

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ANA BİLİM DALI

TURİZM AMAÇLI KULLANILACAK YERALTI MAĞARALARINDA İŞ
SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ RİSKLERİNİN ANALİZİ: GÜMÜŞHANE
AKÇAKALE MAĞARASI ÖRNEĞİNDE FMEA VE HAZOP UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS

GÜL UÇAK

Haziran 2026
GÜMÜŞHANE



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TURİZM AMAÇLI KULLANILACAK YERALTI MAĞARALARINDA İŞ
SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ RİSKLERİNİN ANALİZİ: GÜMÜŞHANE
AKÇAKALE MAĞARASI ÖRNEĞİNDE FMEA VE HAZOP UYGULAMASI**

**ANALYSIS OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY RISKS IN
UNDERGROUND CAVES TO BE USED FOR TOURISM PURPOSES: FMEA
AND HAZOP APPLICATION IN THE CASE OF GÜMÜŞHANE AKÇAKALE
CAVE**

YÜKSEK LİSANS

GÜL UÇAK

**Haziran 2026
GÜMÜŞHANE**



**GÜMÜŞHANE
ÜNİVERSİTESİ**
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TURİZM AMAÇLI KULLANILACAK YERALTI MAĞARALARINDA İŞ
SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ RİSKLERİNİN ANALİZİ: GÜMÜŞHANE
AKÇAKALE MAĞARASI ÖRNEĞİNDE FMEA VE HAZOP UYGULAMASI**

**ANALYSIS OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY RISKS IN
UNDERGROUND CAVES TO BE USED FOR TOURISM PURPOSES: FMEA
AND HAZOP APPLICATION IN THE CASE OF GÜMÜŞHANE AKÇAKALE
CAVE**

YÜKSEK LİSANS

GÜL UÇAK

DANIŞMAN: DOÇ. DR. GÖKHAN KÜLEKÇİ

**HAZİRAN 2026
GÜMÜŞHANE**

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Gökhan KÜLEKÇİ danışmanlığında, **Gül UÇAK** tarafından hazırlanan “**Turizm Amaçlı Kullanılacak Yeraltı Mağaralarında İş Sağlığı ve Güvenliği Risklerinin Analizi: Gümüşhane Akçakale Mağarası Örneğinde FMEA ve HAZOP Uygulaması**” isimli bu çalışma, 24/06/2026 tarihinde yapılan lisansüstü tez savunma sınavı sonucunda **Oy Birliği** ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

.....
Prof Dr. İzzet KARAKURT (Başkan)

.....
Doç. Dr. Gökhan KÜLEKÇİ (Danışman)

.....
Dr. Öğr. Üyesi Nuri GÜLEŞÇİ (Üye)

Lisansüstü tez savunma sınavında başarılı bulunarak kabul edilen bu tezin ciltlenmiş hali, /..... /..... tarihli ve / sayılı Enstitü Yönetim Kurulu toplantısında görüşülmüş ve tez yazım kılavuzuna uygun bulunarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Duygu ÖZDEŞ
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Teziolarak hazırlamış olduğum “**Turizm Amaçlı Kullanılacak Yeraltı Mağaralarında İş Sağlığı ve Güvenliği Risklerinin Analizi: Gümüşhane Akçakale Mağarası Örneğinde FMEA ve HAZOP Uygulaması**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, danışmanımın sorumluluğunda hazırladığımı, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

24/06/2026

.....

Gül UÇAK

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince bilgi, deneyim ve akademik birikimiyle bana yol gösteren, her aşamada desteğini esirgemeyen, değerli görüş ve önerileriyle çalışmamın şekillenmesine önemli katkılar sağlayan danışmanım Sayın Doç. Dr. Gökhan KÜLEKÇİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca sevgileri, emekleri ve fedakârlıklarıyla her zaman yanımda olan, eğitim hayatım boyunca bana destek veren, bu günlere ulaşmamda sabır ve güvenlerini dayanak olarak gördüğüm aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım tüm hocalarıma ve desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Gül UÇAK
GÜMÜŞHANE – 2026

ÖZET

Bu çalışma, doğal bir yeraltı ortamı olan Akçakale Mağarası'nda iş sağlığı ve güvenliği (İSG) perspektifinden risklerin değerlendirilmesini ve mağara ortamına özgü tehlike faktörlerinin sistematik olarak analiz edilmesini amaçlamaktadır. Geleneksel olarak endüstriyel alanlarda kullanılan risk değerlendirme yöntemlerinin doğal ortamlara uyarlanabilirliği incelenmiş; bu kapsamda FMEA (Hata Türleri ve Etkileri Analizi) ve HAZOP (Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi) yöntemleri birlikte kullanılarak bütüncül bir değerlendirme yapılmıştır. Bu yönüyle çalışma, doğal bir kapalı alan olan mağaralarda İş sağlığı ve güvenliği uygulamalarına yönelik literatüre özgün bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Araştırmada mağara içi fiziksel, kimyasal, biyolojik, çevresel ve jeolojik risk faktörleri; hava kalitesi, nem, sıcaklık, gaz birikimi, çökme riski ve mikroklimatik değişkenler çerçevesinde ele alınmıştır. Ayrıca mağara içi çevresel koşulların insan sağlığı üzerindeki olası etkileri değerlendirilmiş ve risklerin şiddet, olasılık ve tespit edilebilirlik parametrelerine göre sınıflandırılması yapılmıştır.

Elde edilen bulgular, mağara ortamlarında en kritik risklerin çökme potansiyeli, gaz birikimi ve mikroklimatik dengesizlikler olduğunu göstermiştir. FMEA ve HAZOP yöntemlerinin birlikte kullanılması, risklerin yalnızca tanımlanmasını değil aynı zamanda önceliklendirilmesini ve yönetilebilir hale getirilmesini sağlamıştır.

Sonuç olarak bu tez, yeraltı doğal ortamlarında güvenli çalışma ve araştırma koşullarının geliştirilmesi için uygulanabilir bir risk değerlendirme modeli ortaya koymakta ve gelecekte yapılacak benzer çalışmalar için metodolojik bir çerçeve önermektedir.

Anahtar Kelimeler: Akçakale mağarası, FMEA, HAZOP, Mağara

ABSTRACT

This study aims to evaluate the risks from the occupational health and safety (OSH) perspective in Akçakale Cave, which is a natural underground environment, and to systematically analyze the hazard factors specific to the cave environment. The adaptability of risk assessment methods traditionally used in industrial settings to natural environments has been examined; in this context, a holistic assessment was made by using FMEA (Error Types and Effects Analysis) and HAZOP (Hazard and Operability Analysis) methods together. In this respect, the study aims to provide an original contribution to the literature on occupational health and safety practices in caves, which are a natural closed area.

In the research, physical, chemical, biological, environmental and geological risk factors in the cave were considered within the framework of air quality, humidity, temperature, gas accumulation, collapse risk and microclimatic variables. In addition, the possible effects of the environmental conditions in the cave on human health were evaluated and the risks were classified according to the parameters of severity, probability and detectability.

The findings obtained have shown that the most critical risks in cave environments are collapse potential, gas accumulation, and microclimatic imbalances. The combined use of FMEA and HAZOP methods has ensured that risks are not only identified, but also prioritized and made manageable.

As a result, this thesis presents a viable risk assessment model for the development of safe working and research conditions in underground natural environments and proposes a methodological framework for similar studies to be conducted in the future..

Keywords: Akçakale cave, FMEA, HAZOP, Cave

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Mağaraların Turizm Amaçlı Kullanımı ve Güvenlik Gereksinimi	2
1.2. Turizme Açık Mağaralarda İş Sağlığı ve Güvenliği Riskleri	5
1.3. Mağara Güvenliğinde Risk Değerlendirmesi ve FMEAHAZOP Yaklaşımları.....	12
1.4. Turizme Açık Mağaralarda Güvenlik ve Risk Yönetimine İlişkin Çalışmalar.....	16
1.5. Literatürdeki Boşluk ve Araştırmanın Gerekliliği	22
1.6. Araştırmanın Amacı ve Özgün Değeri.....	25
1.7. Araştırmanın Kapsamı ve Sınırlılıkları	27
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
2.1. Çalışma Alanı.....	30
2.2. Yapılan Çalışmalar.....	34
2.2.1. Saha Çalışmaları	36
2.2.2. Laboratuvar. Çalışmaları	39
2.2.3. Mağaranın Riskli Bölgelere Ayrılması.....	42
2.3. Akçakale Mağarasının Risk Analizi	43
2.3.1. FMEA'nın Temel Kavramları ve Yapısı	43
2.3.2. HAZOP'un Temel Kavramları ve Uygulanması	45
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	47
3.1. Saha Çalışmalarından Elde Edilen Bulguları.....	47
3.1.1. Hava Akım Hızı.....	48
3.1.2. Nem	49
3.1.3. Sıcaklık	52
3.1.4. Gaz Ölçümü	53
3.1.5. Ses Şiddeti	57

3.2. Laboratuvar Çalışması Bulguları	58
3.2.1. pH analizleri	58
3.2.2. Ağır Metal Ölçümleri	60
3.3. Akçakale Mağarasının Risk Analizi	61
3.3.1. FMEA Analizi	61
3.3.2. HAZOP analizi	74
3.3.3. Mağaranın Riskli Bölgelerinin Oluşturulması.....	84
4. SONUÇLAR.....	86
5. ÖNERİLER.....	89
KAYNAKÇA.....	94
ÖZGEÇMİŞ	100

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Çalışma alanı ölçüm ve numune alım sayıları	34
Tablo 2. FMEA risklerin derecelendirilmesi	44
Tablo 3. FMEA şiddet değerleri.....	44
Tablo 4. FMEA ihtimal derecesi tablosu	45
Tablo 5. FMEA risklerin tespit edilebilirlik derecesi tablosu	45
Tablo 6. HAZOP anahtar kelimeleri	46
Tablo 7. CO, CH ₄ , H ₂ S, O ₂ ve aydınlanma ölçüm sonuçları.....	53
Tablo 8.Yer altı maden ocağında gaz seviyeleri ve alınması gereken önlemler	56
Tablo 9. Toprak örneklerinden incelenen elementlerin değerleri	60
Tablo 10. FMEA risk analizi birinci bölge tablosu.....	62
Tablo 11. FMEA risk analizi ikinci bölge tablosu	64
Tablo 12. FMEA risk analizi üçüncü bölge tablosu.....	66
Tablo 13. FMEA risk analizi dördüncü bölge tablosu	67
Tablo 14. FMEA risk analizi beşinci bölge tablosu	69
Tablo 15. FMEA risk analizi altıncı bölge analizi	71
Tablo 16. FMEA risk analizi yedinci bölge tablosu	73
Tablo 17. Birinci çalışma noktası HAZOP risk analiz tablosu	74
Tablo 18. Üçüncü çalışma noktası HAZOP risk analiz tablosu.....	75
Tablo 19. Üçüncü çalışma noktası HAZOP risk analiz tablosu.....	78
Tablo 20. Dördüncü çalışma noktası HAZOP risk analiz tablosu	79
Tablo 21. Beşinci çalışma noktası HAZOP risk analiz tablosu	81
Tablo 22. Altıncı çalışma noktası HAZOP risk analiz tablosu	82
Tablo 23. Yedinci çalışma noktası HAZOP risk analiz tablosu.....	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Akçakale Mağarası yer buldur haritası	30
Şekil 2. Akçakale Mağarası iç kısmından görünüm.....	31
Şekil 3. Akçakale Mağarası tabanında oluşan gölcükler	31
Şekil 4. Mağara incileri ve dikit örnekleri	32
Şekil 5. Mağara içerisinden bazı oluşumlar	32
Şekil 6. Tavandan zemine düşmüş kaya blokları	33
Şekil 7. Mağara içinden bir görünüm.....	33
Şekil 8. Mağara içinden bir inceleme.....	34
Şekil 9. Mağara içerisinde ölçüm yapılan noktalar	36
Şekil 10. Extech EN300 model çok fonksiyonlu çevresel ölçüm cihazı.....	36
Şekil 11. HTC-1 Clock / Humidity higrometre – termometre	37
Şekil 12. Dräger X-am 5000 model çoklu gaz ölçüm cihazı	38
Şekil 13. Görsel kayıtlar için kullanılan fotoğraf makinesi	39
Şekil 14. Laboratuvar çalışmaları için alınan su numuneleri	40
Şekil 15. Örnek alınan noktalar.....	40
Şekil 16. Öğütülen kayaç numunesinden bir örnek	41
Şekil 17. İçerisinde numuneler bulunan sindirim kapları	41
Şekil 18. Numunelere asit eklenmesi ve yakılmak üzere fırına yerleştirilmesi	41
Şekil 19. Mağaranın, bölgelere ayrılmış hali	42
Şekil 20. Mağara içi hava akım hızı	48
Şekil 21. Mağara içi nem ölçüm sonucu grafiği	50
Şekil 22. Mağara içi 6 aylık sıcaklık ölçüm sonucu.....	52
Şekil 23. Mağaradaki CO ₂ miktarı	54
Şekil 24. Ses şiddeti ölçüm sonuçları.....	57
Şekil 25. pH analiz sonuçları	59
Şekil 26. Akçakale Mağarası'nın risk analizleri sonrası tehlike oranlarına göre sınıflandırılması sonucu	84

1. GİRİŞ

Mağaralar; jeolojik, hidrolojik, biyolojik ve mikroklimatik süreçlerin karşılıklı etkileşimi sonucunda gelişen doğal yeraltı ortamlarıdır. Yüzey sistemlerinden farklı olarak sınırlı doğal ışık, yüksek bağıl nem, düşük veya değişken hava hareketi, karmaşık geçit geometrisi ve kendine özgü canlı topluluklarıyla karakterize edilen bu ortamlar, önemli bir jeolojik ve ekolojik miras niteliği taşımaktadır (Nazik, 2018). Özellikle karstik mağaralar; sarkıt, dikit, sütun, perde ve benzeri speleotem oluşumlarının yanı sıra yeraltı su sistemleri, jeolojik kayıtlar ve hassas ekosistemler barındırmaları nedeniyle bilimsel araştırmalar ve doğa koruma çalışmaları açısından özel bir öneme sahiptir (Ford ve Williams, 2007; Gillieson vd., 2022).

Mağaraların sahip olduğu estetik, bilimsel, kültürel ve rekreasyonel değerler, bu doğal alanların turizm amacıyla kullanımını yaygınlaştırmıştır. Mağara turizmi; ziyaretçilere yeraltı jeomorfolojisini, karstik oluşumları, mağara ekosistemlerini ve bölgenin jeolojik geçmişini doğrudan gözlemlene olanağı sunan, doğa temelli turizmin ve jeoturizmin önemli bileşenlerinden biridir (Nazik ve Bayarı, 2018). Turizme açılan mağaralar, çevre eğitiminin geliştirilmesi ve jeolojik mirasın topluma tanıtılmasının yanı sıra yerel ekonomilere ve bölgesel kalkınmaya da katkıda bulunabilmektedir. Nitekim dünya genelinde turizme açık mağaralar her yıl milyonlarca ziyaretçiyi ağırlamakta; Türkiye’de de mağaraların alternatif turizm kaynakları arasındaki önemi giderek artmaktadır (Külekçi ve Sezen, 2018; Chiarini vd., 2022; Köroğlu, 2024).

Bununla birlikte mağaralar, doğal oluşumları ve kapalı yeraltı koşulları nedeniyle geleneksel turizm alanlarından önemli ölçüde ayrılmaktadır. Düzensiz ve kaygan yüzeyler, sınırlı görüş alanı, dar veya alçak geçitler, değişken tavan duraylılığı, su birikimleri, düşük hava dolaşımı ve mağara atmosferinde meydana gelebilecek değişimler; ziyaretçiler, rehberler, teknik personel ve araştırmacılar açısından farklı nitelikte tehlikeler ortaya çıkarabilmektedir. Mağara ortamında meydana gelen bir olumsuzluğun yer üstündeki açık alanlara göre daha zor fark edilmesi, müdahale olanaklarının sınırlı olması ve tahliye sürecinin güçleşmesi, risklerin sonuçlarını ağırlaştırabilmektedir. Bu nedenle turizme açık veya turizme açılması planlanan mağaralarda ziyaretçi güvenliği, mağaranın doğal yapısının korunmasından ayrı düşünülemeyen temel bir yönetim bileşenidir (Chiarini vd., 2022; Gillieson vd., 2022).

Mağaraların güvenli ve sürdürülebilir biçimde kullanılabilmesi, yalnızca yürüme yolları, aydınlatma sistemleri ve fiziksel erişim düzenlemelerinin yapılmasıyla sağlanamaz. Mağaranın jeolojik, atmosferik, hidrolojik, biyolojik ve mikroklimatik özelliklerinin birlikte değerlendirilmesi; tehlikelerin önceden belirlenmesi, risklerin önem düzeylerine göre sınıflandırılması ve uygun kontrol önlemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, hem insan sağlığı ve güvenliğinin korunması hem de turistik kullanımın mağaranın hassas doğal dengesi üzerindeki etkilerinin sınırlandırılması bakımından önem taşımaktadır. Dolayısıyla mağara turizminin planlanmasında ve sürdürülmesinde sistematik risk değerlendirmesi, güvenli kullanım ile doğal mirasın korunması arasında denge kuran temel bir karar destek aracı olarak ele alınmalıdır (Siler, 2023).

1.1. Mağaraların Turizm Amaçlı Kullanımı ve Güvenlik Gereksinimi

Doğal mağaralar, yüzeyle doğrudan veya dolaylı bağlantısı bulunan ve insanın girebileceği boyutlara ulaşmış yeraltı boşluklarıdır. Bu ortamların fiziksel yapısı; ana kayaç özellikleri, süreksizlikler, yeraltı su hareketleri, yüzeyden gerçekleşen su sızmaları ve uzun süreli jeolojik değişimler tarafından şekillendirilmektedir (Baykara, 2018). Karbonatlı kayaçlarda gelişen karstik mağaralar ise çözünmeye elverişli kayaç yapısı, çatlak ve kırık sistemleri, yeraltı drenajı ve mineral çökelişi gibi süreçlerin etkisi altında bulunan dinamik doğal sistemlerdir. Bununla birlikte, mağara oluşum mekanizmalarının ayrıntılı sınıflandırılmasından bağımsız olarak, bu jeolojik özelliklerin turistik kullanım açısından temel önemi; mağara boşluklarının geometrisini, zemin koşullarını, su hareketini ve kaya kütlelerinin duraylılığını etkileyebilmesinden kaynaklanmaktadır (Ford ve Williams, 2007).

Karstik mağaraların turistik çekiciliği büyük ölçüde sahip oldukları jeolojik ve görsel çeşitliliğe dayanmaktadır. Sarkıt, dikit, sütun, perde, akmataşı ve mağara incisi gibi speleotemler, uzun zaman dilimlerinde gelişen doğal süreçlerin görünür ürünleri olarak mağaralara yüksek estetik ve bilimsel değer kazandırmaktadır (Arpacı vd., 2012). Mağara içindeki tortullar, kaya yüzeyleri, su birikimleri ve mineral oluşumları da geçmiş çevresel koşullara ilişkin bilgiler taşıyan önemli doğal kayıtlardır. Bu özellikler, mağaraların yalnızca rekreasyonel alanlar olarak değil, korunması ve gelecek kuşaklara aktarılması gereken jeolojik miras alanları olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir. Karst ve mağara sistemlerinin turistik, ekolojik, bilimsel ve ekonomik değerlerinin birbiriyle ilişkili olması, bu alanların bütüncül koruma ve yönetim ilkeleri doğrultusunda kullanılmasını zorunlu kılmaktadır (Gillieson vd., 2022).

Mağara turizmi, doğa temelli turizm ve jeoturizm kapsamında ziyaretçilere özgün deneyimler sunarken, mağaraların bulunduğu bölgeler için de önemli bir kalkınma potansiyeli oluşturmaktadır. Ziyaretçi hareketliliği; rehberlik, ulaşım, konaklama, yeme-içme ve yerel ürünlerin değerlendirilmesi gibi farklı ekonomik faaliyetleri destekleyebilmektedir. Türkiye'nin farklı bölgelerinde bulunan karstik mağaralar, sahip oldukları jeolojik oluşumlar ve doğal peyzaj özellikleriyle önemli turistik kaynaklar arasında yer almaktadır. Özellikle Doğu Karadeniz Bölümü'ndeki karstik mağaralara yönelik ziyaretçi sayıları ve jeoturizm çalışmaları, bu doğal alanların bölgesel turizm açısından dikkate değer bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Külekçi ve Sezen, 2018; Köroğlu, 2024).

Bununla birlikte bir mağaranın turistik çekiciliğe sahip olması, doğrudan turizme açılmaya uygun olduğu anlamına gelmemektedir. Turistik kullanımdan önce mağaranın jeolojik duraylılığı, erişilebilirliği, yüzey ve yeraltı su hareketleri, atmosferik koşulları, doğal havalandırma düzeni, biyolojik hassasiyeti ve acil durumlarda tahliye olanakları değerlendirilmelidir (Atasoy ve Ercik, 2021). Turizme açılma sürecinde yapılacak giriş düzenlemeleri, yürüyüş yolları, merdivenler, korkuluklar, aydınlatma sistemleri ve diğer yapısal müdahaleler, ziyaretçi güvenliğini artırırken mağaranın doğal hava dolaşımını, nem dengesini ve ekolojik özelliklerini değiştirebilir. Bu nedenle güvenlik amacıyla gerçekleştirilen her müdahalenin mağaranın doğal sistemine oluşturabileceği etkilerle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Chiarini vd., 2022; De Araujo ve Lobo, 2023).

Mağara turizminin çevresel etkileri yalnızca kalıcı fiziksel düzenlemelerden kaynaklanmamaktadır. Ziyaretçiler tarafından ortama aktarılan vücut ısı ve karbondioksit, kapıların açılmasıyla değişen hava hareketleri, yapay aydınlatma, yüzeylerle fiziksel temas ve ziyaretçi gruplarının oluşturduğu yoğunluk, mağaranın mikroklimatik dengesini etkileyebilmektedir (Gözcü ve Zülkadiroğlu, 2014). Özellikle ziyaretçi sayısının mağaranın doğal taşıma kapasitesini aşması durumunda sıcaklık, bağıl nem ve karbondioksit konsantrasyonlarında değişimler meydana gelebilmekte; yapay ışık kaynaklarının çevresinde istenmeyen biyolojik oluşumlar gelişebilmektedir. Bu nedenle mağara turizminin sürdürülebilirliği, ziyaretçi sayısının ve ziyaret sürelerinin mağaranın hacmi, hava dolaşımı ve çevresel hassasiyetiyle uyumlu biçimde planlanmasına bağlıdır (Chiarini vd., 2022; Miler vd., 2024).

Turistik mağaralarda güvenlik gereksinimi, mağaranın kendine özgü fiziksel ve çevresel koşullarından kaynaklanmaktadır. Doğal ışığın bulunmaması, geçitlerin düzensiz biçimi, bazı alanlarda sınırlı hareket olanağı ve yer yer değişebilen zemin koşulları, ziyaretçilerin çevresel tehlikeleri algılama ve bunlara tepki verme kapasitesini

azaltabilmektedir. Ayrıca dış ortamla hava alışverişinin sınırlı olduğu bölümlerde mağara atmosferinin özellikleri değişebilmekte; yeraltı suyu ve yüzeyden sızan sular ise zemin koşullarını ve güvenli geçiş olanaklarını etkileyebilmektedir. Kaya kütleindeki doğal süresizlikler ve zaman içerisinde meydana gelen çözünme, aşınma veya suya doygunluk değişimleri de bazı alanlarda tavan ve duvar duraylılığı bakımından değerlendirilmesi gereken koşullar oluşturabilmektedir. Akçakale Mağarası üzerine gerçekleştirilen çalışmalar da karstik mağaralarda tavan duraylılığı, gaz birikimi, zemin kayganlığı ve mikroklimatik koşulların bölgesel olarak farklılaşabildiğini ve turistik kullanımdan önce yerel ölçekte incelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Külekçi ve Uçak, 2025).

Mağara ortamındaki güvenlik gereksinimleri, bu alanları kullanan kişilerin görevlerine ve mağarada bulunma sürelerine göre de değişebilmektedir. Ziyaretçiler çoğunlukla mağara koşullarına ilişkin sınırlı bilgi ve deneyime sahip olduklarından, güvenli güzergâhlar, anlaşılır yönlendirmeler, yeterli aydınlatma ve rehber gözetimi temel gereksinimlerdir. Rehberler, ziyaretçi grubunun düzenini sağlamanın yanı sıra olası bir tehlikeyi erken fark etme ve acil durumlarda ilk yönlendirmeyi gerçekleştirme sorumluluğunu taşımaktadır. Teknik personel; aydınlatma, yürüyüş platformları, havalandırma, izleme sistemleri ve diğer altyapı bileşenlerinin kurulması veya bakımında, ziyaretçilere kıyasla daha uzun süre ve daha farklı koşullarda mağara ortamına maruz kalabilmektedir. Araştırmacılar ise ana ziyaret güzergâhlarının dışındaki dar, eğimli, ıslak veya duraysız alanlarda çalışabildiğinden daha özel güvenlik düzenlemelerine ihtiyaç duyabilmektedir (Selçuk, 2023).

Bu farklı kullanıcı gruplarının tamamı açısından güvenli kullanımın sağlanabilmesi, mağaraya girişten önce başlayan ve ziyaret ya da çalışma tamamlandıktan sonra da devam eden bütüncül bir yönetim anlayışını gerektirmektedir. Güzergâhların taşıdığı tehlikelerin belirlenmesi, ziyaretçi hareketlerinin kontrol edilmesi, görevli personelin eğitilmesi, acil durum iletişim ve tahliye düzeninin oluşturulması, ilk yardım ve mağara kurtarma olanaklarının planlanması bu anlayışın temel bileşenleridir. Uluslararası mağara yönetimi ilkelerinde de ziyaretçi güvenliğinin turizme açık mağaraların temel hedeflerinden biri olması; geçiş yolları, baş mesafesi, korkuluklar, acil erişim, personel eğitimi ve kurtarma planlamasının mağaranın özelliklerine göre düzenlenmesi gerektiği vurgulanmaktadır (International Show Caves Association vd., 2014).

Güvenlik yönetiminin yalnızca görünür tehlikelere yönelik tek seferlik kontrollerle sınırlandırılması yeterli değildir. Mağaralar; su hareketi, mevsimsel dış

sıcaklık değişimleri, doğal havalandırma, kaya yüzeylerindeki bozulma ve ziyaretçi yoğunluğu gibi faktörlerin etkisiyle zaman içerisinde değişebilen ortamlardır. Bu nedenle mağara içi koşulların düzenli olarak izlenmesi, daha önce belirlenen risklerin yeniden değerlendirilmesi ve kontrol önlemlerinin güncel verilere göre iyileştirilmesi gerekmektedir. Risk yönetiminin sürekliliği, hem çalışanların ve ziyaretçilerin korunmasını hem de mağaranın doğal yapısına gereksiz ve geri döndürülemez müdahalelerin önlenmesini desteklemektedir (Palmer, 2007).

Sonuç olarak mağaraların turizm amaçlı kullanımı, doğal mirasın tanıtılması ve bölgesel kalkınmanın desteklenmesi bakımından önemli fırsatlar sunmakla birlikte, bu kullanım biçimi mağara ortamının doğal tehlikeleri ve insan faaliyetlerinden kaynaklanan etkiler nedeniyle dikkatli bir planlama gerektirmektedir. Turizme açılacak bir mağaranın güvenliği, yalnızca ziyaretçilerin belirlenen bir güzergâh boyunca hareket edebilmesiyle değil; mağaranın jeolojik, hidrolojik, atmosferik, mikroklimatik ve biyolojik özelliklerinin birlikte değerlendirilmesiyle sağlanabilir. Bu çerçevede Akçakale Mağarası'nın turizm amaçlı kullanımının değerlendirilmesi, mağaranın farklı bölümlerinde ortaya çıkabilecek tehlikelerin sistematik biçimde belirlenmesini ve ziyaretçiler, rehberler, teknik personel ile araştırmacılar açısından kabul edilebilir bir güvenlik düzeyinin oluşturulmasını gerekli kılmaktadır.

1.2. Turizme Açık Mağaralarda İş Sağliğı ve Güvenliği Riskleri

Turizme açık mağaralar, ziyaretçilerin kontrollü biçimde kabul edildiği doğal alanlar olmakla birlikte, geleneksel turizm tesislerinden ve yüzeydeki çalışma ortamlarından önemli ölçüde farklı koşullara sahiptir. Mağaraların doğal olarak gelişen düzensiz geometrisi, sınırlı giriş ve çıkış olanakları, karanlık ortamı, yüksek nemi, değişken hava hareketleri ve yer yer suyla ilişkili yapısı, farklı tehlike kaynaklarının aynı ortamda bir araya gelmesine neden olmaktadır. Bu nedenle mağara güvenliği yalnızca ziyaretçilerin yürüyüş güzergâhında karşılaşılabileceği görünür tehlikelerle sınırlandırılmaz. Jeolojik, fiziksel, atmosferik, kimyasal, mikroklimatik, biyolojik, ergonomik, psikososyal, hidrolojik ve çevresel risklerin birbirleriyle olan etkileşimleri de dikkate alınmalıdır. Uluslararası mağara yönetimi yaklaşımlarında da turizme açık mağaraların güvenliği; mağaranın doğal yapısı, ziyaretçi kapasitesi, geçiş yolları, aydınlatma, hava koşulları, radon, biyolojik yaşam ve sürekli izleme gereksinimiyle birlikte ele alınmaktadır (Chiarini vd., 2022; International Show Caves Association vd., 2014).

Mağara ortamlarındaki en önemli tehlike gruplarından biri jeolojik ve yapısal risklerdir. Karstik boşlukların tavan ve duvarlarında bulunan tabakalanma yüzeyleri, çatlaklar, kırıklar, ayrılmış kaya parçaları ve süreksizlik sistemleri, kaya kütlelerinin duraylılığını doğrudan etkileyebilmektedir. Yeraltı ve yüzey sularının çatlaklar boyunca ilerlemesi, kayaçların fiziksel ve kimyasal özelliklerinde zaman içerisinde değişime yol açabilmekte; bu durum gevşek blokların hareket etmesine, yüzeyden parça kopmasına veya sınırlı alanlarda tavan duraysızlığına neden olabilmektedir. Özellikle mağara tavanının yüzeye yakın olduğu, kaya örtü kalınlığının azaldığı, süreksizlik yoğunluğunun arttığı veya su sızıntılarının belirginleştiği bölümlerde yapısal risklerin yerel olarak yükselmesi mümkündür (Aytaç vd., 2024). Altamira Mağarası'nda gerçekleştirilen bütünleşik araştırmalar, mağara tavanındaki çatlak, kırık ve ayrılma sistemlerinin hem yapısal duraylılık hem de koruma koşulları bakımından ayrıntılı biçimde incelenmesi gerektiğini göstermiştir (Bayarri vd., 2023). Benzer şekilde Akçakale Mağarası'na yönelik çalışma, tavan çökmesi ve kaya bloklarının duraylılığının mağaranın her bölümünde aynı düzeyde olmadığını ve risklerin bölgesel özelliklere göre değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur (Külekçi ve Uçak, 2025).

Jeolojik tehlikelerin önemi yalnızca doğrudan kaya düşmesi veya çökme olasılığından kaynaklanmamaktadır. Mağara içerisindeki bir kaya düşmesi, yürüyüş yolunu kapatabilir, aydınlatma veya iletişim altyapısına zarar verebilir ve tahliye güzergâhının kullanılmasını engelleyebilir. Bu nedenle yüzeyde sınırlı sonuç doğurabilecek bir yapısal olay, mağaranın kısıtlı kaçış ve müdahale koşulları nedeniyle daha ağır sonuçlara yol açabilir (Özşahin, 2014). Ayrıca ziyaretçilerin doğal oluşumlara temas etmesi, gevşek kaya ve bloklara basması veya belirlenmiş güzergâhların dışına çıkması, mevcut duraysızlıkların harekete geçmesine neden olabilecek ikincil etkiler oluşturabilir. Jeolojik risklerin zamana bağlı olarak değişebilmesi, mağara tavanı ve duvarlarının yalnızca turizme açılma aşamasında değil, kullanım süresince de değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu yönüyle mağara güvenliği, statik bir yapı kontrolünden çok jeolojik, hidrolojik ve çevresel değişimlerin birlikte izlendiği dinamik bir süreç olarak ele alınmalıdır (Gillieson vd., 2022).

Turizme açık mağaralarda fiziksel riskler, ziyaretçi ve çalışanların en sık karşılaşılabileceği tehlikeler arasında bulunmaktadır. Doğal ışığın bulunmaması, yapay aydınlatmanın bazı alanlarda yetersiz kalması, ışık ve gölge arasındaki ani geçişler ve ıslak yüzeylerde meydana gelen yansımalar, çevresel tehlikelerin algılanmasını güçleştirebilir (Aktürk ve Karadağ, 2020). Düzensiz taban yapısı, basamaklar, eğimli

yüzeyler, su ve çamur birikimleri ile düşük tavan açıklıkları; kayma, takılma, düşme, baş çarpması ve sıkışma gibi olayların meydana gelme olasılığını artırmaktadır. Caving kazalarına ilişkin epidemiyolojik incelemelerde düşmelerin yaralanmaların başlıca nedenleri arasında yer aldığı ve çoğunlukla ortopedik travmalarla sonuçlandığı belirlenmiştir (Stella-Watts vd., 2012). Turistik mağaralarda güzergâhların düzenlenmiş olması bu riski azaltmakla birlikte, zeminin doğal ve değişken yapısı nedeniyle riski bütünüyle ortadan kaldırmamaktadır. Yaşlılar, çocuklar, hareket kısıtlılığı bulunan kişiler ve mağara deneyimi olmayan ziyaretçiler, aynı fiziksel koşullardan daha yüksek düzeyde etkilenebilmektedir.

Mağara içerisindeki dar geçitler, düşük tavanlar, keskin kaya çıkıntıları ve görüş mesafesinin sınırlı olması, ziyaretçilerin yanı sıra rehberler, bakım personeli ve araştırmacılar açısından da fiziksel güvenlik sorunları oluşturmaktadır. Teknik personel ve araştırmacılar, ziyaretçilere kıyasla ana güzergâhın dışında kalan daha dar, eğimli, ıslak veya düzensiz alanlarda bulunabilmekte ve buralarda daha uzun süre çalışabilmektedir. Bu durum, yaralanma ve düşmenin yanında yorgunluk, ısı kaybı ve hareket kabiliyetinin azalması gibi riskleri de artırmaktadır. Mağarada meydana gelen bir yaralanmanın sonuçları, sağlık ekibinin olay yerine ulaşmasının ve yaralı kişinin dışarı çıkarılmasının uzun sürmesi nedeniyle yüzeydeki benzer bir yaralanmadan daha ciddi olabilir. Dolayısıyla fiziksel tehlikelerin değerlendirilmesinde yalnızca olayın meydana gelme olasılığı değil, mağara ortamındaki kurtarma ve tahliye güçlükleri de dikkate alınmalıdır (Balkaner ve Aymankuy, 2023).

Aydınlatma yetersizliğinin yanı sıra kullanılan elektrikli sistemler, ziyaretçi konuşmaları, bakım faaliyetleri ve teknik ekipmanlar da mağara içerisindeki fiziksel ortamı etkileyebilir. Özellikle geniş salonlar ve sert kaya yüzeyleri sesi yansıtarak belirli noktalarda rahatsız edici ses düzeyleri oluşturabilir. Sürekli veya ani yüksek sesler, çalışanların iletişimini güçleştirebilir, ziyaretçi gruplarında dikkat dağılmasına neden olabilir ve acil durum uyarılarının algılanmasını olumsuz etkileyebilir. Benzer biçimde mağara içi sıcaklık koşulları çoğunlukla yüzeye göre daha kararlı olmasına rağmen, uzun süreli maruziyet, ıslak kıyafetler, düşük hava hareketi ve yüksek nem nedeniyle termal konfor bozulabilir. Ziyaretçiler için kısa süreli olan bu maruziyet, rehberler, bakım personeli ve araştırmacılar bakımından tekrarlanan veya uzun süreli bir çalışma koşuluna dönüşebilmektedir (Çiçekdağı ve Fidan, 2015).

Atmosferik ve kimyasal riskler, mağara ortamlarında doğrudan gözle veya koku yoluyla her zaman fark edilememeleri nedeniyle özel önem taşımaktadır. Mağaraların doğal havalandırması; giriş sayısı, galeri geometrisi, mağara içi ve dış ortam arasındaki

sıcaklık farkı, mevsim, atmosfer basıncı ve su hareketleri gibi değişkenlerden etkilenmektedir. Hava hareketinin sınırlı olduğu kapalı veya derin bölümlerde karbondioksit, radon ve kaynak bulunması hâlinde diğer gazlar birikebilir. Aynı zamanda bazı gazların ortamda bulunması, solunabilir oksijen oranının azalmasına neden olabilir. Oksijen yetersizliği; karar verme yeteneğinde azalma, koordinasyon bozukluğu, baş dönmesi, bilinç kaybı ve ileri düzeylerde yaşamı tehdit eden sonuçlar doğurabilecek bir atmosferik tehlikedir. Oksijen düzeyindeki azalma her zaman koku, renk veya görünür bir belirtiyiyle fark edilemediğinden yalnızca kişisel algıya dayalı değerlendirme yeterli değildir (Spelce ve McKay, 2016).

Karbondioksit, mağara atmosferinde toprak ve epikarsttan gelen hava, organik faaliyetler, karbonat dengesi, su hareketleri ve insan solunumu gibi farklı kaynaklarla ilişkilendirilebilir. Karbondioksitin havadan daha yoğun olması, hava hareketinin zayıf olduğu çukur alanlarda ve düşük kotlarda birikme olasılığını artırabilir. Konsantrasyonun yükselmesi; baş ağrısı, nefes darlığı, dikkat azalması ve fizyolojik zorlanma gibi etkiler oluşturabilir. Bununla birlikte mağara içerisindeki karbondioksit dağılımı sabit değildir ve mevsimsel havalandırma rejimine göre önemli ölçüde değişebilir. Škocjan Mağaraları'nda yapılan sürekli izleme çalışmaları, ziyaretlerin ve kapıların açılmasının mağara sıcaklığı ile karbondioksit konsantrasyonunu etkilediğini; sıcaklığın doğal düzeye daha hızlı dönebilmesine karşılık karbondioksitteki değişimlerin daha uzun süre devam edebildiğini göstermiştir (Debevec ve Rakovec, 2021). Bu nedenle tek bir noktada ve tek bir zamanda gerçekleştirilen ölçüm, mağaranın tüm bölümlerindeki atmosferik koşulları temsil etmeyebilir.

