T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜNCEL BARAJ KAZALARININ İRDELENMESİ YOLUYLA BARAJLARIN TİP VE TASARIM KRİTERLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Alin ABA

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ vi
SİMGELER ve KISALTMALAR vii
1. GİRİŞ 1
1.1. Barajların Önemi, Teknik Bilgiler ve Genel Değerlendirme 2
1.2. Baraj Güvenliği 10
1.3. Tezin Amacı ve Özgünlüğü 11
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 12
3. MATERYAL ve YÖNTEM 19
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 20
4.1. Barajlar Hakkında Teknik Bilgiler 20
4.2. Güvenlik Değerlendirmeleri ve Tasarım 29
4.3. İşletme ve Bakıma Dönük İş ve İşlemler 31
4.4. Çalışmada İncelenen Baraj Problemleri 33
4.5. Barajlarda Sızma Problemi ve Çözümler 62
4.6. Betonda Oluşan Problemler ve İyileştirme yolları 68
4.7. Dolusavakta Oluşan Problemler 75
4.8. Ölçmeler ve Yöntemler 78
4.8.1. Dolgu barajlarda kullanılan ölçme aletler 78
4.8.2. Barajlarda deformasyon izlenmesi 79
4.9. Baraj Yeri ve Tip Seçimi 83
4.10. Günümüzde Baraj Hasarlarından Edilen Tecrübeler Doğrultusunda Performans Değerlendirmesi 85
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 87
KAYNAKLAR 91

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÜNCEL BARAJ KAZALARININ İRDELENMESİ YOLUYLA BARAJLARIN TİP VE TASARIM KRİTERLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Alin ABA

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kasım YENİGÜN
YIL: 2022, Sayfa:96

Barajların elektrik üretimi, tarım arazilerinin su ihtiyacının karşılanması; taşkın suların kontrolü, balıkçılık ve diğer avantajlarının yanı sıra yıkılma tehlikesi gibi bazı riskleri de barındırdığı bir gerçektir. Uzun yıllardan beri dünya genelinde pek çok örneği görülen bu hasarlar sonucunda ciddi can ve mal kayıpları da yaşanabilmektedir. Bu tür problemlere karşı koymak için dirençli barajlar inşa edebilmek, muhtemel riskler için de dinamik analizler yapmak gereklidir. Edinilen tecrübeler yoluyla tasarım, inşa, işletme kriterlerini güncellemek ve elde edilen yeni risklere karşı tedbirler alınması sağlanmalıdır.Dünya genelinde sürekli gündemde yer bulan su azlığı dolayısıyla ortaya çıkan gıda ve enerji sorunu ile ilgili olarak su kaynaklarının doğru değerlendirilmesi ve yönetilmesi bir zorunluluk halini almıştır. Dolayısıyla bu maksadı ifa etmeden önce en önemli yapılar arasında bulunan barajların sürekli izlenmesi, bakım ve onarımlarının yapılması, yanı sıra etkilendikleri risk faktörlerinin de ciddi düzeyde tespit ve takibi önemlidir. Bu riskleri en aza indirmek için dünya genelinde baraj güvenliğiyle ilgili akademik ve teknik çalışmalara her zaman ihtiyaç duyulmuştur.Bu çalışmada baraj hasarlarında etkin olan faktörler gözlenmiş, hasar ve yıkılma olayları ele alınmış ve analizleri yapılmıştır. Analiz kapsamında güncel baraj hasarlarının dünyadaki örneklerinin genelinde baraj yaşı, türü, inşa özelliklerinin büyüklüğüne göre detaylı olarak ele alınmıştır. Verilere ulaşma imkânları çerçevesinde özellikle ABD gibi ülkelerin baraj bilgileri detaylı incelenmiştir. Buradan hareketle baraj tasarımı ve inşasındaki genel uygulamalar, kullanılan kriterler hasarlardaki etkinlikleri itibariyle değerlendirilmiştir. Bu çerçevede hem yeni barajların planlama, inşa, kontrol, tasarım aşamalarına hem de mevcut barajların performanslarını güvenlik açısından değerlendirme ve önerilerde bulunulmaya çalışılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Baraj hasarları, Baraj tasarımı, Risk faktörleri, Baraj güvenliği,

ABSTRACT

MSc Thesis

Evaluation of Alternative Preferences and Criteria in Type and Design of Dams Through Experiences from Current Accidents

Alin ABA

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Kasım YENİGÜN
Year: 2022, Page: 96

It is a fact that dams have risks such as collapse or insufficiency in addition to electricity generation, water storage for agricultural areas, control of floods, fishing and other advantages. Because of these damages, many examples of which have been seen in the world for many years, serious loss of life and goods can occur. In order to combat such problems and build durable dams, it is necessary to dynamically analyze possible risks, developing the design, construction and operation criteria using the experiences gained, and in this way, be prepared for new risks. The correct evaluation and management of water resources has become a necessity in relation to the food and energy demand that arises due to water scarcity, which is constantly on the agenda throughout the world. Therefore, continuous monitoring, maintenance and repair of dams, which are among the most important structures in fulfilling this purpose, as well as serious detection and follow-up of the risk factors they are affected are important. In order to minimize these risks, there has always been a need for academic and technical studies on dam safety around the world. In this study, the effective factors in dam damage were discussed and analyzed with observed damage and failure events. Within the scope of the analysis, current dam damages are discussed in detail according to dam age, type, construction features and size across the examples in the world. Within the framework of the possibilities of accessing the data, the dam information of countries such as the USA has been examined in detail. From this point of view, the general applications in dam design and construction, the criteria used were evaluated in terms of their effectiveness in damages. In this context, it has been tried to evaluate and make recommendations for the planning, construction, control and design stages of new dams and the performance of existing dams in terms of safety.

KEY WORDS: Dam damages, Dam design, Risk factors of dams, dam safety

TEŞEKKÜR

Bu tezin proje aşamasından bitiş aşamasına kadar olan sürecinde gerek tecrübesi, gerekse bilgi birikiminin yanında entelektüelliğiyle bana yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Kasım YENİGÜN hocama teşekkür ederim. Ayrıca bu zor süreçte bana destek veren eşime ve aileme çok teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. 1. Patel Barajı, Kenya, 2018 4
Şekil 1. 2. Toddbrook Rezervuar Barajı, İngiltere, 2019 4
Şekil 1. 3. Testalinden Barajı, Kanada, 2010 5
Şekil 1. 4. Tempe Town Lake Barajı, ABD, 2010 5
Şekil 1. 5. Dakrong 3 Barajı, Vietnam, 2012 6
Şekil 1. 6. Gleno Baraj hasarı, İtalya, 1923 6
Şekil 1. 7. Edersee Baraj Hasarı, Almanya, 1943 7
Şekil 1. 8. Fujinuma Barajı, Japonya, 2011 8
Şekil 1. 9. Shakidor Barajı, Pakistan, 2005 9
Şekil 1. 10. Zeyzun Barajı, Suriye, 2002 9
Şekil 1. 11. Vajont Barajı, İtalya, 1963 10
Şekil 4. 1. Yortanlı Barajı, İzmir, Türkiye 23
Şekil 4. 2. Çatalan Barajı, Adana, Türkiye 23
Şekil 4. 3. Baldwin Hill Barajı, Los Angeles, Amerika, 1963 24
Şekil 4. 4. Santa Clara Barajı, Amerika, 2012 24
Şekil 4. 5. Oroville Barajı, California, Amerika 25
Şekil 4. 6. Taum Sauk Barajı, Missouri, Amerika 26
Şekil 4. 7. Ilısu Barajı, Mardin, Türkiye 26
Şekil 4. 8. Dworshak Barajı, Idaho, Amerika 27
Şekil 4. 9. Roseland Barajı, Fransa 27
Şekil 4. 10. Karakaya Barajı, Diyarbakır, Türkiye 28
Şekil 4. 11. Beydağ Barajı, İzmir, Türkiye 28
Şekil 4. 12. Oroville baraj hasar görüntüsü 32
Şekil 4. 13. Hasarların baraj tipine göre yüzdesi 50
Şekil 4. 14. Big Bay Lake Barajı, Mississippi, Amerika, 2004 51
Şekil 4. 15. Baraj yaşına göre hasarların yüzdesi 52
Şekil 4. 16. Hindistan'da Gujarat'ta Machhu II Baraj hasar görüntüsü, 1979 52
Şekil 4. 17. Toddbrook Rezervuar Barajı, İngiltere, 2019 53
Şekil 4. 18. Baraj büyüklüğüne göre hasarların yüzdesi 54
Şekil 4. 20. 73 m yüksekliğindeki Xe pien Xe Namnoy Barajı, Laos, 2018 55
Şekil 4. 21. Hasar nedenine göre sınıflandırma yüzdesi 56
Şekil 4. 22. Üstten aşma nedeniyle Spencer Baraj hasarı, Nebraska, Amerika, 2019 57
Şekil 4. 23. Borulanma nedeniyle Lawn Lake Baraj hasarı, Amerika, 1982 57
Şekil 4. 24. Tasarım yetersizliğinden Tous Baraj hasarı, İspanya, 1982 58
Şekil 4. 25. Sızmadan meydana gelen Testalinden Barajı, Kanada, 2010 58
Şekil 4. 26. Yıllara göre hasar görme yüzdesi 60
Şekil 4. 27. ICOLD yapım amacına göre baraj sınıflandırılması 61
Şekil 4. 28. Yapım amacına göre sınıflandırılma oranı 62
Şekil 4. 29. Geosentetik Kil (GCL) 63
Şekil 4. 30. GCL bitimi ve granüle bentonit detayı 64
Şekil 4. 31. Barra Grande Barajı'ndaki beton hasarı 65
Şekil 4. 32. Campos Novos Baraj Hasarı, Brezilya, 2006 65
Şekil 4. 33. Tiansheng Qiao Barajı'ndaki hasar, Çin 65
Şekil 4. 34. Su tutucuların altına neopren yerleştirme işlemi 66
Şekil 4. 35. Uçucu kül uygulaması 67
Şekil 4. 36. Epoksi uygulaması 67
Şekil 4. 37. Bentonit görünümü 68
Şekil 4. 38. Ön yüzü beton uygulamaları 69
Şekil 4. 39. Beton bordür uygulaması 69
Şekil 4. 40. Beton bordür kalıp uygulaması 70
Şekil 4. 41. Ard soğutma sistemi 71
Şekil 4. 42. Ard soğutma sistemi ve ısı kontrolü 72
Şekil 4. 43. Betonda titreşim uygulama yöntemi 74

Şekil 4. 44. Beton yüzeyinde kürleme işlemi 74
Şekil 4. 45. Soğuk havalarda beton koruma yöntemi 75
Şekil 4. 46. Işımak kullanarak soğuk havada beton koruması 75
Şekil 4. 47. Glen Kanyon Barajı ve kavitasyon 76
Şekil 4. 48. Silika Dumanı 77
Şekil 4. 49. Ilısu Barajı'nda şekerli su kullanımı 78
Şekil 4. 50. Bitüm kaplama işlemi 78
Şekil 4. 51. Jeodezik olmayan ölçme aletleri 81
Şekil 4. 52. Yıprak Baraj memba şevindeki membran kaplaması 82
Şekil 4. 53. Kaya birleşim bölgelerinde sıkıştırma yöntemi 83

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 4. 1. Çalışmada değerlendirilen 1800-2020 yılları arasındaki bazı baraj hasarları 33
Çizelge 4. 3. Baraj tipine göre hasarların sınıflandırılması 50
Çizelge 4. 4. Hasarların baraj yaşına göre sınıflandırılması 51
Çizelge 4. 5. Baraj yüksekliğine göre hasar sınıflandırılması 53
Çizelge 4. 6. Yıkılma nedenine göre sınıflandırılma 56
Çizelge 4. 7. Yıkılma yıllarına göre baraj hasar sınıflandırılması 59
Çizelge 4. 8. Yapım amacına göre sınıflandırılma 61
Çizelge 4. 9. Jeodezik yöntemlerle ölçme aletleri 80
Çizelge 4. 10. Jeodezik olmayan yöntemlerle ölçme aletleri 80

SİMGELER ve KISALTMALAR

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AP	Associated Press
ASDSO	Association of State Dam Safety Officials
C	taşkın kontrolü
DSİ	Devlet Su İşleri
F	Balıkçılık
GCL	Geosentetik kil
H	Hidroelektrik
I	Sulama
ICOLD	Uluslararası Büyük Baraj Komisyonu
kg	Kilogram
km	Kilometre
lt	Litre
m	Metre
m^3	Metreküp
M.Ö.	Milattan Önce
NFT	Navigasyon, balıkçılık ve atık
O	Diğer
ÖYBK	Ön Yüzü Beton Kaya Dolgu Baraj
R	Rekreasyon
S	Su temini
SSB	Silindirle sıkıştırılmış beton
X	bilinmiyor
$	Dolar

1. GİRİŞ

Su yapıları, ulaşım kolaylığıyla ve yenilenebilme olasılığı yüksek olmasından dolayı içme, kullanma, sulama, akarsu ulaşımı, enerji üretimi ve sanayi suyu gibi insanoğlunun temel ihtiyaçlarını karşılanmasında en etkin kaynaklardır.

Barajlar akarsu vadisini tamamen kapatmak suretiyle, suyu depolamak için hazne oluşturan yapılardır. Barajın su depolamasının yanında, su seviyesini yükseltme ve geniş su yüzeyi oluşturması nedeniyle akışın kontrol görevleri de vardır. Bu görevleri sağlayabilmek adına yapılacak barajların en muvazi ebatlı olanı bile, hem inşa alanı hem yapım süresi hem de inşa maliyeti açısından önemli ve inanılmaz büyüklükler gerektirmektedir.

Yüksek maliyetlerine rağmen barajlar, su ve enerji temini noktasında doğaya zarar vermeyen bir sürekliliğe sahiptir. Yapıldıkları yerde suyu depolayan barajlar, suyun akışkan özelliğinden dolayı sürekli kuvvete maruz kalmaktadır. Bu durum yapının zaman içerisinde deforme olmasına, önlem alınmadığı takdirde zaman zaman zarar görmesine neden olmaktadır. Bu nedenle baraj emniyeti hem ekonomik olarak hem de çevre sağlığı açısından hayati önem taşımaktadır. Barajların planlanan zamandan daha önce kullanım dışı kalması ekonomik kayıplara neden olurken, zamanında müdahale edilmeyen şekil değişimleri ve bozulmalar, bazen yıkımlara ve telafisi imkânsız can ve mal kayıplarına neden olabilmektedir. Bu sebeple, baraj gövdesi ve yakın çevresindeki değişimlerin belirli periyotlarda izlenmesi, değişimlerin analiz edilmesi ve meydana gelebilecek zararlara karşı önlem alınması gerekmektedir.

Su, tüm canlı varlıklar için vazgeçilmez bir yaşam kaynağıdır. İnsanlar ezelden beri sudan yararlanmak için farklı nedenlerle suyun optimal kullanımına müteveccih projeler tasarlamış ve tasarlamaya devam etmektedir. Bu projelerden biri de baraj yapılarıdır. Barajların inşasında detaylı tasarım, kusursuz imalat ve en uygun işletme koşulları gibi konular tartışılmaz önem taşımasıyla beraber, baraj yapımında veya

işletilmesinde meydana gelebilecek problemlerin de belirlenmesi ve bu problemlere karşı gereken tüm önlemlerin alınması da ehemmiyetlidir. Buna dayalı olarak son yıllarda risk faktörlerini öngören, geçmişte meydana gelen baraj hasarları ve yıkılmalarının bir daha yaşanmaması amacıyla sürekli olarak gelişmekte olan, yapıyla beraber etraftaki yaşamları da korumayı hedef edinen "baraj güvenlik değerlendirmesi" konusu önem kazanmıştır. Baraj güvenliği hem güncel barajlar hem de inşa edilecek barajların tasarımı, imalatı, işletmesi, bakımı ve onarımı gibi konuları da kapsamaktadır. Günümüzde bir çok gelişmiş ülkede hukuki ve teknik alt yapıya varan baraj güvenliği terimi ülkemizde de akademik birimler, konferanslar ve idari meclisler ile birlikte zaman ilerledikçe daha çok değer kazanmaktadır (Ulusoy, 2015).

1.1. Barajların Önemi, Teknik Bilgiler ve Genel Değerlendirme

Eski medeniyetlerde yaşam su etrafında oluşturulmuştur. İster tarım alanlarında ister içme suyu ihtiyaçlarını karşılamak için baraj inşa edilmiştir. Günümüzde bu amaçlara ilave olarak da elektrik üretimini sağlamak için inşa edilmektedir. Bunların yanında birçok amaç bulunmaktadır:

Elektrik üretimi: Günümüzde elektrik üretimi için en çok hidroelektrik santraller tercih edilmektedir. Dünya genelinde rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisi artmasına rağmen barajlar elektrik enerji üretiminde en önemli kaynaktır. Baraj gölünde biriken su, enerji potansiyeline sahip olduğundan, baraj gövdesindeki aralıklardan serbest bırakılarak türbinlerin yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Üretilen enerji mekanik olmasından dolayı çevreye herhangi bir zarar vermemektedir. İşlemden geçen su temiz kaldığından dolayı tekrar kullanmak amacıyla kaynak yatağına geri gönderilmektedir. İçme ve sulama: su kaynakları zaman ilerledikçe yetersiz hale gelmektedir. Bu kaynaklar yetersiz olduğu bölgelerde içme ve tarımda sulama suyunu sağlamak için barajlar tasarlanmaktadır. Barajlardan gelen su arıtmadan geçirilerek filtrelenir ve içme su şebekesine aktarılır. Barajlarda biriken su ise kanallar yoluyla tarım arazilerini sulamak için gönderilir. Taşkın kontrolü ve önleme: Akarsu debisinin yüksek olduğu yerlerde taşkın meydana gelmektedir. Su akışını kontrol etmek için akarsu yatağında barajlar inşa edilir. Barajlar suyu depolayarak akış hızını düşürüp kontrollü şekilde çevreye zarar vermeden dengeli akışı sağlar. Atık biriktirme: Maden

ocaklarında üretim işlemleri sırasında çıkan atıkların çevreye zarar vermemesi amacıyla barajlar inşa edilir. Barajlar kirli su ve maden atıklarını çevreden uzak tutarak gölünde depolar. Atık barajlarda sızma, erozyon ve taşkın olasılığının yüksek olmasından dolayı proje tasarımının aşamasında daha çok hassasiyet göstermek gerekmektedir (Güneş, 2020).

Yukarıdaki sıralanan baraj faydaları yanında dolaylı faydalar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Su depolama sonucunda iklimde olumlu değişmeler olması,
- Ulaşım imkanları sağlanması,
- Balık çiftlikleri kurulmasıyla balıkçılığın gelişmesi (Yamula Barajı),
- Su taşımacılığın gelişmesi,
- Göl etrafında mesire alanları olarak hizmet vererek turizme olumlu etkiler yapması,
- Su sporların gelişimi.

Ancak bu faydaların yanında çevreye bazı zararları olmuştur, bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Bozulmuş doğa dengesi,
- Rezervuar alanında kalan arazilerin devre dışı olması,
- Yolların göl alanında kalmasından dolayı yeni ulaşım yatırımların yapılması,
- Rezervuardaki buharlaşan sudan dolayı su miktarının azalması,
- Su kütlesinin atması nedeniyle çevredeki heyelan riski ve diğer jeolojik olayların meydana gelmesi,
- Tarihi eserlerin göl alanında kalması, (Erkaya ve ark., 2004).

Barajların önemli olması yanı sıra bu barajların zamanla yapısal özelliklerindeki değişmelerden dolayı barajların yıkılma ve hasar oluşma nedenleri de değişmektedir. Günümüzde baraj gövde yıkılma ve hasar görme olmak üzere biçimlendirilir. Baraj yıkılma tarihine bakınca her barajın kendine ait özel bir yıkılma nedeni olmuştur. Araştırmaların gelişimiyle baraj yıkılma nedenleri aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

1) Şiddetli yağış sel veya taşkınlar (Şekil 1.1'deki Patel Barajı Kenya'da 2018 Mayıs ayında 48 kişi hayatını kaybetmiştir) (Ramya ve ark., 2021).



Şekil 1. 1. Patel Barajı, Kenya, 2018

2) Yetersiz dolusavak (Şekil 1.2'de verilen Toddbrook rezervuar Barajında, İngiltere'de 2019 yılında 1500 kişi evinden olmuş, onarım maliyeti 15 milyon pound çıkmıştır) (BBC, 2021).



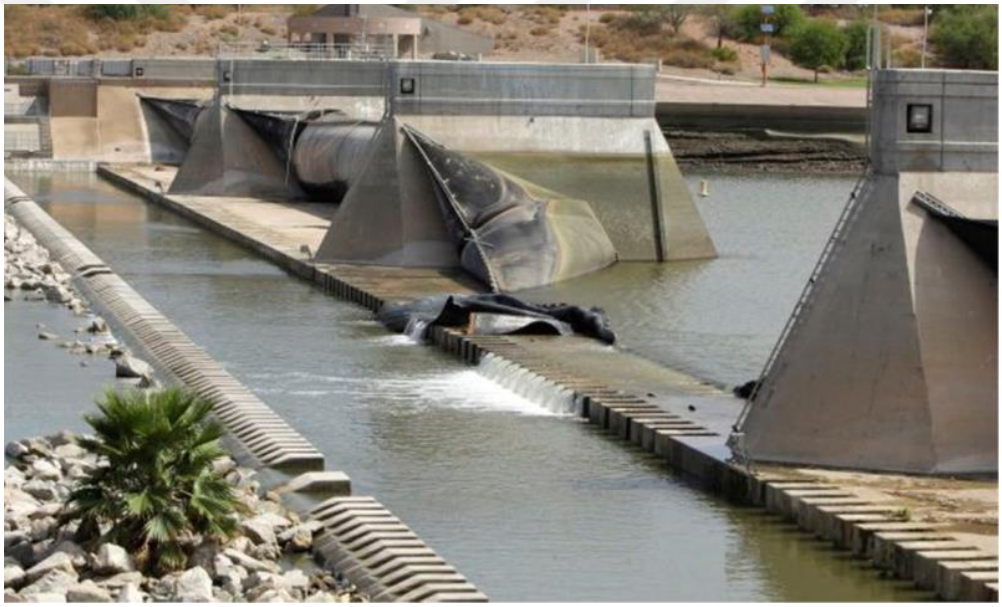
Şekil 1. 2. Toddbrook Rezervuar Barajı, İngiltere, 2019 (BBC, 2021)

3) Gövde dolgusunda veya temelde oluşan borulama (The Meadows Barajı ABD'de 2012 de bir kişinin ölümü ile sonuçlanmıştır.) veya sızma (Şekil 1.3'te verilen Testalinden Barajı, Kanada'da 2010 yılında yaşanan hasarın onarım maliyeti 20 milyon $ olarak gerçekleşmiştir) (Johnson, 2021).



Şekil 1. 3. Testalinden Barajı, Kanada, 2010

4) Uygun olmayan işleteme veya yetersiz bakım (Şekil 1.4'te verilen Tempe Town Lake Barajı, ABD'de 2010 yılında hasar görmüştür) (Richards, 2020).



Şekil 1. 4. Tempe Town Lake Barajı, ABD, 2010 (Richards, 2020)

5) Yetersiz tasarım (Şekil 1.5'te verilen Dakrong 3 Barajı, Vietnam'da 2012 yılında oluşan hasar 960.000 $ olarak gerçekleşmiştir) (Nhandan, 2012) veya uygun olmayan malzeme (Şekil 1.6'da verilen Gleno Barajı, İtalya'da 1923 yılında meydana gelen hasarda 356 kişi hayatını kaybetmiştir) (Pilotti ve ark., 2011).

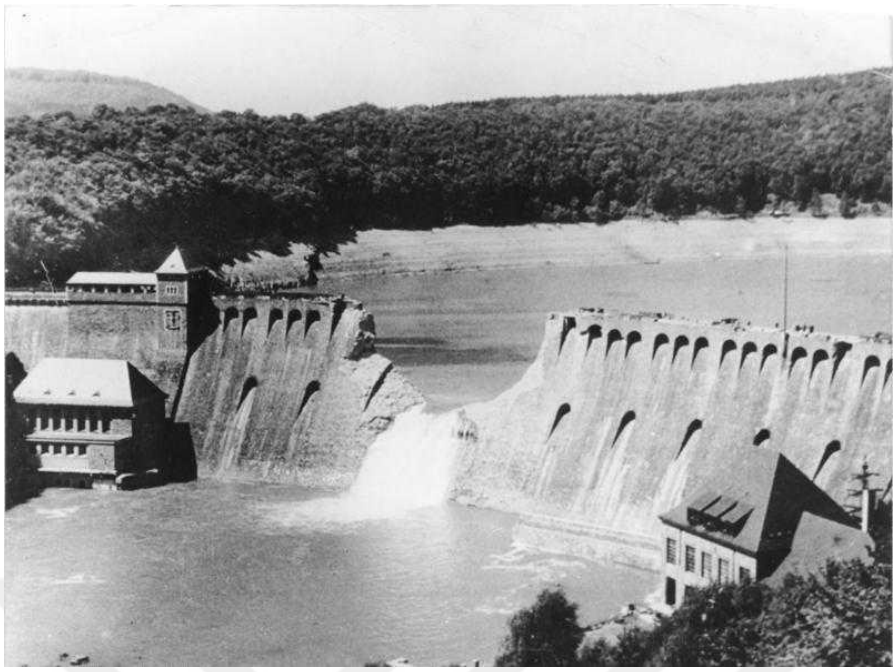


Şekil 1. 5. Dakrong 3 Barajı, Vietnam, 2012 (Nhandan, 2012)



Şekil 1. 6. Gleno Baraj hasarı, İtalya, 1923 (Pilotti ve ark, 2011)

6) Erozyona yol açan dalga hareketi veya şiddetli rüzgar
7) Terör saldırması veya savaş (Şekil 1.7'de verilen Edersee Barajında -Almanya 1943- II Dünya savaşında 90 kişi hayatını kaybetmiştir) (Bhrati ve ark., 2020).



