

Baraj Yıkılma Modellerinde Kullanılan Debi Tahmin Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Alper AYDEMİR¹, Aytaç GÜVEN²

¹Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri.

²Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep.

Eposta: aydemir@nny.edu.tr, aguyen@gantep.edu.tr

Geliş Tarihi: 17.03.2017

Kabul Tarihi: 11.04.2017

Özet

Barajların elektrik üretimi ve sulama gibi alanlarda elde edilecek faydaları ile ülke ekonomilerine katkılarının yanı sıra çevre düzenlemesi, ulaşım ve taşkın koruma gibi alanlarda da faydaları bulunmaktadır. Ancak oluşabilecek aksaklıklar baraj yapılarının yükseklikleri ve aktif depolama hacimlerinin büyüklüğüne göre farklı seviyelerde tehlikeler meydana getirmektedir. Özellikle baraj alanlarına yakın yerleşim bölgeleri için barajlarda oluşabilecek yıkılmanın önceden minimum hata ile tahmin edilebilmesi hayati önem taşımaktadır. Bu çalışma baraj yıkılma modellerinde kullanılan debi tahmin yöntemlerinin temel amaçları, hesap yöntemleri ve uygulama alanları ile elde edilecek sonuçların karşılaştırılmasını içermektedir. Literatürde bulunan ve bu çalışmada incelenen yöntemler tarihi baraj yıkılma verilerine istatistiksel regresyonlar uygulanarak elde edildiği için bazı durumlarda yetersiz kalmaktadır; özellikle bu verilerin elde edildiği baraj türlerinin (baraj yüksekliklerinin) tüm barajları içermemesi sebebiyle önerilen regresyon denklemlerinin yüksek belirsizlikleri olduğu görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Baraj Güvenliği; Baraj Yıkılma Parametreleri; Gedik Genişliği; Çıkan En Büyük Debi; Maksimum Yıkılma Debisi.

Comparison of Peak Breach Discharge Prediction Methods Used in Dam Break Modelling

Abstract

Dams have benefits such as electricity generation and irrigation for national economy as well as recreation, transportation and flood prevention could be given as other benefits. However, possible failures could cause different level hazards according to dam height and active storage volumes of dams. Especially for people living in inundation zones of dams, it is essential to predict dam breach simulations with lowest uncertainty. In this study, dam breach peak discharge prediction methods are compared based on their principles, applications and formulations. Since the methods obtained from the literature were derived from regression analysis of historical dam failures, these methods are insufficient in some situations, especially the historical data used in these studies does not include all dam failures or some types of dam data are missing. Hence, it is obvious that regression equations include high uncertainty.

Keywords: Dam Safety; Dam Breach Parameters; Breach Width; Peak Breach Discharge; Maximum Breach Discharge.

1. Giriş

Barajların elektrik üretimi ve sulama gibi alanlarda elde edilecek faydaları ile ülke ekonomilerine katkılarının yanı sıra; çevre düzenlemesi, ulaşım ve taşkın koruma gibi alanlarda da faydaları bulunmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle yıkılma parametrelerinin tanımları ve en çok kullanılan tahmin yöntemleri açıklanmıştır. Daha sonra aynı fiziksel büyüklüğü hesaplamak için kullanılan yöntemler formülleriyle birlikte verilmiş ve yöntemlerin temellerinde bulunan parametreler açıklanmıştır.

Son bölümde ise tüm yöntemlerin avantaj ve dezavantajları açıklanarak, farklı durumlarda baraj güvenliği ve mühendislik açısından başvurulması gereken çözümler ve seçilmesi gereken yöntemler açıklanmıştır. Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu'na (ICOLD) göre 15 metreden daha az yüksekliğe sahip barajlar küçük baraj olarak sınıflandırılmaktadır. Geçmiş baraj yıkılmalarında küçük barajlarda meydana gelen kazaların sayısının daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak bu barajların yapım aşamasında ve işletme süreçlerinde diğer barajlar kadar dikkatli inceleme çalışmaları

yapılmaması gibi çeşitli sebeplerden dolayı bu yıkılma durumlarına ait verilerin eksik olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda türetilen regresyon denklemlerinde bu tür barajların durumları yeterince değerlendirilmemektedir.

Bu çalışma mevcut yöntemlerin bir arada verilmesi ve birbirlerine göre kıyaslanmalarına olanak sağlamaktadır. Ayrıca tüm baraj yıkılması taşkın debi hesapları ve bu analizlerden sonra hazırlanacak acil afet eylem planlarında temel gereklilikleri içermesi bakımından önem arz etmektedir.

