

Mersin- Anamur Karayolu T3 Tünelindeki Karstik Boşlukların İyileştirilmesinde Kullanılan Yöntemler

Yücel GÜÇ^{1,a}, Sedat TÜRKMEN^{1,b}

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

^aORCID: 0009-0000-1497-9676; ^bORCID: 0000-0002-9867-5545

Makale Bilgileri

Geliş : 23.05.2025

Kabul : 25.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1704326

Sorumlu Yazar

Sedat TÜRKMEN

sturkmen@yahoo.com

Anahtar Kelimeler

Sipahili T3 tüneli

Kazı sınıflaması

Karstik boşluk

İyileştirme

Atf şekli: GÜÇ, Y., TÜRKMEN, S., (2026). Mersin- Anamur Karayolu T3 Tünelindeki Karstik Boşlukların İyileştirilmesinde Kullanılan Yöntemler. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 17-28.

ÖZ

Çalışma alanı, Mersin-Anamur Devlet Karayolu Projesi, km:142+300-148+875 arasındaki T3 Tüneli kesimini kapsamakta olup tünelin toplam uzunluğu 6575 metredir. Tünel çift tüp olarak tasarlanmış olup yol ise 2 x 2 ve 23-26 m platform genişliğine sahiptir. Tünel güzergahında İnfra-Kambriyen yaşlı Sipahili formasyonu geçilmiş olup başlıca düşük dereceli metamorfizma izleri taşıyan meta-konglomera, çakıllı kalkışist, fillat, klorit şist ve kristalize kireçtaşı aralanmasından oluşmaktadır. Tünel kazı desteklemeleri, kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri tarafından önerilen ampirik ve analitik yöntemler ve arazi verileri değerlendirilerek yapılmıştır. Tünel güzergahında kireçtaşı geçilen km:148+159,81-148+167,31 ile km:148+283,81-148+286,31 arasında karstik boşluklar gözlenmiştir. Karstik boşlukların iyileştirilmesi, reçine esaslı organik köpük ajanı ile oluşturulan hafif dolgu betonu yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Methods for Repairing Karstic Voids in the T3 Tunnel on the Mersin-Anamur Highway

Article Info

Received : 23.05.2025

Accepted : 25.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1704326

Corresponding Author

Sedat TÜRKMEN

sturkmen@yahoo.com

Keywords

Sipahili T3 tunnel

Excavation classification

Karstic cavity

Improvement

How to cite: GÜÇ, Y., TÜRKMEN, S., (2026). Methods for Repairing Karstic Voids in the T3 Tunnel on the Mersin-Anamur Highway. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 17-28.

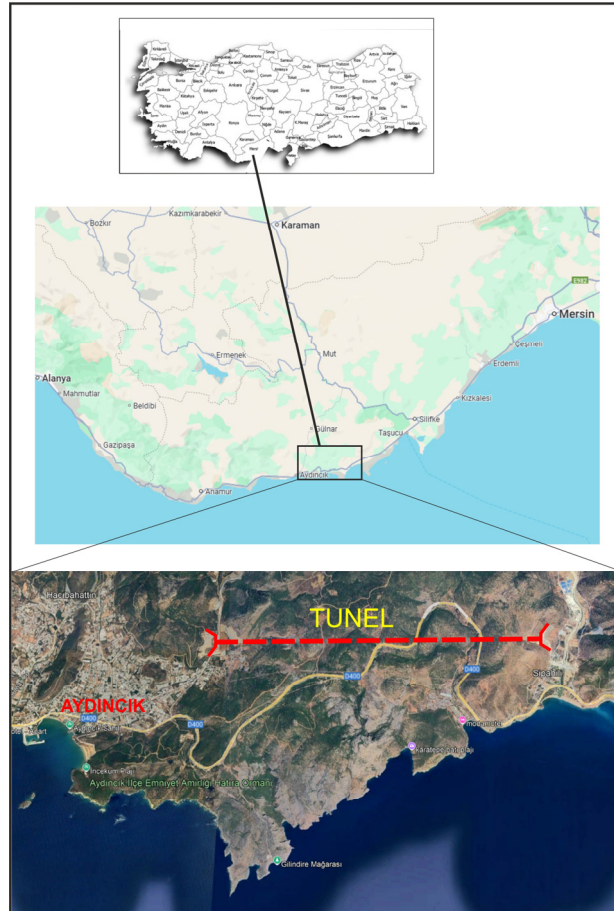
ABSTRACT

The study area covers the T3 Tunnel section between the Mersin-Anamur State Motorway Project, km: 142+300-148+875, and the total length of the tunnel is 6575 meters. The maximum overburden thickness along the tunnel alignment is 377 meters. The tunnel is designed as a double tube, and the road has a 2 x 2 and 23-26 m platform width. The tunnel route passes through lithologies consisting of karstic crystallized limestone belonging to the The Infra-Cambrian-aged Sipahili Formation mainly consists of an alternation of meta-conglomerate, pebbly calc-schist, phyllite, chlorite schist, and crystalline limestone that exhibit traces of low-grade metamorphism. Tunnel excavation and support systems were designed with empirical and analytical methods suggested by rock mass classification systems and by evaluating field data. Along the tunnel alignment, karstic cavities were encountered within the limestone sections between km: 148+159.81-148+167.31 and km: 148+283.81-148+286.31. The repairing of karstic cavities was carried out by the lightweight filling concrete method formed with resin-based organic foaming agent.

