T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
COĞRAFYA ANABİLİM DALI

BARAJ RİSK SINIFLANDIRMA METOTLARINDA HAVZA SÜREÇLERİNİN ETKİSİNİN BELİRLENMESİ – NİLÜFER ÇAYI HAVZASI BARAJLARI ÖRNEĞİ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

MUSTAFA TOPSAKAL

BURSA 2025

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
COĞRAFYA ANABİLİM DALI

BARAJ RİSK SINIFLANDIRMA METOTLARINDA HAVZA SÜREÇLERİNİN ETKİSİNİN BELİRLENMESİ - NİLÜFER ÇAYI HAVZASI BARAJLARI ÖRNEĞİ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

MUSTAFA TOPSAKAL

Danışman:

PROF. DR. HASAN ÖZDEMİR

BURSA 2025

ÖZET

Mustafa TOPSAKAL
Bursa Uludağ Üniversitesi
Sosyal Bilimler Enstitüsü
Coğrafya Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hasan ÖZDEMİR
VII + 85 SAYFA

Baraj Risk Sınıflandırma Metotlarında Havza Süreçlerinin Etkisinin Belirlenmesi – Nilüfer Çayı Havzası Barajları Örneği

Barajlar akarsu akışlarını engelleyecek şekilde akarsu vadilerinde su depolamak, enerji üretmek ve taşkın kontrolü sağlamak gibi çeşitli amaçlarla inşa edilmektedirler. Küresel iklim değişikliği ile hızla değişen hidrolojik koşullar hem hidrolojik döngünün her bir noktasını hem de bununla bağlantılı olarak baraj yapılarını etkilemektedir. Uzun ömürlü olarak tasarlanan baraj yapıları değişen bu koşullara ayak uyduramayıp yetersiz kalabilmektedir. Dünyada var olan tüm baraj yapıları, gövdelerinin ardında biriktirdikleri devasa su kütleleri nedeniyle mansap hattında var olan tüm beşerî ve doğal yapılar için tehlikeler barındırmaktadırlar. Barajların mevcut durumlarını yorumlamak adına ise literatürde yaygın olarak kullanılan ICOLD ve Bureau metotları mevcuttur. Bu metotlar barajların yapı, mansap ve depremsellik özelliklerine dayanarak bir risk sınıflaması ortaya koyarlar. Dünyada yetersizlik gösteren veya yıkılan barajlara bakıldığında ise yaşanan olayların yaklaşık %30'luk kısmı üstten aşma ile meydana gelmektedir. Üstten aşma olayı barajların havzalarından toplanan suyu tahliye etmede yetersiz kalması ile suların, baraj duvarının üzerinden akış göstererek baraj yapısına hasar vermesi şeklinde meydana gelmektedir. Bu bağlamda barajların değerlendirilmesinde havza süreçlerinin kritik olduğu ancak mevcut metotlarda bu süreçlerin ele alınmadığı görülmektedir. Bu çalışmanın temel amacı barajların değerlendirilmesinde akarsu havza süreçlerinin de ele alınmasının, barajları daha kapsamlı ve tutarlı bir şekilde değerlendirmeyi sağlayacak bir yaklaşım olduğunu ortaya koymaktır. Çalışmada örnek saha olarak seçilen Nilüfer Çayı havzası, yoğun bir nüfus barındırmakla birlikte jeolojik ve jeomorfolojik olarak çeşitlilik arz eden, aktif tektonik yapıya sahip bir alanda yer almaktadır. Çalışmada Nilüfer Çayı havzasındaki barajlar inceleme altına alınmış olup hem kullanımdaki metotlar ile toplam riskleri hesaplanmış hem de havza süreçleri ele alınmıştır. Havza süreçleri ele alınırken havza morfometrisi ile akarsu havzalarının pik akım kabiliyeti yorumlanmış, Curve Number ile havzaların yüzeysel akış potansiyelleri tespit edilmiş ve ardıl baraj varlığı ile muhtemel tehlikeler baraj risk metotlarına dahil edilmiştir. Sonuç olarak kullanımdaki metotların görmezden geldiği bir süreç olarak havza süreçleri de toplam riski değerlendirmede ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Baraj, Risk sınıflandırma, Bureau, ICOLD, Morfometri, Nilüfer Çayı

ABSTRACT
Mustafa TOPSAKAL
Bursa Uludag University
Institute of Social Sciences
Geography Department
Master's Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Hasan ÖZDEMiR
VII + 85 PAGE

Determination of Basin Processes into Dam Risk Classification Methods - The Case of Nilüfer River Basin Dams

Dams are constructed in river valleys for various purposes, such as storing water, generating energy and controlling floods by blocking river flows. Rapidly changing hydrological conditions due to global climate change are affecting every point of the hydrological cycle and, consequently, dam structures. Dam structures designed for long-term use may fail to adapt to these changing conditions and become inadequate. All existing dams worldwide pose risks to all human and natural structures downstream due to the massive water masses they accumulate behind their bodies. To assess the current condition of dams, the ICOLD and Bureau methods are widely used in the literature. These methods classify risks based on the structural, downstream, and seismic characteristics of dams. When examining dams that have failed or collapsed worldwide, approximately 30% of such incidents are caused by overtopping. Overflow occurs when dams are unable to discharge the water collected from their basins, causing the water to flow over the dam wall and damage the dam structure. In this context, it is seen that basin processes are critical in the evaluation of dams, but these processes are not addressed in the current methods. The main objective of this study is to demonstrate that considering river basin processes in the evaluation of dams provides a more comprehensive and consistent approach to evaluating dams. The Nilüfer River basin, selected as the study area, is located in an area with a dense population, geological and geomorphological diversity, and active tectonic structure. In the study, dams in the Nilüfer River basin were examined, and both the total risks were calculated using existing methods and basin processes were considered. While addressing basin processes, the peak flow capacity of river basins was interpreted using basin morphometry, the surface flow potentials of basins were determined using the Curve Number, and the presence of successive dams and potential hazards were included in dam risk methods. As a result, basin processes, which are overlooked by the methods in use, were also considered in the assessment of total risk.

Key Words: Dam, Risk Classification, Bureau, ICOLD, Morphometry, Nilüfer Basin

ÖNSÖZ

"*Baraj Risk Sınıflandırma Metotlarında Havza Süreçlerinin Etkisinin Belirlenmesi - Nilüfer Çayı Havzası Barajları Örneği*" adlı bu çalışma, barajların riskini sınıflandırmada kullanılan yaygın metotların göz ardı ettiği akarsu havza süreçlerini, barajların değerlendirilmesi kapsamında ele alınması gerektiğini öne sürerek bu alanda öncü bir çalışma olma özelliğini taşımaktadır.

Çalışma dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde baraj tarihine, literatürdeki baraj risk sınıflandırma metotlarına, havza süreçlerini yorumlamada kullanılan havza morfometrisi ve Curve Number metotlarına değinilerek amaç ve kapsam verilmiş, çalışma sahası tanıtılmıştır. İkinci bölümde çalışma kapsamında kullanılan veriler tanıtılmış ve metotlar anlatılmıştır. Çalışmada karşılaşılan sınırlılıklardan da bu kısımda bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde hem geleneksel baraj risk sınıflandırma metotlarının hem de baraj havzalarından elde edilen bulgular verilerek önerilen değerlendirme sistemine yer verilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlardan bahsedilmiş ve çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında ve kariyerimin gelişiminde beni destekleyen, yönlendiren ve bilimsel bakış açısı kazanmama yardımcı olan danışman hocam Prof. Dr. Hasan ÖZDEMİR'e teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmama değerli fikirleriyle katkı sunan Doç. Dr. Abdullah Akbaş'a ve Dr. Öğr. Üyesi Emre ELBAŞI'ya da teşekkür ederim. Ayrıca hem tez çalışmama sağladıkları katkılar hem de tezden bağımsız olarak birlikte yürüttüğümüz çalışmalardaki emekleri nedeniyle kıymetli ekip arkadaşlarım Süleyman Sinan YASAK'a, Enes DOĞAN'a ve Furkan ÇORAPÇI'ya da ayrıca teşekkür ederim.

Bu çalışma Bursa Büyükşehir Belediyesi tarafından "Lisansüstü Tez Destekleme Programı" kapsamında desteklenmiştir.

Mustafa TOPSAKAL
Bursa - 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ÖNSÖZ iii
İÇİNDEKİLER iv
TABLO LİSTESİ v
ŞEKİL LİSTESİ vi
KISALTMA LİSTESİ vii
1. GİRİŞ 1
1.1. Literatür Değerlendirmesi 3
1.1.1. Baraj Tarihi 3
1.1.2. Baraj Yetersizlikleri 7
1.1.3. Toplam Risk Sınıflandırma Metotları 15
1.1.4. Havza Morfometrisi 18
1.1.5. Curve Number 20
1.2. Amaç – Kapsam 22
1.3. Çalışma Sahasının Özellikleri 23
2. VERİ – YÖNTEM 28
2.1 Veri 28
2.2. Yöntem 30
2.2.1. Baraj Risk Sınıflandırma Metotları 32
2.2.2. Morfometrik Parametrelerin Hesaplanması 36
2.2.3. Curve Number Değerlerinin Elde Edilmesi 44
2.3. Sınırlılıklar 45
3. BULGULAR ve TARTIŞMA 46
3.1. Nilüfer Çayı Havzasındaki Barajların Mevcut Risk Özellikleri 46
3.2. Nilüfer Çayı Havzasındaki Barajların Havza Özellikleri 53
3.2.1. Havza Morfometrisi Sonuçları 53
3.2.2. Curve Number Sonuçları 59
3.2.3. Ardıl Baraj Varlığı 61
3.3. Toplam Risk Değerlendirmesi 61
4. SONUÇ VE ÖNERİLER 64
KAYNAKÇA 67

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Dünya'da Başlıca Baraj Yıkılmaları (Abay vd., 2015)..... 11
Tablo 2. Literatürdeki çalışmalara göre barajlarda meydana gelen yıkılmalarda üstten aşmanın oranı (Taymaz, 1989'dan değiştirilerek). 12
Tablo 3. Barajlar için Tehlike Potansiyeli Sınıflaması (FEMA, 2004)..... 16
Tablo 4. ICOLD Metoduna Göre DYİ Risk Değerlendirmesi. 32
Tablo 5. ICOLD Metodu ile Toplam Risk Değerlendirmesi..... 32
Tablo 6. ICOLD Metoduna Göre Toplam Risk Katsayısına Bağlı Risk Sınıfları..... 33
Tablo 7. Bureau Metoduna Göre Toplam Risk Katsayısına Bağlı Risk Sınıfları 33
Tablo 8. Bureau metoduna göre baraj yapı risk katsayıları..... 34
Tablo 9. Bureau Metoduna Göre Baraj Eskilik Katsayıları. 34
Tablo 10. Bureau metoduna göre Mansap Risk Katsayıları..... 35
Tablo 11. Farklı baraj tiplerine göre ÖHİ formülleri. 36
Tablo 12. Çalışmada kullanılan Morfometrik Parametreler ve matematiksel tanımlamalar. 38
Tablo 13. Çalışma alanındaki barajların yapı, mansap ve depremsellik özellikleri..... 46
Tablo 14. ICOLD Metoduna göre elde edilen katsayılar ve risk derecelendirilmeleri 51
Tablo 15. Bureau Metoduna göre elde edilen katsayılar ve risk derecelendirilmeleri..... 51
Tablo 16. Baraj Havzalarının Ortalama NMFI Değerleri 58
Tablo 17. Baraj Havzalarının Ortalama CN Değerleri..... 60
Tablo 18. Baraj Sınıflandırma Metotları ve Havza Analizleri Sonuçları (Yeşil: Düşük, Sarı: Orta, Turuncu: Yüksek, Kırmızı: Çok Yüksek)..... 63
Tablo 19. Toplam baraj risk sınıflandırması sonuçları..... 64

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Bir barajın hazne ve yapı bölümleri..... 2
Şekil 2. Türkiye'deki antik barajların dağılışı (Öziş, 2015)..... 5
Şekil 3. Türkiye'de Yıllara Göre İnşa Edilen Baraj Sayısı (DSİ, 2023) 6
Şekil 4. Türkiye'deki Aktif Barajların Dağılışı (Wang vd., 2022)..... 7
Şekil 5. Baraj Yetersizliklerinin Dünyadaki Dağılışı (Historical Dam Failures Database, 2020). 13
Şekil 6. Dünyadaki Baraj Yetersizliği Olaylarının Yıllara Göre Dağılışı (Historical Dam Failures Database, 2020). 14
Şekil 7. Çalışma Sahası Lokasyon Haritası 27
Şekil 8. Çalışmaya ait akış şeması. 31
Şekil 9. Çalışma sahasındaki barajların ICOLD (1) ve Bureau (2) metotlarına göre risk derecelendirme dağılışı 52
Şekil 10. Baraj Havzalarının NMFI Sonuçları..... 58
Şekil 11. Baraj Havzalarının Curve Number Dağılışı 60

KISALTMA LİSTESİ

ABD : Amerika Birleşik Devletleri

ARF : Age Risk Factor

BUSKİ : Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi

CN : Curve Number

CRF : Capacity Risk Factor

DHF : Downstream Hazard Factor

DRI : Downstream Damage Risk Index

DSİ : Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü

DYİ : Doruk Yer İvmesi (ing. Peak Ground Acceleration - PGA)

ERF : Evacuation Requirement Factor

ESI : Earthquake Severity Index

FEMA : Federal Emergency Management Agency

HRF : Height Risk Factor

ICOLD : International Commission on Large Dams

NMFI : Normalised Morfometric Flood Index

PDF : Predicted Damage Factor

PDI : Predicted Damage Index

SYM : Sayısal Yükselti Modeli

TRF : Total Risk Factor

TÜİK : Türkiye İstatistik Kurumu

KAFZ : Kuzey Anadolu Fay Zonu

1. GİRİŞ

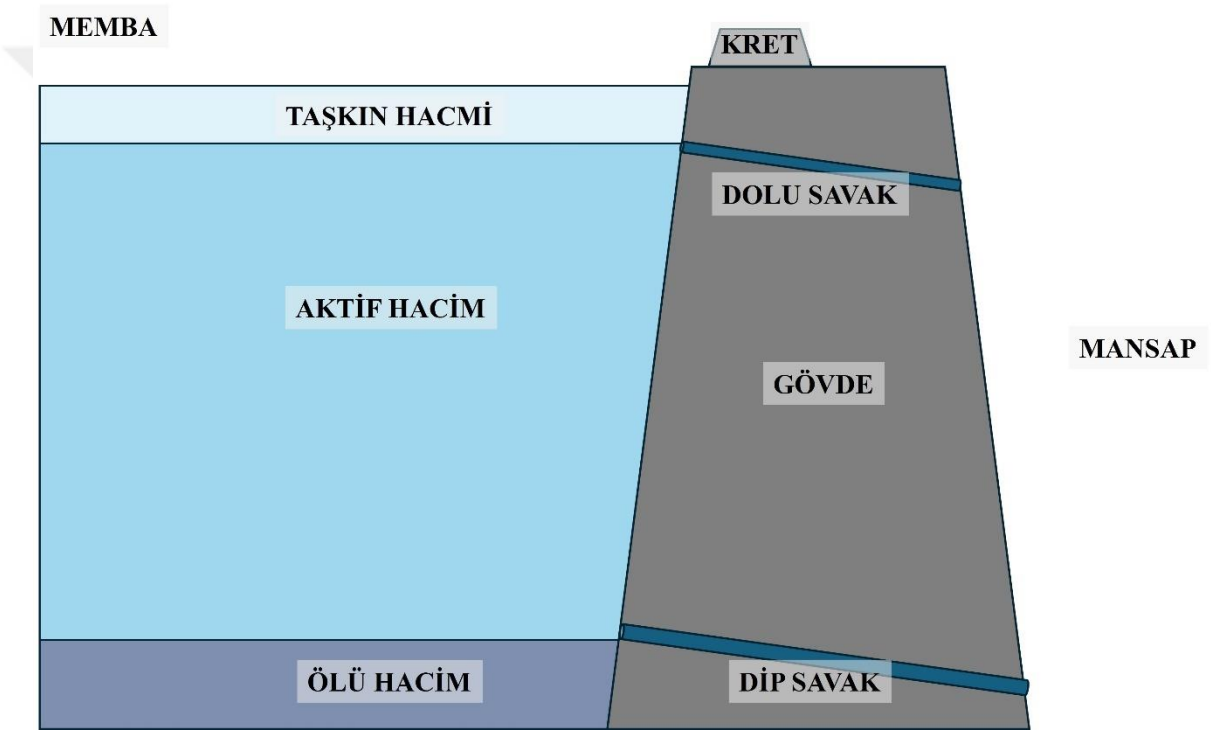
Yerleşmelerin ilk ortaya çıkmaya başladığı günlerden beri, suyun yönetilmesi ile ilgili ihtiyaçlar da ortaya çıkmıştır. İlk uygarlıkların doğuşundan günümüze kadar insan toplulukları, kuraklıklara karşı inşa ettikleri su yapılarına güvenerek yaşamışlardır (Şentürk, 1994). Tespit edilen ilk tarihsel su yapıları tarımsal sulama amaçlı olarak inşa edilen kanallar ve bu kanalları besleyecek suyu depolayan ve yönlendiren bent yapılarıdır (Biswas, 1970). Türkçe'de akarsu akışını engelleyen tüm yapılara genel olarak bent denilse de amaçlarına ve büyüklüklerine göre baraj veya bağlama olarak da isimlendirilirler. Aralarındaki en temel farklılık bağlama yapıları suyu yükseltmek için, baraj yapıları suyu depolamak için kullanılır (Erker ve Ağıralioğlu, 1986). Barajın üzerinden su aşması, barajın yıkılmasına yol açabilecek bir olayken pek çok bağlama yapısı üzerinden su aşması için tasarlanır (Ağıralioğlu, 2011). Baraj kelimesi Fransızca kökenli olup bir akarsuyun önünü kesen ve bir engel teşkil ederek suyun biriktirilmesini sağlayan bir yapı anlamını taşır (Doğan, 2001). Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu (ICOLD)'na göre temelden yüksekliği 15 metreyi aşan, 3 hm^3 hazne hacmine sahip tüm yapılar, büyük baraj olarak adlandırılır. Biçim bakımından benzer ancak boyut olarak daha küçük yapılar ise küçük baraj olarak adlandırılır. Türkiye'de bu küçük barajlar gölet olarak adlandırılsa da (Gündoğdu vd., 2001) çalışmamızda bu ayrım gözetilmemiş ve tüm yapılar baraj olarak ele alınmıştır. Barajlar çeşitli ihtiyaçlar için su temini, hidroelektrik enerji üretimi, taşkın kontrolü, rekreasyon alanı oluşturma, balıkçılık, kara içi su yolu oluşturmak ve sediman kontrolü gibi amaçlar için inşa edilebilirler. Barajları sınıflandırmak için büyüklükleri, yapı malzemeleri, inşa tipi ve kullanım amacı gibi özellikler de kullanılmaktadır (Erker ve Ağıralioğlu, 1986).

Bir baraj temelde yapı ve işletme tesislerinden meydana gelir. Yapı unsurları gövde, savaklar ve su alma yapıları gibi bölümlerden meydana gelirken, işletme tesisleri personel yaşam alanları ile barajın kullanım amacına bağlı olarak enerji, su arıtma ve rekreasyon tesisleri gibi alanları barındırır. Barajların suyu depoladığı alana hazne adı verilir. Erker ve Ağıralioğlu (1986)'na göre baraj hazneleri 3 ana bölüm olarak ele alınabilir (Şekil 1).

-Akarsu ile havzadan toplanarak taşınan sedimanların birikmesi için ayrılan ve minimum işletme kotunun altında kalan ölü hacim.

-Minimum işletme kotu ile maksimum işletme kotu arasında kalan, barajın tesislerinin kullanımına açık olan aktif hacim.

-Olası taşkın durumunda havzadan toplanan suların baraj yapılarına zarar vermesini engellemek amacı ile bırakılan taşkın hacmi.



Şekil 1. Bir barajın hazne ve yapı bölümleri.

Barajlar gövdelerinin arkasında biriktirdikleri devasa hacimdeki su kütleleri sebebiyle mansapta var olan tüm beşerî ve doğal unsurlar için yıkılma veya barajda oluşabilecek tahribat neticesinde potansiyel tehlikeler-riskler barındırmaktadırlar. Baraj yıkılmaları ile oluşacak olan taşkınlar doğal süreçlerin getirdiği ekstrem yağışlardan ve ani kar erimelerinden kaynaklanan taşkınlara göre çok daha ölümcül ve tahrip edicidirler (Özdemir vd., 2011). Bu sebeple barajların mevcut durumlarının belirlenmesi ve buna yönelik

önlemlerin alınması baraj yıkılmalarından kaynaklanabilecek can ve mal kayıplarının önüne geçmekteki öncül çalışmalardan biri olmalıdır (Dal, 2018).

1.1. Literatür Değerlendirmesi

1.1.1. Baraj Tarihi

Barajlar tarihte ilk defa tarım toplumlarının ortaya çıkışıyla birlikte görülmekte olup tarımsal sulama amaçlı olarak inşa edilmişlerdir. Yaklaşık olarak MÖ. 5000'li yıllarda Mısır'da Nil hattı, Mezopotamya'da Dicle ve Fırat hattı çeşitli su yapılarıyla kontrol edilmeye çalışılmıştır. Bu su yapıları sulama ve saptırma kanalları ile barajlardır (Biswas, 1970). Tarihin bilinen ilk barajı Herodotos'un ünlü Tarih (Histories) kitabında bahsettiği üzere Mısır'da Kral Menes zamanında Memphis kentini korumak üzere inşa edilen benttir. Kentin 100 stad kadar uzağına inşa edilen bendin, nehrin akış yönünü değiştirerek şehri taşkınlara karşı korumak için yapıldığı bilinmektedir. Aktarılan metinde bu bilginin Pers'ler döneminde kayda alındığı ve metnin yazıldığı tarihte hala kullanımda olduğu aktarılmış olup bendin yıkılmasının korkulan bir olay olduğundan da bahsedilmiştir (Herodotos, 2019). Tarihin ilk büyük ölçekli barajı ise Paganlar ya da Kafirler Barajı olarak da bilinen Sadd-el-Kafara barajıdır. Mısır'da M.Ö. 2950 ve M.Ö. 2750 yılları arasında inşa edildiği kabul edilmektedir. Kalıntıları günümüzde de gözlemlenebilen barajın, 14 metre duvar yüksekliğine, 113 metre kret uzunluğuna ve yarım milyon metreküp su tutma kapasitesine sahip olduğu tahmin edilmektedir. Faaliyete geçemeden yıkıldığı tahmin edilen bu baraj büyük ölçekte su depolamaya yönelik ilk girişimdir (Lahmeyer, 1845; Biswas, 1970; Mays, 2008). Mısır medeniyetinin aynı dönemde hâkim olduğu farklı bölgelerde de baraj yapıları inşa ettiği görülmektedir. Bunlara örnek olarak günümüzde Suriye topraklarında kalan ve Asi Nehri üzerinde yer alan Katinah Barajı (Biswas, 1970) ve günümüzde Ürdün topraklarında kalan Jawa Barajı (Vogel, 1991) verilebilir. Mezopotamya uygarlıklarına gelindiğinde ise Fırat ve Dicle üzerinde yoğunlaşan baraj yapılarını görmek mümkündür. Babil imparatorluğuna ait olan ve Dicle'nin bir kolu üzerinde yer alan Marduk Barajı, Asur imparatorluğuna ait olan

Ajilah, Bavian ve Kısırı Barajları Mezopotamya uygarlıklarının öne çıkan barajlarıdır. İran coğrafyasında ve Uzak Doğu uygarlıklarında da birkaç yüzyıl ara ile barajların ortaya çıktığı görülmektedir (Biswas, 1970). Barajlar sadece tarih kitaplarına değil aynı zamanda toplum mitlerine ve dinlere de konu olmuşlardır. Örneğin Yemen'de M.Ö. 1000 ile 700 yılları arasında inşa edildiği tahmin edilen Mârib Barajı da erken dönemde inşa edilmiş büyük barajlardandır. Antik dönemin bir harikası olarak da anılan Mârib Barajı antik Mârib şehrine 64 km uzaklıkta yer almaktadır. Baraj gövdesinin yaklaşık olarak 10 metre yüksekliğe, 580 metre uzunluğa sahip olduğu tahmin edilmekte olup özenli bir işçiliği olduğundan bahsedilmektedir. M.S. 400'lü yıllarda yıkılan bu baraj o denli bir felakete yol açmıştır ki, Müslümanların kutsal kitabı olan Kur'an-ı Kerim'de (Sebe suresi 16. Ayet) kendine yer edinmiştir (Biswas, 1970). Ortadoğu'da Mârib Barajı inşa edilirken Uzakdoğu'da dünyanın su yönetimi mucizelerinden biri olarak anılan Li Bing sulama ve kanal sistemlerinin temelleri atılmaktaydı. Çin'in Sinçuan bölgesinde yer alan Çengdu ovasında dönemin valisi Li Bing tarafından tasarlanan kanal ve baraj sistemleri günümüzde dahi kullanılmaktadır (Angelakis vd., 2024).

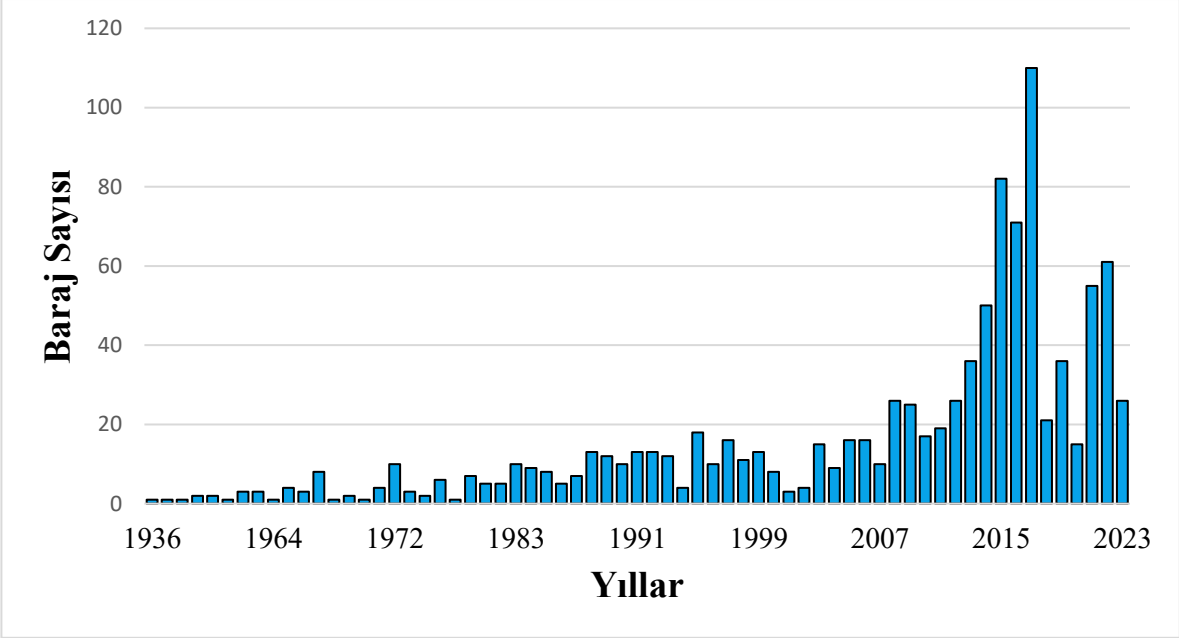
Günümüzde Türkiye topraklarının yer aldığı Anadolu yarımadası da tarih boyunca üzerinde yaşayan pek çok medeniyet tarafından çeşitli ihtiyaçlar için su yapıları ile donatılmıştır (Angelakis vd., 2024). Hatta bu yapılar o denli bir kültürel zenginlik arz etmektedir ki Öziş (2015) tarafından antik hidrolik eserler noktasında, Anadolu bir açık hava müzesi olarak nitelendirilmektedir. Türkiye'de bulunan antik barajların dağılışına bakıldığında Kuzey Mezopotamya, Toroslar, Ege kıyıları, Menderes ovaları ve İstanbul çevresinde yoğunluk olduğu göze çarpmaktadır (Şekil 2).