2. Baraj Yıkılma Parametreleri

Baraj yıkılması taşkın, sızma, deprem vb. durumlar sebebiyle meydana gelebilecek aksaklıklar sonucunda baraj gövdesinde oluşacak gedikten çok büyük debiye sahip suyun baraj rezervuarından mansap kısmına kontrolsüz bir şekilde akmasıdır. Bu süreçte en temel parametreler yıkılma sırasında oluşacak taşkın pik debi değeri, baraj gövdesinde oluşacak gediğin genişliği ile eğimi ve özellikle erken uyarı sistemlerinin temel öğesi olan yıkılma süresidir. Bu verilerden de anlaşılacağı üzere parametreler arasında çeşitli bağlantılar kurulabilir. Örneğin gedik genişliği ne kadar büyük olursa rezervuardan boşalacak su miktarı dolayısıyla pik debi değeri o kadar büyük olur.

3. Baraj Yıkılma Modellerinde Kullanılan Tahmin Yöntemleri

Foster vd. [1] çalışmalarında toprak dolgu barajlardaki sızma ve eğim karasızlıkları konularında araştırmalar yapmışlardır.

Xu vd. [2] toprak ve kaya dolgu olarak inşa edilmiş 182 baraj üzerinde yaptıkları çalışmada temel yıkılma parametrelerinin değişiminde en fazla etki eden özelliğin barajın erozyona karşı duyarlılığı olduğu sonucuna varmışlardır.

Dolgu barajlarda daha küçük daneli zeminler kullanılarak ve şev açıları daha düz belirlenerek baraj yıkılmasının süresi uzatılabilir [3].

Yıkılma sırasında oluşacak taşkın ağırlıklı olarak baraj gövdesinde oluşacak gediğin genişliğine bağlıdır [3] bu sebeple gedik genişliği hesapları aynı zamanda

mansap kısmına etki edecek olan taşkın dalgasının modellenmesi için önemlidir.

Larocque vd. [4] deneysel olarak iki boyutlu idealize edilmiş baraj yıkılmasını modelleyerek hız profillerini incelemişlerdir. Gedik genişliği ve yıkılma süresi barajın türüne, geometrik şekline, baraj gövdesinde kullanılan malzemelere, rezervuar yüksekliğine, yıkılma anındaki su hacmine, zemin ve barajın etrafının topoğrafya özelliklerine bağlıdır [5].

Ayrıca bu yöntemlerin dışında özellikle zemin özellikleri açısından daha detaylı incelemeler yapılması gerekmektedir. Örneğin Al-Riffai ve Nistro yaptıkları çalışmada, toprak dolgu barajlar için mevcut modellerin suya doygun olmayan zemin durumunda yıkılmanın ilk aşamalarında zemin danelerinin arasındaki boşlukları dolduracak su moleküllerinin etkisini ihmal ettiğini deneysel olarak göstermişlerdir [6].

Bu araştırmada baraj yıkılmasıyla oluşacak taşkın debisinin hesaplanması için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmaların temel amacı eldeki verileri daha etkin kullanarak özellikle istatistik açısından mevcut durumdaki belirsizlikleri en aza indirmektir.

Bu çalışmalara örnek olarak yıkılma süresi hesapları için; genetik programlama ve regresyon analizlerini kullanan çalışmalar [7]; istatistik yöntemleri kullanan çalışmalar [8]; barajlar için en büyük debiyi hesaplamak için; regresyon analizi kullanan çalışmalar [9] [10], yapay sinir ağlarını [11][12], genetik programlamayı [13] [14], bulanık küme teorisi kullanan çalışmalar [15], gedik genişliği hesapları için; bulanık mantık kullanan çalışmalar [16] verilebilir.

Wahl [17] yıkılma parametrelerini ve çıkan en büyük debi değerini hesaplamakta kullanılan yöntemlerin istatistiki olarak belirsizliklerini incelemiş ve yıkılmış bir baraj üzerinde tüm metotları uygulayarak karşılaştırmıştır.

Biscarini vd [18] üç boyutlu tasarım yazılımlarını kullanarak baraj yıkılması anında oluşan taşkınları incelemiş ve sığ su kabulüyle özellikle yer çekimi etkisinin tam olarak eklenmediğini bunun önüne

geçmek için üç boyutlu modellemenin daha uygun olacağını belirtmişlerdir.

Baraj yıkılması modelleme çalışmalarında özellikle 1970 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde baraj güvenliği açısından tarihi baraj yıkılmalarının daha detaylı incelenerek mevcut verilerin arttırılması gerektiği kanaatine varılmış ve bu sebeple baraj yıkılma modelleme çalışmalarını yönetmek üzere Federal Emergency Management Agency (FEMA) tarafından bir komisyon oluşturulmuştur [19]. Bu komisyon tarihi baraj kazalarını inceleyerek verileri daha sağlıklı toplanmasını ve yeni yöntemler hazırlanırken daha doğru verilere ulaşılmasına olanak sağlamıştır.

