



Araştırma Makalesi / Research Article

# Kültürel ve Tarihi Miras Alanlarındaki Kaya Oyma Yapılarda Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları; Kayaşehir Yüzey Yerleşkesi (Nevşehir) Örneği

## Engineering Geological Studies of Rock Hewn Structures in Cultural and Historical Heritage Sites: A Case Study of Kayaşehir Surface Settlement (Nevşehir)

İsmail DİNÇER<sup>1\*</sup> , Mutluhan AKIN<sup>1</sup> , Ahmet ORHAN<sup>1</sup> ,  
Emre BECERİR<sup>2</sup> , Mehmet Yasin CANBOLAT<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Kapadokya Jeolojik Miras ve Kaya Oyma Yapıları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Nevşehir

<sup>2</sup> Nevşehir Belediyesi, Kentsel Dönüşüm Müdürlüğü, Nevşehir

Geliş (Received): 24.10.2024 / Düzeltme (Revised): 17.11.2024 / Kabul (Accepted): 26.11.2024

### ÖZ

Kültürel ve tarihi miras niteliğindeki kaya oyma yapıların buldukları kaya kütleleri ve inşasında kullanılan doğal malzemeler, çevresel faktörlerin etkisiyle zaman içinde ilksel özelliklerini kaybederek bozunmaktadır. Bunun sonucu olarak söz konusu yeraltı yapıları bazı kaya kütle duraysızlıklarına maruz kalmakta, ve tarihi ve kültürel özelliklerini kaybetmektedir. Bu durum genel olarak mühendislik jeolojisinin tarihi ve kültür varlıklarının korunması ve yönetimi çalışmalarındaki önemini göstermektedir. Bu çalışmada, Nevşehir kent merkezinde 2014 yılında kentsel dönüşüm çalışmaları sırasında ortaya çıkarılan ve çok sayıda kaya oyma mekândan oluşan Kayaşehir yeraltı şehrindeki “Kilise” ve “At Ahır” olarak kullanılmış kaya oyma yapılarda olası kaya kütle duraysızlıkları mühendislik jeolojisi açısından değerlendirilmiştir. Söz konusu kaya oyma yapılar sonlu elemanlar yöntemine göre sayısal olarak analiz edilmiştir. Buna göre, incelenen kilisenin tavan ve incelenmiş yan duvarlarında çekme gerilmeleri oluşurken, At Ahır’ının kırık hatlarının kesiştiği tavan bölümünde çekme gerilmeleri yoğunlaşmıştır. Kaya oyma yapılarda gerçekleştirilen sayısal analizlerde, belirlenen çekme gerilmeleri ve dayanım faktörü değişimleri olası duraysızlıkların değerlendirilmesinde anlamlı sonuçlar vermektedir. Kapadokya Bölgesi’ndeki kaya oyma yapılarda tavadan blok düşmesi, aşırı sökülme, eğilme, pullanma, doğal ayaklarda ayrışma ve makaslama yenilmesi, tavan kalınlığının azalması, açıklık girişlerindeki kaya düşmesi, mevcut destek sistemlerinde zayıflama ve düşük kaya kütle kalitesi en önemli duraysızlık türleridir. Bölgenin kültürel miras niteliği göz önünde bulundurularak söz konusu stabilite problemlerine karşı iyileştirme yöntemlerinin seçiminde doğal dokunun mümkün olduğunca korunmasına ve yapıların tarihi önemlerine mutlaka özen gösterilmelidir. Bunun için arkeolog, sanat tarihçi, mimar, restoratör ve yetkin mühendisler gibi disiplinlerin de içinde bulunduğu bir grup tarafından iyileştirme yöntemlerinin değerlendirilip karar verilmesi, tarihi ve kültürel yapıların korunması ve mevcut çevresel koşullara uyumlu hale getirilmesi noktasında oldukça önemlidir.

**Anahtar Kelimeler:** Kapadokya, tarihi kaya oyma yapılar, zayıf kaya, sayısal analiz

### ABSTRACT

The rock masses where rock-hewn structures forming cultural and historical heritage are located and the natural materials used in their construction lose their initial properties and deteriorate over time under the influence of

*environmental factors. As a result, the underground structures in question are exposed to some rock mass instabilities and lose their historical and cultural properties. This situation generally illustrates the importance of engineering geology for the protection and management of historical and cultural assets. In this study, possible rock mass instabilities in the rock-hewn structures used as “church” and “horse stable” in Kayaşehir underground city, which was unearthed during urban transformation works in Nevşehir city center in 2014 and consists of many rock-hewn spaces, were evaluated in terms of engineering geology. The rock-hewn structures in question were numerically analyzed with the finite element method. Accordingly, while tensile stresses occur in the ceiling and thinned side walls of the church, tensile stresses are concentrated in the ceiling section where the discontinuities of the Horse Stable intersect. In numerical analyses performed on the rock-hewn structures, the tensile stresses and strength factor changes provide meaningful results for the evaluation of possible instabilities. In the rock-hewn structures in the Cappadocia Region, the most important types of instabilities are blocks falling from the ceiling, breaking, bending, flaking, deterioration and shear failure of natural piers, decreases in ceiling rock thickness, rockfall at the entrances of openings, weakening of existing support systems and low rock mass quality. Considering the cultural heritage nature of the region, when selecting improvement methods for these stability problems, attention should be paid to preserving the natural texture as much as possible and to the historical importance of the structures. For this reason, it is very important for improvement methods to be evaluated and decided by a group including several disciplines, such as archaeologists, art historians, architects, restorers and competent engineers, in order to preserve historical and cultural structures and to assist in adaptation to the current environmental conditions.*

**Keywords:** Cappadocia, historical rock hewn structures, weak rocks, numerical analysis

## GİRİŞ

İnsanlığın Dünya'da bıraktığı en önemli izlerden biri olan kültürel miraslar ve bunların bulunduğu tarihi alanların korunması ve mevcut çevresel koşullara uyumlu hale getirilmesi, sahip olduğumuz kültürel ve tarihi mirasların gelecek nesillere aktarılması noktasında oldukça önemli bir husustur. Kültürel ve tarihi mirasın korunması ve yönetilmesi sanat, tarih, arkeoloji, mimarlık, mühendislik ve yönetim sistemleri gibi disiplinler arası bir sürecin işletilmesine ihtiyaç duymaktadır. Özellikle insanlar tarafından oluşturulmuş kutsal alanlar, arkeolojik alanlar, anıtsal heykeller ve diğer mimari yapılar gibi somut kültürel miraslar ve bunların kalıntıları mevcut çevresel koşullar ile uyumlu değildir. Söz konusu yapıların oluşturulmasında kullanılan doğal malzemeler ve içine oluşturuldukları kaya kütleleri çevresel faktörlerin etkisiyle zaman içinde ilksel özellikleri kaybederek bozunmaktadır. Bu durum genel olarak mühendislik jeolojisi ve yer bilimlerinin, kültür varlıklarının korunması ve

yönetimi konusunda önemli bir rolü olduğunu göstermektedir. Margottini (2015), jeolojinin genel olarak tarihi kentsel alanların ve kültürel mirasın kentsel planlamasına ve inşasına getirdiği sınırlamaları değerlendirmiştir. Buna göre kaya malzemesinin kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin zayıflamasında etkili olan jeolojik faktörlerin, çevresel ve doğal tehlikelerle birlikte anıt ve sit alanlarının kısa, orta ve uzun vadede korunmasını etkileyen faktörler olarak karşımıza çıktığını ifade etmiştir.

Kapadokya, mühendislik jeolojisi çalışmalarının yoğun bir şekilde gerçekleştirildiği en önemli tarihi ve kültürel miras alanlarından biri olup doğası, tarihi ve kültürel değerleri ile 1985 yılında UNESCO tarafından Dünyada korunması gerekli Kültür Mirası listesine dâhil edilmiştir. Kapadokya, volkanik aktivitenin yoğun olarak yaşandığı bir bölge olup yörede kalın bir piroklastik istif (tüf, ignimbirit vb.) yayılım göstermektedir. Söz konusu piroklastik kayalar, kolay kazılabilen zayıf kaya özelliği

göstermeleri ve termal yalıtım özelliklerinden dolayı hem tarihsel dönemde hem de günümüzde korunma, barınma, ibadet alanı, depolama ve turistik tesis amacıyla kullanılan kayadan oyma yapılar için temel kayası konumundadır. Söz konusu jeolojik çevrenin kayadan oyma yapılar için tarih boyunca kullanımı, bölgede birçok önemli tarihi ve kültürel mirasın oluşmasına neden olmuştur. Ancak, söz konusu tarihi ve kültürel miras öğeleri, inşa edildikleri kaya kütle kalitesinin düşük olması ve çevresel faktörlerin etkisiyle kolaylıkla ilksel dayanımlarını kaybetmekte ve bunun sonucu meydana gelen kaya kütle duraysızlıkları tarafından ciddi şekilde tehdit edilmektedir. Bundan dolayı bölge birçok mühendislik jeolojisi çalışmasına konu olmuştur. Erguvanlı ve Yüzer (1977) bu yapıların tarihsel ve güncel kullanımı üzerine ilk çalışmayı yapmışlardır. Bunun yanı sıra; bu yapıların tasarımını etkileyen mühendislik jeolojisi parametreleri birçok araştırmacı tarafından irdelenmiştir (Topal ve Doyuran, 1997; Topal ve Doyuran, 1998; Ulusay vd., 2006; Aydan vd., 2007; Sülükçü, S., 2019; Dinçer vd., 2020; Deniz ve Topal, 2021). Bölgede, kalın ve masif tabakalı istifler içerisinde açılan yeraltı açıklıklarında herhangi bir sorun ile karşılaşılmazken, ince ve orta tabakalı istifler içerisindeki yeraltı açıklıklarında duraysızlık problemleri ile karşılaşılmaktadır (Yılmaz, 2005). Aydan ve Ulusay (2003) bu yapıların inşa edildiği tüflerin yatay ve düşey yönde herhangi bir değişim göstermediğini belirtmiştir. Kapadokya Bölgesi'nde yer alan kaya oyma yapılarda stabilite sorunlarını kontrol eden temel parametreler ayrışma ve süreksizliklerdir (Ulusay vd., 2006). Yeraltı açıklıklarında blok duraysızlıkları, aşırı sökülme, erozyon, sütun kesmeleri ve kaya düşmeleri en önemli stabilite sorunları olarak tanımlanmıştır. Öte yandan Ulusay ve diğ. (2013) ve Kaşmer ve diğ. (2013)

bölgedeki stabilite sorunlarını önemli lokasyonlar için değerlendirmişlerdir. Ayrıca bölgede yaygın afet türü olan kaya düşmelerini konu alan bir çok çalışma da bulunmaktadır (Tunusluoğlu ve Zorlu, 2009; Dinçer vd., 2015 ve 2016, Akın vd., 2021).

Bu çalışmada, Nevşehir kent merkezinde 2014 yılında kentsel dönüşüm çalışmaları sırasında ortaya çıkarılan ve çok sayıda kaya oyma mekândan oluşan yeraltı şehri oluşturulan kaya oyma yapılar (Kilise ve At Ahır) mühendislik jeolojisi açısından değerlendirilmiştir. Söz konusu yeraltı şehri bölgede son on milyon yılda etkili olan volkanizmanın ürünü olan volkanosedimanter bir istif içerisinde yer almaktadır. Oldukça kırıklı-çatlaklı ve keskin litolojik değişimlerin hâkim olduğu kaya kütleleri ayrışmanın etkisiyle zayıflamış ve birçok kaya oyma mekânda kaya kütle duraysızlıklarının yaşanmasına neden olmuştur. Bundan dolayı yeraltı şehri tamamen ziyarete açılmamış olup, günümüzde yeraltı şehri kısmi olarak ziyaret edilebilmektedir. Nevşehir Belediyesi tarafından yürütülen çalışmalar kapsamında ziyaret rotasının genişletilerek daha nitelikli kültür miraslarının ziyarete açılması planlanmaktadır. Bu kapsamda ziyarete açılması planlanan ve görece nitelikli kültür miraslarının bulunduğu kaya oyma yapılarıdaki olası kaya kütle duraysızlıkları bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır.

