



T.C.
ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ

PROJE BAŞLIĞI
BARAJ GÖVDESİ VE TEMEL ZEMİNİNDE OLUŞABİLECEK SIZMA
PROBLEMLERİNİN SONLU-SONSUZ ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Proje No:FBA-2019-12058

Proje Türü
BİREYSEL ARAŞTIRMA PROJESİ

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:
Beytullah TEMEL
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Araştırmacı :
Timuçin Alp ASLAN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

TEMMUZ 2022

ADANA

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımız sırasında bize destek olan Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI'ye teşekkür ederiz.

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir **(FBA-2019-12058)**.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
İÇİNDEKİLER	I
ÇİZELGELER DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ	V
ÖZ	VI
ABSTRACT	VII
1. GİRİŞ	1
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
3. MATERYAL VE METOD	9
3.1 SIZMA İLE İLGİLİ GENEL DENKLEMLER	9
3.1.1. DARCY DENKLEMİ	9
3.1.2. SONLU ELEMAN FORMÜLASYONU	12
3.2. SINIR ŞARTLARI	20
4.1. SAYISAL UYGULAMALAR	21
4.1.1. İZOTROP DOLGU BARAJ GÖVDESİNDE SIZMA ANALİZİ	21
4.1.2. ANİZOTROP DOLGU BARAJ GÖVDESİNDE SIZMA ANALİZİ	24
4.1.3. YATAY DRENAJLI ANİZOTROP DOLGU BARAJ GÖVDESİNDE SIZMA ANALİZİ	25
4.1.4. KUYRUK SULU İZOTROP DOLGU BARAJ GÖVDESİNDE SIZMA ANALİZİ	27
4.1.5. İZOTROP DOLGU BARAJ TEMELİNDE SIZMA ANALİZİ	28
4.1.6. GEÇİRİMSİZLİK PERDELİ İZOTROP DOLGU BARAJ TEMELİNDE SIZMA ANALİZİ	30

5. SONUÇLAR	33
KAYNAKLAR	35
EKLER	40

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 3.1. Gauss integrasyon noktası koordinatları ve ağırlık değerleri	19
Çizelge 4.1. Dolgu baraja ait birim genişlikteki sızma debisi ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	22
Çizelge 4.2. Dolgu baraja ait hidrolik yük ve basınç yükü değerleri	23
Çizelge 4.3. Farklı zemin özelliklerindeki dolgu barajlara ait birim genişlikteki sızma debisi ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	24
Çizelge 4.4. Farklı uzunlukta yatay drenaja sahip dolgu barajlara ait birim genişlikteki sızma debisi ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	26
Çizelge 4.5. Dolgu baraja ait birim genişlikteki sızma debisi ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	27
Çizelge 4.6. Baraj temelinden geçen birim genişlikteki sızma debisi ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	28
Çizelge 4.7. Baraja ait hidrolik yük ve basınç yükü değerleri	29
Çizelge 4.8. Farklı uzunlukta geçirimsizlik perdesine sahip dolgu baraj temelinden birim genişlikteki sızma debisi ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	31

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 3.1. Darcy Kanunu ile ilgili deney düzeneği	9
Şekil 3.2. Gözenekli ortamdaki akış için birim kontrol hacmi	11
Şekil 3.3. Hidrolik bir yapının altındaki doymuş geçirgen topraktan su akışı	13
Şekil 3.4. Sekiz düğümlü kuadratik dörtgen eleman	15
Şekil 3.5. 3x3 nokta sayısına göre Gauss integrasyon noktaları	19
Şekil 3.6. Dolgu barajda sızma ve sınır şartları	20
Şekil 4.1. Dolgu baraj gövde kesiti ve özellikleri	21
Şekil 4.2. Dolgu baraj sonlu eleman modeli	22
Şekil 4.3. Dolgu baraj gövde kesiti ve özellikleri	24
Şekil 4.4. Yatay drenajlı dolgu baraj gövde kesiti ve özellikleri	25
Şekil 4.5. Dolgu baraja ait freatik hat	26
Şekil 4.6. Dolgu baraj gövde kesiti ve özellikleri	27
Şekil 4.7. Dolgu baraj gövde-temel kesiti ve özellikleri	28
Şekil 4.8. Geçirimsizlik perdeli dolgu baraj gövde-temel kesiti ve özellikleri	30

ÖZ

BARAJ GÖVDESİ VE TEMEL ZEMİNİNDE OLUŞABİLECEK SIZMA PROBLEMLERİNİN SONLU-SONSUZ ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Bu çalışmada, dolgu baraj gövdesi ve temelindeki 2D boyutlu kararlı durum sızma analizi, Galerkin yaklaşımına dayalı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Gövde ve temel zemini homojen izotropik ve anizotropik malzemeler olarak kabul edilir ve yatay drenaj uzunluğu ve geçirimsiz perdenin sızıntı üzerindeki etkileri araştırılır. Zemindeki suyun tepkisini idare eden diferansiyel denklem, Darcy yasası ve süreklilik denklemleri yardımıyla elde edilir. Baraj gövdesi içindeki noktalarda hidrolik yük, basınç değerleri, freatik hattı ve baraj tabanındaki sızıntı miktarını bulmak için Fortran dilinde bir program hazırlanmıştır. Elde edilen değerlerin literatürdeki mevcut çalışmalar ve paket programların sonuçlarıyla karşılaştırılarak iyi bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Baraj; Sızma analizi; Sonlu elemanlar yöntemi

ABSTRACT

ANALYSIS OF SEEPAGE PROBLEMS IN DAM BODY AND FOUNDATION SOIL WITH FINITE-INFINITE ELEMENTS METHOD

In this study, the 2D steady-state seepage analysis of the embankment dam body and its base is investigated using the finite element method based on the Galerkin's approach. The body and foundation soil are considered as homogeneous isotropic and anisotropic materials and the effects of horizontal drainage length and cutoff wall on seepage are investigated. The differential equation governing the response of water in the soil is obtained with the help of Darcy's law and continuity equations. A program has been prepared in Fortran programming language to find the hydraulic load, pressure values and phreatic line pressure values at the points inside the dam body and the amount of seepage on the bottom of dam. It has been shown that the obtained values are in good agreement by comparing them with the results of existing studies and package programs in the literature.

Keywords: Dam; Seepage analysis; Finite element methods

1.GİRİŞ

1.GİRİŞ

Baraj, su biriktirmek amacı ile hazne oluşturmak üzere bir akarsu vadisini kapatan ve biriken suyu enerji üretimi, içme suyu, tarım alanlarını sulamada kullanılması gibi pek çok farklı amaçla inşa edilen mühendislik yapılarıdır.

Barajlar günümüzde farklı amaçlar doğrultusunda yapılmaktadır. Barajlar; sulama suyu sağlama, içme ve kullanma suyu sağlama, hidroelektrik enerji üretme, endüstri suyu sağlama, taşkın kontrolü, dinlenme yeri sağlama, balıkçılığın geliştirilmesi ve korunması, akarsu ve iç su yolu ulaşımı, akarsu deltalarında tuzluluğun giderilmesi ve katı maddenin tutulması ve kontrolü amaçlarından biri ya da birkaçını karşılamak için kullanılabilir. Ayrıca barajların, yerleşim ve tarım alanlarını taşkınlardan koruma, su üzerinde ulaşım imkanı sağlama, su ürünleri üretimi, rekreasyon ve spor alanlarının oluşumu, toprak erozyonunun önlenmesi veya azaltılması ile toprak muhafazasını sağlama, milli güvenlik üzerinde olumlu etki yapması, iklim üzerinde etkisinin olması, istihdamda olumlu etkisinin olması, su kalitesinin ve kirlenme kontrolünü sağlama gibi bir çok faydası bulunmaktadır.

Günümüzde su kaynaklarına olan ihtiyacın giderek artması büyük su yapıları inşa edilmesini zorunlu hale getirmektedir. Su yapılarının büyüklüğü nispetinde oluşabilecek zararların artması gibi hususlar göz önüne alındığında; bu tür yapıların tekniğine uygun bir şekilde inşa edilmeleri, olası zararlara karşı güvenliklerinin sağlanması, analiz ve tasarımlarının daha hassas olarak yapılmasını gerektirmektedir. Ayrıca bu tür mühendislik yapılarında, zemin içindeki suyun durumu ve hareketi takip edilmelidir. Bu vb. problemlerden biri de, su tutan dolgu barajların gövde ve temel zemininden geçmesi muhtemel su miktarının tespittir. Sızma, barajın memba kısmında biriktirilen suyun kontrolsüz, ölçülemeyen biçimde mansap kısmına doğru devamlı hareketidir. Barajların gövdelerinde meydana gelebilecek sızmalar, haznelerinde su kayıplarına neden olduğu gibi, dolgu içerisinde de erozyon ve borulanmalara sebep olmaktadır. Bu durum, baraj gövdesinde tahribatlara yol açmakta, hatta barajın yıkılmasına sebep olabilmektedir. Bu ve benzeri sebeplerden ötürü, baraj gövde ve temel zemininde meydana gelebilecek sızma problemlerini incelemek önem kazanmaktadır.

1.GİRİŞ

Bu projede, dolgu baraj gövdesi ve temelindeki 2D boyutlu kararlı durum sızma analizi, Galerkin yaklaşımına dayalı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Gövde ve temel zemini homojen izotropik ve anizotropik malzemeler olarak kabul edilir ve yatay drenaj uzunluğu ve geçirimsiz perdenin sızıntı üzerindeki etkileri araştırılır. Zemindeki suyun tepkisini idare eden diferansiyel denklem, Darcy yasası ve süreklilik denklemleri yardımıyla elde edilir. Baraj gövdesi içindeki noktalarda hidrolik yük, basınç değerleri, freatik hattı ve baraj tabanındaki sızıntı miktarını bulmak için Fortran dilinde bir program hazırlanmıştır. Elde edilen değerlerin literatürdeki mevcut çalışmalar ve paket programların sonuçlarıyla karşılaştırılarak iyi bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatür incelendiğinde, zamana bağlı-zamandan bağımsız sızma problemlerinin çözümü için sonlu elemanlar metodu, sonlu farklar metodu, sonlu hacimler yöntemi, sınır elemanlar yöntemi ve akım ağları analizi vb. birçok yöntem kullanıldığı görülmüştür.

Sızma analizinin temeli 1856 yılında Darcy tarafından gerçekleştirilmiştir. Darcy araştırmalarının sonunda, toprak gibi ince geçirgen ortamlarda hidrolik eğimin birinci dereceden etkili olduğuna bağlı olarak, eğimin etkisi altında su sızmalarının gerçekleştiği üzerine çalışmalar yapmıştır. Daha sonraları 1880'lerde Forchheimer; su basıncının yayılması ve suyun hızının, Laplace diferansiyel denklemleriyle bulunabildiğini göstermiştir. Birbirlerinden bağımsız olarak 1900'lerin başlarında Almanya'da Forchheimer, İngiltere'de de Richardson etkili bir grafik metod geliştirerek Laplace denkleminin hemen hemen doğru sonuçlar verdiğini kanıtlamışlardır. Fakat bu metod 1937'de Casagrande çok yönlü yazısını yayınlayana kadar toprak barajlar için çok fazla kullanılmamıştır. Daha sonraları Laplace denkleminin sonuçları sızma analizi için standart işlem haline gelmiştir.

Sonlu elemanlar yönteminin sınırlandırılmış sızma akımına uygulanması ilk kez Zienkiewicz ve ark. (1966) tarafından yapılmış ve zonlu izoparametrik olmayan akım bölgeleri için çözümler toplam enerji $h(x,y)$ 'nin dağılımı şeklinde elde edilmiştir. Aynı problemin sınırlandırılmamış akıma uygulanması Finn (1967), King ve Chowdury (1971), tarafından ele alınmış ve ilave olarak akımın debisi de hesaplanmıştır. Cividini ve Gioda (1984) tarafından serbest yüzeyli sızma akımı analizi için adım adım yaklaşık sonlu eleman çözümü yapılmıştır. Tracy ve Marino (1987), doygun gözenekli ortamda sızma olayını Galerkin sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Zhao ve Vallappan (1993), sonsuz ortamdaki zamana bağlı sızma problemlerinin çözümünü incelemişlerdir. Mevcut sonsuz elemanın doğruluğunu ve etkinliğini incelemek için, hem yarı-sonsuz bir ortamda, bir boyutlu (1 D) sızıntı problemi hem de tam bir düzlemde 2 boyutlu zamana bağlı sızma problemini sonlu ve sonsuz eleman tekniği kullanarak çözmüşlerdir. Sonlu ve sonsuz elemanlardan elde edilen matrislerin çözümü, merkezi sonlu farklar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Lam ve ark.(1987), doymuş ve doymamış zeminler için zamandan bağımsız sızma modeli olan geoteknik mühendislik yaklaşımını önermişlerdir. İki boyutlu akım denklemi, sonlu elemanlar yöntemiyle çözülmüştür. Galerkinin ağırlıklı artıklar yöntemine dayalı diferansiyel denklemlerin

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

çözümünde üçgen eleman kullanılmıştır. Bulduğu sonuçları karşılaştırmak için sonlu eleman tabanlı TRAASE isimli bilgisayar programı kullanmıştır.