1. GİRİŞ

Tüneller yer altı mühendisliği açısından son derece önemli yapılardır. Günümüzde ulaşım ihtiyaçlarının daha hızlı ve verimli karşılanabilmesi amacıyla tünel inşaatları yaygın olarak uygulanmaktadır. Tünelcilikle ilgili kaya sınıflamaları ilk defa Terzaghi'nin [1] ortaya koyduğu kaya yükü esasına dayalı olarak yapılmış, daha sonra Bieniawski [2] tarafından geliştirilen RMR kaya kütlesi sınıflama sistemi ve Jeomekanik Sınıflama sistemi ve Norveç Jeoteknik Enstitüsü (NGI) araştırmacılarının [3] geliştirdiği Q sistemi yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ise tünel mühendisliğinde Yeni Avusturya Tünel Açma Metoduna (NATM) dayalı olarak kazı ve destekleme sistemleri uygulanmaktadır. Bu tür projelerin güvenli ve başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için, kazının gerçekleştirileceği zemin veya kaya ortamının mühendislik, jeolojik ve yapısal özelliklerinin ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu incelemeler doğrultusunda, jeomekanik parametreler belirlenmeli ve uygun kaya/zemin sınıflaması yapılmalıdır. Tünel kazısı sürecinde; kazı ve destekleme yöntemleri, tünel geometrisi, kazı sırasında karşılaşılabilecek zemin problemleri, meydana gelen deformasyonlar ve uygulanacak destek sistemleri bir bütün olarak ele alınmalı ve proje koşullarına en uygun çözümler geliştirilmelidir. Kazı esnasında, çevreleyen kaya kütlelerinde aşırı sökülme yaşanabilmekte ya da doğal olarak oluşmuş karstik boşluklara rastlanabilmektedir. Bu tür boşluklar, zamanla destekleme elemanlarına doğru hareket etme eğilimindedir. Bu nedenle, zemin ile destek elemanları arasında bulunan veya oluşan boşlukların uygun yöntemlerle doldurulması ve sistemin ana kayaya sabitlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma kapsamında, Mersin–Anamur Karayolu üzerinde yer alan 6.575 m uzunluğundaki T3 Tüneli'nin mühendislik jeolojisi ve jeoteknik özellikleri belirlenmiş; arazi verileri değerlendirilerek kazı ve destekleme yöntemleri saptanmıştır (Şekil 1). Tünel kazısı sırasında, km:148+159,81–148+167,31 ile km:148+283,81–148+286,31 kesimleri arasında, sağ tüpün tavan ve sağ omuz bölgelerinde karstik boşluklara rastlanmıştır [4]. Bu kesimlerdeki karstik boşlukların iyileştirme yöntemlerinin belirlenmesi ve uygun alternatif çözüm önerilerinin sunulması amaçlanmıştır.



Şekil 1. T3 Tüneli yer bulduru haritası ve uydu görüntüsü

2. BÖLGESEL JEOLJİ

Proje alanının jeolojik özellikleri MTA ve çeşitli kurumlar tarafından farklı dönemlerde gerçekleştirilen genel jeoloji çalışmalarıyla ortaya konulmuştur [5-9]. Bu çalışmalar doğrultusunda, bölgenin jeolojisi ve litostratigrafik birimleri tanımlanmıştır. İnceleme alanı, Toros Kuşağı'nın Silifke ile Anamur arasında kalan orta kesiminin en güneyinde yer almaktadır. Çalışma sahasında, Geyikdağı Tektonik Birliği'nin taban kesimlerini oluşturan ve düşük derecede bölgesel metamorfizma geçirmiş birimler ilk kez Demirtaşlı [7] tarafından "Sipahili formasyonu" olarak adlandırılmıştır. Formasyon, Geç Devoniyen–Erken Triyas zaman aralığında çökelmiş olan Aladağ Birliği istifinin, Triyas döneminde gelişen bir bindirme sonucu tanımlanan ve İnfra-Kambriyen - Geç Permiyen zaman aralığında çökelmiş Geyikdağı Birliği istifinin üzerine itildiği belirlenmiştir [8]. Bu iki birimin, tektonik dokanak oluşturacak şekilde birbirleri ile temas halinde oldukları yorumlanmaktadır (Şekil 2). Mühendislik çalışmaları olarak inceleme alanını yakın çevresinde Anamur - Kaledran arasında karayolu çalışmalarında açılan T5 tünelinin mühendislik jeolojisi özellikleri ve kaya kütle sınıflaması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [10].