Karbonmonoksit, metan ve hidrojen sülfür her doğal mağarada bulunması beklenen gazlar değildir; ancak jeolojik yapı, organik madde ayrışması, yeraltı suyu, yakın çevredeki insan faaliyetleri, yakıtla çalışan ekipmanlar veya dış ortamdan taşınım gibi uygun kaynak ve koşullar bulunduğunda değerlendirilmesi gereken tehlikelerdir. Karbonmonoksit, renksiz ve kokusuz olması nedeniyle fark edilmeden toksik etki gösterebilir. Hidrojen sülfür düşük düzeylerde belirgin bir kokuya sahip olsa da yüksek konsantrasyonlarda koku alma duyusunu baskılayabileceğinden kokunun bulunmaması güvenli bir atmosfer göstergesi olarak kabul edilemez. Metan ise toksik etkisinden çok ortam oksijenini azaltabilmesi ve uygun konsantrasyonlarda yanıcı veya patlayıcı atmosfer oluşturabilmesi nedeniyle önem taşımaktadır. Bu gazlara ilişkin risk düzeyi, her mağaranın jeolojik ve çevresel koşulları temelinde ayrı olarak değerlendirilmelidir (Doğan, 2024).

Radon, uranyum içeren kayaç ve topraklarda doğal bozunma sonucunda oluşabilen radyoaktif bir gazdır. Yeraltı ortamlarında sınırlı havalandırma nedeniyle birikebilmesi, mağaralarda özellikle mesleki maruziyet açısından dikkate alınmasını gerektirmektedir. Radon riski, kısa süreli ve seyrek ziyaret gerçekleştiren turistlerle karşılaştırıldığında, mağara içerisinde düzenli çalışan rehberler, güvenlik görevlileri, bakım personeli ve araştırmacılar için daha yüksek önem taşıyabilir. Dünya Sağlık Örgütü, radonu akciğer kanseri açısından önemli bir çevresel risk etmeni olarak değerlendirmekte ve uzun süreli maruziyetin azaltılmasına yönelik ölçüm ve yönetim programlarının önemini vurgulamaktadır (World Health Organization, 2009). Uluslararası turistik mağara kılavuzlarında da radon, mağara yöneticilerinin ve çalışanlarının maruziyet süreleri dikkate alınarak izlenmesi gereken başlıca atmosferik unsurlardan biri olarak gösterilmektedir (International Show Caves Association vd., 2014).

Mağara mikrokliması, atmosferik ve fiziksel risklerin biçimlenmesinde belirleyici rol oynamaktadır. Mağaraların derin bölümlerinde sıcaklık çoğunlukla dış ortama göre daha kararlı olmakla birlikte, bağıl nem genellikle yüksektir ve hava hareketi bölümler arasında önemli farklılık gösterebilir. Yüksek nem, yüzeylerde yoğunlaşmayı ve zemin kayganlığını artırabilir; elektrikli ekipmanların ve ölçüm cihazlarının performansını etkileyebilir ve çalışanların termal konforunu bozabilir. Düşük hava hareketi ise karbondioksit, radon veya diğer gazların belirli bölgelerde kalma süresini artırabilir. Mağara kapılarının açılması, yapay havalandırma, aydınlatma sistemleri ve ziyaretçi grupları, doğal mikroklimatik dengeyi geçici veya kalıcı biçimde değiştirebilir. Ziyaretçilerin vücut ısısı ve solunumu mağara havasına ısı, nem ve karbondioksit kazandırırken, yürüyüş hareketleri tabandaki ince parçacıkların yeniden havalanmasına neden olabilir (Yozcu, 2020).

Škocjan Mağaraları'nda gerçekleştirilen araştırma, turist ziyaretlerinin mağara sıcaklığı, karbondioksit ve farklı boyutlardaki partikül madde konsantrasyonları üzerinde doğrudan ve mevsimsel olarak değişen etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Ziyaretçi sayısının yüksek olduğu yaz döneminde mikroklimatik ve partikül madde etkilerinin daha belirgin olduğu; ziyaretçi hareketlerinin, kapıların açılmasının, bakım faaliyetlerinin ve dış ortam kaynaklarının mağara havasının özelliklerini değiştirebildiği belirlenmiştir (Miler vd., 2024). Bu durum mikroklimatik risklerin yalnızca doğal koşullardan değil, turistik işletme faaliyetlerinden de etkilenebildiğini göstermektedir. Dolayısıyla ziyaretçilerin mağara üzerindeki etkisi ile mağara koşullarının ziyaretçiler ve çalışanlar üzerindeki etkisi karşılıklı bir ilişki içerisinde değerlendirilmelidir.

Biyolojik riskler, mağara ekosisteminde doğal olarak bulunan mikroorganizmalar, mantarlar, sporlar, yarasalar ve diğer canlılarla ilişkilidir. Mağara havasında veya nemli yüzeylerde bulunan biyolojik etkenler, duyarlı kişilerde alerjik reaksiyonlara ve solunum sistemi yakınmalarına neden olabilir. Özellikle yarasa ve kuş dışkılarıyla zenginleşmiş toprak veya tortuların bozulması, havaya mantar sporlarının karışmasına yol açabilir (Ağar, 2021). Histoplasma türleriyle kirlenmiş materyalin bulunduğu alanlarda çalışan veya araştırma yapan kişiler açısından inhalasyon yoluyla histoplazmoz riski ortaya çıkabilmektedir. NIOSH, mağaralarda çalışma ile yarasa veya kuş dışkısının bozulmasını mesleki histoplazmoz bakımından değerlendirilmesi gereken faaliyetler arasında göstermektedir (National Institute for Occupational Safety and Health, 2022). Bununla birlikte biyolojik risklerin varlığı ve düzeyi mağaradan mağaraya değişmekte; mağaradaki canlı toplulukları, organik birikim, nem, hava hareketi ve insan faaliyetleri tarafından belirlenmektedir.

Yarasalarla doğrudan temas, ısırılma veya tırmalanma gibi olayların yanı sıra mağara ekosisteminin bozulması bakımından da önem taşımaktadır. Ziyaretçi yoğunluğu, gürültü, ışık ve fiziksel yaklaşım, yarasaların dinlenme, üreme ve kışlama davranışlarını etkileyebilir (Albayrak, 2012). Bu nedenle biyolojik risk yönetimi yalnızca insanların mikroorganizma veya hayvanlardan korunmasını değil, ziyaretçilerin mağara canlıları üzerindeki etkilerinin sınırlandırılmasını da içermektedir. Mağara ekosisteminin bozulması, biyolojik çeşitlilik kaybının yanında organik madde döngüsü ve mikroklimatik denge üzerinde dolaylı değişiklikler meydana getirebilir. Bu yönüyle biyolojik güvenlik, iş sağlığı ve güvenliği ile mağara koruma hedeflerinin kesiştiği alanlardan biridir (Gillieson vd., 2022).

Ergonomik riskler, mağara içindeki geçit geometrisi ve çalışma biçimiyle doğrudan ilişkilidir. Dar ve alçak galerilerde eğilerek, çömelerek veya emekleyerek ilerleme; düzensiz yüzeylerde dengeyi koruma, ekipman taşıma ve uzun süre sabit olmayan pozisyonlarda çalışma, kas-iskelet sistemi üzerinde önemli fiziksel yük oluşturabilir. Rehberlerin aynı güzergâhı gün içerisinde birden fazla kez kullanması, bakım personelinin araç ve malzeme taşıması ve araştırmacıların ölçüm sırasında zorlayıcı vücut pozisyonlarını sürdürmesi, ergonomik maruziyeti artırabilir. Islak zemin, düşük sıcaklık, yüksek nem ve sınırlı görüş gibi çevresel koşullar fiziksel yorgunluğu artırarak dikkat, denge ve hareket koordinasyonunun azalmasına neden olabilir. Bu nedenle ergonomik riskler, düşme ve çarpma gibi fiziksel risklerden bağımsız değil, onların meydana gelme olasılığını artırabilen tamamlayıcı unsurlar olarak değerlendirilmelidir (Aksüt vd., 2020).

Mağara ortamlarının kapalı, karanlık ve alışılmadık yapısı psikososyal riskler de doğurabilmektedir. Dar geçitler, çıkışın görülmemesi, derinlik algısının kaybolması, karanlık, kalabalık ziyaretçi grupları ve beklenmeyen sesler bazı kişilerde kaygı, klostrofobik tepki, yön kaybı veya panik oluşturabilir. Panik durumunda bireyin hızlı ve kontrolsüz hareket etmesi, ziyaretçi grubundan ayrılması veya dar bir alanda geri dönmeye çalışması ikincil yaralanmalara yol açabilir. Acil durumda aydınlatmanın veya iletişimin kesilmesi, psikolojik tepkinin şiddetini artırarak tahliye düzenini bozabilir. Mağara kazalarına ilişkin araştırmalar, ortamın sınırlı erişim koşullarının yaralıya ulaşma ve tahliye sürelerini uzatabildiğini göstermektedir (Stella-Watts vd., 2012). Bu nedenle mağara içerisindeki psikososyal riskler, yalnızca bireysel rahatsızlık olarak değil, grup güvenliğini ve acil durum yönetimini etkileyebilecek bir İSG unsuru olarak ele alınmalıdır (Taşdemir ve Paksoy, 2021).

Hidrolojik ve çevresel riskler de karstik mağaraların güvenlik profilinin temel bileşenlerindendir. Yüzeyden sızan yağış suları, mağara içerisindeki aktif veya dönemsel akışlar, damlama alanları ve taban çukurlarındaki su birikimleri, yürüyüş güzergâhlarının koşullarını kısa sürede değiştirebilir. Yoğun yağış dönemlerinde yeraltı su seviyesinin yükselmesi veya debinin artması, daha önce geçilebilir olan alanların su altında kalmasına ve tahliye güzergâhlarının kesilmesine neden olabilir. Karstik sistemlerde suyun çatlak ve kanallar boyunca hızlı biçimde taşınabilmesi, yüzeydeki yağış ile mağara içindeki hidrolik tepki arasında karmaşık bir ilişki oluşturur. Su hareketi aynı zamanda kaya yüzeylerinde ayrışmayı, gevşek malzeme taşınmasını, çamur oluşumunu ve zemin kayganlığını artırarak jeolojik ve fiziksel riskleri de etkileyebilir (Çelik vd., 2023).

Mevsimsel değişimler, mağara içerisindeki hava dolaşımını, nemi, sıcaklığı, gaz dağılımını ve su hareketini birlikte değiştirebilir. Bu nedenle kurak bir dönemde yapılan gözlem ve ölçümlerin yağışlı dönemin risklerini bütünüyle temsil etmesi beklenemez. Benzer şekilde ziyaretçi yoğunluğunun arttığı dönemlerde oluşan mikroklimatik etkiler ile düşük ziyaretçi sayısına sahip dönemlerdeki koşullar farklılık gösterebilir. Akçakale Mağarası'nda gerçekleştirilen bölgesel değerlendirmeler de karbondioksit birikimi, zemin kayganlığı ve tavan duraylılığı gibi tehlikelerin mağaranın farklı bölümlerinde farklı düzeylerde ortaya çıkabildiğini göstermektedir (Külekçi ve Uçak, 2025). Bu durum risk değerlendirmesinin yalnızca mağara genelini temsil ettiği varsayılan tek bir ölçüm noktasına dayandırılmaması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Mağara ortamlarındaki risklerin önemli bir özelliği, tek başlarına değil, birbirlerini güçlendiren bir yapı içinde ortaya çıkmalarıdır. Örneğin yüksek nem ve su

sızıntısı zeminin kayganlaşmasına yol açarken aynı zamanda kaya yüzeylerinin ayrışmasını ve ekipmanların performans kaybını hızlandırabilir. Düşük hava hareketi karbondioksit ve radon birikimini kolaylaştırırken yüksek nemle birlikte termal konforu olumsuz etkileyebilir. Yetersiz aydınlatma, düzensiz zeminin algılanmasını güçleştirerek düşme riskini artırabilir; bu sırada dar geçitler ve kalabalık ziyaretçi grupları tahliyeyi yavaşlatabilir. Benzer biçimde fiziksel yorgunluk, düşük görüş ve psikolojik stresin aynı anda ortaya çıkması, bireyin karar verme ve denge yeteneğini azaltabilir. Dolayısıyla mağaralardaki İSG risklerinin yalnızca ayrı tehlike listeleri şeklinde ele alınması, gerçek risk profilinin eksik değerlendirilmesine neden olabilir.

Sonuç olarak turizme açık mağaralarda iş sağlığı ve güvenliği; jeolojik duraylılık, fiziksel erişim koşulları, mağara atmosferi, mikroklima, biyolojik yaşam, kullanıcıların fiziksel ve psikolojik özellikleri ile mevsimsel çevre değişimlerinin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Risklerin mağara bölümleri, kullanıcı grupları ve kullanım sürelerine göre farklılaşması, genel ve değişmez bir güvenlik değerlendirmesi yapılmasını güçleştirmektedir. Ziyaretçiler için kısa süreli olan bir maruziyet, rehberler ve teknik personel bakımından tekrarlanan mesleki maruziyete dönüşebilmekte; ana ziyaret güzergâhında düşük olan bir risk, araştırmacıların veya bakım çalışanlarının bulunduğu güzergâh dışı alanlarda yükselebilmektedir. Bu çok boyutlu yapı, mağara ortamındaki tehlikelerin sistematik olarak tanımlanmasını, risklerin karşılaştırılabilir biçimde önceliklendirilmesini ve değişen koşullar doğrultusunda yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu gereklilik, turizme açık mağaralarda uygulanabilecek sistematik risk değerlendirme yaklaşımlarının ve bu kapsamda FMEA ile HAZOP yöntemlerinin incelenmesine bilimsel bir temel oluşturmaktadır.

1.3. Mağara Güvenliğinde Risk Değerlendirmesi ve FMEA HAZOP Yaklaşımları

Turizme açık veya turizme açılması planlanan mağaralarda güvenliğin sağlanabilmesi, mevcut tehlikelerin yalnızca gözlemsel olarak tanımlanmasıyla sınırlı olmayan, sistematik ve tekrarlanabilir bir risk değerlendirme sürecini gerekli kılmaktadır. Önceki bölümde ele alındığı üzere mağara ortamları; jeolojik duraysızlık, sınırlı görüş, düzensiz ve kaygan zeminler, atmosferik değişimler, yüksek nem, su varlığı, biyolojik etkenler ve tahliye güçlükleri gibi farklı risk kaynaklarını aynı fiziksel ortam içerisinde barındırabilmektedir. Bu risklerin birbirlerinden bağımsız olmaması, bazı tehlikelerin diğerlerinin ortaya çıkma olasılığını veya sonuçlarının şiddetini artırabilmesi ve mağara içerisindeki koşulların mekânsal ve zamansal olarak

değişebilmesi, risk değerlendirmesini mağara güvenliğinin temel bileşenlerinden biri hâline getirmektedir. Risk değerlendirmesinin temel amacı, tehlike kaynaklarının sistematik biçimde belirlenmesi, bunlardan kaynaklanabilecek olumsuz sonuçların analiz edilmesi, risklerin göreceli önemlerinin ortaya konulması ve kontrol gerektiren alanların önceliklendirilmesidir. Bu yaklaşım, risk yönetiminin yalnızca bir tehlike listesi oluşturma faaliyeti değil, karar verme ve kaynakların uygun risk alanlarına yönlendirilmesini destekleyen sürekli bir süreç olduğunu göstermektedir (International Organization for Standardization [ISO], 2018).

Türkiye’de iş sağlığı ve güvenliğinin yasal çerçevesini oluşturan 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu’nda risk değerlendirmesi; mevcut veya dışarıdan kaynaklanabilecek tehlikelerin belirlenmesi, bu tehlikelerin riske dönüşmesine yol açan faktörlerin incelenmesi, risklerin analiz edilerek derecelendirilmesi ve kontrol tedbirlerinin kararlaştırılması amacıyla yürütülen çalışmalar bütünü olarak tanımlanmaktadır. Kanun aynı zamanda çalışma ortamında gerekli kontrol, ölçüm, inceleme ve araştırmaların gerçekleştirilmesini risk değerlendirmesinin önemli bir bileşeni olarak ele almaktadır (6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 2012). İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği ise fiziksel, kimyasal, biyolojik, psikososyal, ergonomik ve benzeri tehlikelerin hem tekil olarak hem de birbirleriyle etkileşimleri dikkate alınarak değerlendirilmesini öngörmektedir. Yönetmelikte ayrıca tehlike ve risklerin niteliğine, çalışma ortamının özelliklerine ve ulusal veya uluslararası standartlara göre bir veya birden fazla risk analiz yönteminin birlikte kullanılabileceği açıkça belirtilmektedir. Bir ortamın farklı özelliklere sahip bölümlerden oluşması durumunda bu bölümlerin ayrı ayrı değerlendirilmesi, ancak nihai risk profilinin bölümler arasındaki etkileşimler dikkate alınarak bütüncül biçimde ele alınması gerektiği de düzenlenmiştir. Bu yaklaşım, koşulların mağaranın farklı kesimlerinde değişebildiği doğal yeraltı ortamları bakımından özellikle önem taşımaktadır.

Risk değerlendirmesinde kullanılacak yöntemin seçimi, incelenen ortamın özellikleri ve çalışmanın amaçlarıyla doğrudan ilişkilidir. Mağara gibi çok sayıda farklı tehlike kaynağının aynı ortamda bulunduğu sistemlerde, yalnızca tek bir değerlendirme yaklaşımının kullanılması bazı risk ilişkilerinin yeterince görünür hâle getirilememesine neden olabilir. Bu nedenle risklerin bir yandan ayrı tehlike veya başarısızlık biçimleri üzerinden değerlendirilmesi, diğer yandan mevcut koşullardan meydana gelebilecek sapmaların olası neden ve sonuçlarıyla birlikte incelenmesi daha kapsamlı bir değerlendirme sağlayabilir. Bu bağlamda Hata Türleri ve Etkileri Analizi (Failure

Modes and Effects Analysis [FMEA]) ile Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (Hazard and Operability Study [HAZOP]), farklı analitik bakış açılarına sahip ancak birbirini tamamlayabilecek iki sistematik yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

FMEA, bir sistem, süreç veya faaliyetin beklenen işlevini yerine getirememesine yol açabilecek hata türlerinin belirlenmesi ve bu hata türlerinin oluşturabileceği etkilerin sistematik olarak değerlendirilmesi amacıyla kullanılan yapılandırılmış bir analiz yöntemidir. IEC 60812:2018 standardına göre FMEA'nın temel işlevi, bir bileşenin veya sürecin hangi biçimlerde başarısız olabileceğini belirlemek, bu başarısızlıkların yerel veya genel etkilerini incelemek ve gerektiğinde nedenlerini ortaya koyarak müdahale gerektiren konuların önceliklendirilmesini desteklemektir. Standardın uygulama kapsamı yalnızca fiziksel ekipmanlarla sınırlı olmayıp yazılım, süreçler, insan eylemleri ve bunların karşılıklı etkileşimlerini de içermektedir. Bu özellik, FMEA'nın yalnızca üretim veya makine güvenilirliği çalışmalarında değil, farklı bileşenlerden oluşan güvenlik sistemlerinde de kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır (International Electrotechnical Commission [IEC], 2018).

Mağara güvenliği bakımından değerlendirildiğinde FMEA'nın temel katkısı, birbirinden farklı nitelikteki tehlikelerin ortak ve yapılandırılmış bir değerlendirme çerçevesi içerisinde ele alınabilmesidir. Mağara içerisinde kaya veya blok duraysızlığı, atmosferik koşulların değişmesi, yürüme güzergâhının güvenliğini kaybetmesi, aydınlatmanın yetersiz kalması veya iletişim ve tahliye imkânlarının belirli koşullarda işlevini yerine getirememesi gibi durumlar, güvenlik sistemi açısından olası başarısızlık biçimleri olarak kavramsallaştırılabilir. Bu noktada FMEA'nın değeri yalnızca tehlikenin varlığını göstermekten değil, söz konusu tehlikenin nedenlerini ve ortaya çıkması durumunda insan sağlığı, güvenli kullanım veya mağara işletilebilirliği üzerindeki muhtemel etkilerini aynı analitik çerçevede ilişkilendirebilmesinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, mağaraya özgü hangi tehlikelerin hangi değerlendirme ölçütlerine göre analiz edileceği ve nasıl önceliklendirileceği yöntemin uygulama aşamasına ilişkin olduğundan, bu ayrıntıların giriş bölümünde değil Materyal ve Yöntem bölümünde açıklanması daha uygundur.

HAZOP ise FMEA'dan farklı olarak, incelenen sistem veya faaliyette beklenen ya da referans kabul edilen koşullardan meydana gelebilecek sapmaların sistematik biçimde sorgulanmasına dayanmaktadır. IEC 61882:2016 standardında HAZOP; sistemlerdeki tehlikelerin ve işletilebilirlik sorunlarının belirlenmesi amacıyla rehber kelimeler yardımıyla gerçekleştirilen yapılandırılmış bir inceleme yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Yöntem; sistemin tanımlanması, inceleme sınırlarının belirlenmesi,

olası saptmaların oluşturulması, saptmaların neden ve sonuçlarının değerlendirilmesi ve elde edilen bulguların kayıt altına alınması esasına dayanmaktadır (IEC, 2016). Bu nedenle HAZOP’un temel analitik sorusu, bir sistemde yalnızca “hangi tehlike bulunmaktadır?” biçiminde değil, “beklenen koşuldan hangi biçimde sapma meydana gelebilir ve bu sapmanın sonuçları ne olabilir?” şeklinde kurulmaktadır.

HAZOP’un bu özelliği, fiziksel ve çevresel parametrelerin belirli referans koşullar çevresinde değiştiği doğal yeraltı ortamlarının değerlendirilmesi açısından yöntemsel bir potansiyel taşımaktadır. Mağara atmosferi, hava hareketi, sıcaklık, nem, su varlığı, görüş koşulları, geçiş imknları ve yapısal durum gibi değişkenler zaman içerisinde veya mağaranın farklı kesimlerinde değişebilmektedir. Bu değişkenlerin normal veya beklenen davranışlarından gerçekleşen saptmalar, insan sağlığı ve güvenliği üzerinde farklı sonuçlar oluşturabilir. Dolayısıyla HAZOP’un sapma temelli yaklaşımının mağara ortamına aktarılması, çevresel koşulların yalnızca ölçülen mevcut değerleri üzerinden değil, güvenliği bozabilecek olası değişim senaryoları üzerinden de değerlendirilmesini sağlayabilir. Burada mağaraya uyarlanabilirlik, IEC 61882’nin sistem ve süreçlere yönelik genel yaklaşımından hareketle yapılan yöntemsel bir değerlendirmedir; HAZOP’un turistik doğal mağaralar için özel olarak geliştirilmiş bir yöntem olduğu anlamına gelmemektedir.

FMEA ve HAZOP arasındaki temel farklılık aynı zamanda iki yöntemin birlikte kullanımının gerekçesini oluşturmaktadır. FMEA, sistem içerisindeki belirli hata veya tehlike türlerini tanımlama, bunların neden ve etkilerini ilişkilendirme ve risklerin göreli önemini ortaya koyma yönünde güçlü bir yapı sunarken; HAZOP, beklenen koşullardan gerçekleşebilecek saptmaları sistematik senaryolar biçiminde incelemektedir. Başka bir ifadeyle FMEA daha çok “hangi durum başarısızlığa yol açabilir ve bunun etkisi nedir?” sorusu üzerinde yoğunlaşırken, HAZOP “mevcut veya beklenen koşul hangi yönde değişebilir ve bu değişimin nedenleri ile sonuçları nelerdir?” sorusunu ele almaktadır. Bu nedenle iki yöntemin birlikte kullanılması, bir yöntemin diğerinin yerine geçmesinden çok, farklı analitik perspektiflerin aynı risk değerlendirmesi içerisinde bir araya getirilmesi olarak değerlendirilmelidir. IEC 60812 FMEA’nın diğer güvenilirlik ve risk analiz teknikleriyle ilişkili olarak uyarlanabileceğini belirtirken, İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği de risklerin niteliğine bağlı olarak bir veya birden fazla yöntemin birlikte kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Bu yöntemlerin mağara ortamına uygulanmasında önemli bir diğer husus, analizlerin saha verilerinden ve gerçek çevresel koşullardan bağımsız dşnlmemesidir. FMEA ve HAZOP, lm veya gözlemin yerine geçen yöntemler

değil; elde edilen saha verilerinin güvenlik bağlamında sistematik biçimde değerlendirilmesine yardımcı olan analitik araçlardır. Kaya durumu, gaz konsantrasyonları, mikroklimatik değişkenler, su varlığı veya fiziksel geçiş koşulları hakkında yeterli veri bulunmadan gerçekleştirilecek risk değerlendirmeleri büyük ölçüde uzman görüşüne bağımlı hâle gelebilir. Bu nedenle doğal mağara ortamlarında güvenilir bir risk değerlendirmesi, sahadan elde edilen gözlem ve ölçümlerin yapılandırılmış yöntemlerle birleştirilmesini gerektirmektedir. Benzer şekilde risk değerlendirmesi sonuçlarının kesin ve değişmez değerler olarak değil, değerlendirmenin gerçekleştirildiği koşullar ve mevcut bilgi düzeyi içerisinde yorumlanması gerekmektedir.

Sonuç olarak FMEA ve HAZOP'un birlikte ele alınması, doğal mağara ortamlarının çok boyutlu risk yapısını değerlendirmek için teorik olarak uygun ve birbirini tamamlayan bir çerçeve sunmaktadır. FMEA tehlike ve başarısızlık biçimlerinin sistematik olarak tanımlanmasına ve önceliklendirilmesine katkı sağlarken, HAZOP çevresel veya operasyonel koşullarda meydana gelebilecek sapmaların neden-sonuç ilişkileri içerisinde incelenmesine olanak vermektedir. Yapılan kaynak taramasında turizme açık doğal mağaralarda bu iki yöntemin birlikte kullanımını doğrudan konu alan, doğrulanabilir ve yerleşik bir uygulama literatürünün sınırlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle yöntemlerin doğal mağara ortamına birlikte uyarlanması, mevcut risk değerlendirme ilkelerinin yeni bir uygulama alanına aktarılması olarak değerlendirilmelidir. Bunun bilimsel gerekçesinin daha açık biçimde ortaya konulabilmesi için, turizme açık mağaralarda şimdiye kadar gerçekleştirilen güvenlik ve risk yönetimi çalışmalarının hangi tehlike gruplarına yoğunlaştığının incelenmesi gerekmektedir.

1.4. Turizme Açık Mağaralarda Güvenlik ve Risk Yönetimine İlişkin Çalışmalar

Turizme açık mağaralarda güvenlik ve sürdürülebilir kullanım üzerine gerçekleştirilen araştırmalar, mağara ortamının çok bileşenli yapısı nedeniyle farklı disiplinlerde gelişmiştir. Jeoloji ve jeoteknik çalışmalar daha çok kaya kütlesi duraylılığına ve yapısal bozulmalara; çevre ve atmosfer araştırmaları karbondioksit, radon, sıcaklık, nem ve hava dolaşımına; biyolojik çalışmalar mikroorganizma toplulukları ve insan kaynaklı biyolojik değişimlere; turizm yönetimi araştırmaları ise ziyaretçi yoğunluğu, taşıma kapasitesi ve kullanım planlamasına odaklanmaktadır. Bu çalışmaların ortak noktası, mağaranın turizme açılmasının yalnızca fiziksel erişim

sağlanması anlamına gelmediğini; ziyaretçilerin ve çalışanların güvenliği ile mağaranın doğal bütünlüğünün birlikte korunması gerektiğini göstermektedir. Bununla birlikte literatürde farklı risk gruplarının çoğunlukla ayrı ayrı incelenmesi, bütünlük İSG yaklaşımının önemini artırmaktadır.

Turistik mağaralarda yapısal duraylılık ve kaya düşmesi riski, doğrudan can güvenliğiyle ilişkili olması nedeniyle araştırmaların temel konularından biridir. Karstik mağaralarda kaya kütlesinin süreksizlik yapısı, tavan örtü kalınlığı, suyun çatlaklar içerisindeki hareketi ve geçmişte gerçekleşen blok ayrılmaları, gelecekte oluşabilecek duraysızlıkların değerlendirilmesinde önem taşımaktadır. Bayarri vd., (2023), İspanya'daki Altamira Mağarası'nın Polychrome Hall bölümünde tavanın yapısal koşullarını incelemek amacıyla üç boyutlu lazer tarama, insansız hava aracı verileri ve yer radarı gibi farklı geomatik ve jeofizik yöntemleri birlikte kullanmıştır. Çalışmada mağara tavanına kadar uzanan önemli düşey süreksizliklerin varlığı ortaya konulmuş ve bu süreksizliklerin mağara içi ile yüzey arasındaki su ve akışkan hareketleriyle ilişkili olabileceği gösterilmiştir. Bulgular, tavan duraylılığı ile hidrolojik süreçlerin birbirinden bağımsız değerlendirilmemesi gerektiğini ve yüksek değer taşıyan mağaralarda yapısal izlemenin koruma ve güvenlik yönetiminin bir parçası olması gerektiğini ortaya koymaktadır (Bayarri vd., 2023).

Yapısal güvenliğin turistik mağaralarda yalnızca mevcut kaya bloklarının gözlemlenmesine indirgenemeyeceği, farklı mağara türlerinde yürütülen güncel araştırmalarda da vurgulanmaktadır. Turistik volkanik mağaralara yönelik geliştirilen jeolojik ve jeomekanik değerlendirme çalışmalarında, çalışanların mağara içerisinde turistlerden daha uzun süre bulunması nedeniyle yapısal tehlikelere maruziyetlerinin farklılaşabileceği ve mağaraya yapılan fiziksel müdahalelerin kaya kütlesinin davranışını etkileyebileceği belirtilmektedir. Bu çalışmalar, güvenli turistik kullanım için yapısal tehlikenin tanımlanması, duraysız alanların haritalanması ve değişimlerin izlenmesinin birlikte yürütülmesi gerektiğini göstermektedir. Her ne kadar volkanik mağaraların litolojik ve oluşumsal özellikleri Akçakale gibi karstik mağaralardan farklı olsa da, yapısal güvenliğin mağaraya özgü jeolojik koşullar temelinde değerlendirilmesi gerektiği ilkesi farklı mağara türleri için ortak bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Mağara atmosferi üzerine yapılan çalışmalar ise turistik kullanımda görünür olmayan ancak çalışan ve ziyaretçi sağlığı bakımından önemli sonuçlar doğurabilecek riskleri ortaya koymaktadır. Bu alandaki araştırmaların önemli bir bölümü radon konsantrasyonlarının mağaralar arasında ve aynı mağaranın farklı noktalarında önemli ölçüde değişebildiğini göstermektedir. Somlai vd., (2011), Macaristan'daki turizme açık

mağaralarda yıllık ortalama radon konsantrasyonlarını incelemiş ve turistik mağaralarda radonun uzun süreli maruziyet bakımından dikkate alınması gereken bir çevresel değişken olduğunu ortaya koymuştur. Turistlerin mağarada bulunma süreleri görece kısa olmasına karşın rehberler ve diğer çalışanların düzenli ve uzun süreli maruziyeti, aynı atmosferik koşulun farklı kullanıcı gruplarında farklı risk düzeyleri oluşturmaya neden olmaktadır (Somlai vd., 2011).

Bu ayırım çalışan maruziyetinin doğrudan incelendiği araştırmalarda daha belirgin hâle gelmektedir. Somlai vd., (2015), turistik bir mağarada uzun yıllara yayılan radon ölçümleri ile çalışanların bireysel maruziyetlerini birlikte değerlendirerek, yüksek radon konsantrasyonlarının özellikle mağara içerisinde sürekli görev yapan personel açısından mesleki bir maruziyet problemi oluşturabileceğini göstermiştir. Bu sonuç, mağara atmosferinin güvenlik değerlendirmesinde yalnızca “ziyaret için uygunluk” açısından ele alınmasının yeterli olmadığını, çalışanların mağara içerisinde geçirdikleri toplam süre ve maruziyet sıklığının da hesaba katılması gerektiğini ortaya koymaktadır (Somlai vd., 2015).

Radonun yanı sıra karbondioksit ve mağara iklimi de turistik kullanımın güvenlik ve koruma boyutunda yoğun olarak araştırılmıştır. Pulido-Bosch vd., (1997), İspanya’daki Aracena turistik karst mağarasında insan etkisini inceleyerek ziyaretçi kullanımının mağara ortamındaki fiziksel ve kimyasal koşullarda değişiklikler oluşturabileceğini göstermiştir. Bu tür çalışmalar, mağara atmosferindeki değişimin yalnızca doğal havalandırma süreçlerinden kaynaklanmadığını, ziyaretçi varlığının da sistemin mikroklimatik dengesini etkileyebileceğini ortaya koyan erken dönem ampirik araştırmalar arasında yer almaktadır (Pulido-Bosch vd., 1997).

Daha güncel ve ayrıntılı izleme çalışmaları bu ilişkinin zamansal ve mekânsal özelliklerini daha açık biçimde göstermektedir. Miler vd., (2024), UNESCO Dünya Mirası kapsamında bulunan Škocjan Mağaraları’nda sıcaklık, karbondioksit ve farklı boyutlardaki partikül madde konsantrasyonlarını turist ziyaretleriyle birlikte izlemiştir. Araştırmada ziyaretçilerin mağara iklimi ve partikül madde düzeyleri üzerindeki etkisinin doğrudan gözlemlendiği, etkilerin mevsime, ölçüm konumuna ve ziyaretçi yoğunluğuna göre farklılaştığı belirlenmiştir. Yaz döneminde daha fazla ziyaretçi bulunmasının sıcaklık, CO₂ ve bazı partikül fraksiyonları üzerindeki etkileri artırdığı; ziyaretçi hareketleri, kapıların açılması, bakım çalışmaları ve mağara aydınlatmasının mağara atmosferine antropojenik katkılar sağlayabildiği gösterilmiştir (Miler vd., 2024). Bu sonuçlar, mağara havasının tek bir ölçüm değeriyle temsil edilemeyeceğini ve

güvenlik ile koruma yönetiminde zamansal ve mekânsal izlemenin önemini ortaya koymaktadır.

Ziyaretçilerin mağara atmosferine etkisi yalnızca karbondioksit artışıyla sınırlı değildir. Moravya Karstı'ndaki Balcarka ve Výpustek mağaralarında gerçekleştirilen çalışmada, ziyaretçilerin solunumuyla mağara ortamına aktarılan su buharı ve karbondioksitin toplam etkisi değerlendirilmiş; mağaradaki toplam ziyaretçi sayısı ile ziyaret süresinin insan kaynaklı nem ve CO₂ yükünün başlıca belirleyicileri olduğu ortaya konulmuştur. Çalışma ayrıca ziyaretçi kaynaklı su buharının belirli koşullarda mağara yüzeylerinde yoğunlaşmaya ve karbonat yüzeylerinde değişimlere katkıda bulunabileceğini göstermiştir (Lang vd., 2024). Bu bulgu, ziyaretçi güvenliği ile mağaranın korunması arasında doğrudan bir ilişki bulunduğunu ve turistik kullanım yoğunluğunun yalnızca kapasite veya konfor açısından değil, mağara ortamının fiziksel-kimyasal dengesi açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Turizme açık mağaralarda biyolojik risk ve biyolojik bozulma çalışmaları da güvenlik yönetiminin önemli bir diğer boyutunu oluşturmaktadır. Bercea vd., (2018), Karpat Dağları'ndaki dört turistik mağarada bir yıl boyunca mikrobiyolojik hava izlemesi gerçekleştirmiş; mağara havasındaki bakteri ve mantar topluluklarını ziyaretçi sayısı, yarası varlığı ve radon gibi çevresel değişkenlerle birlikte değerlendirmiştir. Araştırmada turistik kesimlerde ve ziyaret edilmeyen alanlarda mikrobiyal toplulukların farklılaşabildiği belirlenmiş ve elde edilen veriler kullanılarak insan sağlığına yönelik mikrobiyolojik risk haritaları geliştirilmiştir. Çalışma, mağara biyolojisinin yalnızca doğal mirasın korunması bağlamında değil, turist ve rehberlerin maruz kalabileceği potansiyel biyolojik etkenlerin değerlendirilmesi açısından da ele alınabileceğini göstermektedir (Bercea vd., 2018).

Biyolojik bozulmanın kültürel ve doğal miras üzerindeki etkileri ise Lascaux gibi yoğun insan müdahalesi geçmişine sahip mağaralarda ayrıntılı olarak incelenmiştir. Lascaux Mağarası'nda mağara duvarlarında ortaya çıkan koyu renkli biyolojik değişimlerin mikrobiyal yapısını inceleyen çalışmalar, pigmentli mantarlar ile mağara yüzeyindeki mikrobiyal topluluklar arasındaki ilişkileri ortaya koymuştur. Bontemps vd., (2024) araştırması, mağara yüzeylerindeki biyolojik değişimlerin belirli mikroorganizma topluluklarıyla ilişkili olduğunu göstererek, mağaralarda biyolojik izlemenin yalnızca görünür oluşumlar ortaya çıktıktan sonra gerçekleştirilecek bir müdahale değil, önleyici koruma yönetiminin bir bileşeni olması gerektiğini desteklemektedir (Bontemps vd., 2024).

