Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Morgedik Barajı (Erciş–Van) Derivasyon Tünelinde Su Kaçaklarının Enjeksiyonla Önlenmesi

Veli KESKİN [1,a]

[1]*Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0003-2769-5044*

Makale Bilgileri

Geliş : 17.01.2026
Kabul : 18.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1865965

Sorumlu Yazar

Veli KESKİN
veli_keskin@outlook.com

Anahtar Kelimeler

Enjeksiyon
Morgedik barajı
Tünel
Su sızıntıları

***Atıf şekli:** KESKİN, V., (2026). Morgedik Barajı (Erciş–Van Derivasyon Tünelinde Su Kaçaklarının Enjeksiyonla Önlenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 635-650.*

ÖZ

Bu çalışmada, Morgedik Barajı derivasyon tünelinde gözlenen su sızıntılarının kontrol altına alınmasında kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu yöntemlerinin etkinliği değerlendirilmiştir. Saha çalışmaları, kırıklı ve çatlaklı sütun bazalt birimlerinde, özellikle 0+150 km ve 0+183 km kilometre noktalarında yaklaşık 4,5 bar basınca sahip su kaçaklarının varlığını ortaya koymuştur. Tünel temel kayasının jeolojik ve jeoteknik özellikleri saha ve laboratuvar çalışmalarıyla belirlenmiş, enjeksiyon malzemelerinin reolojik özellikleri analiz edilmiştir. Enjeksiyon basınçları saha koşullarına göre optimize edilerek uygulamaya alınmış ve enjeksiyon sonrası performans izleme çalışmalarıyla değerlendirilmiştir. Uygulamalar sonucunda su sızıntılarında belirgin bir azalma sağlanmış ve derivasyon tünelinin su geçirimsizlik performansı önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Elde edilen bulgular, kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonunun benzer jeolojik koşullara sahip derivasyon tünellerinde teknik ve ekonomik açıdan etkili ve uygulanabilir bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Grouting-Based Mitigation of Water Leakage in the Morgedik Dam Diversion Tunnel (Erciş–Van)

Article Info

Received : 17.01.2026
Accepted : 18.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1865965

Corresponding Author

Veli KESKİN
veli_keskin@outlook.com

Keywords

Grouting
Morgedik dam
Tunnel
Water leakage

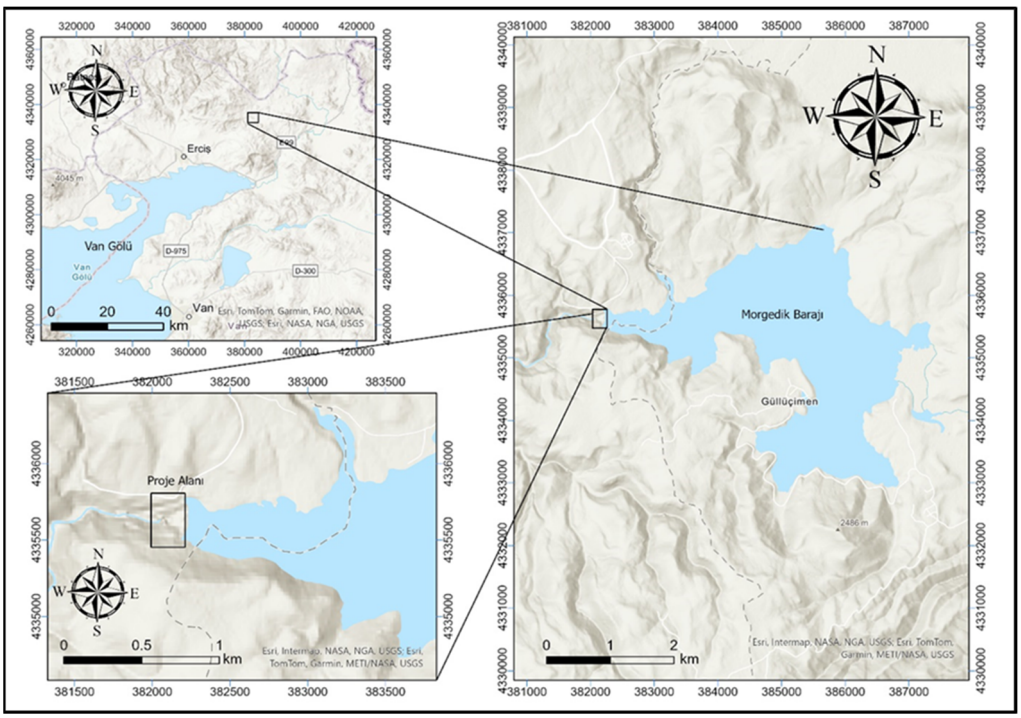
***How to cite:** KESKİN, V., (2026). Grouting-Based Mitigation of Water Leakage in the Morgedik Dam Diversion Tunnel (Erciş–Van). Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 635-650.*

ABSTRACT

This study evaluates the effectiveness of contact and consolidation grouting methods for controlling water leakage observed in the diversion tunnel of the Morgedik Dam. Field investigations identified water inflows with pressures of approximately 4.5 bar within weak zones developed in fractured and jointed columnar basalt units, particularly at chainages 0+150 km and 0+183 km. The geological and geotechnical characteristics of the tunnel foundation rock were determined through detailed field observations and laboratory analyses, while the rheological properties of the grouting materials were systematically assessed. Grouting pressures were optimized according to site-specific conditions, and the post-grouting performance was evaluated through continuous monitoring. The results indicate a significant reduction in water leakage and a marked improvement in the impermeability performance of the diversion tunnel. The findings demonstrate that contact and consolidation grouting constitute a technically effective and economically viable solution for leakage control in diversion tunnels developed under similar geological conditions.

1. GİRİŞ

Morgedik Barajı (Van–Erciş) projesinde baraj gövdesi, kil çekirdekli kaya dolgu tipinde tasarlanmıştır. Gövde dolgusu, yaklaşık 5 m kalınlığındaki aşırı kırıklı, çatlaklı ve ayrışmış bazalt ile alüvyon biriminin kaldırılmasının ardından, Kuvaterner yaşlı bazalt ana kaya üzerine oturtulmuştur. Baraj mühendisliğinde, barajın oturacağı ana kayanın yanı sıra derivasyon tüneli gibi yardımcı yapıların geçirimsizliği ve stabilitesi, yapının uzun dönemli güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda, derivasyon tüneli güzergâhı boyunca ana kaya içerisinde gelişmiş ayrışma, alterasyon ve süreksizliklere bağlı litolojik zayıflık zonlarının belirlenmesi ve tünel inşaatı sırasında bu zonların iyileştirilmesi gerekmektedir. Söz konusu zayıf zonların güçlendirilmesinde kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonları, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen ve etkinliği kanıtlanmış yöntemler arasında yer almaktadır. Kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu, yeraltı mühendisliği uygulamalarında; özellikle tünel ve baraj yapılarında karşılaşılan su sızıntılarının kontrol altına alınması ile zemin/kaya kütlesinin dayanım ve geçirgenlik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla uygulanan basınçlı enjeksiyon teknikleridir [1,2]. Bu yöntemler, kaya ve zemin ortamındaki mevcut boşlukların, süreksizliklerin ve zayıflık zonlarının çimento esaslı enjeksiyon karışımları ile doldurulmasını hedefleyerek daha geçirimsiz ve bütünlüklü bir yapı oluşturmayı amaçlamaktadır [3,4]. Her iki enjeksiyon yöntemi, uygulama derinliği ve hedeflenen boşluk türleri açısından farklılık göstermekle birlikte, çoğu uygulamada entegre biçimde kullanılarak iyileştirme etkinliği artırılmaktadır [5-7]. Teknik yaklaşım ve kullanılan malzeme açısından benzerlik gösteren kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu uygulamaları arasındaki temel fark, enjeksiyonun uygulandığı derinlikler ile enjeksiyon basınçlarının farklı olmasıdır. Bu bağlamda, enjeksiyon parametrelerinin saha koşullarına uygun şekilde belirlenmesi, uygulamanın başarısını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında, ana kaya içerisinde açılan Morgedik Barajı derivasyon tünelinde, barajın işletmeye alınmasının ardından ortaya çıkan su sızıntılarının kontrol altına alınmasına yönelik olarak uygulanan kontakt ve konsolidasyon enjeksiyon teknikleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. İnceleme sürecinde, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü tarafından geliştirilen tasarım yaklaşımı, saha uygulamaları ve enjeksiyonların etkinliğine ilişkin elde edilen bulgular sistematik olarak değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen iyileştirme uygulamalarının analizi ile benzer mühendislik projelerinde kullanılabilecek teknik bir bilgi birikiminin oluşturulması amaçlanmıştır. Deliçay üzerine inşa edilen ve sulama ile enerji üretimi amaçlı işletilen Morgedik Barajı, kil çekirdekli kaya dolgu tipindedir. . Proje alanı, Van J50-C1 ve J50-C4 numaralı 1/25.000 ölçekli topoğrafik haritalar kapsamında yer almakta olup, konum bilgileri Şekil 1'de gösterilmiştir. Baraja ait teknik özellikler Çizelge 1'de sunulmakta olup, baraj Van iline bağlı Erciş ilçesinin yaklaşık 37 km kuzeydoğusundadır



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası

Çizelge 1. Baraja ait teknik bilgiler

Tipi	Kil çekirdekli kaya dolgu	Maksimum su seviyesi	1025.00m
Kret kotu	2232.50 m	Yıllık ortalama su	240.5hm³/yıl
Kret uzunluğu	237.00 m	Toplam göl hacmi	1025.105 m³
Talvegden yüksekliği	55.00 m	Regülasyon oranı	% 88.24
Temelden yüksekliği	60.00 m	Toplam kurulu güç	4.11 MW
Kret genişliği	10.00m	Proje düşüsü	47.50 m
Derivasyon tüneli	Betonarme (L = 341.50 m., R= 3.5 m)	Proje debisi	2.168 m³/s
Göl alanı	8.20 km²	Yıllık enerji üretimi	10.88 GWh/yıl