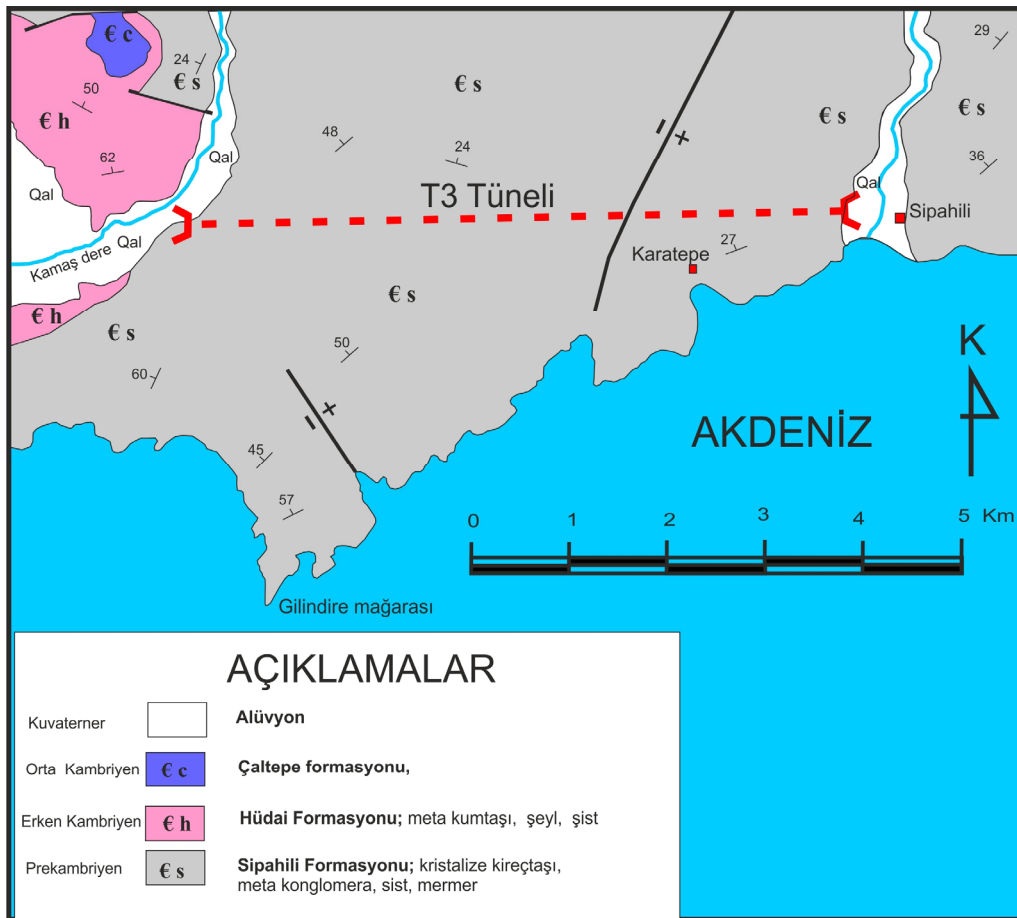
Üst Sistem	Sistem	Seri / Kat	Formasyon	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
SENEZOYİK	Tersiyer	Alt Miyosen	Mut		Açık sarı, süt beyaz renkli, kalın tabakalı, masif, bol fosilli, resifal nitelikli kireçtaşı
M E S O Z O Y İ K	Kretase	Kampaniyen-Maastrichtiyen	Yavca		Taban konglomera Açısız Uyumsuzluk Kireçtaşı, silttaşı ara seviyeli, açık kahve renkli kumtaşı Kırmızı renkli, ince tabakalı, bol globotruncanidli pelajik kireçtaşı Parakonkordans / düşük açılı uyumsuzluk Bej-açık sarı renkli, kalın tabakalı, rudist kavkulu breşik kireçtaşı Açısız Uyumsuzluk Bej-pembe renkli, orta tabakalı, mikritik kireçtaşı
		Alt			Açık gri, bej renkli, kalın tabakalı, miliolidli kireçtaşı
		Yüce			Gri renkli, orta-kalın tabakalı dolomit
		Yüce			Gri renkli, orta-kalın tabakalı dolomitik kireçtaşı, gri renkli, orta-kalın tabakalı, bol foraminiferli kireçtaşı araldanması
	Jura	Malm			Demirli kumtaşı seviyesi Megatodonlu kireçtaşı Monojenik konglomera Gri renkli, orta tabakalı dolomit, gri renkli orta-kalın tabakalı, kireçtaşı araldanması
	Triyas	Üst			Konglomera, kumtaşı, çamurtaşı, silttaşı, kili kireçtaşı Açısız Uyumsuzluk
		Üst			Dolomitik kireçtaşı, Mizzia'lı kireçtaşı, kumtaşı, foraminiferli kireçtaşı araldanması Açısız uyumsuzluk
	Devoniyen	Alt	Konaklı		Dolomitik kireçtaşı, çamurtaşı arakatkılı, bol makro fosilli kireçtaşı
		Üst	Akdere		Kumlu kireçtaşı arakatkılı silttaşı, çamurtaşı, kuvars kumtaşı, bol makro fosilli kumlu kireçtaşı
		Orta	Boydaceel		Breşik kireçtaşı, dolomit, dolomitik kireçtaşı
		Alt	Söğöç		Konglomera, dolomit, kumtaşı Açısız uyumsuzluk Dolomitik kireçtaşı, kireçtaşı, kuvars kumtaşı, silttaşı
P A L E O Z O Y İ K	Silüriyen	Üst	Karayar		Kireçtaşı, şeyl, silttaşı, kuvars kumtaşı araldanması
		Alt	Hırmancık		Ortoseras'lı kireçtaşı seviyeli, yeşil-siyah renkli, ince tabakalı, graptolitli şeyl
	Kambriyen	Orta	Çelebi Eğinler		Konglomera, silttaşı-şeyl arakatkılı kuvars kumtaşı Açısız uyumsuzluk Gri renkli, kalın tabakalı dolomit, kireçtaşı
		Alt	Hüdal		Kahve renkli, ince-orta tabakalı meta-şeyl arakatkılı, kahve, beyaz renkli, çapraz tabakalanmalı kuvarsit
	Infra-Pre Kambriyen				Uyumsuzluk
			Sipahili		Kalkışist, metakonglomera, fillat, metaşeyl araldanması

Şekil 2. Aydıncık bölgesinin genelleştirilmiş stratigrafi kesiti [8]

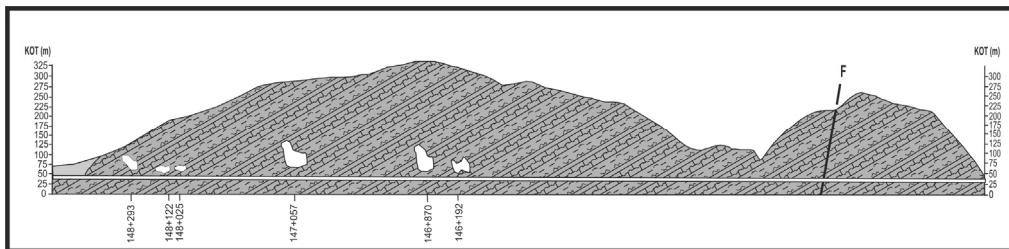
3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Tünel Güzergâhının Jeolojisi

Tünel güzergahında İnfra-Kambriyen yaşlı Sipahili formasyonuna ait başlıca düşük dereceli metamorfizma izleri taşıyan meta-konglomera, çakıllı kalkışist, fillat, klorit şist, şist ve kristalize kireçtaşı ardalanmasından oluşan birimler izlenir. Önceki çalışmalarda Sipahili formasyonu olarak adlandırılan birim; tünel güzergahında açık kahve-gri renkli ve orta tabakalı kireçtaşı, kalk şist, mermer, yer yer şist ve meta konglomera düzeyleri içerir (Şekil 3 ve 4). Arazinin çok engebeli bir morfoloji sunmasından dolayı tünel güzergahında toplam iki adet 69,5 m derinliğinde sondaj açılabilmiştir (Şekil 5). Kireçtaşları gri renkli, ince-orta kalınlıkta tabakalı olup çatlaklı ve yer yer metamorfik bir yapı sunar. Yapılan sondaj çalışmaları sonucunda, tünelin altı farklı bölüme ayrılarak incelenmesi düşünülmüştür. Tünel güzergahını, Sipahili formasyonunun daha çok üst kesimlerini temsil eden çoğunlukla gri renkli, düzgün, orta-kalın tabakalı, sert yapıli kristalize kireçtaşları oluşturmakta olup yer yer karstlaşma yaygındır. Sipahili formasyonunun alt seviyelerinin biraz üzerinde ise kristalize dolomitler ve merceksele mermer seviyeleri gözlenmiştir (Çizelge 1).