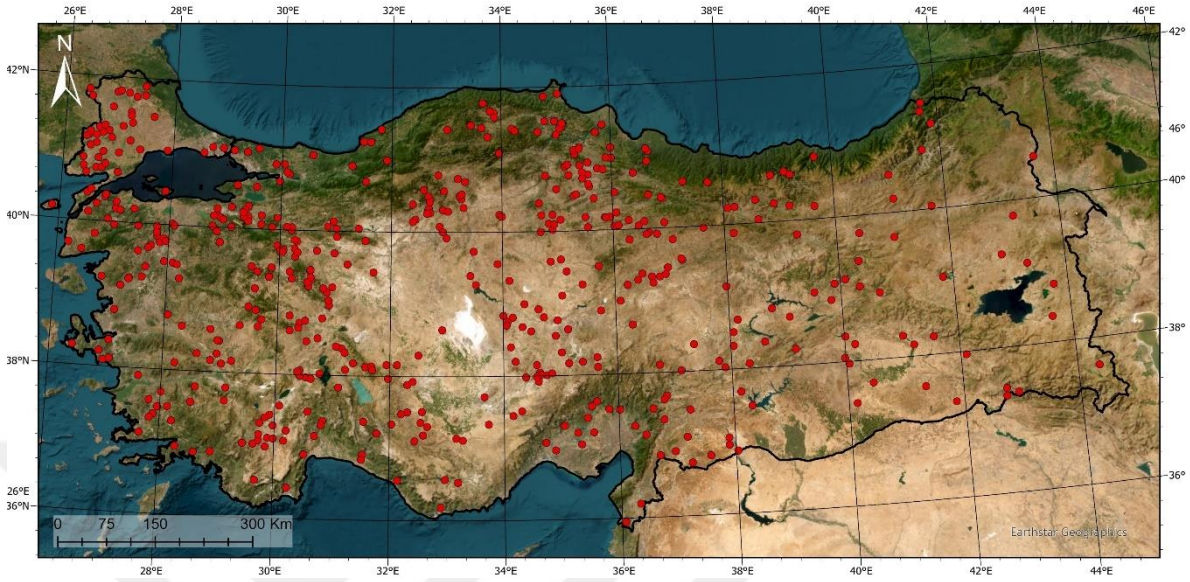
Şekil 2. Türkiye'deki antik barajların dağılışı (Öziş, 2015)

Hititler, Urartular, Romalılar ve Selçuklular Anadolu topraklarında barajlar inşa eden en eski medeniyetlerdir (Torun, 2020). Anadolu'da bilinen ilk barajlar Hititler tarafından yapılmış olsa da literatürde hangi barajın ilk olduğuna dair bir fikir birliği yoktur (Bildirici, 2009; Ozan, 2018). Hitit medeniyetinin hüküm sürdüğü dönemde pek çok barajın inşa edildiği bilinse de çoğunun kalıntısı günümüze ulaşamamıştır. Kalıntılarına ulaşılan barajlar ise Çorum'da bulunan Gölpınar Barajı, Kayseri'de bulunan Pınarbaşı Karakuyu Barajı ve Konya'da bulunan Kadınhan Köylütolu Barajı'dır (Bildirici, 2009). Hititlerin peşi sıra Urartular ve Romalılar Anadolu'nun çeşitli bölgelerinde baraj yapıları inşa etmişlerdir (Torun, 2020; Laflı ve Buora, 2023). Roma döneminde inşa edilmiş olan Anadolu barajları arasında günümüzde Kütahya il sınırları içerisinde bulunan Aizonai Barajı özellikle taşkından korunma amaçlı yapılmış olması ile dikkat çekmektedir (Scihnitter, 1967). İlerleyen zamanlarda Bizans ve Osmanlı imparatorlukları özellikle başkent ve çevresinde baraj yapılarına yer vermiştir. Bu nedenle günümüzdeki İstanbul şehrinde pek çok tarihi baraj yapısına rastlamak mümkündür (Bildirici, 2009). Osmanlı döneminde inşa edilen barajlar

arasında özellikle inşa tipi ve malzemesi ile bir baraj dikkat çekmektedir. Sultan 2. Mahmut döneminde (1808-1839) inşa edilen Şamlar Bend'i adlı baraj 1848 yılında yaşadığı bir üstten aşma olayı ile gündeme gelmiştir. Ancak kemer yapıdaki kesme taş bloklardan oluşan barajın gövdesi sadece yüzeysel hasarlar almış ve işlevini sürdürmeye devam etmiştir. Cumhuriyet döneminin ilk barajı ise Ankara'da bulunmakta olan Çubuk 1 barajıdır. Peşi sıra Gölbaşı (Bursa) ve Gebere (Niğde) barajları inşa edilmiştir (Bildirici, 2009). Türkiye'de baraj inşası 2. Dünya Savaşı'ndan sonra hız kazanıp yaygınlaşmıştır (Yıldız, 2021) (Şekil3). Cumhuriyetin kuruluşundan 1950 yılına kadar geçen sürede yalnızca 3 adet baraj (Çubuk 1, Gölbaşı, Gebere) inşa edilmiş olup baraj inşa süreçleri bu tarihten sonra hızlanmış ve artış göstermiştir (Erker ve Ağıralioğlu, 1986). Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) tarafından sağlanan verilere göre günümüzde Türkiye'de toplam 1018 adet baraj bulunmaktadır (Şekil 4).



Şekil 3. Türkiye'de yıllara göre inşa edilen baraj sayısı (DSİ, 2023)



Şekil 4. Türkiye'de işletmedeki barajların dağılışı (Wang vd., 2022)

1.1.2. Baraj Yetersizlikleri

Baraj yetersizliği (*ing. Dam Failure*) olarak tanımlanabilecek olaylar baraj yapılarında meydana gelen çeşitli arızalardan kaynaklı olarak barajın tamamen kullanım dışı kalması veya ciddi hasar alarak suyun kontrol altında tutulamaması olaylarıdır (Cheng, 1993). Bu olaylar baraj duvarının yıkılması, göçmesi ve borulanması gibi olaylar ile olabileceği gibi savak kapaklarının arızalanması ve kret üzerinden su aşması gibi olaylar ile de meydana gelebilirler (Abay vd., 2015; Adamo vd., 2020; Aba, 2022; Direkci, 2022). Nihayetinde tüm bu olayların sonucu olarak baraj yapısı işlevini yerine getirememiş ve mansap hattına kontrolsüz su salınmasına sebebiyet vermiş olur (Association of State Dam Safety Officials, 2021). Tarihte pek çok baraj yetersizliği olayı meydana gelmiştir. Özellikle son iki yüz yıl içerisinde gerçekleşen baraj yetersizliği olayları oldukça tahrip edici ve yıkıcı sonuçlar ortaya çıkarmıştır (Taymaz, 1989). Can kayıplarına ek olarak meydana gelen ekonomik kayıplar göz önüne alındığında, tehlikenin boyutu daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. ICOLD'a (1998) göre kıtalar bazında baraj yetersizlikleri ele alındığında %33 ile Asya kıtası ve onu takiben %30 ile Kuzey Amerika kıtası başı çekmektedir. Bahsi geçen kıtalarda bu olayların yaşandığı ülkeler ise Asya'da Çin, Kuzey Amerika'da Amerika Birleşik Devletleri

(ABD)'dir. Uzun yıllardan beri binlerce baraj inşası gerçekleştirilmiş olan bu ülkeler doğal olarak yetersizlik olaylarında da başı çekmektedirler (ICOLD, 1998). Ülke ölçeğinde bakıldığında ise dünyada sırasıyla ABD, Çin, Japonya, İtalya ve Kanada gelmektedir. Türkiye ise toplamda 7 baraj yetersizliği olayı ile 21. sırada yer almaktadır (Bernard-Garcia ve Mahdi, 2020).

Türkiye'de önemli bir baraj yetersizliği olayı yaşamamasının sebebi baraj yapılarının güncel ve nispeten sayıca az olmasıdır. Oysa Çin ve ABD gibi uzun yıllardır barajlar inşa eden ülkelerde pek çok baraj faciası yaşanmıştır (Ağıralioğlu, 2011; Aba, 2022). Baraj kaynaklı oluşan taşkınlar diğer taşkın olaylarına göre düşük bir olasılığa sahip olsalar da meydana geldikleri zaman çok ciddi sonuçlar doğururlar (Fattorelli vd., 1999). Baraj yetersizliklerinin doğurduğu taşkın olayları sel karakterli olmakla birlikte yüzeyde şiddetli bir aşındırma ve yıkım yapma potansiyeline sahiptir. Bu taşkınlar baraj yapılarındaki pek çok sorundan kaynaklanabilirler. Literatürde karşılaşılan sorunların genel olarak yetersiz dolu savak kapasitesi (BBC, 2021), dolu savak tıkanıklığı (Rizzo ve Blair, 1998), bakım eksikliği (Richards, 2020), borulanma (Zorluer, 1999), sabotaj (Bharti vd., 2020; Anadolu Ajansı, 2023), deprem (Bharti vd., 2020), baraj aklanında kütle hareketleri (Abay vd., 2015) olduğu görülmüştür. Federal Acil Durum Yönetim Kurumu'na (*ing. Federal Emergency Management Agency - FEMA*) göre baraj arızaları ve yıkılmaları hidrolojik, jeolojik, yapısal, sismik ve insan kaynaklı olmak üzere beş üst başlıkta ele alınabilir: Hidrolojik kaynaklı yıkılma ve arızalanmalar üstten aşma ve yüzey erozyonu gibi iki temel alt başlıkta toplanmaktadır. Yine FEMA (2013) tarafından yapılan çalışmalarda 656 adet baraj yıkılması incelendiğinde 465'inin taşkın ve üstten aşma kaynaklı olduğu ortaya konulmuştur. Bu sayı oransal olarak %70'lik bir dilimi karşılamaktadır. Ek olarak dolgu barajlarda meydana gelen yıkılmaların büyük kısmının da taşkın nedeniyle üstten aşma olduğu belirtilmiş olup bu barajların gediklenerek duvar yapılarının göçtüğünün altı çizilmiştir.

Yıldız'ın (2007) çalışmasında belirtildiği üzere üstten aşma olayı iki alt başlıkta ele alınabilir; Rezervuardaki su seviyesinin kreti aşması ve rezervuarda oluşan dalganın kreti aşması. Rezervuardaki su seviyesinin kreti aşabilmesi için hazneye giren su miktarının çıkan su miktarından fazla olması gereklidir. Bu bağlamda taşkın karakterli pik akımlar, hatalı dolu

savaklar, dolu savak tıkanmaları, savak kapaklarının zamanında açılmaması, yetersiz hava payı ve şevde kayma gibi sorunlar rezervuardaki su seviyesinin üstten aşmasına neden olur. Rezervuarda oluşacak bir dalga ile kretin aşılması durumu ise memba şevinde kayma ya da rezervuarın aklanında heyelan şeklinde meydana gelebilecek kütle hareketleri suyu taşırıp taşkına ve yıkılmaya yol açabilir.

Baraj yetersizlikleri konusundaki çalışmalar 1950'li yıllarda Middlebrooks (1953) ile başlamıştır (Yıldız, 2007). 1850 – 1950 yılları arasını kapsayan bu çalışmada 200 baraj yetersizliği olayı ele alınmış olup yetersizliklerin %30'unun üstten aşma, %25'inin gövde problemleri ve %15'inin temel problemleri ile meydana geldiği tespit edilmiştir. Zhang vd. (2009) tarafından yapılan bir çalışmada küresel olarak 1065 baraj yetersizliği olayı ele alınmış ve yıkılan barajların eğer toprak dolgu ise yüksek oranda borulanma ve üstten aşma ile, eğer çekirdek duvar dolguysa büyük oranda üstten aşma ile yıkıldığı ortaya konulmuştur. Çalışmada yapılan istatistik analizler sonucunda ise yüksekliği tespit edilebilen barajlar arasında 15 metre ve altında duvar yüksekliğine sahip olan barajların yetersizlik oranı %61 olarak belirlenmiştir. ICOLD'un küresel çapta derlediği verilere göre barajlarda meydana gelen hasarların %60'ı temel ve gövde üzerinde meydana gelen problemlerden, %30'u ise kret üzerinden su aşması şeklinde meydana gelmektedir (ICOLD, 2010). Martin (2018) tarafından yapılan bir çalışmadan elde edilen verilere göre ABD'de 1900 – 2018 yılları arasında sadece 2 yıl hariç olmak üzere tüm yıllarda en az 1 baraj yıkılmış, arızalanmış ya da hasar almıştır. Bu süreç zarfında yılda ortalama 10, 1980 – 2018 yılları arasında ise yılda ortalama 24 baraj kullanım dışı kalmıştır. Bahsi geçen yetersizlik olaylarının %4'ü sadece ekonomik zararla sınırlı kalmayıp can kayıplarına da yol açmıştır. Tabi bu sayıların ortaya çıkmasındaki temel sebep ABD'nin baraj envanterinin kalabalık ve yaşlı olmasıdır. Yine Martin (2018) tarafından aktarılan bilgilere göre ABD'de 90 binden fazla baraj yapısı bulunmakta ve ortalama yaşları 57'ye ulaşmaktadır. Bu denli fazla sayıda barajın bu kadar yaşlanmış olması pek çok sorunu da beraberinde getirmektedir. Aba'nın (2022) çalışmasından elde edilen verilere göre dünyada yıkılan barajların %70'i dolgu tipi barajlar olup yıkılan barajların yaklaşık %40'ı 30 yaşından büyük, %25'ise 0 - 10 yaşları arasındadır. Yaşa bağlı olarak artış gösteren yıkılma yüzdesi, yıpranma ve eskimeye dayalı iken genç

barajların bu denli yüksek sonuç vermesinin sebebi yetersiz ve hatalı baraj yapılarıdır. 50 yaşından büyük olan barajlarda da sıklıkla görülen hasar alma sebebi ekstrem yağışlarla birlikte suyun kretten aşmasıdır (Mauney, 2021). Literatürde genel olarak kabul gördüğü şekilde tüm baraj tiplerinde meydana gelen yetersizliklerde üstten aşmanın payı yaklaşık %30'dur (ICOLD, 1974; Kaya, 2016). Gelişen teknoloji ile temel ve gövde problemleri giderek azalmakta olsa da bazı gövde problemleri ve üstten aşma olayları hala yıkılmalara yol açan önemli etkenlerdendir (Yıldız, 2007; Abay vd., 2015).

Tüm bunlara ek olarak pek çok küçük barajın ihmal ve göz ardı edilmesi ile de çeşitli baraj taşkınları meydana gelmektedir. Viseu ve Martins, 1998 yılında yaptıkları çalışmada bu konuya dikkat çekerek küçük barajların denetiminin aksatıldığını, erken uyarı sistemlerinin eksik ya da yetersiz olduğunu ortaya koyarak ihmali ortaya çıkarmış, küçük barajların da büyük barajlar kadar önemli olduğunu ve insan hayatını etkileyebileceğini ortaya koymuşlardır. Bir akarsu üzerinde bulunan birden çok barajın varlığı durumunda memba barajları mansapta bulunan barajların yıkılmasına sebebiyet verebilir (Tofiq, 2015). Ardıl barajların bir risk arttırıcı unsur olması fikri yeni olmamasına karşın literatürde sık olarak kullanılmamaktadır. Ancak hem tarihi olaylar hem de barajlar ile ilgili kullanılan farklı sınıflandırma yaklaşımları ardıl barajların risk arttırıcı bir unsur olmasını gerekli kılmaktadır (IDNR, 1990). Ardıl barajlardan birinin yıkılması tekil bir baraj yıkılmasından çok daha büyük sorunlara yol açacağı için önem verilmesi gereken bir konudur (Demir ve Dinçer, 2017). Bu durumun en yakın tarihli örneği 10 Eylül 2023 tarihinde Libya'nın Derne şehrinde meydana gelmiştir. Daniel fırtınası ile gelen şiddetli yağışlar önce Bumansur barajının kapasitesini aşarak üstten aşma ile yıkılmasına neden olmuş, serbest kalan su kütlesi vadi boyunca yıkılan barajın gövde unsurları ile birlikte akış göstererek el-Bilad barajına ulaşmıştır. Gelen akışa karşı direnç göstermekte yetersiz kalan el-Bilad barajı da yıkılarak Derne şehrine ulaşan bir taşkına yol açmıştır. Meydana gelen ekonomik kayıplara ek olarak 11.300 kişi hayatını kaybetmiş, 10 binden fazla kişi ise kaybolmuştur. Ek olarak yerel kaynaklar ölü sayının 20 binlere ulaştığını belirtmiştir. Olay neticesinde 2.200 bina sular altında kalmış ve hasar görmüştür (Anadolu Ajansı, 2024). Sadece bu olay sonucu oluşan taşkınla ölen kişi sayısı, Cumhuriyet tarihi içerisinde sel taşkın envanterlerinde Türkiye'de

ölen kişi sayısından fazladır (Akbaş vd. 2025). Nihayetinde ardıl barajlar amaçlarının aksine mansapta yer alan barajlar için bir tamamlayıcı unsur olmak yerine çeşitli arızalar ve kazalar yoluyla mansap barajlarına tehdit oluşturmaktadırlar (Hu vd., 2020; Říha vd., 2020).

Dünyada ölüme yol açan baraj yıkılması olayları incelendiğince, listenin başında yağışlarla birlikte üstten aşma olayına maruz kalarak yıkılan barajlar görülmektedir. Abay vd.'nin (2015) çalışmasından aktarılan tabloda (Tablo 1) görüldüğü üzere en çok can kaybına yol açan baraj yıkılması olayları üstten aşma mekaniği ile yıkılan barajlarda meydana gelmektedir. Tarihin en büyük baraj felaketi olarak bahsedilen ve Tablo 1'de 1. sırada yer alan Banqiao barajının yıkılması olayı Adamo vd. (2020) tarafından aktarılmış olup 08.08.1975 tarihinde bölgenin 1 yıllık toplam yağışısın 24 saatte düşmesi ile meydan gelmiş bir baraj yıkılmaları olayıdır. Bazıları ardıl olmak üzere 62 adet barajın yıkılması ile sonuçlanmıştır.

Tablo 1. Dünya'da Başlıca Baraj Yıkılmaları (Abay vd., 2015)

Sıra	Baraj Adı	Yıl	Ülke	Ölü Sayısı	Yıkılma Nedeni
1	Banqiao/Shimantan	1975	ÇHC	171.000	Üstten aşma
2	Machchu 2	1979	Hindistan	5.000	Üstten aşma
3	Sempor	1967	Endonezya	>2.000	Üstten aşma
4	South Fork	1889	ABD	2.209	Üstten aşma
5	Vaiont	1963	İtalya	2.000	Üstten aşma
6	Tigra	1917	Hindistan	1.000	Temel sorunları
7	Panshet	1961	Hindistan	1.000	Gövde sorunları
8	Puentes	1802	İspanya	608	Zemin sorunları
9	St. Francis	1928	ABD	600	Zemin sorunları
10	Malpesset	1959	Fransa	423	İnşaat sorunları

Taymaz (1989) tarafından aktarılana göre Sefarim'in (1981) çalışmasında 1850 – 1980 yılları arasındaki baraj yıkılmalarının çok büyük kısmının 15 – 20 metre arası kret yüksekliğine sahip barajlarda gerçekleştiği tespit edilmiştir. İnşa yılı ile yıkılmalar arasındaki ilişki

incelendiğinde ise 1950 yılından önce inşa edilmiş dolgu barajların yıkılma sıklığı 1950 yılından sonra inşa edilmiş olanların 7 katıdır. Gelişen teknikler ve teknolojilerin baraj yıkılmaları üzerindeki etkisi net bir şekilde görülmektedir (Foster vd., 2000).

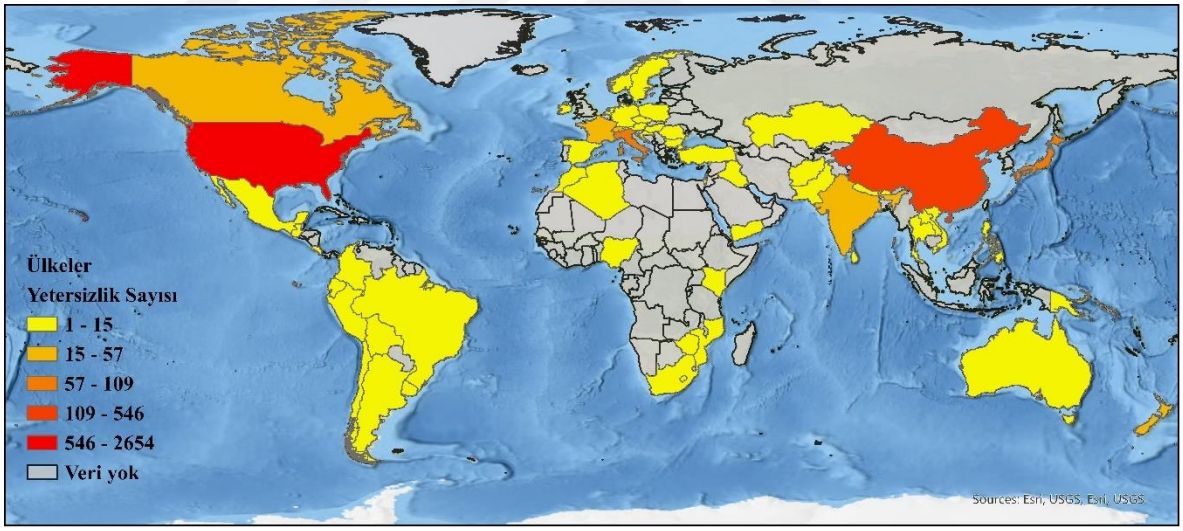
Literatürde yer alan faklı baraj yıkılması çalışmalarında tespit edilen üstten aşma olayları ile bunların toplam yıkılma olayları içerisindeki yüzdeleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablodan hareketle üstten aşma ile yıkılmaların yaklaşık olarak oranı %30 civarında kümelendiği çıkarımına varılabilmektedir. Taymaz'ın (1989) çalışmasında ek olarak baraj yıkılmaları envanteri de derlenmiştir. 1900 – 1985 yıllarını kapsayan bu envanterde, 15 metreden yüksek dolgu baraj yıkılmaları ele alınmış olup toplamda 228 adet baraj yıkılması tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmanın da istatistikleri göstermektedir ki üstten aşma ile meydana gelen baraj yıkılması olaylarının payı %22'dir.

Tablo 2. Literatürdeki çalışmalara göre barajlarda meydana gelen yıkılmalarda üstten aşmanın oranı (Taymaz, 1989'dan değiştirilerek).

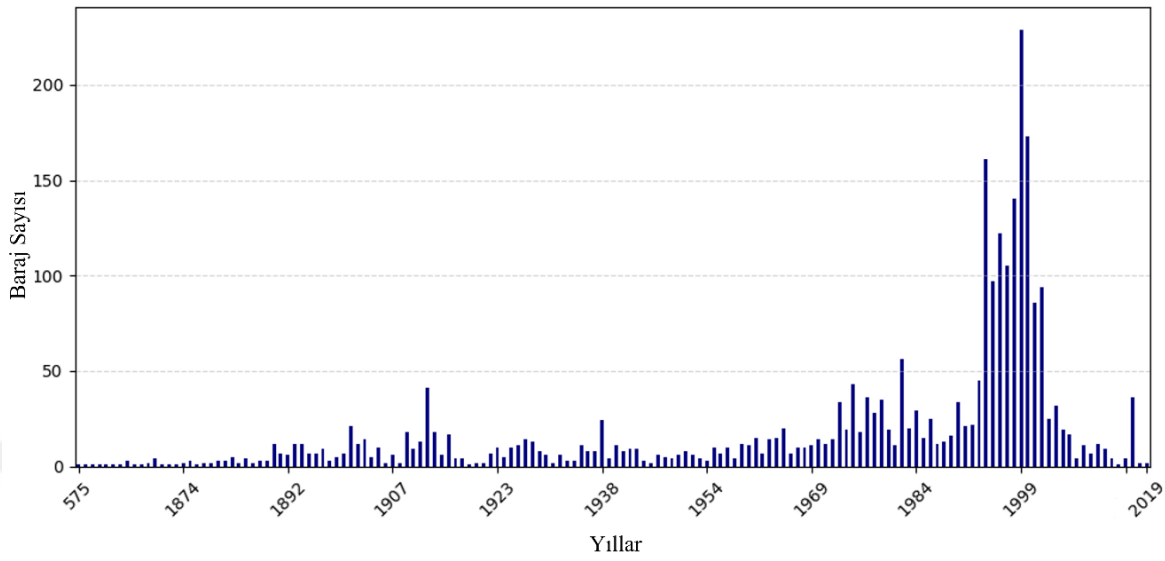
Üstten Aşma Yüzdesi	Baraj Sayısı	Kaynaklar
30%	200	Middlebrooks (1953)
23%	33	Gruner (1963)
36%	12	Babb ve Mermel (1968)
28%	1226	Takase (1967)
38%	74	USCOLD (1974)
14%	100	Charles and Boden (1985)
22%	228	Taymaz (1989)

Baraj yetersizliklerini derleyen bir veri tabanı olan Historical Dam Failures Database'e (Bernard-Garcia ve Mahdi, 2020) göre dünya genelinde meydana gelen baraj yetersizlikleri olayları toplamda 3,861 adettir. Bu veri seti belirli bir tarih aralığı gözetilmeksizin baraj yıkılmalarını ve erişilebilen tüm yetersizlik olaylarını içermektedir. Her bir olay kaydında, barajın adı, konumu, yıkım nedeni, barajın türü ve özellikleri (yükseklik, rezervuar kapasitesi

vb.) gibi 45 farklı değişken yer almaktadır. Ancak veri seti bu anlamda her bir olay için tam anlamıyla verileri toplayamamış, belli alanlarda eksik kalmıştır. Bu veri seti doğal ve yapay tüm barajlarda meydana gelen yıkılma ve yetersizlikleri kapsamaktadır. Ancak veri tabanının büyük kısmını yapay barajların yıkılması olayları oluşturmaktadır. Veri setinden hareketle dünyadaki baraj yetersizliklerinin dağılışı Şekil 5'te verilmiştir. Zamansal olarak baraj yetersizlikleri incelendiğinde ise (Şekil 6) tarih boyunca dönem dönem artışlar olmakla birlikte 1990'lı yıllar ve 2000'li yılların başı tarihte görülmemiş derecede baraj yetersizliği olayına şahitlik etmiştir. Günümüze doğru ise bir azalma eğrisi görülmektedir. Bu veri setine göre 3,861 baraj yetersizliği olayından 1,300'ü üstten aşma şeklinde meydan gelmiştir. Bu sayı veri tabanının yaklaşık 1/3'ünü yani %33'ünü oluşturmaktadır. Taymaz'ın (1989) çalışmasından elde edilen veriler ile karşılaştırıldığında (Tablo 2) benzer bir oran görülmektedir.



Şekil 5. Baraj yetersizliklerinin dünyadaki dağılışı (Historical Dam Failures Database, 2020).



Şekil 6. Dünyadaki baraj yetersizliği olaylarının yıllara göre dağılışı (Historical Dam Failures Database, 2020).

Türkiye'de baraj yetersizlikleri çok nadir görülür. Duvar yıkılması veya çökme şeklinde tespit edilebilen tek baraj yıkılması olayı Kütahya ilinin Simav ilçesinde bulunan Söğüt Dere barajıdır. 19/05/2011 tarihinde yıkılan toprak dolgu tipindeki bu barajın, yıkıldığı günün sabahında meydana gelen deprem ve artçı sarsıntılarının tetiklemesi ile yıkıldığı düşünülmektedir (Beyaz Gazete, 2011). Olay neticesinde mansap hattında pek çok alan su altında kalmış olsa da can kaybına sebebiyet vermemiştir (Evrensel, 2011). Özdemir vd. (2011) tarafından aktarılan bir olay ise baraj inşası esnasında yaşanan yetersizlik örneği olarak karşımıza çıkmaktadır. 16/11/2007 tarihinde Çanakkale ilinde bulunan Çokal barajının inşası esnasında memba batardosunun, havzadan gelen suyu tahliye etmede yetersiz kalınması sonucu üstten aşma olayı yaşadığı ve gediklenme ile yıkıldığı bildirilmiştir. Olay sonucunda mansap hattında kalan arazilerde meydana gelen taşkınlar sonucu maddi hasar ortaya çıkmış olsa da herhangi bir can kaybı yaşanmamıştır. Türkiye'de yaşanan bir başka baraj kaynaklı taşkın olayı ise 24/02/2012'de Adana'da Köprü barajında yaşanmıştır. İnşası tamamlandıktan sonra su depolamaya başladığı aşamada derivasyon tünellerine çıkan bir arıza neticesinde 97 milyon metreküp su serbest kalarak 10 işçinin ölümüne ve mansapta kalan arazilerin sular altında kalmasına neden olmuştur. Yerel halkın uyarılması ve tahliyesi

ile sivil kayıplara mahal verilmese de ülke tarihinde yaşanan baraj kaynaklı taşkınların önemli bir örneğidir (Wikipedia, 2012). Yapı kaynaklı bir başka olay ise 29/05/1984 tarihinde Adana ilinde bulunan Aslantaş barajında yaşanmıştır. Dolu savak kapaklarından birinde meydana gelen arıza sonucu kapağın parçalanarak yerinden çıkması ile barajın haznesindeki suyun bir kısmı Ceyhan Nehri'ne kontrolsüz olarak boşalmıştır. Nehir yatağının bölgede oldukça geniş olması ve alınan tedbirler bir taşkın olayının meydana gelmesinin önüne geçmiştir (Hürriyet, 1984; Milliyet, 1984; Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 1992).

1.1.3. Toplam Risk Sınıflandırma Metotları

Toplam risk sınıflandırma metotları bir barajın yıkılması ya da arızalanması durumunda ne gibi etkiler doğuracağını göz önünde bulundurarak barajları sınıflandırır. Bu sınıflandırmalarda çeşitli kurumlar farklı sistemler kullansa da genellikle aynı temellere dayanırlar. Literatürde kullanılan terimlerin net olmaması ve farklı metotların aynı şeyleri farklı kelimelerle ifade etmesi gibi sorunlardan dolayı FEMA gibi kurumlar, terimlerin açıkça tanımlandığı sınıflama sistemlerinin kullanılmasını önermektedir (FEMA, 2004).

