

Mağaralarda Jeoturizm Amaçlı Risk Analizi; Gümüşhane Akçakale Mağarası Örneği

Risk Analysis for Geotourism in Caves: The Example of Gümüşhane Akçakale Cave

Gökhan KÜLEKÇİ^{1*}, Gül UÇAK²

¹Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., Maden Müh. Bölümü

²Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi İş Sağlığı ve Güvenliği ABD

*Sorumlu Yazar: gokhankulekci@gmail.com, Gümüşhane, Türkiye, 0000-0002-2971-4045

Özet

Bu çalışma, Gümüşhane il sınırlarında yer alan ve Berdiga Formasyonu içerisinde gelişmiş karstik bir yapı gösteren Akçakale Mağarası'nın jeoteknik açıdan risk değerlendirmesini konu almaktadır. Toplam uzunluğu 445 metre olan mağara, tavan kalınlığının bazı bölgelerde 35-40 metreye kadar düşmesi nedeniyle yerel çökme riski barındırmaktadır. Bu bağlamda mağara yedi bölgeye ayrılarak ayrıntılı gözlemsel ve ölçümsel analizler yapılmış; sıcaklık, nem, CO₂, O₂ gibi mikroklimatik parametreler izlenmiş ve kaya blok stabilitesi üzerine deformasyon verileri toplanmıştır. Yedi bölgeden biri için ayrıntılı 5×5 risk matrisi metodolojisi uygulanmış; etki ve olasılık düzeyleri esas alınarak bölgesel tehlike düzeyleri sınıflandırılmıştır. Risk matrisinde “yüksek olasılık, yüksek etki” grubunda yer alan tavan çökmesi, karbon dioksit birikimi ve zemin kayganlığı gibi tehlikeler ön plana çıkmıştır. Diğer bölgelerde risk düzeylerinin daha düşük olduğu gözlenmiş, buna karşın sürekli izleme ve tahkimat gerekliliklerinin bazı alanlarda sürdüğü belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, karstik mağara sistemlerinin turizme açılmadan önce lokal bazda detaylı risk analizine tabi tutulmasının önemine işaret etmektedir. Bu çalışma, yer altı boşluklarında bölgesel heterojenliğin risk yönetimi stratejilerine etkisini ortaya koymakta ve çok ölçekli bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Karstik yapı, mağara jeolojisi, risk matrisi, tavan stabilitesi, mikroklima, yeraltı çökme riski

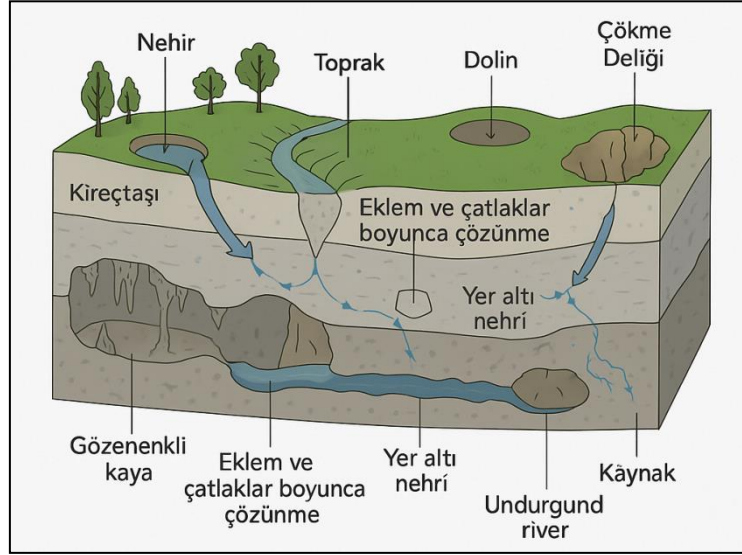
Abstract:

This study focuses on the geotechnical risk assessment of Akçakale Cave, a karstic structure developed within the Berdiga Formation and located within the borders of Gümüşhane Province. The cave has a total length of 445 meters and poses a potential for local collapse due to roof thicknesses decreasing to as little as 35–40 meters in certain sections. The cave was divided into seven distinct zones in this context, and detailed observational and instrumental analyses were conducted. Microclimatic parameters such as temperature, humidity, CO₂, and O₂ were monitored, and deformation data related to rock block stability were collected. A detailed 5×5 risk matrix methodology was applied to one of these seven zones, in which regional hazard levels were classified based on the combination of impact and probability scores. Hazards such as roof collapse, carbon dioxide accumulation, and ground slipperiness emerged as critical threats falling within the "high probability–high impact" category. Although the remaining zones displayed lower risk levels, the necessity for continuous monitoring and localized reinforcement was still observed in certain areas. The findings underscore the importance of conducting localized, in-depth risk analyses before opening karstic cave systems to tourism. This study demonstrates how regional heterogeneity within subterranean voids affects risk management strategies and presents a multi-scalar assessment approach.