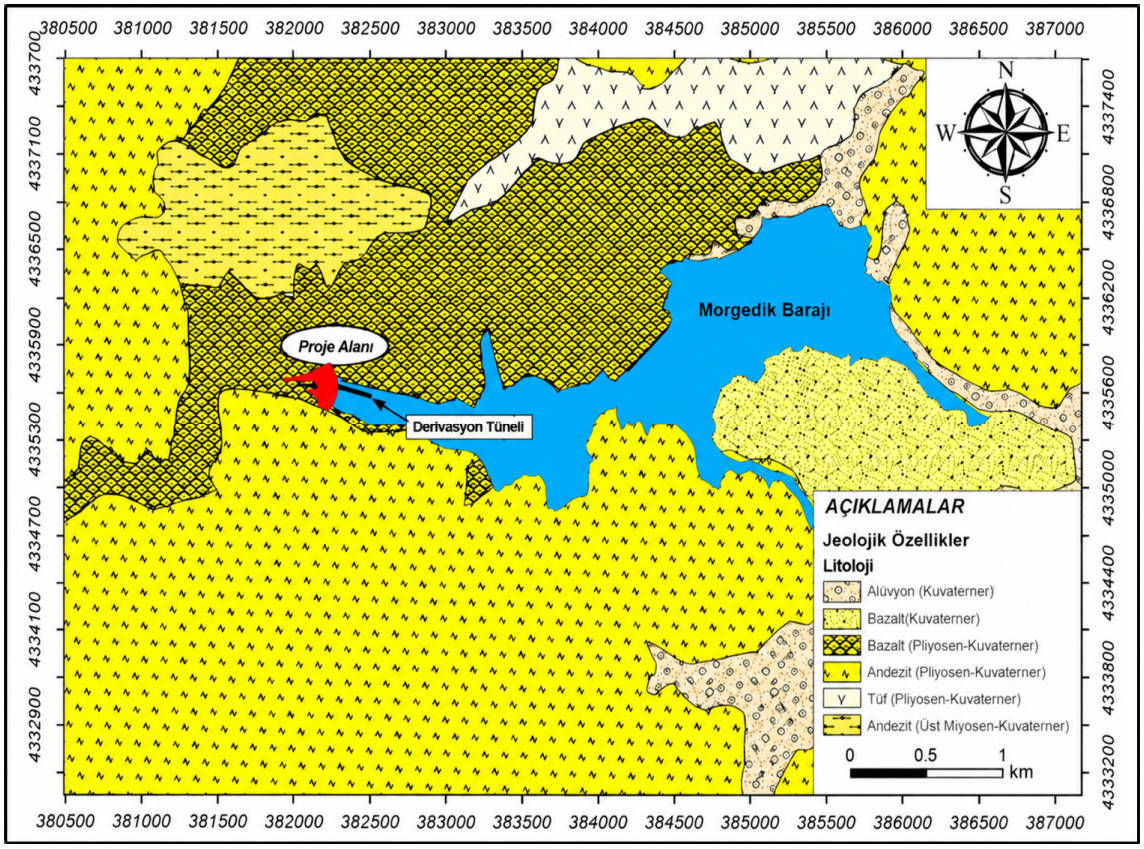
2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Bu çalışmanın ana materyalini; Morgedik Barajı derivasyon tüneli, tünel çevresindeki litolojik birimler, derivasyon tünelinde gözlenen su sızıntıları, kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu uygulamalarında kullanılan araç ve gereçler, enjeksiyon şerbetinde kullanılan kimyasallar ile arazi ve laboratuvar malzemeleri oluşturmaktadır. Morgedik Barajı derivasyon tünelinde gerçekleştirilen kontakt-konsolidasyon enjeksiyonu uygulama projeleri, Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler Dairesi Başkanlığı tarafından yayımlanan Enjeksiyon Teknik Şartnamesi [8] ilkeleri doğrultusunda; baraj yerinin jeolojik ve jeoteknik özellikleri dikkate alınarak hazırlanmıştır.

2.1.1. Baraj Yeri ve Çevresinin Jeolojik Özellikleri

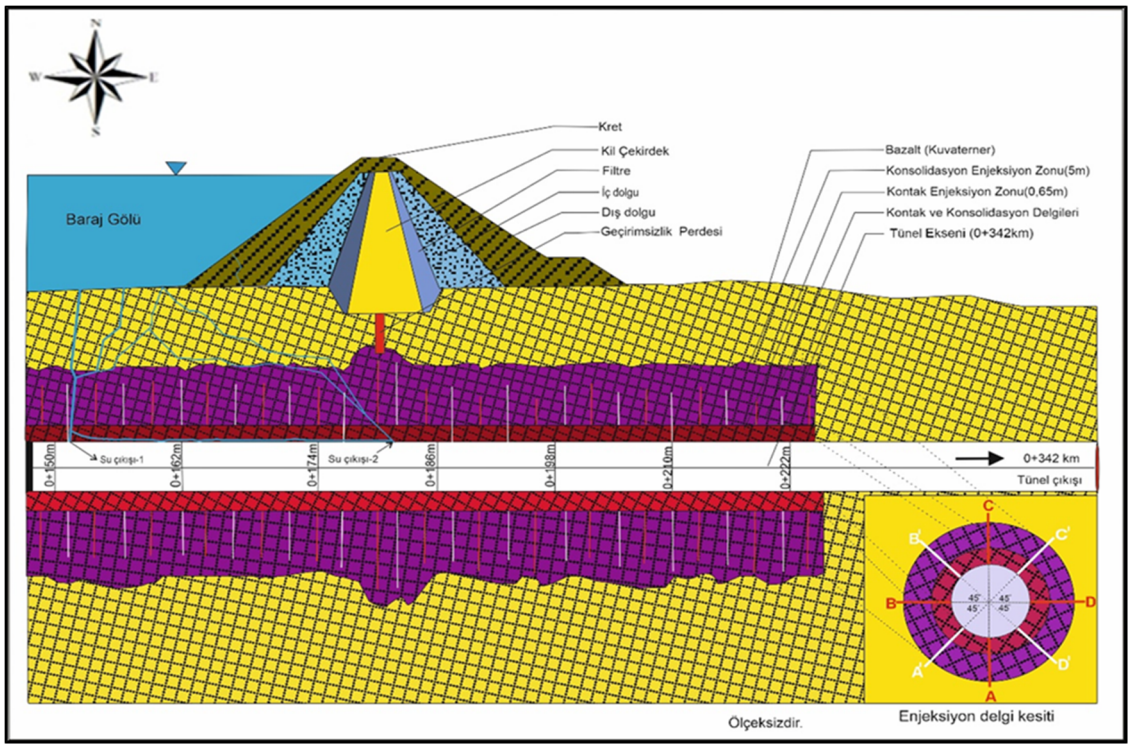
İnceleme alanında gözlenen Üst Miyosen–Kuvaterner yaşlı volkanik birimler, litolojik özellikleri ve yapısal süreksizlikleri nedeniyle baraj temeli ve derivasyon tüneli açısından önemli jeoteknik heterojenlikler sunmaktadır. Özellikle Üst Miyosen yaşlı andezitler ile Pliyosen–Kuvaterner yaşlı sütun bazaltlarda yaygın olarak gelişmiş kırık, çatlak ve süreksizlik sistemleri, kaya kütlesinin mühendislik özelliklerini olumsuz yönde etkilemekte ve su iletimine elverişli yollar oluşturmaktadır [9]. Bu durum, derivasyon tüneli boyunca yerel su sızıntılarının gelişmesine zemin hazırlamaktadır. Derivasyon tünelinin geçtiği sütun bazalt birimlerinde gözlenen tektonik deformasyon ve süreksizlik yoğunluğu, kaya kütlesinin bütünlüğünü azaltmakta ve enjeksiyon gereksinimini artırmaktadır [9]. Özellikle çatlak aralığı geniş, süreksizlik devamlılığı yüksek olan ve bozunmaya uğramış zonlarda, kaya kütlesinin geçirgenliği artmakta; bu alanlar enjeksiyon uygulamaları açısından öncelikli müdahale bölgeleri olarak değerlendirilmektedir. Bu tür zonlarda kontakt enjeksiyonu, kaplama ile kaya kütlesi arasındaki boşlukların doldurulması amacıyla uygulanırken; konsolidasyon enjeksiyonu, kaya kütlesinin daha derin seviyelerinde yer alan süreksizlik ve çatlakların doldurularak su geçiş yollarının sınırlandırılması amacıyla tercih edilmektedir. Enjeksiyon şerbetinin kırık ve çatlak sistemlerini doldurması, öncelikle kaya kütlesinin geçirimsizlik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik olmakla birlikte, süreksizliklerin sürekliliğinin azaltılması yoluyla kaya kütlesinin bütünlüğüne ve mekanik davranışına da olumlu katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Bölgede yayılım gösteren Kuvaterner yaşlı alüvyon birimleri ise düşük taşıma gücü ve yüksek sıkışabilirlik özellikleri nedeniyle baraj temeli açısından risk oluşturmaktadır. Bu birimlerin baraj aksında sınırlı kalınlıklarda bulunması olumlu bir durum olmakla birlikte, alüvyon–ana kaya geçiş zonları potansiyel su kaçak yolları açısından dikkatle değerlendirilmiştir. Bu geçiş zonlarında gerçekleştirilen enjeksiyon uygulamaları, geçirimsizliğin sağlanması ve zemin–kaya etkileşiminin iyileştirilmesi açısından önemli bir rol oynamıştır. Sonuç olarak, Morgedik Barajı ve derivasyon tüneli çevresinde hâkim olan jeolojik ve jeoteknik koşullar, kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonunun birlikte ve aşamalı olarak uygulanmasını gerekli kılmıştır. Kaya kütlesinin süreksizlik özellikleri, litolojik heterojenliği ve yerel alüvyon birimleri dikkate alındığında, enjeksiyon uygulamalarının esas olarak su sızıntılarının kontrolü ve su geçiş yollarının sınırlandırılması amacıyla etkin bir iyileştirme yöntemi olduğu; kırık ve çatlak sistemlerinin doldurulmasının ise kaya kütlesinin bütünlüğü ve mekanik davranışı üzerinde ikincil düzeyde olumlu katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 2. Çalışma alanı ve yakın çevresinin jeoloji haritası [10].