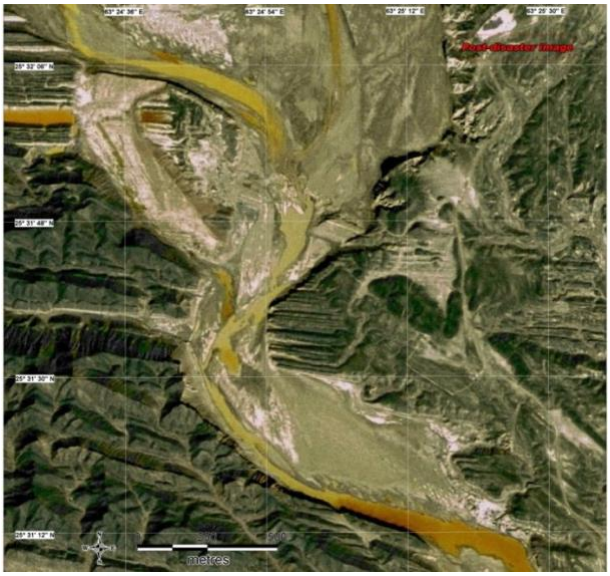
Şekil 1. 7. Edersee Baraj Hasarı, Almanya, 1943

8) Deprem (Şekil 1.8'de verilen Fujinuma Barajında, -Japonya 2011- deprem nedeniyle 8 kişi hayatını kaybetmiştir) (Bhrati ve ark., 2020).



Şekil 1. 8. Fujinuma Barajı, Japonya, 2011 (Pradel ve ark., 2012)

9) Rezervuarda aşırı akım bulunması (Şekil 1.9'da verilen Shakidor Barajında - Pakistan 2005- hasar meydana geldikten sonra 70 kişi hayatını kaybetmiştir) (Bhrati ve ark., 2020).



Şekil 1. 9. Shakidor Barajı, Pakistan, 2005 (International Chater Infographic, 2005)

10) Yetersiz veya uygunsuz filtre tasarımı (Şekil 1.10'da verilen Zeyzun Barajında, 2002 yılında -Suriye- 22 kişi hayatını kaybetmiş ve toplam hasar maliyeti 6 milyon dolar olarak gerçekleşmiştir) (Bhrati ve ark., 2020).



Şekil 1. 10. Zeyzun Barajı, Suriye, 2002

11) Yer kayması veya kaya düşmesinden kaynaklayan üstten aşma (Şekil 1.11'de verilen Vaiont Barajında -İtalya- 1963 yılında 2056 kişinin yaşamını yitirmiştir) (Abay ve ark., 2015) .



Şekil 1. 11. Vajont Barajı, İtalya, 1963 (Christopher ve Alessandro, 2003)

Ancak barajların maliyeti yüksek olması, yıkılma veya hasar gören barajlardan ders alarak ve mühendislik tecrübelerden faydalanarak bu felaketlerle karşılamamak veya riski en aza indirmek için daha güvenli yapılar inşa etmek gerekmektedir.

1.2. Baraj Güvenliği

21. yüzyıldayız ve hala baraj kazaları yaşanmaktadır. Bu hasarların kimi işletme kimi planlama kimi iklim değişlikleri kimisi ise doğal afetleri gibi çeşitli nedenlerden dolayı meydana gelmektedir. Barajlarda görülen hasarların analiz edilmesiyle genel bir değerlendirme yapmak mümkündür. Baraj güvenliği planlama, işletme, bakım, tasarım ve inşa sürecinde kullanılan bir terimdir. Barajlar, diğer su yapıları gibi hacmi büyük, tasarım süresi uzun ve yüksek maliyetlidirler. Dolayısıyla planlama, inşaat ve işletme süresinde oluşacak tüm risklerden ve güvensizliklerden kaçınmak amacıyla baraj güvenliğine yönelik bir çok araştırma yapılmaktadır. Hem bu riskleri önlemek hem de meydana gelecek hasarları en aza indirmek için çözümler bulmak gerekir (Abay ve ark, 2015).

1.3. Tezin Amacı ve Özgünlüğü

Bilim uzmanların fikirleri ve meslek kuralları baraj inşaat sektöründe çok önem taşımaktadır. Bu tür tecrübeler çok az sayıda yazılı çalışmaya aktarılmıştır. Baraj planlama, inşa ve bakım süresinde tecrübeli mühendislere danışmak her zaman mümkün olmayabilir. Bu çalışmada, barajların yıkılmasında oluşabilecek faktörler, gerçek hasar ve yıkılma gözlem ve istatistikleri ile ele alınmıştır. Ardından, oluşan etkilerin analizleri yapılmıştır. Güncel baraj hasarları, dünyadaki örnekler genelinde, baraj yaşı, türü, inşa özellikleri ve büyüklüğüne göre detaylı olarak incelenmiştir. Buradan yola çıkarak, bu konu ile ilgili genel uygulamalar, tasarım ve inşa kriterlerindeki değişimler ve alternatif görüşler değerlendirilmiştir. Hem yeni inşa edilen barajların planlanması, inşası, kontrol ve tasarım aşamalarının ve hem de mevcut barajların performanslarının güvenlik açısından değerlendirilmesi açısından önerilerde bulunulmuştur.

Yeni barajlarda yaşanabilecek olumsuz olayların önüne geçilmesi için, geçmişte yaşanan baraj hasarlarının nedenlerinin incelenmesi, büyük ve küçük barajlardaki hasarların istatistik değerlendirilmelerinin yapılması, barajların planlama, inşa, kontrol ve işletme aşamalarındaki güvene bağlı farklı önerilerde bulunması ve barajların tip seçiminde farklı alternatiflerde bulunması açısından, bilimsel veriler ışığında yapılacak çalışmalarla, olumsuz durumlar minimum seviyeye indirilmesi planlanmaktadır. Bu çalışma sonucunda, elde edilecek bilgilerle yaşanabilecek ekonomik zararlar ve can kayıplarının aşağı seviyelere çekilmesi hedeflenmektedir. Toplumda oluşabilecek ekonomik zararların dışında, toplumun sosyal yaşantısını etkileyecek olumsuzlukların önüne geçmek de hedeflenmektedir. Bu durum toplum yaşantısında, maddi refah açısından katkı sağlayacaktır. Elde edilen bilgilerin yeni çalışmalara veri kaynağı oluşturması beklenmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Öziş (1983), insan hayatındaki en değerli kaynak su olduğunu ve onu en değerli ve verimli şekilde kullanmak, sudan kaynaklanan her türlü zarardan korunmak için çeşitli su yapıları ve en mühimi barajları inşa etmişler. Barajlar suyu rezervuarında biriktirip taşkından korunmakla beraber çeşitli amaçlarla inşa edilmiş büyük maliyetli yatırımlardır.

Kızılkaya ve Yegül (1988), bilimsel araştırmalarında dünya insanlar için su ve su yapıların hava ve toprak kadar ehemmiyetli olup dünya genelinde toplam suyun %1' i sadece kullanılabilir haldedir. Suyun değerli olarak kullanması, insanlar tarafından israf edilmemesi ve suyun temiz kalıp iyi önlemlerin alınmasından bahsetmiş olup aksi takdirde önümüzdeki yıllarda insanlar su kıtlığı rastlanabilir.

Uzel (1991), hasar gören 200 baraj üzerinde çalışma yapmıştır ve bu hasarlardan yaklaşık 8000 kişi hayatını kaybetmiştir. Uluslararası büyük barajlar komisyonun (ICOLD) yaptığı çalışmaya dayanarak 1965 yılına kadar 202 büyük baraj hasarı görülmüştür. Çalışmada hasar ve yıkılmaların oluşması nedeniyle uzmanların daha tedbirli olmaları ve planlama, tasarım, inşa, işletme ve bakım aşamalarındaki riskleri ve bu risklerin faktörlerini araştırıp incelemenin önemine dikkat etmiştir. Hasarların en yaygın nedenleri ise temelde oluşan problemler ve dolusavak yetersizliğinden kaynaklanmış olup değerlendirilmiştir.

Rizzo ve Bair (1998), yaptıkları çalışmada baraj tipine göre yıkılma / hasar nedenine odaklanmıştır, Vincent No II barajında dolusavağın görevi kar nedeniyle engellenip üstte aşma meydana gelmiştir, benzer durumda borulanma nedeniyle Amerika'da Idho eyaletinde hasar gören Teton Barajı'nda 11 can kaybı meydana gelmiş ve bu hasar yaklaşık 400 milyon dolara mal olmuştur.

Viseu ve Martins (1998), küçük barajlarla yaptıkları çalışmada, çok küçük barajlarda da büyük barajlar kadar can kayıpları oluşabildiğini vurgulamıştır. Küçük barajların tasarımı, inşası, yapımı ve işletmesi ile ilgili olan gereksinimler ve

koşullar, büyük barajlar kadar önem taşımamakta olup sıkı denetim yapılamamaktadır. Ayrıca uyarı sistemleri küçük barajlarda pek yeterli görülmemektedir. Her ne kadar küçük barajlar kayıtlara geçmeyip yeterli bilgi bulunmasa da dünya genelinde küçük barajların sayısı büyük barajların sayısından daha fazladır.

Yenigün (2001), barajların çoğunun hedeflendiği şekilde çalışmadığını, hasar gördüğünü ve bu nedenlerden bahsetmiştir. Ayrıyeten ICOLD'un yaptığı bir araştırmada 1900-1975 yıllar arasında 15 m'den büyük barajların yapısal hasarlarını incelemiş olup, beton barajların hasarları ; % 29'u baraja gövdesinin üzerinden su aşmasıyla, %53'ü temelden kaynaklanan problemlerle, %18'i ise farklı nedenlerle meydana geldiğini, dolgu barajların hasarları; %35'i baraj gövdesinin üzerinden su aşmasıyla, %21'i temelden kaynaklanan problemlerle, %38'i sızma ve borulanma, %18'i ise farklı nedenlerle meydana geldiğini belirtmiştir. Ve aynı çalışmada tüm tipteki barajların hasarları; %34'ü baraja gövdesinin üzerinden su aşmasıyla, %30'u temelden kaynaklanan problemlerle, %28'i sızma ve borulanma, %8'i ise farklı nedenlerle gerçekleştiğini belirtmiştir.

Yenigün ve Erkek (2002), yaptıkları çalışmada barajların güvenliğinin ehemmiyetli olması, hasarların nasıl kötü sonuçlarla yol açabileceğini ifade etmişlerdir. Baraj mühendisleri diğer tüm mühendisler gibi planlama ve işletme sürecinde risk mühendisliği yaklaşımıyla bir risk analizi yapmak, kabul edilebilir bir riskin olması ve bu riski oldukça alçak tutmanın önemine değer vermişlerdir.

Yenigün ve Gerger (2006), yaptıkları çalışmada dünyanın nüfusu hızlı bir şekilde artmakta olup buna benzer bir oranda insanların suya olan ihtiyacı da hızlı artmaktadır. Suyu gerektiği şekilde kullanmayınca su kaynaklarınında azalma olacağını vurgulamışlardır.

Rico ve ark. (2007), çalışmalarında dünyadaki güncel baraj kaza ve yıkılmalarının detaylı olarak araştırmışlardır. Oluşan pek çok kazanın verileri değerlendirildiğinde bunların; barajların konumu, yapısal ve fiziksel özellikleri, sanal ve gerçek nedenler, sosyo ve ekonomik nedenler ve iklim gibi parametrelere bağlı

olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca Avrupa'da yaşanan baraj kazalarının %18'i yüksekliği 10-20 m arasındaki barajlarda meydana gelmektedir. En belirgin sebebi ise anormal yağış olaylarından kaynaklanmaktadır. Bu duruma ilave olarak, deprem sonucunda meydana gelen kazalarda mevcuttur.

Emiroğlu (2008), baraj tip seçiminde birçok faktörlerin etkisi olduğunu göstermiştir. Seçime karar vermeden önce tüm faktörlerin tecrübeli mühendisler tarafından değerlendirilip analiz etmelidir. Çalışmasında farklı tip temeller için bir çok kaide sunulmuş ve bu kaidelerine dayanarak tip seçimindeki hataların azaltılabileceği gösterilmiştir.

Shaver (2009), Yeni Zelanda'da bulunan Hawke's Bay'da bulunan baraj tasarımları da referans projeler arasında yer almaktadır. Bu barajların tasarımı, yapısı itibarıyla küçük olup birçok avantaja sahiptir. Suya kolayca ulaşmak, enerji üretimi, sel sularını depolayarak kazaların önüne geçmesi, su kalitesini değerlendirmesi, yangın söndürme, balıkçılık ve estetik açıdan yararlı önemli yapılardır. Ancak barajların tasarım ve yapısal tehlikeleri de mevcuttur. Barajlar suyu biriktirir. Biriken suların yoğunluğu yaklaşık olarak 1 kg/lt veya 1000 kg/m3 olup baraja uyguladığı basınç derinlikle doğru orantılı olarak artmaktadır. Baraj güvenliği barajın gerilme gücünü ve sızdırmazlığına da bağlıdır. Yeterli sıkıştırma ile geniş bir kesite sahip olması ve kesit boyunca sızıntıyı giderme yöntem ve uygulamalar, baraj stabilitesini sağlayan güvenlik etmenleridir. Yeni Zelanda'da 1150'den daha fazla büyük baraj bulunmaktadır ve tüm inşaat yasaları buna göre düzenlenmiştir. Baraj güvenliği genel olarak tasarım, inşaat yapısı ve devam eden işlemler olmak üzere üç aşamaya ayrılarak gerçekleştirilmektedir.

Akkaya (2010), çalışmasında farklı tipteki barajların farklı yöntemlerle maliyet mukayesesi hazırlanmıştır. Devlet Su İşlerinin verdiği birim fiyatla yaklaşık maliyetlerini bulmuştur. İnşaatın her mevsimde sürebilmesi, geniş alanlarda temelin yayılması, zemin gerilmesinin emniyette kalmasında dolayı, düşük zonlu beton, zonlu kum çakıl dolgu, ön yüzü beton çakıl dolgu ve silindirle sıkıştırmış beton barajlar arasında en ekonomik tip zonlu kum çakıl dolgunun olması bulunmuştur.

ICOLD (2010), güvenlik deprem değerlendirmesi ve maksimum güvenilir depremle ilgili bir çalışmaya varılmıştır. Deprem için dönüş periyodu yörüngesi kullanılır, baraj büyüklüğüne göre farklı metotlarla deprem güvenliği incelenir. Büyük barajların deprem dönüş periyodu 10.000 yıl olarak seçildiğini açıklamıştır. Bu olayın nadir olduğundan dolayı sonucu tahmin etmek zordur, buna dayalı gözlemlenen tecrübelerden ve mevcut baraj güvenlik değerlendirmelerinden faydalanarak yeni barajların tasarımında rehberlik yapılmaktadır.

Yenigün (2012), yaptığı çalışmada iklim değişikliğinden kaynaklanan baraj hasarları ve bunun su kaynaklarına olan etkisini doğrudan değerlendirmiştir. Özellikle taşkına dayalı baraj güvenliğinin değerlendirilmesinin önemi vurgulanmıştır.

Yenigün ve Sepetçioğlu (2012), Hidrolik yapıların üzerinde yaptığı güvenirlik analiz çalışmalarında barajların hasar nedenlerini açıklayıp her bir nedene örnek vermiş, güncel barajların hasarlarına değinilmiş ve Ka Loko Barajı (Hawai 2006), Zipingpu Barajı (Çin 2008), Lake Delhi Barajı (Iowa, Amerika 2010) ve Gökdere Köprü Barajı (Türkiye 2012) örneklendirilrmiştir.

DSİ (2012), barajların planlama, tasarım, inşa, işletme ve bakım aşamalarından bahsetmiş olup barajda oluşan hasarlar ve onarımlarla ilgili bilgiler vermiştir. Barajlarda oluşabilecek hasarların önlenmesi veya onarım çalışmalarının önemliliğini vurgulanmıştır. Barajlarda oluşabilen sıkıntıların üzerinde durup ilerideki dönemlerde planlama, tasarım, inşa, işletme ve bakım alanlarındaki çalışmalara özendirmiştir.

Hughes (2012), dolgu ve temelde oluşan aşırı sızmanın iç erozyona sebep olduğu ve barajın yetersiz kalmasıyla hasar gördüğü ifade edilmiştir. Erozyon genelde yavaş başlar ve suyun yavaş akmasıyla toprağı taşır, daha sonra erozyon hızlı ilerler ve borulanmaya neden olur. Tamamen su geçirimsiz bir baraj yapmak zor olduğundan dolayı sızma her zaman meydana gelecektir. Burdan yola çıkarak temel ve dolgu, sızmayı kabul edilecek şekilde, uygun drenaj ve filtre tasarlanmasının yeterliliğinden bahsedilmiştir.

Gaps Guidelines (2015), zaman içerisinde ortaya çıkan baraj kazalarını göz önünde bulundurularak farklı baraj projeleri ve tasarımlarını ortaya koymuştur. Baraj projelerinde üzerinde durulan gerilme göstergesi barajın fiziksel durumuyla paralellik göstermektedir. Fiziksel durum değişikliğinin meydana gelmesinde, boşlukların yoğunluğu, sızmanın artması, şiddetli drenaj, borulanma, iç kanalizasyon, erozyon, toprak kayması, çökme, dikey eğim ve temel hazne başlıca nedenler olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca toprak yoğunluğu, dalga hareketlerinden dolayı dengesiz yamaçların çökmesine ve toprak kaymasına sebep olabilmektedir.

George (2015)'e göre yapılan projelerde barajların kurulduğu bölgelerin ne kadar önemli bir yere sahip olduğunu görmek önem arz etmektedir. Proje bakımından kendine özgü projeye sahip barajlara rastlamak ta mümkündür. Kagir barajlardan sonra ise yapımı 1958'den 1969'a kadar devam eden Nagarjunsagar barajı örnek verilebilir. Bu baraj Krishna Nehri üzerinde yapılmıştır. Sıralı moloz taşı duvarı, kireçli betonarme karışımından oluşmaktadır. Kagir barajı günümüzde artık kullanılmamaktadır. Bu tip barajların kullanılmamasının sebepleri ise günümüzde üretimi daha kolay malzemelerin bulunması ve farklı inşaat tekniklerinin ortaya çıkması olarak ifade edilebilir. Günümüzde ağırlık barajları, beton kütlesinden inşa edilmektedir. Betondan inşa edilen farklı baraj inşası türleri de mevcuttur. Bunlar çok payandalı ve çok kemerli barajlardır. Hindistan'da bulunan Periyar Nehri'nin üzerinde bulunan Idukki Barajı bu örneklerden bir tanesidir.

Abay ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada barajların faydalarının yanında rezervuardaki biriktirdiği su ve kapladığı alanda önemli bir risk ve tehlike olasılığın olduğuna değinilmiştir. Çalışmalarında tarih boyunca meydana gelen baraj hasarları, bu hasarların çevreye verdiği zararlar ve kazaların çıkma nedenleriyle ilgili bilgiler verilmiştir.

Aşık (2016), su kaynaklarının en verimli şekilde kullanmasını sağlayan barajlar, detaylı planlar yapılması sonucunda ve tecrübeli mühendisler tarafından inşa edilmiştir. Bu yapılar yüksek maliyetli olmasından dolayı uzun süre faaliyete kalması beklenir. Barajlar farklı tipte ve farklı nedenlerle inşa edilir. Kimi taşkın

kontrolü kimi elektrik enerji üretimi, kimi tarım sulama, kimisi ise içme suyu, bazıları balıkçılık, ulaşım, su sporları, bazıları turizm alanları gibi çeşitli faydalar sağlayarak inşası yapılır.

Lemperiere (2017), baraj hasarların çoğu şiddetli yağıştan oluşan sellerden kaynaklandığını belirtmiştir. İklim değişikliği de baraj üzerinde bir risk oluşturmaktadır, bu risk olasılığı genelde beton barajlarda düşüktür. Ana risk 10.10^6 m^3 depolayan barajlara ve özellikle tek kapaklı dolusavaklı barajlarda oluşmaktadır. Geçmişte bir arada iki dolusavak kullanmak hasar önleyici bir çözüm olup güvenliği arttırabilmektedir.

Bridle (2017), mevcut barajlarla ve setlerdeki iç erozyonla ilgili ICOLD iç erozyon mekaniği ve direnme yeteneği hakkında bilgi sağladığını açıklamıştır. Mekanik bilgileri ve mekaniğe ilişkin zemin özellikleri olmadan sadece toprak barajın iç erozyona karşı ihtimal değerlendirilmesi yapılır. İç erozyon mekaniği bilgilerine dayanarak hidrolik yükleme, taşkın sırasındaki su seviyeleri ve iç erozyon direnme oranına ulaşılabilir. Buna dayalı olaylara karşı olası tepki değil de gerçek tepki tahmini, bu da gerçek hasar ve yetersizlik olasılığını göz önüne sermektedir.

Gedik (2018), barajların yapım amaçlarına ilave seçimini etkileyen faktörlerden bahsetmiştir. Aynı anda çevreye olan etkilerini vurgulayıp baraj tipinin seçimi için incelenmesi gereken faktörlerle ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

Martin (2018), yaptığı çalışmada Amerika tarihini inceleyerek, baraj yıkılma olaylarının yaygın olduğunu öne sürmüştür. Oluşan kazaların çoğu küçük barajlarda meydana gelmektedir. Bu durumlar sonucunda, mal ve can kayıpları meydana gelmektedir. 1889 tarihinde Johnstoun'da günlerce yağmur yağmasından dolayı, South Fork barajı hasarından bahsetmiştir. Bunun sonucunda 2209 kişi hayatını kaybetmiştir. ABD'de ilk yıkılan baraj 1848 tarihinde Massachussets eyaletinde yıkılan Bancroft barajıdır.

Lyu ve ark. (2019), atık barajların üzerinde yaptıkları çalışmada madencilik işletmelerinde, depolama göl ve havzalarını güvenli halde tutmak en zor görevlerden

saymaktadır. Bu tür atık depolama yapılarında karşılaşılan baraj kazaları benzeri kazalarda diğer su depolama yapılarından daha fazla zarar meydana gelmesinin sebeplerini; bentlerin inşasında toprak kullanılması, büyük atıklar, madencilik atıkları, barajların yüksekliği arttıkça atık su hacminin artması, tasarım standartlarının yetersizliği ve bilimsel olmaması, madenciliğin yapıldığı süreçte izleme maliyetlerinin yüksek olmasını sıralamak mümkün olduğunu söylemiştir.

Güneş (2020), ülkemizde geçmiş yıllarda farklı medeniyetler yaşayıp iz bıraktığı için çeşitli antik yapılara rastlanılabilir. Bu yapıların en önemlisi de Çorum'da Hitit Barajı'dır. Bu medeniyetler, çevreyi gözlemleyen analizlerle çeşitli su yapıları inşa etmiştir. Bu gözlemlerden dersler alarak uygulamaya geçirilmiştir. Eski dönemlerde çevrenin koruması amacıyla çalışmaları yapılmışken, günümüzde ekonomi ve işgücü tasarrufuna daha çok yönelmiştir.

Pinto ve ark. (2022), barajların amacını artırmak için bazen büyük barajlara ilave olarak küçük barajlar da inşa edilmektedir. Küçük barajların yıkılma olasılığı büyük barajlara göre daha fazla ve ciddi hasarlarla sonuçlanabildiğine rağmen küçük barajların bilgileri kısıtlı olup her zaman ulaşmak mümkün olmayabilir. Bu da küçük barajların güvenliğine ve özellikle güvenlik değerlendirmeleriyle ilgili politikalarına dikkat göstermek gerektiğinden bahsetmiştir. Bu güvenliği etkileyen faktörlerin bakım ve onarım olduğunu açıklamıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada izlenecek yöntemler, konuyu yakından ilgilendiren kitap, dergi, makale, gazete, tez, yazılmış argümanlar, ele alınmış dokümanlar ve ayrıca yerli, yabancı kaynaklar ele alınarak karşılaştırılacak ve aynı zamanda bu konuyla ilgili genel bakış açılarının tespiti yapılacaktır. Bu durumda tarafların ortaya koyduğu teoriler ve bu teorilere bağlı olarak istenilen durumlar bilimsel verilere dayandırılarak en gerçekçi şekilde meydana getirilmeye çalışılacaktır. Aynı zamanda başka araştırmacıların bu konuyla ilgili yaptığı çalışmalar göz önünde bulundurularak, daha verimli bir araştırma elde edilecektir. Çalışma yapılırken objektif bakış açısıyla konuya yaklaşılacaktır. Özellikle 2000 yılından günümüze meydana gelen; kaza, hasar, yetersizlik, devre dışı kalma ve yıkılma gibi durumlar yaşayan barajlar;

a) Yaş
b) Konum
c) Tip
d) İnşa şekli
e) Malzeme
f) İşletme özellikleri
g) Extrem olaylar, Vs, gibi parametreler ışığında incelenip istatistiksel anlamda yorumlanacaktır.