Turistik mağara yönetimine ilişkin bir diğer önemli araştırma alanı, mağaranın çevresel taşıma kapasitesinin belirlenmesidir. Mağaralarda taşıma kapasitesi yalnızca belirli bir alana fiziksel olarak kaç kişinin sığabileceğiyle ilişkili değildir; ziyaretçi grubunun mağara sıcaklığı, karbondioksit, nem ve diğer çevresel değişkenler üzerinde oluşturduğu etkinin mağaranın doğal koşullarına geri dönebilme kapasitesi de dikkate alınmalıdır. Calaforra vd., (2003), turizme açılması planlanan Cueva del Agua de Iznalloz'da doğal koşulları uzun süreli sıcaklık izleme verileriyle belirledikten sonra kontrollü ziyaret deneyleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada ziyaretçi kaynaklı termal etkinin kısa sürede gözlemlendiği ve ziyaret sonrasında mağaranın doğal termal koşullarına dönmesi için belirli bir iyileşme süresine gereksinim olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar bu verilerden hareketle mağaraya özgü bir ziyaretçi kapasitesi önermiş ve taşıma kapasitesinin sabit bir genel sayı yerine mağaranın çevresel tepki ve toparlanma özelliklerinden türetilmesi gerektiğini göstermiştir (Calaforra vd., 2003).

Benzer yaklaşım güncel çalışmalarda daha uzun süreli veri dizileriyle geliştirilmiştir. Fernández-Cortés vd., (2025), İspanya'daki El Castillo ve Covalanas mağaralarında 2020–2022 dönemindeki çok yıllık çevresel izleme verilerini kullanarak ziyaretçi akışının mağara iklimi üzerindeki etkisini incelemiş ve sıcaklık ile CO₂ değişimlerini doğal dalgalanma aralıklarıyla karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda iki mağaranın çevresel toleranslarının birbirinden önemli ölçüde farklı olduğu ve bu nedenle sürdürülebilir ziyaretçi sınırlarının mağaraya özgü olarak belirlenmesi gerektiği ortaya konmuştur. Aynı metodoloji içerisinde bile iki mağara için farklı önerilen ziyaretçi sayılarının elde edilmesi, mağara güvenliği ve korunmasında evrensel ve tek tip ziyaretçi kapasitesi değerlerinin uygun olmadığını açık biçimde göstermektedir (Fernández-Cortés vd., 2025).

Türkiye'deki mağara turizmi çalışmalarında ise güvenli ve sürdürülebilir kullanım konusu çoğunlukla turizm potansiyeli, peyzaj, erişilebilirlik ve yönetim sorunlarıyla birlikte ele alınmıştır. Örneğin Timur vd (2017), Çankırı Kaya Tuzu Mağarası'nın turizm ve rekreasyon kullanım potansiyelini SWOT analizi, görsel peyzaj değerlendirmesi ve CBS tabanlı eğim analiziyle incelemiş; çalışma alanındaki başlıca sorunlardan birinin yasal ve yönetsel konular olduğunu belirlemiştir. Araştırma, mağaraların turizme kazandırılmasının yalnızca doğal çekicilik üzerinden değerlendirilemeyeceğini ve alan kullanımı ile yönetim planlamasının da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Bununla birlikte söz konusu çalışma doğrudan çoklu İSG risklerinin sistematik analizi üzerine kurulmamıştır; bu yönüyle Türkiye'deki mağara çalışmalarında turizm planlaması ile kapsamlı iş sağlığı ve güvenliği risk

değerlendirmesi arasında geliştirilmesi gereken bir araştırma alanının bulunduğu görülmektedir (Timur vd., 2017).

Literatür birlikte değerlendirildiğinde, turizme açık mağaralarda güvenlik ve korumaya ilişkin önemli bir bilimsel bilgi birikiminin oluştuğu, ancak çalışmaların büyük bölümünün belirli risk grupları etrafında yoğunlaştığı görülmektedir. Yapısal araştırmalar çatlak, süreksizlik ve tavan duraylılığına; atmosfer çalışmaları radon, CO₂ ve havalandırmaya; mikroklimatik çalışmalar sıcaklık, nem ve ziyaretçi etkisine; biyolojik çalışmalar mikroorganizma topluluklarına; taşıma kapasitesi araştırmaları ise ziyaretçi sayısı ve mağaranın çevresel toparlanma kapasitesine odaklanmaktadır. Bu çalışmalar, kendi araştırma amaçları açısından güçlü ve ayrıntılı sonuçlar ortaya koymakla birlikte, ziyaretçinin veya çalışanın aynı anda maruz kalabileceği jeolojik, fiziksel, atmosferik, biyolojik, ergonomik ve çevresel tehlikelerin tek bir İSG değerlendirme çerçevesinde bir araya getirilmesi daha sınırlı kalmaktadır.

Bu durum doğal mağara ortamlarında güvenli kullanımın tek bir parametre üzerinden değerlendirilemeyeceğini göstermektedir. Bir mağarada kabul edilebilir CO₂ düzeylerinin belirlenmiş olması, tavan duraylılığı veya kayma-düşme risklerinin kabul edilebilir olduğu anlamına gelmediği gibi, yapısal açıdan stabil olarak değerlendirilen bir güzergâh da atmosferik veya biyolojik yönden otomatik olarak güvenli kabul edilemez. Benzer şekilde ziyaretçi açısından kısa süreli ve düşük kabul edilebilecek bir maruziyet, aynı ortamda sürekli görev yapan rehber veya teknik personel için farklı bir risk düzeyi oluşturabilir. Bu nedenle mağara güvenliğinin gerçekçi biçimde değerlendirilebilmesi, farklı disiplinlerden elde edilen verilerin aynı risk yönetimi sistemi içerisinde ilişkilendirilmesini gerektirmektedir.

Sonuç olarak mevcut literatür, turistik mağaralarda yapısal duraylılık, mağara atmosferi, mikroklima, biyolojik değişim ve ziyaretçi taşıma kapasitesi konularında önemli yöntemsel ve ampirik katkılar sunmaktadır. Bununla birlikte bu risk unsurlarının çoğunlukla birbirlerinden bağımsız araştırılması, mağara ortamındaki çoklu ve etkileşimli risk yapısının bütüncül İSG perspektifinden değerlendirilmesi bakımından bir boşluk oluşturmaktadır. Özellikle ölçüme dayalı çevresel verilerin sistematik risk önceliklendirmesi ve sapma senaryolarıyla birleştirildiği çalışmaların sınırlı olması, farklı risk analiz yaklaşımlarının doğal mağara koşullarına uyarlanmasını bilimsel açıdan anlamlı hâle getirmektedir. Bu literatür görünümü, Akçakale Mağarası özelinde farklı tehlike gruplarının saha verileriyle birlikte ele alınması ve FMEA ile HAZOP yaklaşımlarının tamamlayıcı olarak kullanılmasının araştırma gerekçesini oluşturmaktadır.

1.5. Literatürdeki Boşluk ve Araştırmanın Gerekliliği

Turizme açık mağaralara ilişkin bilimsel literatür incelendiğinde, mağaraların jeolojik yapısı, mikroklimatik özellikleri, atmosfer bileşimi, biyolojik çeşitliliği, ziyaretçi etkileri ve turizm potansiyeli üzerine önemli bir bilgi birikiminin bulunduğu görülmektedir. Bununla birlikte mevcut çalışmaların önemli bir bölümü, mağara ortamının belirli bir bileşenini ayrıntılı biçimde inceleyen tematik araştırmalardan oluşmaktadır. Örneğin Bayarri vd., (2023), Altamira Mağarası'nın tavan yapısındaki süreksizlikleri ve yapısal koşulları çoklu ölçüm teknikleriyle değerlendirerek kaya kütlesi duraylılığı ve koruma açısından ayrıntılı sonuçlar ortaya koymuştur. Miler vd., (2024) ise Škocjan Mağaraları'nda sıcaklık, karbondioksit ve partikül madde konsantrasyonlarını izleyerek doğal ve ziyaretçi kaynaklı mikroklimatik değişimleri incelemiştir. Benzer biçimde Bercea vd., (2018), dört turistik mağarada havadaki mikrobiyolojik bileşenleri araştırarak insan sağlığı açısından biyolojik risk haritaları oluşturmuştur. Bu araştırmaların her biri kendi çalışma alanında ayrıntılı ve önemli bulgular sağlamakla birlikte, mağara ortamında aynı anda bulunabilecek farklı iş sağlığı ve güvenliği risklerinin ortak bir değerlendirme sistemi içerisinde bütünleştirilmesi bakımından daha sınırlı bir yaklaşım sunmaktadır.

Benzer bir uzmanlaşma mağara atmosferine yönelik araştırmalarda da görülmektedir. Özellikle radon, karbondioksit, sıcaklık, bağıl nem ve doğal havalandırma arasındaki ilişkiler uzun süreli izleme programlarıyla ayrıntılı biçimde araştırılmaktadır. Šebela, Briestenský ve Novak (2026), iki turistik Slovenya mağarasında uzun süreli radon verilerini mağara ve dış ortam sıcaklığı ile atmosfer basıncıyla birlikte değerlendirmiş; radon konsantrasyonlarının mevsimsel ve günlük olarak değiştiğini ve aynı maruziyet koşullarının ziyaretçiler ile mağarada uzun süre çalışan rehberler açısından farklı önem taşıyabileceğini göstermiştir. Bu bulgular, mağara güvenliğinin yalnızca tek bir ölçüm zamanına veya tek bir çevresel parametreye göre değerlendirilemeyeceğini açıkça ortaya koymaktadır. Ancak bu tür atmosfer çalışmaları ağırlıklı olarak belirli bir maruziyet unsurunun dağılımını, değişimini veya doz ilişkisini açıklamakta; kaya düşmesi, kayma ve düşme, yetersiz aydınlatma, su birikmesi, ergonomik zorlanma veya acil durum koşulları gibi diğer tehlike gruplarını aynı risk değerlendirmesi içerisinde ele almamaktadır (Šebela vd., 2026).

Ziyaretçi etkisi ve taşıma kapasitesine ilişkin araştırmalar da benzer biçimde belirli çevresel göstergelere odaklanmaktadır. Calaforra vd., (2003), turizme açılması planlanan Cueva del Agua de Iznalloz'da ziyaretçi kaynaklı sıcaklık değişimlerini

kontrollü deneylerle incelemiş ve mağaranın doğal termal koşullarına geri dönüş süresinden hareketle ziyaretçi kapasitesini değerlendirmiştir. Bu yaklaşım, mağara kullanımının ölçülebilir çevresel göstergeler üzerinden yönetilebileceğini göstermesi bakımından önemlidir. Bununla birlikte çevresel taşıma kapasitesinin belirlenmesi ile çalışan ve ziyaretçilerin karşılaşabileceği çoklu İSG risklerinin sistematik olarak önceliklendirilmesi birbirinden farklı değerlendirme gereksinimleridir. Başka bir ifadeyle bir mağaranın sıcaklık veya karbondioksit bakımından kabul edilebilir bir kullanım yoğunluğuna sahip olması, aynı alanın yapısal duraylılık, kayma-düşme, atmosferik tehlike veya tahliye açısından da aynı düzeyde güvenli olduğu anlamına gelmemektedir (Calaforra vd., 2003).

Literatürdeki bir diğer önemli gereksinim, doğrudan ölçülen çevresel veriler ile sistematik risk değerlendirme yöntemlerinin daha güçlü biçimde ilişkilendirilmesidir. Mağara araştırmalarında sıcaklık, nem, CO₂, radon, partikül madde, mikrobiyolojik yük veya yapısal süreksizlikler gibi değişkenlerin ölçülmesi ve modellenmesine dayalı çok sayıda araştırma bulunmasına karşın, bu verilerin farklı tehlike gruplarını ortak bir risk önceliklendirme sistemi içerisinde değerlendiren uygulamalar daha sınırlı görünmektedir. Miler vd., (2024) çalışmasında incelenen parametrelerin mevsimsel, günlük ve mekânsal değişimler gösterdiğinin ortaya konulması, ölçüm sonuçlarının mağaranın bütününe tek bir değer olarak genellenmesinin uygun olmadığını göstermektedir. Bercea vd., (2018) farklı turistik ve ziyaret edilmeyen mağara bölümleri için elde ettiği mikrobiyolojik farklılıklar da benzer biçimde mağara içi koşulların homojen kabul edilemeyeceğini desteklemektedir. Dolayısıyla güvenlik değerlendirmesinde yalnızca hangi tehlikenin bulunduğu belirlenmesi değil, bu tehlikenin mağaranın hangi bölümünde ve hangi koşullarda daha önemli hâle geldiğinin de ortaya konulması gerekmektedir.

Bu noktada mağara içerisindeki mekânsal değişkenliğin bölgesel risk değerlendirmesine dönüştürülmesi ayrı bir araştırma gereksinimi oluşturmaktadır. Mevcut çevresel çalışmaların bir kısmında farklı ölçüm istasyonları veya mağara bölümleri kullanılarak mekânsal değişim incelenirse de, elde edilen farklılıkların jeolojik, fiziksel, atmosferik, kimyasal, biyolojik ve çevresel risk gruplarıyla birlikte ele alınarak bölge bazında bütüncül bir İSG risk profiline dönüştürülmesi yaygın bir yaklaşım değildir. Oysa turizm amaçlı kullanılacak geniş mağara sistemlerinde ziyaretçi güzergâhının tamamının aynı tehlike düzeyine sahip olduğunun varsayılması gerçekçi değildir. Girişe yakın bir bölüm ile hava dolaşımının sınırlı olduğu iç kesimler; düzgün bir geçiş alanı ile su birikmesi veya blok düşmesi bulunan bir salon; geniş bir galeri ile

sınırlı hareket olanağı sağlayan bir bölüm birbirlerinden farklı tehlike profilleri oluşturabilir. Bu nedenle mekânsal değişkenliğin yalnızca çevresel gözlem olarak kaydedilmesi değil, risk önceliklerinin belirlenmesinde kullanılabilecek sistematik bir yapıya dönüştürülmesi gerekmektedir.

FMEA ve HAZOP yöntemleri bu gereksinim açısından dikkate değer bir yöntemsel potansiyel sunmaktadır. FMEA, IEC 60812:2018 kapsamında bir sistem veya süreçte oluşabilecek hata biçimlerinin ve bunların etkilerinin sistematik olarak tanımlanması ve önceliklendirilmesi için kullanılan genel bir yöntemdir. HAZOP ise IEC 61882:2016 kapsamında beklenen koşullardan meydana gelebilecek sapmaların neden ve sonuç ilişkileri içerisinde sistematik olarak incelenmesini sağlamaktadır. Her iki standart da geniş uygulama alanları için geliştirilmiş olup doğal turistik mağaralara özgü bir risk analizi yöntemi tanımlamamaktadır. Bu tez kapsamında incelenen mağara güvenliği literatüründe de FMEA ve HAZOP'un doğal bir turistik mağaranın fiziksel ve çevresel saha verileriyle birlikte, aynı çalışma alanında tamamlayıcı iki yöntem olarak kullanımının yerleşik bir uygulama hâline geldiğini gösteren yeterli bir araştırma birikimine ulaşılamamıştır. Bu nedenle burada söz konusu yöntemlerin mağaralarda daha önce hiç kullanılmadığı yönünde mutlak bir iddiada bulunmak yerine, iki yöntemin birlikte ve ölçüm verileriyle bütünleştirilmiş kullanımının mağara güvenliği literatüründe yeterince araştırılmamış olduğu sonucuna varılması bilimsel açıdan daha savunulabilir bir yaklaşımdır.

Literatürde ortaya çıkan bu yapı, Akçakale Mağarası üzerinde gerçekleştirilen araştırmanın gerekliliğini belirlemektedir. İhtiyaç duyulan yaklaşım, yalnızca mağaradaki sıcaklık, nem veya gaz değerlerinin ölçülmesi ya da yalnızca gözlemsel bir tehlike listesi hazırlanması değildir. Fiziksel ve çevresel ölçümlerden elde edilen verilerin saha gözlemleriyle birleştirilmesi, mağaranın farklı özelliklere sahip bölümlerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi ve belirlenen tehlikelerin sistematik risk analiz yöntemleri kullanılarak karşılaştırılabilir bir yapıya dönüştürülmesi gerekmektedir. Böyle bir yaklaşım, hangi tehlikelerin bulunduğu yanında hangi bölgelerde hangi risklerin öncelikli olduğunun belirlenmesine de olanak sağlayacaktır. Bu literatür boşluğu, çalışmanın araştırma amacını ve yöntemsel yaklaşımını doğrudan şekillendirmekte; Akçakale Mağarası'nın turizm amaçlı kullanımına yönelik bütünsel bir İSG değerlendirmesinin bilimsel gerekçesini oluşturmaktadır.

1.6. Araştırmanın Amacı ve Özgün Değeri

Bu tez çalışmasının temel amacı, Gümüşhane ili sınırları içerisinde bulunan Akçakale Mağarası'nın turizm amaçlı kullanımı sürecinde ziyaretçiler, çalışanlar, teknik personel ve mağara içerisinde çalışma gerçekleştirebilecek diğer kişiler açısından ortaya çıkabilecek iş sağlığı ve güvenliği risklerinin belirlenmesi, mevcut risklerin saha ve laboratuvar verileriyle desteklenmesi ve belirlenen tehlikelerin FMEA ile HAZOP yöntemleri kullanılarak sistematik biçimde değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesidir. Bu temel amaç doğrultusunda mağara, yalnızca turistik çekiciliğe sahip doğal bir oluşum olarak değil, fiziksel, atmosferik, jeolojik, kimyasal ve çevresel özelliklerin birbiriyle etkileşim hâlinde bulunduğu doğal bir yeraltı çalışma ve kullanım ortamı olarak ele alınmıştır. Araştırmanın odağı, mağaranın turizm potansiyelini belirlemekten ziyade, turistik kullanımın güvenli biçimde gerçekleştirilebilmesi için dikkate alınması gereken tehlike kaynaklarının bilimsel olarak ortaya konulmasıdır.

Bu temel amaca ulaşabilmek için çalışmada birbirini tamamlayan çeşitli araştırma hedefleri benimsenmiştir. İlk olarak, Akçakale Mağarası içerisindeki çalışma ve ziyaret koşullarını etkileyebilecek fiziksel, atmosferik, kimyasal, biyolojik, çevresel ve yapısal tehlikelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda yalnızca gözle görülebilen kayma, düşme, blok hareketi veya zemin düzensizliği gibi tehlikelerin değil, mağara atmosferi ve mikroklimatik özellikleriyle ilişkili olarak doğrudan algılanması mümkün olmayan tehlikelerin de değerlendirmeye dâhil edilmesi hedeflenmiştir. Böylece mağaranın güvenlik profili, tek bir risk grubuna dayalı değerlendirme yerine farklı tehlike kaynaklarının birlikte dikkate alındığı bütüncül bir yapı içerisinde ele alınmıştır.

Araştırmanın ikinci amacı, sahada belirlenen tehlikelerin yalnızca gözlemsel değerlendirmelere dayandırılmaması, mümkün olan parametrelerin ölçüm ve laboratuvar verileriyle desteklenmesidir. Mağara ortamının sıcaklık, nem, hava hareketi ve atmosfer bileşimi gibi özellikleri dönemsel olarak değişebildiğinden, risk değerlendirmesinin çalışma döneminde elde edilen gerçek saha verileriyle ilişkilendirilmesi araştırmanın temel yaklaşımını oluşturmuştur. Benzer şekilde laboratuvar incelemelerinden elde edilen veriler, mağara ortamının kimyasal özelliklerinin değerlendirilmesine katkı sağlamıştır. Böylece risk analizi ile saha ve laboratuvar araştırmaları birbirinden bağımsız süreçler olarak değil, aynı güvenlik değerlendirmesinin birbirini tamamlayan bileşenleri olarak ele alınmıştır.

Çalışmanın bir diğer amacı, mağaranın geniş ve heterojen yapısı nedeniyle farklı kesimlerde değişebilen koşulların tek bir genel değerlendirme içerisinde kaybolmasını önlemektir. Bu doğrultuda mağara yedi değerlendirme bölgesine ayrılmış ve her

bölgenin kendine özgü çevresel ve fiziksel özellikleri dikkate alınmıştır. Bölgesel yaklaşımın temel amacı, Akçakale Mağarası'nın tamamını tek bir risk düzeyiyle tanımlamak yerine, risklerin mağara içerisindeki mekânsal dağılımını ortaya koyabilmektir. Böylelikle güvenli kullanım bakımından daha fazla dikkat gerektiren bölümlerin diğer alanlardan ayrıştırılması ve mağara genelindeki risk dağılımının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Araştırmanın özgün değeri üç temel unsur üzerinde şekillenmektedir. Bunlardan ilki, doğal bir kapalı alan olan mağarada saha ve laboratuvar verilerinin sistematik risk değerlendirmesiyle bir araya getirilmesidir. Çalışmada risk analizi yalnızca literatürde tanımlanan genel mağara tehlikelerine göre oluşturulmamış; Akçakale Mağarası'ndan elde edilen gözlem ve ölçüm verileri değerlendirme sürecinin temel girdilerinden biri olarak kullanılmıştır. Böylece araştırma, teorik bir güvenlik değerlendirmesinden ziyade çalışma alanının gerçek koşullarına dayalı bir uygulama niteliği kazanmıştır.

İkinci özgün unsur, FMEA ve HAZOP yöntemlerinin aynı doğal yeraltı ortamında birbirini tamamlayacak şekilde kullanılmasıdır. FMEA aracılığıyla belirlenen tehlikelerin ve olası hata durumlarının göreceli önemlerinin ortaya konulması amaçlanırken, HAZOP yaklaşımıyla mağara ortamında beklenen koşullardan meydana gelebilecek sapmaların neden ve sonuç ilişkileri açısından değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Buradaki özgünlük, yöntemlerden herhangi birinin yeni geliştirilmiş olmasından değil, endüstriyel sistemlerde yaygın biçimde kullanılan iki farklı risk değerlendirme yaklaşımının doğal bir mağara ortamının güvenlik sorunlarına birlikte uyarlanmasıyla kaynaklanmaktadır.

Üçüncü özgün unsur ise mağaranın yedi farklı bölgesinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek bölgesel risk profilinin oluşturulmasıdır. Bu yaklaşım, yalnızca “Akçakale Mağarası risklidir” veya “güvenlidir” biçiminde genel bir sonuca ulaşmak yerine, risklerin mağara içerisinde nasıl değiştiğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Böylece çalışma sonucunda elde edilen değerlendirmelerin turizm amaçlı kullanım planlamasında daha işlevsel hâle getirilmesi hedeflenmiştir. Sonuç olarak araştırmanın özgün değeri, yeni bir risk analizi yöntemi geliştirme iddiasından ziyade, mevcut ve kabul görmüş risk değerlendirme yöntemlerinin gerçek saha ve laboratuvar verileriyle desteklenerek doğal bir yeraltı ortamına bütünleşik biçimde uyarlanması ve mekânsal risk farklılıklarının ortaya konulması üzerine kurulmuştur. Bu yaklaşım, çalışmanın bilimsel iddiasını daha açık ve savunulabilir hâle getirmektedir.

1.7. Araştırmanın Kapsamı ve Sınırlılıkları

Bu araştırmanın çalışma alanı Gümüşhane’de bulunan Akçakale Mağarası ile sınırlıdır. Tez kapsamında elde edilen gözlem, ölçüm, laboratuvar ve risk değerlendirme sonuçları söz konusu mağaranın araştırmanın gerçekleştirildiği dönemdeki fiziksel ve çevresel koşullarını temsil etmektedir. Akçakale Mağarası’nın geniş bir yeraltı boşluğu olması ve mağara içerisinde morfolojik, yapısal ve çevresel koşulların bölgeden bölgeye değişebilmesi nedeniyle çalışma alanı tek ve homojen bir ortam olarak değerlendirilmemiştir. Mağaranın morfolojik yapısı, galeri ve salonların dağılımı, tavan ve blok düşme özellikleri ile genel jeolojik ve çevresel farklılıkları dikkate alınarak çalışma yedi değerlendirme bölgesi üzerinden yürütülmüştür. Bu bölgesel yaklaşım, mağara içerisindeki risklerin mekânsal farklılıklarının değerlendirilmesine olanak sağlamakla birlikte, belirlenen bölgeler bu araştırmanın çalışma tasarımına özgüdür ve başka mağaralara doğrudan aktarılabilecek standart bölgelendirme birimleri olarak değerlendirilmemelidir.

Araştırmanın zamansal kapsamını altı aylık saha çalışması dönemi oluşturmaktadır. Bu süreç içerisinde mağaraya belirli aralıklarla saha ziyaretleri gerçekleştirilmiş ve çalışma kapsamında belirlenen çevresel parametreler izlenmiştir. Sıcaklık, bağıl nem, hava akım hızı ile karbondioksit, karbonmonoksit, oksijen, metan ve hidrojen sülfür gibi atmosferik parametreler çalışma dönemi boyunca periyodik olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte çalışmada kullanılan bütün parametreler aynı tekrar sayısı ve ölçüm sıklığıyla incelenmemiştir. Aydınlanma ve ses şiddeti gibi bazı fiziksel parametreler daha sınırlı sayıda ölçülmüş; laboratuvar analizlerinde kullanılan su, toprak ve benzeri örnekler ise saha programı içerisinde belirlenen örnekleme dönemlerinde alınmıştır. Bu nedenle çalışmanın zamansal kapsamı değerlendirilirken altı aylık araştırma süresi ile her bir parametrenin gerçek ölçüm veya örnekleme sıklığı birbirinden ayrılmalıdır.

Altı aylık ölçüm dönemi, mağara koşullarındaki belirli dönemsel değişimlerin gözlenmesine olanak sağlamış olmakla birlikte, yılın tamamını kapsamadığından uzun dönemli ve yıllar arası değişkenliklerin değerlendirilmesine imkân vermemektedir. Mağara mikrokliması ve atmosferi; dış ortam sıcaklığı, yağış, yeraltı ve yüzey suyu hareketleri, atmosfer basıncı ve doğal havalandırma koşulları gibi değişkenlerden etkilenebilmektedir. Bu nedenle araştırma döneminde belirlenen sıcaklık, nem, hava hareketi veya gaz koşullarının farklı mevsimlerde veya farklı yıllarda aynı şekilde devam edeceği varsayılmamalıdır. Benzer şekilde ölçümlerin belirli saha ziyaretleri sırasında gerçekleştirilmesi nedeniyle gün içindeki veya iki saha ziyareti arasında

meydana gelebilecek kısa süreli değişimler veri setine bütünüyle yansımamış olabilir. Bu durum özellikle mağara atmosferi ve mikroklimatik değişkenlerin yorumlanmasında dikkate alınması gereken zamansal bir sınırlılıktır.

Araştırmanın içerik kapsamı, tez çerçevesinde doğrudan gözlemlenen veya ölçülen fiziksel, atmosferik, kimyasal, çevresel ve yapısal özellikler ile bu özelliklerden hareketle belirlenen iş sağlığı ve güvenliği tehlikeleriyle sınırlıdır. Saha çalışmalarında mağara içerisindeki sıcaklık, nem, hava hareketi, atmosferik gazlar, aydınlanma, ses, zemin ve yapısal koşullar değerlendirilmiş; laboratuvar çalışmalarında ise alınan örnekler üzerinden pH ile element ve ağır metal içeriğine ilişkin incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu parametrelerin seçilmiş olması mağara ortamında bulunabilecek bütün olası çevresel veya sağlıkla ilişkili değişkenlerin ölçüldüğü anlamına gelmemektedir. Dolayısıyla çalışmanın risk değerlendirmesi, araştırma programına dâhil edilen ölçüm, gözlem ve laboratuvar verileri çerçevesinde yorumlanmalıdır.

Çalışmanın bir diğer sınırlılığı kullanılan ölçüm cihazlarının teknik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Her ölçüm cihazının belirli bir çalışma aralığı, algılama sınırı, çözünürlüğü ve ölçüm belirsizliği bulunmaktadır. Mağaraların yüksek nem, düşük hava hareketi ve fiziksel erişim güçlüğü gibi özellikleri de cihaz kullanım koşullarını etkileyebilmektedir. Bu nedenle bazı parametrelerin değerlendirilmesi kullanılan cihazların ölçüm kapasitesiyle sınırlı kalmıştır. Ayrıca mağaranın genişliği, düzensiz taban yapısı, ulaşılabildiği güç kesimleri ve güvenli erişim gereksinimleri nedeniyle mağaranın her noktasında aynı yoğunlukta ölçüm gerçekleştirilmesi mümkün olmamıştır. Yedi bölge üzerinden oluşturulan çalışma düzeni bu sorunu azaltmayı ve mağara içerisindeki farklı koşulları temsil etmeyi amaçlamış olmakla birlikte, her noktanın kesintisiz olarak izlendiği bir sürekli izleme sistemi niteliğinde değildir.

Yöntemsel kapsam bakımından araştırma, belirlenen tehlikelerin değerlendirilmesinde FMEA ve HAZOP yaklaşımlarının birlikte kullanılmasına dayanmaktadır. Bu yöntemlerin tercih edilmesi, farklı tehlikelerin sistematik biçimde tanımlanmasına, önceliklendirilmesine ve olası sapmaların neden-sonuç ilişkileri içinde incelenmesine olanak sağlamıştır. Bununla birlikte çalışma, mevcut tüm risk değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırıldığı veya FMEA ve HAZOP'un diğer yöntemlere göre istatistiksel üstünlüğünün test edildiği bir yöntem karşılaştırma araştırması değildir. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar, araştırmada benimsenen yöntemsel çerçeve kapsamında değerlendirilmelidir.

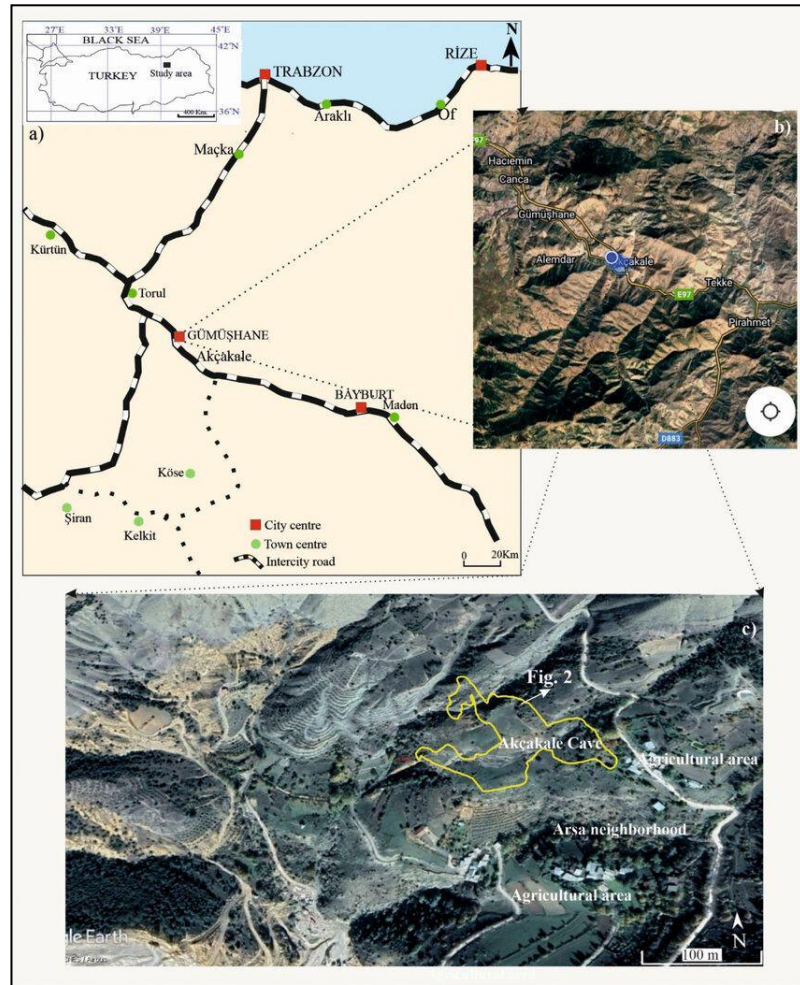
Son olarak, araştırmanın tek bir doğal mağarada gerçekleştirilmiş olması sonuçların genellenebilirliği açısından temel sınırlılıklardan biridir. Mağaraların

litolojisi, geometrisi, giriş ve galeri yapısı, su hareketleri, doğal havalandırması, mikrokliması, biyolojik özellikleri ve çevresel koşulları birbirinden önemli ölçüde farklılık gösterebilir. Bu nedenle Akçakale Mağarası için belirlenen risk düzeylerinin veya bölgesel değerlendirmelerin başka bir mağaraya doğrudan aktarılması uygun değildir. Buna karşılık çalışmada kullanılan genel yaklaşım; diğer mağaralarda o alana özgü ölçüm ve gözlem verilerinin elde edilmesi, bölgesel özelliklerin yeniden tanımlanması ve risk kriterlerinin çalışma alanına göre değerlendirilmesi koşuluyla benzer araştırmalar için yöntemsel bir çerçeve sağlayabilir. Bu nedenle çalışmanın sonuçları Akçakale Mağarası'na özgü bulgular, çalışmanın yaklaşımı ise benzer doğal yeraltı ortamlarında sınanabilecek bir uygulama modeli olarak değerlendirilmelidir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı

Tez çalışması kapsamında araştırma alanı olarak Akçakale Mağarası seçilmiştir. Akçakale Mağarası, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde Gümüşhane il merkezine bağlı Akçakale Köyü sınırları içerisinde yer almakta olup (Şekil 1), bölgenin önemli karstik oluşumlarından biridir (Eker vd., 2025). Deniz seviyesinden yaklaşık 1513 m yükseklikte konumlanan mağara, Üst Jura yaşlı Berdiga formasyonuna ait kireçtaşları içerisinde gelişmiştir. Toplam uzunluğu yaklaşık 445 m olan Akçakale Mağarası; doğal, eğimli, yarı yatay ve düden karakterli bir fosil mağara niteliği taşımaktadır (MTA, 2012).



Şekil 1. Akçakale Mağarası yer buldur haritası

Mağara morfolojisi, doğu–batı ve kuzey–güney doğrultusunda uzanan, birbirine bağlı geniş hacimli salonlardan oluşan tek bir ana galeri şeklinde gelişmiştir. Salon genişlikleri yer yer 90 m’ye ulaşırken, tavan yükseklikleri 8 m ile 40 m arasında değişmektedir (Alemdağ vd. 2019). Mağaranın giriş kotuna göre ölçülen en derin noktası yaklaşık -40,5 m’dir. Bu özellikleriyle Akçakale Mağarası, büyük hacimli boşluklara sahip (Şekil 2), ancak yapısal açıdan duraysız bir yeraltı sistemi oluşturmaktadır (MTA, 2012).



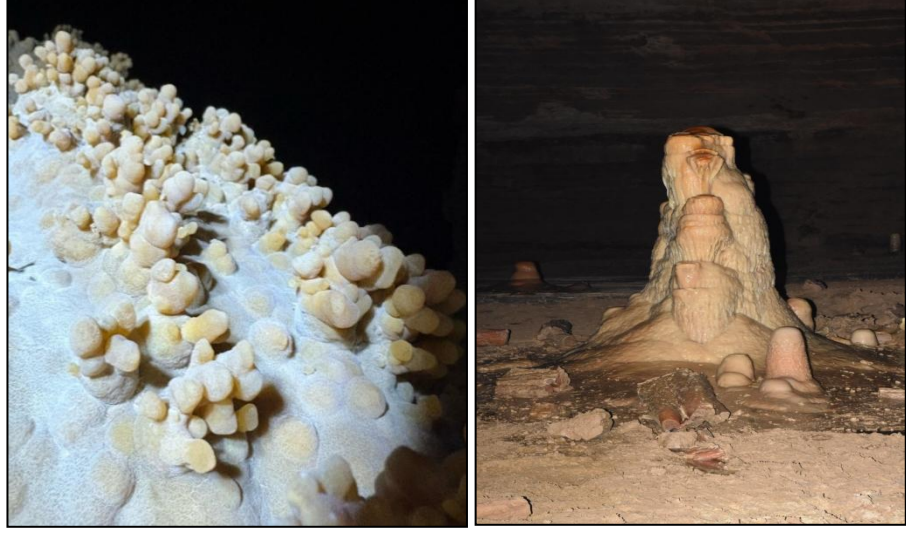
Şekil 2. Akçakale Mağarası iç kısmından görünüm

Akçakale Mağarası hidrojeolojik açıdan aktif bir yeraltı suyu sistemine sahip olmayıp, vadoz zon içerisinde yer alan fosil bir mağaradır. Sürekli akış gösteren bir su sistemi bulunmamakta; yalnızca mevsimsel yağışlar sırasında, yüzeyden çatlak ve kırıklar aracılığıyla sızan sular mağara ortamına ulaşmaktadır. Bu sular, mağaranın taban kotunun düşük olduğu bölümlerde geçici ve sığ gölcüklerin oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 3). Bu durum, mağaranın hidrolik gelişimini tamamladığını ve günümüzde yalnızca ikincil beslenme etkisi altında bulunduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Akçakale Mağarası tabanında oluşan gölcükler

Mağara içerisindeki speleotem (damlataş) oluşumları sınırlı düzeydedir. Özellikle girişe yakın kesimlerde ve tavan duraylılığının zayıf olduğu bölümlerde sarkıt ve sütun gelişimi gözlenmemektedir. Buna karşın, yan girintiler ve nispeten daha korunaklı salonlarda örtü damlataşları, mikro damlataş havuzları, mağara incileri ve düzensiz boyutlara sahip dikitler gelişmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Mağara incileri ve dikit örnekleri

Dikitlerin kalınlık ve boy oranlarındaki düzensizlik, mağara tavanında uzun süredir devam eden çökme süreçlerinin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Mağara içerisinde bazı oluşumlar

Akçakale Mağarası'nın en belirgin özelliklerinden biri, yüzeye oldukça yakın konumda bulunması ve üzerindeki kireçtaşı örtüsünün (et kalınlığının) ince olduğu düşünülmektedir. Kireçtaşlarının yoğun çatlaklı yapısı, kimyasal çözünmeye açık

litolojik özellikleri ve mağaranın büyük hacimli boşluklardan oluşması, tavan duraylılığını önemli ölçüde zayıflatmıştır. Bu nedenle mağarada geçmişten günümüze kadar çok sayıda tavan çökmesi meydana gelmiş olup (Şekil 6), bu süreç günümüzde de devam etmektedir.