Ardıçlıoğlu (1990), toprak dolgu baraj gövdelerindeki düzenli iki boyutlu sızma akımının analizi için sonlu elemanlar yöntemini ele almış ve bu yönteme dayalı bir bilgisayar programı geliştirmiştir. Bu program ile akım bölgelerindeki eleman düğümlerindeki boşluk suyu basınçları, dolgunun birim genişliğinden geçen sızma debisi ve sınırlandırılmış akımdaki serbest su yüzünün yeri hesaplanmıştır. Güngör (1995), toprak dolgu barajların haznelerinden sızan sudan dolayı, baraj gövdesinde ve tabanında meydana gelen akım olayını nümerik olarak incelemiştir. Bunun için olayın sonlu elemanlar modeli kurmuş, yazılan bilgisayar programı yardımıyla tüm alan için matematiksel bağıntı çözmüş, baraj gövdesi ve tabanındaki akımın, hız ve potansiyel dağılımı elde etmiştir. Keskin (2005), çeşitli palplanş, bağlama ve toprak dolgu barajların gövdesindeki ve altındaki sızmadan dolayı meydana gelen potansiyel ve hız dağılımları, sonlu elemanlar yöntemiyle iki boyutlu olarak ele almıştır. Çilingir (2007), matematiksel model olarak seçilen Büyükçekmece barajının gövdesinde oluşan sızmaların sonlu elemanlar yöntemi ve Geo-Studio bilgisayar programından yararlanmak suretiyle sızma analizleri yapmıştır. Elde edilen sonuçlar DSİ'nin yapmış olduğu sızma gözlemleri verileri ile karşılaştırmıştır.

Fakhari ve Ghanbari (2013) ise çalışmalarında, kil çekirdekli bir baraj gövdesinden geçen toplam sızma miktarı için yeni bir formül geliştirmiş ve diğer tüm debi hesaplama yöntemleriyle karşılaştırmalarını yapmışlardır. Ayrıca, GeoStudio SEEP/W programı ile bu yapılan karşılaştırmalar değerlendirmiştir. Çelik (2014), İkizdere Barajı gövde en kesitlerinde Seep/W programıyla iki boyutlu sızma analizi yapmıştır. Programa girilen modelin malzeme parametrelerinin seçiminde proje paftalarında sunulan laboratuvarı deney sonuçlarından ve literatürden faydalanmıştır. Yapılan analizlerin neticesinde inşaat sonu baraj gövdesinde oluşan sızma değerleri ile teoride olması öngörülen sızma değerleri karşılaştırılmıştır. Gürarslan (2004), iki boyutlu yeraltı suyu akımı incelenerek sayısal bir model geliştirmiştir. Yeraltı suyu akımına ait değişken zemin özelliklerini içeren zamana bağlı kısmi diferansiyel denklem; belirli sınır koşulları altında, düzensiz sonlu fark hesap şeması kullanılarak çözmüştür. Sağlıca (2013), mevcut tez çalışmasında önemli bir yere sahip olan sonlu farklar hesap yöntemi ile sızma analizi yapan bir program yazmış ve analiz sonucunda elde edilen değerlerin diğer yöntemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmalarını yapmıştır. Kesgin (2015), tipik bir toprak dolgu baraj tipi atık barajın sonlu farklar yardımıyla oluşturulmuş yeni bir matematik model ile sızma mekanizması incelenmiştir. Atık baraja ait sızma ağı çıkartılmış, sızma miktarı ise sonlu

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

elemanlar tabanlı GeoStudio SEEP/W programı ile mukayese edilmiştir. Freatik hattın belirlenmesinde ve hesaplanmasında kullanılan yöntemleri açıklamıştır. Chang (1988), serbest bölgedeki zamana bağlı-zamandan bağımsız sızma problemleri için sınır eleman formülasyonunu uygulamıştır. Bu yöntemin uygulanabilirliğini, sayısal çözümler ile ölçülen laboratuvar ve saha verileri arasındaki karşılaştırmalara dayanarak değerlendirmiştir. Da Veiga (1994), sınırlandırılmış serbest yüzey sızıntı problemleri belirtmiş ve sınır koşullarıyla ilişkili olayı yöneten diferansiyel denklemler hem sınır elemanları yöntemleri (BEM), hem de sonsuz sınırlar üzerindeki sonsuz elemanlar (IEM) ile sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak çözmüştür. Darbandi ve ark (2007) çalışmalarının temel amacı değişik geometri alanlardaki sızma problemini çözebilen yeni bir hareketli kafes sonlu hacim yöntemi geliştirmişlerdir. Sızma probleminin çözümlenmesinde, çözümün başında bilinmeyen freatik sınırın pozisyonunun belirlenmesini göstermiştir. Rafiezadeh ve Ataie-Ashtiani (2013), çok alanlı genel anizotropik ortamda sızma analizi için, üç boyutlu sınır elemanı çözümü, dönüşüm yaklaşımını temel alınarak geliştirmişlerdir.

Chen ve Song (2015), serbest alanda zamana bağlı sızma problemleri için yeni bir yapay sınır yaklaşımı sunmuştur. Kesikli sınırdaki yapay sınır şartı, çözeltiler de dahil olmak üzere bir boyutta geçici sızıntı problemleri için analitik çözümlerden türetmiş, tek boyutlu problemlerin yanı sıra bazı iki boyutlu problemler için geçici olarak uygulamıştır. Ouria ve Toufigh (2009), serbest sızma problemini çözmek için Nelder-Mead basit optimizasyonuna dayanan mesh deforme sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. El-Jumaily ve Al-Bakry (2013) hidrolik yapıların altındaki ve içindeki sızıntı analizi, yapının parçalara ayrılmasına gerek kalmadan aynı anda incelenmekte ve daha sonra her bir parçayı ayrı ayrı analiz etmektedir. Analiz, dikdörtgen elemanlar kullanılarak sonlu hacim yöntemi ile incelenmiştir. Papacianakis ve Fredlund (1984), Doymuş ve doymamış zemin arasındaki sürekli akışı tanımlayan bir model önermiştir. Akışın iki boyutlu halde zamandan bağımsız durum koşulları altında olduğu kabul etmişlerdir. Doymamış bölgede, geçirgenlik katsayısı, gözenekli su basınç yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak ele alınır. Akışı yöneten doğrusal olmayan diferansiyel denklem, iteratif bir sonlu elemanlar şeması kullanılarak çözülmüştür. Yılmaz (1999), baraj altından sızıntı problemini çözmek amacıyla sabit grid yapısı kullanarak iki boyutlu homojen izotrop halde zamandan bağımsız yeraltı suyu akım denklemini MS-Excel'deki döngüsel başvurudan yararlanarak ETP aracılığıyla çözmüştür. Sonlu fark denklemleri kütlenin korunumu prensibiyle türetilmiştir. Leontiev ve Huacasi (2000), basınçsız sızma akım problemleri için matematiksel programlama yaklaşımını geliştirmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Thieu ve ark.(2000), geçirimli-geçirimsiz zeminlerde sızma analizi için genel kısmi diferansiyel denklem çözümleri sunmuşlardır. Malzeme heterojen anizotropdur. Literatürde bulunan farklı permeabilite katsayısı için zamana bağımlı-zamandan bağımsız sızma analizlerini yapmış ve bunları karşılaştırmıştır. Çözümlerde PDEase2D programını kullanmıştır. Leontiev ve Huacasi(2001), gözenekli ortamda serbest bölgede zamandan bağımsız akışın sayısal simülasyonu için matematiksel bir programlama tekniği sunmuştur. Özgün serbest sınır problemini bir şekil optimizasyon problemi olarak düşünerek, sınır elemanları ayırıklaştırma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Xu (2002), Doygun-doygun olmayan sızma akımı modelini kullanarak dolgu barajların optimum hidrolik tasarımını ele almıştır. Ayvaz (2004), toprak dolgu barajlarda meydana gelen serbest yüzeyli sızma olayını incelemiştir. Değişken grid yapısı kullanılarak zamana bağlı heterojen anizotrop ortam için sızma olayına ait kısmi diferansiyel denklem Elektronik Tablolama Programı (ETP) aracılığıyla iteratif adım metodu (Değişken Doğrultulu İteratif İmplicit Metod) ile çözmüştür. Mesci (2006), baraj gövdelerinde meydana gelen sızmaların belirlenmesi için kullanılan metotlar incelemiş ve bu metotlar ile suyun gövde içindeki akışı belirlenerek toplam sızma miktarları hesap etmiştir. Ayrıca akım çizgileri ve eş potansiyel çizgiler hesap edilerek grafiksel olarak değerlendirilmiştir.

Stucchi ve ark (2010) istinat veya ankastre yapılarda deprem etkileriyle doymuş zeminler içindeki sızma analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında sızma akışının zamana bağlı analizini deşarj hızı yaklaşımı ve gözenek basıncı yaklaşımı olmak üzere iki tane sonlu eleman yaklaşımı ile incelemiştir. Şekil değiştirme-deplasman bağıntılarını kullanarak elde ettiği denklemleri sınır koşulları yardımıyla çözmüştür. Çakır (2011), iki boyutlu yeraltı suyu akımı incelenerek kollokasyon yöntemi ile sayısal bir model geliştirmiştir. Karşılaştırma amacıyla kapalı ve açık formda sonlu farklar yöntemi ile de çözüm yapılmıştır. Programlamada MATLAB programı kullanılmıştır. Brahma ve Harrar (2016) geçirimsiz bir alt sınıra sahip homojen bir toprak barajda zamana bağlı sızıntıyı incelemektedir. Çözümlerde Hele-Shaw viskoz model deneyinden elde edilen sonuçlarla analitik sonuçları kıyaslamıştır.

Yuan ve Zhong (2016), üç boyutlu sınırlandırılmamış sızma problemleri analizi için zayıf formulu kuadratik eleman yöntemini kullanmışlardır. Zhang ve ark. (2017) incelemelerinde, sızma analizini araştırırken serbest su yüzeyinin belirlenmesi için Monte Carlo integrasyonu ile hareketli Kriging Meshsiz yöntemini önermişlerdir. Khassaf ve Madhloom (2017), çekirdek geçirgenliğini ve çekirdek kalınlığını değiştirmenin etkisiyle çekirdek bölgeyi toprak barajlarda meydana gelen sızıntı miktarını, sonlu eleman yöntemi SLIDE V.5.0

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

yazılımıyla bulmuşlardır. Zewdu (2019), Koga toprak dolgu baraj gövde ve temelinde meydana gelen sızma miktarını sonlu eleman tabanlı PLAXIS 2D yazılımını kullanarak hesaplamıştır. Taghvaei ve ark. (2014), SEEP/W yazılımını kullanarak farklı kil-kum bileşimlerinde zemin toprak barajının sayısal modelini hazırlamışlar ve deneysel sonuçlarla doğrulamışlardır. Doaa ve Molla makalelerinde (2019) geçirimsiz temel üzerinde oluşturulan bir toprak barajının kesiti boyunca toplam sızıntı hızları üzerinde palplanş varlığının yanı sıra, yüksekliği ve konumunun etkisini belirlemeyi amaçlamışlardır. Sanayei ve Javdanian (2020), simetrik olmayan sınır koşullarına sahip barajlardan kararlı halde sızma olayı için yeni bir analitik çözüm geliştirmişlerdir. Barajlarda, iki boyutlu durumlar için simetrik olmayan sınır koşulları, baraj düzleminin mansap kısmında farklı birim basamak fonksiyonları ile oluşturmuşlardır. Salmasi ve ark. (2020), baraj temelinde meydana gelen sızma olaylarında geçirimsizlik perdesi ve mansap filtrelerinin etkisini araştırmak için sonlu eleman yöntemini ve sayısal modeli doğrulamak için deneysel verileri kullanmışlardır. Javdanian ve Shams [24], kil çekirdekli set barajlarının altındaki sızmayı sonlu eleman tabanlı SEEP/W programını kullanarak hesaplamışlar ve sonuçlarının doğruluğunu fiziksel modelleme sonuçlarıyla karşılaştırarak göstermişlerdir.

