

SAVCIBEY GÖLETİ (BİLECİK) EKSEN YERİNİN GEÇİRİMLİLİĞİ VE ENJEKSİYON PERDESİNİN BOYUTLANDIRILMASI

PERMEABILITY OF SAVCIBEY DAM (BİLECİK) AXIS LOCATION AND DESIGN OF GROUT CURTAIN

Mustafa Can CANOĞLU^{a*} ve Bedri KURTULUŞ^b

^a Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü

^b *Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü*

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Savcibey Göleti, Lugeon
deneyi, düşen seviyeli
geçirimsizlik deneyi,
enjeksiyon perdesi
boyutlandırılması

ÖZ

Bu çalışma, Savaşçı Gölet (Söğüt/Bilecik) eksen yerinin geçirimsizliğini sağlamak amacıyla yapılması planlanan enjeksiyon perdesinin boyutlandırılmasını kapsamaktadır. Arazi çalışmaları kapsamında mühendislik jeolojisi haritası yapılmış, araştırma sondajları açılmış ve bu araştırma sondajlarında geçirimlilik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışmaları ile eksen yerindeki Triyas yaşlı Bozüyük Metamorfitleri'ne ait şistlerin içerdiği süreksizliklerin özellikleri ve geçirimliliğe olan etkisi, süreksizliklerin eksen yerine göre konumları göz önüne alınarak gözlemsel olarak belirlenmiştir. Süreksizlik konumları genel olarak K-G ile KKD-GGB arasında değişen doğrultulara sahiptir. Baraj ekkseninde 5 adet, memba batardosu üzerinde 2 adet, çevirme tüneli güzergâhında 3 adet, dolusavak yerinde ise 2 adet olmak üzere toplam 245 m derinliğinde araştırma sondajları açılmıştır. Eksen yerindeki kayaçların geçirimliliğinin belirlenememesi ve enjeksiyon perdesinin boyutlandırılabilmesi amacıyla, Bozüyük Metamorfitleri'ne ait birimlerde Lugeon deneyleri, talvegedi alüvyonlarda ve sağ yamaçta yüzeylenen yamaç molozunda ise düşen seviyeli geçirimlilik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Lugeon deneyleri sonucunda Bozüyük Metamorfitleri'nin genel olarak geçirimli ve yer yer az geçirimli özellikte olduğu belirlenmiştir. Alüvyon ve yamaç molozu ise çok geçirimlidir. Ayrıca, eksen yerinde gerçekleştirilen sondaj çalışmaları, Triyas yaşlı Bozüyük Metamorfitlerinde ayrışma derecesinin artmasıyla geçirimliliğin de arttığını göstermiştir. Tüm çalışmaların sonucunda Savaşçı Göleti'nin geçirimliliği ile ilgili bilgiler toplanmış ve enjeksiyon perdesi boyutlandırılmıştır. Buna göre, 1,50 m'lik sızırma kazısından itibaren ortalama 40 m derinliğinde oluşturulacak bir enjeksiyon perdesinin muhtemel kaçakları engelleyeceği öngörülmüştür.

Geliş Tarihi: 15.01.2015

Kabul Tarihi: 02.08.2016

Keywords:

*Savcibey Dam, Lugeon
Test, falling head
permeability test, design of
grout curtain hole*

ABSTRACT

This study comprise the design of the planned grout curtain in Savcıbey Dam (Söğüt/Bilecik) in order to provide impermeability along the dam axis. Within the context of field studies, engineering geology map was generated, ground investigation drilling was realized and permeability tests were performed. Within the field studies, the joint conditions of the geological units (Triassic aged Bozüyük Metamorphic schists) under the dam axis and its effect on permeability was observed considering the positions of the discontinuities with regard to the dam axis location. Orientation of discontinuities generally have strikes changing between N – S and NNE – SSW. 5 boreholes on dam axis, 2 boreholes on cofferdam, 3 boreholes on diversion tunnel and 2 boreholes on spillway total 245 m ground investigation borehole were drilled. In order to determine the permeability profile of dam axis and design the grout curtain, Lugeon tests in Bozüyük Metamorphic units observed in dam axis, falling head permeability tests in alluviums observed in thalveg and slope debris observed in right abutment were performed. Lugeon tests realized in Bozüyük Metamorphic units show that the unit is generally permeable and partly low permeable. Alluvium and slope debris are highly permeable. In addition, drilling works realized in dam axis shows that the augmentation of the weathering degree cause an increase of permeability in Triassic aged Bozüyük Metamorphic schists. As a result of these studies information about the permeability of Savcıbey Dam was collected and the grout curtain hole was designed. Accordingly, it is predicted that approximately 40 m depth of grout curtain from the stripping excavation with the depth of 1.50 m would prevent the possible leakages.

1. Giriş

Nüfus artışına bağlı olarak, enerji ihtiyacı, içme suyu temini, tarımsal sulama, taşkından korunma,

balıkçılık, rekreasyon ve daha birçok amaca yönelik planlanan baraj ve göletler ülke ekonomisine ciddi katkılar sağlamaktadır. Söz konusu baraj ve göletlerde planlama aşamasında gerçekleştirilen

* Başvurulacak yazar: Mustafa Can Canoğlu, e-mail: mccanoglu@sinop.edu.tr
http://dx.doi.org/10.19076/mta.01647

mühendislik jeolojisi ve hidrojeolojik çalışmalar, yapıların sağlıklı bir şekilde hizmet vermesi ve inşaa aşamasında çıkacak sorunların en aza indirilmesinde çok büyük önem taşımaktadır. Bu tip yapılar, çeşitli araştırmacılar tarafından jeoteknik ve hidrojeolojik olarak, depreme karşı duraylılık, sıvılaşma, heyelanlar gibi farklı açılardan incelenmiştir (Lombardi, 1985; Nonveiller, 1989; Karagüzel ve Kılıç, 2000; Tunar vd., 2013; Eryılmaz ve Korkmaz, 2015; Aldemir vd., 2015). Lombardi (1985) barajlardaki geçirimsizliğin sağlanabilmesi için tasarlanan enjeksiyon perdesi ve enjeksiyondaki çimentonun özellikleri ile ilgili gerçekleştirdiği çalışmada enjeksiyon şerbetindeki kohezyonun şerbet viskozitesini arttırdığı ve şerbetin süreksizlikler içerisinde kolay nüfuz edemediğini belirlemiştir. Nonveiller (1989) barajlardaki enjeksiyon perdesi oluşturulmasında çeşitli yöntemler ile ilgili, Aksoy ve Ercanoğlu (2006) ve (2007) heyelanlar ile ilgili, Ulusay vd. (2007) barajlardaki sıvılaşma ile ilgili, Tunar vd. (2013) atık barajlarında duraylılık ile ilgili, Eryılmaz ve Korkmaz (2015) kuyu testleri ile hidrolik iletkenliğin belirlenmesi ile ilgili, Aldemir vd. (2015) beton barajların deprem davranışlarında kullanılan analiz yöntemleri ile ilgili çalışmıştır. Karagüzel ve Kılıç (2000) ise, bir ofiyolitik melanjdaki alterasyonun geçirimsizliğe olan etkisini enjeksiyon verimliliği ve enjeksiyon şerbeti alışı miktarı açısından araştırmıştır. Ayrıca, bu çalışmada, istatistiksel analizler kullanılarak Lugeon deneyindeki su kaybı ile enjeksiyon şerbeti alışı arasındaki ilişki matematiksel bir formül ile ifade etmiştir. Ayrıca, kaya kütlelerinin geçirimsizlikleri de çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Ewert, 2003; Foyo vd., 2005; Şekercioğlu, 2007; Coli vd., 2008; Li vd., 2008; Gürocak ve Alemdağ, 2012; Kayabaşı vd., 2015). Foyo vd. (2005) baraj temellerindeki kaya kütleleri için ikincil bir geçirimsizlik indeksini

