

KİL ÇEKİRDEK PARAMETRELERİNİN KAYA DOLGU BARAJLARIN DEFORMASYONU ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF THE EFFECT OF CLAY CORE PARAMETERS ON DEFORMATION OF ROCKFILL DAMS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

Mustafa Soner Sevdî¹, Dr. Öğr. Üyesi Güneş Babagiray²

ÖZET

Bu çalışma, kil çekirdekli kaya dolgu barajların gerilme ve deformasyon özelliklerini ayrıntılı bir şekilde inceleyerek, bu barajların genel performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, barajın dayanıklılığı, stabilitesi ve uzun vadeli performansı üzerindeki etkiler ele alınacaktır. Araştırma, içsel sürtünme açısı ve kohezyon özelliklerinin kil çekirdekli kaya dolgu baraj malzemeleri üzerindeki etkilerini anlamayı hedeflemektedir. Elde edilen deformasyon verileri, makine öğrenimi, derin öğrenme, çoklu regresyon, karar ağacı ve yapay sinir ağları yöntemleriyle değerlendirilecek ve analiz öncesi parametrelere dayalı olarak önceden bir deformasyon tahmini sunulacaktır. Bu çalışma, kil çekirdekli kaya dolgu barajlarda gerilme-deformasyon analizi alanında bilgi birikimine katkı sağlamayı amaçlamakla birlikte, aynı zamanda bu barajlar için gerilme-deformasyon analizi üzerine yeni bir yaklaşım sunarak bilimsel literatüre katkıda bulunmayı hedeflemektedir. Çoklu doğrusal regresyon analizinde, içsel sürtünme açısı için B değeri negatif (-2.235) olduğundan, içsel sürtünme açısının maksimum düşey deplasman üzerindeki etkisi ters yönlüdür. Bu, içsel sürtünme açısındaki bir birimlik artışın maksimum düşey deplasmanda azalmaya neden olduğunu gösterir. Kohezyon için ise B değeri pozitif (0.301) olduğundan, maksimum düşey deplasman üzerindeki etkisi pozitifdir; yani, kohezyon arttıkça maksimum düşey deplasman da artmaktadır. İçsel sürtünme açısı ve kohezyon, maksimum düşey deplasmandaki değişimin %25'ini ($R^2 = 0.248$) açıklayabilmektedir. Karar ağacı analizi, maksimum düşey deplasmanı etkileyen en önemli faktörün içsel sürtünme açısı olduğunu göstermiştir. İçsel sürtünme açısının belirsiz olduğu durumlarda, kohezyonun belirli eşik değerlerinin üzerinde veya altında olması, maksimum düşey deplasman değerlerinde anlamlı değişikliklere neden olmaktadır. Yapay Sinir Ağları (YSA) modelinde, içsel sürtünme

¹ Mustafa Soner Sevdî, DOLSAR Mühendislik A.Ş., ssevdi@dolsar.com.tr (Sorumlu yazar)

² Dr. Öğr. Üyesi Güneş Babagiray, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, gunesaydin@gazi.edu.tr



açısı için her üç düğümde de B değerleri sırasıyla 1.434, 2.373 ve 2.495 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin pozitif olması (Node 1, Node 2, Node 3), içsel sürtünme açısının maksimum düşey deplasman üzerindeki etkisinin pozitif olduğunu gösterir. Yani, içsel sürtünme açısındaki artış, maksimum düşey deplasmanın artmasına neden olmaktadır; içsel sürtünme açısı ne kadar yüksekse, maksimum düşey deplasman da o kadar büyük olur. Kohezyon için ise, Node 1 ve Node 3'te B değerleri sırasıyla -0.038 ve -4.464 olarak belirlenmiştir. Bu negatif değerler, kohezyonun maksimum düşey deplasman üzerindeki etkisinin negatif olduğunu gösterir; yani, kohezyon arttıkça maksimum düşey deplasman azalmaktadır. Ancak, Node 2'de B değeri 1.30 olarak belirlenmiştir ve bu pozitif değer, kohezyonun maksimum düşey deplasman üzerindeki etkisinin pozitif olduğunu gösterir; yani, kohezyon arttıkça maksimum düşey deplasman da artmaktadır. Bulgular, içsel sürtünme açısının genellikle olumlu bir etkiye sahip olduğunu, ancak kohezyonun etkisinin düğümler arasında değişiklik gösterdiğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Baraj, Kil Parametre, Kohezyon, İçsel Sürtünme Açısı Deplasman, Makine Öğrenimi