Yapılan araştırmalar sonucunda baraj gövdelerinde ve temelinde meydana gelen sızma miktarını belirlemede farklı yöntemlerle birçok çalışmaya rastlanmaktadır. Bu çalışmada baraj gövdelerinde ve temelinde zamandan bağımsız halde meydana gelen sızma miktarı sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Sızma problemleri için genel amaçlı Fortran dilinde bilgisayar programı hazırlanmış ve elde edilen sonuçların doğruluğu, literatürde mevcut çözümler ile karşılaştırmalar yapılarak gösterilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

3. MATERYAL VE METOD

3. MATERYAL VE METOD

3.1 SIZMA İLE İLGİLİ GENEL DENKLEMLER

3.1.1.DARCY DENKLEMİ

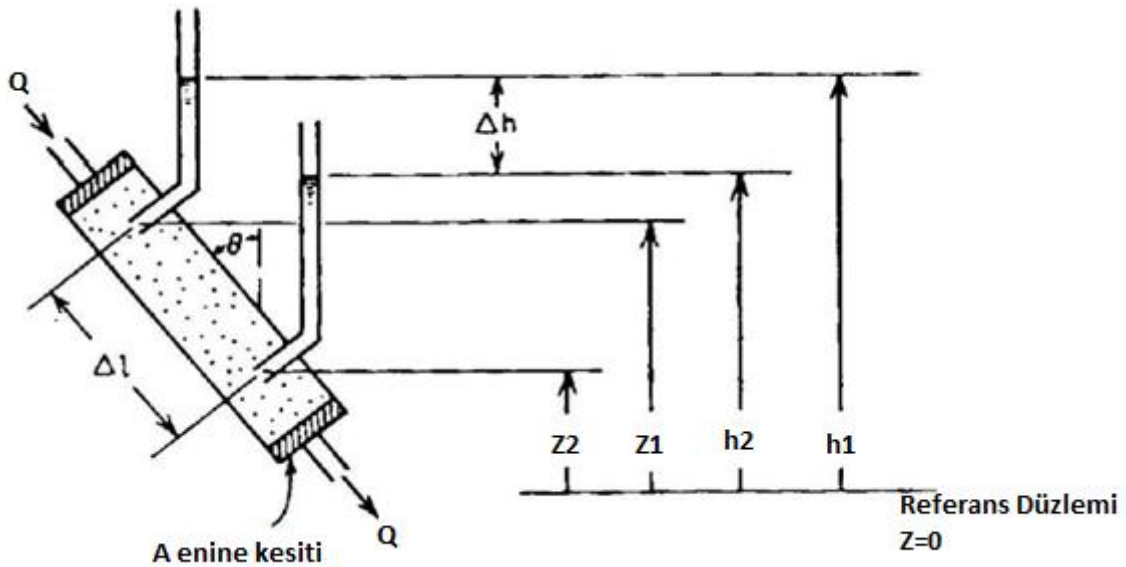
Fransız mühendis Darcy, toprak içerisindeki akışı incelemesiyle kohezyonsuz, granüler olan homojen ortamlarda suyun hareketini belirleyen bir takım deneyler yapmıştır. Deneyler sonucunda Darcy kanunu olarak da bilinen Şekil 3.1.'de de ifade edildiği gibi sızan su debisinin Q ($m^3/sn.$), kesit alanı A ve hidrolik eğimi (i) ifade eden $\Delta h/L$ ile orantılı olduğunu bulmuştur. Buna göre silindir içindeki özgül debi hızı v 'yi;

$$v = \frac{Q}{A} \quad (3.1.)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Q 'nun boyutunun L^3/T ve A 'nın ki $[L^2]$ olduğu zaman v 'nin boyutu hız boyutu $[L/T]$ olur.

Darcy tarafından yapılan deneyler Δl sabit olduğu zaman v 'nin $h_1 - h_2$ ile doğru orantılı ve $h_1 - h_2$ sabit olduğu zamanda Δl ile ters orantılı olduğunu göstermiştir. $\Delta h = h_1 - h_2$ olursa Darcy yasası



Şekil 3.1. Darcy Kanunu ile ilgili deney düzeneği

$$v = -K \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (3.2.)$$

3. MATERYAL VE METOD

şeklinde ya da

$$v = -K \frac{dh}{dl} \quad (3.3.)$$

diferansiyel formunda yazılabilir.

Darcy yasasının bir alternatif formu (3.1.) eşitliği (3.3.) eşitliğine konularak elde edilebilir:

$$Q = -K \frac{dh}{dl} A \quad (3.4.)$$

Bu eşitlik bazen daha da kısaltılarak,

$$Q = -Ki A \quad (3.5.)$$

şeklinde yazılmaktadır. Bağlıntıdaki i hidrolik eğimdir.

Laminer akım durumu için geçerli olan Darcy yasası ampirik bir yasa olup sadece deneysel kanıtlara dayanmaktadır. Darcy yasasını daha temel fiziksel yasalardan türetmek için pek çok teşebbüste bulunulmuştur. (Bear, 1987), bu çalışmaları da derinlemesine incelemiştir. En başarılı yaklaşımlar, akışkanlar mekaniğinde çok iyi bilinen Navier-Stokes denklemlerinin, gözenekli ortamın idealize edilmiş kavramsal modelinin gözenek kanallarındaki su akışına uygulanması şeklinde olmuştur.

Anizotropi özelliği gösteren bir ortamda üç boyutlu akışta tek boyutlu Darcy yasasını genelleştirmek gerekecektir. Bileşenleri v_x, v_y, v_z üç boyuttaki hız v bir vektör olup en basit genelleştirilmesi,

$$v_x = -K_x \frac{dh}{dx}$$

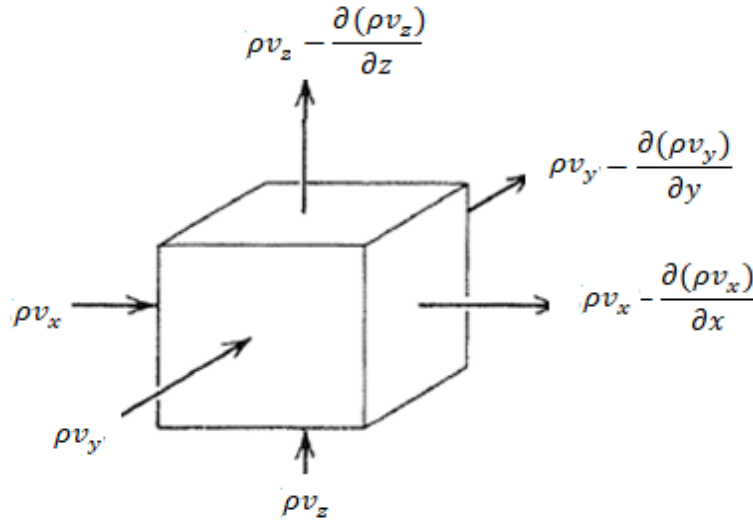
$$v_y = -K_y \frac{dh}{dy}$$

$$v_z = -K_z \frac{dh}{dz}$$

3. MATERYAL VE METOD

şeklinde. Denklemleri K_x, K_y, K_z ; x, y, z yönlerindeki yönlerindeki hidrolik iletkenlik değerleridir (Freeze and Cherry, 2003).

Gözenekli ortamın bir birim hacmini (Şekil 3.2.) göz önüne alalım. Böyle bir eleman çoğu zaman birim kontrol hacmi olarak anılır. Doygun gözenekli ortamda zamana bağlı akışın kütle korunumu yasasına göre, kontrol hacmine giren akışkan kütlesi akışının net miktarı, elemandaki akışkan kütlesi depolamasındaki değişimin zamansal miktarıdır. Süreklilik denklemi Şekil 3.2. baz alınarak,



Şekil 3.2. Gözenekli ortamdaki akış için birim kontrol hacmi

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + R = \frac{\partial(\rho n)}{\partial t} \quad (3.6.)$$

şeklini alır. Ya da, denklemin sağ tarafı açılacak olursa:

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + R = n \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial n}{\partial t} \quad (3.7.)$$

(3.7) denkleminde R, birim zamanda birim hacime gelen iç hidrolik yük miktarı, denkleminin sağ tarafındaki ilk terim, ρ yoğunluğundaki değişim altında suyun genişlemesi ile üretilen suyun kütle oranıdır. İkinci terim ise, n gözenekliliğindeki değişim altında gözenekli ortamın kompaksiyonu ile üretilen suyun kütle oranıdır. Birinci terim akışkanın sıkışabilirliği α tarafından kontrol edilir. ρ 'daki değişim ve n 'deki değişimin ikisinde de hidrolik yük h 'daki değişim ile meydana geldiğini ve ayrıca yükteki birim azalış için bu iki mekanizma ile üretilen

3. MATERYAL VE METOD

suyun hacminin S_s (depolama katsayısı) olduğunu biliyoruz. Üretilen suyun kütle oranı $\rho S_s \partial h / \partial t$ 'dir ve (3.8.) denklemi şu şekli alır:

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + R = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.8.)$$

Suyun yoğunluğu sabit kabul edilirse (3.8.) denkleminin iki tarafındaki ρ terimleri sadeleşir.

Bu denklemde, hız terimi Darcy yasasına göre yazılırsa (2.10.) denklemini elde ederiz.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{dh}{dx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{dh}{dy} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{dh}{dz} \right) + R = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.9.)$$

Denklem (3.9.), doymun, anizotrop gözenekli ortamdaki zamana bağlı olan akışın denklemini temsil etmektedir. Ortam homojen ve izotrop olursa (3.10.) denklemi elde edilir.

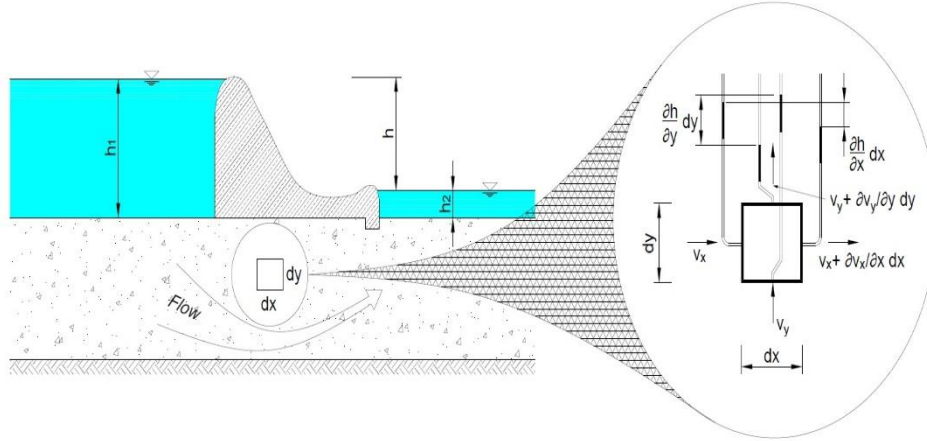
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + R = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.10.)$$

3.1.2. SONLU ELEMAN FORMÜLASYONU

Sonlu elemanlar metodu nümerik çözüm yöntemlerindendir. Bu metotta incelenecek bölge, belli büyüklükte ve boyutta sonlu sayıda elemanlara ayrılır ve elemanların birbirlerine bağlı oldukları düğüm noktaları ile temsil edilir. Burada baraj tabanı iki boyutlu olarak incelenmiştir. Bu çalışmada baraj tabanı için izoparametrik sekiz düğümlü, kuadratik eleman kullanılmaktadır.

Bu proje kapsamında sızma analizi zamandan bağımsız olarak incelenmektedir. İki boyutlu geçirimli, anizotropik (Şekil 3.3.) bir zemin içerisindeki sızma olayı Darcy yasası ve süreklilik denklemleri yardımıyla aşağıdaki kısmi diferansiyel denklem ile ifade edilmektedir (Harr,1962).

3. MATERYAL VE METOD



Şekil 3.3. Hidrolik bir yapının altındaki doymuş geçirgen topraktan su akışı

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (3.11.)$$

Zeminlerde su akımını tanımlayan genel diferansiyel denklemdir. Bu denklem hidrolik yükün akım bölgesi içinde değişimini matematiksel olarak ifade etmektedir. Bu denklem çözülerek akım bölgesinde bütün noktalarda toplam hidrolik yükün değeri elde edilmektedir. Daha sonra, hidrolik eğimler, akım hızları, akım miktarı ve sızma basınçları kolaylıkla bulunmaktadır.