Özellikle bu tür güvenlik problemleri sonrasında verilen kararlar, atılan adımlar, yapılan analizler;

a) Uygulanabilirlik
b) Performans
c) Tasarım ve inşa kriterleri, gibi ölçütlerle ele alınacak ve yorumlanacaktır.

Ayrıca çalışma alanı dünya geneli ve en çok veri paylaşan Amerika ve Çin'de 1800-2020 yıllar arasındaki baraj hasarları incelenmeye çalışılmış 297 baraj değerlendirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çalışmanın bu bölümünde hasar gören barajlara dayalı güvenlik çalışmaları ve alınan dersler sonucu elde edilen araştırma ve bulgulara yer verilmiştir.

4.1. Barajlar Hakkında Teknik Bilgiler

Dünya tarihinde kayadan yapılmış barajlar dünyanın birçok yerinde tercih sebebi olmuştur. M.Ö. 2600- 2900 yılları arasına tarihlenen; Mısır'ın Helwan yakınlarında kalıntıları bulunan Sadd El-Kafara barajı tarihteki ilk örnek olarak değerlendirilmektedir. Kalıntılar incelendiğinde baraj duvar yüksekliğinin 14 metreye ulaştığı tahmin edilmektedir. Ayrıca duvar yüzeyinin kesme taş, moloz, çakıl dolgusundan ibaret olduğu da görülmüştür. Barajın yapımı sırasında gerçekleşen sel yüzünden baraj yüzeyinin orta kısmı çökmüştür. Buradan öğrenilen bilgi ise dolgu malzemelerinin sel ile gerçekleşen erozyona karşı korunmamış olduğudur. İran'da Moğol Dönemine tarihlenen bir baraj, Qum Kasabası'nın yaklaşık 24 km güneyinde tespit edilmişti. Kebar Nehri üzerinde bulunan dar bir geçide inşa edilmişti. M.Ö. 1300 yıllarından kalma barajın en önemli özelliği ise "En Eski Kemer Baraj" olmasıdır. Ayrıca yüksekliği 26 metre olup, uzunluğu ise 55 metredir. Baraj duvar yapısı incelendiğinde Harçlı - Taş Blok Cepheli ve Çimentolu Moloz Duvar örgüsünden oluştuğu belirlenmiştir. Bunun yanında Kemer Yapısının sağlamlığını artırmak için Kanyon duvarlarına bindirme yapıldığı da gözlemlenmiştir (Jansen, 1998).

18. yüzyılın sonlarına kadar barajların tasarımı için çok az rasyonel kriter vardı. 1802'de İspanya'nın Rio Guadalentin kenti yakınlarındaki Puentes Barajı'nda yaşanan aksaklıklar, bu sektördeki bazı ampirik yöntemlerin yetersiz olduğunu ortaya koydu. Bu barajda yer çekimine karşı gelinebilmesinin kolaylaştırılması amacıyla 50 metre yüksekliğindeki duvar yapısının tamamı yığma kaya olarak tasarlanmıştır. Fakat, nehir yatağındaki derin alüvyon tabakasının varlığı sebebiyle duvar yapısının temeli yapılırken ahşap kazıklar ve temel destekleme unsurları kullanılmak zorunda kalmıştır. Fakat bütün planlamalardaki eksikler sonucunda duvarın yapımından 11 yıl sonra temel yapısındaki ahşaplar zarar gördüğü ve kaya tabakasını kaldıramadığı için

duvar yüzeyinde büyük bir yarık meydana gelmiştir. On dokuzuncu yüzyılda, kıta Avrupa'sında baraj mühendisliği konusunda dikkate değer birçok ilerleme kaydedilmiştir. Bunlardan en önemlisi Fransız mühendis M. De Sazilly tarafından 1853'de ortaya konulmuştur. Sazilly, bir baraj içerisindeki basıncın belirlenen düzeylerde tutulmasının gerekliliğini ve duvar boyutlarının barajın genel yapısındaki kaymaları engelleyecek bir biçimde sınırlandırılmasını savunmuştur. Bu çıkarımdan yaklaşık 25 yıl sonra İngiltere'den W.J.M. Rankine tarafından "baraj yüzeyini oluşturan düzlemlerin (orta üçte birlik kısmının), baraj oluştuğundaki yaşanacak basınç durumlarının önceden planlanma yaklaşımı" ortaya atılmıştır. Bu yaklaşımların tümü değerlendirildiğinde, günümüzde kullanılan " Barajların Mantıksal Analizi" kavramının temeli o günlerde atılmış olduğunu görmekteyiz (Jansen, 1998).

1882 -1890 tarihleri arasında İngiltere'de inşa edilen Vyrnwy Barajı tasarımında su seviyesinin yükselmesini kontrol altına alabilmek için drenaj sistemi uygulanmıştır. Bu tarihten sonra mühendisler tarafından akarsu rejimi ve yerçekimi kuvvetinin dikkate alınması ile barajlardaki yükselme ve kaymanın önüne geçilmesi şansı olduğu ortaya çıkmıştır.

1900'lü yılların başlarında beton teknolojisi üzerinde bir çok gelişmeler yaşanmıştır. İçeriği hassas şekilde kontrol edilen karışımlar, titreştirme işlemi, Özel Katkılı Çimentolar, Puzolanlar, Agrega İşleme, Hava Sürükleme, Soğutma işlemini hızlandıran katkı maddeleri bu gelişmeler arasında sayılabilir. 1962 yılında İsviçre'de inşa edilen Grand Dixence Barajı bu gelişmelerle birlikte 285 metre yüksekliğine çıkabilmiş ve bu sektörün adeta bir anıtı haline gelmiştir. Yine 1900'lü yılların başlarından itibaren, taşıma ve sıkıştırma işlemlerinde hayvanlar yerine makinaların kullanılması ile birlikte dolgu tipi inşaat uygulamalarının gelişimi hızlanmıştır. Atlı vagonlar yerine Greyderlerin, düz silindirler yerine Tırmıkların, Koyun ayaklı sıkıştırıcılar yerine Paletli Araçların Genel kullanıma sokulması çok hızlı gerçekleşmiştir. 1940'lara gelindiğinde Toprağı ve Kaya'yı hareket ettirmek ve sıkıştırmak için Büyük ve Özel ekipmanlar geliştirilmiştir. 1950 ve sonrasında ise Titreşimli Silindir ile kum ve çakılları sıkıştırma ardından da kaya dolgularının sıkıştırma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

İnşa işlemlerindeki bu tip gelişmeler daha büyük Baraj set duvarlarının yapılmasına doğru verilmiştir. Bu durum ile birlikte daha geniş çalışma sahası kullanımı ve doğal kuvvetlerin göz önünde bulundurularak yapılan geniş duvarları ortaya çıkarılmıştır.

İlk zamanlarda daha popüler olan Kaya Dolgu Barajların yerini, 1940'larda Toprak Çekirdekli Kaya Dolguları, 1960'larda ise Beton Yüzlü Sıkıştırılmış Kaya Dolgusu çeşidi almıştı. Bu tip çalışmalara örnek ise Kolombiya sınırları içerisindeki 1975 yılında yapılan Esmeralda (Chivor) Barajı 237 metre yükseklikte, 1980 yılında yapılan Meksika'daki Chicoasen Barajı ise 261 metre yüksekliğine ulaşmıştı. Barajların bu yüksekliğe ulaşmasındaki en temel olgu da "Toprak Çekirdeği" barındıran Yeni Tip Kaya Dolgu çalışmaları sayesindeydi (Jansen, 1998).

Buradan dünyada bir çeşit değil de birçok baraj tipi bulunduğu anlaşılmaktadır. Buna dayanarak barajları oluşturan unsurları ve amaçları çeşitli olmasından dolayı bir sınıflandırma yapmak pek mümkün değildir. Sınıflandırmayı ancak şu şekilde yapabiliriz:

- Barajların Kullanım amacına göre sınıflandırma: barajlar tek amaçlı veya çok amaçlı olarak inşa edilir. Bu amaçlar içme ve endüstri suyu sağlamak, arazi sulama suyu sağlamak, enerji üretimi ve taşkın kontrolünü yapma olarak tek veya birkaç amaç için planlaması yapılır (Orhan, 1997).

Şekil 4.1’de İzmir’de Yortanlı Barajı tarım sulama amacında inşa edilmiş olup ve Şekil 4.2’de Adana’da Çatalan Barajı taşkın kontrolü ve enerji üretime amacı ile yapılmıştır;



Şekil 4. 1. Yortanlı Barajı, İzmir, Türkiye



Şekil 4. 2. Çatalan Barajı, Adana, Türkiye

- Barajların büyüklüğüne göre: Küçük veya büyük baraj olarak tanımak pek zor olabilmektedir. Uluslararası büyük barajlar komisyonuna göre (ICOLD) yüksekliği temelden 15 m'den büyük veya yüksekliği 5 m ile 15 m olup rezervuar hacmi 3 milyon m^3 ten büyük olan barajlara büyük baraj sınıfına girer (Şekil 4.3 Baldwin Hills

Barajı) aksi takdirde küçük baraj olarak sınıflandırılır (Şekil 4.4 Santa Clara Barajı) (Ağıralioğlu, 2011).



Şekil 4. 3. Baldwin Hill Barajı, Los Angeles, Amerika, 1963



Şekil 4. 4. Santa Clara Barajı, Amerika, 2012

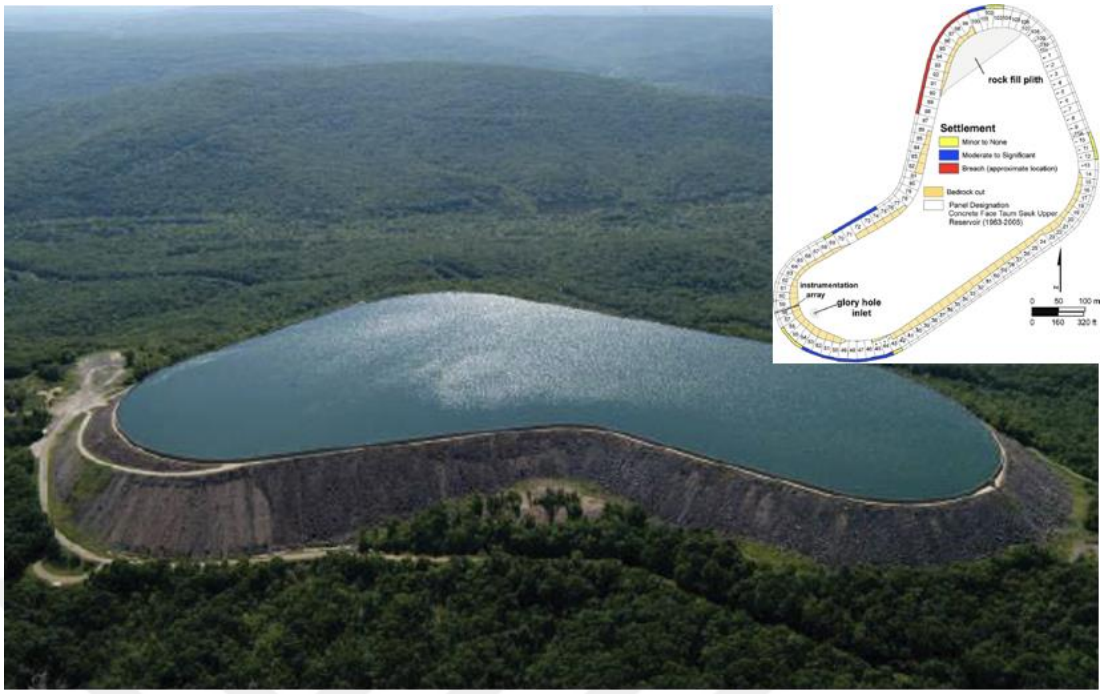
- Barajların gövde tipine göre: barajların gövde statiğine bakarak gövde şekline göre; ağırlık baraj, kemer baraj, kemer ağırlık baraj, payandalı baraj, toprak ve kaya dolgu baraj halinde sınıflandırma mümkün olup kullanılmış malzemeye göre de

sınıflandırmak doğrudur. En yaygın sınıflandırma ise hem gövde malzemesi hem de gövde şekline dayanarak yapılmaktadır (Orhan, 1997).

Dolgu barajlar: toprak dolgu (Şekil 4.5), kaya dolgu (Şekil 4.6), ön yüzü beton kaya dolgu (Şekil 4.7) olarak ayrılır (Ağıralioğlu, 2011).



Şekil 4. 5. Oroville Barajı, California, Amerika



Şekil 4. 6. Taum Sauk Barajı, Missouri, Amerika



Şekil 4. 7. Ilısu Barajı, Mardin, Türkiye

Beton barajlar: beton ağırlık (Şekil 4.8), payandalı beton (Şekil 4.9), beton kemer baraj (Şekil 4.10), silindirle sıkıştırılmış beton baraj (Şekil 4.11) şeklinde ayrılır (Ağıralioğlu, 2011).



Şekil 4. 8. Dworshak Barajı, Idaho, Amerika



Şekil 4. 9. Roseland Barajı, Fransa



Şekil 4. 10. Karakaya Barajı, Diyarbakır, Türkiye



Şekil 4. 11. Beydağ Barajı, İzmir, Türkiye

Ulaşılan verilere dayanarak Türkiye'de bir barajın ortalama yapım süresi 7.1 yıl olduğu görülmüştür. Son yıllarda SSB barajlarının inşa hızı ve kısa sürede işletmeye girebilmesinden dolayı tercih edilmektedir. ÖYBK sistemler ise geniş akarsularda

inşa hızından dolayı tercih edilebilir. Türkiye'de 2010 yıl sonu itibariyle 601 adet büyük baraj bulunmuştur. ICOLD 2013 yılında yaptığı güncelleme ile Türkiye'de 741 baraj olduğunu belirtmiştir. Ülkemizde hemen hemen tüm tiplerden örnek bulunmaktadır. Bunların %71'i toprak dolgu baraj ve %20'si kaya dolgu baraj bulunmakta olup %70'i sulama amacıyla inşa edilmiştir. Çok amaçlı barajların %43'ü ise sulama amacıyla yapılmıştır (Çalamak ve ark., 2013). Türkiye'de 2020 yılında işletmede 861 adet baraj bulunmaktadır (DSİ, 2020).

4.2. Güvenlik Değerlendirmeleri ve Tasarım

Mısır'daki Sedd El – Kafara Barajı dünyada ilk baraj olup inşa edildikten bir süre sonra yıkıldı ve ilk yıkılan baraj örneği oldu. Baraj inşa projesinde savak bulunmamıştı ve bağlayıcı malzeme kullanılmamıştı. Esas sebep gövdenin gevşek olup oturmamasıyla üstten aşma, mansapta aşınma, yüzeyde sızdırmaz malzeme kullanılmamasıyla suyun gövdeyi ikiye ayırmasıydı (Türker, 2021).

Associated Press (AP) in analizine göre ABD'de 2200'den fazla baraj kötü koşullar altındadır. Onarım ihtiyacı olan barajların sayısı yüksek oranda artmıştır. Bu risklerin birçok nedeni vardır; uzun süre bakımı ertelenmiş ve iklim değişliğinden meydana gelen fırtınalardır. Düşük tasarım kriterlerine sahip barajların sayısının artmasıyla hasar / risk oluşma oranı da artmaktadır. Zaman ilerledikçe yüksek tehlike potansiyeline sahip olan barajların sayısı da artmaktadır. Bu barajların onarım maliyeti yaklaşık 76 milyar dolardır (AP, 2022).

Barajların maliyetlerinin yüksekliği, zaman ilerledikçe su kaynakların azalmasıyla baraj yapımın azalması, güncel barajların iyileştirmeye ihtiyaç duyması planlama mühendislerinin bu barajları nasıl koruyacağı, ne kadar süre faaliyette kalacağı, risklere karşı bir çözüm kaynaklarını düşündürmektedir. Baraj güvenliği, artan baraj hasar sayısına göre düşük, önemli ve yüksek risk olarak sınıflandırmaya odaklanmıştır. Baraj güvenlik mühendisliği, bu sınıflandırmayı kullanarak hasarların en yaygın sınıflandırma tipine yönelmektedirler.

- Düşük risk potansiyeli: yıkılma sonucunda herhangi bir mal veya can kaybının olmamasıdır.
- Önemli risk potansiyeli: yıkılma sonucunda insanların can kayıp olasılığın olmaması, ancak ekonomik hasarlar, çevresel zararlar ve yaşam bölgelerinin zarar görme olasılığın olmasıdır.
- Yüksek risk potansiyeli: can ve mal kayıpların olmasıdır (Fema, 2016).

Yalnız bu sınıflandırma güncel ve faaliyette olan barajları kapsamamaktadır. Çünkü risk analizi planlama, inşa, işletme ve bakım aşamaları için yapılmaktadır.

Risk genellikle iki ayrı bileşenden oluşur: hasar olasılığı ve hasar sonucu. Barajların güncel durumunu hasar olasılığı, risk potansiyeli ise hasar sonucunu etkilemektedir. Her iki bileşen de barajın genel risk potansiyeli değerlendirmesinde pay almaktadır (Ryan, 2019).

Baraj güvenliği analizi ve değerlendirilmesi için önceleri baraj mühendisliği içeren birkaç düzenleme gurubu tarafından kullanılmıştır. Bunlar taşkın amaçlı savak tasarımında, taşkın anında rezervuar seviye tahmini tasarımında ve deprem tasarımında uygulanmıştır (Nielsen ve ark., 1994).

Risk analizi yaklaşımı bazı durumlarda faydalı olabilecek uygulamalara sınırlandırmalar getirebilmektedir. Ancak bazı organizasyon deneyimleri sonucunda, Risk Mühendisliği yaklaşımı kullanılarak uzun dönemlerde birçok daha faydanın elde edildiği ispat edilmiştir. Buna göre;

- Ortaya konan riskin projeye olan etki ve etkileşimlerinin algılanması ve tespit edilmesi,
- Ortaya çıkacak risklere karşı, daha iyi bir olasılık planlaması ve aksiyon cetveli hazırlanması, riskin ortaya çıkardığı durumları çözmek için daha karmaşık yollar tercih edilmesi için planlar oluşturulması,
- Oluşabilecek risklerin tanımlanmaları, dizayn ve planlama işlerinde geri bildirimin önemi,

- Projelerin inşa ve işletilme süreçlerinde "İleri Besleme Yaklaşımının", oluşacak riskler içinde Risk Şiddetini Hafifletilme ve Tepki Seçiminin Planlanması,
- Tüm bu riskler dikkate alındığında proje risklerinin azaltılması,
- Projenin gelişme sürecindeki tahmin değerlerinin duyarlılık kriterlerine göre değerlendirilmesi,
- Genellikle bireysel hafızanın güçlendirilmesi yerine dokümantasyon ve ortak hafızanın ilerletilmesi ve kaynaştırılması dikkate alınmalı,
- Gerçek ve doğru bilginin her zaman önemli olduğunun vurgulanması, daha iyi karar veren bir mekanizmanın yerleşmesi ve risk yönetiminde uzmanlaşma,

Yukarıda sayılan tüm maddeler daha iyi bir mühendislik çalışması ile daha sağlıklı yapılar yapılmasını mümkün kılmaktadır (Cooper ve Chapman, 1993).

Risk analiz işlemi, farklı yöntemlerle değerlendirerek baraj yıkılma ve çevre zararlarına odaklanmıştır. Böylece analiz yaparken hiçbir faktör gözden kaçırılmamaktadır.

4.3. İşletme ve Bakıma Dönük İş ve İşlemler

Bir baraj ömrü boyunca muntazam bir şekilde işletme ve bakıma ilave sürekli denetim uygulanmaktadır. Bunları alışkanlık hale getirince işlevlerin düzgünlüğü, maliyet tesirleri, güvenlik koşullarına uyum sağlamasına ilave, eksiklikleri erkenden algılama ve hasarları önlemesinde katkı bulunmaktadır. Baraj yönetim faaliyetlerini sürdürmek, detaylı bir bakım ve işletme yapmak bir barajın faaliyet ömrünü uzatır. İşletme ve bakım barajın tasarım ve kullanım amacına bağlı güvenliğini sağlayan bir mühendislik ekibi tarafından hazırlanır. İşletme ve bakım ana bileşeni baraj operasyonu olup ikincisi ise bakıma odaklanmaktır. Önleyici ve olağan üstü riskler için bakım yapılır. Önleyici bakım sürekli rutin bir şekilde yapılırsa hayvansal etkiler, bitki örtüsü, ekipman bozulması, mekanik arızalar, sel veya hasardan kaçınmak amacıyla gerçekleştirilir. Olağan üstü bakımlar ise hasar gerçekleşmesi halinde yapılması gereken bakım ve onarımlardır. Değerlendirmeler, deneyimli mühendisler tarafından tasarıma dayalı yapılmalı ve güncel koşullarla karşılaştırılmalı. Denetim ise

bakım personelleri tarafından sürekli ve sık sık yapılır. İşletme, bakım, denetim ve değerlendirme risk potansiyeli ve hasar oluşma olasılığı belirlemekle hasardan kaçınmayı sağlar. Bu erken tespitler hem mal hem zaman hem de can kaybı için aşırı önem taşımaktadır (Cover ve ark., 1990).

Yetersiz tasarım, bakım ve onarımdan kaynaklanan baraj hasarlarının tümünün bilgilerine ulaşmak pek mümkün değildir. Son zamanda meydana gelen Amerika'daki Oroville Barajı yetersiz dolusavak tasarımında dolayı aşınma meydana gelip mansapta taşkın oluşmasına neden olmuştur.



Şekil 4. 12. Oroville baraj hasar görüntüsü

4.4. Çalışmada İncelenen Baraj Problemleri

Baraj tarihi boyunca binlerce hasar ciddi oranda can ve mal kayıplarına neden olmuştur. Bir ülkenin nüfus sayısı ve baraj yaşı arttıkça hasar görme potansiyeli de artmaktadır. Tarih boyunca yıkılan tüm barajların verilerine ulaşmak pek mümkün değildir. Türkiye'deki barajların işletmeye açılış yıllarına bakıldığında bir kısmı 50 yıldan daha yaşlı oldukları görülmüştür. Bu yaşlılık, barajda bir kısım arızalanma ve zayıflama problemlerini de beraberinde getirmektedir. Bir Deprem ülkesi olarak bilinen Türkiye'de çok önemli herhangi bir baraj yıkılma olayı gerçekleşmemiştir. Bunun nedeni ise Türkiye'de baraj inşaatın geç başlamasıdır. Bundan dolayı teknoloji ve bilimin ilerlemesinden sonra baraj inşasına başlanmıştır (Ağıralioğlu, 2011). Bu bölümde özellikle verisine ulaşılan Amerika ve Çin'deki 1800-2020 yıllar arasındaki baraj hasarları incelenmeye çalışılmış, bunlar içinden barajların hasar görme mekanizmaları ışığında 297 baraj örneği verilip analiz edilmiştir.

Çizelge 4. 1. Çalışmada değerlendirilen 1800-2020 yılları arasındaki bazı baraj hasarları

Baraj	Tip	Amaç	Yükseklik m	Bitirme yılı	Yıkılma Yıl	Yaş	Rezervuar Kapasitesi (10^6 M^3)	Ülke	Ölüm Sayısı	Detaylar
Edenville Dam	Toprak Dolgu	HC	16	1925	2020	95		ABD	0	Üstten aşma
Sanford Dam		H	11	1925	2020	95		ABD	0	Üstten aşma
Yangshuo county	Toprak Baraj			1965	2020	45	0,965	Çin		Üstten aşma
Charleston Reservoir	Toprak Baraj	S	4,9	1920	2019	99	0,617	ABD		Üstten aşma
Graphic Packaging Sludge Drying Basin Dam	Toprak Baraj	O	3,7	2019	2019	0	0,037	ABD		Yetersiz tasarım
Linn Grove Mill Dam	Ağırlık Baraj	R	2,7	1924	2019	95	0,513	ABD		Üstten aşma
Okobojo Dam	Toprak Baraj	R	6,7	1938	2019	81	3,885	ABD		
Quinn Dam	Toprak Baraj	R	5,2	1937	2019	82	1,067	ABD		
Spencer Dam	Toprak Baraj	H	13,7	1927	2019	92	20,336	ABD		Üstten aşma

Çizelge 4.1. (devamı)

Tiware Dam	Toprak Baraj			2005	2019	14		Hindistan	23	Üstten aşma
Toddbrook Reservoir Dam	Toprak Dolgu	IR	24	1840	2019	179		İngiltere		Dolusavak yetersizliği
Augustine	Toprak Baraj	R	4,3		2018		0,012	ABD		Üstten aşma
Baxley 501 Pond Dam	Toprak Baraj	R	2,1	1953	2018	65	0,194	ABD		Üstten aşma
Cantrell Lake Dam	Toprak Baraj	SR	5,5	1972	2018	46	0,169	ABD		
Cotton Lake Dam	Toprak Baraj	S	4,9	1970	2018	48	0,118	ABD		
Covington Millpond Dam	Toprak Baraj	I	3,3	1900	2018	118	0,493	ABD		Üstten aşma
Cranberry Creek	Toprak Baraj	R	4,6	1973	2018	45	0,37	ABD		Üstten aşma
Crawford Pond Dam	Toprak Baraj	R	4,9	1960	2018	58	0,087	ABD		Üstten aşma
Davids Millpond Dam	Toprak Baraj	O	2,7	1870	2018	148	0,486	ABD		Üstten aşma
Jordan Pond Dam	Toprak Baraj	R	5,8	1956	2018	62	0,108	ABD		Erozyon
Lake Darpo Dam	Toprak Baraj	R	4,6	1957	2018	59	0,18	ABD		Borulanma
Lake Hiddenwood Dam	Toprak Baraj	R	8,2	1926	2018	92	0,585	ABD		Üstten aşma
Mcmeekin Pond Dam	Toprak Baraj	R	2,1	1950	2018	68	0,117	ABD		Üstten aşma
Panjshir Valley	Toprak-Kaya Dolgu	I	104		2018			Afganistan	10	Borulanma
Patel Dam	Toprak Baraj				2018			Kenya	47	Şiddetli yağmurda yıkıldı.
Sanford Dam			12,2	1960	2018	58		ABD		Üstten aşma
Swar Chaung Dam		R		2001	2018	17		Myanmar	4	Şiddetli yağışta dolusavaklarda çatlaklar oluştu.