Keywords: Karstic formation, cave geology, risk matrix, ceiling stability, microclimate, underground collapse hazard

1.Giriş

Karstik mağaralar, çözünebilen kayaçların (özellikle kireçtaşı ve dolomit) çözünmesiyle oluşan doğal yeraltı boşluklarıdır ve bu yapılar hem jeolojik hem de jeoteknik açıdan yüksek öneme sahiptir (Waltham ve diğ., 2005). (Şekil 1). Bu boşlukların gelişimi sırasında meydana gelen çökmeler, tavan instabiliteleri ve gaz birikimleri, doğal afet niteliği taşıyabilecek riskleri beraberinde getirmektedir. Karstik sistemlerin mühendislik uygulamalarında (örneğin yeraltı depolama, madencilik, turizm yapıları) kullanımı giderek artarken, bu yapıların stabilitesine yönelik risk analizlerinin önemi de aynı oranda artmaktadır (Zhang ve diğ., 2015; Castellanzave diğ., 2018).



Şekil 1. Karstik süreçlerin genel tanımı

Mağara tavan çökmesi, karstik sistemlerde en sık gözlemlenen jeoteknik risklerden biridir. Bu tür çökmeler; boşluk boyutu, tavan kalınlığı, kayaç türü, su ve gaz etkileri gibi birçok faktöre bağlı olarak gelişmektedir (Lollino ve diğ., 2019). Özellikle tavan yüksekliğinin düzensiz olduğu ve siltli zonların bulunduğu alanlarda çökme riski artmaktadır (Jiang ve diğ., 2024). Ayrıca mağara içi mikroklima koşulları da stabilite üzerinde etkili olmaktadır; yüksek CO₂ birikimi veya düşük oksijen oranı, hem yapı güvenliğini hem de ziyaretçi sağlığını tehdit edebilmektedir (Bayarri ve diğ., 2023).

Bu nedenle, karstik mağaraların turizm veya diğer amaçlarla kullanılmasından önce detaylı bir risk değerlendirmesi yapılması gerekmektedir. Karstik mağaralarda yürütülen risk analizleri yalnızca jeoteknik ve çevresel unsurlarla sınırlı kalmamalı, aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliği (İSG) çerçevesinde de değerlendirilmelidir. Yeraltı ortamlarında sıklıkla karşılaşılan düşük oksijen seviyesi, gaz birikimi, düşen bloklar ve zemin kaymaları gibi durumlar, yalnızca yapısal değil aynı zamanda yaşam güvenliğini doğrudan etkileyen parametrelerdir. Nitekim Külekçi, (2023), tarafından vurgulanan tarihsel İSG evrimi ve madencilik uygulamalarındaki risk yönetimi pratiği, yeraltı mekânlarının sistematik değerlendirilmesinin zorunluluğunu ortaya koymaktadır. Yeraltı işletmelerinde siyanür gibi toksik maddelerin yönetimi (Külekçi ve Uçak, 2024) ve üretim sürecinde yaşanan kaza örnekleri (Külekçi ve Şahin, 2024), kapalı hacimli doğal alanların yapay veya doğal tehlikelere karşı nasıl hassas olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Gümüşhane ilindeki çevresel altyapı yönetimi (Külekçi ve Güvendi, 2023) ve inşaat şantiyelerinde uygulanan risk analiz metodolojileri (Meral ve Külekçi, 2024), bu tür yapıların çok boyutlu değerlendirilmesinin önemini desteklemektedir. Son olarak, maden kazalarının hem Türkiye’de hem de uluslararası düzeyde İSG bağlamında analizine ilişkin yapılan

karşılaştırmalı çalışmalar (Külekçi, 2023), bu tür mağara sistemlerinin yönetiminde yalnızca jeolojik değil, insan faktörünü merkeze alan yaklaşımların da gerekli olduğunu göstermektedir.

Literatürde bu amaçla kullanılan yöntemler arasında sayısal modelleme (FEM/DEM), deformasyon izleme sistemleri, HAZOP/FMEA gibi sistematik analiz teknikleri ve özellikle 5×5 risk matrisi gibi karar destek araçları öne çıkmaktadır (Parise ve Ravbar, 2015; Castellanza ve diğ., 2018). Risk matrisleri, olasılık ve etki düzeylerinin kesişimini esas alarak bölgesel tehlike seviyelerinin sınıflandırılmasını sağlar ve mağara sistemlerinin yönetiminde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır (Yassin ve diğ., 2022).

Türkiye’de karstik alanların yaygınlığına karşın, mağara stabilitesine yönelik sistematik ve bölgesel risk analizlerine dayalı akademik çalışmaların sayısı sınırlıdır. Mevcut çalışmalar genellikle tanımlayıcı veya jeomorfolojik düzeyde kalmakta; yapısal riskleri bölgesel bazda ele alan bütüncül yaklaşımlar eksik kalmaktadır (Currens, 2012) (Çizelge 1).