4. Baraj Yıkılma Anında Oluşabilecek En Büyük Debinin Tahmini

Baraj güvenliği konusunda baraj yıkılması durumunda oluşacak taşkın debisinin en büyük değerinin hesaplanmasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada literatürde bulunan yöntemlerden en fazla kullanılan ve güncel olan dört tanesi seçilmiştir. Bunlar; Costa, Soil Conservation Service (SCS), Froehlich ve Gupta –Singh yöntemleridir.

4.1. Costa Yöntemi

Bu yöntemde çıkan en büyük debi değeri aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [20].

$$Q_p = 10,5 * (H)^{1,87}$$

Bu denklemde;

Q_p : Yıkılma anında çıkan en büyük debi

H: Baraj yüksekliği

olarak verilmiştir.

4.2. Soil Conservation Service (SCS) Metodu

SCS metoduna göre çıkan en büyük debi hesaplarında aşağıdaki denklem kullanılmaktadır [21].

$$Q_p = 0,65 * (H_w)^{1,85}$$

Bu denklemde;

Q_p : Yıkılma anında çıkan en büyük debi

H_w : Yıkılma anındaki su yüksekliği

olarak verilmektedir.

4.3. Froehlich Metodu

22 yıkılmış baraj verileri üzerinde çoklu lineer regresyon uygulayarak bulunan Froehlich denkleminde göre taşkın debisi [22];

$$Q_p = 0,607 * (V_w^{0,295}) * (H_w^{1,24})$$

denkleminde hesaplanabilmektedir. Bu denklemde;

Q_p : Oluşan taşkın maksimum değeri

V_w : Yıkılma anında barajdaki su hacmi

H_w : Gedik tabanından itibaren su yüksekliği olarak verilmiştir.

4.4. Gupta ve Singh Tarafından geliştirilen yöntem

Gupta ve Singh 2012 yılında yaptıkları çalışmada [23], Thornton vd. [9] tarafından 2011 yılında geliştirilen yöntemde dolgu genişliği ile dolgu boyu parametrelerinin eklenmesi ile gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edileceğini göstermişlerdir. Bu yöntemde göre taşkın anındaki pik debi;

$$Q_p = 0,02174 * (V^{0,4738}) * (h^{1,1775}) * ((W+L)^{0,17094})$$

Formülüyle hesaplanmaktadır. Bu formülde

Q_p : Yıkılma anında çıkan en büyük debi

V: Yıkılma anında rezervuardaki su hacmi

h: Yıkılma anındaki su yüksekliği

W: Dolgu genişliği

L: Dolgu uzunluğu

olarak verilmiştir.

5. Yöntemlerin Karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında, Tony L. Wahl tarafından hazırlanan tarihi baraj yıkılma veri tabanından yeterli ve güvenilir verileri olan 25 adet tarihi baraj yıkılma verisi seçilmiştir [17]. Bu veriler kullanılarak seçilen yöntemlerin gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesinde uygun olup olmadıkları kontrol edilmiştir. Uygulama amacıyla seçilen barajlar araştırılırken özellikle güvenilir verileri olan baraj yıkılmaları seçilmiştir. Çünkü literatürde birçok baraj yıkılma olayı bulunsa da bunların birçoğunda eksik bilgiler olduğu görülmektedir. İncelenen barajların temel özellikleri, yıkılma tarihleriyle birlikte aşağıdaki Tablo 1'de verilmiştir.

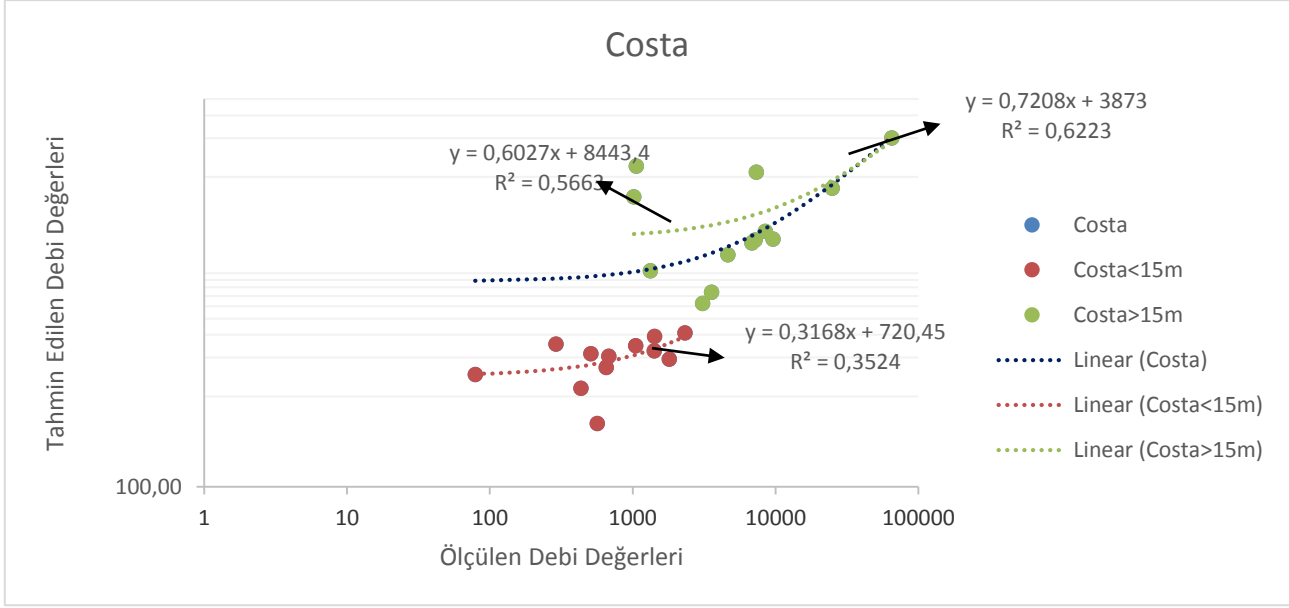
Tablo 1. Tarihi Baraj Yıkılmaları ve Özellikleri [17].