Bir barajın barındırdığı toplam risk çeşitli katsayılar dikkate alınarak sistematik bir şekilde analiz edilebilir. FEMA tarafından önerilen temel bir tehlike potansiyeli sınıflamasında insan ölümü ve ekonomik – çevresel kayıp temelinde 3 tehlike grubunda barajlar sınıflandırılmaktadır (Tablo 3). FEMA tarafından yapılan tanımlaya göre tehlike potansiyeli sınıflaması "Bir barajın yıkılmasından veya yanlış işletilmesinden kaynaklanan artan olumsuz sonuçlarına göre barajları gruplara ayırma sistemidir." Tehlike potansiyeli sınıflaması barajların mevcut durumu hakkında bilgi vermeden bir gruplama yapar (FEMA, 2004; Ağıralioğlu, 2011). Bu nedenle daha detaylı veriler içeren metotlar ile sınıflama yapılması barajların durumu hakkında daha tutarlı sınıflamalar yapabilmeye olanak sağlar.

Tablo 3. Barajlar için Tehlike Potansiyeli Sınıflaması (FEMA, 2004)

Tehlike Potansiyeli Sınıfı	İnsan Ölümü	Ekonomik, Çevre ve Canlı Kaybı
Düşük	Beklenmiyor	Düşük veya tesis ile sınırlı.
Orta	Beklenmiyor	Bekleniyor
Yüksek	Muhtemel (Bir veya daha fazla)	Bekleniyor (Bu sınıf için gerekli değil)

Bu bağlamda baraj yapılarındaki toplam riski ele alan, literatürde yaygın olarak kabul görmüş ICOLD (ICOLD, 1989) ve Bureau (Bureau ve Ballentine, 2002) metotları mevcuttur. Bu metotlar temelde, barajın inşa edildiği konumun deprem tehlikesi ve baraj yapısı gibi bilgilere dayanarak risk sınıfını ortaya koymaya çalışır. Baraj konumunun deprem tehlikesi Doruk Yer İvmesi'ne (DYİ - İng. Peak Ground Accelaration) dayalı olarak belirlenirken baraj yapısının risk derecesi ise hazne kapasitesi, duvar yüksekliği, mansapta ikamet eden nüfus ve mansapta meydana gelebilecek hasarın büyüklüğü gibi parametrelere bağlıdır. ICOLD metodu deprem ve yapı-mansap riskini ayrı ayrı ele alırken Brueau metodu toplam riski ortaya koymaktadır. Bu nedenle de yapılan çalışmalarda toplam risk faktörünü ortaya koyabilmesi bağlamında Brueau metodu sıklıkta tercih edilmektedir (Ağıralioğlu, 2011). Bu metotlara ek olarak Türkiye'de DSİ tarafından ortaya konulmuş olan bir metot da mevcuttur. Ancak literatürde çok sınırlı olarak yer edinmiş olup yaygın değildir (Efe, 2022).

ICOLD metoduna göre barajların toplam riski, yapısal ve sosyo-ekonomik faktörleri içermektedir. Bu metotta deprem tehlikesi ayrı olarak ele alındığı için bir baraj deprem bağlamında güvenli ancak yapısal olarak riskli ya da yapısal olarak güvenli ama deprem bağlamında riskli gibi sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Ek olarak bu metotta yapı riski belirlenirken katsayılar eşit görülerek toplanır ve toplam katsayı üzerinden değerlendirme yapılır. Ancak Bureau metodu incelendiğinde ise daha kompleks bir hesaplama yöntemi görülmektedir.

Bureau ve Ballentine tarafından 2002 yılında geliştirilen metot, ilk olarak 7. ABD Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı'nda sunulmuştur (Bureau ve Ballentine, 2002). Bu çalışma, ICOLD metriklerinden türetilmiş ve 1900-2001 yılları arasındaki 350'den fazla barajın sismik performans verilerine dayandırılmıştır. Metod, barajların toplam riskini hızlı bir şekilde değerlendirmek için yarı-kantitatif bir yaklaşım sunar. Bu yöntem, barajın yapısal özelliklerini, mansap hattındaki risk potansiyelini ve depremselliğini dikkate alarak toplam risk faktörünü hesaplar. Elde edilen risk faktörü, barajları düşük, orta, yüksek veya çok yüksek olarak kategorilere ayırır. Bureau (2003), bu yöntemi genişletmiş ve deprem mühendisliği el kitabında, barajlar ve ilgili tesisler için uygulamalarını detaylandırmıştır. Metot, başlangıçta Güney Carolina'daki barajlar için tasarlanmış, ancak daha sonra dünya genelinde benimsenmiştir. Örneğin, dünyada birçok çalışmada (Singh vd., 2011; Noferesti vd., 2015; Moldovan vd., 2016; Hariri-Ardebili ve Nuss, 2018; Chen ve Lin, 2018; Topcu ve Tosun, 2021; Irinyemi ve Lombardi, 2021; Zhang ve Wang, 2022; Zhang vd., 2023; Tosun ve Hariri-Ardebili, 2024) ve Türkiye'de Tosun ve diğerleri (2007) tarafından büyük dolgu barajların sismik risk sınıflandırması için kullanılmıştır (Tosun vd., 2007). Bu, metodun basitliği ve büyük portföylerde uygulanabilirliği sayesinde küresel bir araç haline geldiğini göstermektedir. Ancak, detaylı sayısal simülasyonlara kıyasla daha az kesin olduğu için, yüksek riskli barajlar için ek analizler gerekebilmektedir.

Türkiye'de yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde ise ilk olarak Tosun vd. (2007) tarafından yapılan çalışma karşımıza çıkmaktadır. Fırat havzasından seçilen 32 barajın ele alındığı ve Bureau metodu kullanılarak toplam risk durumlarının ortaya konulduğu bu çalışmada, incelenen 32 barajdan 15'inin yüksek, 17'sinin orta risk grubunda olduğu tespit edilmiştir. Tosun ve Seyrek (2010) tarafından Kızılırmak havzasında yapılan bir çalışmada 36 baraj ele alınarak Bureau metodu ile toplam risk durumları tespit edilmiştir. İncelenen 36 barajdan 13'ünün orta, 23'ünün yüksek risk grubunda olduğu tespit edilmiştir. Tosun vd. (2020) tarafından Kuzeybatı Anadolu bölgesinde Kuzey Ege ve Gediz havzalarında yer alan 15 baraj ile yapılan bir çalışmada ise 4 barajın orta, 11 barajın yüksek risk grubunda olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu çalışmada ICOLD metoduna göre de hesaplamalar yapılmış olup incelenen 15 barajdan 9'unun yüksek, 6'sının çok yüksek risk grubunda olduğu tespit

edilmiştir. Tosun (2020) tarafından Orta Anadolu'da Kuzey Anadolu fay zonu üzerinde yer alan 15 baraj hem ICOLD hem de Bureau metoduna göre incelenmiştir. Bureau metoduna göre 2 barajın orta, 13 barajın yüksek risk grubunda olduğu tespit edilmiştir. ICOLD metoduna göre ise 3 baraj orta, 6 baraj yüksek ve 6 barajın çok yüksek risk grubuna dahil olduğu tespit edilmiştir. Tosun (2021) tarafından Eskişehir ilinde yer alan 6 baraj ile yapılan bir çalışmada ise Bureau metoduna göre 6 baraj da yüksek riskli olarak tespit edilmiştir.

Depremsellik bağlamında ICOLD metodu baraj konumunun DYİ verisini ve faya yakınlığını ele alırken Brueau metodunda DYİ verisi ve doğrudan bir deprem magnitüdü ele alınmaktadır. Brueau metodu olmuş veyahut olacak olan bir deprem olayının tahmini büyüklüğü girilerek çok daha spesifik bir risk tespiti yapmaya yönelik tasarlanmıştır. İki metodun aynı parametreler üzerinde birbirinden farklı katsayılar kullanması da aralarındaki önemli farklılıklardan biridir. Hangi metodun daha tutarlı olduğuna dair yapılmış olan bir çalışmaya erişilememiştir.

1.1.4. Havza Morfometrisi

Morfometri doğal veya yapay şekil ve yapıların geometrik özelliklerinin sayısal analizi olarak tanımlanmaktadır (Clarke, 1996; Agarwal, 1998; Obi Reddy vd., 2002). Biyolojiden paleontolojiye, jeolojiden jeomorfolojiye kadar çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Morfometrik analizler, formların nasıl şekillendiğini, hangi süreçlerden geçtiğini ve zaman içinde nasıl değiştiğini anlamak için önemli bir ölçüm aracıdır (Webster ve Sheets, 2010; Shekar ve Mathew, 2022). Havza morfometrisi, bir havzanın şeklinin ve topografik özelliklerinin nicel olarak incelenmesidir. Akarsu havza sistemlerinde uygulanan morfometrik analizler, genel olarak arazi özelliklerini (Jordan 2003; Sreedevi vd., 2005; Ehsani ve Quiel 2008) ve özellikle nehir havzası sistemlerini incelemek için kullanılmaktadır (Biswas vd., 1999; Vittala vd., 2004; Chopra vd., 2005; Ratnam vd., 2005; Dinagara Pandi vd., 2017). Bir akarsu havzasının jeomorfometrik olarak ölçülmesi nehir sistemlerinin dinamiklerinin anlaşılması, su yönetimi planlaması ve doğal tehlikelerin değerlendirilmesi gibi süreçlerde kullanılmakla birlikte şiddetli yağış koşulları altındaki davranışını tahmin

edebilmeyi ve öngörebilmeyi de sağlar (López-Vicente vd., 2009; Conforti vd., 2011; Lara vd., 2018).

Havza morfometrisinin en yaygın kabul gören ilkesi, drenaj havzası morfolojisinin zaman içinde meydana gelen çeşitli iklimsel, jeolojik ve jeomorfolojik süreçlerin bir göstergesi olduğudur. Söz konusu ifade birçok morfometrik çalışmada vurgulanmıştır (Horton, 1945; Strahler, 1952; Strahler ve Chow, 1964; Muller 1968; Shreve 1969; Evans 1972, 1984; Chorley vd, 1984; Merritts ve Vincent 1989; Ohmori 1993; Cox 1994; Oguchi 1997; Burrough ve McDonnell 1998; Hurtrez vd. 1999; Ozdemir ve Bird 2009). Havza morfometrisi toprak özellikleri, erozyon mekanizmaları ve yeryüzü şekil süreçlerinin anlaşılmasında önemli bir role sahiptir (Delcaillau 2001; Ponza vd., 2010; Beneduce vd., 2004; Capolongo vd., 2005; Gioia ve Schiattarella 2010; Gioia vd., 2011). Ayrıca, drenaj ağlarının ve bir bölgenin üç boyutlu geometrisinin açıklanmasına katkıda bulunur. Ek olarak bölgenin jeolojik ve jeomorfolojik evrim sürecinin anlaşılmasına da yardımcı olur (Singh 1980). Havza morfometrisi önemli bir topografik gösterge olduğundan, hidrologlar ve jeomorfologlar için toprak erozyonu, yamaç dengesi, sel, heyelan ve pik akım gibi ciddi çevresel sorunlara yaklaşımda çok önemlidir (Aspinall ve Pearson, 2000; Kumar vd., 2000; Nag ve Chakraborty 2003; Lhomme vd., 2004; Özdemir, 2011).

Akarsu havzalarının pik akım kabiliyetinin yüksek olması doğal olarak yağışın hızlı bir şekilde akışa geçmesine neden olmakta ve havzaların taşkına karşı duyarlı olmasına yol açmaktadır (Alam vd., 2021). Özdemir ve Akbaş (2023) çalışmalarında hidrolojik verilerin yetersiz kaldığı bölgelerde, havza morfometrisi ile akarsu havzalarının analiz edilmesi ve sonuçların Normalize Morfometrik Taşkın İndeks (NMFI) ile değerlendirilmesini önermiş, yaptıkları çalışmada da bu yöntemin hidrodinamik modeller ile tutarlı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

1.1.5. Curve Number

Yağışlar ile yüzeye ulaşan suların akarsu vadilerinde toplanarak akışa geçmesinden önce bu toplanma sürecinde yüzeysel akış göstermesi ve vadi tabanına ulaşması gerekmektedir (Bayazıt, 1995; Elbaşı ve Özdemir, 2018). Bu aşamada arazinin yüzey örtüsü ve toprak yapısı suyun akış hızını belirleyici temel unsurlardandır. Dunne ve Black'e (1971) göre doğal arazi örtüsü, bitki örtüsü ve toprağın organik madde içeriği yağmur suyunun yer altına sızmasını desteklerken, yapılaşma ve tarımsal alanlardaki yoğun kullanım, toprağın geçirgenliğini azaltarak suyun doğrudan yüzey akışına dönüşmesine zemin hazırlamaktadır. Kentleşme sürecinde artan betonlaşma ve asfalt kaplamalar, yağış ile gelen suyunun emilimini engellemekte; bu durum, yağışın kısa sürede ani su birikimine neden olarak taşkınlara yol açabilmektedir (Ozdemir ve Elbaşı, 2015). Öte yandan, tarımsal alanlarda uygulanan yoğun işleme teknikleri ve monokültür uygulamaları, toprak yapısının bozulmasına ve suyun doğal akış yollarının değişmesine neden olarak, yüzeysel akış üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir (Brutsaert, 1999). Örneğin, tarım arazilerinde yoğun toprak işleme, toprak sıkışmasına ve yüzey sertleşmesine neden olarak infiltrasyonu azaltır (Fiener vd., 2011). Bu durum, özellikle Horton tipi akış rejimlerinde yüzeysel akışın artmasıyla sonuçlanır. Buna karşılık, ormanlık alanlar yüksek infiltrasyon kapasitesi ve yaprak örtüsüyle yağışın tutulmasını sağlayarak akışı geciktirir (Hundecha ve Bárdossy, 2004). Sonuç olarak arazi kullanımı değişiklikleri, infiltrasyon kapasitesi, tutulma ve yüzeysel akış gibi temel hidrolojik dinamikleri doğrudan etkileyen bir faktördür (Foley vd., 2005). Kentleşme, ormansızlaşma ve yoğun tarım uygulamaları, akışı artırarak sel tehlikelerini ve erozyonu şiddetlendirir (Brinson ve Malvárez, 2002).

Literatürde yer alan çalışmalardan hareketle arazi kullanımındaki farklılıkların, hidrolojik süreçleri önemli ölçüde etkilemekte ve özellikle yüzeysel akış oluşumunu değiştirdiği çıkarımına varılmaktadır. ABD Tarım Bakanlığı Doğal Kaynaklar Koruma Servisi (National Resources Conservation Service – NRCS - eski adıyla Soil Conservation Service - SCS) tarafından geliştirilen bir model olan Eğri Numarası (İng. Curve Number - CN) yöntemi arazi kullanım türlerinin, hidrolojik toprak gruplarının ve yağış öncesi nem koşullarının akış

potansiyelini nasıl etkilediğini niceliksel olarak değerlendirmektedir (NRCS, 2004; Krisnayanti vd., 2022). Bir sahanın CN değeri yağış ve yüzey akışı arasındaki ilişkiyi temsil etmekle birlikte özellikle ölçülmemiş su havzaları için kullanışlıdır (Tikno vd., 2016; Kim ve Shin, 2018). CN yöntemi temelde yağış-akış, akarsu havzaları akış tahmini yapmak ve taşkın olaylarını öngörmek için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır (Mishra ve Singh, 2013). Literatürde CN metodu pek çok çalışmada sınanmış ve tutarlılığı test edilmiştir. Örneğin Schueler (1994) tarafından yapılan bir çalışmada ormanlık bir alanın (CN ≈ 30–70) konut alanına (CN ≈ 60–90) dönüştürüldüğünde akış hacminin %40–60 artabildiği tespit edilmiştir. Soares vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada akarsuların akış hızı ile CN değerleri arasında yüksek korelasyon görüldüğü ortaya konulmuştur. Georgia'daki Little River havzasında yapılan bir çalışma, kentleşmenin ortalama CN değerini 65'ten 78'e çıkarak pik debileri %35 artırdığı tespit edilmiştir (Sheridan, 1997). Appalaş Dağları'nda yapılan ağaçlandırma çalışmaları ortalama CN değerlerini 75'ten 55'e düşürerek erozyonu %80 azaltmıştır (Trimble, 1999). Baltimore'da büyüyen kentsel alanlar geçirimsiz yüzey oranını %35'e çıkararak CN değerlerini 68'den 82'ye yükseltmiş ve sel sıklığını ikiye katlamıştır (Arnold vd., 1998). Literatürde yer alan çalışmalar CN yönteminin yüzey akışını etkili bir şekilde tahmin edebildiğini ve sonuçların gözlem verileri ile tutarlı olduğunu göstermekte bu durum da yağış-akış ilişkilerini anlamada ve taşkın tahmininde değerli bir araç olduğunu kanıtlamaktadır (Tikno vd., 2016). Çalışmamızda akarsu havzalarının CN değerleri, yüzeysel akış potansiyellerinin değerlendirmesi bağlamında ele alınmıştır.

CN değeri 0 ile 100 arasında değişen değerler alarak temsil edilmektedir. Düşük CN değerleri düşük akış koşullarını, yüksek CN değerleri yüksek akış koşullarını işaret etmektedir (Mishra ve Singh, 2013). CN değeri yükseldikçe yağış ile oluşan akışın hacmi de yükselir ve dolayısıyla akarsu havzalarının pik akıma ulaşma eğilimi de artar (Soomro vd., 2019). Azalan CN değerleri ise akarsu havzalarının oluşturduğu pik akımların azalmasına yol açar (Sumarauw ve Ohgushi, 2012). CN değerleri üzerinde etkili olan bir faktör olarak arazi kullanımı ile ilgili çalışmalar incelendiğinde Shi vd. (2007), Shenzhen bölgesinde kentsel alanların %58'e çıkmasıyla akış katsayısının %33,5 arttığını ve taşkın debilerinin önemli ölçüde yükseldiğini göstermiştir. Hundecha ve Bárdossy (2004), parametre bölgeselleştirme

yöntemiyle yaptıkları çalışmada, kentsel alanların iki katına çıkarılmasının yaz taşkınlarında %28,9'luk debi artışına neden olduğunu ortaya koymuştur. Guzha vd. (2018) Doğu Afrika'da orman kaybının yıllık akışı ortalama %16 artırdığını ve yüzeysel akışın %45'e varan oranlarda yükseldiğini tespit ederek okaliptüs plantasyonlarının, doğal ormanlara kıyasla yüzeysel akışı %9,6'ya çıkardığını ancak tarım arazilerinin bu oranları %22'ye ulaştırdığını ortaya koymuşlardır. Sajikumar ve Remya (2015) Hindistan'ın Kerala bölgesinde pirinç tarlalarının yerleşim alanlarına dönüşmesi ile geçirimsiz yüzeylerin arttığını ve ani taşkın riskinin yükseldiğini tespit etmişlerdir. Ozdemir ve Elbaşı (2015) Türkiye'nin İstanbul şehrinde temelde benzer özellikler sergileyen ancak arazi kullanımı bağlamında farklılaşan iki komşu havza üzerine yaptıkları çalışmada arazi kullanımı değişiminin akışa olan etkilerini açıkça ortaya koymuşlardır. Çalışma kapsamında ele alınan Çınar Havzası'nda 30 yıllık bir zaman diliminde doğal yüzeyler dramatik bir şekilde azalmış ve yapay alanlar toplam varlıklarını havza alanının yaklaşık %60'ı kadar arttırmıştır. Bu değişim 30 yıllık bir zaman diliminde Çınar Havzası'ndaki akışı yaklaşık 7.5 katına çıkarmıştır. Bu sonuçlar, geçirimsiz yüzeylerin hâkim olduğu alanlarda yüzeysel akışın hızlandığını ve hidrolojik tepkinin şiddetlendiğini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

1.2. Amaç – Kapsam

Barajlar ya da bağlama yapıları fark etmeksizin, akarsular üzerine inşa edilen yapıların tasarımı tarihsel hidrolojik verilere dayandırılarak hesaplanır (Adamo vd., 2020). Bahsi geçen yapılar tasarımının yapıldığı dönemin hidrolojik koşullarına göre tasarımcı tarafından uygun görülen Risk-Maliyet çerçevesinde inşa edilir. Bu bağlamda tarihsel hidrolojik verilerin yapıların tasarımı için yeterli olduğu öngörülür (Erker ve Ağıralioğlu, 1986; Mallakpour vd., 2019). Ancak özellikle son yıllarda tanık olduğumuz küresel iklim değişiklikleri ile değişen yağış miktarı, türü ve frekansı bilinen hidrolojik süreçleri hızla değişime uğratmakta ve bu anlayışla inşa edilen yapıları tehdit etmektedir (Milly vd., 2002; Prein vd., 2017; Özdemir, 2021). ABD'de 2010 yılından 2020 yılına kadar gerçekleşen 73 baraj yetersizliği olayının büyük bir kısmı ekstrem hava olayları kaynaklıdır ve bu barajların

ortalama yaşı 62'dir (Adamo vd., 2020). Bu tespit yıkılan barajların kendi döneminin ekstremlerine dayanmış olduğunu ancak iklim değişikliğinin getirdiği yeni ekstrem seviyelerine dayanamadıklarını göstermektedir. Baraj yıkılmaları arasında üstten aşma (barajın havzadan toplanan suyu tahliye edemeyerek dolup kret üstünden suyun akışa geçmesi) olayı yaklaşık %30'luk bir paya sahiptir (Bernard-Garcia ve Mahdi, 2020). Literatür değerlendirmesinde görüldüğü üzere barajların toplam riski ele alınırken havza süreçleri dikkate alınmamaktadır. Bununla birlikte üstten aşma mekanizmasını toplam risk metotları ile ele alarak barajların değerlendirilmesini sağlayan bir metot veya çalışma da bulunmamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, havza süreçlerinin barajların toplam risk metotlarında ele alınmaması ile sürece yaklaşımda büyük bir eksiklik olduğu öngörülerek havza süreçlerini mevcut yöntemlerin sonuçları ile karşılaştırmak ve birlikte değerlendirerek barajların toplam riskini daha yüksek bir doğruluk ile tespit edebilmektir. Bu amaç doğrultusunda baraj havzalarının pik akım kabiliyetlerini ortaya koyabilmek için havzaların CN özellikleri ile Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) temelli havza morfometrisi analizleri uygulanarak, baraj gölüne su taşıyan akarsu havzalarının pik akım potansiyelinin belirlenmesi hedeflenmiş, ardıl barajlar da risk arttırıcı bir unsur olarak ele alınarak değerlendirilme yapılmıştır.

1.3. Çalışma Sahasının Özellikleri

Çalışma alanı olarak seçilen Nilüfer Çayı Havzası 1988 km² yüzölçümüne sahip olup DSİ tarafından belirlenen 26 yönetsel drenaj havzasından 03 numaralı Susurluk Havzası'nın alt havzasıdır. 39° ve 41° kuzey enlemleri ile 28° ve 30° doğu boylamları arasında kalan Nilüfer Çayı Havzası, Türkiye'nin kuzeybatısında yer almaktadır (Şekil 7). Havzanın yükselti değerleri yaklaşık olarak deniz seviyesinden 2543 metreye kadar değişmekte olup, en yüksek noktası aynı zamanda Nilüfer Çayı'nın da kaynağı olan Uludağ kütlesinde yer almaktadır.

Genel olarak, Nilüfer Çayı havzası Akdeniz iklimi ile karakterize edilir. Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre havzanın yaklaşık %58'i Csa, %18'i Cfb, %17'si Csb, %4'ü Dfc,

%2,5'i Dfb, kalan küçük bir kısmı ise ET iklim tipindedir. (Taşoğlu vd., 2024). Havzanın ova kesiminde kışları ılıman ve yazları çok sıcak geçen Csa iklim tipi, yazları ılıman geçen Csb iklim tipi ve yazları ılıman geçen ve her mevsim yağış alan Cfb iklim tipi görülmektedir. Uludağ kütlesinin yüksek kesimlerinde ise yazları sıcak geçen nemli karasal iklim tipi olan Dfb ve yazları serin geçen nemli karasal iklim tipi olan Dfc görülmektedir. Zirvede ise tundra karakterli ET iklim tipi görülmektedir. Bu bakımdan Uludağ kütlesi ve çevresi mikroklimatik karakterdedir (Öztürk, 2014). Meteoroloji istasyonlarından elde edilen 30 yıllık kayıtlara göre (1975 - 2007) ortalama sıcaklık ovalarda 14,5 °C, yaylalarda 4,8 °C, yıllık ortalama yağış ise ovalarda 674 mm, yaylalarda 1453 mm olup, Ekim ve Ocak aylarında aşırı yağışlar görülmektedir (Öztürk, 2014; Akbas, 2023). Sahada yağışın dağılışı orografik koşullar nedeniyle Uludağ ve çevresinde kalan yüksek sahalarda artış göstermektedir (Gönençgil vd., 2016; Akbaş ve Özdemir, 2018). Coşkun'un (2022) çalışmasına göre ise sahada 21. Yüzyılın sonlarına doğru ortalama yağışlar azalarak ekstrem yağışlar artış gösterecektir. Bu durum sel ve taşkın olaylarının bölgede hem sıklığının hem de şiddetinin artış göstereceğine işaret etmektedir. Ek olarak bahsi geçen çalışmada elde edilen sonuçlara göre bölgede yakın gelecekte Doğancı Barajı için taşkın oluşturabilecek bir potansiyel öngörülmüştür.

Nilüfer Çayı, yalnızca bir akarsu olmanın ötesinde, Bursa Ovası'nın su dengesini belirleyen başlıca hidrografik unsurlardan biridir. Bildirici'ye (2009) göre Nilüfer Çayı bu merkezi konumu nedeniyle tarih boyunca çeşitli su taşkınlarına, bataklık oluşumlarına ve tarımsal alanlarda verim kayıplarına yol açan sorunların da kaynağı olmuştur. Özellikle eğimin azaldığı ova kesimlerinde suyun göllenme eğiliminde olması hem tarım hem de yerleşim açısından ciddi tehditler doğurmuştur. Bu sorunlara çözüm getirmek amacıyla, 19. yüzyılın sonlarından itibaren çeşitli ıslah ve düzenleme projeleri gündeme gelmiştir (Bildirici, 2009). Bu kapsamda Nilüfer Çayı'na ilişkin ilk sistemli müdahale, 1891 yılında Fransız mühendis G. Ravotti tarafından hazırlanan raporla şekillenmiştir. Nihayetinde çeşitli su yapıları inşa edilerek düzenlemeler yapılsa da ilk olarak 1938 yılında Gölbaşı barajının yapımına başlanması ile Bursa'da baraj yapıları ortaya çıkmaya başlamıştır.

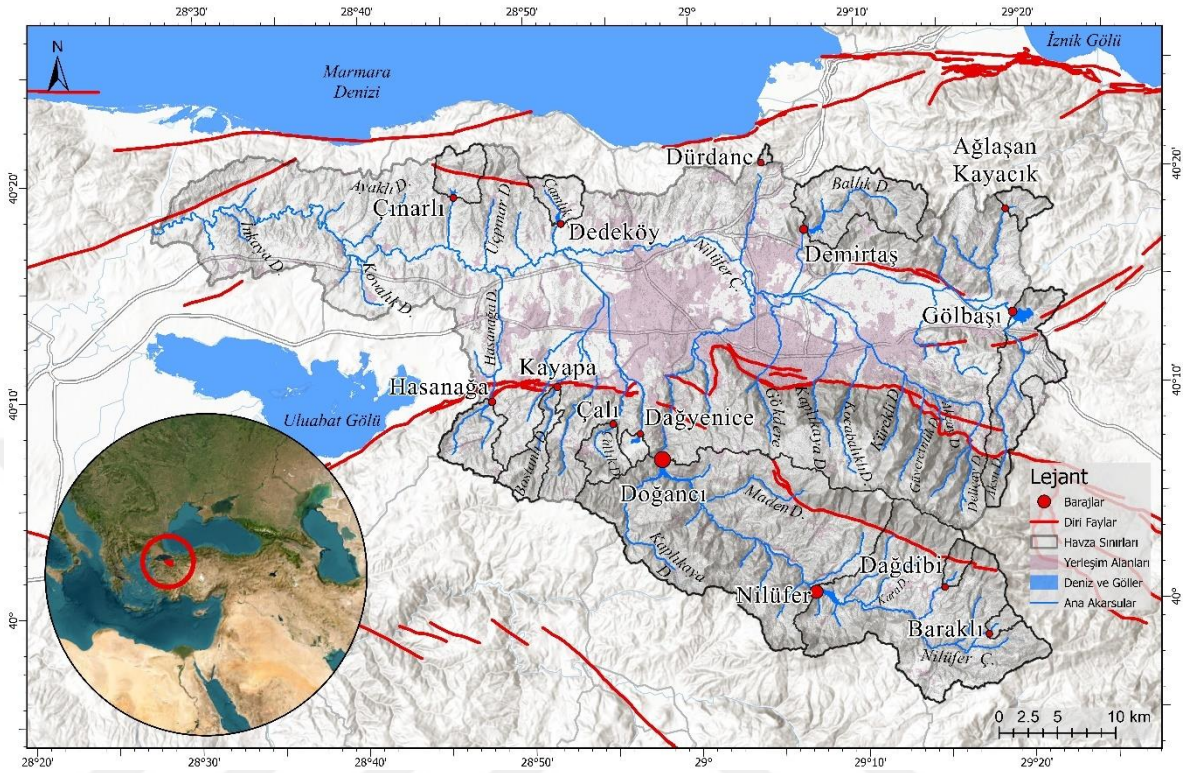
Nilüfer Çayı havzası tektonik olarak Kuzey Anadolu Fay Zonunun (KAFZ) güney kolu tarafından şekillendirilmekte olup havza içerisinde hem KAFZ ile bağlantılı sistemler hem

de küçük ölçekli yerel faylar bulunmaktadır (Yaltırak, 2002). Havzanın güneydoğusunda yer alan Uludağ kütlesi Batı Anadolu Genişleme Bölgesi (BAGB) ve KAFZ arasında kalan özel bir tektonik konuma sahiptir (Karabacak ve Sançar, 2025). Uludağ kütlesi KAFZ'ın güney kollarının güney sınırını oluşturmaktadır (Şengör vd., 2005, Okay vd., 2008). Emre vd. (2011) çalışmasına göre kuzeyde Bursa fayı, güneyde Soğukpınar fayı ile çevrili olan Uludağ kütlesinin batısında Uluabat fayının etkinlik gösterdiği görülmektedir. Çalışma sahasında yer alan 4 adet baraj da Uluabat fayının doğu kolu ile kontrol edilen bölgede yer alan vadilere inşa edilmişlerdir. Bursa ovasının kuzeydoğu kesimi Barakfakih fayı ile kontrol edilirken kuzey ve kuzeybatı kesimleri ise Marmara denizi kıyılarının güneyini de şekillendiren Gençali ve Zeytinbağı fayı ile çevrili durumdadır. Nilüfer Çayı havzasının batı ucu ise Karacabey fayının kontrolü altındadır. Havza içerisinde Bursa şehrinin de bulunduğu, Uludağ kütlesinin kuzeyinde yer alan ova kesimi çek-ayır mekanizması ile oluşmuş olup kuzeyde ve güneyde aktif faylar ile çevrelenmiştir (Yılmaz ve Koral, 2007).

