.7	7.75	24.02	-	-	2.5
SK-9	9.8	10	22.28	22	-	-
SK-10	2	2.15	20.51	16.3	-	-
SK-10	7.5	7.55	21.48	-	-	1.8
SK-10	9.5	9.55	24.21	-	-	2.9
SK-10	10.5	10.8	23.86	32.9	10.209	-
SK-10	12.9	13	22.83	-	-	2.7
SK-11	2.1	2.2	22.31	-	-	1.4
SK-11	6.1	6.2	22.22	37.4	-	-
SK-11	9.85	10	23.47	30	-	-
SK-11	11.8	11.85	25.15	-	-	4.7
SK-11	12.2	12.3	21.96	24.4	7.232	-
SK-11	14	14.05	21.21	-	-	0.5

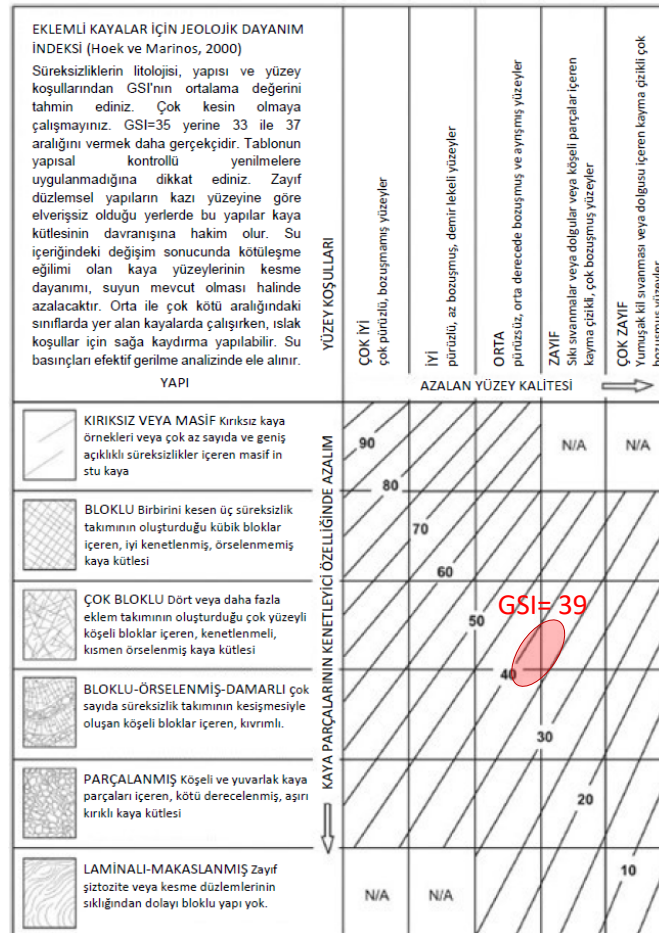
Tablo 4. Midyat Grubu Kireçtaşlarına Ait Laboratuvar Deney Sonuçları İstatistikleri (Laboratory Experiment Results Statistics of the Midyat Group Limestones)

	Birim Hacim	Tek Eksenli	Elas.	Nokta
	Ağırlık	Sıkışma D.	Modülü	Yükleme
	γ_n	σ_{ci}	E_i	I_{s50}
	[kN/m ³]	[MPa]	[GPa]	[MPa]
Numune Sayısı	62	28	9	34
Minimum Değer	19.95	10.70	3.53	0.30
Maksimum Değer	25.15	38.70	10.28	4.70
Ortalama Değer	22.55	24.15	6.88	1.65
Standart Sapma	1.18	8.47	2.55	1.15

4.3. Kireçtaşı Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi (Determination of Limestone Design Parameters)

Midyat grubu kireçtaşı biriminin parametreleri laboratuvar verileri ve kaya kütledeki süreksizliklerden yararlanarak geliştirilmiş Hoek ve Brown yenilme kriteri ile tespit edilmiş olup bu amaçla kullanılan değerler; masif kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_{ci}), Jeolojik dayanım indeksi (GSI), Kayaç malzemesine ait boyutsuz malzeme sabiti (m_i), Örselenme faktörü (D), Elastisite modülü (E_i) ve Birim ağırlık (γ)'tır. Birimin sondaj numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçlarının ortalamaları kullanılarak tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_{ci}), birim ağırlığı (γ), elastisite modülü (E_i) belirlenmiştir.