ABSTRACT

This study aims to evaluate the overall performance of clay core rockfill dams by analysing their stress and deformation characteristics in detail. In this context, the effects on the durability, stabilisation and long-term performance of the dam will be addressed. The research aims to understand the effects of friction angle and cohesion properties on clay core rockfill dam materials. The deformation data obtained will be evaluated by machine learning, deep learning, multiple regression, decision tree and artificial neural network methods and a preliminary deformation prediction will be provided based on the pre-analysed parameters. This study aims to contribute to the body of knowledge in the field of stress-deformation analysis of clay-core rockfill dams, but also to contribute to the scientific literature by presenting a new approach to stress-deformation analysis for these dams. In the multiple linear regression analysis, since the B value for the intrinsic friction angle is negative (-2.235), the effect of the intrinsic friction angle on the maximum vertical displacement is inverse. This indicates that a one unit increase in the angle of friction causes a decrease in the maximum vertical displacement. For cohesion, since the value of B is positive (0.301), its effect on the maximum vertical displacement is positive; that is, as the cohesion increases, the maximum vertical displacement also increases. The angle of friction and cohesion can explain 25% ($R^2 = 0.248$) of the variation in maximum vertical displacement. The decision tree analysis showed that the most important factor affecting the maximum vertical displacement is the angle of friction. In cases where the angle of friction is uncertain, the cohesion above or below certain threshold values causes significant changes in the maximum vertical displacement values. In the Artificial Neural Network (ANN) model, the B values for the friction angle at all three nodes were determined as 1.434, 2.373 and 2.495, respectively. The fact that these values are positive (Node 1, Node 2, Node 3) indicates that the effect of the friction angle on the maximum vertical displacement is positive. That is, an increase in the angle of friction leads to an increase in the maximum vertical displacement; the higher the angle of friction, the greater



the maximum vertical displacement. For cohesion, the B values at Node 1 and Node 3 were determined as -0.038 and -4.464, respectively. These negative values indicate that the effect of cohesion on the maximum vertical displacement is negative; that is, as cohesion increases, the maximum vertical displacement decreases. However, at Node 2, the B value was determined as 1.30 and this positive value indicates that the effect of cohesion on the maximum vertical displacement is positive; i.e., as cohesion increases, the maximum vertical displacement also increases. The findings revealed that the angle of friction generally has a positive effect, but the effect of cohesion varies between nodes.

Keywords: Dam, Clay Parameter, Cohesion, Friction Angle, Displacement, Machine Learning

1. GİRİŞ

Su kaynaklarının etkin bir şekilde yönetimi, su depolama tesislerinin inşası ve sürdürülebilir su kaynaklarının korunması, günümüz mühendislik alanında önemli bir konu haline gelmiştir. Bu bağlamda barajlar, su kaynaklarını kontrol etmek, enerji üretmek, sulama sağlamak ve sel kontrolü gibi bir dizi fonksiyonu yerine getiren kritik altyapı unsurlarıdır. Ancak barajların güvenliği ve dayanıklılığı, çeşitli etkenlerin etkileşimiyle belirlenen karmaşık bir mühendislik sorunudur (Kalkan, 2012). Barajın inşa edildiği malzemenin seçimi, su basıncına, deprem etkilerine ve diğer dış kuvvetlere karşı direnç göstermesi açısından kritik bir öneme sahiptir (Taşçı, 2003). Bu noktada baraj tasarımında kullanılan malzeme parametreleri, yapının dayanıklılığı, uzun ömürlülüğü, güvenliği ve performansı üzerinde doğrudan etkili olabilir. Dayanıklı bir malzemenin seçilmesi, barajın maruz kalabileceği çeşitli doğal etkenlere karşı güçlü bir koruma sağlar. Aynı zamanda deprem etkilerine karşı malzemenin esnekliği ve dayanıklılığı, barajın deprem sırasında sağlam kalmasını destekler. Maddaha, A., Sorousha, A. ve Tabatabaie Shourijeh, P. (2014) tarafından yürütülen çalışma, barajlarda deformasyon etkisiyle ilişkilendirilen önemli bulgular ortaya koymuştur. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, malzeme seçimi ve özellikleri, barajın deformasyon karakteristiğini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır.