Şekil 3. Tünel güzergahının genel jeoloji haritası [8]



Şekil 4. T3 tünelinin jeolojik enine kesiti



Şekil 5. Tünel giriş portalında açılan araştırma sondajından bir görünüm

Çizelge 1. Altı bölüme ayrılan tünel güzergahında kireçtaşı geçilen kısımlar

Proje kesim	Km aralığı	Jeolojik birim
Giriş portalı	142+300-142+460	Çatlaklı kireçtaşı
I Kesimi	142+460-143+600	Kristalize kireçtaşı
II Kesimi	143+600-144+710	Kireçtaşı
III Kesimi	144+710-147+860	Kireçtaşı
IV Kesimi	147+860-148+600	Karstik kireçtaşı
Çıkış portalı	148+600-148+875	Yamaç molozu (killi)

Proje alanı ile ilgili yapılan jeolojik çalışmalar ve laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen sayısal verilere göre tünel güzergahında kazı aşamasında karşılaşılabilecek kaya birimleri, uluslararası kabul görmüş kaya sınıflama sistemlerinden Hoek ve Brown [11,12], kaya dayanım tahmini, Q kaya kütle sınıflaması Barton, Lien ve Lunde [13,14], RMR Jeomekanik sınıflama sistemi [3] ve ÖNORM B 2203, [15] (NATM) ile yapılmıştır.

3.2. Tünel Güzergahı Kaya Sınıflaması ve Jeolojik Parametreler

Proje alanı ile ilgili yapılan jeoloji çalışmaları ve laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen sayısal verilere göre tünel güzergahında kazı aşamasında karşılaşılabilecek kaya formasyonları, RMR [2], Q [3], ve ÖNORM B 2203, [15] (NATM) kaya sınıflama sistemleri kullanılarak değerlendirilmiştir (Çizelge 2 ve 3).

Çizelge 2. Sondajlardan alınan örnekler üzerinde yapılan deney sonuçları ve belirlenen parametreler

Kesit	Giriş ve çıkış portalı	Eksen I ve Eksen III kesimi	Eksen II ve Eksen IV kesimi
Km aralığı	142+300-142+460 148+600-148+440	142+460-143+600 144+710-147+860	143+600-144+710 147+860-148+600
Kaya birim hacim Ağırlığı, (kN/m ³)	2,63	2,63	2,63
Tek eksenli basınç dayanımı, (MPa)	14	14	14
GSI değeri	37	41	41
mi değeri	9	12	12
Örselenme faktörü, D	0-0,5	0-0,5	0-0,5

Çizelge 3. Tünelin farklı kesimlerinde uygulanan destekleme sistemleri

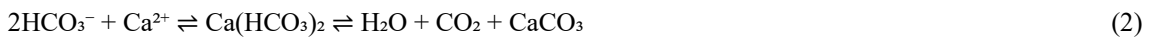
Kesim	Giriş portalı	Eksen II ve Eksen IV kesimi, Sığınma cebi ve araç geçişi	Eksen I ve Eksen III kesimi, Sığınma cebi ve araç geçişi	Eksen kesimi	Çıkış portalı
Km	142+300-142+460	143+600-144+710 147+860-148+600	143+600-144+710 147+860-148+600	Sağ 142+370-142+888 Sol 142+406-142+913	142+300-142+460
Kaya sınıfı	B3 Invert	B3	B2	B2	B3 Invert
Kaya bulunu (m)	6*1,5-1,0-1,5 PG/IBO	4-6 (1,00-1,50) L=4 m (Alt Yarıda) L=6 m (Üst yarıda) (PG Bulon)	4-6 (1,00-2,00) L=4 m (Alt Yarıda) L=6 m (Omuzlarda) (PG Bulon)	4-6 (1,00-2,00) L=4 m (Alt Yarıda) L=6 m (Omuzlarda) (PG Bulon)	6*1,5-1,0-1,5 PG/IBO
Püskürtme betonu	25 cm	25 cm	20 cm	20 cm	25 cm
Hasır çelik	2 sıra (Q221x221) Üst 120°de, 30 cm ara ile (L=6m) 2"	2 sıra (Q221x221) Üst 120°de, 20-30 cm ara ile (L=6m) 2"	2 sıra (Q221x221) Üst 120°de, 20-25 cm ara ile (L=6m) 2"	2 sıra (Q221x221) Üst 120°de, 20-25 cm ara ile (L=6m) 2"	2 sıra (Q221x221) Üst 120°de, 30 cm ara ile (L=6m) 2"
Çelik iksa	I 160 1,0-1,5 m ara ile	I 160 1,0-1,5 m ara ile	I 120 1,5-2 m ara ile	I 120 1,5-2 m ara ile	I 160 1,0-1,5 m ara ile
İlerleme adımı (m)	Üst yarı: 1,0-1,5 m Alt yarı: 3,0 m	Üst yarı: 1,0-1,5 m Alt yarı: 3,0 m	Üst yarı: 1,5-2,0 m Alt yarı: 3,0 m	Üst yarı: 1,5-2,0 m Alt yarı: 3,0 m	Üst yarı: 1,0-1,5 m Alt yarı: 3,0 m
Nihai kaplama	Donatısız (C25/30)	Donatısız (C25/30)	Donatısız (C25/30)	Donatısız (C25/30)	Donatısız (C25/30)
Kesit	Taban kemerli	Taban kemersiz	Taban kemersiz	Taban kemersiz	Taban kemerli