Yapılan sondaj çalışmalarının kaya kalite göstergesi (RQD) değerlerinin ortalaması 30 olarak hesaplanmış olup jeolojik dayanım indeksi (GSI) değeri için RocData bilgisayar yazılımında bulunan ve Hoek (2013) tarafından revize edilmiş eşitlik kullanılmış; $GSI = 1,5JCond89 + RQD/2$ ve yaklaşık 39 olarak tespit edilmiştir (Şekil 7 ve Şekil 8).



Şekil 7. Jeolojik Gözlemlerden GSI Tahmini Tablosu (GSI Expectation Table From Geological Observation) (Hoek ve Marinos, 2000)

Definition of JCond89, after Bieniawski (1989)

Condition of discontinuities	Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous
Rating	30	25	20	10	0

Guidelines for classification of discontinuity conditions

Discontinuity length (persistence)	< 1 m	1 to 3 m	3 to 10 m	10 to 20 m	More than 20 m
Rating	6	4	2	1	0
Separation (aperture)	None	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	More than 5 mm
Rating	6	5	4	1	0
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided
Rating	6	5	3	1	0
Infilling (gouge)	None	Hard infilling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft infilling < 5 mm	Soft infilling > 5 mm
Rating	6	4	2	2	0
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Moderate weathering	Highly weathered	Decomposed
Rating	6	5	3	1	0

Şekil 8. Hoek vd. (2013)'a Göre JCond89 Koşullarıyla Hesaplanan GSI Tahmini (GSI Estimate Calculated with JCond89 Conditions According to Hoek et al., 2013) (RocData v5.007)

Çalışma alanındaki kaya kütlelerinin rezidüel parametreleri de hesaplanmıştır. Bu bağlamda rezidüel GSI (GSI_r) değeri $GSI_r = GSI_e e^{-0.0134 GSI}$ bağıntısı kullanılarak (Cai vd., 2007) $GSI_r = 23$ olarak hesaplanmış ve rezidüel tasarım parametreleri hesabında kullanılmıştır.

Kaya kütlelerinin mi değeri üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi mevcut olmadığı için RocData v5.007 programındaki yazarlar tarafından önerilen mi değerleri dikkate alınmıştır. Örselenme faktörü değeri D=0.7 olarak kabul edilmiştir. Buna göre, kireçtaşı için tek eksenli sıkışma dayanımı $\sigma_{ci} = 24.20$ MPa, malzeme sabiti $m_i = 12$, birim ağırlığı $\gamma = 22.60$ kN/m³, elastisite modülü $E_i = 6.90$ GPa olarak öngörülmüştür. Bununla birlikte, örtü yüksekliğinden bağımsız olarak kullanılan genelleştirilmiş Hoek ve Brown ölçütleri de (mb, s ve a) hesaplanmıştır. Hardening Soil yenilme modelinde kullanmak üzere Mohr-Coulumb değerleri de belirlenmiş olup tüm hesaplamalar RocData v5.007 bilgisayar yazılımı kullanılarak ve 60 metrelik örtü kalınlığına göre gerçekleştirilmiştir. Kireçtaşının tasarım parametreleri Tablo 5'te verildiği gibidir.

Tablo 5. 60 Metrelik Örtü Kalınlığı İçin Kireçtaşlarının Kaya Kütleleri Tasarım Parametreleri (Rock Mass Design Parameters of the Limestones for 60-Meter Cover Thickness)

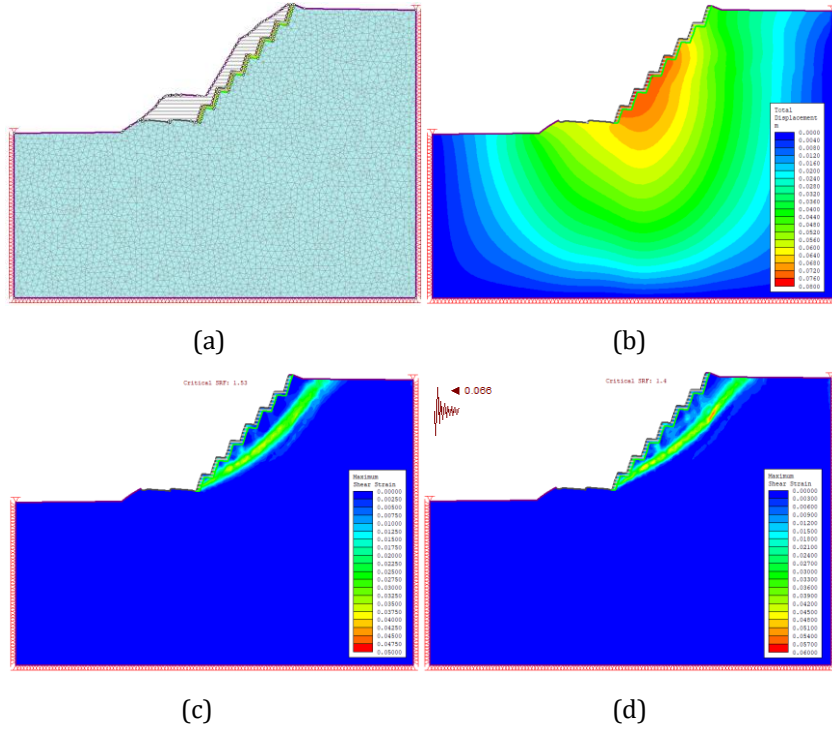
	Örselenme Faktörü	Kohezyon	İçsel sürtünme açısı	Deformasyon modülü	Hoek ve Brown Ölçütleri		
	D	c	Ø	Em	mb	s	a
		[kPa]	[°]	[GPa]			
Doruk Parametreler	0	341	43	1.03	1.3584	0.0011	0.5122
	0.7	218	33	0.38	0.4203	0.0001	0.5122
Rezidüel Parametreler	0	233	37	0.37	0.7671	0.0002	0.5358
	0.7	129	25	0.20	0.1745	0.00001	0.5358

