



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Kil çekirdekli dolgu barajlarda kararlı durum sızmasının olasılıksal analizi

## *Probabilistic steady-state seepage analysis of clay core embankment dams*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Arife GÜNAY<sup>1</sup>, Sami Oğuzhan AKBAŞ<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-3116-0408

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-7872-1604

**To cite to this article:** Günay A. ve Akbaş S. O., “Kil çekirdekli dolgu barajlarda kararlı durum sızmasının olasılıksal analizi”, *Journal of Polytechnic*, 28(1): 167-176, (2025).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Günay A. ve Akbaş S. O., “Kil çekirdekli dolgu barajlarda kararlı durum sızmasının olasılıksal analizi”, *Politeknik Dergisi*, 28(1): 167-176, (2025).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.1418676

# Kil Çekirdekli Dolgu Barajlarda Kararlı Durum Sızmasının Olasılıksal Analizi

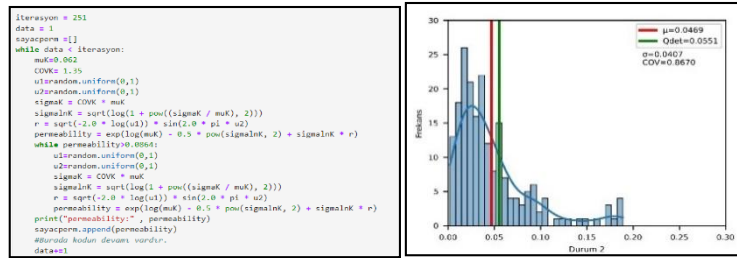
## Probabilistic Steady-State Seepage Analysis of Clay Core Embankment Dams

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Kil çekirdekli barajlarda permeabilitedeki değişkenliğin sızma üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. / The effect of variability in permeability on seepage in clay-cored dams was analysed.
- ❖ Permeabilite tüm çekirdek için log-normal dağılımlı rastgele değişken olarak modellenmiştir. / Permeability of the core was modeled as a log-normally distributed random variable.
- ❖ Genellikle olasılıksal analizle deterministik yöntemle göre daha düşük sızma değerleri elde edilmiştir. / Generally, probabilistic analyses yielded lower seepage values compared to those obtained deterministically.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Permeabilite değeri için Python'da MCS ile log-normal dağılıma uyan rastgele değişkenler üretilerek bu özellikteki belirsizliklerin dolgu barajlardaki sızmanın üzerindeki etkisi araştırılmıştır. / For the permeability value, random variables fitting the log-normal distribution were generated with MCS in Python and the effect of uncertainties in this property on seepage in embankment dams was investigated.



Şekil. Python kod parçası, Sonuç histogramı / Figure. Python codes part, Results histogram

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada permeabilitedeki değişkenliğin sızma üzerine etkisini araştırmak amaçlanmıştır. / The aim of this study is to investigate the effect of variability in permeability on seepage.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Rastgele sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve permeabilite için bir log normal dağılım kullanılmıştır. / Random finite element method was used and a log normal distribution was used for permeability.

### Özgünlük (Originality)

Farklı çekirdek geometrileri ve ortalama değerlerinde olasılıksal analizlerin yapılması ve sonuçların birbirleriyle ve deterministik yöntem sonucu ile karşılaştırılması / Probabilistic analyses for different core geometries and mean values and comparison of the results with each other and with the results of the deterministic method.

### Bulgular (Findings)

Genellikle, olasılıksal analiz ile elde edilen sızma sonuçları deterministik analiz sonuçlarından farklı oranlarda daha düşüktür. / Generally, seepage obtained by the probabilistic analyses are lower than those obtained by the deterministic analyses at various rates.

### Sonuç (Conclusion)

Sızma konusunda baraj tasarım aşamasında olasılıksal analizler kullanılmalıdır. / Probabilistic analyses should be used at the dam design stage for seepage.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission

# Kil Çekirdekli Dolgu Barajlarda Kararlı Durum Sızmasının Olasılıksal Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Arife GÜNAY<sup>1\*</sup>, Sami Oğuzhan AKBAS<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 12.01.2024 ; Kabul/Accepted : 31.05.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 27.06.2024)

## ÖZ

Dolgu barajlarda suyun barajın memba kısmından mansap kısmına doğru sürekli ve engellenemeyen hareketi sızma olarak tanımlanır. Tasarım aşamasında bu hareketin belirli bir mertebenin altında tutulması hedeflenir. Bu hedef doğrultusunda sızmanın doğru tahmin edilebilmesi için konu üzerinde çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma yapılmıştır. Son yıllarda, hesaplardaki belirsizliklerin azaltılması amacı ile zemindeki değişkenliklerin de dikkate alındığı ve sonlu elemanlar yönteminin sıklıkla kullanıldığı olasılıksal analizler de gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Bu kapsamda, mevcut çalışmada kil çekirdek malzemesinin permeabilite değerindeki belirsizlikler göz önünde bulundurularak sonlu elemanlar yöntemi ile olasılıksal sızma analizleri yapılmıştır. Bu analizler, farklı şev eğimlerine sahip iki adet kil çekirdekli dolgu baraja uygulanmıştır. Öncelikle, kil çekirdeği oluşturan zemine ait permeabilite değerlerinin istatistiksel parametreleri belirlenmiş, Monte Carlo simülasyonları ile üretilen permeabilite PLAXIS 2D programında yapılan sızma analizlerinin girdileri olarak kullanılmıştır. Aynı ortalama değerinde elde edilen iki modele ait sonuçlar birbirleriyle ve deterministik olarak elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Analiz sonuçları, olasılıksal analizle deterministik yöntemle göre daha düşük sızma değerleri elde edildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca zemin parametrelerine ait kabul edilen olasılıksal dağılım özelliklerinin sonuçlar üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Dolgu barajlar, kararlı sızma analizi, Monte Carlo simülasyonu, Permeabilite.

# Probabilistic Steady-State Seepage Analysis of Clay Core Embankment Dams

## ABSTRACT

Seepage in embankment dams is defined as the continuous and uncontrollable movement of water from the upstream to the downstream side of the dam. During design phase, it is aimed to keep this movement below a certain threshold. For this aim, numerous experimental and numerical studies have been conducted to accurately predict seepage. In recent years, probabilistic analyses incorporating variations in soil properties have been increasingly employed, particularly with the aim of reducing uncertainties in calculations. Finite element methods are frequently employed in these probabilistic analyses. In this study, probabilistic seepage analyses were conducted using the finite element method, considering uncertainties in the permeability values of the core material. Two hypothetical embankment dams with different core slopes were designed for the study. Initially, the statistical parameters of permeability values for the clay core were determined, and permeabilities generated through Monte Carlo simulations were employed as inputs for PLAXIS 2D analyses. Results from both models with the same mean permeability were compared with each other and with the deterministically obtained results. Generally, the study reveals lower seepage values through probabilistic analysis compared to those obtained with deterministic methods. Furthermore, the impact of the assumed probabilistic distribution parameters of the soil variability on the final outcome was explicitly illustrated.