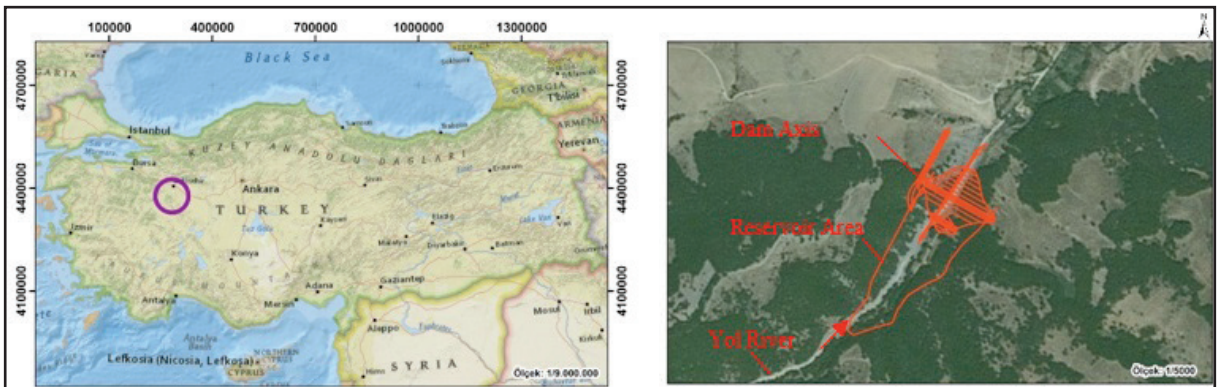
Lugeon testleri ile ortaya koymuştur. Gürocak ve Alemdağ (2012) yaptıkları çalışmada temeldeki kaya kütlelerinin geçirimsizlik özelliklerini görgül ve sayısal olarak incelemişlerdir. Kayabaşı vd. (2015) ise lineer olmayan regresyon analizlerini kullanarak kaya kütlelerinin süreksizlik özellikleri ile Lugeon değerleri arasındaki ilişkiyi değerlendirmiştir. Enjeksiyon perde derinliğinin belirlenmesi için ise Şekercioğlu (2007)'nin önerdiği görgül yöntemden yararlanılmıştır. Ancak, bu yöntem görgül bir yöntem olduğundan dolayı geçirimsizlik perdesi mühendislik hükmü kullanılarak, temel kayaya gelecek su yükü de hesaba katılacak şekilde tasarlanmıştır.

Çalışmanın amacı genel olarak, Bilecik İli, Söğüt İlçesi'nde yapıımı planlanan Savcibey Göleti eksen yerinin geçirimsizlik karakteristiklerini belirleyerek oluşturulacak enjeksiyon perdesinin boyutlandırılmasıdır. Bu amaçla, gerçekleştirilmesi gereken enjeksiyon çalışmalarının hangi derinliğe kadar yapılması gerektiği belirlenmiştir.

Proje alanı, Bilecik ili, Söğüt ilçesi sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 1). Savcibey Göleti'nin, Savcibey köyüne ait, yaklaşık 164 ha'lık tarım arazilerinin sulanabilmesi amacı ile Yol Deresi üzerinde yapılması DSİ 3. Bölge Müdürlüğü tarafından planlanmaktadır. Baraj yeri, 1/25.000 ölçekli Eskişehir "I24-a2" numaralı paftası içerisinde yer almaktadır ve ulaşım, Eskişehir-Bursa karayolunun Yeniçepni sapağından Kuzey istikametine döndükten sonra 11 km asfalt yoldan sağlanmaktadır (Şekil 1).

2. Jeoloji

Bu çalışma, büro çalışmaları, arazi çalışmaları ve laboratuvar çalışmalarını kapsamaktadır. Büro



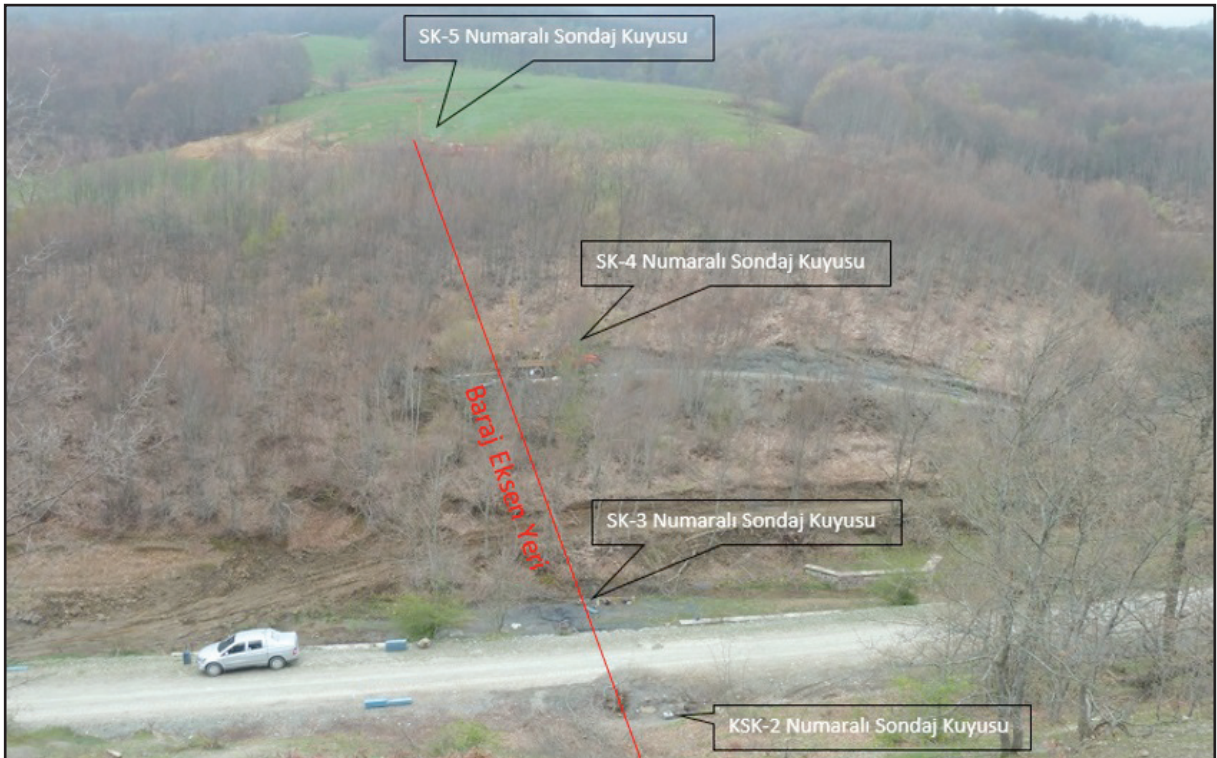
Şekil 1- Çalışma alanının yer bulduru haritası.

çalışmaları kapsamında, çalışma alanı ile ilgili literatür taraması yapılmış, Devlet Su İşleri (DSİ) ve Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından önceden yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Arazi çalışmaları, jeolojik haritalama, sondaj ve yerinde yapılan geçirimsizlik deneylerinden oluşmaktadır. Laboratuvar çalışmaları ise yapılan sondajlardan alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinden oluşmaktadır. Arazi çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen sondaj çalışmalarında, gölet ekseninde 5 adet toplam 200 m, batardo üzerinde 2 adet toplam 25 m, çevirme tüneline 3 adet toplam 30 m, dolusavakta ise 2 adet toplam 20 m derinliğinde olmak üzere toplam 275 m jeoteknik amaçlı araştırma sondaj kuyusu açılmıştır. Şekil 2’de aks yeri ve çevirme tüneline açılan, şekil 3’te ise aks yeri ile batardoda açılan sondaj kuyuları gösterilmiştir. Gölet eksen yeri boyunca açılan sondaj kuyularında gerçekleştirilen Lugeon deneyleri ile kaya birimlerinin farklı hidrolik yükler altında sergileyecekleri geçirimsizlik karakteristikleri belirlenmiştir. Alüvyon ve yamaç molozunun hidrolik iletkenlikleri ise düşen seviyeli geçirimsizlik deneyleri ile belirlenmiştir.