2.1.2. Derivasyon Tünel Güzergâhının Jeoteknik Özellikİnceleme

Morgedik Barajı dipsavak ve derivasyon tünelinde gözlenen su kaçakları yerinde yapılan incelemelerle değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, derivasyon tünelinin km 0+150 kesitinde yaklaşık 10 L/s, km 0+183 noktasında ise yaklaşık 8 L/s debiye sahip su girişleri tespit edilmiştir. Derivasyon tüneli ile baraj gövdesinin mansap sağ sahilinden gelen sulara ait kot ve kilometre bilgileri belirlenmiş; söz konusu sular ile baraj göl suyu arasındaki ilişkinin ortaya konulması amacıyla su numuneleri alınarak kimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, derivasyon tüneli içerisinden alınan su örnekleri ile baraj göl suyunun benzer kökene sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, tünel içerisinden gelen suyun (vana odası) debisinin baraj göl seviyesi ile birlikte artış gösterdiği saptanmıştır. Baraj yerinde yayılım gösteren Tendürek bazaltlarının kırıklı ve çatlaklı yapısı nedeniyle, tünel kazısı sırasında km 0+150 ile km 0+190 arasında yer yer göçükler meydana gelmiş ve tünel tavanında yoğun su gelişleri gözlenmiştir. Bu durum, daha önce uygulanmış enjeksiyonların zamanla yıkanmış veya etkinliğini kaybetmiş olabileceğini göstermektedir. Ortaya çıkan bu olumsuzluklar doğrultusunda, tünel stabilitesinin artırılması ve su gelişlerinin kontrol altına alınması amacıyla ilave enjeksiyon uygulamalarının yapılmasına karar verilmiştir. Morgedik Barajı sağ sahil derivasyon tünelinde, km 0+150 ile km 0+190 arasındaki birimin aşırı derecede ayrıştığı, yer yer kil bantları içeren bazaltlarda yeterli kemerlenmenin sağlanamadığı belirlenmiştir. Bu zonlarda tünel duvarlarında dökülmeler ve kopmalar meydana gelmiş olup, kaya kütlesinin mühendislik özelliklerinin zayıf olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle planlanan konsolidasyon enjeksiyonu uygulamalarında, km 0+150 ile km 0+222 arasında ana kayada 5 m, enjeksiyon perdesi bölümünde ise toplam 5+3 m delgi boyları öngörülmüştür. 5+3 m delgi boyu ile daha önce gerçekleştirilen perde enjeksiyonu ile planlanan konsolidasyon enjeksiyonunun birbiriyle bütünleştirilmesi ve böylece enjeksiyon zonunun sürekliliğinin sağlanması amaçlanmıştır. Bu uygulamanın, tünel çevresindeki zayıf kaya kütlesinin iyileştirilmesine ve mevcut su geçiş yollarının kontrol altına alınmasına katkı sağlayacağı değerlendirilmiştir (Şekil 3).



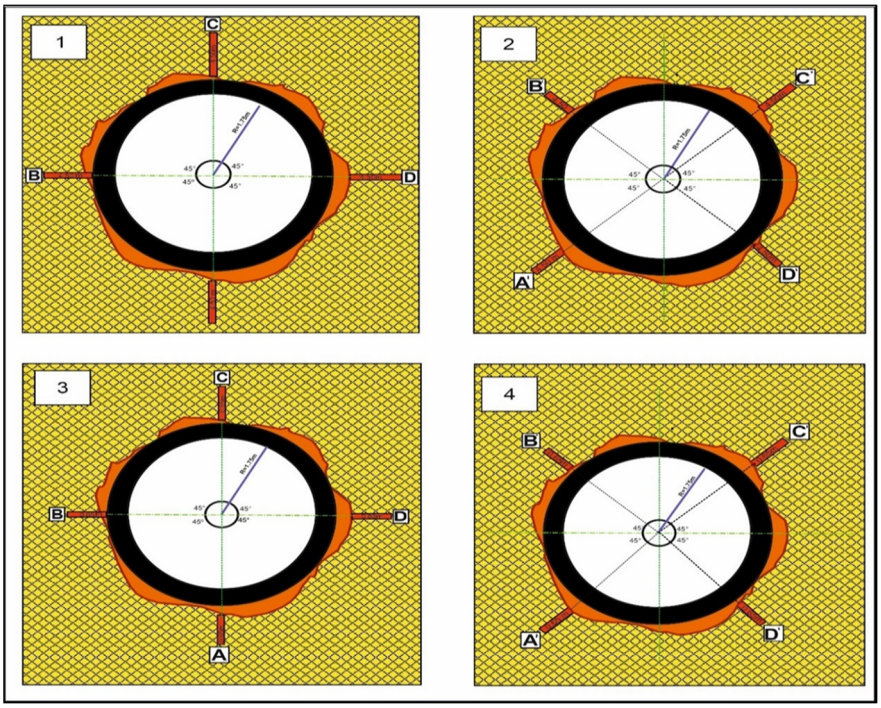
Şekil 3. Morgedik Barajı derivasyon tüneli kontakt ve konsolidasyon enjeksiyon kesiti

2.2. Yöntem

Bu çalışma kapsamında, baraj aksı doğrultusu ile sağ sahilde kesişen ve baraj gövdesine temel oluşturan sütun bazaltları içerisinde açılmış derivasyon tünelindeki su kaçaklarını önlemek amacıyla, km 0+150 ile km 0+222 aralığında kaplama betonu ile ana kaya arasındaki boşlukların doldurulması için kontakt enjeksiyonları; ana kaya kütlesindeki süreksizliklerin ve zayıf zonların iyileştirilmesi amacıyla ise konsolidasyon enjeksiyonları gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon çalışmalarında ano uzunluğu 24 m olarak seçilmiş olup, bu seçim enjeksiyonların daralan ano (split-spacing) yaklaşımına uygun olarak kademeli biçimde sıklaştırılmasına olanak sağlayan bir başlangıç geometrisi oluşturması esasına dayanmaktadır. Nitekim 24 m'lik başlangıç ano uzunluğunun 12, 8, 6, 4, 3 ve 2 m gibi daha küçük aralıklara bölünebilmesi, enjeksiyon alışları ve basınçlı su deneylerinden elde edilen sonuçlara bağlı olarak gerekli görülen kesimlerde delgi aralıklarının kademeli olarak azaltılmasına ve enjeksiyon performansının saha koşullarına göre değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bu kapsamda, yaklaşık 72 m uzunluğundaki su kaçağının gözlendiği derivasyon tüneli kesiminde kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonları üç ano sistemi şeklinde uygulanmıştır. Bununla birlikte, su çıkışlarının debisi ve enjeksiyon alış değerlerine bağlı olarak delgi sayıları, çapları ve yönelimleri saha koşullarına göre yeniden tasarlanmıştır [11]. Kontakt enjeksiyonlarında öncelikle tek numaralı kesitler tamamlanmış, ardından çift numaralı kesitlere geçilmiş; her bir anonun kontakt enjeksiyonu tamamlandıktan ve 14 günlük priz süresi sağlandıktan sonra konsolidasyon enjeksiyonuna geçilmiştir [8].

2.2.1. Delgi Yöntemi

Enjeksiyon delgileri genel olarak 56 mm çapında, döner (rotary) delgi yöntemiyle açılmıştır. Kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonlarına ait ana ve ara kuyular, tünel güzergâhında daha önce gerçekleştirilen temel sondajlarının karotlu olması nedeniyle karotsuz olarak delinmiştir. Delgilerin açıldığı uygun kesitlerde, kontakt ve konsolidasyon kuyularında basınçlı su deneyleri gerçekleştirilerek kaya kütlesinin hidrolik davranışı değerlendirilmiştir [8]. Delgi çalışmalarına öncelikle tek kesitlerden başlanmış; tünel çeperine dik (90°) doğrultuda açılan tek kontakt delgileri ile 45° eğimli çift kontakt delgileri, delme sırasında oluşan formasyon ve beton kırıntılarının uzaklaştırılması amacıyla basınçlı su ile yıkanmıştır (Şekil 4). Aynı temizleme ve kontrol işlemleri konsolidasyon delgileri için de uygulanmıştır [12,13] (Şekil 4).



Şekil 4. Kontakt ve konsolidasyon delgi kesitleri(1-4) tek kesit(A, B, C, D). çift kesit (A', B', C', D').

2.2.2. Enjeksiyonda Kullanılan Malzemeler

Sülfata Karşı Dayanıklı Çimento

Enjeksiyon uygulamalarına geçilmeden önce, derivasyon tüneli vana odası ile rezervuar alanından alınan su örnekleri üzerinde ayrıntılı kimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde özellikle sülfat (SO_4^{2-}) iyonu derişimleri, enjeksiyon malzemesi seçimi açısından değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, mevcut koşullar altında sülfat kaynaklı herhangi bir kimyasal riskin bulunmadığını ortaya koymuştur. Ancak, enjeksiyon uygulamalarının uzun vadeli performansı ve olası hidrojeokimyasal değişimler göz önünde bulundurularak, ilerleyen dönemlerde sülfat etkisinin ortaya çıkma ihtimaline karşı önleyici bir tedbir olarak sülfata dayanıklı çimentonun kullanımı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, uygulama sırasında gerekli görülmesi halinde kullanılmak üzere sülfata dayanıklı çimento temin edilmiştir [14].

Normal Portland Çimento

Derivasyon tüneli enjeksiyon çalışmalarında, sülfata dayanıklı çimentoların kullanılması zorunlu olan alanlar dışında kalan tüm enjeksiyon uygulamalarında, sulu ortamlarda daha yüksek dayanım performansı sergilemesi nedeniyle CEM II tipi katkılı çimentolar tercih edilmiştir. Kullanılan çimentonun özgül yüzeyi 4557 cm^2/g olup, 200 µm göz açıklığına sahip elekte en fazla %1, 90 µm göz açıklığına sahip elekte ise en fazla %9 oranında kalıntı bıraktığı belirlenmiştir [14].

Bentonit

Enjeksiyon uygulamaları sırasında çimento taneciklerinin askıda kalmasını sağlayarak harcın duraylılığını artırmak ve çimento–su karışımında su ayrışmasını en aza indirmek amacıyla, TS EN ISO 13500 standardına uygun sodyumlu karben bentonit kullanılmıştır [14,15]. Gerçekleştirilen tüm enjeksiyonlarda, karışım içeriğindeki çimento miktarının %1'i oranında bentonit ilavesi yapılmıştır.

Kimyasal Katkı Maddeleri

Enjeksiyon sıvısının viskozite değerinin düşürülmesi amacıyla Rheobuild 1000T akışkanlaştırıcı kullanılmış; hızlı priz almasının gerekli olduğu durumlarda ise kimyasal katkı maddesi olarak Sikament AC 326 tercih edilmiştir [16].

