

## Boraboy Heyelanında (Amasya) Jeomorfometrik Değerlendirmeler

Onur YAYLA  
Süleyman Demirel Üniversitesi  
onuryayla29@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0002-8710-3701

Yıldırım ATAYETER  
Süleyman Demirel Üniversitesi  
yilatayeter@sdu.edu.tr  
ORCID ID: 0000-0002-8710-3701

Araştırma Makalesi	DOI: 10.31592/aeusbed.1424749
Geliş Tarihi: 23.01.2024	Revize Tarihi: 17.03.2024
	Kabul Tarihi: 29.03.2024

### Atf Bilgisi

Yayla, O. ve Atayeter, Y. (2024). Boraboy heyelanında (Amasya) jeomorfolometrik değerlendirmeler. *Ahi Evran Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 169-187.

### Öz

Boraboy Gölü, Amasya ilinin kuzeyinde yer alan tipik bir heyelan set gölüdür. Çatağın Deresi vadisini kapatan heyelan setinin gerisinde suların birikmesiyle meydana gelmiştir. Bu çalışmada, Boraboy Gölü'nü oluşturan heyelan kütlesinin jeomorfometrik özelliklerinin Blokaj İndisi (BI), Hapsolmuş Su İndisi (II) ve Boyutsuz Blokaj İndisi (DBI) gibi jeomorfometrik indisler kullanılarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen verilerden Boraboy Gölü'nün üç indise göre Kararlı Oluşmuş Heyelan Set Gölleri sınıfında yer aldığı sonucuna ulaşılmıştır. Jeomorfometrik indislerde indislerin her biri için indis özelinde BI değerinin 8,97 olarak tespit edilmesi, setin hacmi ve drenaj alanı dikkate alındığında heyelan set gölünün kararlı olduğunu göstermiştir. 0,00021'lik II değeri, rezervuar hacmi ile heyelan set hacmi arasındaki dengeyi göstermektedir. Bu değerde yine kararlı bir set gölü olduğunu sonucunu ortaya koymuştur. Son olarak DBI değerinin -4,12 olması set gövde yüksekliğinin ve rezervuar kapasitesinin heyelan setini kararlı halde devam ettiğini göstermektedir. Genel olarak, göl uzun bir süredir varlığını devam ettirmektedir ve özellikle drenaj sistemi üzerinde uygun çalışmalar yapılarak göl kontrol edildiğinde, gelecekte de istikrarlı olarak varlığını koruyacağı düşünülmektedir. Ancak Kuzey Anadolu Fay zonunun yakınındaki tektonik hareketler, bölgedeki jeomorfolojik süreçlerde oluşabilecek riskler gibi birçok farklı muhtemel risk açısından gözlem ve yeni araştırmaların yapılması ihtiyacının göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Boraboy Gölü, jeomorfometrik indisler, heyelan, heyelan set gölleri.

## Geomorphometric Evaluations in Boraboy Landslide (Amasya)

### ABSTRACT

The Boraboy Lake is a typical landslide barrier lake located in the north of Amasya province. It was formed by the accumulation of water behind the landslide barrier that closed the Çatağı Stream valley. In this study, it was aimed to evaluate the geomorphometric properties of the landslide mass forming Boraboy Lake by using geomorphometric indices such as Blockage Index (BI), Impoundment Index (II) and Dimensionless Blockage Index (DBI). According to the data obtained, it was concluded that Boraboy Lake is in the Stable Landslide Dammed Lakes class according to three indices. The fact that the index-specific BI value for each of the indices in the geomorphometric indices was determined to be 8.97 showed that the landslide dammed lake was stable when the volume and drainage area of the set were taken into consideration. The II value of 0.00021 indicates the balance between the reservoir volume and the landslide embankment volume. It has been concluded that this value is a stable barrier lake. Finally, the DBI value of -4.12 indicates that the height of the embankment body and the reservoir capacity keep the landslide dam stable. In general, the lake has been in existence for a long time and it is thought that it will continue to exist steadily in the future, especially if the lake is controlled by appropriate studies on the drainage system. However, the need for observation and new research should not be ignored in terms of many different possible risks such as tectonic movements near the North Anatolian Fault zone and risks that may occur in geomorphological processes in the region.

**Keywords:** Boraboy Lake, geomorphometric indices, landslide, landslide dammed lakes.

### Giriş

Dünya yüzeyi bir sistemin ürünü olarak jeomorfolojik süreçler içerisinde şekillenmektedir. Özellikle son yıllarda küresel iklim değişimleri (Teller, Leverington ve Mann, 2002), yine bu iklim değişimleri ile buzullarda gerçekleşen erimeler sonucu bazı glasiyal ortamlarda gelişen göllerin ani boşalımı ile deniz seviyesindeki birtakım değişimler (Garcia-Castellanos vd., 2009; Teller vd., 2002)

ani taşkınların oluşturabileceği riskleri ortaya koymak adına önemli parametreler olarak görülmektedir. Ani taşkınların önemli jeomorfolojik ve jeolojik etkileri vardır. Nehir kanallarını ve yatak şekillerini de değiştirme yeteneğinde olan bu ekstrem hareketlerin ciddi erozyon ve sediman taşıma kapasiteleri bulunmaktadır (Carling, 2013; Carling ve Fan, 2020; Turzewski, Huntington ve LeVeque, 2019).

Çeşitli jeomorfolojik süreçlerde, heyelanlar, buzullar ve morenlerle ilişkilendirilenler de dahil olmak üzere, sık periyotlarda, dik dağlık ortamlarda akarsu vadi drenaj sisteminin tıkanmasıyla göl oluşumları meydana gelebilmektedir (Costa ve Schuster, 1988). Vadi yatağının tıkanması sonucunda göl oluşumu durumunda göllerin ömrünü, setlerinin hacim ve morfometrik durumları ile jeolojik ortam gibi etkenlerle birlikte gölün sürekli olma veya bozulma durumları belirlemektedir. Vadi yatağı yamacında gelişen heyelan sonucu vadinin tıkanması ile set gerisinde oluşan göl bazen seti bozarak hızla boşalabilme kabiliyetine sahiptir. İşte bu tarz boşalmalar da yukarıda bahsedilen ani taşkınların bir örneğini teşkil etmektedir ki, bu tarz göllerin olduğu vadinin mansabında yerleşmelerin olması durumunda bu durum ciddi bir afet potansiyeli taşımaktadır. Bu şekilde oluşan bazı göller uzunca bir süre varlıklarını korumakta kararlı bir tutum sergilemektedir. Göle gelen akarsuların, kabul havzaları gölün sediman biriktirme gücünü de belirlemektedir. Bu durumlarda da jeolojik özelliklere ve toprak yapısına uygun olarak bazı göller sediman ile dolarak kapanabilme kabiliyetini de taşımaktadır (Liu vd., 2015; Reneau ve Dethier, 1996).

Heyelan set göllerinin genel çoğunluğu kararsız bir durum gösterir. Bu şekilde oluşmuş 50 set gölü örneğinin 10 tanesi oluşumunun ilk gününde setin çökmesiyle bozulur. 20'den azı ise 1 yıldan daha uzun süre varlıklarını korur. Yukarıda da vurgulandığı üzere heyelan kaynaklı göllerde, bozulma ve tahrip olma ihtimali dahilinde oluşacak sel ile taşınacak moloz birikiminin ciddi afet oluşturma riski bulunmaktadır (Mason, 1929). Vadinin mansap kısmı boyunca aşırı ve yüksek miktarlarda aşınım erozyonu ve birikmesi ile hızlı bir şekilde set gölünün bozulması mümkün olabilmektedir (Crosta, Frattini, Fusi ve Sosio, 2011).

9 Nisan 2000'de Tibet'in güneydoğusundaki Zhamu Vadisi boyunca çok büyük bir heyelan ( $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ) meydana gelerek Yigong nehrini tıkamış ve bir heyelan set gölü oluşturmuştur. Ancak süreç içerisinde hemen bozulmayan heyelan set gölü iki ay kadar sonra haziran ayında setin bozulmasıyla ani ve büyük bir taşkına ortam hazırlamıştır. Yigong Nehri'nin mansap kısmında 4000 insanın yaşadığı bir kent, otoyollar, şehrin iletişim hatları gibi birçok unsur bu sel ile tahrip olmuş ve ciddi maddi hasar oluşturmuştur (Shang, Yang, Li, Liao ve Wang, 2003).

Türkiye'de de Dünya'da olduğu gibi akarsu vadilerindeki yamaç bozulmalarından kaynaklı olarak gelişen heyelanların vadi yatağını tıkayarak oluşan heyelan set göllerinin çok sayıda örneği vardır. Bu göllere ilişkin yapılan çalışmalarla (Akkan ve Gürgen, 1993; Akkan, Doğu, Çiçek, Gürgen, Yiğitbaşıoğlu ve Somuncu, 1993; Atayeter, Yayla ve Tozkoparan, 2020; Bayrakdar ve Görüm, 2012; Beret, 1955; Doğu, Çiçek ve Gürgen, 1994; Duman, 2009; Hoşgören ve Ekinci, 2004; Yayla, Atayeter ve Tozkoparan, 2021; Zeybek, 2002) bu şekilde oluşmuş gölleri meydana getiren heyelanlar üzerine katkılar sunmakta ve bu göllerin kararlı ya da kararsız olmasına dair bilgiler verilmektedir.