4.4. Nümerik Analiz Sonuçları (Results of Numerical Analysis)

Hoek ve Brown yenilme modeli kullanılarak RS2 v8.005 ve Plaxis v2018.01 bilgisayar programlarında gerçekleştirilen analizlerde 1Y/3D şev geometrisinin uygulandığı haliyle genel şev yüksekliği 66 metre olan analiz kesiti kullanılmıştır. Her aşamada uygulanacak kazı yüksekliği 2 metre olarak belirlenmiş ve 4 metre olarak hesaplanan örselenme kalınlığı kesimine örselenmiş (D=0.7) numune parametreleri uygulanmıştır.

Ağ (mesh) tipi uniform, element tipi 6 düğümlü üçgenler (6 noded triangles), ağ (mesh) element sayısı 5000 olarak

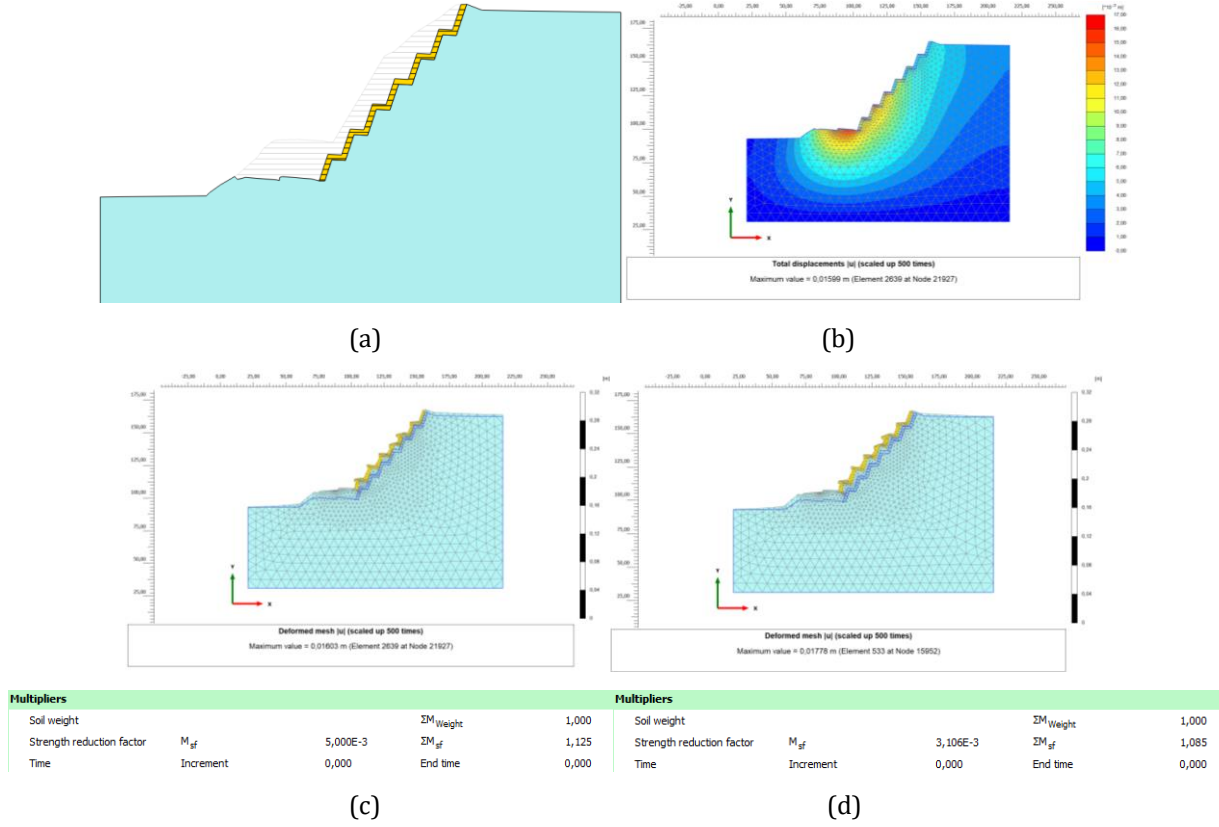
gerçekleştirilen RS2 v8.005 analizlerinin çıktıları Şekil 9’ da, analiz sonuçları özet tablosu Tablo 6’da verilmiştir. Çok sıkı ağ (very fine mesh) tipi ile gerçekleştirilen Plaxis v2018.01 analizlerinin çıktıları ve sonuç özet tablosu ise Şekil 10 ve Tablo 7’deki gibidir.