2.2.3. Enjeksiyonda Kullanılan Karışımlar

Morgedik Barajı'nda gerçekleştirilen kontakt ve konsolidasyon enjeksiyon çalışmalarında kullanılan şerbet karışımları Çizelge 2'de sunulmuştur. Hazırlanan karışımlara, toplam karışım içeriğindeki çimento miktarının %10 olacak şekilde hazırlanan bentonit çözeltisi ilave edilmiştir.

Çizelge 2. Kontakt ve konsolidasyon enjeksiyon uygulamalarında kullanılan şerbet karışım oranları [8]

Karışım oranı	Çimento	Su	Bentonit		Katkı	Hacim	Yoğunluk
Çimento/Su	(kg)	(L)	(L)	(kg)	(L)	(L)	(gr/cm^3)
1/1	150	136.5	15	1.5	3.75	202.5	1.50
9/10	150	121.5	15	1.5	3.75	187.5	1.152
4/5	150	106.5	15	1.5	3.75	172.5	1.55
5/7	150	93.6	15	1.5	4.50	160	1.59
Yoğunluk (gr/cm^3)	3.13	1	1.11	1.5	1.22	-	-

2.2.4. Kontakt ve Konsolidasyon Enjeksiyon Basınçları

Morgedik barajı sağ sahilinde yer alan derivasyon tünelinin km 0+150–km 0+222 arasındaki bölümünde kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu uygulanmak üzere projelendirilmiştir. Projede farklı kesitlerde delgi boylarının farklı olması ve farklı basınçlarda su çıkışları olduğu için enjeksiyon basınçları ilgili kesitlere göre hesaplanmıştır.

Kontakt ve konsolidasyon kuyularının enjeksiyon basıncı (PT);

$$PT = 0.33 * H \tag{1}$$

formülüne göre hesaplanmıştır.

H = Metre cinsinden kademe ortası kuyu ağzı arasındaki mesafedir. PT = Efektif basınç (kg/cm^2) Gerekli görüldüğünde, proje özelliklerine bağlı olarak bu basınçlar bir miktar artırılıp azaltılabilir. Bir kuyu veya kuyu kademesinin enjeksiyonu sona erdirilirken, manometrede okunacak refü basıncı, kuyunun açılış yönüne bağlı olarak hesaplanmıştır. Derivasyon tünelinde enjeksiyon yapılan kuyularda, yukarı yönlü açılışlarda şerbet sütununun hidrostatik basıncı enjeksiyon basıncına eklenirken; aşağı yönlü açılışlarda ise çıkarılarak bulunmuştur. Ayrıca, eğimli kuyularda şerbetin hidrostatik basıncına kuyu eğimi (düşey ile yaptığı açı) de etki ettiğinden, manometrede okunacak refü basıncı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

Yukarı yönde ve yukarı yönde eğimli kuyularda:

$$\mathrm{Pm} = \mathrm{PT} + (W * L * \cos\alpha)/10 \tag{2}$$

Aşağı yönde ve aşağı yönde eğimli kuyularda:

$$\mathrm{Pm} = \mathrm{PT} - (W * L * \cos\alpha)/10 \tag{3}$$

Burada; PT = Enjeksiyon basıncı (kg/cm^2)
Pm = Manometre basıncı (kg/cm^2)
L = Kuyuda enjekte edilecek kademe ortasından kuyu başı manometresine kadar olan mesafedir.

Manometre kuyunun başında olmadığı durumlarda manometrenin bulunduğu yer ile kuyu arasındaki metre cinsinden düşey mesafe dikkate alınmıştır.

α = Kuyu yönü ile düşey arasındaki açıdır. Bu açı (α = 45˚) sadece yan deliklerde etken olmaktadır. Düşey ve tam yatay deliklerde Cos α=90˚ değeri 1'e eşit oluğundan hesaplanacak basınç değerini değiştirmeyecektir.
W = Enjeksiyon şerbetinin özgül ağırlığıdır [8].

Projede kullanılan enjeksiyon basınçları ve kontrol kuyusu test sonuçları Çizelge 1, 3, 4 ve 5 'te verilmiştir.

Çizelge 3. Derivasyon tüneli kontakt enjeksiyon basınçları

Tek numaralı delgi	Kademe boyu (m)	Efektif basınç Pt(kg/cm²)	Manometre basıncı Pm (kg/cm²)
A	0.65	2.10	2.00
B	0.65	2.10	2.50
C	0.65	2.10	2.80
D	0.65	2.10	2.50
Çift numaralı delgi		Efektif basınç Pt (kg/cm²)	Manometre basıncı Pm (kg/cm²)
A’	0.65	2.10	2.00
B’	0.65	2.10	2.50
C’	0.65	2.10	2.50
D’	0.65	2.10	2.00

Çizelge 4. Derivasyon tüneli konsolidasyon enjeksiyon basınçları

Tek numaralı delgi	Kademe boyu (m)	Efektif basınç Pt. (kg/cm²)	Manometre basıncı Pm. (kg/cm²)
A	0.00-2.50	2.40	2.15
	2.5-5.00	3.25	2.60
B	0.00-2.50	3.40	2.90
	2.5-5.00	3.30	4.10
C	0.00-2.50	2.40	3.20
	2.5-5.00	3.25	4.45
D	0.00-2.50	2.40	2.90
	2.5-5.00	3.30	4.10
Çift numaralı delgi	Kademe boyu (m)	Efektif basınç Pt. (kg/cm²)	Manometre basıncı Pm. (kg/cm²)
A’	0.00-2.5	2.40	2.20
	2.5-5.00	3.25	2.75
B’	0.00-2.5	4.40	2.90
	2.5-5.00	3.25	4.00
C’	0.00-2.5	2.40	2.90
	2.5-5.00	3.25	4.00
D’	0.00-2.5	2.40	2.20
	2.5-5.00	3.25	2.75

Çizelge 5. Perde enjeksiyonu bölgesindeki(0+183km) konsolidasyon enjeksiyon basınçları

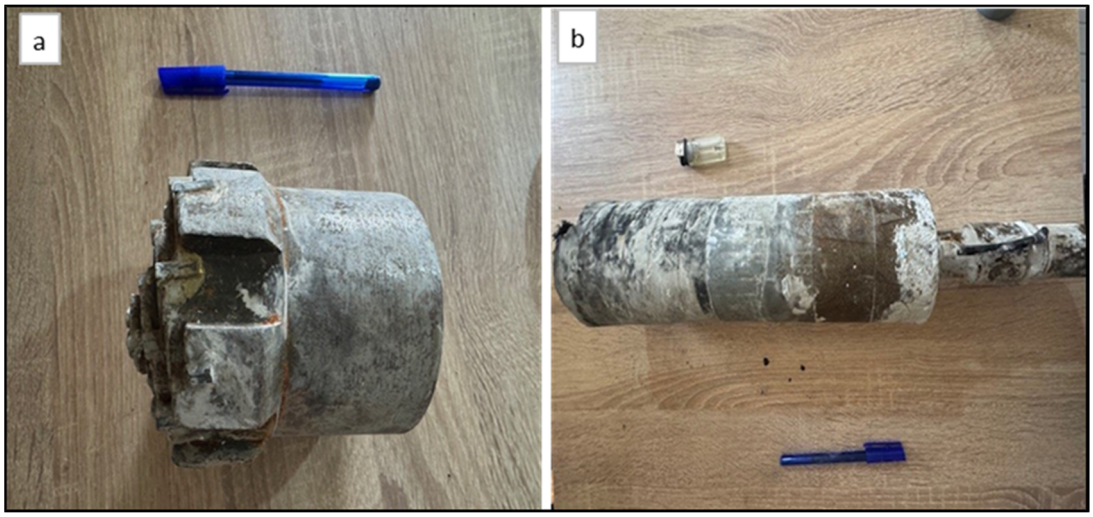
Tek numaralı delgi	Kademe boyu (m)	Efektif basınç Pt. (kg/cm²)	Manometre basıncı Pm. (kg/cm²)
A	0.00-4.00	2.70	2.30
	4.00-8.00	5.2	3.00
B	0.00-4.00	2.70	3.30
	4.00-8.00	4.00	5.20
C	0.00-4.00	2.70	3.60
	4.00-8.00	4.00	5.50
D	0.00-4.00	2.70	3.30
	4.00-8.00	4.00	5.20
Çift numaralı delgi	Kademe boyu (m)	Efektif basınç Pt. (kg/cm²)	Manometre basıncı Pm. (kg/cm²)
A’	0.00-4.00	3.00	3.00
	4.00-8.00	4.00	3.25
B’	0.00-4.00	2.70	3.25
	4.00-8.00	4.00	5.00
C’	0.00-4.00	3.00	3.20
	4.00-8.00	4.00	5.00
D’	0.00-4.00	3.00	2.95
	4.00-8.00	4.00	3.25

Kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonları, uygulama amacı ve hedeflenen kaya zonu bakımından birbirinden ayrılmaktadır. Kontakt enjeksiyonu, tünel kaplaması ile çevre kaya arasındaki temasın iyileştirilmesine yönelik olarak uygulanırken, konsolidasyon enjeksiyonu daha derindeki kaya kütlesinde bulunan süreksizlik ve zayıf zonların iyileştirilmesine yönelik olarak uygulanmıştır. Bu iki uygulama, enjeksiyon programında birbirini izleyen aşamalar olarak gerçekleştirilmiştir.