3.3. Tünel Güzergahındaki Karstlaşma

Karst, özellikle karbonatlı kayaların erimesi ve yüzeyel akarsuların yer altına sızması sonucunda oluşan boşluklu alanların tümünü ifade eden morfolojik bir terimdir. Karstlaşma sonucunda yeraltında oluşan boşluklu yapıya “karstik boşluk” adı verilir. Karstik yapıların oluşumunda başta kayaların özellikleri olmak üzere; yükselti, sıcaklık, nemlilik, iklim ve vejetasyon koşulları önemli rol oynar. Kireçtaşlarında karstlaşma oldukça yaygın bir süreçtir. Kırık ve çatlaklardan sızan suların etkisiyle, kalsiyum karbonat (CaCO₃) gibi eriyebilen kayalar çözünerek boşluklu yapılar oluşturur. Karbondioksit (CO₂) açısından zengin asidik yağmur suları ile başlayan bu süreç yüzeyden derinlere doğru ilerleyerek zamanla büyük mağaraların oluşumuna yol açar. Karstlaşma, yeraltı sularının dolaşımı ve depolanması açısından da büyük öneme sahiptir. Bu süreçte, suda çözünmüş haldeki CO₂, su ile reaksiyona girerek karbonik asit (H₂CO₃) oluşturur:



Karbonik asidin, sudaki kalsiyum iyonları ile etkileşmesi sonucunda ise geri dönüşümlü bir kimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyonlar, zaman zaman kalsiyum karbonatın çökmesiyle sonuçlanır.



Bu denge süreçleri karstik boşlukların genişlemesine, mağara ve diğer yer altı yapılarının şekillenmesine neden olur. T3 Tüneli sol tüpte km:148+122,08- 148+129,08 arasında geçilen karstik boşluklar Şekil 6 ve 7 de verilmiştir.



Şekil 6. T3 Tüneli sol tüpte (km:148+122,08- 148+129,08 arası) geçilen karstik boşluklar



Şekil 7. Tünel sol tüp tavan kesimindeki karstik boşluktan bir görünüm

3.4. Karstik Boşluk Geçişleri ve Çözüm Önerileri

Tünel kazısında kireçtaşı birimleri içerisinde geçilen kesimlerde yer yer karstik boşluklarla karşılaşmıştır. Karşılaşılan karstik boşlukların bazıları dolgulu, bazıları sulu olup tünel açımında zorluk yaratmıştır. Bu kesimlerin iyileştirilmesi ve nihai olarak sağlamlaştırılması için geliştirilen iyileştirme yöntemleri, boşlukların dolgulu ve sulu olmaları durumuna göre farklılıklar göstermektedir. Bu birimler, boşluk bulundurma, boyutları, boşluklar arası ilişkiler ve bu ilişkilerin derecesi gibi yeraltı suyu barındırabilme ve iletebilme kapasiteleri göz önüne alınarak irdelenmişlerdir. Önerilen iyileştirme yöntemleri; tünelde karşılaşılan karstik boşlukların özelliğine göre “Kil Dolgulu Karstik Boşluk” ve “Dolgusuz ve Su Taşıyan Karstik Boşluklar” olarak iki başlık altında ele alınmıştır.

3.4.1. Kil Dolgulu Karstik Boşluk

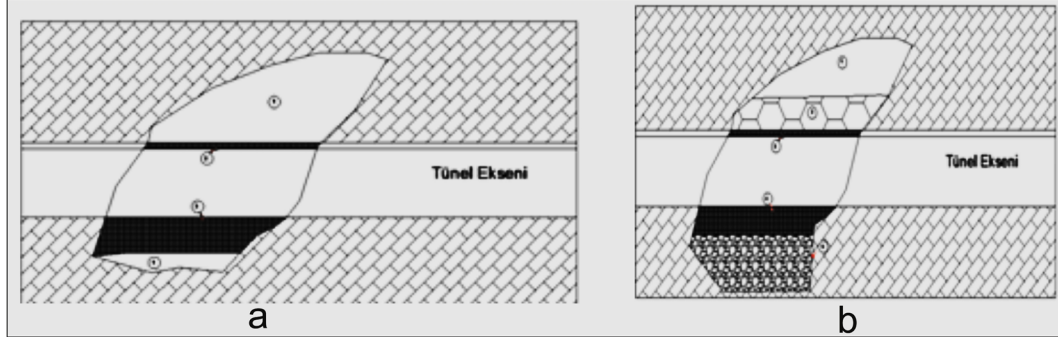
Bu tür karstik boşluklar su taşımayan ve killi dolgu dolu boşluklardır (Şekil 8). Bu tür boşluklar ile karşılaşılması durumunda önerilen yöntem aşağıda belirtilmiştir. Tünel imalatlarında bu türlü bir karstik boşlukla karşılaşılması durumunda;

1. Ön iksa (çelik kuşak, hasır çelik, püskürtme betonu ve süren)
2. Grobeton (2-3 m kalınlığında) gibi yöntemler önerilmiştir.

3.4.2. Dolgusuz ve Su Taşıyan Karstik Boşluklar

Bu tür boşluklar yeraltı suyunu barındıran ve taşıyan güncel karstlardır. Tünel kazısı sırasında bu tip yapılar ile karşılaşılması durumunda çözüm önerisi olarak boşluklarda aşağıdaki sırayla iyileştirme uygulanması öngörülmüştür.

1. Köpük (Çabuk priz alan düşük yoğunluklu malzeme ile yaklaşık 3,0 m dolgu)
2. Köpükten önce ön iksa (Çelik kuşak, hasır çelik, püskürtme beton, süren)
3. Grobeton
4. Serbest drenaj malzemesi (kırmataş malzeme).