**Keywords:** Embankment dams, Monte Carlo simulation, Permeability, Steady-state seepage analysis.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dolgu barajlarda sızmanın kabul edilebilir sınırlar içinde tutulması, baraj tasarımının temel amaçlarından biridir. Bunu sağlamak için zonlu dolgu olarak sınıflandırılan barajların çekirdek bölümlerinde sızma miktarını kontrol altında tutmak amacıyla düşük permeabiliteye ( $k$ ) sahip zeminler kullanılmaktadır. Ancak çekirdeği oluşturan zeminin doğasındaki kaçınılmaz değişkenlik nedeniyle, bu malzemenin özellikleri performans üzerinde belirsizliklere yol açar [1, 2]. Bu belirsizlikler, deterministik sızma analizlerinin sahadaki ölçülen sızma miktarından farklı sonuçlar üretebileceği anlamına gelir. Bu nedenle, dolgu barajlarda sızma analizleri için

genellikle belirsizlikleri de dikkate alan olasılıksal analizler daha uygun bir yaklaşım sunar. Bu bağlamda, yapılan çalışmada dolgu barajların çekirdek bölümünde kullanılan kile ait doygun permeabilitenin ( $k_s$ ) değişkenliğinin kararlı durum koşulları altında toplam sızma debisi ( $Q$ ) üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında,  $k_s$  için literatürden uygun dağılım parametreleri seçilmiş, olasılık dağılımının ortalama değerinin ( $\mu$ )  $Q$  üzerindeki etkisini incelemek amacıyla  $\mu$  değerinin kendisi, 10 kat azaltılmış hali ve 100 kat azaltılmış hali ile analizler gerçekleştirilmiştir.  $k_s$  değerindeki değişkenlikle birlikte, çekirdek geometrisinin sızma üzerindeki etkisini araştırmak için,

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : arifegunay@ktu.edu.tr

çekirdek eğimleri 2:1 ve 3:1 olan iki farklı model analize tabi tutularak sonuçlar irdelenmiştir.

## 2. DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULARI (PREVIOUS STUDIES AND THEIR FINDINGS)

Fenton vd. [3], zeminin permeabilite ( $k$ ) değerinin değişkenliğini log-normal dağılım fonksiyonu kullanarak modelledikleri Monte Carlo (MC) simülasyonlarıyla, sızma debisinin ortalama ile ilişkilendiğini, yani akım hızı varyansının küçük olduğunu, ayrıca permeabilitenin standart sapması arttıkça ortalama sızmanın hızlı biçimde azaldığını ortaya koymuşlardır. Ahmed [4], dolgu barajlardaki sızmayı olasılıksal analiz ile inceleyerek  $k$  değişkenini log-normal dağılıma tabi tutmuş ve rastgele alan teoremi kullanarak bir hidrolik yapı altındaki sınırlandırılmış akımı modellemiştir. Çalışma sonuçlarında sızma miktarının tüm varyasyon katsayısı (COV) ve dalgalanma ölçeği ( $\Theta$ ) değerlerinde deterministik yöntemlerle hesap edilenden daha az olduğu belirlenmiştir. Srivastava vd. [5], tipik bir toprak şev geometrisindeki  $k$  değerini log-normal dağılımlı ve mekansal ilişkili rastgele bir değişken olarak ele alarak, bu rastgele değişkenin kararlı durumdaki sızma akışı üzerindeki ve kararlı sızma olan koşullarda şev stabilitesi problemlerindeki etkisini araştırmışlardır. Korelasyon mesafesi arttıkça ortalama sızmanın da arttığı sonucuna varmışlardır. Cho [6], rastgele sonlu elemanlar yöntemini (RFEM) kullanmış ve  $k$ 'nın mekansal değişkenliğini göz önünde bulundurarak temel zemini üzerindeki bir dolgudaki sızmanın olasılıksal olarak analizini gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda olasılıksal yaklaşımın, toprak temel üzerindeki bir dolgudaki sızma değerlendirmesinde  $k$ 'nın mekansal değişkenliğinin neden olduğu çeşitli akış modellerini verimli bir şekilde dikkate almak için kullanılabileceği gösterilmiştir. Le vd. [7] tarafından yapılan çalışmada heterojen malzeme özelliklerinden porozite ve  $k$  rastgele değişken olarak seçilmiş ve MC simülasyonu ile sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Kararlı duruma ulaşma zamanının ve toplam akımın standart sapmasının, porozitenin standart sapmasının ve korelasyon uzunluğunun artması ile artma eğiliminde olduğu ifade edilmiştir. Çalamak [1], zemin değişkenliğinin dolgu barajlardaki sızma üzerine etkisini hidrolik iletkenlik ve Van Genuchten parametrelerinin rastgele değişken olarak alındığı bir çalışma ile incelemiştir. Çalışmada varsayımsal olarak hazırlanan biri zonlu diğerleri homojen toplamda üç baraj modellemiştir. Elde edilen sonuçlarda sızma üzerinde hidrolik iletkenliğin değişkenliğinin etkisinin önemli olduğu, diğer parametrelerdeki değişkenliklerin etkisinin ise ihmal edilir düzeyde yer aldığı görülmüştür. Tan vd. [8] çalışmalarında hidrolik parametrelerin değişkenliğinin toprak dolgu barajlardaki akış üzerindeki etkisini araştırmak için, doymuş-doymamış sızmayı MC simülasyonu ve rastgele alan teorisini birleştirerek sayısal olarak simüle etmişlerdir. Duyarlılık analizleri sonucunda, zemin-su ilişkisi karakteristiği eğrisi

(SWCC) parametresi  $n$  ve  $k_s$  varyasyon katsayılarının sızma debisi üzerinde SWCC parametresi  $a$ 'ninkinden daha büyük bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Mouyeaux vd. [9] bir toprak dolgu baraj için boşluk suyu basıncının mekansal değişkenliğini simüle etmek için RFEM kullanmıştır.  $k$ 'nın mekansal değişkenliğinin gözenek suyu basıncı üzerindeki etkisi MC simülasyonlar kullanılarak incelenmiştir. Siacara vd. [10],  $k_s$ , içsel sürtünme açısı ve kohezyonu rastgele değişkenler kabul ederek dolgu barajların rezervuarlarında hızlı bir düşüş olması durumunda güvenilirlik analizlerini gerçekleştirmiş ve hidrolik iletkenliğin güvenlik faktörü üzerindeki etkisinin kohezyon ve içsel sürtünme açısına kıyasla daha büyük olduğunu ortaya çıkartmışlardır. Salmasi vd. [11], çalışmalarında sızma ve hidrolik eğimleri simüle etmek için sayısal modeller kullanarak eğimli ve dik çekirdeklerin performansı karşılaştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucu, dik çekirdeklerdeki sızmanın, eğimli çekirdeklerdeki sızmaya göre daha az olduğunu göstermektedir. Kalateh vd. [12], toprak ve kaya dolgu barajlarda sızma analizinin farklı yönlerini ele alan, olasılıksal olarak geliştirilmiş yöntemleri vurgulayan kapsamlı bir literatür taraması sunmuşlardır. Yapılan bu çalışmada  $k$  değerinin analizlerde sıklıkla kullanılan bir parametre olduğu ortaya konulmuş ve bu parametreye ait COV değerlerinin aralığı karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca MC simülasyonun en sık kullanılan olasılıksal yöntemlerden biri olduğu çalışmada vurgulanmıştır.