2. UYGULAMA

Farklı dolgu ve temel parametrelerine sahip dört baraj üzerinde, kil dolguya ait içsel sürtünme açısı ve kohezyon parametreleri değiştirilerek Rocscience-RS2 yazılımı ile gerilme-deformasyon analizi yapılmış ve baraj kretindeki maksimum düşey deplasmanlar belirlenmiştir. Dolgu barajlar için malzeme modeli olarak Mohr-Coulomb bünye modeli tercih edilmiştir. Bu model, basit ve anlaşılır yapısının yanı sıra, genel zemin davranışını birinci dereceden doğru bir yaklaşımla temsil ettiği ve oturma davranışını iyi yansıttığı için seçilmiştir.

2.1. Baraj Dolgu ve Temel Kayası Parametreleri

Analiz yapılan barajların kaya, kil dolgu ve temel kayası için Mohr-Coulomb bünye modeli parametreleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir.



Tablo 1. 1 Numaralı Baraj Kaya, Kil Dolgu ve Temel Kayası Mohr-Coulomb Bünye Modeli Parametreleri

Dolgu Malzemesi	Birim Hacim Ağırlık (γ) (kN/m ³)	Kohezyon (c) (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı ϕ' (°)	Poisson Oranı ν	E ₅₀ ^{ref} Deformasyon Modülü (MPa)
Kil Dolgu	17	154	20	0.3	40
Kaya Dolgu	26	1	43	0.3	65
Temel Kayası	27	6121	22	0.3	5632

Tablo 2. 2 Numaralı Baraj Kaya, Kil Dolgu ve Temel Kayası Mohr-Coulomb Bünye Modeli Parametreleri

Dolgu Malzemesi	Birim Hacim Ağırlık (γ) (kN/m ³)	Kohezyon (c) (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı ϕ' (°)	Poisson Oranı ν	E ₅₀ ^{ref} Deformasyon Modülü (MPa)
Kil Dolgu	18	68	12	0.3	40
Kaya Dolgu	26	1	43	0.3	65
Temel Kayası	27	1046	20	0.3	1369

Tablo 3. 3 Numaralı Baraj Kaya, Kil Dolgu ve Temel Kayası Mohr-Coulomb Bünye Modeli Parametreleri

Dolgu Malzemesi	Birim Hacim Ağırlık (γ) (kN/m ³)	Kohezyon (c) (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı ϕ' (°)	Poisson Oranı ν	E ₅₀ ^{ref} Deformasyon Modülü (MPa)
Kil Dolgu	17	107	12	0.3	40
Kaya Dolgu	24	1	43	0.3	100
Temel Kayası	27	8354	30	0.3	7509

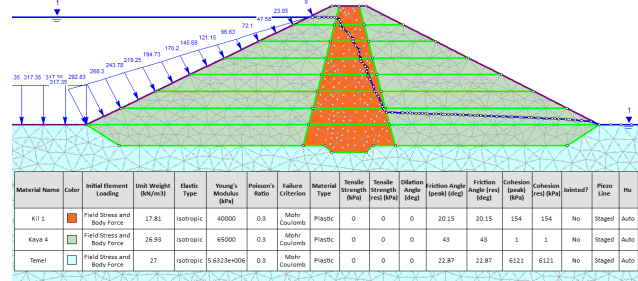
Tablo 4. 4 Numaralı Baraj Kaya, Kil Dolgu ve Temel Kayası Mohr-Coulomb Bünye Modeli Parametreleri

Dolgu Malzemesi	Birim Hacim Ağırlık (γ) (kN/m ³)	Kohezyon (c) (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı ϕ' (°)	Poisson Oranı ν	E ₅₀ ^{ref} Deformasyon Modülü (MPa)
Kil Dolgu	16	42	10	0.3	40
Kaya Dolgu	28	1	43	0.3	60
Temel Kayası	27	2623	22	0.3	4023