Şekil 9. RS2 Programında ‘Hoek ve Brown’ Yenilme Modeli ile Gerçekleştirilen Duraylılık Analizleri (a) Analize Yönelik RS2 Modeli (b) Toplam Yer Değiştirme (Statik) (c) Statik Durum Güvenlik Sayısı ve Maksimum Makaslama Yer Değiştirmesi (d) Sismik Durum Güvenlik Sayısı ve Maksimum Makaslama Yer Değiştirmesi (The Stability Analysis Performed With ‘Hoek & Brown’ Failure Model in RS2 Program (a) RS2 Model for Analysis (b) Total Displacement (Static) (c) Static State Safety Number and Maximum Shearing Displacement (d) Seismic State Safety Number and Maximum Shearing Displacement)

Tablo 6. RS2 v8.005 Duraylılık Analiz Sonuçları (Hoek ve Brown Yenilme Modeliyle) (RS2 v8.005 Stability Test Results (With Hoek ve Brown Failure Model))

Toplam yer değiştirme (cm)	Statik Güvenlik	Sismik Güvenlik
8	1.53	1.4

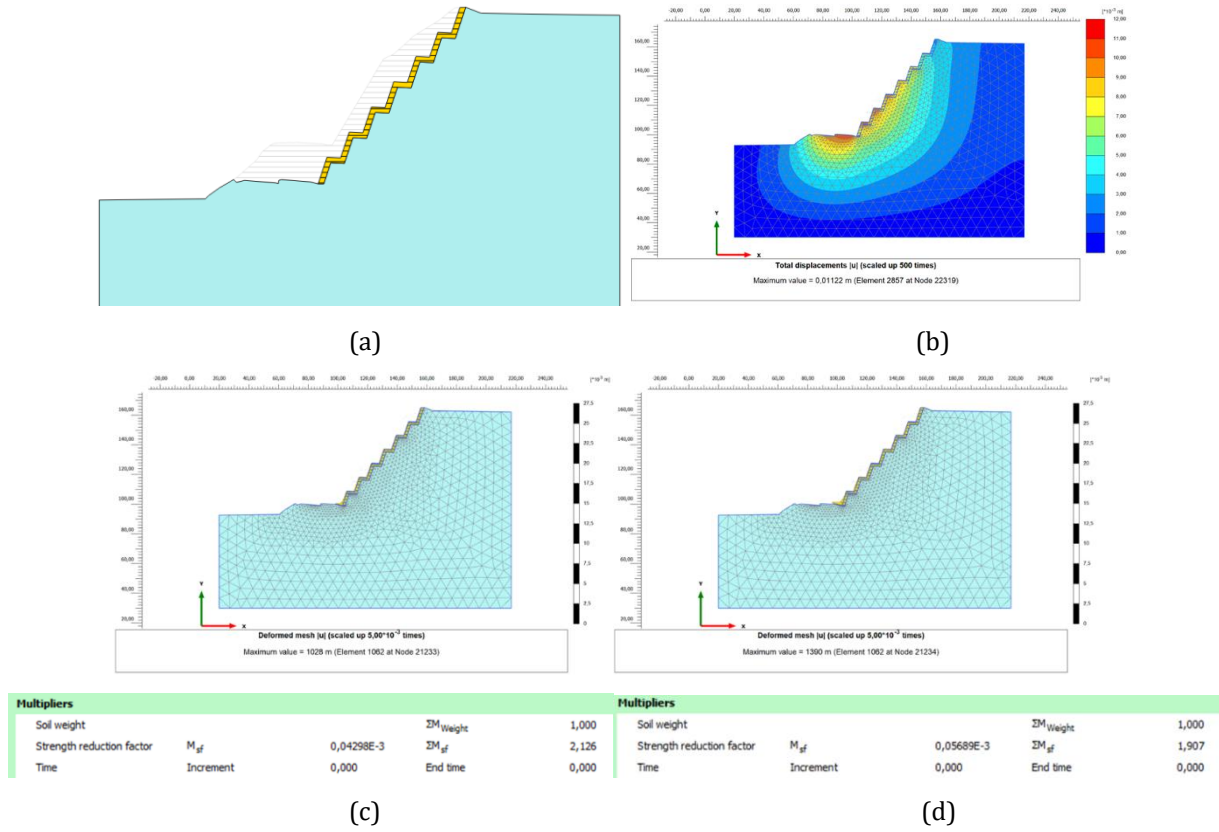


Şekil 10. Plaxis Programında 'Hoek ve Brown' Yenilme Modeli ile Gerçekleştirilen Duraylılık Analizleri (a) Analize Yönelik Plaxis2D Modeli (b) Toplam Yer Değişirme (Statik) (c) Statik Durum Güvenlik Sayısı (d) Sismik Durum Güvenlik Sayısı (The Stability Analysis Performed With 'Hoek ve Brown' Failure Model (a) Plaxis2D Model for the Analysis (b) Total Displacement (Static) (c) Static State Safety Number (d) Seismic State Safety Number)

Tablo 7. Plaxis v2018.01 Duraylılık Analiz Sonuçları (Hoek ve Brown Yenilme Modeliyle) (Plaxis v2018.01 Stability Analysis Results (With Hoek ve Brown Failure Model))

Toplam yer değiştirme (cm)	Statik Güvenlik	Sismik Güvenlik
1.6	1.125	1.085