Önceki çalışmalar incelendiğinde, sabit ortalamaya sahip bir permeabilite katsayısı kullanılarak, genellikle homojen barajlardaki kararlı durum sızıntı analizlerine odaklanıldığı veya barajların altındaki sızmanın incelendiği görülmektedir. Bu noktalardan hareket ile, mevcut çalışma ise zonlu barajlarda çekirdek geometrisinin  $Q$  üzerine etkisiyle ilgili yapılan özellikle olasılıksal çalışmaların yetersizliği göz önünde bulundurularak ve farklı permeabilite ortalamalarının sızma üzerinde etkisini araştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

## 3. UYGULAMA BARAJLARI (APPLICATION DAMS)

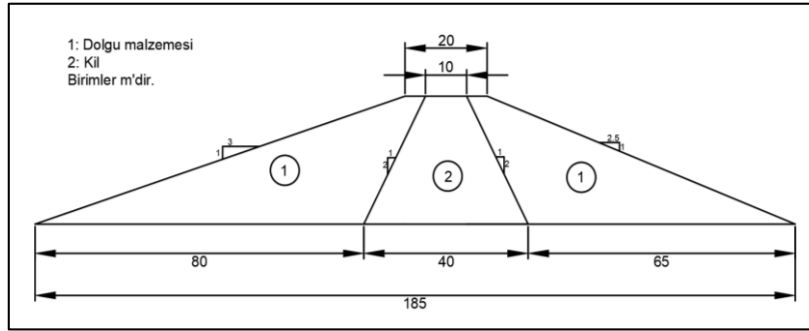
Hesaplamalar için Birleşik Devletler İstimlak Bürosu (USBR) [13], kurallarına uygun olarak kil çekirdek eğimleri farklı olan iki adet dolgu baraj kullanılmıştır. Uygulanan tasarım kriterleri Çizelge 1'de verilmektedir. Oluşturulan barajların geometrileri Şekil 1 ve 2' de verilmektedir. Her iki barajın taban uzunluğu 185 m ve yüksekliği 30 m'dir. Birinci modelde çekirdek 40 m taban genişliğine sahiptir ve her iki yönde eğimleri 2:1'dir. İkinci modelde ise çekirdek 28 m taban genişliğine sahiptir ve eğimleri 3:1'dir. Her iki modelde de su seviyesi sabit ve 24 m olarak alınmıştır. Yapılan baraj tasarımlarında genellikle dolgu zonu farklı permeabilite değerlerine sahip birkaç katmandan oluşmaktadır. Ancak bu çalışmada her iki modelde de dolgu zonu tek bir katman olarak alınmış ve yüksek bir permeabilite değeri

atanmıştır. Bu şekilde sızma problemi için en olumsuz durumlardan biri ele alınmış olmaktadır. Ayrıca dolgu zonunun her iki modelde de aynı alınması, iki model sonuçlarının karşılaştırıldığı bu çalışmada herhangi bir soruna sebep olmamaktadır.

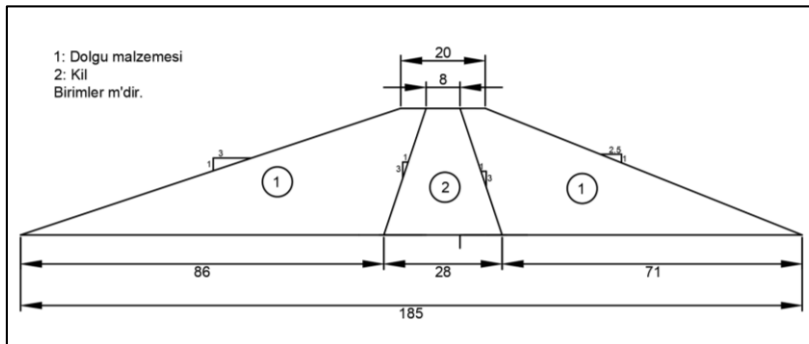
Dolgu zonunun tek bir katman olarak alındığı durumlar literatürde mevcuttur. Calamak (2014) çalışmasında tasarladığı zonlu barajda tek dolgu katmanını kullanmıştır.

**Çizelge 1.** USBR kriterleri (USBR criteria)

Baraj tipi	USBR Kriterleri 1	USBR Kriterleri 2	Model 1	Model 2
Baraj tipi	Minimum çekidekli toprak dolgu baraj	Maksimum çekidekli toprak dolgu baraj	Çekirdek geometrisi maksimum ve minimum değerler arasındadır.	Çekirdek geometrisi maksimum ve minimum değerler arasındadır.
Amacı	Amaç sınırlandırılmamış (Any).	Taşkın koruma veya depolama	Belirtilmiyor.	Belirtilmiyor.
Ani düşmeye maruz kalma durumu	Kritik değil	Hayır	Hayır	Hayır
Dolgu malzemesi	GW, GP, SW, SP	GW, GP, SW, SP	Belirtilmiyor.	Belirtilmiyor.
Memba şev eğimi	2:1	2:1, 2.25:1, 2.5:1, 3:1	3:1	3:1
Mansap şev eğimi	2:1	2:1, 2.25:1, 2.5:1, 3:1	2.5:1	2.5:1



**Şekil 1.** Birinci uygulama barajının enkesiti (Cross-section of the first application dam)



**Şekil 2.** İkinci uygulama barajının enkesiti (Cross-section of the second application dam)

#### 4. YÖNTEM (METHODOLOGY)

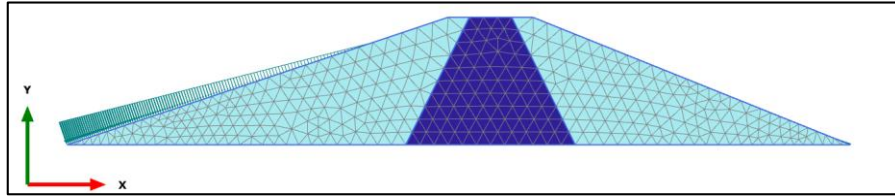
##### 4.1. Sonlu Elemanlar Modellemesi (Finite Element Modelling)

Kararlı durum sızma analizleri PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda Mohr-Coulomb modeli ve "sadece akış" yöntemi seçilmiştir. Doymamış bölgedeki akış için, PLAXIS 2D'de mevcut olan uluslararası bir zemin sınıflandırma sistemi olan Hypres serisi ve SWCC için Van Genuchten modeli