Barajın Adı	Baraj Türü	Yıkılma Türü	Yıkılma Tarihi	Baraj Yüksekliği (m)	Rezervuardaki Su Hacmi (m ³)	Yıkılma Anında Barajdaki Su Yüksekliği (m)	Taşkın Debisi Ölçümünde Kullanılan Yöntem	Ölçülen Taşkın Debisi (m ³ /sn)
Apishapa, Colo.	Homojen Toprak Dolgu	Borulanma	1923	34,14	22,50	28	15 dakikalık rezervuar alçalma eğrileri	6850,00
Baldwin Hills, Calif.	Homojen Toprak Dolgu	Borulanma	1963	71	1,11	18,29	15 dakikalık rezervuar alçalma eğrileri	1061,88
Buffalo Creek, W. Va.	Kömür madeni atıklarıyla dolgu	Sızma	1972	14,02	0,48	14,02	Su yüzü eğimi alan ölçümü	1420,00
Castlewood, Colo.	Toprak-Kaya Dolgu	Taşkın	1933	21,34	4,23	21,64	15 dakikalık rezervuar alçalma eğrileri	3567,92
Davis Reservoir, Calif.	Önyüzü betonarme kaplı toprak dolgu	Borulanma	1914	11,89	57,97	11,5824	bilinmiyor	510,00
Euclides de Cunha, Brazil	Toprak Dolgu	Taşkın	1977	53,04	13,60	58,22	bilinmiyor	1020,00
Frankfurt, Germany	Toprak Dolgu	Borulanma	1977	9,75	0,35	8,23	bilinmiyor	79,00
Fred Burr, Mont.	Homojen Toprak Dolgu	Borulanma	1948	10,4	0,75	10,2	Su yüzü eğimi alan ölçümü (mansapta kısa mesafede)	654,12
Frenchman Creek, Mont.	Homojen Toprak Dolgu	Borulanma	1952	12,5	20,97	10,82	bilinmiyor	1415,84
Goose Creek, S. Carolina	Toprak Dolgu	Taşkın	1916	6,1	10,60	1,37	bilinmiyor	565,00
Hatchtown, Utah	Zonlu Toprak Dolgu	Borulanma veya zemin hasarı	1914	19,2	14,80	16,8	1 saatlik rezervuar alçalma eğrileri	3080,00
Hell Hole, Calif.	Kaya Dolgu	Borulanma	1964	67,06	30,60	35,1	1 saatlik rezervuar alçalma eğrileri	7360,00
Johnstown (South Fork Dam, Penn.)	Toprak-Kaya Dolgu	Taşkın	1889	38,1	18,90	24,6	30 dakikalık rezervuar alçalma eğrileri	8500,00
Kelly Barnes, Ga.	Homojen Toprak Dolgu	Borulanma	1977	11,58	0,51	11,3	Su yüzü eğimi alan ölçümleri (mansapta 250m)	680,00
Lake Avalon, N.M.	Toprak Dolgu	Borulanma	1904	14,5	7,75	13,7	bilinmiyor	2320,00
Lake Latonka, Penn.	Homojen Toprak Dolgu	Borulanma	1966	13	1,59	6,25	bilinmiyor	290,00
Laurel Run, Penn.	Toprak Dolgu	Taşkın	1977	12,8	0,39	14,1	Su yüzü eğimi alan ölçümleri (mansapta 1.6km)	1050,00
Little Deer Creek, Utah	Homojen Toprak Dolgu	Borulanma	1963	26,21	1,73	22,9	Su yüzü eğimi alan ölçümleri (bilinmeyen bir bölgede)	1330,00
Lower Two Medicine, Mont.	Homojen Toprak Dolgu	Borulanma	1964	11,28	19,60	11,3	Su yüzü eğimi alan ölçümleri (mansapta 4km)	1800,00
Oros, Brazil	Zonlu Toprak-Kaya Dolgu	Taşkın	1960	35,36	650,00	35,8	bilinmiyor	9630,00
Salles Oliveira, Brazil	Toprak Dolgu	Taşkın	1977	35,05	25,90	38,4	bilinmiyor	7200,00
Sandy Run, Penn.	Toprak Dolgu	Taşkın	1977	8,53	0,06	8,53	bilinmiyor	435,00
Schaeffer, Colo.	Betonarme çekirdekli Toprak Dolgu	Taşkın	1921	30,5	3,93	27,43	Su yüzü eğimi alan ölçümleri (mansapta 13km)	4629,80
Swift, Montana	Kaya Dolgu	Taşkın	1964	57,61	37,00	47,8536	Su yüzü eğimi alan ölçümleri (mansapta 27km)	24947,00
Teton, Idaho	Zonlu Toprak Dolgu	Borulanma	1976	92,96	356,00	77,4	Su yüzü eğimi alan ölçümleri (mansapta 4km)	65120,00

