







BATMIŞ HİDROLİK SIÇRAMADA GERİ DÖNÜŞ BÖLGESİ UZUNLUĞUNUN YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİYLE TAHMİNİ

¹Veysel GÜMÜŞ , ²İbrahim Mahmut YOLUK , ³Oğuz ŞİMŞEK ,
⁴Nazire Göksu SOYDAN OKSAL 

^{1, 2, 3}Harran Üniversitesi, Mühendislik, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, TÜRKİYE
⁴Mersin Üniversitesi, Mühendislik, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mersin, TÜRKİYE
¹gumus@harran.edu.tr, ²mahmut_y@hotmail.com, ³oguzsimsek@harran.edu.tr,
⁴goksusoydan@mersin.edu.tr

(Geliş/Received: 13.02.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.05.2021)

ÖZ: Bu çalışmada, içerisinde kayar kapak bulunan bir laboratuvar kanalının mansabında meydana gelmiş batmış hidrolik sıçramanın geri dönüş bölgesinin uzunluğu deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel olarak kapak açıklığı, mansap su yüksekliği, froude sayıları kullanılarak farklı yapay zekâ yöntemleri ve Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) yöntemi ile batmış hidrolik sıçramada geri dönüş bölgesinin uzunluğu tahmin edilmiştir. Yapay zekâ yöntemleri olarak Yapay Sinir Ağları (YSA), Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi (ANFIS) ve Genexpresyon Programlama (GEP) yöntemleri tercih edilmiştir. Yöntemlerin geri dönüş bölgesinin uzunluğunu tahmin etmedeki başarı performanslarını belirlemek için belirlilik katsayısı (R^2), Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) parametreleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, kapak açıklığı, mansap su yüksekliği ve froude sayısını girdi parametresi olarak kullanan YSA ve ANFIS yöntemlerinin sıçrama geri dönüş bölgesinin uzunluğunu belirlemede oldukça başarılı olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Batmış hidrolik sıçrama, Geri dönüş bölgesi uzunluğu, Açık kanal akımı, Yapay zekâ yöntemleri

Estimation of the Roller Length of Submerged Hydraulic Jumps using Artificial Intelligence Methods

ABSTRACT: In this study, the roller length of the submerged hydraulic jump that occurred in a downstream of the laboratory canal with a sluice gate is experimentally determined. Experimentally, the roller length of the submerged hydraulic jump is estimated by using artificial intelligence methods and Multiple Linear Regression (MLR) method using the gate opening height, tail water height and froude numbers. Artificial Neural Networks (ANN), Adaptive Network Based Fuzzy Inference System (ANFIS) and Genexpression Programming (GEP) methods have been preferred as artificial intelligence methods. The coefficient of determination (R^2), Mean Square Error (MSE) and Mean Absolute Relative Error (MARE) parameters are used to determine the success performance of methods in estimating the length of the roller zone. As a result of the study, it is determined that ANN and ANFIS methods, which use gate opening height, tail water height and froude number as input parameters, are quite successful in determining the roller length of the submerged hydraulic jump.

Key Words: Submerged hydraulic jump, Roller length, Open channel flow, Artificial intelligence methods

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Akım ıslak kesitinin tümüyle katı sınırla çevrelenmediği ve atmosfer basıncına maruz kalan akımlar, açık kanal akımı olarak tanımlanır. Serbest yüzeyli akım olarak da adlandırılan bu akımlar; sulama kanaletleri, menfezler, kanalizasyon sistemleri ve yapay açık kanallar gibi doğal olmayan akımlar ile akarsu ve deniz akımları gibi doğal akımları kapsamaktadır. Açık kanal akımlarının zamana bağlı değişim göstermesi değişken, zamandan bağımsız olması ise düzenli akım olarak sınıflandırılır. Bunun yanında, akımın hızının yerden bağımsız olması üniform, yere bağlı olarak değişim göstermesi ise üniform olmayan akım olarak sınıflandırılır.

Açık kanal akım debisinin ve su derinliğinin kontrolünde kayar kapaklar sıklıkla kullanılmaktadır. Kayar kapağın akım alanına yerleştirilmesiyle akım alanında rejim değişikliği (kritik altıdan kritik üstüne geçiş) meydana gelmektedir. Yumuşak eğimli kanalda, kritik-üstü rejim ile kapak altından çıkan su akımı, kısa mesafeli bir daralma sonrasında M3 yavaş değişen akım profili göstererek serbest hidrolik sıçramayı takiben kritik-altı, üniform bir akıma dönüşür. Ancak, sıçrama sonrasındaki su derinliğinin, M3 profilindeki derinlik aralığının eşlenik değerlerinden daha büyük olması durumunda ise serbest hidrolik sıçrama meydana gelemez, kapağın önünde batmış hidrolik sıçrama oluşmaktadır. Bu durumda, serbest sıçramanın memba derinliği, kapak açıklığını aşacak ve hidrolik sıçrama kapak ile etkileşim haline gelerek farklı batmışlık durumlarında su yüzü profili değişecektir. Serbest hidrolik sıçramanın, bir uzunluktaki akımı etkileyen yüzeysel çevrelerden meydana gelen türbülanslı yapısı ve enerji kayıpları batmış hidrolik sıçramada da olmaktadır (Gümüş ve diğ., 2013).

Hidrolik sıçrama, akımda önemli miktarda enerji kaybına neden olduğundan en bilinen haliyle barajlarda, dolu savaklardan bırakılan yüksek enerjiye sahip suyun güvenli bir şekilde mansaba iletilmesinde ve enerji kırıcı yapıların projelendirilmesinde etkin rol oynamaktadır. Ayrıca, hidrolik sıçrama ile yüksek enerjiye sahip akımın yapıya ve çevreye vereceği zararlar minimuma indirilir, akımın sahip olduğu enerji kontrol edilir, yatak erozyonu önlenir ve suyun arıtılması sürecinde kullanılan kimyasal maddelerin entegre edilmesi süreci rahatlatılır. Meydana gelen hidrolik sıçramanın uzunluğunun bilinmesi özellikle hidrolik yapıların tasarımı açısından önemli bir etmendir.