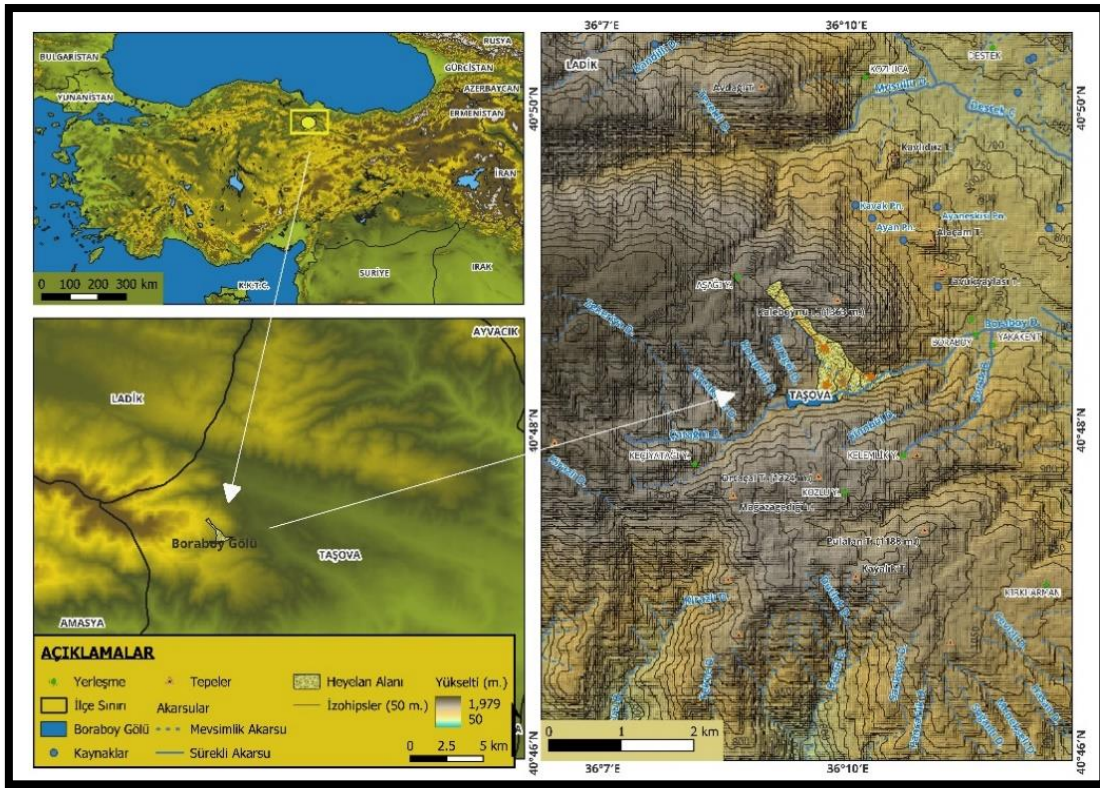
Heyelanlar afet oluşturma potansiyelinden ötürü birçok farklı disiplin içerisinde dinamik yönleriyle araştırmalara konu olmaktadır (Bozkurt, Akın ve Uşak, 2004; Özler, 2021). Bu çalışmada ise heyelan set göllerinin afet oluşturma süreçlerine ilişkin değerlendirmelerde bir örnek olan Boraboy gölü inceleme alanı içerisine alınmıştır.

Bu araştırmanın konusu olan Boraboy Gölü, Doğu vd.'ne (1994) göre bir heyelan set gölü olarak tespit edilmiş, o günün şartlarına göre jeolojik ve jeomorfolojik etüdü çok ayrıntılı ve detaylı bir şekilde yorumlanmıştır. Ancak bugüne kadar yapılan bilimsel araştırmalarda heyelan set gölünün kararlı olma veya bozulma durumuna ilişkin değerlendirme yapılmamıştır. Gölün bozulmaması veya sel yarınları oluşturarak üzerinden patlama yapmaması için betonarme dolu savak işlemlerinin 1993 yılında veya daha öncesinde yapıldığı da söz konusu çalışmada vurgulanmıştır (Doğu vd., 1994).

Bu çalışmanın amacı Boraboy heyelan set gölünü oluşturan heyelan ile göl arasındaki ilişkiyi modern yöntemlerle ele alarak gölün bu jeomorfolojik özelliklerini farklı bir bakış açısı ile incelemektir. Çalışmada Boraboy Gölü'nün sürekli kalma, bozulma ihtimali ve bozulur ise afet oluşturma potansiyeli ortaya konulmuştur.

### Araştırma Sahasının Yeri ve Sınırları

Araştırma sahası 36°70' D - 36°12' D boylamları ile 40°46' K - 40°50' K enlemleri arasında yer almaktadır (Şekil 1). Boraboy Gölü, Orta Karadeniz Bölümü içerisinde Karadeniz iç kesiminde Amasya'nın kuzeydoğu istikametinde Kuzey Anadolu Fayı (KAF)'nın güneyinde Boraboy köyünün batısında yer almaktadır. Boraboy Gölü KAF'ın güneyinde gelişen yüksek topoğrafya üzerinde Kaleboynu Tepe ile Ortaçal Tepe (1324 m) arasında akan Çatağın Deresi üzerinde derinin kuzeyinden harekete geçen kütlelinin vadiyi tıkamasıyla oluşmuş bir heyelan set gölüdür. Çatağın Deresi'nin kaynaklarını topladığı kabul havzası ve setin oluşum mekanizmasına etki eden formasyonların yüzeylendiği çalışma alanı yaklaşık 13 km<sup>2</sup>lik bir alanı kapsamaktadır.



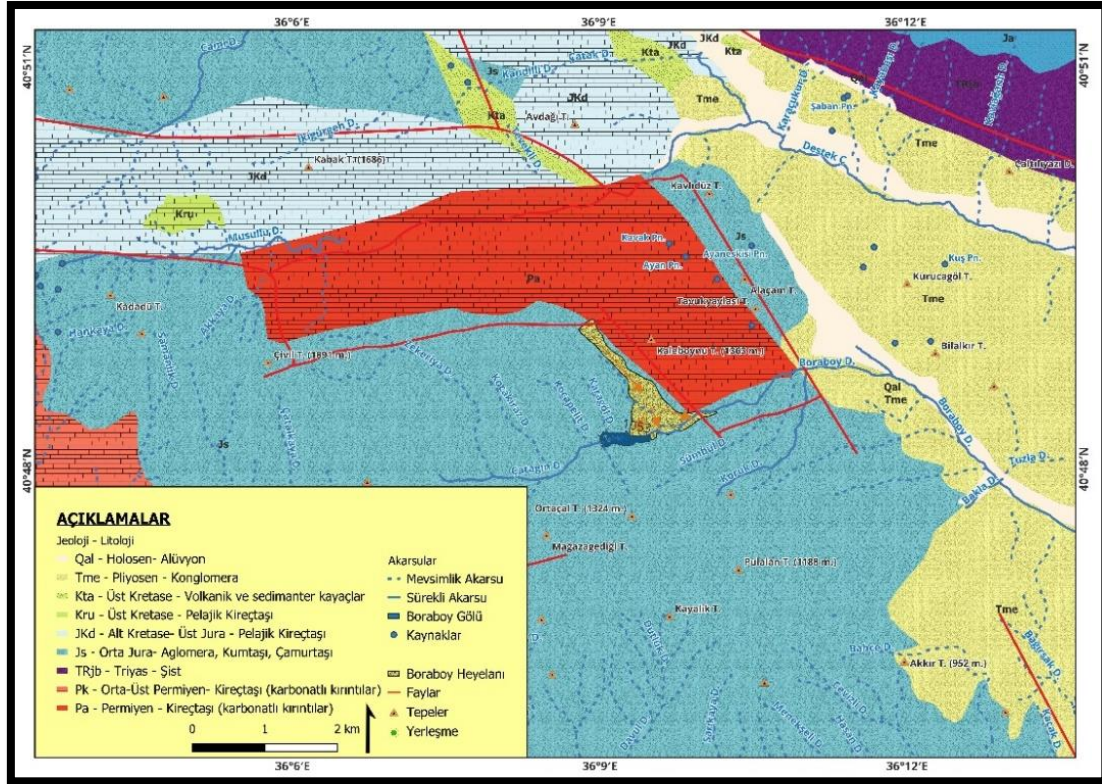
Şekil 1. Boraboy Gölü ve Yakın Çevresinin Lokasyon ve Topoğrafya Haritası

Boraboy Gölü ve yakın çevresi Kuzey Anadolu Fayı (KAF) tarafından kontrol edilmektedir. Bütün topoğrafya KAF'ın kırdığı Yeşilirmak grabeni yönünde aşınımını sürdürmektedir. Boraboy Gölü hidrografik olarak yıl boyu akış gösteren Çatağın Deresi üzerinde gelişmiştir. Akdağ kütlelinin doğusundan kaynaklarını alan Çatağın Deresi, Boraboy Deresi ile birleştikten sonra doğuya doğru akarak kaynaklarını önce Destek Çayı'na ve böylelikle Yeşilirmak Nehri'ne ulaştırmaktadır.

Boraboy Gölü, Yeşilirmak ile Tersakan Çayı arasındaki Akdağ kütlelinin doğu uzantısında yer almaktadır. Göl ve yakın çevresindeki litolojik birimler Paleozoyik'e ait kireçtaşlarından, Mesozoyik'e ait aglomera, tuf, kumtaşı, çakıştaşı gibi unsurlardan yine Mesozoyik'e ait Alt-Orta Jura kalkerlerinden Tersiyer'e ait konglomera ve kumtaşları ile Kuvaterner alüvyonlarından oluşmaktadır (Şekil 2). Bu saha özellikle Kuzey Anadolu Fay Zonu'na yakın bir konumda olmasından ötürü faylar tarafından kontrol edilmektedir. Özellikle heyelanın gerçekleştiği alan ve yakın çevresindeki çizgisellikler, fayların bölgenin morfolojisini kontrol etmekte oldukça aktif olduğunu göstermektedir (Aktimur, Tekirli ve

Yurdakul, 1990). Heyelan set gölünün çevresindeki litolojik birimler, Permiyen'e ait kristalize kalkerlerden, Jura'ya ait tortul aratabakalı tuf ve aglomeralardan ve Pliyosen'e ait karasal tortullardan oluşmaktadır (Doğu vd., 1994). Gölün olduğu saha ve yakın çevresinde iki formasyon daha fazla öne çıkmaktadır. Bunlar Paleozoyik Akdağ ile Mezozoik Seyfe formasyonlarıdır. Akdağ Formasyonu gri kurşuni renkli ve bol kalsit damarlı, yer yer oolitik kireçtaşı, yer yer pizolitik kireçtaşları ve yer yer de killi kireçtaşlarından meydana gelmektedir. Çatlak ve kırıkları yer yer şist vb. metamorfik unsurlarla dolmuştur. 2-400 m kalınlığa sahip olan bu birim yanıl olarak devamsızlık gösterirken bünyesindeki fosiller ile Permiyen yaşlı olduğu belirlenmiştir (Aktimur vd., 1990). Seyfe Formasyonu ise boz renki meta volkanit, yeşil şist, kireçtaşı bileşenli tuf ve aglomera ve marn araldanmasından meydana gelmektedir. 100-400 m kalınlığa sahip olan birim, denizaltı volkanizmanın bol olduğu neritik ortamlarda çökelmiş ve dereceli olarak Doğdu Formasyonu'na geçmektedir. İçerdiği fosillerden ötürü Liyas-Dogger yaşlıdır (Aktimur vd., 1990).