Nilüfer Çayı havzasında jeolojik olarak Miyosen ve Kuvaterner arazileri havzanın %63'lük kısmını oluşturmaktadır. Takiben sahanın %26'sını kaplayan Paleozoyik – Permo-Triyas arazileri gelmektedir. Bu iki hâkim jeolojik yapıya ek olarak Orta Jura – Üst Kretase ve Üst Kretase – Eosen yaşlı yapılar da sahada bulunmaktadır. Litolojik dağılım incelendiğinde ise en yaygın kayaç topluluğu Neojen karasal kırıntılılar (%35) ve Kuvaterner ayrılmamış alüvyonlar (%28) olarak öne çıkmaktadır. Metamorfikler (şist, fillit, mermer, metabazit) alanın yaklaşık %20'sini oluştururken, sığ deniz karbonatları (gölsel) (%6) ve pelajik flyş geçişli kırıntılı-karbonatlar (%3) ile daha sınırlı yayılım gösterir. Ofiyolitik melanj, peridotit ve metaultrabazik kayaçlar %2'nin biraz üzerinde bir pay alırken; Üst Kretase kırıntılı-karbonat geçişli birimler ile Paleosen–Eosen karasal kırıntılılar ise sınırlı bir varlık göstermektedir. Buna göre Nilüfer Çayı havzasının jeolojik yapısı, genç karasal birikimlerin ağırlıklı olduğu; bunları orta-yaşlı denizel çökeltiler ve daha sınırlı da olsa eski metamorfik ve ofiyolitik birimlerin izlediği çok katmanlı bir görüntü sunar. Çalışma alanı Prekambriyen'den Kuvaterner'e kadar uzanan metamorfik, volkanik, ofiyolitik, plütonik ve sedimanter kayaçlardan oluşan litolojik bir çeşitlilik sergilemektedir (MTA, 2009). Tektonik ve litolojik özelliklere bağlı olarak saha, dağlar ve platolardan oluşan yüksek alanlar ile

alüvyal yelpazeler ve ovalardan oluşan alçak alanlar şeklinde iki ana morfolojik birimden oluşmaktadır (Ardel 1943; Ketin 1947). Buzul morfolojisi ve periglasyal morfoloji 1900 metrenin üzerindeki yüksekliklerde görülürken (Zahno vd., 2010), bu yüksekliğin altında akarsu aşındırması sonucu oluşan morfolojik şekiller baskındır (Çorapçı, 2022). Havzaları sahadaki yüksek sahalara uzanan akarsular, ova tabanında kaya, çakıl, kum, silt ve kil gibi karışık malzemeleri biriktirerek ve alüvyal yelpaze morfolojisini oluşturmuştur. Bu nedenle havzadaki baskın tektonik yapıyı oluşturan KAFZ alüvyon yelpazeleri ile örtülüdür (Yaltirak vd., 2005). Özellikle Uludağ Kütlesinin kuzey yamaçları ile Bursa Ovasının buluştuğu noktada bir araya gelen alüvyon yelpazeleri Doğu-Batı uzanımlı bir dağ eteği (piedmont) ovası meydana getirmektedir (Ardel, 1943). Geri kalan ovalar ise kuzeyden güneye doğru derinliği 200 metreye kadar uzanan kil, silt, kum ve çakıldan oluşan düzlüklerdir (Tolun 1948; Başarı, 2003; MTA, 2009; Çorapçı, 2022).

Çalışma alanı olarak bahsi geçen havzanın tercih edilmesinin nedeni, tektonik olarak faal ve aktif faylar ile iç içe bir bölge olmasıdır. Bununla birlikte bölgede bulunan barajların mansaplarında yoğun bir nüfusun, sanayi tesislerinin ve tarım alanlarının yer alması nedeniyle bölge hali hazırda olası baraj yetersizliklerine karşı duyarlıdır. Bölgede bulunan barajlar ovaya açılan vadilerde yer almakta ve olası bir baraj kaynaklı taşkın durumunda vadilerden ovaya akış göstererek büyük alanları sular altında bırakma potansiyeline sahiptir. Güneyde Uludağ, kuzeyde Katırlı Dağları ile çevrelenmiş olan ovanın tabanında büyük bir nüfus barındıran Bursa'nın mevcut nüfusu 3.238.618'dir (TÜİK, 2024) ve nüfusun büyük çoğunluğu bahsi geçen ovada yerleşmiştir. Türkiye'nin önde gelen tarım ve sanayi kentlerinden biri olan Bursa; tarımsal üretimde tahıl, meyve ve sebze çeşitliliği ile öne çıkarken, sanayi sektöründe ise otomotiv, tekstil ve mobilya sektörleri ile güçlü bir üretim altyapısına sahiptir (Bursa Ticaret ve Sanayi Odası, 2025; Turhan vd., 2013).



Şekil 7. Çalışma sahası lokasyon haritası

2. VERİ – YÖNTEM

2.1 Veri

Çalışmada kullanılan temel altlık verileri; Nilüfer Çayı Havzası içerisindeki baraj yapılarına ait veriler, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verisi, arazi kullanımı/örtüsü verisi, CN değerleri için GCN250 verisi, DYİ değerleri için Küresel Sismik Tehlike verisi ve TÜİK nüfus verileri oluşturmaktadır.

Bunlardan baraj yapıları ile ilgili teknik bilgi ve verilere 2014 ve 2022 yıllarına ait Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından hazırlanan Bursa İli İl Çevre Durum Raporları ve Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi (BUSKİ) ile DSİ kurumlarının ilgili birimleri aracılığıyla ulaşılmıştır. Çalışma sahamız olan Nilüfer Çayı Havzası içerisindeki 20 barajdan 14'ünün verisi elde edilebilmiştir. Bu veriler barajların toplam riskini elde etmek için kullanılmak amacı ile elde edilmiştir.

Çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan SYM verisi Harita Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Kullanılan SYM, stereo hava görüntülerinden üretilmiş olup 5 metre mekânsal çözünürlüğe sahiptir. %90 güven aralığına sahip olan bu veri ±3 metre düşey doğruluğa sahiptir (Çam vd. 2013; Kuşcu ve Ozdemir, 2025). Stereo hava görüntülerinden üretilmiş olmasından kaynaklı olarak yapı ve bitki örtüsünü detaylarını da barındıran bir yüzey modelidir (*ing. Digital Surface Model*). Literatürde 5 metre çözünürlüğe sahip SYM verileri ile gerçekleştirilen çeşitli morfometrik analiz çalışmaları bulunmakta olup araziyi daha gerçekçi olarak temsil etme kabiliyetine değinilmektedir (Giano vd., 2021; Ege ve Avsever, 2022; Kuşçu ve Özdemir, 2023; Marangoz, 2024; Kuşcu ve Ozdemir, 2025). Çalışmada da tüm morfometrik ölçümler, hesaplamalar ve görselleştirmeler bu model üzerinden gerçekleştirilmiştir. Arazi kullanımı verisi çalışmada akarsu havzalarının akışa olan etkisinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan Curve Number (CN) verisi, 250 metre mekânsal çözünürlüğe sahip olan GCN250 adlı küresel bir veri setidir (Jaafar vd., 2019). Veri setinin sağladığı CN

değerlerinin üretimi için arazi kullanımı/örtüsü verisi olarak ESA (European Space Agency) tarafından üretilen 2015 tarihli CCI-LC (Climate Change Initiative Land Cover) verisi, hidrolojik toprak grubu verisi olarak 2018 tarihli HYSOGs250m (Hydrologic Soil Groups at 250 m) verisi kullanılmıştır. Toprak nemi içeriğine göre kuru, ortalama ve ıslak koşullara göre üç farklı veri üretilmiş olup çalışmada ortalama koşullara göre üretilmiş olan veri kullanılmıştır. Çalışmada bu veri seti, hem literatürde yoğun olarak kullanılıyor olması hem de kendi alanında ikamesi olmayan çözünürlükte bir veri seti olması nedeniyle (Sañudo vd. 2020; Ekmekcioğlu vd., 2021; Ferreira vd., 2021; Cea vd., 2022; Ekmekcioğlu vd., 2022; Khan vd., 2025) tercih edilmiştir. CN verisi çalışmada akarsu havzalarının akışa olan etkisinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan arazi kullanımı/örtüsü verisi, 2023 yılına ait 10 metre mekânsal çözünürlüğe sahip Sentinel-2 uydu görüntülerinden üretilmiş olan Esri Land Cover verisidir (Karra vd., 2021). Hem güncel olarak en yüksek mekânsal temsiliyet kabiliyetine sahip olan veri setlerinden biri olması hem de literatürde yoğun olarak kullanılıyor olması veri setinin tercihinde etkili olmuştur (Himeur vd., 2022; Patopov vd., 2022; Venter vd., 2022). Arazi kullanımı/örtüsü verisi çalışmada CN değerlerinin dağılışını yorumlamak için kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında ihtiyaç duyulan bir diğer girdi veri ise DYİ verisidir. Bu bağlamda Johnson vd. (2023) tarafından sunulan küresel bir DYİ veri seti kullanılmıştır. Küresel Sismik Tehlike Haritası (Global Seismic Hazard Map) adlı bu veri seti 50 yıl içinde %10 aşılma olasılığına sahip olan DYİ değerlerinin coğrafi dağılımını, referans kaya koşulları (Vs30 = 760-800 m/s olan kayaların kayma dalgası hızı) için, yerçekimi ivmesinin bir kesri olarak göstermektedir. Bu veri seti mekânsal temsiliyet kabiliyetinin yeterli olması ve güncel çalışmalarda yoğun olarak kullanılıyor olması (Bellalem, 2024; Choi vd., 2024) nedeniyle seçilmiştir. Elde edilen DYİ verisi de barajların toplam riskinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

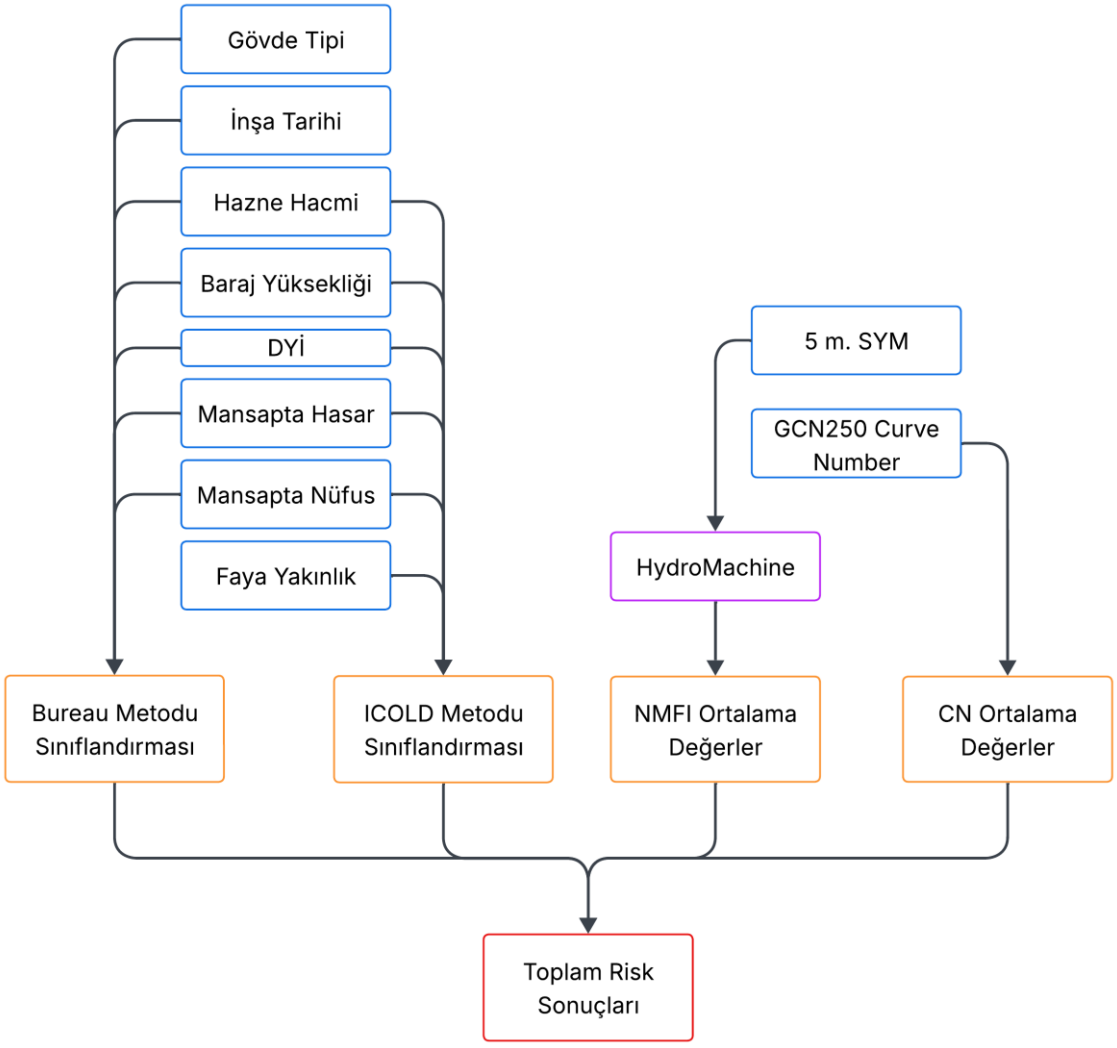
Ayrıca ek olarak toplam risk metotlarında yer alan, mansapta yaşayan insan sayısı girdisi için, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından sağlanan Coğrafi İstatistik Portalı aracılığıyla elde edilen veriler kullanılmıştır (TÜİK, 2025). TÜİK tarafından sağlanan nüfus

verileri, literatürde pek çok alanda yapılan çalışmalarda tercih edilmekte ve kullanılmaktadır (Coşkun, 2022, Erdem vd., 2023; Kamuş, 2023).

2.2. Yöntem

Çalışma kapsamında barajlar ile ilgili veriler elde edildikten sonra ICOLD ve Bureau metotlarına göre barajların toplam risk değeri hesaplanmıştır. Sonrasında analizlerin gerçekleştirilebilmesi için SYM hatalarının giderilmesi ihtiyacı doğmuştur. Verinin yüksek çözünürlüklü olmasından kaynaklanan köprü, geçit ve çeşitli akarsu yapılarının akarsu kanallarında dolgu şeklinde meydana getirdiği hatalar tespit edilerek Arc Hydro (Maidment, 2002) içerisindeki "Burn lines into Dem" aracı ile manuel olarak düzeltilmiştir. Veri analizlere uygun hale getirildikten sonra tüm morfometrik analizlerin elde edilmesi için ArcGIS yazılımlarında çalışan bir araç kutusu olan HydroMachine (Topsakal vd., 2025) araç kutusu kullanılmıştır. Temel amacı akarsu havza morfometrisi parametrelerinin hesaplanmasını otomatize etmek olan bu araç kutusu, analizlerin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan ön hazırlık süreçlerinde de kullanılmaktadır. Bu çalışmada da ilgili analizler ve ön hazırlık süreçlerinde yapılacak olan işlemler için HydroMachine araç kutusundan faydalanılmıştır. Akarsu ağı üretimi noktasında eşik değer olarak 1000 değeri belirlenmiş olup 5 metre mekânsal çözünürlüğe sahip olan SYM verisinde 25,000 metrekare alanı temsil etmektedir. Eşik değerin belirlenmesi aşamasında farklı değerler denenmiş olup 1000 değerinin topoğrafyayı temsil kabiliyetinin diğer denemelere göre görece iyi olmasından dolayı tercih edilmiştir. Nihayetinde baraj gölüne dökülen akarsu havzalarının morfometrik analizleri yapılarak NMFI ve CN değerleri tespit edilmiştir. NMFI, Özdemir ve Akbaş (2023) tarafından geliştirilen ve literatürde sıklıkla tercih edilmeye başlanan bir yöntemdir (Corapci ve Ozdemir, 2024; Ertoğral ve Çiçek, 2024; Islam ve Setiawan, 2024; Kuşcu ve Ozdemir, 2025; Topsakal vd., 2025). NMFI yöntemi, akarsu havzalarının morfometrik değerlerinin normalize edilerek taşkın duyarlılığının yorumlanmasında kolaylık sağlanması için kullanılır. Elde edilen veriler her bir havzaya ait olduğu için her bir barajın kendi değerini oluşturabilmek adına CN ve NMFI değerlerinin barajlar özelinde alan ağırlıklı ortalamaları

alınarak her bir baraj havzası için değerler elde edilmiştir. Sonuç olarak toplam risk sınıflandırma metotları sonuçları havza analizi sonuçları birlikte değerlendirilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Çalışmaya ait akış şeması.

2.2.1. Baraj Risk Sınıflandırma Metotları

ICOLD Metodu: Dünyada kullanılmakta olan çeşitli metotlar olmakla birlikte literatürde genel kabul görmüş ilk baraj toplam risk sınıflandırma metodu ICOLD metodudur (ICOLD, 1989; Ağıralioğlu, 2011). Bu metot barajın bulunduğu yerin depremselliği ile yapının taşıdığı riski ayrı ayrı ele alan bir metottur. Depremselliğin etkisini DYİ ve faya yakınlık ile (Tablo 4) ele alan metot, barajların toplam risk değerlendirmesini Tablo 5'teki parametreler ile ortaya koyar. Ele alınan baraj Tablo 5 kılavuzluğunda değerlendirilip, Tablo 6 ile risk derecelendirilmesi yapılır. Tablo 5'te yer alan puanlamaya göre toplam sayı karşılığınca gelen risk grubuna dahil edilir.

Tablo 4. ICOLD Metoduna Göre DYİ Risk Değerlendirmesi.

En Büyük Yer İvmesi (DYİ)	Risk Sınıfı	Risk Derecesi
DYİ < 0,1 g	I	Düşük
0,1 g < DYİ <0.25 g	II	Orta
0.25 g < DYİ (10 km mesafede aktif fay yoksa)	II	Yüksek
0.25 g < DYİ (10 km mesafede aktif fay varsa)	IV	Çok Yüksek

Tablo 5. ICOLD Metodu ile Toplam Risk Değerlendirmesi

Risk Faktörü	Çok Yüksek		Yüksek		Orta		Düşük	
	Değeri	Puanı	Değeri	Puanı	Değeri	Puanı	Değeri	Puanı
Rezervuar Hacmi (hm^3)	>120	6	120-1	4	1-0.1	2	<0,1	0
Yüksekliği (m)	>45	6	45-30	4	30-15	2	<15	0
Mansapta tahliye edilecek insan	>1000	12	1000-100	8	100-1	4	Yok	0
Mansapta muhtemel hasar	Yüksek	12	Orta	8	Düşük	4	Yok	0

Tablo 6. ICOLD Metoduna Göre Toplam Risk Katsayısına Bağlı Risk Sınıfları

Toplam Risk Katsayısı	Risk Sınıfı	Risk Derecelendirmesi
0-6	I	Düşük
7-18	II	Orta
19-30	III	Yüksek
31-36	IV	Çok Yüksek

Bureau Metodu: ICOLD metodundan sonra literatürde genel kabul gören bir diğer metot ise Bureau metodudur (Bureau ve Ballentine, 2002). Bureau metodu, ICOLD metodundan farklı olarak deprem ve yapı riskini ayrı ayrı ele almayıp toplam riski ele almaktadır. Eşitlik 1'de hesaplanma yöntemi verilmiş olup Tablo 4'te toplam risk katsayısının karşılığı risk sınıfları verilmiştir.

TRF = [(CRF+HRF+ARF) + DHF] * PDF (Eşitlik 1)

Eşitlikte yer alan, TRF: Toplam Risk Faktörü, CRF: Hacim Risk Katsayısı, HRK: Yükseklik Risk Katsayısı, ARF: Eskilik Risk Katsayısı, DHF: Mansap Risk Katsayısı, PDF: Öngörülen Risk Katsayısıdır.

Tablo 7. Bureau Metoduna Göre Toplam Risk Katsayısına Bağlı Risk Sınıfları

Toplam Risk Katsayısı (TRF)	Baraj Risk Sınıfı
2-25	I (Düşük)
25-125	II (Orta)
125-250	III (Yüksek)
>250	IV (Çok Yüksek)

Bureau metoduna göre Toplam Risk Katsayısının elde edilebilmesi için gerekli olan ilk parametreler Hacim Risk Katsayısı ve Yükseklik Risk Katsayısıdır. Bu parametreler yapı etkisini ele alan 3 parametrenin 2'sini temsil etmektedir. Barajın depolama hacmi ve duvar yüksekliğine bağlı olarak elde edilirler (Tablo 8). Yapı etkisini ele alan üçüncü parametre ise Eskilik Risk Katsayısıdır. Bu parametre ile de barajın yapım tarihine göre katsılar elde edilir (Tablo 9).

Tablo 8. Bureau metoduna göre baraj yapı risk katsayıları.

Risk Katsayısı	Toplam Risk Sayısına Katkı Değeri							
	Çok Yüksek		Yüksek		Orta		Düşük	
Değer ve puanı	Değer	Puan	Değer	Puan	Değer	Puan	Değer	Puan
Hacim (hm^3)	>62	6	62-1,15	4	1,15-0.125	2	<0,125	0
Yükseklik (m)	>25	6	25-12	4	12-6	2	<6	1

Tablo 9. Bureau Metoduna Göre Baraj Eskilik Katsayıları.

Risk Katsayısı	Barajın yapılış tarihi					
	<1900	1900-1925	1925-1950	1950-1975	1975-2000	>2000
Eskilik Risk Katsayısı	6	5	4	3	2	1

Bureau metodunda mansap riskini ele alan parametre Mansap Tehlike Katsayısı ile temsil edilir. Elde edilebilmesi için iki alt bileşeni vardır (Eşitlik 2). Bu bileşenler mansapta tahliye edilmesi gereken insan sayısı ve mansapta meydana gelebilecek muhtemel hasarın boyutudur. Bureau (2003) tarafından ekonmik çalışmalar ve taşkın yayılım haritaları ile bu katsayıların belirlenmesinin tutarlılığı arttıracağını belirtilmiştir. Alt parametrelerin değerlerinin elde edilebilmesi için gerekli bilgiler Tablo 10'de verilmiştir. Bu noktada hesaplamanın yapılabilmesi için nüfus bilgisi TÜİK'ten elde edilirken mansapta meydana gelebilecek muhtemel hasarın boyutunun tespiti uydu görüntüleri kullanılarak uzman görüşüne bağlı şekilde belirlenmiştir. Metotta yer alan bu yaklaşım metodun yarı kantitatif olmasına yol açan unsurdur.

DHF= ERF+DRI (Eşitlik 2)

Eşitlikte yer alan ERF: Mansaptaki insan sayısı, DRI: Mansaptaki muhtemel hasardır.

Tablo 10. Bureau metoduna göre Mansap Risk Katsayıları.

	Toplam Risk Sayısına Katkı Değeri							
Risk Katsayısı	**Çok Yüksek**		**Yüksek**		**Orta**		**Düşük**	
	Değer	**Puan**	**Değer**	**Puan**	**Değer**	**Puan**	**Değer**	**Puan**
Tahliye edilecek insan sayısı	>1000	12	1000-100	8	100-1	4	Yok	1
Mansapta muhtemel hasar	Yüksek	12	Orta	8	Düşük	4	Yok	1

Bureau metodunda son olarak ele alınan parametre Öngörülen Risk Katsayısıdır. Bu parametre depremselliği denkleme dahil eden parametredir. Birkaç alt bileşenden meydana gelir. Öngörülen Risk Katsayısının elde edilmesi için öncelikle Öngörülen Hasar İndeksinin elde edilmesi gerekir. Öngörülen Hasar İndeksi elde edildikten sonra Denklem 3'teki şekilde Öngörülen Risk Katsayısına dönüştürülür.

$$PDF = 2{,}5 * PDI \quad \text{(Eşitlik 3)}$$

Eşitlikteki PDF: Öngörülen Risk Katsayısı ve PDI: Öngörülen Hasar İndeksi'dir. Öngörülen Hasar İndeksi ise 5 farklı baraj tipi için farklı eşitlikler ile elde edilir. Bu farklılık her bir baraj tipinin deprem sarsıntılarına verdiği yanıta göre tasarlanmıştır. Tablo 8'de farklı baraj tiplerine göre Öngörülen Hasar İndeksinin hesaplanma yöntemleri verilmiştir. PDI denklemlerinde görülen ESI değeri Deprem Şiddeti İndeksidir. Bu indeks Eşitlik 4'te verilen şekilde elde edilir. M değeri ise Richter ölçeği cinsinden deprem büyüklüğüdür. Bu noktada çalışma için gerekli olan M değeri, Seyitoğlu vd. (2024) çalışmasında ortaya konulan ve çalışma alanımızı da kapsayan bir alanda yer alan fay hatlarının üretmesi muhtemel görülen deprem büyüklüğü değeri (7.0) olarak alınmıştır.

$$ESI = PGA * (M-4{,}5)^3 \quad \text{(Eşitlik 4)}$$

Eşitlikte ESI: Deprem Şiddeti İndeksi, PGA: Doruk Yer İvmesi, M: Richter büyüklüğüdür.

Tablo 11. Farklı baraj tiplerine göre ÖHİ formülleri.

Baraj Türü	PDI Formülü
Ağırlık baraj	1.0712 × ESI^ (0.1302)
Kemer baraj	0.1162 × ln (ESI) + 1.6979
Toprak dolgu baraj	0.1772 × ln (ESI) + 1.9763
Kaya dolgu baraj	0.1994 × ln (ESI) - 1.3249
Hidrolik dolgu ve atık baraj	2.7688 × ESI^ (0.1559)

Bu iki metoda ek olarak pek çok ülkenin kendi risk sınıflandırma metotları mevcuttur (Ağıralioğlu, 2011). Türkiye'de ise DSİ tarafından ortaya koyulmuş olan metot diğer metotlardan farklı olarak hidrolojik verilerin güncelliği ve dolu savak tipi parametrelerine sahiptir. Efe (2022) tarafından aktarılan bilgiye göre DSİ tarafından geliştirilen bu metot ile Türkiye barajlarının incelenmesi yapılmış ve mevcut barajların %85'inin yüksek ve en yüksek risk grubunda yer aldığı tespit edilmiştir. Ancak bahsi geçen çalışmaya ve sonuçlara ulaşılamamakla birlikte DSİ metodu hakkındaki bilgiler literatürde oldukça sınırlıdır.

2.2.2. Morfometrik Parametrelerin Hesaplanması

Çalışma alanında yer alan barajların göllerine akış gösteren tüm akarsu havzalarının elde edilmesi, havzaların morfometrik parametrelerinin hesaplanması ve CN değerlerinin belirlenmesi için gerekli olmuştur. Bu amaçla öncelikle D8 (Greenlee, 1987; Jenson ve Domingue, 1988) akış algoritması kullanılarak çalışma alanı için bir akarsu ağı modeli üretilmiştir. Bu modelin elde edilebilmesi için HydroMachine (Topsakal vd., 2025) araç kutusu içerisinde yer alan Flow D8 ve Stream Network Generation araçları kullanılmıştır. Flow D8 aracı girdi SYM verisine düzeltme (Fill) (Tarboton vd., 1991; Planchon ve Darboux, 2002) işlemi uygulayarak D8 metoduna göre Akış Yönleri (Flow Direction) ve Akış Toplanma (Flow Accumulation) verilerini üretmiştir. Stream Network Generation aracı ise

Flow D8 aracının çıktılarını alarak belirlediğimiz eşik değere göre akarsu ağını, Strahler dizinleme metodu (Strahler, 1952; Tarboton vd., 1991) ile düzenlenmiş olarak üretmiştir. Akarsu ağında eşik değer olarak 300 değeri ile 1000 değeri arasında denemeler yapılmış olup 1000 değerinin araziyi temsiliyet kabiliyetinin yeterli olduğuna karar verilmiş ve akarsu ağı bu değere göre üretilmiştir.