Şekil 6. Tavandan zemine düşmüş kaya blokları

Akçakale Mağarası günümüzde ziyaretçilere kapalı olmakla birlikte, geçmiş yıllarda turizme kazandırılması yönünde girişimlerde bulunulmuş ve yeniden değerlendirilmesi gündeme gelmiştir. Bölgenin doğal miras potansiyeli, ulaşım kolaylığı ve geniş hacimli salonlara sahip olması nedeniyle mağara, turizm açısından dikkat çekici bir yeraltı oluşumu olarak değerlendirilmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Mağara içinden görünüm

Ancak mevcut jeolojik ve yapısal özellikleri, özellikle tavan duraylılığı ve blok düşme potansiyeli gibi risk faktörleri dikkate alındığında, mağaranın turizm amaçlı kullanımı kapsamlı mühendislik önlemleri ve detaylı risk analizleri gerektirmektedir (Şekil 8).



Şekil 8. Mağara içinden inceleme

Bu sebepten, Akçakale Mağarası'nın kontrollü biçimde turizme açılabilmesi ancak bilimsel temelli jeoteknik değerlendirmeler, güvenlik planlamaları ve sürdürülebilir kullanım ilkeleri doğrultusunda mümkün olabilecektir.

2.2. Yapılan Çalışmalar

Çalışma alanı olan Akçakale Mağarasına 6 ay boyunca yapılan ziyaretlerle birlikte periyodik ölçümler, gözlemler ve yerinde incelemeler saha çalışmalarını oluşturmaktadır. Gaz, nem, sıcaklık, hava akım hızı ölçümleri, toprak ve su numune alımları, ses ve aydınlanma şiddetlerinin belirlenmesi amacıyla toplamda 16 mağara ziyareti yapılmıştır. Araştırma kapsamında mağaradan elde edilen veri türleri ve bu verilere ilişkin ölçüm tekrarları Tablo 1'de verilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Çalışma alanı ölçüm ve numune alım sayıları

Parametreler	Sahada Ölçüm Yapılan Aylar						Toplam
	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	
Sıcaklık (°C)	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	12
Nem (%RH)	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	12
Hava akım hızı (km/h)	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	12
Karbon dioksit (CO ₂)	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	12
Karbonmonoksit (CO)	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	12
Oksijen (O ₂)	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	12
Metan (CH ₄)	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	12
Hidrojen sülfür (H ₂ S)	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	12
Işık şiddeti (Lux)	✓	X	X	X	X	X	1
Ses şiddeti (dB)	✓	✓	X	X	X	X	2
Toprak numunesi alımı	✓✓✓✓✓✓	✓✓✓✓	X	X	X	X	10
Su numunesi alımı	✓✓✓✓✓✓ ✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓✓✓	X	X	X	16

Sıcaklık, nem hava akım hızı karbondioksit (CO₂), karbonmonoksit (CO), oksijen (O₂), metan (CH₄) ve hidrojen sülfür (H₂S) ölçümleri 6 aylık süreçte her ay düzenli olarak yapılmıştır. Her bir bölge için ayrı ayrı yapılan ölçümler, her bölgede 2 defa olmak üzere toplamda 12 defa yapılarak bu parametrelerin ölçüm çalışmaları tamamlanmıştır.

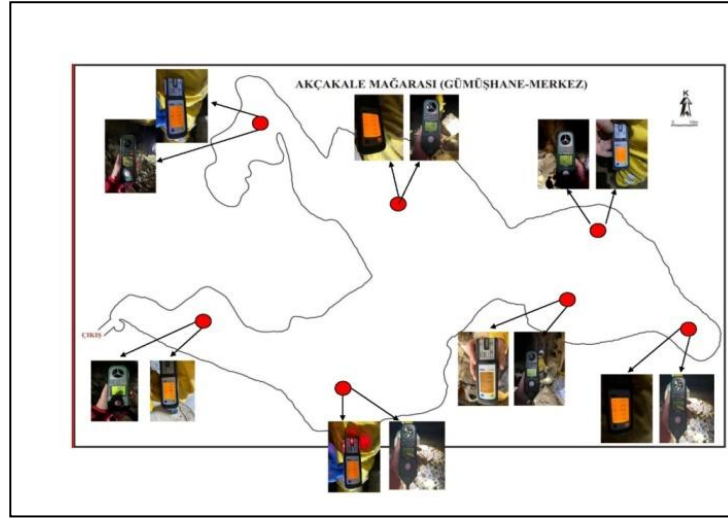
Işık şiddeti ölçümü, mağaranın kendi doğal ışığı olmadığı ve dış dünyadan bağımsız bir yapıya sahip olduğundan ve içeriye girerken yapay aydınlatmalarla girdiğimizden dolayı sağlıklı bir ölçüm sonucu alamayacağımız için 1 defa yapılmıştır. Mağaralar zaten kapalı ortamlar olduğundan dolayı ışıksız karanlık ortamlardır.

Ses şiddeti ölçümü, daha önceki yapılmış olan mağara akustiği ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde, çalışmalarda bulunan sonuçlarla, çalışma alanı olan Akçakale mağarası ses düzeyini karşılaştırmak amacıyla şubat ve mart ayında birer defa olmak üzere toplamda 2 defa yapılmıştır.

Toprak numunesi alımı, mağaradaki ağır metallerin tespiti için şubat ayında 6 farklı noktadan ve mart ayında 4 farklı noktadan olmak üzere toplamda 10 farklı numune örneği alınmıştır. Toprak numunesinin sadece şubat ve mart ayında alınmasının, kısa zaman aralığında içerdiği ağır metallerin değişim göstermeyeceği düşüncesindendir.

Su numunesi alımı, çalışma alanı olan mağara içerisindeki su varlığının pH değeri ölçümü ve ağır metal analizi için şubat ayında 7, mart ayında 4 ve nisan ayında 5 olmak üzere toplamda 16 tane su numunesi alınmıştır. Bu numunelerin mart ve nisan ayında alınanları, şubat ayında alınan noktalardan tekrar alınmasıyla toplam 16 tane olmuştur. Alınan su numunelerinin 3 tanesinin pH analizi, pH analizi yapılan 3 su numunesi ile birlikte toplam 5 tanesinin de ağır metal analizi yapılmıştır.

Mikroklimatik koşulların mağara içerisindeki mekânsal değişimini ortaya koyabilmek amacıyla, girişten mağaranın derin kesimlerine kadar farklı çevresel özellikleri temsil eden yedi ölçüm noktası belirlenmiş ve tüm ölçümler bu noktalarda gerçekleştirilmiştir(Şekil 9).



Şekil 9. Mağara içerisinde ölçüm yapılan noktalar

2.2.1. Saha Çalışmaları

Saha çalışmamız tez kapsamında, çalışma alanı olan Akçakale Mağarasına yapılan ziyaretlerde yapılan hava akım hızı, nem ve sıcaklık ölçümü, gaz ölçümü, ses şiddeti ölçümü, aydınlanma şiddeti ölçümü ve görsel kayıtlar almak için yapılan bütün çalışmaları içermektedir.

Mikroklimatik Koşulların Belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında mağara ortamındaki hava akım hızı, ortam sıcaklığı, bağıl nem, ışık şiddeti ve ses düzeyi ölçümü gibi mikroklimatik koşulların belirlenmesi amacıyla kanatlı sensör sistemine sahip Extech EN300 model çok fonksiyonlu çevresel ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Extech EN300 model çok fonksiyonlu çevresel ölçüm cihazı

Ölçümler, çalışma alanı olan mağara içerisinde 6 aylık hava sıcaklığını, hava sirkülasyonunu, ortamın doğal aydınlığını, nem miktarını ve doğal ses seviyesini belirlemek amacıyla yapılmıştır.

Elde edilen veriler, mağara içerisindeki risk değerlendirmeleri için temel parametreler olarak kullanılmıştır. Sınır değerlerin altında yada üstündeki değerler, insan sağlığını etkileyen birer risk unsuru olarak görülüp, puanlaması yapılmıştır.

Sıcaklık ve nem ölçümü

Mağara ortamındaki sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin izlenmesi amacıyla ikinci bir ölçüm cihazı olan, HTC-1 model dijital higrometre–termometre (Clock/Humidity) cihazı kullanılmıştır (Şekil 11). İkinci bir ölçüm cihazının amacı, her iki cihazın verilerini karşılaştırarak daha güvenilir sonuçlar elde etmektir. Kullanılan ikinci ölçüm cihazı, ortam sıcaklığını (°C) ve bağıl nem oranını (%) dijital ekran üzerinden anlık olarak gösterebilmekte ve minimum–maksimum değerleri belirleme özelliğine sahiptir. Ölçümler, mağara içerisindeki mikroklimatik koşulların belirlenmesi ve nem–sıcaklık dengesinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, ortamın yoğunlaşma potansiyeli, nem kaynaklı yüzey kayganlığı ve genel iklimsel stabilitesi açısından analiz edilmiş ve oluşabilecek kayma, düşme, termal konfor gibi fiziksel risk etmenlerinin anlaşılabilmesinde yol gösterici olmuştur.



Şekil 11. HTC-1 Clock / Humidity higrometre – termometre

Gaz ölçümü

Mağara ortamındaki atmosferik gaz konsantrasyonlarının belirlenmesi amacıyla Dräger X-am 5000 model çoklu gaz ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 12). Cihaz;

oksijen (O_2), karbondioksit (CO_2), karbon monoksit (CO), hidrojen sülfür (H_2S) ve metan (CH_4) gibi farklı gaz sensörleri ile donatılabilen portatif bir dedektördür.



Şekil 12. Dräger X-am 5000 model çoklu gaz ölçüm cihazı

Ölçümler, mağara içerisindeki hava kalitesinin değerlendirilmesi ve insan sağlığı açısından risk oluşturabilecek gaz birikimlerinin tespit edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Dräger X-am 5000, elektrokimyasal ve katalitik sensör teknolojisi ile düşük konsantrasyonlardaki gaz değişimlerini hassas şekilde algılayabilmekte ve eşik değer aşımalarında sesli ve görsel alarm sistemi ile uyarı vermektedir. Elde edilen veriler, mağara ortamının iş sağlığı ve güvenliği kapsamında güvenli giriş koşullarının değerlendirilmesinde temel parametre olarak kullanılmıştır.

Görsel kayıt

Tez çalışması kapsamında mağara iç ortamının görsel olarak belgelenmesi, mevcut fiziksel ve çevresel koşulların kayıt altına alınması ve yapılan gözlem sonuçlarının desteklenmesi amacıyla fotoğraf makinesi ve cep telefonu kamerası birlikte kullanılmıştır. Arazi çalışmaları sırasında elde edilen görüntüler, mağara içerisindeki jeolojik oluşumların, galerilerin yapısal özelliklerinin, zemin koşullarının ve potansiyel risk unsurlarının detaylı bir şekilde incelenmesine olanak sağlamıştır. Özellikle cep telefonu kameralarının pratikliği ve erişilebilirliği önemli bir avantaj sunarken, fotoğraf makinesi ile daha yüksek çözünürlüklü ve detaylı görüntüler elde edilmiştir (Şekil 13).

Elde edilen tüm görseller, çalışma sürecinin sistematik bir şekilde dokümanite edilmesinde kullanılmış ve analiz aşamasında destekleyici veri olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, çekilen fotoğraflar hem mağara iç ortamının mevcut durumunu yansıtmakta hem de risk değerlendirme süreçlerinde görsel kanıt niteliği

taşımaktadır. Ayrıca bu görseller, çalışmanın bulgular bölümünde sunulan verilerin daha anlaşılır hale getirilmesine katkı sağlamış ve elde edilen sonuçların görsel olarak desteklenmesine imkân tanımıştır. Bu nedenle fotoğraf makinesi ve cep telefonu kamera kullanımı, çalışmanın güvenilirliğini ve bütünlüğünü artıran önemli bir veri toplama yöntemi olarak değerlendirilmiştir.



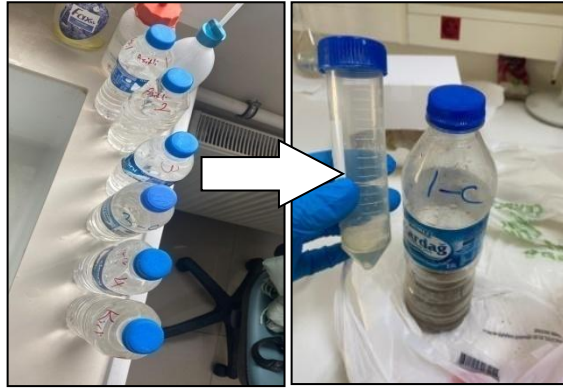
Şekil 13. Görsel kayıtlar için kullanılan fotoğraf makinesi

2.2.2. Laboratuvar. Çalışmaları

Bu tez çalışması kapsamında laboratuvarda yapılan çalışmalar, sahadan alınan su numunelerinin pH değer ölçümleri ve yine su numuneleri ile sahadan alınan toprak, çamur ve kaya parçalarının içeriğinde bulunan ağır metal ile iz element tespit çalışmaları yapılarak tamamlanmıştır.

pH Analizleri

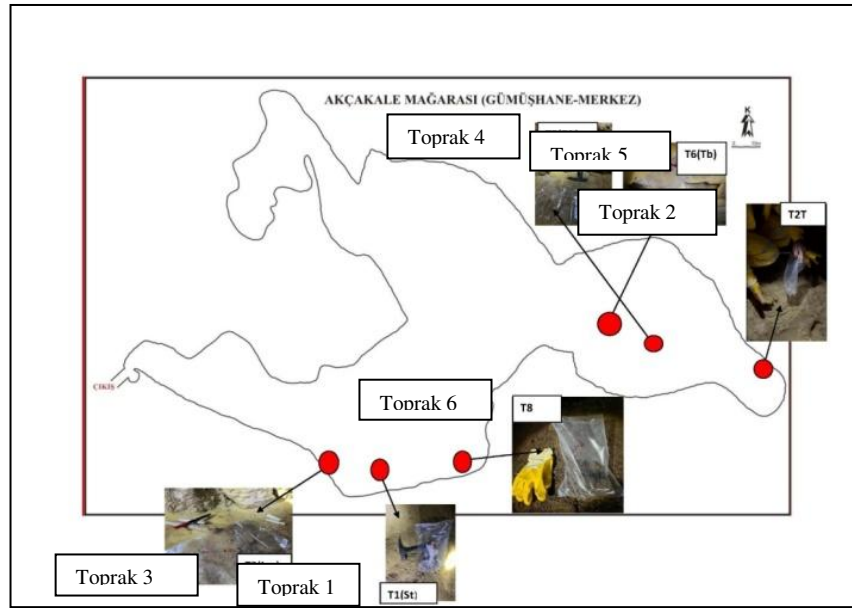
Çalışma alanındaki su varlığının pH değerleri ölçümü için 3 farklı noktadan su numunesi alınarak Gümüşhane Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarına incelenmek üzere götürülmüştür. Numunelerde askıda bulunan katı maddelerin uzaklaştırılması için filtre kağıdından geçirilmiştir (Şekil 14). Daha sonra ölçüm cihazı kalibrasyon için standart değerlerdeki çözeltilere daldırılarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyonun ardından ölçüm cihazının elektrodu saf su ile temizlenerek ölçüm işlemine başlanmıştır. Herbir numuneye 3 defa ard arda daldırılan elektrot uç, numunelerin pH ölçümü değerlerini ortaya koymuştur.



Şekil 14. Laboratuvar çalışmaları için alınan su numuneleri

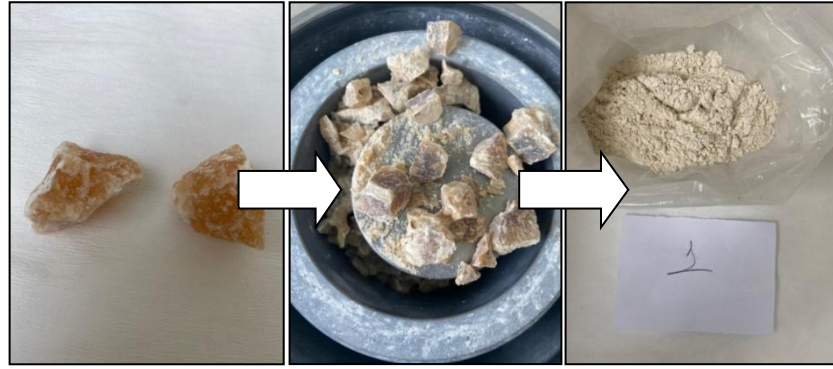
Ağır metal Ölçümleri

Ağır metal ölçümleri için çalışma alanında belirlenen 6 noktadan çamurlaşmış toprak ve kaya parçaları numuneleri alınarak laboratuvar çalışması yapılmıştır (Şekil 15).



Şekil 15. Örnek alınan noktalar.

Analiz sonuçlarına ulaşmak için öncelikle Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarında küçük parçalara ayrılan numuneler, öğütülmek üzere Gümüşhane Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarına götürülmüştür (Şekil 16).



Şekil 16. Öğütülen kayaç numunesinden bir örnek

Öğütülen numuneler, 0,5 gr civarında tartılarak mikrodalga sindirim kaplarına konulmuştur (Şekil 17).



Şekil 17. İçerisinde numuneler bulunan sindirim kapları

Kaplardaki numunelerin herbirinin ve kör olarak adlandırılan boş numune kabının üzerine 6 ml HCL, 2 ml H₂O₂, 2 ml HNO₃ ve 1 ml HF eklenerek çözünürleştirme işlemi için Mileston marka Start D model mikrodalga yakma cihazına yerleştirilmiştir (Şekil 18).



Şekil 18. Numunelere asit eklenmesi ve yakılmak üzere fırına yerleştirilmesi

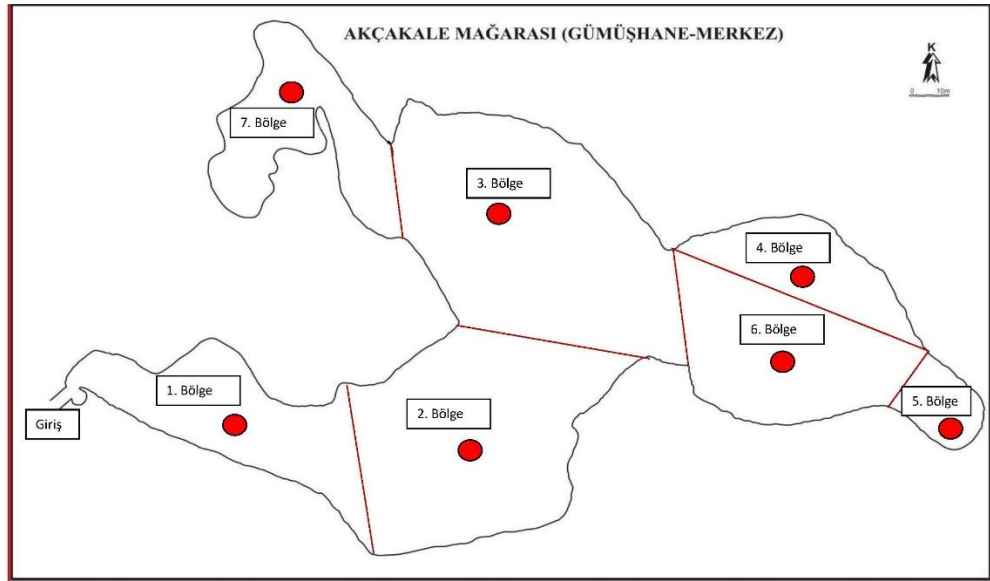
Yakma işlemi 200 C de 15 dk olarak gerçekleştirilmiştir. Yakma işleminden sonra oda sıcaklığına gelen numuneler 50 ml seyreltilerek +4 °C de 1 gece buzdolabında muhafaza edilmiştir.

Sonraki gün ise numuneler spektrum cihazı kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, toprak numunelerinde bulunan elementlerin konsantrasyonları belirlenmiştir.

2.2.3. Mağaranın Riskli Bölgelere Ayrılması

Tez çalışması kapsamında Akçakale Mağarası, daha kapsamlı ve sistematik bir analiz yapılabilmesi amacıyla bölgelere ayrılarak incelenmiştir. Bölgelendirme işlemi, mağaranın morfolojik yapısı, galeri ve salonların dağılımı, tavan, blok düşme yoğunluğu ve genel jeolojik özellikleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (Külekçi, 2023). Bu sayede mağara içerisindeki heterojen yapı göz önünde bulundurularak her bir alanın kendine özgü koşulları ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Çalışma alanı geniş bir yapıya sahip olduğu için, 7 ayrı noktadan ölçümler alındığı için 7 ayrı bölge için ayrı ayrı risk analiz çalışması yapılmıştır (Şekil 19).



Şekil 19. Mağaranın, bölgelere ayrılmış hali

Yapılan bölgesel analiz yaklaşımı sayesinde mağara içerisindeki risklerin mekânsal dağılımı daha net bir şekilde ortaya konulmuş, risk yoğunluğunun yüksek olduğu alanlar belirlenmiş ve bu alanlara yönelik daha odaklı değerlendirmeler yapılabilmiştir.

Belirlenen her bir bölgede hava akım hızı, ortam sıcaklığı, bağıl nem ve gaz konsantrasyonları ölçülmüş; ölçümler standart noktalarda ve karşılaştırılabilir veri elde edilecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra görsel analiz için fotoğraf makinesi kullanılarak tavan duraylılığı, çatlak gelişimi, blok düşmeleri, zemin koşulları ve nemlenme durumları detaylı olarak kayıt altına alınmıştır. Bu veriler, mağaranın farklı kesimlerinde oluşabilecek risklerin türü ve şiddeti hakkında önemli bilgiler sunmuştur.

Sonuç olarak, mağaranın bölgelere ayrılarak incelenmesi, hem ölçüm doğruluğunu artırmış hem de iş sağlığı ve güvenliği açısından daha etkin ve bütüncül bir değerlendirme yapılmasına imkân tanımıştır.

2.3. Akçakale Mağarasının Risk Analizi

Bu çalışmada risk analiz yöntemi olarak FMEA ve HAZOP yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler, FMEA ve HAZOP gibi risk analiz tekniklerinin uygulanmasında veri bütünlüğünü artırmış ve analizlerin daha güvenilir sonuçlar vermesine katkı sağlamıştır. Akçakale Mağarası ortamı için FMEA ve HAZOP risk analizleri, iş sağlığı ve güvenliği, madencilik, jeoloji ve ilgili diğer disiplinlerde bilgi ve deneyime sahip yaklaşık 20 gözlemcinin değerlendirmeleri doğrultusunda yürütülmüştür. Gözlemci sayısının yaklaşık 20 kişi ile sınırlandırılmasında, çalışma alanının doğal mağara ortamı olması etkili olmuştur. Mağara içerisinde düzensiz zemin yapısı, yer yer kaya düşmesi ve çökme riski taşıyan bölgelerin bulunması, güvenli çalışma koşullarının sağlanması ve mağaranın doğal yapısının korunması gerekliliği nedeniyle aynı anda çok sayıda kişinin çalışma alanında bulunması uygun görülmemiştir. Bu nedenle, hem güvenilir ve çok yönlü değerlendirmelerin yapılabilmesi hem de çalışma güvenliğinin sağlanabilmesi amacıyla farklı disiplinlerden uzman görüşlerini temsil edecek yaklaşık 20 gözlemci ile risk puanlaması yapılarak risk analiz tabloları oluşturulmuştur.

2.3.1. FMEA'nın Temel Kavramları ve Yapısı

FMEA analizi, belirli bir sistem veya sürecin kapsamının tanımlanmasıyla başlayan ve potansiyel hata türlerinin sistematik olarak belirlenmesini içeren bir yöntemdir. Bu süreçte, analiz edilecek bileşen, adım veya süreçte hangi tür hataların oluşabileceği ortaya konulmakta, ardından bu hataların olası sonuçları değerlendirilerek etkilerinin ciddiyet derecesi belirlenmektedir. Bir sonraki aşamada, söz konusu hataların gerçekleşme olasılığı analiz edilmekte ve mevcut kontrol sistemleri çerçevesinde bu

hataların ne ölçüde tespit edilebilir olduğu değerlendirilmektedir. Tüm bu parametrelerin bir araya getirilmesiyle Risk Öncelik Değeri (RÖD) hesaplanmakta ve böylece hatalar önceliklendirilerek gerekli önlemlerin planlanması sağlanmaktadır (Tablo 2). RÖD, FMEA'nın en önemli unsurlarından biri olup, hangi risklerin öncelikli olarak ele alınması gerektiğini belirlemede temel bir ölçek olarak kullanılmaktadır (Çevik veAran, 2009).

$$\text{Formülü : RÖD} = \text{İxŞxT} \quad (1)$$

Tablo 2. FMEA risklerin derecelendirilmesi

Sıra	Risk Öncelik Değeri	Karar
1	01-50 arası	Düşük risk
2	50-100 arası	Orta risk
3	100-200 arası	Yüksek risk
4	200-1000 arası	Çok yüksek risk

Şiddet (Ş): Bir hata gerçekleştiğinde ortaya çıkan sonuçların sistem, insan ve çevre üzerindeki etkisinin büyüklüğünü ifade eder. (Tablo 3).

Tablo 3. FMEA şiddet değerleri

Sistem FMEA Şiddet Etki Sınıflaması		
Etki	Şiddetin Etkisi	Derece
Uyarısız gelen tehlike	Felakete yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata	10
Uyarısız gelen tehlike	Yüksek hasara ve toplu ölümlere yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata	9
Çok yüksek	Sistemin tamamen hasar görmesine neden olan, yıkıcı etkiye, ağır yaralanmalara, zehirlenme, 3. derece yanık, akut ölümcül hastalık vb. etkiye sahip hata	8
Yüksek	Ekipmanın tamamen hasar görmesine sebep olan ve ölüm, zehirlenme, 3. derece yanık, akut ölümcül hastalığa vb. sebep olan hata	7
Orta	Sistemin performansını etkileyen, uzuv ve organ kaybına, ağır yaralanmalara, kanser vb. neden olan hata	6
Düşük	Kalıcı iş göremezlik, kırık, 2. Derece yanık, beyin sarsıntısı vb. neden olabilecek hata	5
Çok düşük	İncinme, küçük kesik ve sıyrıklar, ezilmeler vb. hafif yaralanmalar ve kısa süreli rahatsızlıklara neden olan hata	4
Küçük	Sistemin çalışmasını yavaşlatan hata	3
Çok küçük	Sistemin çalışmasında kargaşaya yol açan hata	2
Yok	Etki yok	1

İhtimal (İ): Bir hata türünün belirli koşullar altında ortaya çıkma ihtimalini ifade eden göreceli bir risk parametresidir. (Tablo 4).

Tablo 4. FMEA ihtimal derecesi tablosu

Hata İhtimali	Hata Kümülatif Sayısı	Derece
Çok yüksek - kaçınılmaz hata	$\frac{1}{2}$ ' den fazla	10
	1/3	9
Yüksek - tekrar tekrar hata	1/8	8
	1/20	7
Orta- ara sıra olan hata	1/80	6
	1/400	5
	1/2000	4
Düşük - nispeten az olan hata	1/15000	3
	1/150000	2
Pek az - olası olmayan hata	1/500000'den düşük	1

Tespit Edilebilirlik (T): Bir hata türünün meydana gelmeden önce veya meydana geldiği anda tespit edilme olasılığını ifade eder ve kontrol mekanizmalarının etkinliğine bağlıdır. (Tablo 5).

Tablo 5. FMEA risklerin tespit edilebilirlik derecesi tablosu

TESBİT EDİLEBİLİRLİK	TESBİT EDİLEBİLİRLİK OLASILIĞI	DERECE
Tespit edilemez	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği mümkün değil	10
Çok az	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği çok uzak	9
Az	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği uzak	8
Çok düşük	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği düşük	7
Düşük	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği çok düşük	6
Orta	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği orta	5
Yüksek ortalama	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği yüksek ortalama	4
Yüksek	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği yüksek	3
Çok yüksek	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği çok yüksek	2
Hemen hemen – kesin	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği kesin	1

2.3.2. HAZOP'un Temel Kavramları ve Uygulanması

HAZOP analizi, genellikle proses akış diyagramları (PFD) veya boru-akış şemaları üzerinden yürütülen sistematik bir risk değerlendirme yöntemidir. Bu kapsamda öncelikle analiz edilecek sistem veya proses, daha ayrıntılı inceleme yapılabilmesi amacıyla küçük ve yönetilebilir bölümlere ayrılmaktadır. Ardından basınç, sıcaklık, akış hızı, debi ve kimyasal özellikler gibi temel parametreler belirlenerek analiz sürecinin temelini oluşturmaktadır. Belirlenen bu parametreler üzerinde “fazla”, “az”, “hiç”, “ters”, “parçası”, ”...kadar iyi”, “...dan başka” gibi yönlendirici ifadeler (guide words) kullanılarak olası anormallikler sistematik bir şekilde incelenmektedir (Tablo 6). Her bir anormallik için potansiyel tehlikeler ve bu tehlikelerin olası sonuçları detaylı olarak değerlendirilmekte, son aşamada ise riskleri azaltmaya veya tamamen ortadan kaldırmaya yönelik önleyici ve düzeltici önlemler önerilmektedir(Marhaviyas vd., 2020).

Tablo 6. HAZOP anahtar kelimeleri

Anahtar Kelimeler	Anlamı
Fazla	Kantitatif çoğalma
Az	Kantitatif azalma
Hiç	Mevcut değil
Ters	Öngörülen yönün aksine
Parçası	Sistemin bir bölümü olmasından gerekenden farklı
... kadar iyi	Aynı derecede
... dan başka	Tamamen farklı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gümüşhane ili, Akçakale Mağarasında yapılmış olan incelemede, mağara ortamının çok geniş olması sebebiyle, detaylı risk analizi çalışması yapılabilmesi için mağara yedi bölgeye ayrılarak saha ve laboratuvar çalışmaları butez kapsamında yapılmıştır.

Belirlenen her bir bölge kendi içinde fiziksel, kimyasal, biyolojik, çevresel ve yapısal olarak incelenip değerlendirilmiştir. Çalışma sürecinde, risklerin sistematik bir şekilde belirlenmesi ve analiz edilmesi amacıyla FMEA (Hata Türleri ve Etkileri Analizi) ve HAZOP (Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi) yöntemleri birlikte kullanılmıştır.

FMEA yöntemi ile her bir bölgede ortaya çıkabilecek potansiyel hata türleri, bu hataların olası nedenleri ve etkileri belirlenerek risk önceliklendirmesi yapılmıştır. HAZOP yöntemi kapsamında ise sistematik bir yaklaşımla, belirlenen bölgelerdeki süreçler ve ortam koşulları üzerinden sapmalar analiz edilmiş ve olası tehlikeler detaylı olarak incelenmiştir. Bu iki yöntemin birlikte kullanılması, hem potansiyel risklerin belirlenmesinde hem de bu risklerin neden-sonuç ilişkisi içerisinde değerlendirilmesinde önemli detaylar ortaya koymuştur.

Yapılan analizlerde mağara ortamında hava kalitesi, nem, sıcaklık, aydınlanma, gaz birikimi, zemin koşulları, yapısal stabilite ve biyolojik olmak üzere çeşitli parametreler dikkate alınmış; elde edilen bulgular saha gözlemleri ve ölçüm verileri ile desteklenmiştir. Ayrıca çalışma sürecinde elde edilen veriler, her bir bölge için ayrı ayrı değerlendirilerek risklerin dağılımı ve yoğunluğu ortaya konulmuştur. Bu kapsamda, mağara ortamında oluşabilecek potansiyel tehlikeler belirlenmiş ve elde edilen bulgular iş sağlığı ve güvenliği perspektifinde analiz edilmiştir.

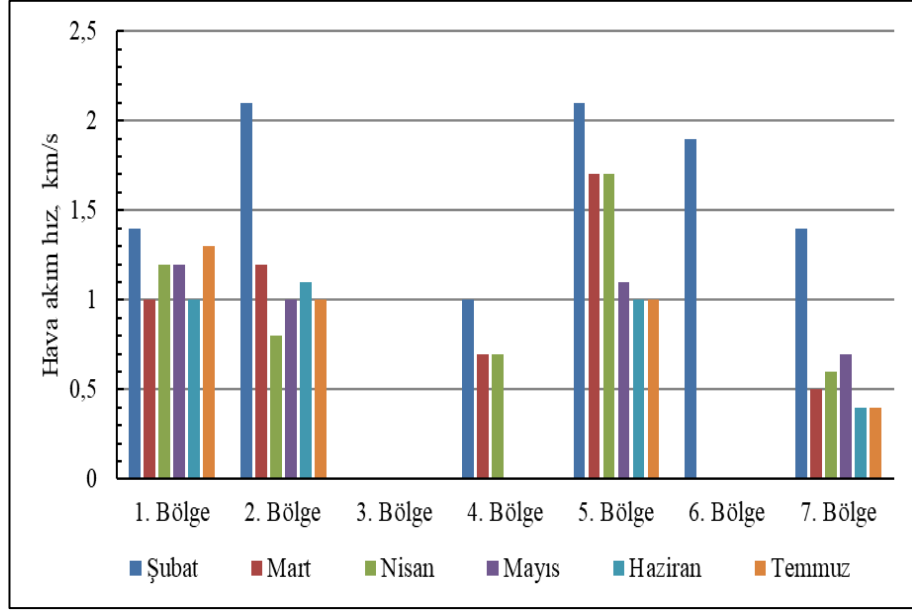
3.1. Saha Çalışmalarından Elde Edilen Bulguları

Bu tez çalışması kapsamında saha ve laboratuvar olmak üzere iki farklı çalışma grubu oluşturulmuştur. Saha çalışmaları kapsamında, mikroklimatik koşulların belirlenmesi amacıyla sıcaklık ve nem ölçümü, hava akım hızı ölçümü, gaz ölçümü ve görsel kayıtlar alınarak, Akçakale mağarası riskli bölgelere ayrılmış olup risk analizi tamamlanmıştır. Laboratuvar çalışmaları kapsamında ise çalışma alanının belirli noktalarından çamurlanmış toprak, kaya parçaları ve dökülmüş mağara içi oluşumlardan

numuneler alınarak ağır metal ölçümleri ve pH analizleri için su numuneleri alınarak çalışmaları yapılmıştır.

3.1.1. Hava Akım Hızı

Tez kapsamında düzenli aylık periotlarda 6 ay boyunca alınan ölçümler sonucunda hava akım hızı belirlenmiştir (Şekil 20).



Şekil 20. Mağara içi hava akım hızı

Şekil 20’de görüldüğü gibi hava akım hızının en yüksek olduğu ay Şubat ayı, en düşük olduğu ay ise temmuz ayıdır. Mağaranın tek bir girişi olduğundan dolayı bazı bölgelerde hava durağan ve hava sirkülasyonu yoktur. Bu nedenle ölçüm alınamamıştır. Alınan ölçümler sonucunda en yüksek değer ikinci bölgede şubat ayında 2,1 km/s, en düşük değer ise temmuz ayında 0,4 km/h ile yedinci bölgede ölçülmüştür.

Birinci bölgede genel olarak yüksek olma sebebi giriş bölgesi olduğu içindir. Birinci bölgedeki hava akım hızı ortalamasına bakıldığında insan sağlığı açısından normal bir seviyede seyretmektedir. Bu değerler bölgede yeterli hava sirkülasyonu olduğunun bir göstergesidir. Mikroklimatik açıdan bakıldığında nem ve gaz birikimini kontrol altında tutan değere sahiptir. Ziyaretçiler içinde ferah bir geçiş sağlamaktadır.

İkinci bölgede yine birincibölgedeki hava akım hızı kadar iyi bir seviyededir. Mikroklimatik açıdan bu bölgedeki nem oranının birinci bölgeye göre yüksek olmasından dolayı hava asılı toz miktarı daha düşüktür, gaz birikimi miktarı da yine düşüktür. İnsan sağlığı açısından ikinci bölgedeki hava akım hızı koşulları uygundur.

Üçüncü bölgede altı ay boyunca yapılan hiçbir ölçümde hava akım hızı tespit edilememiştir. Bu da bu bölgeye gelen ziyaretçilerin uzun süre kalması halinde bazı, baş ağrısı, baş dönmesi ve bunalma gibi rahatsızlar yaşamasına zemin hazırlayacaktır.

Dördüncü bölgede altı ay boyunca yapılan tüm ölçümlerde sadece şubat, mart ve nisan aylarında hava akım hızı tespit edilebilmiştir. Kalan diğer aylarda hava akım hızının 0 km/h olduğu görülmüştür.

Beşinci bölge, hava akım hızı açısından tüm bölgelere göre en yüksek değerlere sahip bölgesidir. Şubat ayında en yüksek 2,1 km/h değer ile haziran ve temmuz ayında ise en düşük 1 km/h değerinde ölçülmüştür. Hava akım hızı ölçüm yapılan hiçbir ayda 1 km/h altına düşmemiştir. 1,4 km/s ile en yüksek ortalamaya sahip bölgedir.

Altıncı bölge altı ay boyunca yapılan tüm ölçümlerde hava akım hızı 1,9 km/s ile sadece şubat ayında tespit edilmiştir.

Yedinci bölgede hava akım hızı en yüksek 1,4 km/h ile şubat ayı, 0,4 km/s ile de haziran ve temmuz ayında ölçülmüştür. Tüm ayların ortalaması 0,6 km/s'dir.