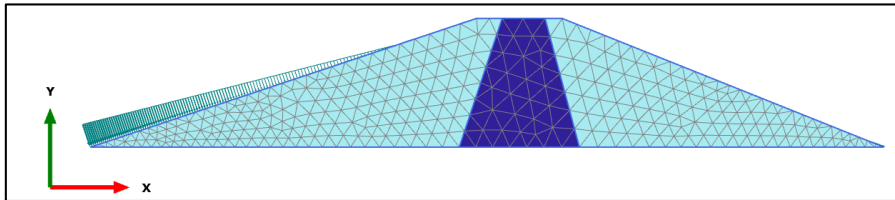
kullanılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, bu çalışmada iki farklı uygulama barajı modeli oluşturulmuştur. Uygulama barajının sonlu elemanlar modelleri sırasıyla Şekil 3 ve 4'te gösterilmektedir. İlk model 5927 düğüm noktası ve 757 elemandan oluşmaktadır. Göreceli eleman boyutu 0.333 olacak şekilde ağ örgüsü yapılmıştır. Alt sınır akışa tamamen kapatılmıştır. Memba ve mansap dolgusunda ve çekirdekte kullanılan malzeme özellikleri PLAXIS 2D

Referans Kılavuzundan (2022) alınmıştır ve Çizelge 2'de sunulmaktadır [14]. Olasılıksal analizlere başlanmadan önce modellerin deformasyon kontrolü deterministik olarak “tamamen birleştirilmiş akış deformasyonu” hesaplama yöntemiyle yapılmıştır. Deterministik analizden sonra, çekirdekte kullanılan kilin  $k_s$  değerindeki belirsizliğin sızma miktarı üzerindeki etkisini araştırmak için olasılıksal analizler gerçekleştirilmiştir. Olasılıksal analizlerde çeşitli problemlerde sıklıkla tercih edilen MC

simülasyonları kullanılmıştır [15, 16]. Bu çalışmada stokastik analizlerde, MC simülasyonlarını yürütmek amacıyla PLAXIS 2D'ye gömülü olarak bulunan Python yazılımı kullanılmıştır [17]. PLAXIS 2D v14 ile veri girişini mümkün kılmak için kullanıcılara bir Python komut dosyası etkileşim arayüzü sağlanmıştır. Bu arayüz, 2017 ve sonraki sürümlerde gömülü program araçlarından biridir [18, 19]. PLAXIS ve Python arasındaki bağlantı Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Birinci modelin ağ sistemi (Mesh system of the first model)



Şekil 4. İkinci modelin ağ sistemi (Mesh system of the second model)

Çizelge 2. Uygulama barajının malzeme özellikleri (Material properties of application dam)

Parametre	Çekirdek	Dolgu	Birim
Zemin modeli	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	-
Drenaj tipi	Drenajsız(B)	Drenajlı	-
$\gamma$	18	20	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{unsat}$	16	16	kN/m <sup>3</sup>
Yeraltı suyu sınıflandırma tipi	Hypres	Hypres	-
$k_x$	$10^{-4}$	1	m/gün
$k_y$	$10^{-4}$	1	m/gün
$E_{ref}$	1,500	20,000	kN/m <sup>2</sup>
$C_{ref}$	-	5	kN/m <sup>2</sup>
$S_{u,ref}$	5	-	kN/m <sup>2</sup>
$E'_{inc}$	300	-	kN/m <sup>2</sup> /m
SWCC uygunluk modeli	Van Genuchten	Van Genuchten	-

```

In [1]: import imp
        from math import pi
        import time
        from math import log
        from math import sqrt
        from math import exp
        from math import pow
        from math import sin
        from math import cos
        import random
        import numpy as np
        from pyteseract import pytesseract
        from PIL import ImageGrab
        from PIL import Image
        import pyautogui
        import datetime

In [2]: # Python-Plaxis Bağlantısı
        localhostport_input = 10000
        localhostport_output = 10001
        plaxis_path = r"C:\ProgramData\Bentley\Geotechnical\PLAXIS Python Distribution V1\python\Lib\site-packages"
        found_module = imp.find_module('plxscripting', [plaxis_path])
        plxscripting = imp.load_module('plxscripting', *found_module)
        from plxscripting.easy import *
        s_i, g_i = new_server('localhost', localhostport_input, password = 'BeWxZQ<gGtcarC9W')
        s_o, g_o = new_server('localhost', localhostport_output, password = 'BeWxZQ<gGtcarC9W')

```

Şekil 5. Plaxis-Python bağlantı kurulumu (Plaxis-Python connection)

#### 4.2 Rastgele Değişken Üretimi (Random Variable Generation)

Daha önce yapılan stokastik sızma analizlerinde,  $k$  ve  $k_s$  gibi temel hidrolik ve geoteknik özelliklerin yanı sıra Van Genuchten parametreleri rastgele değişken olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada kil çekirdekte kullanılan zeminin  $k_s$  değeri rastgele değişken olarak ele alınmıştır [1, 4, 5, 8]. Çeşitli çalışmalar  $k_s$ 'nin log-normal dağılım ile karakterize edilebileceğini göstermektedir [20, 21, 22, 23].  $k_s$  değişkenine ait temel istatistiksel bilgileri bulabilmek için çeşitli deneylerle elde edilen zemin için su tutma ilişkileri (SWC eğrisi) kullanılmıştır [24].  $k_s$  için  $\mu$  ve COV dahil olmak üzere temel istatistiksel bilgiler, 12 farklı SWC eğrisi sağlayan Carsel vd. [25] çalışmasından elde edilmiştir. Spesifik olarak, bu değerler sırasıyla 0.26 cm/saat ve %267 olarak belirlenmiştir.  $\mu = 0,26$  cm/saat, Casagrande [26] tarafından baraj ve setlerin geçirimsiz bölgelerinde uygulanmak üzere önerilen kriterlere uygun bir  $k_s$  değerini temsil etmektedir. Buna ek olarak, ilgili çalışmalar killer için COV( $k_s$ ) değerinin % 100-300 aralığında değişebildiğini göstermiştir [27, 28]. Çalışmada seçilen dağılımın ortalama değerinin sızma üzerinde etkisini araştırmak üzere ortalamanın kendisi ile 10 kat ve 100 kat azaltılmış hali kullanılarak analizler yapılmıştır.  $k_s$  değerindeki değişkenliğe ek olarak çekirdek geometrisinin sızma üzerine etkisi araştırmak amacıyla çekirdek eğimleri 2:1 ve 3:1 olan iki farklı model oluşturulmuştur. Bu şekilde elde edilen durumların isimlendirilmesi Çizelge 3'te verilmektedir.

Yukarıda da belirtildiği gibi,  $k_s$  değerinin log-normal dağılıma uyduğu kabul edilmiştir. Böylece, ortalama ( $\mu_{k_s}$ ) ve varyans ( $\sigma_{k_s}^2$ ) değeri kullanılarak  $k_s$  değerinin olasılıksal dağılım fonksiyonu belirlenebilir.  $k_s$  değerinin doğal logaritması ( $\ln k_s$ ) alınarak normal dağılıma dönüştürülür ve bu normalleştirilmiş dağılımın parametreleri (varyans,  $\sigma_{\ln k_s}$  ve ortalama,  $\mu_{\ln k_s}$ ) Eş. (1) ve (2)'de verildiği gibi elde edilebilir [29, 3] :

**Çizelge 3.** Çalışmada  $k_s$  için kullanılan parametre değerleri ve durumların isimlendirilmesi (Parameter values and nomenclature of cases used for  $k_s$  in the study)