Akarsu ağı elde edildikten sonra baraj göllerine dökülen akarsu havzalarını belirlemek için HydroMachine araç kutusu içerisinde yer alan Watershed Generation aracı kullanılarak baraj göllerine dökülen akarsu havzaları oluşturulmuş ve veri üzerinde gözlem yapılarak doğruluğu kontrol edilmiştir. Bu noktada her bir baraj gölüne dökülen akarsu havzaları membasındaki barajın havzalarını kapsamayacak şekilde üretilmiştir. Morfometrik olarak pik akım yorumlanmaya çalışıldığı ve bir barajın doğal olarak pik akımı sönümlendireceği göz önüne alındığında, bir barajın membaında bulunan diğer barajların havzaları, mansap barajlarına morfometrik olarak dahil edilmemiştir. Watershed Generation aracı ile toplamda 216 adet akarsu havzası elde edilmiştir. Ardından morfometrik parametrelerin hesaplanmasındaki temel girdilerden olan Strahler yöntemine göre dizinlenmiş, vektör formattaki akarsu ağının üretilmesi için HydroMachine içerisinde yer alan Strahler Merge aracı kullanılmıştır. Bu araç ile Strahler dizinleme metoduna göre dizinlenmiş ve segmentasyon hatası giderilmiş vektör formattaki akarsu ağı verisi elde edilmiştir.

Morfometrik parametrelerin hesaplanması için HydroMachine içerisinde yer alan HydroMorpho ve Time of Concentration araçları kullanılarak Tablo 12'de verilmiş olan parametreler hesaplanmıştır. HydroMorpho aracına akarsu havzaları, akarsu ağı ve SYM verisi girdi olarak verilmiş sonuç olarak 10 farklı morfometrik parametre her bir havza için elde edilmiştir. Akım Toplanma Süresi parametresinin hesaplanması için yine HydroMachine içerinde yer alan Strahler Merge (LS), Longest Stream ve Time of Concentration araçları sırası ile kullanılmış ve tüm akarsu havzaları için Kirphic formülü ile Akım Toplanma Süresi hesaplanmıştır. Böylelikle tüm havzaları için toplamda 11 farklı morfometrik parametre elde edilmiştir. Elde edilen morfometrik parametreler incelendiğinde literatürde Çizgisel, Alansal ve Rölyef morfometri şeklinde 3 alt başlıkta ele alındığı görülmektedir.

2.2.2.1. Çizgisel Morfometri

Akarsu havzalarını ve akarsu ağını temsil eden ve tek boyutlu olarak vektör formatta temsil edilen veriler kullanılarak hesaplanabilen parametrelerdir. Bahsi geçen verilerin uzunluğu ve sayısına dayalı olarak çeşitli hesaplamalar yaparak elde edilirler. Çalışmada kullanılan çizgisel morfometrik parametreler şunlardır:

Çatallanma Oranı (Rb): Strahler akarsu dizinleme metodu kullanılarak hesaplanan bir morfometrik parametredir (Horton, 1932; Strahler, 1957; Pike vd., 2009). Strahler akarsu dizinleme metodu basitçe aynı dizin numarasına sahip akarsu kollarının birleşerek bir üst dizine yükselmesi prensibine dayalı olarak akarsu ağlarını sınıflandırır (Strahler, 1957). Çatallanma oranı her bir dizine ait akarsu kolların toplam sayısının bir üst dizinin kol sayısının toplamına olan oranlarının ortalaması olarak elde edilir (Tablo 12). Elde edilen sonuçları yorumlamak adına genel bir referans değer bulunmamaktadır. Uygulama yapılan sahadaki minimum ve maksimum üzerinden nispi olarak yorumlanabilir. Genel olarak düşük Rb değerine sahip havzaların akım hidrografları nispeten keskin olurken yüksek Rb değerine sahip olan havzalarda hidrograflar daha yayvan olarak görülmektedir (Özdemir, 2011).

Tablo 12. Genel morfometrik parametrelerin hesaplanması.

Morfometrik Parametreler		**Formüller**
Çizgisel	Çatallanma Oranı (Rb)	$R_b = N_u / N_{u+1}$
	Uzunluk Oranı (Rl)	$R_l = L_U / L_{u+1}$
	Tekstür Oranı (T)	$T = N_{u1} * (1/P)$
Alansal	Drenaj Yoğunluğu (Dd)	$\mathrm{D_d} = \sum \mathrm{L/A}$
	Akarsu Sıklığı (Fs)	$\mathrm{F_s} = \mathrm{N/A}$
	Yüzeysel Akış Uzunluğu (Lo)	$L_o = 1/(2 * D_d)$
	Gravelius İndeks (Kc)	$K_c = P/2 * \sqrt{(\pi * A)}$
Rölyef	Havza Rölyefi (Bh)	$B_h = H_{max}/H_{min}$
	Engebelilik Değeri (Rn)	$R_n = B_h * D_d$
	Akım Toplanma Süresi (Tc)	$T_c = 0.0195 * L^{0.77}/S^{0.385}$
	Hipsometrik İntegral (Hi)	$H_i = \frac{H_{mean} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}$

N: Toplam akarsu kolu sayısı, Nu (1,2, 3...): Dizin numarasına göre toplam akarsu kolu sayısı, ∑L: Toplam akarsu kolu uzunluğu, Lu (1,2, 3...): Dizin numarasına göre toplam akarsu kolu uzunluğu, P: Havza çevre uzunluğu (km), A: Havza alanı (km^2), L: En uzun akarsu kolu (m) H_{mean}: Ortalama havza yükseltisi, H_{min}: Minimum havza yükseltisi, H_{max}: Maksimum havza yükseltisi, S: En uzun akarsu kolunun eğimi (m/m)

Uzunluk Oranı (Rl): Strahler dizinleme metodu temelinde hesaplanan bu parametre akarsu kollarının uzunluğuna dayalı olarak havzanın infiltrasyon kapasitesi ve yüzeysel akışı hakkında birtakım bilgiler verir. Her bir Strahler dizininin toplam akarsu kolu uzunluğunun, kendinden bir büyük dizin grubunun toplam akarsu kolu uzunluğuna oranı şeklinde hesaplanır (Patton, 1988). Tüm oranlamaların ortalaması ise üzerine çalışılan akarsu havzasının Rl değerini verir. Yüksek Rl değerleri keskin hidrografları ve akarsu havzalarının pik akım kabiliyetinin yüksek olduğunu vurgular (Özdemir, 2011).

Tekstür Oranı (T): Strahler dizinleme metoduna dayalı olarak hesaplanabilen bu parametre birinci dizin grubundaki tüm akarsu kollarının sayısının, akarsu havzasının çevre uzunluğuna oranı olarak tanımlanabilir (Horton, 1945). Tekstür oranı akarsu havzalarının jeolojisine, infiltrasyon kapasitesine ve bakı durumuna göre değişkenlik göstermektedir (Rekha vd., 2011). Nispi olarak yorumlanabilen T değeri yükseldikçe, ana akarsu koluna su taşıyan birinci dizin akarsu kollarının artış gösterdiği ve akarsu havzalarının pik akım kabiliyetinin yüksek olduğu düşünülebilir (Özdemir, 2011).

2.2.2.2. Alansal Morfometri

Akarsu havzalarını ve akarsu ağını temsil eden vektör formattaki veriye bir boyut daha kazandırarak akarsu havzalarının alan verilerinin de kullanılarak hesaplanıldığı morfometrik parametreleri içeren gruptur. Çalışmada kullanılan alansal morfometrik parametreler şunlardır:

Drenaj Yoğunluğu (Dd): Drenaj yoğunluğu, bir havzanın hidrolojik ve jeomorfolojik özelliklerini anlamada kritik öneme sahip temel morfometrik parametrelerden biridir (Horton, 1945). Bu parametre, havza içerisindeki toplam akarsu uzunluğunun havza alanına oranı olarak tanımlanır ve km/km^2 birimi ile ifade edilir (Strahler, 1957). Drenaj yoğunluğu,

havzanın jeolojik yapısı, toprak özellikleri, bitki örtüsü ve iklim koşulları gibi çevresel faktörlerden önemli ölçüde etkilenir (Schumm, 1956). Yüksek drenaj yoğunluğu değerleri, genellikle geçirimsiz yüzey materyali, seyrek bitki örtüsü ve dik yamaçların varlığına işaret ederken, düşük değerler geçirimli yüzey materyali ve düşük eğimli arazilerin göstergesidir (Schumm, 1956; Chorley vd., 1984). Drenaj yoğunluğu, havzanın su toplama kapasitesi ve taşkın potansiyeli hakkında önemli bilgiler sunar. Yüksek drenaj yoğunluğuna sahip havzalar, yağış sularını hızla ana kanala iletme eğilimindedir ve bu nedenle taşkın riski açısından daha hassastır (Gregory ve Walling, 1973).

Akarsu Sıklığı (Fs): Akarsu Sıklığı, bir havzadaki toplam akarsu kolu sayısının havza alanına oranını ifade eden morfometrik parametredir (Horton, 1932). Bu parametre, havzanın drenaj yoğunluğunu ve su toplama kapasitesini anlamak için kullanılan temel göstergelerden biridir (Strahler ve Chow, 1964). Melton (1957), akarsu sıklığının havzanın jeolojik, yapısal ve iklimsel özelliklerini yansıttığını belirtmiştir. Yüksek akarsu sıklığı değerleri, genellikle geçirimsiz yüzey materyali, seyrek bitki örtüsü ve yüksek rölyef koşullarının varlığına işaret eder (Verstappen, 1983). Bu durum, yüzeysel akışın yeraltına sızma oranının düşük olduğunu ve havzanın yüksek taşkın potansiyeline sahip olabileceğini gösterir. Schumm (1956), akarsu sıklığının havza gelişiminin farklı aşamalarını karakterize etmede önemli bir rol oynadığını vurgulamıştır. Düşük akarsu sıklığı değerleri ise genellikle yüksek infiltrasyon kapasitesi ve düşük yüzeysel akış potansiyeli ile ilişkilendirilir (Singh, 1992).

Yüzeysel Akış Uzunluğu (Lo): Yüzeysel akış uzunluğu, bir havzanın hidrolojik ve morfometrik özelliklerini anlamlandırmada kullanılan bir parametredir. Bu değer, yüzey akışının yamaç boyunca ana akarsuya ulaşıncaya kadar kat ettiği ortalama mesafeyi ifade eder (Horton, 1945). Lo değeri, havzadaki su toplama süreçlerini ve erozyon potansiyelini değerlendirmede kritik bir rol oynar. Yüksek Lo değerleri, suyun ana kanala ulaşması için daha uzun mesafe kat etmesi gerektiğini gösterir, bu da daha uzun konsantrasyon süresine ve daha düşük pik debi değerlerine yol açar (Strahler ve Chow, 1964). Düşük Lo değerleri ise tam tersine, yüzey akışının hızlı bir şekilde ana kanala ulaştığını ve taşkın riskinin daha yüksek olabileceğini işaret eder.

Gravelius İndeks (Kc): Gravelius (1914) İndeksi, bir havzanın şekilsel özelliklerini nicel olarak ifade eden morfometrik parametredir (Horton, 1932). Bu indeks, havza çevresinin aynı alana sahip bir dairenin çevresine oranı olarak tanımlanır (Schumm, 1956; Miller, 1953). Gravelius İndeks, havzanın dairesellikten sapma derecesini göstererek 1'den büyük değerler alır. İndeks değeri 1'e yaklaştıkça havza şekli daireye yaklaşır, değer büyüdükçe havza şekli uzamaya başlar (Gregory ve Walling, 1973; Özdemir, 2011). Bu özellik, havzanın hidrolojik tepkisini anlamak açısından önemlidir çünkü dairesel havzalar, uzunlamasına havzalara göre daha kısa konsantrasyon süresine ve daha yüksek pik debi potansiyeline sahiptir (Chorley et al., 1984).

2.2.2.3. Rölyef Morfometrisi

Çizgisel ve alansal morfometride kullanılan verilere ek olarak yükselti değerlerinin de kullanıldığı bu grup, 3 boyutlu olarak akarsu havzalarını ele alarak çeşitli parametreler üzerinden yorumlamalar sağlar. Çalışmada kullanılan rölyef morfometrik parametreler şunlardır:

Havza Rölyefi (Bh): Havza rölyefi, bir havzanın en yüksek ve en düşük noktaları arasındaki yükselti farkını ifade eden morfometrik parametredir (Strahler, 1952). Bu parametre, havzanın topografik karakterini, erozyon potansiyelini ve sediman taşıma kapasitesini anlamada rol oynar (Schumm, 1956; Pike ve Wilson, 1971). Yüksek havza rölyef değerleri, genellikle daha dik yamaçların varlığını, daha fazla erozyon potansiyelini ve daha yüksek akış hızlarını işaret eder (Chorley vd., 1984). Bu parametre, diğer morfometrik indekslerle birlikte değerlendirildiğinde, havzanın hidrojeomorfolojik özelliklerini daha iyi anlamamıza olanak sağlar. Örneğin, rölyef oranı (Rh) ve rölyef faktörü (Rf) gibi türetilmiş parametreler, havza rölyefi değeri kullanılarak hesaplanır ve havzanın morfodinamik özelliklerini daha detaylı analiz etmemize yardımcı olur (Melton, 1957). Havza rölyefi, günümüzde SYM'ler kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Modern teknolojiler, bu parametrenin daha hassas ve doğru bir şekilde belirlenmesine olanak tanımakta ve havza yönetimi çalışmalarında etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır (Moore vd., 1991).

Engebelilik Değeri (Rn): Bu parametre, havzanın rölyefi ile drenaj yoğunluğunun çarpımı sonucu elde edilmektedir (Patton ve Baker, 1976). Havza rölyefi ve drenaj yoğunluğu arasındaki bu ilişki, havzanın topografik karakterini ve erozyon potansiyelini yansıtmaktadır (Horton, 1945). Yüksek Rn değerleri, genellikle dik yamaçların ve derin vadilerin varlığını işaret ederken, düşük değerler daha yumuşak bir topografyayı gösterir (Schumm, 1956). Bu parametre, özellikle havzadaki sediman taşınımı, erozyon süreçleri ve taşkın potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır (Melton, 1957). Tektonik aktivitenin yoğun olduğu bölgelerde genellikle yüksek Rn değerleri gözlemlenirken, olgun topoğrafyaya sahip havzalarda daha düşük değerler elde edilmektedir (Pike ve Wilson, 1971).

Akım Toplanma Zamanı (Tc): Akım Toplanma Zamanı, hidroloji biliminde bir havzanın yağışa verdiği tepkinin süresini ifade eden temel bir parametredir. Daha spesifik olarak, Tc, havzanın en uzak noktasından çıkış noktasına suyun ulaşması için geçen süreyi tanımlar (Strahler ve Chow, 1964). Akım Toplanma Zamanının hesaplanması, havzanın morfolojik özelliklerine dayalı empirik formüllerle gerçekleştirilir. Bu bağlamda en yaygın kullanılan yöntemlerden biri, Kirpich (1940) tarafından geliştirilen ve özellikle küçük ve orta ölçekli havzalarda etkin bir şekilde uygulanan Kirpich Formülü'dür. Bu formül, Tennessee'deki küçük tarımsal havzalar üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda ortaya konmuş (Kirpich, 1940) ve o zamandan beri hidroloji uygulamalarında standart bir araç haline gelmiştir. Daha sonra, Strahler ve Chow (1964) *Handbook of Applied Hydrology* adlı kapsamlı eserinde Tc'nin önemini vurgulamış ve farklı hesaplama yöntemlerini bir araya getirerek bu parametrenin hidroloji bilimindeki yerini pekiştirmiştir. Singh (1992) ise *Elementary Hydrology* kitabında, Tc'nin havza karakteristiklerine bağlı değişkenliğini ve hidrolojik modellemedeki rolünü ayrıntılı bir şekilde incelemiştir. Bununla birlikte, Tc'nin hesaplanmasında kullanılan tek yöntem bu değildir; Snyder, SCS ve Giandotti gibi alternatif formüller de havzanın büyüklüğü, eğimi ve bitki örtüsü gibi özelliklerine göre farklı yaklaşımlar sunar (Singh, 1992). Kısa bir Tc'ye sahip havzalarda, yağış hızla yüzey akışına dönüşür ve çıkış noktasında ani, yüksek pik debileri oluşur; bu durum, taşkın riskinin arttığını gösterir (Strahler ve Chow, 1964). Buna karşılık, uzun Tc'ye sahip havzalarda akış daha yavaş birikir, pik debi genellikle daha düşük olur, ancak taşkın süresi uzayabilir.

Hipsometrik İntegral (Hi): Hipsometrik İntegral, bir havzanın topografik özelliklerini, jeomorfolojik olgunluğunu, jeomorfolojik evrimini ve erozyon dinamiklerini değerlendirmek için kullanılan parametredir (Özdemir, 2011; Elbaşı, 2015). Bu parametre, havzanın yükseklik dağılımını analiz ederek, erozyon süreçlerini, tektonik aktiviteleri ve hidrolojik tepkileri sayısallaştırır. Hipsometrik İntegral, bir havzanın hipsometrik eğrisinin altında kalan alanın, havzanın maksimum ve minimum yükseklikleri ile tanımlanan toplam dikdörtgen alanına oranını ifade eder. Bu yöntem, havzanın ortalama yüksekliğinin, minimum ve maksimum yükseklikler arasındaki rölatif konumunu ölçer. Hi değeri 0 ile 1 arasında bir skalada yer alır. Yüksek Hi değerleri (Hi > 0.6), havzanın genç olduğunu ve tektonik aktivitelerin baskın olduğunu gösterir. Bu tür havzalarda, akarsular derin vadiler oluşturarak hızlı erozyon süreçlerini tetikler. Buna karşılık, düşük Hi değerleri (Hi < 0.3), havzanın olgunlaştığını ve erozyonun ileri aşamalarda olduğunu işaret eder; bu durumda topoğrafya daha düz ve vadiler geniş tabanlı bir hal alır (Strahler, 1952). Hidrolojik açıdan, Hi havzanın su toplama ve akış dinamiklerini doğrudan etkiler. Yüksek Hi'ye sahip havzalarda, eğimin fazla olması nedeniyle suyun akış hızı artar ve bu durum pik akım riskini yükseltir. Düşük Hi'li havzalarda ise akış daha yavaş ve yayılmış bir şekilde gerçekleşir, bu da akımların şiddetini azaltabilir (Singh, 1992).

Elde edilen morfometrik parametrelerin birlikte değerlendirilerek havzaların pik akım kabiliyetini yorumlamada faydalı olması açısından 11 morfometrik parametre HydroMachine içinde yer alan NMFI aracı ile normalize edilerek değerlerde sadeleştirme yapılmıştır. NMFI yöntemi (Ozdemir ve Akbas, 2023) ile havza morfometrik parametreleri Eşitlik 5 ve 6 kullanılarak normalize edilmekte ve her bir havza için tüm morfometrik parametrelerin normalizasyon değerinin ortalaması alınmaktadır. Eşitlik 5 (Standart normalizasyon) yükselen değerlerin pik akımda maksimum etkiye sahip olduğu parametreler için kullanılırken, Eşitlik 6 (Ters normalizasyon) azalan değerlerin pik akımda maksimum etkiye sahip olduğu morfometrik parametreler için kullanılır. Bu noktada pik akım kabiliyeti elde edilmek amaçlandığı için Lo, Kc, Rl, Rb ve Tc değerleri ters normalize, geri kalan parametreler standart şekilde normalize edilmiştir.

$$NMFI = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{m_i - m_{i_{min}}}{m_{i_{max}} - m_{i_{min}}}\right) \quad \text{(Eşitlik 5)}$$

$$NMFI = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{m_i - m_{i_{max}}}{m_{i_{min}} - m_{i_{max}}}\right) \quad \text{(Eşitlik 6)}$$

NMFI yöntemi ile her bir barajın havzaları için pik akım kabiliyetini 0 ile 1 değeri arasında yorumlayan değerler elde edilmiştir. Ancak her bir barajın birden fazla havzası olduğu için barajlara ait pek çok NMFI değeri ortaya çıkmıştır. Bu durumu aşabilmek adına bir yöntem geliştirilmiştir (Eşitlik 7). Bu yöntem bir barajın NMFI değerlerinin ağırlıklı ortalamasını hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir. Hesaplama, her bir baraj havzasına ait NMFI değerlerinin, ilgili baraj havzalarının toplam alan büyüklüğü ile ağırlıklandırılması prensibine dayanır. Bu hesaplama yöntemi, her bir havzanın toplam havza alanı içindeki önemini dikkate alarak ortalamayı belirler. Alan değeri büyük olan havzanın NMFI değerleri hesaplamaya daha fazla etki ederken, küçük alanlı havzaların NMFI değerleri daha az etkiye sahiptir. Böylece, tüm barajlar için NMFI değerleri tek bir değer hâline getirilmiş olur. Bu yöntem ile baraj ölçeğinde NMFI değişkeninin daha güvenilir bir şekilde yorumlanmasına imkân tanınmıştır.

$$NMFI_{Baraj} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(NMFI_i * Alan_i)}{\sum_{i=1}^{n} Alan_i} \quad \text{(Eşitlik 7)}$$

2.2.3. Curve Number Değerlerinin Elde Edilmesi

Baraj havzalarının arazi kullanımı/örtüsü ve toprak tiplerine bağlı olarak yağışı akışa dönüştürme potansiyellerini ve pik akım oluşturabilme kabiliyetlerini yorumlayabilmek adına CN metodu tercih edilmiştir. Baraj havzalarının CN değerlerini elde edebilmek için GCN250 (Jaafar vd., 2019) adlı küresel olarak raster formatta sunulan CN veri seti kullanılmıştır. Her bir baraj adına CN değerlerinin belirlenebilmesi için baraj göllerine dökülen havzalar kullanılarak raster formattaki CN veri setinden ArcGIS Pro programında

yer alan “Add Surface Information” aracı kullanılmış ve bu araç ile her bir baraj için ortalama CN değerleri elde edilmiştir.

2.3. Sınırlılıklar

Çalışmadaki en büyük sınırlayıcı unsur toplam risk parametrelerinin subjektif olmasıdır. Birtakım girdiler uzman görüşüne bağlı olarak şekillenmektedir. Baraj yüksekliğinin temelden veya talvegden mi hesaplanacağı gibi sebeplerden ötürü tam anlamıyla kantitatif bir metodolojinin uygulanmasını olanaksız kılmaktadır. Ayrıca mansapta yaşayan insan sayısı belirlenirken esas alınması gereken temel koşullar belirtilmemiştir. Sadece Bureau metodunda taşkın yayılım analizleri ile mansapta yaşayan insan sayısının tespit edilmesinin doğruluğu arttıracağı şeklinde bir öneri mevcuttur. Mansapta ön görülen hasar parametresi de belirlenirken uzman görüşüne bağımlı kalınmaktadır. Bu da metotları kantitatif olmaktan uzaklaştırmaktadır. Bunlara ek olarak barajlar ile ilgili teknik verilerin temini tamamen sağlanamamıştır. İlgili kurumlardan yapılan talepler neticesinde çalışma sahamızdaki 14 barajın verisi elde edilebilmiştir.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Nilüfer Çayı Havzasındaki Barajların Mevcut Risk Özellikleri

Verisi temin edilebilen barajların yapı, mansap ve depremsellik bilgisi Tablo 13'te verilmiştir. ICOLD metodunun uygulanması için gerekli olan baraj yerinin 10 km mesafesinde aktif fay olup olmama durumunun tabloda belirtilmemiş olma nedeni tüm barajların 10 km mesafesinde aktif fay hattı bulunmasıdır.

Tablo 13. Çalışma alanındaki barajların yapı, mansap ve depremsellik özellikleri

Barajlar	Göl hacmi (hm^3)	Yükseklik (m)	İnşa tarihi	Mansapta insan	Mansapta hasar	DYİ	Gövde Tipi
Ağlaşan Kayacık	3.07	40	2016	726	Düşük	0.35	Kaya Dolgu
Baraklı	0.20	15	1977	264	Düşük	0.27	Toprak Dolgu
Çalı	3	44	2001	18,023	Yüksek	0.4	Toprak Dolgu
Çınarlı	1.7	18.5	1985	642	Düşük	0.36	Toprak Dolgu
Dağdibi	1.4	50	2011	823	Yüksek	0.31	Toprak Dolgu
Dağyenice	2	26	1981	1,181	Orta	0.4	Toprak Dolgu
Dedeköy	2.34	18	1982	809	Düşük	0.37	Toprak Dolgu
Demirtaş	14.457	43	1983	109,149	Yüksek	0.35	Kaya Dolgu
Doğancı	43.3	65	1983	122,204	Yüksek	0.41	Toprak Dolgu
Dürdane	0.22	21	2013	4,427	Orta	0.42	Toprak Dolgu
Gölbaşı	14.28	11	1938	1,746	Orta	0.32	Toprak Dolgu
Hasanağa	3.71	37	1985	4,185	Yüksek	0.44	Toprak Dolgu
Kayapa	4.22	37	1998	7,053	Orta	0.41	Toprak Dolgu
Nilüfer	39.5	74.5	2007	566	Düşük	0.31	Kaya Dolgu

Elde edilen verilere bakıldığında baraj gölü hacimleri 0.20 hm^3 ile 43.3 hm^3 arasında değişmektedir. Depolama kapasitesi en düşük olan baraj 0.20 hm^3 ile Baraklı Barajı olurken, depolama kapasitesi en yüksek olan baraj 43.3 hm^3 ile Doğancı Barajı'dır. Doğancı Barajı'nı takiben 39.5 hm^3 ile Nilüfer Barajı, 14.4 hm^3 ile Demirtaş Barajı ve 14.2 hm^3 ile Gölbaşı Barajı hacim sıralamasını oluşturmaktadır. ICOLD metoduna göre barajların rezervuar hacimleri değerlendirildiğinde Baraklı ve Dürdane barajları orta risk grubunda yer alarak 2 değerine, geriye kalan 12 baraj ise yüksek risk grubunda yer alarak 4 değerine sahip olmuştur. Çalışma sahasında 120 hm^3 ve üzerinde depolama kapasitesine sahip olan bir baraj bulunmaması bu alandaki değerlerin 4 ve altında kalmasına neden olmuştur. Bureau metoduna göre ise çalışma sahasındaki barajların rezervuar hacimleri değerlendirildiğinde tüm barajlar yüksek risk grubunda yer almakta olup hacim risk katsayıları 4 olarak belirlenmiştir. Bunun nedeni Bureau metoduna göre 62 hm^3 ile 1.15 hm^3 arasındaki depolama hacimlerinin katsayısının 4 olmasıdır. Çalışma sahasındaki tüm barajların depolama hacimleri de bu aralıkta yer almaktadır.

Baraj duvarı yükseklikleri ise 11 metre ile 74,5 metre arasında değişmektedir. Baraj duvarı yüksekliği en düşük olan baraj 11 metre ile Gölbaşı Barajı olurken, 74,5 metrelik baraj duvarı yüksekliği ile Nilüfer Barajı çalışma alanındaki en yüksek duvar yapısına sahip baraj olarak tespit edilmiştir. Nilüfer Barajını takiben 65 metrelik duvar yüksekliği ile Doğancı Barajı gelmektedir. Bu noktada duvar yükseklikleri talvegden yükseklik şeklinde ele alınmıştır. ICOLD metoduna göre barajların duvar yüksekliği değerlendirildiğinde Gölbaşı Barajı 11 metrelik duvar yüksekliği ile düşük risk grubunda yer alarak 0 değerini alırken beş adet baraj 2, beş adet baraj 4 ve üç adet baraj 6 değerini almıştır. Bureau metoduna göre ise 11 metrelik duvar yüksekliği ile Gölbaşı Barajı orta risk grubunda yer alarak 2 değerini alırken dört adet baraj 4 değerini, dokuz adet baraj 6 değerini almıştır. Elde edilen verilere göre iki değerlendirme metoduna göre de her bir yükseklik risk sınıfına dahil olan baraj çalışma sahasında mevcuttur. Baraj duvarı yüksekliğini değerlendirirken Bureau metodunun daha alçak duvarlar üzerine odaklandığını ICOLD metodunun ise daha geniş aralıklar kullanarak yüksek duvarlar üzerine odaklandığını söylemek mümkünüdür.

İnşa tarihlerine bakıldığında ise çalışma sahasındaki barajlar arasında en yaşlı olanı 1938 yılında inşa edilmiş olan Gölbaşı Barajı'dır. Gölbaşı Barajı Cumhuriyet döneminin 2. barajı olarak da tarihi bir öneme sahiptir (Bildirici, 2009). Çalışma alanındaki en genç baraj ise 2016 yılında yapımı tamamlanan Ağlaşan Kayacık Barajı'dır. Bureau metoduna göre eskilik risk katsayısında ise alandaki en yaşlı baraj olan Gölbaşı Barajı 4 değerini alırken geri kalan barajlardan 1975 yılı ve sonrasına ait olan sekiz adet baraj 2, 2000 yılı ve sonrasına ait olan beş adet baraj 1 değerini almıştır. Değerlendirmede baraj inşaatlarının tamamlanarak kullanıma açıldığı yıllar ele alınmıştır. ICOLD metodu baraj yaşları ile ilgili bir değerlendirme sunmadığı için bu noktada yalnızca Bureau metoduna göre değerlendirme yapılmıştır. Ek olarak Bureau metoduna göre baraj yaşlarının değerlendirilmesi 1900 öncesi ile 2000 sonrası ve bu yüz yıllık aralığın 25'er yıllık dilimlemesi şeklinde değerlendirilmesi şeklinde ele alınmaktadır. Temelde eski barajların yeni barajlara göre daha savunmasız olduğunu ele alan bir yaklaşım ile olası bozulmaların, bakım eksikliklerinin ve modası geçmiş inşaat tekniklerinin bu noktada riski arttıracağı görüşüne dayalıdır (Bureau ve Ballentine, 2002).