## MALZEME VE YÖNTEM

### Kayaşehir

Bu çalışmanın konusunu oluşturan Kayaşehir yeraltı şehri (Şekil 1), Nevşehir Kale Yerleşkesi içerisinde yer almakta olup, söz konusu bölgede Taşınmaz Kültür ve Tabiat Varlıkları Yüksek Kurulu'nun 17.04.1987 tarih 3578 sayılı kararıyla Nevşehir Kalesi ve etrafındaki alan

üzerinde çok sayıda anıtsal yapı ve sivil mimari örneği tescil edilmiştir. Bu dönemdeki tesciller sadece yerüstü kültür varlıklarını kapsamaktadır ve tescilli yapılar mevcut kent dokusu içinde dağınık biçimde konumlanmıştır (Becerir, 2020). Nevşehir Belediyesi'nce 05.09.2005 tarih 10 sayılı karar ile söz konusu alan 'Kentsel Dönüşüm ve Gelişim Alanı' ilan edilmiştir. 2009 yılında bölgede yer alan konutlarda kentsel dönüşüm çalışmaları kapsamında boşaltılma ve yıkım süreci başlamıştır. Bu aşamada yıkılan konutların bodrum ve yamaç bölümünde bir takım kaya oyma yapılarının varlığı tespit edilmiştir. Bu

gelişmeye istinaden yapılan çalışmalarda sahada çok sayıda boşluk, tünel vb. yapıların varlığı tespit edilmiş ve bunun üzerine Nevşehir Kültür Varlıkları Koruma Bölge Kurulu'nun 09.05.2014 tarihli 1079 sayılı kararıyla alanda hiçbir imar uygulaması yapılmaması kararı alınmış ve Nevşehir Kalesi etrafı üçüncü derece arkeolojik sit alanı ilan edilmiştir. 2019 yılında Nevşehir Müze Müdürlüğü'nün kontrolü altında Nevşehir Belediyesi'nce yapılan temizlik çalışmalarında açığa çıkarılan kaya oyma mekânlar ve diğer gelişmeler ışığında üçüncü derece sit alan sınırı tescil sınırları güncellenmiştir.



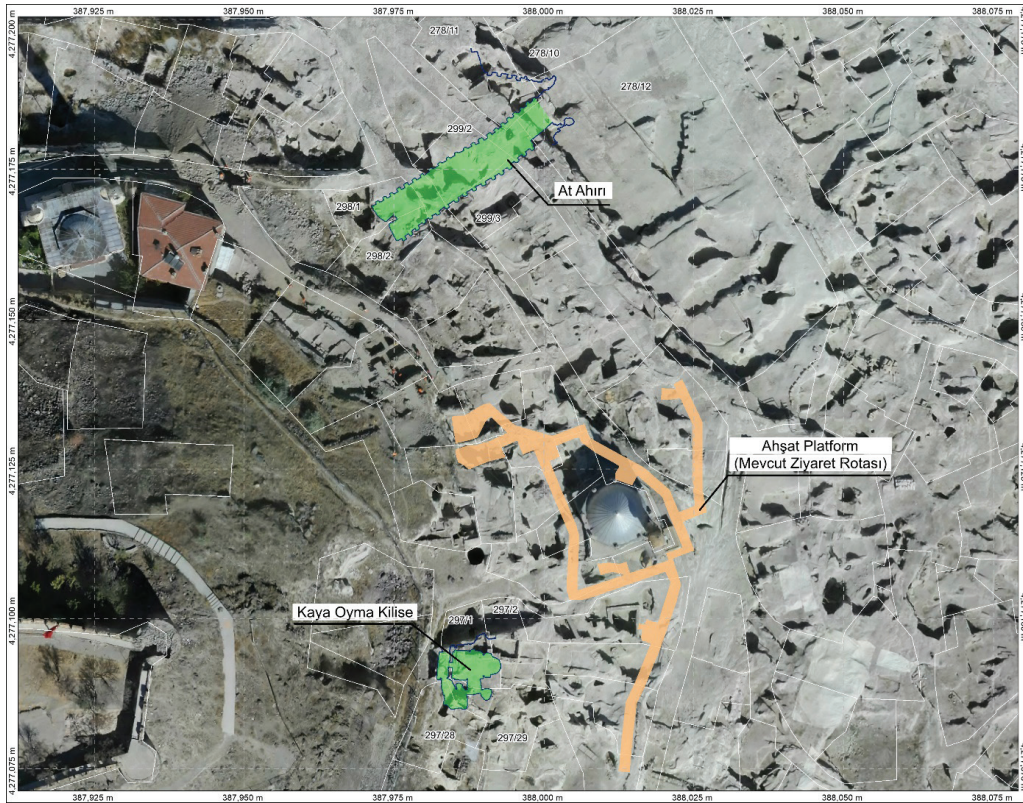
Şekil 1. Kayaşehir'in kentsel dönüşüm öncesi görünümü (a), yeraltı şehrinin genel görünümü (b), yeraltı şehrinin detay görünümü (c).

Figure 1. General view of Kayaşehir before urban renewal (a), general view of the underground city (b), close up view of the underground city (c).

2020 yılında Nevşehir Kalesi ve çevresini kapsayan alan 5366 sayılı yıpranan tarihi ve kültürel taşınmaz varlıklarının yenilenerek korunması ve yaşatılarak kullanılması yasası uyarınca ‘yenileme alanı’ ilan edilmiştir. Bu karardan sonra bölgede yerüstü güncel sivil mimari örneklerinin çoğu kaldırılmış olup yeraltı şehri oluşturmuş su yapıları, kaya oyma mezarlar, tüneller, barınma yapıları gibi askeri, dini ve sosyal yaşam alanlarına ait farklı nitelikte kaya oyma mekânlar büyük ölçüde açığa çıkarılmıştır. Bugüne kadar 120 bin metrekarelik alanda gerçekleştirilen temizlik çalışmalarında, 6. yüzyıla tarihlenen Manastır ve 12. yüzyılda yapılan Bizans Kilisesi gün yüzüne çıkartılmış olup söz konusu bölge 2020 yılında “Kayaşehir” adıyla kısmi olarak ziyarete açılmıştır.

## Yöntem

Bu çalışmada mevcut Kayaşehir ziyaret rotasının genişletilmesine yönelik devam eden güçlendirme ve ıslah çalışmaları kapsamında bazı kaya oyma yapılarındaki stabilite problemleri değerlendirilmiştir. Bu amaç için Bizans Kilisesi ve At Ahır olarak adlandırılan iki farklı kaya oyma yapı seçilmiş ve mühendislik jeolojisi açısından incelenmiştir (Şekil 2). Bu kapsamda öncelikle her iki kaya oyma yapısının mimari özelliklerini ortaya koymak üzere röleve çalışmaları gerçekleştirilmiş ve elde edilen plan ve kesitler mühendislik jeolojisi çalışmalarında temel altlık olarak kullanılmıştır.



Şekil 2. İncelenen kaya oyma yapıların konumları.

Figure 2. Locations of the investigated rock hewn structures.

Sahada öncelikle kaya kütle ve malzeme özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Fiziksel özellikleri için küçük boyutlu örnekler alınırken, dayanım özellikleri için tahribatsız deney yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmada İğne Penetrometresi deneyi yardımıyla zayıf ignimbirit ve volkanosedimanter birimlerin tek eksenli basınç dayanımı dolaylı yoldan belirlenmiştir. İğne Penetrometresi deneyinin esası, elle yapılan yüklemeye penetrometrenin ucunda bulunan iğnenin kayanın içine batmasına dayanmaktadır (Ergüler, 2007). Deneylerde kullanılan iğne penetrometresi aleti, Maruto Testing Machine Co. (Maruto, 2006) tarafından üretilen SH-70 modelidir ve ağırlığı yaklaşık 700 g'dır.

İnceleme sahasındaki piroklastik kayaların ve volkanosedimanter birimler ilk olarak 1990'lı yıllarda Hoek-Brown tarafından geliştirilen Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) yardımıyla da değerlendirilmiş olup GSI sisteminde kaya kütleleri, süreksizlik özellikleri ve kaya kütlelerinin özelliğini yansıtan yapısal özellik puanı yardımıyla sınıflanabilmektedir. Değerlendirmelerde Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen kantitatif GSI abağı kullanılmıştır.

Bilindiği üzere kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri kaya malzemesi dayanımı ve süreksizliklerin ortak bir fonksiyonu olup kaya kütlelerini kesen süreksizliklere ait özellikler de arazi çalışmaları ile belirlenmiştir. İgnimbiritlerin ve volkanosedimanter seviyelerinin kütleli dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesinde Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünden (Hoek vd., 2002) yararlanılmıştır. İgnimbirit ve volkanosedimanter kaya kütleleri için yenilme zarfları Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre RocData yazılımı ile elde edilmiştir.

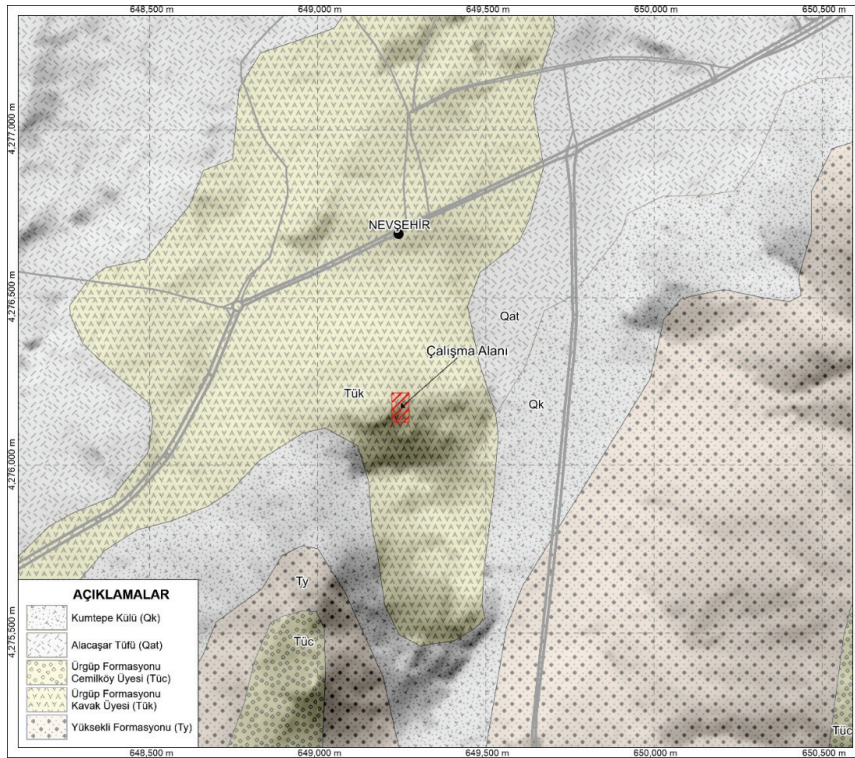
Kaya oyma yapılarındaki stabilite problemleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak

değerlendirilmiştir. Bu çalışmada sayısal analizler için sonlu elemanlar yöntemini temel alan iki boyutlu (2D) yazılım RS2 (Rocscience, 2020) kullanılmıştır. Analizlerde incelenen yapıyı karakterize edecek şekilde, rölelerinden farklı yönlerde kesit hatları belirlenmiştir.

### **Kayaşehir ve Civarının Jeolojisi**

Kayaşehir ve yakın civarının jeolojisini Tersiyer yaşlı karasal ve volkanik birimler oluşturmaktadır. Söz konusu birimler Atabey (1989) tarafından Yüksekli formasyonu, Ürgüp formasyonu Kavak üyesi ve Cemilköy üyesi ve Alaçaşar tüfü ve Kumtepe külü olarak adlandırılmıştır (Şekil 3). Kayaşehir'in güney ve güney doğusunda gözlenen Yüksekli formasyonu (Ty) akarsu ve göl ortamı ürünüdür. Birim genel olarak beyazımsı – gri, orta – ince taneli, teknesel çapraz tabakalı kumtaşı, çakıllı kumlu, tüfit, miltası, kiltası ile kaba kumtaşı ve çakıl taşlarıyla temsil edilmektedir (Atabey, 1989).

Kayaşehir'in içerisinde yer aldığı Ürgüp formasyonu Kavak üyesi (Tük) ignimbirit karakterli olup, açık kahve, beyazımsı renkli homojen ignimbirit ve pomza içermektedir. Kavak üyesinde beyaz – kirli beyaz renkli, andezitik bileşenli, camsı tüfitli, köşeli parçacıklı pomza külü düzeyleri de izlenmiştir. Kavak üyesi, Ürgüp yöresinde ilk ignimbirit oluşumlarını temsil etmektedir (Atabey, 1989). Birim kumtaşı, marn, kiltası ve çakıl taşı gibi sedimanter seviyeler ile ardalanma göstermekle birlikte yer yer oldukça kırıklı çatlaklı bir yapı sunmaktadır. Buna karşın Kayaşehir'in güneyinde oldukça sınırlı bir alanda gözlenen Ürgüp formasyonu Cemilköy üyesi (Tüc) ise pomzalı, inci grisirenginde pumisli ve litik karakterli volkano – sedimanter bir ardalanmadan oluşmaktadır. Yer yer ofiyolitik kayaç ve bazaltik lav çakılları içerir (Atabey, 1989).



Şekil 3. Kayaşehir ve yakın civarının jeoloji haritası (Atabey, 1989'dan değiştirilerek alınmıştır).