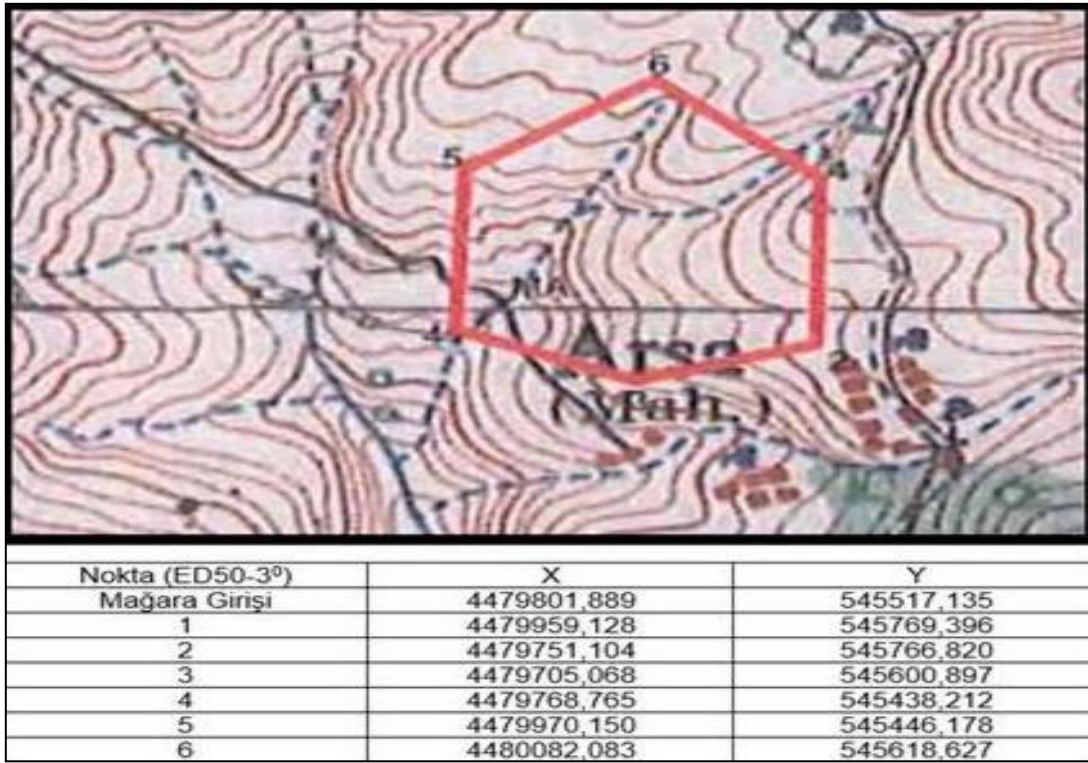
Çizelge 1. Literatürde kullanılan başlıca risk analiz yöntemleri ve karşılaştırmaları

Yöntem Adı	Uygulama Alanı	Avantajları	Sınırlamaları	Örnek Kullanımlar
5×5 Risk Matrisi	Yeraltı yapıları, jeoteknik risk	Basit, görsel ve karar destek sistemleriyle uyumlu	Subjektiflik, sayısal olmayan veriyle sınırlı	Altamira Mağarası (Bayarive diğ., 2023)
FMEA	Endüstriyel sistemler, mühendislik	Potansiyel hata türlerini önceden tanımlar	Karmaşık sistemlerde kapsam eksikliği	Hidrojeolojik kazılar (Parise&Ravbar, 2015)
HAZOP	Kimya, çevre ve riskli alanlar	Sistematik ve ekip tabanlı yaklaşım	Çok zaman alıcı, eğitilmiş ekip ihtiyacı	Yeraltı gaz alanları (Currens, 2012)
FEM Analizi	Tüneller, mağaralar, barajlar	Yapısal deformasyonun sayısal olarak modellenmesi	Karmaşık, yüksek veri ihtiyacı	Longyou Mağaraları (Zhang ve diğ., 2015)
CBS Tabanlı Risk Haritalama	Karstik alanlar, şehir planlama	Bölgesel ölçekte görselleştirme ve planlama	Veri kalitesi ve çözünürlüğe bağımlı	Kinta Vadisi, Malezya (Yassin ve diğ., 2022)

Bu çalışmada, Gümüşhane ili sınırlarında yer alan Akçakale Mağarası üzerinde detaylı bir ön değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Mağara, maksimum oda uzunluğu 150 metre olmak üzere toplam 445 m uzunluğa ve 10–40 m aralığında değişen tavan yüksekliğine sahip olup, yapısal olarak Berdiga Formasyonu’na ait karbonatlı kayalar içerisinde gelişmiştir. Çalışma kapsamında mağara yedi ayrı bölgeye ayrılmış; her biri için deformasyon ölçümleri, mikroklima parametreleri (CO₂, O₂, sıcaklık, nem), tavan kalınlığı ve zemin yapısı analiz edilmiştir. Bu yedi bölgeden biri için detaylı 5×5 Matris temelli risk değerlendirmesi uygulanarak bölgesel risk seviyeleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, karstik yapıların bölgesel heterojenliğinin stabilite üzerine etkisini ortaya koymakta ve yer altı sistemleri için sürdürülebilir yönetim yaklaşımlarına katkı sunmaktadır.

2. Çalışma Alanı

Akçakale Mağarası, Türkiye’nin Doğu Karadeniz bölgesinde, Gümüşhane ilinin Torul ilçesi sınırları içerisinde yer almaktadır. Yaklaşık olarak 39° 28' K enlemi ve 39° 25' D boylamında konumlanan mağara, Karadeniz Dağları’nın güney eteklerinde, yüksek eğimli topoğrafya ile karakterize edilmiş bir vadinin kuzey yamacında konumlanmaktadır (Şekil 2). Deniz seviyesinden ortalama 1400 metre yükseklikte yer alan mağaranın erişimi mevsimsel olarak değişiklik göstermekte, özellikle kış aylarında kar örtüsü ve erozyon kaynaklı yamaç dengesizlikleri bölgeye ulaşımı zorlaştırmaktadır.