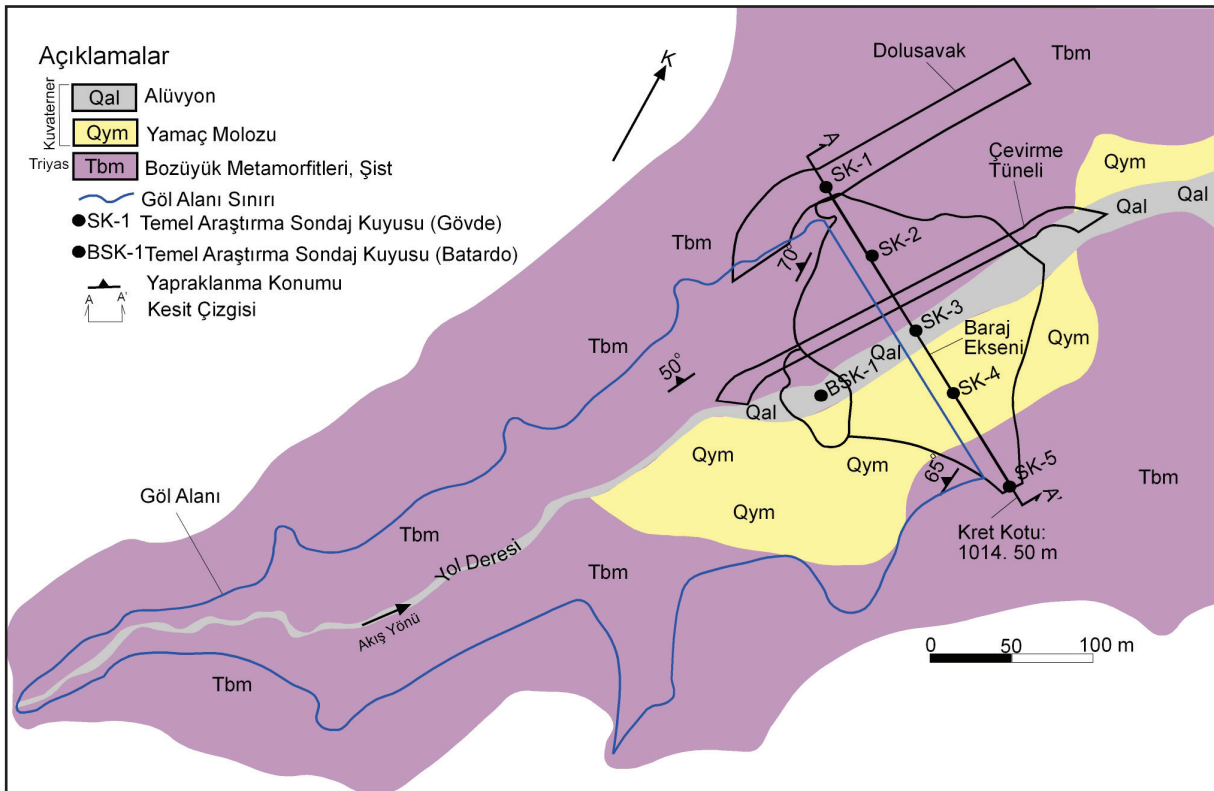
Metamorfiklerde, süreksizliklerin eğim miktarı ve yönü, eksen yerinin geçirimsizliğini etkileyen en önemli özelliktir. Bununla beraber,

dolgu türü, ayrışma derecesi, süreksizlik açıklığı, süreksizlikler arası mesafe de baraj geçirimsizliğini etkileyen faktörlerdendir. Arazi ön çalışmalarında gerçekleştirilen gözlemlere göre eksen yerinde geçirimsizlik problemi oluşturacak herhangi bir durum saptanmamıştır. Ayrıca, şistozite doğrultuları baraj eksenini yer yer 90° ile kesse de genel olarak şistozite eğim yönleri genel olarak baraj eksenine göre akış yukarı doğrudur ve süreksizlikler kil dolguludur. Bu nedenle herhangi bir geçirimsizlik problemi gözlemsel olarak beklenmemektedir.

Proje alanı ve yakın çevresinde genel olarak Bozüyük Metamorfikleri’ne ait şistler hakim olmakla beraber yer yer yine aynı formasyona ait mermerler de yüzlek vermektedir. Triyas’dan Kuvaterner’e uzanan zaman aralığında oluşmuş Bozüyük Metamorfikleri’nin üzerinde ise Kuvaterner yaşlı alüvyon (Qal) ve yamaç molozu (Qym) uyumsuz olarak yer almaktadır. Çalışma alanı Türkiye’deki ana aktif fay sistemlerinden biri olan Kuzey Anadolu Fay Zonu’na yaklaşık 50 km uzaklıkta olup ikinci derece deprem bölgesinde yer almaktadır. Baraj yeri ve çevresindeki jeolojik birimler aşağıda bölümler halinde açıklanmış olup proje alanı ve yakın çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kesiti şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 2- Savcıbey Göleti eksen yerinde SK-1 Numaralı kuyudan (sol sahilden) sağ sahile bakış.



Şekil 3- Savcıbey Göleti eksen yeri ve rezervuar alanının mühendislik jeolojisi haritası.

ÜST SİSTEM	SİSTEM	FORMASYON ADI	FORMASYON SİMGESİ	KALINLIK (m)	KAYA TÜRÜ	AÇIKLAMA	DOKANAK İLİŞKİSİ
SENOZOYİK	KUVATERNER	YAMAÇ MOLOZU ALÜVYON	Qym	1.5-2m 2.5-4.5m		Qym: Yamaç molozu	UYUMSUZLUK
			Qal			Qal : Alüvyon	
MESOZOYİK	TRİYAS	BOZUYUK METAMORFİKLERİ	Tbm	-	- M - M - M	Tbm : Fillit, Mikaşist, Mermer, Yeşil Sist	
	ÜST-ORTA				M - M - M		
					M = M = M		
					M - M - M		
					M = M = M		
					M - M - M		
					M M		
						M	
					M		
						M	

Şekil 4- Baraj yeri ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kesiti.

2.1. Bozüyük Metamorfikleri (Tbm)

Bozüyük Metamorfikleri bölgede geniş yayılımı sahiptir. Bu birim daha önce çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiş olup yaşı Triyas olarak belirtilmiştir (Yılmaz, 1979; Yılmaz ve Koral, 2007; Ayaroğlu, 1979; Kayadibi vd., 1994). Birimin üzerine Kuvaterner yaşlı alüvyon ve yamaç molozu birimleri uyumsuz olarak gelmektedir. Bu formasyonun kayaç birimleri fillit, mikaşist, yeşilşist, talk şist, kloritşist, amfibollü şist, haritaya koyulamayacak ölçekte glokofanlı şist, grafit şist, ortognays, kuvarsit, mermer, serpantin, peridotit, gabro ile metadiyabaz ve metabazalttır (Yılmaz, 1979). Başlangıçta karbonatlar ile kil ve kum boyutundaki kayaçlar ve granitik bir intrüzyonun ürünleri bölgesel metamorfizmanm yeşilşist fasiyesi koşullarından etkilenecek günümüzdeki petrografi özelliklerini kazanmışlardır (Ayaroğlu, 1979). Çalışma alanında genel olarak bu birime ait yeşil şist hakim olup, yer yer mermer kütleleri de gözlenmektedir. Ancak şekil 5'teki kesitten de görüldüğü gibi baraj gövdesinin oturacağı zeminde söz konusu mermer kütlelerine rastlanmamıştır. Bozüyük metamorfiklerine ait birimleri süreksizlik tipi olarak şistozite düzlemleri içermektedir. Ancak Triyas yaşlı bu birimlerin maruz kaldığı değişik zamanlarda gelişmiş olan tektonizma etkisi nedeniyle bu şistozite düzlemleri farklı yönelimlere sahiptirler. Baraj eksen yeri sol ve sağ yamaçtaki mostralarda ölçülen konumlara göre şistozite düzlemleri KD-GB doğrultulu olup, eğimleri 50^0 ila 70^0 arasında