Mansapta tahliye edilmesi gereken insan sayısına bakıldığında ise 122,204 kişi ile Doğancı Barajı ve 109,149 kişi ile Demirtaş Barajı en yüksek sayıda mansap tahliyesi gerektiren barajlar olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda en düşük tahliye gereksinimi olan baraj 264 kişi ile Baraklı Barajı'dır. Baraklı barajının mansap tahliye gereksiniminin sahadaki en düşük sayıda olmasının nedeni Bursa kentsel alanından uzakta, Uludağ kütlesinin yüksek rakımlı (1250 m.) bir bölgesinde yer alması ve mansap hattında oldukça düşük yoğunlukta ve az sayıda yerleşim bulunmasıdır. ICOLD metoduna göre mansapta insan tahliyesi incelendiğinde altı baraj yüksek risk grubunda yer alarak 8 değerine, sekiz baraj yüksek risk grubunda yer alarak 12 değerine sahip olmuştur. Bureau metodunda mansap tahliyesi ICOLD metodu ile aynı şekilde ele alındığı için ayrıca değinilmemiştir.

Mansapta muhtemel hasar durumu incelendiğinde ise uzman görüşüne bağımlı kalınarak 5 baraj düşük, 4 baraj orta ve 5 baraj yüksek risk kategorisinde sınıflandırılmıştır. ICOLD metoduna göre mansapta hasar muhtemel hasar durumu orta sınıfına dahil edilen beş baraj 4 değerini, yüksek sınıfına dahil edilen dört baraj 8 değerini ve çok yüksek sınıfına dahil edilen

beş baraj 12 değerini almıştır. Bureau metoduna göre mansap risk durumu incelendiğinde ise bu değerin elde edilmesi için gerekli olan iki alt bileşen kullanılmaktadır. Bu bileşenler mansapta tahliye risk katsayısı ve mansapta muhtemel hasar risk katsayısıdır. Bunlar ICOLD metodunda kullanılan sınıflama ile aynı şekilde elde edilmektedir. Bu iki katsayının toplamı Mansap tehlike katsayısını oluşturmuştur. Buna göre mansap tehlike katsayıları 12 ile 24 değeri arasında değişmektedir. Bureau metoduna göre bu değerin en düşük 2 en yüksek 24 olabildiği göz önüne alındığında çalışma sahasında mansap tehlikesinin yüksek olduğu görülmektedir. Çalı, Demirtaş, Doğancı ve Hasanağa barajları 24 değeri ile Bureau metoduna göre sahadaki en yüksek mansap riskini barındıran barajlardır.

DYİ değeri ele alındığında 0.44 değeri ile Hasanağa barajı ön plana çıkarken 0.42 değeri ile Dürdane Barajı ve 0.41 değeri ile Doğancı ve Kayapa barajları DYİ sıralamasını oluşturmaktadır. 0.27 değeri ile Baraklı Barajı sahadaki en düşük DYİ değerine sahip baraj olarak tespit edilmiştir. ICOLD metoduna göre DYİ değerleri incelendiğinde Baraklı Barajı 0.27 değeri ile çalışma sahasındaki en düşük DYİ değerine sahip baraj olsa da ICOLD metodunda belirtilen 0.25 taban değerinden büyük olması nedeniyle depremsellik bağlamında güvenli olarak nitelendirilemez durumdadır. Ek olarak ICOLD metoduna göre çalışma sahasındaki tüm barajların DYİ risk değerlendirmesi sonuçları IV. derecede yani Çok Yüksek seviyededir. Bunun nedeni ise ICOLD metodunda DYİ değerlendirmesi faya yakınlık ile birlikte ele alınmasıdır. Çalışma sahasındaki tüm barajlar 0.25 DYİ değerinden daha yüksek değerlere sahip olduğundan ve aktif bir faya 10 km'den daha yakın oldukları için ICOLD metoduna göre Çok Yüksek risk grubuna dahil olmaktadırlar. Bureau metoduna göre ise depremsellik öngörülen hasar katsayısı olarak kompleks bir şekilde ele alınmaktadır. Öngörülen hasar katsayısı elde edilirken baraj yapılarının gövde tipleri de ele alınmaktadır. Gövde tiplerine bakıldığında çalışma sahasındaki barajlar temelde 2 grupta, Kaya ve Toprak dolgu şeklinde inşa edilmişlerdir. Çalışma sahasındaki barajların yalnızca 3 tanesi (Baraklı, Demirtaş ve Nilüfer) kaya dolgu tipinde inşa edilmiştir. Geri kalan 11 baraj toprak dolgu tipinde inşa edilmiş barajlardır. Öngörülen hasar katsayısı sonuçları ele alındığında ise 1.62 değeri ile Hasanağa Barajı, 1.54 ile Dürdane Barajı ve 1.50 ile Doğancı ve Kayapa Barajı en

yüksek değerleri alırken 0.91 değeri ile Baraklı ve Nilüfer barajları en düşük değerleri alan barajlar olmuştur (Tablo 15).

ICOLD metoduna göre toplam risk değerlendirilmesi ise Tablo 14'te verilmiş olup elde edilen sonuçlara göre sahadaki 14 barajın 5'i çok yüksek, 6'sı yüksek ve 3'ü orta risk derecelendirmesi grubunda yer almaktadır. Çok yüksek grubunda yer alan barajlar arasında 34 puanlık toplam risk değeri ile Doğancı Barajı öne çıkmakta olup onu takiben 32 değeri ile Çalı, Demirtaş ve Hasanağa barajları gelmektedir. Orta grubunda yer alan barajlarda ise 16 puan ile Baraklı Barajı sahadaki en düşük toplam risk değerine sahip olan baraj olarak tespit edilmiştir. ICOLD metoduna göre toplam risk katsayısı tüm katsayıların toplanması ile elde edilmekte ve 0 ile 36 arasında değişmektedir. Bu değerlendirmede depremsellik ayrıca ele alınmaktadır. Çalışmadaki tüm barajlar ICOLD metoduna göre depremsellik bağlamında Çok Yüksek riskli olarak tespit edilmiştir.

Bureau metoduna göre toplam risk değerlendirilmesi ise Tablo 15'te verilmiş olup elde edilen sonuçlara göre sahadaki 3 baraj düşük, 12 baraj orta risk grubunda yer almaktadır. Orta risk grubunda yer alan barajlar arasında 58 puanlık toplam risk değeri ile Hasanağa Barajı en yüksek toplam risk değerine sahip olan baraj olarak karşımıza çıkmaktadır. Hasanağa Barajını takiben 54 değeri ile Doğancı ve 51 değeri ile Çalı barajı gelmektedir. Düşük risk grubunda ise 20 puan ile Baraklı Barajı sahadaki en düşük toplam risk değerine sahip olan barajdır.

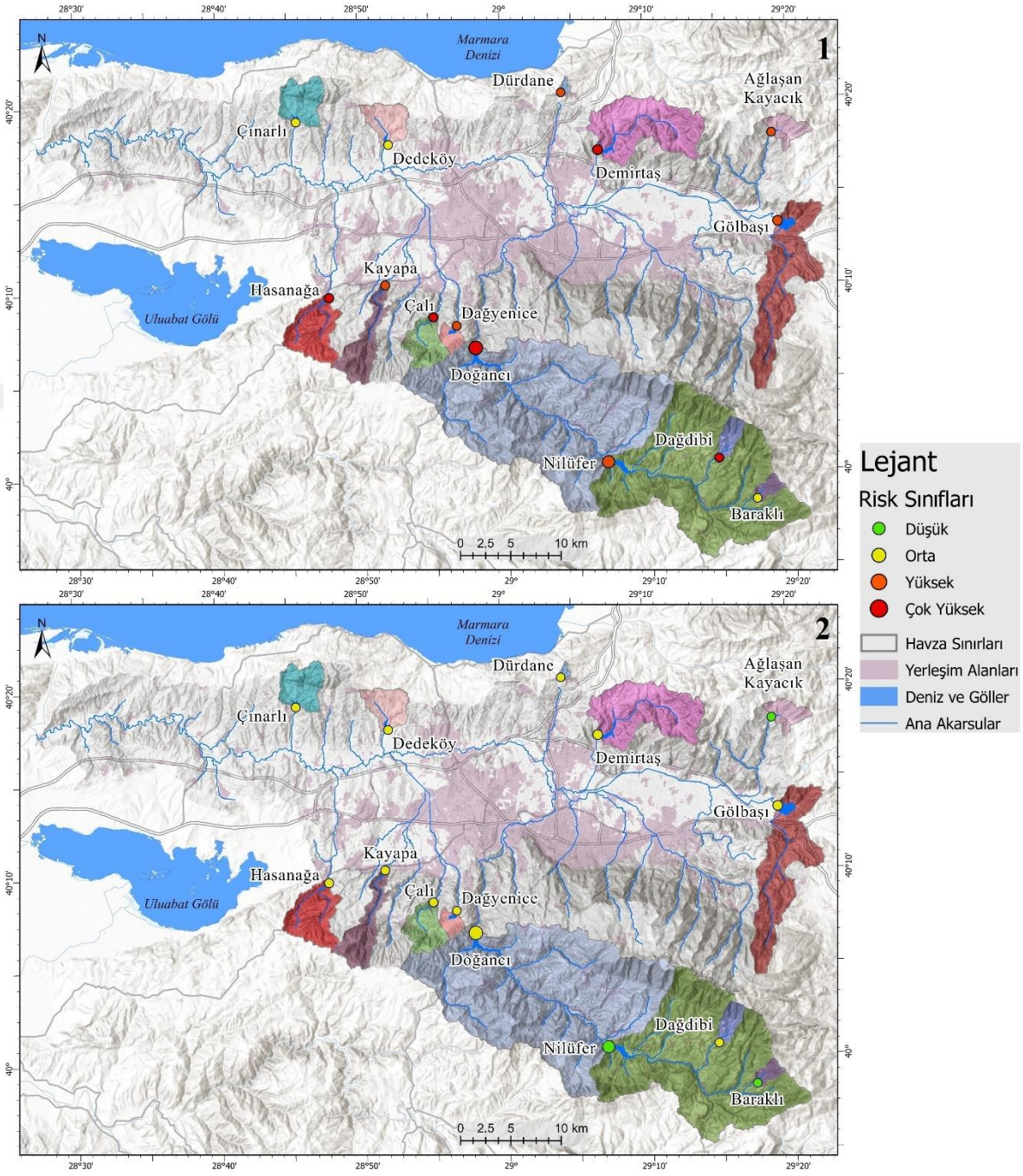
İki metoda göre de en düşük risk değerine sahip olan baraj Baraklı Barajı olarak tespit edilmiştir. En yüksek risk değerine sahip olan barajlar aynı olmasa da iki metoda göre de Çalı ve Doğancı Barajları en yüksek risk değerine sahip ilk üç baraj içerisinde yer almaktadır. Şekil 9A'da ICOLD metoduna, şekil 9B'de Bureau metoduna göre elde edilen risk gruplarının çalışma sahasındaki dağılışı verilmiştir.

Tablo 14. ICOLD Metoduna göre elde edilen katsayılar ve risk derecelendirilmeleri

Barajlar	CRF	HRF	Mansapta insan risk katsayısı	Mansapta hasar risk katsayısı	TRF	Risk derecelendirmesi
Ağlaşan Kayacık	4	4	8	4	20	Yüksek
Baraklı	2	2	8	4	16	Orta
Çalı	4	4	12	12	32	Çok Yüksek
Çınarlı	4	2	8	4	18	Orta
Dağdibi	4	6	8	12	30	Çok Yüksek
Dağyenice	4	2	12	8	26	Yüksek
Dedeköy	4	2	8	4	18	Orta
Demirtaş	4	4	12	12	32	Çok Yüksek
Doğancı	4	6	12	12	34	Çok Yüksek
Dürdane	2	2	12	8	24	Yüksek
Gölbaşı	4	0	12	8	24	Yüksek
Hasanağa	4	4	12	12	32	Çok Yüksek
Kayapa	4	4	12	8	28	Yüksek
Nilüfer	4	6	8	4	22	Yüksek

Tablo 15. Bureau Metoduna göre elde edilen katsayılar ve risk derecelendirilmeleri

Barajlar	CRF	HRF	ARF	DHF	PDF	TRF	Risk derecelendirmesi
Ağlaşan Kayacık	4	6	1	12	1.006156	23	Düşük
Baraklı	4	4	2	18	0.9101241	20	Düşük
Çalı	4	6	1	24	1.4665461	51	Orta
Çınarlı	4	4	2	12	1.304591	29	Orta
Dağdibi	4	6	1	20	1.0908211	34	Orta
Dağyenice	4	6	2	20	1.4665461	47	Orta
Dedeköy	4	4	2	12	1.3458067	30	Orta
Demirtaş	4	6	2	24	1.006156	36	Orta
Doğancı	4	6	2	24	1.5058557	54	Orta
Dürdane	4	4	1	20	1.5447132	42	Orta
Gölbaşı	4	2	4	20	1.1346293	34	Orta
Hasanağa	4	6	2	24	1.6211101	58	Orta
Kayapa	4	6	2	20	1.5058557	48	Orta
Nilüfer	4	6	1	12	0.9120608	21	Düşük



Şekil 9. Çalışma sahasındaki barajların ICOLD (1) ve Bureau (2) metotlarına göre risk derecelendirme dağılışı.

3.2. Nilüfer Çayı Havzasındaki Barajların Havza Özellikleri

3.2.1. Havza Morfometrisi Sonuçları

Çalışma alanı içerisindeki değerlendirilmeye alınan 14 barajın gölüne dökülen toplam 216 akarsu havzası tespit edilerek morfometrik hesaplamalar bu havzalar üzerinden yapılmıştır. Toplamda 216 adet olan havzaların 56'sı Doğancı, 32'si Nilüfer, 26'sı Demirtaş, 20'si Gölbaşı, 12'si Ağlaşan Kayacık, 11'i Dağyenice, 11'i Hasanağa, 11'i Kayapa, 10'u Dedeköy, 9'u Çalı, 6'sı Çınarlı, 5'i Baraklı, 5'i Dürdane ve 4'ü Dağdibi barajlarına aittir. Çalışma sahasında yer alan havzaların boyutları 2.54 hektar ile 18,223.89 hektar arasında değişmektedir. Ortalama olarak ise havza boyutları yaklaşık 300 hektardır. Çalışma sahasındaki en büyük havzalar Doğancı, Gölbaşı ve Nilüfer gibi depolama hacmi büyük olan barajların ana havzalarıdır. Tüm akarsu havzaları için HydroMachine aracılığıyla 11 farklı morfometrik parametre elde edildikten sonra NMFI yöntemi kullanılarak akarsu havzalarının pik akım kabiliyeti ortaya konulmuştur. Her bir havza için elde edilen NMFI değerinin ortalaması havzaların alansal büyüklüğüne bağlı olarak elde edilmiş ve her bir baraj için tek bir değere indirgenmiştir. Tablo 16'da verilen NMFI değerlerine bakıldığında 0.62 değeri ile Baraklı Barajı en yüksek ortalama NMFI değerine sahiptir. Çalışma sahasındaki en düşük ortalama NMFI değeri ise 0.47 değeri ile Çalı ve Demirtaş barajlarına aittir. NMFI yöntemine göre 0 – 0.25 aralığı düşük, 0.25 – 0.50 aralığı orta, 0.50 – 0.75 aralığı yüksek, 0.75 – 1 aralığı çok yüksek olarak nitelendirilmektedir. 0.50 değerinin üstünde kalan tüm değerlerin genel olarak pik akım kabiliyeti yüksek havzaları temsil ettiği göz önüne alındığında çalışma sahasındaki 14 barajdan 12'sinin su toplama havzalarının pik akıma duyarlı olduğu söylenebilir. NMFI değerlerinin çalışma alanındaki dağılışına bakıldığında ise homojen bir dağılış sergilendiğini söylemek mümkündür. Bunun nedeni her bir barajın havzalarının kendi arasında normalize edilmesidir. Ancak genel olarak Uludağ kütlesi üzerinde yer alan akarsu havzalarının NMFI değeri nispeten yüksek olarak elde edilmiştir (Şekil 10).

Tekil olarak elde edilen morfometrik parametrelere bakıldığında ise baraj havzalarının ortalama Bh değeri 278.78 olarak tespit edilmiştir. En düşük Bh değerini alan havza 6.13, en

yüksek Bh değeri alan havza 2,279.65 değerine sahiptir. Yaklaşık 2,280 metre rölyef ile en yüksek Bh değerine sahip olan havza Gölbaşı Barajının güney havzasını ve Aksu deresini oluşturan havzadır. Uludağ'ın yüksek kesimlerinden ova tabanına sert bir iniş yaptığı için oldukça yüksek bir rölyefe sahiptir. Sahadaki en yüksek Bh değerine sahip olan ikinci havza ise 2,154 metre ile Doğancı Barajının ana havzasıdır. Uludağ'ın zirvesinde kadar uzandığı için bu denli yüksek bir rölyefe sahiptir. Bh değerlerinin dağılışına bakıldığında ise Uludağ kütlesinden doğan akarsu havzalarının yoğunlukla yüksek değerlere sahip olduğu görülmekte, bölgedeki fayların etkisi bu anlamda net bir şekilde izlemektedir. Buna göre havzaları Uludağ kütlesi üzerinden doğan Baraklı, Dağdibi, Doğancı, Gölbaşı ve Nilüfer barajları erozyon potansiyeli yüksek ve daha yüksek hızlı akış doğurabilecek havzalara sahiptir.

Baraj havzalarının ortalama Hi değeri 0.50 olarak tespit edilmiştir. En düşük Hi değeri 0.07, en yüksek Hi değeri 0.74 olarak tespit edilmiştir. En düşük Hi değeri olarak tespit edilen 0.07 değeri Gölbaşı Barajının küçük havzalarında tespit edilmiştir. Uç bir değer olup baraj gölünün yakınında yer alan, düze yakın bir sahayı kapsayan havzanın değeridir. En yüksek Hi değeri ise 0.74 olup Çalı Barajının havzalarında tespit edilmiştir. En yüksek ikinci Hi değeri de (0.73) yine Çalı Barajının havzalarında tespit edilmiştir. Bu bağlamda Çalı Barajının pik akıma duyarlı ve genç havzalara sahip olduğu söylenebilmektedir. Hi değerinin dağılışı sahada nispeten homojen olmakla birlikte barajların küçük havzalarında yüksek değerler görülmektedir.

Baraj havzalarının ortalama T değeri 1.38 olarak tespit edilmiştir. En düşük T değeri 0.30, en yüksek T değeri 19.1 olarak tespit edilmiştir. En düşük T değeri olarak tespit edilen 0.30 değeri Ağlaşan Kayacık Barajının küçük havzalarında tespit edilmiştir. En yüksek T değeri olarak tespit edilen 19.1 değeri Doğancı Barajının ana havzasında tespit edilmiştir. Takip eden yüksek T değerleri Doğancı, Nilüfer, Gölbaşı ve Demirtaş barajlarının havzalarında görülmektedir. Çalışma sahasında yüksek T değerlerinin dağılışı havza büyüklüğü ile orantılı olarak dağılış göstermekte, alanı büyük olan havzalarda yüksek değerler görülmektedir. T değerinin yüksek olması ana akarsu koluna su taşıyan 1.dizin akarsu kollarının yüksek sayıda

olduğunu ortaya koyarak yüksek değerler taşıyan havzaların pik akım kabiliyetinin yüksek olduğunu vurgulamaktadır.

Baraj havzalarının ortalama Dd değeri 3.9 olarak tespit edilmiştir. En düşük Dd değeri 0.52, en yüksek Dd değeri 8.77 olarak tespit edilmiştir. En düşük Dd değeri olarak tespit edilen 0.52 değeri Kayapa Barajının küçük havzalarından birinde tespit edilmiştir. En yüksek Dd değeri olarak tespit edilen 8.77 değeri ise Nilüfer Barajının küçük havzalarından birinde tespit edilmiştir. Sahadaki en yüksek Dd değerleri Doğancı, Gölbaşı ve Nilüfer Barajı havzalarında görülmektedir. Özellikle büyük hazneli barajların havzalarında görülen yüksek Dd değerleri, bahsi geçen havzaların yüksek bir drenaj yoğunluğuna sahip olduğunu ve yağışı hızlıca kanal akışına dönüştürerek pik akım kabiliyetinin yüksek olduğuna işaret etmektedir. Ek olarak Shekar ve Mathew'in (2024) çalışmasında 3.73 ve üzerindeki Dd değerlerinin gelişmiş bir drenaj ağını işaret ettiği ve dik eğimleri vurguladığı belirtilmiştir. Buna göre sahadaki ortalama Dd değerinin 3.9 olması ve elde edilen değerlerin 3.3 ile 5.5 arasında yığılması sahanın akarsular ile parçalanmış bir yapısı olduğunu ve yoğun bir drenaj ağı barındırdığını göstermektedir.

Baraj havzalarının ortalama Rn değeri 1.19 olarak tespit edilmiştir. En düşük Rn değeri 0.02, en yüksek Rn değeri 10.92 olarak tespit edilmiştir. En düşük Rn değeri olarak tespit edilen 0.02 değeri Gölbaşı Barajının en küçük havzasında tespit edilmiş olup aynı zamanda en düşük Bh değerine de sahip olan havzadır. En yüksek Rn değeri olarak tespit edilen 10.92 değeri ise Gölbaşı Barajının en büyük havzasını oluşturan ve Uludağ kütlesinin yüksek kesimlerine kadar uzanan güney havzasında tespit edilmiştir. Bahsi geçen havza, sahadaki en yüksek Bh değerine sahip olan havza olarak da karşımıza çıkmaktadır. Rn değerinin dağılışına bakıldığında ise yüksek Rn değerine sahip olan havzaların Uludağ kütlesi üzerinde yoğunlaştığı dikkat çekmektedir. Yüksek Rn değerlerinin dik yamaçları, şiddetli erozyon süreçlerini ve yoğun tektonik aktiviteyi işaret ettiği göz önüne alındığında, sahadaki dağılışın literatürdeki bulgular ile de uyuşmakta olduğu görülmektedir.

Baraj havzalarının ortalama Lo değeri 0.15 olarak tespit edilmiştir. En düşük Lo değeri 0.05, en yüksek Lo değeri 0.94 olarak tespit edilmiştir. En düşük Lo değeri olarak tespit edilen 0.05 değeri Nilüfer Barajının küçük havzaları arasında tespit edilmiş olup düşük değerlerin

Gölbaşı, Doğancı ve Nilüfer barajlarının küçük havzalarında yoğunlaştığı görülmektedir. Yüzeysel akışın küçük havzalarda daha yüksek olduğu, Shekar ve Mathew (2024) tarafından yapılan çalışmalarda da ortaya konulmuştur. En yüksek Lo değeri olarak tespit edilen 0.94 değeri Kayapa Barajının küçük havzaları arasında tespit edilmiştir. Lo değerlerinin düşük olmasının yüzeysel akışın hızlıca kanala ulaştığını işaret ettiğini göz önüne alındığında özellikle Baraklı, Dağyenice, Doğancı ve Nilüfer barajlarının bu bağlamda yamaç eğimlerinin yüksek, yüzeysel akışın sınırlı olduğu havzalara sahip olduğu görülmektedir.

Baraj havzalarının ortalama Fs değeri 19.77 olarak tespit edilmiştir. En düşük Fs değeri 4.46, en yüksek Fs değeri 43.38 olarak tespit edilmiştir. En düşük Fs değeri olarak tespit edilen 4.46 değeri Nilüfer Barajının ortalama büyükteki havzaları arasında tespit edilirken en yüksek Fs değeri olarak tespit edilen 43.38 değeri Dedeköy barajının küçük havzaları arasında tespit edilmiştir. Fs değerlerinin sahadaki dağılışı homojen olmakla birlikte alansal olarak orta ve küçük ölçekli havzalarda yüksek değerlerin elde edildiği görülmektedir. Bu durum sahadaki küçük havzaların genellikle geçirimsiz yüzey örtüsü ve yüksek rölyef koşullarına sahip olduğuna işaret etmektedir. Shekar ve Mathew'in (2024) çalışmasında 15 ve üzerindeki Fs değerlerinin yüksek ve çok yüksek olarak kategorize edildiği ve bu değerlerin havzalarda yoğun hidrolojik aktiviteyi işaret ettiği belirtilmektedir. Sahanın ortalama Fs değerinin 19.77 olarak belirlenmesi, çalışma sahasının yoğun bir hidrolojik aktiviteye sahip olduğunu göstermektedir.

Baraj havzalarının ortalama Kc değeri 1.92 olarak tespit edilmiştir. En düşük Kc değeri 1.43, en yüksek Kc değeri 2.89 olarak tespit edilmiştir. En düşük Kc değeri olarak tespit edilen 1.43 değeri Hasanağa Barajının havzaları arasında tespit edilirken en yüksek Kc değeri olan 2.89 değeri Nilüfer Barajının havzalarında tespit edilmiştir. Sahadaki Kc değerlerinin dağılışına bakıldığında Uludağ kütlesi ve çevresindeki havzaların yüksek Bursa ovasının kuzey kesiminde kalan barajların havzalarında ise daha düşük değerlerin yaygın olduğu görülmektedir. Bunun nedeni Uludağ kütlesi üzerinde yer alan havzaların daha uzunlamasına bir formda olmasıdır. Kc değerinin 1 değerinden uzaklaşması havzaların daha uzunlamasına olduğunu işaret ettiği göz önüne alındığında sahanın kuzey kesiminde kalan barajların havzalarının daha dairesel formlara sahip olduğunu söylemek mümkündür.

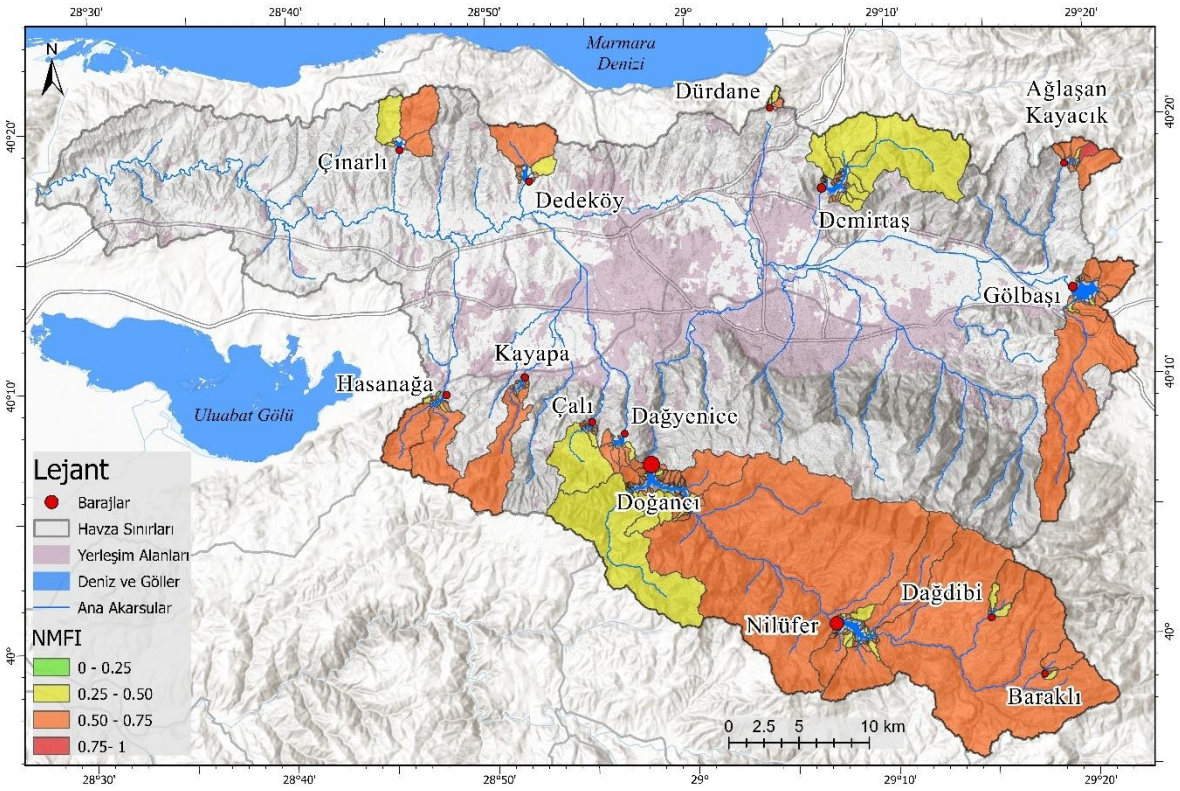
Baraj havzalarının ortalama Rl değeri 2.09 olarak tespit edilmiştir. En düşük Rl değeri 0, en yüksek Rl değeri 125 olarak tespit edilmiştir. En düşük Rl değeri olarak tespit edilen 0 değeri sahadaki küçük havzalardan gelişmiş bir akarsu ağına sahip olmayan havzalarda tespit edilmiştir. Bahsi geçen havzalarda farklı dizin gruplarına sahip bir akarsu ağı olmadığı için Rl değeri hesaplanamamaktadır. En yüksek Rl değeri olarak tespit edilen 125 değeri ise uç bir değer olup Kayapa Barajının orta ölçekli bir havzasında tespit edilmiştir. Havzadaki akarsu ağı havzanın çıkışında bir üst dizine geçtiği için bu denli yüksek bir değer elde edilmiştir. Çalışma sahasındaki Rl değerlerinin yoğunluğu 0 ile 8 arasında görülmektedir.