Şekil 8. (a) Tünel tabanında kil dolgulu karstik boşluk kesiti ve (b) Tünel tavan ve tabanındaki dolgulu tünel kesiti

Tünelde geçen karstik boşluklu kesimler için ÖNORM B 2203'[15]e göre yapılan kazı ve destekleme sınıflaması Çizelge 4 ve 5'te verilmiştir.

Çizelge 4. T3 Tüneli karstik bölgelerin kazı sınıfı (ÖNORM B 2203) ve geçen birimler

	Km başlangıcı	Km sonu	Ayna km	Boşluk bölgesi	Kazı sınıfı ve geçen birim	Karstik boşluk türü
Sağ tüp	148+283,81	148+286,31	148+283,81	Tavan-eksen kesimi	B2-Kireçtaşı	Dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklar
Sağ tüp	148+159,81	148+167,31	148+159,81	Sağ omuz	B2 -Kireçtaşı	Dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklar
Sağ tüp	147+054,80	147+060,80	147+058,81	Tavan-eksen kesimi	B3 -Kireçtaşı	Dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklar
Sağ tüp	146+868,80	146+872,90	146+868,81	Tavan ve sağ omuz	B2 -Kireçtaşı	Dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklar
Sağ tüp	146+182,00	146+200,00	146+196,00	Tavan	B2 -Kireçtaşı	Dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklar
Sol tüp	148+122,08	148+129,08	148+122,08	Sağ omuz	B2 -Kireçtaşı	Dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklar
Sağ tüp	148+288,25	148+293,00	148+291,81	Sağ omuz	B2 -Kireçtaşı	Dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklar

Çizelge 5. T3 Tüneli karstik bölgelerin kaya sınıfı ve kazı destekleme tablosu

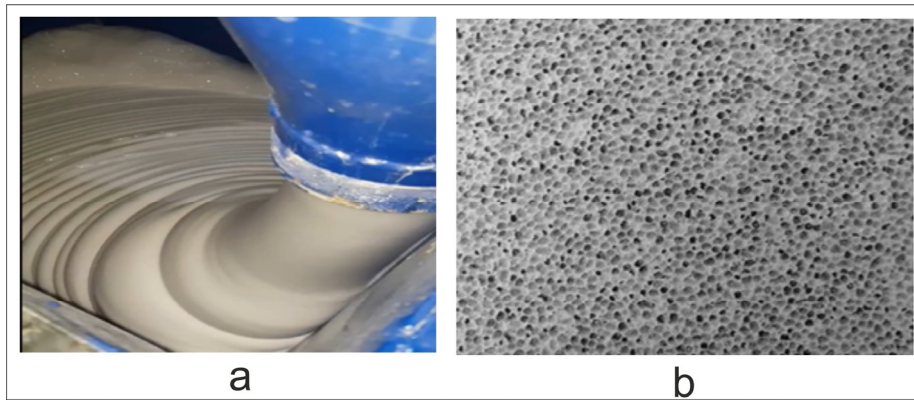
Kaya Sınıfı (ÖNORM B 2203)		
	B2-Karstik	B3-Karstik
Kaya bulonu (m)	4-6*1,5*(1,5-2,0) L=4 m (Alt yarıda) L=6 m (Omuzlarda) (PG Bulon) Karstik kesim L:12 IBO bulon 1x1m ara ile	4-6*1,5*(1,0-1,5) L=4 m (Alt yarıda) L=6 m (Omuzlarda) (PG Bulon) Karstik kesim L:12 IBO bulon 1x1m ara ile
Püskürtme betonu	20 cm (C25/30)	25 cm (C25/30)
Hasır çelik	2 sıra (Q221x221)	2 sıra (Q221x221)
Süren (m)	Üst 120°de, 20-25 cm ara ile (L=6 m) 2"	Üst 120°de, 20-30 cm ara ile (L=6 m) 2"
Çelik iksa	I 120 1,5-2,0 m ara ile	I 160 1,0-1,5 m ara ile
İlerleme adımı (m)	Üstyarı 1,5-2,0 m Altyarı; 3,0 m	Üstyarı 1,0-1,5 m Altyarı; 3,0 m
Nihai beton	Donatısız (C30/37)	Donatısız (C30/37)
Kesit	Taban kemersiz	Taban kemersiz

3.5. Karstik Boşluklarda Kullanılan Hafif (Köpük) Betonun Özellikleri

T3 tüneline karşılaşılan karstik boşlukların iyileştirilmesi için gerekli değerlendirmeler yapılarak boşlukların hafif betonla doldurulması öngörülmüştür.

Beton içerisinde çeşitli yollarla boşluklar oluşturularak veya birim hacim ağırlığı normal agregaya kıyasla daha düşük olan agregalar kullanılarak betonun birim hacim ağırlığı düşürülebilmektedir. Bu yollardan herhangi biri ile üretilen yoğunluğu 2200 kg/m^3 'ten düşük olan betonlara hafif beton denilmektedir.

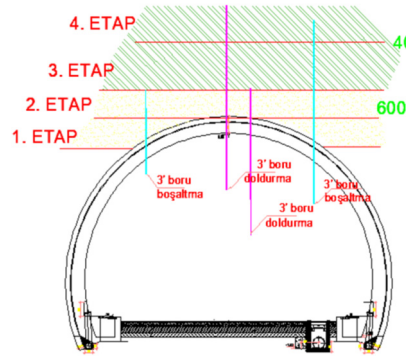
Yapısal hafif beton üretiminde dikkate alınması gereken ilk husus, “dayanım” özeliğinden ziyade “düşük birim hacim ağırlık” özelliğidir. Amaç, maksimum yoğunluk limitlerini aşmadan, minimum dayanım limitlerinin altına düşmeyen beton üretmektir. Hafif betonların birim hacim ağırlığı genellikle $250\text{-}1600 \text{ kg/m}^3$ arasında değişir. Yoğunluğu 800 kg/m^3 'ten düşük olan betonlar çok hafif beton olarak adlandırılır (Şekil 9). Hafif beton kullanım alanları arasında, geçirimsizliğin sağlanması, tünel, maden, petrol kuyusu, vb. açıklıkların doldurulması ve stabil olmayan zeminlerin sağlamlaştırılması sayılabilir.