Hardening Soil yenilme modeli kullanılarak Plaxis v2018.01 bilgisayar programında gerçekleştirilen analizlerde aynı analiz modeli ve hesaplanan Mohr-Coulumb değerleri kullanılmıştır. Çok sıkı aę (very fine mesh) tipi ile gerçekleştirilen Plaxis v2018.01 analizlerinin ıktıları ve sonuç zet tablosu Şekil 11 ve Tablo 8'daki gibidir.



Şekil 11. Plaxis Programında 'Hardening Soil' Yenilme Modeli ile Gerçekleştirilen Duraylılık Analizleri (a) Analize Yönelik Plaxis2D Modeli (b) Toplam Yer Değişirme (Statik) (c) Statik Durum Güvenlik Sayısı (d) Sismik Durum Güvenlik Sayısı (The Stability Analysis Performed With the 'Hardening Soil' in Plaxis Program (A) Plaxis2D Model for the Analysis (b) Total Displacement (Static) (c) Static State Safety Number (d) Seismic State Safety Number)

Tablo 8. Plaxis v2018.01 duraylılık analiz sonuçları (Hardening Soil yenilme modeliyle) (The Plaxis v2018.01 stability analysis results (with the Hardening Soil failure model))

Toplam yer değişikirme (cm)	Statik Güvenlik	Sismik Güvenlik
1.12	2.126	1.907

Yapılan analizlerin sonuçlarını birlikte gösteren özet analiz sonuç tablosu aşağıdaki gibidir (Tablo 9).

Tablo 9. Duraylılık Analiz Sonuçları Özet Tablosu (Summary Chart of Stability Analysis Result)

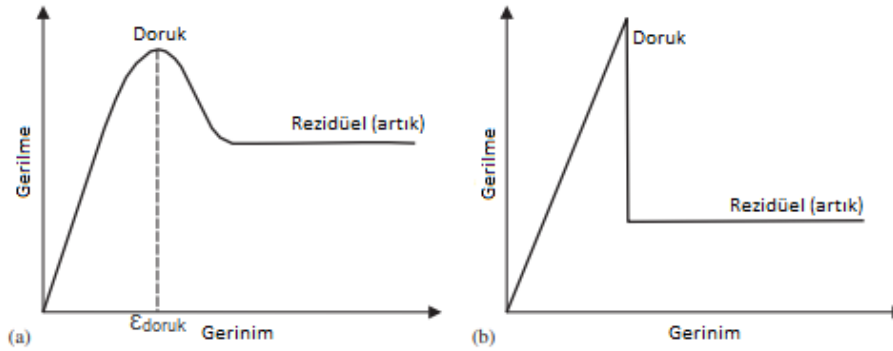
Yapılan Analizler	Toplam yer değişikirme (cm)	Statik Güvenlik	Sismik Güvenlik
RS2 Duraylılık Analiz Sonuçları (Hoek ve Brown)	8	1.53	1.4
Plaxis Duraylılık Analiz Sonuçları (Hoek ve Brown)	1.6	1.125	1.085
Plaxis duraylılık analiz sonuçları (Hardening Soil)	1.12	2.126	1.907