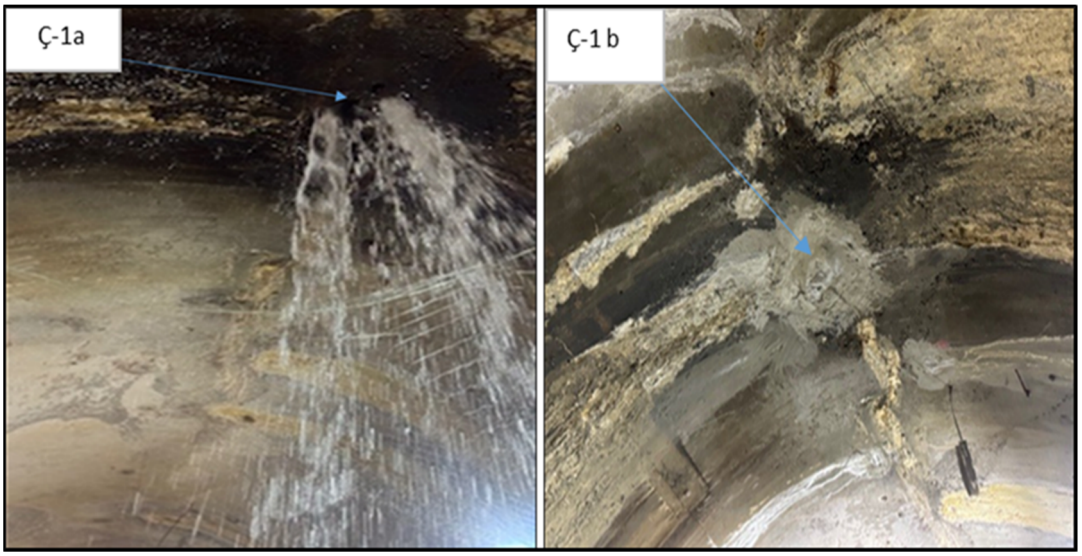
Kontakt Enjeksiyonu

Kontakt enjeksiyonunda delgi boyları, kaplama betonu kalınlığına ek olarak 35 cm kaya ortamı içerisine uzanacak şekilde belirlenmiştir. Bu yaklaşım ile beton–kaya ara yüzeyinde kazı hasarı ve patlatma etkisi sonucu gelişen zayıflamış zonun enjeksiyon kapsamına alınması amaçlanmıştır. Belirlenen derinlik, enjeksiyon şerbetinin temas yüzeyindeki boşluklara ve gevşek kaya dokusuna etkin biçimde nüfuz etmesini sağlarken, aynı zamanda enjeksiyon basınçlarının kontrol altında tutulmasına ve kaplama betonunun yapısal bütünlüğünün korunmasına olanak tanımıştır. Enjeksiyon uygulamaları 24 m uzunluğundaki anolar hâlinde gerçekleştirilmiştir. Basınçlı su çıkışlarının gözlendiği kesitlerde, su girişlerinin kontrol altına alınabilmesi amacıyla 56 mm ve 114 mm çaplarında farklı delgiler açılmıştır. Enjeksiyon işlemleri, öncelikle tünel içerisindeki tek kesitlerden başlanarak sırasıyla tünel tabanı, sol yan, sağ yan ve tavan deliklerine, A, B, D, C sıralamasına göre uygulanmıştır (Şekil 4). Tek kesit enjeksiyonlarının tamamlanmasının ardından 14 günlük priz süresi beklenmiş ve daha sonra çift kesit enjeksiyon aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada enjeksiyonlar, sırasıyla tünel tabanı, sol yan alt–üst ve sağ yan alt–üst deliklerine, A’, D’, B’, C’ sıralamasıyla gerçekleştirilmiştir [8]. Derivasyon tünelindeki kontakt enjeksiyon çalışmalarına taban deliklerinden 1/1 çimento–su karışım oranına sahip şerbet ile başlanmıştır. 1 m³ şerbet verilmesine rağmen manometre basıncında artış gözlenmemesi durumunda, sırasıyla 9/10, 4/5 ve 5/7 çimento–su karışım oranlarındaki karışımdan 1 m³, 1 m³ ve 5 m³ uygulanmıştır. Toplamda 8 m³ şerbet verilmesine karşın refü basıncı elde edilememesi hâlinde enjeksiyona ara verilerek priz süresi beklenmiştir.

Bu süreçte, kuyunun refü göstermemesine neden olabilecek jeolojik ve jeoteknik koşullar değerlendirilmiş ve ilgili enjeksiyon kademesinin metodolojisi gözden geçirilmiştir [8]. Refü sağlanamayan kademeler temizlendikten sonra enjeksiyon işlemlerine yeniden başlanmıştır. Yeniden enjeksiyona geçildiğinde, basınç değeri kademe refü basıncının yarısı veya daha düşük ise başlangıç şerbeti (1/1) ile 0,25 m³ enjeksiyon yapılmış, ardından priz süresince kullanılan karışımla uygulamaya devam edilmiştir. Şerbet karışımı ile hedef basınca ulaşılıp 10 dakika boyunca kademe şerbet almadığında, başlangıç şerbetine dönülerek enjeksiyon bu karışımla sürdürülmüştür. Kademenin 20 dakika içerisinde 0,6 L/m/dk veya daha düşük miktarda şerbet alması durumunda refü sağlanmış kabul edilerek enjeksiyon sonlandırılmış ve bir sonraki kademeye ya da deliğe geçilmiştir [8]. Bu enjeksiyon metodolojisi, basınçlı su çıkışlarının yoğun olarak gözlendiği 14C ve 23C kesitlerinde eksiksiz biçimde uygulanmıştır. Diğer kesitlerde ise farklı karışım oranları kullanılarak refü basıncına ulaşılmış ve enjeksiyon işlemleri tamamlanmıştır (Çizelge 2).
Morgedik Barajı derivasyon tünelinde km 0+150–km 0+222 aralığında tespit edilen yüksek basınçlı su girişlerinin önlenmesi amacıyla gerçekleştirilen kontakt enjeksiyon çalışmaları, ayrıntılı planlama ve kademeli enjeksiyon yaklaşımı ile yürütülmüştür. Basınçlı su çıkışlarının görüldüğü noktalarda 114 mm çapında delgiler açılmış ve bu deliklere 112 mm çapında mekanik pakerler yerleştirilmiştir (Şekil 5). Enjeksiyon uygulamaları üç basınç kademesinde planlanmış; birinci kademede 2 bar, ikinci ve üçüncü kademelerde ise 3'er bar basınç artışı uygulanmıştır. Yüksek alış değerlerine bağlı olarak yalancı refü oluşumunu önlemek amacıyla günlük ortalama 23.103 L şerbet kullanılmıştır. Şerbet üretiminde çimento esaslı karışımlar tercih edilmiştir. Her 25 ton çimento kullanımı (yaklaşık 27.103 L çimento enjeksiyonu) sonrasında, şerbetin formasyon içerisinde priz alabilmesi için ilgili kuyu 24 saat dinlendirilmiş ve ardından enjeksiyona yeniden başlanmıştır [8]. Bu işlem, refü basıncına ulaşılıncaya kadar 72 saatlik aralıklarla sürdürülmüştür. Uygulamalar, tünel kesitinde su çıkışlarının yoğun olduğu 23C ve 14C numaralı kontakt kuyularında gerçekleştirilmiştir (Şekil 6 ve 7). Bu kuyular, kırıklı ve çatlaklı sütun bazalt birimleri içerisinde yoğun su girişlerinin gözlendiği zonları temsil etmektedir. Kuyu lokasyonlarının belirlenmesinde; kaya kütlesinin süreksizlik yoğunluğu ve sürekliliği, çatlak açıklıkları, alterasyon derecesi, yeraltı suyu seviye ve akım yönleri ile tünel kazısı sırasında gözlenen su geliş debileri gibi jeolojik ve hidrojeolojik parametreler belirleyici olmuştur [13]. Gerçekleştirilen enjeksiyon çalışmaları sonucunda yüksek basınçlı su girişleri büyük ölçüde kontrol altına alınmış ve tünel yapısının su geçirimsizliği önemli ölçüde sağlanmıştır (Şekil 6 ve 7).



Şekil 5. Basınçlı su çıkışlarının yoğun olarak gözlendiği kesitlerde kullanılan ekipmanlar: kapalı matkap (a) ve mekanik paker (b)

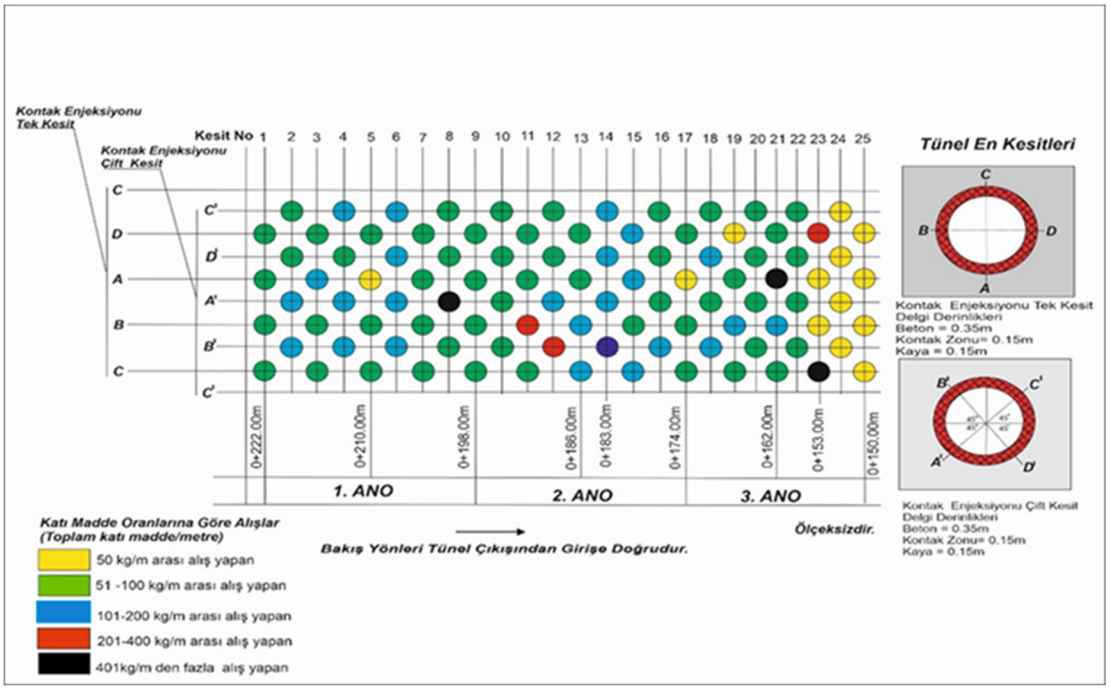


Şekil 6. Enjeksiyon öncesi ve sonrası su çıkışlarının yoğun olarak gözlendiği 14C numaralı kesit



Şekil 7. Enjeksiyon öncesi ve sonrası su çıkışlarının yoğun olarak gözlendiği 23C numaralı kesit

Bu metodoloji, derivasyon tünelinde yer alan tüm enjeksiyon kuyularında titizlikle uygulanmış ve kontakt ile konsolidasyon enjeksiyon çalışmalarının etkin biçimde yürütülmesi sağlanmıştır. Her bir kuyu için enjeksiyon süresince kullanılan katı madde miktarları düzenli olarak kaydedilmiş; elde edilen veriler esas alınarak derivasyon tünelinde katı madde alışının mekânsal dağılımını gösteren kesitler oluşturulmuştur. Bu kesitler, enjeksiyon uygulamalarının etkinliğinin değerlendirilmesi ve su sızıntılarının azaltılmasında önemli bir veri seti sunmuştur. Ayrıca enjeksiyon malzemesinin farklı zonlarda tüketim oranı ve yeraltı ortamına nüfuz derecesi bu kesitler üzerinden analiz edilmiştir [13]. Böylece enjeksiyon parametrelerinin optimize edilmesi, gerekli durumlarda enjeksiyon programının yeniden düzenlenmesi ve mühendislik uygulamalarının yönlendirilmesi mümkün olmuştur (Şekil 8).