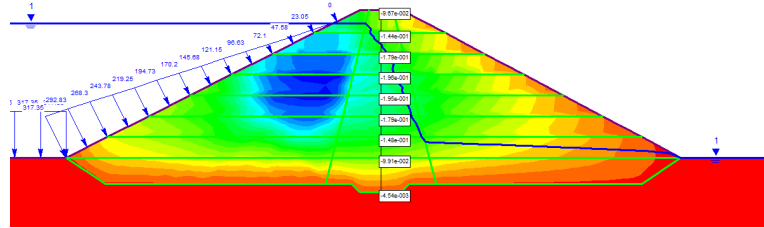
2.2. Barajlar Gerilme Deformasyon Analizleri ve Baraj Kreti Maksimum Düşey Deplasman Değerleri

Son yıllarda, sonlu elemanlar yöntemi hem teorik gelişmeler hem de uygulama alanları açısından büyük ilerlemeler kaydetmiştir. Sonlu elemanlar programı olan Rocscience RS2, geoteknik mühendisliği problemlerinin nümerik analizi için geliştirilmiş bir yazılımdır. Bu program; projelerin tasarımında ihtiyaç duyulan deformasyon ve stabilite analizleri, zemin-yapı etkileşimi, gerilme-şekil değiştirme, yükleme durumları, konsolidasyon, taşıma gücü, akım ağı, zemin dinamiği gibi konularda ve malzeme çeşitliliği içeren durumlarda kullanılmakta olup, neredeyse gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada, merkezi kil çekirdekli kaya dolgu barajların karakteristikleri dikkate alınarak, barajların gerilme ve deformasyonları RS2 programı yardımıyla analiz edilmiştir. Barajların geometrileri, karakteristik özelliklerine bağlı olarak modellenmiştir. Kil malzemeye ait içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri değiştirilerek barajda meydana gelen deplasmanlar

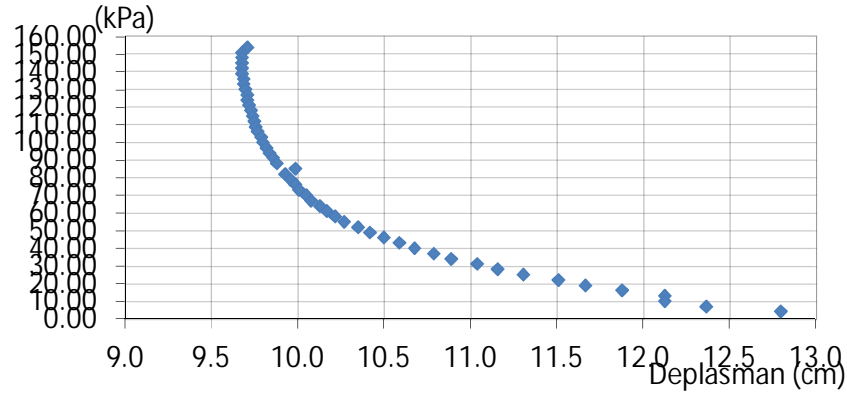
hesaplanmıştır. Analiz yapılan barajlara ait Rocscience RS2 gerilme-deformasyon analizi modeli Şekil 1'de gösterilmektedir. Rocscience RS2 yazılımı ile kil dolgunun kohezyon ve içsel sürtünme açısındaki değişimlere göre yapılan gerilme-deformasyon analizi sonucunda, barajların kretinde meydana gelen maksimum düşey deplasman değerleri, örnek olarak 1. Baraj için Şekil 3 ve 4'te verilmiştir. Toplam dört baraj için analizler yapılmış ve aynı değerler elde edilmiştir. Düşey deplasman hesabı için, Şekil 1'de gösterildiği üzere RS2 yazılımında gerçek baraj boyutlarına göre bir kesit modellenmiş, model oluşturulduktan sonra malzeme parametreleri yazılımda tanımlanmıştır.



