



T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAPAKLI KONDUİTLERDE DEMİR GİDERİMİNİN
REGRESYON ANALİZİ İLE TAHMİNİ**

MEHMET FATİH KILINÇKIRAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

KAHRAMANMARAŞ 2025

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAPAKLI KONDUİTLERDE DEMİR
GİDERİMİNİN REGRESYON ANALİZİ İLE
TAHMİNİ

MEHMET FATİH KILINÇKIRAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
KAHRAMANMARAŞ 2025

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

MEHMET FATİH KILINÇKIRAN



Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bilgilerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

KAPAKLI KONDUİTLERDE DEMİR GİDERİMİNİN REGRESYON ANALİZİ İLE TAHMİNİ (YÜKSEK LİSANS TEZİ)

MEHMET FATİH KILINÇKIRAN

ÖZET

Su, yaşamın sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmez bir kaynaktır ve pek çok alanda kritik öneme sahiptir. Ancak nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşmeye bağlı olarak su kaynakları hem niceliksel hem de niteliksel tehditlerle karşı karşıyadır. Bu tehditlerden biri de yeraltı sularında yaygın olarak bulunan ve suyun fiziksel, kimyasal ve estetik özelliklerini bozan çözünmüş demirdir. Özellikle içme ve kullanma suyunda demirin varlığı; renk, tat ve tortu problemlerine yol açmakta, altyapı sistemlerinin ömrünü kısaltmakta ve kullanıcı memnuniyetini düşürmektedir.

Bu tez çalışmasında, yeraltı sularındaki çözünmüş demirin fiziksel havalandırma yoluyla giderilmesine yönelik kullanılan kapaklı konduit sistemlerinde gerçekleşen demir gideriminin modellenmesi amaçlanmış ve bu süreçte etkili olan hidrolik parametrelerin (boru uzunluğu, debi, daralma oranı vb.) performansa etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, sembolik regresyon yöntemi ile değerlendirilmiş ve genetik programlama temelli gplearn kütüphanesi kullanılarak matematiksel tahmin modelleri oluşturulmuştur.

Modelin test kümesi üzerinde elde ettiği $R^2 = 0,94$, $RMSE = 4,67$, $MAE = 3,72$ gibi performans ölçütleri, yüksek doğrulukla çalışan bir öngörü modeli geliştirildiğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, yalnızca mevcut sistemin değerlendirilmesini değil, aynı zamanda benzer konduit yapıların tasarım süreçlerine karar destek sunacak şekilde kullanılacak yenilikçi ve uygulanabilir bir yaklaşım ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Demir Giderimi, Sembolik Regresyon, Genetik Programlama

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Fen Bilimler Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Haziran/2025

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ÜNSAL

Sayfa Sayısı: 23

**ESTIMATION OF IRON REMOVAL in GATED CONDUITS USING
REGRESSION ANALYSIS
(M.Sc. THESIS)**

MEHMET FATİH KILINÇKIRAN

ABSTRACT

Water is an indispensable resource for the sustainability of life and is of critical importance in many areas. However, due to population growth, urbanization and industrialization, water resources face both quantitative and qualitative threats. One of these threats is dissolved iron, which is widely found in groundwater and disrupts the physical, chemical and aesthetic properties of water. The presence of iron, especially in drinking and utility water; causes color, taste and sediment problems, shortens the life of infrastructure systems and reduces user satisfaction.

In this thesis study, it was aimed to model the iron removal in gated conduit systems used for the removal of dissolved iron in groundwater through physical ventilation and the effect of hydraulic parameters (conduit length, flow rate, contraction ratio, etc.) effective in this process on performance was analyzed. The experimental data obtained were evaluated with the symbolic regression method and mathematical prediction models were created using the gplearn library based on genetic programming.

Performance criteria such as $R^2 = 0.94$, $RMSE = 4.67$, $MAE = 3.72$ obtained by the model on the test set show that a prediction model that works with high accuracy has been developed. In this respect, the study presents an innovative and applicable approach that can be used not only to evaluate the existing system but also to provide decision support for the design processes of similar conduit structures.

Keywords: Genetic Programming, Iron Removal, Symbolic Regression

Kahramanmaraş Sütçü Imam University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering, Jun/2025

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet ÜNSAL

Page number: 23

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitim sürecim boyunca bilgi ve tecrübeleriyle bana destek olan danışman hocam Prof. Dr. Mehmet ÜNSAL'a teşekkür ederim.

Bütün hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen her koşulda yanımda olan çok değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.

MEHMET FATİH KILINÇKIRAN



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	I
ABSTRACT.....	III
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ	IX
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Sembolik Regresyon	3
1.1.1. Genetik Programlama	5
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	8
3. MATERYAL VE METOT.....	14
4. BULGULAR	16
5. SONUÇLAR.....	20
KAYNAKLAR.....	21
ÖZGEÇMİŞ.....	23

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Fe	: Demir
OH	: Hidroksit
mg	: Miligram
GP	: Genetik Programlama
GA	: Genetik Algoritma
cm	: Santimetre
Q_A	: Hava Debisi
Q_w	: Su Debisi
D	: Daralma Oranı
%	: Yüzde
L	: Uzunluk
Re	: Reynold Sayısı
R²	: Belirleme Katsayısı
MAE	: Ortalama Mutlak Hata
MSE	: Ortalama Karesel Hata
RMSE	: Kök Ortalama Karesel Hata

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Genetik Programlama Modelinin Ağaç Yapısı.....	6
Şekil 3.1. Deney Düzenegi.....	12
Şekil 4.1. R^2	15
Şekil 4.2. Gerçek Değerler ve Tahmin Değerleri Grafiği.	16



ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 4.1 Performans Metrikleri	16
----------------------------------------------	----



1. GİRİŞ

Su, yaşamın temel yapı taşı olarak tüm canlıların varlığını sürdürebilmesi için vazgeçilmez bir bileşendir. İnsan organizmasındaki fizyolojik süreçlerin sağlıklı bir şekilde gerçekleşmesi suya bağlıdır; aynı zamanda su, ekosistemlerin sürekliliği ve çevresel dengenin korunması açısından da hayati öneme sahiptir. Tarım, endüstri, enerji üretimi ve içme suyu temini gibi pek çok sektörde yaygın biçimde kullanılan su, sürdürülebilir kalkınmanın temel girdilerinden biridir. Bununla birlikte, su kaynaklarının niceliksel azalması veya niteliksel olarak kirlenmesi hem çevresel hem de sosyoekonomik düzeyde ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu nedenle suyun etkin ve planlı bir şekilde yönetilmesi, yalnızca mevcut ihtiyaçların karşılanması açısından değil, gelecek nesillerin suya erişiminin güvence altına alınması bakımından da büyük önem taşımaktadır.

Günümüzde nüfus artışı, kentleşme, sanayileşme ve iklim değişikliğinin etkileri sonucunda su kaynakları üzerindeki baskı her geçen gün artmaktadır. Özellikle yüzeysel ve yeraltı su kaynakları, tarımsal faaliyetlerde kullanılan kimyasal gübre ve pestisitler, evsel atık sular ve sanayi kaynaklı kirleticiler nedeniyle ciddi biçimde kirlenmekte ve kullanılamaz hâle gelmektedir. Bu bağlamda, su kaynaklarının korunması ve mevcut suyun yeniden kullanımına yönelik teknolojilerin yaygınlaştırılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Gelişmiş ülkelerde uygulanan modern arıtma sistemleri sayesinde atık sular yeniden kullanılabilir hale getirilmekte ve doğal kaynaklara olan bağımlılık azaltılmaktadır. Bu tür teknolojiler özellikle su tüketiminin yoğun olduğu sektörlerde daha fazla önem arz etmekte ve sürdürülebilir su yönetiminin bir parçası olarak değerlendirilmektedir. Ancak etkili bir su yönetimi yalnızca teknolojik çözümlerle sınırlı kalmamalı; toplumsal farkındalığın artırılması, çevresel eğitimlerin yaygınlaştırılması ve kaynak kullanımında bireysel sorumluluk bilincinin geliştirilmesi gibi sosyal boyutları da kapsamalıdır.