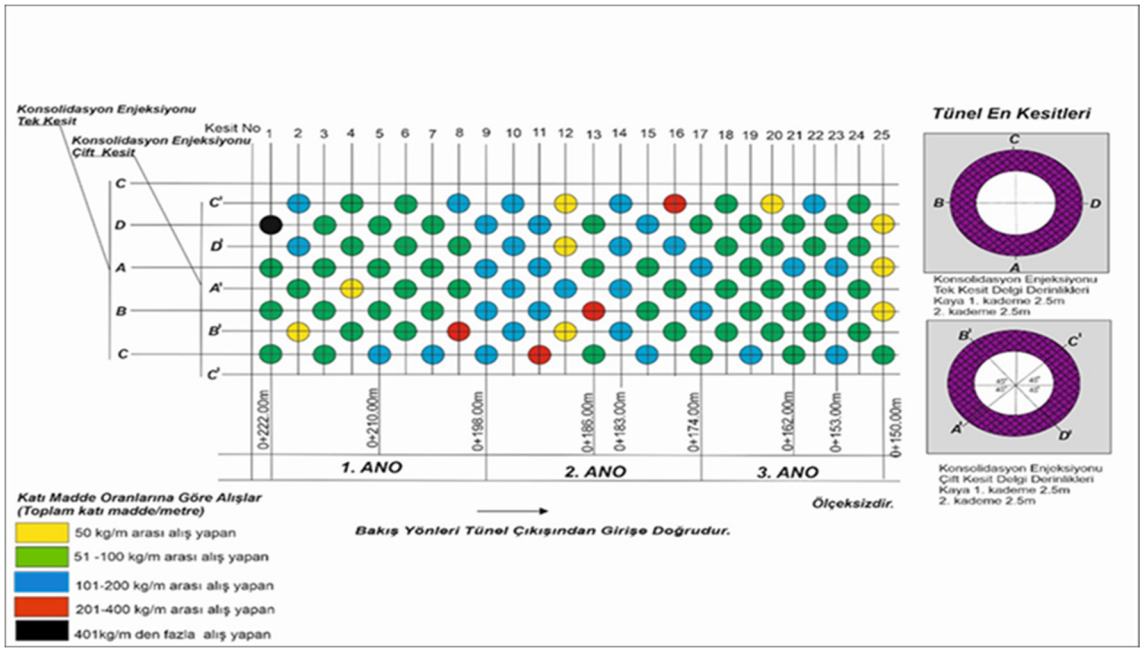


Şekil 8. Derivasyon tünelinde gerçekleştirilen kontakt enjeksiyonuna ait katı madde alış grafiği

Konsolidasyon Enjeksiyonu

Kontakt enjeksiyon uygulamasında en az iki anoya ait işlemler tamamlandıktan veya 14 günlük priz süresi dolduktan sonra, konsolidasyon enjeksiyonu delgileri, daha önce kontakt enjeksiyonu yapılmış deliklerin delgi boyları uzatılarak açılmıştır. Bu uygulama, enjeksiyon yapılan zonların derinlemesine sağlamlaştırılması ve kaya kütlesinin su geçirimsizliğinin artırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Konsolidasyon enjeksiyonu için açılan delgiler genellikle toplam 5 m uzunluğunda planlanmış ve enjeksiyonun aşamalı ve kontrollü biçimde uygulanabilmesi amacıyla 2+3 m kademelere ayrılmıştır. Derivasyon tünelinin perde enjeksiyonu ile kesiştiği kritik kesitlerde, zemin ve kaya kütlesinin daha yüksek geçirimsizlik gereksinimi nedeniyle konsolidasyon delgi boyları 8 m olarak belirlenmiş ve enjeksiyon işlemleri 2+3+3 m kademeleri şeklinde yürütülmüştür. Bu sayede enjeksiyon şerbetinin yeraltı ortamına nüfuz derinliği artırılmış ve su kaçaklarının etkin biçimde önlenmesi hedeflenmiştir. Konsolidasyon enjeksiyonlarına, kontakt enjeksiyon metodolojisiyle uyumlu olacak şekilde taban deliklerinden 1/1 (çimento/su) oranlı şerbetle başlanmıştır. Enjeksiyonun başlangıç aşamasında hacim düşük tutulmuş ve genellikle 1 m³ şerbet verilerek kontrol sağlanmıştır. Bu yaklaşım, şerbetin kılcal boşluklara daha etkin şekilde nüfuz etmesine olanak tanımıştır. Enjeksiyon sırasında hedeflenen refü basıncına ulaşıldığında ve devam eden süreçte, 10 dakikalık gözlem süresi boyunca kademenin şerbet almaması ya da 20 dakika içerisinde litre/metre/dakika cinsinden şerbet tüketiminin 0.6 veya daha az olması durumunda, enjeksiyonun etkin biçimde tamamlandığı ve refü sağlandığı kabul edilmiştir [8,13]. Söz konusu kriterler, enjeksiyonun doluluk ve tıkanma düzeyinin belirlenmesinde temel parametreler olarak değerlendirilmiştir. Bu uygulama tüm kesit ve deliklerde tekrarlanarak enjeksiyonun homojenliği ve genel etkinliği artırılmıştır. Konsolidasyon enjeksiyonlarıyla, yeraltı yapısındaki potansiyel su sızıntı yollarının kapatılması ve enjeksiyon malzemesinin boşlukları kayıpsız biçimde doldurarak süreklilik gösteren bir geçirimsiz tabaka oluşturması amaçlanmıştır [8]. Uygulama süresince kullanılan enjeksiyon katı madde miktarları düzenli

olarak kaydedilmiş ve bu veriler kullanılarak derivasyon tüneline ait konsolidasyon enjeksiyonu katı madde alış kesitleri oluşturulmuştur (Şekil 9). Bu kesitler, enjeksiyonun mekânsal verimliliğinin ve şerbet dağılımının değerlendirilmesi, enjeksiyon stratejilerinin optimize edilmesi ve benzer mühendislik projeleri için karşılaştırmalı veri oluşturulması amacıyla kullanılmıştır[13].



Şekil 9. Derivasyon tünelinde uygulanan konsolidasyon enjeksiyonuna ait katı madde alış grafiği [8]

Kontrol Delgileri ve Testleri

Morgedik Barajı derivasyon tünelinde gerçekleştirilen kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu uygulamalarının ardından, enjeksiyon zonunun geçirimsizlik sağlama kapasitesini ve uygulamanın genel etkinliğini değerlendirmek amacıyla basınçlı su testleri yapılmıştır. Ortalama 0,65 m derinlikte ve 56 mm çapındaki kontrol delgilerinde gerçekleştirilen bu testlerde, enjeksiyon uygulamalarının ardından doğal su akışlarının kesilmesi sonrasında, enjeksiyon zonunun sızdırmazlık durumunu kontrol etmek amacıyla delgilere belirli bir basınç altında su verilmiştir. Testlerde, enjeksiyon basıncının yaklaşık %90'ına karşılık gelen basınç altında 10 dakika süreyle su verilmiş ve bu süre boyunca gerçekleşen su sarfiyatları ölçülmüştür. Enjeksiyon öncesinde doğal akış koşullarında gözlenen su çıkışları (Çıkış-1: 8 L/s, Çıkış-2: 10 L/s) ile enjeksiyon sonrasında basınç altında gerçekleştirilen kontrol testlerinde ölçülen 9,5–14 L/dk aralığındaki su sarfiyatları, farklı hidrolik koşulları temsil etmeleri nedeniyle doğrudan karşılaştırılmamıştır. Basınçlı su testlerinden elde edilen su sarfiyatı değerleri, enjeksiyon zonunun uygulanan test basıncı altında su kabul etme davranışının ve sızdırmazlık durumunun değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Buna ek olarak, çok kademeli olarak test edilen C ve D serisi enjeksiyon kuyularında gerçekleştirilen Lugeon testleri ile kaya kütlesinin geçirgenlik davranışı analiz edilmiştir. Bu kuyularda ölçülen Lugeon değerlerinin 3–5 aralığında kaldığı, derin zonlarda geçirgenlik katsayısının 10^{-7}–10^{-8} m/s mertebesinde olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, özellikle zayıf zonlarda su geçiş yollarının kontrol altına alındığını ortaya koymaktadır. B çiftindeki kontrol delgilerinde ölçülen nispeten yüksek su sarfiyatı değerleri ise, yerel kırıklılık yoğunluğunun fazla olması veya enjeksiyonun bu kesitlerde yeterli düzeyde etkili olmaması ile ilişkilendirilmiştir. Özellikle K3–K4 kontrol delgisinde, 2,25 kg/cm² basınç altında ölçülen 13–14 L/dk değerlerindeki su sarfiyatı, bu kesitte enjeksiyon zonunun diğer bazı kesitlere göre daha fazla su kabul ettiğini göstermiştir. Bu durum, kaya kütlesi içerisinde sürekliliği yüksek çatlak sistemlerinin veya enjeksiyon zonu dışına uzanan ikincil geçirgenlik yollarının varlığına işaret etmektedir. Bu doğrultuda, söz konusu kesitte enjeksiyon perdesinin sürekliliğini ve etkinliğini artırmak amacıyla ilave enjeksiyon uygulamaları gerçekleştirilmiş, sonrasında yapılan kontrol testlerinde su sarfiyatının belirgin biçimde azaldığı gözlenmiştir. Elde edilen bulgular, bölgesel jeolojik koşullar dikkate alınarak enjeksiyon uygulamalarının gerektiğinde tekrarlanmasının, tünel çevresinde hedeflenen geçirimsizlik seviyesine ulaşılmasında önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 6. Kontrol delgilerine ait basınçlı su testi sonuçları [8]

