

DOLGU BARAJLARDA SIZMANIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE OLASILIKSAL ANALİZİ

FINITE ELEMENT-BASED PROBABILISTIC ANALYSIS OF SEEPAGE IN EMBANKMENT DAMS

Arife GÜNAY¹, Sami Oğuzhan AKBAŞ²

ÖZET

Dolgu barajlarda suyun barajın memba kısmından mansap kısmına doğru sürekli hareketi olarak tanımlanan sızmanın hesaplanması ve belirli bir mertebenin altında tutulması için gerekli önlemlerin alınması tasarımın önemli aşamalarından birini oluşturur. Sızmanın tasarım öngörülerinin dışında meydana gelmesi durumunda, barajın hizmet performansı düşebilir ve ekstrem durumlarda barajda iç aşınma veya borulanma sonucu yenilmeye varan sonuçlar ortaya çıkabilir. Bu sebeple uzun yıllar boyunca dolgu barajların gövdesindeki kararlı ve kararsız sızma konusu üzerinde deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Sızma miktarını, hızını ve sızma ağını etkileyen birçok faktör bulunması ve bu faktörlerin belirsizlikler içermesinden dolayı günümüzde sızma analizlerinde sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri de sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Bu analizlerde göz önüne alınması gereken önemli hususlardan biri de dolgu barajı oluşturan zemin malzemesinin özelliklerindeki belirsizlikler ve değişkenliklerdir. Yapılan çalışmada, bu durum göz önüne alınarak, öncelikle, barajların kil çekirdeğini oluşturan zemine ait permeabilite değerlerindeki değişkenlikler araştırılmış, ardından zeminin permeabilite değeri rastgele değişken olarak Python yazılım dili ve Monte Carlo Simülasyonu (MCS) ile Plaxis 2D programında yapılan sızma analizlerinin girdileri olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışma ile kil çekirdekli dolgu barajları oluşturan zeminlerin permeabilite değişkenliklerinin sızma davranışı üzerindeki etkisi olasılıksal olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dolgu Barajlar, Monte Carlo Simülasyonu, Permeabilite, Sızma Analizi

ABSTRACT

Calculation of seepage, which is defined as the continuous movement of water from upstream to downstream of the embankment dams, and taking the necessary measures to keep it below a certain level is one of the significant stages of the design. If the seepage

¹ Arş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, arifegunay25@gmail.com (Sorumlu yazar)

² Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, soakbas@gmail.com

exceeds the design forecasts, the service performance of the dam may become unsatisfactory, and in extreme cases, failure can be observed as a result of internal erosion or piping in the dam. For this reason, laboratory-based and theoretical studies have been carried out on the subjects of steady-state and transient seepage in the embankment dams for many years. However, since many factors affect the amount and rate of seepage and resulting flow nets, and these factors contain uncertainties and variabilities, finite difference and finite element methods have been frequently used in seepage analyses in recent years. One of the significant issues to be considered in these analyses is the uncertainties in the properties of the soil used in the embankment dam. In this study, based on the aforementioned issues, first, variability of the permeability of clays were investigated. Then, the permeability of the soil was simulated as a random variable for the input to the seepage analyses made in the Plaxis 2D program using the Python software language and Monte Carlo simulations. The effects of variability of permeability in the clay core on seepage behavior were probabilistically investigated.

Keywords: *Embankment Dams, Monte Carlo Simulation, Permeability, Seepage analysis*

1. GİRİŞ

Su ihtiyacı, enerji ihtiyacı ve taşkın kontrolü amacıyla bir akarsu vadisinin en uygun kesitine inşa edilen ve bu şekilde akarsuyun baraj gölünde birikmesini sağlayan ve çeşitli malzemeler kullanılarak farklı tiplerde inşa edilebilen yapılara baraj denir. Ekonomik olarak uygun olması, inşa edilebilirliğinin nispeten daha kolay olması ve esnek proje şartları sağlamasından dolayı en çok tercih edilen baraj türü olan dolgu barajlarda suyun memba tarafından mansap tarafına doğru sürekli ve engellenemeyen hareketi olarak bilinen sızma izin verilen miktarları aştığında barajda borulanmaya ve iç erozyona bağlı olarak yıkılmalara, bunların sonucunda ise can ve mal kayıplarına sebep olacağından, tasarım aşamasında baraj güvenliği için göz önüne alınması gereken önemli kriterlerinden biridir.