Kullanılan yöntemlerin vereceği sonuçların uygunluğunu incelemek amacıyla tahmin yöntemleriyle hesaplanan debiler ile gerçek debi değerleri karşılaştırılarak doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Bu analizde belirlenen R kare değeri serinin anlamlılığını yani iki değişkenin birbirine göre durumunu incelemek için kullanılmaktadır. Başka bir ifade ile bu çalışmadaki yöntemler kullanılarak hesaplanan debi değerleri ile gerçek ölçülen debi değerlerinin arasındaki fark belirlenmiştir.

5.1. Costa Yönteminin Uygulaması

Costa Yöntemi uygulanarak barajlardan taşkın durumunda çıkan en büyük debi değerleri hesaplanmıştır. Şekil 1’de bu yönteme ait değerler ile ölçülen taşkın debisi karşılaştırılmıştır. İncelenen barajların genelinde R kare değerinin 0,6223 olduğu, 15 metreden büyük barajlar için R kare değerinin 0,5663 olduğu ve 15 metreden küçük barajlar için R kare değerinin 0,3524 olduğu görülmektedir.

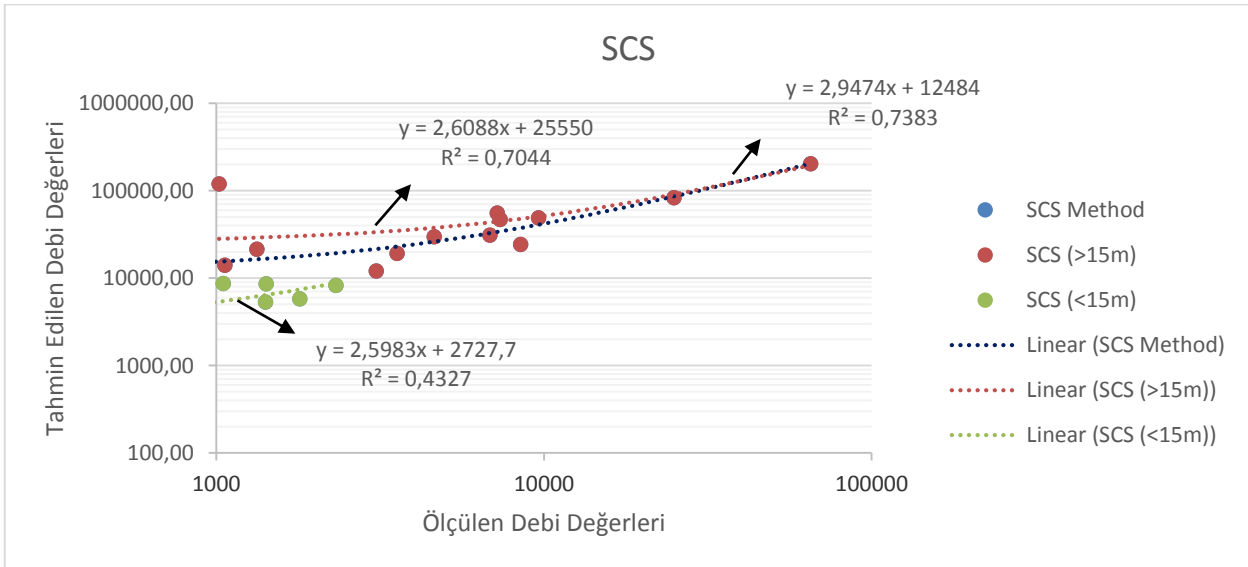


Şekil 1. Costa Metodu Debi Değerleri.