Şekil 2. Akçakale Mağarası'nın bölgesel konumunu gösteren harita (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, t.y., 2021)

Akçakale Mağarası, Berdiga Formasyonu olarak tanımlanan Üst Kretase yaşlı birimlerin içerisinde gelişmiş karstik boşluk sistemlerinden biridir. Bu formasyon, iyi tabakalanmış, orta kristalli, gri renkli kireçtaşlarından oluşmakta olup, yer yer dolomitleşme izleri ve mikritik mercerler içermektedir. Kalker kütlesi içerisinde gelişmiş olan mağara, karstik aşındırma ve çözünme süreçlerinin etkisiyle oluşmuş fosil bir mağara sistemidir. Litolojik olarak kompakt yapıya sahip olan bu kireçtaşlarının yer yer çatlak zonları barındırdığı gözlenmiştir. Stratigrafik olarak mağara alanında, Berdiga formasyonunun altına doğru ilerledikçe paleojen volkanik ve volkanosedimanter birimlere geçişler izlenmektedir (Şekil 3).

Yapısal açıdan bölge, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun güneyinde yer almakta olup, aktif tektonik rejimin etkisi altındadır. Mağaranın gelişim gösterdiği litolojik blok, doğu-batı doğrultulu genç normal faylarla sınırlandırılmıştır. Bu yapısal unsurlar, hem mağaranın gelişim yönünü hem de tavan çökmesi gibi jeoteknik riskleri doğrudan etkilemektedir. Çalışma alanında gözlenen çatlak sistemleri genellikle KD-GB ve KB-GD doğrultuludur ve bunlar mağara içi çökeltilerin konumunu da belirlemektedir. Bölgesel jeodinamik yapı, hem derinlikten gelen tektonik gerilmeler hem de yüzeysel eğim etkileriyle birlikte ikincil çatlak ağlarının oluşumunu desteklemektedir.

Üs Sistem	Sistem	Seri	Formasyon	Simge	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
Senozoyik	Paleojen	Eosen	Kabaköy	Tek		Tabanda konglomeratik seviyelerle başlayıp, ince nummulitik kireçtaşı seviyesi ile bazaltik-andezitik volkanizma ve volkano tortul istif
Mesozoyik	Kretase	Albiyen-Apsiyen	Mescitli	Km		Tabanda sarı renkli kumtaşı, mikritik kireçtaşı, türbiditik, kıltaşı, kumtaşı ardalanması
		Malm-Albiyen	Berdiga	Jkb		Neritik, taban seviyeleri dolomitik kireçtaşları
	Jura	Liyas	Hamurkesen	Jh		Bazaltik-andezitik volkanizma ve volkano tortul istif, yer yer ammonitico rosso seviyesi
		Gümüşhane Granaletli	Pulur	Dpm		Devoniyen? yaşlı ganys, amfibolit orta ve yüksek dereceli metamorfikler ve bunları kesen Gümüşhane granitoyidi: Alkali feldispat graniti
Paleozoyik	Devoniyen-Karbonifer					

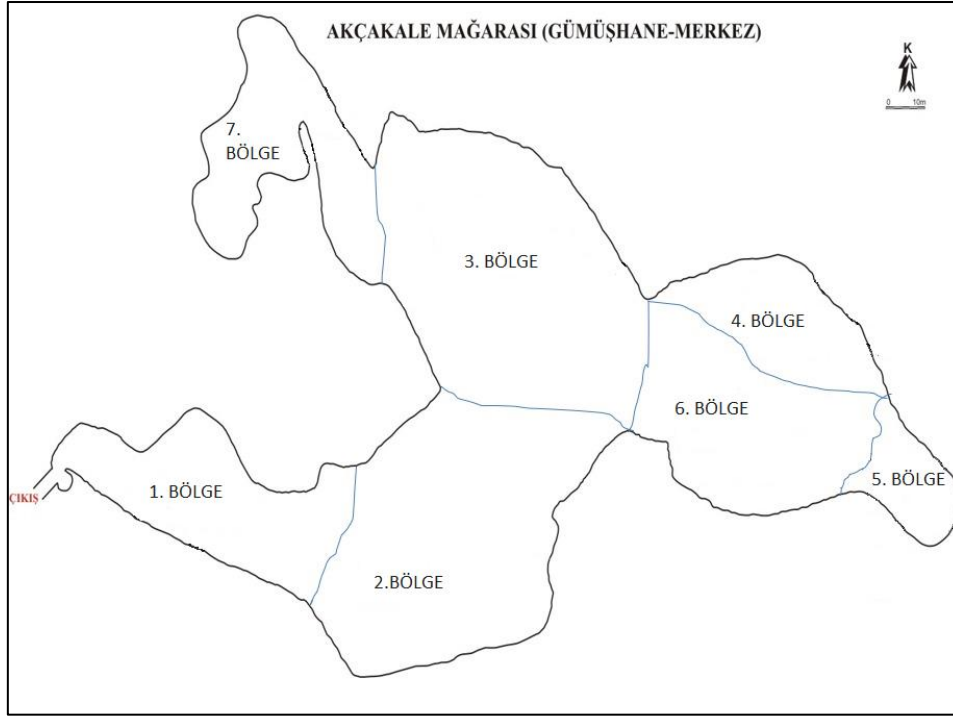
Şekil 3. Mağara yöresindeki gözlenen Berdiga Formasyonunun genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (MTA., 2012)