Figure 3. Geological map of Kayaşehir and vicinity (modified from Atabey, 1989).

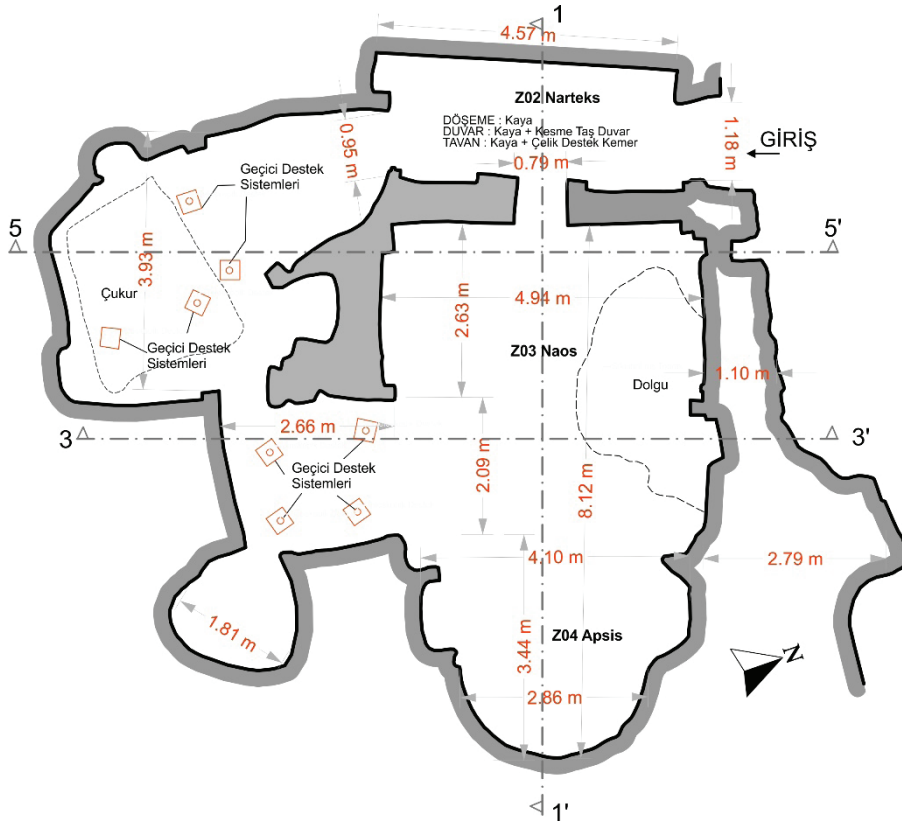
Kayaşehir civarında geniş mostralar sunan ve zayıf kaynaşmış karakterde olan Alacaşar tüfü (Qat) ve Kumtepe külü (Qk) geniş alanlarda gözlenmekte olup Alacaşar tüfü lav parçaları ve obsidiyence zengin iken, Kumtepe külü ise pomzaca zengin camsı küllerden oluşmaktadır. Kumtepe külünün yaşı Holosen – Güncel olarak kabul edilmiştir (Atabey, 1989).

### ARAŞTIRMA BULGULARI

Önceki bölümlerde belirtildiği üzere Kayaşehir çok sayıda kaya oyma yapıdan oluşmaktadır. Bu çalışmada “Kilise” ve “AtAhır” olarak adlandırılan iki farklı kaya oyma yapıda kaya kütle duraysızlıklarının değerlendirilmesine yönelik gerçekleştirilen mühendislik jeolojisi çalışmalarına yer verilmiştir.

### Kaya Oyma Kilise

Tek nefli ve 4.60 metre genişliğinde duvar resimlerinin bulunduğu Kaya Oyma Kilise'nin ilk çalışmalarına göre 13.yy Geç Ortaçağ dönemine ait olduğu düşünülmektedir. Şekil 4'te detaylı planın verildiği açıklık, yaklaşık doğu-batı uzanımında olup toplam 10.58 metre uzunluğundadır. Kaya oyma kilisenin neden olduğu yeraltı açıklığın genişliği 4.94 ile 2.86 metre arasında değişmekte olup açıklık yüksekliği 4.24 ile 3.62 metre arasındadır. Üzerindeki örtü kalınlığı 1.00 ile 1.50 metre arasında değişmekte olup, üst bölümde herhangi bir kaya oyma yapı veya ilave gerilme oluşturacak bir yapı bulunmamaktadır.



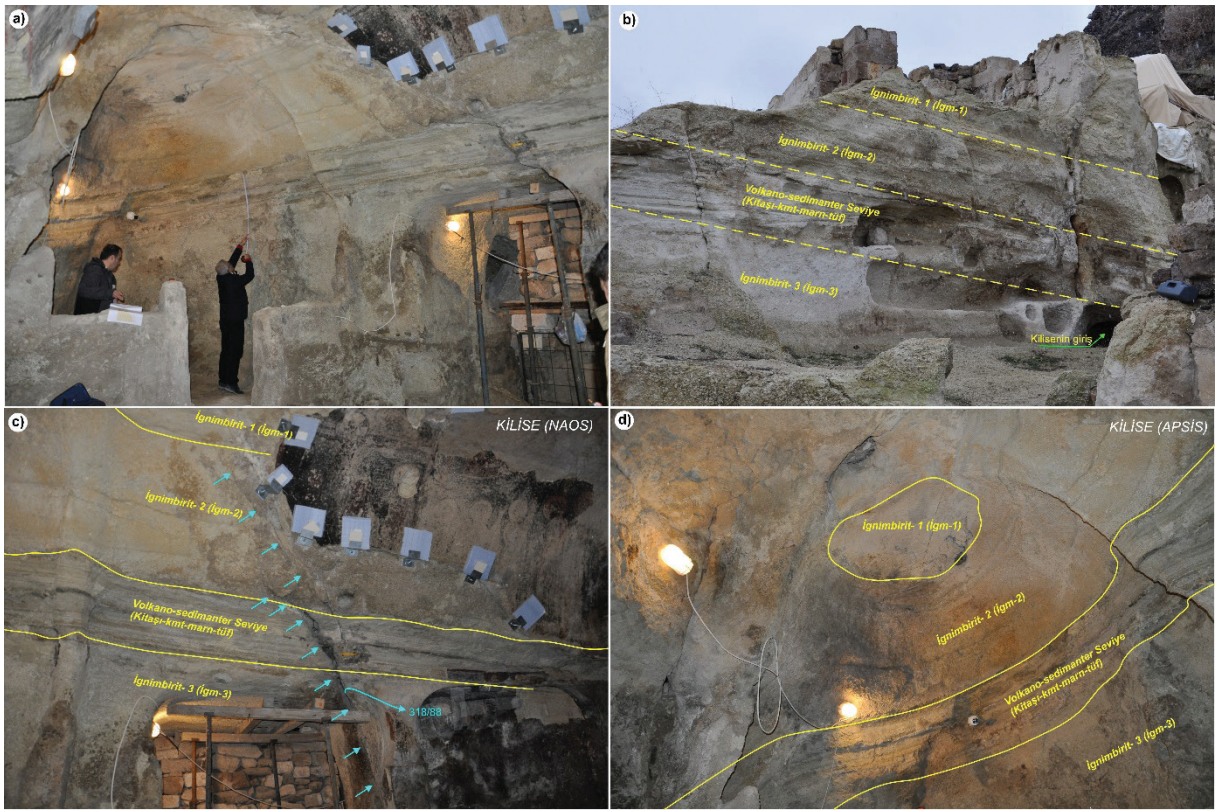
Şekil 4. Kaya oyma kilisenin plan görünümü.

Figure 4. Plan view of the rock hewn church.

Kilisenin içerisinde yer aldığı kaya kütlesi, bölgede 9-10 milyon yıl önceki volkanik faaliyetler sonucunda oluşmuş ve volkanosedimanter seviyeler ile kesilmiş farklı ignimbirit seviyelerinden oluşmaktadır. Söz konusu farklı seviyeler kaya oyma kilisenin içerisinde yer aldığı kaya kütlesinde de net olarak gözlenmektedir (Şekil 5a ve b). Kaya oyma kilisenin tabanı çalışma kapsamında İgnimbirit-3 olarak adlandırılan birim ile başlamaktadır. İgnimbirit-3 krem yer yer kirli beyaz orta-zayıf kaynaşmış karakterdedir. Bu seviyenin hemen üzerine yaklaşık 343/12 tabaka yönelimine sahip ve yaklaşık 0.7 metre kalınlığında sedimanter seviye gelmektedir. Söz konusu seviye kumtaşı-

marn-kiltaşı-tüf ardalanmasından oluşmaktadır. Daha sonra bu seviyenin üzerinde İgnimbirit-2 olarak adlandırılan ve yaklaşık 1.10 metre kalınlığında iri pomzalı ve az kaynaşmış seviye yer almaktadır. En üstte ve kaya oyma kilisenin tavanını oluşturan ignimbirit yine orta-zayıf kaynaşmış karakterdedir (Şekil 5c ve d). Açıklık içerisinde düzenli-düzensiz süreksizlikler bulunmakta olup önemli süreksizlik yönelimleri 318/88, 357/82, 344/74 ve 343/12 olarak belirlenmiştir. 318/88 yönelime sahip süreksizlik oldukça geniş açıklığa ve yüksek devamlılığa sahip olup kiliseyi kuzeydoğu-güneybatı yönünde boydan boya kesmektedir (Şekil 5c).





Şekil 5. Kilisenin genel görünümü (a), kaya kütle özelliklerinin kilisenin dışından görünümü (b), kilisenin içinden (Naos ve Apsis) kaya kütle birimlerinin değişimi (c ve d).

Figure 5. General view of the rock hewn church (a), rock mass properties of the church from outside (b), rock mass properties of the church (nave and apse) from inside (c-d).

### Kilisenin kaya malzemesi ve kaya kütle özellikleri

İnceleme alanındaki İgnimbiritler ve volkanosedimanter seviyelerin malzeme ve kaya kütle özellikleri açısından tahribatsız test yöntemleri ve görgül sınıflamalar ışığında değerlendirilmiştir.

Arazide yapılan iğne penetrometresi deneyleri sonucuna göre inceleme alanındaki İgnimbiritlerde iğne penetrometresi batma oranları (NPR) 3.5 ile 25.0 N/mm arasında değişmekte olup, Ulusay ve Ergüler (2012) tarafından önerilen formül (1)'e göre kaya

birimlerin sağlam kaya tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiştir.

$$UCS = 0.51 \times NPR^{0.8575} \quad (1)$$

İgnimbiritlerin tek eksenli basınç dayanımı 2.00 MPa ile 5.10 MPa arasında değişmekte olup, ortalama tek eksenli basınç dayanımı İgnimbirit-1 ve volkanosedimanter seviyeler için 5.00 MPa, İgnimbirit-2 için 3 MPa ve İgnimbirit-3 için 4.00 MPa olarak belirlenmiştir. Birimlerin kaya kütle özellikleri Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) yardımıyla da

değerlendirilmiştir. Değerlendirmelerde Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen kantitatif GSI abağı kullanılmıştır. Kaya oyma kilisenin içerisinde yer aldığı kaya kütlelerini oluşturan ignimbirit seviyelerindeki süreksizlik yüzeyleri genellikle az pürüzlü ve az-orta derecede bozunmuş özelliktedir. Süreksizliklerde dolgu gözlenmemiştir. Bu özellikler ışığında ignimbiritler ve volkano-sedimanterler için süreksizlik yüzey koşulu (SCR) puanı 12 olarak saptanmıştır. Öte yandan, Ignimbirit-1 için hacimsel eklem sayıları ( $J_v$ ) 1.5 ve Ignimbirit-2, Ignimbirit-3 ve volkano-sedimanter için 2'dir. Bu durumda, GSI sistemindeki yapısal özellik puanı (SR), Ignimbirit-1 için 75, diğer kaya birimleri için 64 olarak belirlenmiştir. Buna göre Ignimbirit-1 için GSI puanı 65 ve diğer kaya birimleri için 60'dir. GSI değerine göre çalışma alanında yer alan kaya birimleri "bloklı" kaya kütlelerini yansıtmaktadır.

İgnimbiritlerin ve volkanosedimanter seviyelerinin kütleli dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesinde Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünden (Hoek vd., 2002) yararlanılmıştır. Çalışma alanında volkano-sedimanter birimler için kaya malzeme sabiti ( $m_i$ ) 10 kabul edilirken, örselenme faktörü (D) sıfır olarak kabul edilmiştir. İgnimbirit ve volkanosedimanter kaya kütleleri için Hoek-

Brown yenilme ölçütüne göre RocData yazılımı ile kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, kütleli dayanımı, elastisite modülü ve Hoek-Brown sabitleri olan "mb, s ve a" belirlenmiştir (Çizelge 1). Rocdata programı kullanılarak kaya kütlelerinin deformasyon modülü Hoek ve Diederichs (2006)'da verilen eşitlik ile belirlenmiştir.