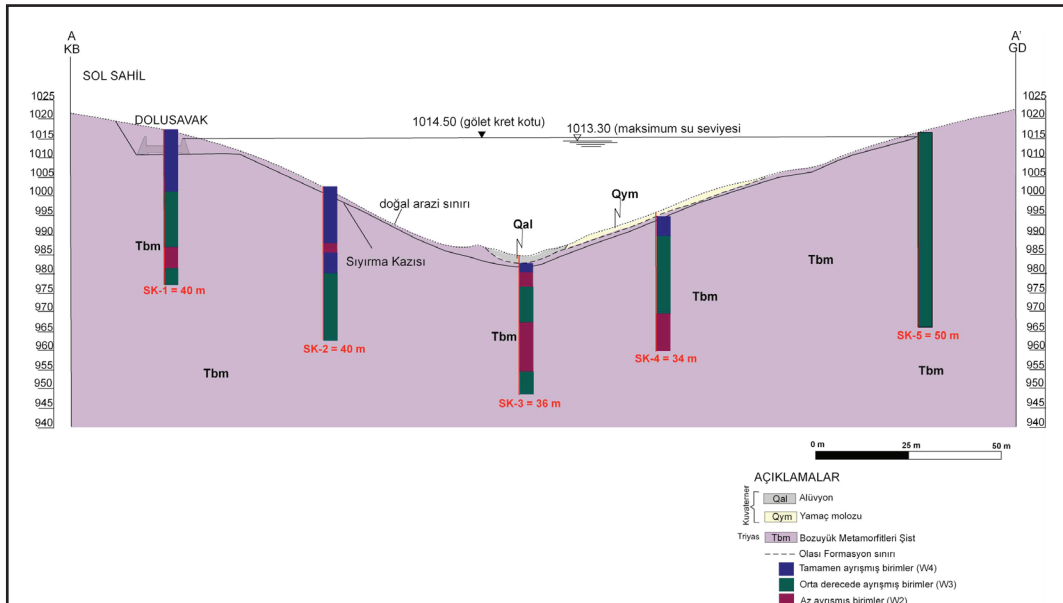
değişmektedir. Şistozite düzlemlerinin eğim yönleri genel olarak KB olarak ölçülmüştür.

Çalışma sahası ve çevresinde ilk kıvrımlanma Hersiniyen hareketlerle başlar. Paleozoyik yaşlı şistler şiddetli bir şekilde kıvrılmışlar, bunun daha ileri kırılma safhasında meydana gelen faylar boyunca intrüzyon faaliyeti başlamıştır. Asit İntruzifler bu safhada şistlerin arasına yerleşmiştir. Daha sonra bu İntruzifler içinde meydana gelen KD-GB istikametli faylar boyunca aplitler yerleşmiştir. Alpin hareketler sonucu başlangıçta GB-KD istikametli olan ana aplit kitlesi D-B istikametini almıştır (Yılmaz, 1979). Ancak, baraj yerinde bu aplitlere rastlanmamıştır. Paleotektonik aktiviteler ile oluşan kırık çatlak sistemleri genel olarak kil dolguludur. Yol yarması boyunca gerçekleştirilen hat etüdünden elde edilen bilgilere göre çatlaklar arası mesafe ortalama 2 m olarak ölçülmüş olup, çatlak açıklığı 1 cm ile 30 cm arasında değişmektedir.

Buna göre Bozüyük Metamorfikleri'ni üzerleyen Kuvaterner yaşlı alüvyon ve yamaç molozu birimleri ile olan ilişkisi ve şekil 3'te gösterilen A-A' kesiti ile temel araştırma sondajlarının konumları şekil 5'te sunulmuştur.

2.2 Alüvyon (Qal)

Baraj ekseninin bulunduğu Yol Deresi'nin üzerinde yer almaktadır (Şekil 3 ve 5). Kuvaterner yaşlı bu alüvyonlar, dere yatağında eğime bağlı olarak birikmiş



Şekil 5- Baraj gövdesi mühendislik jeolojisi boy kesiti (A-A' kesiti)

olan çakıl, kum, silt ve kil boyutunda malzemeden oluşmaktadır. Gerçekleştirilen sondaj çalışmalarına göre, Savcıbey Göleti eksen yerinde alüvyonun kalınlığı 1.50 – 2.00 m arasında değişmektedir. Alüvyon genişliğinin ise bazı kesimlerde 10 m'ye kadar ulaşabildiği gözlenmiştir.

2.3. Yamaç Molozu (Qym)

Yer yer bloklu yapıya sahip olan yamaç molozunun yamaç eteklerinde ana kayadan (ayrışmış şistlerden) türediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, yamaç molozu ağırlıklı olarak iri çakıl ve kil boyutunda malzemeden oluşmaktadır ve çimentolanma gözlenmemektedir. Gerçekleştirilen sondaj çalışmalarında, yamaç molozunun sağ yamaçta 1.0 m kalınlığa kadar varabildiği belirlenmiştir.

3. Mühendislik Jeolojisi

Kil çekirdekli kaya dolgu gövde tipinde planlanan barajın talvegden yüksekliği 31.15 m, temelden yüksekliği ise 36.15 m olarak planlanmıştır. Göletin kret uzunluğu 189.67 m, talveg kotu 985.64 m dir ve gölet rezervuarındaki en düşük su kotu 995.75 m, en yüksek su kotu ise 1013.3 m olacaktır. Dipsavak beton gömlekli cebri boru tipinde, sol sahilde, giriş kotu 988.50 m çıkış kotu ise 978.50 m olarak tasarlanmıştır. Dolusavak ise sol sahilde 1012.34 m'lik eşik kotunda, enerji kırıcı havuzlu olarak projelendirilmiştir.

ISRM (2007)'nin önerdiği kaya kütlelerinin ayrışma derecesini tanımlama ölçütlerine göre sondajlardan elde edilen karot numuneleri genel olarak tamamen ayrışmış (W4) ve orta derecede ayrışmış (W3) olduğu gözlemlenmiştir, ancak yer yer az ayrışmış (W2) birimlere de rastlanmıştır.

4. Baraj Eksen Yerinin Geçirimliliği

Bu çalışmanın esas amacı, enjeksiyon perdesinin boyutlandırılmasıdır ve bu amaçla eksen yerindeki temel kaya ile alüvyon ve yamaç molozunun geçirimsizlik değerlerinin belirlemek için düşen seviyeli geçirimsizlik ve Lugeon testleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler gölet eksen yerinde açılmış olan araştırma sondajlarında gerçekleştirilmiştir.

Lugeon deneyi farklı hidrolik yükler altında kaya kütlelerinin hidrolik iletkenliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen bir arazi deneyidir.

Sondaj kuyularında genellikle düşey yönde 2 ila 5 metre arasında değişebilen deney zonlarında gerçekleştirilebilir. Deneyde uygulanacak kademe boyunun uzunlukları, kaya kütlelerinin fiziksel ve yapısal özelliklerine göre değişmektedir. Geçirimsiz ve üniform özellikli bir kaya kütlelerinde 5-10 m'lik kademeler uygulanabileceği gibi, çok geçirimli ve değişken özellikteki kayalarda, kademe boyu 1 metreye kadar düşürülebilmektedir (Akyüz, 2010). Lugeon (1933) tarafından önerilen yöntemde, 1 Lugeon, 10 atm hidrolik yük altında 1 dakikada 1 m uzunluğundaki deney zonuna basılan su miktarının litre cinsinden değeri olarak tanımlanmıştır. Deney sırasında uygulanan basınçlar kayacın özelliklerine göre değişmekte olup, bu konuda belirlenmiş bir standart olmamakla beraber deney 2,4,6,8,10 kg/cm²'lik basınç kademelerinde gerçekleştirilmektedir. Deney sırasında her basınç kademesinde 10 dakika beklenir ve su kaçakları beşer dakikalık aralarla kaydedilir. Daha sonra 9, 7, 5, 3, 1 kg/cm² 'lik geri dönüş basınçları uygulanarak su kayıpları kayıt altına alınır.

Gerçekleştirilen deney sonunda Lugeon değeri (LU) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$LU = (Q \times 10) / (P \times L) \quad (\text{eşitlik 1})$$

Bu eşitlikte, LU Lugeon değeri (lt/dk/m), Q kuyuya verilen su miktarı (lt/dk), P uygulanan su yükü (kg/cm²) ve L kademe boyu (m) olarak ifade edilmektedir. Lugeon değerlerine karşılık gelen geçirimsizlik sınıfları çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1- Kaya kütlelerinin Lugeon değerlerine göre geçirimsizlik sınıflandırması.