Literatürde serbest ve batmış hidrolik sıçramanın tahmin edilmesi ile ilgili farklı çalışmalar bulunmaktadır (Houichi ve diğ., 2013; Mahtabi ve Satari, 2016; Roushangar ve Homayounfar, 2019). Husain ve diğ. (1994), serbest hidrolik sıçrama profilini eğimli dikdörtgen bir açık kanalda deneysel olarak ölçmüşlerdir. Üç farklı kanal eğimi (% 2.5, 5 ve 7) ve farklı Froude sayılarında toplamda 440 adet deney yapmışlardır. Regresyon analizi yardımıyla deneysel olarak ölçülmüş sıçrama uzunlukları ile kuyruk suyu yüksekliklerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Sonuç olarak sıçrama uzunluğu ve derinliği ile ilgili yeni denklemler önermişlerdir. Negm ve Shouman, (2002), çalışmalarında, yapay olarak pürüzlendirilmiş dikdörtgen dinlendirme havuzunda hidrolik sıçrama karakteristiklerini deneysel olarak ölçmüşlerdir. Deneysel ölçüm değerlerini kullanarak batmış hidrolik sıçramanın karakteristiklerini yapay sınır ağları (YSA) kullanarak modellemeye çalışmışlardır. Veri seti, eğitim ve test verisi olmak üzere ikiye ayrılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, YSA modelinin batmış hidrolik sıçramanın karakteristiklerinin tahmin edilmesinde güçlü ve etkili bir yöntem olduğu bildirilmiştir. Negm, (2009), çalışmasında, dinlendirme havuzunda meydana gelen serbest ve batmış hidrolik sıçrama uzunluklarını tahmin etmek için bir YSA modeli geliştirmiştir. YSA modelinde kullanılan veriler laboratuvar kanalında gerçekleştirilen deneylerden toplanmıştır. Deneylerle elde edilen bu sonuçlar, Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) ve YSA modelleri ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Değerlendirmeler neticesinde, serbest ve batmış hidrolik sıçramanın karakteristiklerini belirlemede YSA modelinin ÇDR modeline göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Naseri ve Othman, (2012), yatay dikdörtgen bir kesite sahip açık kanal akımında hidrolik sıçramanın uzunluğunu belirlemek için bir YSA modeli geliştirmişlerdir. Sıçrama karakteristiklerini belirlemek için kurmuş oldukları YSA modelinde iki farklı algoritma kullanmışlardır. Ele alınan YSA modeliyle elde edilen sonuçlarla, bir ampirik denklem olan Silvester denklemi kullanılarak, elde edilen sonuçları karşılaştırmışlar ve YSA modelinin sıçrama karakteristiklerini belirlemede ampirik denkleme kıyasla daha uygun sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Abbaspour ve diğ. (2013), hidrolik sıçrama özelliklerini

belirleyebilmek için YSA ve Genetik Programlama (GP) yöntemlerini kullanmışlardır. Deneysel olarak elde edilen sıçrama özelliklerinin, YSA ve GP yöntemleri ile elde edilen sonuçlarla uyum içinde olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca, YSA yönteminin GP yöntemine nazaran daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Banhatti ve Hinge (2014), çalışmalarında, dikdörtgen bir dinlendirme havuzunda belirli bir büyüklüğe sahip savak kullanarak hidrolik sıçramanın konumunu deneysel olarak belirlemişlerdir. Deneylerle elde edilen verilerin modellenmesi için YSA yöntemini tercih etmişlerdir. YSA ile çeşitli parametrelerin ara değerlerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Çalışma sonucunda YSA yönteminin kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir. Karbasi ve Azamathulla (2016), çalışmalarında, engebeli bir yatakta hidrolik sıçrama özelliklerini tahmin etmek için Genexpresyon Programlama (GEP) yöntemini kullanmışlar ve elde edilen sonuçları YSA yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Bunu yaparken literatürde daha önce yayınlanmış olan verileri kullanmışlardır. Sonuç olarak YSA yönteminin GEP yöntemine göre daha doğru sonuçlar verdiğini ancak pratik amaçlar için açık denklemler türetilmesi noktasında GEP yönteminin daha kullanışlı olduğu sonucuna varmışlardır. Azimi ve diğ. (2018), çalışmalarında, pürüzlü bir yatak üzerindeki meydana gelen hidrolik sıçramanın geri dönüş uzunluğunu hibrit ateşböceği algoritması ve uyarlamalı ağ tabanlı bulanık mantık çıkarım sistemi (ANFIS-FA) kullanarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Bunu yaparken dikkate aldıkları parametreler Froude sayısı, ardışık derinlikler ve pürüzlülük olmuştur. Çalışma sonucunda, ANFIS-FA yönteminin sıçrama geri dönüş bölgesi uzunluğunu belirlemede oldukça başarılı olduğu sonucuna varmışlardır. Kumar ve diğ. (2019), YSA modelini kullanarak pürüzlülüğün ve eğimin hidrolik sıçrama üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Burada pürüzlülük farklı özelliklere sahip agregalar ile gerçekleştirilmiş ve bu agregalar ile üç farklı pürüzlülük elde edilmiştir. Ayrıca bu işlemler esnasında iki farklı yatak eğimi kullanmışlardır. Sonuç olarak, hidrolik sıçramanın ardışık derinliklerinin tahmininde YSA modelinin oldukça kullanışlı olduğu kanısına varmışlardır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, sıçramanın farklı özelliklerini tahmin etmek için ampirik ya da yapay zekâ yöntemleri ile yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, sıçramanın geri dönüş bölgesinin uzunluğunun tahmin edilmesi ile ilgili çalışmaların ise sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Bu çalışma, batmış hidrolik sıçramanın geri dönüş bölgesinin uzunluğunun tahmin edilmesi ile ilgili detaylı bir yaklaşım sunmaktadır.

Meydana gelen sıçramanın uzunluğu inşa edilecek su yapılarının tasarımı için önemli bir parametre olup, bu çalışma kapsamında batmış hidrolik sıçramaya ait akım karakteristikleri deneysel olarak ölçülmüş ve deneysel veriler kullanılarak farklı yapay zekâ yöntemleri kullanılarak sıçrama geri dönüş bölgesinin uzunluğu kısıtlı girdi parametreleri ile tahmin edilmiştir. Farklı başarı ölçütleriyle yöntemlerin başarısı belirlenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Deneyleler (Experiments)

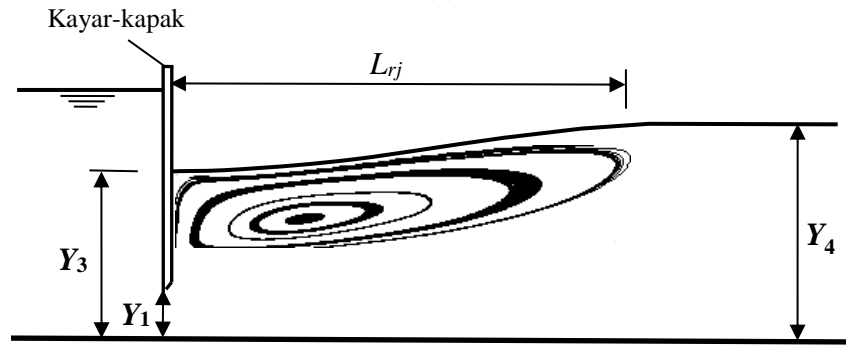
Deneyleler, Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında bulunan açık kanal modelinde gerçekleştirilmiştir. Deneyleler için laboratuvarında bulunan 400x35x35 cm boyutlarında tabanı ve yan duvarları camdan imal edilmiş dikdörtgen kesitli açık kanal modeli kullanılmıştır. Kanaldaki suyun sirkülasyonu bir santrifüj pompa ile sağlanmış ve debi ölçümü Altigen marka elektromanyetik debi metre ile gerçekleştirilmiştir. Farklı akım durumlarında su seviyesinin stabil olduğu bölgelerde su derinliği ölçümleri ise cihaz üzerine önceden yerleştirilen dijital limnometre yardımıyla elde edilmiştir.