Baraj havzalarının ortalama Rb değeri 1.5 olarak tespit edilmiştir. En düşük Rb değeri, Rl parametresi ile aynı nedenden dolayı 0 olarak tespit edilmiştir. En yüksek Rb değeri ise 9 olarak tespit edilmiş olup bu değer Doğancı Barajının orta boyutlu havzaları arasında tespit edilmiştir. Sahadaki Rb değerlerinin dağılışı homojen olup düşük değerler genellikle küçük boyutlu havzalarda tespit edilmiştir. Elde edilen Rb değerleri 1.8 ile 6 arasında yığılmakta olup Verstappen‟in (1983) belirttiği 3 ile 5 aralığından daha geniş bir aralık görülmektedir.

Baraj havzalarının ortalama Tc değeri 11.70 olarak tespit edilmiştir. En düşük Tc değeri 1.23, en yüksek Tc değeri 153.46 olarak tespit edilmiştir. En düşük Tc değeri olarak tespit edilen 1.23 değeri Doğancı Barajının en küçük havzasında tespit edilmiş olup bahsi geçen havza aynı zamanda sahadaki en küçük havzalar arasında yer almaktadır. En yüksek Tc değeri olarak tespit edilen 153.46 değeri ise Doğancı Barajının ana havzasında tespit edilmiş olup bahsi geçen havza sahadaki en büyük havza olarak da karşımıza çıkmaktadır.

Tablo 16. Baraj Havzalarının Ortalama NMFI Değerleri

Baraj	Ortalama NMFI
Ağlaşan Kayacık	0.59
Baraklı	0.62
Çalı	0.47
Çınarlı	0.55
Dağdibi	0.57
Dağyenice	0.55
Dedeköy	0.52
Demirtaş	0.47
Doğancı	0.55
Dürdane	0.51
Gölbaşı	0.54
Hasanağa	0.51
Kayapa	0.56
Nilüfer	0.53



Şekil 10. Baraj havzalarının NMFI sonuçları.

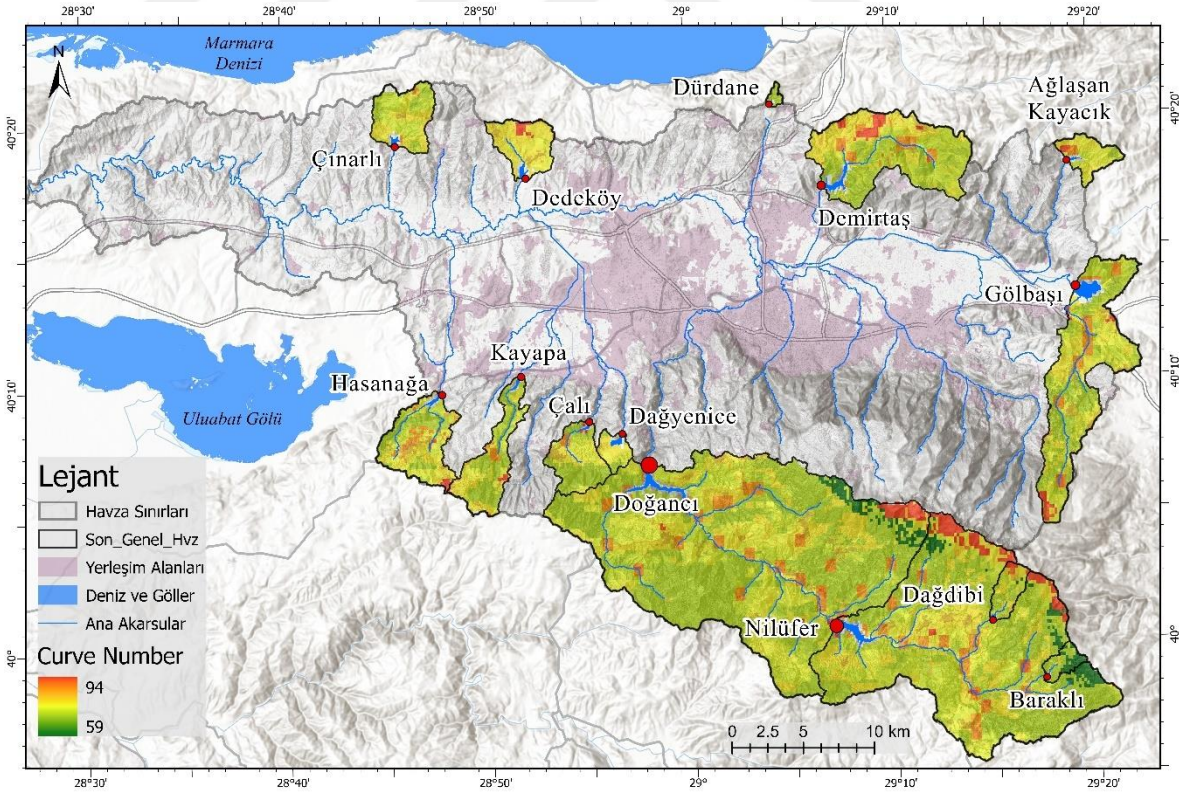
3.2.2. Curve Number Sonuçları

Çalışma alanındaki CN değerleri 59 ile 94 arasında değişmektedir. Sahadaki en yüksek CN değeri olan 94 değeri Demirtaş Barajının havzasının kuzey kesiminde yer alan tarım arazilerinde tespit edilmiştir. Sahada tespit edilen 90 ve üzerindeki yüksek değerlerin dağılışına bakıldığında ise yoğunlukla tarım arazilerinde, kentsel alanlarda ve Uludağ kütlesinin yüksek kesimlerinde yer alan çıplak arazilerde görülmektedirler. Sahadaki en düşük CN değeri olan 59 değeri ise Baraklı Barajı havzasındaki ormanlık arazilerde tespit edilmiştir. Sahada tespit edilen 70 ve altındaki nispeten düşük değerin dağılışına bakıldığında ise bu değerlerin Uludağ kütlesinin güney yamaçlarında yer alan ormanlık arazilerde yoğunlaştığı görülmektir.

Çalışma alanında elde edilen CN değerlerinin baraj havzalarındaki ortalamasına bakıldığında 77.8 ile Dedeköy Barajı en yüksek değeri alan baraj olarak tespit edilmiştir. Onu takiben 75.44 ile Demirtaş ve 75.01 ile Ağlaşan Kayacık barajları gelmektedir. En düşük değerlere bakıldığında ise Baraklı barajı 67.71 değeri ile en düşük CN değerine sahip olan baraj olarak tespit edilmiştir. CN değerlerinin 0 – 100 arasında değiştiği göz önüne alındığında, çalışma sahasından elde edilen değerlerin yüksek olduğu söylenebilir. Sahada yapılmış önceki çalışmalarda bölgenin yüksek derecede yüzeysel akış potansiyeline sahip olduğu ve sahaya düşen yağışın doğrudan yüzeysel akışa geçtiği tespit edilmiştir (Kuşçu, 2024). Bu durumun nedeni ise hidrolojik toprak grupları arasında en geçirimsiz olan D grubu toprakların sahada yaygın olmasıdır. Arazi kullanımı bağlamında ise çalışma sahasında genel anlamda ormanlık alanların baskın durumda olduğu görülmektedir. Baraj havzalarının neredeyse tamamı kırsal alanlardan oluştuğundan dolayı kentsel arazi kullanımı çok sınırlı şekilde görülmektedir. Nilüfer çayı havzasının kuzey kesiminde kalan baraj havzalarının oransal olarak daha büyük bir tarımsal arazi kullanımına sahip olduğu görülmektedir. Çalışma sahasındaki mera - çayır ve çıplak arazi sınıfları ise sınırlı şekilde, kuzey kesimde yer alan baraj havzalarının yüksek kesiminde görülmekle birlikte yoğunlukla Uludağ kütlesinin yüksek rakımlı bölümlerinde hâkim arazi örtüsü olarak görülmektedir (Karra vd., 2021).

Tablo 17. Baraj Havzalarının Ortalama CN Değerleri

Baraj	CN Değeri
Ağlaşan Kayacık	75.01
Baraklı	67.71
Çalı	74.13
Çınarlı	74.1
Dağdibi	74.05
Dağyenice	74.21
Dedeköy	77.8
Demirtaş	75.44
Doğancı	72.75
Dürdane	72
Gölbaşı	74.09
Hasanağa	73.68
Kayapa	73.98
Nilüfer	73.24



Şekil 11. Baraj havzalarının Curve Number dağılışı.

3.2.3. Ardıl Baraj Varlığı

Çalışma sahasındaki barajların memba havzalarında ardıl baraj varlığı durumu sonuçları Tablo 18'de verilmiştir. Buna göre ele alınan 14 barajın 3'ünün memba havzasında ardıl barajlar bulunmaktadır. Bu barajlar Doğancı, Gölbaşı ve Nilüfer barajlarıdır. Ardıl barajların çoğunun sediman önleyici olarak konumlandırılmış olduğu görülse de özellikle Nilüfer Barajı'nın inşasının arkasında Doğancı Barajı'nın taşkın kontrolünü sağlamak yatmaktadır (Coşkun, 2022). Bu durum literatürde ardıl barajların kullanım amaçları ile benzerlik göstermektedir (Vaníček vd., 2016; Nguyen vd., 2024). Doğancı barajının havzasında Baraklı, Dağdibi ve Nilüfer barajları bulunmaktadır. Gölbaşı barajının havzasında Aksu ve Kazancı barajları bulunmaktadır. Nilüfer barajının havzasında ise Baraklı ve Dağdibi barajları bulunmaktadır. Bahsi geçen ardıl barajlar her ne kadar mansap barajlarını koruma amaçlı yapılmış olsalar da literatürde görüldüğü üzere meydana gelebilecek yetersizlik olaylarında mansap barajlarına karşı her zaman bir tehdit unsurudurlar (Cai vd., 2019; Říha vd., 2020). Bu durumun temel nedeni ise bir barajın yetersizlik göstermesi sonucu serbest kalan yüksek hacimli su kütlelerinin mansapta yer alan yapılara zarar verme potansiyelidir. Gerek 2023 yılında Libya'da (Anadolu Ajansı, 2024) gerekse 1975 yılında Çin'de yaşanan baraj yıkılması olaylarında (Adamo vd., 2020) bu yaklaşımın sahadaki etkileri görülmektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı çalışmada ardıl barajlar risk arttırıcı bir parametre olarak ele alınmıştır. Ardıl barajlar değerlendirilirken bir barajın havzasında kaç adet ardıl baraj olduğu gözetilmeden yalnızca var olup olmama durumu ele alınmıştır.

3.3. Toplam Risk Değerlendirmesi

Elde edilen sonuçlara bakıldığında öncelikle sınıflandırma metotlarının kendi arasında tutarlı olmadığı göze çarpmaktadır (Tablo 18). Örneğin Ağlaşan Kayacık barajı için ICOLD metodu yüksek riskli olarak sonuç verirken Bureau metodu düşük riskli olarak sonuç vermektedir. Benzer şeklide Baraklı ve Nilüfer barajlarında da aynı durum görülmektedir. İki metoda göre de aynı risk sınıfında tespit edilen barajlar ise Çınarlı ve Dedeköy barajlarıdır. Curve Number

değerleri bağlamında barajlar değerlendirildiğinde ise yüksek ve çok yüksek olarak sınıflandırabilecek değerlere sahip oldukları görülmektedir. Bu bağlamda Dedeköy Barajı 77.8'lik CN değeri ile öne çıkmakta olup onu takiben Demirtaş ve Ağlaşan Kayacık barajları gelmektedir. CN değerlerine göre sahadaki 3 baraj çok yüksek, 11 baraj yüksek değerlere sahiptir. Barajlara morfometrik olarak bakıldığında da yüksek bir tehlike profili görülmektedir. Bu noktada morfometrik parametreler ile akarsu havzalarının pik akım kabiliyetinin yorumlanması NMFI yöntemi çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Morfometrik olarak görece yüksek pik akım göstermeye yatkın havzalara sahip olan Ağlaşan Kayacık, Baraklı, Dağdibi, Dağyenice ve Doğancı barajlarının Bureau metoduna göre düşük ve orta risk grubunda sınıflandırıldığı görülmekte, ancak ICOLD metoduna göre yüksek ve şiddetli gibi risk gruplarında sınıflandırıldığı görülmektedir. Morfometrik olarak yalnızca Çalı, Dedeköy ve Kayapa barajları orta grupta yer almış olup geriye kalan 11 baraj yüksek grubunda sınıflandırılmıştır.

Sonuçlar arasında CN ve NMFI bağlamında çok yüksek ve yüksek değerlere sahip olan Dedeköy barajının durumu, Bureau ve ICOLD metoduna göre orta risk grubunda değerlendirilmesi bakımından dikkat çekicidir. Benzer şekilde Çınarlı barajında da bu durum görülmektedir. Her ne kadar CN bağlamında sahadaki en düşük değeri taşısa da çalışma alanında morfometrik olarak en yüksek tehlikeyi barındıran Baraklı barajı da Bureau metoduna göre düşük, ICOLD metoduna göre orta risk grubunda ele alınmaktadır.

Tablo 18'de ICOLD, Bureau, Curve Number, NMFI ve Ardıl Baraj başlıkları altında verilen bulgular nitel olarak sınıflandırılmaya tabi tutulmuştur. İlk aşamada değişkenler Düşük, Orta, Yüksek ve Çok Yüksek olarak kategorize edilmiş ardından bu kategorilere sıralıyla 1, 2, 3 ve 4 değerleri atanmıştır (Tablo 19). Böylelikle tüm değerler sıralı ölçek yapısına dönüştürülmüştür. Ardından her bir baraj için ICOLD ve Bureau kategori değerlerinin ortalaması ile Curve Number ve NMFI kategori değerlerinin ortalaması alınmıştır. Ek olarak Ardıl Baraj durumu var ve yok şeklinde 1 ve 0 olarak bu hesaplamada risk arttırıcı bir unsur olarak dahil edilerek ortalama değerler toplanmıştır. Bu noktada CN ve NMFI değerlerinin aynı etki ağırlığında olduğu ön kabulü ile hesaplama yapılmış olup Bureau ve ICOLD metodu sonuçlarının da aynı ağırlıkta olduğu ön kabulü mevcuttur. Çalışma kapsamında bahsi geçen

tercihler ile hesaplamalar yapılmış olsa da bu ağırlıklandırmaların çeşitli saha testleri ile belirlenmesi gereklidir. Çalışma kapsamında bu testlerin gerçekleştirilememiş olmasının nedeni ilgili testlerin yapılacağı barajlar ve sahalar hakkındaki ulaşılabilir verilerin yetersiz olmasıdır.

Tablo 18. Baraj Sınıflandırma Metotları ve Havza Analizleri Sonuçları (Yeşil: Düşük, Sarı: Orta, Turuncu: Yüksek, Kırmızı: Çok Yüksek)

Baraj	ICOLD	Bureau	Curve Number	NMFI	Ardıl Baraj
Ağlaşan Kayacık	20	23	75.01	0.59	Yok
Baraklı	16	20	67.71	0.62	Yok
Çalı	32	51	74.13	0.47	Yok
Çınarlı	18	29	74.1	0.55	Yok
Dağdibi	30	34	74.05	0.57	Yok
Dağyenice	26	47	74.21	0.55	Yok
Dedeköy	18	30	77.8	0.52	Yok
Demirtaş	32	36	75.44	0.47	Yok
Doğancı	34	54	72.75	0.55	Var
Dürdane	24	42	72	0.51	Yok
Gölbaşı	24	34	74.09	0.54	Var
Hasanağa	32	58	73.68	0.51	Yok
Kayapa	28	48	73.98	0.56	Yok
Nilüfer	22	21	73.24	0.53	Var

Tablo 19'da Sonuç adlı sütunda verilen ortalama değerler 2 ile 9 arasında değerler almakta olup 5.5 ve üzeri değerlerin yüksek riskli olduğu göz önüne alındığında sahadaki barajlardan Baraklı ve Çınarlı barajı haricindeki 12 barajın yüksek riskli olarak kabul edilebilir olduğu görülmektedir. En yüksek riske sahip olan baraj Doğancı Barajı olarak tespit edilmiş olup takiben Gölbaşı Barajı sahadaki en yüksek riskli ikinci baraj olarak karşımıza çıkmaktadır. 2018 yılında bölgede meydana gelen sağanak yağış olayları neticesinde Nilüfer ve Doğancı barajları tam doluluğa erişmiş ve barajın hasar almasını önlemek için Doğancı Barajı'nda su tahliyesi yapılmaya başlanmıştır. Barajdan salınan sular ise mansap hattındaki Nilüfer çayı

üzerinde yer yer taşkın olaylarına neden olmuştur (BursadaBugün, 2018; Milliyet, 2018). Hem yaşanan bu olay hem de devam eden yıllarda Doğancı Barajı'nın mevsimsel olarak yüksek doluluk oranları sergilemesi (Anadolu Ajansı, 2024) Doğanı Barajı'nın sahadaki en yüksek riskli baraj olduğu sonucunu desteklemektedir.

Elde edilen sonuçlar çalışma sahasındaki barajlarının büyük kısmını yüksek riskli göstermektedir. Ancak bu durumun önerilen metodun bir eksikliği mi yoksa bölgenin bu anlamda yüksek riskli bir bölge olduğu mu gelecekte bölgesel ölçekte yapılacak olan çalışmalar ile birlikte tam anlamıyla belirlenebilecektir.

Tablo 19. Toplam baraj risk sınıflandırması sonuçları.

Baraj	ICOLD	Bureau	Curve Number	NMFI	Ardıl Baraj	Sonuç
Ağlaşan Kayacık	3	1	4	3	0	5.5
Baraklı	2	1	3	3	0	4.5
Çalı	4	2	3	2	0	5.5
Çınarlı	2	2	3	3	0	5
Dağdibi	4	2	3	3	0	6
Dağyenice	3	2	3	3	0	5.5
Dedeköy	2	2	4	3	0	5.5
Demirtaş	4	2	4	2	0	6
Doğancı	4	2	3	3	1	7
Dürdane	3	2	3	3	0	5.5
Gölbaşı	3	2	3	3	1	6.5
Hasanağa	4	2	3	3	0	6
Kayapa	3	2	3	3	0	5.5
Nilüfer	3	1	3	3	1	6

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Bursa ili sınırları içerisinde yer alan Nilüfer çayı havzasındaki barajların toplam risk durumları ile havza analizleri ele alınmış ve havzalardan elde edilen verilerin toplam risk metotlarını iyileştirmede kullanılabileceği ortaya konulmuştur. Barajların toplam riskini belirlemekte kullanılan yaygın iki metot (Bureau ve ICOLD), barajların yapı, mansap ve depremsellik özelliklerinden yola çıkarak bir sonuç ortaya koyar (ICOLD, 1989; Bureau ve Ballentine, 2002). Nitekim dünyada yaşanan baraj yetersizliği olaylarının yaklaşık %30'u üstten aşma yani barajların havzalarından taşınan suyun baraj haznesini doldurarak duvarın üzerinden akış göstermesi şeklinde meydana gelmektedir (Bernard-Garcia ve Mahdi, 2020). Bu durum toplam risk hesaplamalarında barajların havza süreçlerinin ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada akarsu havzalarının morfometrik olarak ve CN bağlamında analiz edilmesi ile elde edilen sonuçlar Bureau ve ICOLD metodu ile elde edilen risk durumları ile birlikte ele alınarak çalışma sahasındaki barajların havza süreçleri ve toplam risk durumları ortaya konulmuştur. Metotların ve havza süreçlerinin bulguları ile ardıl baraj durumu nitel sınıflandırma ile sadeleştirilerek toplam risk değeri ortaya konulmuştur. Buna göre barajlar hem mevcut metotlar hem de havza süreçleri bağlamında değerlendirilmiş ve sahadaki 14 barajdan 12'sinin yüksek riskli olduğu kanısına varılmıştır.

Sonuçlar açıkça barajların toplam riskini belirlemede kullanılan metotlarda havza süreçlerinin eksikliğini ortaya çıkarmaktadır. Toplam risk sınıflandırmalarının, baraj havzalarının havza morfometirisi, CN değerleri ve ardıl baraj durumu ile birlikte değerlendirilmesi sayesinde barajların toplam riski daha kapsamlı bir şekilde ortaya konulabilmektedir. Önerilen bu yaklaşımın farklı coğrafi özelliklere sahip alanlardaki barajlarda ele alınması ile mevcut metotlar ve havza süreçleri arasındaki ilişki daha net bir şekilde ortaya çıkarılabilecektir. Özellikle dünyada üstten aşma ile yıkılmış veyahut yetersizlik göstermiş barajlar tespit edilip havza analizlerinin gerçekleştirilmesi ile doğrulama sağlanması önerilen yaklaşım için gereklidir. Yapılacak olan doğrulama sayesinde gerçek olaylar üzerinden elde edilecek veriler ile mevcuttaki metotların güncellenmesi baraj riskine havza süreçlerinin de dahil edilmesi bakımından gereklidir. Ek

olarak havza süreçleri ele alınırken bu çalışmada morfometri ve CN temelinde bir yaklaşım güdülmüş olsa da ilerleyen çalışmalarda jeoloji ve iklim verileri gibi unsurlar da kullanılarak havzaların durumu çok daha net bir şekilde ortaya konulabilir.

Sonuç olarak, toplam risk sınıflandırma metotlarında havza süreçlerinin eksikliği bu çalışma ile ortaya konulmuştur. Bureau ve ICOLD metotlarında kullanılan depremsellik, mansap ve yapı etkilerinden farklı olarak havza süreçlerini temsilen havza morfometrisi, CN ve ardıl baraj durumunun da göz önüne alınması gerekmektedir. Yapılacak olan toplam risk tespit çalışmalarında baraj havzalarından elde edilen, akış sürecini yansıtacak verilerin de gerekli olduğunun göz önüne alınması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

Aba, A. (2022) Güncel Baraj Kazalarının İrdelenmesi Yoluyla Barajların Tip ve Tasarım Kriterlerinin Değerlendirilmesi (Tez No. 756811) [Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi]. Yök Tez Merkezi Https://Tez.Yok.Gov.Tr/Ulusaltezmerkezi

Abay, O., Baykan, N., Ve Baykan, N.O., (2015). Tarih Boyunca Barajların Elden Çıkma Nedenleri. 4. Su Yapıları Sempozyumu, 19-21 Kasım, Antalya, S.157- 166.

Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., ve Knutsson, S. (2020). Dam Safety and Overtopping. Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, 10(6), 41-78.

Ağıralioğlu, N., (2011). Baraj Güvenliği. Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.

Akbas, A. (2023). Seasonality, persistency, regionalization, and control mechanism of extreme rainfall over complex terrain. Theoretical and Applied Climatology, 152(3), 981-997.

Akbaş, A., & Özdemir, H. (2018). Marmara Denizi havzasının hidroklimatolojik dinamiklerinin belirlenmesi. Türk Coğrafya Dergisi, (70), 123-131.

Akbaş, A., Görüm, T., & Özdemir, H. (2025). Türkiye'de Taşkınların FlooDOT Tabanlı İncelenmesi ve Farklı Veri Kaynaklarının Mekânsal Karşılaştırılması. Turkish Journal of Civil Engineering, 36(6). https://doi.org/10.18400/tjce.1618212

Alam, A., Ahmed, B., ve Sammonds, P. (2021). Flash flood susceptibility assessment using the parameters of drainage basin morphometry in SE Bangladesh. Quaternary International, 575, 295-307.

Anadolu Ajansı. (2023). Anadolu Ajansı. Https://Www.Aa.Com.Tr/Tr/Pg/Foto Galeri/Ukraynada Kakhovka-Barajinin-Yikilmasinin-Ardindan-Herson-Bolgesi-Su-Altinda-Kaldi

Anadolu Ajansı. (2024). Libya'nın Derne kentinde 2 barajın patladığı sel felaketinin üzerinden bir yıl geçti. AA. https://www.aa.com.tr/tr/dunya/libyanin-derne-kentinde-2-barajin-patladigi-sel-felaketinin-uzerinden-bir-yil-gecti/3327232

Anadolu Ajansı. (2024, 20 Mart). Bursa'nın içme suyu barajlarının doluluğu rekor seviyeye ulaştı. https://www.aa.com.tr/tr/gundem/bursanin-icme-suyu-barajlarinin-dolulugu-rekor-seviyeye-ulasti/3169264

Angelakis, A. N., Baba, A., Valipour, M., Dietrich, J., Fallah-Mehdipour, E., Krasilnikoff, J., Bilgic, E., Passchier, C., Tzanakakis, V. A., Kumar, R., Min, Z., Dercas, N., & Ahmed, A. T. (2024). Water Dams: From Ancient to Present Times and into the Future. Water, 16(13), 1889. https://doi.org/10.3390/w16131889

Ardel, A. (1943). Marmara bölgesinin güneydoğu havzalarının morfolojik karakterleri. Türk Coğrafya Dergisi, (2), 160-173.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., ve Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 34(1), 73-89.

Association of State Dam Safety Officials. (2021). Dam failures and incidents. DamSafety.org. https://damsafety.org/dam-failures

Babb, A. O., ve Mermel, T. W. (1968).Catalog of dam disasters,failures and accidents. Washington, DC: U.S. Dept. of the In-terior, Bureau of Reclamation: Springfield. Reproduced by theClearinghouse for Federal Scientific ve Technical Information.

Başarı, E. (2003). Bursa İl Merkezi Zeminlerinde Dinamik Zemin Davranış Analizleri (Tez No. 139019) [Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Bayazıt, M. (1995). Hidroloji. İstanbul Teknik Üniversitesi.

BBC, 2021. Whaley Bridge: Dam Repairs Could Cost Up To £16m. Https://Www.Bbc.Com/News/Uk England-Derbyshire-56495335 (Erişim Tarihi 06.06.2023).

Bellalem, F., Pavlenko, V.A., Molina, S. et al. Probabilistic seismic hazard analysis in Northern Algeria using the Parametric-Historic method. Nat Hazards (2024). https://doi.org/10.1007/s11069-024-06978-3

Bernard-Garcia, M., ve Mahdi, T.-F. (2020). A Worldwide Historical Dam Failure's Database [Dataset]. Borealis. https://doi.org/10.5683/sp2/e7z09b

Beyaz Gazete. (2011, 19 Haziran). Kalkan Söğüt Dere Barajı yıkıldı. Beyaz Gazete.

Bharti, M. K., Sharma, M., And Islam, N.,2020. Study On The Dam ve Reservoir, And Analysis Of Dam Failures: A Data Base Approach. International Research Journal Of Engineering And Technolody, 7(5): 1661-1669.

Bildirici, M. (2009). Teknik ve Kültürel Değerleriyle Tarihi Sulama, Su Depolama ve Taşkın Koruma Tesisleri. Ankara: Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü.

Biswas, A. K. (1970). History of hydrology, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, the Netherlands.

Biswas, S., Sudhakar, S., & Desai, V. R. (1999). Prioritisation of subwatersheds based on morphometric analysis of drainage basin: A remote sensing and GIS approach. Journal of the Indian society of remote sensing, 27, 155-166.

Brinson, M. M., ve Malvárez, A. I. (2002). Temperate freshwater wetlands: types, status, and threats. Environmental conservation, 29(2), 115-133.

Brutsaert, W. (1999). Aspects of bulk atmospheric boundary layer similarity under free-convective conditions. Reviews of geophysics, 37(4), 439-451.

Bureau, G. J. (2003). Dams and appurtenant facilities. Earthquake engineering handbook, 1144-1189.

Bureau, G.J. ve Ballentine, G.D. (2002), "A Comprehensive Seismic Vulnerability And Loss Evaluation Of The State Of South Carolina Using HAZUS. Part VI. Dam Inventory And Vulnerability Assessment Methodology" 7th National Conference On Earthquake Engineering. July 21-25, Boston, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, AC.

Bursa Ticaret ve Sanayi Odası. (2025). Bursa'da Sektörlerin Durumu. https://www.btso.org.tr/default.asp

BursadaBugün. (2018, Mart 29). Bursa'da barajlar taşma noktasına geldi, kapakları açıldı. https://www.bursadabugun.com/haber/bursa-da-barajlar-tasma-noktasina-geldi-kapaklari-acildi-963846.html

Cai, W., Zhu, X., Peng, A., Wang, X., & Fan, Z. (2019). Flood risk analysis for cascade dam systems: A case study in the Dadu River Basin in China. Water, 11(7), 1365.