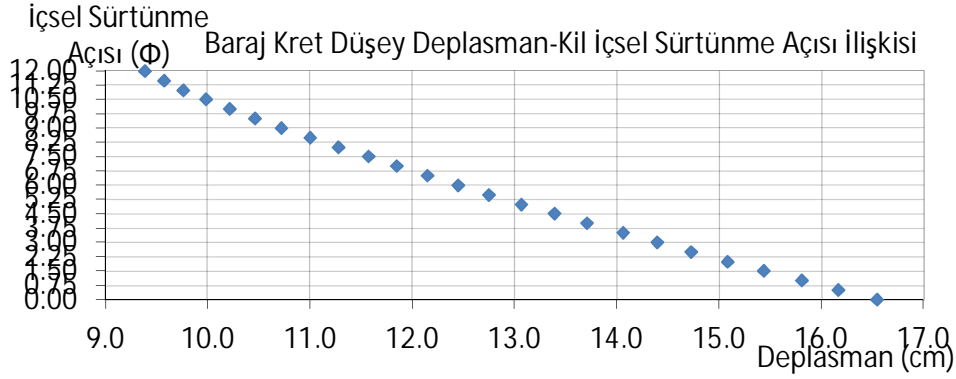
Şekil 1. Baraj Rocscience Rs2 Gerilme Deformasyon Analizi Modeli ve Malzeme Parametreleri Şekil 3 ve 4'te belirtildiği üzere Kil dolgu için kohezyon, içsel sürtünme açısı değerleri arazi deneylerinden elde edilen değer ile başlanılmış ve belli oranlarda azaltılarak yazılımda deformasyon analizi yapılmıştır. Örnek olarak 154kpa kil dolgu kohezyon, 12° içsel sürtünme açısı değeri için deformasyon analizi Şekil-2'de verilmiştir.



Şekil 2. Baraj Rocscience Rs2 Gerilme Deformasyon Analizi
Kohezyon (c)Baraj Kret Düşey Deplasman-Kil Dolgu Kohezyon İlişkisi



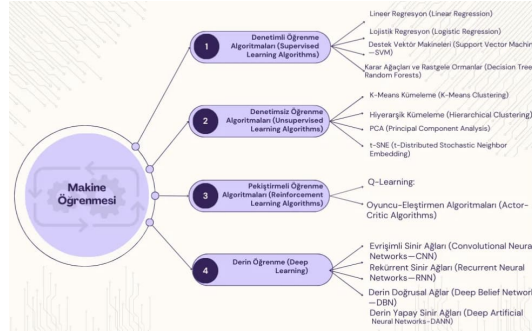
Şekil 3. Baraj Kil Dolgu Kohezyon-Baraj Kret Maksimum Düşey Deplasman ilişkisi



Şekil 4. Baraj Kil Dolgu İçsel Sürtünme Açısı-Baraj Kret Maksimum Düşey Deplasman ilişkisi

3. MAKİNE ÖĞRENMESİ

Makine öğrenmesi, veri kümelerinden daha önce fark edilmemiş yapıları ve desenleri ortaya çıkarmak amacıyla kullanılan otomatik süreçler olarak tanımlanabilir (Kelleher, Namee ve D'Arcy, 2015). Makine öğrenmesi algoritmaları Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Bu çalışmada çoklu doğrusal regresyon, karar ağacı ve yapay sinir ağları algoritmaları makine öğrenmesi sürecinde kullanılmıştır. Gerilme-Deformasyon analizi ile elde edilen kil kohezyon-içsel sürtünme açısına karşılık gelen maksimum düşey deplasman değerleri makine öğrenmesi yöntemiyle veri olarak kabul edilmiş ve bu değişimlerin analizi yapılmıştır.

3.1 Çoklu Regresyon

Bir regresyon modelinde birden fazla açıklayıcı değişken bulunması durumunda, bu modele çoklu doğrusal regresyon adı verilmektedir (Kalaycı, 2018). Çoklu doğrusal regresyon modelinde, standardize olmayan regresyon katsayısı (B), bağımsız değişkenin orijinal ölçü biriminde bağımlı değişken üzerindeki doğrudan etkisini gösterir. Bağımsız değişkenin bir birimlik değişiminin, bağımlı değişkende ne kadar değişikliğe yol açtığını açıklar. Standart hata (Std. Hata), regresyon katsayısının tahminindeki belirsizliği ölçer ve tahminin ne kadar

kesin olduğunu gösterir. Standardize regresyon katsayısı (β), değişkenlerin etkilerini standart sapma birimleri cinsinden ifade eden katsayıdır. Bu katsayı, değişkenlerin farklı ölçeklerde olmasından kaynaklanan etkileri normalize ederek karşılaştırma yapmayı sağlar. R^2 , modelin uyumunu gösteren bir ölçüdür ve bağımlı değişkenin toplam varyansının ne kadarının bağımsız değişkenler tarafından açıklandığını ifade eder. p-değeri, çoklu doğrusal regresyonda, modelin bağımsız değişkenlerinin etkilerini değerlendirirken kullanılan kritik bir metriktir. Bağımsız değişkenlerin, bağımlı değişken üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için kullanılır (Kalaycı, 2018)