Özellikle gölün kuzeydoğusundaki kristalize kalkerler, faylar tarafından sınırlandırılmıştır. Bu nedenle, Permiyen kalkerleri, diğer formasyonlardan topografik özellikleri ile ayrılmaktadır. Araştırma sahasında en geniş alanı kaplayan Jura yaşlı birimler, tuf ve aglomeralar ile kil ve kumtaşlarından oluşur. Bu yapı, bölgenin iklim koşulları altında heyelan olaylarına uygun bir ortam sağlamaktadır. Boraboy Gölü'nün oluşumunda etkili olan heyelan olayları, özellikle Jura yaşlı birimler ve Permiyen kalkerleri arasındaki bir fay hattı ile ilişkilidir. Bu fay hattının geçtiği karşılaşma alanı ve çatlaklar boyunca yer altına sızan sular, tuf ve aglomeralar üzerinde kütle hareketlerini kolaylaştırmıştır (Doğu vd., 1994).



Şekil 2. Boraboy Gölü ve Yakın Çevresinin Jeoloji Haritası (Aktimur vd., 1990'dan yararlanılarak yeniden çizilmiştir).

Boraboy Gölü'nün olduğu saha ve yakın çevresinin iklimi üç farklı istasyonun verilerine dayanılarak ifade edilmiştir. Bu istasyonlardan ilçe istasyonu olan Taşova ve Lâdik, 10 yıllık dönemde veri birikimi olan istasyonlar iken üçüncü bir istasyon olan Amasya istasyonu ise 1961'den beri 61 yıllık veri ile Türkiye meteorolojisine veri sağlamaktadır (Meteoroloji Genel Müdürlüğü [MGM]). Ortalama sıcaklık tüm istasyonlar için temmuz ve ağustos aylarında en yüksek seviyelerde olduğu görülmektedir. Özellikle ağustos ayında Amasya'da 24,3 °C, Taşova'da 25,1 °C, Lâdik'te ise 19,6 °C ile en yüksek ortalama sıcaklık değerleri ölçülmüştür (MGM, Uzun Yıllar Verileri).

Boraboy Gölü ve yakın çevresindeki üç istasyon bazında ortalama sıcaklığın en düşük olduğu aylar da genel olarak ocak ve kasım ayları olarak belirlenmiştir. Özellikle ocak ayı içerisinde ortalama sıcaklık değerleri Amasya'da 2,6 °C, Taşova'da 4,1 °C, Lâdik'te ise 1,9 °C ile en düşük ortalama sıcaklık değerleri ölçülmüştür (MGM, Uzun Yıllar Verileri).

Boraboy Gölü ve yakın çevresi için benzer istasyonlar özelinde yağış durumu değerlendirilmiştir. Özellikle 10 yıllık periyod içerisinde Taşova ve Lâdik için elde edilen toplam yağış verileri değerlendirilmiştir. Bu durumda ocak ayı içerisinde en fazla yağış değeri Taşova'da 195,2 mm iken Lâdik'te 232,9 mm olarak ölçülmüştür. Ancak Amasya için durum değişiklik göstermektedir. Amasya istasyonunda elden edilen uzun yıllar (1961-2022) verileri incelendiğinde en fazla yağışın gerçekleştiği ay 1066,1 mm ile aralık ayı iken bunu takip eden ayın 1039,9 mm ile mayıs ayı olduğu görülmektedir. Yağış değerinin en az olduğu aylar ise Taşova için 56,6 mm ile ağustos ayı iken Lâdik için ise 6,2 mm ile yine ağustos ayı olduğu görülmektedir. Amasya için durumda benzer özellikler göstermektedir. 497,8 mm ile ağustos ayı en az yağışın gerçekleştiği aydır (MGM, Uzun Yıllar Verileri).

Heyelan set göllerinde kar yağışı ve kütlelerin kar erimelerine bağlı olarak harekete geçmesi önemli bir parametredir. Bu yüzden çalışma alanına en yakın istasyon olan Amasya istasyonunda kar örtülü gün sayıları incelenmiştir. Kar örtülü gün sayıları genel olarak her yıl ocak ayında gerçekleşmiş olup 20 günden fazla yerde kalmak suretiyle 1972, 1989, 1993, 2002, 2008 yıllarında gerçekleşmiştir. En fazla kar örtülü gün sayısı 25 gün ile 2002 ve 2008 yıllarının ocak ayında kaydedilmiştir.

## Yöntem

### Araştırma Modeli

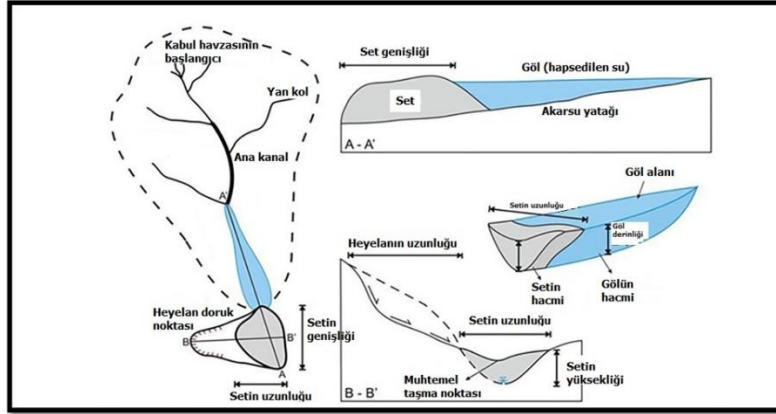
Araştırma, nicel araştırma yöntemlerinden oluşmaktadır. Bu çalışmada Türkiye'nin heyelan set göllerinden biri olan Boraboy Gölü'nün (Doğu vd., 1994) oluşumunda etkili olan heyelan kütlelerinin jeomorfometrik durumunu belirlemek üzere jeomoroflojik indisler kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Gölün jeomoroflojik süreçte oluşumunu ve gelecek süreçte de durumunu belirlemek adına jeomoroflojik indislere ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle çalışmada; Blokaj İndisi Blockage Index (BI) (Casagli ve Ermini, 1999; Ermini ve Casagli, 2002, 2003; Korup, 2004; Stefanelli, Segoni, Casagli ve Catani, 2016), Hapsolmuş (Tutulmuş) Su İndisi Impoundment Index (II) (Casagli and Ermini, 1999; Korup, 2004), Boyutsuz Blokaj İndisi Dimensionless Blockage Index (DBI), (Ermini ve Casagli, 2002; Ermini ve Casagli, 2003; Stafanelli vd., 2016)'den yararlanılmıştır (Şekil 6).

### Blokaj İndisi

Blokaj İndisi yöntemi, heyelan kütlelerinin vadiyi tıkayan heyelan setinin hacmi ile gölün oluşumuna sebep olan tıkanma noktasından akarsu kaynağına doğru akarsuyun toplandığı havza alanının ilişkisine dayanan bir indistir.  $BI = \log(V_d/A_b)$  formülü ile hesaplanmaktadır. Bu formülde  $V_d$ , vadiyi tıkayan heyelan setinin hacmini;  $A_b$  ise tıkanma noktasından akarsu menbaasına doğru havza alanı ( $km^2/m^2$ ) olarak ifade edilmektedir.

Canuti, Casagli ve Rinaldi (1998) ve Casagli ve Ermini (1998) çalışmalarında, heyelanın tüm hacmi yerine sadece heyelan set gölünün oluşumuna katkıda bulunan malzemenin dikkate alınması gerektiğine dikkat çekmişlerdir. Daha öncesinde ise bu tip çalışmalar ile heyelan set göllerindeki jeomorfolojik süreçleri inceleyen araştırmacılar olmuştur (Casagli ve Ermini, 1999). Vadiyi tıkayan heyelan kütlelerinin hacim hesaplamaları bu indisin net ve doğru sonuçlar vermesi açısından oldukça önemlidir. Bu kapsamda bu çalışmada farklı bir yöntem ile hacim hesaplamaları konusunda çalışmalar yapılmıştır. Hacmin hesaplanma sürecinde İnsansız Hava Aracı (İHA) aracılığıyla yüksek çözünürlükte sayısal yükselti modeli (SYM) oluşturulmuştur (Aguera-Vega vd., 2018). Boraboy Gölü için yüksek çözünürlüklü SYM sadece gölü oluşturan setin hacmini belirlemek için set üzerinde uçuş gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Ayrıca diğer analizlerin yapılması sürecinde Sentinel 1 uydu görüntüleri kullanılarak 10 m çözünürlükte SYM üretilmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir (Mohseni vd., 2023; Wang vd., 2023). Boraboy Gölü üzerinde hesaplamalar yapılmak üzere Fan vd.'nin (2020)

çalışmasındaki heyelanın jeomorfometrik parametreleri üzerinden değerlendirmeler yapılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Heyelan Set Göllerinin Havza, Set ve Göl Üzerindeki Jeomorfometrik Parametreleri (Fan, vd., 2020'den yararlanılarak yeniden düzenlenmiştir).

### Hapsolmuş (Tutulmuş) Su İndisi

Heyelan set göllerinin oluşum sürecini ve sürekliliğini değerlendirmek için Hapsolmuş (Tutulmuş) Su indisi (II) kullanılmaktadır. Bu indiste, vadiyi tıkayan heyelan setinin hacmi ( $V_d$ ) ile heyelan seti arkasında kalan gölün hacmi ( $V_1$ ) arasındaki oranın logaritması alınmaktadır.  $II = \log(V_d/V_1)$  (Casagli ve Ermini, 1999; Korup, 2004). Bu indisin jeomorfometrik parametreleri, daha önce yapılan çalışmalarda (Ermini ve Casagli, 1999; Korup, 2004) grafiksel olarak yorumlanmış ve heyelan set göllerinin süreklilik riskleri belirlenmiştir.