Kaya oyma kilisenin içerisinde yer aldığı kaya kütlelerini kesen ve yaklaşık olarak 318/88 yönelime ve yüksek devamlılığa sahip süreksizlik düzleminin kayma direnci için Barton-Bandis yenilme ölçütü kullanılmıştır.

Barton ve Choubey (1977) residual sürtünme açısının şu şekilde tahmin edilebileceğini belirtmiştir.

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 \frac{r}{R} \quad (2)$$

Burada,  $r$  ayrışma yüzeyin veya ıslak yüzeyin Schmidt değeri,  $R$  is ayrışmamış yüzeyin Schmidt değeridir. Temel sürtünme açısı ( $\phi_b$ ) süreksizliklerin makaslama dayanımının tahmininde anahtar rol oynamaktadır. Temel sürtünme açısı taze yüzeyleri karakterize etmekte olup laboratuvarında tilt deneyi ve süreksizlik makaslama kutusu deneyi yapılarak taze düz yüzeyler için hesaplanabilir.

**Çizelge 1.** Kaya birimlerinin kütleli dayanım ve deformasyon özellikleri.

*Table 1. Rock mass strength and deformation properties of the rock units.*

Birim Adı	$m_b$	s	a	Kaya Kütleli Çekme Dayanımı (MN/m <sup>2</sup> )	Kaya Kütleli Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MN/m <sup>2</sup> )	Kütleli Dayanım (MN/m <sup>2</sup> )	Elastisite Modülü (MN/m <sup>2</sup> )
İgnimbirit-1	2.865	0.020	0.502	-0.036	0.710	1.237	1500
İgnimbirit-2	1.917	0.012	0.503	-0.018	0.321	0.595	900
İgnimbirit-3	2.157	0.012	0.503	-0.022	0.428	0.834	1200
Sedimanter S.	2.397	0.012	0.503	-0.025	0.535	1.092	1500

İnceleme alanındaki kaya birimlerinin temel içsel sürtünme açısı ( $\phi_b$ ) iki tane disk şeklinde örnek kullanılarak aynı örnek üzerinde yapılan beş farklı tilt deneyinden elde edilen eğim açılarının ( $\beta$ ) ortalaması alınarak Stimpson (1981)'e göre belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda inceleme alanındaki ignimbiritler ve volkanosedimater için temel sürtünme açısının ( $\phi_b$ ) ortalama 34 olduğu belirlenmiş ve buna göre artık sürtünme açısı ise ( $\phi_r$ ) 32° olarak hesaplanmıştır. Pürüzlülük katsayısı (JCR) 10 ve süreksizlik yüzey dayanımı 2.0 MPa olarak belirlenmiştir. Buna göre düşük gerilme koşulları (70 kPa) için süreksizlik düzleminin sürtünme açısı ( $\phi$ ) 48° ve kohezyon 2.0 kPa olarak saptanmıştır.

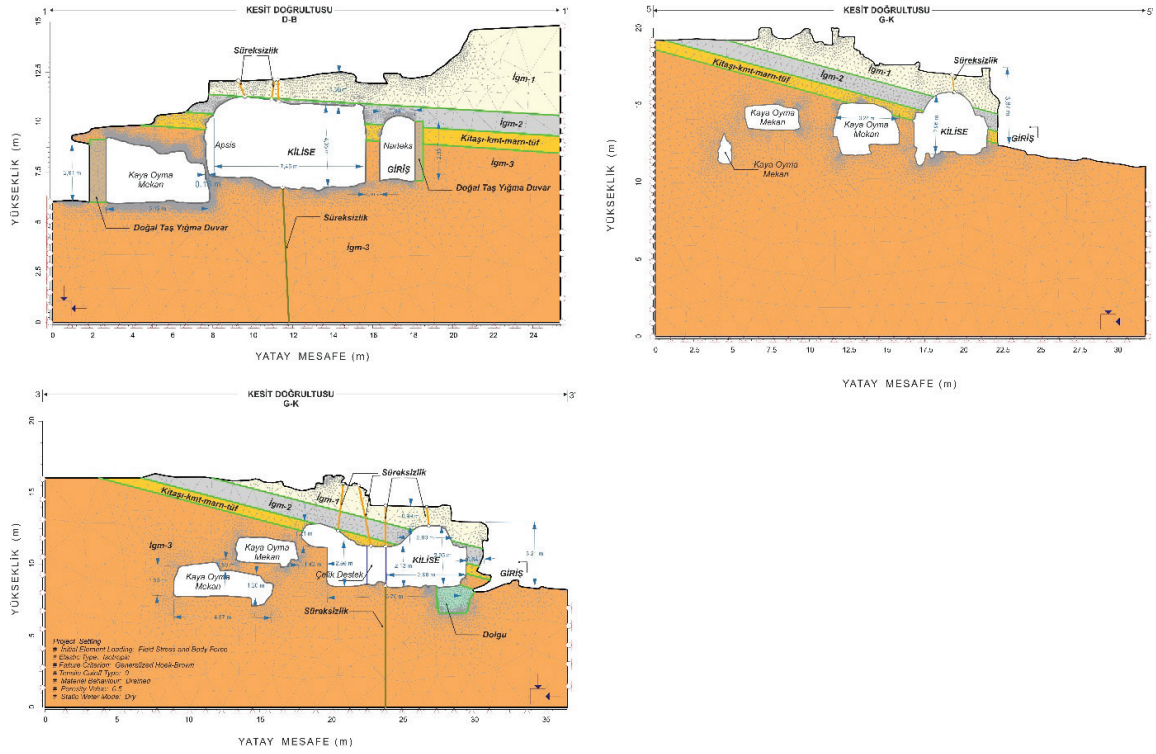
### Kilisenin sayısal modellenmesi

Sayısal analizler için sonlu elemanlar yöntemini temel alan iki boyutlu (2D) yazılım RS2 (Rocscience, 2020) kullanılmıştır. Bu amaç için yapıyı karakterize edecek şekilde farklı yönlerde üç adet kesit hattı belirlenmiştir (Şekil 4). Söz konusu kesit hatları 1-1', 3-3' ve 5-5' olarak adlandırılmış olup 1-1' doğu-batı yönündeyken diğer kesit hatları kuzey-güney yönündedir. 3-3' kesit hattı Naos ile Apsis arasında gözlenen ve yüksek devamlılığa sahip süreksizlik hattına paralel bir konumda yer almaktadır.

Kaya oyma kilise, bölgede yaygın olarak gözlenen volkanosedimenter bir istif içerisinde açılmış olup jeolojik yapının değişimi Şekil 6'da verilen kesitlerde gösterilmiştir. Çizelge 1'de verilen mühendislik parametreleri analizlerde girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Analizlerde Hoek-Brown yenilme ölçütü dikkate alınmış olup ağırlıklı olarak ignimbiritlerden oluşan kaya kütlelerinin davranışı elasto-plastik malzeme olarak değerlendirilmiştir. Arazi gerilmeleri ve yerçekiminden kaynaklanan doğal kütle gerilmeleri göz önünde bulundurulmuştur.

“Kaya Oyma Kilise” olarak adlandırılan kaya oyma yapı boyunca 3 farklı kesit analizlerde kullanılmıştır (Şekil 6).

Analizlerde kuru ve statik koşullar göz önünde bulundurulmuş olup sonuçlar maksimum düşey gerilme, toplam deformasyon, dayanım faktörü (strength factor) ve çekme gerilmesi olarak verilmiştir (Şekil 7, 8 ve 9). Sayısal analizlerde sınır koşullarına dikkat edilmiş olup sayısal analiz sonuçlarına ait kesitler görsel olarak düzenlenmiştir. Buna göre, Kesit-1 boyunca elde edilen maksimum gerilmelere kilisenin yan duvarlarında ulaşılmakta olup kilisenin doğusundaki bölümde kaya duvar kalınlığı oldukça azaldığı için gerilmenin 2.00 MPa'a kadar ulaştığı görülmektedir. Genel olarak bakıldığında açıklık etrafında gerilme değerleri 1.00 MPa'ın altındadır. Kilisenin tavan bölümünde (kazı sınırı üzerinde) 0.01 MPa seviyesinde kalan çekme gerilmeleri kazı sınırına yakın bölümde 0.10 MPa'a kadar ulaşabilmektedir (Şekil 7d). Açıklık tavan bölümünde 7.00 mm'ye yaklaşan toplam deformasyonlar hesaplanmıştır. Dayanım faktörü (strength factor) belirli bir seviyedeki malzeme dayanımının, o seviyede etkili olan gerilmeye oranı şeklinde ifade edilmektedir. Dayanım faktörünün 1'den büyük olması, malzeme dayanımının etkili olan gerilme şartlarından büyük olduğunun ve dolayısıyla bir yenilmenin olmayacağını işaretleri olarak algılanabilir. Buna göre dayanım faktörünün bazı lokasyonlarda kritik sınırın altında olduğu görülmekte olup özellikle Apsis ile doğusunda yer alan kaya oyma bölüm arasındaki et kalınlığının düşük olması en önemli riski oluşturmaktadır. Bu bölümün mutlaka yapı estetiğine uygun şekilde desteklenerek güçlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca Narteks ile Naos arasındaki geçişin tavan bölümünün de desteklenmesi gerektiği görülmektedir.



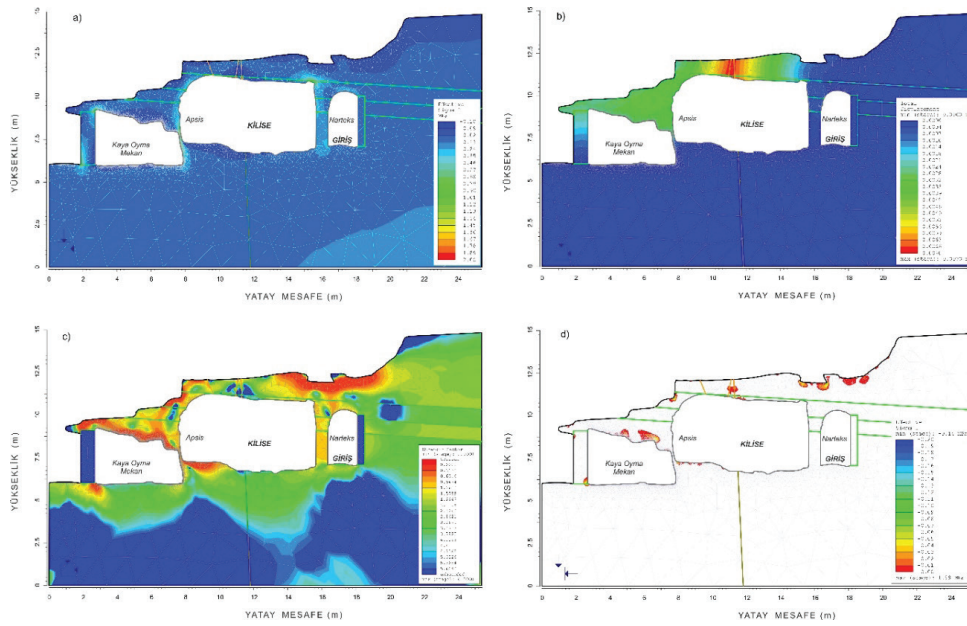
Şekil 6. Kaya oyma kilisenin seçilen kesit hatları için belirlenen mühendislik jeolojisi modelleri.

Figure 6. Engineering geological models for selected sections of the rock hewn church.