Durum İsmi	Model İsmi	$\mu(k_s)$ değeri (m/gün)	COV( $k_s$ )
Durum 1	Model 1	0.062	1.35
Durum 2	Model 1	0.0062	1.35
Durum 3	Model 1	0.00062	1.35
Durum 4	Model 2	0.062	1.35
Durum 5	Model 2	0.0062	1.35
Durum 6	Model 2	0.00062	1.35

$$\sigma_{\ln k_s}^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma_{k_s}^2}{\mu_{k_s}^2}\right) \quad (1)$$

$$\mu_{\ln k_s} = \ln \mu_{k_s} - \frac{1}{2} \sigma_{\ln k_s}^2 \quad (2)$$

Log-normal dağılıma sahip geçirgenlik katsayısı Eş. (3)'te verildiği gibi bulunur:

$$k_s = \exp(\mu_{\ln k_s} + \sigma_{\ln k_s} \times r') \quad (3)$$

Standart rastgele normalizasyon katsayısı  $r'$  Box Müller dönüşümü ile elde edilir [30] ve Eş. (4)'te verildiği gibi hesaplanır:

$$r' = (-2 \ln u_1)^{\frac{1}{2}} \times \sin 2\pi u_2 \quad (4)$$

$u_1$  ve  $u_2$  sayıları, (0-1) aralığında sabit bir olasılıksal yoğunluk fonksiyonuna sahip bağımsız rastgele değerlerdir. Bu normalizasyon işlemi ve rastgele  $k_s$  üretme işlemi için hazırlanan basit kodlar Şekil 6'da sunulmaktadır. Kil için seçilen COV( $k_s$ ) değeri göz önüne alındığında, doğal kil malzemesinin tipik olarak sergilemeyeceği simüle edilmiş bir  $k_s$  değeri üretmek mümkündür. Bu bağlamda, Casagrande [26] tarafından sağlanan grafikte sunulan limitlere uygun olarak, maksimum  $k_s$  değerini, barajların ve seddelerin geçirimsiz bölümlerinde kullanılan killerle yaygın olarak ilişkilendirilen bir değer olan  $10^{-4}$  cm/s'de sınırlamak yerinde olacaktır.

```

iterasyon = 251
data = 1
sayacperm = []
while data < iterasyon:
    muK=0.062
    COVK= 1.35
    u1=random.uniform(0,1)
    u2=random.uniform(0,1)
    sigmaK = COVK * muK
    sigmaLnK = sqrt(log(1 + pow((sigmaK / muK), 2)))
    r = sqrt(-2.0 * log(u1)) * sin(2.0 * pi * u2)
    permeability = exp(log(muK) - 0.5 * pow(sigmaLnK, 2) + sigmaLnK * r)
    while permeability>0.0864:
        u1=random.uniform(0,1)
        u2=random.uniform(0,1)
        sigmaK = COVK * muK
        sigmaLnK = sqrt(log(1 + pow((sigmaK / muK), 2)))
        r = sqrt(-2.0 * log(u1)) * sin(2.0 * pi * u2)
        permeability = exp(log(muK) - 0.5 * pow(sigmaLnK, 2) + sigmaLnK * r)
    print("permeability:" , permeability)
    sayacperm.append(permeability)
    #Burada kodun devamı vardır.
    data+=1

```

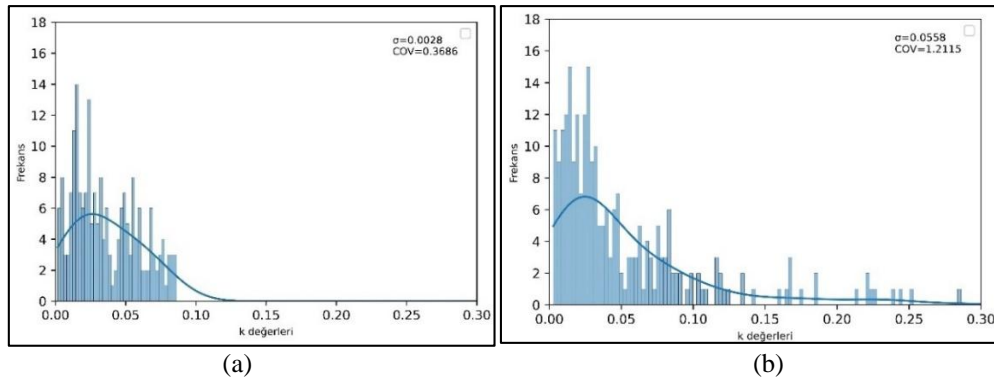
**Şekil 6.** Rastgele  $k_s$  değerlerinin üretilme kodu (Generation code for random  $k_s$  values)



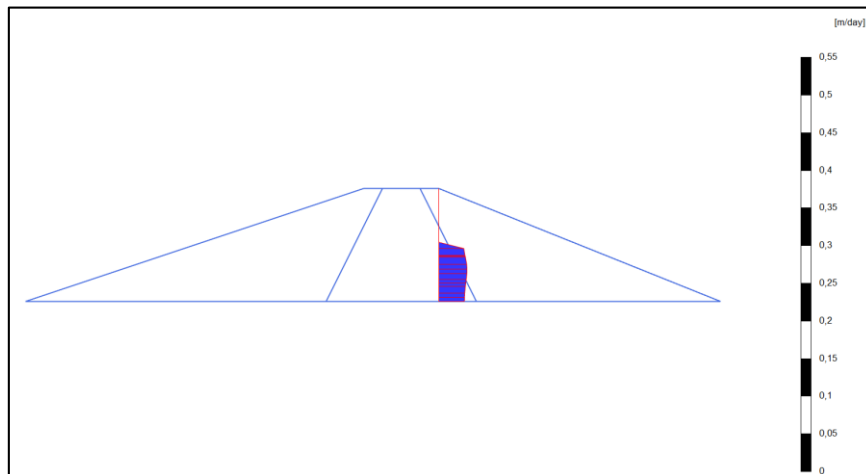
## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Olasılıksal analizlerde barajın memba ve mansap kısımlarındaki su seviyesinde herhangi bir değişikliğin olmadığı kararlı durum sızma şartları değerlendirilmiştir. Kararlı durum analizlerinin yapılmasının nedeni, rezervuarın doldurulması sırasında, çekirdeğin her iki tarafı arasındaki su seviyesi farkı maksimum değerine ulaştığında baraj için kritik bir stabilite durumunun ortaya çıkmasıdır. İki farklı model için daha önce anlatıldığı gibi üretilen kararlı durum  $k_s$  değerlerinin histogramları bahsedilen sınırlandırmanın (en büyük değer  $10^{-4}$  cm/s olacak şekilde) uygulanmış haliyle Şekil 7a'da ve uygulanmamış haliyle Şekil 7b'de sunulmaktadır. Kararlı durum stokastik analizlerinin sonuçlarının elde edildiği kesit Şekil 8'de gösterilmektedir. Bu analizler için,  $Q$ 'nun COV değerinde ( $COV_Q$ ) ihmal edilebilir düzeyde değişiklik

oluncaya kadar simülasyon sayısı sistematik olarak artırılmıştır. Şekil 9' dan da görülebileceği gibi, yaklaşık 250 simülasyondan sonra  $COV_Q$ 'da yaklaşık %0.10'luk ihmal edilebilir düzeyde bir değişiklik olmuştur. Bu nedenle simülasyon sayısı tüm durumlar için 250 olarak seçilmiştir. Bu sayı simülasyon süresini belirlemektedir. Az sayıda MC simülasyonu yapmak gerçek sonuçlara ulaşmak için yeterli olmayabilirken gereğinden fazla MC simülasyonu yapmak ise zaman kaybı olabilir. Bu çalışmada 250 simülasyon yaklaşık 2 saatte tamamlanmıştır. Toplam 6 durum için analiz süresi 12 saat sürmüştür. Simülasyon sayısı arttıkça yazılan kodun çözüme ulaşma hızı yavaşlamaktadır ve böylelikle analizler daha uzun sürmektedir. Örneğin simülasyon sayısına karar vermek için yapılan 500 simülasyon yaklaşık 5 saat sürmüştür. Bu sebeple doğru bir şekilde analiz edilerek simülasyon sayısına karar verilmelidir.