Bu çalışmada,  $V_d$  vadiyi tıkayan heyelan setinin hacmini BI başlığı altında anlatıldığı şekilde hesaplanmıştır.  $V_1$  ise heyelan seti arkasında kalan gölün hacmini göstermektedir. Gölün hacmini hesaplamak için batimetrik verilere ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla, arazi çalışması sırasında GPS ile göl üzerinde lokasyonlar alınmış ve bu noktalardan şerit metre yardımı ile derinlik ölçümleri yapılmıştır. Birçok noktadan alınan derinlik ölçümleri Coğrafi Bilgi Sistemleri'nden QGIS tarafından sistemde analiz edilmiş ve b-splash enterpolasyon yöntemi ile enterpole edilerek batimetri çıktılarına ulaşılmıştır.

### Boyutsuz Blokaj İndisi (DBI)

Boyutsuz Blokaj İndisi (DBI)  $DBI = \log(A_b \cdot H_d / V_d)$  formülü ile hesaplanmaktadır. Boyutsuz blokaj indisi (DBI), temel olarak heyelan setinin yüksekliğini (m) işe koşturmaktadır. Ayrıca vadiyi tıkayan heyelan kütlelerinin hacmi ( $m^3$ ) ve gölün oluşumuna sebep olan tıkanma noktasından akarsuyun menbasına doğru suyun toplandığı kabul havzasının alanı ( $m^2$ ) arasındaki ilişkiyi ifade eder (Ermini ve Casagli, 2002, 2003). Bu ilişki, heyelan set gölünün yüksekliği suyun tıkanma noktasında taşma yaptığı yerden heyelanın akarsu yatağına mansap yönünde ulaştığı en son nokta arasındaki kot farkının ölçümü ile belirlenmektedir. Ölçülen bu değer, gölün tıkanma noktasının üzerinden aşır taşma durumu ile akarsuyun yatağını temizleyerek yeniden akışa geçebilme durumu üzerine de değerlendirmeler yapılabilmesine olanak tanımaktadır (Stefanelli vd., 2016). Heyelan setinin yüksekliği, vadi tabanından suyun taşma noktasına olan dikey irtifa farkıdır ve metre cinsinden tanımlanır (Costa ve Schuster, 1988). Setin gerisinde su birikimi oluşmasından sonra heyelan setinin yüksekliğine bağlı olarak bu setin gerisinde oluşacak göl setin yüksekliğine göre kararlı veya kararsız olma durumuna göre davranış oluşturabilmektedir. Biriken su setin yüksekliğine ulaştıktan bir müddet sonra su tıkanma noktasının en alçak ve aşırıma en uygun kısmından aşarak yeni bir yatak içinden geçip yoluna devam edecektir. Bu sürecin gelişmesinde akarsuyun hidrolik eğimi ile heyelan kütlelerinin eğimi arasındaki ilişki, suyun seti yeniden aşmasında belirleyici faktörler olarak ortaya çıkmaktadır.

Boraboy heyelan set gölünde, heyelan setinin yüksekliğini tespit etmek için öncelikle tıkanma noktasında GPS ile yükseklik ölçümü yapılmıştır. Ardından heyelanın topuk noktası ile setin en yüksek olduğu alan arasındaki irtifa farkı heyelan setinin yüksekliğini ( $H_d$ ) ifade ettiği için topuk noktasından da ölçümler alınarak setin yüksekliği belirlenmiştir. Heyelan setinin hacmi ( $V_d$ ) ve setin tıkanma yaptığı noktadan akarsu kaynağına doğru kabul havza alanının ( $A_b$ ) hesaplanma süreci yukarıda BI başlığında açıklanmıştır. Bütün indisler üzerinde kullanılabilir verilerin seti açık bir şekilde ifade edilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1

*Çalışmada Kullanılan Jeomorfometrik Parametreler (Yayla vd., 2021).*

Jeomorfometrik Parametreler	Tanım	Kaynak
$V_d$	Heyelan sadece bir set olarak vadiyi tıkadığı kütle hacmi	1 m SYM (İHA)
$D_d$	Vadi içerisini dolduran heyelan kütle hacmi	GPS
$A_b$	Suyun tıkanma noktasından akarsu kaynağına doğru havza alanı	Harita Genel Müdürlüğü HGM Ortofoto, 10 m SYM
$H_d$	Heyelan setinin suyun setten aşma yaptığı alan ile heyelan topuğunun arasındaki yükselti farkı	GPS, 10 m SYM
$V_l$	Heyelan sonucu oluşmuş olan gölün hacmi	Arazi çalışmaları ile hesaplanmıştır

Boraboy heyelan set gölü İHA ile yapılan uçuşlarda gölün 3 boyutlu modeli oluşturulmuş olup göl üzerinde Yer Kontrol Noktaları (YKN) tespit edilerek bu alanlar tamamen ağaçsız ve açık lokasyonlar olarak belirlenmiştir. Bu alanlar üzerinde GPS ve İHA'nın eşleştirmeleri yapılarak göl ve yakın çevresinin jeomorfometrik parametreleri hesaplanmıştır.

## Evren ve Örneklem

Çalışma Türkiye'deki heyelan set göllerinden Boraboy Gölü örnekleme üzerine temellendirilmiştir. Araştırma Boraboy Gölü ve kabul havzası ile sınırlıdır.

## Veri Toplama Araçları

Araştırmada arazi üzerinden elde edilen ölçümler ile veriler toplanmıştır. Ölçümlerde lazermetre, şeritmetre, GPS ve İHA kullanılmıştır.

## Verilerin Toplanması ve Analizi

Çalışmada veriler, arazi üzerinde yapılan ölçümler ile toplanmıştır. Bu ölçümler ofis çalışmaları ile analiz edilmiştir. Ofis çalışmalarında farklı yazılımlar kullanılarak veriler çözümlenmiştir. Temelde açık kaynak kodlu yazılımlar kullanılmıştır. Bütün işlemler QGIS üzerinde analiz edilmiştir. İHA'dan elde edilen veriler ise CloudCompare yazılımı ile analiz edilmiş ve çözümlenmiştir.

## Araştırma Etiği

Araştırmada etik kurul alınmasını gerektiren bir veri seti kullanılmamıştır. Bu yüzden etik kurul belgesi alınmamıştır.

## Bulgular

Boraboy Gölü uzun bir dönem önce gerçekleşen bir heyelanın Çatağın Vadisi'nin tabanının tıkanması sonucu meydana gelmiş tipik bir heyelan set gölüdür. Boraboy Gölü'nün oluşmasına sebep olan bu heyelanın kuzeyinde iki farklı jeolojik birimin disloke olması ile bu birimlerin karşılaşma sınırında gerçekleşmiş bir kütle hareketi ile oluşmuştur. Bu sahada kütle hareketlerine zemin

hazırlayacak tetikleyici unsurlardan biri olan tektonik faaliyetler de çalışma alanını doğrudan etkilemiş olmalıdır. Özellikle KAF çalışma alanının güneyinin Yeşilirmak grabenin içerisinde olması Boraboy Gölü ve yakın çevresini doğrudan etkileyen tektonik faaliyetlerin bu sahada da yaşanmasının kaçınılmaz olduğu fikrini pekiştirmektedir (Fotoğraf 1).



Fotoğraf 1. Kuzey'den Güney'e Boraboy Gölü ve Gölü Oluşturan Setin Panoramik Görünümü (Fotoğraf kuzeyden güneye doğru alınmıştır).

### Boraboy Heyelan Set Gölünün Blokaj İndisine (BI) İlişkin Bulguları

Boraboy heyelan set gölü setin hacim hesaplamaları yapılabilmesi için İHA, Sentinal 1 ve GPS verilerinden yararlanılmıştır. Bu kapsamda hacim hesaplama işlemlerinde heyelanın hareketi başlattığı heyelan doruk noktası ile topuk arasındaki kütle hacmi yerine sadece  $V_d$  olarak ifade edilen seti oluşturan kütle hacmi hesaplanmıştır (Canuti vd., 1998). Heyelan kütlesi üzerindeki ölçüm ve hesaplamalar İHA tarafından elde edilen model üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca güvenilirliğini test etmek için lazermetre ile kontrol edilmiştir. Bu kapsamda elde edilen veriler doğrultusunda ulaşılan parametrelerin değeri şu şekildedir;  $W_d$  125,50 m,  $L_d$  969 m,  $D_d$  217 m,  $V_d$  103838328,56 m<sup>3</sup>tür.

Blokaj İndisi (BI) kapsamında değerlendirilecek bir diğer parametre ise  $A_b$ 'dir.  $A_b$ , gölü oluşturan heyelan setinin tıkanmayı gerçekleştirdiği alandan menba'ya doğru akarsuların suyu topladığı kabul havzası olarak ifade edilmektedir. Sentinal 1 verisinden elde edilen 10 x 10 m çözünürlükteki veriler ile hidroloji analizleri gerçekleştirilmiş olup heyelan set gölünün kabul havza sınırları belirlenmiştir. Bu sınırların hesaplanması sonucunda  $A_b$ , 11 km<sup>2</sup> alandan su topladığı verisine ulaşılmıştır. Bu hususta BI değerlendirilmesi için veriler formüle yerleştirildiğinde sonuç aşağıdaki gibidir.

$$BI = \log(V_d/A_b); BI = \log(103838328,56/11) = 6,97$$

BI hesaplamalar gerçekleştirildiğinde literatüre göre üç farklı sınıfta değerlendirilmektedir (Canuti vd., 1998; Casagli ve Ermini, 1999; Tablo 2). Bu değerlere göre Boraboy heyelan set gölünün BI değeri 6,97 olarak tespit edilmiştir.  $6,97 > 5,68$  değerinden büyük olmasından ötürü sınıflandırma ölçeğinde "Kararlı Oluşmuş Heyelan Set Gölleri" sınıfında değerlendirilmektedir.