Yukarıda verilen denkleme ağırlıklı artıklar yöntemi uygulandığında;

$$\int \int_{A_e} \psi \left(K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) dA = 0 \quad (3.12.)$$

diferansiyel denklemi integral formda yazılmaktadır. ψ ağırlık fonksiyonu ve A_e elemanın alanıdır. Kısmi integrasyon yapıldığında,

$$\int \int_{A_e} \left(K_x \frac{\partial \psi}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + K_y \frac{\partial \psi}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) \right) dx dy - \int_r \underbrace{\psi \left(\frac{\partial h}{\partial x} n_x + \frac{\partial h}{\partial y} n_y \right)}_q d\sigma = 0 \quad (3.13.)$$

3. MATERYAL VE METOD

şeklini almaktadır. Bu ifadelerde, ikinci kısım sınır şartlarını temsil etmekte olup, formülasyonda Γ , elemanın sınırını, n_x ve n_y ise sınırın birim vektör bileşenlerini, q ise sınır boyunca akışı ifade etmektedir. $[N]$, elemanın hidrolik yük için şekil fonksiyonu matrisini, σ ise saatin tersi yönünde sınır boyunca integrasyon değişkenini göstermektedir.

Galerkin yönteminde hidrolik yükün varyasyonu ağırlık fonksiyonları olarak,

$$\psi = \delta h \quad (3.14.)$$

dikkate alınmaktadır. Ağırlık fonksiyonları yerine yazıldıktan sonra (3.15.) denklemi elde edilmektedir.

$$\int \int_{A_e} \left(K_x \frac{\partial(\delta h)}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + K_y \frac{\partial(\delta h)}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) \right) dx dy - \int_{\Gamma} (\delta h) q d\sigma = 0 \quad (3.15.)$$

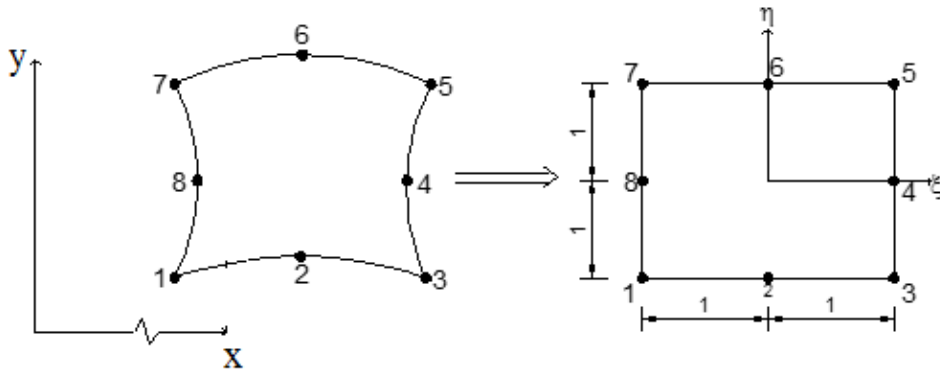
Matris formuna dönüşmektedir. Elemanın herhangi bir noktasındaki hidrolik yükler (3.16.) denkleminde verilmektedir.

$$\{h\} = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4 \ N_5 \ N_6 \ N_7 \ N_8] \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \\ h_8 \end{Bmatrix} = [N] \{\Delta\} \quad (3.16.)$$

Burada $[N]$, şekil fonksiyonları matrisi ve $\{\Delta\}$, eleman hidrolik yükleridir.

Baraj zemininde ve gövdesinde meydana gelen kararlı durum için sızma probleminin incelenmesinde sekiz düğümlü kuadratik dörtgen eleman kullanılacaktır.

3. MATERYAL VE METOD



a) Gerçek eleman

b) Referans elemanı

Şekil 3.4. Sekiz düğümlü kuadratik dörtgen eleman

Kuadratik dörtgen elemanda herhangi bir noktanın koordinatları şekil fonksiyonlarına bağlı olarak,

$$x = \sum_{i=1}^8 N_i x_i \quad y = \sum_{i=1}^8 N_i y_i \quad (3.17.)$$

şeklinde verilmektedir. Burada x_i ve y_i düğümünün koordinatları olup, kuadratik N_i şekil fonksiyonları aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(-1 + \xi)(1 - \eta)(1 + \xi + \eta) \\ N_2 &= \frac{1}{2}(-1 + \xi^2)(-1 + \eta) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1 + \xi)(-1 + \eta)(1 - \xi + \eta) \\ N_4 &= \frac{1}{2}(1 + \xi)(1 - \eta^2) \\ N_5 &= \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta)(-1 + \xi + \eta) \\ N_6 &= \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 + \eta) \\ N_7 &= \frac{1}{4}(-1 + \xi)(1 + \eta)(1 + \xi - \eta) \\ N_8 &= \frac{1}{2}(-1 + \xi)(-1 + \eta^2) \end{aligned} \quad (3.18.)$$

İzoparametrik elemanlarda geometrik şekil fonksiyonları ile interpolasyon şekil fonksiyonları aynıdır. Böylece, elemanın herhangi bir noktasındaki hidrolik yük şekil fonksiyonlarına bağlı olarak

3. MATERYAL VE METOD

$$h(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) \mathbf{h}_i \quad (3.19.)$$

eleman düğüm yükleri yardımıyla hesaplanabilmektedir. (3.16.) ifadesi (3.15.) da yerine konulursa

$$\int \int_{A_e} \left(K_x \frac{\partial(\delta h)}{\partial x} \left(\frac{\partial[N]}{\partial x} \{\Delta\} \right) + K_y \frac{\partial(\delta h)}{\partial y} \left(\frac{\partial[N]}{\partial y} \{\Delta\} \right) \right) dx dy - \int_r (\delta h) q d\sigma = 0 \quad (3.20.)$$

elde edilir.

(3.20.) denklemi hidrolik yük gradyan vektörüne dayanmaktadır. Bu gradyan, interpolasyon fonksiyonunun türevlerini içeren $[B]$ matrisi vasıtasıyla belirlenebilir.

$$\{gv\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial[N]}{\partial x} \\ \frac{\partial[N]}{\partial y} \end{bmatrix} \{h\} = [B] \{h\} = [B] \{\Delta\} \quad (3.21)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Buna göre hidrolik yük varyasyonları da ;

$$\begin{aligned} \delta h &= [N] \{\delta \Delta\} \\ \delta h^T &= \{\delta \Delta\}^T [N]^T \end{aligned} \quad (3.22.)$$

olur. (3.21.), (3.22.) eşitlikleri (3.20.) yerine yazıldığında,

$$\int \int_{A_e} \left(K_x \frac{\partial[N] \{\delta \Delta\}}{\partial x} \left(\frac{\partial[N]}{\partial x} \{\Delta\} \right) + K_y \frac{\partial[N] \{\delta \Delta\}}{\partial y} \left(\frac{\partial[N]}{\partial y} \{\Delta\} \right) \right) dx dy + \int_r [N] \{\delta \Delta\} q d\sigma = 0 \quad (3.23.)$$

denklemi edilir. Bu ifade (3.24.) de düzenlenirse

$$\{\delta \Delta\}^T \left(\int \int_A ([B]^T [K] [B]) \{\Delta\} dA - \int_r [N]^T q d\sigma \right) = 0 \quad (3.24)$$

şeklini almaktadır. (3.24.) denkleminde $[K]$, iletkenlik katsayılar matrisidir.

3. MATERYAL VE METOD

$$[K] = \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix}$$

Buradan

$$[s_e]_{(8 \times 8)} = \int \int_A [B]^T [K] [B] dA \quad (3.25.)$$

$$\{f_s\}_{(8 \times 1)} = \int_r ([N]^T q) d\sigma$$

tarifleri yapıldığında eleman denklemi,

$$[s_e]\{\Delta\} = \{f_s\} \quad (3.26.)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada $[s_e]$ eleman iletkenlik matrisi, $\{\Delta\}$, eleman hidrolik yük vektörünü, $\{f_s\}$, elemanın sınır yük vektörünü ifade etmektedir. $\{f_s\}$, sınır üzerinde olmayan düğümlerde 0 (sıfır) değerini almaktadır.

Problemin çözümünde

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix}$$

yazılır. Burada $[J]$, gerçek eleman ile referans elemanı arasında geçişi sağlayan Jacobian dönüşüm matrisi olup, şekil fonksiyonları cinsinden,

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^8 \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} x_i & \frac{\partial N_i}{\partial \xi} y_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} x_i & \frac{\partial N_i}{\partial \eta} y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(N_1 N_2 \dots N_8)}{\partial \xi} \\ \frac{\partial(N_1 N_2 \dots N_8)}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ x_8 & y_8 \end{bmatrix}$$

olarak hesaplanmaktadır. Şekil fonksiyonlarının koordinatlara göre türevleri,

3. MATERYAL VE METOD

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det[J]} \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial \eta} & -\frac{\partial y}{\partial \xi} \\ -\frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix}$$

bulunur. Burada $\det[J]$, Jacobian matrisinin determinantıdır. Ayrıca (x,y) koordinatlarındaki elementer bir alan,

$$dA = dx dy = \det[J] d\xi d\eta$$

Şeklinde ifade edilmektedir. (2.26) da verilen eleman iletkenlik matrisi, (ξ, η) koordinatlarında,

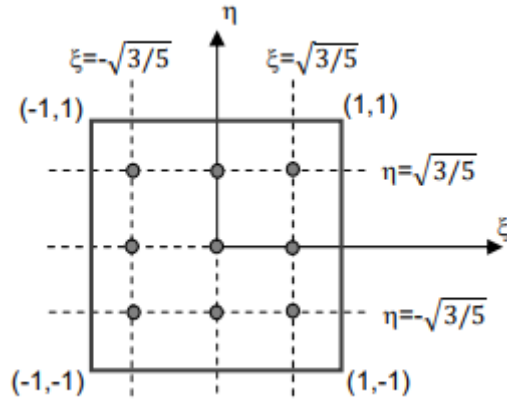
$$\begin{aligned} [s_e] &= \int_A [B]^T [K] [B] dA = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [B]^T [K] [B] \det[J] d\xi d\eta \\ &= \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [s(\xi, \eta)] d\xi d\eta \end{aligned}$$

şekline dönüşmektedir. Burada, $[s_e(\xi, \eta)] = [B]^T [K] [B] \det[J]$ olarak tarif edilmektedir. İfadesinin integrali, standart Gauss-Legendre sayısal integral yön temiiyle hesaplanmaktadır. Bu çalışmada hem ξ hem de η yönlerinde, 3 Gauss noktası seçilmektedir. Buna göre

$$[s_e] = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [s(\xi, \eta)] d\xi d\eta \cong \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 w_m w_n [s(\xi_m, \eta_n)]$$

olur. Burada, w_m ve w_n , Gauss formülündeki ağırlık değerleridir. ξ_m ve η_n ise, Gauss integrasyon noktalarının koordinatlarıdır.

3. MATERYAL VE METOD



Şekil 3.5. 3x3 nokta sayısına göre Gauss integrasyon noktaları

Çizelge 3.1. Gauss integrasyon noktası koordinatları ve ağırlık değerleri

Gauss noktası sayısı	İntegrasyon noktası koordinatları ξ_i, η_j	İntegrasyon ağırlık değerleri w_i, w_j
3x3	0.00	8/9
	$\pm\sqrt{3/5}$	5/9

Herhangi bir akım bölgesinde ise elemanların katkısı alınarak sistem sızma matrisi ve sistem yük vektörü oluşturulur.

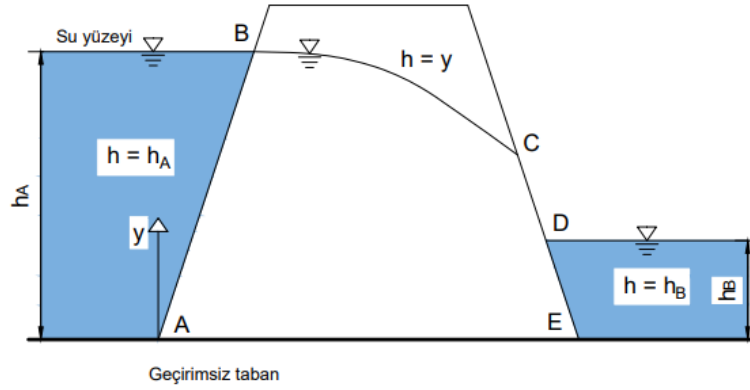
$$[S]\{\Delta\} = \{F\} \quad (3.27.)$$

Burada $[S]$, sistem sızma matrisi, $\{\Delta\}$ tüm düğümler için hidrolik yük vektörü ve $\{F\}$ sistem yük vektörüdür. Belirlenen sınır şartları altında sayısal çözümü yapılarak düğüm noktalarındaki toplam hidrolik yük bulunur. Daha sonra, hidrolik eğimler, akım hızları, akım miktarı ve sızma basınçları kolaylıkla hesaplanabilecektir.