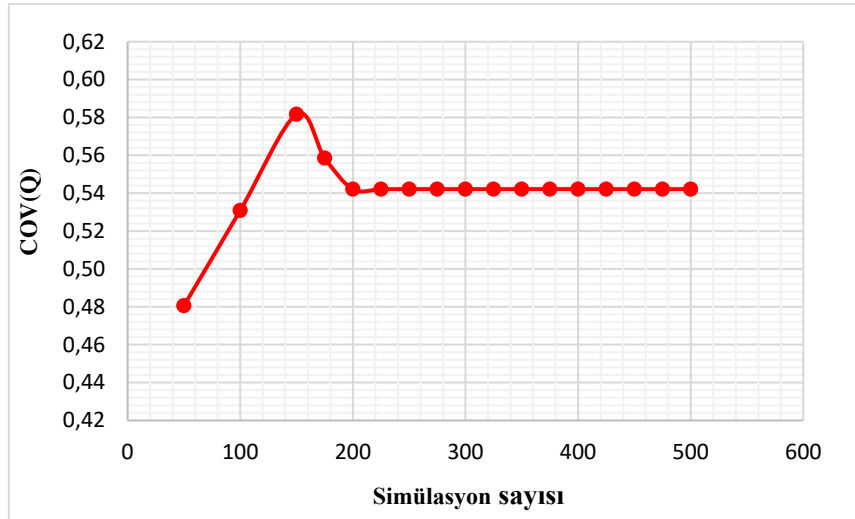


Şekil 7.  $\mu = 0.062$  için a) Sınırlandırılmış olarak üretilen  $k_s$  değerleri b) sınır olmadan üretilen  $k_s$  değerleri ( For  $\mu = 0.062$  a)  $k_s$  values generated with boundary b)  $k_s$  values generated without boundary)



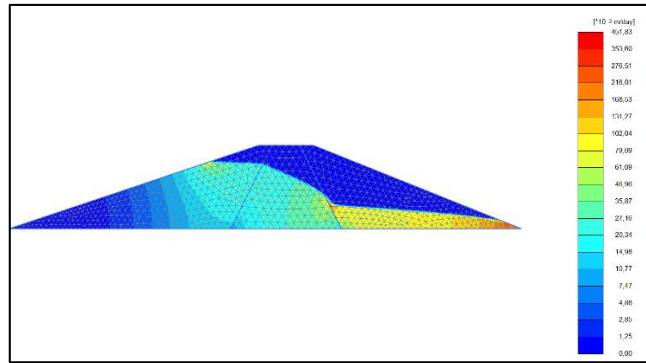
Şekil 8. Sonuçların alındığı enkesit (Cross-section from which the results were taken)





Şekil 9.  $COV_Q$  değerinin simülasyon sayısına göre değişimi (Variation of  $COV_Q$  value according to the number of simulations)

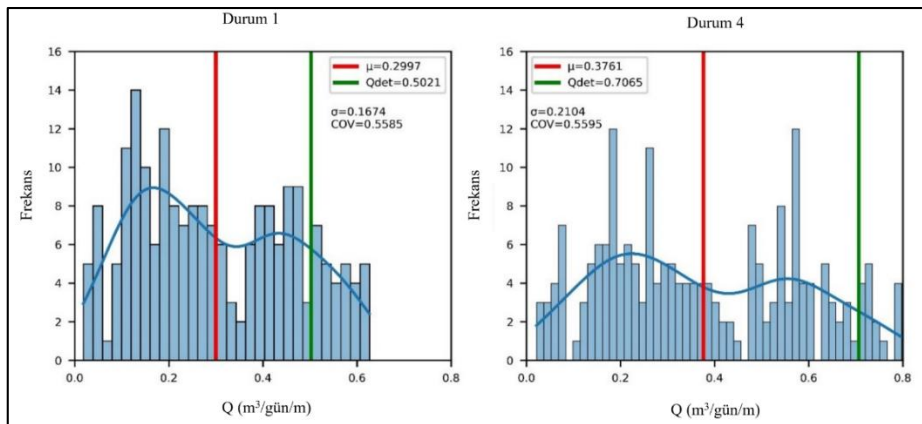
Analiz sonuçlarının değerlendirilmesine geçmeden önce uygulama barajlarında oluşan sızmaya ait bir analiz sonucu Şekil 10'da gösterilmektedir.



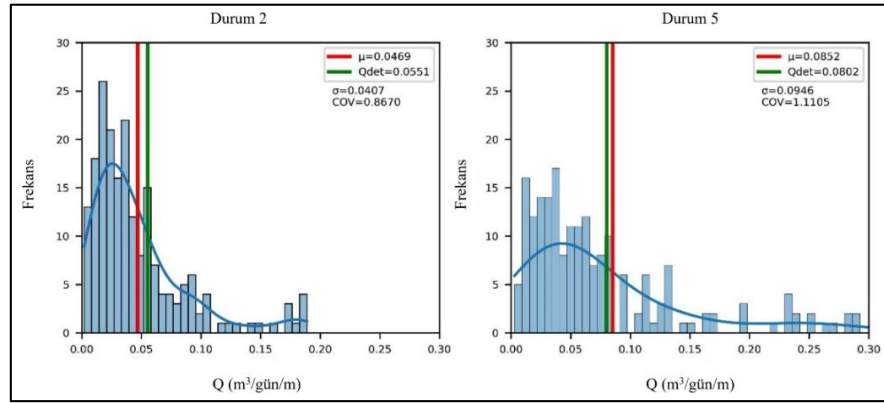
Şekil 10. Barajlarda oluşan sızmaya örnek (Example for seepage through dams)

Daha önce de bahsedildiği gibi analizler iki farklı model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bulgular, model ve  $\mu$  değerine göre yapılan isimlendirmeye (Çizelge 2) göre

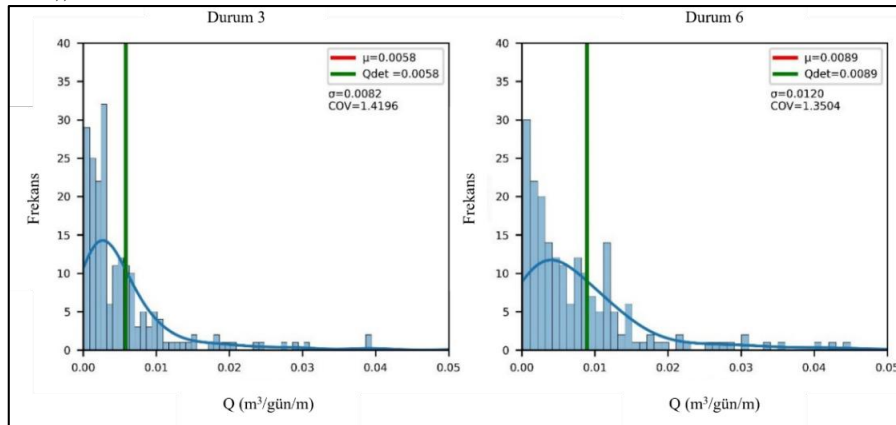
Şekil 11, 12 ve 13'te sunulmaktadır. Sunulan histogramlarda aynı  $\mu$  değerinde iki farklı model kıyaslanmıştır.