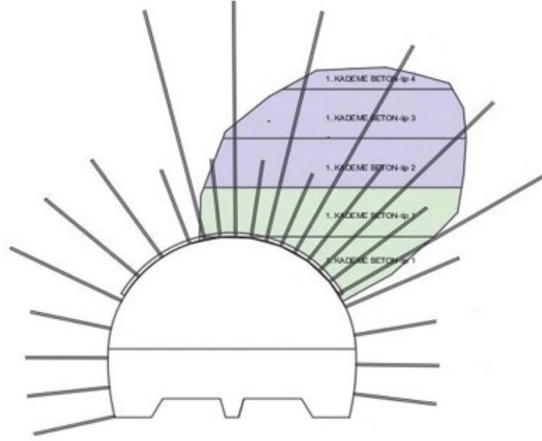
Şekil 9. (a) Hafif köpük beton harcı ve (b) Hava kabarcıklı beton

3.6. Tünel Karstik Boşluklarında Hafif Beton Uygulaması

Karstik boşlukların tünel sağ tüp eksen tavan bölgesinden başladığı, sağ omuz bölgesine doğru genişlediği ve boşlukların 3-8 metre derinliklere ulaştığı görülmüştür. Karstik boşlukların dolgusu kademeler şeklinde uygulanmıştır (Şekil 10 ve 11). Öncelikle alt kademe dolgusu olarak tünelin tavanından itibaren boşluğa doğru en az 2,5 metre kalınlığında varsa yan boşlukları da içine alacak şekilde yoğunluğu 600 kg/m^3 beton enjeksiyonu ile alt kademe oluşturulmuştur. Bu kademeden üzerinde yoğunluğu 400 kg/m^3 olan hafif beton ile boşluğun tamamını dolduracak şekilde üst kademe oluşturulmuştur. Uygulanan hafif betonun tek eksenli basınç değeri alt kademede 3 MPa, üst kademede 1.6 MPa'dır (ACI 318-19 Code, [16]). Uygulamada önceden hazırlanan hafif beton karışımı transmikserlerle tünel içerisine getirilmekte ve pompa vasıtasıyla tünel kaplaması içerisinde önceden açılmış delikler vasıtasıyla karstik boşluklara enjekte edilmektedir (Şekil 12). Karstik boşlukların olduğu kesimlerde yapılan destekleme sistemi ve bu kesimlerde uygulanan hafif beton dolgu iyileştirme sistemleri tünel kesitleri üzerinde belirtilmiştir (Şekil 13).



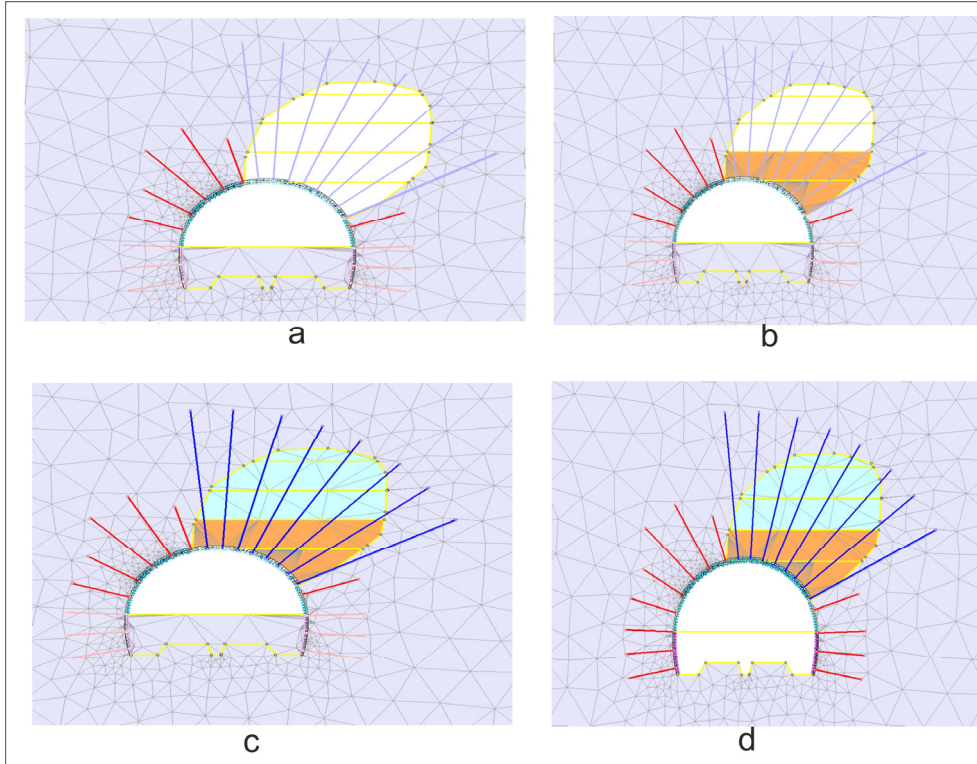
Şekil 10. Tünelde hafif köpük beton uygulaması tip en kesiti



Şekil 11. Tünel sağ tüp karstik boşlukların tipik kesiti



Şekil 12. Hafif köpük betonun hazırlanması ve tavanda uygulanması



Şekil 13. (a) Üst yarı desteklemesi (püskürtme betonu ve bulonlama sisteminin) tipik kesiti, (b) Karstik boşluğun alt kademesinin hafif beton ile doldurulması, (c) Karstik boşluğun üst kademesinin hafif beton ile doldurulması ve (d) Karstik boşluğun ve bulonlama uygulamasının tamamlanmış kesiti

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mersin – Anamur Karayolu projesinde yer alan T3 Tüneli, farklı litolojiler içeren Pre-Kambriyen yaşlı Sipahili formasyonuna ait kireçtaşı birimleri içerisinde açılmıştır. Tünel kazısı sırasında, km: 46+ 192 ile km:48+290 arasında kireçtaşı içerisinde yer yer dolgunsuz ve su taşıyan karstik boşluklarla karşılaşmış olup beklenmeyen bu özellikten dolayı projede öngörülen destek sistemlerine ilave olarak öneriler geliştirilmiş ve bu kesimlerdeki karstik boşluklar hafif köpük beton kullanılarak doldurulmuştur.