Demir elementi, dünya üzerinde bol miktarda bulunan ve su kaynaklarında sıklıkla karşılaşılan bir kirleticidir. Özellikle yeraltı sularında iki değerlikli (Fe^{2+}) formda çözünebilen demir, yüzeye ulaştığında oksijenle reaksiyona girerek üç değerlikli (Fe^{3+}) forma dönüşür ve çözünmez hale gelir. Bu değerlik dönüşümü, demirin arıtımını güçleştirerek suyun kullanılabilirliğini olumsuz etkiler. Yeraltı sularında çözünmüş halde bulunan demir iyonları, evsel ve endüstriyel kullanımda ciddi sorunlara yol açabilir. Demir iyonlarının varlığı; metalik tat, renk değişimi, yüzeylerde pas lekeleri ve boru hatlarında birikmeler şeklinde kendini gösterir. Bu birikintiler zamanla su sistemlerinde tıkanmalara, ekipmanların verim kaybına ve bakım maliyetlerinde artışa neden olmaktadır.

Doğal süreçler sonucunda yer altında çözünebilen demir bileşikleri, yüzeye ulaştığında oksidasyon tepkimeleriyle çözünmez yapılar oluşturur. Özellikle karbon dioksit ile tepkimeye girerek ferrous bikarbonat formunda yeraltı ortamında bulunan demir, atmosferik oksijenle temas ettiğinde ferrik hidroksit $[Fe (OH)_3]$ olarak çöker. Bu durum hem suyun fiziksel görünümünü bozar hem de altyapı sistemlerinde tortu birikimi oluşturur. Bu nedenle içme ve kullanma sularında demirin arıtılması büyük önem taşımaktadır. Sağlıklı bir içme suyunun berrak, renksiz ve hoş içimli olması; mikroorganizmalar ile kimyasal kirleticilerden arındırılmış bulunması gerekmektedir. Türkiye’de içme suyu standartları, bu kriterleri sağlamak üzere belirlenmiş olup, demir ve benzeri inorganik kirleticilere yönelik sınır değerleri içermektedir. Bu bağlamda, suyun arıtılması, yalnızca insan sağlığını korumakla kalmayıp, aynı zamanda altyapı sistemlerinin uzun ömürlü kullanımını da desteklemektedir [1].

Suda doğal olarak bulunan demir, özellikle iki değerlikli formu (Fe^{2+}) ile yeraltı sularında çözülmüş halde bulunur. Ancak bu formun oksijenle temas ederek üç değerlikli (Fe^{3+}) hâle geçmesi ve uygun şekilde uzaklaştırılmaması durumunda, demir, içme ve kullanma sularında ciddi kalite sorunlarına neden olur. Belirli bir sınır değerin üzerinde bulunan demir konsantrasyonu, suyun fiziksel, kimyasal ve estetik özelliklerini olumsuz etkiler. Örneğin demirin 0.3 mg/L’yi aşan düzeylerde bulunması; suyla temas eden yüzeylerde, özellikle cam eşyalar, lavabo, çamaşır ve banyo gibi alanlarda kahverengi ya da sarı renkli lekelenmelere sebep olur. Düşük miktarlarda (0.1–1 mg/L) bile metalik bir tat bırakabilen demir, tüketici memnuniyetini azaltır ve suyun doğrudan içme amaçlı kullanımını sınırlar. Ayrıca, bu tür suların renk ve koku gibi duyuşal özelliklerinde de bozulmalar meydana gelir. Endüstriyel süreçlerde de demir içeriği yüksek olan sular kalite açısından sorun teşkil eder ve üretim süreçlerinde aksamalara yol açabilir.

Demirli suyun uzun süreli kullanımı, tesisat sistemlerinde çökelti oluşturarak boru çaplarının daralmasına ve tıkanmalara neden olur. Bu durum yalnızca su iletimini zorlaştırmakla kalmaz, aynı zamanda sistemin enerji tüketimini artırır. Özellikle ısıtma sistemlerinde, demir birikintileri kazanların iç yüzeyini kaplayarak ısı transfer verimliliğini düşürmekte, enerji maliyetlerini yükseltmektedir. Yüksek demir içerikli sularla yapılan yemeklerde sebzelerin renkleri bozulmakta, besinlerin tadı olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle, suyun hem estetik hem de işlevsel özelliklerini korumak amacıyla demirin etkin şekilde giderilmesi büyük önem taşır.

Demir gideriminde kullanılan başlıca yöntemlerden biri olan havalandırma, oksidasyon temelli bir işlem olup demiri çözünmeyen forma dönüştürerek ortamdaki uzaklaştırmayı hedefler. Bu amaçla kullanılan hidrolik yapılar arasında kapaklı konduitler, venturi sistemleri, kaskat yapılar ve su jetleri gibi çeşitli mühendislik çözümleri bulunmaktadır. Bu sistemler, suya doğal yolla hava kazandırarak çözülmüş demirin oksitlenmesini sağlar ve arıtma sürecini destekler.

Bu çalışmada, konduit sistemlerinde demir gideriminin modellenmesi amaçlanmakta ve farklı parametrelerin etkisi sembolik regresyon analizi ile değerlendirilmektedir.

Bu çalışma, konduit sistemlerinde demir gideriminin hidrolik yapılar içerisinde gerçekleşen havalandırma süreciyle nasıl etkilendiğini istatistiksel olarak modellemeye yönelik özgün bir yaklaşım sunmaktadır. Literatürde, demir giderimi genellikle kimyasal oksidasyon, filtrasyon ya da biyolojik yöntemler bağlamında ele alınırken; bu tezde fiziksel havalandırma yapıları kullanılarak doğal oksidasyonla demir uzaklaştırma sürecinin deneysel verileri değerlendirilmiş ve regresyon temelli matematiksel modeller oluşturulmuştur. Konduit sistemlerinin farklı geometrik parametrelerin (daralma oranı, boru uzunluğu, debi gibi) demir giderme performansına etkisini sayısal olarak ortaya koyarak, mühendislik tasarımlarına karar destek sağlayabilecek nitelikte öngörülse bir modelleme geliştirmektedir.

Geliştirilen regresyon modeli, sadece deneysel doğrulama sağlamakla kalmamış aynı zamanda benzer sistemlerin optimize edilmesine yönelik parametre tahmini amacıyla da kullanılabilir bir araç haline getirilmiştir. Bu yönüyle tez çalışması, çevresel mühendislik, su arıtma sistemleri ve sürdürülebilir altyapı tasarımı alanlarında uygulanabilirliği yüksek, yenilikçi bir araştırma olarak değerlendirilmektedir.

1.1. Sembolik Regresyon

Regresyon analizi, bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi inceleyen temel bir istatistiksel yöntemdir. Basitçe ifade etmek gerekirse, bağımlı değişkenin değerini, bağımsız değişken veya değişkenlerin değerleri üzerinden tahmin etmeyi amaçlar. Bu analizde, eğer tek bir bağımsız değişken kullanılıyorsa, bu basit doğrusal regresyon veya tek değişkenli regresyon olarak adlandırılır. Ancak, birden fazla bağımsız değişkenin aynı anda bağımlı değişken üzerindeki etkisini incelemek için çoklu regresyon analizi kullanılır. Çoklu regresyon, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki ortak etkisini eş zamanlı olarak değerlendirir.

Sembolik regresyon, gözlemlenen verileri tanımlamak için uygun bir matematiksel model bulma yöntemidir. Geleneksel regresyon tekniklerinde, algoritmaya başlangıçta belirli bir model verilir ve bu modelin parametreleri optimize edilir. Örneğin, doğrusal regresyon modeli, bağımlı değişkenler ile açıklayıcı değişkenler arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu varsayar; yapay sinir ağları (YSA) ise, önceden tanımlı bir ağ yapısı (nöron bağlantıları ve aktivasyon fonksiyonları gibi) üzerine kurulu doğrusal olmayan modellerdir.

Ancak, sembolik regresyonda böyle önceden belirlenmiş fonksiyon biçimlerine ihtiyaç yoktur. Bunun yerine, aday fonksiyon bileşenlerini (matematiksel işlemler, durum değişkenleri, sabitler, analitik fonksiyonlar vb.) içeren bir matematiksel ifade uzayı tanımlanır ve bu uzay içinde uygun çözüm arayışı yapılır. Başka bir deyişle, sembolik regresyonda hem model yapıları hem de model parametreleri optimize edilir. Önceden tanımlanmış fonksiyon biçimi gerekmediğinden, kullanılan optimizasyon algoritmaları geleneksel analitik/nümerik yöntemlerden (örneğin, konjugat gradyan veya Newton-Raphson yöntemleri) farklıdır.