Delgi no	Delgi çapı (mm)	Kademe delgi derinliği (m)	Test süresi (dk)	Kontrol kuyuları test basınçları (kg/cm^2)	Kademe su sarfiyatı	
					1.5 dk	2. 5dk
K1 - K2 (A çift)	56	0.65	10	1.8	12	11
K3 – K4 (B çift)	56	0.65	10	2.25	14	13
K6 – K7 (A çift)	56	0.65	10	1.8	12	11
K7 – K8 (A çift)	56	0.65	10	1.8	14	11.5
K9 – K10 (A çift)	56	0.65	10	1.8	11	9.5
K11 – K12 (C tek)	56	0.65	10	1.8	13	11.5
K13 – K14 (C tek)	56	0.65	10	2.25	14	10.5
K9 – K10 (D çift)	56	0.00 -2.50	10	2.7	15	14.5
		2.50 - 5.00	10	3.24	17	15
K11 – K12 (C tek)	56	0.00 - 2.50	10	2.88	16	14.5
		2.50 - 5.00	10	4.5	20	17.5
K13 – K14 (B tek)	56	0.00- 2.50	10	2.7	14	11
		2.50 - 5.00	10	3.24	18	15.5

3. BULGULAR

Morgedik Barajı derivasyon tünelinde uygulanan kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonlarının etkinliği; enjeksiyon sırasında kaydedilen şerbet alış miktarları, enjeksiyon sonrası gerçekleştirilen basınçlı su testleri, kontrol delgileri ve Lugeon deneyleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, enjeksiyon uygulamalarının su sızıntılarının azaltılması ve kaya kütlesinin geçirimsizlik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır.

3.1. Enjeksiyon Alış Davranışına İlişkin Bulgular

Kontakt enjeksiyonu uygulamaları sırasında, enjeksiyon şerbetinin özellikle kırıklı ve çatlaklı sütun bazalt birimlerinde yüksek alış miktarları gösterdiği belirlenmiştir. Katı madde alış grafikleri incelendiğinde, km 0+150–0+222 aralığında yer alan enjeksiyon zonlarında alışların homojen olmadığı; bazı kesitlerde yüksek, bazı kesitlerde ise sınırlı düzeyde gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum, kaya kütlesinin süreksizlik yoğunluğu ve sürekliliği açısından belirgin bir heterojenlik sunduğunu göstermektedir. Kontakt enjeksiyonlarında, özellikle 14C ve 23C kesitlerinde enjeksiyon şerbeti tüketiminin belirgin şekilde arttığı ve refü basıncına ulaşmanın daha uzun sürede gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu kesitlerde enjeksiyonun çok kademeli olarak ve yüksek hacimli şerbet kullanılarak tamamlanması, kaya kütlesindeki açık çatlak sistemlerinin varlığına işaret etmektedir. Buna karşılık, diğer kesitlerde refü basıncına daha düşük hacimlerde ve daha kısa sürede ulaşılması, enjeksiyonun bu bölgelerde daha etkin şekilde sonuçlandığını göstermektedir. Konsolidasyon enjeksiyonlarında ise katı madde alışlarının, kontakt enjeksiyonlara kıyasla daha kontrollü ve derinliğe bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle 2,5–5,0 m ve 4,0–8,0 m derinlik kademelerinde enjeksiyon şerbeti alışlarının devam etmesi, süreksizliklerin derin zonlara kadar uzandığını ortaya koymuştur. Bu bulgu, konsolidasyon enjeksiyonunun kaya kütlesinin derin seviyelerinde geçirimsizlik sağlama açısından kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

3.2. Basınçlı Su Testi Bulguları

Kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonlarının tamamlanmasının ardından gerçekleştirilen basınçlı su testleri, enjeksiyon zonunun sızdırmazlık durumunun ve test basıncı altındaki su kabul davranışının değerlendirilmesi amacıyla uygulanmıştır. Ortalama 0,65 m derinlikte ve 56 mm çapında gerçekleştirilen kontrol delgilerinde, enjeksiyon sonrasında doğal su akışlarının kesilmesinin ardından, enjeksiyon basıncının yaklaşık %90'ına karşılık gelen basınç altında 10 dakika süreyle su verilmiş ve su sarfiyatları ölçülmüştür. Kontrol testlerinde ölçülen su sarfiyatlarının 9,5–14 L/dk aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu değerler, enjeksiyon öncesinde doğal akış koşullarında gözlenen 8–10 L/s arasındaki su çıkışlarından farklı hidrolik koşullarda elde edildiğinden, söz konusu ölçümler doğrudan karşılaştırılmamıştır. Enjeksiyon öncesindeki doğal su çıkışları tünel çevresindeki mevcut su geçişlerinin belirlenmesinde, enjeksiyon sonrasındaki basınçlı su testleri ise enjeksiyon zonunun belirli bir test basıncı altında su kabul etme

davranışının ve sızdırmazlık durumunun kontrol edilmesinde kullanılmıştır. Kontrol delgileri bazında değerlendirildiğinde, A ve C çiftlerinde ölçülen su sarfiyatlarının genel olarak daha düşük, B çiftindeki kontrol delgilerinde ise daha yüksek olduğu görülmüştür. Özellikle K3–K4 kontrol delgisinde 2,25 kg/cm² test basıncı altında 13–14 L/dk su sarfiyatı ölçülmesi, bu kesitte enjeksiyon zonunun diğer bazı kesitlere göre daha fazla su kabul ettiğini göstermektedir. Bu durum, yerel kırıklılık yoğunluğunun fazla olması veya enjeksiyon zonu içerisinde sürekliliği yüksek geçirgenlik yollarının bulunması ile ilişkili olabilir. Bu kesitte gerçekleştirilen ilave enjeksiyon uygulamasının ardından yapılan kontrol testlerinde su sarfiyatının belirgin biçimde azalması, enjeksiyon uygulamasının söz konusu kesitteki sızdırmazlık koşullarının iyileştirilmesine katkı sağladığını göstermektedir. Genel olarak, kontrol delgilerinde elde edilen su sarfiyatı değerleri, enjeksiyon zonunun farklı kesimlerinde sızdırmazlık koşullarının yerel jeolojik özelliklere bağlı olarak değişebildiğini ortaya koymaktadır.

3.3. Lugeon Testi Bulguları

Çok kademeli olarak test edilen C ve D serisi enjeksiyon kuyularında gerçekleştirilen Lugeon testleri, enjeksiyon sonrası kaya kütlesinin geçirgenlik özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Lugeon (Lu) değeri, 1 MPa (10 bar) etkin test basıncı altında, 1 m uzunluğundaki test zonundan dakikada alınan su miktarını ifade etmektedir. Kaya kütlesinin hidrolik geçirgenlik katsayısının yaklaşık olarak belirlenmesinde yaygın kullanılan bağıntı $k \approx Lu \times 10^{-7}$ m/s şeklindedir [17]. Bununla birlikte, Lugeon–geçirgenlik ilişkisi test zonunun uzunluğu, kuyu çapı, kaya kütlesinin süreksizlik özellikleri ve hidrolik sınır koşullarından etkilenebildiğinden, bu bağıntı yaklaşık bir korelasyon olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, C ve D serisi enjeksiyon kuyularında ölçülen Lugeon değerlerinin 3–5 Lu aralığında olduğu belirlenmiştir. Söz konusu bağıntı kullanıldığında, bu değerler yaklaşık 3×10^{-7}–5×10^{-7} m/s aralığında hidrolik geçirgenlik katsayılarına karşılık gelmektedir. Lugeon değerlerinin 3–5 aralığında olması, kaya kütlesinin düşük geçirgenlik gösterdiğine işaret etmektedir. Elde edilen sonuçlar, enjeksiyon uygulamalarından sonra kaya kütlesindeki su iletim yollarının sınırlandırıldığını ve özellikle derin seviyelerde uygulanan konsolidasyon enjeksiyonlarının hidrolik davranışın iyileştirilmesine katkı sağladığını göstermektedir.

3.4. Kritik Kesitlerde Enjeksiyon Performansı

Şekil 8'de verilen kontakt enjeksiyonu katı madde alış dağılımı incelendiğinde, enjeksiyon alışlarının kesitler arasında belirgin farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Katı madde alışlarının ≤50 kg/m ile >50 kg/m arasında değişen sınıflarda gerçekleşmesi, kaya kütlesindeki süreksizliklerin mekânsal olarak homojen olmadığını göstermektedir. Özellikle 14C ve 23C kesitlerinde yüksek katı madde alışlarının gözlenmesi ve bu kesitlerde refü basıncına ulaşmanın daha uzun sürmesi, enjeksiyon şerbetinin daha fazla miktarda ve daha uzun süre süreksizlik sistemlerine nüfuz ettiğini göstermektedir. Buna karşılık, daha düşük alış gösteren kesitlerde hedeflenen refü basıncına daha kısa sürede ulaşılması, enjeksiyon sırasında şerbet tüketiminin daha sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Bu değerlendirme, enjeksiyon basıncı altında gerçekleşen şerbet alış davranışının kaya kütlesindeki süreksizliklerin özellikleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir. Enjeksiyon sonrasında C ve D serisi kuyularda elde edilen 3–5 Lu aralığındaki Lugeon değerleri ise bu kesimlerde kaya kütlesinin düşük geçirgenlik gösterdiğine işaret etmektedir. Kontakt enjeksiyonlarında gözlenen yüksek alış değerleri ile enjeksiyon sonrasında gerçekleştirilen Lugeon deneylerinden elde edilen düşük değerler birlikte değerlendirildiğinde, enjeksiyon şerbetinin süreksizlik yoğunluğu ve geçirgenliği yüksek zonlara nüfuz ettiği ve enjeksiyon uygulamalarının ardından kaya kütlesindeki su iletim yollarının sınırlandırıldığı değerlendirilmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Morgedik Barajı derivasyon tünelinde sütun bazaltlar içerisinde gelişen su sızıntılarının kontrol altına alınması amacıyla uygulanan kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonlarının performansı saha verileri ışığında değerlendirilmiştir. Enjeksiyon öncesinde gerçekleştirilen gözlem ve ölçümler, km 0+150–0+190 aralığında yoğunlaşan su gelişlerinin kırıklı–çatlaklı, ileri derecede altere ve yer yer kil bantları içeren bazalt zonlarıyla ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Enjeksiyon uygulamaları sonucunda derivasyon tünelinde gözlenen doğal su çıkışları kontrol altına alınmış ve özellikle vana odası bölgesinde ölçülen