Şekil 1’de, açık kanal akımında meydana gelen batmış hidrolik sıçramanın deney düzeneği ve şematik görüntüsü verilmiştir. Deney modeli oluşturulurken, kanal başlangıç noktasından 115 cm uzaklığa ve kanal sonuna birer kayar kapak yerleştirilmiştir. 0,01 m ile 0,029 m arasında değişen 9 farklı kapak altı su yüksekliği (y_1), 0,09 m ile 0,125 m arasında değişen 3 farklı kanal sonu kapak su yüksekliği, her kurulan deney düzeneği ile eş zamanlı değiştirilen 11.17 m³/saat ile 37.20 m³/saat aralığında değişim gösteren farklı debi değerleri ve 1,06 ile 4,07 arasında değişen değerler alan Froude sayıları ile toplam 98 adet deney gerçekleştirilmiştir. Her bir deneyde batmış hidrolik sıçramanın geri dönüş bölgesinin

uzunlukları (Roller length- L_{rj}) boya deneyi yardımıyla belirlenmiş ve mansap bölgesindeki su derinliğinin stabil olduğu durumdaki su yükseklikleri de (y_4) 0.01 mm hassasiyetine sahip limnometre yardımıyla ölçülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 1. (a) Deney düzeneği, (b) Deney düzeneğinin şematik görüntüsü

Figure 1. (a) Experimental setup, (b) Schematic view of experimental setup

Yöntem (Method)

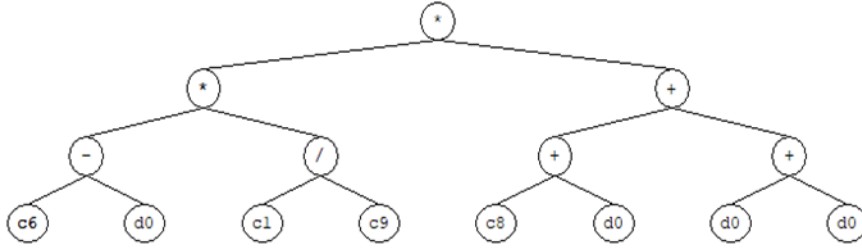
Genexpresyon Programlama (Genexpression Programming -GEP)

Genexpresyon programlama (GEP) mevcut literatür içerisinde geleneksel genetik programlama (GP) tekniklerinin en gelişmiş şekli olarak kabul edilmektedir. GP, yüksek derecede otomatikleştirilmiş bir şekilde doğrusal olmayan tahmin modelleri oluşturabilen bir makine öğrenimi yöntemidir (Majidifard ve diğ., 2021). Geleneksel genetik algoritmada, girdiler doğrusal ve sabit uzunluktadır. Ancak genetik programlamada girdiler farklı uzunluk ve şekillerde olup doğrusal değildir. GEP yönteminde ise girdiler başlangıçta sabit uzunlukta değerlendirilir, daha sonra boyut ve şekilleri doğrusal olmayacak şekilde tanımlanır (Ferreira, 2001). GEP yönteminin uygulamadaki avantajı açık bir yapıya sahip olmasıdır. Bunun yanında GEP modelinin diğer veri odaklı yöntemlere (YSA, ANFIS) göre en güçlü yanı ise fiziksel

ilişkiler arasında açık formüller üretebilmesidir (Kişi ve diğ., 2012). GEP yönteminde ilk olarak tahmin için, en iyileme yapılacak uygunluk fonksiyonunun seçilmesi gerekmektedir. Uygunluk fonksiyonu için bağıl hata, mutlak hata veya belirlilik katsayısı seçilebilir.

Bu çalışma kapsamında GEP yönteminde tahmin modeli tasarlanırken uygunluk fonksiyonu olarak karekök ortalama karesel hata (KOKH) parametresi seçilmiştir. Oluşturulmuş olan 12 model içerisinde dokuz modelde üç alt fonksiyon, üç modelde ise bir alt fonksiyon kullanılmıştır. Yöntem ile elde edilen her bir alt fonksiyonun toplanması ile sıçrama uzunluğunu tahmini için kullanılacak fonksiyon elde edilmiştir. Şekil 2’de GEP yönteminde elde edilen örnek bir alt fonksiyon verilmiştir.

Sub-ET 1

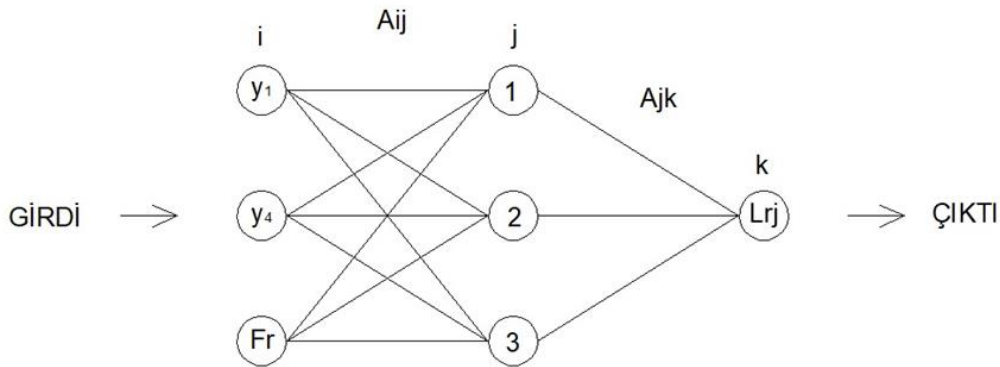


Şekil 2. Çalışmada GEP yönteminde elde edilen örnek bir alt fonksiyon

Figure 2. An example sub-function obtained in the GEP method from this study

Yapay Sinir Ağları -YSA (Artificial Neural Networks -ANN)

Yapay sinir ağları, farklı bilim dallarında yaygın olarak kullanılan kavramsal bir tekniktir. YSA modelleri, analitik ilişkileri içermeyen problemleri modellemedeki kolaylıkları nedeniyle araştırmacılar tarafından son yıllarda tercih edilmektedir (Naseri ve Othman, 2012). YSA modelleri, parametreler arasındaki içsel doğrusal olmayan ilişkiyi karmaşık bir problemle eşleştirmeye çalışır. Şekil 3'te giriş katmanında (i) üç nöron, gizli katmanda (j) üç nöron ve çıkış katmanında (k) bir nöron olan tipik bir YSA modeli gösterilmiştir. Şekil 1’de verilmiş olan A_{ij} ve A_{jk} terimleri ise hücre katmanları arasındaki bağlantı ağırlıklarıdır ve bu değerler model kurulma esnasında rastgele değerler alırlar. Ancak, eğitime sürecinde hesaplanan çıktı değerlerinin gözlenen değerlerle karşılaştırılması sonucunda sürekli olarak değiştirilirler. Son olarak da hataları minimuma düşürecek bağlantı ağırlık değerlerine yakınsayana kadar hatalar geriye doğru yayılır. Bu çalışmada ağırlıkların ayarlanması için Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır (Marquardt, 1963).



Şekil 3. Üç katmanlı yapay sinir ağı modeli

Figure 3. Three layers artificial neural network model

Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System - ANFIS)

Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System-ANFIS), yapay sinir ağları ile bulanık mantık sistemlerini birleştirme prensibi ile Jang (1993) tarafından geliştirilmiştir. Temelde ANFIS, Sugeno tipi bulanık sistemlerin yapay sinir ağları ile öğrenme yapmasıyla meydana gelen bir ağ modelidir. Girdi ve çıktı verileri arasındaki ilişkiyi elde etmek ve üyelik fonksiyonunu (Membership function) belirlemek için eğitim sürecinde yapay sinir ağları kullanılır (Wu ve diğ., 2009). Bu çalışmada, farklı üyelik fonksiyonları kullanılarak sıçrama uzunlukları tahmin edilmeye çalışılmıştır. ANFIS hakkında daha fazla bilgi Jang (1993)'de bulunabilir.