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Seçilmiş karayolu şevinin duraylılığı sayısal analizler ile değerlendirilmiş olup sonlu elemanlar yaklaşımı ile çalışan Plaxis v2018.01 ve RS2 v8.005 bilgisayar programları kullanılmıştır. 2 boyutlu (2D) analizlerde kullanılacak olan kaya parametrelerinin belirlenmesi kaya kütleleri için geliştirilmiş olan genelleştirilmiş Hoek ve Brown (Hoek, 2006) yenilme modeline uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Belli bir normal gerilme altında gerinim/deformasyon değeri malzemenin doruk dayanım değerine ulaştığında

doruk dayanım değerleri kademeli olarak düşerek rezidüel değere ulaşabileceği gibi yumuşatma mekanizması olmaksızın doğrudan rezidüel dayanım değerine düşerek gevrek yenilme de gösterebilir. Bu durum sayısal modeller için son derece önemlidir. Rezidüel dayanımlar uygun şekilde belirlenmezse asla optimum kaya destek tasarımı elde edilemez (Cai vd., 2007).



Şekil 12. (a) Kayalardaki Birim Deformasyon Yumuşaması, (b) Kayalardaki Tam Gevrek Yenilme (Cai vd., 2007) ((a) Unit Deformation Softening on Rocks, (b) Complete Brittle Failure on Rocks (Cai vd., 2007))

Bu bağlamda çalışma alanındaki kaya kütlelerinin 'elasto-birttle-plastic (elastik-gevrek-plastik)' davranış gösterebileceği ve daha önce kazıya maruz kaldığı düşünülerek kaya kütlelerinin genelleştirilmiş Hoek & Brown yenilme modeli için doruk ve rezidüel olmak üzere iki ayrı parametre takımı hesaplanmıştır.

Hoek ve Brown yenilme modeli kullanılarak gerçekleştirilen güvenlik analizlerinde RS2 v8.005 programında malzeme tipi plastik olarak seçilerek doruk ve rezidüel parametre takımları olduğu gibi kabul edilmiştir. Sadece doruk parametrelerle yapılan analiz sonuçları çok daha yüksek çıktığından değerlendirmeye alınmamıştır.

Plaxis v2018.01 programındaki analizlerde ise doruk parametreler kullanılmıştır. Rezidüel parametrelerle yapılan analiz sonuçları daha düşük çıktığı için değerlendirmeye alınmamıştır.

Bir kaya şev tasarımında kayma yüzeyinin kesme dayanımı sürtünme açısı (f) ve kohezyon (c) ile ilişkili olup kayanın bir Coulomb malzemesi olduğu kabul edilir (Coulomb, 1773; Keskin, 2008; Wyllie vd., 2004). Plaxis programında Mohr-Coulomb modelinden daha gelişmiş olan ve gerçek değerlere yakın sonuçlar hesaplaması nedeniyle önerilen Hardening Soil yenilme modeli (Çelik, 2017) sıkça kullanılmaktadır. Bu sebeple Plaxis v2018.01 programında yapılan genelleştirilmiş Hoek ve Brown analizlerine ek olarak Hardening Soil yenilme modeli ile de bir analiz gerçekleştirilmiş olup analizlerde rezidüel Mohr-Coulomb parametreleri kullanılmıştır. Doruk parametrelerle yapılan analiz sonuçları daha yüksek çıktığından değerlendirmeye alınmamıştır.

Bu bağlamda, yapılan tüm analizlerin kıyasına yönelik;

Şev tasarım yönteminde kesme kuvveti (yer değiştirme kuvvetinin) kayanın kesme dayanımından (direnen kuvvetten) büyük ise şev duraylı olmayacaktır (Keskin, 2008). Bir şevin duraylı olarak değerlendirilmesi için güvenlik katsayısının daima "1"den büyük olması gerekmekte olup geçici durum şev çalışmaları için en az "1,3", uzun dönem şev çalışmalarında ise en az "1,5" olmalıdır (AASHTO, 2002). Ayrıca "Walsh, 2003"ün belirttiği üzere; uzun dönem şev duraylılıklarında statik güvenlik sayısının $\geq 1,50$, sismik güvenlik sayısının ise $\geq 1,10$ olması beklenmektedir.