Çizelge 4.1. (devamı)

Xe pian - Xe Namnoy dam	Toprak Dolgu	H	73		2018			Laos	36	Yetersiz tasarım
Bonasa Breaks Ranch Dam	Toprak Baraj	R	5,8	1960	2017	57	0,044	ABD		Yetersiz dolusavak kapasitesi
Electro Lake Dam	Toprak Baraj	R	3,7	1927	2017	90	0,062	ABD		
Forest Lake Dam	Toprak Baraj	R	4,9	1940	2017	77	0,183	ABD		
Maple Lake	Toprak Baraj	R	5		2017			ABD	0	Yetersiz tasarım
Oroville Dam	Toprak Dolgu	S C H	235	1968	2017	49	36,511	ABD		Yetersiz tasarım
Smith Lake Dam	Toprak Baraj	R	4,9	1950	2017	67	0,086	ABD		
Walker Dam	Toprak Baraj	S	6,7	1965	2017	52	1,048	ABD		Sel nedeniyle hasar oluşması
Amanda Lake Dam	Toprak Baraj	R	8	1959	2016	57	2,327	ABD		Üstten aşma
Arran Lakes Dam	Toprak Baraj	R	6,4		2016		0,178	ABD		Üstten aşma
Bennetts Bridge RD. Dam	Toprak Baraj	O	1,5		2016			ABD		Üstten aşma
Big Millpond Dam	Toprak Baraj	R F	2,7	1900	2016	116	0,089	ABD		Şiddetli yağmurdan meydana gelen hasar.
Blackwell Pond Dam	Toprak Baraj	R	4,9	1960	2016	56	0,09	ABD		Fırtına
Bloomfield Dam	Toprak Baraj	R	10,1	1960	2016	56		ABD		Dolusavak erozyonu
Bowling Pond Dam	Toprak Baraj	R	4,9	1900	2016	116	0,086	ABD		Fırtına
Copeland Pond Dam	Toprak Baraj	R	3,7	1959	2016	57	0,099	ABD		
Devonwood Lower Dam		R	7,6		2016		0,216	ABD		Üstten aşma

Çizelge 4.1. (devamı)

Durhams Lake Dam	Toprak Baraj	R	3,7		2016		0,138	ABD		Üstten aşma
Flowers Pond Dam	Toprak Baraj	R	3,3	1957	2016	59	0,092	ABD		Sel nedeniyle hasar oluşması
Floyd Pond Dam	Toprak Baraj	R	6,4	1950	2016	66	0,084	ABD		Sel nedeniyle hasar oluşması
Gaddys Millpond Dam	Toprak Baraj	R	2,4	1830	2016	186	0,639	ABD		Sel nedeniyle hasar oluşması
Graham Mill Pond Dam	Toprak Baraj	R	4	1930	2016	86	0,147	ABD		Sel nedeniyle hasar oluşması
Guy Lake Dam	Toprak Baraj	R	4,3		2016		0,089	ABD		Üstten aşma
Haire Pond Dam	Toprak Baraj	R	2,7	1949	2016	67	0,111	ABD		Sel nedeniyle hasar oluşması
Martin Farm Pond Dam	Toprak Baraj	R	6,4		2016		0,031	ABD		Borulanma
New WalesPlant	Atık Baraj		18		2016			ABD		İç erozyon
Pee Dee ST Park Dam	Toprak Baraj	R	3	1930	2016	86	0,287	ABD		Sel nedeniyle hasar oluşması
Pepsi Cola Lake Pond Dam	Toprak Baraj	R	3	1950	2016	66	0,059	ABD		
Sales International Dam	Toprak Baraj	R	7,6	1965	2016	51	0,281	ABD		
Able / Cobett Pond Dam	Toprak Baraj	R	3	1955	2015	60	0,072	ABD		Üstten aşma
Banner Lake	Toprak Baraj	F R	4	1960	2015	55	0,138	ABD		Borulanma

Çizelge 4.1. (devamı)

Bastrop State Park Dam	Toprak Baraj	R	5,5	1913	2015	102	0,136	ABD		Üstten aşma
Black Crest Farm Pond Dam	Toprak Baraj	R	6,1	1970	2015	45	0,2	ABD		Üstten aşma
Boyds Pond dam	Toprak Baraj	I	4	1963	2015	52	0,084	ABD		Üstten aşma
Boyle Pond Dam	Toprak Baraj	R	4,9	1957	2015	58	0,068	ABD		Üstten aşma
cook Pond Dam	Toprak Baraj	R	4	1963	2015	52	0,065	ABD		Üstten aşma
Crosby Pond Dam		R	2,7	1900	2015	115	0,037	ABD		
Dam Ne 06722	Toprak Baraj	O	7,6		2015		0,507	ABD		Üstten aşma
Dogwood Lake Dam	Toprak Baraj	R	4,3	1850	2015	165	0,083	ABD		Üstten aşma
Drafts Pond Dam	Toprak Baraj	R	4,3	1967	2015	48	0,888	ABD		Üstten aşma
Ellerbees Millpond Dam	Toprak Baraj	R	2,1	1830	2015	185	0,186	ABD		Üstten aşma
Glen Lake Dam	Toprak Dolgu	R	3,7	1922	2015	93	0,081	ABD		Borulanma
Haithcock Pond Dam	Toprak Baraj	R	3,3	1946	2015	69	0,181	ABD		Üstten aşma
Intrepid Potash West Plant Dam	Toprak Baraj	T	20,8	1978	2015	37	2,563	ABD		Borulanma
Kendall Lake Dam	Toprak Baraj	SR	6,1	1965	2015	50	0,094	ABD		Üstten aşma
KinugawaLeven at Joso	Toprak Dolgu	R	3,7	1880	2015	135		Japonya	2	Üstten aşma
Lexington Mill Pnd Dam	Toprak Baraj	R	6,1	1900	2015	115	0,543	ABD		Üstten aşma
Lone Tree Dam	Toprak Baraj	O	5,8	1954	2015	61	0,622	ABD		Üstten aşma
M R Trotter Dam	Toprak Baraj	R	7,3	1971	2015	44	0,111	ABD		Üstten aşma
Mccray Lake dam	Toprak Baraj	R	4,3	1908	2015	107	0,087	ABD		Üstten aşma
Murray Pond Dam	Toprak Baraj	R	4,9	1930	2015	85	1,616	ABD		Üstten aşma

Çizelge 4.1. (devamı)

Pinewood Lake Dam	Toprak Baraj	R	4,3	1900	2015	115	0,324	ABD		Üstten aşma
Rice Lake Dam	Toprak Baraj	S	6,1	1960	2015	55	0,671	ABD		Dolusavak yetersizliği
Sunview Lake Dam	Toprak Baraj	R	3,3	1949	2015	66	0,289	ABD		Üstten aşma
Weaver Lake Dam	Toprak Baraj	O	3,7	2013	2015	2	0,236	ABD		
Wilson Millpond Dam	Toprak Baraj	R	4,3	1960	2015	55	0,165	ABD		Üstten aşma
Corti - Jencen Dam		R		1989	2014	25		ABD		Borulanma
Crescent Lake Dam	Toprak Baraj	R	4,9	1960	2014	54	0,488	ABD		Üstten aşma
Hawkins dam	Toprak Baraj	I	10,1	1940	2014	74	0,074	ABD		Erozyon
TokweMukorsi Dam	Ön Yüzü Beton Kaya Dolgu	I	90,3	2016	2014	0		Zimbabve	0	Yetersiz tasarım
Jacobs Irrigation Pond Dam	Toprak Baraj	I	9,1	1977	2013	36	1,714	ABD		Borulanma
Mashburn Millpond Dam	Toprak Baraj	R	7,6	1930	2013	83	0,133	ABD		Üstten aşma
Brookstone Lake Dam	Toprak Baraj	R	5,5	2007	2012	5	0,069	ABD		Borulanma
Brookville Waterworks	Toprak Baraj	S	7,3	1912	2012	100	0,6	ABD		Üstten aşma
Brown Bridge Dam	Toprak Baraj	H	14	1921	2012	91	3,454	ABD		Sızma
Campos dos Goytacazes dam	Toprak Baraj		14		2012			Brezilya	0	Borulanma
Corunna Dam		R	4,6	1843	2012	169	0,099	ABD		

Çizelge 4.1. (devamı)

Dakrong 3 dam		H	6	2010	2012	2		Vietnam	0	yetrsiz tasarım
Henry Hudson Dam	Toprak Baraj	R	5,2	1999	2012	13	0,354	ABD		Borulanma
Köprü Dam	Beton Baraj	I F H		2012	2012	0		Türkiye	10	Yetersiz tasarım
Mike Williams Dam	Toprak Baraj	R	5,5	2005	2012	7		ABD		Üstten aşma
Pine Acres Lake Dam	Toprak Baraj	R	6,7	1965	2012	47	0,053	ABD		Borulanma
Santa Clara Dam	Toprak Dolgu	C	8	1919	2012	93		ABD		Sızma
The Meadows Dam	Toprak Baraj	O	6,7	1975	2012	37	0,084	ABD		Borulanma
Cassville Dam	Toprak Baraj	R	1,8		2011			ABD		Üstten aşma
Centerton Lake Dam	Toprak Baraj	R	3,7	1942	2011	69	0,71	ABD		Üstten aşma
Cushman Lake Dam	Toprak Baraj	R	5,2		2011		0,076	ABD		Üstten aşma
Echo Lake Dam	Kagir Ağırlık	R	3,7	1880	2011	131	0,178	ABD		Sel nedeniyle hasar oluşması
Fujinuma Dam	Toprak Dolgu	I	18,5	1949	2011	62		Japonya	8	Deprem nedeniyle yıkıldı.
Gates Mills Low Head Dam		R	2,1	1903	2011	108		ABD		Üstten aşma
Glendale Lake Dam	Toprak Baraj	R	4,3	1945	2011	66	0,067	ABD		Borulanma
Mountaindale Recreation Lake Dam	Toprak Baraj	R	4,9	1973	2011	38	0,081	ABD		Üstten aşma
Saffin Pond Dam	Toprak Dolgu	R	7,3	1930	2011	81	0,181	ABD		Borulanma
Wivenhoe Dam	Kaya Dolgu	S	59	1984	2011	27		Australiya		Sel nedeniyle hasar oluşması
Breadthauer Dam	Toprak Baraj		7,9		2010			ABD		Üstten aşma

Çizelge 4.1. (devamı)

Club 13 Lake Dam	Toprak Baraj	R	8,5	1966	2010	44	0,399	ABD		Üstten aşma
Ericson Dam	Toprak Baraj	O	10,7	1916	2010	94	0,119	ABD		Erozyon
Gararda Dam	Toprak Baraj	R	30	2009	2010	1		Hindistan		Borulanma
Gracie Creek Road Dam	Toprak Baraj	R	6,1	1980	2010	30		ABD		Üstten aşma
Hope Mills Dam	Beton Ağırlık	R	10	2008	2010	2		ABD	0	
Lake Delhi Dam	kompozite	R	18	1922	2010	88		ABD		Yetersiz tasarım
Lake Getaway Dam	Toprak Baraj	R	11,9	2002	2010	8	0,419	ABD		Yetersiz tasarım
Lake Shawnee Dam	Toprak Baraj	R	2,7		2010		0,464	ABD		Üstten aşma
Morgan Dam	Toprak Baraj	O	6,1	1960	2010	50		ABD		Üstten aşma
Niedow Dam	Toprak Dolgu	RI	18	1962	2010	48		Polonya	1	yetersiz tasarım
Rose Hill Dam	Toprak Baraj	R	11,6	1935	2010	75	1,172	ABD		Üstten aşma
Tempe Town Lake Dam		F	4,9	1999	2010	11		ABD		Yetersiz bakım
Testalinden Dam	Toprak Dolgu	I	2,5	1937	2010	73		Kanada		Sızma
Old City Lake Dam	Toprak Baraj	R	4,3	1956	2009	53	0,113	ABD		Borulanma
Peddy Lake Dam	Toprak Baraj	R	6,1	1997	2009	12	0,118	ABD		Üstten aşma
Sayana - Shushenskaya Dam	Kemer Baraj	H	242	1985	2009	24		Rusiya	75	Yetersiz bakım
Situ Gintung	Toprak Baraj		16	1933	2009	76		Endonezya	100	Yetersiz bakım
Abney Lake Dam	Toprak Baraj	R	11	1968	2008	40	0,144	ABD		Kayma
Chandiya Dam	Toprak Baraj	I	22,5		2008			Hindistan		Ani su baskısından dolayı çatlama.
Harper Lake Dam	Toprak Baraj	R	11,6	1978	2008	30	0,102	ABD		Kayma
Herring Lake Dam	Toprak Baraj	R	15,2	1968	2008	40	2,159	ABD		Borulanma

Çizelge 4.1. (devamı)

Katy Lake Dam	Toprak Baraj	R	13,7	1905	2008	103	0,337	ABD		Borulanma
Koshi		C H		1962	2008	46		Nepal	250	Yetersiz bakım
Lac Shayne Dam	Toprak Baraj	R	21,9	1979	2008	29	3,053	ABD		Kayma
Lake Boutin Dam	Toprak Baraj	R	14	1961	2008	47	4,65	ABD		Kayma
Lake Konstanz Dam	Toprak Baraj	R F	27,4	1999	2008	9	0,127	ABD		Kayma
Palwmgavu dam	Toprak Dolgu		13		2008			Hindistan		Üstten aşma
Jaswant Sagar Dam	Toprak Baraj	I	43,4	1892	2007	115		Hindistan		Borulanma
Sugar Creek Watershed Dam	Toprak Dolgu	C	19,5	1971	2007	36		ABD		Yetersiz dolusavak kapasitesi
Campos Novos Dam	Ön Yüzü Beton Kaya Dolgu	H	202	2006	2006	0		Brezilya	0	Sızma
Galestown Millpond	Toprak Baraj	I	2,7	1972	2006	34	0,281	ABD		Üstten aşma
Gusau Dam		H			2006			Nigerya	40	Yetersiz bakım
Kaloko Dam	Toprak Dolgu	I	12		2006			ABD	7	Yetersiz baktım
Mill Creek Dam	Toprak Baraj	R F	3,3	1930	2006	76	0,096	ABD		Şiddetli yağmurdan meydana gelen hasar.
Shakidor Dam		I		2003	2005	2		Pakistan	70	Şiddetli yağıştan dolayı baraj çöktü.

Çizelge 4.1. (devamı)

Taum Sauk Dam	Kaya Dolgu	H	27	1963	2005	42		ABD	0	Üstten aşma
Big Bay Dam	Toprak Dolgu	R	17,4	1991	2004	13		ABD	0	Erozyon
Camara Dam	Beton Baraj	O	50	2002	2004	2		Brezilya	3	İnşaat sırasında yıkılma.
Silver Lake Dam	Toprak Baraj	T	9	1992	2003	11		ABD	0	Dolusavak hasarı.
Beech Lake Dam	Toprak Baraj	R	6,7	1963	2002	39		ABD		Borulanma
Zeyzoun Dam	Toprak Dolgu	I	40	1996	2002	6		Suriye	22	Sızma
Bridgefield Lake Dam	Toprak Baraj	R	7,6		2001			ABD		Borulanma
Jamunia Dam	Toprak Baraj	I	15		2001			Hindistan		Borulanma
Lake Flamingo Dam	Toprak Baraj	R	8,2		2001			ABD		Borulanma
Polecat Lake Dam	Toprak Dolgu		42,6		2001			ABD		Üstten aşma
Pratappur dam	Toprak Dolgu	I H	10,6	1891	2001	110		Hindistan		Sel nedeniyle hasar oluşması
SaukRiver Melrose Dam	Toprak Baraj	R	8,2		2001			ABD		Borulanma
Benito Juarez Dam	Toprak Baraj	I	86	1961	1999	38		Meksika		Üstten aşma
Edwards dam	Beton Baraj	H		1837	1999	162		ABD		Devlet tarafından yıkıldı
El Guapo Dam	Toprak Dolgu		60	1980	1999	19		Venezuela		Erozyon
Pittsfield Dredge Disposal Pond Dam	Toprak Baraj	C	10,7		1999			ABD	0	Borulanma
Shihgang Dam	Beton Ağırlık	R	25	1977	1999	22		Tayvan	0	Deprem nedeniyle yıkıldı.

Çizelge 4.1. (devamı)

Hematite Dam	Toprak Baraj	S	4		1998			ABD		Borulanma
Vertrees dam	Toprak-Kaya Dolgu		8,2		1998			ABD		Borulanma
Virgen Dam	Toprak Dolgu	P		1972	1998	26		Nikaragua		Üstten aşma
Holland dam	Toprak Baraj	I	4		1997			ABD		Borulanma
Opuha dam	Toprak Baraj	I	47	1998	1997	0		Yeni Zelanda	0	İnşaat sırasında şiddetli yağmurdan dolayı baraj hasar oluştu, daha sonra inşaatı devam edildi
Meadowpond dam	Toprak Baraj	R	11		1996			ABD	1	Yetersiz tasarım
Eureka Holding Dam	Toprak Baraj	T	12,2		1995			ABD		Borulanma
Folsom Dam	Kompozite	CH	104	1954	1995	41		ABD		Üstten aşma
Royd réservoir dam	Toprak Baraj	H	9,8		1995			ABD		Borulanma
Arrowhead Lake	Toprak Baraj	R	5,5	1954	1994	40	2,891	ABD		Borulanma
Penn Forest Dam	Toprak Dolgu	S	44,2	1958	1994	36		ABD		Sızma
Peruca dam	Toprak Baraj	H	65	1958	1993	35		Hırvatistan	0	Sırbistan ordusu tarafından bombalandı.
Balci dam	Toprak Dolgu	S	26	1975	1991	16		Romanya	25	Üstten aşma
Bindaweir		R	5,2	1953	1986	33		Avustralya		
Kantale Dam	Toprak Baraj	I	15		1986			Sri Lanka	180	Yetersiz bakım

Çizelge 4.1. (devamı)

Kantale Dam	Toprak Baraj	I	15		1986			Sri Lanka	180	Yetersiz bakım
Upriver Dam	Beton Ağırlık	H		1980	1986	6		ABD	0	Üstten aşma
Cascadelake	Beton Ağırlık	R	5,2		1983			ABD		
Glen Canyon Dam	Beton Baraj	H	216	1964	1983	19		ABD		Yetersız Dolusavak
Lawn Lake Dam	Toprak Dolgu	I	7,9	1903	1982	1	0,798	ABD	3	Borulanma
Tous Dam	kompozite	C	70,1	1978	1982	4		İspanya	8	Yetersiz tasarım
Johnstoncity	Toprak Dolgu	F	4,27	1921	1981	60	0,575	ABD		Sızma
Moscovite Dam	Toprak Baraj		15	1978	1980	2		Rusiya		Üstten aşma
Prospect Dam	Toprak Dolgu	S	13,3	1914	1980	66		ABD		Yetersiz bakım
Kodaganar	Toprak Baraj	I	15	1977	1979	2	12,3	Hindistan		Üstten aşma
Machhu II Dam	Kompozite	I	22,5	1972	1979	7		Hindistan	25000	Yetersiz tasarım
Maple Grove Dam	Toprak Dolgu	R	15,5	1956	1979	23		ABD		Dolusavak yetersizliği
Wadi Qattara Dam	Kil Dolgu	I	55	1971	1979	8		Libya	0	Üstten aşma
Palagnedra Dam	Beton Baraj	CH	22	1952	1978	26		İsviçre		Sel nedeniyle hasar oluşması
Euclides da Cunha	Toprak Dolgu		53	1958	1977	19				Üstten aşma
Frankfurt	Toprak Dolgu		10	1975	1977	2	0,325	Almanya		Borulanma
Kelly Barnes Dam	Toprak Baraj	H	12	1949	1977	28	0,777	ABD	39	Yetersiz tasarım
Laurel Run Dam	Toprak Dolgu	R	13	1918	1977	59	0,555	ABD	40	Üstten aşma
North BranchTributary	Toprak Baraj	CR	5,5		1977		0,022	ABD		
Otto Run	Toprak Dolgu	O	5,8		1977		0,007	ABD		

Çizelge 4.1. (devamı)

Salles Olivrira	Toprak Dolgu	H	35	1966	1977	11		Brezilya		Üstten aşma
Schaeffer	Toprak Baraj	R	8,5		1977			ABD		Üstten aşma
Teton Dam	Toprak Dolgu	R	93	1975	1976	1	355,55	ABD	11	Yetersiz tasarım. Borulanma
Banqiaoand Shimantan Dam	Toprak Dolgu	H	25	1956	1975	19	607,5	Çin	85000	Üstten aşma
Rito Manzanares	Toprak Dolgu	R	7,3		1975		0,0247	ABD		Sızma
Buffalo Creek Dam	Atık Baraj	O	14	1971	1972	1	0,48	ABD	125	Sızma
Canyon Lake Dam	Toprak Dolgu	O	6,1	1938	1972	34	0,985	ABD	238	Üstten aşma
Lake Barcroft		O	21	1913	1972	59		ABD		
Bullock Drew Dike	Toprak Dolgu	R	5,8	1971	1971	0	1,13	ABD		Borulanma
Lower San Fernando	Toprak Baraj	S	43,3	1916	1971	55		ABD		Deprem
Cheaha Creek	Toprak Dolgu	C	7	1970	1970	0	0,069	ABD		Üstten aşma
Sheep Creek	Toprak Dolgu	O	17	1969	1970	1		ABD		Sızma
Wheatland	Toprak Dolgu	I	13,6	1893	1969	76	11,6	ABD		Borulanma
Nanaksagar	Toprak Dolgu	R	16,2	1962	1967	5		Hindistan		Üstten aşma
Sempor Dam	Toprak-Kaya Dolgu	C R S	58	1978	1967	0		Endonezya	138	Üstten aşma
Lake Latonka		S	13	1965	1966	1		ABD		
Fontenlle Dam	Toprak Dolgu	O	38,7	1964	1965	1		ABD		Sızma
Hell Hole	Kaya Dolgu	O	67,1	1964	1964	0	30,6	ABD		Borulanma
Swift Dam	Toprak Dolgu	O	57	1914	1964	50	37	ABD	19	Üstten aşma
Twomedicine	Toprak Dolgu		11,3	1913	1964	51		ABD	0	Yetersiz bakım
Baldwin Hills dam	Toprak Dolgu	R	70,7	1951	1963	12	0,91	ABD	5	Sızma
Little Deer Crek	Toprak Dolgu	C	26,2	1962	1963	1	1,36	ABD		Borulanma

Çizelge 4.1. (devamı)

Vajont Dam	Kemer Baraj		262	1960	1963	3		İtalya	2000	Üstten aşma
Khadakwasla	Kagir Ağırlık	I	39	1879	1961	82		Hindistan		Üstten aşma
Panshet Dam	Toprak Dolgu	I	51	1961	1961	0		Hindistan	1000	Yetersiz tasarım
Oros dam	Toprak Baraj	I	35,5	1961	1960	0		Brezilya		Üstten aşma
Kaila Dam	Toprak Dolgu	I	23,1	1955	1959	4		Hindistan		Yetersiz tasarım
Malpasset dam	Beton Kemer	I S	66	1954	1959	5		Fransa	423	Yetersiz tasarım
Vega de Tera	Beton Baraj	F	34,1	1958	1959	1		İspanya	144	Yetersiz yapım
Kaddam	kompozite	I	30,8	1957	1958	1		Hindistan		Üstten aşma
Frenchman dam	Toprak Dolgu	O	12,5	1951	1952	1	16	ABD		Üstten aşma
Kobila Dam		H	10	1586	1948	362		Slovenya		Üstten aşma
Edersee Dam	Beton Ağırlık	H	48	1914	1943	29		Almanya	70	2. Dünya savaşı sırasında bombalandı
Möhne dam	Beton Ağırlık	F	34,1	1913	1943	30		Almanya	1579	2. Dünya savaşındaki Chastise operasyonu tarafından bombanlandı.
Secondary Dam of Sella Zerbino	Beton Ağırlık	H	11	1904	1942	38		İngiltere	0	2. Dünya savaşındaki Chastise operasyonunda yıkıldı.
Horonai Dam		I	21		1941			Japonya	60	Üstten aşma
Fort Peck Dam	Toprak Dolgu	O	76,2	1940	1938	0		ABD		Sızma

Çizelge 4.1. (devamı)