5.2 SCS Yönteminin Uygulaması

Bu yöntemle elde edilen sonuçlar Şekil 2’de verilmiştir. Uygulanan barajların tamamında SCS yöntemi 0,7383; 15 metreden büyük barajlarda

0,7044 ve 15 metreden küçük barajlarda 0,4327 R kare değerlerine sahiptir.



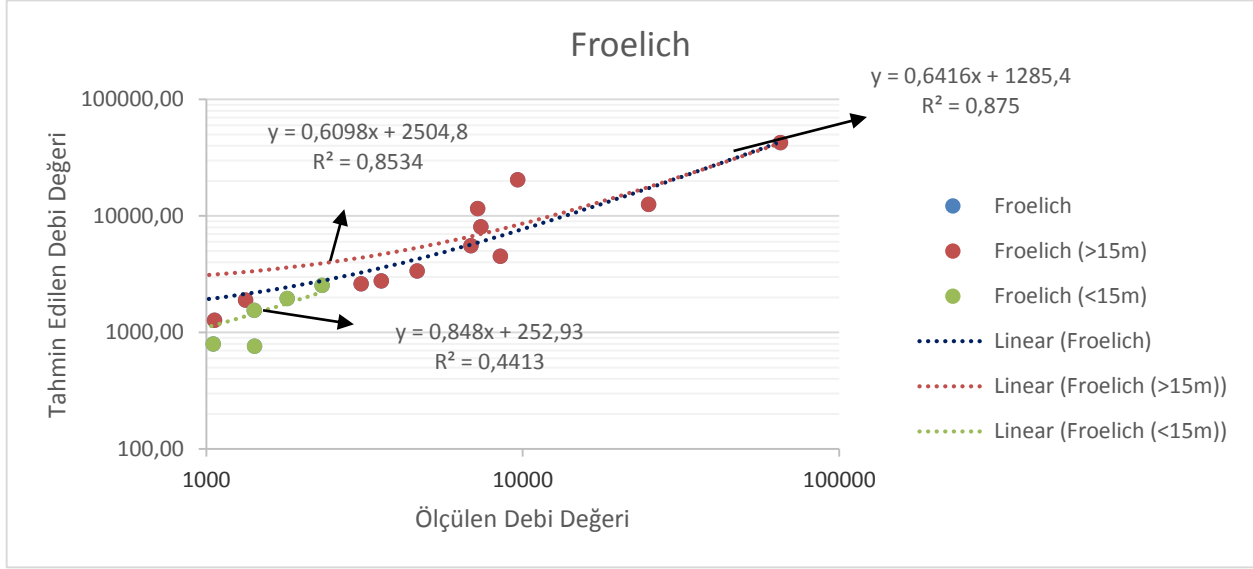
Şekil 2. SCS Metodu Debi Değerleri.

5.3 Froehlich Yönteminin Uygulaması

Diğer yöntemlerde olduğu gibi bu yöntemde de barajların tamamında, büyük barajlarda ve küçük barajlarda olmak üzere R kare değerleri sırasıyla, 0,875; 0,8534 ve 0,4413 olarak hesaplanmıştır.

Froelich yönteminde kullanılan veriler diğer yöntemlerden farklı olarak yıkılma anında barajdaki

su hacmi parametresine ihtiyaç duymaktadır. Bu yöntemin uygulamasında Tablo 1 de verilen tüm barajlar değerlendirilmiş ancak Brezilyadaki Euclides de Cunha barajında eksik veriler olduğu için bu baraj Froelich yönteminden çıkartılmıştır. Froelich yöntemi ile elde edilen sonuçlar Şekil 3'te verilmiştir.