Lugeon Değerleri	Geçirimsizlik Sınıfı
<1 Lugeon	Geçirimsiz
1-5 Lugeon	Az Geçirimli
5-25 Lugeon	Geçirimli
>25 Lugeon	Çok Geçirimli

Savcıbey Göleti'nde oluşması muhtemel su kaçaklarının önlenmesi, daha verimli bir şekilde su tutabilmesi için gölet eksen boyunca bir enjeksiyon perdesinin oluşturulması planlanmıştır. Oluşturulması planlanan enjeksiyon perdesinin boyutlandırılabilmesi, enjeksiyon sırasında her bir kademeye basılacak enjeksiyon şerbetinin yaklaşık miktarının öngörülebilmesi için gölet eksen boyunca açılan 5 adet (SK-1, SK-2, SK-3, SK-4 ve SK-5) ve batardo için açılan 1 adet (BSK-1) sondaj kuyusunda Lugeon (1933) testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).

Fell vd. (2005) gerçekleştirdiği çalışmada homojen ve izotrop ortamlarda 1 Lugeon değerinin 1.3×10^{-5} cm/s'lik bir hidrolik iletkenlik katsayısına denk geldiğini önermiştir. Fell vd. (2005)'nin önerdiği çizelgedeki Lugeon değerleri ile hidrolik iletkenlik katsayısı arasındaki ilişki şekil 6'daki grafikte gösterilmiştir.

Şekil 6'da Lugeon değerlerine karşılık gelen hidrolik iletkenlik katsayısı eşitlik 2'deki ifade ile temsil edilebilir.

$$K = 1 \times 10^{-5} \times (LU)^{1.0082} \quad (\text{eşitlik 2})$$

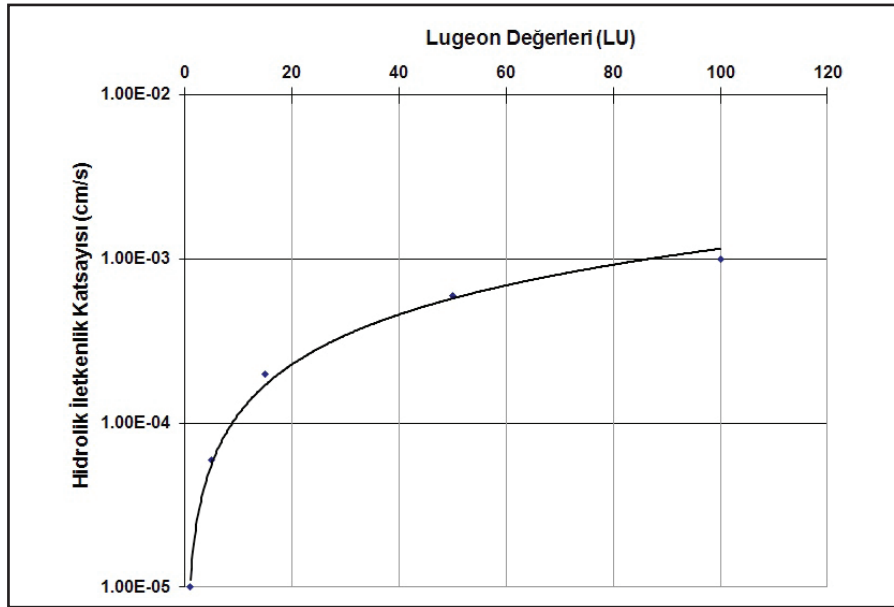
Eşitlik 1'de ifade edilen hidrolik iletkenlik katsayısı (K) ile Lugeon değeri (LU) arasındaki korelasyon katsayısı $R^2=0.9954$ olarak belirlenmiştir. Korelasyon katsayısının 1'e yakın olması eşitlikte belirtilen Lugeon değerleri ile hidrolik iletkenlik katsayısı değerleri arasındaki ilişkinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Diğer bir deyişle, R^2 'nin 1'e yakın olması eşitlik 2'nin gerçeği yansıttığını göstermektedir. Savcıbey Göleti'nin farklı hidrolik yükler altındaki geçirimsizlik karakteristiklerini

belirleyebilmek için gerçekleştirilen Lugeon deneyleri sonucunda elde edilen Lugeon değerleri eşitlik 2'deki ifade kullanılarak hidrolik iletkenlik katsayısı olarak ifade edilmiş ve tüm kuyulardaki minimum ortalama ve maksimum hidrolik iletkenlik katsayısı değerleri olarak çizelge 2'de gösterilmiştir.

Ayrıca, sol yamaçta açılan SK-1 ve SK-2, talvegde açılan SK-3 ve BSK-1 ve sağ yamaçta açılan SK-4 ve SK-5 numaralı sondaj kuyularında gerçekleştirilen Lugeon deney sonuçlarının derinliğe bağlı değişimleri şekil 7'de her 3 bölge için ayrı ayrı gösterilmiştir.

5. Düşen Seviyeli Geçirimsizlik Deneyleri

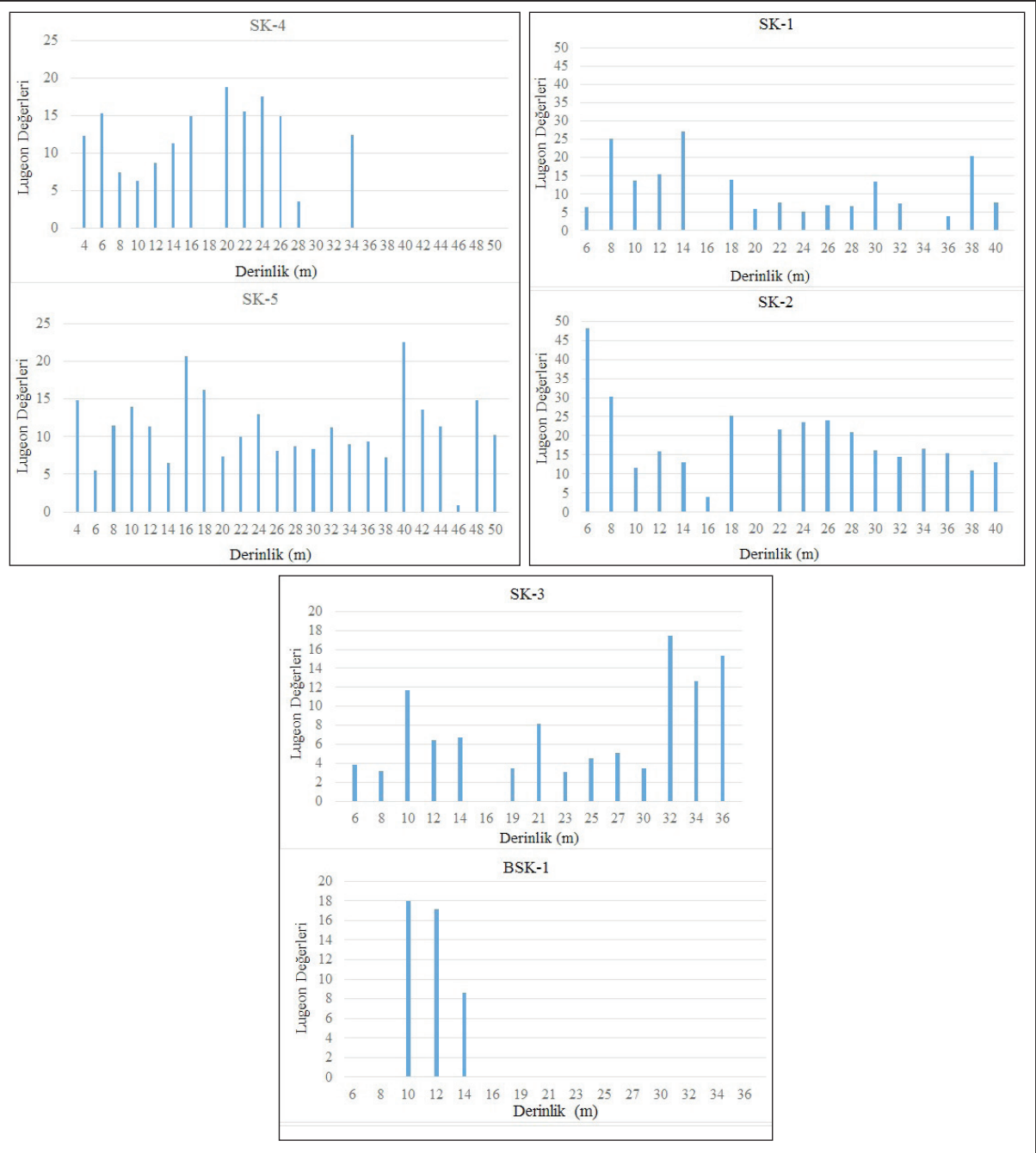
Savcıbey Göleti'nin inşa edileceği zeminin geçirimsizlik özelliklerinin belirlenebilmesi için alüvyon ve yamaç molozunda düşen seviyeli geçirimsizlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 2 m'lik kademeler halinde yapılmıştır. SK-1 numaralı sondaj kuyusunda 0 – 4 m arasındaki, SK-2 numaralı



Şekil 6- Lugeon değerleri ile hidrolik iletkenlik katsayısı arasındaki ilişki (Fell vd., 2005'ten değiştirilerek alınmıştır).