Tablo 2

*Blokaj İndisi (BI) Verilerine Göre Boraboy Heyelan Set Gölünün Sınıflandırılması.*

Sınıfı	Değeri
Kararlı Oluşmuş Heyelan Set Gölleri	$BI > 5.68$
Kararsız Oluşmuş Heyelan Set Gölleri	$3.00 < BI < 5.68$
Oluşmamış Heyelan Set Gölleri	$BI < 3.00$

## Boraboy Heyelan Set Gölünde Hapsolmuş Su İndisine (II) İlişkin Bulguları

Hapsolmuş su indisi, heyelanın gerçekleşmesi ile vadiyi tıkayan kütlelerin hacmi ( $V_d$ ) ( $m^3$ ) ve setin gerisinde meydana gelen gölün hacmi ( $V_1$ ), ( $m^3$ ) arasındaki ilişkiyle belirlenmektedir.  $V_d$  verisi Blokaj İndisi başlığında elde edilmiştir ve  $V_d$  103838328,56 olarak belirlenmiştir. Gölün hacmi olan  $V_1$  verisi ise göl yüzeyinde bot ile yapılan ölçümler ile elde edilmiştir. Ağırlık uçlu bir şerit metre yardımı ile GPS ile konumu belirlenen noktalardan derinlik ölçümü alınarak gölün derinlik veri seti ortaya çıkarılmıştır. Ardından bu veri seti Coğrafi Bilgi Sistemleri'nden QGIS yazılımı ile sayısallaştırılmış ve b-spline enterpolasyon yöntemi ile batimetri raster formatı oluşturulmuştur. Böylece batimetri veri tabanı oluşturulan Boraboy heyelan set gölünün hacim değerleri elde edilmiştir. Bu değerlere göre  $V_1$  103788377,24'tür. Gölün hacim değerlerinin hesaplanması için yapılan derinlik ölçümlerini gösteren lokasyon alanları ve gölün batimetrik durumunu yansıtan batimetri haritası yapılmıştır.

Elde edilen veriler Hapsolmuş Su Indisi formülünde yerine konulduğunda Boraboy Gölü için;  
 $II = \log(V_d/V_1)$ ;  $II = \log(103838328,56/103788377,24) = 0,00021$

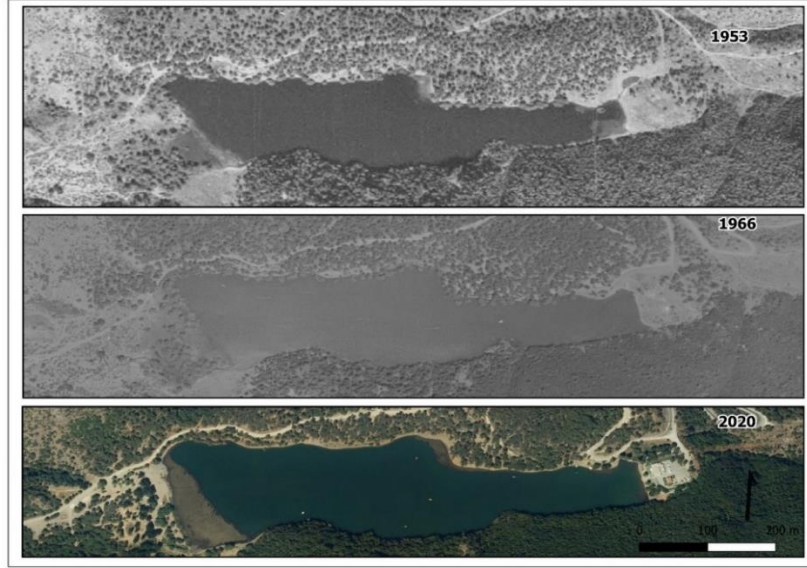
Hapsolmuş su indisine göre heyelan set gölleri iki farklı sınıfta değerlendirilmektedir (Casagli ve Ermini, 1999; Korup, 2004; Tablo 3). Boraboy heyelan set gölü elde edilen sonuca ve indisin değerlerine göre "Kararlı Oluşmuş Heyelan Set Gölleri" sınıfında yer almaktadır.

Tablo 3

*Hapsolmuş Su İndisine Göre Heyelan Set Göllerinin Sınıflandırılması (Korup, 2004).*

Sınıfı	Değeri
Kararlı Oluşmuş Heyelan Set Gölleri	$II < 1$
Kararsız Oluşmuş Heyelan Set Gölleri	$1 < II$

Sonuçlar değerlendirildiğinde yaklaşık olarak vadiyi tıkayan heyelan kütlelerinin hacmi kadar tıkanma noktasının gerisinde su depolanmaktadır. Rezervuarın hacimsel değeri setin hacimsel değeri ile eşdeğer olarak görülmektedir. Ancak göl sularının Boraboy Gölü'nün dolu savak kısmına yapılan bir tahliye ortamı ile mansap kısmında yer alan yerleşim alanlarını korumak adına kontrollü bir şekilde suyun salındığı görülmektedir. Böylelikle suyun aralıklı olarak tahliyesi sayesinde Çatağın Deresi taşıdığı sediman ve yük ile gölü kısmen dolduracak ve sete baskı uygulayacak olan su hacmini azaltarak baskı gücünü de azaltmış olacaktır. Yakın çevresindeki halk için kıymetli bir rekreasyon alanına dönüşen bu sahanın merkezinde yer alan gölün sediman ile dolup kapanmasını önlemek ve taşkınlara engel olmak adına Çatağın Deresi vadisinde göl alanından menbaya doğru dört farklı küçük setleme çalışması yapılmıştır. Bu setlemeler aslında göle gelecek yoğun ve ani yağışlar sonrası büyük su ve malzeme girişi önlenmek istenmiştir. Bu hususta başarılı olunarak gölün dolması engellenmiş, gölün alüvyal düzlüklerinde büyük ağaçlar yetiştirilerek kamp ve piknik alanları oluşturulmuştur. Farklı tarihlere yönelik hava fotoğrafları incelendiğinde gölün esasen zaman içerisinde dolmasının engellendiği ve su seviyesinin yükseldiği tespit edilmiştir. Bu yükselmeler de kontrollü bir şekilde gölün taşma noktası olan savak bölgesinden salınmak suretiyle kontrol altında tutulmaktadır. Özellikle farklı yıllardaki yağış ve sediman taşıma durumlarına bakıldığında sığ olan kısımlarda su olmadığı ancak son yıllarda suyun geriye doğru genişlediği görülmektedir. Bu hususta indisten edinilen yorumlamalara göre Boraboy heyelan set gölü "Kararlı Oluşmuş Heyelan Set Gölleri" sınıfında yer almaktadır. Uzun yıllar önce gerçekleşen heyelan olayı sonrası varlığını devam ettirmektedir (Şekil 4).

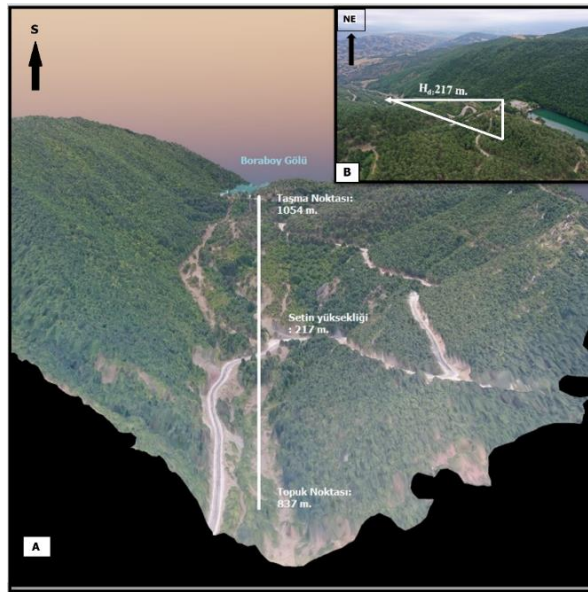


Şekil 4. Farklı Tarihlerde (1953, 1966, 2020) Boraboy Gölü'nden Alınan Hava Fotoğrafları (HGM)

#### Boraboy Heyelan Set Gölünde Boyutsuz Blokaj İndisine (DBI) İlişkin Bulguları

Boyutsuz Blokaj İndisi'nin hesaplanmasında farklı parametrelere ihtiyaç vardır. Burada aslında heyelanın z değeri olarak ifade edebilecek setin yüksekliği diğer parametreler ile işe koşulmaktadır. Bu indisin çalıştırılma prensipleri içerisinde heyelanı tıkayan setin tıkanma noktası ile heyelanın topuk noktası arasındaki noktaların kot farkı heyelanın yüksekliğini ifade etmektedir. Bu hususta elde edilen hesaplamalara göre heyelanın yüksekliği ( $H_d$ ) 217 m olarak tespit edilmiştir. İndiste kullanılan diğer parametreler ise vadiyi tıkayan heyelan setinin hacim değeri ( $V_d$ ) ve akarsuyun Boraboy Gölü'nün tıkanma noktasından geriye doğru akarsuyun kabul havza alanı ( $A_b$ )'dır.

Heyelan setinin tıkanma noktası veya bir diğer bakış açısı ile gölün taşma yapmasıyla yeni yatağının başlangıç alanının yüksekliği 1054 m olarak tespit edilmiştir. Heyelanın yüksekliğinin belirlenmesinde bir diğer lokasyon ise heyelan topuğudur. Heyelan topuğunun yüksekliği ise 837 m olarak tespit edilmiştir. İki nokta arasındaki irtifa farkı veya yüksekliği ise 217 m olarak hesaplanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. A) İHA'dan Üretilmiş 3 Boyutlu Model Üzerinde Heyelan Setinin Yüksekliği. B) Arazi Çalışmaları Sırasında Setin Güneydoğu Yönüne Doğru Çekilmiş Fotoğrafı.