3. MATERYAL VE METOD

3.2. SINIR ŞARTLARI

Mansap bölgesinde kuyruk suyu bulunan dolgu baraja ait sızma problemleri için sınır şartları Şekil 3.6.'da verilmektedir.



Şekil 3.6. Dolgu barajda sızma ve sınır şartları

$h = h_A$	AB (Memba)
$h = h_B$	ED (Mansab)
$\left\{ \begin{array}{l} h = y \\ \frac{\partial h}{\partial n} = 0 \end{array} \right\}$	BC (Freatik hat)
$h = y$	CD (Sızma yüzeyi)
$\frac{\partial h}{\partial n} = 0$	AE (Geçirimsiz taban)

Şekil 3.6.'daki BC su yüzeyinin konumu belli olmadığından sonlu eleman analizinin iteratif çözümünü gerektirir. Öncelikle yüzeydeki i düğümler için $h = y_i$ alınarak tahmini bir sızma hattı belirlendikten sonra çözüm yapılır. Sonra $h = \bar{h}$ için çözüm yapılarak ($\bar{h} = y_i$) hatası kontrol edilir. Bu hataya dayanarak düğümlerin koordinatları güncellenir ve yeni bir sızma hattı elde edilir. Bu işlemler hata küçünceye kadar devam edilir. CD parçası sızma yüzeyi olacaktır. Böylelikle $\bar{y}$ yüzeyin koordinatı olmak üzere $h = \bar{y}$ ile sınır şartı elde edilmiş olur.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

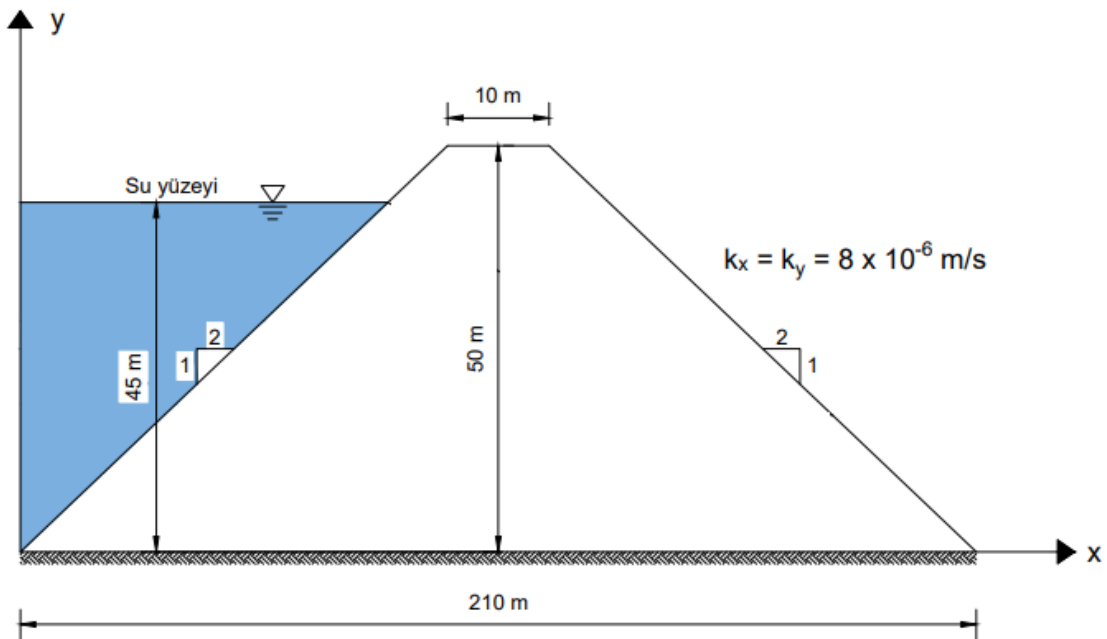
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, dolgu baraj gövdesi ve temelindeki 2D boyutlu kararlı durum sızma analizi, Galerkin yaklaşımına dayalı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Gövde ve temel zemini homojen izotropik ve anizotropik malzemeler olarak kabul edilir ve yatay drenaj uzunluğu ve geçirimsiz perdenin sızıntı üzerindeki etkileri araştırılacaktır. Baraj gövdesi içindeki noktalarda hidrolik yük, basınç değerleri, freatik hattı ve baraj tabanındaki sızıntı miktarını bulmak için Fortran dilinde bir program hazırlanmıştır. Hazırlanan programın veri dosyası hazırlama kılavuzu Ek 1’ de sunulmuştur. Elde edilen değerlerin literatürdeki mevcut çalışmalar ve paket programların sonuçlarıyla karşılaştırılarak iyi bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir.

4.1. SAYISAL UYGULAMALAR

4.1.1. İZOTROP DOLGU BARAJ GÖVDESİNDE SIZMA ANALİZİ

İlk olarak Şekil 4.1.’de verilen homojen izotrop dolgu baraj gövdesinde zamandan bağımsız olarak sızma olayı araştırılmıştır. Barajın taban genişliği 210 m, yüksekliği 50 m, kret genişliği 10 m’dir. Menba ve mansap şev eğimi 1/2 olan baraj havzasında su yüksekliği 45m’dir. Baraj gövdesindeki dolgu malzemenin permeabilite katsayısı 2×10^{-6} m/s olmaktadır.



Şekil 4.1. Dolgu baraj gövde kesiti ve özellikleri

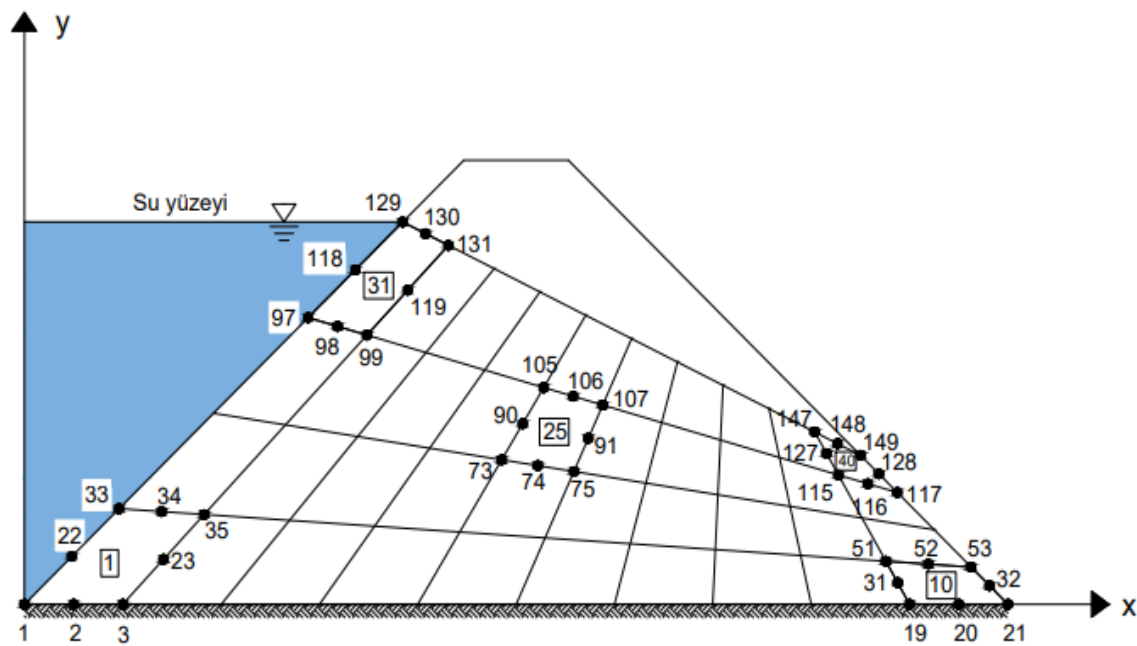
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Galerkin yaklaşımına dayalı sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan dolgu baraj gövdesinden geçen sızma değeri, literatürde bulunan sonuçlar ile Çizelge 4.1.'de karşılaştırmalı olarak verilmiş ve sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.1. Dolgu baraja ait birim genişlikteki sızma debisi ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)

SEY Ardiçlioğlu(1990)	Akım Ağı Yöntemi Ardiçlioğlu(1990)	Bu çalışma
6.9803×10^{-6}	6.8572×10^{-6}	6.8478×10^{-6}

Hesaplamalar yapılırken sızma bölgesi 40 sonlu eleman ağına (149 düğüm noktası) bölünerek işlemler yapılmıştır. Şekil 4.2. üzerinde belirtilen noktalardaki dolgu baraja ait hidrolik yük ve basınç değerleri hesaplanarak Çizelge 4.2’ de sunulmuştur.



Şekil 4.2. Dolgu baraj sonlu eleman modeli

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çizelge 4.2. Dolgu baraja ait hidrolik yük ve basınç yükü değerleri

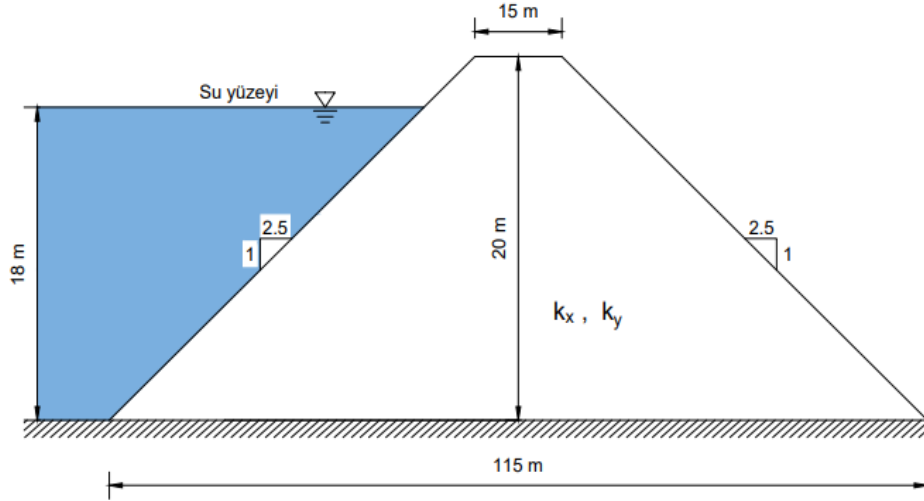
DÜĞÜM NO	X (m)	Y (m)	HİDROLİK YÜK (m)	BASINÇ YÜKÜ (m)	DÜĞÜM NO	X (m)	Y (m)	HİDROLİK YÜK (m)	BASINÇ YÜKÜ (m)
1	0.000	0.000	45.000	45.000	91	128.750	15.938	32.685	16.747
2	10.500	0.000	44.998	44.998	97	67.500	33.750	45.000	11.250
3	21.000	0.000	44.966	44.966	98	74.100	32.287	44.412	12.125
19	189.000	0.000	10.084	10.084	99	80.700	30.825	43.502	12.677
20	199.500	0.000	4.712	4.712	105	120.300	22.050	35.033	12.983
21	210.000	0.000	0.000	0.000	106	126.900	20.588	33.348	12.760
22	11.250	5.625	45.000	39.375	107	133.500	19.125	31.582	12.457
23	30.950	5.137	44.889	39.751	115	186.300	7.425	11.741	4.316
31	188.550	1.237	10.332	9.095	116	192.900	5.963	8.038	2.075
32	208.250	0.750	0.750	0.000	117	199.500	4.500	4.500	0.000
33	22.500	11.250	45.000	33.750	118	78.750	39.375	45.000	5.625
34	31.700	10.762	44.928	34.165	119	90.650	35.963	42.789	6.826
35	40.900	10.275	44.759	34.484	127	185.850	8.663	12.003	3.340
51	188.100	2.475	10.589	8.114	128	197.750	5.250	5.250	0.000
52	197.300	1.987	5.764	3.776	129	90.000	45.000	45.000	0.000
53	206.500	1.500	1.500	0.000	130	95.300	43.003	43.004	0.000
73	108.200	14.700	37.478	22.778	131	100.600	41.001	41.001	0.000
74	116.100	13.725	35.690	21.965	147	185.400	12.300	12.300	0.000
75	124.000	12.750	33.775	21.025	148	190.700	9.650	9.650	0.000
90	114.250	18.375	36.283	17.908	149	196.000	6.000	6.299	0.000

Çizelge 4.2. incelendiğinde en büyük hidrolik yük ve basınç yükü değerlerinin menba kısmının temele yakın bölgesinde olduğu anlaşılmaktadır. Bilindiği üzere çizelge incelendiğinde temel kotundan su yüzeyine çıkıldıkça ve menba bölgesinden mansap bölgesine gidildikçe basınç yükü değerlerinin azaldığı görülmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1.2. ANİZOTROP DOLGU BARAJ GÖVDESİNDE SIZMA ANALİZİ

Şekil 4.3.'de verilen homojen izotrop dolgu baraj gövdesinde zamandan bağımsız olarak sızma olayı araştırılmıştır. Barajın taban genişliği 115 m, yüksekliği 20 m, kret genişliği 15 m'dir. Menba ve mansap şev eğimi 1/2.5 olan baraj havzasında su yüksekliği 18 m'dir.