Çizelge 2- Her bir kuyunun en yüksek, ortalama ve en düşük hidrolik iletkenlik katsayısı (cm/s).

	Hidrolik İletkenlik Katsayıları (cm/s)					
	SK-1	SK-2	SK-3	SK-4	SK-5	BSK-1
En Düşük	4.1E-05	4.1E-05	3.1E-05	3.6E-05	8.4E-06	8.8E-05
Ortalama	1.4E-04	2.2E-04	7.6E-05	1.3E-04	1.1E-04	7.5E-04
En Yüksek	3.6E-04	5.4E-04	1.8E-04	1.9E-04	2.3E-04	1.8E-03



Şekil 7- Sol yamaç (SK-1 ve SK-2), talveg (SK-3 ve BSK-1) ve sağ yamaç (SK-4 ve SK-5) için Lugeon değerlerinin derinliğe bağlı değişimleri.

sondaj kuyusunda 0 – 2 m arasındaki Bozüyük Metamorfitle’ne ait ayrılmış birimlerde, BSK-1 numaralı sondaj kuyusunda 0 – 8 m arasındaki alüvyon biriminde deney yapılabilmiştir. SK-3, SK-4 ve SK-5 numaralı sondaj kuyularında ise kuyu duvarlarında yıkılma gerçekleştiği için muhafaza borusuyla sondaj yapıldığından dolayı düşen seviyeli geçirimsizlik deneyi uygulanamamıştır. SK-3 numaralı sondajda kesilen alüvyonun geçirimsizliği BSK-1

numaralı sondaj kuyusunda yapılan deney sonuçlardan öngörülebilmektedir.

SK-1 ve SK-2 numaralı kuyularda gerçekleştirilen düşen seviyeli geçirimsizlik deneyleri Bozüyük Metamorfitle’ne ait ayrılmış ve ileri derecede eklemlenmiş birimlerin yüksek hidrolik iletkenliğe sahip olduğunu göstermektedir ($K \approx 10^{-4} \text{cm/s}$). BSK-1 numaralı kuyuda gerçekleştirilen düşen seviyeli

geçirimlilik deneyi ise alüvyonların çok geçirimli ($K \approx 10^{-3} \text{ cm/s}$) olduğunu işaret etmektedir. Bu durumda baraj gövdesinin oturacağı kazı alanındaki alüvyon biriminin tamamen sıyrılması hem geçirimlilik hem de gövde duyarlılığı açısından önem arz etmektedir. Yeraltı su seviyesi ve sıyırma kazısı yapılan zeminin hidrolik iletkenliği de göz önüne alındığında kazı alanına 3.2 l/s debi ile yeraltı suyunun gelmesi beklenmektedir (SuYapı, 2013). Bu durumda, kazı alanına gelmesi beklenen suyun uygun pompalarla uzaklaştırılması gerekmektedir.

6. Enjeksiyon Perde Derinliğinin Belirlenmesi

Enjeksiyon perdesi derinliğinin (h') belirlenmesinde kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır (Bureau of Indian Standard, 1993; Pettersson ve Molin, 1999; Ewert, 2003; Şekercioğlu, 2007; Schleiss ve Pougatsch, 2011). Enjeksiyon perdesi derinliğinin, baraj yüksekliğinin (h) bir fonksiyonu olarak kullanıldığı bu yöntemler aşağıda eşitlik 3, 4, 5, 6 ve 7 olarak ifade edilmiştir.

Bureau of Indian Standard (1993)'e göre $h' = \left\{ \frac{2}{3} \right\} h + 8$ (eşitlik 3);

Pettersson ve Molin (1999)'a göre $h' = \left\{ \frac{3}{4} \right\} h$ (eşitlik 4);

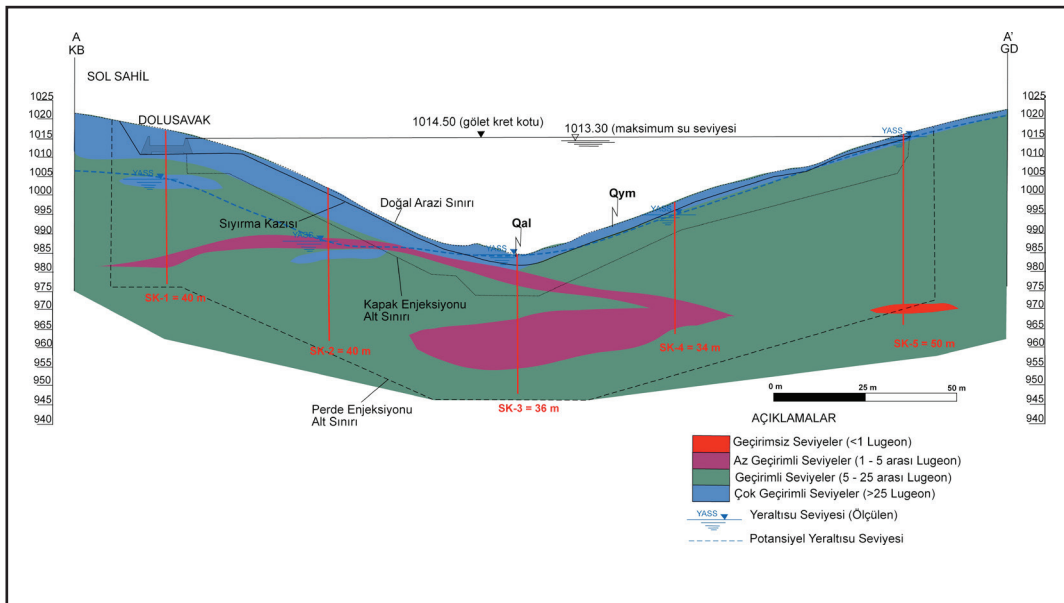
Ewert (2003)'e göre $h' = h$ (eşitlik 5);

Schleiss ve Pougatsch (2011)'e göre $h' = \left\{ \frac{2}{3} \right\} h$ (eşitlik 6);

Şekercioğlu (2007)'ye göre $h' = \left\{ \frac{1}{2} \right\} h + 15$ (eşitlik 7);

Enjeksiyon perde derinliği (h') Savcıbey Göleti'nin talveg kısmı için Bureau of Indian Standard (1993) tarafından önerilen eşitlik 3 ve Şekercioğlu (2007) tarafından önerilen eşitlik 7 kullanılarak karşılaştırılmıştır. Buna göre, h' eşitlik 7'den 30.575 m, eşitlik 3'den ise 28.77 m olarak bulunmuştur. Enjeksiyon perde derinliği için önerilen her iki yöntemin de birbirine çok yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Bu çalışmada, Savcıbey göleti enjeksiyon perde derinliği hesabı için, Şekercioğlu (2007) tarafından önerilen eşitlik 7 temel alınmış ancak, güvenli tarafta kalma amacıyla mühendislik hükmü kullanılarak yamaçlarda da aynı derinlikte enjeksiyon yapılması öngörülmüştür.