Kesit 3-3' kaya oyma kiliseyi kuzey-güney eksenini boyunca Naos ile Apsis arasında kesmekte olup 318/88 yönelimine sahip süreksizliğe paralel bir şekilde konumlanmıştır. Söz konusu kesit kilise ana mekânının güneyinde yer alan kaya oyma yapıları ile ilişkisini de göstermektedir (Şekil 8). Bu kesit hattı için maksimum düşey gerilme 0.75 MPa olarak belirlenmiş olmasına rağmen kesit etrafında hâkim düşey gerilmeler 0.20 ile 0.25 MPa arasında değişmektedir (Şekil 8a). Kilise ana mekânı ile güneyinde yer alan açıklık arasındaki geçişin tavan bölümünde ağırlıklı olarak çekme gerilmeleri oluşmaktadır (Şekil 8d). Çekme gerilmeleri maksimum 1 kPa civarında olup bu bölümler geçici olarak desteklenmiştir. Maksimum 7.2 mm'lik bir toplam deformasyonun hesaplandığı kesit için, deformasyon vektörlerinin dağılımı Şekil 8b'de

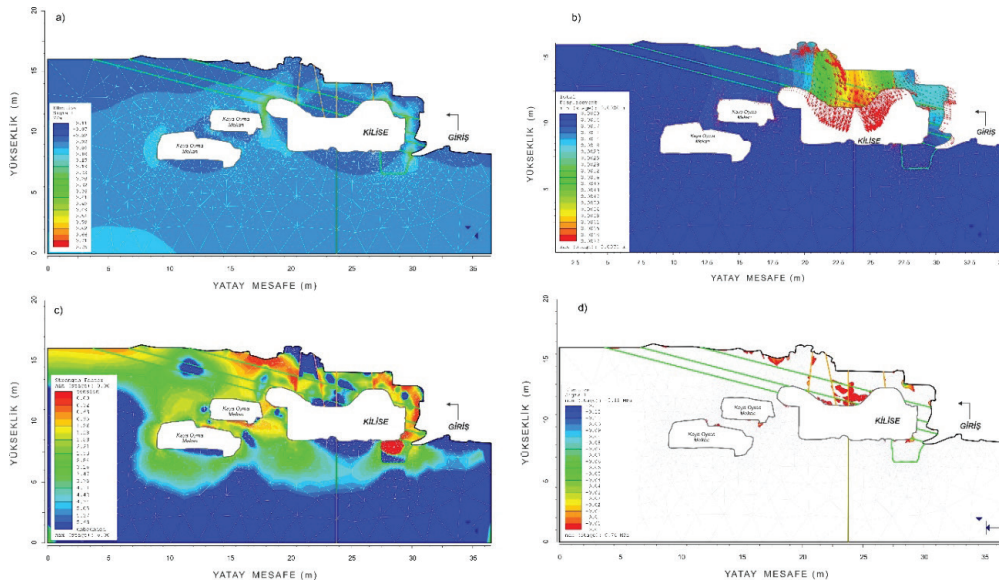
gösterilmiştir. Buna göre kilisenin ana mekânı ile güneyinde yer alan kaya oyma yapıları arasındaki geçiş boyunca deformasyonlar güney ve kuzey yönünde gelişmektedir. Bunun yanında kilisenin ana mekânının kuzey duvarında dayanım faktörü oldukça düşük değerler sunmaktadır (Şekil 8c).

Kaya Oyma Kilisede Naos'un batı bölümü Kesit-5 ile temsil etmekte olup kesitte kilisenin maksimum açıklığı 4.73 m ve yüksekliği 3.80 m'dir. Güneyinde yer alan kaya oyma mekânı ile arasındaki kaya kalınlığı yaklaşık 1.0 metre olup kilise üzerindeki örtü kaya kalınlığı 1.23 m olarak belirlenmiştir. Kesitin temsil ettiği açıklık etrafında maksimum 0.57 MPa gerilme oluşmakta olup (Şekil 9a) açıklık çevresinde genel gerilme dağılımı ise 100 ile 150 kPa arasında değişmektedir.



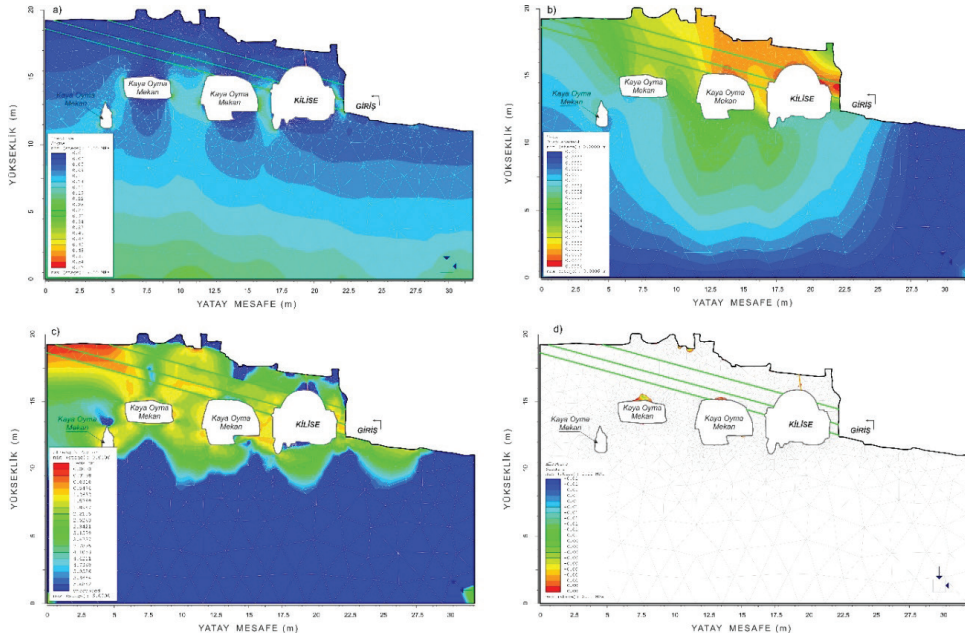
Şekil 7. Kesit -1 için sayısal analiz sonuçları a) düşey gerilme değişimi, b) toplam deformasyon değişimi, c) dayanım faktörü değişimi, d) çekme gerilmesi değişimi.

Figure 7. Results of numerical analyses for Section-1 a) vertical stress distribution, b) total deformation distribution, c) distribution of strength factor; d) distribution of tensile stress.



Şekil 8. Kesit -3 için sayısal analiz sonuçları a) düşey gerilme değişimi, b) toplam deformasyon değişimi, c) dayanım faktörü değişimi, d) çekme gerilmesi değişimi.

Figure 8. Results of numerical analyses for Section-3 a) vertical stress distribution, b) total deformation distribution, c) distribution of strength factor; d) distribution of tensile stress.



Şekil 9. Kesit -5 için sayısal analiz sonuçları a) düşey gerilme değişimi, b) toplam deformasyon değişimi, c) dayanım faktörü değişimi, d) çekme gerilmesi değişimi.

Figure 9. Results of numerical analyses for Section-5 a) vertical stress distribution, b) total deformation distribution, c) distribution of strength factor; d) distribution of tensile stress.

Kilisenin ana açıklığı diğer kesitlere göre daha az olduğu için, bu kesit hattı boyunca çekme gerilmeleri çok etkin değildir (Şekil 9d). Ancak kilisenin güneyinde yer alan açıklıkların tavanında sınırlı bir alanda çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Söz konusu bölümde ince-orta tabakalı kumtaşı-marn-kiltaş ardalanmasının gözlemlendiği düşünüldüğünde, oluşacak çekme gerilmelerinin tabaka düzlemleri boyunca kopmalara neden olması beklenmektedir. Maksimum 0.6 mm'lik toplam deformasyon belirlenmiş olup deformasyon vektör yönleri kuzeye doğrudur (Şekil 9). Bunun yanında kilise çevresinde dayanım faktörü sınır değerini (1.0) hemen üzerinde değişim göstermektedir.

### At Ahır

Bu bölümde göz önünde bulundurulmuş kaya oyma yapı, ait oldukları dönemde at barınağı

olarak kullanılmış olduğundan “At Ahır” olarak adlandırılmıştır. Şekil 10’da at ahırının Kayaşehir yerleşkesi içindeki konumu ve giriş bölümüne ait genel bir görünüm verilmiştir. Şekil 11’de detaylı planın verildiği açıklık, yaklaşık kuzeydoğu-güneybatı uzanımında olup 34.40 metre uzunluğundadır ve açıklığın genişliği 4.93 ile 6.64 metre arasında değişmektedir. Bunun yanında kaya oyma mekânının açıklık yüksekliği 2.60 ile 3.10 metre arasındadır. Üzerindeki örtü kalınlığı 11.00 ile 12.00 metre arasında değişmekte olup üst bölümde yer alan kaya oyma yapıların konumu karmaşık geometrileri nedeniyle tam olarak belirlenememiştir. Söz konusu açıklığın stabilitesi planda görüldüğü üzere üç doğal ayak ile sağlanmaya çalışılmış olup doğal ayak aralarındaki mesafeler 8.46 ile 11.40 metre arasında değişmektedir (Şekil 11).



Kayaşehir Temizlik Çalışmaları (2017)

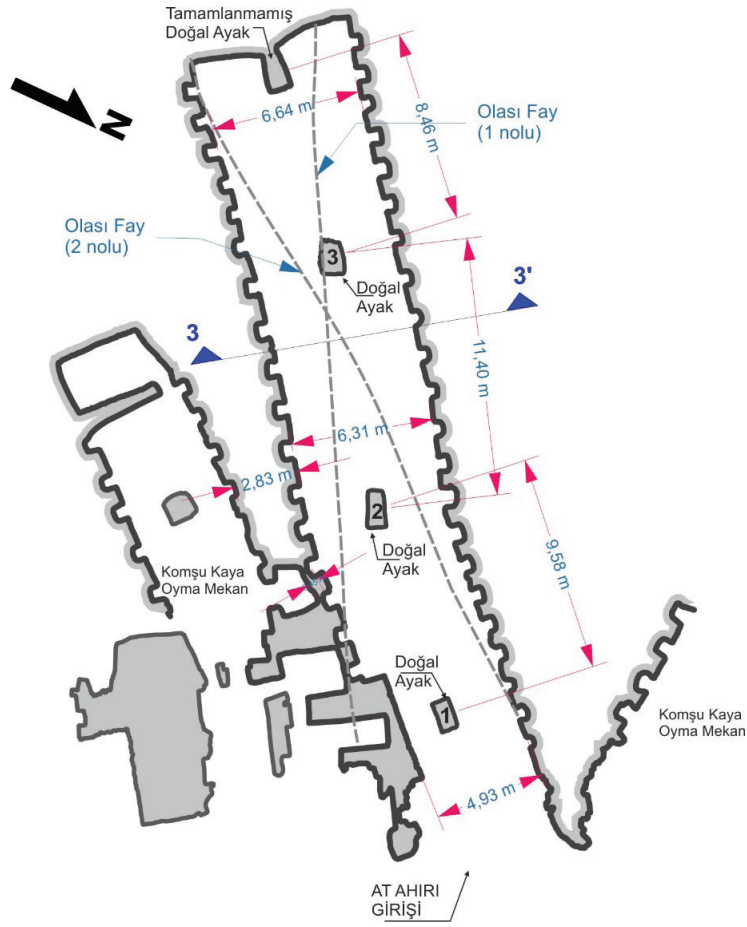
Şekil 10. At Ahır olarak adlandırılan kaya oyma yapının genel görünümü.

Figure 10. General view of the rock hewn structure named "horse stable".

### At ahırının kaya kütle özellikleri

At ahırının bir bölümü tuf-ignimbirit içerisinde açılmasına rağmen, bir kısmında ise kumtaşı, marn ve kilaşı aralanmasından oluşan seviye yer almaktadır (Şekil 12). Kaya oyma mekânın içerisinde keskin jeolojik değişimler gözlenmekte olup bu durum kırık hatları tarafından kontrol edilmektedir (Şekil 12b). Özellikle 1 nolu kırık mekân içerisinde

litolojik sınırı da oluşturmaktadır. 1 nolu kırık hattının kontrol ettiği kumtaşı, marn ve kilaşı aralanması kaya oyma mekânın iç bölümünde sadece kuzey yan duvarda gözlenirken, mekân girişine doğru 1 nolu kırık hattının kontrolünde yapının tavan bölümü de dahil olmak üzere geniş bir bölümünü oluşturmaktadır (Şekil 12). Kaya oyma yapıyı boydan boya kateden kırık hatları boyunca ayrışma izleri ve küçük ölçekli duraysızlık sorunları gözlenmektedir.



Şekil 11. At Ahır olarak adlandırılan kaya oyma yapının plan görünümü.

Figure 11. Plan view of the rock hewn structure named "horse stable".

Açıklığın giriş bölümünde yoğun olmak üzere birçok noktada kavlaklanma türü duraysızlıklar gözlenmektedir. Kumtaşı-marn ve kilaşı ardalımasının oluşturduğu litoloji, bozunma etkisine tuf-ignimbirit seviyelerine göre daha az direnç göstermektedir. Kumtaşı, marn ve kilaşı ardalımasının mekânın giriş bölümünde yapının tavan bölümünde geniş yayılım sunması, kavlaklanma ve aşırı sökülme problemlerinin daha fazla gözlenmesine neden olmuştur. Aşırı sökülme genelde sedimanter seviyenin tabaka düzlemleri boyunca gerçekleşmektedir (Şekil 12d).

Kaya oyma yapının stabilitesini sağlamak için yapıldığı dönemde üç adet doğal sütun bırakılmıştır. Boyutları düşey yönde değişken olmakla birlikte yaklaşık olarak dikdörtgen (1.20 m x 0.70 m) kesitli olup, yükseklikleri 2.32 ile 2.50 metre arasında değişmektedir. Çevresel faktörler ile tektonizma ve bozunmanın etkisiyle, bırakılan doğal sütunlar zamanla aşınmış olup sisteme yapmış oldukları destek kapasitesinde bir azalma olduğu öngörülmektedir.