Çoklu Doğrusal Regresyon -ÇDR (Multiple Linear Regression-MLR)

Veri setinde bulunan bağımsız değişkenler yardımıyla bağımlı değişkeni tahmin etmek ve hangi bağımsız değişkenin bağımlı değişkeni etkilediğini bulmak için çoklu doğrusal regresyon (ÇDR) klasik bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

ÇDR'de bağımlı değişken y , bağımsız değişkenler x_1, x_2, \dots, x_p olarak ifade edilirse,

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_jx_j + \dots + b_px_p + e \quad (1)$$

olarak yazılabilir. Burada $b_0, b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_p$ regresyon katsayılarını ifade etmektedir. Herhangi bir b_j katsayısı, diğer değişkenlerin etkisi ortadan kaldırıldığında, yani diğer değişkenler sabit tutulduğunda, x_j değişkeninde ortaya çıkan bir birimlik değişime karşılık y değişkenindeki beklenen değişiklik miktarını verir. Bu nedenle, b_j ($j=1, 2, \dots, p$) parametreleri kısmi regresyon katsayıları olarak adlandırılmaktadır. Denklem (1) içerisinde ifade edilen b_0 kesim noktası e ise hata terimini temsil etmektedir (Yeşiltaş, 2018).

BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Laboratuvarda farklı akım özelliklerine sahip toplam 98 batmış hidrolik sıçramaya ait y_1, y_4, Fr ve L_{rj} değerleri deneysel olarak ölçülmüştür. Çalışma kapsamında kullanılan yöntem ve modellerin başarısını belirlemek için niceliksel karşılaştırma kriteri olarak belirlilik katsayısı (R^2), ortalama karesel hata (OKH) ve ortalama mutlak hata (OMH) parametreleri kullanılmış ve Denklem 2, 3 ve 4'te sırasıyla verilmiştir.

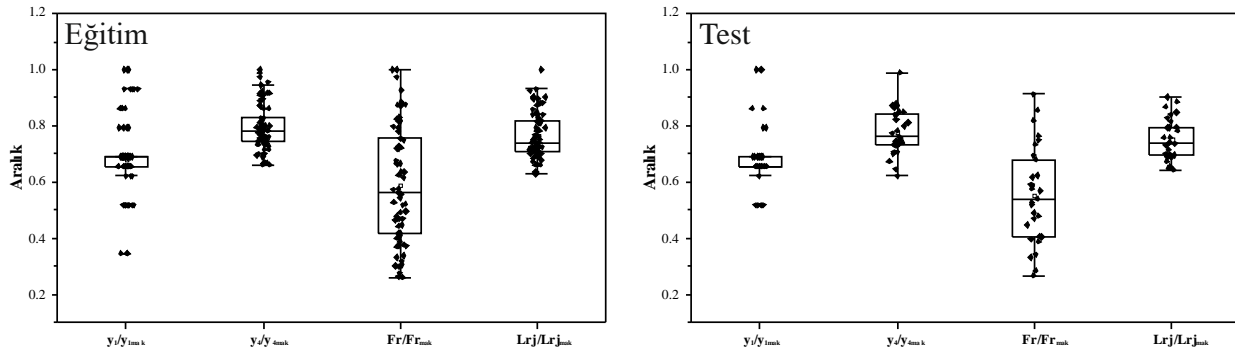
$$R^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (Lrj_{hesap} - Lrj_{ortalama})^2 - \sum_{n=1}^N (Lrj_{hesap} - Lrj_{tahmin})^2}{\sum_{n=1}^N (Lrj_{hesap} - Lrj_{ortalama})^2} \quad (2)$$

$$OKH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Lrj_{hesap} - Lrj_{tahmin})^2 \quad (3)$$

$$OMH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |Lrj_{hesap} - Lrj_{tahmin}| \quad (4)$$

Bu denklemlerde bulunan N , toplam veri sayısını, Lrj_{hesap} hesaplanan sıçrama uzunluğu değerini, $Lrj_{ortalama}$ hesaplanan sıçrama uzunluğu değerlerinin ortalaması, Lrj_{tahmin} ise model sonucunda elde edilen sıçrama uzunluğu değerini ifade etmektedir. Çalışma kapsamında analizler, YSA, ÇDR ve ANFIS için

Matlab programında hazırlanan kodlar ile yapılmış, GEP yönteminin uygulaması ise Genexprotools yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilerin tahmin edilmesi için kurulan modellerde öncelikli olarak veri setinde bulunan 98 deney seti rastgele bir seriye dönüştürülmüş, sonrasında ise bu verilerin yaklaşık %70'ine karşılık gelen 69 veri seti, modellerin eğitim sürecinde, geri kalan %30 yani 29 veri ise kurulan modelin başarısını görmek açısından test sürecinde kullanılmıştır. Böylece, eğitim sürecine hiç dahil edilmemiş veri setleri ile model performansının değerlendirilmesi mümkün olmuştur. Eğitim ve Test sürecinde kullanılan verilerin en büyük değere bölünerek boyutsuz hale getirilmiş dağılımları Şekil 4'te verilmiştir. Burada, rastgele seçilen eğitim ve test verilerinin birbirlerine yakın aralıkta olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Eğitim ve test sürecinde kullanılan verilerin dağılımı

Figure 4. Distribution of the training and testing data

GEP Yöntemi ile Geri Dönüş Bölgesi Uzunluğunun Tahmin Edilmesi (Estimating the Length of the Roller Zone with the GEP Method)