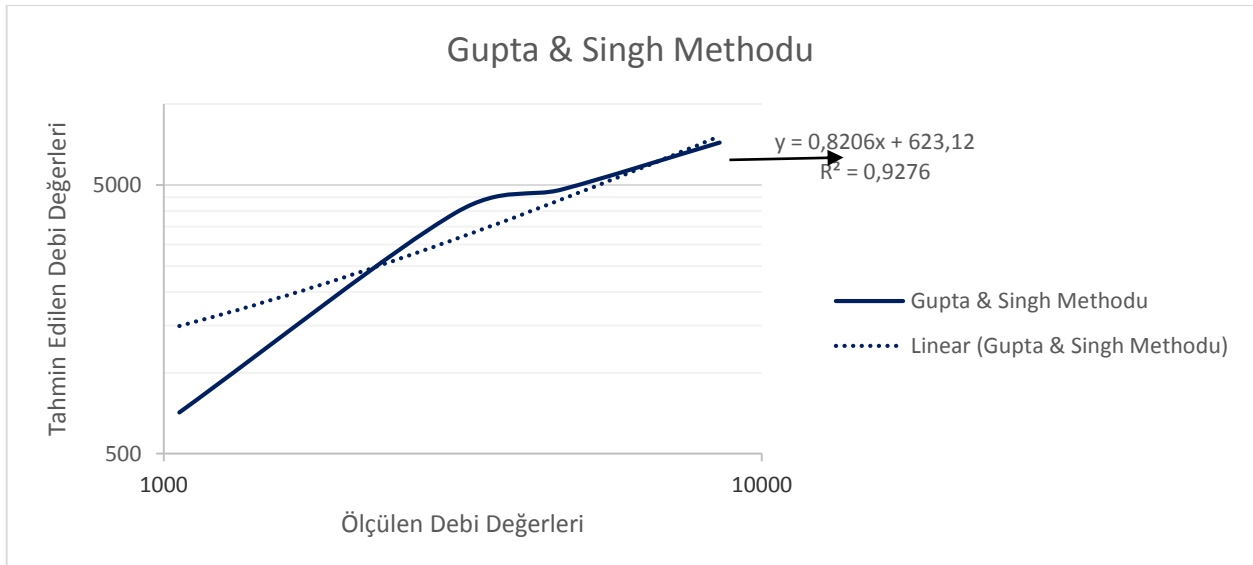
Şekil 3. Froelich Methodu Debi Değerleri.

5.4 Gupta ve Singh Yönteminin Uygulaması

Bu araştırma kapsamında kullanılan barajlardan dolgu genişlik ve uzunluk verileri bulunanlar Baldwin Hills, Calif., Hatchtown, Utah, Schaeffer, Colo. ve Johnstown (South Fork Dam, Penn.) barajlarıdır.

Bu barajlar yükseklikleri bakımından büyük baraj sınıfına girmektedirler. Bu yöntem incelenirken veri yetersizliği sebebiyle yalnızca bu 4 baraj üzerinde

uygulama yapılmıştır. Gupta ve Singh tarafından geliştirilen bu yöntemin sonuçlarını içeren Şekil 4'tede görüldüğü üzere; bu method yeterli verisi olan barajlara uygulandığında 0,9276 R kare değerine ulaşmıştır.



Şekil 4. Gupta ve Singh Methodu Debi Değerleri.

6. Sonuç ve Öneriler

Baraj yıkılmaları can ve mal kayıplarına sebep olan felaketler olarak tanımlanmaktadır. Bu kazalar sonucu oluşan kayıpların büyüklüğü barajların yüksekliği ve baraj göllerindeki suyun hacmi ile orantılıdır. Özellikle acil afet eylem planlarında barajların yıkılma senaryoları kullanılarak alınacak önlemler can ve mal kayıplarının önlenmesi açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmada baraj yıkılması durumunda oluşacak taşkın debisinin en büyük değerini hesaplamak için kullanılan yöntemler karşılaştırılmıştır. Uygulanan regresyon analizlerinin sonucu olarak Froehlich yönteminin incelenen tüm barajlar ve 15 metreden büyük barajlar göz önüne alındığında diğer yöntemlerden daha gerçekçi sonuçlar verdiği ayrıca SCS yönteminin az farkla diğer yöntemlerden küçük barajlar için daha doğru sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu değerlendirmelere göre ICOLD ölçütlerinde küçük olarak tanımlanan barajlar incelendiğinde tüm yöntemlerin 0,3524-0,4413 aralığında değişen ve istatistik olarak seriyi tamamen anlamlı bir şekilde ifade etmeyen değerlere sahip oldukları görülmektedir. Gupta ve Singh tarafından geliştirilen yöntemde 0,9276 gibi yüksek bir anlamlılık değerine ulaşılmasına rağmen bu yöntemin kullanılması sırasında ihtiyaç duyulan dolgu genişliği ve uzunluğu değerlerinin çoğu baraj yıkılmasında ölçülemediği olması uygulama alanını kısıtlamaktadır. Ancak yeterli veriler bulunan durumlarda Gupta ve Singh tarafından önerilen yöntemin daha iyi sonuç vereceği görülmektedir.

Sonuç olarak baraj güvenliği açısından taşkın debisi hesaplarında kullanılan yöntemlerin tarihi baraj yıkılma verilerinden elde edilmiş olması ve bu verilerde oluşan çeşitli tutarsızlıklar veya eksiklikler sebebiyle küçük barajlarda uygun sonuçlar vermediği görülmektedir. Ancak bu yöntemler şu anda uygulama açısından kullanılabilecek en uygun yöntemlerdir çünkü baraj güvenliği incelemelerinde tarihi verilere dayalı istatistik yöntemler dışında deneysel olanakların maliyetli ve zaman alıcı hatta yüksek barajlar için mevcut teknolojiler ile uygulanması neredeyse olanaksızdır. Bu sebeple incelenen yöntemlerden baraj risk analizleri yapılırken Froehlich yönteminin seçilmesi daha uygun olacaktır. Barajlar inşa edilme aşamalarından

başlanarak her açıdan dikkatli incelenmeli ve özellikle olası baraj yıkılma durumunda elde edilecek veriler ile yöntemler geliştirilmelidir.