Şekil 12. At Ahır olarak adlandırılan kaya oyma yapının jeolojik yapısı, (a) litolojik değişimlerin görünümü, (b ve c) kırık hatlarının yönelimi, (d) tavan bölümünde bozunma ve duraysızlıklar.

Figure 12. Geological properties of the "horse stable" rock hewn structure, (a) view of lithological variations, (b-c) direction of faults, (d) deterioration and instabilities in the ceiling section.

Önemli bir yapısal problem olarak karşımıza çıkan bu durum özellikle en içte bulunan sütun üzerinde açıkça görülmektedir (Şekil 12c).

İgnimbirit ve volkanosedimanter seviyelerinin kütleli dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesinde Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünden (Hoek vd., 2002)

yararlanılmıştır. İgnimbirit ve volkanosedimanter kaya kütleleri için Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre RocData yazılımı ile kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, kütleli dayanımı, elastisite modülü ve Hoek-Brown sabitleri olan "mb, s ve a" belirlenmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Kaya birimlerinin kütleli dayanım ve deformasyon özellikleri (At Ahır).

Table 2. Rock mass strength and deformation properties of the rock units (horse stable).

Birim Adı	$m_b$	s	a	Kaya Kütleli Çekme Dayanımı (MN/m <sup>2</sup> )	Kaya Kütleli Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MN/m <sup>2</sup> )	Kütleli Dayanım (MN/m <sup>2</sup> )	Elastisite Modülü (MN/m <sup>2</sup> )
İgimbirit	2.870	0.020	0.502	0.05	5.00	1.278	1400
Sedimanter S.	2.454	0.009	0.503	0.019	5.00	1.088	1250

### At ahırının sayısal modellenmesi

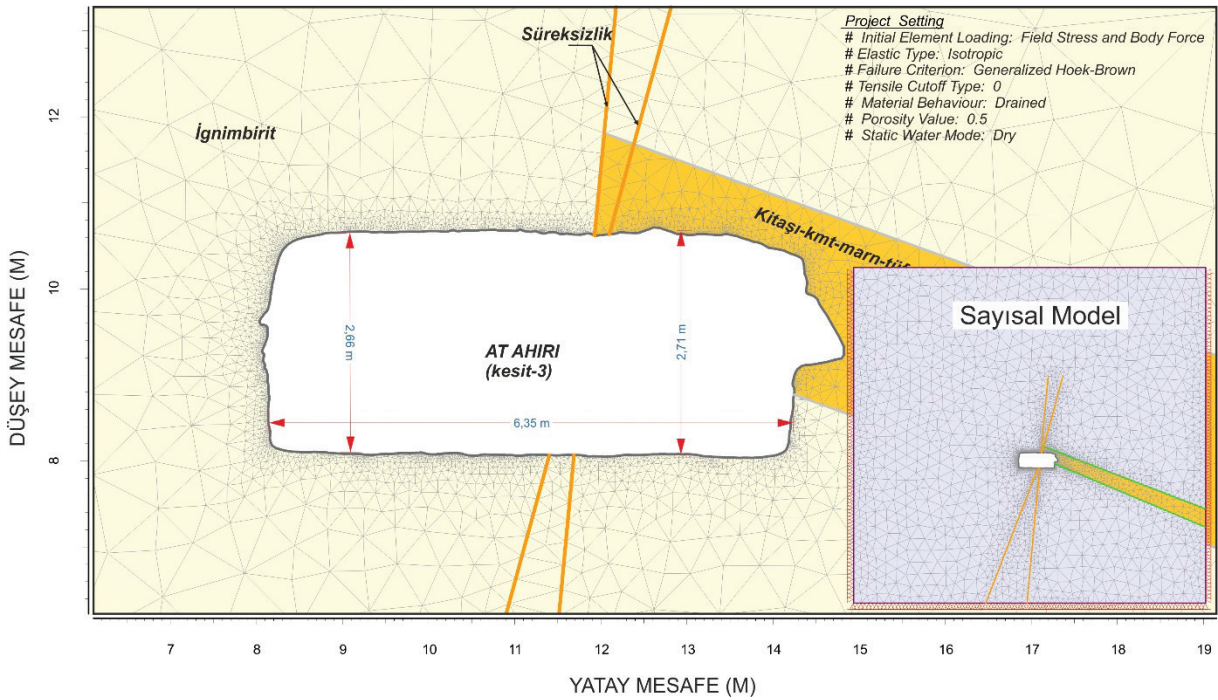
Dinçer vd. (2019) kaya oyma yapıyı 2018 yılında farklı yönlerde 3 adet kesit hattı belirlenmiş ve nümerik olarak incelenmiş olup bu çalışmada Şekil 11'de gösterilen 3-3' kesit hattı boyunca elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Kaya oyma At Ahır, bölgede yaygın olarak gözlenen volkanosedimanter bir istif içerisinde açılmış olup jeolojik yapının değişimi Şekil 13'te verilen kesitte gösterilmiştir. Sayısal analizlerde sınır koşulları dikkate alınmış olup Şekil 13'te verilen model görsel olarak düzenlenmiştir. Analizlerde Hoek-Brown yenilme kriteri dikkate alınmış olup ağırlıklı olarak İgimbiritlerden oluşan kaya kütlelerinin davranışı elasto-plastik malzeme olarak değerlendirilmiştir. Arazi gerilmeleri ve yerçekiminden kaynaklanan doğal kütle gerilmeleri göz önünde bulundurulmuştur (Şekil 13).

Söz konusu kesit hattı kaya oyma yapının orta bölümünü ve her iki kırık hattının yaklaşık kesişim yaptığı bölgeyi temsil etmektedir. Kesitin maksimum yüksekliği 2.66-2.71 metre iken genişliği 6.35 m'dir. Kesitin temsil ettiği açıklık etrafında maksimum 1.30 MPa gerilme oluşmakta olup gerilmeler yan duvarlarda daha etkili olmaktadır (Şekil 14). Açıklık tavanında kırık hattının sol bölümünde geniş bir bölümde çekme gerilmeleri oluşmaktadır (Şekil 14d). Maksimum 0.1 MPa düzeyinde oluşan çekme gerilmeleri, tabakalı yapı sunan volkanosedimanterler içerisinde tabaka düzlemleri boyunca kopmalara

neden olması beklenmektedir. Bunun yanında çekme gerilmelerinin olduğu bölümde maksimum 3.0 mm'lik bir toplam deformasyon miktarı belirlenmiştir. Kesit boyunca dayanım faktörü çekme gerilmelerinin olduğu bölümde kritik sınırın altına inmekte (Şekil 14c) olup bu bölümde kaya kütle yenilmeleri olasıdır.

### TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada birbiriyle bir şekilde ilişkisi olan yüzlerce kaya oyma yapının bulunduğu tarihi ve kültürel miras alanında yer alan iki farklı kaya oyma yapıda gözlenmesi muhtemel mühendislik jeolojisi kökenli duraysızlıklar ve bunların sayısal analizleri irdelenmiştir. Kapadokya Bölgesi'nde genel olarak kaya oyma mekânlarda meydana gelen duraysızlıklar düşük kaya kütle kalitesi, bozunma ve süreksizliklerin kontrolünde gerçekleşmektedir. Ulusay vd. (2006) ve Akın vd. (2020) tarafından kayadan oyma yapılarda gözlenen kaya kütle duraysızlık problemleri tavadan blok düşmesi, aşırı sökülme, eğilme, pullanma, doğal ayaklarda bozunma ve makaslama yenilmesi, tavan kalınlığının azalması, açıklık girişlerindeki kaya düşmesi, mevcut destek sistemlerinde zayıflama ve düşük kaya kütle kalitesi olarak ifade edilmiştir (Şekil 15).

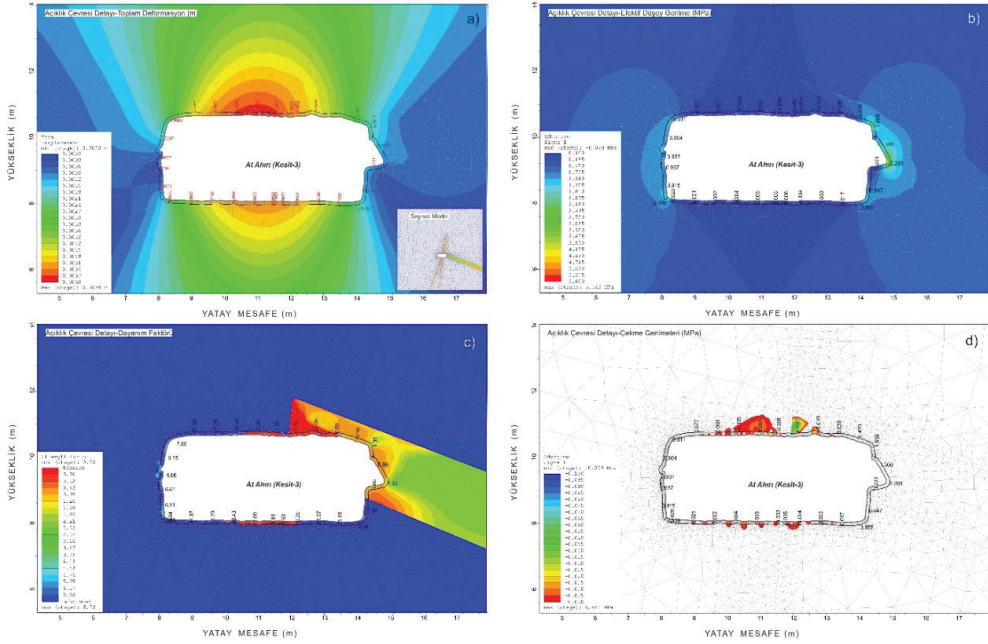


Şekil 13. At Ahır olarak adlandırılan kaya oyma yapıda Kesit-3 için açıklık etrafındaki detay mühendislik jeolojisi modeli.

Figure 13. Detailed engineering geological model for the section-3 of the "horse stable" rock hewn structure.

Tavandan blok düşmesi, kaya oyma yapının yer aldığı kaya kütlelerini kesen süreksizlik düzlemleri sınırlandırdığı kaya bloklarının yerçekimi etkisiyle süreksizlik kesişim düzlemleri boyunca düşmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Yatay veya yataya yakın tabakalanma stabilite açısından tehlikeli durumların oluşmasına, diğer bir ifadeyle tavan bölümünde aşırı sökülmelere neden olabilir. Bu durum duraysız bloğu diğer blokların takip etmesi sonucu oldukça geniş çaplı duraysızlık problemlerine neden olabilmektedir. Kayaşehir'in bulunduğu bölgede ignimbirit seviyelerinin kalınlıkları çok değişken olmakla birlikte, zaman zaman bu seviyeler arasında ince sedimanter ve tüf seviyeleri ortam koşullarına bağlı olarak ara katman olarak yer alabilmektedir.

Ardalanmalı bir yapıya sahip olan bu tür kaya ortamları içerisinde yer alan kaya oyma yapılarında aşırı sökülme önemli bir duraysızlık türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanında ince tabakalar içerisinde açılmış olan kaya oyma yapılarında, tabakalar yavaş bir şekilde boşluğa doğru hareket eder. Kaya, açıklığı çevreleyen kaya kütlelerinden tamamen ayrılmaya meydan gelen deformasyon kayaç içerisinde kırıklara ve oyuntulara neden olabilir. Ulusay vd. (2006) tarafından eğilme olarak tanımlanan bu sürecin devam etmesi durumunda, eğilme direnci aşılar ve kaya malzemesi ait olduğu kütlede ayrılarak bir takım duraysızlıklara neden olabilmektedir. Bölgede kayadan oyma yapılarının açıldığı ortamlar zayıf kaya kütleleri özelliğinde olup bozunmaya karşı oldukça duyarlıdır.