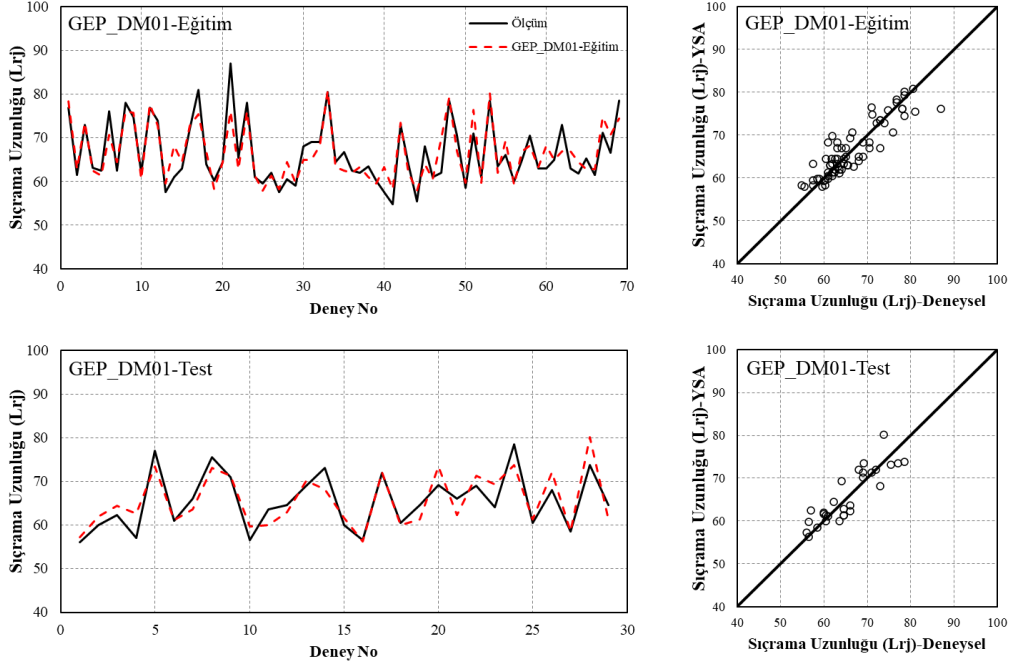
GEP yöntemi ile sıçrama uzunluğunun belirlenmesi için üç farklı girdi parametresine sahip ancak farklı operatörler kullanılarak toplam 12 model oluşturulmuştur. Çizelge 1'de verilmiş olan modellerde y_1 kapak açıklığı, y_4 sıçrama sonrası meydana gelen su yüksekliğini ve Fr ise kapak altı bölgesinde hesaplanan Froude sayısını ifade etmektedir. Buna göre, Model 1, 4, 7 ve 10'da sadece y_4 (ifade ağacındaki karşılığı d_0), Model 2, 5, 8 ve 11'de y_1 (ifade ağacındaki karşılığı d_0) ve y_4 (ifade ağacındaki karşılığı d_1), Model 3, 6, 9 ve 12'de ise y_1 (ifade ağacındaki karşılığı d_0), y_4 ve Fr (ifade ağacındaki karşılığı d_2) parametreleri girdi olarak verilmiş, çıktı olarak da geri dönüş bölgesi uzunluğu (L_{rj}) tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Çizelge 1. GEP yöntemi ile elde edilen sonuçlar*Table 1. Results obtained with the GEP method*

MODEL	Eğitim			Test			Kullanılan Fonksiyonlar
	R ²	OKH (cm ²)	OMGH (%)	R ²	OKH(cm ²)	OMGH (%)	
Model 1 (GEP DM01) (y ₄)	0,7982	10,10	3,60	0,7669	9,78	3,86	+, -, *, /, exp(x), x ² , x ^{1/3}
Model 2 (GEP DM02) (y ₁ , y ₄)	0,8068	9,72	3,50	0,7378	11,13	4,07	
Model 3 (GEP DM03) (y ₁ , y ₄ , Fr)	0,8146	9,34	3,62	0,7571	10,42	3,88	
Model 4 (GEP DM04) (y ₄)	0,8063	9,70	3,56	0,7608	9,85	3,93	+, -, *, /, exp(x), ln(x), 1/x x ² , x ³ , x ⁴ , x ⁵ , x ^{1/3} , sin(x) arctan(x), tanh(x)
Model 5 (GEP DM05) (y ₁ , y ₄)	0,7954	10,28	3,57	0,7370	10,72	3,97	
Model 6 (GEP DM06) (y ₁ , y ₄ , Fr)	0,8287	8,80	3,48	0,7067	11,86	3,94	
Model 7 (GEP DM07) (y ₄)	0,7949	10,27	3,68	0,7315	1,11	4,12	(x+y), (x-y), (x*y), (x/y) pow(x,y), sqrt(x), exp(x) pow(10,x), ln(x), abs(x), 1/x, x ² , x ³ , x ⁴ , x ⁵ , x ^{1/3} , x ^{1/4} , x ^{1/5} , Pi(x), E(x), sin(x), cos(x), tan(x), arcsin(x), arccos(x), arctan(x), sinh(x), cosh(x), tanh(x)
Model 8 (GEP DM08) (y ₁ , y ₄)	0,8030	9,86	3,52	0,7428	10,62	3,96	
Model 9 (GEP DM09) (y ₁ , y ₄ , Fr)	0,8375	8,13	3,33	0,7210	11,64	3,91	
Model 10 (GEP DM10) (y ₄)	0,7949	10,91	3,91	0,7344	12,68	4,55	+, -, *, /
Model 11 (GEP DM11) (y ₁ , y ₄)	0,7942	10,35	3,63	0,7368	10,79	4,11	
Model 12 (GEP DM12) (y ₁ , y ₄ , Fr)	0,8007	10,24	3,77	0,7447	11,49	4,23	

Çizelge 1’de verilen R², OKH ve OMGH parametrelerine göre, test verileri dikkate alındığında, Model 1 ve 4’ün birbirlerine oldukça yakın sonuçlar verdiği ve yaklaşık olarak %3,9’luk bir hata oranı ile sıçrama uzunluğunu tahmin ettikleri görülmüştür. Kullanılan operatör sayısının artırıldığı Model 4, 5 ve 6’da ise, operatör sayısının artırılmasıyla model başarısının artmadığı belirlenmiştir. En çok işlem operatörü sayısının kullanıldığı Model 7, 8 ve 9’da ise performans kriterleri açısından anlamlı bir değişim görülmemiş, %4 civarında hata oranı ve 0,70-0,75 arasında bir belirlilik katsayısı değeri belirlenmiştir. Sadece toplama, çıkarma, çarpma ve bölme işlemlerinin kullanıldığı ve en basit formülü bulmayı amaçlayan Model 10, 11 ve 12’de ise hata oranının %4,11 ile girdi parametresi olarak sadece y₁ ve y₄’ü kullanan Model 11’de belirlenmiştir. GEP yönteminin sıçrama uzunluğunu belirlemedeki genel yaklaşımı incelendiğinde, alt fonksiyon sayısı ya da işlem operatör sayısının artmasının deneysel verilere yaklaşımda model performansını çok fazla etkilemediği görülmüştür. y₁, y₄ ve Fr sayısının girdi olarak

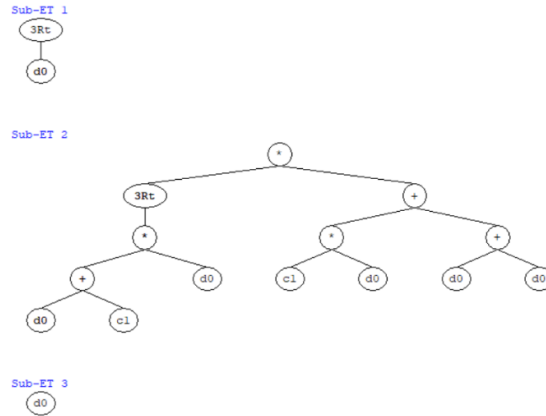
kullanıldığı Model 9'un eğitim periyodunda kullanılan başarı kriterlerinin hepsinde en başarılı model olduğu görülürken, test periyodunda R^2 ve OMGH kriterlerine göre sadece y_4 parametresinin girdi olarak kullanıldığı Model 1, OKH kriterine göre ise Model 7'nin en başarılı model olduğu görülmüştür. Bu sonuçtan, hidrolik sıçrama geri dönüş bölgesinin uzunluğunun GEP yöntemiyle belirlenmesinde sadece y_4 parametresinin yeterli olduğu söylenebilir. Şekil 5'te en başarılı model olarak belirlenen GEP DM01'in eğitim ve test sürecinde deneysel ve hesaplanan sıçrama geri dönüş bölge uzunluğunun dağılımı verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere hem eğitim ve hem de test sürecinde modelin başarısının oldukça yüksek olmuştur.