Sembolik regresyonda en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olan Genetik Programlama (GP), Koza tarafından genetik algoritmaların (GA) özel bir uygulaması olarak geliştirilmiştir ve mühendislik alanında özellikle atomik yapı öngörülerinde yaygın şekilde kullanılır. GP'nin temelinde Darwin'in evrim kuramı vardır: bir problemin çözümü nesiller boyunca evrimleşerek en uygun çözüme ulaşır.

GA'nın aksine, GP'de çözümler ikili dizilerle değil, ağaç yapılı kromozomlarla temsil edilir. Örneğin, $1 + \exp(-x)$ fonksiyonu, iç düğümleri matematiksel işlemler (örneğin +, \times , \exp) ve terminal düğümleri değişkenler ve sabitler olan bir ağaç şeklinde gösterilebilir. Her birey (kromozom), bir çözüm adayını temsil eder ve ağaç yapısı sayesinde fonksiyon ifadesi derinlemesine taranabilir.

Ağaç yapısı genellikle ikili olmak zorunda değildir; operatörün argüman sayısına göre değişebilir. Kullanıcı, probleme uygun bir fonksiyon kümesi tanımlayarak GP'nin esnekliğinden faydalanabilir. GP sürecinde, bu temel yapı taşlarıyla çok sayıda ağaç yapısı oluşturulur ve her biri değerlendirilir.

GP'nin temel işlemleri üç kategoride toplanır:

- Çaprazlama (Crossover): İki ebeveyn ağaç alınarak rastgele alt ağaçlar değiştirilir ve yeni bireyler oluşturulur. Bu işlem genellikle baskın çoğalma yöntemidir.

- Mutasyon (Mutation): Tek bir ebeveyn alınarak rastgele bir alt ağaç yeni bir yapıyla değiştirilir. Bu işlem, popülasyona yeni özellikler kazandırmak ve yerel minimumlardan kaçmak için önemlidir.

- Üreme (Reproduction): Uygun bireyler doğrudan bir sonraki nesle aktarılır, böylece nesiller arası benzerlik bir ölçüde korunur.

Her nesilde, bireylerin başarımı (fitness değeri) genellikle hata ölçütleri (ortalama kare hata, kök ortalama kare hata) ile değerlendirilir. En uygun çözümler bir sonraki nesle aktarılır ve süreç, önceden tanımlı uygunluk kriterine veya maksimum nesil sayısına ulaşıncaya dek sürer [2].

1.1.1. Genetik Programlama (GP)

, bazen bu modelleri gerçek süreçlere uygulamak mühendisler için karmaşıklıklara ve sorunlara neden olur. Bu durumda, genetik programlama, herhangi bir sürekli doğrusal olmayan giriş-çıkış eşlemesini öğrenme yeteneğiyle süreç sistemi davranışını temsil etmenin basit ve etkili bir yolunu sağlar.

Genetik Programlama (GP), belirli bir problemi çözebilmek amacıyla bilgisayar programları üreten sembolik bir optimizasyon tekniğidir. Genetik Algoritmaların (GA) bir alt dalı olarak değerlendirilen GP, literatürde çoğunlukla “ağaç tabanlı GP” olarak da anılmaktadır [3]. GP, çözüm yapı taşlarını oluşturan temel bileşenlerin evrimsel süreçler yoluyla geliştirilmesini ve bu süreçte uyum değerinin artırılmasını hedefleyen bir evrimsel algoritmadır [4].

Her ne kadar GA ve GP aynı temele dayansa da aralarında yapısal bazı farklar bulunmaktadır. Bu farklardan en dikkat çekici olanı, çözümün temsil biçimidir. GA’da bireyler genellikle ikili diziler ya da reel sayılardan oluşurken, GP’de çözümler genellikle hiyerarşik bir ağaç yapısıyla tanımlanan bilgisayar programları şeklinde temsil edilir. Ayrıca GA’da birey uzunlukları sabitken, GP’de program ağaçlarının uzunluğu ve karmaşıklığı evrim sürecinde değişkenlik gösterebilir [5].

Genetik Programlama, genel hatlarıyla üç temel adımdan oluşur: başlangıç popülasyonunun oluşturulması, genetik operatörler (örneğin mutasyon ve çaprazlama) ile yeni bireylerin türetilmesi ve sonlandırma kriterlerinin sağlanması. İlk popülasyon genellikle rastgele oluşturulur ve bu durum geniş bir çözüm uzayını kapsayacak şekilde yüksek çeşitliliği beraberinde getirir. Bireyler, fonksiyon ve terminal kümelerinden seçilen

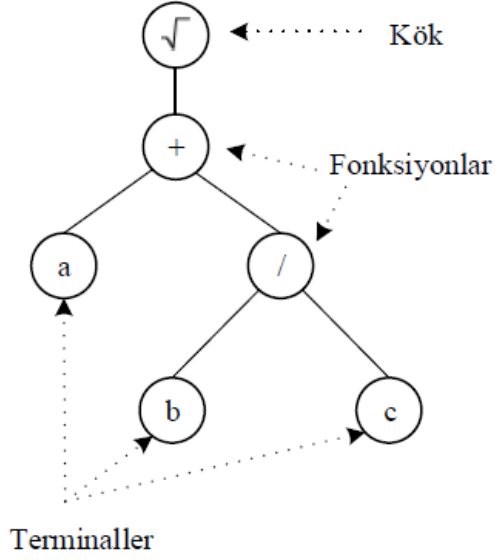
elemanlarla oluşturulan ağaç yapılarıdır. Fonksiyon kümesinde aritmetik işlemler (+, -, ×, ÷), mantıksal operatörler (and, or, not) veya trigonometrik ve logaritmik fonksiyonlar (sin, cos, log, tanh vb.) yer alabilir. Terminal kümesi ise kullanıcı tanımlı sabitler veya değişkenleri içerebilir. Bu yapılar, kök düğümünden başlayarak dallanan ağaç benzeri bir formda, çözüm modelini meydana getirir.

GP'de, başlangıçta bireylerin rastgele bir popülasyonu oluşturulur ve ardından popülasyondaki her bir bireyin zindeliği değerlendirilir. Her bir bireyin zindeliği belirlendikten sonra, üreme için popülasyonun üyelerini seçmenin temeli olarak kullanılır. Literatürde önerilen farklı seçim yöntemleri vardır ve turnuva seçimi bunlardan biridir. Bu, ana popülasyondan sabit sayıda bireyin rasgele örneklenmesi ve bir alt küme oluşturulması ve bu alt kümenin en uygun üyesinin üremek üzere seçilmesidir. İkinci yöntem, uygunluğuna orantılı bir olasılıkla ana popülasyondan bir bireyin örneklenmesi olan uygunluk orantılı seçimdir. Son yöntem, popülasyonun azalan zindelik değerleri sırasına göre düzenlendiği ve en uygun bireylerin üremeye tabi tutulduğu elitist şemadır. En uygun bireyler seçildikten sonra, genetik operatörler (üreme, çaprazlama ve mutasyon) uygulanabilir. Üreme operatörü, ana popülasyondan bir üyeyi bir sonraki nesle kopyalar. Çaprazlama operatörü popülasyonun iki üyesini alır ve onları birleştirerek yeni yavrular yaratırken mutasyon önerilen model yapısında rastgele değişiklikler yapar. Bu genetik ve seçim operatörleri popülasyonun evrimini yönlendirir ve mevcut popülasyonda gerçekleştirildikten sonra yavru popülasyonu eski popülasyonun yerini alır. Bu süreç sonlandırma kriterleri karşılanana kadar tekrar tekrar tekrarlanır. Bu kriter, nesil sayısı ve uygunluk değeri olabilir ve karşılandığında problemin çözümü oluşturulur [6].

GP, doğal seçim ilkesinden ve biyolojik evrimi taklit eden genetik operatörlerden esinlenerek gelişen birey popülasyonları kullanır [5]. Bu yönüyle GP, çözümün doğrudan sayısal bir değer olduğu GA'ya kıyasla daha esnek ve güçlüdür. GP'nin çıktısı bir çözüm değeri değil, probleme özgü bir bilgisayar programıdır. Bu durum, özellikle klasik yöntemlerle çözülemeyen veya çok sayıda geçerli çözümün bulunduğu problemlerde önemli bir avantaj sağlar.