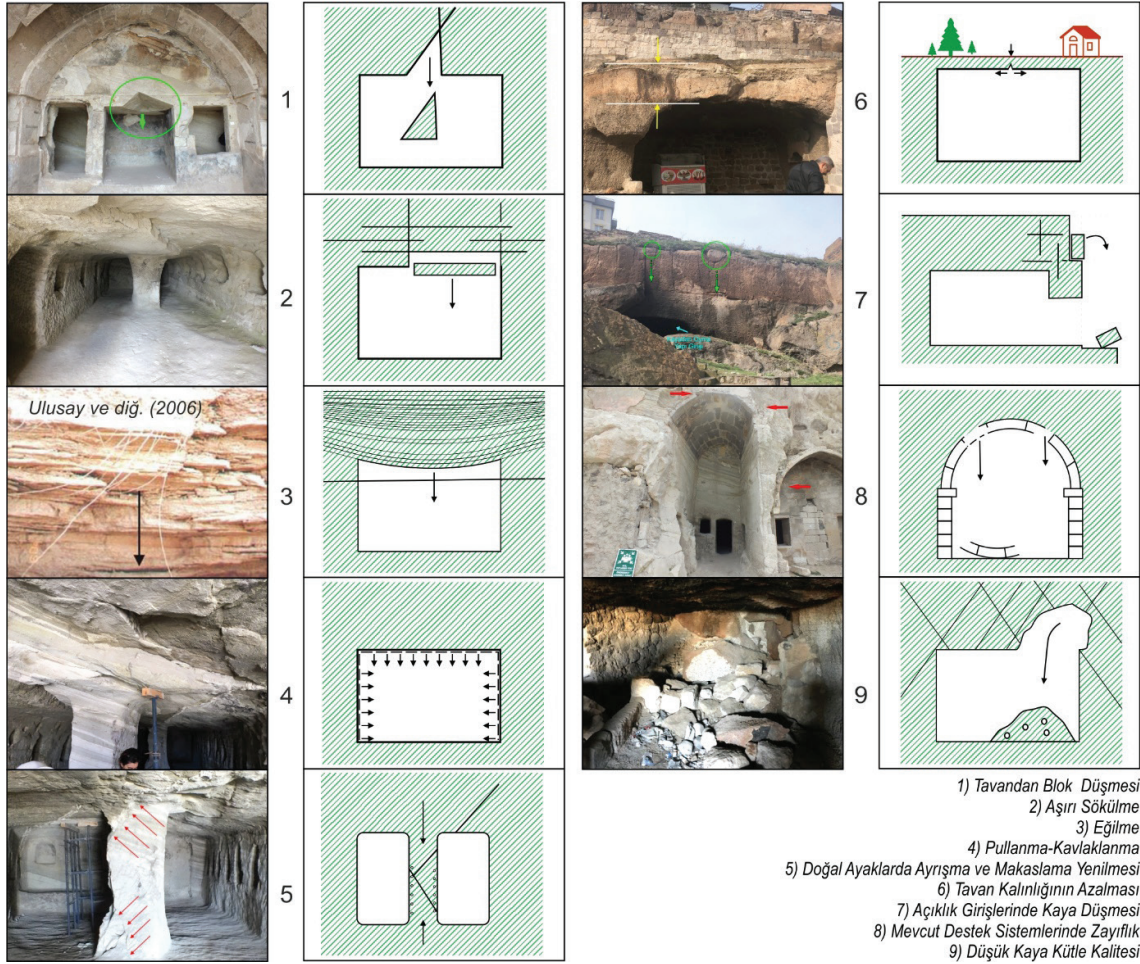


Şekil 14. At Ahırını olarak adlandırılan kaya oyma yapının kesit-3 boyunca elde edilen sayısal analiz sonuçları a) düşey gerilme dağılımı, b) toplam deformasyon dağılımı, c) dayanım faktörü dağılımı, d) çekme gerilmesi dağılımı.

Figure 14. Results of numerical analyses for Section-3 of the "horse stable" rock hewn structure a) vertical stress distribution, b) total deformation distribution, c) distribution of strength, d) distribution of tensile stress.

Kaya oyma yapılarda kaya kütle kalitesinin zayıflamasına dönüşecek olan bozunmanın en önemli işareti ise pullanma ve kavlaklanmadır. Bölgede geniş yeraltı açıklıklarında stabiliteyi sağlamak amacıyla doğal ayaklar (sütun) bırakılmaktadır. Atmosferik koşulların etkisi altında ve ayrışma sürecine bağlı olarak, söz konusu doğal ayaklar ayrışmaya ve aşınmaya maruz kalmaktadırlar. Bu durum, doğal ayakların açıklığa sağlamış oldukları destek kapasitelerini zamanla kaybetmesiyle sonuçlanabilir. Doğal ayaklardaki bozunmaya bağlı dayanım kayıplarına ek olarak, düşey gerilmelerin bu sütunlar üzerinde yoğunlaşması, doğal ayaklarda makaslama kırıkları oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum "At Ahırını" olarak incelen kaya oyma yapıda açık bir şekilde gözlenmektedir (Şekil 12).

Kaya oyma yapılarda tavan kaya kalınlığının azalmasına bağlı olarak çekme gerilmesi kırığı ve devamında çökme gibi bazı duraysızlık problemleri de meydana gelebilmektedir. Ayrıca alt-üst ilişkisi olan katlı kaya oyma mekânları arasındaki tavan kalınlığının (döşeme kalınlığı) az olması durumunda da duraysızlık sorunları gelişebilmektedir. Bazı kaya oyma yapılarında bulunduğu kaya kütlelerinde duraysızlık açısından herhangi bir problem olmamasına rağmen, açıklık girişlerinden daha yüksek kotlarında yer alan bazı bloklar düşme riski taşıyabilmektedir. Bu durum Kayaşehir açısından oldukça önemli bir problemdir. Daha detaylı açıklamak gerekirse, Kayaşehir'i oluşturan kaya oyma yapılarının daha üst kotlarında yer alan bazalt blokları kaya düşmesi açısından kaynak alan konumunda olup olası kaya düşmeleri hem de ziyaretçileri etkileyebilecek düzeydedir (Şekil 16).



Şekil 15. Kaya oyma yapılarında gözlenen duraysızlık türleri.

Figure 15. Instability types observed in the rock hewn structures.

Bölgede zayıf kaya kütlelerinde açılan boşlukların özellikle girişleri, bazen de iç bölümleri yine çevre kayalardan elde edilmiş olan prizmatik blokların kullanıldığı kemer ve/veya duvar sistemleri ile desteklenmiştir. Kökeni zayıf kaya olan bozunmaya eğilimli prizmatik bloklar da zaman içerisinde bozunarak sağlamış oldukları destek görevini yerine getirememekte ve bunun sonucu olarak bazı stabilite problemleri yaşanabilmektedir. Son olarak bölgede düşük kaya malzemesi dayanımı, çok eklemli, kırıklı, oldukça açık yer yer pürüzsüz

dolgulu süreksizlikler ve nemli koşullar ile temsil edilen düşük kaya kütle kalitesi, tasarım hatalarından bağımsız olarak doğrudan stabilite problemlerinin kaynağı olabilmektedir. Bölgede yaşanan stabilite problemleri göz önünde bulundurulduğunda, Kayaşehir'de bulunan kaya oyma yapılarında tavandan blok düşmesi, aşırı sökülme, tavan kalınlığının azalması, doğal ayaklarda deformasyon, daha üst kotlardan kaya düşmesi ve mevcut destek sistemlerinde zayıflama en önemli duraysızlık türleri olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 16).



Şekil 16. Kayaşehir’de kaya oyma yapılarda gözlenen stabilite problemlerine ait fotoğraflar.

Figure 16. Photographs showing stability problems in the rock hewn structures of Kayaşehir.

Çoğukültürel ve tarihi varlık kapsamında olan ve genellikle zayıf kaya kütleleri içerisinde açılan kaya oyma yapıların duraylılık incelemesinde veri toplamadaki problemler, kaya kütlelerinde bozunmaya bağlı heterojenlikler ve yeraltı açıklığının çoğunlukla düzensiz geometriye sahip olması ve kaotik alt-üst ilişkileri nedenleriyle bazı zorluklar söz konusu olabilmektedir. Bu bölümde yeraltı açıklıklarının duraylılık değerlendirmelerinde bazı analitik ve sayısal

(sonlu elemanlar) yöntemleri kullanılabilir. Sonlu Elemanlar Yöntemi, karmaşık sınır koşulları ve doğrusal olmayan (non-linear) malzeme davranışı, homojen olmayan malzemeler gibi zor ve karmaşık problemlerin çözümünde sistematik bir programlamaya izin verebilir olup mühendisliğin çok geniş bir alanında sınır değer problemlerine uygulanabilmektedir (Berilgen, 1996; Cansız, 2014). Sonlu elemanlar analizleri sonucunda asal gerilmeler, yanal ve düşey

hareketler, boşluk suyu basınçları ve zemin suyu akışı gibi parametreler farklı mühendislik uygulamaları için belirlenmektedir. Kaya oyma yapılar için gözlemsel ve görgül yöntemlerin yanı sıra, bu açıklıklarının etrafındaki asal gerilme dağılımlarının ortaya konması, deformasyon miktarlarının belirlenmesi ve yenilme koşullarının araştırılması gibi amaçlar doğrultusunda sayısal analizler doğru kullanıldığında anlamlı sonuçlar elde edilebilir.

Bu çalışma kapsamında değerlendirilen “Kilise” ve “At Ahır” isimli kaya oyma yapılar RS2 (Rocscience, 2020) yazılımı kullanılarak sayısal olarak değerlendirilmiştir. Öncelikle kültürel ve tarihi değeri olan kaya oyma yapılar sistematik bir mimariye sahip olmadığı için iki boyutlu analizlerde çok sayıda kesit boyunca analizlerin yapılması gerekmektedir. Bu analizlerde özellikle açıklık genişliğinin en küçük olduğu eksene paralel kesitler göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun yanında arazideki jeolojik ve yapısal unsurlar modelde mümkün olduğu kadar yansıtılmalıdır.

Kilisenin içerisinde yer aldığı kaya kütlelerinde keskin litolojik değişim, buna bağlı olarak yan duvarlarında meydana gelen deformasyonlar ve zamanla meydana gelen diğer tahribatlar kilisenin ilksel yapısal özelliklerinin zayıflamasına neden olmuştur. Bu durum kilisenin içerisinde ve dış yüzeyinde açık bir şekilde izlenmektedir. Kilisenin mevcut durumu sonlu elemanlar yöntemine göre sayısal olarak analiz edilmiş olup, yer yer tavan ve incelmış yan duvarlarda çekme gerilmelerinin olduğu görülmüştür. Ulusay vd. (2013), bölgede yapmış oldukları çalışmada kuru koşullarda tüfler için çekme dayanımının 0.17 ile 0.26 MPa arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Bu durum ve doymuş koşullarda çekme dayanımındaki olası azalmalar göz önünde bulundurulduğunda, kilisenin

tavanında ve yan duvarlarında (doğu ve kuzey) ilerleyen zamanlarda bir takım yenilmelerin oluşması muhtemeldir. Bundan dolayı kilisenin özellikle kuzey ve doğu duvarlarının güçlendirilmesi kaya oyma kilisenin yapısal bütünlüğünün korunması açısından büyük önem arz etmektedir.

Sayısal analiz sonuçlarına göre “At Ahır” içerisinde stabilite problemleri açısından riskli olarak işaret edilen bölümde, 2020 yılı içerisinde tavan bölümünde önemli bir kütleli yenilme meydana gelmiştir (Şekil 17). Söz konusu yenilmenin meydana geldiği bölüm, iki ve üç no’lu doğal ayakların arasında ve kırık hatlarının keşiştiği bir alandır. Yenilme gerçekleşmesinden önce yapılan sayısal analizlerde söz konusu tavan bölgesinde çekme gerilmelerinin olduğu belirlenmiş olup, yenilme olasılığı da değerlendirilmiştir. Şekil 17’den görüleceği üzere kaya kütlelerinin kırıklı-çatlaklı olduğu ve tavadaki yenilmenin öncelikle kırık hatları boyunca meydana geldiği dikkati çekmektedir. Bu durum sayısal analizlerde oluşturulan mühendislik jeolojisi modellerinin gerçek koşulları tam olarak yansıttığında oldukça başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Sayısal analizler sonucu elde edilen toplam deformasyon değerleri tarihi kaya oyma yapıların uzun süre önce açılmış olmaları göz önünde bulundurulduğunda çok anlamlı olmamakla birlikte, kaya koyma yapının zorlandığı noktaların tespiti açısından önemlidir. Bunun yanında dayanım faktörünün 1.0’ın altında olduğu ve çekme dayanımlarının olduğu bölümler ise kaya oyma yapıların en riskli olduğu bölümleri işaret etmektedir. Bundan dolayı özellikle tavan bölümünde oluşacak çekme gerilmeleri tabakalı litolojilerin bulunduğu kaya kütlelerinde ciddi duraysızlıklara neden olmaktadır.



Şekil 17. At Ahırı olarak adlandırılan kaya oyma yapıda 2020 yılında meydana gelen kaya kütle yenilmesinin genel görünümü

Figure 17. General views of the rock mass failure occurred in 2020 in the rock hewn structure named as (horse stable).