Boraboy heyelan set gölü için elde edilen veriler formülde işlendiğinde;  
 $DBI = \log (A_b.H_d/V_d)$ ;  $DBI = \log (11.217/103838328,56) = -4,12$

Tablo 4

*Boyutsuz blokaj indisine göre heyelan set göllerinin sınıflandırılması (Ermini ve Casagli, 2003, 2004).*

Sınıfı	Değeri
Kararlı Oluşmuş Heyelan Set Gölleri	$DBI < 2,43$
Kararsız Oluşmuş Heyelan Set Gölleri	$2,43 < DBI < 3,98$
Oluşmamış Heyelan Set Gölleri	$DBI > 3,98$

Elde edilen verilerde sonuçları üç sınıf içerisinde değerlendiren Boyutsuz blokaj indisine göre Boraboy heyelan set gölünün “Kararlı Oluşmuş Heyelan Set Gölleri” sınıfı içerisinde yer aldığı görülmektedir (Tablo 4). Set gerisinde biriken suyun hacimsel değeri, suyun toplandığı kabul havzasının büyüklüğünün yanı sıra setin hacimsel değeri, setin yüksekliği, genişliği ve uzunluğu gölün kararlı bir şekilde varlığını sürdürebilecek olmasını ortaya koymaktadır. Boraboy Gölü ve yakın çevresi çok eski dönemde gelişmiş bir heyelan olması gölün de uzun yıllar varlığını sürdürüyor olması gelecekte de varlığını devam ettirme potansiyelinin yüksek olduğunun bir göstergesidir.

### Sonuç, Tartışma ve Öneriler

Heyelan set göllerinde, heyelan setlerinin hacim değerleri ile gölü oluşturan akarsuyun kabul havzasının alanı ve yine gölün sete uyguladığı hacimsel basınç değerleri heyelan set göllerinin kararlı bir durum oluşturması ya da kararsız olarak bozulmasına yönelik sonuçlar ortaya koyabilecek önemli parametrelerdir. Bu parametrelere göre üç farklı indis üzerinde yorumlamalar ve değerlendirmeler yapılmıştır. Bunlar Blokaj İndisi, Hapsolmuş Su İndisi ve Boyutsuz Blokaj İndisi’dir. Üçünü de birbirinden ayıran temel parametreler arasında heyelan setinin hacmi ( $V_d$ ), set gerisinde oluşan gölün hacmi ( $V_i$ ), setten itibaren akarsuyun menbasına kadar ulaşan kabul havzasının alanı ( $A_b$ ), heyelan setinin tıkanma yaptığı yükseklik değeri ile heyelanın topuk noktası arasındaki rakım farkını gösteren heyelan yüksekliğidir ( $H_d$ ). Heyelan set göllerinde hacim değerlerinin tahmin edilmesi ve hesaplanması için iki farklı hacim değerine ihtiyaç vardır. Bunlar, heyelan kütlelerinin hacmi ve seti oluşturan sadece vadiyi tıkayan tıkanma kütlelerinin hacmidir. Heyelan set göllerinde heyelan kütlelerinin hacim değeri teorik olarak drenaj sisteminin vadi morfolojisi üzerindeki etkisiyle açıklanmaktadır (Argentin vd., 2021). Bütün bu süreç içerisinde gölün hacmi, heyelanın hacmi ve vadi şekliyle ilişkilidir. Vadinin genişliği, derinliği (vadinin kenar yüksekliği), vadinin uzunlamasına eğimi ve setin yüksekliği tamamen söz konusu akarsuyun drenaj alanına bağlı olarak gelişmektedir (Argentin vd., 2021; Flint, 1974; Whitbread, Jansen, Bishop ve Attal, 2015).

Boraboy Gölü’nün oluşum sürecinde gerçekleşen heyelan ve heyelan setinin sürekli olma veya kontrol edilme durumu heyelan setinin dolu savak alanı planlanarak Boraboy Gölü’nde veya Çatağın akarsu drenajında gerçekleşecek bir ani su yükselmesi veya sel gibi oluşumlarda setin kontrolü bir yapay savak sistemi ile düzenlenmiştir. Bu kısımda göldeki biriken ve yükselen su değerleri kontrollü olarak Çatağın Vadisi’nden Destek Çayı’na doğru yönlendirilmektedir. Bu kontrolün yapılmasındaki en büyük etken vadinin tam kenarında yerleşim yeri olan Boraboy köyü üzerine gelebilecek kontrolsüz ve ani yükselen suların oluşturacağı yıkımı engellemektedir.

Fan vd.’ne (2020) göre yapılan çalışmalarda ve elde edilen envanter örneklerinde heyelan setlenme durumları üzerinde yapılan çoklu çalışmalar değerlendirilmiştir. Bu çalışmalarda set gerisinde oluşan heyelan set göllerinin büyük bir bölümü (%70) zaman içerisinde yok olmuştur. Ancak bu yok oluş süreci ayrı bir araştırma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle yok olma aşamasında bir set bozulması ile oluşan yıkım ile mi gerçekleşmiştir yoksa set ve setin gerisinde oluşan göl geçici bir kaide seviyesi olarak oluşmuş ve ardından bu kaide seviyesi mabadan alacağı sedimanları burada depolayarak gölü doldurması ile mi kapanmıştır sorusu hep araştırmacılar tarafından tartışılmaktadır (Shafieiganjeh, Ostermann, Schneider-Muntau, ve Gems, 2022). Özellikle setlerin bozulması

durumunda oluşan vakaların %40'ı setin yıkılma ya da taşkın oluşturma durumu tespit edilememiştir. Bu durumda göllerin kaybolması veya ortadan kalkma süreci genel olarak göl alanının sediman birimlerle doldurularak kapanmasıyla sonuçlanmıştır (Fan vd., 2020). Bir başka bakış açısına göre ise göle gelen akarsu girişi kontrol altına alınması durumunda havzanın gölü doldurma durumu da buna bağlı olarak değişmektedir (Korup, 2004).

Boraboy Gölü'nde de buna benzer bir durum gözlemlenmektedir. Göl uzun zamandır varlığını devam ettirmektedir. Çatağın Deresi'nin menbasından kaynaklarını toplayarak göle kadar gelen irili ufaklı akarsuların toplam kabul havza alanı 11 km<sup>2</sup>'dir. Bu kadar geniş alandan taşınan sedimanlar yağışın ve yağış tarafından oluşturulan sel vakalarında bu akarsuyun yük taşıma kapasitesine bağlı olarak gölü doldurmaya yetecek derecede sediman taşıma kabiliyetine sahip olduğu arazi çalışmalarında tespit edilmiştir.

Gölün dolmasının engellenmesi ve zaman içerisinde sellenme ile gelen büyük su taşıma dönemlerinde gölde taşkın yaratmaması için göle müdahale edilmiş ve bu göle katılan akarsular üzerinde farklı seviyelerde setlemeler yapılmıştır (Fotoğraf 2ab). Özellikle gölün kabul havzası içerisinde heyelan seti kotu olan 1054 m'den itibaren yukarıya doğru 1075 m, 1110 m, 1129 m, 1220 m rakımda olmak üzere 4 set Çatağın Vadisi üzerine kaynağa doğru inşa edilmiştir. Bu setler akarsuların talveglerinden yaklaşık 5- 6 m yüksek olacak şekilde inşa edilmiştir (Fotoğraf 2a). Zaman içerisinde bu setlerin gerisi taşınan sedimanlar ile yaklaşık 2-3 m kadarı dolmuş hatta 1220 m ve 1129 m rakımlardaki setlemeler neredeyse tamamen sedimanlar tarafından doldurulmuştur (Fotoğraf 2b).



Fotoğraf 2. 1075 m Rakımdaki Gölün Sediman Dolumunu Engellemek İçin Yapılan Set (Uydu Fotoğraflarından Bu Setin 2000 ile 2010 Arasında Yapıldığı Anlaşılmaktadır).



Fotoğraf 3. 1129 m Rakımdaki Gölün Sediman Dolumunu Engellemek İçin Yapılan Set Tamamen Sediman ile Dolmuş ve Kapanmıştır (2023).

Boraboy Gölü'nün kararlı olma durumu jeomorofometrik parametreler ve indisler ile değerlendirildiğinde gölü oluşturan heyelan setinin BI, II, DBI indisleri ile değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu değerlendirmeler sonucunda indislerden elde edilen veriler bu konuda yapılan çalışmalar (Casagli ve Ermini, 1999; Ermini ve Casagli, 2002; Tacconi Stafenelli vd., 2016) ile değerlendirildiğinde indisler üzerinden yapılan yorumlamaların genel olarak doğru orantılı sonuçlar ortaya koymaktadır.

Bu değerlendirmeler kapsamında Blokaj İndise (BI) göre Boraboy Gölü'nün Blokaj İndis değeri 8,97 olarak belirlenmiştir. Canuti vd.'ne (1998) göre Boraboy heyelan set gölü "Kararlı Oluşmuş Heyelan Set Gölleri" sınıfı içerisinde değerlendirilmiştir. Bu indise göre heyelan set gölünün setin hacmi ile kabul havza alanına göre gölün risk oluşturmadığı ve varlığını sürdürmeye devam edeceği sonucu elde edilmiştir. Ancak yine de göle gelen sedimanlar Fotoğraf 2'de görüldüğü üzere göl alanını doldurabilecek düzeyde malzemeyi taşıyabilecek güce sahiptir. Eğer beşerî müdahaleler edilmemiş olsa bile indislerden elde edilen bulgulara göre varlığını devam ettirecektir. Ancak belki de daha sık, daha az suyu bünyesinde taşıyabilecek bir görünüm ortaya koyabilecektir. Bu durumda indis değerlerine göre göl kararlı bir şekilde varlığını devam ettirmektedir.

Boraboy Gölü, Hapsolmuş Su İndisine (II) göre değerlendirilmiş ve indis değeri 0,00021 olarak bulunmuştur. Korup'a (2004) göre Boraboy Gölü'nün  $II < 1$  değerinden az olması gölü "Kararlı Oluşmuş Heyelan Set Gölleri" sınıfında değerlendirilmektedir. Boraboy Gölü de hapsolmuş su indisine göre kararlı, uzunca yıllar da varlığını sürdürebilecek durumda bir heyelan set gölü olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak bu değerlendirmede elde edilen verilere göle göldeki suyun hacmi ile heyelan setinin hacmi hemen hemen aynı değerlere karşılık gelmektedir. Bu hususta suyun oldukça yükseldiği ve seviyenin setin üzerinden taşma yaptığı alanlarda beşerî kontrol ve müdahaleler gölün daha uzun yıllar varlığını sürdürmesi açısından önemlidir.