Örneğin, bir sürüş davranışını modelleyen program tasarlanacaksa, tek bir ideal çözüm bulunmayabilir. Bazı programlar güvenli ama yavaş sürüşü tercih ederken, bazıları daha hızlı ancak riskli bir yaklaşım benimseyebilir. Bu bağlamda, GP ile elde edilen çözümler hız ve güvenlik gibi kriterler arasında farklı denge noktaları sunabilir. Ayrıca GP, değişken çevresel koşullara dinamik biçimde uyum sağlayan çözümler üretebilmesi bakımından da avantajlıdır.

Örneğin, düz bir yol için geliştirilen bir sürüş algoritması, bozuk zeminli bir yol için alternatif sürüş stratejileri üretebilir [7]. Genetik programlama modelinin örnek bir $(\sqrt{a + \frac{b}{c}}$ sembolik ifadesinin) ağaç yapısı şeklindeki gibidir [8].



Şekil 1.1. Genetik Programlama Modelinin Ağaç Yapısı

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Keklik, M., (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, sudan demir giderim performansını değerlendirmek amacıyla çeşitli kapak aralıkları ve farklı uzunluklarda kondüitler kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneylerde, suyun hızına bağlı olarak Reynolds sayısında (Re) ve çekilen hava miktarında artışlar gözlemlenmiştir. 0,5 cm, 1 cm ve 1,5 cm kapak açıklıklarıyla yapılan deneylerde, 100 cm ve 150 cm uzunluğundaki kondüitlerde elde edilen hava hacimleri birbirine yakın çıkarken, 50 cm'lik kondüitte bu miktarın daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kapak açıklığının 0,5 cm olduğu durumlarda, çekilen hava miktarının en yüksek değerlere ulaştığı; 1 cm ve 1,5 cm açıklıklar için ise benzer hava çekim değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Re sayısındaki artışın, genel olarak demir giderim verimini olumlu yönde etkilediği görülmüş, en yüksek verim %72 olarak rapor edilmiştir.

Ünsal ve çalışma arkadaşları (2005), kapaklı kondüit sistemlerinde boru uzunluğunun havalandırma üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Araştırmada, farklı uzunluklardaki kondüitler, çeşitli kapak aralıkları ve değişen debi koşulları altında incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, özellikle dar kapak açıklığı kullanıldığında, kondüit uzunluğundaki artış hava emme kapasitesini olumlu yönde etkilemiştir. Öte yandan, kısa boru uzunluklarında kapak açıklığının artırılmasıyla hava emme oranının en yüksek seviyelere ulaştığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, sistem geometrisinin ve açıklık genişliğinin hava transferine olan etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Esenceli (2019) tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında, venturi yapısı kullanılarak atıksulardan demir uzaklaştırma performansı incelenmiştir. Çalışmada, iki farklı venturi modeli ile üç farklı boru uzunluğu bir araya getirilerek sistemin demir giderme kapasitesi değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, en düşük arıtma verimi, Dt/D oranı 0,75 olan ve 25 cm uzunluğundaki borunun kullanıldığı konfigürasyonda gözlemlenmiştir. Bu bulgu, hem boru geometrisinin hem de venturi tasarımının performans üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

Bartak ve ark. (2017), yeraltı sularındaki çözülmüş demiri uzaklaştırmak amacıyla, demir içeriği yüksek olan bir kuyu üzerinde çeşitli arıtma denemeleri gerçekleştirmiştir. Yapılan uygulamalar sonucunda, sistemin genel verimliliğinde %50 oranında bir iyileşme sağlanmış, ayrıca demir gideriminde %25'lik bir artış elde edilmiştir. Bu sonuçlar, deneysel müdahalelerin arıtma performansını belirgin şekilde yükseltebildiğini göstermektedir.

Appelo ve çalışma arkadaşları (2019), yeraltı suyundan demirin uzaklaştırılmasına yönelik saha ölçekli bir modelleme çalışması gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda, belirli bir

hacme oksijen içeren su verilmiş ve ardından, doğal yeraltı suyuna kıyasla daha düşük demir içeren ancak daha fazla miktarda su kuyudan çekilmiştir. Sürecin analizinde hidrojeokimyasal taşınım esaslı bir modelleme yaklaşımı tercih edilmiş ve modelleme sonuçları hedeflenen başarı düzeyine ulaşmıştır.

Çobaner ve ark., 2016, çalışmalarında geçmiş günlere ait yeraltı su seviyesi ölçümleri ve meteorolojik parametreler kullanılarak, gelecekteki yeraltı su seviyelerinin öngörülmesi amacıyla matematiksel modeller oluşturulmuştur. Modelleme sürecinde, genetik programlamanın çok-genli versiyonu olan ÇGGP (çok-genli genetik programlama) yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada, 2007–2009 yıllarına ait Develi meteoroloji istasyonu ve Karacaviran gözlem kuyusundan elde edilen günlük veriler kullanılmıştır. Trenin ardından bir ay sonraki yeraltı su seviyesini tahmin etmeyi amaçlayan modeller, çoklu doğrusal regresyon yöntemleriyle kıyaslanmış; ÇGGP ile elde edilen modellerin, dört farklı performans kriteri açısından üstün sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu yöntemle hem sade hem de pratik olarak kullanılabilir öngörü modelleri elde edilmiştir.

Bıyık ve ark., 2016, çalışmalarında, bağlantı elemanlarının gevşeme davranışı sayısal simülasyon teknikleriyle modellenmiş ve deneysel verilerle uyumlu olacak şekilde, etkili parametrelerin belirlendiği bir deneysel tasarım süreci gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda hem regresyon tabanlı yöntemler hem de genetik programlama ile öngörü modelleri oluşturulmuştur. Özellikle dinamik ve titreşimli yüklemeye koşulları altındaki bağlantı sistemlerinde gevşeme davranışını tahmin etmek üzere genetik programlama yönteminin bu alanda ilk kez uygulandığı görülmüştür. Sonuçlar, genetik programlamanın regresyon analizine kıyasla daha başarılı tahminler sunduğunu göstermektedir.

Bozogullarından ve ark., 2025, çalışmalarında, Yapay Arı Koloni Programlama (ABCP) algoritması ile transfer öğrenme yaklaşımı birleştirilerek sembolik regresyon problemlerine yönelik yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Transfer öğrenme, bir problemde elde edilen öğrenmenin, benzer yapıya sahip farklı bir probleme aktarılmasına olanak tanıyan bir yöntemdir. Literatürde, bu yaklaşımın geleneksel makine öğrenmesi teknikleri ve genetik programlama ile bütünleştirilerek başarılı sonuçlar verdiği çeşitli örneklerle gösterilmiştir. İlgili çalışmada ise transfer öğrenme ilk kez ABCP algoritmasına entegre edilerek “ABCP-T” olarak adlandırılan bir algoritma ailesi oluşturulmuş ve bu yeni yöntem, çeşitli sembolik regresyon problemleri üzerinde test edilmiştir. Elde edilen bulgular, ABCP-T algoritmalarının standart ABCP’ye göre daha düşük hata oranlarına ve daha yüksek tahmin başarımına sahip

olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, transfer öğrenmenin evrimsel algoritmalara dayalı modelleme tekniklerinde performans iyileştirmesi sağlayabileceğini göstermektedir.

Özger ve ark., 2022’de yaptıkları çalışmada, venturi-konduit yapısına sahip sistemlerde havalandırma performansını modelleyebilecek fonksiyonların elde edilmesi amacıyla Yapay Arı Koloni Programlama (ABCP) yöntemi önerilmiştir. Farklı daralma oranlarına sahip iki ayrı venturi için elde edilen deneysel verilerle eğitilen modelin performansı, yapay sinir ağları ve genetik programlama ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, test verileri üzerinde ABCP yöntemi her iki veri setinde de $R^2 = 0,99$ değeriyle genetik programlama ve yapay sinir ağlarına üstünlük sağlamıştır. İlgili veri setlerinde hesaplanan RMSE değerlerinin sırasıyla 1,64 ve 2,66 olması, ABCP’nin bu probleme uygun matematiksel fonksiyonları yüksek doğrulukla üretebildiğini göstermektedir. Bu bulgular, ABCP yönteminin sembolik regresyon temelli modelleme uygulamalarında güçlü bir alternatif olabileceğini ortaya koymaktadır.