Morfolojik açıdan mağara, toplamda yaklaşık 455 metre uzunluğa ve maksimum 50 metre tavan yüksekliğine ulaşan, çok bölmeli ve geniş hacimli bir yapı sergilemektedir. Giriş bölgesinden itibaren yer yer daralan galeriler, yüksek tavanlı salonlar ve karstik çökeltilerin yoğunlaştığı alanlar gözlenmektedir. Sarkıt, dikit, sütun ve mağara mercanı gibi ikincil karstik oluşumlar mağaranın hem estetik hem de bilimsel değerini artırmaktadır. Zemin büyük oranda nemli ve yer yer su birikintileri ile örtülüdür; mağara içerisindeki nem oranı %95'in üzerinde seyretmekte olup, sıcaklık ortalama 13–17 °C aralığındadır.

3. Veri Toplama ve Yöntem

3.1. Mağaranın Bölgelere Ayrılması

Çalışmanın temel dayanağını, Akçakale Mağarası'nın yapısal, morfolojik ve jeoteknik karakteristiklerine göre yedi ayrı bölgeye ayrılması oluşturmaktadır. Bu zonlama işlemi; tavan kalınlığı, açıklık mesafesi, gözlemlenen çatlak yoğunluğu, zemin eğimi ve mikroklimatik farklılıklar gibi çok boyutlu kriterler esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Her bir bölge; farklı jeolojik risk profili taşıması, gözlem kolaylığı ve ölçüm sürekliliği gözetilerek bağımsız bir analiz birimi olarak tasarlanmıştır. Ayrıca bölgelendirme sırasında mağaranın doğal hava akımı bölmeleri ve CO₂ konsantrasyonundaki değişimler de dikkate alınmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Mağaranın bölümlendirilmiş haritası

3.2. Mikroklimatik Gözlem Yöntemleri

Mağara ortamlarının fiziko-kimyasal kararlılığı, iç iklim parametrelerinin sürekliliğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada dört temel mikroklimatik parametre izlenmiştir: sıcaklık, bağıl nem, CO₂ ve O₂ oranları. Ölçümler, mağaranın farklı bölgelerinden, Dräger X-am 5000 gaz ölçüm, Extech EN300 5 parametre (hava hızı, ışık şiddeti, ses seviyesi, sıcaklık ve nem) çevre ölçüm ve Clock/Humidity HTC-1 sıcaklık ve nem ölçer makineleri kullanarak alınmıştır (Şekil 5)



Şekil 5. Mikroklimatik parametreleri izlemede kullanılan ölçüm aletleri

Sensörler, EN 50545-1 standardına uygun olarak çalıştırılmış ve kayıtlar 5 dakikalık aralıklarla toplanarak günlük ortalamalar hesaplanmıştır. Özellikle CO₂ birikiminin yoğun olduğu noktalarda ölçüm sürekliliği sağlanarak olası sağlık ve tavan stabilite tehditleri belirlenmiştir.

3.3. Risk Analiz Yöntemi: 5×5 Risk Matrisi

Mağara genelinde yapılan gözlemsel analizlerin ardından, 5 numaralı bölge için detaylı bir risk değerlendirmesi uygulanmıştır. Bu değerlendirme, literatürde yaygın olarak kabul gören ve özellikle çevresel ve jeoteknik mühendislik uygulamalarında kullanılan 5×5 risk matrisi yöntemine dayanmaktadır (Bayarri ve diğ., 2023; Zhang ve diğ., 2015).

Bu yöntemde, belirlenen her bir risk faktörü iki boyutta derecelendirilmiştir:

- Olasılık (P): Riskin gerçekleşme ihtimali (1 = Çok Düşük, 5 = Çok Yüksek)
- Etki (E): Riskin etkisinin ciddiyeti (1 = İhmal Edilebilir, 5 = Felaket düzeyinde)

Her bir tehlike, bu iki parametrenin çarpımıyla risk puanı ($R = P \times E$) olarak hesaplanmıştır. Elde edilen puanlara göre aşağıdaki renk kodlarıyla bölgesel risk seviyeleri belirlenmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Risk puan renk skalası

Risk Puanı (R)	Seviye	Renk Kodu
1–4	Düşük	Yeşil
5–9	Orta	Sarı
10–14	Yüksek	Turuncu
15–25	Çok Yüksek	Kırmızı

4. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde, Akçakale Mağarası'nın 2. bölgesi için uygulanan 5×5 risk matrisi temelli analiz sonuçları sunulmakta ve elde edilen bulgular, mağara içi fiziksel koşullar, gözlemsel veriler ve literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Risk değerlendirmesinde her bir tehlike, gerçekleşme olasılığı ve etkisinin çarpımıyla hesaplanan risk puanına göre sınıflandırılmış; sonuçlar renk kodlu bir matris sisteminde görsel olarak sunulmuştur. Analiz sonucunda tavan çökmesi, CO₂ yoğunluğu ve zemin kayganlığı, kırmızı risk kategorisinde değerlendirilmiştir (Tablo 3).