Elk City		O	9	1925	1936	11	1,18	ABD		Üstten aşma
Apishapa	İnce Kum	F	34,1	1920	1933	13	22,2	ABD		Borulanma
Castlewood Dam	Beton Baraj	O	21,3	1890	1933	43		ABD	2	Yetersiz bakım ve tasarım.
French Landing	Toprak Baraj	O	8,5	1925	1929	4		ABD		Sızma
St. Francis Dam	Beton Baraj	S	62,5	1926	1928	2		ABD		Yetersiz tasarım
Tigra Dam	Beton Ağırlık	O	62,5	1926	1928	2		ABD	451	Yetersiz tasarım
Coedty		H	11	1924	1925	1	0,3	İngiltere		
Eigiau		R	10,5	1908	1925	17	4,52	İngiltere		
Llyn Eigiau Dam			11	1911	1925	14		Birleşik Krallık Dolgarrog	17	
Gleno Dam	Payandalı Kemer	H	43	1923	1923	0		Italya	356	Yetersiz yapım ve tasarım
Mammoth		R	21,3	1916	1917	1	13,6	ABD		Üstten aşma
Sweetwater Dam	Beton Ağırlık	I	62,5	1916	1917	1		Avusturalya		Yetersiz tasarım
Warren Dam	Kâgir Ağırlık	R	24	1917	1917	0		Hindistan	1000	Üstten aşma
Desna dam	Toprak Dolgu	R	17,5	1915	1916	1		Çek Cumhuriyeti	65	Yetersiz yapım
GooseCreek	Toprak Dolgu	S	6,1	1903	1916	13	10,6	ABD		Üstten aşma
Lake Toxaway Dam	Toprak Baraj	R	18	1903	1916	13		ABD	0	Yetersiz tasarım
LowerOtay Dam	Toprak Dolgu	S	12,2	1897	1916	19	19,6	ABD	14	Üstten aşma
Walnut Grove Dam	Beton Ağırlık	R	33	1888	1916	28		ABD	8	Üstten aşma
LowerTwo Medicine	Toprak Baraj	I	11	1913	1915	2		ABD		Sızma
Lyman	Toprak Baraj	O	20	1913	1915	2	49,5	ABD		Borulanma

Çizelge 4.1. (devamı)

Davis	Beton Baraj	O	11,9	1914	1914	0		ABD		Borulanma
Hatchtown	Toprak Dolgu		19	1908	1914	6	14,8	ABD		Sızma
Hebron	Toprak Dolgu	F	11,9	1913	1914	1		ABD		Borulanma
HorseCreek	Beton Baraj	I	12,2	1911	1914	3	12,8	ABD		Sızma
Erindale		H	10,5	1910	1912	2		Kanada		Üstten aşma
Austin Dam	Beton Ağırlık	S	15	1909	1911	2		ABD	78	Hatalı tasarım, hatalı yapım ve yetersiz bakım.
Hatfield		H	6,8	1908	1911	3	12,3	ABD		Üstten aşma
Ketner Dam	Toprak Baraj	S	13,7	1912	1911	0		ABD		İnşaat sırasında meydana gelene üstten aşma
BrokenDown Dam	Beton Ağırlık	O		1908	1909	1		ABD	0	Tasarım hatası
Melville	Toprak Baraj	C	11	1907	1909	2	24,7	ABD		Sızma
Hauser Dam	Beton Ağırlık	H	24	1907	1908	1		ABD	0	Sızma
Sherburne		S	10,5	1892	1905	13		ABD		Borulanma
Lake Avalon	Homojen	R	14,5	1894	1904	10	31,5	ABD		Borulanma
Oakford Park		R	6		1903			ABD		Üstten aşma
Break Neck Run		O	7	1877	1902	25	4,9	ABD		
Grand Rapids		O	7,6	1874	1900	26	0,255	ABD		Üstten aşma
Lake France	Toprak Dolgu		15	1899	1899	0	0,865	ABD		Sızma
Minneapolis	Beton Ağırlık	O	5,5	1894	1899	5		ABD		Üstten aşma

Çizelge 4.1. (devamı)

GohnaLaje Dam		I		1893	1894	1		Hindistan	1	Heyelanın oluşmasıyla barajın patlamasına neden oldu
South Fork Dam	Kaya Dolgu	O	22	1887	1890	3		ABD	100	Yetersiz tasarım
Johnstown	Beton Baraj	S	38,1	1853	1889	36	18,9	ABD		Üstten aşma
Puentes Dam	Toprak-Kaya Dolgu	S	22	1852	1889	37		ABD	2208	Yetersiz tasarım
Spring Lake	Homojen	R	5,5	1887	1889	2	0,136	ABD		Borulanma
LyndeBrook	Toprak Baraj	S	12,5	1870	1876	6	35,8	ABD		Sızma
Mill River Dam	Toprak Dolgu	O	12	1866	1874	13	2,5	ABD	139	Yetersiz tasarım
Iruka Lake Dam	Toprak Baraj	I		1633	1868	235		Japonya	941	Üstten aşma
Bradfield Dam		F	29	1863	1864	1	3,2	İngiltere		
HogsBack Dam	Beton Baraj	R		1820	1829	9		Kanada		Sızma
nant-y-Gro dam	Beton Ağırlık	R	50	1791	1802	11		İspanya	608	Yetersiz tasarım
Baimiku	Toprak Dolgu		8				0,2	Çin		
Chenying	Homojen	I	12				5	Çin		Üstten aşma
Dalizhuang	Homojen	R	12				0,6	Çin		Üstten aşma
Danghe			46				10,7	Çin		Üstten aşma
Dongchuankou	Homojen		31				27	Çin		Üstten aşma
Dushan	Homojen		17,7				0,67	Çin		Üstten aşma
Erlangmiao	Homojen		31				27	Çin		Üstten aşma
Fenghuang	Homojen		10				0,625	Çin		Üstten aşma
Gouhou	Beton Baraj		71				3,18	Çin		Borulanma
Hougou	Homojen		8				0,24	Çin		Üstten aşma

Çizelge 4.1. (devamı)

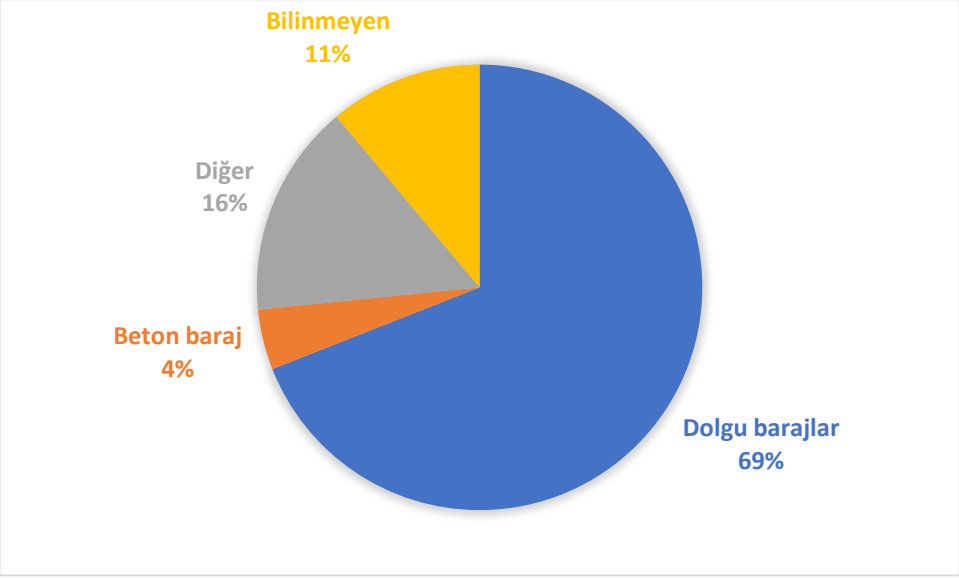
Huoshishan	Homojen		13				0,22	Çin		Üstten aşma
Huqitang	Homojen		9,9				0,424	Çin		Borulanma
Longtun			9,5				30	Çin		Üstten aşma

Çizelge 4.1'e göre dünya genelinde 297 baraj hasarı bulunmuş ve 122000'den fazla can kaybı olmuştur. Yaptığımız çalışmaya göre ve güncel verilerin değerlendirildiğinde tip - yaş – büyüklük – rezervuar hacmi ve nedenlerin etkisine bağlı sınıflandırma yapıp aşağıdaki bilgiler verilmektedir;

a. Baraj tipi: Çizelge 4.2 ve Şekil 4.13'te anlaşılan toprak ve dolgu barajların hasar / yıkılma olasılığı diğer tiplerden daha fazladır.

Çizelge 4. 2. Baraj tipine göre hasarların sınıflandırılması

Baraj Tipi	Hasar sayısı	Yüzdelik
Dolgu barajlar	205	%69
Beton baraj	13	%4
Diğer	46	%16
Bilinmeyen	33	%11



Şekil 4. 13. Hasarların baraj tipine göre yüzdesi

Toprak barajların rijitliği düşük dolayısıyla hasar / yıkılma olasılığı yüksektir. Bu hasarların en yaygın nedeni ise yetersiz veya uygunsuz dolusavak, tasarımda taşkın olabilme ihtimalinin katmaması veya yetersiz bakım ve işletmeden kaynaklanan üstten aşmadır. Şekil 4.14'te Amerika'da Mississippi eyaletindeki hasara uğrayan Big Lake Barajı bir toprak dolgu barajdır.

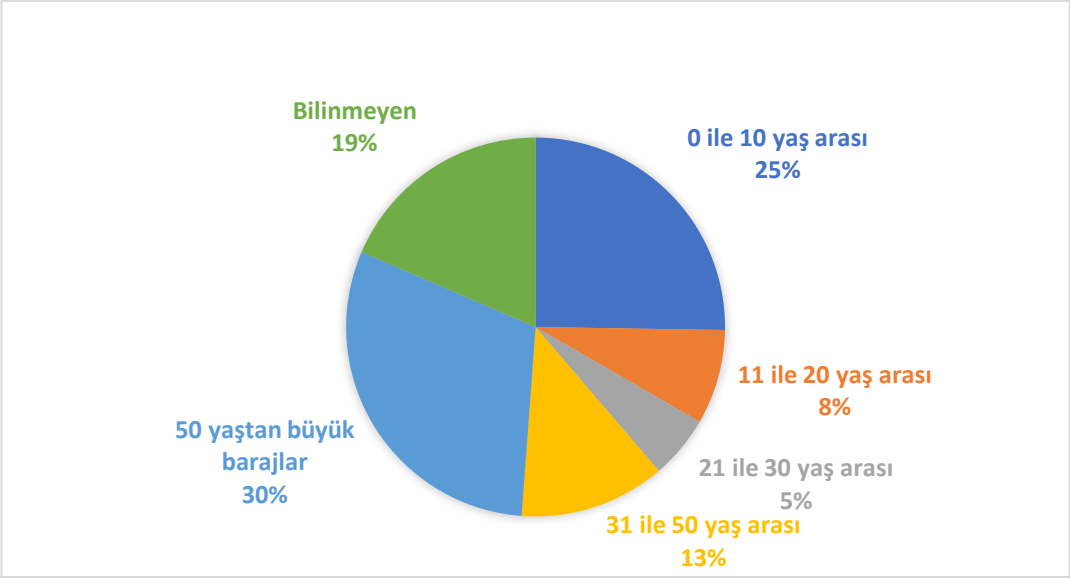


Şekil 4. 14. Big Bay Lake Barajı, Mississippi, Amerika, 2004

b. Baraj yaşı: Çizelge 4.3 ve Şekil 4.15'te anlaşılan barajlar işletmeye açıldıktan sonraki ilk on yıl içinde yıkılma oranı %25 olup 50 yaştan sonraki oranı ise %30'dur. Dolayısıyla barajların yaşlılığı hasar / yıkılmada eskisi gibi artık etkili bir faktör değildir.

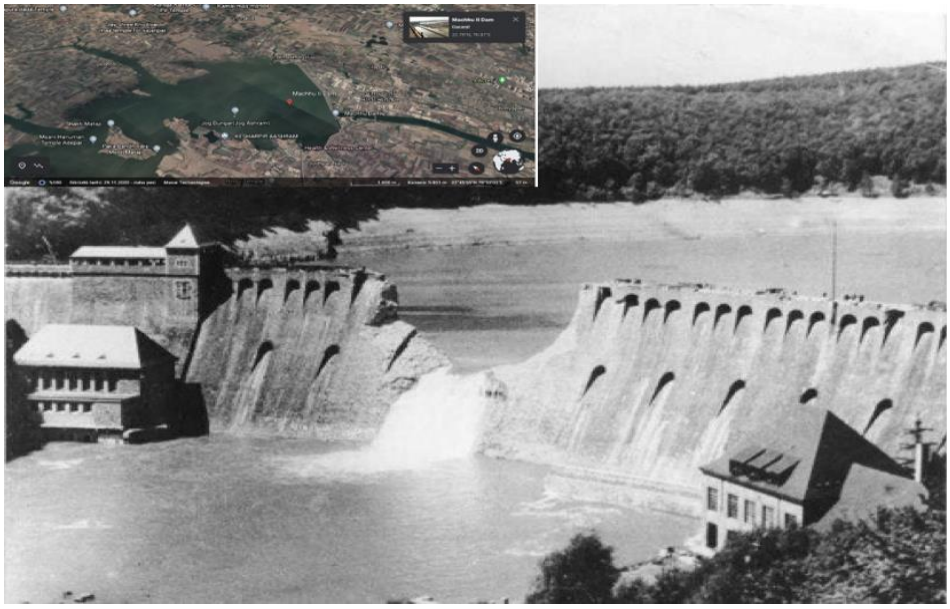
Çizelge 4. 3. Hasarların baraj yaşına göre sınıflandırılması

Baraj yaşı	Baraj sayısı	Yüzdelik
0 ile 10	75	%25
11 ile 20	24	%8
21 ile 30	16	%5
31 ile 50	37	%13
50 <	90	%30
Bilinmeyen	55	%19



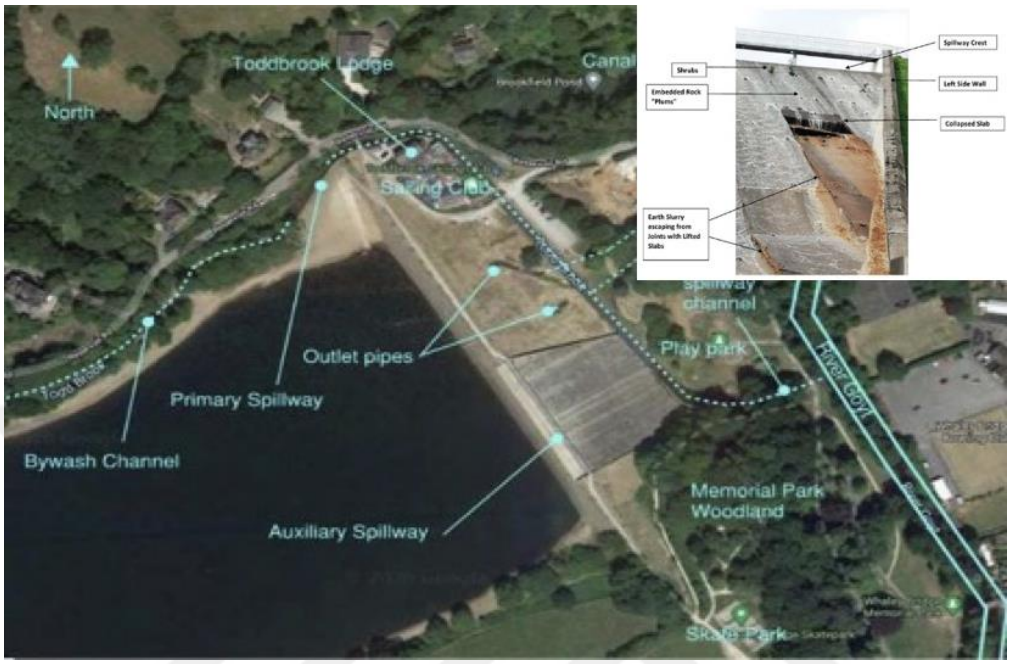
Şekil 4. 15. Baraj yaşına göre hasarların yüzdesi

Baraj yaşı arttıkça hasar yüzdesi önce azalma sonra artış görülmüştür. Barajların ilk 10 yıldaki hasar / yıkılmanın nedeni yetersiz tasarım, yetersiz dolu savak kapasitesi ve yetersiz taşkın kapasite tasarımıdır. 1979 yılında şiddetli fırtına nedeniyle Machhu II Barajının tüm kapakları açılmış, rezervuarın dolmasıyla dolusavak yetersiz hale gelmiş, üstten aşma sonrası, maddi kayıplara ilave yaklaşık 25000 kişi hayatını kaybettiği belirlenmiştir (şekil 4.16) (Dhar ve ark., 2009).



Şekil 4. 16. Hindistan'da Gujarat'ta Machhu II Baraj hasar görüntüsü, 1979

50 yaştan büyük barajları yıkılma nedeni ise şiddetli yağıştan meydana gelen üstten aşmadır (Şekil 4.17'de Toddbrook Rezervuar Barajı) (Mauney, 2021).

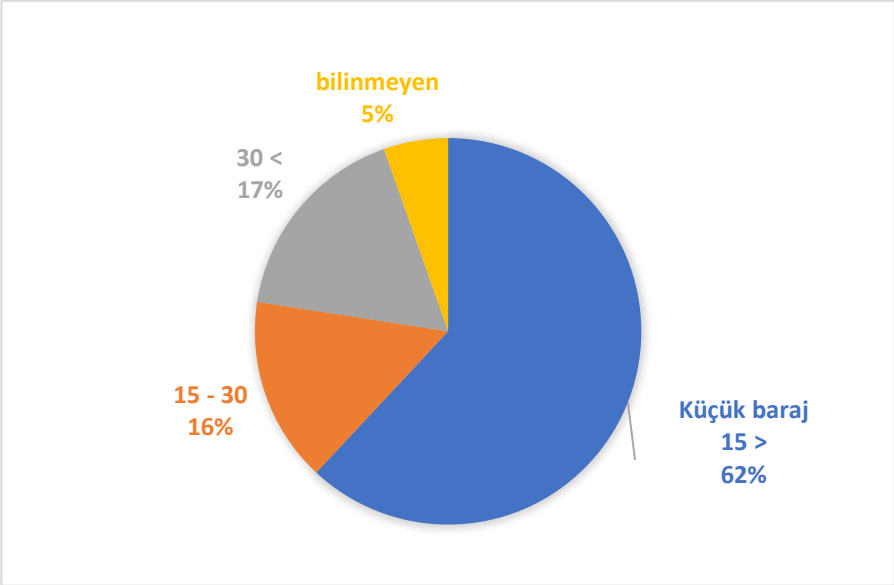


Şekil 4. 17. Toddbrook Rezervuar Barajı, İngiltere, 2019

c. Baraj büyüklüğü: ICOLD'a göre, yüksekliği 15 m'den düşük barajlara küçük baraj (Şekil 4.19), yüksekliği 15 m'den fazla olanlara ise büyük baraj (Şekil 4.20) denir.

Çizelge 4. 4. Baraj yüksekliğine göre hasar sınıflandırılması

Yükseklik m	Baraj Sayısı	Yüzdelik
15 <	184	62%
15- 30	46	16%
30 >	51	17%
Bilinmeyen	16	5%



Şekil 4. 18. Baraj büyüklüğüne göre hasarların yüzdesi

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.18'deki analizlere göre dünya genelinde yüksekliği 15 m'den düşük barajların yıkılma olasılığı 15 m'den daha yüksek barajlardan yüksektir. Bunun nedeni ise büyük barajlarda tasarım, inşaat, işletme ve bakıma daha çok dikkat edilmekten kaynaklanmaktadır. Öte yandan yıkılma veya hasar oluşma riskleri baraj yüksekliğine bağlı olmadığı, farklı yükseklikteki barajlarda risk olasılığı benzediğinden anlaşılmaktadır (Cheng, 1993) . Tablo 1 e göre küçük barajların yapısal hasarları aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

- Küçük barajların yaşı büyük barajlara göre daha büyüktür bu da hasar / yıkılma ihtimalini arttırır.
- Küçük barajların %78'i toprak ve toprak dolgu barajdır.

Yıkılan barajların nedeni ise üstten aşmadır.



Şekil 4.19. 13 m yüksekliğindeki Laurel Run Barajı, Pennsylvania, Amerika, 1977

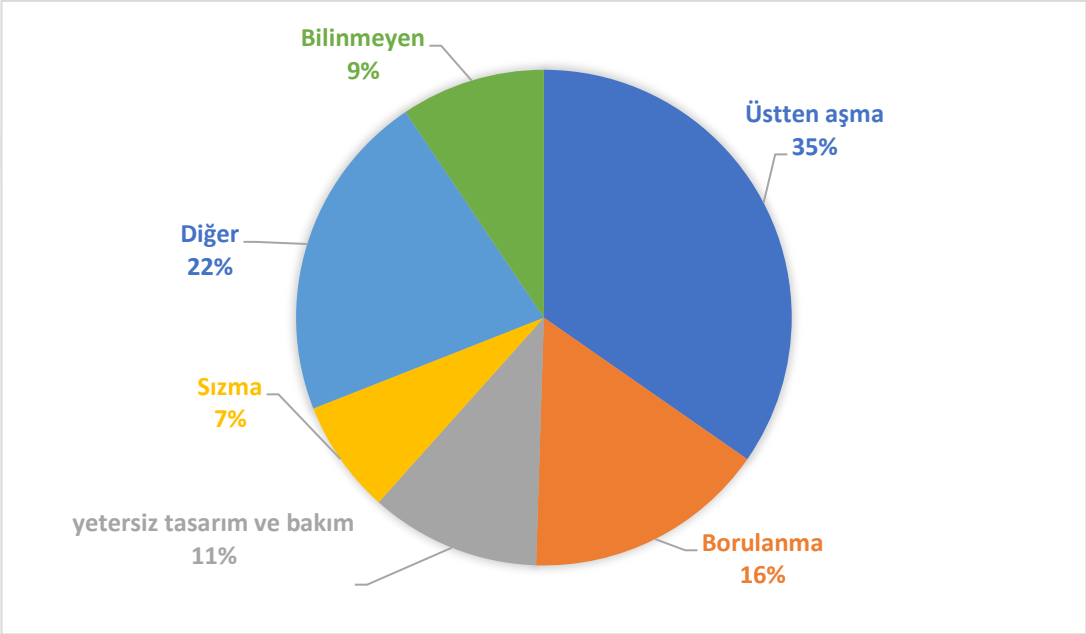


Şekil 4. 19. 73 m yüksekliğindeki Xe pien Xe Namnoy Barajı, Laos, 2018

d. Yıkılma / hasar nedenine göre: Çizelge 4.5 ve Şekil 4.21'deki analizlere göre barajların hasar / yıkılma nedenleri değişmekte olup; üstten aşma %35, yetersiz tasarım ve bakım %1, borulanma %16, sızma %7 oranında gerçekleşmiştir.

Çizelge 4. 5. Yıkılma nedenine göre sınıflandırılma

Yıkılma nedeni	Baraj sayısı	Yüzdelik
Üstten aşma	103	35%
Borulanma	47	16%
Yetersiz tasarım ve bakım	33	11%
Sızma	22	7%
Diğer	64	22%
Bilinmeyen	28	9%



Şekil 4. 20. Hasar nedenine göre sınıflandırma yüzdesi

Hızlı yapım, yetersiz tasarım, yetersiz bakım, dinamik yükleme ve uygunsuz malzemeden dolayı üstten aşma meydana gelmektedir. Barajların %35'i üstten aşma (Şekil 4.22), %16'sı borulanma (Şekil 4.23), %11'i yetersiz tasarım ve bakım (Şekil 4.24), %7'si sızmadan (Şekil 4.25) kaynaklanan hasarlar olup %9'unun ise nedeni bilinmemektedir.



Şekil 4. 21. Üstten aşma nedeniyle Spencer Baraj hasarı, Nebraska, Amerika, 2019



Şekil 4. 22. Borulanma nedeniyle Lawn Lake Baraj hasarı, Amerika, 1982



Şekil 4. 23. Tasarım yetersizliğinden Tous Baraj hasarı, İspanya, 1982



Şekil 4. 24. Sızmadan meydana gelen Testalinden Barajı, Kanada, 2010

Çizelge 4.1'de 297 baraj analiz çalışmasına göre en çok gözlemlenen baraj göçme nedeni %35'lik bir oranla barajın üstten aşılmasıdır. Tiplere göre ise göçen baraj tiplerinin büyük bölümünü toprak dolgu barajlarının oluşturduğunu göstermiştir. Bundan dolayı dolgu barajların üstten aşılma güvenilirliği üzerindeki çalışmalar büyük önem taşımaktadır.