Şekil 11.  $\mu = 0.062$  m/gün için model 1 ve 2'ye ait sonuçlar (Durum 1 - Durum 4) (Results for models 1 and 2 for  $\mu = 0.062$  m/day (Case 1 - Case 4))



Şekil 12.  $\mu = 0.0062$  m/gün için model 1 ve 2'ye ait sonuçlar (Durum 2 - Durum 5) (Results for models 1 and 2 for  $\mu = 0.0062$  m/day (Case 2 - Case 5))



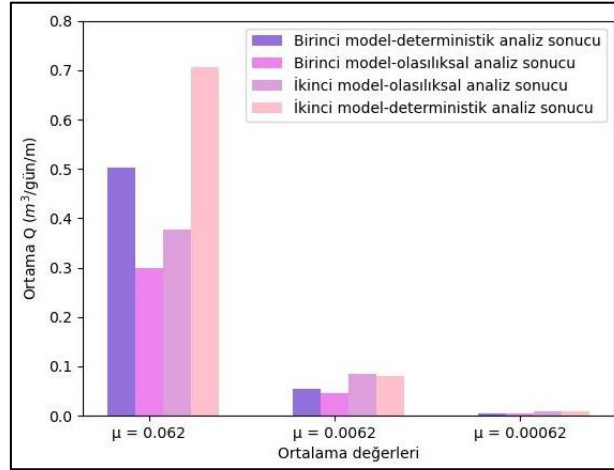
Şekil 13.  $\mu = 0.00062$  m/gün için model 1 ve 2'ye ait sonuçlar (Durum 3 - Durum 6) (Results for models 1 and 2 for  $\mu = 0.00062$  m/day (Case 3 - Case 6))

Gerçekleştirilen kıyaslamalara göre,  $\mu = 0.062$  m/gün için ilk modelde yapılan analizlerde (Durum 1) elde edilen ortalama sızma değeri deterministik yöntemle elde edilenden %40.3 oranında daha düşük iken, ikinci modelde (Durum 4) bu oran %46.8 değerine ulaşmıştır.  $\mu = 0.0062$  m/gün için ilk modelde yapılan analizlerde (Durum 2) elde edilen sızma miktarı deterministik yöntemle elde edilenden %14.9 oranında daha düşüktür. Deterministik yöntem sonuçlarının olasılıksal analiz sonuçlarından daha az olabileceği sonucuna Çalamak [1] ve Ahmed [4] çalışmalarında da ulaşılmıştır.  $\mu = 0.0062$  m/gün için ikinci modelden (Durum 5) elde edilen sızma miktarı deterministik yöntemle elde edilen sonuçtan az da olsa (%6.3) daha yüksektir. Bu şekilde olasılıksal analiz sonuçlarının deterministik analiz sonuçlarından daha yüksek olabildiği durumlara örnek sonuçlar literatürde Çalamak [1] çalışmasında bulunmaktadır.  $\mu =$

0.00062 m/gün için her iki modelde de deterministik yöntemin sonuçlarıyla benzer sonuçlara ulaşılmıştır. İlk modelde  $\mu$  ve  $\mu/10$  değerleri ile yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırıldığında,  $\mu$ 'nun 10 kat azaltılmasının, sızma miktarını %84.4 oranında azalttığı belirlenmiştir. Bu modelde,  $\mu$  ve  $\mu/100$  değerleri ile yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırıldığında ise,  $\mu$ 'nun 100 kat azaltılmasının, sızmayı çok büyük bir biçimde, %98 oranında azalttığı belirlenmiştir. İkinci modelde bu karşılaştırma yapıldığında ise  $\mu$  değerinin 10 kat azaltılması ile sızmanın %77.4 oranında, 100 kat azaltılması ile ise %97.6 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç Srivastava vd. [5] ve Günay [31] tarafından elde edilen sonuçlar ile paralellik göstermektedir. Yapılan tüm kıyaslamalar Çizelge 4'te özetlenmektedir. Ayrıca, bulguların karşılaştırılmasına kolaylık sağlayan histogram Şekil 14'te sunulmaktadır.

Çizelge 4. Elde edilen bulguların karşılaştırılması (Comparison of the obtained findings)

Model ismi/Sonuç	$\mu - \mu/10$	$\mu - \mu/100$	Durum İsmi	Det. yöntemle kıyaslama (%)
Birinci model	-84.4	-77.4	Durum 1	-40.3
			Durum 2	-14.9
			Durum 3	00.0
İkinci model	-98.0	-97.6	Durum 4	-46.8
			Durum 5	6.3
			Durum 6	00.0



Şekil 14. Elde edilen bulguların karşılaştırmalı histogramı (Comparative histogram of the results obtained)

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, farklı şev eğimlerine sahip kil çekirdekli iki adet dolgu barajdaki kararlı durum sızma analizleri stokastik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde doygun bölge permeabilite değeri ( $k_s$ ) log-normal dağılıma uyan rastgele bir değişken olarak modellenmiştir. Bu amaçla, sonlu elemanlar programı PLAXIS 2D Ultimate yazılımı, Monte Carlo (MC) simülasyonlarını yürütmek için Python yazılım dili ile birlikte kullanılmıştır. Sadece baraj gövdesindeki sızma dikkate alınmış ve temeldeki sızma göz ardı edilmiştir. Bu koşullar altında,  $k_s$  değerindeki belirsizliğin ve çekirdek geometrisinin toplam sızma debisi ( $Q$ ) üzerine etkisi stokastik ve deterministik olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmektedir:

- Kararlı durum sızma analizlerinde kil çekirdekte kullanılan malzemenin  $k_s$  değişkenliği  $Q$  üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.
- Deterministik ve olasılıksal yöntemlerle elde edilen  $Q$  değerlerindeki önemli derecedeki farklılıklar, zemin parametrelerindeki belirsizliklerin sızma analizlerinde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Baraj tasarım aşamasında sızma analizlerinin olasılıksal olarak yapılması, burada gösterilen yöntemde olduğu gibi sürati ve ekonomikliğinin yanı sıra daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmasını sağladığı gerekçesi ile tercih edilmelidir.
- Kararlı durum sızma analizlerinde  $k_s$  değerinin ortalama ( $\mu$ ) değerinin arazi ve laboratuvar deneyleri kullanılarak doğru biçimde tespiti son derece önemlidir. Bu değer stokastik analizlerin sonucunu etkileyen önemli parametrelerden biri olduğu mevcut çalışmada gösterilmiştir.
- Kil çekirdek tasarımında sızma analizlerinin olasılıksal olarak yapılması ile optimum

tasarıma gidilebilir. Bu yöntemle farklı geometriler denenerek hızlı ve deterministik yöntemle kıyaslandığında daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilecektir.