Bu yöntemsel yaklaşım hem alan gözlemlerinin hem de ölçümsel verilerin bütünleştirilmesine olanak tanımış; mağara içerisindeki bölgesel risk heterojenliğinin anlaşılmasına katkı sağlamıştır. Risk matrisine dayalı analiz yalnızca tek bir bölgeye uygulanmış olsa da, diğer alt bölgelerde elde edilen veriler bu değerlendirmeyi destekleyici niteliktedir.

Tablo 3. Akçakale mağarası 2. Bölge 5x5 matris yöntemi ile risk analizi

No	Tehlike	Risk	Sonuç	Tehlikeye maruz kalan kişi	O*	Ş**	R***	Önlem
1	Zemin yapısı	Zeminin ıslak olması	Kayma, düşme, yaralanma	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	3	4	12	Kauçuk tabanlı ayakkabı kullanılmalı
2	Tavan ve duvar yapısı	Çökme, kaya düşmesi	Yaralanma, ölüm	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	3	5	15	Tavana ve duvarlara koruma çiti veya örtülü örgü sistemleri kurulmalı
3	Hava akımı	Hava sirkülasyonu olmaması	Bunalım, cilt kuruluğu, bayılma	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	3	4	12	Alana uygun havalandırma sistemleri kurulması, mümkünse doğal havalandırma pencereleri açılmalı
4	Uyarı işaret ve levhası	Tehlikelerden haberdar olamama	Yer yön bulamama ve tehlikelere hazırlıksız yakalanma	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	3	4	12	Olası riskleri haber vermek için riske uygun uyarı levhası koyulmalı

Tablo 3'ün devamı

5	Aydınlatma	Çevredeki tehlikeleri görememe	Çarpma, kayma, düşme, sakatlanma	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	4	5	20	Sabit aydınlatma sistemleri yerleştirilmeli
6	Sıcaklık	Hipotermi ve hipertermi	Sıcak veya soğuk yanıkları, bunalım, bayılma, soğuktan uzuv kaybı vb.	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	2	2	4	Alandaki hava ısısı her mevsim canlı yaşamına uygun olduğu için önleme gerek yoktur
7	Su varlığı	Gölet oluşumu	Boğulma, düşme	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	3	3	9	Suya temas etmeyecek şekilde yürüyüş yolları yapılması, uyarı levhası konulması
8	Su varlığı	Tehlikeli mikroorgan izmalar	Mikroorganizmalardan kaynaklı çeşitli hastalıklar	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	3	4	12	Tehlikenin türüne bağlı olarak uygun kişisel koruyucular kullanılmalı
9	Nem	Yetersiz hava sirkülasyonu	Solunum yolu hastalıkları, koku yap bozulması, elektronik cihazlarda bozulma	Ziyaretçiler, çalışanlar, araştırmacılar ve elektronik aletler	5	5	25	Sürekli nem sensörleri, tahliye sistemleri, havalandırma sistemleri
10	Gaz birikimi (CH ₄ , H ₂ S, CO)	Gaz sıkışması, patlama	Zehirlenme, yaralanma, ölüm	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	2	4	8	Sürekli izleme cihazları, acil tahliye planı
12	Yarasa	Yarasa kaynaklı bulaşlar	Ölümcul hastalıklar	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	5	4	20	Mağaraya giriş öncesi eğitim, el feneri vb. ışıkla yeterli aydınlatma sağlanmalı ve uyarı levhaları konulmalı
13	Yarasa	Yarasa ile karşılaşma	Panik, çarpma, korku, yaralanma	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	3	5	15	Yeterli aydınlatma sağlanmalı, uyarı levhası konulmalı
14	Yarasa dışkısı	Dışkı kaynaklı bulaşlar	Solunum yolu enfeksiyonu, histoplazmoz, kötü koku	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	3	4	12	Maske, eldiven, filtreli maske gibi KKD kullanılmalı, dışkı ortamdaki uzaklaştırılmalı, havalandırma sistemleri kurulmalı.
15	Yarasa	Ekosistem bozulması	Yarasa neslini tehlikeye atma durumu	Yarasa popülasyonu	4	2	8	Belli dönemlerde sınırlı giriş çıkış yapılmalı ekolojik dengenin korunabilmesi için çünkü yarasalar korunması gereken türlerdir.
16	Radyasyon	Radon gazı birikimi	Uzun süreli maruziyette kanser riski	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	3	3	9	Radyasyon varlığı tespit edilirse giriş çıkışlarda süre sınırlaması getirilmeli ve kişiye uygun KKD kullanımı zorunlu hale getirilmeli.
17	Kriz yönetimi	Acil eylem planı olmaması	Panik, korku, yer yön kaybı, yaralanma	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	5	4	20	Senaryo bazlı eğitimler verilmeli ve mağara içi kaçış planları oluşturulmalı
18	Ağır metal	Ağır metal birikme riski	Zehirlenme, uzun vadede kanser riski	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	4	5	20	Toksik alanların sınırlandırılması, KKD kullanılmalı, gerekli işaretlemeler yapılmalı.
19	İletişim	Mobil sinyal ve CBS bağlantısı problemleri	Herhangi bir tehlike durumunda iletişim problemleri	Ziyaretçiler, çalışanlar ve araştırmacılar	3	4	12	Mağara içi radyo tabanlı iletişim alt yapısı kurulmalı