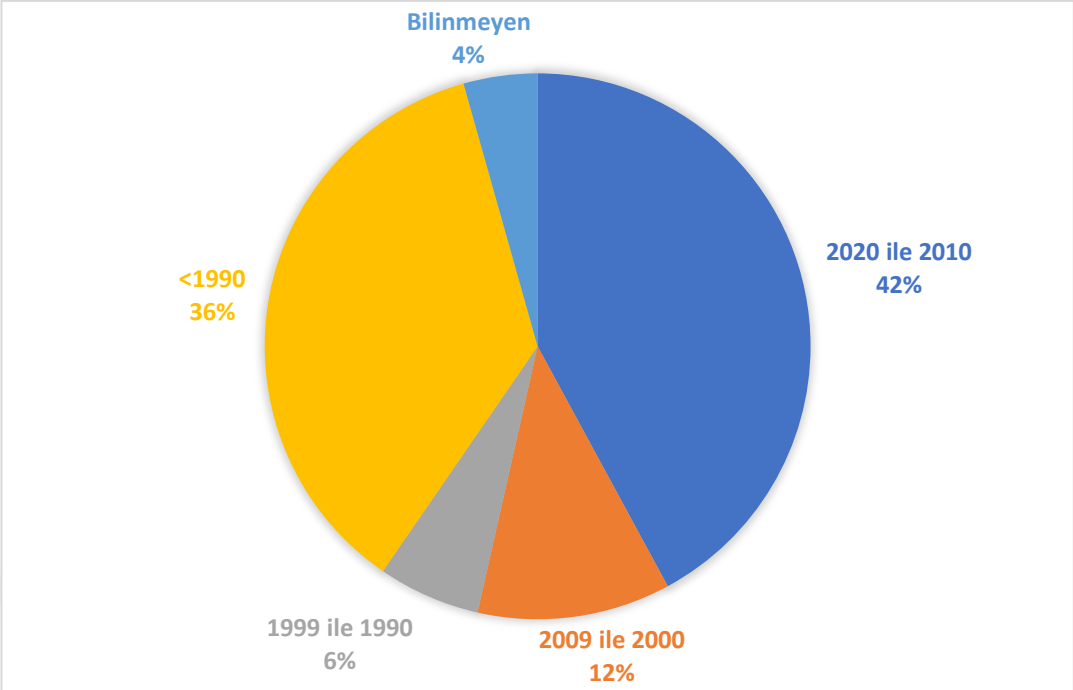
Dolusavak yetersizliği ya da hazne taşkın kontrol yetersizliği sebebiyle barajlar bir taşkın anında üstten aşılabilir. Barajın üstten aşma olasılığını en az indirgemek maksadıyla havzada müşahede edinebilecek ekstrem hidrograflar tanımlanmalı ve bunlara göre tasarlanmalıdır. Dolusavakta güvenli bir şekilde geçirebileceği azami taşkın debisi, o yapının tasarım debisi olarak tanımlanır. Dolusavak tasarım debisini değerlendirme için hem iki ya da çok değişkenli taşkın frekans analizi edilmeli hem de tasarım parametrelerindeki değişkenlikleri göz ardı edilmemelidir (Çalamak, 2017).

Dolgu barajlarda dolusavak tasarımı muhtemel maksimum taşkın değerlerine göre yapılmalıdır. Hem kapaklı hem de kapaksız ve tüm dolusavaklar için ayrı ayrı taşkın öteleme hesaplanmalıdır. Beton barajlarda ise dolusavak tasarım taşkını 1000 yıllık tekrarlanan taşkının pik debisine eşdeğer alınmalıdır. Yalnız öteleme hesabı 10000 yıllık tekrarlanan taşkına göre yapılmalıdır (Ağıralioğlu, 2011).

e. Yıllara göre sınıflandırma:

Çizelge 4. 6. Yıkılma yıllarına göre baraj hasar sınıflandırılması

Yıllar	Hasar gören baraj sayısı	Toplam baraj sayısı (yaklaşık)
2020 ile 2010	125	60.000
2009 ile 2000	34	53.000
1999 ile 1990	18	47.000
<1990	107	39.000
Bilinmeyen	13	



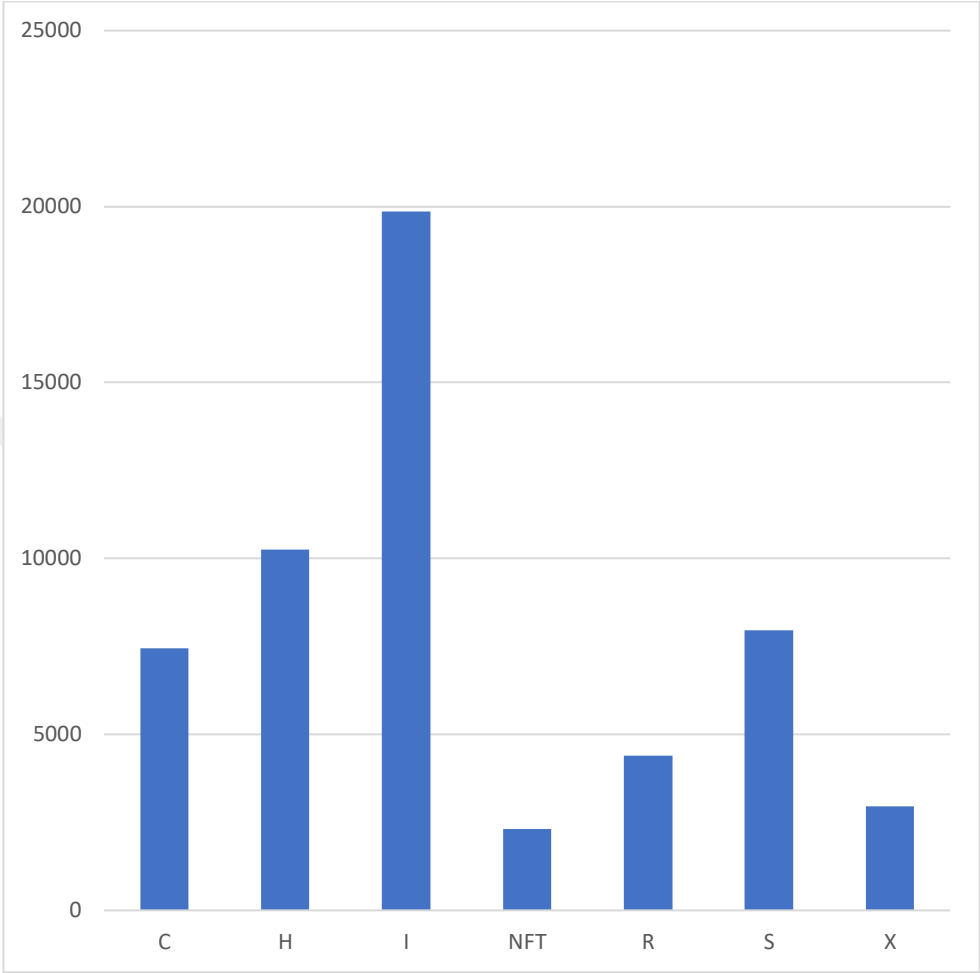
Şekil 4. 25. Yıllara göre hasar görme yüzdesi

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.26'da yapılan analizlere göre son 10 yılda (2010 ile 2020) arası yıkılan barajların %84'ü toprak ve toprak dolgu barajdır (dünyada 2020 yılında ICOLD' a göre 58713 baraj olup %65'i ise toprak barajdır), %84'ü ise küçük baraj olup yüksekliği 15 m'den azdır, %44.8'inin nedeni ise üstten aşmadır.
Bu barajların %58.4'ünün yaşı 50 den büyük olup %8'i ise ilk on yılda hasar görmüştür.

f. Yapım amacına göre sınıflandırılma:

Yapım amacına göre dünyadaki barajlar ICOLD 2020 tarafından şekil 4.27'de sınıflandırılmıştır. Şekil 4.27 incelendiğinde sulama amaçlı olan barajların sayısının diğer barajlara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bununla beraber Çizelge 4.7 ve Şekil 4.28'da ise yıkılan barajların yapım amacına göre sınıflandırma yüzdeleri görülmektedir. 297 barajın yapım amacına göre sınıflandırılması gerçekleştirildiğinde rekreasyon %42, sulama %14, Hidroelektrik %11, su temini %9, taşkın kontrolü %5 ve balıkçılık %4 orandaki değerler elde edilmiştir. En çok rekreasyon amaçlı barajların hasara uğradığı görülmüştür. Buna ilave %42'lik rekreasyon barajların değerlendirildiğinde, %80'i dolgu baraj, %83'ü küçük baraj, %12'si ilk 10 yaşta ,

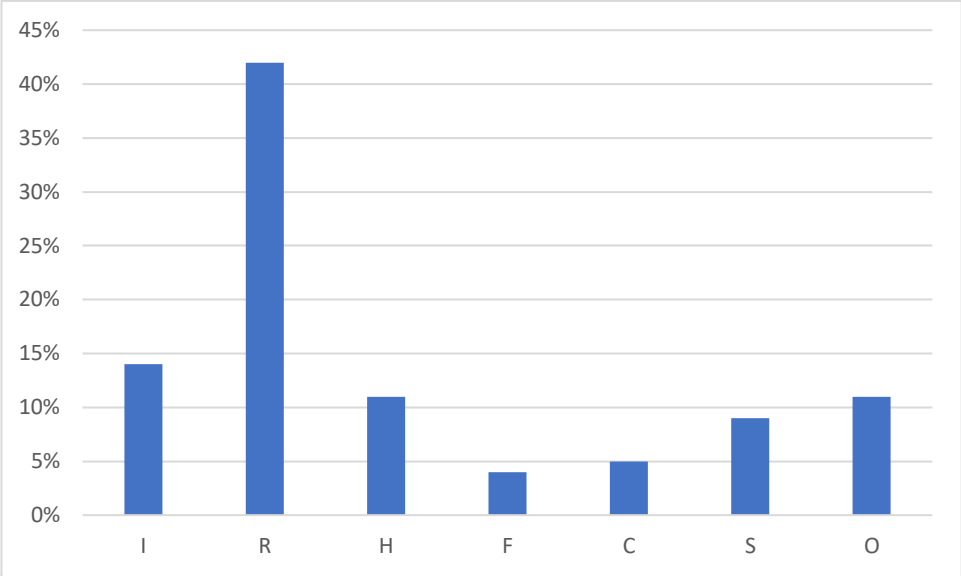
%47'si 50 yaştan sonra ve %41'i ise üstten aşmadan dolayı hasar gördüğü ortaya çıkmıştır.



Şekil 4. 26. ICOLD yapım amacına göre baraj sınıflandırılması

Çizelge 4. 7. Yapım amacına göre sınıflandırılma

Yapım amacı	Baraj sayısı	Yüzdelik
R	124	%42
I	41	%14
H	33	%11
S	28	%9
C	15	%5
F	12	%4
O	33	%11



Şekil 4. 27. Yapım amacına göre sınıflandırılma oranı

4.5. Barajlarda Sızma Problemi ve Çözümler

Suyun baraj gövdesinden veya temelinden geçmesi, barajda ciddi bir problem olduğunu göstermektedir. Bu türbülanslı akım, iç erozyonun da oluşabilme ihtimalini göstermektedir. Bu durum zaman ilerledikçe malzemenin bozulması ve yapının zarar görmesine yol açan bir sızma gelişimidir. Temeldeki mukavemeti düşük malzemelerden veya baraj gövdesindeki yüksek plastik killerden küçülen çatlaklardan meydana gelen oturma çatlakları da bir sızmaya neden olabilmektedir (Yenigün ve Gerger, 1998).

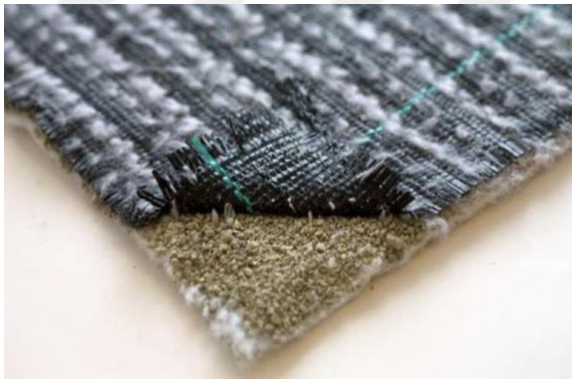
Sızmanın nedenini birkaç etkenle tahmin etmek zordur. Sızma problemleri değerlendirilebilmek için geniş bir çalışma yapılmalıdır. Hidrodinamik kaidelere göre su genelde en kolay yolu seçerek baraj gövdesindeki borulanmalara neden olur. Bu durum dolgu barajlarda kaçınılmaz hale gelmiştir (Mortazavi ve Soleimani, 2015).

Dolgu barajlarda oluşan sızma miktarı kontrol altında bulundurulmalıdır. Barajların yapılacağı bölgede gereken geçirimsizliğe sahip malzemelerin bulunamadığı halde sızma hattının kontrol altına alınmalı ve dolgu malzemenin sızmayla beraber taşınıp baraja zarar vermesini önlemek için gövdenin mansabında

yeterli boyutlarda topuk drenaj yapılabilir. Böylece sızıntı hattı mansaptan uzaklaştırılıp kontrol altında alınabilir (Sağlıca, 2013).

Derin temellere sahip alüvyon dolgu barajlarda ise bulamaç hendeği yöntemiyle yeraltı suyundan kaynaklanan sızmayı engellemek için geçirimsizlik perde yapılır (Çakır ve ark, 2019). Bu yöntemde hendek stabilitesini sağlamak adına yüksek vizkositeye sahip akışkanlar doldurularak kazılar desteklenir. ICOLD farklı elemanlar için uygulanabilir maximum kazı derinliği ile alakalı önerilerde bulunmuştur (Fenoux, 1985).

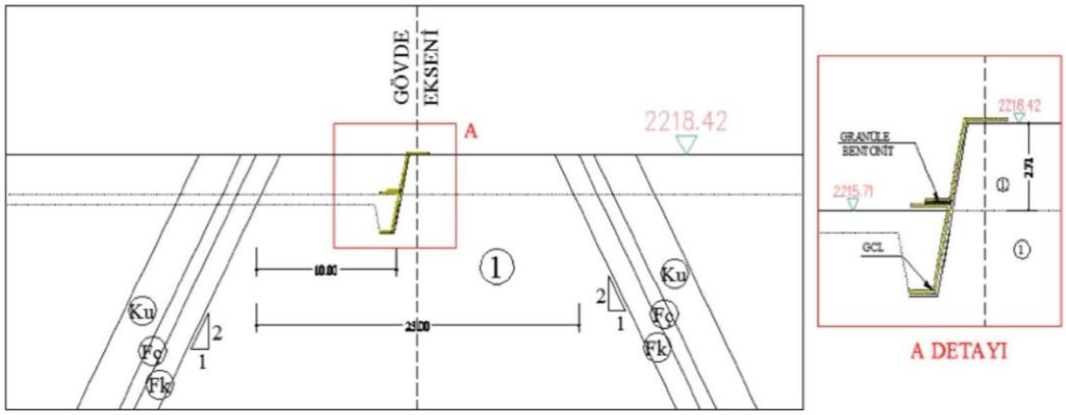
Genellikle dolgu barajların geçirimsizliği kil çekirdekle sağlanmaktadır. Yalnız uygun koşullara sahip kil bulunamadığında geosentetik kil ile kil çekirdeği desteklenir. Geotekstil malzemelerin arasına yerleştirilir, suya temas edince şişip jel haline gelerek sıkıştığı yerde yüksek düzeyde yalıtım sağlayan geosentetik kil çok uygun ve ekonomik olup dolgu barajların geçirimsizliği sağlamaktadır. Bu yöntem de Morgedik Barajı'nda başarılı bir şekilde uygulanarak Türkiye'de ilk kullanım örneği olmuştur (Aydın, 2018).



Şekil 4. 28. Geosentetik Kil (GCL)

Geosentetik kilin uygulama yöntemi aşağıdaki gibidir;
Memba tarafındaki kil dolgu ve şev kesimi belli bir seviyeye kadar bittikten sonra trapez hendeği kazısına başlanır. Geosentetik kil roluları ankraj hendeği üzerine serilir. Membada kalan kil dolgu mensap seviyesine gelecek şekilde tamamlanır. Kil dolgusu artırmadan önce GCL ruloları mansaba değil de memba tarafına verilir. Mansapta kil dolgu ve şev işlemi tamamlanır. Şevde GCL ruloların arasına sızdırmazlığı arttırmak amacıyla granüle bentonit dökülür. Membada geri kalan kil dolgu mansap kotuna

getirilir ve bu şekilde işlemin tekrarlanmasıyla imalat bitmiş olur (Aydın, 2018).



Şekil 4. 29. GCL bitimi ve granüle bentonit detayı

Baraj temelinde veya gövde içinde serbestle sızan su, dolgu ve temel malzemesini aşındırarak stabiliteyi değiştirmektedir. Bazen su, dağılan minerallerden ve alçı taşından cereyan edip baraj gövdesine geçmektedir. Bu da boşluk su basıncını artırır. Meydana gelen bu yüksek basınç toprağı zayıflatmaktadır. Baraj gövde malzemelerin cinsi ve temel sızdırmazlığı, sahada ve laboratuvar ortamında deneyler yapılmalıdır. Baraj su tutma aşamasından sonra boşluk su basıncı, kayıp su toplamı ve sızma debileri gibi detayların belirlenip analiz ederek bilimsel çözümlere yol açar. Baraj gövdesinde veya temelinde meydana gelebilecek sızmanın baraj emniyeti üzerindeki tesisleri proje tasarım aşamasında düşünülmeli ve sızma tasarım aşamasında minimum düzeyde tutup suyu güvenli bir şekilde geçmesini sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır (DSİ, 2012).

ÖYBK yüksek baraj inşa edildiğinde özellikle ilk dolum sırasında ön yüzü betonda meydana gelen çatlaklar olup aşırı sızmaya neden olur (DSİ, 2012). Bunun nedeni ise çoğu zamanda yetersiz beton tasarımı ve uygunsuz beton işçiliğinden kaynaklanmaktadır (Ergeneman, 2012).

Bu durum Brezilya'daki Barra Grande Barajında da gerçekleşmiştir. Baraj ilk dolum sırasında merkezi düşey büzülme derzi ve yüksek basınç gerilmesinden kaynaklanan çatlaklar Şekil 4.31'daki gibi oluştur. Baraj bakım ve onarım işlemlerinden sonra faaliyete geçti (Yenigün ve Yüzgül, 2013).



Şekil 4. 30. Barra Grande Barajı'ndaki beton hasarı

Şekil 4.32'da Brezilya'da Campos Novos Barajı'nda 2006'da yüksek basınç gerilmesi sebebiyle sızma meydana gelmiştir. Baraj bakım ve onarım işleminden sonra 2007 yılında faaliyete geçmiştir (Yüzgül, 2018).



Şekil 4. 31. Campos Novos Baraj Hasarı, Brezilya, 2006

Yine sızma problemine maruz kalan Çin'de Tiansheng Qiao Baraj'ı merkezi düşey büzülme derzleri ve yüksek basınç gerilmesi nedeniyle beton plağında kırılma Şekil 4.33'deki gibi olmuştur (Yenigün ve Yüzgül, 2013).



Şekil 4. 32. Tiansheng Qiao Barajı'ndaki hasar, Çin

ÖYBK barajlarda geçirimsizliği arttırmak amacı ile ön yüzü beton plakalar arasında yüksek dayanımlı bakır su tutucu yerleştirilir. Ayni anda baraj gövdesinde meydana gelebilecek oturmaları minimum seviyeye indirmek için su tutucuların altına Şekil 4.34'deki gibi neopren adlı malzeme yerleştirilir (Yüzgül, 2018).



Şekil 4. 33. Su tutucuların altına neopren yerleştirme işlemi

Şekil 4.35'te su basıncı tesiri ile derz noktalarında meydana gelebilen sızmayı uçucu kül ile derz noktalarını doldurarak ve o bölgede katılaşarak su sızmasını engellemektedir (Yüzgül, 2018).



Şekil 4. 34. Uçucu kül uygulaması

Ön yüzü betonda kürleme işlemi yapılsa da bazen küçük çatlaklar meydana gelir. Bu oluşan çatlaklar gövdede herhangi bir hasara uğramamak adına sikaDur-52 li olan epoksi ile tamiri Şekil 4.36'teki gibi yapılır (Yüzgül, 2018).



Şekil 4. 35. Epoksi uygulaması

Bentonit malzemesi suyu emerek içine çeker, şişip jel haline gelerek baraj yapım işleminde su kaçaklarını önüne geçmek için kullanılır. Yüksek plastik endeksine sahip olması nedeniyle beton çatlakların oluşumunu önler (Esener, 2005).



Şekil 4. 36. Bentonit görünümü

4.6. Betonda Oluşan Problemler ve İyileştirme yolları

ÖYBK temel kazıları ve iyileştirmeler aşağıdaki gibidir;

Sıyırma kazısı: kazı alanı kuru ve temiz tutup, malzemeleri de uzaklaştırarak korunmalıdır

- Yüzeyin temiz tutması, aksi takdirde erozyon ve borulanma meydana gelebilmektedir.
- Enjeksiyon, topuk plağı süresince yapılmalıdır.
- Basınçlı hava ve su ile temizliği sağlanmalıdır.
- Topuk plağından geri gittikçe ve uzaklaştıkça dolgu kütlesi otomatik olarak artmalı.
- Yerel boşluklar beton ile doldurularak desteklenir.

Beton ön yüzü koruma işlemi püskürtme betonu, asfalt ve şerbet yöntemi Şekil 4.38'daki gibi olup Şekil 4.39 ve 4.40'deki ise beton bordür yöntemi ile segregasyonu düşürüp erozyonu önler. Beton ön yüzü ve bordür beton arasında bitüm kullanılırsa bağ teşekkül etmemesini önlenir.

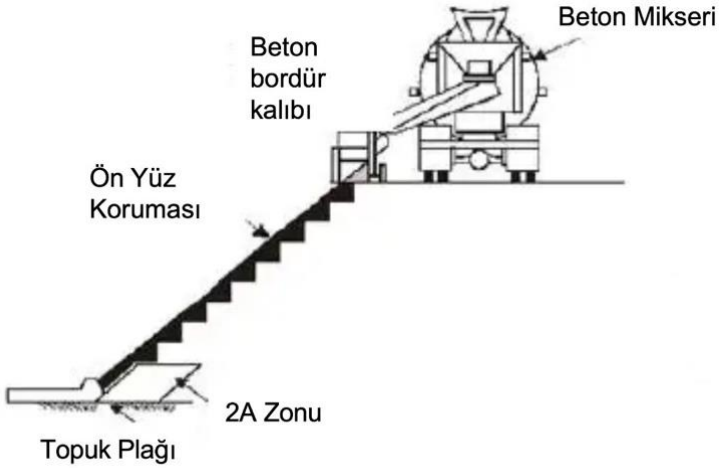
Ön yüzü beton merkezde daha kalın olmalı ve beton ön yüzü davranışı numerik modelle analiz edip değerlendirilmelidir (Ergeneman, 2012).



Şekil 4. 37. Ön yüzü beton uygulamaları



Şekil 4. 38. Beton bordür uygulaması



Şekil 4. 39. Beton bordür kalıp uygulaması

Baraj inşa sırasında açılan derivasyon tünelinde kırıcılar ile yapılacak çalışmalardan dolayı toz oluşmaktadır ve bu toz hem çalışanların sağlığı hem de çevrede bulunan varlıklara ciddi zararlar vermektedir. Tünelde oluşan tozları uzaklaştırmak adına kırıcılara su püskürtme yöntemini kullanarak tozları suyla kapatarak havayla temas etmesini engellemektedir. Basınçlı su püskürtme, baraj inşa sırasındaki özensiz püskürtme beton yüzeyini temizlemek için de kullanmaktadır. Derivasyon tünelinde uygulanan betonda kötü görünüm ve istenmeyen yapısal sonuçlar oluşunca Ilısu Barajı örneğindeki durum gibi Sika 610 ve sika 616 harcını kullanarak tamir edilmektedir. Bu malzeme eski ile yeni beton arasındaki aderansı sağlama görevini de yapmaktadır (Yüzgül, 2018).

Ard soğutma sistemi, ÖYBK barajlarda beton döküldükten sonra hidratasyondan kaynaklanan reaksiyon sıcaklığından betonda meydana gelebilecek çatlakların önlenmesi ve tabakalar arasındaki derzlerin enjeksiyon işlemi yapılması için derz kapanma ısısı kadar beton ısı derecesini de düşürme görevini yapmaktadır (Yüzgül, 2018).



Şekil 4. 40. Ard soğutma sistemi

Şekil 4.41'da görüldüğü gibi Ilısu Barajı dolusavak beton dökme aşamasında basınçlı su geçirerek tüm kaçakların olasılığına karşı önlemler alınmış olup beton dökülür. Şekil 4.42'ta görüldüğü gibi nehir suyu borulardan geçerek beton sıcaklığını önlenmiş olur. Sürekli olarak verilen bu basınçlı su ağızlardaki ısıyı kontrol ederek beton sıcaklık derecesini düşürülmüş olup bu işlem 7 gün boyunca gereken sıcaklık derecesine vardıktan sonra borulara enjeksiyon yaparak işlem bitmiş olur. Bu ard soğutma metodunun amacı beton ısısını, derz enjeksiyon aşamasına girebilmek için istenen derz sıcaklığına kadar düşürmektir (Yüzgül, 2018).