Önen ve ark., 2018 yaptıkları çalışmada, Diyarbakır ili için 2005–2014 yılları arasına ait su yönetimiyle ilgili çeşitli parametreler kullanılarak içmesuyu talebinin tahminine yönelik modellemeler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, şebekeye verilen su miktarı, su kayıpları, tahakkuk verileri, sıcaklık, nem, yağış, nüfus, içmesuyu abone sayısı ve ekonomik gelişmişliği yansıtan Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYH) gibi göstergeler değerlendirmeye alınmıştır. Söz konusu parametreler, içmesuyu tüketimini etkileyen faktörler olarak ele alınmış ve Genetik İfadeli Programlama (GEP) yöntemi kullanılarak çeşitli tahmin modelleri geliştirilmiştir. Elde edilen modeller aracılığıyla tüketim üzerindeki değişkenlerin etkileri analiz edilmiş ve içmesuyu talebine yönelik öngörüler oluşturulmuştur. Model performansları, determinasyon katsayısı (R^2) ve kök ortalama kare hata (RMSE) gibi istatistiksel ölçütler yardımıyla değerlendirilmiş; GEP tabanlı yaklaşımların yüksek doğrulukla sonuç verdiği ve ölçülen değerlerle güçlü bir uyum sağladığı belirlenmiştir.

Yunusova 2019, çalışmasında, Türkiye’nin elektrik enerjisi tüketiminin modellenmesinde yapay zekâ temelli bir yöntem olan Ağaç-Tohum Programlaması (Tree-Seed Programming – TSp) kullanılmıştır. 2015 yılında geliştirilen ve ağaçlarla tohumları arasındaki doğal ilişkiden esinlenen Ağaç-Tohum Algoritması’na (Tree-Seed Algorithm – TSA) dayanan bu yöntem, otomatik programlama yaklaşımı ile geliştirilmiş ve çözüm temsili için ağaç tabanlı çaprazlama yapısı benimsenmiştir. TSp algoritmasında doğrusal kodlama yapısı ve kurallar, ağaç temelli kodlamaya göre düzenlenmiş ve öncelikle sembolik regresyon problemleri üzerinde test edilerek performansı değerlendirilmiştir. Belirli matematiksel fonksiyonlar üzerinde elde edilen olumlu sonuçlar, TSp’nin farklı problemlere

uyarlanabilirliğini ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, Türkiye'nin 1992-2016 yılları arasındaki gayrisafı yurt içi hasıla (GSYİH), nüfus, ithalat ve ihracat gibi göstergelerine dayalı olarak elektrik tüketimini modellemek amacıyla TSp uygulanmıştır. Elde edilen modelin başarımını değerlendirmek için, aynı problem üzerinde genetik programlama (GP) algoritması da çalıştırılmış ve TSp'nin hem eğitim hem de test verilerinde GP'ye kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Son olarak, TSp ile geliştirilen model iki farklı senaryo altında 2017-2025 yılları arasındaki elektrik tüketimi tahmininde kullanılmıştır.

Bozorg, O., 2017' yaptıkları çalışmalarında model girdileri, boyut indirgeme tekniği olan Temel Bileşen Analizi (PCA) ile belirlenmiş; LSSVR modelinin katsayıları ise duyarlılık analizi ve istatistiksel ölçütler yardımıyla optimize edilmiştir. Yapılan analizler, LSSVR performansının katsayılara oldukça duyarlı olduğunu ve denenen kombinasyonların %60'ında Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısının (NS) negatif olduğunu göstermiştir. Bu durum, söz konusu parametre kombinasyonları için zaman serisinin ortalamasının LSSVR'ye kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Bu sınırlamaları aşmak amacıyla, LSSVR modeli Genetik Algoritma (GA) ile birleştirilerek GA-LSSVR yöntemi geliştirilmiş ve modelleme doğruluğu artırılmıştır. Geliştirilen GA-LSSVR ve GP yöntemleri, İran'da yer alan Sefidrood Nehri'nde Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , pH, elektriksel iletkenlik (EC) ve toplam çözünmüş madde (TDS) gibi su kalite parametrelerinin modellenmesinde kullanılmıştır. Sonuçlar, özellikle R^2 ve NS kriterlerine göre GA-LSSVR'nin GP yöntemine kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığını ortaya koymakta; ancak genel olarak her iki yöntemin de su kalitesinin tahmini açısından güvenilir ve uygulanabilir yaklaşımlar sunduğu ifade edilmektedir.

Bozorg-Haddad, Omid, Shima Soleimani, and Hugo A. Loáiciga. "Modeling water-quality parameters using genetic algorithm–least squares support vector regression and genetic programming." *Journal of Environmental Engineering* 143.7 (2017): 04017021.

Mohammad-Azari, S., 2020, yaptıkları incelemede, su kaynakları problemlerine çeşitli uygulamalarda yararlı olduğu kanıtlanmış GP varyantlarını sunmaktadır. GP'nin su kaynakları sistemleri analizinde uygulamalarına ilişkin birkaç örnek burada sunulmaktadır. Bu inceleme, GP'nin yağış-akış modellemesi, akarsu sediman tahmini, taşkın tahmini ve yönlendirmesi, buharlaşma ve buharlaşma-terleme tahmini, rezervuar işletimi, yeraltı suyu modellemesi, su kalitesi modellemesi, su talebi tahmini ve su dağıtım sistemleri dahil olmak üzere çok çeşitli suyla ilgili problemleri çözmek için uygun hale getiren diğer geleneksel yöntemlere kıyasla yeteneğini ve üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

Zhang, K., 2019, bu çalışmada, üç farklı kirletici (toplam askıda katılar- TSS, toplam fosfor- TP ve toplam azot- TN) için yeni biriktirme algoritmaları üretmek üzere genetik programlama (GP) yaklaşımını benimseyerek yağmur suyu kalite modellerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Bunu, Avustralya ve ABD'deki farklı havzalardan toplanan veriler kullanılarak yeni modellerin (ayrıca kıyaslama olarak geleneksel biriktirme ve yıkama modelleri) test edilmesi izledi. GP yaklaşımı, yalnızca tipik önceki kuru hava periyodunu (ADWP) değil, aynı zamanda diğer daha az 'geleneksel' değişkenleri- TSS için önceki yağış derinliği ve TP ve TN simülasyonu için maksimum hava sıcaklıklarını- dahil ederek yeni biriktirme algoritmaları kümelerini bilgilendirdi. Geleneksel modeller, Gilby Road'daki (GR) TP (kalibrasyonda $E=0,21$ ve doğrulamada $0,43$) hariç, nispeten zayıf bir performansa sahipti (Nash-Sutcliffe katsayısı, $E<0,0$). GP tarafından bilgilendirilen yeni oluşturma algoritmalarına sahip modeller kullanılarak iyileştirilmiş performans gözlemlendi. Örneğin GR'deki TP'yi ele alırsak, en iyi performans gösteren modelin kalibrasyonda E değeri $0,46$ ve doğrulamada $0,54$ 'tü. TSS, TP ve TN için en iyi performans gösteren modeller genellikle farklıdır ve bu da farklı kirleticiler için belirli modellerin kullanılması gerektiğini göstermektedir. Yağmursuyu kalite modelleri için mümkün olan daha fazla iyileştirmeye ilişkin görüşler verildi. Tipik oluşturma ve yıkama sürecine ek olarak, yeni nesil yağmursuyu kalite modellerinin stokastik yaklaşımlar yoluyla geleneksel olmayan kirletici kaynaklarını (örn. çapraz bağlantılar, septik tank sızıntısı, yasadışı deşarjlar) hesaba katabilmesi önerilir. Stokastik modelleme için her türlü konvansiyonel olmayan kaynaktan gelen kirletici yüklerinin yoğunluk-frekans-süre (IFD) gibi bilgilerini içeren emisyon envanterlerinin oluşturulması önerilmektedir.