Boraboy Gölü, Boyutsuz Blokaj İndisine (DBI) göre değerlendirildiğinde indis değeri -4,12 olarak tespit edilmiştir. Ermini ve Casagli'e (2003) göre değerlerin genel olarak 2,43'ün altında olması gölün kararlı bir şekilde varlığını devam ettireceği anlamına gelen bir sonuç ortaya koymaktadır. Boraboy Gölü de DBI'ye göre "Kararlı Oluşmuş Heyelan Set Gölleri" sınıfında yer almaktadır.

Boraboy Gölü tarihi süreç içerisinde eski bir heyelan tarafından Çatağın Vadisi'nin tabanını doldurarak vadinin tıkanması sonucu oluşmuş setin gerisinde suların depolanmasıyla meydana gelmiştir. Göl ve yakın çevresi farklı jeolojik birimlerden meydana gelmiştir. Özellikle yüksek eğim değerlerine sahip bu topoğrafyanın jeolojisi ağırlıklı Permiyen'e aglomeralar ve tüflerden oluşan birimlerden

oluşmaktadır. Çalışma sahasında tektonik faaliyetlerin de etkisi ile gelecekte bu zemin üzerinde farklı kütle hareketlerinin meydana gelmesi mümkündür. Bu yüzden gölün sürekliliği ve kararlılığı açısından değerlendirilmesi önemlidir.

Gölde yapılan araştırmalar ile üç farklı indis özelinde farklı parametrelerin yorumlanmasıyla ortak bir sonuca ulaşılmıştır. Bu sonuç, Boraboy heyelan set gölünün varlığını kararlı bir şekilde devam ettirmesidir. Araştırma sonucunda elde edilen verilere göre göl ve yakın çevresinde yapılan beşerî müdahaleler ile Boraboy Gölü ve yakın çevresi şekillenmiştir. 1953 yılında göl ve çevresi bugünün şartlarından oldukça farklı bir ortam sunmaktadır (Şekil 9). Bu tarihte heyelanın vadi tabanını doldurması ile oluşturduğu setin gerisinde ve setin üzerinde iki farklı göl meydana getirmiştir. Ancak muhtemeldir ki o heyelan ile gölün olduğu o ilk yıllarda gölün mansap kısmında yer alan Boraboy köyü sürekli olarak yaşanan taşkın ve sel süreçlerinden etkilenmiş ve gölün boşalıp yerleşmeyi taşkın ve sel olayları ile tahrip etme riski taşınmasına karşı göle müdahale edilme kararı alınmıştır. Bu kararın alınması 1966 yılı hava fotoğrafı görüntüsünden anlaşılmaktadır. 1966 yılı görüntüsünde gölün önüne bir set yapılmış ve gölün suları kontrol altına alınmaya çalışılmıştır. Gölün sularının kontrol altına alınması için gölün taşma noktasına inşa edilen bu yeni yapay setleme çalışması heyelan setinin üzerinde kendiliğinden oluşan ikinci gölün bozulup ortadan kalkmasına sebep olmuştur. Bugün bu sahada, heyelan seti gerisinde tek bir göl bulunmaktadır.

Yıllar içerisinde göl ve çevresi, turizm ve rekreasyon olanaklarına göre şekillendirilmiştir. Bugün bu amaçla kullanımına devam edilmektedir. Bugün de Boraboy Gölü'ne gelen sedimanların engellenmesi için 2000'li yıllarda göl kabul havzası içerisine setler yapılarak sedimanlar kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Bu müdahaleler sebebi ile gölün uzunca bir zaman varlığını sürdürdüğü anlaşılmaktadır. Gölün kabul havzası olarak nitelendirilen alanlarda özellikle Çatağın Deresi'nin vadisinde yapılan farklı kotlardaki setleme çalışmaları belirli aralıklarla kontrol edilmeli, sediman ile dolan bu setler sık sık temizlenmelidir. Böylece göle gelen sediman yükü ve vadi yatağı da kontrol altında tutulmalıdır.

Çalışma alanının tektonik süreçlerden etkilenme düzeyi de göz önünde bulundurulduğunda bu ortamdaki risk durumu ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir. KAF gibi güçlü ve diri bir fay hattının hemen yanı başında oluşan bu heyelan set gölünün bünyesinde taşıdığı su hacminin heyelan kütesine olan baskısı göz ardı edilmemelidir. Bu sahanın sismik şartları ile heyelan seti arasındaki ilişki sürekli kontrol edilmeli ve olası büyük risklerin oluşmadan önüne geçilmelidir.

Göl ve yakın çevresi jeomorfolojik parametreler de dikkate alınarak mühendislik jeolojisi esaslarına göre tekrar incelenmeli ve özellikle jeoloji, jeofizik, jeodezi ve jeomorfoloji disiplinlerinin bir araya gelerek birlikte çalışma olanakları sağlayabileceği yeni çalışma ortamları oluşturulmalıdır. Boraboy Gölü ve yakın çevresinin analizleri dikkatli ve ayrıntılı bir şekilde tekrar gözden geçirilmelidir.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı**

Bu çalışmada yazarların katkı oranı %50, %50 olarak oranlanmıştır. Bütün yazarlar araştırmanın bütün bölümlerinde ve tüm çalışma aşamasında yer almıştır.

### **Çıkar Çatışması**

Bu çalışmanın yazarları, çalışmada herhangi bir çıkar çatışması olmadığını belirtir ve taahhüt eder.

### **Teşekkür ve Açıklama**

Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi SDK-2022-8813 numaralı projesi kapsamında sağlanan destekler ile arazi çalışmaları yapılmış ve makale formatında hazırlanabilmiştir. Bu çalışma "Türkiye'de Karadeniz Bölgesindeki Örnekleri ile Farklı Oluşum Şartları Altında Gelişen Heyelan Set Göllerinin Jeomorfolojik İndislerle Değerlendirilmesi" isimli doktora tez çalışmasından üretilmiştir.

## Kaynaklar

- Agueera-Vega, F., Carvajal-Ramirez, F., Martinez-Carricondo, P., López, J. S. H., Mesas-Carrascosa, F. J., Garcia-Ferrer, A. and Pérez-Porras, F. J. (2018). Reconstruction of extreme topography from UAV structure from motion photogrammetry. *Measurement*, (121), 127-138. <https://doi.org/10.20944/preprints201704.0012.v1>
- Akkan, E. ve Gürgen, G. (1993). Gaga Gölü. *Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi*, (2), 241-249.
- Akkan, E., Doğu, A. F., Çiçek, İ., Gürgen, G., Yiğitbaşıoğlu, H. ve Somuncu, M. (1993). Uzungöl. *Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi*, (2), 251-262.
- Aktimur, H.T., Tekirli, M.E. ve Yurdakul, M.E. (1990). *1/100.000 ölçekli Açınsama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi Tokat D-22 (G-36) paftası*. Ankara: MTA, Jeoloji Etüdüleri Dairesi.
- Argentin, A. L., Robl, J., Prasicek, G., Hergarten, S., Hölbling, D., Abad, L. and Dabiri, Z. (2021). Controls on the formation and size of potential landslide dams and dammed lakes in the Austrian Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(5), 1615-1637. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1615-2021>.
- Atayeter, Y., Yayla O. ve Tozkoparan U. (2020). Tekeli Gölü'nün (Kop Dağı/Bayburt) fiziki coğrafyası ve turizm potansiyeli açısından önemi. T. Erdoğan, A. Temizer, R. İnan (Ed.), *Sosyal Bilimlerde Akademik Çalışmalar*. Montenegro: Ivpe Cetinje.
- Bayrakdar, C. ve Görüm, T. (2012). Yeşil Göl heyelanı'nın jeomorfolojik özellikleri ve oluşum mekanizması. *Türk Coğrafya Dergisi*, (59), 1-10. <https://doi.org/10.17211/tcd.06398>
- Beret, B. (1955). Sera Heyelanı. *Türk Coğrafya Dergisi*, (13-14), 155-160.
- Bozkurt, O., Akın ve Uşak, M. (2004). İlköğretim 6., 7. ve 8. sınıf öğrencilerinin "erozyon" hakkındaki ön bilgilerinin ve kavram yanlışlarının tespiti. *Ahi Evran Üniversitesi Kırşehir Eğitim Fakültesi Dergisi*, 5(2), 277-285.
- Canuti, P., Casagli, N. and Rinaldi, M. (1998). Unsaturated flow and mechanisms of failure of a streambank during flow events. In *Moore D., Hungr O. Proceedings* (pp. 1865-1870).
- Carling, P. A. (2013). Freshwater megaflood sedimentation: What can we learn about generic processes? *Earth-Science Reviews*, (125), 87-113. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.06.002>
- Carling, P. A. and Fan, X. (2020). Particle comminution defines megaflood and superflood energetics. *Earth-Science Reviews*, (204), 103087. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103087>
- Casagli, N. and Ermini, L. (1999). Geomorphic analysis of landslide dams in the Northern Apennine. 20(3), 219-249.
- Costa, J. E. and Schuster, R. L. (1988). The formation and failure of natural dams. *Geotechnical Special Publication*, (3), 13-41.
- Crosta, G.B., Frattini, P., Fusi, N., and Sosio, R. (2011). Formation, characterisation and modeling of the Val Pola rock-avalanche dam (Italy). Evans, S., Hermanns, R., Strom, A., Scarascia-Mugnozza, G. (Ed.) *Natural and Artificial Rockslide Dams* in (p.347-368). Berlin, Heidelberg: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-04764-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04764-0_12)
- Duman, T. Y. (2009). The largest landslide dam in Turkey: Tortum landslide. *Engineering Geology*, 104(1-2), 66-79. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.08.006>