Şekil 5. GEP ile en başarılı modelin eğitim ve test sonuçlarının dağılımı (DM01)

Figure 5. Distribution of training and test results of the most successful model with GEP (DM01)

Şekil 6'da, Model 1'e ait ifade ağacı ve Denklem 5'te ise formülü verilmiştir. Modelde sıçrama uzunluğunun hesaplanması için girdi verisi olarak yalnızca y_4 parametresi kullanılmıştır. Modele ait formül incelendiğinde y_4 parametresinin alt fonksiyon içerisinde toplam 7 defa kullanıldığı görülmektedir.



$$c1 = -0.143$$

Şekil 6. Model 1'e ait ifade ağacı

Figure 6. Expression tree of Model 1

$$Lr_{j_{Model1}} = \sqrt[3]{y_4} + \left(\left(\sqrt[3]{(c_1 + y_4)y_4} \right) (c_1 y_4 + 2y_4) \right) + y_4 \quad (5)$$

YSA Yöntemi ile Geri Dönüş Bölgesi Uzunluğunun Tahmin Edilmesi (Estimating the Length of the Roller Zone with the ANN Method)

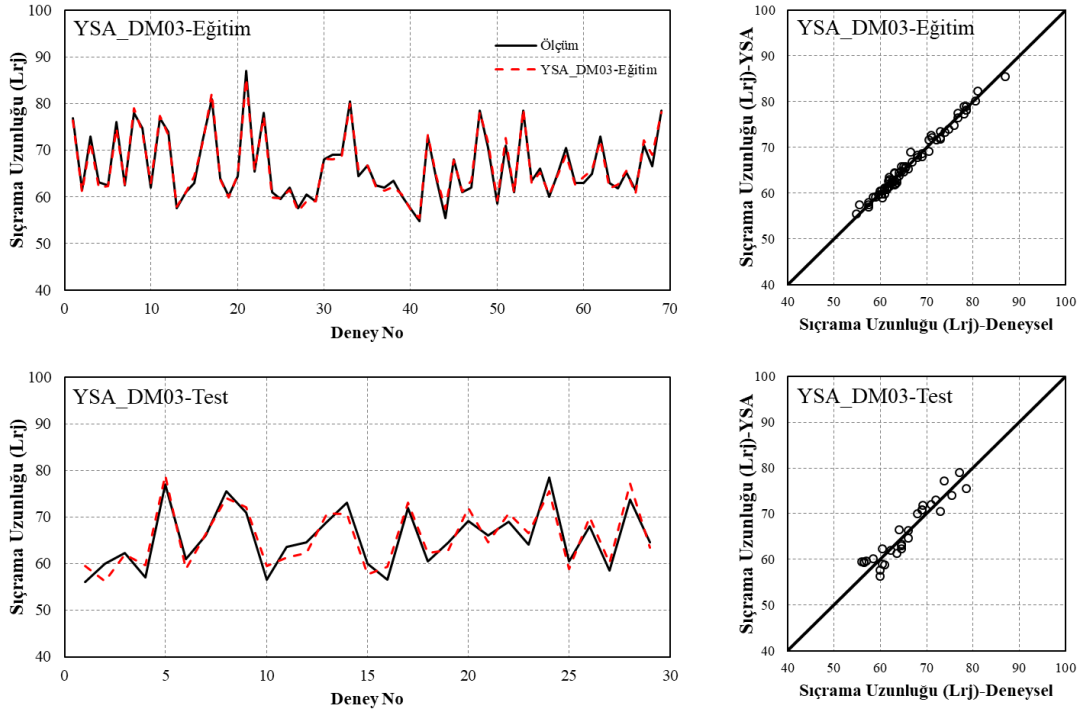
YSA yöntemi ile sıçrama uzunluğunun belirlenmesi için üç farklı girdi parametresine sahip üç model oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 2’de verilmiştir. Kullanılan üç model olan YSA DM01, YSA DM02 ve YSA DM03’te ara katman sayısı sırasıyla 4, 4 ve 7 olarak belirlenmiştir. Ara katman sayısının belirlenmesi için MATLAB yazılımı yardımıyla bir optimizasyon yapılmış ve test verileri içerisinde en düşük OKH değerini veren ara katman sayısı modelde kullanılmıştır. Buna göre, eğitim sürecinde R² değerleri 0,8299 ile 0,9847 aralığında, test sürecinde ise 0,7911 ile 0,8872 aralığında değiştiği, OMGH değerlerinin de test sürecinde %4’ün altında olduğu görülmektedir. Farklı girdi parametreleri kullanılarak elde edilen model sonuçlarından y₁, y₄ ve Fr kullanıldığı YSA DM03’ün tüm başarı ölçütlerinde hem eğitim hem de test sürecinde en başarılı model olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 2. YSA yöntemi ile elde edilen sonuçlar

Table 2. Results obtained with the YSA method

	Eğitim			Test		
	R ²	OKH	OMGH (%)	R ²	OKH	OMGH (%)
Model 1 (YSA DM01) (y ₄)	0,8299	20,26	7,65	0,7911	8,44	3,76
Model 2 (YSA DM02) (y ₁ , y ₄)	0,8956	12,44	6,46	0,7997	8,22	3,51
Model 3 (YSA DM03) (y ₁ , y ₄ , Fr)	0,9847	1,82	2,55	0,8872	4,84	3,16

YSA DM03 modeli kullanılarak YSA yöntemi ile elde edilen eğitim ve test sonuçlarının deneysel verileri ile uyumunun görülebilmesi için dağılım ve saçılım grafikleri Şekil 7’de verilmiştir. Buna göre, eğitim sürecinde verilerin birbirleri ile oldukça uyumlu oldukları, tahmin değerlerinin gerçek değerlerle neredeyse aynı değeri buldukları görülmektedir. Test sonuçları incelendiğinde ise, eğitim verilerine benzer bir şekilde oldukça başarılı olduğu görülmüştür.



Şekil 7. YSA ile en başarılı modelin eğitim ve test sonuçlarının dağılımı (YSA DM03)

Figure 7. Distribution of training and test results of the most successful model with ANN

ANFİS Yöntemi ile Geri Dönüş Bölgesi Uzunluğunun Tahmin Edilmesi (Estimating the Length of the Roller Zone with the ANFIS Method)