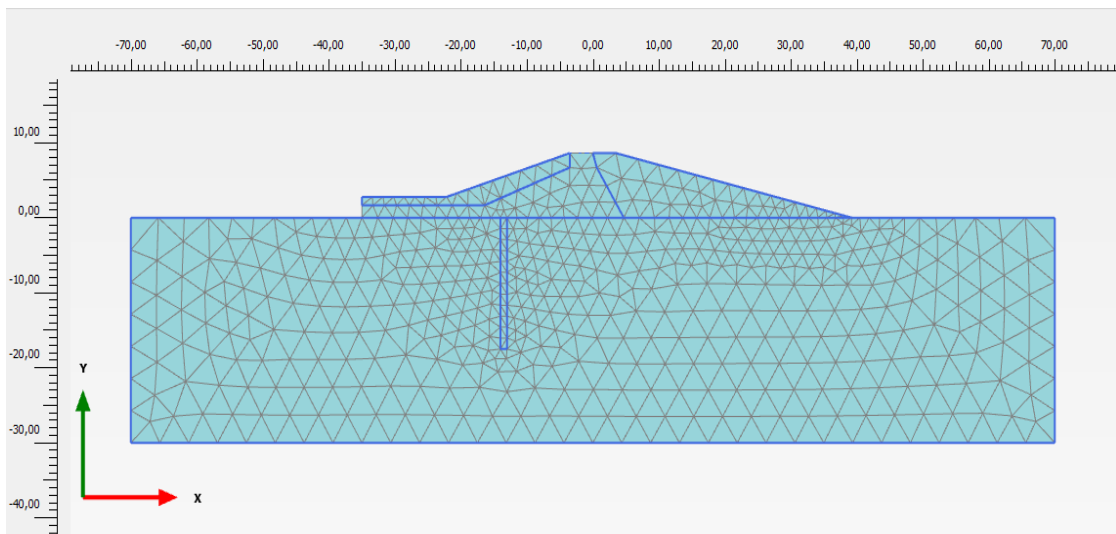
Geleneksel olarak barajların tasarımı aşamasında sızma hesapları deterministik yöntemlerle yapılmakta olup, barajın geoteknik özelliklerinin zeminin doğası kaynaklı ve ölçüm hatası ile yetersiz örnekleme sebepleri ile içerdiği belirsizlikler hesaba matematiksel olarak katılamamaktadır. Fakat, özellikle sızmayı engellemek amacıyla geçirimsizliği çok düşük olan kil malzemeden çekirdek yapılar tasarlanan kil çekirdekli dolgu barajlarda kil malzemenin doğru ve tam sıkıştırılamamasından dolayı permeabilite değerinin önemli miktarda belirsizlik içermesi kaçınılmazdır. Örneğin, Pınarcı vd (2017), çalışmalarında Atatürk Barajı'nda kullanılan kil malzemesi üzerinde farklı enerjilerle kompaksiyon deneyleri yaparak sıkıştırılmanın kilin boşluk oranı, yoğunluk değerleri ve permeabilite değeri üzerine etkisini sunmuşlardır.

Son yıllarda geoteknik parametrelerdeki değişkenlik göz önüne alınarak sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleriyle daha gerçekçi sonuçlar elde edilmeye başlanmıştır. Fenton ve Griffiths (1996), dolgu barajlarda oluşan sızmayı istatistiksel olarak incelemiştir ve sonuç olarak stokastik sonuçların dalgalanma ölçeğinin baraj geometrisine bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca sızma debisinin ortalama ile ilişkilendiğini yani varyansının küçük olduğunu; varyans arttıkça ortalama sızma hızının hızlıca düştüğünü ve deterministik yöntemlerle elde edilen sonuçların serbest yüzey profili için güvenle kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ahmed (2009), deterministik ve stokastik sızma analizlerinin sonuçlarını