Güven, A. ve ark. 2024'te araştırmalarında, Fırat Nehri'nin bir alt havzası özelinde aylık akım ve sediment taşınımı değerlerinin tahmini amaçlanmıştır. Çalışmada, CanESM2 iklim modelinden elde edilen senaryolar kullanılmış ve bu senaryolar, istatistiksel ölçek küçültme teknikleri ile yapayzeka tabanlı genetik programlama yöntemleri aracılığıyla analiz edilmiştir. Havza sınırları Watershed Modeling System (WMS) yardımıyla belirlenmiş, istatistiksel ölçek küçültme sürecinde GEP ve LGP yaklaşımları uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, doğruluk açısından lineer regresyon yönteminin sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Makine kodlama temelli LGP yöntemi, hem akım hem de sediment taşınımı tahminlerinde eğitim ve test aşamalarında en yüksek korelasyon katsayısına (R) ve en düşük hata değerlerine (MSE ve MAE) ulaşmıştır. Geleceğe yönelik RCP 2.6, 4.5 ve 8.5 senaryoları altında yapılan projeksiyonlar incelendiğinde, her iki model de özellikle RCP 8.5 senaryosu için en iyi sonuçları sunarken, GEP yöntemi ise 2006-2020 dönemindeki gözlenen veriler ile yapılan karşılaştırmada daha başarılı performans sergilemiştir. Genel değerlendirmede, her iki model

de 2021-2100 yılları arasındaki süreçte hem debi (Q) hem de sediment taşınımı (Qs) için hafif bir azalma eğilimi öngörmekte olup, bu durum gelecekteki hidrolojik planlama ve kaynak yönetimi açısından önemli bilgiler sağlamaktadır.

Taşbaş, S. 2018, yaptığı çalışmada, genetik programlama yaklaşımıyla hava kalitesinin zamana bağlı seriler üzerinden tahmini gerçekleştirilmiştir. Dünya Sağlık Örgütü ve çeşitli çevre kuruluşlarının yayımladığı raporlar, hava kirliliğine bağlı ölüm ve sağlık sorunlarının önlenmesi açısından hava kalitesi tahmininin kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Çalışmanın temel hedefi, hava kalitesinin öngörülmesinde genetik programlamanın kullanımını teşvik etmek ve bu yöntemin performansını makine öğrenmesi teknikleri ile ARIMA modeli karşısında değerlendirmektir. Araştırmada, bir yıl boyunca saatlik olarak toplanan meteorolojik veriler kullanılarak kükürt dioksit ve partikül madde gazlarının yoğunlukları tahmin edilmiştir. Bu zaman serisi tahmini, sembolik regresyon problemi şeklinde ele alınmış ve Java tabanlı Evrimsel Hesaplama Araştırma (ECJ) sistemi üzerinden modellenmiştir. Elde edilen tahmin sonuçları, genetik programlamanın başarısını göstermek amacıyla çeşitli karar ağacı algoritmaları ve ARIMA modeli ile karşılaştırılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmalar sonucunda, genetik programlamanın bazı topluluk öğrenme algoritmalarına kıyasla dahi daha üstün sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Yarangüme, V. 2008 de hazırladığı tez kapsamında, karbon monoksit oksidasyonuna ilişkin kinetik modelleme genetik programlama yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, deneysel verilerden yararlanılarak reaksiyon hızını tanımlayan bir denklem geliştirilmiş ve bu denklem reaksiyon mekanizmasının anlaşılmasında kullanılmıştır. Çalışmanın başlangıcında, genetik programlamanın hız denklemleri elde etmedeki uygunluğunu test etmek amacıyla, kinetik yapıları ve mekanizmaları daha önceden bilinen temel reaksiyonlar üzerinde modelleme uygulamaları yapılmıştır. Kullanılan fonksiyonlar, genellikle katalitik süreçlerde yer alan hız denklemlerinin yapısında bulunan temel matematiksel bileşenlerden seçilmiştir. Genetik programlama yoluyla elde edilen hız denklemlerinin yapısal açıdan literatürdeki benzer denklemlerle büyük oranda örtüştüğü görülmüştür. Çalışmanın ilerleyen aşamasında, katalitik karbon monoksit oksidasyon reaksiyonu için modelleme yapılmış ve bu süreçte biri laboratuvar da üretilmiş, diğerleri ise farklı literatürlerden alınmış olmak üzere üç ayrı katalizör sistemi için deneysel veriler kullanılmıştır. Geliştirilen modeller hem elde edilen deneysel verilerle hem de literatürde sunulan diğer modellerle istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca, oluşturulan modeller üzerinden hız denklemleri ve parametreler detaylı bir şekilde değerlendirilerek reaksiyonun olası mekanizması incelenmiştir. Çalışma

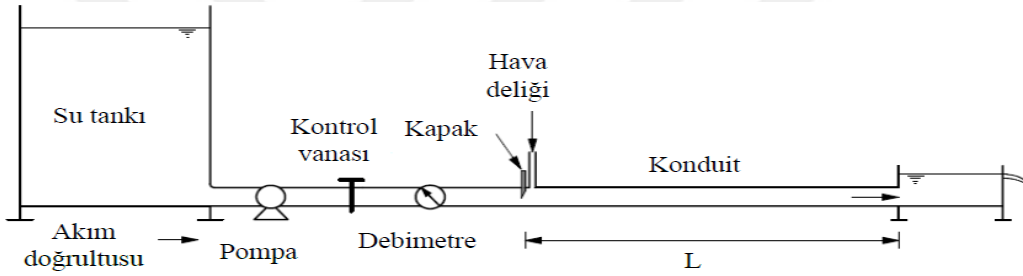
sonuçları, genetik programlama yönteminin, benzer katalitik reaksiyonların kinetik ve mekanizma analizlerinde de etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.



3. MATERYAL VE METOT

3.1. MATERYAL

Bu tez çalışmasında kullanılan deneysel veriler, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından desteklenen ve [2020/9-1 YLS] numaralı proje kapsamında yürütülen çalışmalardan elde edilmiştir. İlgili projede, farklı uzunluklardaki (50 cm, 100 cm ve 150 cm) dikdörtgen konduit sistemlerinde farklı daralma oranlarına ($D=0.5$ cm, 1 cm, 1.5 cm) sahip borular kullanılmış; çeşitli debilerde akan suyun oluşturduğu basınç farkı ile havalandırma sağlanarak doğal oksidasyonla demir uzaklaştırma süreci incelenmiştir. Bu deneylerde her bir senaryo için çıkıştaki %Fe giderim oranları ölçülmüş ve söz konusu veriler bu tez kapsamında sembolik regresyon yöntemiyle tahmin modelleri geliştirilmiştir ve deney sonuçları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.1. Deney Düzenegi