Kaynaklar

- [1]. M. Foster, R. Fell, and M. Spannagle, "The statistics of embankment dam failures and accidents," *Can. Geotech. J.*, vol. 37, no. 5, pp. 1000–1024, 2000.
- [2]. Y. Xu and L. M. Zhang, "Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 135, no. 12, pp. 1957–1970, 2009.
- [3]. C. Chinnarasri, S. Jirakitlerd, and S. Wongwises, "Embankment dam breach and its outflow characteristics," *Civ. Eng. Environ. Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 247–264, 2007.
- [4]. L. A. LaRocque, J. Imran, and M. H. Chaudhry, "Experimental and Numerical Investigations of Two-Dimensional Dam-Break Flows," *J. Hydraul. ...*, no. June, pp. 569–579, 2012.
- [5]. S. S. Chauhan, D. S. Bowles, and L. R. Anderson, "Do current breach parameter estimation techniques provide reasonable estimates for use in breach modeling?," *2004 Annu. conf assoc state dam Saf. Off. Phoenix, AZ, USA*, 2004.
- [6]. M. Al-Riffai and I. Nistor, "Impact and analysis of geotechnical processes on earthfill dam breaching," *Nat. Hazards*, vol. 55, no. 1, 2010.
- [7]. A. Altunkaynak and H. G. Elmazoghi, "Neuro-fuzzy models for prediction of breach formation time of embankment dams," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 31, no. 3, 2016.
- [8]. D. F. Campos-Aranda, "Estimate of the magnitudes of ruptures of earth or rockfill dams using a statistical method," *Tecnol. y Ciencias del Agua*, vol. 5, no. 3, 2014.
- [9]. C. I. Thornton, M. W. Pierce, and S. R. Abt, "Enhanced predictions for peak outflow from breached embankment dams," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 16, no. 1, 2010.
- [10]. G. De Lorenzo and F. Macchione, "Formulas for the peak discharge from breached earthfill dams," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 140, no. 1, 2014.
- [11]. V. Nourani, H. Hakimzadeh, and A. B. Amini, "Implementation of artificial neural network technique in the simulation of dam breach hydrograph," *J. Hydroinformatics*, vol. 14, no. 2, 2012.
- [12]. F. Hooshyaripor, A. Tahershamsi, and S. Golian, "Application of copula method and neural networks for predicting peak outflow from breached embankments," *J. Hydro-Environment Res.*, vol. 8, no. 3, 2014.
- [13]. H. Hakimzadeh, V. Nourani, and A. B. Amini, "Genetic programming simulation of dam breach hydrograph and peak outflow discharge," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 19, no. 4, 2014.

- [14]. A. M. A. Sattar, "Gene expression models for prediction of dam breach parameters," *J. Hydroinformatics*, vol. 16, no. 3, 2014.
- [15]. G. Tsakiris and M. Spiliotis, "Embankment dam break: Uncertainty of outflow based on fuzzy representation of breach formation parameters," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 27, no. 5, 2014.
- [16]. H. G. Elmazoghi, "Fuzzy algorithm for estimating average breach widths of embankment dams," *Nat. Hazards*, vol. 68, no. 2, 2013.
- [17]. T. L. Wahl, "Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 130, no. 5, pp. 389–397, May 2004.
- [18]. C. Biscarini, S. Di Francesco, and P. Manciola, "CFD modelling approach for dam break flow studies," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 14, pp. 705–718, 2010.
- [19] M. W. Pierce, S. R. Abt, and C. I. Thornton, "Revision of embankment dam breaching regression relationships," in *Association of Dam Safety Officials - Dam Safety 2008*, 2008.
- [20]. J. E. Costa, "Floods from Dam Failures," 1985.
- [21]. S. C. Service, "Simplified Dam-Breach Routing Procedure," *Tech. Release*, no. 66, p. 39p, 1981.
- [22]. D. C. Froehlich, "Peak Outflow from Breached Embankment Dam," *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 121, no. 1, pp. 90–97, 1995.
- [23]. S. K. Gupta and V. P. Singh, "Discussion of 'Enhanced Predictions for Peak Outflow from Breached Embankment Dams' by Christopher I. Thornton, Michael W. Pierce, and Steven R. Abt," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 17, no. 3, pp. 463–466, Mar. 2012.