Ayrıca, enjeksiyon perde derinliği, gövdenin talvegden yüksekliği (31.15 m) göz önüne alınarak ve gölet temelini oluşturan ana kayaya gelecek fazladan su yükü de düşünülerek tasarlanmıştır. Bununla beraber, enjeksiyon perdesi göl alanında oluşabilecek küçük çaplı kaçakların da engellenebilmesi için göl alanına doğru uzatılmıştır. Şekil 7'de tasarlanan enjeksiyon perdesi ile ufak çaplı kaçakların önleneyeceği ve geçirimsizliğin sağlanacağı düşünülmektedir. Enjeksiyon perdesi tasarlanırken geçirimlilik değerleri ve yeraltı su seviyeleri (YASS) dikkate alınmıştır. Sondaj çalışmalarından sonra gerçekleştirilen yeraltısuyu ölçümleri sonucunda, SK-1 no'lu sondaj kuyusunda YASS 13.20 m, SK-2 no'lu sondaj kuyusunda ise 13.6 m olarak ölçülmüştür. Talvegde açılan SK-3 no'lu sondaj kuyusundaki YASS 0 m olarak belirlenmiştir. Sağ yamaçta açılan SK-4 no'lu



Şekil 8- Gölet ekseninin Lugeon değerlerine göre mikro bölgelendirilmesi ve enjeksiyon perdesi sınırı.

kuyudaki YASS 3.00 m, SK-5 no'lu kuyudaki YASS 0.6 m olarak ölçülmüştür. Gölet eksen yerindeki sondaj kuyularının tamamında yeraltı suyu (YAS) kotları karşılaştırıldığında her iki yamaçta da YAS hareketinin dereye doğru olduğu görülmektedir (Şekil 8). Bu durum derenin her iki yamaçtan da beslendiğini ve dere kotunda yamaçlara doğru herhangi bir su akısının mevcut olmadığını göstermektedir.

Şekil 8'de gösterilen enjeksiyon perdesi ile potansiyel kaçakların önlenmesi ve geçirimsizliğin sağlanması amaçlanmıştır. Buna göre, sol sahildeki enjeksiyon perde derinliği 35 ila 40 m arasında değişmektedir. Su yükünün artması formasyon üzerindeki hidrostatik basıncı arttıracığından kaçakları tetikleyecektir. Bu nedenle, en çok su yükünün talveg üzerinde olacağından dolayı, sol sahilden talvege yaklaşıldıkça enjeksiyon perde derinliği arttırılmıştır. Talveg boyunca perde derinliği ortalama 40 m olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, talvegden sağ sahile doğru gidildikçe geçirimsizlik çok arttığından dolayı enjeksiyon perde derinliği sıyırma kazısından itibaren 45 metre olarak belirlenmiştir.

7. Sonuçlar ve Öneriler

Gölet ekseninde açılan 5 adet ve batardo için açılan 1 adet temel sondaj kuyusunda yapılan Lugeon deneylerinden elde edilen sonuçlar sağ yamaç, talveg ve sol yamaç için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Değerlendirme yapılırken çizelge 1'de belirtilen geçirimsizlik sınıfları temel alınmıştır.

Buna göre, sol yamaç için açılan SK-1 ve SK-2 numaralı kuyuların geçirimsizliği 14 metreye kadar geçirimsiz ile çok geçirimsiz arasında değişmektedir. 14.0 ile 40.0 m arasında, SK-1 numaralı kuyunun geçirimsizliği az geçirimsiz – geçirimsiz arasında değişirken SK-2 numaralı kuyuda kaya kütlesi özellikle 18 – 28 m arasında geçirimsiz çok geçirimsiz sınırında seyretmekte, 28 – 40 m arasında ise geçirimsiz özellik göstermektedir (Şekil 7).

Talveg için açılan, SK-3 ve BSK-1 numaralı kuyulardan elde edilen Lugeon değerleri ise yer yer çok geçirimsiz seviyelerin var olduğunu göstermektedir. BSK-1 numaralı kuyuda alüvyon kalınlığının 5 metreden fazla olması ve 6 – 8 m ile 8 – 10 m deney kademelerinde Lugeon deneyi sırasında kuyu ağzından su gelmesi sebebiyle, sadece 10 – 12, 12 – 14, 14 –

16 m kademelerinde deney gerçekleştirilebilmiştir. Gerçekleştirilen söz konusu Lugeon deney sonuçlarına göre bu kademelerdeki kaya kütlesi geçirimsiz özellik göstermektedir. Ancak SK-3 numaralı kuyuda, 6 – 10 m ve 23 – 32 m arasında geçilen seviyeler az geçirimsiz olarak değerlendirilebilir. Bunun dışında kalan seviyeler geçirimsiz özelliktedir (Şekil 7). Sağ yamaçta açılan SK-4 ve SK-5 numaralı kuyular ise geçirimsiz az geçirimsiz özellik göstermekte olup, yer yer geçirimsiz seviyeler de gözlenmektedir (Şekil 7).

Şekil 7'ye göre derinliğe bağlı olarak geçirimsizlik değişimleri her bir kuyu için çizelge 1'de verilen Lugeon değerlerine karşılık geçirimsizlik sınıfları göz önüne alındığında, aşağıdaki gibi değerlendirilmektedir;

- SK-1 numaralı kuyuda 6 – 8 m ve 12 – 14 m kademeler çok geçirimsiz, 4 – 6 m, 18 – 20 m, 22 – 24 m ve 34 – 36 m kademeler az geçirimsiz diğer kademelerin ise geçirimsizdir.
- SK-2 numaralı kuyuda 4 – 8 m arasındaki kademeler çok geçirimsiz, 14 – 16 m kademeler az geçirimsiz diğer kademeler ise geçirimsizdir.
- SK-3 numaralı kuyuda 4 – 8 m, 16 – 19 m, 21 – 25 m ve 28 – 30 m arasındaki kademeler az geçirimsiz, diğer kademeler ise geçirimsizdir.
- BSK-1 numaralı kuyuda 8 – 14 m arasındaki kademeler geçirimsizdir.
- SK-4 numaralı kuyuda 26 – 28 m arasındaki kademe az geçirimsiz, diğer kademeler ise geçirimsizdir.
- SK-5 numaralı kuyuda 44 – 46 m arası geçirimsiz, 4 – 6 m arası az geçirimsiz, diğer kademeler ise geçirimsizdir.

Temel araştırma sondaj kuyularından elde edilen veriler ve yüzeysel araştırmalara göre ISRM (2007)'nin önerdiği kaya kütlelerinin ayrışma derecesini tanımlama ölçütleri göz önüne alındığında, bu birimin genel olarak orta derecede ayrışmış (W3) ile tamamen ayrışmış (W4) arasında olduğu söylenebilir. Ayrıca, sondaj çalışmalarında az ayrışmış (W2) birimlere de rastlanmıştır. Şekil 5 ve 8 karşılaştırıldığında, ayrışma derecesinin geçirimsizliğe olan etkisi gözlenebilmektedir. Buna göre, tamamen ayrışmış (W4) birimlerdeki geçirimsizliğin, orta derecede ayrışmış (W3) ve az ayrışmış (W2) birimlere

göre yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca, kuyu ağzından su gelmesinden dolayı Lugeon deneyinin gerçekleştirilemediği kademelerin de tamamen ayrılmış olduğu da dikkat çekmektedir. Bu durumda, Triyas yaşlı Bozüyük Metamorfiklerinde ayrışma derecesinin artmasıyla geçirirliliğin de arttığı söylenebilir.

Gölet yerinde temel kayayı oluşturan, Bozüyük Metamorfikleri genel olarak az geçirimli – geçirimli bir birim olarak değerlendirilebilir. Gölet ekseninde yaklaşık 1.5 - 2 m kalınlığında yer alan altıvyon ve yer yer 1 m kalınlığa ulaşan yamaç molozunun tamamen kaldırılması uygun bulunmuştur. Gölet yerinde yapılan yüzeysel jeolojik çalışmalar ve açılan sondajlarda yapılan basınçlı su testlerinden elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, gövde altında yamaç molozu ve altıvyonun kaldırılmasından sonra geçirirlilik yönünden talvegde ve yamaçlarda bir kaç kademe dışında problem yaşanmayacak düzeyde olduğu görülmektedir. Bu durum dikkate alındığında memba-mansap yönünde su hareketinin yapılacak enjeksiyon perdesi ile önleneceği, diğer bir ifadeyle istenen geçirimsizliğin sağlanacağı düşünülmektedir.