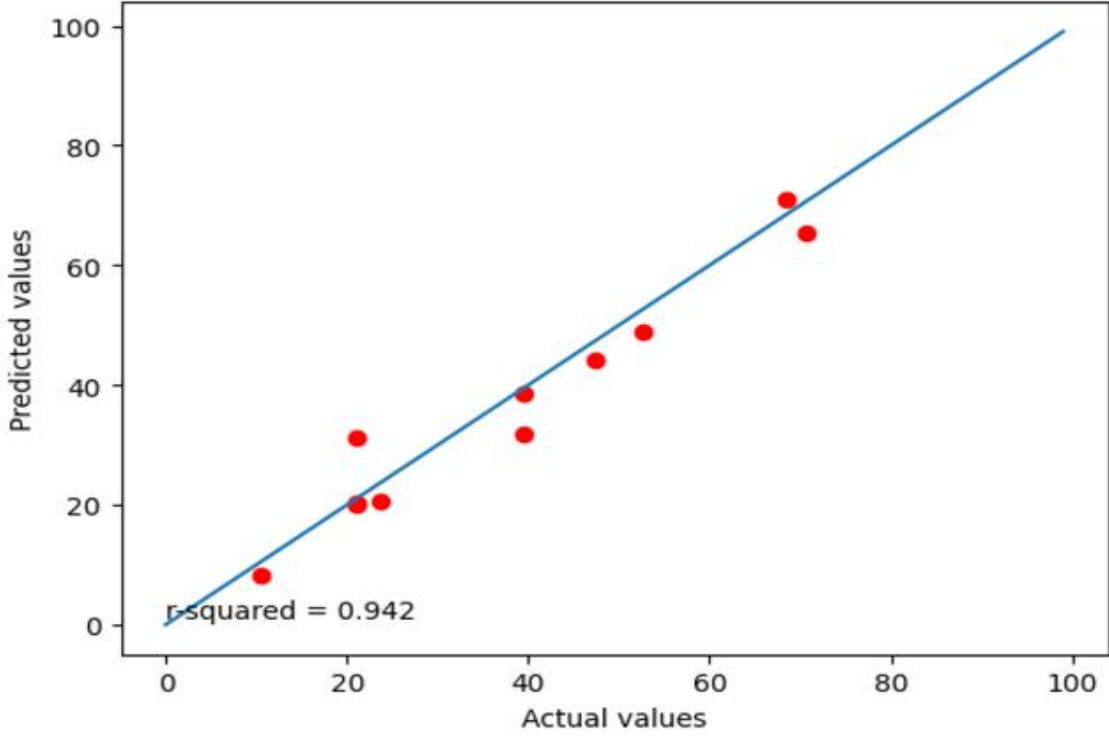
3.2. METOD

Bu çalışmada, sembolik regresyon için genetik programlama tabanlı bir yaklaşım olan gplearn kütüphanesi kullanılmış; add, sub, div, sin gibi temel matematiksel fonksiyonların yer aldığı fonksiyon setiyle 6000 bireylik popülasyon büyüklüğünde ve 40 jenerasyonluk bir evrimsel süreç işletilmiştir. Elde edilen modelin test kümesi üzerinde gösterdiği performans değerlendirilmiştir.

Giriş (bağımsız) değişkenler olarak Q_A/Q_W (hava/su debisi), Boy (konduit uzunluğu), Daralma oranları ve Reynold sayısı; çıkış (bağımlı) değişken olarak ise %Fe (demir giderimi) kullanılmıştır. Modelin tahmin başarımı; MAE (Ortalama Mutlak Hata), MSE (Ortalama Kare Hata), RMSE (Karekök Ortalama Kare Hata) ve R^2 (Determinasyon Katsayısı) gibi istatistiksel metrikler üzerinden değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, regresyon modelinin fiziksel parametrelerle olan ilişkileri analiz edilmiş ve %Fe giderimi tahmin doğruluğu karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

4. BULGULAR

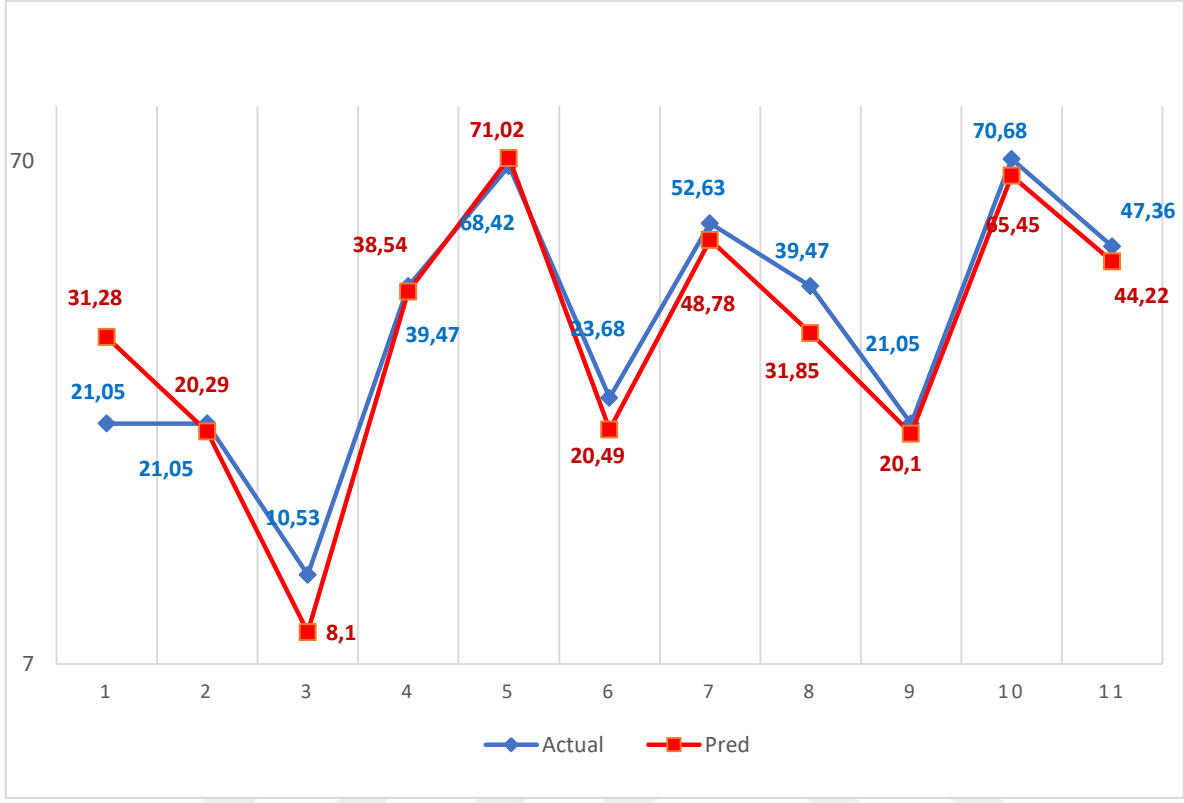
Şekil 4.1'de, model tarafından tahmin edilen değerler ile deneysel (gerçek) değerler arasındaki ilişki gösterilmektedir. Grafikte kırmızı noktalar her bir örneğin gerçek ve tahmin edilen değerlerini temsil ederken, mavi doğrusal çizgi mükemmel tahmin durumunu ($y=x$) ifade etmektedir. Noktaların büyük çoğunluğunun bu çizgiye yakın konumlanması, modelin yüksek doğrulukla tahminlerde bulunduğunu göstermektedir. Modelin determinasyon katsayısı (R^2) 0.942 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, modelin toplam varyansın %94.2'sini başarıyla açıkladığını ortaya koymakta ve elde edilen sembolik regresyon denkleminin sistem davranışını temsil etmede güçlü bir araç olduğunu kanıtlamaktadır. Bu sonuç, modelin hem genelleme kabiliyetinin hem de öngörü performansının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.1. R^2 Grafiği

Şekil 4.2'de, modelin farklı örnekler üzerindeki tahmin başarısı doğrudan görselleştirilmiş ve genellikle her iki eğrinin benzer doğrultuda ilerlediği gözlemlenmektedir. Özellikle 5., 7. ve 10. örneklerde modelin gerçek değerlere oldukça yakın sonuçlar ürettiği dikkat çekmektedir. Bazı örneklerde (örneğin 1. ve 8. örnekler) tahminlerde kısmi sapmalar olsada, genel eğilim doğru bir şekilde yakalanmıştır. Bu durum, modelin ani değişimleri ve tepe-nokta davranışlarını önemli ölçüde temsil edebildiğini ve öngörü kabiliyetinin yüksek

olduğunu göstermektedir. Grafikselle karşılaştırma, sembolik regresyon modelinin genel yapıya duyarlı ve güvenilir olduğunu desteklemektedir.



Şekil 4.2. Gerçek Değerler ve Tahmin Değerleri Grafiği

Tablo 4.1. Performans Metrikleri

Metrik	Teset Kümesi	Eğitim Kümesi
MAE	3,72	5,3
MSE	21,81	53,89
RMSE	4,67	7,34
R^2	0,94	0,83

Tablo 4.1’de, geliştirilen sembolik regresyon modelinin eğitim ve test kümelerine ait performans değerlendirme metrikleri yer almaktadır. Test kümesi için ortalama mutlak hata (MAE) 3,72, ortalama kare hata (MSE) 21,81 ve kök ortalama kare hata (RMSE) 4,67 olarak hesaplanmıştır. Eğitim kümesinde ise bu değerler sırasıyla 5,3 (MAE), 53,89 (MSE) ve 7,34

(RMSE) şeklindedir. Bu sonuçlar, modelin test verilerindeki hata değerlerinin eğitim verilerine kıyasla daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır.