Şekil 4. 41. Ard soğutma sistemi ve ısı kontrolü

Taze beton dökme aşamasında hidratasyon nedeniyle oluşan reaksiyon sıcaklığının betona zarar vermesini önlemek için ön soğutma sistemi aşağıdaki sıralamaya göre yapılır;

1. Agregayı soğutmak
2. Düşük hidratasyonalu çimento kullanmak
3. Çimento dozajını azaltmak
4. Uçucu kül gibi puzolanları kullanmak
5. Buzlu su kullanmak
6. Taze beton ısısını düşürmek

Beton barajlarda sıcaklığı kontrol edebilmek için aşağıdaki faktörlere dikkat edilmelidir;

- Beton kütle ısısı
- İklim sıcaklık değişimi
- Baraj tipi ve yüksekliği
- Kullanılan beton karışımı
- İklim değişikliğinden kaynaklanan beton kısıtlamaları

Beton döküm aşamasında sürekli titreşim vererek yerine yerleştirilmesini sağlar. Beton döküldüğünde priz almadan önce kalıplara yerleşebilme adına ve segragasyonları önlemek amacıyla titreşimli vibrasyon yöntemleri kullanılmaktadır (Yüzgül, 2018).



Şekil 4. 42. Betonda titreşim uygulama yöntemi

Beton yüzeyinde oluşacak plastik büzülme çatlaklarının önüne geçmesi için döşemede vibrasyon bittikten sonra perdah cihazını kullanarak perdahlama işlemi yapılır.



Şekil 4. 43. Beton yüzeyinde kürleme işlemi

Soğuk iklimlerde beton döküm işleminden sonra çelik malaları ile perdahlama işlemi yapılabilmesi için şekil 4.45'te görüldüğü gibi ano yüzeyleri kapatılır. Ayrıca beton döküldükten sonra kimyasal kür beton yüzeyine uygulanmaktadır. Kapatma

işlemi yapıldıktan sonra TS 1248'de gereken sıcaklıkta beklemesini sağlamak adına beton priz alma süresine kadar ışımakla sıcaklık verilir. Betonda donma meydana gelmesi dayanım azalması, direnci kaybı ve sızdırmazlık azaltılır. Böyle bir durum meydana gelmeden önce yeterli bakımlar yapılmalı aksi takdirde beton hasara uğrayabilir (Yüzgül, 2018).



Şekil 4. 44. Soğuk havalarda beton koruma yöntemi



Şekil 4. 45. Işımak kullanarak soğuk havada beton koruması

4.7. Dolusavakta Oluşan Problemler

Dolusavak kapakları açılınca su akımı hızlı bir şekilde mansaba geçer. Bu hızlı akımla birlikte akım derinliği azalıp ve buhar basınç seviyesine kadar inmektedir. Düşen akım buhar kabarcıkların oluşmasına neden olur. Bu olay sırasında kinetik enerji, basınç enerjisine dönüşüp akımdaki bozukluk mansaba geçerek kavitasyon

hasarına sebep olur. Kavitasyon hasarını önlemek için boşaltma kanallarına havalandırıcı kurarak su akımına hava karışmasını sağlar (Yüzgül, 2018).

1983 yılında Glen Kanyon Barajı dolusavağında derin bir kavitasyon boşluğu gözlemlenmiştir. Oluşan kavitasyondan sonra havalandırıcı yapıları inşa edilmiştir (Alçay ve ark., 2018).



Şekil 4. 46. Glen Kanyon Barajı ve kavitasyon

Ilısu Barajı'nda kavitasyon hasarını önlemek için havalandırıcıların inşa edilmesine ilave, kavitasyon riskini azaltması ve beton kütlesini artırmak adına dayanımı yüksek olan silika dumanı uygulanmıştır (Alçay ve ark., 2018).



Şekil 4. 47. Silika Dumanı

Silika dumanı beton dayanımını arttırır, terlemeyi düşürür, sızmayı önler, alkali silika reaksiyonunu düşürür ve sülfatlara karşı dayanımı arttırır. Ayrıca silis dumanı kullanınca su ihtiyacı artacağı için, bu duruma karşı hiper akışkan maddeler kullanılmalıdır (Alçay ve ark., 2018).

Dolusavak sıçrama eşiğinde oluşan deflektör problemi, beton yüzeyine şekerli su püskürterek ve böylece priz süresini artırarak çözülmektedir.



Şekil 4. 48. Ilısu Barajı'nda şekerli su kullanımı

Önyüzü beton ile bordür beton arasında bir bağ kurmak gerekir. Bunda dolayı bitüm kullanılarak tabakaların ayrı ayrı çalışmaları sağlanır (Yüzgül, 2018).



Şekil 4. 49. Bitüm kaplama işlemi

4.8. Ölçmeler ve Yöntemler

4.8.1. Dolgu barajlarda kullanılan ölçme aletler

1. Piyezometreler:

a) Temel – dolgu tipi: kil çekirdekli kaya ve toprak barajlarda kullanımı yaygındır. Temeldeki sızıntıyı, enjeksiyon perdenin efektif değerini ve yeraltı su seviyesinin kontrolünü yapmak amacıyla kullanılır.
b) Toplam basıçölçer: kaya ve toprak dolgu barajlarda dolgu ve boşluk su basıncını ölçer.

   Dolgu hızını kontrol etmek amacıyla piyezometre ile beraber kil dolgu malzemenin içine yerleştirilir. Aynı anda kaya dolgu barajlarda oluşan basınçları ve kemerleşmeyi belirlemek için de kullanılır.
c) Magnetic extensometer: Dolgu barajlarda oluşan çökme veya kabarma sebebiyle meydana gelen düşey deplasmanların ölçümünde kullanılır.

2. Su basınçölçer: mansap yönündeki filtre tabanına yerleştirilir. Ölçer başına kesinlikle numaratör takılmalıdır.
3. Çökme ölçer: ÖYBK'da kullanılır. Hendek içine yerleştirilemez olup gövde yerleştirme noktalarına yerleştirilir.
4. İnklinometre: ÖYBK 'da belirli kesitlerde ve yükseklikte yatay deplasmanları ölçümünde kullanılır. Ayrıca temellerde, baraj gövdesinde ve payandalarda sondaj derinliklerine yerleştirilir ve sondaj eksenine dik yönde meydana gelen hareketlerin yeri, büyüklüğü ve yönü tespit edilir (Ulusoy, 2015).

4.8.2. Barajlarda deformasyon izlenmesi

Barajlar ve baraj çevresi farklı nedenlerle deformasyona uğrayabilir. Baraj tipi, gövde yapısı, su miktarı, su basıncı, gövdede meydana gelen su basınç değişmeleri, iklim koşullardaki değişmeleri ve yeryüzündeki hareketler deformasyona uğrama sebebini açıklar. Bu deformasyon değişmeleri küçük hasardan baraj yıkılmaya kadar tehlikelei sonuçlar verebilir. Oluşabilecek her türlü fiziksel veya şekil değişmeleri sürekli olarak incelenir ve kritik noktalara ne kadar yaklaşmış olup hangi tehlike sınıfına geçiş yaptığının belirlenir. Böylece gerekli tüm önlemler alınır ve baraj güvenliği, verimliliği ve beklenen performansa erişilebilinir. Barajlarda oluşan deformasyonları izlemek için jeodezik ve jeodezik olmayan yöntemler aşağıdaki gibi kullanılır;

Çizelge 4. 8. Jeodezik yöntemlerle ölçme aletleri

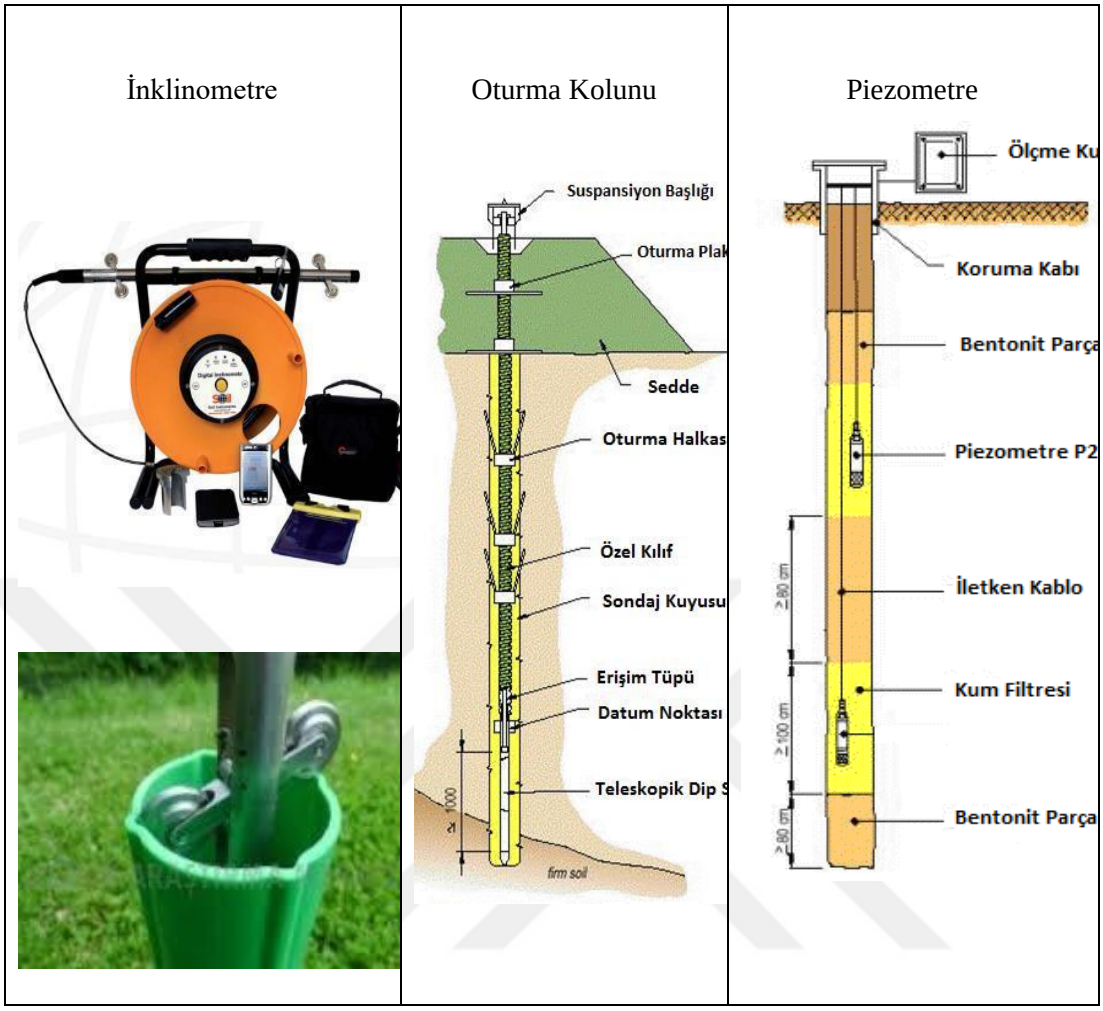
Jeodezik Yöntemler	Kullanılan Alet ve Donanımlar
Aliynman Ölçmeleri	Teodolit, Laser Optik, İnvar Tel vs.
Klasik Konum Ölçmeleri	Total station, Teodolit ve uzaklık ölçer
Uydu bazlı konum ölçmeleri	GNSS alıcıları
Presiz. Trigonometrik Nivelman Ölçmeleri	Presiz. Total Station, Teodolit ve uzaklık Ölçer
Presiz. Geometrik Nivelman Ölçmeleri	Presiz. Geometrik Nivelman Donanımı
Laser Tarama Tekniği	Laser Tarayıcı
İnterferometrik SAR Görüntü Tekniği	SAR Uydu Görüntülerinin Değerlendirilmesi

Daha çok yatay ve düşey eksenlerdeki deformasyonların analizinde kullanılır. Baraj tipine, beklenen şekil değişmeler çeşidine ve barajın vardığı aşamaya bağlı olarak farklı sonuçlar gösterebilmektedir.

Çizelge 4. 9. Jeodezik olmayan yöntemlerle ölçme aletleri

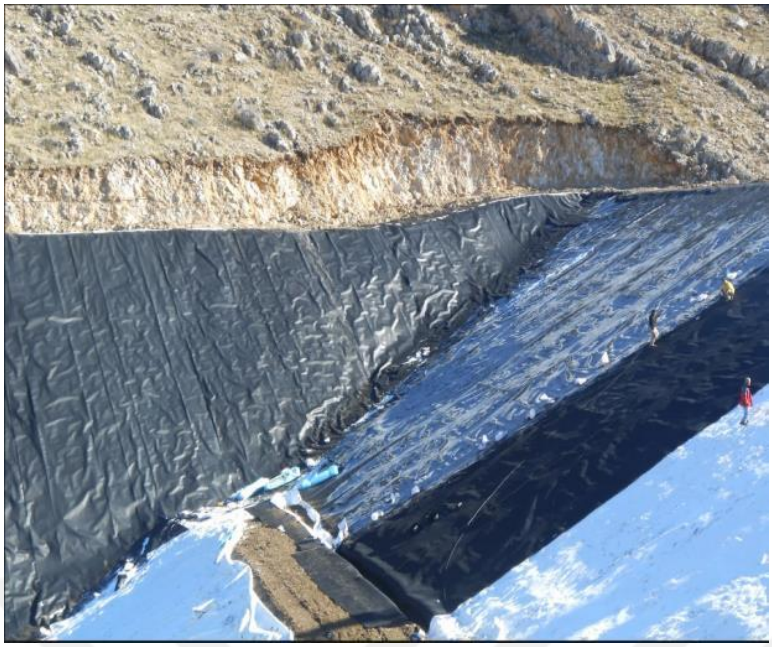
Jeodezik Olmayan Yöntemler	Ölçme Aletleri
Eğim Ölçmeleri	İnklinometre
Düşey yer tebdil Ölçmeleri	Oturma Kolonları (Settlement tubes)
Uzunluk Değişimi	Extensometre
Boşluk su basıncı	Piezometre
Düşeyden ayrılma	Pendulum
Derz Ölçümü	Jointmetre
Çatlak Ölçümü	Crackmetre

Bu aletlerin çoğu kablolu ve borulu şekilde kullanılır. İzlemeyi otomatik olarak yapar ve sonuçları kaydedip merkezinde toplar (Kalkan, 2014).



Şekil 4. 50. Jeodezik olmayan ölçme aletleri

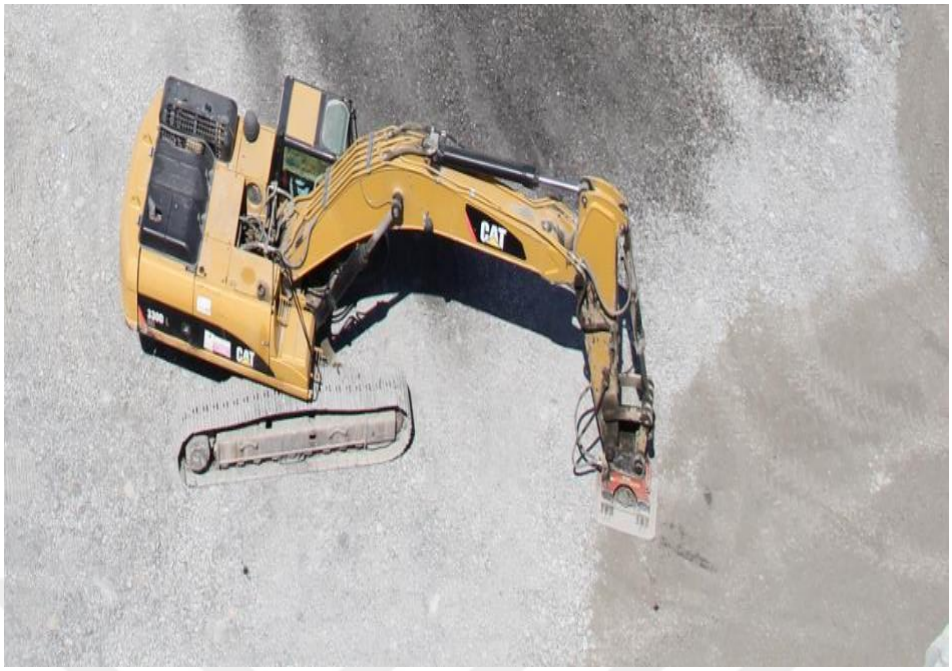
Ön yüzü membran dolgu barajlarda depremden dolayı meydana gelen aşırı şev ve kret deformasyonları, memba yüzeyinde hasar oluşmasına neden olmaktadır. Barajdaki sızma kuvveti, şev stabilitesinin arızalanmasına neden olur. Dolgu barajlarda kayma yüzeyi max ivme ve deprem deformasyon analizleri yarı ampirik metotla yapılmaktadır. Kesme dilimi ile barajdaki dolgu modellenmesi, ana kayadan kret seviyesine kadar olan ivme artışları, zemin özelliklerine bağlı şekilde hesaplanır (Çavuş, 2017).



Şekil 4. 51. Yıprak Baraj memba şevindeki membran kaplaması

Dar vadilerde ÖYBK barajlarda kret oturmaları zamana bağımlı bir şekildeki oranı, yarı logaritmik bir planda takribi olarak düz ve yalın bir eksen olmaktadır. Sıkıştırılmış ÖYBK barajlarda kret oturmaları, sıkıştırılmamış kayalı barajlara göre daha azdır. Kaya dolgu barajlar kuru olduğundan dolayı deprem esnasında boşluk su basıncı teşekkül edilmemektedir. Beton kaplama inşasında daim kür yapılması, gereken mukavemete varmak ve çatlakların önlenmesine her zaman gerekli bir işlemdir (Emiroğlu, 1998).

Kaya dolgu barajlarda kayaların birleşim bölgelerinde silindir ile köşe bölgeleri tam sıkıştıramadığı nedeniyle oturmaları meydana gelebilmektedir. Bundan dolayı köşe bölgelerine daha ince malzeme kullanılmalı ve ayriyeten düz ağızlı tip eksakavatörle sıkıştırma yapılır (Yüzgül, 2018).



Şekil 4. 52. Kaya birleşim bölgelerinde sıkıştırma yöntemi

Tokmalı silindirle su sızdırmaz dolguların sıkıştırılması önerilir. Arz edilen sıkışlığa varana kadar nemlendirme işlemini yapıp ardından silindirle maksimum 12 kere geçirilerek sıkıştırma işlemi önerilmektedir. Gerek tabaka kalınlığından daha kalın toprak dolguların sıkıştırma işlemine başlamadan önce kırılıp küçük parçalar haline getirilmelidir. Nem drecesinin optimum olmadığı yerlerde tabaka kalınlığı 15 cm halinde istenilen sıklığa varana kadar geçiş sayısı 12 kereden fazla olmalıdır. Geçirimsiz çekirdeğin yetereince sıkıştırılmadığı halde mekanik tokmalarla arz edilen sıkışıklığa varılır (Çetin, 2009).

4.9. Baraj Yeri ve Tip Seçimi

Baraj yeri ve tip seçimini etkileyen faktörler;

- Vadi şekli ve topografik durumu: vadinin topografik şekline göre baraj tipi seçilir, V şeklindeki vadilere beton kemer, U şeklindeki vadilere ise beton ağırlık ve çok geniş vadilerde dolgu barajlar tercih edilir.
- Temel zemin ve jeolojik özellikler: tüm temeller her çeşit baraj için uygun değildir. Kaya temeller çok sağlam, taşıma gücü yüksek ve homojen bir yapıya sahip olup sızdırmazlardır, her tip baraj için uygundur.

1. Çakıl temeller ise oturma miktarı az, taşıma gücü iyi ancak geçirimli bir yapıya sahiptir. Bunlar genelde payandalı ve kemer barajlarda tercih edilmez. İyi sıkıştırılsa toprak dolgu, kaya dolgu, ve yüksekliği az beton ağırlık barajlarda uygun olur. Geçirimliliği yüksek olduğu için sızdırmayı engelleyecek veya azaltacak malzeme kullanılmalıdır.
2. Silt veya ince kum temeller: taşıma gücü düşük, geçirimliliği çok ve oturma miktarı yüksek olmasından dolayı barajda erozyon oluşabilir. Yüksekliği az beton ve toprak dolgu barajlar için uygun olabilmektedir. En büyük problemi ise geçirimsizlik kaybı ve mansapta oyulmanın olmasıdır.
3. Kil temeller: taşıma gücü çok düşük olup geçirimliliği azdır, ve oturma miktarı çok yüksektir. Sadece alçak toprak dolgu barajlarda uygundur.

- Ulaşım imkânları: baraj yeri seçilirken yollara yakın olması, yeni maliyetli imalatların yapımını azaltmalıdır.
- Deprem koşulları: meydana gelecek herhangi bir deprem planlama aşamasında çok dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir.
- Ekonomi: baraj inşası ülkenin ekonomisine bağlı olup, demir, çimento ve diğer yapı malzemelerini üretimi baraj tipi seçiminde rol alır.
- Derivasyon şartları: barajlar kuru ortamda inşa edilir. Memba ve mansab kısmında batardo barajlar ile çevirilir.
- Dolusavak yeri ve kapasitesi: dolgularda oluşabilecek hareketlere karşı hoşgörülü olmasına rağmen suyun gövde aşmasına karşı dayanıklı olmayıp direnci azdır. Buda dolgu barajlarnın tutucu tasarımını görünmektedir. Beton barajlarda gövde üzerinden su aşmasında tasarım toleransı büyüktür. Büyük yapılarda meydana gelebilecek büyük taşkınlara karşı yeterli kapasiteye sahip dolusavaklar yapılır. Burda dolusavağın baraj gövde üzerinde yerleşebildiği beton ve kemer barajlar uygun olabilir. Dar boyunların olduğu vadilerde ise dolusavağın yer alabildiği dolgu baraj uygun olur
- İklim şartları ve inşa süresi: iklim koşullarına göre tip seçilir, eğer killi bir yapı söz konusu ise malzeme büyük çapta oluyor fakat iklim koşulları yapımına müsaade etmiyorsa, beton baraj tipi seçilir. Aynı anda inşaat süresi göz önünde bulundurmalıdır.

- Heyelan: baraj rezervuar yamaçlarında heyelanlardan oluşabilecek dalga hareketleri zemine aktarılır. Dolgu barajlar dalgalara karşı dayanımı zayıftır. (Gedik, 2018).

4.10. Günümüzde Baraj Hasarlarından Edilen Tecrübeler Doğrultusunda Performans Değerlendirmesi

Önyüzü beton kaya barajlarda ÖYBK kayaların dayanım yüksekliği ile tutucu ön yüzü beton yardımıyla dünya genelinde tercih edilen bir tiptir. Kayalar geçirgen olup sızma hattı oluşturduğunda iç ereozyon ve borulanma gözlenmemektedir. Kaya dayanımı yüksek olması barajın aktif ömrünü artmasına neden olur. Ön yüzü beton barajlar deprem dalgaları meydana geldiğinde kaya dolgu boşluklarında su basıncı oluşturmaz, bundan dolayı depreme karşı dayanıklı bir tiptir. ciddi bir deprem yüküne denk gelen bir durum söz konusu kayıtlara geçmemiştir. Yüksekliği az veya orta olan barajlarda düşük ve orta mertebeli depremlerde sızma artması normaldir. Yüksek mertebeli depremlerde ise plak kalınlığı artırılmaktadır. Yüksek inşaatlarda çatlaklar ve sızma ciddi bir oranda artış gösterirse rezervuar boşaltmaya geçirilir (DSİ, 2012). Bu tip barajlarda sorunların nedeni çoğu zaman yetersiz beton tasarımı ve uygunsuz beton işçiliğinden kaynaklanmaktadır (Emiroğlu, 1998).

Homojen toprak dolgu barajlar dünyada kullanılan en basit ve en eski baraj tipidir. Toprak barajların tasarımı, planlaması ve inşası hakkında tecrübeler ve deneyimler bulmak mümkündür. Toprak malzemelerinin dayanımı ve davranışı ile ilgili bilgiler çok sayıda olması, toprak barajların güvenli bir şekilde inşaatı artış göstermektedir. Bu tip barajlarda en büyük problem ise kontrolü olmayan sızmalar meydana gelmesidir. 19. Yüzyıldan beri dolgu barajlarda iki ana temele önem verilmiştir;

a) Geçirimsiz olup su tutma görevini alan eleman ya da az geçirimli çekirdek,
b) Yapının stabilitesinin sağlanması amacıyla iri malzemeli yardımcı dolgular.

Kaya dolgu barajlar beton dolgu barajlardan daha üstündür bunun nedeni ise;

a) Kış aylarında kaya dolgunun serilmesi uygundur.

b) Kaya dolgu ile beton enjeksiyonunun aynı zamanda yapılmasında sakınca yoktur.
c) Kaya dolguda borulanma ve boşluk basıncı bulunmamaktadır.

Dolgu barajlar diğer tiplere göre zaman ilerledikçe daha gündemde olmaktadır.
Bunun nedeni aşağıda verilmiştir.

- Hem dar vadilerde hem de geniş vadilerde yapımı uygundur,
- İste sert kaya olsun iste yumuşak toprak olsun, geçirgen veya geçirimsiz, sıkışabilen veya sıkışamayan temel koşullarında yapılabilmektedir,
- Kullanılacak malzeme çevre doğasından temin edildiği için dışarıdan getirilecek malzeme veya çimento miktarı azdır,
- Dolgu barajların tasarım kriterleri esnektir,
- İnşaat işlemlerindeki kullanılan makinelerin gelişmesiyle piyasada toprak dolgu veya kaya dolgunun birim fiyatı beton gibi hızlı artış göstermemektedir.

Bu üstünlüklerin yanında ise dezavantajları bunlardır:

- Gövde üzerinde su aşma tehlikesi yüksek olmasından dolayı hasar / yıkılma olasılığı daha büyüktür. Bunun için taşkını dikkate alacak dolusavaklar tasarlanmalıdır.

Baraj gövdesinde ve temelinde erozyon ve sızmanın tehlikesi diğer baraj tiplerine göre daha büyüktür (Gedik, 2018).