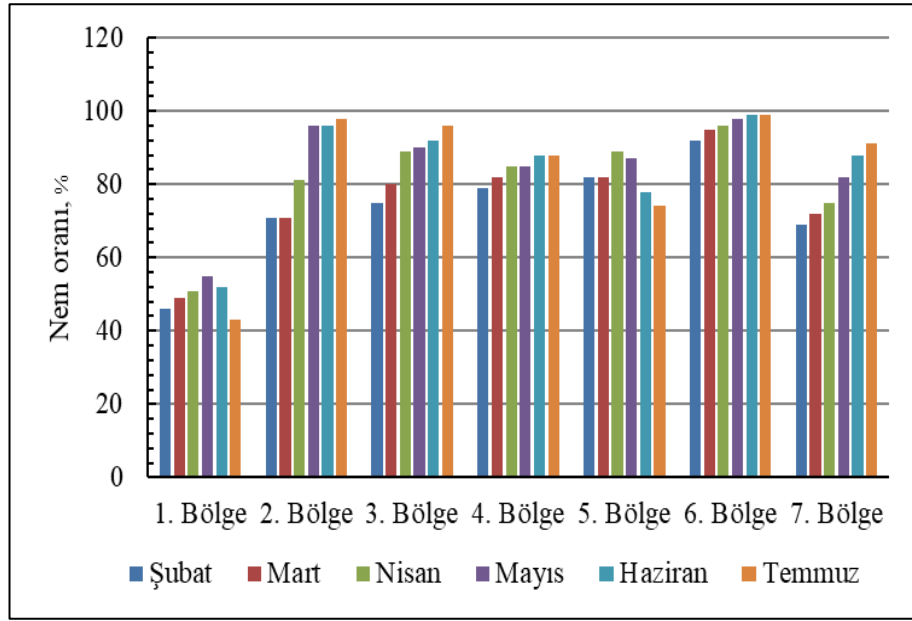
Hava akım hızı, çalışma ortamının termal koşullarının değerlendirilmesinde kullanılan temel çevresel parametrelerden biridir. TS EN ISO 7730 standardına göre termal konfor değerlendirmesinde hava akım hızının 0–1 m/s aralığında olması gerekmektedir.

Bu aralık kilometre/saat cinsinden 0–3,6 km/s değerlerine karşılık gelmektedir. Bu nedenle çalışmada ölçülen hava akım hızı değerleri 0–3,6 km/sa referans aralığı dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ölçüm sonuçlarının bu aralık içerisinde bulunması, değerlerin TS EN ISO 7730 standardında termal konfor değerlendirmesi için belirtilen hava akım hızı aralığında olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte söz konusu aralığın doğal mağara ortamı için doğrudan bir yasal sınır değer değil, termal konfor değerlendirmesine ilişkin bir referans aralığı olduğu dikkate alınmalıdır (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2006).

Hava akım hızının ölçümü sonucunda genel olarak bölgeleri birbiriyle kıyaslayacak olursak en güvenli olan bölgelerin birinci ve beşinci bölgeler olduğunu, en riskli olanlar ise üçüncü ve altıncı bölgeler olduğu söyleyebiliriz. Riskli bölgelerde gaz birikimi, yetersiz hava koşulları birer risk parametresi olarak değerlendirilmiştir

3.1.2. Nem

Tez çalışması kapsamında, çalışma alanı olan Akçakale Mağarası'na 6 ay boyunca her ay düzenli girilerek nem ölçümü yapılmıştır (Şekil 21).



Şekil 21. Mağara içi nem ölçüm sonucu grafiği

Birinci bölge, mağaranın dış dünyaya en yakın noktasıdır. Ortalama % 50'nin altındaki nem oranı mağara iklimi için uygun koşulu oluşturmaz ve kurak sayılır. Mağara içi oluşumların dökülme riskini artırabilmektedir ve yeni oluşum gözlenmesi nadir beklenmektedir. Fakat bu oran, insan sağlığı açısından termal konfor parametresi olarak bakıldığında gayet uygundur. Bu bölgede bulunan insanlar terleme yoluyla ısıyı vücuttan kolayca tahliye edebilir. İnsan sağlığı için risk unsuru olabilecek durum ise toz oluşumudur ve bu oluşum hava kalitesini etkileyerek partikül maruziyetini artırabilir olmasıdır.

İkinci bölge, birinci bölgeyi geçtikten sonra nem oranının hızla yükseldiği bölgedir. İkinci bölgede nem oranı kıştan yaza doğru doğru orantılı olarak artış göstermiştir. Şubat ve mart aylarında düşük nem oranına sahipken temmuz ayında yükselen nem oranıyla %98 e kadar ulaşmıştır. Bu bölgede yüksek nem sebebiyle yoğunlaşan bir hava hakimdir. İnsan sağlığı için elverişli bir ortam olmasada mağara iklimi için uygun bir bölgedir. Bu bölgede mağara içi oluşumların görülmesi beklenen bir durumdur.

Üçüncü ve dördüncü bölgelerdeki nem oranı da ikinci bölge gibi kış aylarından yaz aylarına doğru doğru orantılı bir artış göstermiştir. Yani mağaranın derinliklerine doğru ilerledikçe yüksek nem oranı ile birlikte bunaltıcı ağır bir hava söz konusudur. Bununla birlikte kaygan bir zemin oluşumu görülmüştür.

Beşinci bölgedeki nem oranı %89 oranla en yüksek nisan ayında %74 oranla ise en düşük temmuz ayında ölçülmüştür. Ölçüm yapılan aylarla doğru orantılı değil

karma bir dengeye sahiptir. Bu durum mevsimsel etkilerin mağaraya yansıdığını göstermektedir. Dengesiz bir nem oranına sahip olsa da yüksek bir nem oranına sahiptir.

Altıncı bölge, tüm bölgeler içinde en yüksek nem oranına sahip bölgedir. %92'lik nem oranıyla en düşük veri şubat ayında ölçülmüştür. Haziran ve temmuz aylarında ise %99 nem oranıyla en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Haziran ve temmuz ayında yapılan ölçümlerde, havanın neme tam olarak doyumuyla birlikte ölçüm yaptığımız cihaz arıza moduna geçmiştir. Bu yüzden ölçüm defalarca tekrarlanmıştır. Bu demek oluyor ki mağaranın bu bölgesinde hava akım hızı yoktur. Hava akım hızı ölçüm verileri de şubat ayı hariç diğer aylarda 0 km/h ile bunu desteklemektedir. Altıncı bölge olan bu bölgede kaygan zemin, ekipman ve cihaz korozyonu, ısı çarpması riski gibi riskler oldukça yüksektir.

Yedinci bölge, %69 nem oranıyla en düşük veriyi şubat ayında, %91 nem oranıyla ise en yüksek temmuz ayında vermiştir. Kıştan yaza doğru hava sıcaklığıyla doğru orantı göstermiştir. Bölgenin çukur oluşu sebebiyle içerideki su oranının artışıyla nem oranında da artış görülmüştür. Bölge diğer bölgeler gibi yüksek nem oranına sahiptir.

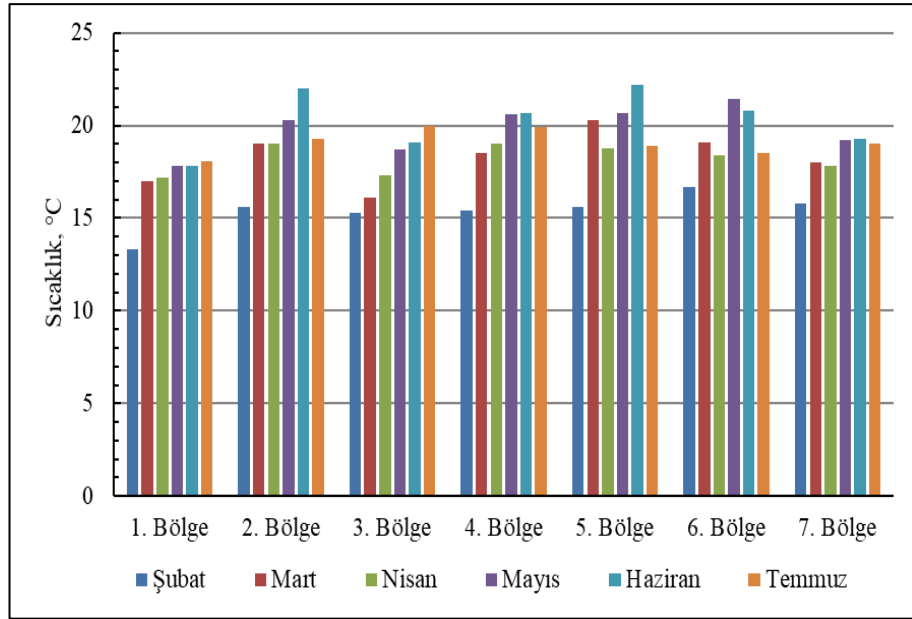
Tüm bölgeler birlikte değerlendirildiğinde nem oranının %99 lara ulaşarak pik yaptığı altıncı bölge en yüksek nem oranına sahip bölgedir. Nem açısından en riskli bölgedir. En düşük ortalama ile en düşük nem oranına sahip olan bölge birinci bölgedir ve insan sağlığı açısından uygundur. Birinci bölge hariç diğer bölgeler insan sağlığı açısından yüksek bir orana sahiptir. Bu durum beraberinde birçok sağlık sorununa sebebiyet verebilecek düzeydedir. Birinci bölge haricinde diğer 6 bölgenin yüksek nem oranına sahip olmasına rağmen her bölgede farklılıklar göstermesi mağarada farklı mikroklimatik bölgeler olduğunu göstermektedir. Ama yüksek nem varlığının en güzel yanı mikroklimatik açıdan mağaranın tam bir mağara olma özelliğine sahip olmasıdır.

Bağıl nem, çalışma ortamının termal konfor koşullarının değerlendirilmesinde dikkate alınan temel çevresel parametrelerden biridir. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı tarafından yayımlanan termal konfor değerlendirmesine ilişkin dokümanda, ortamın bağıl nem değerinin %30–70 aralığında olması önerilmektedir. Buna göre, ölçülen bağıl nem değerlerinin %30'un altında veya %70'in üzerinde olması önerilen aralığın dışında; %30–70 aralığında bulunması ise önerilen nem aralığı içerisinde değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, bağıl nemin termal konfor üzerindeki etkisinin ortam sıcaklığı ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği belirtilmektedir. Bu çalışmada mağara ortamında ölçülen bağıl nem değerleri %30–70 referans aralığı dikkate alınarak değerlendirilmiştir (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2021)

Aydoğdu ve arkadaşının 2015'te yapmış oldukları çalışmada mağara iç ortam nem değerlerini %100 olarak bulmuşlardır. Tez çalışmamda yaptığımız ölçümlerin Akçakale Mağarasının nem oranının, ortamın heterojen bir nem dengesine sahip olsada bu verilere uygun olarak sınır değerlerin üzerinde olduğu görülmüştür veyaptıkları çalışmayı desteklemektedir (Aydoğdu, ve Şevik. 2015).

3.1.3. Sıcaklık

Tez çalışması kapsamında, çalışma alanında 6 aylık düzenli aralıklarla yapılan sıcaklık ölçümü sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki gibidir (Şekil 22).



Şekil 22. Mağara içi 6 aylık sıcaklık ölçüm sonucu

Birinci bölge sıcaklık ölçüm sonuçlarına göre,şubat ayında sıcaklık 13,3 °C ile en düşük seviyededir. Mart ve Nisan aylarında kademeli bir artış gözlenerek sıcaklık 17°C seviyelerine ulaşmaktadır. Mayıs ve Haziran aylarında artış devam ederek 17,18 °C'ye çıkmakta, Temmuz ayında ise küçük bir artışla 18,1 °C'ye ulaşmaktadır. Bu durum, 1. bölgede dış ortam etkisinin nispeten hissedildiğini ve sıcaklığın mevsimsel olarak değiştiğini göstermektedir. Fakat dış dünyadan bağımsız bir iklimi olduğu görülmüştür. Çünkü şubat ayında dış dünyanın sıcaklığı 4 °C temmuz ayında ise 30 °C civarında iken içeriye çalışma yapılmaya girilmiştir.

Diğer bölgelerdeki sıcaklık değerleri, incelendiğinde, Mağara içerisindeki sıcaklık ölçümlerin dar bir aralıkta değiştiği ve ortamın genel olarak termal açıdan stabil bir yapı sergilediği görülmüştür. Bu durum mağaranın doğal izolasyon özelliğinden kaynaklanmakta olup, dış ortam sıcaklık değişimlerinin iç ortama sınırlı düzeyde

yansıdığını göstermektedir. Bununla birlikte bazı bölgelerde sıcaklık değerlerinin diğer bölgelere göre nispeten yüksek olduğu belirlenmiştir.

Aylık değişim açısından değerlendirildiğinde ise, mağara içi sıcaklıkların yıl boyunca büyük dalgalanmalar göstermediği, ancak mevsimsel geçişlere bağlı olarak sınırlı artış ve azalışların meydana gelebileceği görülmektedir. Özellikle yaz aylarında sıcaklıkta hafif artışlar, kış aylarında ise sınırlı düşüşler gözlenebileceği, ancak bu değişimlerin mağara iç ortamında belirgin bir termal dengesizlik oluşturmayacak düzeyde olduğu değerlendirilmiştir.

TS EN ISO 7730 standardında termal konfor değerlendirmesi için kuru hava sıcaklığının 10–30 °C aralığında olması öngörülmektedir. Bu çalışmada mağara ortamında ölçülen sıcaklık değerlerinin 10–30 °C aralığında bulunması, değerlerin standardın termal konfor değerlendirmesi için öngörülen sıcaklık aralığı içerisinde olduğunu göstermektedir (TSE, 2006).

Bekaroğlu'nun 2006'da yapmış olduğu tez çalışmasında Gümüşhane Karaca Mağarası'nın iç ortam sıcaklık değerlerine yer vermiştir. Çalışmada, mağara iç ortam sıcaklığının dış ortamdan bağımsız, mevsimsel olarak küçük değişimler gözlemlendiği dengeli bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Yapmış olduğumuz tez çalışmasında, Akçakale Mağarası iç ortam sıcaklık değerleri Bekaroğlu'nun yapmış olduğu çalışma gibi dengeli bir yapıya sahip olduğu ve dış ortamdan bağımsız destekleyen sonuçlar vermiştir (Bekaroğlu, 2006).

3.1.4. Gaz Ölçümü

Mağarada CO₂, O₂, CO, CH₄, H₂S, gaz ölçümleri 6 ay boyunca periyodik olarak,aydınlanma ise kapalı ortam olmasından ve doğal bir aydınlanma olmamasından dolayı çalışmaya başlanılan ilk ay olan şubat ayında yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda CO, CH₄, H₂S gazlarına ve aydınlanmaya rastlanmamış, O₂ gazı ise tüm bölgelerde ölçüm yapılan tüm zamanlarda solunabilir seviyede ölçülmüştür. (Tablo 7).

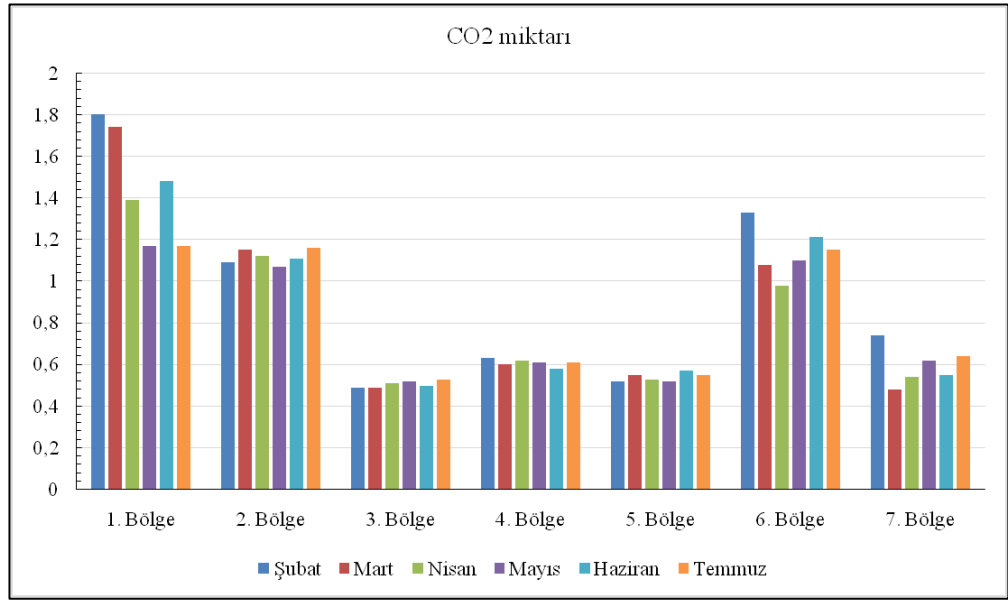
Tablo 7. CO, CH₄, H₂S, O₂ ve aydınlanma ölçüm sonuçları

Parametre	Birim	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz
Oksijen (O ₂)	%	20,9-20,7	20,8-21	20,9-20,5	20,6-21	20,8-20,9	20,9-20,6
Metan (CH ₄)	Ppm	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
Karbonmonoksit (CO)	Ppm	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
Hidrojen Sülfür(H ₂ S)	Ppm	0-0	0—0	0-0	0-0	0-0	0-0
Aydınlanma	Lux	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0

Ölçümler sonucu, sıfır değerli olan gazların mağarada, patlayıcı ve toksik gaz kaynaklı ani tehlikelere sebep olmayacağı görülmüştür. Ölçülen aydınlanma seviyesinin

çalışma yapıldığı esnada yapay aydınlatma el feneri vb. kaynaklardan dolayı sağlıklı olması, aydınlatıcıların kapatılarak ölçüm almanın mümkün olmamasından dolayı sıfır kabul edilmiştir. Bu nedenle yapay aydınlatmasız mağara içi görsel algının tamamen kısıtlı olduğu ve kişilerin yön tayini, zemin farklılıklarını fark etme ve engellere çarpma risklerinin arttığı tespit edilmiştir.

Oksijen oranı ise tüm ölçüm periyodu boyunca tüm bölgelerde solunabilir seviyede ölçülmüş ve bu durum ortamın solunabilir hava koşullarını sağladığını göstermektedir.



Şekil 23. Mağaradaki CO₂ miktarı

Birinci bölgede ölçülen CO₂ değerleri ölçüm sonuçlarına göre en fazla şubat ayında %1.8 lik konsantrasyonla ölçülmüştür. Yüksek seviyelerde başlayan konsantrasyonun nisan ve mayıs aylarında azalma eğilimi gösterdiği, Haziran ayında tekrar yükselerek Temmuz ayında yeniden düşüşe geçtiği görülmektedir. Bu dalgalı yapı, bölgenin dış ortamla kısmen etkileşim halinde olduğunu ve hava hareketlerinin dönemsel olarak değiştiğini göstermektedir. Bu nedenle 1. bölge, mikroklimatik açıdan yarı açık bir geçiş alanı özelliği göstermektedir. Bunun yanında CO₂ ölçüm sonuçları bölgelere göre değiştiği belirlenmiştir (Şekil 23).

İkinci bölgede CO₂ değerlerinin genel olarak orta seviyede seyrettiği ve aylar arasında belirgin ancak sınırlı dalgalanmalar gösterdiği görülmektedir. Şubat ayında düşük başlayan değerler Mart ayında artış göstermiş, Mayıs ayında en düşük seviyeye gerilemiş ve sonrasında tekrar yükselmiştir. Bu durum, bölgedeki hava sirkülasyonunun

tamamen sabit olmadığını ancak ani gaz birikimi oluşturacak kadar da kapalı bir yapı sergilemediğini göstermektedir.

Üçüncü bölgede ölçülen CO₂ konsantrasyonlarının diğer bölgelere kıyasla daha düşük seviyelerde olduğu ve genel olarak dengeli bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Şubat ve Mart aylarında en düşük değerlerin ölçülmesi, bu bölgenin hava kalitesi açısından daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır. İlkbahar aylarında hafif artış gözlenirse de genel olarak sabit bir CO₂ varlığı söz konusudur. Hava akım hızı bu bölgede tüm aylarda tüm ölçümlerde 0 km/h olduğu göz önüne alınırsa aralarında bir zıtlık olduğu görülmüştür.

Dördüncü ve beşinci bölgelerde ölçülen CO₂ değerleri benzer özellikler gösterdiği için birlikte değerlendirildiğinde, her iki alanın da benzer mikroklimatik özellikler sergilediği ve genel olarak orta seviyede, sınırlı dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Her iki bölgede de şubat ayından itibaren değerlerin küçük artış ve azalışlar göstererek ilerlediği, belirgin bir yükselme ya da keskin düşüş eğilimi olmadığı belirlenmiştir. Özellikle mart ayındaki artış ve ardından nisan–mayıs dönemindeki kısmi düşüş ile haziran ayında tekrar gözlenen yükselme eğilimi, bu bölgelerde hava hareketlerinin mevsimsel etkilerle sınırlı düzeyde değiştiğini göstermektedir. Bu durum, dördüncü ve beşinci bölgelerin ne tamamen kapalı bir yapı sergilediğini ne de dış ortamla doğrudan etkileşim halinde olduğunu, aksine orta düzeyde bir hava sirkülasyonuna sahip dengeli geçiş alanları olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla bu iki bölge, gaz birikimi açısından yüksek riskli alanlar arasında yer almamakla birlikte, mikroklimatik dengeyi koruyan ve kontrollü değişim gösteren bölgeler olarak kabul edilebilir.

Altıncı bölgede 6 ay boyunca periyodik ölçümler sonucu CO₂ değerleri, diğer tüm bölgelere küçük bir dalgalanma farkıyla belirgin yüksek olup tüm ölçüm döneminde bu seviyesini korumaktadır. Bölgede 6 aylık ortalama CO₂ konsantrasyon değeri %1,14 olarak ölçülmüştür. Değerlerin aylar boyunca birbirine yakın olması, bu bölgede bir miktar gaz birikimi olduğunu ve havalandırmanın olmadığını göstermektedir. Bu durum, bölgenin kapalı bir mikroklimaya sahip olduğunu ve özellikle iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi gereken bir alan olduğunu ortaya koymaktadır.

Yedinci bölgede CO₂ değerleri Şubat ayında %0,74'lük konsantrasyonla nispeten yüksek seviyede başlamış, Mart ayında düşüş göstermiş ve sonraki aylarda kademeli olarak artış eğilimi sergilemiştir. Bu düzenli değişim, bölgenin dengeli ancak tamamen sabit olmayan bir hava yapısına sahip olduğunu göstermektedir. Genel olarak orta seviyede kalan CO₂ değerleri, bu alanın ne yüksek riskli ne de tamamen güvenli bölgeler arasında yer aldığını ifade etmektedir.

Tablo 8.Yer altı maden ocağında gaz seviyeleri ve alınması gereken önlemler

Gaz	Normal Seviye	Tehlike Sınırı	Kritik Seviye	Alınması Gereken Önlemler
Metan (CH ₄)	< %1.0	%1.0-%1.5 (Dikkat)	≥%1.5 (Üretim Durdurulur)	Havalandırma artırılır, kıvılcım yaratabilecek işler yasaklanır.
		%1.5-%2.0 (Tehlikeli)	≥%2.0 (Ocak Tahliye Edilir)	Tüm personel tahliye edilir, elektrik kesilir, ocak kapatılır.
Oksijen (O ₂)	%20.8-%19.5	< %19.5 (Düşük O ₂)	≤%18 (Boğulma Riski, Tahliye)	Havalandırma artırılır, fazla CO ₂ CH ₄ kontrol edilir.
Karbondioksit (CO ₂)	< %0.5	%0.5-%1.0 (Dikkat)	≥%1.5 (Solunum Riski, Tahliye)	Havalandırma artırılır, CO ₂ kaynağı araştırılır.
Karbon Monoksit (CO)	< %10 ppm	10-50 ppm (Dikkat)	≥50 ppm (Zehirlenme, Tahliye)	Kişisel koruyucu donanım (maske) kullanılır, ocak güvenliği kontrol edilir.
Hidrojen Sülfür (H ₂ S)	< %10 ppm	10-20 ppm (Tehlikeli)	≥20 ppm (Ölümcül Seviyeler, Tahliye)	Anında gaz maskesi takılmalı, kaynak araştırılmalı.

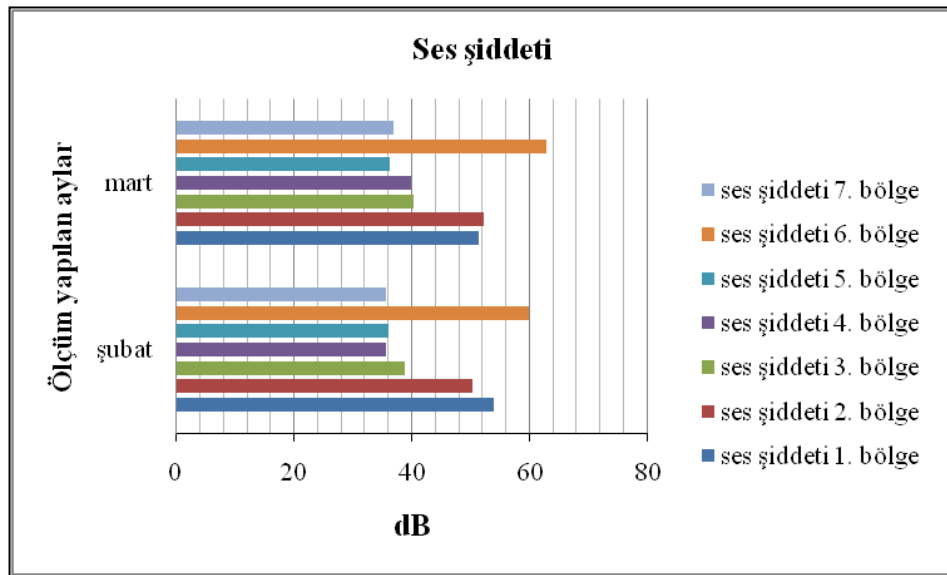
Yeraltı çalışma ortamlarında gazlara ilişkin sınır değerler, Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği esas alınarak Tablo 8’de verilmiştir (Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği, 2013, Ek-3), (Tablo 8). Mağaranın tamamında mikroklimatik değerler homojen bir yapı göstermemektedir. Mağaradaki CO₂ miktarı genel olarak dikkat edilmesi gereken seviye değerlerindedir. Mevcut durumda tahliye gerektiren bir durum yoktur fakat içeriye girebilecek ziyaretçi sayısına göre O₂ seviyelerindeki düşüş CO₂ miktarındaki artışa neden olacaktır ve havalandırma için uygun şartlar oluşmıyorsa tahliye zorunlu hale gelecektir.

Mağara ortamında gerçekleştirilen gaz ölçümleri, oksijen (O₂), metan (CH₄), karbondioksit (CO₂), karbonmonoksit (CO) ve hidrojen sülfür (H₂S) parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesinde, mağara ortamının yeraltı atmosferi ile benzer özellikler taşıması nedeniyle Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği Ek-3’ün 8.5 maddesinde belirtilen referans değerlerden yararlanılmıştır. İlgili düzenlemeye göre ortam havasında oksijen konsantrasyonunun %19’un altına düşmemesi, metan konsantrasyonunun %2’yi aşmaması, karbondioksit konsantrasyonunun %0,5’i aşmaması ve karbonmonoksit konsantrasyonunun 50 ppm’in üzerinde olmaması gerekmektedir. Ayrıca hidrojen sülfür için 8 saatlik çalışma süresi açısından izin verilen en yüksek konsantrasyon 20 ppm olarak belirtilmiştir. Bu referans değerler esas alınarak değerlendirilen ölçüm sonuçlarının, çalışma kapsamında belirlenen gaz konsantrasyonları açısından ilgili sınır değerler içerisinde kaldığı görülmüştür. Elde edilen bulgular, araştırmanın gerçekleştirildiği dönemlerde mağara atmosferinde ölçülen O₂, CH₄, CO ve H₂S konsantrasyonlarının söz konusu referans değerler bakımından çalışan sağlığı ve güvenliği açısından kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğunu göstermektedir CO₂ bakımından ise biraz daha sınır değerlerin üzerinde çıkmıştır. (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2013).

Olgun vd.,nin 2015'te yapmış oldukları çalışmada kapalı alanlar olan yeraltı maden ocaklarında gazların sınır değerlerine yer verilmiştir. CO₂ sınır değerleri ortamdaki en düşük olması gereken O₂ miktarı olan %19'luk orana bağlı olarak %0,5 olması gerektiğine vurgu yapılmıştır. %1'lik değere ulaştığında ise çalışmaların durdurulması ve ortamın terk edilmesi gerektiği belirtilmiştir (Olgun vd, 2015). Tez çalışması kapsamında yapmış olduğumuz ölçümlerde üçüncü, dördüncü, beşinci ve yedinci bölgeler %0,5-1 aralığında CO₂, diğer bölgelerde ise %1'lik değerlerin biraz üstünde dikkat gerektiren bölgeler olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Elde ettiğimiz sonuçlar referans alınan Olgun vd., (2015)'te yapmış olduğu çalışmayı desteklemektedir.

3.1.5. Ses Şiddeti

Tez çalışması kapsamında saha çalışmaları içerisinde yer alan 2 kere şubat ve mart ayı olmak üzere yapılan ses ölçümü sonuçları aşağıdaki gibidir (Şekil 24).



Şekil 24. Ses şiddeti ölçüm sonuçları

Akçakale Mağarası ses ölçümünde ise yedi noktada yapılan ölçümler sonucunda 61,35 dB ortalama ile en yüksek altıncı bölge, 36,15 dB'lik ortalamayla ise en düşük beş. bölgeden veriler elde edilmiştir. Daha önce kısıtlı da olsa yapılan çalışmalar baz alındığında mağara akustiğine uygun veriler elde edilmiştir. Birinci, ikinci, ve altıncı bölgenin yüksek sonuçlar vermesi, çalışma alanına kalabalık girilmesi, su damlama seslerinin yoğun olması, yarasa varlığı veya yankı yapma ihtimalinin düşük olması düşünülmektedir.

Türkiye'de çalışanların gürültüye maruz kalması sonucunda ortaya çıkabilecek sağlık ve güvenlik risklerinin, özellikle işitme ile ilgili risklerin önlenmesi amacıyla

Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik uygulanmaktadır. Yönetmeliğin 5. maddesinde günlük 8 saatlik çalışma süresi esas alınarak en düşük maruziyet eylem değeri 80 dB, en yüksek maruziyet eylem değeri 85 dB ve maruziyet sınır değeri 87 dB olarak belirlenmiştir (Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik, 2013, Madde 5).

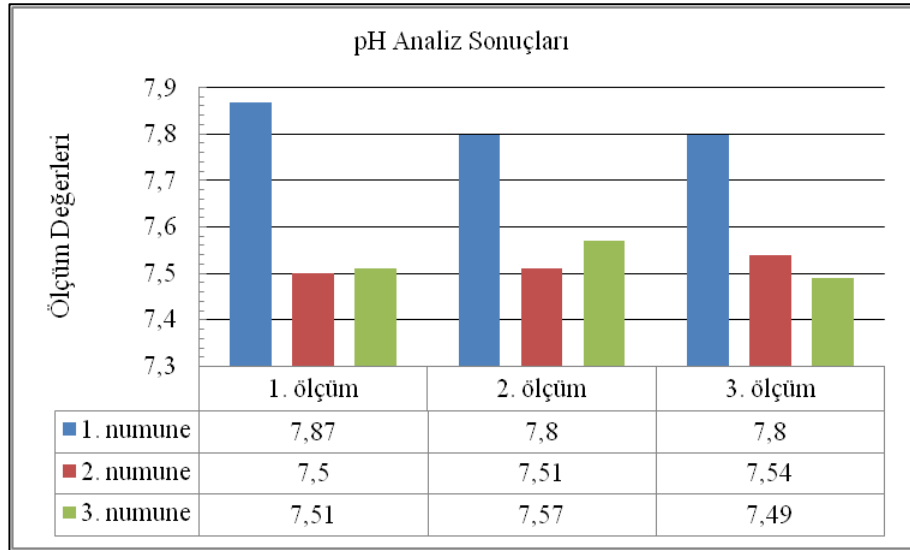
Zhao vd., (2025) yapmış olduğu çalışmada Çin'in Guizhou bölgesindeki karstik turistik mağaralarda gerçekleştirilen çalışmada, mağara içi akustik özellikler ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ölçümler sonucunda mağara içerisindeki doğal arka plan ses seviyelerinin bölgelere göre değiştiği ve 32.1 dB ile 48.3 dB arasında olduğu belirlenmiştir. altı farklı noktadan yapılan ölçüm sonucunda en düşük ses seviyesi 3. bölgede 32.1 dB olarak ölçülürken, en yüksek doğal arka plan sesi birinci bölgede 48.3 dB olarak kaydedilmiştir. Çalışmada ayrıca mağara yapısının sesin yankılanmasına neden olduğu ve özellikle kapalı hacim ile kaya yüzeylerinin sesi yansıtarak konuşma seslerini büyüttüğü ifade edilmiştir. Yankılanma süresinin orta frekanslarda 1.4–3.1 saniye arasında değiştiği belirlenmiş olup, bu durumun özellikle turistik mağaralarda konuşma anlaşılabilirliğini etkileyebileceği vurgulanmıştır. Araştırmacılar, mağara içerisindeki akustik değişimlerin mağaranın geometrik yapısı, hacmi ve insan hareketliliği ile doğrudan ilişkili olduğunu belirtmiştir. Akçakale Mağarası'nın ortam akustik koşullarının belirlenmesi ve gürültü kaynaklarının değerlendirilmesi amacıyla ölçümler yapılmış; elde edilen sonuçların, işitme sağlığı açısından yüksek gürültü düzeylerine işaret etmediği değerlendirilmiştir. Yapmış olduğumuz bu tez çalışması ölçümleri sonucunda 36,15 ve 61,35 arasında değişen ses düzeyi ile Akçakale Mağarası'nın gürültü ölçüm sonuçları benzeri yapılmış olan Zhao vd., çalışmasında 32.1 ve 48.3 olan ses düzeyi ile paralellik göstermektedir (Zhao vd., 2025).

3.2. Laboratuvar Çalışması Bulguları

Çalışma alanından alınan su ve toprak numunelerinin laboratuvarda incelenmesi sonucu elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir.

3.2.1. pH analizleri

Tez çalışması kapsamında mağara içerisinden alınan üç farklı su numunesi üzerinde pH analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler, suyun asidik veya bazik karakterini belirlemek ve mağara ortamındaki kimyasal koşulları değerlendirmek için yapılmıştır (Şekil 25).



Şekil 25. pH analiz sonuçları

1 numaralı su numunesinin diğer örneklerle kıyasla daha yüksek pH değerlerine sahip olduğu ve 7,80–7,87 aralığında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Diğerlerine göre bazik değerlere daha eğilimlidir.

2 numaralı su numunesinde ise pH değerlerinin 7,50–7,54 aralığında oldukça stabil olduğu görülmektedir. Bu durum, bu bölgedeki hidrolojik koşulların daha dengeli olduğunu ve suyun kimyasal bileşiminin dış etkenlerden daha az etkilendiğini göstermektedir. Ölçüm tekrarları arasındaki farkın düşük olması, analiz sonuçlarının güvenilirliğini desteklemektedir.

3 numaralı su numunesi çalışma alanı olan mağaranın yarasa ekosistemi olan bölgesindeyarasa guanosunun bulunduğu alandan alınmıştır. pH değerlerinin 7,49–7,57 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Bu bölgede organik yükün varlığına rağmen pH değerlerinde belirgin bir düşüş meydana gelmemiştir. Bu durumun sebebi kayaç yapısının karbonatlı olmasındandır, karbonatlı kayaçların çözünerek suya verdikleri bikarbonat iyonları sayesinde suyun pH değerinde bir dengesizlikoluşturmamıştır.

Elde edilen pH analiz sonuçları, TS 266 ve İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik kapsamında değerlendirildiğinde (TSE 2006), tüm numunelerin ilgili standartlarda belirtilen $6,5 \leq \text{pH} \leq 9,5$ aralığı içerisinde yer aldığı belirlenmiştir. Ölçülen pH değerlerinin nötr ve hafif bazik seviyelerde olması, suların Ph açısından içme suyu kalitesi açısından uygun seviyelerde olduğunu göstermektedir. Ayrıca, farklı noktalardan alınan numuneler arasında önemli bir pH farkının bulunmaması, mağara içi hidrojeokimyasal sistemin dengeli ve homojen bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

3.2.2. Ağır Metal Ölçümleri

Çalışma alanından alınan toprak, kayaç numune örnekleri laboratuvar sonuçları aşağıda verilmiştir (Tablo 9). Laboratuvar çalışmasında incelenen elementler, vanadyum, kobalt, nikel, bakır,arsenik, kurşun, toryum ve uranyumdur.

Ağır metal analizleri sonucunda, Akçakale Mağarası'ndan alınan toprak örneklerinde vanadyum (V), kobalt (Co), nikel (Ni), bakır (Cu), arsenik (As), kurşun (Pb), toryum (Th) ve uranyum (U) konsantrasyonlarının örnekleme noktalarına göre farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların çevresel açıdan değerlendirilmesinde, Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik Ek-1'inde yer alan jenerik kirlletici sınır değerleri esas alınmıştır. Yönetmelikte sınır değerler mg/kg biriminde verilmiş olmakla birlikte, çalışmanın sonuçları µg/kg olarak sunulmuş ve karşılaştırmalarda gerekli birim dönüşümü dikkate alınmıştır. Buna göre vanadyum, kobalt, nikel ve bakır konsantrasyonlarının belirlenen referans değerlerin altında kaldığı; buna karşılık arsenik konsantrasyonlarının tüm örnekleme noktalarında, kurşun konsantrasyonlarının ise Toprak 2 örneği dışında ilgili referans değerlerin üzerinde olduğu görülmüştür. Özellikle Toprak 6 örneğinde birçok elementin diğer örneklerle göre daha yüksek konsantrasyonlarda bulunması, bu bölgedeki metal birikiminin ayrıca değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Toryum ve uranyum açısından ise söz konusu yönetmelikte doğrudan karşılaştırılabilir bir jenerik sınır değer bulunmadığından, bu elementlere ilişkin sonuçların literatür verileri ve bölgenin doğal jeokimyasal özellikleri dikkate alınarak değerlendirilmesi uygun görülmüştür. Elde edilen bulgular, özellikle arsenik ve kurşun açısından mağara sedimentlerinin insan sağlığı ve çevresel riskler yönünden dikkate alınması gereken bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır (Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010).