Ayrıca, test kümesi için elde edilen determinasyon katsayısı ($R^2=0,94$) modelin yüksek açıklayıcılık gücüne sahip olduğunu göstermektedir. Eğitim kümesindeki R^2 değeri 0,83 olup, bu da modelin öğrenme sürecinde aşırı öğrenme (overfitting) eğiliminde olmadığını ve genelleme kabiliyetinin güçlü olduğunu ortaya koymaktadır.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad [1]$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad [2]$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad [3]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad [4]$$

y_i : Gerçek değerler

\hat{y}_i : Tahmin edilen değerler

\bar{y} : Gerçek değerlerin ortalaması

n : Veri setindeki toplam örnek sayısı

Bu çalışmada, çözülmüş demir giderimi üzerine yapılan deneysel veriler, genetik programlama (GP) temelli sembolik regresyon yöntemi ile modellenmiştir. Sembolik regresyon sonucunda elde edilen model aşağıdaki matematiksel denklemlerle ifade edilmiştir.

Regresyon Denklemi:

$$\frac{-90.9164246565343D + \sin(\sin(L))}{-\sin(25.6410256410256D) + \frac{0.478209435237018}{\sin(L)}} + \frac{-\frac{QA}{QW} - 0.249}{\sin\left(\frac{1165.59518790429D - 0.701194672659845}{-\sin(25.6410256410256D) + \frac{0.478209435237018}{\sin(L)}} - \sin(25.6410256410256D)\right)} + \frac{2.20805979841716 \sin(Re) - 1.02941593618463}{\sin(\sin(Re))} \quad [5]$$

L = Konduit Uzunluğu

D = Daralma Oranı

Re = Reynold Sayısı

Q_A/Q_W = Hava/Su Debi Oranı



5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, kapaklı konduit sistemlerinde gerçekleştirilen fiziksel havalandırma süreçlerinin demir giderimi üzerindeki etkileri istatistiksel olarak modellenmiş ve sembolik regresyon yöntemleriyle tahmin modelleri geliştirilmiştir. Çalışmanın özgün yönü, geleneksel kimyasal ve biyolojik arıtma yaklaşımlarından farklı olarak, tamamen fiziksel oksidasyon esasına dayalı bir sistemin matematiksel modelleme ile değerlendirilmesidir.

Modelleme sürecinde, sembolik regresyon için genetik programlama tabanlı bir yaklaşım olan gplearn kütüphanesi kullanılmış; add, sub, div, sin gibi temel matematiksel fonksiyonların yer aldığı fonksiyon setiyle 6000 bireylik popülasyon büyüklüğünde ve 40 jenerasyonluk bir evrimsel süreç işletilmiştir.

Elde edilen modelin test kümesi üzerinde gösterdiği performans değerlendirmesi oldukça başarılıdır:

- Ortalama Mutlak Hata (MAE): 3,72
- Ortalama Kare Hata (MSE): 21,81
- Kök Ortalama Kare Hata (RMSE): 4,67
- Belirlilik Katsayısı (R^2): 0,94

Bu sonuçlar, modelin yüksek doğrulukla tahmin yapabildiğini ve deneysel verilere uyum sağladığını göstermektedir. Eğitim kümesindeki R^2 değeri ise 0,83 olarak hesaplanmıştır; bu durum modelin öğrenme yeteneğini ortaya koymakla birlikte, aşırı öğrenme (overfitting) eğiliminin düşük olduğunu da göstermektedir.

Tahmin edilen ve gerçek değerlerin karşılaştırıldığı grafiklerde, modelin özellikle test verileri üzerinde tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, geliştirilen sembolik regresyon modelinin sadece eldeki deneysel veriyi anlamakla kalmayıp, benzer sistemler için tasarım aşamasında öngörüselle karar destek aracı olarak da işlev görebileceğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması; mühendislik tasarımlarında kullanılabilir, yorumlanabilir, düşük hesaplama maliyetli ve güçlü bir modelleme alternatifi sunmaktadır. Geliştirilen modelin, kapaklı konduit gibi doğal havalandırma yapılarında su kalitesinin iyileştirilmesine yönelik ileri uygulamalarda kullanılması mümkün olup, sürdürülebilir su yönetimi ve altyapı planlamaları için değerli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Keklik, M.
- [2] Çobaner, Murat, Emin Babayiğit, and Bilal Babayiğit. "METEOROLOJİK VERİLER KULLANILARAK YERALTI SU SEVİYESİNİN GENETİK PROGRAMLAMA İLE TAHMİNİ." Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 5.2 (2016): 177-187.
- [3] KOZA, J.R., Genetic Programming. Massachusetts Institute of Technology, MIT Press, London, UK, 1992.
- [4] KOZA, J.R., Genetic Programming III: Darwinian Invention and Problem Solving, Morgan Kaufmann, San Francisco, USA, 1999.
- [5] TELCİOĞLU, M.B., Veri Madenciliğinde Genetik Programlama Temelli Yeni Bir Sınıflandırma Yaklaşımı ve Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2007.
- [6] Yarangüme, Verda. "Karbon monoksit oksidasyonunun genetik programlama kullanılarak kinetik modellenmesi" Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul, 2008
- [7] AYDINER, Z., Genetik Programlama ile Akışkan Kontrolü Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [8] Emel, Gül Gökay, and Ç. Taşkın. "Genetik algoritmalar ve uygulama alanları." Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 21.1 (2002): 129-152.
- [9] Ünsal, M., Tuğal, M., Özkan, F. Kapaklı Konduitlerde Boy Uzunluğunun Havalandırma Performansına Etkisi. DAUM, 3 (3), S.132-137
- [10] Esenceli, S., (2019). Venturi ile Atıksulardan Demir Gideriminin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Kahramanmaraş.
- [11] Bartak, R., Macheleidt, W., Grischek, T., (2017). Controlling the Formation of the Reaction Zone around an Injection Well during Subsurface Iron Removal. Water, 2017, 9. 87.
- [12] Appelo, C.A.J., Drijver, B., Hekkenberg, R., Jonge, M., (2019). Modeling in situ iron removal from ground water. Groundwater Week. Vol 37, No 6, 811-817
- [13] Çobaner, Murat, Emin Babayiğit, and Bilal Babayiğit. "METEOROLOJİK VERİLER KULLANILARAK YERALTI SU SEVİYESİNİN GENETİK PROGRAMLAMA İLE TAHMİNİ." Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 5.2 (2016): 177-187.

- [14] Bıyık, Aysel, et al. "CIVATALI BAĞLANTILARIN TİTREŞİM ALTINDA GEVŞEMESİNİN GENETİK PROGRAMLAMA VE REGRESYON ANALİZİ İLE TAHMİNİ."
- [15] Bozoğullarından, Elif, Ceylan Bozoğullarından, and Celal Öztürk. "Transfer Learning in Artificial Bee Colony Programming." 2020 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). IEEE, 2020.
- [16] Özger, Zeynep Banu, Ayşe Ece Yağcı, and Mehmet Unsal. "Estimating The Aeration Performance Of Venturi-Conduit By Artificial Bee Colony Programming." *Politeknik Dergisi* 25.1 (2022): 389-398
- [17] Önen, Fevzi, Behzat Aslan, and Nizamettin Hamidi. "Diyarbakır Kenti içmesuyu ihtiyacının genetik ifadeli programlama ile modellenmesi." *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* 9.2 (2018): 859-870.
- [18] Yunusova, Parvana. "Türkiye elektrik enerjisi talep tahmini için ağaç-tohum programlama yaklaşımı." (2019).
- [19] Bozorg-Haddad, Omid, Shima Soleimani, and Hugo A. Loáiciga. "Modeling water-quality parameters using genetic algorithm–least squares support vector regression and genetic programming." *Journal of Environmental Engineering* 143.7 (2017): 04017021.
- [20] Mohammad-Azari, Sahar, Omid Bozorg-Haddad, and Hugo A. Loáiciga. "State-of-art of genetic programming applications in water-resources systems analysis." *Environmental monitoring and assessment* 192 (2020): 1-17.
- [21] Zhang, Kefeng, et al. "Testing of new stormwater pollution build-up algorithms informed by a genetic programming approach." *Journal of Environmental Management* 241 (2019): 12-21.
- [22] Güven, Aytaç, Muhammed Vedat Gün, and Abdulhadi Pala. "Modeling and future projection of streamflow and sediment yield in a sub-basin of Euphrates River under the effect of climate change." *Journal of Water and Climate Change* 15.6 (2024): 2628-2647.
- [23] Taşbaş, Su. "Air quality time series forecasting with genetic programming." *Yüksek Lisans Tezi, Yaşar Üniversitesi, İzmir, 2018.*