karşılaştırmıştır. Yapılan analizlerde sızma miktarının deterministik yöntemlerle hesap edilen değerden daha az olduğu görülürken; suyun çıkış noktasının deterministik yöntemle bulunan yerinin zeminin homojen olduğu kabulü ve bu yüzden daha küçük hidrolik değişkenlik değeri olan noktaların göz ardı edilmesinden kaynaklı daha yukarıda bulunduğu söylenmiştir. Calamak (2014) çalışmasında hidrolik iletkenlik ve Van Genuchten parametrelerindeki belirsizliklerin sızma üzerindeki etkilerini farklı bölgelerden oluşan ve homojen barajlara uygulayarak incelemiştir. Söz konusu çalışmada hidrolik iletkenlikteki değişkenliğin sızma üzerinde önemli bir etkisi olduğunun bulunmasına karşın, Van Genuchten parametrelerinin ihmal edilebilir düzeyde önemli olduğu belirlenmiştir. Boroomand ve Mohammadi (2019), MCS ve SEEP/W programı ile zeminin hidrolik parametrelerindeki belirsizliğin sızma üzerindeki etkisini incelemiş ve çekirdeksiz olarak inşa edilen barajlarda sızma miktarının arttığını ve dolgu barajlarda çekirdek bölgesinin gerekli olduğunu bulmuştur.

2. UYGULAMA PROJESİ

İstanbul'da Büyükçekmece gölü üzerinde bulunan Büyükçekmece Barajı, 1983-1988 yılları arasında, Büyük İstanbul İçme Suyu Projesi kapsamında inşa edilen ve inşası sonrası normal su kotunda göl alanı $28,47 \text{ km}^2$ 'ye ulaşan, minimum göl alanı ise 18.22 km^2 'ye düşen, kret kotu 8,60 m olan ve $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ dolgu hacmine sahip maksimum su kotu 6,68 m olan alüvyonlu bir zemin üzerine inşa edilmiş çekirdekli toprak dolgu baraj tipinde bir barajdır (Çilingir,2007). Çekirdek kısmı için uygun nitelikte yeterli kil bulunamadığından +3 m kotuna kadar kil malzeme ile yükseltilip devamı için permeabilite katsayısı 10^{-6} olan bir dolgu malzemesi kullanılmıştır. Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından 1992 yılına ait kaçak debi ölçümleri bulunan barajda maksimum sızma verisi günlük ortalama 0,1 l/s olarak ölçülmüştür. Artan su yüksekliği ile bir noktaya kadar artan sızma miktarı, sızan suyun taşıdığı malzemelerle oluşan tıkanıklıktan dolayı hazne su seviyesi artmasına rağmen azalmıştır (Çilingir, 2007). Büyükçekmece Barajı'na ait geometri ve sınır şartları Şekil 1'de verilen sonlu elemanlar modelinde gösterilmektedir.



Şekil 1. Büyükçekmece Barajı sonlu elemanlar modeli

3. YÖNTEM

Bu bölüm çalışmada kullanılan yöntemin detaylarını kapsamaktadır. Sızma analizleri Plaxis 2D Ultimate ve Python yazılımları kullanılarak Monte Carlo Simülasyonları ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmıştır.

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi: Plaxis 2D

Kararlı durum sızma analizleri geoteknik mühendisliğinde tasarım aşamasında sıklıkla kullanılan Plaxis 2D Ultimate yazılımı 2022 versiyonu aracılığıyla yapılmıştır. Zemin davranışını modellemek için Mohr Columb seçeneği kullanılmıştır. Kullanılan zemin parametreleri için literatür taramasından faydalanılmıştır. Çetin (2009), çalışmada Türkiye'deki toprak dolgu barajların geçirimsiz çekirdek bölgelerinde kullanılan malzemelerin geoteknik özelliklerini istatistiksel olarak incelemiş ve sunmuştur. Farklı hesaplama yöntemleri de sunan yazılımda bu çalışma için "Flow Only" yöntemi seçilerek analizler tamamlanmıştır. Kil permeabilitesi (K) için kullanılan ortalama ve varyasyon katsayısı parametreleri de literatürde yer verilen ve uygun görülen değerler seçilerek analizde kullanılmıştır. Doygun bölgenin permeabilite katsayısının olasılıksal yoğunluk fonksiyonu bir ortalama değer ve standart sapmanın ortalama değere oranıyla değişkenliği ifade etmekte kullanılan varyasyon katsayısı (COV) ile log-normal dağılım şeklinde ifade edilebilir. Bu dağılıma ait parametreler aşağıdaki şekilde normalleştirilebilir:

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

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

Box Müller dönüşümü (Box vd., 1958) ile elde edilen standart rasgele normalleştirme katsayısı r' ile log-normal dağılıma sahip permeabilite katsayısı aşağıdaki şekilde bulunur.

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

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

u_1 ve u_2 sayıları (0 - 1) aralığında sabit olasılıksal yoğunluk fonksiyonuna sahip bağımsız değerlerdir.