Hoek ve Brown ve Hardening Soil yenilme modeli ile gerçekleştirilen kaya şevi duraylılık analizlerinin programlara göre karşılaştırmalı sonuç tablosu aşağıdaki gibidir (Tablo 10). Analizlerde kullanılan parametreler Tablo 11'de tekrar özetlenmiştir.

Tablo 10. Duraylılık Analiz Sonuçları Kıyas Tablosu (Benchmarking Table of the Stability Analysis Results)

Analiz Programları	Analizler	Yenilme Modeli	
		Genelleştirilmiş Hoek & Brown (*, **)	
RS2 v8.005	Toplam yer değiştirme (cm)	8	
	Statik Güvenlik	1.53>1.50	
	Sismik Güvenlik	1.4>1.10	
Plaxis v2018.01		Genel. Hoek ve Brown (*)	Hardening Soil (**)
	Toplam yer değiştirme (cm)	1.6	1.12
	Statik Güvenlik	1.125<1.50	2.126>1.50
	Sismik Güvenlik	1.085<1.10	1.907>1.10

* Tablo 11'de yer alan doruk parametre seti kullanılmıştır.

** Tablo 11'de yer alan rezidüel parametre seti kullanılmıştır.

Tablo 11. Kireçtaşı Tasarım Parametreleri (Design Parameters of the Limestone)

	Örselenme Faktörü	Kohezyon	İçsel sürtünme açısı	Deformasyon modülü	Hoek ve Brown Ölçütleri		
					D	c	Ø
		[kPa]	[°]	[GPa]			
* Doruk Parametreler	0	341	43	1.03	1.3584	0.0011	0.5122
	0.7	218	33	0.38	0.4203	0.0001	0.5122
** Rezidüel Parametreler	0	233	37	0.37	0.7671	0.0002	0.5358
	0.7	129	25	0.20	0.1745	0.00001	0.5358

Tüm bu veriler ışığında, sonuç olarak;

- Genelleştirilmiş Hoek ve Brown yenilme modelinin kullanıldığı durumda; kaya şevi RS2 v8.005 programında uzun dönem duraylılık şartını sağlamaktayken Plaxis V2018.01 programında duraylılık şartını sağlamamıştır. Genelleştirilmiş Hoek ve Brown yenilme modeli Plaxis V2018.01 programındaki hesaplamalarda RS2 v8.005 programına göre daha düşük değer vermiştir (Tablo 10). Doruk ve rezidüel parametrelerin birlikte girilmesi, kaya malzemesinin ilk yenilme gerçekleştikten sonra malzeme dayanımının rezidüel duruma geçeceğini ifade eder (Rocscience Manuel). Bu bağlamda, genelleştirilmiş Hoek ve Brown yenilme modeli kullanılarak her iki programda da (RS2 v8.005, Plaxis2D V2018.01) gerçekleştirilen hesaplamaların farklı sonuç veriyor (Tablo 10) olmasının nedeni Plaxis programında yenilme sonrasında geçiş yapılacak rezidüel değerlerin tanımlanmayışı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, Plaxis programında sadece doruk parametrelerin kullanılmasına rağmen şev duraylılık şartlarını sağlamaması (daha yatık olan şev geometrisinin uygulanmadığı haliyle kaya kütlelerinin zaten duruyor olmasından dolayı) şüphe uyandırıcıdır.
- Hardening Soil yenilme modeli ile Plaxis programında (kayanın rezidüel parametreleri kullanılarak) yapılan analiz sonuçlarının RS2 programında genelleştirilmiş Hoek ve Brown yenilme modeliyle (kayanın plastik malzeme modelinde doruk ve rezidüel parametreleri kullanılarak) yapılan analiz sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir (Tablo 10). Bu bağlamda, farklı çalışma ortamlarındaki kayaç çeşitleri ve parametreleriyle yapılacak güvenlik analizleri bu uyumun tartışılmasına olanak verecek veri çokluğunu sağlayacaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. (No conflict of interest was declared by the authors.)

Kaynaklar (References)