Yapılan güçlendirme işlemi, tünel destekleme elemanlarına, tünel stabilitesine ve trafik güvenliğine destek sağlayacaktır. Bu sebeplerden dolayı karstik boşluk geçilen alanların ek olarak desteklenmesi sağlanarak hem kazı sırasında hem de kalıcı olarak güçlendirilmesi sağlanmıştır. Tünel içerisinde yer alan boşlukların ve kırıklı yapıların kısa ve uzun dönemde tünelde meydana getireceği sorunları ortadan kaldırmak, trafik güvenliğini artırmak ve tünel işletmesi aşamasında beklenen performansı sağlamak için destekleme ve güçlendirme çalışmaları büyük öneme sahiptir.

T3 Tüneli sağ ve sol tüp kesiminde yer alan ve kritik kesitler olarak tanımlanan km:46+872,90 ile km:146+868,81 ve km:146+182,00 ile 146+196 arasında yer alan karstik boşluk, tünel tavan bölgesinden başlayarak tünel sağ omuz bölgesine doğru devam ederek genişleyen ve tünel alt yarısı ile omuz bölgesi arasında sonlanan 1-8 m derinlikte bir yapıdadır. İyileştirme tasarım parametreleri buna göre uygulanmıştır.

Tünel tavan kesiminde saptanan boşluklar, tünel kazı seviyesinden itibaren en az 2,5 m kalınlıkta olacak şekilde, 600 kg/m³ yoğunluğa ve 3,0 MPa tek eksenli basınç dayanımına sahip hafif beton (alt kademe beton tabakası) ile doldurulmuştur. Bu tabakanın üzerine, 400 kg/m³ yoğunluğa ve 1,6 MPa tek eksenli basınç dayanımına sahip hafif beton kullanılarak ikinci bir dolgu tabakası uygulanmış ve boşluklar tamamen stabilize edilmiştir.

Boşluğun fazla olduğu alanlarda da hafif betonunun kademeli olarak doldurulması uygun olacaktır. Bu kesimlerde tünel yüzeylerinin desteklenmesinde çift kat hasır çelik ve sınıflama sisteminde önerilen kalınlıkta püskürtme beton uygulanması daha güvenli destekleme sağlayacaktır. Karstik boşlukların olduğu kesimlerde iksa sistemi kazı projesine uygun olarak öngörülen aralıklarda ve kalınlıklarda uygulanmıştır. Tünelin diğer kesimlerinde de benzer stabilite ve karstik boşluk problemi ile karşılaşılması durumunda bu tasarım projesi uygulanabilir.

Güzergahta 7 adet boşluklu yapıya rastlanmıştır. Bu kesimlerde de karstik boşluklar için aynı sistemi ve çözüm önerileri uygulanmıştır. Tünel kesiminde kullanılacak bulon tipinin kendinden delgili bulon (İBO Bulon (Ø32) olarak kullanılması uygun ve güvenli olacaktır.

5. KAYNAKLAR

1. Terzaghi, K. (1946). Rock defects and load on tunnel supports. In: *Proctor, R.V., White, T.C. (Eds.), Introduction to Rock Tunnelling with Steel Support*. Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstava, OH, USA, 271.
2. Bieniawski, T. (1989). Engineering rock mass classifications. *John Wiley and Sons*, 237.
3. Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. (1974) Engineering classification of rock masses for the design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, 6, 189-236.
4. Güç, Y. (2024). Mersin-Anamur karayolları T3 tünelindeki karstik boşlukları iyileştirme yöntemleri. *Yüksek lisans tezi*. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 84.
5. Blumenthal, M.M. (1942). Cenubi Anadolu Toroslarının sahil sıradağlarının Silifke-Anamur arasındaki Jeoloji incelemeler. *MTA Raporu*, 2833 (Yayınlanmamış), Ankara.
6. Özgül, N. (1976). Toroslar'ın bazı temel jeolojik özellikleri: *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, 19, 65-78.
7. Demirtaşlı E. (1984). Stratigraphy and tectonics of the area between Silifke and Anamur central Taurus Mountains. *Geology of the Taurus Belt, Int. Symp.*, 101-118.
8. Koç, H. (2003). Aydıncık (İçel) yöresinin tektono-stratigrafisi ve jeolojik evrimi. *Doktora tezi*. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Adana, 283.
9. Yapıcı, N., Anıl, M. ve Yetiş, C. (2003). Anamur-Malaklar (Mersin) yöresinin jeolojisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 18(2), 267-282.

10. Aydoğdu, M. ve Türkmen, S. (2023). Anamur-Kaledran arası (Mersin) T5 tünelinin kaya kütle sınıflaması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(1), 252-263.
11. Hoek, E. & Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1165-1186
12. Hoek, E. & Brown, E.T. (1980). Underground excavations in rock. *Institutions of Mining and Metallurgy*. London, 382.
13. Barton, N. & Grimstad, E. (1994) The Q-system following twenty years of application in NTM support selection. *Felsbau*, 12, 428-436
14. Grimstad, E. & Barton, N. (1993). Updating the Q-system for NTM. *Proceeding of the International Symposium Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, Norveç
15. ASI ÖNORM B 2203, (2023). *Austrian standards international*. <https://www.austrian-standards.at/en/shop/onorm-b-2203-1-2023-03-01~p2653352>
16. ACI 318 -19 Code, (1985). Building code requirements for reinforced concrete. *American Concrete Institute*. Farmington Hills, MI, ACI.