3.2. Plaxis – Python Harici Kodlama

Plaxis, 2017 ve daha yeni versiyonlarında gömülü olarak bulunan Python ile olasılıksal dağılım fonksiyonlarından rastgele değer üretmek bu değerleri çoklu analizlerin girdisi olarak kullanma kolaylığı sunmaktadır. Hesap adımları ve yöntemin akış şeması Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Hesap adımlarının ve yöntemin akış şeması

Simülasyonda kullanılan istatistiksel veriler Tablo 1’de gösterilmektedir.

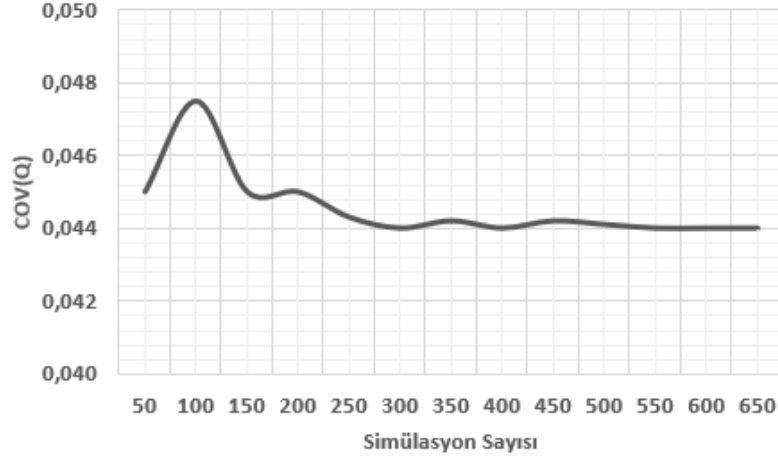
Tablo 1. K için çalışmada kullanılan parametre değerleri

Durum	Ortalama değer (m/gün)	COV(K)
0.5COV(K)	0.062	1.35
1COV(K)	0.062	2.70
2COV(K)	0.062	5.40
3COV(K)	0.062	8.10

3.3. MONTE CARLO SİMÜLASYONU

Güvenilirliğe dayalı tasarım yöntemlerinden biri olan ve sızma problemlerinde oldukça fazla kullanılan Monte Carlo Simülasyonu, çözümü deterministik olarak mümkün olmayan ya da oldukça fazla hata içeren belirli bir problemin istenilen sayıda sürekli olarak çözülmesiyle gerçeğe daha yakın sonuçlar veren, hatayı minimuma indiren ve uygulanabilirliği kolay olan önemli ve pratik bir yöntemdir. Bu yöntemde belirli bir problemin geometrisi ve sınır şartları sabit tutularak problemin sonuçlarına olan etkisi araştırılan parametre için, dağılım fonksiyonu parametreleri (ortalama değeri ve varyasyon katsayısı) ile rastgele değerler üretilir. Üretilen bu rastgele değerler problemin girdisi olarak analize dahil edilir. Sürekli olarak tekrar edilen ve bu şekilde parametrenin içerdiği belirsizliklerin analize dahil edilerek sonuçlardaki etkisi görülen bu yöntemin tek dezavantajı işlem hacmi fazlalığıdır. Ancak ilerleyen teknoloji ve bilgisayar işlemcilerindeki ve hızındaki büyüme bu dezavantajı çoğunlukla ortadan kaldırmıştır.

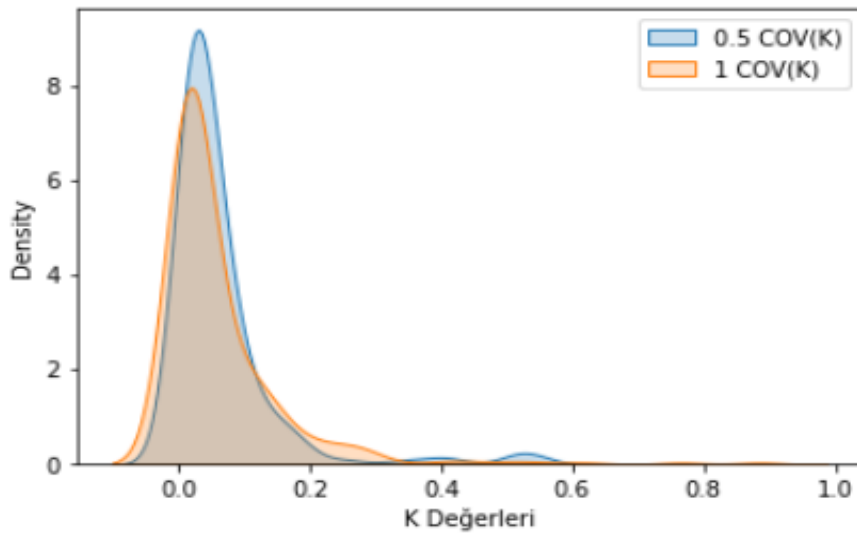
Yapılan çalışmada, sızma miktarı varyasyon katsayısının sabit bir değere yakınlığı simülasyon katsayısı incelenmiştir. Bu noktadan hareket ile 300 simülasyon sayısının yeterli olduğu ortaya çıkmıştır. Bu kararın verilmesi çerçevesinde yapılan simülasyonlar ile sızma miktarı varyasyon katsayısı ilişkisi Şekil 3’te gösterilmektedir.