Şekil 4.3. Dolgu baraj gövde kesiti ve özellikleri

Şekil 4.3.'de geometrisi verilen izotrop ve anizotrop dolgu malzeme özeliğine sahip farklı durumlardaki barajlara ait sızma miktarları hesaplanarak Çizelge 4.3.'de verilmektedir.

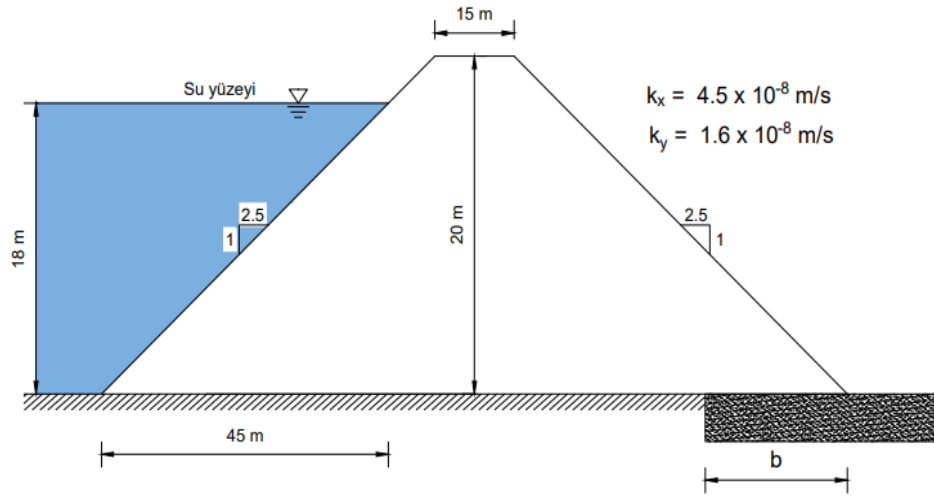
Çizelge 4.3. Farklı zemin özelliklerindeki dolgu barajlara ait birim genişlikteki sızma debisi (m³/s/m)

	Permeabilite Katsayısı (m/s)	Bu çalışma
Durum 1	$K_x = 4.5 \times 10^{-8}$ $K_y = 4.5 \times 10^{-8}$	1.060903×10^{-7}
Durum 2	$K_x = 1.6 \times 10^{-8}$ $K_y = 4.5 \times 10^{-8}$	0.3974995×10^{-7}
Durum 3	$K_x = 4.5 \times 10^{-8}$ $K_y = 1.6 \times 10^{-8}$	1.001256×10^{-7}

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Farklı zemin durumlarının ele alındığı bu örnekte, sonuçların bulunduğu Çizelge 3 incelendiğinde x yönündeki permeabilite katsayısının sızma üzerinde daha etkili olduğu söylenebilir.

4.1.3. YATAY DRENAJLI ANİZOTROP DOLGU BARAJ GÖVDESİNDE SIZMA ANALİZİ



Şekil 4.4. Yatay drenajlı dolgu baraj gövde kesiti ve özellikleri

Anizotrop malzemeli, gövde mansap kısmında yatay drenaj bulunan dolgu baraj için birim genişlik sızma debisi hesaplanarak drenaj uzunluğunun sızma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Barajın taban genişliği 115 m, yüksekliği 20 m, kret genişliği 15 m'dir. Menba ve mansap şev eğimi 1/2.5 olan baraj havzasında su yüksekliği 18 m'dir. Baraj gövdesindeki dolgu malzemenin permeabilite katsayısı x yönünde 4.5×10^{-8} m/s iken y yönünde 1.6×10^{-8} m/s olmaktadır. Sonuçlar Çizelge 4.4.'de sunulmuştur.

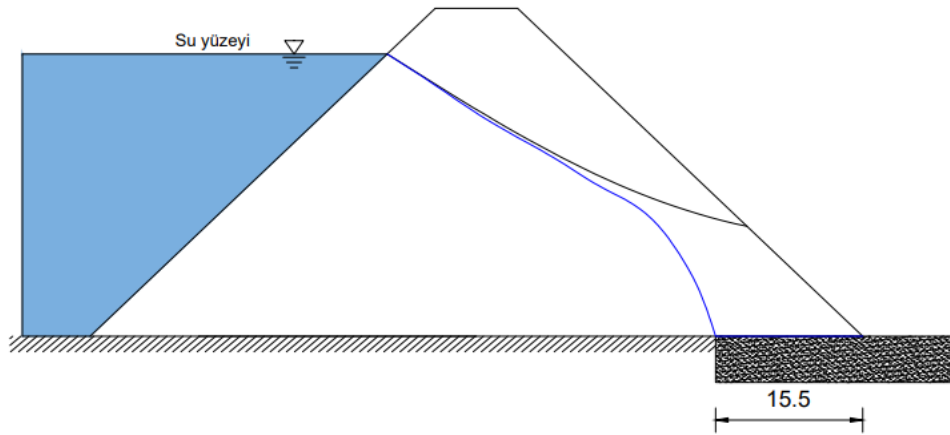
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çizelge 4.4. Farklı uzunlukta yatay drenaja sahip dolgu barajlara ait birim genişlikteki sızma debisi ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)

Yatay Drenaj Uzunluğu, b (m)	Sağlıca (2013)	Bu çalışma
15.5	1.000×10^{-7}	1.023×10^{-7}
18.0	-	1.041×10^{-7}
21.0	-	1.058×10^{-7}
25.0	-	1.106×10^{-7}

Çizelge 4 incelendiğinde yatay drenaj uzunluğu arttıkça birim genişlikteki sızma miktarının da arttığı görülmüştür.

Ayrıca, anizotropik malzeme özelliğine sahip yatay drenajsız (Durum 3) ve yatay drenajlı dolgu barajlar için freatik hattın konumu belirlenerek Şekil 4.5. üzerinde gösterilmiştir.



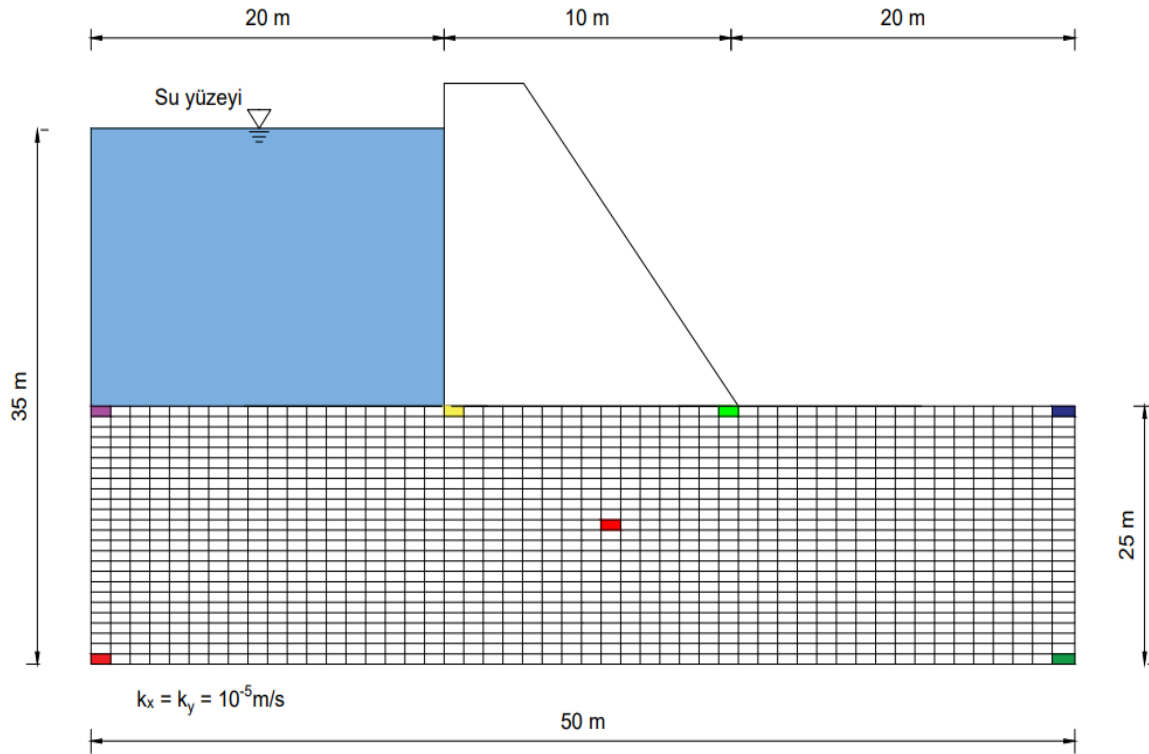
Şekil 4.5. Dolgu baraja ait freatik hat

Şekilden de anlaşıldığı üzere, yatay drenajlı barajlarda sızma hattının baraj gövdesi içinde olmasından dolayı mansap bölgesine borulanmadan kaynaklı olası bir zarar veremeyeceği görülmektedir. Bu sonuç, toprak barajların stabilitesi için su hattı konumunu kontrol etmekte yatay drenajların kullanılmasının önemini kanıtlamaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1.5. İZOTROP DOLGU BARAJ TEMELİNDE SIZMA ANALİZİ

Şekil 4.7.'de verilen ve havzasında 10 m yüksekliğinde su bulunan izotrop barajın temelinden geçen sızma miktarı hesaplanacaktır. Barajın temel genişliği 50 m, yüksekliği 25 m ve zemin malzemenin permeabilite katsayısı 10^{-5} m/s olarak alınmıştır.



Şekil 4.7. Dolgu baraj gövde-temel kesiti ve özellikleri

Analiz sonucu elde edilen değerler Çizelge 4.6.'da verilmiş ve literatürde bulunan sonuç ile birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.6. Baraj temelinden geçen birim genişlikteki sızma debisi ($m^3/s/m$)

Mansuri (2014)	Bu çalışma
7.7015×10^{-5}	7.6502×10^{-5}

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Hesaplamalar yapılırken sızma bölgesi 1250 sonlu eleman ağına (3901 düğüm noktası) bölünerek işlemler yapılmıştır. Temel uçları ve ortası ile (1,50,1200,1250), gövde mansap ve menba bölgesi altında bulunan iki elemandaki (1221,1231) noktalarda baraja ait hidrolik yük ve basınç değerleri hesaplanarak Çizelge 4.7.' de sunulmuştur.