Gölet eksen yeri ve çevresindeki temel kayayı oluşturan Bozüyük Metamorfikleri, çalışma alanında mikaşist, grafitist ve talkist olarak gözlenmektedir. Gölet yeri ve çevresinde gözlenen Bozüyük Metamorfikleri'ne ait birimler genel olarak yeşilimsi kahverengi – gri renkli olup şistozite gösterirler. Triyas yaşlı bu metamorfik birimlerin maruz kaldığı değişik zamanlarda gelişmiş olan tektonizma etkisi ile çok farklı konumlarda şistozite düzlemleri gözlenmektedir. Ancak, şistozite konumlarının baraj eksenine göre akış yukarı doğru eğime sahip olmasından dolayı herhangi bir geçirirlilik probleminin olması beklenmemektedir. Bununla beraber, baraj gövdesinin inşa edileceği alanda bulunan yamaç molozu ve altıvyonun sıyrılması ve barajın ana kayaya oturtulması planlanmıştır. Bu işlem sırasında kazı alanına bir miktar su gelmesi beklenebilir ancak uygun pompalarla söz konusu suyun deşarj edilmesi mümkündür. Ana kayanın dayanım karakteristikleri de göz önüne alındığında, gölet gövdesinde duraylılık açısından bir sorun beklenmemektedir.

8. Katkı Belirtme

Bu çalışma, TC. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, DSİ Eskişehir 3. Bölge Müdürlüğü'ne ait "Sakarya ili: Pamukova-Çilekli, Kemaliye (Deveboynu) ve Turgutlu, Merkez-Beşevler, Kütahya ili: Pazarlar-Orhanlar, Tavşanlı-Kışlademirli, Bilecik ili: Söğüt-Savcibey Göletleri Planlama Mühendislik Hizmetleri" projesi kapsamında, Suyapı Mühendislik ve Müşavirlik AŞ'nin katkılarıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu makalenin geliştirilmesinde, bilgi paylaşımı ve eleştirileri ile katkı koyan DSİ 3. Bölge Müdürlüğü, Bölge Müdürü Hayrettin Baysal'a, Bölge Md. Yrd. Şeref Dağdelen'e, Jeoteknik Hiz. ve YAS Şb. Md. Jeo Müh. Feridun İnce'ye, Jeo Müh. Osman Çakır'a, Jeo Müh. Sn. Engin Kaplan'a ve Jeo Yük. Müh. Sn Hüseyin Yavuz'a teşekkür ederiz.

Ayrıca, yazarlar makale ile ilgili finansman sağlayan ve bilimsel destekleri ile mühendislik tecrübelerini paylaşan tüm Suyapı Mühendislik ve Müşavirliğine, özellikle de Jeoloji ve Jeoteknik Bölümüne teşekkür eder.

Değerilen Belgeler

- Aksoy, H., Ercanoğlu, M. 2006. Determination of the rockfall source in an urban settlement area by using a rule-based fuzzy evaluation. Natural Hazards and Earth System Science 6, 941-954.
- Aksoy, H., Ercanoğlu, M. 2007. Fuzzified kinematic analysis of discontinuity-controlled rock slope instabilities. Engineering Geology 89, 206-219.
- Akyüz, S. 2010. Kargı baraj yeri (Çorum) litolojik birimlerin geçirgenlik özellikleri yönünden incelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 134s.
- Aldemir, A., Yılmaztürk, S.M., Yücel, A.R., Binici, B., Arıcı, Y., Akman, A. 2015. Beton barajların deprem davranışlarının incelenmesinde kullanılan analiz metotları. İMO Teknik Dergi 6943-6968.
- Ayaroğlu, H. 1979. Bozüyük metamorfiklerinin (Bilecik) petrokimyasal özellikleri. Türkiye Jeoloji Bülteni 22/1, 101-107.

- Bureau of Indian Standard, 1993. "Guidelines for the Design of Grout Curtain: Part 2: Masonry and Concrete Gravity Dams".
- Coli, N., Pranzini, G., Alfì, A., Boerio, V. 2008. Evaluation of rock-mass permeability tensor and prediction of tunnel inflows by means of geostructural surveys and finite element seepage analysis. *Engineering Geology* 10, 174-184.
- Eryılmaz Türkkân, G., Korkmaz, S. 2015. Kuyu ve akifer testlerinde uygulanan analitik ve sayısal yöntemlerle hidrolik iletkenliğin belirlenmesi. *İMO Teknik Dergi*, 6969-6991.
- Ewert, F.K. 2003. Discussion of Rock Type Related Criteria for Curtain Grouting". *Proceedings of the Third International Conference on Grouting in Rock and Ground Improvement*, ASCE Special Publication No. 120.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. 2005. *Geotechnical Engineering of Dams*. Taylor & Francis. London. UK.
- Foyo, A., Sanchez, M. A., Tomillo, C. 2005. A proposal for a secondary permeability index obtained from water pressure tests in dam foundations. *Engineering Geology* 77, 69-82.
- Günay, K. 1996. Zemin sondajlarındaki basınçlı su deneylerinde dikkat edilecek noktalar ve Lugeon deneyi. *Sondaj Sempozyumu'96*, 89-96, 1996-İzmir.
- Gürocak, Z., Alemdağ, S. 2012. Assessment of permeability and injection depth at the Atasu dam site (Turkey) based on experimental and numerical analyses. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 71, 221-229.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics). 2007. *Rock Characterization, Testing and Monitoring*. International Society of Rock Mechanics Suggested Methods, Pergamon Press, Oxford, 211 p.
- Karagüzel, R., Kılıç, R. 2000. The effect of the alteration degree of ophiolitic melange on permeability and grouting. *Engineering Geology* 57, 1-12.
- Kayabaşı, A., Yeşiloğlu-Gültekin, N., Gökçeoğlu, C. 2015. Use of non-linear prediction tools to assess rock mass permeability using various discontinuity parameters. *Engineering Geology* 185, 1-9.
- Kayadibi, Ö., Aydal, D., Kadioğlu, Y. K. 1994. Bilecik-Söğüt altın mineralizasyonunun incelenmesi. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni* 9, 252-259.
- Li, P., Lu, W., Long, Y., Yang, Z., Li, J. 2008. Seepage analysis in a fractured rock mass: the upper reservoir of Pushihe pumpedstorage power station in China. *Engineering Geology* 97, 53-62
- Lombardi, G. 1985. The Role of Cohesion in Cement Grouting of Rock, 15. *ICOLD-Congress*, Lausanne, 3, 235-261.
- Lugeon, M. 1933. *Barrage et Géologie*. Dunod. Paris
- Nonveiller, E. 1989. *Grouting Theory in Practice*. Elsevier, Tokyo.
- Pettersson, S.A., Molin, H. 1999. "Grouting and Drilling for Grouting: Purpose, Application, Methods with Emphasis on Dam and Tunnel Projects". *Atlas Copco*. 6991 1019 01
- Schleiss, A. J. Pougatsch, H. 2011. "Les Barrages: Du projet à la mise en service. Presses Polytechniques Universitaires Romandes 17, 714p.
- Suyapı, 2013. Savcıbey Göleti, mühendislik jeolojisi planlama raporu rev.1. DSİ 3. Bölge Müdürlüğü, Eskişehir.
- Şekercioğlu, E. 2007. Yapıların projelendirilmesinde mühendislik jeolojisi. *JMO yayınları* 28, 4. Baskı, s.117.
- Tunar, N.Ö., Ulusay, R., Işık, N.S. 2013. A study on geotechnical characterization and stability of downstream slope of a tailings dam to improve its storage capacity (Turkey). *Environmental Earth Sciences* 69, 1871-1890.
- Ulusay, R., Tuncay, E., Hasançebi, N. 2007. Liquefaction assessments by field-based methodologies for the foundation soils at a dam site in northeast Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 66 (3), 361-375.
- Yılmaz, M., Koral, H. 2007. Yenişehir Havzası'nın (Bursa) neotektonik özellikleri ve jeolojik gelişimi. *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yer Bilimleri Dergisi* 20, 21-32.
- Yılmaz, Y. 1979. Söğüt-Bilecik bölgesinde polimetamorfizma ve bunların jeoteknik anlamı. *Türkiye Jeoloji Bülteni* 22/1, 85-100.