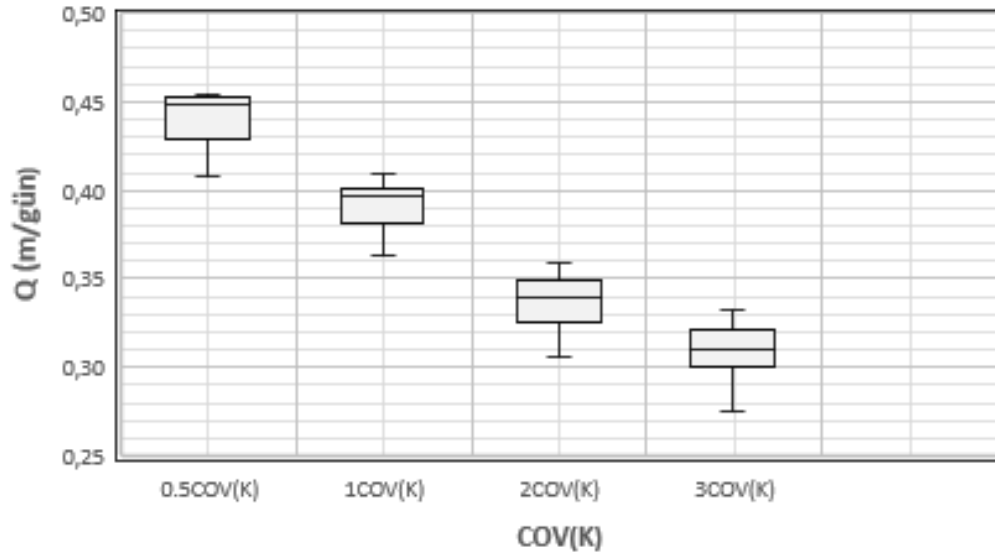
Şekil 3. Simülasyon sayısı ile sızma miktarı varyasyon katsayısı ilişkisi

4. SONUÇLAR

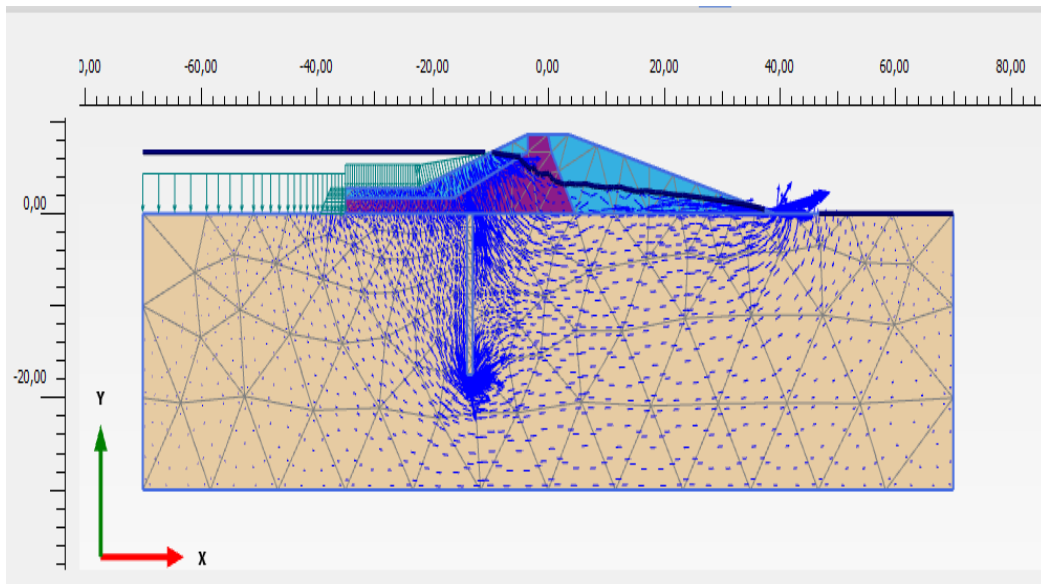
Genel olarak barajların tasarım aşamasında sızma analizleri deterministik olarak gerçekleştirilir. Ancak zeminin geoteknik ve hidrolik parametreleri tasarım aşamasında dikkate alınması gereken düzeyde belirsizlik içermektedir. Bu gerekçe ile yapılan çalışmada aşağıda verilen kutu grafikte de görüldüğü gibi çekirdekte kullanılan kil malzemesinin farklı COV(K) değerlerindeki değişimin kararlı hal sızma üzerinde önemli ölçüde etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Deterministik olarak hesaplanan değerler ile DSi ölçümleri ve çalışma sonuçları karşılaştırıldığında deterministik çözümün ölçülen sızmadan daha büyük olduğu ve stokastik analiz sonuçlarının gerçeğe daha yakın değerler verdiği, ayrıca kilin permeabilite değerinin varyasyon katsayısındaki artışın, sızıntı miktarında bir azalmaya ve değişim derecesinde bir artışa neden olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Kullanılan permeabilite değerlerine ait histogram Şekil 4'te verilmektedir. Elde edilen sonuçlar ise Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmektedir. Tablo 2'de ulaşılan sonuçların istatistiksel verileri sunulmaktadır.