Tablo 9. Toprak örneklerinden incelenen elementlerin değerleri

	V (µg/kg)	Co (µg/kg)	Ni(µg/kg)	Cu (µg/kg)	As (µg/kg)	Pb (µg/kg)	Th (µg/kg)	U (µg/kg)
Toprak 1	1189.6530	1115.4050	4553.1687	1779.5006	2563.4263	886.1386	4.2137	466.6205
Toprak 2	866.0399	176.8295	1535.6822	849.1928	803.5137	270.4126	<0.000	193.4267
Toprak 3	5629.6891	688.3907	1741.4405	1221.9023	3406.2956	3276.2004	<0.000	1725.5663
Toprak 4	226.2387	2928.2389	5842.9338	21968.5251	436.8578	1379.8244	<0.000	309.6153
Toprak 5	2635.1727	837.2150	8697.4721	4658.5251	1226.2953	1454.2733	<0.000	222.6018
Toprak 6	73656.8428	8193.0756	58669.8352	18528.4265	8447.0023	9583.7550	99.5104	931.0600

Eker vd.,(2025), yapmış oldukları çalışmada mağaradan alınan su numunelerinin de ağır metal içeriğine bakmış, ağır metal içeriği açısından içmeye uygun olmayan su olarak bulmuşlardır (Eker vd., 2025). Bizim de yaptığımız çalışma sonuçları bu bulguları desteklemektedir

Genel olarak değerlendirildiğinde mağara içerisinde yüksek metal birikimi yüksek seviyelerdedir. Mağara içi incelenen elementler açısından temiz bir ortam oluşturmamaktadır.

3.3. Akçakale Mağarasının Risk Analizi

Tamamlanan çalışmaların sonunda yöntem olarak FMEA ve HAZOP risk analiz yöntemleri seçilmiştir.çalışılan yedi bölgeden her biri için ayrı ayrı FMEA ve HAZOP tabloları oluşturulmuştur. Oluşturulan tablolarda risk barındıran parametreler puanladırılarak öncelikli riskler belirlenmiştir. Her bir bölgenin risk puanları kıyaslanarak en yüksek riskleri barındıran bölgeler ortaya çıkarılmış ve sonucunda riskleri iyileştirmek veya yok etmek adına tavsiyelerde bulunulmuştur. Aşağı her bir bölgenin risk analiz tablosu sırasıyla birinci bölgeden, yedinci bölgeye kadar önce FMEA sonra HAZOP tablosu olmak üzere verilmiştir.

3.3.1. FMEA Analizi

FMEA yöntemi, mağara ortamında ortaya çıkabilecek potansiyel tehlikelerin önceden belirlenmesi ve bu risklerin sistematik biçimde değerlendirilmesi açısından avantaj sağlamaktadır. Mağara gibi doğal, karmaşık ve değişken çevresel koşullara sahip alanlarda risklerin yalnızca gözlemsel olarak değerlendirilmesi çoğu zaman yeterli olmayabilmektedir. Bu noktada FMEA yöntemi, olası hata türlerini, bu hataların nedenlerini ve ortaya çıkarabileceği sonuçları ayrıntılı biçimde inceleyerek risklerin renk kodu verilerek veya puanlama sırasına göre yazılarak öncelik sırasının değerlendirilmesinde olanak sağlamaktadır. Böylece mağara ortamında tehlike oluşturabilecek unsurlar daha oluşmadan önce belirlenebilmekte ve gerekli önlemlerin planlanması mümkün hale gelmektedir.

Yöntemin en önemli avantajlarından biri, risklerin sayısal olarak değerlendirilebilmesine imkân sağlamasıdır. şiddeti, oluşma ihtimali ve tespit edilebilirlik parametreleri kullanılarak hesaplanan risk öncelik değerleri sayesinde mağara içerisindeki hangi bölgelerin daha fazla risk barındırdığı açık biçimde ortaya konulabilmektedir.

FMEA yönteminin bir başka avantajı ise mağara ortamındaki bölgesel farklılıkların değerlendirilmesine uygun bir yapı sunmasıdır. Çalışma kapsamında mağaranın yedi farklı bölgeye ayrılarak analiz edilmesi, her bölgenin kendine özgü mikroklimatik ve diğer risklerinin ayrı ayrı değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Böylece risklerin mağara genelinde homojen olmadığı ve bazı bölgelerde daha yoğun

şekilde ortaya çıktığı belirlenebilmiştir. Bu yönüyle FMEA, mağara ortamında iş sağlığı ve güvenliği açısından önleyici yaklaşımı destekleyen, riskleri öncelik sırasına göre ortaya koyan ve güvenlik planlamasına katkı sağlayan bir analiz yöntemi olarak değerlendirilmiştir.

Çalışma alanı olan Akçakale Mağarası'nın yedi ayrı çalışma noktasının FMEA risk analiz tabloları aşağıda sırayla verilmiştir.

Tablo 10. FMEA risk analizi birinci bölge tablosu

Potansiyel Hata Türü Ve Etkileri Analizi(FMEA)							
Alan/Proses: Çalışma Yapılan 1. Nokta							
Açıklama: Giriş, Düşmüş Taş Blokların Olduğu Bölge							
No	Hata türü (risk)	Riskin potansiyel nedenleri	Riskin potansiyel etkileri	İhtimal	Şiddet	Tespit edilebilirlik	RÖD
1	Kayma/ düşme	Tavandan dökülmüş olan irili ufaklı kaya parçalarından kaynaklı bozuk zemin yapısı ve dışarıdan içeriye sızan suyun kayaçları kayganlaştırması	Yaralanma, burkulma, kırık, yumuşak doku hasarı	6	5	5	150
2	Kaya düşmesi	Kayaçların, suların etkisiyle, kimyasal çözünme yoluyla birbirinden ayrılmasıyla oluşabilecek kaya düşmesi.	Yaralanma, uzuv kaybı, ezilme, ölüm	7	9	8	504
3	Zemin yapısı	Düşen kaya parçalarının oluşturduğu düzensiz zemin yapısı.	Düşerek yaralanma, ayak sıkışması, doku zedelenmesi, kırık, çatlak	7	7	5	245
4	Mağara giriş kapısı	Mağaraya giriş kapısının oldukça alçak olması ve eğilerek girilmesi	Sırt ağrısı, boyun ağrısı, kafa yaralanması,	7	4	4	112
5	Termal konfor	Aşırı sıcak ve aşırı soğuk	Bunalma, denge kaybı, bayılma, ölüm riski, soğuk yanıkları, donma tehlikesi, hareket kısıtlılığı	2	3	3	18
6	İletişim kopukluğu	GPS ve radyo sinyalinin olmaması	Koordinasyon bozulması, geç müdahaleye sebebiyet verme	8	7	3	168
7	Ağır metal birikimi	Kayaçların suyun etkisi ile kimyasal çözünmesi	Zehirlenme uzun süreli maruziyette kanser olma riski	6	6	8	288

Tablo 10. (Devamı)

Potansiyel Hata Türü Ve Etkileri Analizi(FMEA)							
Alan/Proses: Çalışma Yapılan 1. Nokta							
Açıklama: Giriş, Düşmüş Taş Blokların Olduğu Bölge							
No	Hata türü (risk)	Riskin potansiyel nedenleri	Riskin potansiyel etkileri	İhtimal	Şiddet	Tespit edilebilirlik	RÖD
8	Nem	Mağaraların kapalı alanlar olması sebebiyle hava sirkülasyonu sınırlı veya hiç olmaması, su varlığı, mağara mikro iklimi	Solunum yolu hastalıkları, koku duyusunun bozulması, metal teçhizatlarda paslanma.	3	4	5	60
9	Görüş alanı kısıtlılığı	İçeriye yeterince gün ışığı giremeyişi, herhangi bir aydınlatma çalışması yapılmaması	Çarpma, düşme, kayma gibi nedenlerle yaralanma, sakatlanma, riskleri görememe	9	6	5	270
10	Uyarı işaret ve levhası	Alanda herhangi bir işaretleme ve levha yerleştirme çalışması yapılmamış olması	Yer yön kaybı, çarpma, düşme, sakatlanma ve yaralanma	9	5	3	135
11	Hava akımı	Mağaranın jeolojik ve topografik yapısına bağlı olarak içeride hava akımının olmaması.	Cilt kuruluğu, bayılma, bunalma	5	6	5	150
12	Gaz birikimi	Yetersiz havalandırma, organik ayrışma, guano birikimi	Zehirlenme, baş dönmesi, baş ağrısı, bayılma	2	4	2	16
13	Ses şiddeti	Yankılanma, insan yoğunluğu	İletişim bozukluğu, işitme rahatsızlıkları	5	5	2	50
14	Yarasa ekosistemi	Işık, gürültü, hareket	Ekolojik dengenin bozulması, biyolojik riskler	2	2	3	12
15	Guano	Yarasa dışkıları birikimi, nem, temizlik faaliyetlerinin olmaması	Biyolojik risklerden kaynaklanan hastalıklar, solunum yolu riskleri	2	5	2	20
16	Oksijen	Kapalı ortam, yetersiz hava akışı, oksijen tüketim hızı	Solunum güçlüğü, bayılma hayati fonksiyonların kaybolması	6	4	3	72
17	Karbondioksit	Organik ayrışma, insan yoğunluğu, yetersiz hava akışı	Baş ağrısı, nefes darlığı, bayılma, bilinç kaybı	6	5	3	90

Çalışma yapılan birinci nokta için gerçekleştirilen FMEA analizi (Tablo 10) incelendiğinde, mağara ortamına özgü çeşitli risk faktörlerinin bulunduğu ve bu risklerin farklı şiddet seviyelerinde dağılım gösterdiği görülmektedir. Özellikle düzensiz zemin yapısı, kaya düşmesi gibi fiziksel risklerin yüksek risk öncelik değerlerine sahip olduğu ve bu durumun çalışanlar ve ziyaretçiler açısından ciddi yaralanmalar ve ölüm gibi risklere yol açabilecek potansiyel taşıdığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, mağara giriş yapısının dar ve eğimli olması, görüş alanının kısıtlılığı ve uyarı işaretlerinin olmaması gibi faktörler de çarpma, düşme ve yön kaybı gibi riskleri artıran unsurlar arasında yer almaktadır. Analiz sonuçları, özellikle görüş alanı kısıtlılığı ve kaya düşmesi gibi risklerin en yüksek risk seviyelerinde olduğunu ortaya koyarken, iletişim kopukluğu, ağır metal birikimi gibi çevresel faktörlerin de göz ardı edilmemesi gerektiğini göstermektedir. Nem ve termal konfor gibi faktörler ise diğer risklere kıyasla

daha düşük seviyede değerlendirilmiş olsa da, uzun süreli maruziyet durumunda sağlık açısından olumsuz etkiler oluşturabilecek potansiyele sahiptir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, birinci bölgede belirlenen risklerin büyük bir kısmının fiziksel ve çevresel koşullardan kaynaklandığı ve özellikle zemin yapısı, kaya stabilitesi ve görüş koşullarının öncelikli olarak iyileştirilmesi gereken risk parametreleri olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 11. FMEA risk analizi ikinci bölge tablosu

Potansiyel Hata Türü Ve Etkileri Analizi (FMEA)							
Alan/Proses : Çalışma Yapılan 2. Nokta							
Açıklama : Yarasa Kolonisinin Bulunduğu Bölge							
No	Hata Türü (Risk)	Riskin Potansiyel Nedenleri	Riskin Potansiyel Etkileri	İhtimal	Şiddet	Tespit edilebilirlik	RÖD
1	Kayma/ düşme	Tavandan dökülmüş olan kaya parçalarından kaynaklı bozuk zemin yapısı ve içeriye sızan suyun kayaçları kayganlaştırması	Yaralanma, burkulma, kırık, yumuşak doku hasarı	6	5	3	90
2	Kaya düşmesi	Kayaçların, dışarıdan içeriye giren suların etkisiyle, kimyasal çözünme yoluyla birbirinden ayrılmasıyla oluşabilecek kaya düşmesi.	Yaralanma, uzuv kaybı, ezilme, ölüm	5	7	6	210
3	Zemin yapısı	Düşen kaya parçalarının oluşturduğu düzensiz zemin yapısı.	Düşerek yaralanma, ayak sıkışması, doku zedelenmesi, kırık, çatlak	5	4	4	80
5	Termal konfor	Aşırı sıcak ve aşırı soğuk	Aşırı sıcakta; bunalma, denge kaybı, bayılma, ölüm riski Aşırı soğukta; soğuk yanıkları, donma tehlikesi, hareket kısıtlılığı	2	3	3	18
6	İletişim kopukluğu	GPS ve radyo sinyalinin olmaması	Koordinasyon bozulması, geç müdahaleye sebebiyet verme	8	7	3	168
7	Ağır metal birikimi	Kayaçların suyun etkisi ile kimyasal çözünmesi	Zehirlenme uzun süreli maruziyette kanser olma riski	6	6	8	288
8	Nem	Mağaraların kapalı alanlar olması sebebiyle hava sirkülasyonu sınırlı veya hiç olmaması, su varlığı, mağara mikro iklimi	Solunum yolu hastalıkları, koku duyusunun bozulması, elektronik cihazlarda bozulma metal teçhizatlarda paslanma	8	4	4	128
9	Görüş alanı kısıtlılığı	İçeriye yeterince gün ışığı giremeyişi, herhangi bir aydınlatma çalışması yapılmaması	Çarpma, düşme, kayma gibi nedenlerle yaralanma, sakatlanma, riskleri görememe	10	9	2	180
10	Uyarı işaret ve levhası	Alanda herhangi bir işaretleme ve levha yerleştirme çalışması yapılmamış olması	Yer yön kaybı, çarpma, düşme, sakatlanma ve yaralanma	9	5	2	90
11	Hava akımı	Mağaranın jeolojik ve topografik yapısına bağlı olarak içeriye dışarıdan bir hava akımının olmaması.	Cilt kuruluğu, bayılma, bunalma	8	7	4	224
12	Gaz birikimi	Yetersiz havalandırma, organik ayrışma, guano birikimi	Zehirlenme, baş dönmesi, baş ağrısı, bayılma	7	5	3	105
13	Ses şiddeti	Yankılanma, insan yoğunluğu	İletişim bozukluğu, işitme rahatsızlıkları, yarasa ekosisteminin bozulması	6	4	2	48

Tablo 11. (Devamı)

Potansiyel Hata Türü Ve Etkileri Analizi (FMEA)							
Alan/Proses : Çalışma Yapılan 2. Nokta							
Açıklama : Yarasa Kolonisinin Bulunduğu Bölge							
No	Hata Türü (Risk)	Riskin Potansiyel Nedenleri	Riskin Potansiyel Etkileri	İhtimal	Şiddet	Tespit edilebilirlik	RÖD
14	pH	Su damlamaları, organik çözünme, kimyasal reaksiyonlar.	Ciltte tahriş, ekipman bozulmaları	3	5	2	30
15	Yarasa ekosistemi	Yarasa saldırısı	Yarasaların gürültü ve ışık kaynağıyla rahatsız edilmesi	6	8	5	240
16	Guano	Yarasa dışkıları birikimi, nem, temizlik faaliyetlerinin olmaması	Biyolojik risklerden kaynaklanan hastalıklar, solunum yolu riskleri	8	7	4	224
17	Oksijen	Kapalı ortam, yetersiz hava akışı, oksijen tüketim hızı	Solunum güçlüğü, bayılma hayati fonksiyonların kaybolması	6	4	3	72
18	Karbondioksit	Organik ayrışma, insan yoğunluğu, yetersiz hava akışı	Baş ağrısı, nefes darlığı, bayılma, bilinç kaybı	6	6	3	108
19	Su baskını	Mevsimsel olarak dışarıdan içeriye su girişi, drenaj yetersizliği,	Boğulma, kayma düşme riski, mahsur kalma, ulaşım zorluğu	3	3	2	18

Çalışma yapılan ikinci noktada gerçekleştirilen FMEA bulguları (Tablo 11) değerlendirildiğinde, alanın özellikle fiziksel, atmosferik ve biyolojik riskler açısından yüksek tehlike potansiyeli taşıdığı belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre yarasa ekosistemi, ağır metal birikimi, hava akımı yetersizliği, guano birikimi, kaya düşmesi ve görüş alanı kısıtlılığı en yüksek risk öncelik değeri oluşturan risk faktörleri arasında yer almıştır. Bölgenin yarasa ekosistemi bulunduğu alan olması nedeniyle biyolojik risklerin diğer bölgelere göre daha belirgin olduğu değerlendirilmiştir.

Kaya düşmesi riski, mağara tavanı ve duvarlarında bulunan gevşek kaya parçaları ile çatlak yapılar nedeniyle orta düzeyde değerlendirilmiştir. Bunun yanında mağara içerisine doğal ışığın yeterince ulaşmaması ve aydınlatma eksikliği nedeniyle görüş alanı kısıtlılığı olduğu, bu durumun çarpma, düşme ve yön kaybı gibi risklerin meydana gelme ihtimalini artırdığı belirlenmiştir. Mağara içerisinde hava akımının yetersiz olması, kapalı ortam koşulları nedeniyle gaz yoğunlaşmasına ve hava kalitesinin düşmesine yüksek neme neden olabilecek önemli bir risk faktörü olarak değerlendirilmiştir.

İkinci bölgede dikkat çeken bir diğer önemli risk ise faktörü yarasa ekosistemi ve guano birikimi olmuştur. Yarasa ekosisteminin olduğu alanlarda biyolojik kirleticiler ve mikroorganizmalara maruziyet riskinin arttığı, buna bağlı olarak solunum yolu rahatsızlıkları ve çeşitli biyolojik risklerin oluşabileceği değerlendirilmiştir. Guano birikiminin oluşturduğu kötü koku, mikrobiyolojik faaliyetler ve kaygan yüzeyler çalışan güvenliği açısından risk oluşturabilecek unsurlar arasında yer almıştır.

Tablo 12. FMEA risk analizi üçüncü bölge tablosu

Potansiyel Hata Türü Ve Etkileri Analizi (FMEA)							
Alan/Proses : Çalışma Yapılan 3. Nokta							
Açıklama : Mağara İçi Oluşumların En Fazla Olduğu Bölge							
No	Hata Türü (Risk)	Riskin Potansiyel Nedenleri	Riskin Potansiyel Etkileri	İhtimal	Şiddet	Tespit edilebilirlik	RÖD
1	Kayma/ düşme	Tavandan dökülmüş olan irili ufaklı kaya parçalarından kaynaklı bozuk zemin yapısı ve dışarıdan içeriye sızan suyun kayaçları kayganlaştırması	Yaralanma, burkulma, kırık, yumuşak doku hasarı	7	7	4	196
2	Kaya düşmesi	Kayaçların, suların etkisiyle, kimyasal çözünme yoluyla birbirinden ayrılmasıyla oluşabilecek kaya düşmesi.	Yaralanma, uzuv kaybı, ezilme, ölüm	3	6	5	90
3	Zemin yapısı	Düşen kaya parçalarının oluşturduğu düzensiz zemin yapısı.	Düşerek yaralanma, ayak sıkışması, doku zedelenmesi, kırık, çatlak	5	4	4	80
5	Termal konfor	Aşırı sıcak ve aşırı soğuk	Sıcakta bunalma, denge kaybı, bayılma, ölüm riski Aşırı soğukta; soğuk yanıkları, donma tehlikesi	2	3	3	18
6	İletişim kopukluğu	GPS ve radyo sinyalinin olmaması	Koordinasyon bozulması, geç müdahaleye sebebiyet verme	8	7	3	168
7	Nem	Mağaraların kapalı alanlar olması sebebiyle hava sirkülasyonu sınırlı veya hiç olmaması, su varlığı, mağara mikro iklimi	Solunum yolu hastalıkları, koku duyusunun bozulması, elektronik cihazlarda bozulma, metalteçhizatla rda paslanma	8	5	3	120
8	Görüş alanı kısıtlılığı	İçeriye yeterince gün ışığı giremeyişi, herhangi bir aydınlatma çalışması yapılmaması	Çarpma, düşme, kayma gibi nedenlerle yaralanma, sakatlanma, riskleri görememe	10	9	2	180
9	Uyarı işaret ve levhası	Alanda herhangi bir işaretleme ve levha yerleştirme çalışması yapılmamış olması	Yer yön kaybı, çarpma, düşme, kayma etkisi ile sakatlanma ve yaralanma	9	5	2	90
10	Hava akımı	Mağaranın jeolojik ve topografik yapısına bağlı olarak içeriye dışarıdan bir hava akımının olmaması.	Cilt kuruluğu, bayılma, bunalma	8	7	3	168
11	Gaz birikimi	Yetersiz havalandırma, organik ayrışma, guano birikimi	Zehirlenme, baş dönmesi, baş ağrısı, bayılma	2	4	2	16
12	Ses şiddeti	Yankılanma, insan yoğunluğu	İletişim bozukluğu, stres, işitme rahatsızlıkları, yarasa ekosisteminin bozulması	6	4	2	48
13	Ph	Su damlamaları, organik çözünme, kimyasal reaksiyonlar.	Ciltte tahriş, ekipman bozulmaları	3	5	2	30
14	Yarasa ekosistemi	Yarasa saldırısı	Yarasaların gürültü ve ışık kaynağıyla rahatsız edilmesi	2	2	6	24
15	Guano	Yarasa dışkıları birikimi, nem, temizlik faaliyetlerinin olmaması	Biyolojik risklerden kaynaklanan hastalıklar, kötü koku, solunum yolu riskleri	3	3	6	54
16	Oksijen	Kapalı ortam, yetersiz hava akışı, oksijen tüketim hızı	Solunum güçlüğü, nefes darlığı, bayılma hayati fonksiyonların kaybolması	6	4	3	72
17	Karbondioksit	Organik ayrışma, insan yoğunluğu, yetersiz hava akışı	Baş ağrısı, nefes darlığı, bayılma, bilinç kaybı	3	4	3	36
18	Su baskını	Mevsimsel olarak dışarıdan içeriye su girişi, drenaj yetersizliği,	Boğulma, kayma düşme riski, mahsur kalma, ulaşım zorluğu	2	3	2	12

Çalışma yapılan üçüncü noktada gerçekleştirilen FMEA bulguları (Tablo 12) değerlendirildiğinde, alanın özellikle fiziksel riskler ve çevresel koşullar açısından tehlike içerdiği belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre kayma/düşme riski, görüş alanı kısıtlılığı, iletişim kopukluğu, hava akımı yetersizliği yüksek risk öncelik değeri oluşturan başlıca risk faktörleri olarak değerlendirilmiştir. Bölgenin mağara içi oluşumların en yoğun bulunduğu alan olması nedeniyle düzensiz zemin yapısı, kaygan yüzeyler ve doğal engellerin çalışan ve ziyaretçi yürüyüşünü zorlaştırdığı görülmüştür.

Kayma ve düşme riski, mağara tabanındaki bozuk zemin yapısı, nemli yüzeyler ve kaya parçaları nedeniyle yüksek düzeyde değerlendirilmiştir. Ayrıca mağara içerisine doğal ışığın yeterli düzeyde ulaşmaması ve uygun aydınlatma sistemlerinin bulunmaması sonucunda görme zorluğu oluştuğu, buna bağlı olarak çarpma, yön kaybı ve düşme gibi kazaların meydana gelme ihtimalinin arttığı belirlenmiştir. Bunun yanında mağara içerisinde GPS ve haberleşme sistemlerinin yetersiz çalışması nedeniyle iletişim kopukluğu yaşanabileceği, bu durumun özellikle acil durumlarda koordinasyon kaybına ve müdahale süresinin uzamasına neden olabileceği değerlendirilmiştir. Bölgedeki hava akımının yetersiz olması, kapalı ortam koşullarına bağlı olarak hava kalitesinin düşmesine neden olabilecek çevresel risk faktörü olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 13. FMEA risk analizi dördüncü bölge tablosu

Potansiyel Hata Türü Ve Etkileri Analizi (FMEA)							
Alan/Proses: Çalışma Yapılan 4. Nokta							
Açıklama: Tilki Ölüsünün Olduğu Bölge							
No	Hata Türü (Risk)	Riskin Potansiyel Nedenleri	Riskin Potansiyel Etkileri	İhtimal	Şiddet	Tespit edilebilirlik	RÖD
1	Kayma/düşme	Tavandan dökülmüş olan irili ufaklı kaya parçalarından kaynaklı bozuk zemin yapısı ve dışarıdan içeriye sızan suyun kayaçları kayganlaştırması	Yaralanma, burkulma, kırık, yumuşak doku hasarı	4	4	4	64
2	Kaya düşmesi	Kayaçların, dışarıdan içeriye giren suların etkisiyle, kimyasal çözünme yoluyla birbirinden ayrılmasıyla oluşabilecek kaya düşmesi.	Yaralanma, uzuv kaybı, ezilme, ölüm	3	5	4	60
3	Zemin yapısı	Düşen kaya parçalarının oluşturduğu düzensiz zemin yapısı.	Düşerek yaralanma, ayak sıkışması, doku zedelenmesi, kırık, çatlak	2	4	3	24
5	Termal konfor	Aşırı sıcak ve aşırı soğuk	Aşırı sıcakta; bunalma, denge kaybı, bayılma, ölüm riski Aşırı soğukta; soğuk yanıkları, donma tehlikesi, hareket kısıtlılığı	2	3	3	18
6	İletişim kopukluğu	GPS ve radyo sinyalinin olmaması	Koordinasyon bozulması, geç müdahaleye sebebiyet verme	8	7	3	168

Tablo 13. (Devamı)

Potansiyel Hata Türü Ve Etkileri Analizi (FMEA)							
Alan/Proses: Çalışma Yapılan 4. Nokta							
Açıklama: Tilki Ölüsünün Olduğu Bölge							
No	Hata Türü (Risk)	Riskin Potansiyel Nedenleri	Riskin Potansiyel Etkileri	İhtimal	Şiddet	Tespit edilebilirlik	RÖD
7	Nem	Mağaraların kapalı alanlar olması sebebiyle hava sirkülasyonu sınırlı veya hiç olmaması, su varlığı, mağara mikro iklimi	Solunum yolu hastalıkları, koku duyusunun bozulması, elektronik cihazlarda bozulma, metalteçhizatlar da paslanma	7	5	3	105
8	Görüş alanı kısıtlılığı	İçeriye yeterince gün ışığı giremeyeşi, herhangi bir aydınlatma çalışması yapılmaması	Çarpma, düşme, kayma gibi nedenlerle yaralanma, sakatlanma, riskleri görememe	9	9	2	162
9	Uyarı işaret ve levhası	Alanda herhangi bir işaretleme ve levha yerleştirme çalışması yapılmamış olması	Yer yön kaybı, çarpma, düşme, kayma etkisi ile sakatlanma ve yaralanma	7	5	2	70
10	Hava akımı	Mağaranın jeolojik ve topografik yapısına bağlı olarak içeriye dışarıdan bir hava akımının olmaması.	Cilt kuruluğu, bayılma, bunalma	7	6	3	126
11	Gaz birikimi	Yetersiz havalandırma, organik ayrışma, guano birikimi	Zehirlenme, baş dönmesi, baş ağrısı, bayılma	6	5	2	60
12	Ses şiddeti	Yankılanma, insan yoğunluğu	İletişim bozukluğu, stres, işitme rahatsızlıkları, yarasa ekosisteminin bozulması	6	4	3	72
13	Yarasa ekosistemi	Yarasa saldırısı	Yarasaların gürültü ve ışık kaynağıyla rahatsız edilmesi	2	2	6	24
14	Guano	Yarasa dışkı birikimi, nem, temizlik faaliyetlerinin olmaması	Biyolojik risklerden kaynaklanan hastalıklar, kötü koku, solunum yolu riskleri	3	3	6	54
15	Oksijen	Kapalı ortam, yetersiz hava akışı, oksijen tüketim hızı	Solunum güçlüğü, nefes darlığı, bayılma hayatı fonsiyonların kaybolması	6	4	3	72
16	Karbondioksit	Organik ayrışma, insan yoğunluğu, yetersiz hava akışı	Baş ağrısı, nefes darlığı, bayılma, bilinç kaybı	3	4	3	36
17	Su baskını	Mevsimsel olarak dışarıdan içeriye su girişi, drenaj yetersizliği,	Boğulma, kayma düşme riski, mahsur kalma, ulaşım zorluğu	5	4	2	50

Çalışması yapılan dördüncü bölgede gerçekleştirilen FMEA bulguları (Tablo 13) değerlendirildiğinde, alanın diğer bölgelere kıyasla daha düşük risk düzeyine sahip olduğu, ancak bazı fiziksel ve çevresel risklerin diğer risklere göre biraz daha yüksek seviyede bulunduğu belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre iletişim kopukluğu, nem, görüş alanı kısıtlılığı ve hava akımı yetersizliği en yüksek risk faktörleri arasında yer almıştır.

Bölgede GPS ve haberleşme sistemlerinin yetersiz çalışması nedeniyle iletişim kopukluğu yaşanabileceği, bunun özellikle acil durumlarda koordinasyon kaybına ve müdahale süresinin uzamasına neden olabileceği belirlenmiştir. Bunun yanında mağara

ortamındaki yüksek nem oranı, kaygan yüzey oluşumuna, solunum yolu rahatsızlıklarına ve ekipmanlarda teknik problemlere neden olabilecek bir çevresel risk faktörü olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca mağara içerisine doğal ışığın yeterince ulaşmaması ve uygun aydınlatma sistemlerinin bulunmaması sonucunda görüşü engellediği, buna bağlı olarak çarpma, düşme ve yön kaybı gibi kazaların meydana gelme ihtimalinin arttığı görülmüştür.

Bölgedeki hava akımının yetersiz olması da kapalı ortam koşulları nedeniyle hava kalitesinin düşmesine neden olabilecek bir diğer önemli risk faktörü olarak belirlenmiştir. Her ne kadar kaya düşmesi, gaz birikimi ve su baskını gibi risklerin diğer bölgelere göre daha düşük değere sahip olduğu görülse de mağara ortamının doğal yapısı nedeniyle bu risklerin tamamen göz ardı edilmemesi gerektiği değerlendirilmiştir.

Tablo 14. FMEA risk analizi beşinci bölge tablosu

Potansiyel Hata Türü Ve Etkileri Analizi (FMEA)							
Alan/Proses : Çalışma Yapılan 5. Nokta							
Açıklama : Mağaradaki En Düzlük Ve Çamurlu Bölge							
No	Hata Türü (Risk)	Riskin Potansiyel Nedenleri	Riskin Potansiyel Etkileri	İhtimal	Şiddet	Tespit edilebilirlik	RÖD
1	Kayma/ düşme	Tavandan dökülmüş olan irili ufaklı kaya parçalarından kaynaklı bozuk zemin yapısı ve dışarıdan içeriye sızan suyun kayaçları kayganlaştırması	Yaralanma, burkulma, kırık, yumuşak doku hasarı	5	3	2	30
2	Kaya düşmesi	Kayaçların, dışarıdan içeriye giren suların etkisiyle, kimyasal çözünme yoluyla birbirinden ayrılmasıyla oluşabilecek kaya düşmesi.	Yaralanma, uzuv kaybı, ezilme, ölüm	5	7	5	175
3	Zemin yapısı	Düşen kaya parçalarının oluşturduğu düzensiz zemin yapısı ve çamur	Düşerek yaralanma, ayak sıkışması, doku zedelenmesi, kırık, çatlak	5	4	3	60
5	Termal konfor	Aşırı sıcak ve aşırı soğuk	Aşırı sıcakta; bunalma, bayılma, ölüm riski Aşırı soğukta; soğuk yanıkları, donma tehlikesi, hareket kısıtlılığı	2	3	3	18
6	İletişim kopukluğu	GPS ve radyo sinyalinin olmaması	Koordinasyon bozulması, geç müdahaleye sebebiyet verme	8	7	3	168
7	Ağır metal birikimi	Kayaçların suyun etkisi ile kimyasal çözünmesi	Zehirlenme uzun süreli maruziyette kanser olma riski	7	7	5	245
8	Nem	Mağaraların kapalı alanlar olması sebebiyle hava sirkülasyonu sınırlı veya hiç olmaması, su varlığı, mağara mikro iklimi	Solunum yolu hastalıkları, koku duyusunun bozulması, elektronik cihazlarda bozulma, paslanma	7	5	3	105
9	Görüş alanı kısıtlılığı	İçeriye yeterince gün ışığı giremeyişi, herhangi bir aydınlatma çalışması yapılmaması	Çarpma, düşme, kayma gibi nedenlerle yaralanma, sakatlanma, riskleri görememe	9	9	2	162
10	Uyarı işaret ve levhası	Alanda herhangi bir işaretleme ve levha yerleştirme çalışması yapılmamış olması	Yer yön kaybı, çarpma, düşme, kayma etkisi ile sakatlanma ve yaralanma	9	5	2	90

Tablo 14. (Devamı)

Potansiyel Hata Türü Ve Etkileri Analizi (FMEA)							
Alan/Proses : Çalışma Yapılan 5. Nokta							
Açıklama : Mağaradaki En Düzlük Ve Çamurlu Bölge							
No	Hata Türü (Risk)	Riskin Potansiyel Nedenleri	Riskin Potansiyel Etkileri	İhtimal	Şiddet	Tespit edilebilirlik	RÖD
11	Hava akımı	Mağaranın jeolojik ve topografik yapısına bağlı olarak içeriye dışarıdan bir hava akımının olmaması.	Cilt kuruluğu, bayılma, bunalma	6	6	3	108
12	Gaz birikimi	Yetersiz havalandırma, organik ayrışma, guano birikimi	Zehirlenme, baş dönmesi, baş ağrısı, bayılma	2	4	2	16
13	Ses şiddeti	Yankılanma, insan yoğunluğu	İletişim bozukluğu, stres, işitme rahatsızlıkları, yarasa ekosisteminin bozulması	6	5	2	60
14	pH	Su damlamaları, organik çözünme, kimyasal reaksiyonlar.	Ciltte tahriş, ekipman bozulmaları	5	6	3	90
15	Yarasa ekosistemi	Yarasa saldırısı	Yarasaların gürültü ve ışık kaynağıyla rahatsız edilmesi	2	2	5	20
16	Guano	Yarasa dışkıları birikimi, nem, temizlik faaliyetlerinin olmaması	Biyolojik risklerden kaynaklanan hastalıklar, kötü koku, solunum yolu riskleri	2	3	6	36
17	Oksijen	Kapalı ortam, yetersiz hava akışı, oksijen tüketim hızı	Solunum güçlüğü, nefes darlığı, bayılma hayati fonksiyonların kaybolması	5	4	3	60
18	Karbondioksit	Organik ayrışma, insan yoğunluğu, yetersiz hava akışı	Baş ağrısı, nefes darlığı, bayılma, bilinç kaybı	4	4	3	48
19	Su baskını	Mevsimsel olarak dışarıdan içeriye su girişi, drenaj yetersizliği,	Boğulma, kayma düşme riski, mahsur kalma, ulaşım zorluğu	6	7	4	168

Beşinci noktada gerçekleştirilen FMEA bulguları (Tablo 14) değerlendirildiğinde, alanın özellikle fiziksel, çevresel ve atmosferik riskler açısından tehlike içerdiği tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre görüş alanı kısıtlılığı, su baskını riski, iletişim kopukluğu, ağır metal birikimi ve hava akımı yetersizliği başlıca risk faktörleri olarak değerlendirilmiştir. Bölgenin mağaradaki en düz ve çamurlu alanlardan biri olması nedeniyle zeminin kaygan yapıda olduğu ve çalışan hareketlerini zorlaştırdığı görülmüştür.

Mağara içerisine doğal ışığın yeterli düzeyde ulaşmaması ve uygun aydınlatma sistemlerinin bulunmaması sonucunda görüş alanı kısıtlılığı olduğu, buna bağlı olarak çarpma, kayma ve düşme gibi kazaların meydana gelme ihtimalinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca bölgenin çamurlu yapısı ve mevsimsel su girişleri nedeniyle su baskını riskinin diğer bölgelere göre daha fazla olduğu değerlendirilmiştir. Ani su yükselmelerinin ulaşımın engellenmesine, mahsur kalma riskine ve hareket güvenliğinin azalmasına neden olabileceği düşünülmektedir.