Tablo 5. İçsel sürtünme açısı ve kohezyonun maksimum düşey deplasmana etkisinin çoklu doğrusal regresyonla analizi

Özellik	B	Std Hata	β	p
Sabit	11.920	1.692		.000
İçsel Sürtünme Açısı	-2.235	.367	1.218	.000
Kohezyon	.301	.054	1.125	.000
R ² = 0.248 +/- 0.139				

İçsel Sürtünme açısı için B değeri negatif (-2.235) olduğu için içsel sürtünme açısının maksimum düşey deplasmana etkisi ters yönlüdür. Buna göre içsel sürtünme açısındaki bir birimlik artış maksimum düşey deplasmanda azalmaya neden olmaktadır (B=-2.235; p<.01). Kohezyonun için B değeri pozitif olduğu için (0.301) maksimum düşey deplasmana etkisi pozitifdir. Yani kohezyon arttıkça, maksimum düşey deplasman artmaktadır (B= .30; p <.01). p değeri < 0.01 olduğu için tabloda iki değerinde anlamlıdır. İçsel sürtünme açısı ve kohezyon, maksimum düşey deplasmandaki değişiminin %25 ($R^2=0.248$)'ini açıklayabilmektedir. (Tablo 6).

3.2 Karar Ağacı Bulguları

Bu başlık altında, karar ağacının uygulanması sonucu elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Karar ağacı modeli, Rapidminer programı aracılığıyla oluşturulmuştur. Rapidminer, Dortmund Teknoloji Üniversitesi Yapay Zekâ biriminde geliştirilmiş bir veri madenciliği yazılımıdır. Veri madenciliği sürecinin tüm aşamaları Rapidminer tarafından desteklenmektedir; bu nedenle veri hazırlama, sonuçları görselleştirme, doğrulama ve optimizasyon gibi amaçlar için kullanılabilir.

İçsel Sürtünme Açısının Rolü: İçsel sürtünme açısı, maksimum düşey deplasmanı belirleyen en kritik faktör olarak ortaya çıkmıştır. İçsel sürtünme açısı arttıkça, farklı kohezyon seviyelerine bağlı olarak maksimum düşey deplasmanın nasıl değiştiği ayrıntılı şekilde açıklanmıştır.

Kohezyonun Etkisi: Kohezyon, içsel sürtünme açısının belirsiz olduğu ya da belirli bir değer altında veya üstünde olduğu durumlarda maksimum düşey deplasman üzerinde belirgin bir etki göstermektedir. Bu bulgu, farklı kohezyon seviyelerinin maksimum düşey deplasmanı nasıl etkilediğini anlamak açısından önemlidir.

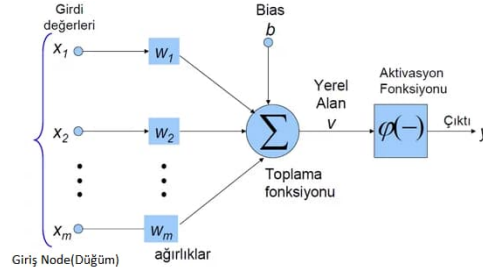
Kompleks İlişkiler: Karar ağacı modeli, içsel sürtünme açısı ve kohezyon arasındaki kompleks etkileşimleri detaylandırarak, bu iki faktörün maksimum düşey deplasman



üzerindeki etkilerini daha net bir şekilde görmemizi sağlamaktadır. Örneğin, belirli bir içsel sürtünme açısı aralığında, kohezyonun etkisinin nasıl değiştiği ve bunun sonucunda maksimum düşey deplasmanın nasıl etkilendiği açıklanmaktadır.

3.3 Yapay Sinir Ağları Bulguları

Rapidminer programı kullanılarak yapay sinir ağları modeli geliştirilmiştir. Yapay sinir ağlarında (Neural Networks) 'node' ya da düğümler, sistemin temel bileşenleridir. Bu düğümler, biyolojik sinir sistemindeki nöronları taklit ederek bilgiyi işlerler. Her bir düğüm, girdi verilerini alır, bir hesaplama yapar ve bir çıktı üretir. Bu çıktı, diğer düğümlere veya ağın son katmanına aktarılır. Bias, yapay sinir ağlarında her bir düğüme eklenen sabit bir terimdir ve girdilerin ağırlıklı toplamına eklenir. Bias, modelin esnekliğini artırarak doğrusal olmayan ilişkileri daha iyi öğrenmesine yardımcı olur. Bias terimleri, modelin öğrenme sürecinde optimize edilerek modelin çıktısını ayarlamak ve doğruluğunu artırmak amacıyla kullanılır.