Şekil 4. Farklı varyasyon katsayıları için K değerleri histogramı



Şekil 5. Farklı varyasyon katsayısı değerlerinde hesaplanan debi değerleri



Şekil 6. Sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan sızmanın gösterimi

Tablo 2. İstatistiksel debi sonuçları

Durum	Maksimum Debi (m/gün)	Minimum Debi (m/gün)	Ortalama Debi (m/gün)	COV(Q)
0.5COV(K)	0.454	0.408	0.440	0.090
1 COV(K)	0.409	0.352	0.392	0.123
2COV(K)	0.359	0.306	0.343	0.124
3COV(K)	0.331	0.240	0.275	0.172

KAYNAKLAR

- Ahmed, A. A. (2009). "Stochastic Analysis of Free Surface Flow Through Earth Dams." Computers and Geotechnics, 36(7), 1186–1190.
- Boroomand, M., and Mohammadi, A. (2019). "Evaluation of Earth Dam Leakage Considering the Uncertainty in Soil Hydraulic Parameters." Civil Engineering Journal, CEJ, 5(7).
- Box, G. E. P., and Muller, M. E. (1958). "A Note on the Generation of Random Normal Deviates." The Annals of Mathematical Statistics, 29(2), 610–611.
- Çalamak, M. Uncertainty Based Analysis of Seepage Through EarthFill Dams, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014 .
- Çetin, F. (2009). Türkiye'deki Dolgu Barajların Geçirimsiz Çekirdek Bölgelerinde Kullanılan Malzemelerin Geoteknik Zemin Özelliklerinin İstatistiksel Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, 2009.
- Çilingir H. Toprak Dolgu Barajların Gövdelerindeki Sızmaların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi: Büyükçekmece Barajı Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- PLAXIS 2D Material Models Manuals. (2022). PLAXIS BV. Delft, The Netherlands: P.O. Box 572, 2600 AN.
- PLAXIS 2D (Software). (2022). PLAXIS BV. Delft, The Netherlands: P.O. Box 572, 2600 AN.
- Python version 3 (Programming Language). The Python Software Foundation.
- Pınarcı, E. & Çetin, H. & Taşçı M. (2017). Killi Zeminlerde Permeabilite ve Efektif Gerilmenin Kompaksiyon Enerjisine Bağlı Olarak Değişimi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32(3), ss. 197-204.

SEMBOL LİSTESİ

Kullanılan semboller aşağıda listelenmiştir.

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
COV(K)	Varyasyon Katsayısı	r'	Rastgele normal dağılım sayısı
K	Permeabilite	U_1	Rastgele bağımsız değişken 1
K_s	Doygun permeabilite	U_2	Rastgele bağımsız değişken 2
MCS	Monte Carlo Simülasyonu	μ	Ortalama değer
PDF	Olasılıksal yoğunluk fonksiyonu	Q	Sızma debisi