Bunun yanında mağara içerisinde GPS ve haberleşme sistemlerinin yetersiz çalışması nedeniyle iletişim kopukluğu yaşanabileceği, bu durumun özellikle acil durumlarda koordinasyon kaybına ve müdahale süresinin uzamasına yol açabileceği

belirlenmiştir. Hava akımının yetersiz olması ve kapalı ortam koşulları nedeniyle hava kalitesinin düşebileceği, ayrıca kayaçların kimyasal çözünmesi sonucu oluşabilecek ağır metal birikiminin uzun süreli maruziyet açısından toksik etkiler oluşturabileceği değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda beşinci bölgede özellikle drenaj kontrolü, aydınlatma sistemleri, haberleşme altyapısı ve zemin güvenliğine yönelik önlemlerin artırılmasının gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 15. FMEA risk analizi altıncı bölge analizi

Potansiyel Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA)							
Alan/Proses: Çalışma Yapılan 6. Nokta							
Açıklama: Duvar Mercanlarının Olduğu Bölge							
No	Hata Türü (Risk)	Riskin Potansiyel Nedenleri	Riskin Potansiyel Etkileri	İhtimal	Şiddet	Tespit edilebilirlik	RÖD
1	Kayma/ düşme	Tavandan dökülmüş olan irili ufaklı kaya parçalarından kaynaklı bozuk zemin yapısı ve dışarıdan içeriye sızan suyun kayaçları kayganlaştırması	Yaralanma, burkulma, kırık, yumuşak doku hasarı	8	7	2	112
2	Kaya düşmesi	Kayaçların, dışarıdan içeriye giren suların etkisiyle, kimyasal çözünme yoluyla birbirinden ayrılmasıyla oluşabilecek kaya düşmesi.	Yaralanma, uzuv kaybı, ezilme, ölüm	4	7	5	140
3	Zemin yapısı	Düşen kaya parçalarının oluşturduğu düzensiz zemin yapısı.	Düşerek yaralanma, ayak sıkışması, doku zedelenmesi, kırık, çatlak	5	6	4	120
5	Termal konfor	Aşırı sıcak ve aşırı soğuk	Aşırı sıcakta; bunalma, bayılma, ölüm riski Aşırı soğukta; soğuk yanıkları, hareket kısıtlılığı	3	3	3	27
6	İletişim kopukluğu	GPS ve radyo sinyalinin olmaması	Koordinasyon bozulması, geç müdahaleye sebebiyet verme	7	7	3	147
7	Ağır metal birikimi	Kayaçların suyun etkisi ile kimyasal çözünmesi	Zehirlenme uzun süreli maruziyette kanser olma riski	7	7	6	294
8	Nem	Mağaraların kapalı alanlar olması sebebiyle hava sirkülasyonu sınırlı veya hiç olmaması, su varlığı, mağara mikro iklimi	Solunum yolu hastalıkları, koku duyusunun bozulması, elektronik cihazlarda bozulma, metalteçhizatlar da paslanma	8	7	3	168
9	Görüş alanı kısıtlılığı	İçeriye yeterince gün ışığı giremeyişi, herhangi bir aydınlatma çalışması yapılmaması	Çarpma, düşme, kayma gibi nedenlerle yaralanma, sakatlanma, riskleri görememe	10	9	2	180
10	Uyarı işaret ve levhası	Alanda herhangi bir işaretleme ve levha yerleştirme çalışması yapılmamış olması	Yer yön kaybı, çarpma, düşme, kayma etkisi ile sakatlanma ve yaralanma	9	6	2	108
11	Hava akımı	Mağaranın jeolojik ve topografik yapısına bağlı olarak içeriye dışarıdan bir hava akışı olmaması.	Cilt kuruluğu, bayılma, bunalma	8	7	3	168
12	Gaz birikimi	Yetersiz havalandırma, organik ayrışma, guano birikimi	Zehirlenme, baş dönmesi, baş ağrısı, bayılma	2	3	2	12
13	Ses şiddeti	Yankılanma, insan yoğunluğu	İletişim bozukluğu, stres, işitme rahatsızlıkları, yarasa ekosisteminin bozulması	5	6	3	90
14	Ph	Su damlamaları, organik çözünme, kimyasal reaksiyonlar.	Ciltte tahriş, ekipman bozulmaları	3	5	4	60
15	Yarasa ekosistemi	Yarasa saldırısı	Yarasaların gürültü ve ışık kaynağıyla rahatsız edilmesi	3	4	6	72

Tablo 15. (Devamı)

Potansiyel Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA)							
Alan/Proses: Çalışma Yapılan 6. Nokta							
Açıklama: Duvar Mercanlarının Olduğu Bölge							
No	Hata Türü (Risk)	Riskin Potansiyel Nedenleri	Riskin Potansiyel Etkileri	İhtimal	Şiddet	Tespit edilebilirlik	RÖD
16	Guano	Yarasa dışkı birikimi, nem, temizlik faaliyetlerinin olmaması	Biyolojik risklerden kaynaklanan hastalıklar, kötü koku, solunum yolu riskleri	3	3	6	54
17	Oksijen	Kapalı ortam, yetersiz hava akışı, oksijen tüketim hızı	Solunum güçlüğü, nefes darlığı, bayılma hayati fonksiyonların kaybolması	4	4	3	48
18	Karbondioksit	Organik ayrışma, insan yoğunluğu, yetersiz hava akışı	Baş ağrısı, nefes darlığı, bayılma, bilinç kaybı	6	5	5	150
19	Su baskını	Mevsimsel olarak dışarıdan içeriye su girişi, drenaj yetersizliği,	Boğulma, kayma düşme riski, mahsur kalma, ulaşım zorluğu	4	3	2	24

Altıncı noktada gerçekleştirilen FMEA bulguları (Tablo 15) değerlendirildiğinde, alanın özellikle fiziksel riskler, çevresel koşullar ve atmosferik faktörler açısından yüksek tehlike potansiyeli taşıdığı belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre görüş alanı kısıtlılığı, karbondioksit birikimi, hava akımı yetersizliği, iletişim kopukluğu ve nem en yüksek Risk Öncelik Değerini oluşturan risk faktörleri arasında yer almıştır. Bölgenin duvar mercanlarının yoğun olarak bulunduğu alan olması nedeniyle mağara içerisindeki doğal oluşumların hareket alanını daralttığı ve çalışan güvenliğini olumsuz etkileyebileceği değerlendirilmiştir.

Mağara içerisine doğal ışığın yeterince ulaşmaması ve uygun aydınlatma sistemlerinin bulunmaması sonucunda görüş alanı kısıtlılığı olduğu, buna bağlı olarak çarpma, düşme ve yön kaybı gibi kazaların diğer bölgedeki gibi meydana gelme ihtimalini artırmaktadır. Ayrıca hava akımının yetersiz olması nedeniyle kapalı ortam koşullarında karbondioksit yoğunlaşmasının yüksek çıkması ile bunun baş ağrısı, nefes darlığı, baş dönmesi ve bilinç kaybı gibi sağlık problemlerine yol açabileceği değerlendirilmiştir.

Bunun yanında bölgenin yüksek nem oranı, kaygan yüzey oluşumuna ve ekipmanlarda teknik problemlere neden olabilecek önemli bir çevresel risk faktörü olarak belirlenmiştir. Mağara içerisinde haberleşme sistemlerinin yetersiz çalışması ise özellikle acil durumlarda koordinasyon kaybına ve müdahale süresinin uzamasına neden olabilecek önemli bir operasyonel risk olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda altıncı bölgede özellikle havalandırma, gaz ölçümleri, aydınlatma sistemleri ve iletişim altyapısına yönelik önlemlerin alınmasının gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 16. FMEA risk analizi yedinci bölge tablosu

Potansiyel Hata Türü Ve Etkileri Analizi (FMEA)							
Alan/Proses: Çalışma Yapılan 7. Nokta							
Açıklama: Derin Göletin Olduğu Bölge							
No	Hata Türü (Risk)	Riskin Potansiyel Nedenleri	Riskin Potansiyel Etkileri	İhtimal	Şiddet	Tespit edilebilirlik	RÖD
1	Kayma/düşme	Tavandan dökülmüş olan irili ufaklı kaya parçalarından kaynaklı bozuk zemin yapısı ve dışarıdan içeriye sızan suyun kaymaları kayganlaştırması	Yaralanma, burkulma, kırık, yumuşak doku hasarı	7	7	5	245
2	Kaya düşmesi	Kayaçların, dışarıdan içeriye giren suların etkisiyle, kimyasal çözünme yoluyla birbirinden ayrılmasıyla oluşabilecek kaya düşmesi.	Yaralanma, uzuv kaybı, ezilme, ölüm	6	7	7	294
3	Zemin yapısı	Düşen kaya parçalarının oluşturduğu düzensiz zemin yapısı.	Düşerek yaralanma, ayak sıkışması, doku zedelenmesi, kırık, çatlak	6	6	5	180
5	Termal konfor	Aşırı sıcak ve aşırı soğuk	Aşırı sıcakta; bunalma, denge kaybı, bayılma, ölüm riski Aşırı soğukta; soğuk yanıkları, donma tehlikesi, hareket kısıtlılığı	4	4	4	64
6	İletişim kopukluğu	GPS ve radyo sinyalinin olmaması	Koordinasyon bozulması, geç müdahaleye sebebiyet verme	8	7	3	168
7	Nem	Mağaraların kapalı alanlar olması sebebiyle hava sirkülasyonu sınırlı veya hiç olmaması, su varlığı, mağara mikro iklimi	Solunum yolu hastalıkları, koku duyusunun bozulması, elektronik cihazlarda bozulma, metalteçhizatlar da paslanma	7	5	3	105
8	Görüş alanı kısıtlılığı	İçeriye yeterince gün ışığı giremeyişi, herhangi bir aydınlatma çalışması yapılmaması	Çarpma, düşme, kayma gibi nedenlerle yaralanma, sakatlanma, riskleri görememe	10	9	2	180
9	Uyarı işaret ve levhası	Alanda herhangi bir işaretleme ve levha yerleştirme çalışması yapılmamış olması	Yer yön kaybı, çarpma, düşme, kayma etkisi ile sakatlanma ve yaralanma	9	6	3	162
10	Hava akımı	Mağaranın jeolojik ve topografik yapısına bağlı olarak içeriye dışarıdan bir hava akımının olmaması.	Cilt kuruluğu, bayılma, bunalma	8	7	3	168
11	Gaz birikimi	Yetersiz havalandırma, organik ayrışma, guano birikimi	Zehirlenme, baş dönmesi, baş ağrısı, bayılma	5	4	3	60
12	Ses şiddeti	Yankılanma, insan yoğunluğu	İletişim bozukluğu, stres, işitme rahatsızlıkları, yarasa ekosisteminin bozulması	6	6	2	72
13	pH	Su damlamaları, organik çözünme, kimyasal reaksiyonlar.	Ciltte tahriş, ekipman bozulmaları	5	5	5	125
14	Yarasa ekosistemi	Yarasa saldırısı	Yarasaların gürültü ve ışık kaynağıyla rahatsız edilmesi	4	5	6	120
15	Guano	Yarasa dışkı birikimi, nem, temizlik faaliyetlerinin olmaması	Biyolojik risklerden kaynaklanan hastalıklar, kötü koku, solunum yolu riskleri	4	5	6	120
16	Oksijen	Kapalı ortam, yetersiz hava akışı, oksijen tüketim hızı	Solunum güclüğü, nefes darlığı, bayılma hayati fonksiyonların kaybolması	6	4	3	72
17	Karbondioksit	Organik ayrışma, insan yoğunluğu, yetersiz hava akışı	Baş ağrısı, nefes darlığı, bayılma, bilinç kaybı	4	5	3	60
18	Su baskını	Mevsimsel olarak dışarıdan içeriye su girişi, drenaj yetersizliği,	Boğulma, kayma düşme riski, mahsur kalma, ulaşım zorluğu	7	7	5	245

FMEA analizinin yapıldığı yedinci noktadaki (Tablo 16) çalışma sahasının hem yapısal hem de çevresel açıdan en yüksek risklerini barındırmaktadır. Analiz edilen faktörlerden en büyük riskleri taşıyan faktörler, bölgede lokal yada genel çöküntü olma ihtimali, derin gölet oluşumu, güvensiz zemin yapısı, nem, görüş kısıtlılığı, hava akışı eksikliği ve sırasıyla diğer risk faktörleridir. Bir bütün olarak değerlendirildiğinde, ziyaretçi ve çalışan güvenliğini tehdit eden unsurların rastlantısal değil, mağaranın jeolojik yapısı ve hidrolojik döngüsüyle doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Özellikle zemin yapısının düzensizliği, su baskını potansiyeli ve tavan stabilitesi gibi faktörler, yüksek şiddetli riskler kategorisinde yer alarak sahadaki çalışmaların doğa koşullarıyla olan bağlantısını göstermektedir. Bu durum, saha güvenliğinin yalnızca bireysel koruyucu donanımlarla sağlanamayacağını, aksine sürekli bir gözlem ve çalışma gerektirdiğini göstermektedir.

Bunun yanı sıra, görüş kısıtlılığı ve iletişim zayıflığı genel olarak her bölgede iyileştirmelerle büyük oranda yönetilebilecek riskler olarak öne çıkmaktadır. Öte yandan, gaz birikimi, biyolojik faktörler ve ses düzeyi gibi daha ikincil etmenler, saha kullanım yoğunluğu ile paralellik gösterdiği için düzenli izleme gerektirmektedir.

3.3.2. HAZOP analizi

Çalışma alanı olan Akçakale mağarası'nın yedi ayrı çalışma noktasının HAZOP risk analiz tabloları aşağıda sırayla verilmiştir.

Tablo 17. Birinci çalışma noktası HAZOP risk analiz tablosu

No	Klavuz kelime	Proses parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Öneriler
1	Az	Nem	Nem oranında değişkenlik.	Dış dünyaya en yakın nokta olması ve hava akımının varlığı	Solunum yolu irritasyonu, toz oluşumuna bağlı rahatsızlık, ortam konforunun azalması.	Periyodik nem ölçümü ve havalandırma kontrolü yapılmalı.
2	Dalgalı	Karbondioksit	Seviye düzensizliği	Hava sirkülasyonunun düzensizliği, kapalı alan etkisi.	Uzun süreli maruziyette baş ağrısı, yorgunluk.	Periyodik ölçüm ve havalandırma kontrolü.
3	Hiç	Karbonmonoksit	Tespit edilmedi.	Yanma kaynağı yok	Mevcut durumda risk yok.	Periyodik gaz ölçümü yapılmalı.
4	Hiç	Metan	Tespit edilmedi.	Organik ayrışma yok	Mevcut durumda risk yok.	Periyodik gaz ölçümü yapılmalı.
5	Hiç	Hidrojen sülfür	Tespit edilmedi.	Organik çürüme yok	Mevcut durumda risk yok.	Periyodik gaz ölçümü yapılmalı.
6	Hiç	Aydınlanma	Tespit edilmedi.	Dış dünyadan bağımsız tamamen kapalı bir alan oluşu.	Çarpma, düşme, yön kaybı.	Sabit aydınlatma sistemleri yerleştirilmeli.

Tablo 17. (Devamı)

No	Klavuz kelime	Proses parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Öneriler
7	Fazla	Ağır metal	Ağır metal konsantrasyonu yüksek	jeolojik yapı ve mineral birikimi	Uzun süreli maruziyette toksik etki, organ hasarı, sağlık sorunları.	Mağaraya giriş sınırlandırılmalı, maruziyet süresi kontrol altına alınmalı, KKD kullanılmalı, insanların dokunması engellenmeli.
8	Fazla	Düşme	Bozuk ve kaygan zemin yapısı.	Zemine tavandan düşen kaya bloklarının zemini kaplamış olması, bozuk yapıda olması.	Düşerek yaralanma, uzuvlarda burkulma, çatlak, kırılma riski.	Yürüyüş yolları planlanmalı, zemin güvenliği sağlanmalı, uyarı işaret levhaları konulmalı.
9	Az	Tavan stabilitesi	Tavan stabilitesi düşük	Jeolojik zayıflık, kayaç yapısının karstik olması, sağlamlığı azaltmaktadır.	Göçük, ciddi yaralanma veya ölüm riski.	Jeoteknik analizler yapılarak, gerekli destekleme sistemleri kurulmalı.
10	Az	Duvar stabilitesi	Duvar stabilitesi düşük.	Karstik kayaç yapısı,	Parça düşmesi, yaralanma veya ölüm riski.	Duvar stabilitesi izlenmeli ve risk içeren kısımlara yaklaşımlar sınırlandırılmalı.

Birinci çalışma noktası olan bölgede (Tablo 17) en dikkat çeken riskler; ağır metal yoğunluğu, düşme riski ve düşük tavan-duvar stabilitesidir. Bölgenin dış dünyaya daha yakın olması nedeniyle nem değişkenlik göstermekte ve bu durum hem ortam konforunu azaltmakta hem de zeminin bozulmasına sebep olmuştur. Özellikle tavandan kopan kaya parçalarının zemini kaplaması, yürüyüş güvenliğini ciddi şekilde azaltarak düşme ve yaralanma ihtimalini artırmaktadır. Ayrıca karstik kayaç yapısı nedeniyle tavan ve duvar stabilitesi zayıf olup göçük veya kaya düşmesi sonucu ölümcül kazalar meydana gelebilecek bir yapı göstermektedir. Ağır metal konsantrasyonunun yüksek olması ise uzun süreli maruziyetlerde toksik etkilere yol açabilecek önemli bir sağlık riski oluşturmaktadır.

Tablo 18. Üçüncü çalışma noktası HAZOP risk analiz tablosu

No	Klavuz kelime	Proses parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Öneriler
1	Fazla	Nem	Nem oranı yüksek	Dış dünyadan içeriye su sızıntısı, kapalı ortam oluşundan nemin birikmesi	Zemini kayganlaştıran en büyük etkidir. Düşme riski, küf oluşumuna bağlı solunumda zorlanmalar, ortam konforunun azalması ve vücudun terlemesini engellemesi.	2. bölgeye girişler kontrollü olmalı, kaygan zemine karşı önlem alınmalı, uzun süreli maruziyet sınırlandırılmalı, uygun havalandırma sistemleri kurulmalı.

Tablo 18. (Devamı)

No	Klavuz kelime	Proses parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Öneriler
2	Dalgalı	Karbondioksit	Artıp-azalmaya meyilli	Hava sirkülasyonu eksikliği, kapalı alan	Uzun süreli maruziyette baş ağrısı, yorgunluk, bunalma, nefes alışverişinde zorlanma.	Periyodik gaz ölçümü yapılmalı ve yeterli hava sirkülasyonu sağlanmalı.
3	Hiç	Karbonmonoksit	Tespit edilmedi.	Yanma kaynağı yok.	Mevcut durumda risk yok.	Periyodik gaz ölçümü yapılmalı.
4	Hiç	Metan	Tespit edilmedi.	Organik ayrışma	Mevcut durumda risk yok.	Periyodik gaz ölçümü yapılmalı.
5	Hiç	Hidrojen sülfür	Tespit edilmedi.	Organik çürüme	Mevcut durumda risk yok.	Periyodik gaz ölçümü yapılmalı.
6	Hiç	Aydınlanma	Tespit edilmedi.	Tamamen kapalı alan olması ve herhangi bir aydınlatma çalışması yapılmaması	Düşme, çarpma, kayma, yön algısını yitirme.	Sabit aydınlanma sistemleri yerleştirilmeli, aydınlatma sistemlerinin ışık şiddeti gözleri rahatsız etmeyecek yoğunlukta olmalı.
7	Fazla	Ağır metal	Yüksek konsantrasyona sahip	Karstik yapı olmasından dolayı mineral birikimi	Uzun süreli maruziyette toksik etki, organ hasarı ve kaybı, ölümcül sağlık sorunları.	Mağaraya giriş sınırlandırılmalı, maruziyet süresi kontrol altına alınmalı ve kesinlikle KKD kullanılmalı, mümkünse insanların dokunması engellenmeli.
8	Fazla	Kayma-düşme	Kayıp düşme riski yüksek.	Yüksek nem ve dış dünyadan mağara içine su sızıntısı etkisiyle zeminin kayganlaşması.	Düşme, yaralanma, düşmeye bağlı kırıklar, kafa travmaları.	Yürüyüş platformları yapılmalı, uyarı işaretleri konulmalı, kauçuk tabanlı ayakkabılar giyilmeli.
9	1.bölgenin parçası	Tavan stabilitesi	1.bölge kadar tehlikeli olmasa da stabilite düşük	Tavandan içeriye su sızıntısı tavan yapısını gevşetebilir, parça kopmasına neden olabilir.	Yaralanma, ölüm riski	Güçlü destek sistemleri ile desteklenmelidir.
10	1.bölge den başka	Duvar stabilitesi	Duvar yapısı stabilitesi daha iyi	1.bölgede duvar yapısı kuru, çatlaklı yapıda ve pürüzlü iken 2.bölgenin duvar yapısı daha düz ve sağlam bir yapıdadır.	Birinci bölge kadar riskli olmasa da bir parça kopması durumunda yaralanma veya ölümle sonuçlanabilecek riskler doğurabilir.	Duvar stabilitesi periyodik olarak izlenmeli, risk içeren bir kısım oluşursa tespit edilip gerekli önlemler alınmalı ve ziyaretçiler uzak tutulmalıdır.

Tablo 18. (Devamı)

No	Klavuz kelime	Proses parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Öneriler
11	Fazla	Yarasa	Yarasa popülasyonu yüksek	Yarasa ekosistemine uygun bir alan olması, insan etkisinin olmaması.	Yarasadan kaynaklı hastalılar, alerjik reaksiyon, temas kaynaklı hastalıklar.	Bölgeye ziyaretler sınırlandırılmalı, doğrudan temas önlenmeli, kişisel koruyucular kullanılmalı.
12	Fazla	Guano	Guano birikimi var	Yarasa varlığı	Solunum yolu enfeksiyonu, kötü koku.	Guanoya temas engellenmeli, maske kullanılmalı mümkünse guano ortamdan uzaklaştırılmalı.
13	Dalgalı	Su varlığı	Su birikimi mevsimsel olarak değişiklik gösteriyor.	İlkbahar mevsimiyle yağmur ve eriyen karların mağara içine sızması	Suya karışabilecek virüs, ağır metal kaynaklı sağlık sorunları	Suyla temastan çekinilmeli, içme suyu olarak tüketilmesi önlenmeli, alana uygun ayakkabı giyilmeli.

İkinci çalışma noktası olan bölge (Tablo 18) mağara içerisindeki biyolojik ve çevresel risklerin en yoğun olduğu alandır. Yüksek nem ve su sızıntıları zemini oldukça kaygan hale getirmekte, bu durum düşme ve kafa travması riskini artırmaktadır. Bölgede yarasa popülasyonunun fazla olması ve buna bağlı guano birikimi bulunması; solunum yolu enfeksiyonları, alerjik reaksiyonlar ve biyolojik maruziyet açısından risk oluşturmaktadır. Ağır metal yoğunluğu ve değişken karbondioksit seviyeleri uzun süreli maruziyetlerde sağlık problemlerine neden olabilecek düzeydedir. Tavan stabilitesi birinci bölgeye göre nispeten daha iyi olsa da nemin kaya yapısını gevşetmesi nedeniyle parça düşmesi ve lokal göçük riski devam etmektedir. Bölge hem biyolojik hem de fiziksel tehlikelerin bir arada bulunduğu alanlardan biri olarak değerlendirilebilir.

Tablo 19. Üçüncü çalışma noktası HAZOP risk analiz tablosu

No	Klavuz kelime	Proses parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Öneriler
1	Fazla	Nem	Yüksek nem oranı	Su sızıntısı, kapalı ortam, hava akımının hiç olmaması	Kaygan zemin, solunum yolu problemleri, bunalma, vücudun toksinleri atamaması, düşme kayma kaynaklı yaralanmalar.	Zemin güvenliği sağlanmalı, kauçuk taban ayakkabı giyilmeli, havalandırma sistemleri kurularak hava akışı sağlanmalı, giriş süresi kısıtlanmalı.
2	Hiç	Hava akımı	Hava akışı yok	Kapalı alan yapısı, dış ortamdan bağımsız.	Boğucu gaz birikimi oluşabilir, bu da solunum yolu rahatsızlıklarına sebep olabilir.bitkinlik, çabuk yorulma.	Periyodik gaz kontrolleri yapılmalı, havalandırma sistemleri oluşturulmalı.
3	Az	Karbondioksit	Düşük seviyede	Hava akışı olmamasına rağmen karbondioksit birikimi diğer bölgelere göre düşük seviyededir. Bu da biyolojik faaliyetlerin olmadığını gösterir.	Mevcut durumda önemli bir risk yok.	Periyodik gaz ölçümleri yapılmalı
4	Hiç	Karbonmonoksit	Tespit edilmedi	Yanma kaynağı yok	Mevcut durumda risk yok	Periyodik gaz ölçümü yapılmalı
5	Hiç	Metan	Tespit edilmedi	Organik gaz oluşumu yok	Mevcut durumda risk yok	Periyodik gaz ölçümü yapılmalı
6	Hiç	Hidrojen sülfür	Tespit edilmedi	Organik ayrışma yok	Mevcut durumda risk yok	Periyodik gaz ölçümü yapılmalı.
7	Hiç	Aydınlanma	Aydınlatma yok	Doğal yada yapay aydınlatma yok	Görüş kısıtlılığı, yer yön bulamama, çarpma, düşme	Yeteri şiddette aydınlatma sistemleri ile aydınlatma yapılmalı
8	Fazla	Kayma-düşme	Zemin kayganlığı ve eğimi fazla	Nem, su birikimi, kayma yapısından dolayı pürüzsüz ve kaygan hale gelen zemin	Düşme, yaralanma,ekstremitelerde kırılma, çatlak riski.	Yürüyüş platformları yapılmalı yada yollar planlı olarak ayarlanıp güvenlik önlemleri alınmalı. Kaymaz taban ayakkabı giyilmeli.
9	2.bölge kadar iyi	Tavan stabilitesi	Tavan stabilitesi nde sapma gözlenmiştir.	Biraz daha sağlam kaya yapısı	Mevcut durumda risk 1.bölgeye göre daha az fakat herhangi bir kaya kopması yada çökmede yaralanma veya ölümle sonuçlanabilir.	Periyodik gözlem yapılmalı ve kaya parçası düşmesine ve ya çökmeye karşı kaya bulonuyada çelik iksalarla güçlendirilmeli.
10	1.bölge kadar iyi	Duvar stabilitesi	1.bölge duvar yapısıyla aynı sapmaya sahiptir.	Kaya yapısı 1.bölge duvar yapısının devamı niteliğindedir.	Kaya parçası kopması veya duvarda meydana gelebilecek göçük sebebiyle yaralanma veya ölüm riski.	Periyodik gözlem yapılmalı ve kaya parçası düşmesine karşı kaya bulonu ya da çelik iksalarla güçlendirilmeli.

Üçüncü çalışma noktası olarak seçilen bölgede (Tablo 19) en önemli problem hava akışının tamamen olmaması ve yüksek nemdir. Kapalı ortam koşulları nedeniyle boğucu bir atmosfer oluşabilmekte, uzun süreli maruziyetlerde nefes darlığı, bitkinlik ve psikolojik baskı hissi meydana getirebilecek düzeydedir. Zeminin kaygan ve eğimli yapısı düşme riskini artırırken, tavan stabilitesi birinci bölgeye göre daha iyi görünse de olası kaya düşmesi durumunda ciddi yaralanma ve ölüm riski devam etmektedir. Duvar yapısının birinci bölgeyle benzer özellik göstermesi nedeniyle stabilite kaybı riski hala önemlidir. Bu bölge özellikle havalandırma eksikliği ve kayma-düşme tehlikesi açısından dikkat edilmesi gereken alanlardan biridir.

Tablo 20. Dördüncü çalışma noktası HAZOP risk analiz tablosu

No	Klavuz kelime	Proses parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Öneriler
1	Fazla	Nem	Yüksek nem seviyesi	Su sızıntıları, kapalı ortam koşulları	Küf oluşumu ve solunum sistemi üzerinde etkiler	Ortam koşulları düzenli izlenmeli, hava akışı sağlanmalı.
2	Az	Hava akım hızı	Hava akışı mevsimsel olarak değişmekte yazda doğru yok	Dış ortamla bağlantısı olmayan kapalı alan olması	Gaz birikimi ve oksijen seviyesinde azalma riski, sağlık açısından olumsuz etkiler	Havalandırma planı oluşturularak, havalandırma sistemleri kurulmalı
3	Dalgalı	Karbondioksit(CO_2)	Karbondioksit seviyesinde değişkenlik	Hava akışı düzensizliği ve ortamdaki mikro canlılar olabilmek ihtimali	Uzun süreli maruziyette baş ağrısı ve dikkat dağınıklığı riski	Düzenli ölçümler yapılmalı ve ortam kontrolü sağlanmalı.
4	Yok	Karbonmonoksit(CO)	Tespit edilmemiştir	Yanma kaynağı yoktur	Mevcut durumda risk bulunmamaktadır.	Periyodik gaz ölçümleri sürdürülmelidir
5	Yok	Metan	Tespit edilmemiştir.	Organik gaz oluşumunun olmaması	Mevcut durumda patlama riski bulunmamaktadır.	Olası değişimlere karşı gaz ölçümü periyodik olarak yapılmalı ortam izlenmelidir.
6	Yok	Hidrojen sülfür	Tespit edilmemiştir	Organik ayrışma olmaması	Mevcut durumda zehirlenme riski bulunmamaktadır.	Periyodik gaz ölçümleri devam ettirilmelidir.
7	Yok	Aydınlanma	Ortamda aydınlatma bulunmamaktadır.	Doğal ışık girişi yok ve yapay ışıklandırma ile ilgili herhangi bir çalışma bulunmaması	Görüş kaybı, çarpma, düşme riski	Yapay aydınlatma sistemleri uygulanmalıdır.
8	Fazla	Kayma-düşme	Kayganlık düzeyi yüksek	Nem ve su birikimi	Düşme, yaralanma riski	Zeminin güvenliği sağlanmalı, uygun yürüyüş yolları oluşturulmalı, uyarı işaretlemesi yapılmalı

Tablo 20. (Devamı)

No	Klavuz kelime	Proses parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Öneriler
9	Fazla	Tavan stabilitesi	Yüksek stabilite	Çatlaklı oluşum, nem etkisi	Parça düşme ihtimaliyle yaralanma, sakatlanma veya ölüm	Tavan yapısı güçlendirilmeli, güçlü materyallerle desteklenmeli.
10	Fazla	Duvar stabilitesi	Yüksek duvar stabilitesi	Su etkisi, kaya dayanımı	Duvar parçasının düşmesi ,yaralanma ihtimali	Duvara güçlü destekler uygulanmalı, periyodik olarak izlenmeli, yaklaşma sınırı belirlenmeli.
11	Az	Çamur	Çamur oluşumu var	Zeminin kaya değil de toprak yapıda olması içeri giren suyla birleşerek çamur oluşumuna sebebiyet vermek.	Kayma, batma, hareket kısıtlılığı.	Çamurlu alana girişler kısıtlanmalı, yürüyüş platformları oluşturulmalı, uyarı işaretleri konulmalı.

Dördüncü çalışma alanı olarak belirlenen bölgede (Tablo 20), yüksek nem, çamur oluşumu ve kayma riski ön plana çıkmaktadır. Özellikle zeminin toprak yapıda olması ve suyla birleşerek çamur oluşturması hareket etmeyi azaltmakta, kayma ve batma riskini artırmaktadır. Hava akımının mevsimsel olarak azalması gaz birikimi ihtimalini yükseltebilir ve oksijen seviyelerinde düşüşe neden olabilir. Tavan ve duvar yapısında çatlaklı oluşumların bulunması, nemin etkisiyle birlikte parça düşmesi riskini artırmaktadır. Bu nedenle bölge; fiziksel yaralanma, stabilite kaybı ve çevresel maruziyet bakımından dikkatle yönetilmesi gereken alanlardan biridir.

Tablo 21. Beşinci çalışma noktası HAZOP risk analiz tablosu

No	Klavuz kelime	Proses parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Öneriler
1	Fazla	Nem	Yüksek nem varlığı	Kapalı ortam koşulları	Kaygan zemin, küf oluşumu, elektronik cihazlarda bozulma, solunum güçlüğü	Nem seviyesini düzenli olarak izlenmeli, maruziyet süresi azaltılmalı
2	Hiç	Karbonmonoksit	Tespit edilmemiştir	Yanma kaynağı yok	Mevcut durumda toksik gaz riski yok	Periyodik gaz ölçümü yapılmalı
3	Hiç	Metan	Tespit edilmemiştir	Organik gaz oluşumu yok	Mevcut durumda patlama ve yanıcı gaz riski yok	Periyodik gaz ölçümü yapılmalı.
4	Hiç	Hidrojen sülfür	Tespit edilmemiştir	Organik çürüme yok	Zehirlenme riski yok	Periyodik gaz ölçümü yapılmalı
5	Hiç	Aydınlanma	Tespit edilmemiştir.	Doğal ışık girişi yok	Görüş kısıtlılığına bağlı çarpma düşme ve yaralanma riski	İnsan sağlığı ve mağara içi oluşumlara zarar vermeyecek şiddette aydınlatma
6	Fazla	Ağır metal	Yüksek ağır metal içeriği	Jeolojik yapı, mineral birikimi	Toksik elementlerden kaynaklı sağlık sorunları ihtimali	Temas engellenmeli ve KKD kullanılmalı
7	Fazla	Kayma-düşme	Kaygan yüzey	Nem ve zemin yüzeyinde su birikimi	Düşme ve yaralanma riski artmaktadır.	Güvenli yürüyüş alanları oluşturulmalı
8	Az	Tavan stabilitesi	Tavan stabilitesi yüksek fakat yerde tavandan düşen sarkıt parçaları var	Tavanda hafif çatlak oluşumlar, nem varlığı dayanıksız oluşumlar	Sarkıt oluşumların düşme riski nedeniyle yaralanmalar.	Düzenli gözlem yapılmalı ve tavandan düşebilecek parçalara karşı güçlü engelleyiciler konulmalı
9	Fazla	Çamur	Çamur oranı ilkbaharda çok yüksek	Mağaranın en alçak noktası ve düzlük alan oluşundan kaynaklı mevsimsel su ve çamur oranı yükselip alçalmaktadır.	Yürüme kısıtlılığı, çamura batma riski	Bölgeye yürüyüş platformları yapılmalı, uyarı işaretleri konulmalı,

Beşinci çalışma noktası olan bölge (Tablo 21) yüksek nem ve yoğun çamur oluşumu en belirgin risk faktörleridir. Bölgenin mağaranın en alçak noktalarından biri olması nedeniyle özellikle ilkbahar döneminde su ve çamur birikimi ciddi seviyelere ulaşmaktadır. Bu durum yürümeyi zorlaştırmakta ve ziyaretçilerin çamura saplanma veya düşme riskini artırmaktadır. Ağır metal yoğunluğu da sağlık açısından uzun süreli toksik etki oluşturabilecek önemli bir tehlikedir. Tavanda çatlaklı yapı ve düşmüş sarkıt parçalarının bulunması, lokal kaya düşmesi riskinin varlığını göstermektedir. Bölge genel olarak hareket kısıtlılığı, düşme ve çevresel maruziyet risklerinin yoğun olduğu alanlardan biri olarak değerlendirilebilir.

Tablo 22. Altıncı çalışma noktası HAZOP risk analiz tablosu

No	Klavuz kelime	Proses parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Öneriler
1	Fazla	Nem	Çok yüksek nem varlığı	Hava akışı olmayışı, kapalı ortam koşulları	Elektronik cihazlarda bozulma, solunum güçlüğü, vücutta ağırlık hissi, bunalma	Havalandırma sistemler kullanılmalı, nem düzeyi sıklıkla izlenmeli,
2	Hiç	Hava akım hızı	Hava akışı yok	Dışarıyla hiçbir bağlantı olmayışı, havalandırma koşullarının olmayışı	Solunum yolu problemleri, uzun süreli maruziyette bayılma, boğulma hissi.	Havalandırma sistemleri kurulmalı
3	Fazla	Karbondioksit	Sınırın üstünde karbondioksit varlığı	Ortamda mikro canlılar oluşu, 2.bölgedeki yarasa varlığının etkisi ve hava akışı olmaması	Çarpıntı, nefes alma güçlüğü, baş dönmesi, bulantı,konsantrasyon kaybı, uyku hali	Havalandırma sistemleri kurulmalı, sürekli izlenmeli
4	Hiç	Karbonmonoksit	Tespit edilmedi	Yanma kaynağı yok	Toksik gaz riski yok	Her ihtimale karşı düzenli gaz ölçümü yapılmalı
5	Hiç	Metan	Tespit edilmedi	Organik gaz oluşumu mevcut değil	Yanıcı ve patlayıcı gaz riski yok	Her ihtimale karşı düzenli gaz ölçümü yapılmalı
6	Hiç	Hidrojen sülfür	Tespit edilmedi	Organik ayrışma ihtimali mevcut değil	Zehirlenme riski yok	Her ihtimale karşı düzenli gaz ölçümü yapılmalı
7	Hiç	Aydınlanma	Tespit edilmedi	Kapalı ortam koşulları sebebiyle içeriye ışık girmemesi	Yer yön kaybı, çarpma, düşme, psikolojik travma, korku	Aydınlatma koşulları sağlanmalı
8	Fazla	Ağır metal	Yoğun ağır metal	Mağara jeolojik yapısı	Deri zehirlenmesi, vücuda bir şekilde giren toksinlerin yaratacağı sağlık sorunları	KKD kullanımı sağlanmalı, yürüyüş platformları konulmalı
9	Fazla	Kayma-düşme	Kayma düşme riski yüksek	Nem ve zemin yüzeyinde su birikimi	Düşme ve yaralanma riski artmaktadır.	Güvenli yürüyüş alanları oluşturulmalı
10	Fazla	Tavan stabilitesi	Tavan stabilitesi yüksek	Tavanda hafif çatlak oluşumlar, nem varlığı	Lokal olarak küçük kaya parçaları düşme riski nedeniyle yaralanmalar	Düzenli gözlem yapılmalı ve güçlendirme çalışması yapılmalı

Altıncı çalışma alanı olarak seçilen bölge (Tablo 22) mağaranın mikroklimatik açıdan en riskli alanı olarak değerlendirilebilir. Çok yüksek nem, hava akışının tamamen olmaması ve karbondioksitin bulunması solunum problemleri oluşturabilecek bir atmosfer meydana getirmektedir. Uzun süreli maruziyetlerde baş dönmesi, nefes darlığı, çarpıntı ve bayılma hissi gibi etkiler ortaya çıkabilir. Bunun yanında ağır metal yoğunluğu ve kaygan zemin yapısı hem toksik hem de fiziksel yaralanmaları meydana getirebilir. Tavan yapısında çatlak oluşumları bulunması nedeniyle lokal kaya düşmeleri meydana gelebilir. Kapalı ortam koşulları nedeniyle psikolojik baskı hissi ve yön kaybı da oluşabilecek önemli sorunlar arasındadır. Bu nedenle bölgeye girişlerin kontrol altında tutulması gerekmektedir.