Şekil 6. Yapay Sinir ağları

Node 1 bulgularına göre, içsel sürtünme açısının maksimum düşey deplasman üzerindeki etkisi pozitifken, kohezyonun etkisi negatiftir. Node 2 bulgularına göre, her iki değişkenin de etkisi pozitifdir. Node 3 bulgularına göre ise, içsel sürtünme açısının etkisi pozitif, kohezyonun etkisi negatiftir (Tablo 7).

Tablo 6. içsel sürtünme açısı ve kohezyonun maksimum düşey deplasmana etkisinin çoklu doğrusal regresyonla analizi

Node	Özellik	B
Node 1	İçsel Sürtünme Açısı	1.434
	Kohezyon	-0.038
	Bias:	-1.247
Node 2	İçsel Sürtünme Açısı	2.373
	Kohezyon	1.300
	Bias:	-0.825
Node 3	İçsel Sürtünme Açısı	2.495
	Kohezyon	-4.464
	Bias:	-1.825
R2= 0.325 +/- 0.150		

İçsel Sürtünme Açısının Rolü:

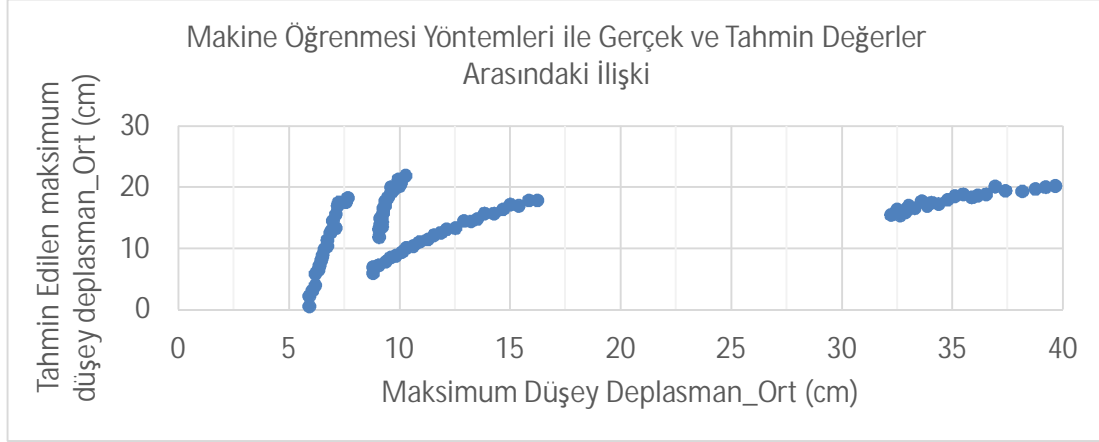
Tablo 7'de belirtildiği üzere Her üç düğümden de B değeri içsel sürtünme açısı için sırasıyla 1.434, 2.373, 2.495 olarak belirlenmiş bu değerler pozitif olduğu için (Node 1, Node 2, Node

3) içsel sürtünme açısının maksimum düşey deplasman üzerindeki etkisi pozitifdir. Bu, içsel sürtünme açısındaki artışın, maksimum düşey deplasman üzerinde artışa neden olduğunu gösterir. Yani, içsel sürtünme açısı ne kadar yüksekse, maksimum düşey deplasman da o kadar büyük olur.

Kohezyonun Rolü:

Tablo 7'de belirtildiği üzere Node 1 ve Node 3'te, B değeri sırasıyla-0.038,-4.464 olarak belirlenmiştir. Bu değerler negatif olduğu için Kohezyonun maksimum düşey deplasman üzerindeki etkisi negatiftir. Kohezyon arttıkça maksimum düşey deplasmanın azaldığını gösterir.

Node 2'de B değeri 1,30 olarak belirlenmiştir. Bu değer pozitif olduğu için kohezyonun etkisi pozitifdir, yani kohezyon arttıkça maksimum düşey deplasman da artar.