Cea, L., Álvarez, M., & Puertas, J. (2022). Estimation of flood-exposed population in data-scarce regions combining satellite imagery and high resolution hydrological-hydraulic modelling: A case study in the Licungo basin (Mozambique). Journal of Hydrology: Regional Studies, 44, 101247.

Charles, J. A., ve Boden, J. B. (1985). The failure of embankment dams in the UnitedKingdom. In Failures in earthworks (pp. 203-220). Thomas Telford Publishing.

Chen, Y., ve Lin, P. (2018). The total risk analysis of large dams under flood hazards. Water, 10(2), 140.

Cheng, S. T. (1993). Statistics of dam failure. Reliability and uncertainty analysis in hydraulic design. ASCE, New York, 97-105.

Choi, Y., Chae, S. H., Lee, J., Choi, J. H., Lee, S. G., ve Choi, Y. (2024). Prospects of utilizing the Korean satellite program for geological disaster detection and analysis. Geosciences Journal, 1-22.

Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988) Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York, pp. 530-537.

Corapci, F., ve Ozdemir, H. (2024). A new approach to flood susceptibility analysis of urbanised alluvial fans: the case of Bursa City (Türkiye). Natural Hazards, 1-24.

Coşkun, S. (2022). Bursa Kentinde Su Kıtlığının İklim Değişikliği ve Nüfus Senaryoları Açısından Makine Öğrenmesi Kullanılarak İncelenmesi (Tez No. 758407) [Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Çam, A., Fıra, O., & Yılmaz, A. (2013). Harita Genel Komutanlığında ortofoto ve sayısal yüzey modeli üretimi faaliyetleri. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, 11(6).

Çorapçı, F. (2022). Uludağ Kütlesi Kuzeydoğusunda Şehirleşmenin Olduğu Alüvyal Fanlar Üzerinde Taşkın Duyarlılık Analizi (Tez No. 758052) [Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Dal, K. (2018) Eğimli Kanalda Ardışık Baraj Yıkılmasının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi (Tez No. 502477) [Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi]. Yök Tez Merkezi Https://Tez.Yok.Gov.Tr/Ulusaltezmerkezi

Demir, A., ve Dinçer, A. E. (2017). MPS ve FEM Tabanlı akışkan-yapı etkileşimi modelinin Çoruh Nehri üzerindeki ardıl baraj-yıkılma problemine uygulanması. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 3(2), 64-69.

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (1992). DSI Teknik Bülteni (Sayı 75).

Direkci, E. (2022). Modelling Breach Parameters Of Embankment Dams (Tez No. 730124) [Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Doğan, D.M. (2001), Büyük Türkçe Sözlük, İstanbul: Gerçek Hayat Yayıncılık.

Dunne, T., ve Black, R. D. (1971). Runoff processes during snowmelt. Water Resources Research, 7(5), 1160-1172.

Efe, H. (2022) Batman Barajının Yıkılma Analizi ve Baraj Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi (Tez No. 743824) [Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi]. Yök Tez Merkezi Https://Tez.Yok.Gov.Tr/Ulusaltezmerkezi

Ege, İ., & Avsever, D. (2022). Sille çayı havzası'nın (Konya) morfometrik özelliklerinin CBS ile belirlenmesi. Gelecek Vizyonlar Dergisi, 6(2), 40-63.

Ekmekcioğlu, Ö., Koc, K., & Özger, M. (2021). Stakeholder perceptions in flood risk assessment: A hybrid fuzzy AHP-TOPSIS approach for Istanbul, Turkey. International Journal of Disaster Risk Reduction, 60, 102327.

Ekmekcioğlu, Ö., Koc, K., & Özger, M. (2022). Towards flood risk mapping based on multi-tiered decision making in a densely urbanized metropolitan city of Istanbul. Sustainable Cities and Society, 80, 103759.

Elbaşı, E. (2015). Marmara Denizi Akarsu Havzalarının Morfometrik Analizi (Tez No. 422327) [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Elbaşı, E., ve Özdemir, H. (2018). Marmara denizi akarsu havzalarının morfometrik analizi. Coğrafya Dergisi, (36), 63-84.

Emre, Ö., Doğan, A., Duman, T. Y., & Özalp, S. (2011). 1:250.000 ölçekli Türkiye diri fay haritası serisi: Bursa (NK 35-12) paftası, seri no: 9 [Harita]. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.

Erdem, A. D., Yavaş, İ., & Bilgili, A. (2023). Sanayileşme Perspektifinden Şehirlerin Dönüşümü: Bursa Örneği. TroyAcademy, 8(2), 210-234.

Erker, C., ve Ağıralioğlu, N. (1986). Su Kaynakları Mühendisliği. İstanbul: Teknik Kitaplar Yayınevi.

Ertoğral, O., ve Çiçek, İ. (2024). Morfometrik Analiz Yönteminin Taşkın Riski Ön Değerlendirme Çalışmalarında Kullanılabilirliği: Yomra Örneği. The Journal Of Academic Social Science, 156(156), 266-288.

Evrensel. (2011, 19 Haziran). Artçı sarsıntılar baraj yıktı. Evrensel. https://www.evrensel.net/haber/8252/artci-sarsintilar-baraj-yikti

Fattorelli, S., Dalla Fontana, G. And Da Ros, D., (1999). Flood Hazard Assessment And Mitigation. In: Casale, R., And Margottini C., (Eds.), Floods And Landslides, 18-38, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany

FEMA. (2004). Federal guidelines for dam safety (FEMA 148). Washington, DC.

FEMA. (2013). Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures.

Ferreira, R. G., da Silva, D. D., Elesbon, A. A. A., Fernandes-Filho, E. I., Veloso, G. V., de Souza Fraga, M., & Ferreira, L. B. (2021). Machine learning models for streamflow regionalization in a tropical watershed. Journal of Environmental Management, 280, 111713.

Fiener, P., Auerswald, K., ve Van Oost, K. (2011). Spatio-temporal patterns in land use and management affecting surface runoff response of agricultural catchments—A review. Earth-Science Reviews, 106(1-2), 92-104.

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., ... ve Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. science, 309(5734), 570-574.

Foster, M., Fell, R., ve Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. Canadian geotechnical journal, 37(5), 1000-1024.

Giano, S. I., Pescatore, E., & Siervo, V. (2021). Morphometry and Debris-Flow Susceptibility Map in Mountain Drainage Basins of the Vallo di Diano, Southern Italy. Remote Sensing, 13(16), 3254.

Gönençgil, B., Biricik, A. S., Atalay, İ., Aydınöz, D., Çoban, A., & Ertek, A. (2016). Türkiye fiziki coğrafyası. İstanbul Üniversitesi Açık ve Uzaktan Eğitim Fakültesi.

Gravelius, H., (1914). Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde. Band I: Flufikunde (Compendium of Hydrology, vol. I. Rivers, in German). Germany: Goschen, Berlin.

Greenlee, D. D. 1987. "Raster and Vector Processing for Scanned Linework." Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 53 (10): 1383–1387.

Gregory, K. J., ve Walling, D. E. (1973). Report: Fluvial Processes in Small Instrumented Watersheds in the British Isles. Area, 5(4), 297-302.

Gruner, E. (1963). Dam disasters. Proceedings of the institution of civil engineers, 24(1), 47-60.

Guzha, A. C., Rufino, M. C., Okoth, S., Jacobs, S., ve Nóbrega, R. L. (2018). Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa. Journal of Hydrology: Regional Studies, 15, 49-67.

Gündoğdu K. S., Demir A. O. ve Akkaya Aslan, Ş. T. (2001). Göletlerin Bazı Hidrolojik Analizlerinin Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) Ortamında Yapılma Olanakları, I. Ulusal Sulama Kongresi, 8-11 Kasım, 247-253, Antalya.

Hariri-Ardebili, M. A., ve Nuss, L. K. (2018). Seismic risk prioritization of a large portfolio of dams: Revisited. Advances in Mechanical Engineering, 10(9), 1687814018802531.

Herodotos. (2019). Tarih. İstanbul: Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları. 16. Baskı. 162. (Orijinal eser MÖ 5. yy'da yazılmıştır.)

Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. Transactions, American geophysical union, 13(1), 350-361.

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological society of America bulletin, 56(3), 275-370.

Hu, L., Yang, X., Li, Q., & Li, S. (2020). Numerical simulation and risk assessment of cascade reservoir dam-break. Water, 12(6), 1730.

Hundecha, Y., ve Bárdossy, A. (2004). Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. Journal of Hydrology, 292(1-4), 281-295.

Hürriyet. (1984, 30 Mayıs). Çukurova'da tehlike. Hürriyet Gazetesi.

ICOLD (1974). Lessons from Dam Incidents USA. ASCE

ICOLD, (1989). Selecting parameters for large dams: Guidelines and recommendations (Bulletin No. 72). ICOLD Committee on Seismic Aspects of Large Dams.

ICOLD, (1998). World register of dams, 1998 (ISBN 2-86812-003-2).

ICOLD, (2010). Bulletin On Dam Safety Management, ICOLD Publications.

IDNR (1990), Design Criteria And Guidelines For Iowa Dams Technical Bulletin No:16., Iowa Department Of Natural Resources.

Irinyemi, S., ve Lombardi, D. (2021). Seismic risk analysis for large dams in West Africa region. Earth Sciences (EARTH).

Islam, M. I., & Setiawan, B. (2024). Analisis Kerentanan Banjir Menggunakan Metode Normalised Morphometric Flood Index (NMFI) Studi Khusus: SubDAS Air Manna, Bengkulu Selatan. OPHIOLITE: Jurnal Geologi Terapan, 6(1), 1-10.

Jaafar, H. H., Ahmad, F. A., & El Beyrouthy, N. (2019). GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design. Scientific data, 6(1), 145.

Jenson, S. K., and J. O. Domingue. 1988. "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis." Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54 (11): 1593–1600.

Johnson, K., Villani, M., Bayliss, K., Brooks, C., Chandrasekhar, S., Chartier, T., Chen, Y.-S., Garcia-Pelaez, J., Gee, R., Styron, R., Rood, A., Simionato, M., ve Pagani, M. (2023). Global Seismic Hazard Map (v2023.1.0) [Data set]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.8409647

Kamuş, A. O. (2023). Esmahanım Deresi Havzasının (Düzce) Taşkın Modellenmesi ve Taşkın Risk Analizi (Tez No. 824824) [Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Karabacak, V., & Sançar, T. (2025). Bursa İli Yerleşim Alanlarının Deprem Tehlikesi: Ulubat, Bursa ve İnegöl Diri Faylarının Paleosismolojik Özellikleri / Earthquake Hazard in Urban Areas of Bursa Province: Paleosismological Properties of the Ulubat, Bursa and İnegöl Active Faults. Türkiye Jeoloji Bülteni, 68(2), 151-176. https://doi.org/10.25288/tjb.1642150

Karra, K., Kontgis, C., Statman-Weil, Z., Mazzariello, J. C., Mathis, M., ve Brumby, S. P. (2021). Global land use / land cover with Sentinel 2 and deep learning. 2021 IEEE International

Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 2021-July, 4704–4707. https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553499

Kaya, C. (2016) Multi-Failure Analysis Of Seyhan Dam And Çatalan Dam (Tez No. 459373) [Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi]. Yök Tez Merkezi Https://Tez.Yok.Gov.Tr/Ulusaltezmerkezi

Ketin, İ. (1947). Uludağ masifinin tektoniği hakkında. Türkiye Jeoloji Bülteni 1(1):60–88F

Khan, M. J. U., Durand, F., Afroosa, M., Coulet, P., Bertin, X., Mueller, V., ... & Wainwright, C. (2025). Tropical cyclone induced compound flooding in Madagascar: a coupled modeling approach. Natural Hazards, 1-38.

Kim, N. W., & Shin, M. J. (2018). Estimation of peak flow in ungauged catchments using the relationship between runoff coefficient and curve number. Water, 10(11), 1669.

Kirpich, Z. P., (1940), Time of concentration of small agricultural watersheds. Civil Engineering 10 (6), 362.

Krisnayanti, D. S., Welkis, D. F., Sir, T. M., Bunganaen, W., & Damayanti, A. C. (2021). Kajian Nilai Curve Number pada Daerah Aliran Sungai Manikin di Kabupaten Kupang. Jurnal Teknik Sumber Daya Air, 1-10.

Kuşcu, İ. (2024). İl Ölçeğinde Taşkın Duyarlılık Analizi: Bursa Örneği (Tez No. 851563) [Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Kuşcu, İ., & Ozdemir, H. (2025). Flood susceptibility analysis of settlement basins on a provincial scale using inventory flood data. Environmental Earth Sciences, 84(1), 1-17.

Kuşcu, İ., & Özdemir, H. (2023). Taşkın duyarlılık analizinde kullanılan parametreler üzerine bir değerlendirme. Türk Coğrafya Dergisi, (84), 67-83.

Laflı, E., Buora, M. (2023) Roman Dams In Asia Minor. Acta Classica Universitatis Scientiarum Debreceniensis.

Lahmeyer, J. W. (1845). Erfahrungs-Resultate über gleichförmige Bewegung des Wassers in Flussbetten und Kanälen. Braunschweig.

Lara, G., Perucca, L., ve Rothis, M. (2018). Morphometric, geomorphologic and flood hazard analysis of an arid mountain river basin, central pre-Andes of Argentina, southwestern South America. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 41(1), 83-97.

Maidment, D. R. (Ed.). (2002). Arc Hydro: GIS for water resources. ESRI, Inc..

Mallakpour, I., AghaKouchak, A., & Sadegh, M. (2019). Climate-induced changes in the risk of hydrological failure of major dams in California. Geophysical Research Letters, 46(4), 2130-2139.

Marangoz, A. M. (2024). Acısu Havzası'nın Jeomorfolojisi (Zara-İmranlı) (Tez No. 855111) [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Martin, W., (2018). Dams Failures İn The U.S. Stanford University, California, 10p.

Mauney, L., 2021. Toddbrook Reservoir Dam. Lessons Learned From Dam Incidents And Failures.

Mays, L. W. (2008). A Very Brief History Of Hydraulic Technology During Antiquity. Environ Fluid Mech, 8: 471-484.

Melton, M. A. (1957). An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology (Vol. 11). New York: Department of Geology, Columbia University.

Middlebrooks, T. A. (1953). Earth-dam practice in the United States. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 118(2), 697-722.

Milliyet. (1984, 30 Mayıs). Aslantaş Barajı'nın kapağı parçalandı. Milliyet Gazetesi.

Milliyet. (2018, Mart 29). Barajlar taşma noktasına geldi, kapakları açıldı. https://www.milliyet.com.tr/yerel-haberler/bursa/barajlar-tasma-noktasina-geldi-kapaklari-acildi-12828042

Milly, P. C. D., Wetherald, R. T., Dunne, K. A., & Delworth, T. L. (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate. Nature, 415(6871), 514-517.

Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2013). Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology (Vol. 42). Springer Science & Business Media.

Moldovan, I. A., Toma-Dănilă, D., Constantin, A. P., Placinta, A. O., Popescu, E., Ghiţă, C., ve Paerele, C. M. (2016). Seismic Risk Assessment for Large Romanian Dams on Bistrita and Siret Rivers and their Tributaries. Studia UBB Ambientum, 61(1-2), 57-72.

MTA. (2009). Bursa İli Kentsel Alanların (İl-İlçe Merkezleri) Yerbilim Verileri, Mta Rapor No: 11163:52

Nguyen, B. Q., Kantoush, S. A., & Sumi, T. (2024). Quantifying the consequences of unsustainable sand mining and cascade dams on aspects in a tropical river basin. Scientific Reports, 14(1), 1178.

Noferesti, H., Fallah, H., Golabchi, Y., ve Rezaee, M. (2015). Total risk rating and liquefaction analysis of farrokhi earth embankment dam, eastern Iran. Indian Geotechnical Journal, 45, 181-191.

NRCS, U. (2004). National engineering handbook: Part 630—hydrology. USDA Soil Conservation Service: Washington, DC, USA, 11-5.

Okay, A. I., Satir, M., Zattin, M., Cavazza, W., & Topuz, G. (2008). An Oligocene ductile strike-slip shear zone: The Uludağ Massif, northwest Turkey—Implications for the westward translation of Anatolia. Geological Society of America Bulletin, 120(7-8), 893-911.

Ozan, C. (2018) Anadolu'daki Tarihi Su Yapıları ve Hitit Dönemi Karakuyu Barajı'nın Hidrolojik Açıdan İncelemesi (Tez No. 526481) [Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi]. Yök Tez Merkezi Https://Tez.Yok.Gov.Tr/Ulusaltezmerkezi

Ozdemir, H., & Akbas, A. (2023). Is there a consistency in basin morphometry and hydrodynamic modelling results in terms of the flood generation potential of basins? A case study from the Ulus River Basin (Türkiye). Journal of Hydrology, 625, 129926.

Ozdemir, H., & Elbaşı, E. (2015). Benchmarking land use change impacts on direct runoff in ungauged urban watersheds. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 79, 100-107.

Özdemir, A. (2021). İklim değişikliğinin havza ölçeğinde akım ve sediman miktarına etkilerinin değerlendirilmesi: Yuvacık baraj gölü havzası. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 45(1), 129-154.

Özdemir, H. (2011). Havza morfometrisi ve taşkınlar. Fiziki Coğrafya Araştırmaları, 507-526.

Özdemir, H., Akbulak, C., ve Özcan, H. (2011). Çokal Barajı (Çanakkale) çökme modeli ve taşkın risk analizi. Uluslararası İnsan Bilimleri Dergisi, 8(2), 659-698.

Öziş, Ü. (2015). Water Works Through Four Millenia In Turkey. Environmental Processes, 2, 559-573.

Patton, P. C. (1988). Drainage basin morphometry and floods. Flood Geomorphology. John Wiley ve Sons New York. 1988. p 51-64. 11 fig, 1 tab, 67 ref.

Patton, P. C., & Baker, V. R. (1976). Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. Water resources research, 12(5), 941-952.

Pike, R. J., & Wilson, S. E. (1971). Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. Geological Society of America Bulletin, 82(4), 1079-1084.

Pike, R. J., Evans, I. S., ve Hengl, T. (2009). Geomorphometry: a brief guide. Developments in soil science, 33, 3-30.

Planchon, O., and Darboux, F. (2002). "A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models." Catena 46(2): 159–176.

Prein, A. F., Rasmussen, R. M., Ikeda, K., Liu, C., Clark, M. P., & Holland, G. J. (2017). The future intensification of hourly precipitation extremes. Nature climate change, 7(1), 48-52.

Richards, G., (2020). Case Study: Tempo Town Lake Dam. Association Of State Dam Safety Officials.

Říha, J., Kotaška, S., & Petrula, L. (2020). Dam break modeling in a cascade of small earthen dams: case study of the Čižina River in the Czech Republic. Water, 12(8), 2309.

Rizzo, P., And Blair, J., (1998). Manitenance And Operation Of Dams To Prevent Failure. Paul C. Rizzo Associates, Pittsburgh.

Sajikumar, N., ve Remya, R. S. (2015). Impact of land cover and land use change on runoff characteristics. Journal of environmental management, 161, 460-468.

Sañudo, E., Cea, L., & Puertas, J. (2020). Modelling pluvial flooding in urban areas coupling the models iber and SWMM. Water, 12(9), 2647.

Schueler, T. (1994). The importance of imperviousness. Watershed protection techniques, 1(3), 100-101.

Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. Geological society of America bulletin, 67(5), 597-646.

Scihnitter, N. J. (1967). A short history of dam engineering.

Sefarim, J.L., (1981). Safety of Dams Judged From Failures. Int Water Power and Dam Contruction, December, 32 – 35.

Seyitoğlu, G., Esat, K., Tün, M., Oruç, B., Pekşen, E., Aktuğ, B., ... ve Çetinkaya, D. (2024). Newly discovered, the Kayapa-Yenişehir cross-basin fault: As revealed by geological and geophysical studies along the southern branch of the North Anatolian Fault Zone, a possible source of the destructive 1855 Bursa earthquakes. Journal of Structural Geology, 179, 105028.

Shekar, P. R., & Mathew, A. (2022). Morphometric analysis for prioritizing sub-watersheds of Murredu River basin, Telangana State, India, using a geographical information system. Journal of Engineering and Applied Science, 69(1), 44.

Shekar, P. R., & Mathew, A. (2024). Morphometric analysis of watersheds: A comprehensive review of data sources, quality, and geospatial techniques. Watershed Ecology and the Environment, 6, 13-25.

Sheridan, J. M. (1997). Rainfall-streamflow relations for coastal plain watersheds. Applied Engineering in Agriculture, 13(3), 333-344.

Shi, P., Yuan, Y., Zheng, J., Wang, J., Ge, Y., ve Qiu, G. (2007). The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region, China. Catena, 69(1), 31-35.

Singh, M., Kijko, A., ve van den Berg, L. (2011). Seismic risk ranking for large dams in South Africa. Acta Geophysica, 59, 72-90.

Soares, M. R. G. D. J., Fıorı, C. O., Sılveıra, C. T. D., & Kavıskı, E. (2017). Efficıency Of The Curve Number Method Of Raınwater Retentıon. Mercator (Fortaleza), 16, E16001.

Soomro, A. G., Babar, M. M., Memon, A. H., Zaidi, A. Z., Ashraf, A., & Lund, J. (2019). Sensitivity of direct runoff to curve number using the SCS-CN method. Civ. Eng. J, 5, 2738-2746.

Strahler, A. N. (1952). Dynamic basis of geomorphology. Geological society of America bulletin, 63(9), 923-938.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. Eos, Transactions American Geophysical Union, 38(6), 913-920.

Strahler, A. N., & Chow, V. T. (1964). Handbook of applied hydrology. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks, 39-76.

Sumarauw, J. S., & Ohgushi, K. (2012). Analysis on curve number, land use and land cover changes and the impact to the peak flow in the Jobaru River Basin, Japan. International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS, 12(02), 17-23.

Şengör, A. M. C., Tüysüz, O., Imren, C., Sakınç, M., Eyidoğan, H., Görür, N., ... & Rangin, C. (2005). The North Anatolian fault: A new look. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 33(1), 37-112.

Şentürk, F. (1994). Hydraulics of dams and reservoirs. Water Resources Publication.

Takase, K. (1967). Statistic study on failure, damage and deterioration of earth dams in Japan. In 9th ICOLD Congress Q (Vol. 34, pp. 1-19).

Tarboton, D. G., R. L. Bras, and I. Rodriguez–Iturbe. (1991). "On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data." Hydrological Processes 5: 81–100.

Taşoğlu, E., Öztürk, M. Z., ve Yazıcı, Ö. (2024). High Resolution Köppen-Geiger Climate Zones of Türkiye. International Journal of Climatology, 44(14), 5248-5265.

Taymaz, İ. (1989) A Review of Embankment Dam Failures (Tez No. 7056) [Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi]. Yök Tez Merkezi Https://Tez.Yok.Gov.Tr/Ulusaltezmerkezi

Tikno, S., Hariyanto, T., Anwar, N., Karsidi, A., & Aldrian, E. (2012). Aplikasi metode Curve Number untuk mempresentasikan hubungan curah hujan dan aliran permukaan di DAS Ciliwung Hulu–Jawa Barat. Jurnal Teknologi Lingkungan, 13(1), 25-36.

Tofiq, F.S. (2015) Computational Dam Safety Analysis Based On Predicted Probable Maximum Flood Discharge From Statistical Downscaling Taking Into Consideration Different General Circulation Models (Tez No. 398919) [Doktora Tezi, Gaziantep Üniversitesi]. Yök Tez Merkezi Https://Tez.Yok.Gov.Tr/Ulusaltezmerkezi

Tolun, N. (1948). Bursa Ovası'nın hidrolojisi hakkında not (MTA Rapor No. 1799). Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.

Topcu, S., ve Tosun, H. (2021, September). An overview on total risk classifications for dams. In 5th Congress on Dams (pp. 1-9).

Topsakal, M., Dogan, E., Yasak, S.S., Corapci, F., & Ozdemir, H. (2025). Basin morphometry? It is no longer an issue with HydroMachine toolbox. Environ Earth Sci 84, 342 (2025). https://doi.org/10.1007/s12665-025-12352-8

Torun, Ö. (2020) Anadolu'da Roma Dönemi Barajları (Tez No. 653864) [Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi]. Yök Tez Merkezi Https://Tez.Yok.Gov.Tr/Ulusaltezmerkezi

Tosun, H. (2020, October). Hazard and Total Risk Analyses of Large Dams under Threat of the North Anatolian Fault Zone in Mid-Anatolia, Turkey. In Proceeding of 5th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'20) Virtual Conference–October 2020 (https://doi. org/10.11159/icgre20. 191).

Tosun, H. (2021, May). Experience on earthquake safety of large embankment dams constructed in Turkey. In Proceedings of the 6rd International Conference on Civil Structural and Transportation Engineering (ICCSTE'21), Virtual Conference (pp. 17-19).

Tosun, H., Tosun, T. V., ve Hariri-Ardebili, M. A. (2020). Total risk and seismic hazard analysis of large embankment dams: case study of Northwest Anatolia, Turkey. Life Cycle Reliability and Safety Engineering, 9(3), 329-338.

Tosun, H., ve Hariri-Ardebili, M. A. (2024). Post-2023 Türkiye earthquake risk assessment of cascade dams in upper Euphrates basin. Water Security, 21, 100164.

Tosun, H., ve Seyrek, E. (2010). Total risk analyses for large dams in Kizilirmak basin, Turkey. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10(5), 979-987.

Tosun, H., Zorluer, İ., Orhan, A., Seyrek, E., Savaş, H., ve Türköz, M. (2007). Seismic hazard and total risk analyses for large dams in Euphrates basin, Turkey. Engineering Geology, 89(1-2), 155-170.

Trimble, S. W. (1999). Decreased rates of alluvial sediment storage in the Coon Creek Basin, Wisconsin, 1975-93. Science, 285(5431), 1244-1246.

Turhan, Ş., Vural, H., ve Erdal, B. (2013). Bursa Tarımının Sosyo-Ekonomik Yapısının Analizi. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 27(1), 27–38.

TÜİK. (2024). Population Census of 2024. https://www.tuik.gov.tr

TÜİK. (2025). Coğrafi İstatistik Portalı. Tuik.gov.tr. https://cip.tuik.gov.tr/

U.S.D.A. S.C.S. (1986). Urban hydrology for small watersheds (Technical Release 55).

Vaníček, I., Vaníček, J., & Pecival, T. (2016). Risk evaluation of domino effect of dam failures on small river-basins. In E3S Web of Conferences (Vol. 7, p. 07009). EDP Sciences.

Verstappen, H. T. (1983). Applied geomorphology: geomorphological surveys for environmental development.

Vogel, A. (1991). Die kupfersteinzeitlichen Dämme von Jawa in Jordanien. In Historische Talsperren (Vol. 2, pp. 9–19). Stuttgart: Wittwer.

Wang, J., Walter, B. A., Yao, F., Song, C., Ding, M., Maroof, A. S., Zhu, J., Fan, C., McAlister, J. M., Sikder, M. S., Sheng, Y., Allen, G. H., Crétaux, J.-F., ve Wada, Y. (2022). GeoDAR: Georeferenced global dams and reservoirs database for bridging attributes and geolocations. Earth System Science Data, 14(4), 1869–1899. https://doi.org/10.5194/essd-14-1869-2022

Webster, M. A. R. K., & Sheets, H. D. (2010). A practical introduction to landmark-based geometric morphometrics. The paleontological society papers, 16, 163-188.

Wikipedia contributors. (2012, February 25). Köprü Dam. Wikipedia. Retrieved January 13, 2025, from https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%B6pr%C3%BC_Dam

Yaltırak, C. (2002). Tectonic evolution of the Marmara Sea and its surroundings. Marine Geology, 190(1-2), 493-529.

Yaltirak, C., Yalcin, T., Bozkurtoğlu, E., & Yüce, G. (2005). Water-level changes in shallow wells before and after the 1999 Izmit and Düzce earthquakes and comparison with long-term water-level observations (1999–2004), NW Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences, 14(3), 281-309.

Yıldız, C. (2021) Baraj Yıkılması Taşkın Risk Analizi Yeşildere Barajı Örneği (Tez No. 672653) [Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi]. Yök Tez Merkezi Https://Tez.Yok.Gov.Tr/Ulusaltezmerkezi

Yıldız, G. (2007). Tarihte Baraj Yıkılmaları ve Yıkılmalardan Öğrenilenler. 1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Ankara, s. 701-717.

Yılmaz, M., ve Koral, H. (2007). Yenişehir havzasının (Bursa) neotektonik özellikleri ve jeolojik gelişimi [Neotectonic features and geological development of the Yenisehir Basin (Bursa)]. İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 20(1), 21–32.

Zahno, C., Akçar, N., Yavuz, V., Kubik, P. W., & Schlüchter, C. (2010). Chronology of Late Pleistocene glacier variations at the Uludağ Mountain, NW Turkey. Quaternary Science Reviews, 29 (9-10), 1173-1187.

Zhang, L. M., Xu, Y., & Jia, J. S. (2009). Analysis of earth dam failures: A database approach. Georisk, 3(3), 184-189.

Zhang, R., ve Wang, B. (2022). Seismic hazard and total risk analysis for cascade dams situated in geologically sensitive regions.

Zhang, R., Wang, B., Zhao, F., ve Guan, X. (2023). Seismic hazard and risk analysis for cascade dams situated in Dadu Basin, China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 37(11), 4161-4173.

Zorluer, İ. (1999). Toprak Dolgu Barajlarda Borulanma ve Bir Borulanma Göçmesi: Teton Barajı.