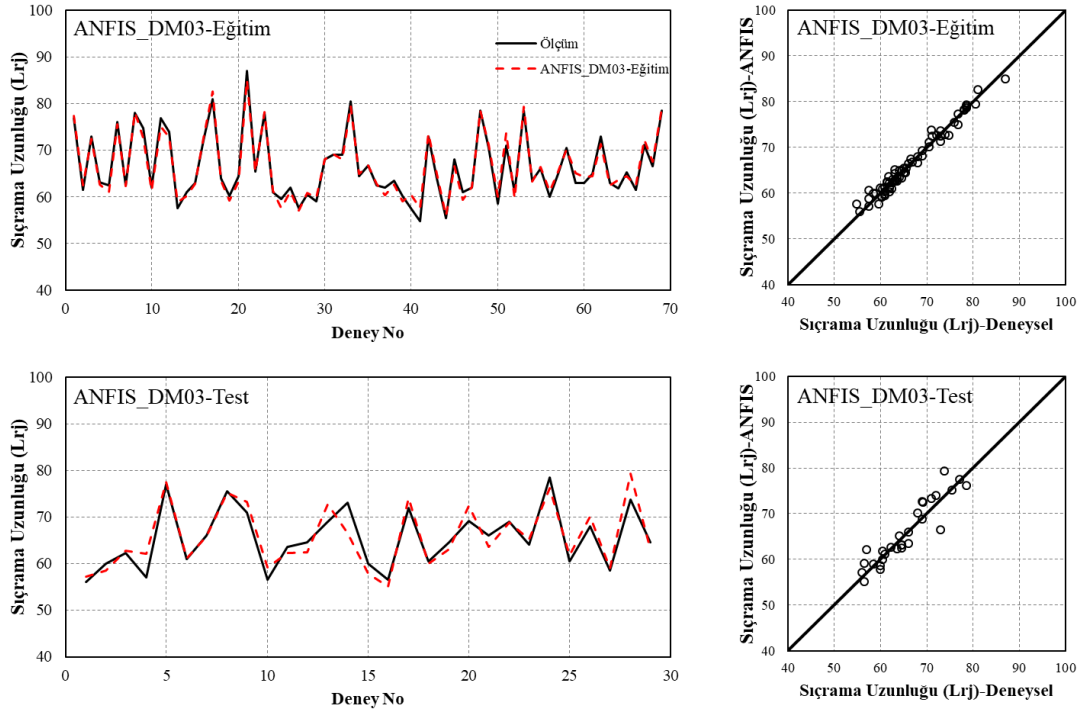
ANFİS yöntemi ile sıçrama uzunluğunun belirlenmesi için YSA yöntemine benzer bir şekilde yine üç farklı girdi parametresine sahip üç model oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir. ANFİS yönteminde üye fonksiyonu sayısının belirlenmesi için YSA yöntemine benzer bir şekilde test verileri içerisinde en düşük OKH değerini veren üyelik fonksiyon sayısı modelde kullanılmıştır. Kullanılan üyelik fonksiyonu sayıları ANFİS DM01, ANFİS DM02 ve ANFİS DM03 için sırasıyla 4, 2 ve 2 olarak belirlenmiştir. ANFİS ile elde edilen eğitim ve test sonuçları değerlendirildiğinde, ele alınan tüm yöntemler içerisinde en büyük R^2 değeri ve en düşük OMGH ve OKH değerinin ANFİS DM03 modelinde olduğu görülmüştür.

Çizelge 3. ANFİS yöntemi ile elde edilen sonuçlar

Table 3. Results obtained with the ANFIS method

	Eğitim			Test		
	R^2	OKH	OMGH (%)	R^2	OKH	OMGH (%)
Model 1 (ANFİS DM01) (y_4)	0,8428	7,87	3,14	0,7816	9,14	3,70
Model 2 (ANFİS DM02) (y_1, y_4)	0,8899	5,51	2,74	0,8202	7,67	3,43
Model 3 (ANFİS DM03) (y_1, y_4, Fr)	0,9729	1,36	1,43	0,8638	6,18	2,89

ANFIS DM03 modeli kullanılarak elde edilen eğitim ve test sonuçlarının deneysel verileri ile uyumunun görülebilmesi için dağılım grafikleri Şekil 8’de verilmiştir. Buna göre, eğitim sürecinde verilerin birbirleri ile oldukça uyumlu oldukları, tahmin değerlerinin gerçek değerlerle neredeyse aynı değeri buldukları görülmektedir. Test sonuçları incelendiğinde ise, eğitim verilerine benzer bir şekilde oldukça başarılı olduğu görülmüştür.



Şekil 8. ANFIS ile en başarılı modelin eğitim ve test sonuçlarının dağılımı

Figure 8. Distribution of training and test results of the most successful model with ANFIS

ÇDR Yöntemi ile Geri Dönüş Bölgesi Uzunluğunun Tahmin Edilmesi (Estimating the Length of the Roller Zone with the MLR Method)

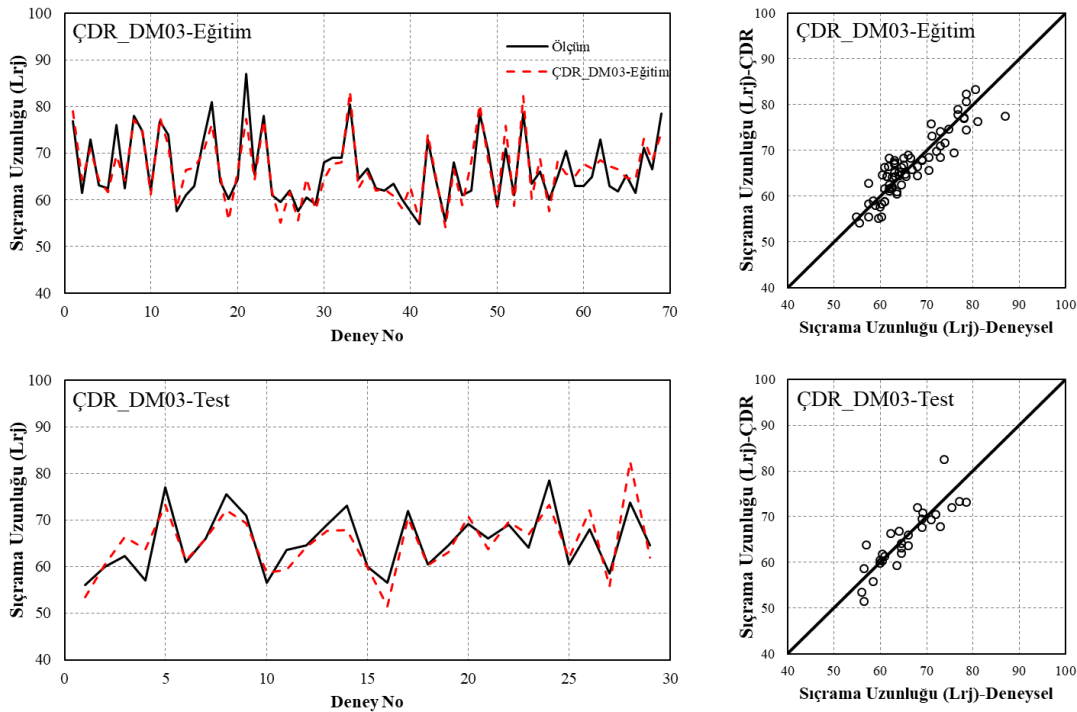
ÇDR yöntemi ile sıçrama uzunluğunun belirlenmesi için yine üç farklı girdi parametresine sahip üç model oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4’te verilmiştir. Klasik bir yöntem olan ÇDR yönteminin sonuçlarının birbirine yakın olduğu ve R^2 değerinin eğitim sürecinde 0,79-0,81 aralığında, test sürecinde ise 0,73-0,75 aralığında olduğu görülmüştür. OMGH değerleri de %4-%5 aralığında olmuştur. ÇDR yönteminde üç girdi parametresinin kullanıldığı ÇDR DM03 modelinin tüm başarı ölçütlerinde YSA ve ANFIS’te olduğu gibi en başarılı model olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4. ÇDR yöntemi ile elde edilen sonuçlar

Table 4. Results obtained with the MLR method

	Eğitim			Test			Formül
	R ²	OKH	OMGH (%)	R ²	OKH	OMGH (%)	
Model 1 (ÇDR DM01) (y ₄)	0,7949	25,49	9,16	0,7344	12,31	4,42	$Lrj = 4,6466y_4$
Model 2 (ÇDR DM01) (y ₁ , y ₄)	0,7938	25,46	9,21	0,7331	12,25	4,41	$Lrj = 0,2428y_1 + 4,6134y_4$
Model 3 (ÇDR DM01) (y ₁ , y ₄ , Fr)	0,8159	22,47	8,85	0,7487	11,44	4,01	$Lrj = 1,8205y_1 + 4,0919y_4 + 0,0181Fr$

Deney sonuçları ile en uyumlu model (ÇDR DM03) ile elde edilen eğitim ve test sonuçlarının dağılım grafikleri Şekil 9'da verilmiştir. Buna göre, eğitim ve test sürecinde verilerin birbirleri ile uyumlu oldukları, sadece yüksek sırama uzunluklarını belirlemede nispeten başarısız olduğu söylenebilir.