Şekil 7. Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Gerçek ve Tahmini Değerler Arasındaki ilişki

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kil çekirdekli kaya dolgu barajlarda içsel sürtünme açısı ve kohezyonun maksimum düşey deplasman üzerindeki etkileri, çoklu doğrusal regresyon, karar ağaçları ve yapay sinir ağları (YSA) modelleri kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, her bir metodolojinin sağladığı farklı bakış açılarıyla değerlendirilmiştir. Çoklu Doğrusal Regresyon Sonuçları: Çoklu doğrusal regresyon analizi, içsel sürtünme açısının maksimum düşey deplasman üzerindeki etkisinin ters yönlü olduğunu göstermiştir. İçsel sürtünme açısındaki bir birimlik artış, maksimum düşey deplasmanda azalmaya neden olmaktadır. Bu durum, baraj yapısının daha fazla içsel sürtünme açısına sahip malzemeler kullanıldığında daha az düşey deplasman yaşayacağını göstermektedir. Kohezyonun maksimum düşey deplasman üzerindeki etkisi ise pozitifdir; yani kohezyon arttıkça maksimum düşey deplasman da artmaktadır. Bu sonuçlar, içsel sürtünme açısı ve kohezyonun maksimum düşey deplasman üzerindeki etkilerinin anlaşılması ve değerlendirilmesi açısından önemlidir. Karar Ağacı Sonuçları: Karar ağacı analizi, maksimum düşey deplasmanı etkileyen en önemli faktörün içsel sürtünme açısı olduğunu ortaya koymuştur. İçsel sürtünme açısının belirsiz olduğu durumlarda, kohezyonun belirli eşik değerlerinin üzerinde veya altında olması, maksimum düşey deplasman değerlerinde anlamlı değişikliklere yol açmaktadır. Bu sonuçlar, içsel sürtünme açısı ve kohezyon arasındaki karmaşık etkileşimlerin anlaşılması için önemli bilgiler sağlamaktadır ve baraj tasarımında kullanılabilir. Yapay Sinir Ağları Sonuçları: YSA modeli, içsel sürtünme açısı ve

kohezyonun maksimum düşey deplasman üzerindeki etkilerini düğüm bazında analiz etmiştir. Bulgular, içsel sürtünme açısının genellikle pozitif etkili olduğunu, ancak kohezyonun etkisinin düğümler arasında değişiklik gösterdiğini ortaya koymuştur. YSA modelinin genel performansı, maksimum düşey deplasmanın tahmininde orta düzeyde başarı göstermiştir. Genel olarak, bu çalışma, kil çekirdekli kaya dolgu barajların tasarımında ve performans değerlendirmesinde içsel sürtünme açısı ve kohezyonun kritik rollerini ortaya koymaktadır. Çoklu doğrusal regresyon, karar ağaçları ve yapay sinir ağları gibi farklı analiz yöntemlerinin kullanılması, bu iki önemli parametrenin maksimum düşey deplasman üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, baraj tasarımında kullanılacak pratik öneriler sunmakta ve gelecekteki araştırmalar için değerli bir temel oluşturmaktadır. Bu çalışma hem akademik literatüre hem de mühendislik uygulamalarına önemli katkılar sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

Kalaycı, Ş. (2018). SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri, 8. Baskı. Dinamik Akademi, Ankara.

Kalkan, Y. (2012). Geodetic deformation monitoring of Atatürk dam in Turkey, Arabian Journal of Geosciences, DOI 10.1007/s12517-012-0765-5.

Taşçı, L. (2003). Kaya Dolgu Barajlarda Deformasyonların GPS yöntemi ile Belirlenmesi (Doktora tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalı.

(Kelleher, Namee ve D'Arcy, 2015) Fundamentals of Machine Learning for Predictive Data Analytics, MIT Press

Maddaha, A., Sorousha, A., & Tabatabaie Shourijeh, P. (2014). Effects of material properties on behavior of embankment dam clay cores in narrow valleys. Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran; Department of Earth Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama
γ	Birim Hacim Ağırlık
c	Kohezyon
B	Standardize Olmayan Regresyon Katsayısı
p	Bağımsız Değişkenlerin Etkileri
•	Derece
ν	Poisson Oranı
β	Standartize Regresyon Katsayısı
R	Regresyon Sayısı