O^{*}: Olasılık değeri, Ş^{**}: Şiddet değeri, R^{***}: Risk değeri

4.1. Yüksek Riskli Unsurlar

Yapılan değerlendirme sonucunda, 2. bölge özelinde en yüksek risk puanlarına sahip unsurlar arasında tavan çökmesi riski, gaz birikimi (CO₂, O₂ dengesizliği), aydınlatma yetersizliği, zemin kayganlığı ve yarasa dışkısına bağlı biyolojik bulaş yer almaktadır. Bu risk faktörlerinin her biri, "yüksek olasılık" (4 veya 5) ve "yüksek etki" (4 veya 5) kategorilerinde puanlandığından dolayı kırmızı alan içerisinde tanımlanmıştır.

Özellikle tavan çökmesi riski ($P=3$, $E=5$, $R=15$), bölgedeki tavan kalınlığı ve gözlenen çatlak yoğunluğu dikkate alındığında yapısal güvenlik açısından kritik öneme sahiptir. Benzer şekilde, mağara içi hava sirkülasyonunun yetersizliği ve yüksek bağıl nem değerleri, CO_2 'nin yer yer birikmesine neden olmakta, bu da ziyaretçi sağlığı açısından akut tehlike oluşturmaktadır ($P=5$, $E=5$, $R=25$).

Aydınlatma eksikliği ($R=20$) ve yönlendirme levhalarının yetersizliği ($R=12$), acil durum tahliyesi ve ziyaretçi güvenliği bağlamında öne çıkan lojistik riskler olarak tanımlanmıştır. Bu bulgular, yalnızca yapısal değil, aynı zamanda işletme güvenliğiyle ilişkili önlemlerin gerekliliğini vurgulamaktadır.

4.2. Orta ve Düşük Riskli Unsurlar

Tablo 3 verilerine göre bazı risk unsurları orta seviye (turuncu/sarı bölge) olarak tanımlanmıştır. Bunlar arasında tur güzergahının darlığı, tavan yüksekliğinin düşüklüğü, zemin bozukluğu ve nemden kaynaklı yosun/küf oluşumu gibi çevresel riskler yer almaktadır. Bu risklerin çoğu, ziyaretçi trafiği ve kullanım yoğunluğu ile doğrudan ilişkilidir ve yapısal tahkimat gerektirmeden, düzenleme ve izleme yoluyla kontrol altına alınabilir niteliktedir.

Buna karşılık, düşük riskli faktörler olarak değerlendirilen unsurlar (örneğin yarasa popülasyonu artışı, küçük taş düşmeleri, duvar çatlakları) mağaranın genel doğal döngüsü içerisinde olağan kabul edilen ancak izlenmesi gereken bileşenlerdir. Bu durum, risk matrisinin karar destek mekanizması olarak işlevselliğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen sonuçlar, Bayarri ve diğ. (2023) tarafından Altamira Mağarası'nda uygulanan tavan stabilite analizi ile paralellik göstermektedir. Özellikle gaz birikimi ve biyolojik kontaminasyon unsurlarının yapısal güvenlik kadar sağlık riskleri açısından da önem taşıdığı vurgulanmıştır. Benzer biçimde, Zhang ve diğ. (2015) tarafından Longyou Mağaraları'nda önerilen zon bazlı risk analizi yaklaşımı, bu çalışmada yalnızca 2. bölgeye uygulanarak dar kapsamlı ama derinlemesine bir değerlendirme modeli sunmuştur.

Ayrıca, Parise ve Ravbar (2015) tarafından önerilen çok disiplinli mağara yönetimi modeliyle uyumlu biçimde, bu çalışmada yalnızca yapısal değil, aynı zamanda mikroklima ve biyolojik koşullar da risk değerlendirme sistemine entegre edilmiştir.

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, Gümüşhane ilinde yer alan Akçakale Mağarası'nın 2. bölgesine odaklanarak gerçekleştirilen 5×5 risk matrisine dayalı analiz aracılığıyla, karstik mağara ortamlarında bölgesel risk değişkenliğinin ortaya konulmasını amaçlamıştır. Yapılan değerlendirme, mağara içi farklılıkların yalnızca jeolojik değil; mikroklimatik, biyolojik ve jeolojik koşullardan kaynaklı olarak da belirgin biçimde değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular, 2. bölgenin çeşitli yönleriyle yüksek risk taşıdığını açıkça göstermektedir. Özellikle tavan çökme olasılığı, CO_2 yoğunluğu, aydınlatma yetersizliği ve biyolojik kontaminasyon gibi unsurlar, yapısal güvenliğin yanında ziyaretçi sağlığı açısından da ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu risk unsurlarının tamamı, kırmızı seviyede değerlendirilerek müdahale gerekliliği açısından önceliklendirilmiştir.