Tablo 23. Yedinci çalışma noktası HAZOP risk analiz tablosu

No	Klavuz kelime	Proses parametresi	Sapma	Sebepler	Sonuç	Öneriler
1	Fazla	Nem	Nem oranı yüksek	Kapalı alan etkisi ve derin gölet olması	Nefes alma güçlüğü, bunalma, darlanma, uzun süreli maruziyette vücutta toksin birikimi,	KKD kullanılmalı, ortam havalandırması sağlanmalı
2	Yok	Karbonmono ksit	Tespit edilmedi	Yanma kaynağı yok	Mevcut durumda karbonmonoksit riski yok	Düzenli olarak gaz ölçümüyle alan izlenmeli
3	Yok	Metan	Tespit edilmedi	Organik gaz oluşumu mevcut değil	Mevcut durumda metan gazından kaynaklı patlama riski yok	Periyodik gaz ölçümü
4	Yok	Hidrojen sülfür	Tespit edilmedi	Organik ayrışma yok	Mevcut durumda zehirlenme riski yok	Periyodik gaz ölçümü
5	Yok	Aydınlanma	Tespit edilmedi	Doğal ışık girişi olmayışı	Görüş kısıtlılığına bağlı düşme, yuvarlanma, vücutta kırık çatlak oluşumu ve korku gibi psikolojik etkiler	Bölgede, göz sağlığına uygun şiddette yapay aydınlatma ile bölge aydınlatılmalı
6	Fazla	Düşme-yuvarlanma	Düşme ihtimali yüksek	Zemin düzensizliği kopan kaya parçalarının zeminde birikmiş olması	Büyük çaplı yaralanmalar, uzuv kaybı, fiziksel sağlık sorunları	Yürüyüş platformları oluşturulmalı, zemin güvenliği sağlanmalı, ziyaretler kısıtlanmalı.
7	Az	Tavan stabilitesi	Tavan yapısı güçsüz	Bölgenin jeolojik yapısı ile birlikte zeminde kopmuş kaya parçalarının fazlalığı durumu izah etmektedir.	Tavandan düşebilecek kaya parçaları, küçük çaplı göçükler sebebiyle ağır yaralanma ve ölüm	Tavan jeolojik yapıya uygun olarak kaya bulonu, çelik iksa vb. ile sağlamlaştırılmalı ve ziyaretler kısıtlanmalı.
8	Az	Duvar stabilitesi	Stabilite kaybı	Duvar kısmındaki yapının güçsüz olması	Yaralanma, ölüm	Duvar yapısı da kaya bulonu ve çelik iksalarla sağlamlaştırılmalı, duvarlarla yaklaşmak engellenmeli
9	Fazla	Su varlığı	Su birikimi fazla	Fazla su girişi ve bölgede derin bir çukur alanın varlığı	Suya düşme, boğulma, ölüm riski	Çukur olan bölgeye ziyaretçilerin girişi engellenmeli, gerekli uyarı işaret levhaları yerleştirilmeli.

Yedinci çalışma alanı olan bölge (Tablo 23) özellikle düşme, yuvarlanma ve boğulma riski açısından en tehlikeli alanlardan biridir. Bölgede bulunan derin çukur ve yoğun su birikimi, suya düşme sonucu ölümcül kazalara neden olabilecek düzeydedir. Zemindeki düzensiz yapı ve kaya parçaları hareket güvenliğini azaltmaktadır. Ayrıca yüksek nem ve kapalı alan etkisi nedeniyle nefes alma güçlüğü ve bunalma hissi oluşabilmektedir. Tavan ve duvar stabilitesinin zayıf olması, kaya düşmesi ve lokal göçük riskini artırmaktadır. Bu bölge fiziksel güvenlik açısından mağaranın en önemli

noktalarından biri olup ziyaretlerin sınırlandırılması gereken yüksek riskli alan niteliğindedir.

3.3.3. Mağaranın Riskli Bölgelerinin Oluşturulması

Bu tez çalışması kapsamında Akçakale Mağarası'nda yapılan saha ve laboratuvar çalışmaları sonucunda FMEA ve HAZOP risk analizleri oluşturulmuştur. Risk analizleri sonrası oluşturulan risk bölgeleri, alanın jeolojik, hidrolojik, biyolojik ve atmosferik özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Bölgelendirme sürecinde; kayaç yapısı ve stabilite durumu, tavan yüksekliği, çatlak ve blok düşme potansiyeli, su varlığı ve nem oranı, gaz birikimi olasılığı ile biyolojik faaliyet yoğunluğu gibi parametreler esas alınmıştır. Ayrıca, saha gözlemleri ve yerinde yapılan incelemeler doğrultusunda her bölgenin kendine özgü tehlike kaynakları tanımlanmış ve bu tehlikelerin oluşturabileceği etkiler değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, benzer risk özellikleri gösteren alanlar aynı risk kategorisi altında toplanmış ve her bir bölgenin tehlike düzeyi, maruziyet durumu ve potansiyel etkileri göz önünde bulundurularak sınıflandırılmıştır (Şekil 26).



Şekil 26. Akçakale Mağarası'nın, risk analizleri sonrası tehlike oranlarına göre sınıflandırılması sonucu

Kırmızı renk ile gösterilen bölgeler en yüksek riskleri barındıran alanlardır. En yüksek tehlikeler birinci, ikinci ve yedinci bölgeleri kapsamaktadır. En yüksek riskleri

taşıyan bu bölgeler yaralanma, uzuv kaybı ve daha çok ölümle sonuçlanabilecek tehlikeleri oluşturabilecek düzeydedir.

Turuncu renk ile gösterilen alan, kırmızı renkteki alanlar kadar yüksek risk taşımasa da üçüncü bölgenin de riskli bir alan olduğunu belirtmektedir. Yine risklerin ortaya çıkması durumunda yaralanma, uzuv kaybı ve ölümle sonuçlanabilecek riskleri barındırmaktadır.

Sarı renk ile gösterilen dördüncü, beşinci ve altıncı bölgeler risk taşımakta fakat diğer renkler ile gösterilen alanlar kadar tehlike potansiyeli olmayan alanları belirtmek için kullanılmıştır. Kontrol altında tutulmadığı sürece ölümcül düzeyde olmasa da çalışan ve ziyaretçilere açısından riskler taşımaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, Akçakale Mağarası'nın iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular doğrultusunda FMEA ve HAZOP risk analiz tabloları oluşturulmuştur. Analizlere göre sonuçlar ortaya konulmuştur.

- Gerçekleştirilen saha gözlemleri ve görsel kayıtlar doğrultusunda mağara içerisinde çeşitli risk unsurları tespit edilmiştir. Mağara içerisinde yer alan yarsa ve guanolarının belirli bölgelerde yoğunlaştığı gözlemlenmiş olup, bu durum biyolojik risk etmeni olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca guano birikimlerinin ortam hijyeni ve hava kalitesi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceği düşünülmektedir.

- Mağara içerisindeki bazı alanlarda zemin yapısının kaygan ve çökmelerden dolayı zeminde birikerek düzensiz zemin yapısı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Özellikle nemli bölgelerde kayma ve düşme riskinin arttığı belirlenmiştir. Bunun yanında bazı kayaç yapılarında çatlaklar ve gevşemeler tespit edilmiş olup, bu alanların çökme riski taşıdığı değerlendirilmiştir.

- Mağara giriş kısmında ise geçiş alanlarının dar yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Giriş bölgesindeki darlığın hareket kabiliyetini sınırlandırabileceği ve acil durum tahliyelerini zorlaştırabileceği düşünülmektedir.

- Mağara içerisinde gerçekleştirilen mikroklimatik ölçümler doğrultusunda hava akımının bazı bölgelerde düşük seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Özellikle mağaranın girişten sonraki alanlara sahip olan bölümlerinde hava dolaşımının sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Yetersiz hava akımı nedeniyle ortam havasının durağan hale gelebildiği ve bunun gaz birikimi açısından risk oluşturabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca düşük hava sirkülasyonunun mağara içerisindeki nem oranını artırabileceği ve ortam konforunu olumsuz etkileyebileceği düşünülmektedir. Bu nedenle mağara içerisinde düzenli hava kalitesi ölçümlerinin yapılmasının önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

- Yapılan ölçümler sonucunda mağara içerisindeki nem oranının yüksek seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Yüksek nemin özellikle zemin yüzeylerinde kayganlık oluşturduğu ve hareket güvenliğini olumsuz etkileyebileceği gözlemlenmiştir. Bunun yanında nemli ortam koşullarının biyolojik oluşumları destekleyebileceği, mantar ve mikroorganizma gelişimine uygun ortam sağlayabileceği değerlendirilmiştir. Sürekli yüksek nem seviyelerinin mağara içerisindeki kayaç yapıları üzerinde fiziksel değişimlere neden olabileceği ve uzun vadede yapısal riskleri artırabileceği

düşünülmektedir. Ayrıca yüksek nemin çalışma konforunu azaltabileceği ve ziyaretçiler açısından olumsuz etkiler oluşturabileceği değerlendirilmiştir.

- Mağara içerisinde gerçekleştirilen sıcaklık ölçümlerinde ortam sıcaklığının genel olarak stabil bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Ancak mağaranın kapalı yapısı nedeniyle bazı bölgelerde hissedilen sıcaklık seviyelerinin farklılık gösterebildiği gözlemlenmiştir. Özellikle hava dolaşımının sınırlı olduğu alanlarda ortam koşullarının daha bunaltıcı hale gelebildiği değerlendirilmiştir. Sıcaklık değerlerinin mağaranın mikroklimatik yapısını doğrudan etkilediği ve nem ile birlikte değerlendirildiğinde çalışma ortamı üzerinde belirleyici bir unsur olduğu düşünülmektedir.

- Mağara içerisinde gerçekleştirilen gaz ölçümlerinde karbondioksit değerlerinin bazı bölgelerde artış gösterebildiği belirlenmiştir. Özellikle hava akımının düşük olduğu kapalı alanlarda CO₂ birikimi oluşabileceği değerlendirilmiştir. Karbondioksit seviyelerindeki artışın uzun süreli maruziyet durumlarında baş ağrısı, dikkat dağınıklığı ve solunum problemleri gibi olumsuz etkilere neden olabileceği düşünülmektedir. Bunun yanında mağara içerisindeki canlı faaliyetleri, organik birikimler ve yetersiz havalandırmanın CO₂ seviyeleri üzerinde etkili olabileceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle düzenli gaz ölçümlerinin yapılmasının önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

- Gerçekleştirilen ölçümlerde diğer gaz parametrelerinin (CO, CH₄ ve H₂S) 0 değerinde olduğu belirlenmiştir. Ölçüm yapılan alanlarda toksik veya yanıcı gaz varlığına ilişkin herhangi bir bulguya rastlanmamıştır. Bu doğrultuda diğer gazlar açısından önemli bir risk unsurunun bulunmadığı değerlendirilmiştir. Ancak mağara ortamlarının doğal yapısı gereği zaman içerisinde farklı gaz oluşumlarının meydana gelebileceği göz önünde bulundurularak periyodik ölçümlerin sürdürülmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir. Oksijen (O₂) seviyesinin ise mevcut durumda yeterli olduğu tespit edilmiştir. Fakat kalabalık ziyaretlerde O₂ seviyesinde dalgalanmalar meydana gelebileceği düşünülmekte ve sürekli izlemelerle kontrol altında tutulması gereken bir parametredir.

- Mağara içerisindeki doğal aydınlatmanın olmadığı gözlemlenmiştir. Mağaranın tüm bölgelerinde görüş mesafesinin sıfır değerinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yetersiz görüş koşullarının acil durum müdahalelerini zorlaştırabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle mağara içerisinde uygun ve kontrollü aydınlatma sistemlerinin kullanılmasının önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

- Mağara içerisinde şubat ve mart aylarında gerçekleştirilen ölçümlerde ses seviyelerinin genel olarak düşük olduğu belirlenmiştir. Ancak mağaranın doğal akustik yapısı nedeniyle seslerin yankılanabildiği ve belirli alanlarda farklı şekilde

hissedilebildiği gözlemlenmiştir. Yankı oluşumunun dikkat dağınıklığına neden olabileceği ve iletişim süreçlerini zorlaştırabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca ani ve yüksek seslerin mağara içerisindeki bulunan yarasa yaşamı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceği düşünülmektedir.

- Gerçekleştirilen laboratuvar çalışmaları sonucunda mağara içerisindeki pH değerlerinin küçük oranda değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Genel olarak içme suyu pH değerleri seviyelerindedir. Ölçülen pH seviyelerinin mağara ortamındaki kayaç yapıları, su oluşumları ve biyolojik süreçler üzerinde etkili olabileceği de değerlendirilmiştir. Özellikle asidik özellik gösteren alanların kayaç yüzeylerinde aşınma ve çözünme süreçlerini hızlandırabileceği düşünülmektedir. Bunun yanında pH değerlerinin mağara içerisindeki mikroorganizma faaliyetleri üzerinde de etkili olabileceği değerlendirilmiştir.

- Mağara içerisinde herhangi bir GPS veya konumlandırma sisteminin bulunmadığı belirlenmiştir. Yer altı ortamlarının doğal yapısı nedeniyle konum tespitinin zorlaşabileceği değerlendirilmiştir. Özellikle mağaranın büyük olması sebebiyle yön kaybı yaşanabilme ihtimalinin yüksek olduğu, GPS sistemlerinin olmaması nedeniyle acil durum müdahaleleri ve tahliye süreçlerinin zorlaşabileceği değerlendirilmiştir. Bu durumun özellikle mağara içerisinde uzun süreli çalışma gerçekleştiren kişiler açısından risk oluşturabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

- Mağaranın kullanıma açık olmaması nedeniyle alan içerisinde herhangi bir uyarı işareti veya yönlendirme levhasının bulunmadığı gözlemlenmiştir. Özellikle riskli bölgeleri belirten uyarı sistemlerinin olmaması; çökme riski bulunan alanlar, kaygan zeminler ve diğer riskler açısından tehlike oluşturabilecek bir unsur olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca yönlendirme levhalarının bulunmamasının mağara içerisinde hareket güvenliğini olumsuz etkileyebileceği düşünülmektedir. Acil durumlarda çıkış yönlerinin belirlenmesini zorlaştırabilecek bu durumun güvenlik açısından önemli bir eksiklik olduğu değerlendirilmiştir.

5. ÖNERİLER

Sonuçlar kısmında verilen tüm bu risk faktörleri değerlendirildiğinde Akçakale Mağarası'nda belirlenen fiziksel, kimyasal, biyolojik ve çevresel risk etmenleri değerlendirilmiş, elde edilen bulgular doğrultusunda mağara ortamında güvenliğin artırılmasına yönelik çeşitli öneriler geliştirilmiştir. Öneriler hazırlanırken mağaranın doğal yapısının korunması, çalışan ve ziyaretçi güvenliğinin sağlanması, olası iş kazalarının önlenmesi ve sürdürülebilir mağara yönetiminin desteklenmesi temel alınmıştır. Ayrıca, mağara ortamına özgü mikroklimatik koşullar, gaz birikimi, kaya düşmesi, biyolojik riskler ve iletişim yetersizlikleri gibi unsurlar dikkate alınarak öneriler oluşturulmuştur. Bu kapsamda geliştirilen öneriler aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

Kaya düşmesi / çökme

- Süreksizlik, çatlak ve blok hareketleri jeoteknik yöntemlerle analiz edilmelidir.
- Yüksek riskli bölgelerde fiziksel bariyerler kullanılmalıdır.
- Titreşim oluşturabilecek insan faaliyetleri kontrol altına alınmalıdır.
- Kaya hareketlerini izlemek amacıyla periyodik gözlem yapılmalıdır.
- Acil müdahale ekipleri ve ilk yardım ekipmanları hazır bulundurulmalıdır.
- Riskli bölgelerde çalışma süresi azaltılmalıdır.
- Mağara tavanı ve duvarlarında düzenli jeolojik stabilite analizleri yapılmalıdır.
- Çatlak, ayrışma ve gevşek blok oluşumları periyodik olarak incelenmelidir.
- Riskli alanlarda tahkimat ve destekleme sistemleri kullanılmalıdır.
- Tehlikeli bölgelerde ziyaretçi ve çalışan girişleri sınırlandırılmalıdır.
- Baret, çelik burunlu ayakkabı ve koruyucu ekipman kullanımı zorunlu hale getirilmelidir.
- Kaya düşmesi riski bulunan alanlara uyarı levhaları yerleştirilmelidir.
- Acil durum tahliye prosedürleri oluşturulmalıdır.

Zemin yapısı

- Kaygan ve düzensiz yüzeylerde kaymaz yürüyüş yolları oluşturulmalıdır.
- Geçiş alanları uygun şekilde işaretlenmelidir.
- Çalışanların kaymaz tabanlı ayakkabı kullanması sağlanmalıdır.

- Zemin stabilitesi belirli aralıklarla kontrol edilmelidir.
- Düşme ve kayma riskine karşı yeterli aydınlatma sağlanmalıdır.

Termal konfor

- Mağara içi sıcaklık ve nem değerlerinin periyodik olarak izlenmeye devam edilmesi önerilmektedir.
- Ölçüm sonuçlarının uygun sınırlar içerisinde kalmasının korunması amacıyla düzenli çevresel takip yapılmalıdır.
- Uzun süreli çalışmalarda çalışanların termal konforunu destekleyici uygun kişisel ekipman kullanımı sağlanmalıdır.
- Mevsimsel değişimlerin mağara iklimi üzerindeki etkileri düzenli olarak değerlendirilmelidir.

İletişim

- Yer altı haberleşme sistemleri kurulmalıdır.
- Telsiz ve acil durum iletişim ekipmanları bulundurulmalıdır.
- Tek başına çalışma uygulaması engellenmelidir.
- Acil durum iletişim planları hazırlanmalıdır.
- Düzenli ekip koordinasyon toplantıları yapılmalıdır.
- Kurtarma ekipleri için konum belirleme sistemleri oluşturulmalıdır.

Ağır metal birikimi

- Düzenli ağır metal analizleri yapılmalıdır.
- Su ve yüzey örnekleri laboratuvar ortamında incelenmelidir.
- Maruziyet süresi azaltılmalıdır.
- Eldiven, maske ve koruyucu kıyafet kullanımı sağlanmalıdır.
- Hijyen kuralları uygulanmalıdır.
- Uzun süreli maruziyetlerde sağlık kontrolleri yapılmalıdır

Nem

- Ortam nem düzeyi düzenli olarak takip edilmelidir.
- Havalandırma sistemleri iyileştirilmelidir.
- Elektronik cihazlar neme dayanıklı seçilmelidir.
- Küf ve mantar oluşumları kontrol edilmelidir.

- Koruyucu kıyafet kullanımı sağlanmalıdır.
- Nem kaynaklı kayganlık riskine karşı önlem alınmalıdır.
- *Aydınlatma*
- Mağara içerisinde yeterli aydınlatma sağlanmalıdır.
- Baş lambası ve yedek ışık kaynakları bulundurulmalıdır.
- Tehlikeli alanlar fosforlu işaretlerle belirtilmelidir.
- Acil durum yönlendirme levhaları kullanılmalıdır.
- Görüşü engelleyen doğal oluşumlar kontrol edilmelidir.
- Hareket güzergâhları belirlenmelidir.

Uyarı işaret ve levhaları

- Mağara içerisinde yeterli aydınlatma sağlanmalıdır.
- Baş lambası ve yedek ışık kaynakları bulundurulmalıdır.
- Tehlikeli alanlar fosforlu işaretlerle belirtilmelidir.
- Acil durum yönlendirme levhaları kullanılmalıdır.
- Görüşü engelleyen doğal oluşumlar kontrol edilmelidir.
- Hareket güzergâhları belirlenmelidir.

Hava akımı

- Riskli alanlara standartlara uygun uyarı levhaları yerleştirilmelidir.
- Acil çıkış yönlendirmeleri görünür şekilde hazırlanmalıdır.
- Ziyaretçi bilgilendirme sistemleri oluşturulmalıdır.
- İşaretlemeler düzenli olarak kontrol edilmelidir.
- Güvenlik talimatları giriş alanlarında bulundurulmalıdır

Gaz birikimi

- Hava sirkülasyonu düzenli olarak ölçülmelidir.
- Doğal havalandırma desteklenmelidir.
- Yetersiz hava akımı bulunan alanlarda çalışma sınırlandırılmalıdır.
- Oksijen ve gaz seviyeleri sürekli takip edilmelidir.
- Kapalı alan prosedürleri uygulanmalıdır.

Ses şiddeti

- Gürültü kaynakları azaltılmalıdır.

- Kulak koruyucu ekipman kullanılmalıdır.
- Gürültülü alanlarda çalışma süresi azaltılmalıdır.
- Düzenli işitme kontrolleri yapılmalıdır.
- Akustik yalıtım önlemleri uygulanmalıdır.

pH

- Su ve yüzey pH değerleri düzenli analiz edilmelidir.
- Kimyasal reaksiyon riski bulunan alanlar kontrol edilmelidir.
- Koruyucu ekipman kullanımı sağlanmalıdır.
- Temas riski bulunan bölgeler işaretlenmelidir.
- Kimyasal yanık riskine karşı ilk yardım ekipmanları bulundurulmalıdır.

Yarasa ekosistemi

- Yarasa kolonilerinin bulunduğu alanlarda insan hareketi sınırlandırılmalıdır.
- Gürültü ve yoğun ışık kullanımından kaçınılmalıdır.
- Ekosistemin korunmasına yönelik bilinçlendirme yapılmalıdır.
- Biyolojik çeşitlilik düzenli olarak gözlemlenmelidir.
- Habitat bütünlüğünü bozacak müdahaleler önlenmelidir.

Guano

- Düzenli temizlik ve hijyen uygulamaları yapılmalıdır.
- Solunum koruyucu maske kullanılmalıdır.
- Biyolojik risklere karşı gerekli uyarı işaretlemeleri yapılmalı.
- Havalandırma yetersiz alanlarda çalışma ve ya ziyaret süresi azaltılmalıdır.
- Guano ile temas sonrası dezenfeksiyon sağlanmalıdır.

Oksijen

- Oksijen seviyesi sürekli izlenmelidir.
- Kritik seviyelerde girişler durdurulmalıdır.
- Taşınabilir oksijen ekipmanları bulundurulmalıdır.
- Kapalı alan çalışma prosedürleri uygulanmalıdır.
- Acil kurtarma ekipmanları hazır tutulmalıdır.

Karbondioksit

- CO₂ sensörleri kullanılmalıdır
- Gaz yoğunluğu düzenli olarak ölçülmelidir
- Havalandırma artırılmalıdır
- Kritik seviyelerde alarm sistemi devreye girmelidir.
- Uzun süreli maruziyet önlenmelidir.

Subaskını

- Drenaj sistemleri kurulmalıdır.
- Mevsimsel yağışlar düzenli takip edilmelidir.
- Su seviyeleri izlenmelidir.
- Acil tahliye güzergâhları belirlenmelidir.
- Riskli dönemlerde mağara girişleri sınırlandırılmalıdır.
- Taşkın risk haritaları hazırlanmalıdır.

KAYNAKÇA

- 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, Kanun No. 6331, T.C. Resmî Gazete, 28339 (30 Haziran 2012).
- Ağar, A. (2021). Çalışma hayatında biyolojik risk faktörleri ve Covid-19. *Halk Sağlığı Hemşireliği Dergisi* 3 (2), 133-140
- Aksüt, G., Eren, T. ve Tüfekçi, M. (2020). Ergonomik Risk Faktörlerinin Sınıflandırılması: Bir Literatür Taraması. *Ergonomi* 3 (3), 169-192
- Aktürk, S. ve Karadağ, F. (2020). Fiziksel Risk Etmenlerinin İş Sağlığı Ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi Ve Uygulamaya İlişkin Bir Örnek. *Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt: 39-3
- Albayrak, İ. (2012). Mağara Ekosistemi. *Biyoloji Bilimleri Araştırma Dergisi* 5 (1), 61-64
- Alemdağ, S., Zeybek, H.İ., ve Külekçi, G. (2019). Stability Evaluation Of The Gümüşhane-Akçakale Cave By Numerical Analysis Method. *Journal of Mountain Science*, 16 (9), 2150-2158
- Arpacı, Ö., Zengin, B., ve Batman, O. (2012). Karamanın Mağara Turizmi Potansiyeli ve Turizm Açısından Kullanılabilirliği. *KMÜ Sosyal ve Ekonomi k Araştırmalar Dergisi*, 14 (23), 59-64
- Atasoy, A., ve Ercik, C. (2021). Gülnar (Mersin) Gezende Kanyon'un Turizm Potansiyeli. *Karadeniz Uluslararası Bilimsel Dergi* 1 (51), 151-177
- Aydoğdu, A., ve Şevik, H. (2015). Mağaralarda İç Ortam Hava Kalitesi: Ilgarini Ve Mantar Mağaraları Örneği. *I. Eurasia International Tourism Congress: Current Issues, Trends, and Indicators (EITOC-2015)*, 95-105
- Aytaç, A. S., Semenderoğlu, A., Kaylı, Ö., ve Yetmen. H. (2024). Şeyh Müslüm Mağaraları'nın (Şanlıurfa) Oluşum ve Gelişim Süreçlerinin İncelenmesi. *Akdeniz İnsani Bilimler Dergisi* 14 (2), 57-81
- Balkaner, S. Y., ve Aymanıkuy, Y. (2023). Akademisyen Gözüyle Turist Sağlığı ve Turist Güvenliği. *Gastroia: Journal of Gastronomy and Travel Research*. Vol.7, issue 1, 157-179
- Bayarri, V., Prada, A., ve García, F. (2023). A multi modal research approach to assessing the karst structural conditions of the ceiling of a cave with Palaeolithic cave art paintings: Polychrome Hall at Altamira Cave (Spain). *Sensors*, 23(22), 9153. <https://doi.org/10.3390/s23229153>

- Baykara, M. O. (2018). Ümitli Yaylası'nın (Gündoğmuş, Antalya) jeolojik ve jeomorfolojik özellikleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 24 (3), 554-560
- Bekaroğlu, C. E. (2006). *Karaca Mağarası'nın Mikroklimatolojisi*. [Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr>
- Bercea, S., Năstase-Bucur, R., Mirea, I. C., Măntoiu, D. Ş., Kenesz, M., Petculescu, A., Baricz, A., Andrei, A.-Ş., Banciu, H. L., Papp, B., Constantin, S., ve Moldovan, O. T. (2018). Novel approach to microbiological air monitoring in show caves. *Aerobiologia*, 34, 445–468. <https://doi.org/10.1007/s10453-018-9523-9>
- Bontemps, Z., Abrouk, D., Venier, S., Vergne, P., Michalet, S., Comte, G., Moënnelocoz, Y., ve Hugoni, M. (2024). Microbial diversity and secondary metabolism potential in relation to dark alterations in Paleolithic Lascaux Cave. *Npj Biofilms and Microbiomes*. doi:10.1038/s41522-024-00589-3
- Calaforra, J. M., Fernández-Cortés, A., Sánchez-Martos, F., Gisbert, J., ve Pulido-Bosch, A. (2003). Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential Show cave before tourist use. *Environmental Conservation*, 30(2), 160–167. <https://doi.org/10.1017/S0376892903000146>
- Chiarini, V., Duckeck, J., ve De Waele, J. (2022). A global perspective on sustainable Show cave tourism. *Geoheritage*, 14, Article 82. doi:10.1007/s12371-022-00717-5
- Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik. (2013). Resmî Gazete (Sayı: 28721, 28 Temmuz 2013).
- Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2013). Maden İşyerlerinde İş Sağlığı Ve Güvenliği Yönetmeliği. Resmî Gazete (Sayı: 28770).
- Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2021). Termal konfor. İş Sağlığı ve Güvenliği Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü Başkanlığı.
- Çelik, M., Altın, S., Keskin, Ş., Papila, B., ve Çallı, S. S. (2023). Güvercin deliği Mağarasının (Seydişehir, Konya) Yeraltı suyu Depolamaya Uygunluğunun İncelenmesi. *HİDRO: Ulusal Hidrojeoloji ve Su Kaynakları Sempozyumu*. 101-108
- Çevik, O., ve Aran, G. (2009). Kalite iyileştirme sürecinde hata türü etkileri analizi (Fmea)* ve piston üretiminde bir uygulama. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi* 8 (16), 241-265

- Çevre ve Orman Bakanlığı. (2010). Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik. Resmî Gazete (Sayı: 27605).
- Çiçekdağı, H. İ., ve Fidan, B. (2015). Konya'daki Obruk Potansiyelinin Turizme Kazandırılması. *I. Eurasia International Tourism Congress: Current Issues, Trends, and Indicators* (EITOC-2015), 283-297
- De Araujo, H. R., ve Lobo, H. A. S. (2023). A strategic framework for analysis and implementation of good practices for the sustainability of Show caves. *Geoheritage*, 15, Article 125. doi:10.1007/s12371-023-00894-x
- Debevec, V., ve Rakovec, J. (2021). Impact of visits on the microclimates of caves: Experimental evidence from Škocjan Caves. *Acta Carsologica*, 50(2–3). doi:10.3986/ac.v50i2-3.7397
- Doğan, F. (2024). İş sağlığı ve güvenliği açısından kimyasal risk faktörleri. *Premium-Journal of Social Sciences* (PEJOSS) 8 (39), 236-245
- Eker, Ç. S., Külekçi, G., ve Uçak, G. (2025). Akçakale mağarası oluşumlarındaki potansiyel toksik elementlerin ilk değerlendirmesi ve ekolojik riski (Gümüşhane-Kuzeydoğu Türkiye). *Environment Monitoring Assessment*, 197:1252, 197(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14663-6>
- Fernández-Cortés, A., Palacio-Pérez, E., Martín-Pozas, T., Cuezva, S., Ontañón, R., Lario, J., ve Sánchez-Moral, S. (2025). Defining the optimal ranges of tourist visits in UNESCO World Heritage caves with rock art: The case of El Castillo and Covalanas (Cantabria, Spain). *Applied Sciences*, 15(7), 3484. doi:10.3390/app15073484
- Ford, D. C., ve Williams, P. (2007). Karst Hydro Geology and Geomorphology. Chichester: *John Wiley ve Sons*
- Gillieson, D., Gunn, J., Auler, A., ve Bolger, T. (Eds.). (2022). Guide lines for cave and karst protection (2nd ed.). *International Union of Speleology and International Union for Conservation of Nature*.
- Gözcü, M. ve Zülkadiroğlu, D. M. (2014). Döngel Mağaraları'nın Doğa Koruma Çalışmaları Yönünden İncelenmesi. *II. Ulusal Akdeniz Orman Ve Çevre Sempozyumu*, 392-403
- International Electrotechnical Commission. (2016). IEC 61882:2016: Hazard and operability studies (HAZOP studies)—Application guide. IEC.
- International Electrotechnical Commission. (2018). IEC 60812:2018: Failure mode and effect analysis (FMEA and FMECA). IEC.

- International Electrotechnical Commission. (2018). IEC 60812:2018 Failure mode and effects analysis (FMEA and FMECA). IEC.
- International Organization for Standardization. (2018). ISO 31000:2018: Risk management—Guidelines. ISO.
- International Show Cave Association, International Union for Conservation of Nature, ve International Union of Speleology. (2014). Recommended international guidelines for the development and management of Show caves.
- İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği. (2012). T.C. Resmî Gazete, 28512 (29 Aralık 2012).
- Köroğlu, F. (2024). Doğu Karadeniz’in Karstik Oluşumları: Karaca (Torul, Gümüşhane) ve Çal (Düzköy, Trabzon) Mağaralarının Jeoturizm Potansiyeli. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 67, 195-230
- Külekçi, E. A., ve Sezen, I. (2018). Bir ekoturizm aktivitesi olarak mağara turizmi; Erzurum ili elmalı mağarası örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi*. 3(1), 66-75
- Külekçi, G. (2023). Damages Caused by Earthquakes to mines and Underground Spaces and Minimizing These Damages. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering* 7 (10), 199-206
- Külekçi, G., ve Uçak, G. (2025). Mağaralarda Jeoturizm Amaçlı Risk Analizi; Gümüşhane Akçakale Mağarası Örneği. *MT Bilimsel, Yeraltı Kaynakları Dergisi*, Sayı: 28, 35-45
- Lang, M., Faimon, J., Pracný, P., Štelcl, J., Kejíková, S., ve Hebelka, J. (2024). Impact of Water Exhaled Out by Visitors in Show Caves: A Case Study From the Moravian Karst (Czech Republic). *Environmental Science and Pollution Research*. doi:10.1007/s11356-024-32946-2
- Marhavilas, P. K., Filippidis, M., Koulinas, G. K., ve Koulouriotis, D. E. (2020). A HAZOP with MCDM based risk-assessment approach: Focusing on the deviations with economic/health/environmental impacts. *Sustainability*, 12(3), 993
- Miler, M., Zupančič, N., Šebela, S., ve Jarc, S. (2024). Natural and Anthropogenic Impact On the Microclimate and Particulate Matter In The UNESCO Show Cave. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 48313–48331. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34366-8>

- National Institute for Occupational Safety and Health. (2022). What workers should know about histoplasmosis (DHHS [NIOSH] Publication No. 2022-104). *Centers for Disease Control and Prevention*. doi:10.26616/NIOSH PUB2022104
- Nazik, L. (2018). Yeraltı Karanlıklar Dünyasının Gizemli Oluşumları: Mağaralar. *Mavi Gezegen Dergisi*. Sayı 24, 20-36
- Nazik, L., ve Bayarı, S. (2018). Mağara Zengini Ülke: Türkiye. *Mavi Gezegen Dergisi*. Sayı 24, 7-19
- Olgun, B., Gülek, S., ve Bulgurcu, H. (2015). Yealtı Maden Ocaklarında Havalandırma Kriterleri. *12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*. 359-369
- Palmer, A. N. (2007). *Cave geology*. Dayton, OH: Cave Books
- Pulido-Bosch, A., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodríguez-Navarro, C. M., ve Vallejos, A. (1997). Human impact in a tourist karstic cave (Aracena, Spain). *Environmental Geology*, 31, 142–149. doi:10.1007/s002540050173
- Šebela, S., Briestenský, M., ve Novak, U. (2026). Radon concentration variability and microclimate controls in two Slovene Show caves. *Environmental Earth Sciences*, 85, Article 194. <https://doi.org/10.1007/s12665-026-12931-3>
- Selçuk, O. (2023). Doğal Tarih Deneyimleri: Jeolojik Etkinlikler, Mağara Gezileri ve Arkeolojik Kazılar. *Deneyimsel Turizmde Yenilikçi Uygulamalar*, 35-50
- Siler, M. (2023). Akçatepe Mağarası'nın (Elazığ) Jeomorfolojik Özellikleri, Turizm Potansiyeli ve Planlaması. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 33, 1(83-100)
- Somlai, J., Csordás, A., Sas, Z., Kopek, A., ve Kovács, T. (2015). Radiation exposure problems of tourist cave workers originating from radon in relation to the new IAEA BSS and ICRP recommendations. *Radiation Emergency Medicine*, 4(2), 53–57. doi:10.51083/radiatemergmed.4.2_53
- Somlai, J., Hakl, J., Kávási, N., Szeiler, G., Szabó, P., ve Kovács, T. (2011). Annual average radon concentration in the Show caves of Hungary. *Journal of Radio analytical and Nuclear Chemistry*, 287, 427–433. doi:10.1007/s10967-010-0841-9.
- Spelce, D., ve McKay, R. T. (2016). Respiratory protection for oxygen deficient atmospheres. *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, 33(2), 1–21.
- Stella-Watts, A. C., Holstege, C. P., Lee, J. K., ve Charlton, N. P. (2012). The epidemiology of caving injuries in the United States. *Wilderness ve Environmental Medicine*, 23(3), 215–222. doi:10.1016/j.wem.2012.03.004

- Taşdemir, D. A. ve Paksoy, S. (2021). İş Sağlığı Ve Güvenliği Perspektifinden Psikososyal Risk Etmenleri. *Adıyaman Uluslararası İnsan Ve Toplum Bilimleri Kongresi*, 45-51
- Timur, U.P., Orhan M., ve Aksüt, A. (2014). Çankırı Kaya Tuzu Mağarasının ve Yakın Çevresinin Turizm ve Rekreasyonel Amaçlı Kullanımın İrdelenmesi. *Ormancılık Dergisi*, 10(1), 97-113
- Türk Standartları Enstitüsü. (2005). TS 266: İnsani tüketim amaçlı sular. Türk Standartları Enstitüsü.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2006). TS EN ISO 7730: Ergonomi—Termal çevrenin analitik olarak belirlenmesi ve yorumlanması.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2006). TS EN ISO 7730: Isıl çevrenin ergonomisi—PMV ve PPD indislerinin hesabı ve bölgesel ısı konfor kriterlerini kullanarak ısı konforun analitik olarak belirlenmesi ve yorumu.
- Yozcu, S. (2020). Türkiye Mağara Turizmine Yönelik Bir Değerlendirme. *Türk Turizm Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 1495-1508
- Zhao, W., Li, Q., Wang, Y., Huang, X., Du, Y., ve Du, L. (2025). Acoustics of Karst Tourist Caves: A Case Study in Guizhou Province, China. *Scientific Reports*, 15:42067. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-26251-2>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Gül UÇAK

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Gümüşhane Üniversitesi , Sağlık Yüksek Okulu, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü

Yüksek Lisans Öğrenimi : Gümüşhane Üniversitesi , Lisansüstü Eğitim Enstitüsü , İş Sağlığı ve Güvenliği Ana Bilim Dalı

Bildiği Yabancı Diller :İngilizce

Bilimsel Faaliyetler ve Yayınlar : Külekçi, G., ve Uçak, G.(2025). Mağaralarda Jeoturizm Amaçlı Risk Analizi; Gümüşhane Akçakale Mağarası Örneği. MT Bilimsel, Yeraltı Kaynakları Dergisi, Sayı: 28, 35-45
Eker, Ç. S., Külekçi, G., ve Uçak, G. (2025). Akçakale mağarası oluşumlarındaki potansiyel toksik elementlerin ilk değerlendirmesi ve ekolojik riski (Gümüşhane-Kuzeydoğu Türkiye). Environmental Monitoring Assessment, 197:1252, 197(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14663-6>
Külekçi, G., ve Uçak G. (2024). Yığın Liç Sürecinde Çevresel ve İş Sağlığı ve Güvenliği Hususları: Madencilik Endüstrisinde Risklerin ve Yönetimin Eleştirel Bir Analizi. Göbeklitepe Sağlık Bilimleri Dergisi, 7(18), 41-59.
Külekçi, G., ve Uçak G. (2024). Madencilik İşlemlerinde Siyanür Kullanımı ve Oluşabilecek İş Güvenliği Sorunları. 2nd

International Conference On Scientific and Innovative Studies, 824-827.

Külekçi, G., ve Uçak G. (2024). Depo Yangınlarının İş Güvenliği ve İşçi Sağlığı Üzerindeki Etkileri Tütün Mamulleri Depoları Üzerinde Bir İnceleme. 1. Bilsel International Harput Scientific Researches Congress, 404-411.

Tarih

:24.06.2026