- MC simülasyonlarının sayısı sonuçları etkileyen önemli bir faktördür. Bu nedenle, MC simülasyonlarının sayısına karar verirken, elde edilen sonuçlardaki değişkenliğin ihmal edilebilir olduğu minimum simülasyon sayısı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bazen simülasyon süresini uzatabilir, ancak daha doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Bu çalışmada kararlı durum halinde farklı çekirdek şev eğimlerine sahip iki tane varsayımsal baraj üzerinde permeabilitenin farklı ortalama değerlerinde olasılıksal sızma analizleri yapılmıştır. Ancak barajlarda sızma konusunda kararsız durum sızmaları da önemlidir. Bu kapsamda, ileriki çalışmalarda rezervuar seviyesindeki ani düşme veya ani yükselme durumlarında bu çalışmada irdelenen durumların araştırılması önerilmektedir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Arife GÜNAY:** Literatür taraması yapmış, analizleri gerçekleştirmiş ve makaleyi yazmıştır.

**Sami Oğuzhan AKBAŞ:** Literatür taraması yapmış, analiz sonuçlarını doğrulamış ve makaleyi yazmıştır.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Çalamak M. "Uncertainty based analysis of seepage through earth-fill dams", Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2014).
- [2] Polater Ö. "Dolgu barajların farklı geçirimsiz malzemeler kullanılarak sızma analizi", Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitlis, (2021).
- [3] Fenton G. and Griffiths D. "Statistics of free surface flow through stochastic earth dam", *Journal of Geotechnical Engineering, (ASCE)*, 122(6): 410–427, (1996).
- [4] Ahmed A. A. "Stochastic analysis of free surface flow through earth dams", *Computers and Geotechnics*, 36(7): 1186-1190, (2009).
- [5] Srivastava A., Babu G. L. S., and Haldar S. "Influence of spatial variability of permeability property on steady state seepage flow and slope stability analysis", *Engineering Geology*, 110(3-4): 93–101. doi:10.1016/j.enggeo.2009.11.006, (2010).
- [6] Cho S.E. "Probabilistic analysis of seepage that considers the spatial variability of permeability for an embankment on soil foundation", *Engineering Geology*, 133–134:30–39, (2012).
- [7] Le T. M. H., Gallipoli D., Sanchez M. and Wheeler S. J. "Stochastic analysis of unsaturated seepage through randomly heterogeneous earth embankments", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 36(8): 1056-1076, (2012).
- [8] Tan X., Wang, X., Khoshnevisan S., Hou X., and Zha F. "Seepage analysis of earth dams considering spatial variability of hydraulic parameters", *Engineering Geology*, 228: 260–269, (2017).
- [9] Mouyeaux A., Carvajal C., Bressollette P, Peyras L, Breul P, Bacconnet C Probabilistic analysis of pore water pressures of an earth dam using a random finite element approach based on field data. *Eng Geol.* 259: 105190, (2019).
- [10] Siacara A. T., Beck A. T., and Futai M. M. "Reliability analysis of rapid drawdown of an earth dam using direct coupling", *Computers and Geotechnics*, 118: 103336, (2019).
- [11] Salmasi F., Norouzi R., Abraham J., Nourani B., Samadi S. "Effect of inclined clay core on embankment dam seepage and stability through LEM and FEM", *Geotechnical and Geological Engineering*, 38: 6571-6586, (2020).
- [12] Kalateh F., and Kheiry M. "A review of stochastic analysis of the seepage through earth dams with a focus on the application of monte carlo simulation", *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-26, (2023).
- [13] "United States Bureau of Reclamation (USBR) Design of Small Dams", (1987).
- [14] PLAXIS 2D (Software). (2022). PLAXIS BV. Delft, The Netherlands: P.O. Box 572, 2600 AN.
- [15] Tekin H. O., Manici T., Singh V. P. "An investigation on shielding effect of bismuth on lung CT scan using Monte Carlo simulation", *Politeknik Dergisi*, 19(4): 617-622 (2016).
- [16] Yanik A., Higgins C. "A monte-carlo simulation for the estimation of side-by-side loading events on oregon bridges", *Politeknik Dergisi*, (2020).
- [17] Python Software Foundation. Python Language Reference, version 3.10.4. Available at <http://www.python.org>
- [18] Üçdemir G., and Akbaş S. "Effect of wall stiffness on excavation-induced horizontal deformations in stiff-hard clays", *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 113-130, (2023).
- [19] Korkut D. E., and Akbaş S. O. "The effect of incorporating vertical spatial variability on the probabilistic analysis of a deep excavation: a case study", *Politeknik Dergisi*, 1:-1, (2023).
- [20] Law J. "A statistical approach to the interstitial heterogeneity of sand reservoirs", Transactions of the AIME, *Soc. of Petroleum Eng.*, 155(1): 202-222, (1944).
- [21] Warren J. E., Price H. S. "Flow in heterogeneous porous media", *Society. of Petroleum Engineer, SPE J.*, 1(3): 153-169, (1961).
- [22] Bennion D. W., Griffiths J. C. "A stochastic model for predicting variations in reservoir rock properties", *Society. of Petroleum Engineer, SPE J.*, 6(1): 9-16. (1966).
- [23] Bulnes A. C. "An application of statistical methods to core analysis data of dolomitic limestone", Transactions of the AIME, *Society. of Petroleum Engineer, SPE J.*, 165(1): 223-240. (1946).
- [24] Kenanoğlu M. B., Toker N. K. A formulation for scanning soil-water characteristic curves. *Politeknik Dergisi*, 21(4): 901-906, (2018).
- [25] Carsel R. F. and Parrish R. S. "Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics", *Water Resources Research*, 24(5): 755-769. (1988).
- [26] Casagrande A. "Notes on soil mechanics-first semester", Harvard University (unpublished), 129 p., (1938).
- [27] Baecher G. B., Christian J. T. "Reliability and statistics in geotechnical engineering", John Wiley & Sons. (2005).
- [28] Wang F., Huang H., Yin, Z., Huang Q. "Probabilistic characteristics analysis for the time-dependent deformation of clay soils due to spatial variability", *European Journal. of Environmental. and Civil. Engineering*, 26(12): 6096-6114, (2022).
- [29] Ang A. H. S., and Tang W. H. "Probability concepts in engineering planning and design vol. 1: basic principles", John Wiley & Sons, New York. (1975).
- [30] Box G. E. P., Muller M. E. A. "Note on the generation of random normal deviates", *The Annals of Mathematical Statistics*, 29(2): 610-611, (1958).
- [31] Günay A. "Kil çekirdekli dolgu barajlarda sızmanın belirsizlik temelli incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2023).