Analiz, karstik mağaralarda tekil ve yüzeysel gözlemler yerine, zon bazlı sistematik değerlendirme yaklaşımının gerekliliğini vurgulamaktadır. Mağara boyunca gözlemlenen risk seviyelerindeki dalgalanmalar, homojen güvenlik önlemlerinin yetersiz kalacağını ve yerel koşullara duyarlı, esnek müdahale planlarının geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çerçevede aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

Tavan stabilitesi riskinin yüksek olduğu alanlara lokal tahkimat uygulamaları (çelik ağlar, kaya civatası, ankraj, bariyer sistemleri) entegre edilmelidir.

Gaz birikimi ve mikroklima değişimlerinin sürekli izlenebilmesi için sabit sensör istasyonları kurulmalı; CO₂ ve nem düzeyine göre ziyaretçi trafiği dinamik olarak yönetilmelidir.

Aydınlatma altyapısı iyileştirilmeli, yön levhaları ve acil durum yönlendirme işaretleri bölgesel risk seviyelerine göre yeniden tasarlanmalıdır.

Biyolojik riskler (yarasa dışkıları kaynaklı bulaşlar gibi) için hijyen protokolleri ve periyodik dezenfeksiyon programları uygulanmalı; ziyaretçilere ön bilgi sunulmalıdır.

Sonuç olarak, bu çalışma yalnızca mevcut risklerin sınıflandırılmasına değil, aynı zamanda karstik mağara sistemleri için sürdürülebilir kullanım ve korunabilirlik ilkeleri doğrultusunda karar destek mekanizmalarının geliştirilmesine katkı sunmaktadır. Uygulanan risk matris modeli, ileride farklı zonlara da genişletilerek mağara bütününde kapsamlı bir yönetim planının temelini oluşturabilir.

Kaynaklar

Bayarri, V., Prada, A., García, F., 2023. An integrated 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>

Bayarri, V., Prada, A., García, F., 2023. Karst ceiling structural assessment with LIDAR and gas sensors: Altamira Cave case. *Sensors*, 23(22). MDPI.

Castellanza, R., Lollino, P., Ciantia, M., 2018. A methodological approach to assess the hazard of underground cavities. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, 31–45.

Currens, J.C., 2012. Guidance for construction on karst terrain and the reduction of property damage and threat to human health resulting from karst geologic hazard. Kentucky Geological Survey, University of Kentucky.

Külekçi, G., 2023. Dünyada ve Türkiye'deki maden kazalarının iş sağlığı ve güvenliği açısından incelenmesi. *Ejons International Journal*, 7(4), 623–633.

Külekçi, G., 2023. İş sağlığı ve güvenliğinin evrimi: Dünya ülkelerinde tarihsel süreç ve madencilikte uygulama yöntemleri. *Icontech International Journal*, 7(4), 8–15.

Külekçi, G., Güvendi, A., 2023. Gümüşhane ilindeki katı atık yönetimi ve katı atık dönüşüm tesisi. II. International Korkut Ata Scientific Researches Conference, 642–647.

Külekçi, G., Şahin, R., 2024. Bir yeraltı madeninde üretim sürecinde karşılaşılabilecek İSG problemleri ve örnek kazalar. 3rd International Conference on Frontiers in Academic Research, 1242–1251.

Külekçi, G., Uçak, G., 2024. Madencilik işlemlerinde siyanür kullanımı ve oluşabilecek iş güvenliği sorunları. 2nd International Conference on Scientific and Innovative Studies, 824–827.

Lollino, P., Perrotti, M., Fazio, N., Parise, M., 2019. Sinkhole susceptibility assessment using FEM charts. ARMA US Rock Mechanics Conference. OnePetro.

Meral, T., Külekçi, G., 2024. Bir inşaat şantiyesinde 3T risk analiz yöntemi kullanarak risklerin değerlendirilmesi. 3. Bilisel International World Science and Research Congress, 956–970.

Parise, M., Ravbar, N., 2015. Hazards in karst and managing water resources quality. In: Parise, M., Ravbar, N., Živanović, V., Mikszewski, A. (Eds.), *Karst Aquifers Characterization and Engineering*. Springer, pp. 223–232. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4_17

Savaş, F., Akgöz, M., Çakır, K., Kahraman, İ., 2012. Akçakale Mağarası (Gümüşhane) araştırma raporu. MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Daire Başkanlığı, Karst ve Mağara Araştırmaları Birimi.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, (t.y.). Akçakale Mağarası'nın bölgesel konumunu gösteren harita. Tabiat Varlıklarını Koruma Genel Müdürlüğü. <https://tvk.csb.gov.tr>

Waltham, T., Bell, F., Culshaw, M., 2005. Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction. Springer, Berlin.

Yassin, R.R., Haji, S., Muhammad, R.F., 2022. Mitigation of geohazards of carbonate karst features in construction sites by applying combined techniques in Kinta Valley, Malaysia. Conference Paper, Semantic Scholar.

Zhang, Z., Li, L., Xu, W., Fu, Y., Feng, J., 2015. Flat-plate roof collapse of shallow caverns and protective measures: A case study of Longyou ancient siltstone caverns. *Natural Hazards*, 77(1), 361–382. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1481-0>