- AASHTO, 2002. Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, 17th Edition, Washington, D.C., USA
- Alejano, L.R., Ferrero, A.M., Oyanguren, P.R., Fernandes, M.I.A., 2011. Comparison of Limit– Equilibrium, Numerical and Physical Models of Wall Slope Stability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 16–26.
- Arkun, A.K., Ergen, M., Çakır, Ferit., 2014. Bitki Kökleriyle Şev Stabilizasyonunun Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi. *SDÜ Orman Fakültesi Dergisi*, 15, 77-83.
- Cai, M., Kaiser, P. K., Tasaka, Y., Minami, M., 2007. Determination of Residual Strength Parameters of Jointed Rock Masses Using The GSI System, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 44, 247-265.
- Cernica, J.N., 1995. *Geotechnical Engineering: Soil Mechanics*, Jhon Wiley And Sons Inc., Canada.
- Ceryan, N, Kesimal, A and Ceryan, S 2018. Probabilistic Analysis Applied to Rock Slope Stability: A Case Study From Northeast Turkey, *Integrating Disaster Science and Management*, 221-261.
- Conrado-Palafox, A. L., Equihua, L., Arreygue-Rocha, E., 2019. Numerical Comparison of Two Model WITH RS2&Plaxis2D of a Road in a Karstic Terrain.
- Coulomb, C.A., 1773. Sur Une Application Des Rgles De Maximis Et Minimis A Quelques Problemes De Statique Relatifs A l'Architecture. *Acad. Roy. Des Sciences Mewoires De Math. Et De Physique Par Divers Savans*, Vol.7, 343-382.
- Çelik, S., 2017. Tünel Kazısından Dolayı Zemin Yüzeyindeki Oturmaların Mohr-Coulomb ve Pekleşen Zemin Modelleriyle Nümerik Tahminlerinin Kararlaştırılması. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 7(4), 95-102.
- Hoek, E., Bray, J.W., 1981. *Rock Slope Engineering*. 3rd Edition. London, Institute of Mining and Metallurgy. 358.
- Hoek, E., 1999. Putting Numbers to Geology – An Engineer's Viewpoint. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32, 1-19.
- Hoek, E., Marinos, P.G., 2000. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and Tunnelling International*;132(11):45-51.
- Hoek, E., 2006. *Rock Mass Properties*, in *Practical Rock Engineering Canada: The University of Toronto Press*, 1-47.
- Hoek, E., 2012. Blast Damage Factor D, *Technical Note For Rocnews*, 4-6.
- Hoek, E., Carter, T.G., Diederichs, M.S., 2013. Quantification of the Geological Strength Index Chart, 47th US Rock Mecanics / Geomechanics Symposium Held in San Francisco, CA, USA June 23-26.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 2007. *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. R. Ulusay and J.A. Hudson (eds.), Ankara.
- Karaman, K., 2013. Kaya Şev Duraylılığının Farklı Yöntemlerle Değerlendirilmesi (Ünye, Ordu). *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 37 (1), 27-47.
- Keskin, M.Ö., 2008. Çukurova Yöresi Kuvarsit İşletmelerinde Bilgisayar Destekli Şev Dizaynı ve Şev Stabilitate Analizleri. Çukurova Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Koca, Kadakçı, T., Koca, Y.M., 2014. Açık Ocak Albit İşletmesindeki Kaya Şevlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Duraylılık Değerlendirmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 38 (1), 1-18.
- Kunst, D.J., 2017. *Modelling Construction Phases of Bored Tunnels with Respect to Internal Lining Forces: A Comparison of Finite Element Programs*, Semantic Scholar. Delft University of Technology Master Thesis.
- Pantelidis, L. 2009. Rock Slope Stability Assessment Through Rock Mass Classification Systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 315–325.
- Sönmez, H., Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., 1998. A Practical Procedure For the Back Analyses of Slope Failures in Closely Jointed Rock Masses, *International Journal of Rock Mechanics&Mining*.
- Taşkıran, T., Yavuz, V.S., Keskin, M.S., 2015. Şev Stabilitésinin İki ve Üç Boyutlu Modeller İle İncelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, Cilt 6, Sayı 1, 1-8.
- Ulusay, R., Aydan, Ö., Karaca, A., 1995. Buckling Failure at an Open – Pit Coal Mine and Its Back Analysis. *Proceedings, 7th International Congress on Rock Mechanics*, Tokyo, Japan September, 25-29.
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., Tuncay, E., 2001. Causes, Mechanism and Environmental Impacts of Instabilities at Himmetoglu Coal Mine and Possible Remedial Measures. *Environmental Geology*, 40 (6), 769–786.
- Ulusay, R., Sönmez, H., 2007. *Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri*, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, 2. Baskı, Ankara, ISBN: 975-395-466-2, s.14-163,256.
- Vardar, M., Özmen, M. Ve Eriş, İ., 1990; "Uygulamalı Jeoloji", İTÜ Maden Fakültesi, Kaya Mekaniği ve Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı, İstanbul, 7/40.
- Walsh, M., 2003. *Engineering and Design Slope Stability*, Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000.
- Wyllie, D., Mah, C., 2004. In: Hoek, E., Bray, J. (Eds.), *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. 4th edn. based on the 3rd edn. Spon Press, London and New York, p. 86.