- Doğu, A. F., Çiçek, İ. ve Gürgen, G. (1994). Borabay Gölü (Amasya). *Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi*, (3), 242-254.
- Ermini, L. and Casagli, N. (2002). Criteria for a preliminary assessment of landslide dam evolution. Rybar, J., Stemberk, J., Wagner, P. (Eds.), *Landslides. Proceedings 1st European Conference on Landslides*, 24–26 June in (pp.157–162), Balkema, Prague.
- Ermini, L. and Casagli, N. (2003). Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 28(1), 31-47. <https://doi.org/10.1002/esp.424>
- Fan, X., Dufresne, A., Subramanian, S. S., Strom, A., Hermanns, R., Stefanelli, C. T., Hewitt, K., Yunus, A.P., Dunning, S., Capra, L., Geertsema, M., Miller, B., Casagli, N., Jansen, J.D. and Xu, Q. (2020). The formation and impact of landslide dams–State of the art. *Earth-Science Reviews*, (203), 103116. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103116>
- Flint, J. J. (1974). Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge, *Water Resources Research*, (10), 969-973. <https://doi.org/10.1029/WR010i005p00969>
- Hoşgören, M. Y. ve Ekinçi, D. (2004). Heyelan seti göllerine tipik bir örnek: Sünnet Gölü. *İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Coğrafya Dergisi*, (12), 1-11.
- Garcia-Castellanos, D., Estrada, F., Jiménez-Munt, I., Gorini, C., Fernández, M., Vergés, J. and De Vicente, R. (2009). Catastrophic flood of the Mediterranean after the Messinian salinity crisis. *Nature*, 462(7274), 778-781. <https://doi.org/10.1038/nature08555>
- Korup, O. (2004). Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams. *Engineering Geology*. 73(1), 13-35. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.11.003>
- Liu, W., Lai, Z., Hu, K., Ge, Y., Cui, P., Zhang, X. and Liu, F. (2015). Age and extent of a giant glacial-dammed lake at Yarlung Tsangpo gorge in the Tibetan Plateau. *Geomorphology*, (246), 370-376. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.034>
- Mason, K. (1929). Shyok glaciers and Indus floods. *Himalayan Journal*, (1), 10-29.
- Mohseni, F., Amani, M., Mohammadpour, P., Kakooei, M., Jin, S., and Moghimi, A. (2023). Wetland Mapping in Great Lakes Using Sentinel-1/2 Time-Series Imagery and DEM Data in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 15(14), 3495. <https://doi.org/10.3390/rs15143495>
- Özler, M. (2021). Kamu yönetimi bağlamında afete dirençli toplum ve bütünleşik afet risk yönetimi. *Ahi Evran Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 7(3), 901-917. <https://doi.org/10.31592/aeusbed.821774>
- Reneau, S. L., and Dethier, D. P. (1996). Late Pleistocene landslide-dammed lakes along the Rio Grande, White Rock Canyon, New Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 108(11), 1492-1507. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1996\)108<1492:LPLDLA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1996)108<1492:LPLDLA>2.3.CO;2)
- Shang, Y., Yang, Z., Li, L., Liao, Q., and Wang, Y. (2003). A super-large landslide in Tibet in 2000: background, occurrence, disaster, and origin. *Geomorphology*, 54(3-4), 225-243. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00358-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00358-6)
- Shafieiganjeh, R., Ostermann, M., Schneider-Muntau, B., and Gems, B. (2022). Assessment of the landslide dams in Western Austria, Bavaria and Northern Italy (part of the Eastern Alps): Data inventory development and application of geomorphic indices. *Geomorphology*, (415), 108403. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108403>



- Tacconi Stefanelli, C., Segoni, S., Casagli, N., and Catani, F. (2016). Geomorphic indexing of landslide dams evolution. *Engineering Geology*, (208), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.024>
- Teller, J. T., Leverington, D. W. and Mann, J. D. (2002). Freshwater outbursts to the oceans from glacial Lake Agassiz and their role in climate change during the last deglaciation. *Quaternary Science Reviews*, 21(8-9), 879-887. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00145-7](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00145-7)
- Turzewski, M. D., Huntington, K. W. and LeVeque, R. J. (2019). The geomorphic impact of outburst floods: Integrating observations and numerical simulations of the 2000 Yigong flood, eastern Himalaya. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(5), 1056-1079. <https://doi.org/10.1029/2018JF004778>
- Yayla, O., Atayeter, Y. ve Tozkoparan, U. (2021). Heyelan Set Göllerinin Oluşum ve Gelişim Şartlarının Jeomorfolojik İndislerle Değerlendirilmesi: Kop (Akburak) Gölü (Bayburt) Örneği. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, (7), 1-18. <https://doi.org/10.46453/jader.820756>
- Wang, Y., Dong, J., Zhang, L., Deng, S., Zhang, G., Liao, M., and Gong, J. (2023). Automatic detection and update of landslide inventory before and after impoundments at the Lianghekou reservoir using Sentinel-1 InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, (118), 103224. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103224>
- Whitbread, K., Jansen, J., Bishop, P. and Attal, M. (2015). Substrate, sediment, and slope controls on bedrock channel geometry in postglacial streams. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, (120), 779–798. <https://doi.org/10.1002/2014JF003295>.
- Zeybek, H. (2002). Sinan (Zinav) Gölü (Reşadiye-Tokat). *Türk Coğrafya Dergisi*, (38), 105-120.

## **Extended Abstract**

### **Introduction**

Among geomorphological processes, lake formations due to the blockage of river valley drainage systems in steep mountainous environments, especially those associated with landslides, glaciers, and moraines, are frequently observed (Costa and Schuster, 1988). These formations determine the continuity or disruption of the lake depending on factors such as the volume of the lake set, morphometric status, and geological environment as a result of the valley bed being blocked. In this context, the formation of landslide-induced lakes, especially with the effect of landslides occurring on the valley bed slope, draws attention with the potential for sudden emptying of the lake behind the set. This situation brings along serious disaster potential if there are settlements in the mouth of the valley where these lakes are formed.

This study is designed as an effort to understand the geomorphological and geological effects of landslide dammed lakes, especially. The study focuses on an area where Boraboy Lake has been identified as a landslide dammed lake and the relationship between the landslide and the lake has been addressed with modern research methods. The continuous existence potential of Boraboy Lake, the possibility of disruption, and the disaster potential that may arise in case of disruption are among the main objectives of this study.

### **Method**

In this study, geomorphometric indices were used to determine the geomorphometric characteristics of Boraboy Lake, one of Turkey's landslide dam lakes. The focus of the study is to evaluate the volume of the mass that blocks the valley of the landslide dam and its effect on the formation of the lake. In doing so, some indices based on geomorphometric parameters were used. These indices are Blockage Index, Impoundment Index, and Dimensionless Blockage Index (Casagli and Ermini, 1999; Ermini ve Casagli, 2002; 2003; Korup, 2004; Stafanelli vd., 2016).

**Blockage Index (BI):** The  $BI = \log(V_d/A_b)$  formula is used to express the relationship between the volume ( $V_d$ ) of the landslide dam blocking the valley and the basin area ( $A_b$ ) from the blockage point to the source of the river. High-resolution digital elevation model (DEM) was obtained through Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for volume calculations (Aqueera-Vega et al., 2018).

**Impoundment Index (II):** The  $II = \log(V_d/V_l)$  calculated by taking the logarithm of the ratio between the volume ( $V_d$ ) of the landslide dam and the volume ( $V_l$ ) of the lake formed behind the dam. Geomorphometric parameters were obtained using ground control points (GPS) determined during UAV flights and bathymetric data to clearly identify the dam.

**Dimensionless Blockage Index (DBI):** The dimensionless blockage index calculated with the  $DBI = \log(A_b \cdot H_d/V_d)$  formula includes the height ( $H_d$ ) of the landslide dam, the basin area ( $A_b$ ), and the volume ( $V_d$ ) of the dam. This index evaluates the relationship between the basin area where water is collected from the blockage point of the lake and the height of the landslide dam.

This methodology aims to examine the geomorphometric characteristics of Boraboy Lake in detail using modern techniques.

### **Findings**

Boraboy Lake is a typical landslide dam lake that occurred as a result of the blockage of the base of the Çatağın Valley a long time ago. The lake was formed by the mass movement caused by the landslide, which was triggered by the dislocation of two different geological units to the north of the

landslide. Tectonic activities, especially in the Yeşilirmak graben to the south of the study area, are one of the triggering factors that affect the study area, which means that tectonic activities around Boraboy Lake are inevitable.

The volume of the set was calculated using UAV, Sentinel 1, and GPS data for Boraboy landslide dam lake. Blockage Index (BI) was calculated with the obtained parameters, and the stability of the set was evaluated. The BI value was determined to be 6.97, along with the calculations of the acceptance basin, which is assumed to collect water from an area of 11 km<sup>2</sup>, for the set with a volume of 103,838,328.56 m<sup>3</sup>. As a result of this evaluation, it was seen that Boraboy landslide dam lake was classified as “Stable Formed Landslide Dam Lakes” according to the literature.

Impoundment Index (II) was evaluated using the ratio between the volume (Vd) of the mass blocking the valley due to the landslide and the volume (Vl) of the lake formed behind the set. As a result of the II calculation for Boraboy Lake, it was determined to be only 0.00021, which is well below the threshold value of 1 used in the classification of landslide dam lakes. According to this value, Boraboy landslide dam lake is classified as “Stable Formed Landslide Dam Lakes”.

### **Conclusion, Discussion and Recommendations**

Boraboy Landslide Dam Lake is a typical landslide dam lake that was formed as a result of long-standing landslide activity. The lake stands out with the stability and long-term existence of the lake set. When evaluated based on the Blockage Index (BI), Impoundment Index (II), and Dimensionless Blockage Index (DBI) values of the lake, the findings show that Boraboy Lake belongs to the “Stable Formed Landslide Dam Lakes” category.

The findings reveal that the controlled sedimentation works around the lake have successfully achieved the goal of protecting the surrounding settlements by discharging the lake waters from the overflow point. In addition, the creation of recreational areas around the lake and the control of the lake’s water level can be evaluated as an effective strategy for the sustainability of the region. Boraboy Lake especially during the period between 1950s and 1960s, changes in the shoreline of the lake are observed due to the absence of a spillway in the area where the landslide dam is located. In case of any damage that could occur in the dam after these years, a disaster situation that could occur in the area where the Boraboy village settlement is located has been foreseen in advance. Therefore, a spillway was constructed in the area where the dam of the lake is located in order to control the lake.

Boraboy Lake has maintained its existence for many years while preserving its characteristics as a landslide dam lake and has shown that it has this potential in the future. This study can shed light on similar research that can be conducted on landslide dam lakes in similar geographical areas and contribute to the development of regional planning and management strategies against natural disasters.