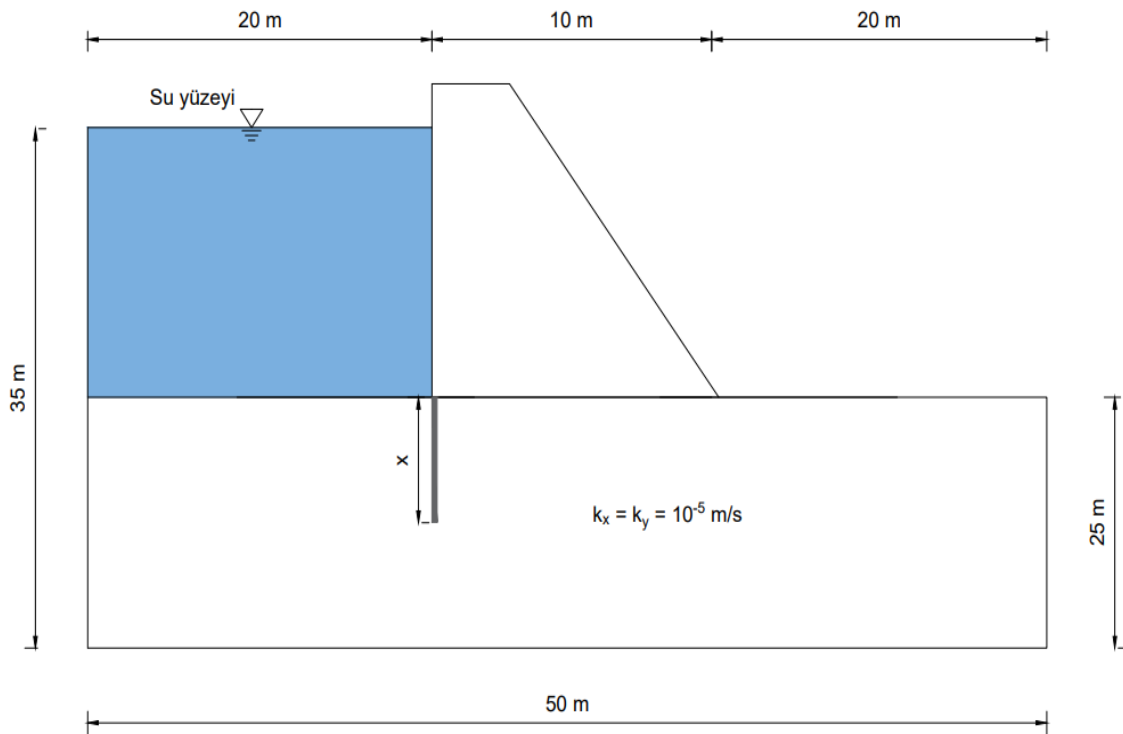
Çizelge 4.7. Baraja ait hidrolik yük ve basınç yükü değerleri

DÜĞÜM NO	X (m)	Y (m)	HİDROLİK YÜK (m)	BASINÇ YÜKÜ (m)	DÜĞÜM NO	X (m)	Y (m)	HİDROLİK YÜK (m)	BASINÇ YÜKÜ (m)
1	0	0	32.412	32.412	3690	20.5	24	33.279	9.279
2	0.5	0	32.410	32.410	3691	21	24	32.793	8.793
3	1	0	32.407	32.407	3709	30	24	26.359	2.359
99	49	0	27.520	27.520	3710	30.5	24	26.026	2.026
100	49.5	0	27.517	27.517	3711	31	24	25.847	1.847
101	50	0	27.516	27.516	3747	49	24	25.169	1.169
102	0	0.5	32.413	31.913	3748	49.5	24	25.169	1.169
103	1	0.5	32.408	31.908	3749	50	24	25.169	1.169
151	49	0.5	27.519	27.019	3750	0	24.5	34.912	10.412
152	50	0.5	27.515	27.015	3751	1	24.5	34.912	10.412
153	0	1	32.416	31.416	3770	20	24.5	34.137	9.637
154	0.5	1	32.415	31.415	3771	21	24.5	32.987	8.487
155	1	1	32.412	31.412	3780	30	24.5	25.853	1.353
251	49	1	27.516	26.516	3781	31	24.5	25.430	0.930
252	49.5	1	27.513	26.513	3799	49	24.5	25.085	0.585
253	50	1	27.512	26.512	3800	50	24.5	25.084	0.584
1873	24	12	30.198	18.198	3801	0	25	35.000	10.000
1874	24.5	12	30.082	18.082	3802	0.5	25	35.000	10.000
1875	25	12	29.965	17.965	3803	1	25	35.000	10.000
1950	24	12.5	30.206	17.706	3841	20	25	35.000	10.000
1951	25	12.5	29.966	17.466	3842	20.5	25	33.756	8.756
2025	24	13	30.215	17.215	3843	21	25	32.986	7.986
2026	24.5	13	30.091	17.091	3861	30	25	25.000	0.000
2027	25	13	29.966	16.966	3862	30.5	25	25.000	0.000
3649	0	24	34.824	10.824	3863	31	25	25.000	0.000
3650	0.5	24	34.824	10.824	3899	49	25	25.000	0.000
3651	1	24	34.823	10.823	3900	49.5	25	25.000	0.000
3689	20	24	33.625	9.625	3901	50	25	25.000	0.000

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çizelge 4.7. incelendiğinde en büyük hidrolik yük ve basınç yükü değerlerinin menba kısmının temel zeminin en alt bölgesinde olduğu anlaşılmaktadır. Bilindiği üzere çizelge incelendiğinde temel zemin en alt kotundan temel kotuna çıkıldıkça ve menba bölgesinden mansap bölgesine gidildikçe basınç yükü değerlerinin azaldığı görülmektedir.

4.1.6. GEÇİRİMSİZLİK PERDELİ İZOTROP DOLGU BARAJ TEMELİNDE SIZMA ANALİZİ



Şekil 4.8. Geçirimsizlik perdeli dolgu baraj gövde-temel kesiti ve özellikleri

Son uygulamada ise Şekil 4.8.'da gösterilen geçirimsizlik perdesinin baraj temelinden sızan su miktarına etkisi araştırılmıştır. Havzasında 10 m yüksekliğinde su bulunan barajın temel genişliği 50 m, yüksekliği 25 m ve zemin malzemenin permeabilite katsayısı 10^{-5} m/s olarak alınmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çizelge 4.8. Farklı uzunlukta geçirimsizlik perdesine sahip dolgu baraj temelinden birim genişlikteki sızma debisi ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)

Geçirimsizlik Perdesi Uzunluğu, X	Bu çalışma
0	7.6502×10^{-5}
7	5.4336×10^{-5}
8	5.1689×10^{-5}
9	4.9176×10^{-5}
10	4.6780×10^{-5}
11	4.4495×10^{-5}
12	4.2311×10^{-5}

Çizelge 4.8. incelendiğinde geçirimsizlik perdesinin sızma olayı üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve uzunluğu arttıkça sızma miktarının azaldığı anlaşılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

5. SONUÇLAR

5. SONUÇLAR

Yürütülen proje çalışmasında ilk olarak dolgu barajlarda meydana gelen sızma olayının önemi ortaya konulmuştur. Daha sonra problemin çözümü için kabuller yapılarak elde edilmek istenilen sonuçlar için çalışma yapılmıştır. Dolgu baraj gövdesi ve temelindeki 2D boyutlu kararlı durum sızma analizi, Galerkin yaklaşımına dayalı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Gövde ve temel zemini homojen izotropik ve anizotropik malzemeler olarak kabul edilir ve yatay drenaj uzunluğu ve geçirimsiz perdenin sızıntı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Zemindeki suyun tepkisini idare eden diferansiyel denklem, Darcy yasası ve süreklilik denklemleri yardımıyla elde edilmiştir. Baraj gövdesi içindeki noktalarda hidrolik yük, basınç değerleri, freatik hattı ve baraj tabanındaki sızıntı miktarını bulmak için Fortran dilinde bir program hazırlanmıştır.

Proje çalışması kapsamında literatürde mevcut bulunan farklı yöntemlerle çözülmüş 6 adet problem üzerinde durulmuş ve Galerkin yaklaşımına dayalı sonlu elemanlar yöntemi ile çözümleme yapıp sonuçlar karşılaştırmalı olarak şekil ve çizelgelerle sunulmuştur.

Ayrıca yapılan çalışmalar sonucunda ortaya, kolay kullanımlı, sonuçları rahatlıkla inceleyebileceğimiz bir program ortaya çıkmıştır. Programımız dinamik olarak çalışan bir program olma özelliğine sahiptir. Bu sayede tüm veri girişleri yapıp analiz yapıldıktan sonra ekrana gelen sonuç penceresinde sonuçlar incelendikten sonra istenirse anında veri dosyasında değişiklik yapılarak çok kısa süre içerisinde tüm sonuçlarını yenileyebilir. Örneğin baraj geometrisi ve malzeme özellikleri veri dosyasında değiştirilerek hızlı ve rahat bir şekilde sızma miktarı ve istenilen değerler hesaplanabilir. Ayrıca baraj gövdesinin tabanına yatay filtre istenildiği uzunlukta ve boyutlarda yerleştirilebilir, geçirimsizlik perdesinin boyutları da düzenlenerek istenilen problem sonuçları kolay ve etkin bir şekilde elde edilebilir.

5. SONUÇLAR

Yapılan çalışmalarda sırasıyla;
dolgu barajlarda sızma miktarı üzerinde x yönündeki permeabilitenin daha etkili olduğu,
yatay drenaj varlığının mansap bölgesi için önemli olduğu,
yatay drenaj uzunluğu arttıkça sızma debisinin arttığı,
geçirimsizlik perdesinin sızma boyunu uzatarak birim genişlikteki sızma debisini azalttığı
sonuçlarına varılmıştır.

Sonuç olarak özellikle homojen dolgu baraj gövde ve temelinde sızma analizinin Galerkin yaklaşımına dayalı sonlu elemanlar yöntemi ile başarılı bir şekilde yapılabildiği görülmüştür. Barajların yıkılmasına dahi sebep olabilecek sızma olayında permeabilite katsayısı, yatay drenaj ve geçirimsizlik perdesinin ne kadar önemli olduğu sayısal verilerle ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

ABROMOWITZ, M., STEGUN, I. A., 1968. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables, Dover, New York, 1046 s.

AKIN, J. E., 1982. Application and Implementation of Finite Element Methods. ACADEMIC PRESS publication. 372 s.

ARDIÇLIOĞLU., M. 1990. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Aslantaş Baraj gövdesinde Sızma Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana. 118 s.

ASLAN, T. A., 2016. Eğrisel Yapı Elemanlarının Etkin Sayısal Analizi Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 176 s.

AYVAZ, M. T., 2004. Serbest Yüzeyli Sızma Problemlerinin Çözümü İçin Pratik Bir Yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir. 92 s.

BRAHMA, S., P., HARR, M. E., 1962. Transient Development of the Free Surface in A Homogeneous Earth Dam. Geotechnique, 12: 283 -302.

BATES, P. D., LANE, S. N., FERGUSON R. 2005. Computational Fluid Dynamics Applications in Environmental Hydraulics. John Wiley & Sons. 531 s.

BEAR, J., VERRUÏJT, A., 1987. Modelling Groundwater Flow and Pollution, Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-55608-014-X, 414 s., Netherlands.

BERGHEAU, J. M., FORTUNIER, R., Finite Element Simulation of Heat Transfer. Wiley Press. New York. 279 s.

BETTES, P., BETTES, J. A., 1984. Infinite Elements for Static Problems. Engrg. Comput., 1: 4-15.

BETTES, P., ZIENKIEWICZ, O. C., 1977. Diffraction and Refraction of Surface Waves Using Finite and Elements. Int. J. Num. Meth. Engrg., 11: 1271-1290.

BRIGHAM, E. O., 1974. The Fast Fourier Transform. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

CASAGRANDE, A., 1937. Seepage Through Dams. New England Water Works. 51(2): 131 - 172.

CHANG, C. S., 1988. Boundary-Element Analysis for Unconfined Seepage Problems. J. Geotech. Engrg., 114(5): 556-572.

CHEN, B., SONG, E., 2015. An Artificial Boundary Approach for Unbounded Transient Seepage Problems. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 39: 762-774.

CHUHAN, Z., CHONGBIN, Z., 1987. Coupling Method of Finite and Infinite Elements for Strip Foundation Wave Problems. Earthquake Engrg. Struc. Dyn., 15: 839-851.

CIVIDINI, A., GIODA G., 1984. An Approximate F. E. Analysis of Seepage With A Free Surface, International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 8:549-566.

ÇAKIR, H. U., 2011. Yeraltısıyu Akımlarının Modellenmesinde Kollokasyon Metodu Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir. 94 s.

ÇELİK, B., 2014. Aydın İkizdere Barajı Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Sızma Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara. 44 s.

ÇİLİNGİR, H. 2007. Toprak Dolgu Barajların Gövdelerindeki Sızmaların Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi: Büyükçekmece Barajı Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. 71 s.

DARBANDI, M. S., TORABİ, O., SAADAT, M., DAGHİGHİ, Y., JARRAHBASHİ, D. 2007. A Moving-Mesh Finite-Volume Method to Solve Free-Surface Seepage Problem in Arbitrary Geometries. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 31:1609–1629.