debilerin baraj göl seviyesiyle olan hidrolik bağı büyük ölçüde zayıflatılmıştır. Bu sonuç, enjeksiyon uygulamalarının lokal boşlukların doldurulmasının yanı sıra ana kaya içerisindeki su geçiş yollarının sürekliliğinin sınırlandırılmasına da katkı sağladığını göstermektedir. Enjeksiyon sonrasında gerçekleştirilen basınçlı su testlerinde ölçülen su sarfiyatları, enjeksiyon zonunun belirli test basınçları altındaki su kabul davranışının değerlendirilmesine ve enjeksiyon perdesinin sızdırmazlık performansının kontrol edilmesine olanak sağlamıştır. Enjeksiyon öncesinde gözlenen doğal su debileri ile enjeksiyon sonrasında basınç altında gerçekleştirilen kontrol deneylerinde ölçülen su sarfiyatlarının farklı hidrolik koşulları temsil ettiği dikkate alınmış ve bu değerler doğrudan karşılaştırılmamıştır. Böylece enjeksiyon performansı, doğal su çıkışlarının kontrol altına alınması ile basınçlı su deneylerinden elde edilen kontrol sonuçları kendi deney koşulları içerisinde değerlendirilmiştir. Ano uzunluğunun 24 m olarak seçilmesi ve enjeksiyonların azalan aralık yöntemiyle üç kademeli sistem şeklinde uygulanması, enjeksiyon basınçlarının kontrollü biçimde iletilmesine olanak sağlamış ve istenmeyen hidrolik yayılım ile enjeksiyon kayıplarının sınırlandırılmasına katkıda bulunmuştur. Enjeksiyon alış değerlerinin kademeler ilerledikçe azalması, kaya kütlesindeki süreksizliklerin giderek daha fazla doldurulduğuna ve geçirgenlik koşullarında iyileşme sağlandığına işaret etmektedir. Kontakt enjeksiyonlarının kaplama betonu ile ana kaya arasındaki boşlukların doldurulmasında, konsolidasyon enjeksiyonlarının ise kaya kütlesindeki süreksizlik ve çatlakların doldurularak su geçiş yollarının sınırlandırılmasında etkili olduğu değerlendirilmiştir. Özellikle kritik 14C ve 23C kesitlerinde gözlenen yüksek enjeksiyon alışları ve refü basıncına ulaşmanın daha uzun sürmesi, enjeksiyon gereksiniminin kaya kütlesindeki süreksizlik özelliklerine bağlı olarak önemli ölçüde değişebildiğini göstermiştir. Bu kesitlerden elde edilen saha bulguları ile enjeksiyon sonrası gerçekleştirilen basınçlı su deneyleri ve C ve D serisi kuyularda elde edilen Lugeon sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi, enjeksiyon performansının yalnızca tek bir parametre üzerinden değil; jeolojik koşullar, enjeksiyon alış davranışı, uygulanan basınç ve enjeksiyon sonrası hidrolik kontrol sonuçları birlikte dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bazı kontrol kesitlerinde ölçülen görece yüksek su sarfiyatları da enjeksiyon performansının kaya kütlesindeki jeolojik heterojenliklere duyarlı olduğunu ve gerekli durumlarda enjeksiyon tasarımının saha sonuçlarına göre revize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle enjeksiyon uygulamalarının tek aşamalı bir işlemden ziyade, saha gözlemleri ve kontrol deneylerinden elde edilen geri beslemeler doğrultusunda yönetilen aşamalı bir mühendislik süreci olarak ele alınması önem taşımaktadır. Kırık ve çatlak sistemlerinin enjeksiyon şerbeti ile doldurulmasının temel amacı kaya kütlesinin geçirimsizlik koşullarının iyileştirilmesi olmakla birlikte, süreksizliklerin sürekliliğinin azaltılmasının kaya kütlesinin bütünlüğüne ve mekanik davranışına da olumlu katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Özellikle altere bazalt ve kil bantlarının yaygın olduğu kesitlerde enjeksiyon sonrasında tünel çeperlerinde gözlenen dökülme ve kopmaların durması bu değerlendirmeyi destekleyen bir saha gözlemi olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte, bu çalışmada kaya kütlesinin dayanımındaki değişimi doğrudan ortaya koyan mekanik deneyler gerçekleştirilmediğinden, enjeksiyon sonrasında meydana gelebilecek dayanım artışı nicel olarak değerlendirilmemiştir. Çalışmanın özgün katkısı, kırıklı ve ileri derecede altere sütun bazaltlardan oluşan bir derivasyon tünelinde uygulanan kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonlarının performansının gerçek saha verileri üzerinden ve birbirini tamamlayan parametreler kullanılarak değerlendirilmesidir. Jeolojik ve jeoteknik gözlemler, enjeksiyon alış davranışları, enjeksiyon basınçları, basınçlı su deneyleri ve Lugeon sonuçlarının birlikte ele alınması, kaya kütlesindeki süreksizlik özellikleri ile enjeksiyon gereksinimi ve hidrolik performans arasındaki ilişkinin saha ölçeğinde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bu yaklaşım, benzer kırıklı ve altere volkanik kaya ortamlarında karşılaşılan su kaçağı problemlerinde enjeksiyon tasarımının yalnızca önceden belirlenmiş sabit uygulama parametrelerine göre değil, uygulama sırasında elde edilen alış, basınç ve kontrol deneyi sonuçlarına göre uyarlanmasının önemini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, Morgedik Barajı derivasyon tünelinde uygulanan kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonlarının kırıklı ve altere volkanik kayaçlarda gelişen su sızıntılarının kontrolünde teknik açıdan etkin ve uygulanabilir bir iyileştirme yöntemi olduğu değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, benzer jeolojik koşullara sahip mevcut baraj ve tünel yapılarında enjeksiyon tasarımı, ano uzunluğu, uygulama basıncı, enjeksiyon sıralaması ve kontrol stratejilerinin belirlenmesine yönelik saha temelli bir mühendislik referansı sunmaktadır. Ayrıca mevcut tünelin enjeksiyon yoluyla iyileştirilmesi, daha kapsamlı yapısal müdahalelere veya yeni yapı çözümlerine duyulan gereksinimin azaltılması açısından ekonomik bir avantaj sağlayabilir. Ancak bu çalışmada doğrudan bir maliyet analizi gerçekleştirilmediğinden, ekonomik katkı nicel bir maliyet veya tasarruf değeri üzerinden değil, mevcut yapının iyileştirilerek kullanılmasına olanak sağlayan uygulanabilir bir mühendislik çözümü sunması açısından değerlendirilmiştir.

5. TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışma kapsamında gerekli izinlerin sağlanması, saha verilerinin temini ve uygulama sürecinde sunulan teknik destekler nedeniyle Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne; çalışmanın bilimsel niteliğinin geliştirilmesine ve son haline ulaşmasına katkı sağlayan Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi editör ve hakemlerine değerli görüş ve önerileri için teşekkürlerini sunar.

6. KAYNAKLAR

1. Houlsby, A.C. (1990). *Construction and design of cement grouting: A guide to grouting in rock foundations.* John Wiley & Sons, New York.
2. Warner, J. (2004). *Practical handbook of grouting: Soil, rock, and structures.* John Wiley & Sons, New York.
3. Lombardi, G. (2003). Grouting of rock masses. *Grouting and Ground Treatment,* 164-197.
4. Karol, R.H. (2003). *Chemical grouting and soil stabilization.* 3rd ed. M. Dekker, New York.
5. Akbulut, S. & Gökçe, A. (2007). Grouting techniques in rock engineering and their applications in tunneling. *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı,* 111-118.
6. Sabancı, A. (2015). Tünelcilikte enjeksiyon yöntemleri ve uygulamaları. *Mühendis ve Makina, 56*(667), 31-44.
7. Ulusay, R. ve Gökceoğlu, C. (2001). *Mühendislik jeolojisi temelleri.* TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.
8. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, (2025). Jeoteknik Hizmetler Daire Başkanlığı – *Enjeksiyon teknik şartnamesi.* Teknik Şartname, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
9. Oyan, V. (2011). Etrüsk Volkanı ve çevresinin (Van Gölü kuzeyi) volkanostratigrafisi, petrolojisi ve magmatik evrimi. *Doktora tezi.* Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van.
10. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), (2002). *Türkiye jeoloji haritası (1:500.000 ölçekli).* Harita seti, MTA Yayınları, Ankara.
11. Turkmen, S. ve Güç, Y. (2026). Mersin-Anamur karayolu T3 tünelindeki karstik boşlukların iyileştirilmesinde kullanılan yöntemler. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41*(1), 17-28.
12. Prasad, R., Singh, S.P. & Kumar, R. (2023). An overview of construction practices in tail race tunnels of lesser himalayas-A case study of Tehri Pumped storage plant-1000 MW Uttarakhand, India. *International Journal of Novel Research and Development, 8*(9), a730-a748.
13. Keskin, V. (2025). Derivasyon tünellerinde su sızıntılarının kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu ile iyileştirilmesi: Enjeksiyon karışım testleri ve uygulama aşamaları. *Mühendislik Alanında Uluslararası Akademik Araştırma ve Çalışmalar,* 109-138. Serüven Yayıncılık, Ankara.
14. Türk Standardları Enstitüsü (TSE), (2012). *TS EN 197-1: Çimento – Bölüm 1: Portland çimentosu, bileşik çimentolar ve yüksek fırın cüruflu çimentolar – Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri.* TSE, Ankara.
15. Al-antaki, T.S.W. ve Niş, A. (2025). Bağlayıcı olarak bazaltik pomza tozu kullanımının geopolimer harçların mekanik dayanımına etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(3), 687-697.
16. Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. (2025). *SikaRapid® AC 326 teknik bilgi föyü.* https://tur.sika.com/dms/getdocument.get/9bc7fe99-999d-4cdc-af83-/sikarapid-ac-326.pdf
17. Zoorabadi, M. (2023). Lugeon test: New insights into calculated hydraulic conductivity. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 56*(3), 2023-006.