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Proje mühendisleri en tehlikeli durumları göz önünde bulundurarak proje ve planları tasarlar. Bu şartlar baraj mühendisleri için de vazgeçilmez bir durumdur. Geçmişte ve günümüzde devam eden baraj hasarlarından meydana gelen kaza sonuçları düşündüğünde baraj güvenliğinin önemini göz önüne serer (Yenigün ve Yüzgül 2014).

Ayrıca baraj güvenliği, proje tasarım aşamasından başlar işletme sürecine kadar devam eden bir kavramdır. Bu sebeple güvenliğe harcanan tutar proje maliyetini değiştirmez herhangi bir tasarruf söz konusu olmayabilir.

Proje mühendisleri bir baraj tasarlarken doğal afet ve dış tehlikelerinin tümünü risk olarak değerlendirip, çalışma alanında oluşabilecek problemleri minimum seviyeye indirecek şekilde denetimlerin sürekli yapılması ve bu denetimleri yaparken iş güvenliğini sağlayarak hem mevcut barajlar için hem de yeni barajların planlama, inşa ve işletme mekanizmalarının tümünü içerecek etkin ve yeterli bir kontrolün oluşması ve düzenli işletme ölçümlerinin gerçeğe yakın bir şekilde müdahale edip problemlerin gidermesini sağlamaktadır.

Barajların yaşı arttıkça bakım ve denetim de orantılı bir şekilde artmalı bilgisi doğru olup yapılan çalışmaya göre barajlar işletmeye açıldıktan ilk 10 yıl içinde yıkılma oranı %25 olup 50 yaştan sonraki yıkılma oranı ise %30 olarak tespit edilmiştir. Buna dayalı ilk 10 yaştaki barajların bakım ve onarımı göz ardı edilmemelidir.

Ayrıca barajların yüksekliği arttıkça, kontrol teşkilatın mesuliyeti de arttığı bilinmektedir. Çalışmaya göre küçük barajların hasar oranı büyük barajlara göre daha yüksek olduğundan dolayı, büyük barajlarda yapılan kontrol ve denetimlerin ne kadar önemli olduğu biliniyorsa, küçük barajlarda da ayni durum söz konusudur.

Çalışmaya dayalı iklim değişikliğinden meydana gelen taşkın olasılığı göz önünde bulundurarak dolusavak boyutu ve kapasitesi tam ve yerinde hesaplanarak tasarlanmalıdır.

Yapılan araştırmalar sonucunda, suyun baraj gövdesinden veya temelinden geçmesi, barajda ciddi bir problem olduğunu göstermektedir. Bu durum zaman ilerledikçe malzemenin bozulması ve yapının zarar görmesine yol açan bir sızma gelişimidir. Sızma değişik faktörlerden meydana geldiğinden dolayı davranışlarını tahmin etmek epey zordur. Bu sebeple sızma problemlerini değerlendirilebilmek için geniş bir çalışma yapılmalıdır. Hidrodinamik kaidelere göre su genelde en kolay yolu seçerek baraj gövdesindeki borulanmalara neden olur. Bu durum dolgu barajlarda kaçınılmaz hale gelmiştir.

Dolgu barajlarda oluşan sızmayı baraj gövdesinden uzaklaştırılıp baraja zarar vermesini önlemek için gövdenin mansabında yeterli boyutlarda topuk drenaj yapılabilir. Böylece sızıntı hattı mansaptan uzaklaştırılıp kontrol altında alınabilir.

Alüvyonlu dolgu barajlarda yeraltı suyundan kaynaklanan sızmayı engellemek adına bulamaç hendeği yöntemiyle geçirimsizlik perde yapılır ve yüksek vizkositeye sahip akışkanlar doldurularak kazılar desteklenir.

Genellikle dolgu barajların geçirimsizliğinde kullanılan kil çekirdeği bulunmadığı durumlarda geosentetik kil malzemesi ile kil çekirdeği desteklenir.

Baraj gövde malzemelerin cinsi ve temel sızdırmazlığı, sahada ve laboratuvar ortamında deneyler yapılmalıdır. Baraj su tutma aşamasından sonra boşluk su basıncı, kayıp su toplamı ve sızma debileri gibi detayların belirlenmesi bilimsel çözümlere yol açar. Baraj gövdesinde veya temelinde meydana gelebilecek sızmanın baraj emniyeti üzerindeki tesisleri proje tasarım aşamasında düşünülmeli ve sızma tasarım aşamasında minimum düzeyde tutup suyu güvenli bir şekilde geçmesini sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır.

ÖYBK yüksek baraj inşa edildiğinde özellikle ilk dolum sırasında ön yüzü betonda meydana gelen çatlaklar olup aşırı sızmaya neden olur. Bunun nedeni ise çoğu zamanda yetersiz beton tasarımı ve uygunsuz beton işçiliğinden kaynaklanmaktadır. Geçirimsizliği arttırmak amacı ile ön yüzü beton plakalar arasında yüksek dayanımlı bakır su tutucu yerleştirilebilir. Ayni anda baraj gövdesinde meydana gelebilecek oturmaları minimum seviyeye indirmek için su tutucuların altına neopren malzemesi yerleştirilmelidir. Derz bölgeleri sızmayı önlemek adına uçucu kül kullanılabilir. Ayriyeten baraj yapım işleminde su kaçaklarının ve beton çatlaklarının oluşumunu önlemek için bentonit malzemesi kullanılır.

ÖYBK barajlarda beton ön yüzü koruma işlemi püskürtme betonu, asfalt ve şerbet yöntemi ve erozyonu önlemek için bordür beton yöntemi kullanılır. Ön yüzü beton ve bordür beton arasında bağ oluşturmamak için bitüm kullanılır.

Derivasyon tünelinde oluşan tozları uzaklaştırmak için ve beton yüzeyini temizlemek için basınçlı su püskürtülür.

ÖYBK barajlarda beton döküldükten sonra hidratasyondan kaynaklanan reaksiyon sıcaklığından betonda oluşan çatlakların önlenmesi ve derzlerin enjeksiyon işlemi yapılabilmesi için beton sıcaklığını düşürerek ard soğutma işlemi uygulanır.

Taze beton döküm aşaması ve beton barajlarda sıcaklığı kontrol edebilmek için uygulanması gereken faktörlere dikkat edilmelidir.

Beton döküm sırasında sürekli vibrasyon uygulanır ardından perdahlama işlemi yapılır.

Soğuk iklimlerde beton döküm işleminden sonra çelik malaları ile perdahlama işlemi yapılabilmesi için ano yüzeyleri kapatılır. Kapatma süresi boyunca istenilen sıcaklığı varana kadar ışımakla sıcaklık verilir. Betonda donma meydana gelmesi dayanım azalması, direnci kaybı ve sızdırmazlık azaltılır. Böyle bir durum meydana gelmeden önce yeterli bakımlar yapılmalı aksi takdirde beton hasara uğrayabilir.

Dolusavakta oluşan kavitasyon hasarının önlemek için boşaltma kanallarına havalandırıcı kurarak su akımına hava karışmasını sağlar. Bu yöntem Glen Kanyon

Barajı'nda başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bir başka yöntem ise Ilısu Barajında kavitasyon hasarını önlemek için havalandırıcıların inşa edilmesine ilave uygulanan silika dumanı beton dayanımını arttırır, terlemeyi düşürür ve sızmayı önler. Bu durum neticesinde silis dumanı kullanıldığında su ihtiyacı artar ve bu duruma karşı hiper akışkan maddeler kullanılabilir.

Dolusavak sıçrama eşiğinde oluşan deflektör problemi, beton yüzeyine şekerli su püskürterek priz süresini artırarak çözülmektedir.

Dolgu barajlarda birçok ölçüm aletleri olduğu bilinmektedir. Bunlar kısaca, Piyezometreler (Temel – dolgu tipi toplam basınçölçer ve Magnetic extensometer), Su basınçölçer, Çökme ölçer ve İnklinometre ölçüm aletleridir.

Barajlarda oluşan deformasyonlar, baraj tipi, gövde yapısı, su miktarı, su basıncı, gövdede meydana gelen su basınç değişmeleri, iklim koşullardaki değişmeleri ve yeryüzündeki hareketlerden kaynaklanır. Bu deformasyonlar büyük hasarlara yol açabilir. Bu sebeple barajların oluşabilecek her türlü fiziksel ve şekil değişmeleri sürekli kontrol altında tutulup gözlenmelidir. Böylece barajın verimliliği ve beklenen performansa erişilebilir. Oluşan bu deformasyonları izlemek için jeodezik ve jeodezik olmayan yöntemler kullanılır.

Ön yüzü membran dolgu barajlarda depremden meydana gelen deformasyonların analizi ise yarı ampirik metotla yapılmaktadır.

Kaya dolgu barajlarda sıkıştırma işlemi yapılırken kayaların birleşim bölgelerinde silindir ile köşe bölgeleri tam sıkıştıramadığı nedeniyle oturmaları meydana gelebilmektedir. Bundan dolayı köşe bölgelerine daha ince malzeme kullanılmalı ve ayrıca düz ağızlı tip ekskavatörle sıkıştırma yapılmalıdır. Tokmaklı silindir yöntemi ile geçirimsiz dolguların sıkıştırılması önerilir.

KAYNAKLAR

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., KNUTSSON, S., LAUE, J., and SISSAKIAN, V., 2020. Dam Safety And Dams Hazards. Journal Of Earth Sciences And Geotechnical Engineering, 10(6):23-40.

AĞIRALİOĞLU, N., 2011. Baraj Güvenliği. Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul, 275s.

AĞIRALİOĞLU, N., 2011. Baraj Planlama ve Tasarım. Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul, 425s.

AKKAYA, U., 2010. Farklı Yöntemlerle İnşa Edilen Barajların Maliyet Mukayesesi Kuruçak Barajı örneği. Gazi Ünivetsitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüsek lisans tezi, Ankara, 86 s.

ALÇAY, R., KOÇ, A., ve YÜCEL, H., 2018. Ilısu Barajı ve HES Projesi Dolusavak ve Beton Ağırlık Baraj İnşaatı Uygulama Raporu. DSİ 16. Bölge Müdürlüğü, Mardin, 196s.

AP, 2022. More Than 2200 Dams Are In Poor Condition Posing Danger To Communities. https://www.npr.org/2022/05/05/1096940224/dams-poor-condition-hazardous-dangerous-infrastructure (Erişim Tarihi 20.06.2022).

ASDSO, 2020, Dam Incident Database Search. Association of State Dam Safety Officials.

AŞIK, Y., 2016. Barajların Kontrolü ve Denetiminin Önemi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,4 Ağustos,Cilt 6; Sayı 1,GümüȻhane, s.33-40.

AYDIN, M. C., 2018. Morgedik Barajı Geçirimsizlik Problemi ve Çözüm Uygulaması. Su Kaynakları Araştırma Makalesi, 3(2): 1-7.

BBC, 2021. Whaley Bridge: Dam repairs could cost up to £16m. https://www.bbc.com/news/uk-england-derbyshire-56495335 (Erişim Tarihi 20.06.2022).

BRIDLE, R., 2017. Internal Erosion Mechanics and Risk Estimation Based on ICOLD Bulletin 164. Geo-Risk 2017, s137-146.

BHARTI, M. K., SHARMA, M., and ISLAM, N.,2020. Study on the Dam & Reservoir, and Analysis of Dam Failures: A Data Base Approach. International Research Journal of Engineering and Technolody, 7(5): 1661-1669.

CHENG, S.T., 1993. Statistics of Dam Failures. Reliability And Uncertainty Analyses In Hydraulic Design, ASCE, New York, 97s.

CHRISTOPHER, R. K., and ALESSANDRO, P., 2003. Major risk from rapid, large-volume landslides in Europe. Geomorphology, 54: 3-9.

COOPER, D.F. and CHAPMAN, C.B. 1993. Risk Analysis for Large Projects. John Wiley and Sons, USA.

COVER, C. K., INGRAM, D. E., ERWIN, E. D., and WELLS, W. B., 1990. Training Aids for Dam Safety: How to Organize a Dam Safety Program. 119s.

ÇAKIR, E. N., ÜNSEVER, Y. S., 2019. Büyükkumla Barajı'nda Bulamaç Hendeği Yöntemi ile Geçirimsizlik Perdesi Uygulaması ve Sızma Analizi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Endtitüsü Dergisi, 23(3): 974-980.

ÇALAMAK, M., 2017. Tanyeri Barajı örneğinde barajların taşkın nedeniyle üstten aşılma güvenilirliğinin belirlenmesi. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32(3):965-975.

ÇALAMAK, M., ARICI, Y., ve YANMAZ, A. M., 2013. Türkiye'de Baraj Mühendisliğinin Gelişimi Üzerine Bir Değerlendirme, Su Yapıları Sempozyumu, 07-08 Aralık, Ankara, s73-83.

ÇAVUŞ, U. Ş., 2017. Geomembran Kaplamalı Kaya Dolgu Bir Barajın Sismik Şev Deformasyonu Tahmini. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17(2) : 638-645.

ÇETİN, F., 2009. Türkiye'deki Dolgu Barajların Geçirimsiz Çekirdek Bölgelerinde Kullanılan Malzemelerin Geoteknik Zemin Özelliklerinin İstatiksel Değerlendirmesi. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale, 150s.

DHAR, O. N., RAKHECHA, P.R., MANDAL, B. N., and SANGAM, R. B., 2009. The rainstorm which caused the Morvi dam disaster in August 1979. Hydrological Sciences Bulletin, 26(1): 71-81.

DSİ, 2012, Dolgu Barajlar Tasarım Rehberi. 1.Barajlar Kongresi, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ekim 2012, Ankara.

DSİ, 2020. Toprak Su Kaynakları https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/754 (Erişim Tarihi 20.08.2022).

ERGENEMAN, I., 2012, Ön yüzü beton kaplı dolgu barajlar, 1. Barajlar Kongresi, 11-12 Ekim 2012, Ankara.

EMİROĞLU M.E., 1998, Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Avantajları Ve İnşasındaki Son Gelişmeler. Türkiye Mühendislik Haberleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, 393:47-56.

EMİROĞLU, M. E., 2008. Influences on Selection of the Type of Dam. International Journal of Science and Technology, 3(2):173-189.

ERKAYA, H., HOŞBAŞ, R. G., GÜLAL, V. E., ve ERSOY, N., 2004. Barajlarda Deformasyon Ölçmeleri, I. Ulusal Barajlar ve Hidroelektrik Santraller Sempozyumu, 1-3 Haziran, Ankara.

ESENER, A. B., 2005. Toprtak Dolgu Yapıların Projelendirilmesinde Geoteknik Çalışmalar.Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, 106s.

EVERITT, S., 2006. Guidelines for the Design Construction Maintenance and Safety of Small Flood Detention Dams. Environment Bay of Plenty, Whakatane, New Zealand, 22p.

FEMA., 2016. South Carolina Dam Failure Assessment and Advisement. United Satate of Amerika, 64p.

FENOUX, G., 1985. Filling Materials for Watertight Cutoff Walls. ICOLD, Paris, 70s.

GAPS GUIDELINES, 2015. Dams and Other Hydraulic Structures. A Publication of Global Asset Protection Services LLC, Hartford, 06103.

GEDİK, N., 2018. Su Yapıları Ders Notu Barajlar, Balıkesir. https://vdocuments.net/7-barajlar-71-s-balikesir-mh-mim-fak-ins-mh-bl-dr-n-gedik-su.html?page=1 (Erişim Tarihi 20.06.2022).

GEORGE, E. P., and JOHN, P. C., 1989. Guidelines for Design of Dams. New York State Department of Environmental Conservation, New York, USA.

GEORGE, J., 2015. Hydraulic Structures for Flow Diversion and Storage. Kharagpur, India.

GÜNEŞ, H., 2020. Türkiye'de Baraj Emniyeti ve Atatürk Barajı'nda Deformasyon İzleme Çalışmaları ve Son 12 Yıllık Analiz Sonuçları. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi,İstanbul, 133s.

HUGHES, A., 2012. Dams and Reservoirs Regulations Performance and Past Failures. Flood Risk: Planning Design and Manegement of Flood Defence Infrastructure. s171-209.

ICOLD, 2020. Purposes of Dam. General Synthesis, https://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/general-synthesis (Erişim Tarihi 20.08.2022).

ICOLD, (2010). Bulletin on Dam Safety Management, ICOLD Publications, 30 Ekim 2019.

INTERNATIONAL CHARTER INFOGRAPHIC., 2005. Pakistan Dam Burst Shakidor Dam Post-disaster. https://disasterscharter.org/image/journal/article.jpg?img_id=22097&t=1411453264304 (Erişim Tarihi 10.06.2022)

IMBROGNO, D., 2014. Analysis of Dam Failures and Development of a Dam Safety Evaluation Program. The Ohio State University, Graduate Program in Civil Engineering, Columbus, USA, 101P.

JANSEN, R. B., 1998. Advanced Dam Engineering for Design, Construction and Rehabilitation. Van Nostrand Reinhold, New York, 816s.

JOHNSONE, W., 2021. Case Study: Testalinden Dam. Association of State Dam Safety Officials.

KALKAN, Y., 2014. Baraj Emniyeti ve Deformasyon İzleme Çalışmaları Atatürk Barajı Örneği. Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6(3):40-50.

KIZILKAYA, T. ve YEGÜL. Ü., 1988. Su Yapıları Kitabı, Milli Eğitim Gençlik ve Spor Bakanlığı Yayınları No 811, Emel Matbaacılık sanayii Ankara, 397s.

LEMPERIERE, F., 2017. Dams and Flood. Engineering, 3(1):144-149.

LISA, B., and THORWID, M., 2015. Evaluation of Failure Modes for Concrete Dams. Royal Institute of Technology KTH. master thesis, Stockholm, 124p.

LYU, Z., CHAI, J., XU, Z., QIN, Y., and CAO, J., 2019. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failure Based on Case History. Advances in Civil Engineering, Hindawi, 19p.

MARK, R., and VİCKERY, P. G.,, 2009. Design and Construction Guidelines for Dams in Texas. Dam Safety Program, Texas Commission on Environmental Quality, Austin, USA.

MARTIN, W., 2018. Dams Failures in the U.S. Stanford University, California, 10p.

MARTIN, W., 2017. Development of F-N Curves for Public Safety Risks Associated with Dam Failures in the U.S. Stanford University, California, 40p.

MAUNEY, L,. 2021. Toddbrook Reservoir Dam. Lessons Learned from Dam Incidents and Failures.

MORTAZAVI, S. M., and SOLEIMANI, S., 2015. Leakage Analysiz of Embankment Dams Using Seep/w and 3D Seep Softwares. J Appl Environ Biol Sci, 5(10): 122-128.

NHANDAN, 2012. Design Change Causes Dakrong 3 Dam Burst. The Central Organ of The Communist Party of Vietnam.

NIELSEN, N.M., VİCK, S.G., and HARTFORT, D.N.D., 1994. Risk Analysis in British Columbia. International Water Power and Dam Construction, 45(8):35-40.

ORHAN, M., 1997. Baraj Tipleri Ve Yapım Kriterleri. Türkiye Mühendislik Haberleri, 391:12-16.
ÖZİŞ, Ü., 1983, Su Yapıları Kitabı, 9 Eylül Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Yayınları İzmir, 352s.
ÖZGEN, N., ve KARADOĞAN, S., 2013. Mekan Etkileri Bakımından Hidroelektrik Santrallerin Swot Analizine Göre İncelenmesi Alkumru ve Kirazlı Barajları Örneği. Coğrafiya Dergisi, 26:21-45.
PILOTTI, M., MARANZONI, A., TOMIROTTI, M., and VALERIO, G., 2011. 1923 Gleno Dam Break: Case Study and Numerical Modeling. Journal of Hydraulic Emgineering, 137(4): 480-492.
PINTO, H., LEANDRO. W., LAURA. M., and FERREIRA FAIS, C., 2022. The Small Dams Safety Index (SDSI): a tool for small dams safety assessment. International Journal of River Basın Managment, 1(9):1-8.
PRADEL, D., WARTMAN, J., and TIWARI, B., 2012. Failure of Fujinuma Dam During the 2011 Tohoku Earthquake. 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering. 4th Asia Conference on Earthquake Engineering, 6-8 March, Tokyo, s1559-1573.
RAMYA, M. N. S., SIVASANKAR, T., GHOSH, S., and RAO G. V., 2021. A Remote Sensing and GIS Approach Toward the Analysis of Patel Milmet Dam Burst. Recent Technologies for Disaster Managemet and Risk Reduction, s 265-274.
RICHARDS, G., 2020. Case Study: Tempo Town Lake Dam. Association of State Dam Safety Officials.
RIZZO, P., and BLAIR, J., 1998. Manitenance and Operation of Dams to Prevent Failure. Paul C. Rizzo Associates, Pittsburgh.
RICO, M., BENİTO, G., SALGUEIRO, A.R., DIEZ-HERRERO, A., and PEREIRA, H.G., 2007. Reported Tailings Dam Failures A Review of the European Incidents in the Worldide Context. Jornal of Hazardous Materials, 152(2008):846-852.
RICO, M., BENITO, G., and DIEZ-HERRERO, A., 2007. Floods from Tailings Dam Failures. Journal of Hazardous Materials, 154(2008): 79-87.
RYAN, 2019. P.E., The Hazard Classification Of Dam Can Change Over Time. https://damfailures.org/lessons-learned/the-hazard-classification-of-a-dam-can-change-over-time-hazard-creep/ (Erişim Tarihi 10.05.2022).
SAĞLICA, O., 2013. Dolgu Baraj Gövdelerinde Sızma Analizi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 89s.
SHAVER, E., 2009. Hawke's Bay Waterway Guidelines Small Dam Design. Hawke's Bay Regional Council, Napier, New Zealand, 32P.
STEPHENS, T., 2010. Manual on Small Earth Dams. FAO Irrigation and Drainage Paper 64, Rome.
TÜRKER, İ.Y., 2021. Baraj Güvenliğinde Risk Yaklaşımı. https://tr.linkedin.com/pulse/baraj-güvenliğinde-risk-yaklaşimi-ilker-yılmaz-türker (Erişim Tarihi 15.05.2022).
ULUSOY, İ.C., 2015. Dolgu Barajların Güvenliğinde Risk Analizi Atatürk Barajı Öğrneği. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 114s.
US National Dams, 2022. Search national dams. https://nationaldams.com/index (Erişim Tarihi 04.06.2022).

UZEL, T., 1991, Barajların Güvenliği, Yıldız Üniversitesi Yayınları, Sayı 221, Doğan Matbaası, İstanbul, 259s.

VISEU, T., and MARTINS, R., 1998. Safety Risks of Small Dams. Edıngs Of The International Symposium on New Trends And Guidelines On Dam Safety,17-19 June, Barcelona, s.283-289.

WILLIAMSON, T., Historic dam failures and recent incidents. British Dam Society Chairman.

YENİGÜN, K., 2001. Barajların Güvenliği ve Dolusavak Boyutlarının Risk Düzeyine Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, İstanbul.

YENİGÜN, K., 2007. Dolusavaklarda Taşkına Dayalı Güvenilirlik ve Baraj Risk Programıyla Risk Analizi Uygulaması. 1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, 28-30 Mayıs, Ankara, s.301-318.

YENİGÜN, K., 2012. Baraj Güvenliği Çalışmalarında İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkisinin Overley Mapping Trend Analysis Technique ile Değerlendilirmesi. Baraj Emniyeti ve Ölçme Sistemleri Çalıştayı, 17-18 Mayıs, İstanbul.

YENİGÜN, K., ve ERKEK, C., 2002. Risk Mühendisliği Yaklaşımıyla Baraj Güvenliğinin İrdelenmesi. GAP IV. Mühendislik Kongresi, (Uluslararası Katılımlı), Şanlıurfa, s1116-1125.

YENİGÜN, K., ve GERGER, R., 1998. Gap Barajlarında Risk Faktörlerinin İncelenmesi. Gap II Mühendislik Kongresi.

YENİGÜN, K., ve GERGER, R., 2006. GAP'ta Su Kaynaklarının Planlama ve Yönetimi Üzerine Teklifler ve Kısas Örneği. TMMOB Su Politikaları Kongresi 21-23 Mart, Ankara, s123-135.

YENİGÜN, K., ve SEPETÇİOĞLU, M.Y., 2012. Güncel Baraj Hasarlarının Analizi. Uluslararası Katılım III. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, ESOGU, 10-12 Ekim, Eskişehir.

YENİGÜN, K., ve YÜZGÜL, F., 2013. Baraj Güvenliği Açısından Tip Seçimi: ÖYBK Barajlarda Etken Faktörler Ilısu Barajı Örneği. 3. Bursa Uluslararası Su Kongresi, 22-24 Mart, Bursa.

YENİGÜN, K., ve YÜZGÜL, F., 2014. Baraj Elemanlarının Tasarım ve Yapım Aşamasında Baraj Güvenliği Kıstasıyla İrdelenmesi: Ilısu Baraj Örneği. 4. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, 9-11 Ekim, Elazığ.

YÜZGÜL, F., 2018. Ilısu Baraj yeri ve Gövde Tipi Seçgim Çalıgşmaları ve Etken Faktörlergin Değerlendirilmesi. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa, 175s.

ZHANG, L.M., XU, Y., and JIA, J.S., 2007. Analysis of Earth Dam Failure A Database Approach. ISGSR 2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, 18,19 October, Shanghai, s287-297.