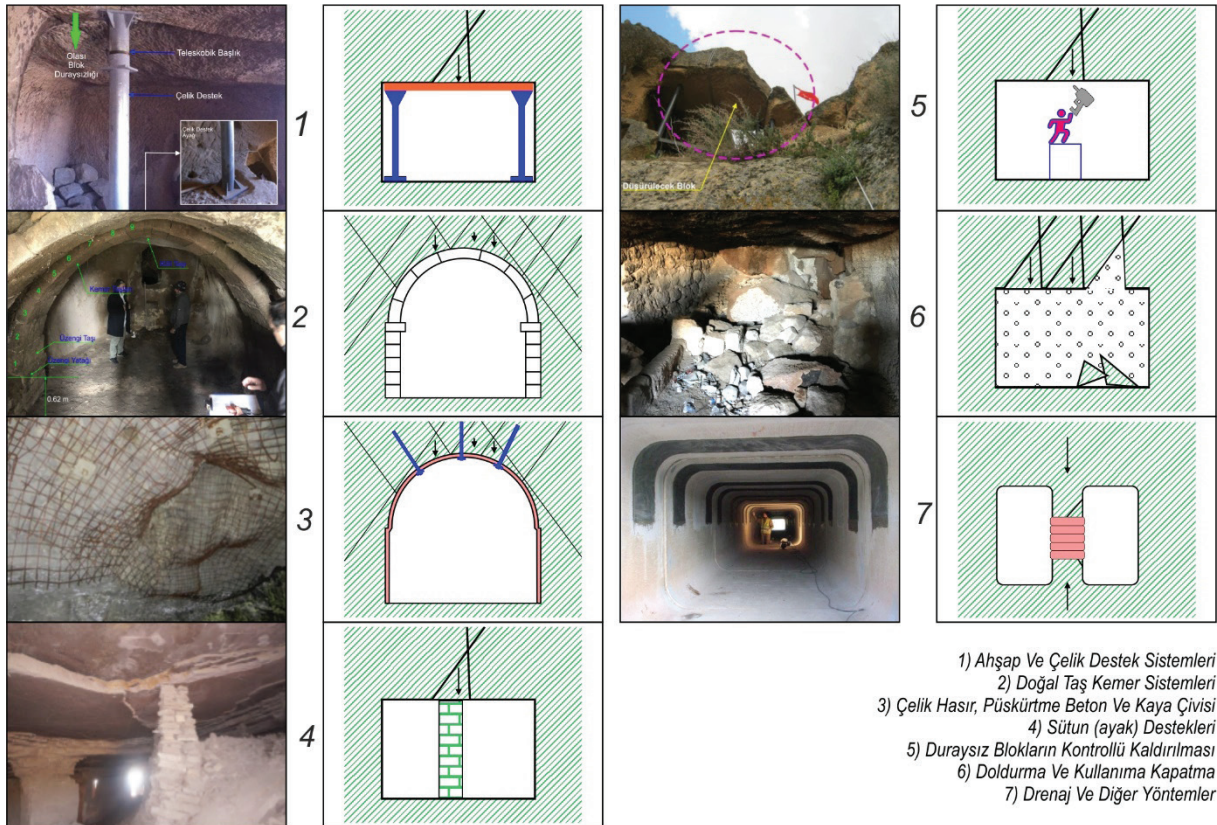
Kaya oyma yapıların doğası gereği sahip oldukları kaotik yapı, içinde yer aldıkları kaya kütlelerinin jeolojik ve mühendislik özellikleri ile birleşince daha riskli ve zor mühendislik koşullarının oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, söz konusu sahaların çoğu zaman sit alanı olması, olayı daha da karmaşık hale getirmekte ve afeti oluşturan problemlerin alışlagelmiş mühendislik yöntemleriyle çözülmesini zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla kaya oyma yapılarıdaki stabilite problemlerine yönelik iyileştirme yöntemleri geliştirilirken, doğal ve tarihi dokunun mümkün olduğunca korunmasına özen gösterilmelidir. Ulusay vd. (2006) kaya oyma yapılarında hali hazırda kullanılmış olan ahşap

kirişler, prizmatik daha sert doğal kayalardan imal edilmiş sütunlar, düşen ve riskli blokların kaldırılması ve doğal sütunların güçlendirilmesi gibi iyileştirme yöntemleri önermişlerdir. Ahşap ve çelik destek sistemleri, doğal taş kemer sistemleri, çelik hasır, püskürtme beton ve kaya çivisi, sütun (ayak) destekleri, duraysız blokların kontrollü kaldırılması, doldurma ve kullanıma kapatma ve drenaj ve diğer yöntemler olarak kaya oyma yapılarında kullanılabilecek iyileştirme yöntemlerini sınıflamışlardır (Şekil 18). Çelik hasır, püskürtme beton ve kaya çivisi gibi sistemlerin düzensiz bir kesit geometrisine sahip, zaman zaman da karmaşık bir yapıya sahip olan tarihi kaya oyma yapıların desteklenmesinde



uygulanmasında dikkatli olunmalıdır. Tarihi ve kültürel öneme sahip ve sit alanı içerisinde yer alan yeraltı açıklıklarında, tarihi dokuyu doğrudan etkilemesi açısından bu sistemlerin uygulanması uygun görülmemelidir. Aynı şekilde Ulusay vd. (2006) çelik hasır, püskürtme beton ve bulonlama ile ilgili bazı çekincelerini belirtmiştir. Öncelikle söz konusu sistemlerin estetik açıdan uygun olmayacağını belirtmişlerdir. Bunun yanında püskürtme beton ile kaya arasında yetersiz bağlanmanın sorun olacağını ve tüfler gibi yumuşak ve aşınmaya eğilimli kaya kütlelerinde bulonlama uygulanması ve performansının tartışmalı olduğunu ifade etmişlerdir.

Yukarıdaki açıklamalardan görüleceği üzere tarihi ve kültürel değeri olan kaya oyma yapıların yeniden kullanıma kazandırılması ve bu benzeri amaca yönelik çalışmalarda kullanılacak ıslah yöntemlerini belirlemede estetik, tarihi ve doğal dokuya uygunluk, yasal zorunluluklar gibi mühendislik ölçütlerin dışında birçok faktörün etkili olduğu görülmektedir. Bundan dolayı bu tür çalışmalarda arkeolog, sanat tarihçi, mimar, restoratör ve yetkin mühendisler vb. gibi disiplinlerin de içinde bulunduğu bir grup tarafından değerlendirilip karar verilmesi önerilmektedir.



Şekil 18. Tarihi kaya oyma yapılarda uygulanabilecek destek sistemleri

Figure 18. Support systems that can be applied in historical rock-hewn structures

**KATKI BELİRTME**

Yazarlar, bu çalışmada her türlü verinin sağlanması ve gerçekleştirilmesi noktasında Nevşehir Belediyesi'ne ve Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkür eder.

**KAYNAKLAR**

- Akin, M., Dinçer, İ., Ok, A. Ö., Orhan, A., Akin, M. K., & Topal, T. (2021). Assessment of the effectiveness of a rockfall ditch through 3-D probabilistic rockfall simulations and automated image processing. *Engineering Geology*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106001>
- Atabey, E. (1989). MTA Genel Müdürlüğü, 1/100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Kayseri H19 (K33) Paftası, 18 sy.
- Aydan, Ö., & Ulusay, R. (2003). Geotechnical and geo-environmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey. *Engineering Geology*, 6, 245-272. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00285-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00285-5)
- Aydan, Ö., Tano, H., Watanabe, H., Ulusay, R., & Tuncay, E. (2007). A rock mechanics evaluation of antique and modern rock structures in Cappadocia Region of Turkey. In *Proceedings of the symposium on the geology of Cappadocia*, Nigde, 13-23
- Barton, N.R., Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10, 1-54. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>
- Barton N, Bandis S (1980). Some effects of scale on the shear strength of joints. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 17, 69–73. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(80\)90009-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(80)90009-1)
- Becerir, E. (2020). Nevşehir Kale çevresi kaya mekânların belgelenmesi ve koruma sorunları. (Master's Thesis), Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Berilgen, M. (1996) Ankrajlı Perdelerde Zemin Yapı Etkileşiminin İncelenmesi. (Doktora Tezi), YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Cansız, B. M. (2014). İksa sistemlerinde köşe etkisinin iki boyutlu sonlu eleman analiz yöntemi ile incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 73 sy
- Deniz, B. E., ve Topal. (2021). A new durability assessment method of the tuffs used in some historical buildings of Cappadocia (Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 80(7), 266. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09546-1>
- Dinçer, İ., Orhan, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2015). Rock mass instabilities in Tatlarin Underground City (Cappadocia-Turkey). In *Engineering Geology for Society and Territory- Volume 8: Preservation of Cultural Heritage* (pp. 361-365). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09408-3\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09408-3_63)
- Dinçer, İ., Orhan, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2016). Rockfall at the heritage site of the Tatlarin Underground City (Cappadocia, Turkey). *Natural Hazards*, 82, 1075-1098. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2234-z>
- Dinçer, İ., Akın, M., & Orhan, A. (2019). Kaya oyma yapıların sayısal yöntemlerle modellenmesi: Nevşehir yeraltı şehri örneği. *International Symposium On Advanced Engineering Technologies*, Kahramanmaraş, Türkiye, 139-144
- Dinçer, İ., Akın, M., Orhan, A., & Duru, C. (2020). Kapadokya Bölgesi'ndeki Kaya Oyma Depoların Tasarım Ölçütlerinin Sayısal Yöntemlerle Değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 44(2), 131-156. <https://doi.org/10.24232/jmd.826934>
- Erguler, Z. A. (2007). Investigation of the effect of water content on engineering behavior of the clay-bearing rocks. Ph. D. Thesis (in Turkish), 225.
- Erguler, Z. A., & Ulusay, R. (2007). Estimation of uniaxial compressive strength of clay-bearing weak rocks using needle penetration resistance. In *ISRM Congress (ISRM-11 CONGRESS)*.
- Erguvanlı, A. K., & Yüzer, A. E. (1977) Past and present use of underground openings excavated

- in volcanic tuffs at Cappadocia area, Rock Storage, Oslo, 15-17. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-8406-4.50011-7>
- Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. In: Proceedings of the fifth North American rock mechanics symposium, Toronto, 1, 267-273
- Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 43(2), 203-215. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>
- Kaşmer, Ö., Ulusay, R., & Geniş, M. (2013). Assessments on the stability of natural slopes prone to toe erosion, and man-made historical semi-underground openings carved in soft tuffs at Zelve Open-Air Museum (Cappadocia, Turkey). *Engineering geology*, 158, 135-158. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.03.010>
- Margottini, C. (2015). Engineering geology in shaping and preserving the historic urban landscapes and cultural heritage: Achievements in UNESCO World Heritage Sites. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 8: Preservation of Cultural Heritage* (pp. 1-28). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09408-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09408-3_1)
- Maruto. (2006). *Penetrometer for Soft Rock: Model SH-70 Instruction Manual*. Tokyo, Japan.
- Rocscience. (2020). *RS2 finite element analysis for excavations and slopes*. Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada
- Rocscience. (2022). *RSData Strength and Stress Analysis Software*. Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada
- Stimpson, B. (1981). A suggested technique for determining the basic friction angle of rock surfaces using core. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 18, 63-65. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90266-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90266-7)
- Sonmez, H., Ulusay, R. (2002). A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modification to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri (Earth Sciences)*, 26, 77-99
- Sülükçü, S., 2019. Kapadokya Bölgesi'ndeki kayadan oyma yeraltı depolarının duraylılığının değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara
- Topal, T., ve Doyuran, V. (1997). Engineering geological properties and durability assessment of the Cappadocian tuff. *Engineering Geology*, 47(1-2), 175-187. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(97\)00017-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(97)00017-3)
- Topal, T., ve Doyuran, V. (1998). Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey. *Environmental geology (Berlin)*, 34(1), 5-20. <https://doi.org/10.1007/s002540050252>
- Tunusluoglu, M. C., & Zorlu, K. (2009). Rockfall hazard assessment in a cultural and natural heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey). *Environmental geology*, 56, 963-972. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1198-z>
- Ulusay, R., & Erguler, Z. A. (2012). Needle penetration test: evaluation of its performance and possible uses in predicting strength of weak and soft rocks. *Engineering geology*, 149, 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.08.007>
- Ulusay, R., Aydan, Ö., Erguler, Z. A., Ngan-Tillard, D. J., Seiki, T., Verwaal, W., & Sato, A. (2015). ISRM suggested method for the needle penetration test. *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014*, 143-155. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0>
- Ulusay, R., Aydan, Ö., Geniş, M., & Tano, H. (2013). Stability assessment of Avanos underground congress centre (Cappadocia, Turkey) in soft tuffs through an integrated scheme of rock engineering methods. *Rock mechanics and rock engineering*, 46, 1303-1321. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0363-6>
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Topal, T., Sönmez, H., Tuncay, E., Ergüler, Z A., ve Kasmer, Ö. (2006). Assessment of environmental and engineering

geological problems for the possible re-use of an abandoned rock-hewn settlement in Ürgüp (Cappadocia), Turkey. *Environmental Geology*, 50(4), 473-494. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0222-4>

Yılmaz, I. (1995). Engineering geologic factors in the design of a large underground structure in a tuff sequence in Cappadocia. *Engineering Geology*, 40(3-4), 235-241. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(95\)00057-7](https://doi.org/10.1016/0013-7952(95)00057-7)