Şekil 9. ÇDR ile en başarılı modelin eğitim ve test sonuçlarının dağılımı

Figure 9. Distribution of training and test results of the most successful model with MLR

SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, laboratuvar ortamında farklı akım özelliklerine sahip kayar kapak sonrası meydana gelen batmış hidrolik sıçramaya ait geri dönüş bölgesinin uzunlukları deneysel olarak belirlenmiştir. Toplam 98 adet deney için farklı girdi parametreleri kullanılarak son yıllarda değişik alanlarda da kullanılan yapay zekâ yöntemlerinden Genexpresyon Programlama (GEP), Yapay Sinir Ağları (YSA), Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System-ANFIS) ve klasik bir yöntem olan Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) sıçrama uzunluğu tahmin edilmiştir. Yapay

zekâ yöntemleri ve ÇDR ile kurulan modellerde veri setinin %70'i eğitim sürecinde, %30'u ise test sürecinde kullanılmıştır. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

GEP yöntemi ile oluşturulan 12 modelde test sonuçlarına göre en başarılı tahmini girdi parametresi olarak sadece y_4 'ü ve toplam 7 tane matematiksel operatörü kullanan Model 1 olmuştur. Ayrıca, GEP yönteminde matematiksel operatörlerin arttırılmasının model başarısını gözle görülür düzeyde arttırmadığı belirlenmiştir.

YSA, ANFIS ve ÇDR yöntemlerinde ise ele alınan tüm performans kriterlerine göre en başarılı model y_1 , y_4 ve Fr parametrelerinin girdi olarak kullanıldığı Model 3 olmuştur. Bu üç yöntem içerisinde ise özellikle YSA ve ANFIS yönteminin sıçrama geri dönüş bölgesinin uzunluğunu tahmin etmede oldukça başarılı sonuçlar verdiği ve sıçrama geri dönüş bölge uzunluğunun tahmin edilmesi için rahatlıkla kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (HÜBAP) tarafından desteklenmiştir (Proje No:18195).

KAYNAKLAR

- Abbaspour, A., Farsadizadeh, D., Ghorbanı, M. A., 2013, "Estimation of hydraulic jump on corrugated bed using artificial neural networks and genetic programming", *Water Science and Engineering*, Cilt 6, Sayı 2, ss. 189-198.
- Azimi, H., Bonakdari, H., Ebtehaj, I., Michelson, D. G., 2018, "A combined adaptive neuro-fuzzy inference system–firefly algorithm model for predicting the roller length of a hydraulic jump on a rough channel bed", *Neural Computing and Applications*, Cilt 29, Sayı 6, ss. 249-258.
- Banhatti, A. G., Hinge, G. A., 2014, "Artificial Neural Network Model for Control of Hydraulic Jump" *CiiT, International Journal of Artificial Intelligent Systems and Machine Learning*, Cilt 6, Sayı 3, ss. 81-84.
- Ferreira, C., 2001, "Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems", *Complex Systems*, Cilt 13, Sayı 2, ss. 87-129.
- Gümüş, V., Aköz, M. S., Kırkgöz, M. S., 2013, "Kapak mansabında batmış hidrolik sıçramanın deneysel ve sayısal modellenmesi", *İMO Teknik Dergi*, Cilt 24, Sayı 2, ss. 6379-6397.
- Houichi, L., Dechemi, N., Heddam, S., Achour, B., 2013, "An evaluation of ANN methods for estimating the lengths of hydraulic jumps in U-shaped channel", *Journal of Hydroinformatics*, Cilt 15, Sayı 1, ss. 147-154.
- Husain, D., Alhamid, A. A., Negm, A. A. M., 1994, "Length and depth of hydraulic jump in sloping channels", *Journal of Hydraulic Research*, Cilt 32, Sayı 6, ss. 899-910.
- Jang, J. S., 1993, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Cilt 23, Sayı 3, ss. 665-685.
- Karbasi, M., Azamathulla, H. M., 2016, "GEP to predict characteristics of a hydraulic jump over a rough bed", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Cilt 20, Sayı 7, ss. 3006-3011.
- Kisi, O., Shiri, J., & Nikoofar, B. 2012. "Forecasting daily lake levels using artificial intelligence approaches", *Computers & Geosciences*, 41, 169-180.
- Kumar, M., Kumar, S., Bidhu, S., 2019, "Determination of sequent depth of hydraulic jump over sloping floor with rounded and crushed aggregates using experimental and ANN model", *Water Supply*, Cilt 19, Sayı 8, ss. 2240-2247.
- Mahtabi, G., Satari, M. T., 2016, "Investigation of hydraulic jump characteristics in rough beds using M5 model tree", *Jordan J. Agric. Sci*, Cilt 12, ss. 631-648.
- Majidifard, H., Jahangiri, B., Rath, P., Contreras, L. U., Buttlar, W. G., Alavi, A. H., 2021, Developing a prediction model for rutting depth of asphalt mixtures using gene expression programming", *Construction and Building Materials*, Cilt 267, 120543.

- Marquardt, D. W., 1963, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters", *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, Cilt 11, Sayı 2, ss. 431-441.
- Naseri, M., Othman, F., 2012, "Determination of the length of hydraulic jumps using artificial neural networks", *Advances in Engineering Software*, Cilt 48, ss. 27-31.
- Negm, A. M., 2009-January, "Modeling Of Hydraulic Jumps Formed At Drops Using ANNs", *7th ISE & 8th HIC*, Conception, Chile, January, ss. 1-10.
- Negm, A. M., Shouman, M. A., 2002- April, "Artificial Neural Network model for submerged hydraulic jump over roughened floor", *In Proc. 2nd Int. Conf. For Advanced Trends in Engineering (MICATE'2002)*, April, ss. 7-9.
- Roushangar, K., Homayounfar, F., 2019, "Prediction characteristics of free and submerged hydraulic jumps on horizontal and sloping beds using SVM method", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Cilt 23, Sayı 11, ss. 4696-4709.
- Wu, J. D., Hsu, C. C., Wu, G. Z, 2009, "Fault gear identification and classification using discrete wavelet transform and adaptive neuro-fuzzy inference", *Expert Systems with Applications*, Cilt 36, Sayı 3, ss. 6244-6255.
- Yeşiltaş, Y., 2018, "Yapay zeka yöntemleri ile GAP bölgesindeki aylık tava buharlaşma değerlerinin tahmin edilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.