DA VEIGA, E. V., MARADO, J. M. P., HAIE, N., MARQUES, J. C., MARTİNS, J. B., 1994. Bem and Iem Applied to Seepage Problems. Some Comparisons. Transactions on Modelling and Simulation. 9, 129.

DOAA, A., MOLLA, T. EL., 2019, Seepage Through Homogeneous Earth Dams Provided With A Vertical Sheet Pile and Formed on İmpervious Foundation, Ain Shams Eng J. 10(3), 529–539.

DONEA, J., HUERTA, A., 2003. Finite Element Methods for Flow Problems. John Wiley & Sons. 350 s.

EL-JUMAILY, K. K., AL-BAKRY, J. M. H., 2013. Seepage Analysis Through and under Hydraulic Structures Applying Finite Volume Method. Eng. Tech. J., 9: 1719-1731.

ESLAMI, M. R., 2014. Finite Elements Methods in Mechanics. <http://www.springer.com/series/6557>. 370 s.

FAKHARI, A., GHANBARI, A., 2013. A Simple Method for Calculating the Seepage from Earth Dams with Clay Core. Journal of GeoEngineering, 8, 27-32.

FREEZE, R.A. CHERRY, J. A., 1979. Groundwater. by Prentice-Hall. Inc., Englewood Cliffs, N.J. 07632.

FREUND, D. G., RAHURCO, H., 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons. 507 s.

FINN, W.D.L, 1967, Finite Element Analysis of Seepage Through Dams, J. Soil. Mech. and Found. D.v., A.S.C.E, 93, 41-53.

GÜNGÜR, M., 1995. Toprak Dolgu Barajlardaki Sızma Olayının Sonlu Elemanlar Modeli. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 33-38.

GÜRARSLAN., G. 2004. Düzensiz Sonlu Fark Hesap Şeması Kullanılarak İki Boyutlu Yeraltı Suyu Akımının Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli. 109 s.

HARR, M. E., 1962. Ground-water and Seepage. McGraw-Hill, New York.

KESGİN, E., 2015. Kıl Çekirdekli Toprak Dolgu Atık Barajlarında Sızmanın Nümerik Metotlarla Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. 73 s.

KESKİN, S. B., 2005. Toprak Dolgu Baraj Gövdesindeki Ve Altındaki Sızma Olayının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi. Denizli. 97 s.

KHEIRI, G., JAVDANIAN, H., SHAMS, G., 2020, A Numerical Modeling Study on The Seepage Under Embankment Dams, Modeling Earth Systems and Environment. 6 1075–1087.

KING, G. J. CHOWDURY, W., 1971, Finite Element Solution for Quantity of Steady Seepage, Civ Eng. and P.W. Rew., 66, 1317-1321.

LAM, L., FREDLUND, D. G., and BARBOURS., G., 1987. Transient Seepage Model for Saturated- Unsaturated Soil Systems: A Geotechnical Engineering Approach. Can. Geotech. J. 24: 565 -580.

LEONTIEV, A., HUACASI, W., 2001. Mathematical Programming Approach for Unconfined Seepage Flow Problem. Engineering Analysis with Boundary Elements. 25: 49-56.

LEWIS, R.W., NITHIARASU, P., SEETHARAMU K. N., 2004. Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow. John Wiley & Sons. 341 s.

MANSURI, B., SALMASI, F., OGHATI B., 2014. Effect of Location and Angle of Cutoff Wall on Uplift Pressure in Diversion Dam, Geotech Geol Eng. 32 1165–1173.

MESCİ., S. B., 2006. Dolgu Baraj Gövdelerindeki Sızmaların Ve Freatik Hattın İncelenmesi: Seferihisar Barajı Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. 93 s.

NARAYANAN, G. V., 1979, Numerical Operational Methods in Structural Dynamics. Ph.D. thesis, University of Minnesota, Minneapolis, Minn.

NICHOLSON, D. W., 2003. Finite Element Analysis Thermomechanics of Solids CRC Press. 268 s.

NOORI, A. R., ASLAN, T. A., TEMEL, B. 2019. Dairesel Plakların Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Laplace Uzayında Dinamik Analizi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(1), 193-205.

OURIA, A., TOUFIGH, M. M., 2009. Application Of Nelder-Mead Simplex Method for Unconfined Seepage Problems. Applied Mathematical Modelling. 33, 3589–3598.

PAPACIANAKIS, A. T., FREDLUND, D.G., 1984. A Steady State Model For Flow in Saturated-Unsaturated Soils. Can. Geotech. J., 21:419-430.

PARSI, M.J.K., DANESHM, F., 2012, Unconfined Seepage Analysis in Earth Dams Using Smoothed Fixed Grid Finite Element Method, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 36 780–797.

PARSI, M.J.K., 2019, Isogeometric Analysis in Solution of Unconfined Seepage Problems. Computers and Mathematics with Applications. 78 (2019) 66–80.

RAFIEZADEH, K., ATAIE-ASHTIANI, B., 2013. Seepage Analysis in Multi-Domain General Anisotropic Media by Three-Dimensional Boundary Elements. Engineering Analysis with Boundary Elements 37,527–541.

SAĞLICA, O., 2013. Dolgu Baraj Gövdelerinde Sızma Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.85 s.

SALMASI, M. NOURI, J. ABRAHAM, 2020, Upstream Cutoff and Downstream Filters to Control of Seepage in Dams, Water Resources Management. 34, 4271–4288.

SANAYEI, H.R.Z., JAVDANIAN, H., 2020, Assessment Of Steady-State Seepage Through Dams With Nonsymmetric Boundary Conditions: Analytical Approach, Environ Monit Assess, 192: 3.

SEGERLIND, L.J., 1984. Applied Finite Element Analysis. John Wiley & Sons.426 s.

STUCCHI, R., CIVIDINI. A., GIANCARLO G., 2010. Finite Element Approaches For the Dynamic Analysis of Seepage. Numerical Methods in Geotechnical Engineering.53-61.

SZABO, B., BABUSKA I., 2011. Introduction to Finite Element Analysis Formulation, Verification and Validation. 364 s.

TRACY, J.C., MARINO M.A., 1987. Seepage Into Variably Saturated Porous Medium, Journal of Irrigation and Drainage Eng., 49, 805-823.

XU, Y. Q., UNAMI K., KAWACHI T., 2002. Optimal Hydraulic Design of Earth Dam Cross Section Using Saturated-Unsaturated Seepage Flow Model, Advances in Water Resources, 26: 1-7.

TEMEL, B., 1996. Dinamik Zemin-Yapı Etkileşimi Problemlerinin Sonlu-Sonsuz Elemanlar Ve Laplace Dönüşüm Yöntemi İle Analizi. Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi, Adana.194 s.

TEMEL, B., ÇALIM, F.F., TÜTÜNCÜ, N., 2004, Quasi-Static and Dynamic Response of Viscoelastic Helical Rods, J. Sounds Vib., 271: 921.-935.

TEMEL, B., YERLİ, H.R., ve KIRAL, E., 1997. Dinamik Zemin-Yapı Etkileşimi Problemlerinin Sonlu ve Sonsuz Elemanlar ile Çözümü. İMO Teknik Dergi,1343-1362.

TAGHVAEI, P., MOUSAVI, SF., SHAHNAZARI, A., KARAMI, H., I., 2014, Shoshpash, Experimental and Numerical Modeling of Nano-Clay Effect on Seepage Rate in Earth Dams, Int J Geosynth Ground Eng. 5(1):1.

THIEU, N. T. M., FREUDLAND D. G., HUNG V. Q., 2000. General Partial Differential Equation Solvers for Saturated-Unsaturated.Proceding of the Assian Conference in Unsaturated Soils, Singapore. 201-206.

UNGLES, R. F., 1973. An Infinite Finite Element. Ms.c. Thesis. The University British Columbia, 76 s.

WANG, H. F., ANDERSON M. P.,1982. Introduction to Groundwater Modeling Finite and Finite Element Methods. Academic Press.New York.237 s.

YERLİ, H.R., İki ve Üç Boyutlu Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi Problemlerinin Sonlu ve Sonsuz Elemanlar Kullanılarak Analizi. Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi, Adana.244 s.

YILMAZ, H., 1999. Elektronik Tablolama Yöntemi ile Yeraltı Su Akımının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. 166s.

ZEWDU, A., 2019,Seepage and Slope Stability Analysis of Earthen Dam: A Case Study Of Koga Dam, Ethiopia, WNOFNS.191-217.

ZHAO., C. and VALLIAPPAN, S., 1993. Transient Infinite Elements for Seepage Problems in Infinite Media. International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 17: 323-341.

ZIENKIEWICZ, O. C., MEYER P., CHEUNG, Y. K., 1966, Solutions of Anisotropic Seepage by Finite Elements. J.Eng.Mech. Div. A.S.C.E., 92,111-120.

EKLER

EK 1

SIZMA PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ İÇİN PAKET PROGRAM

VERİ KILAVUZU

Sınırlandırılmamış akım bölgelerinde sızma probleminin kararlı hali için FORTRAN77 dilinde, bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Sonlu elemanlara ait rijitlik matrisi ve yük vektörleri oluşturulmakta (başlangıç koşulları yardımıyla) ve kodlama tekniği ile bant tipinde sistem rijitlik matrisi ve yük vektörü teşkil edilmektedir. Veri dosyalarındaki bilgiler serbest formatla okutulmakta ve programda, tüm işlemler çift hassasiyette yapılmaktadır.

Zamandan bağımsız sızma problemlerinin çözümü için sekiz düğümlü kuadratik sonlu eleman kullanılarak, düğüm noktalarındaki toplam enerji yüksekliği, su yüksekliği, sızma debisi ve serbest su yüzünün yerini hesaplayan **SIZMA** isimli bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Sonlu eleman rijitlik matrisi hesabı için ihtiyaç duyulan integraller, bilgisayar programında, Gauss sayısal integral yöntemi ile yapılmaktadır

SIZMA PROGRAMI İÇİN VERİ HAZIRLAMA KILAVUZU

Not: Altı çizilmiş bulunan satırlar veri dosyasına yazılmaktadır.

DATA BÖLÜMÜ NO: 1

İSİM

Çıktı dosyasında problemi tanıtmak içindir.

DATA BÖLÜMÜ NO: 2 Baraj gövde köşe koordinat bilgileri

XXX(L) YYY(L) L=1,4

XXX(L): Baraj gövdesinin, menba topuğundan başlayarak saat akrebi yönündeki köşe X koordinatları

YYY(L): Baraj gövdesinin, menba topuğundan başlayarak saat akrebi yönündeki köşe Y koordinatları

DATA BÖLÜMÜ NO: 3 Sonlu eleman bilgileri

SONLU elemanların tarifleri bir satırda bulunan bilgi sayısına göre yapılmaktadır.

ILK NBS N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 NBX NBY

ILK : Bölgedeki ilk eleman no

NBS : Bölgedeki son eleman no

N1,...,N8 : Sonlu eleman tarifi (Şekil a'ya bakınız).

NBX : x- yönünde bölme sayısı

NBY : y- yönünde bölme sayısı

DATA BÖLÜMÜ NO: 4 Baraj gövde düğüm koordinatları satırı

XX(L) YY(L) L=1,4

XX(L): Elemanlara bölünecek bölgenin menba topuğundan başlayarak saat akrebi tersi yönündeki köşe X koordinatları

YY(L): Elemanlara bölünecek bölgenin menba topuğundan başlayarak saat akrebi tersi yönündeki köşe Y koordinatları

DATA BÖLÜMÜ NO:5 Sınır Şartları Bilgileri

AC, HASSAS

AC : Çıkış yüzü açısı

HASSAS : Serbest su yüzünün yeri için gerekli ve yeterli hassasiyet

DATA BÖLÜMÜ NO: 6 Zon Bilgileri

INZ (I) I=1,NBX

XK(I),YK(I), BETA(I) I=1,NZ

INZ : Menba tarafından başlayarak bölgedeki X doğrultusundaki NBX adet elemanın zon numaraları

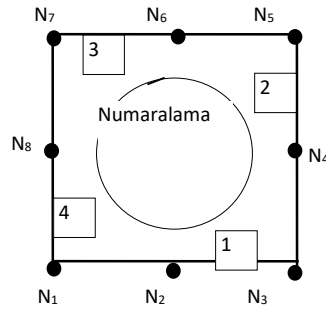
NZ farklı zon sayısı olmak üzere

XK (I) : Zonların X yönündeki permeabiliteleri

YK (I) : Zonların Y yönündeki permeabiliteleri

BETA (I) : Local X ekseninin global X eksenine dönme açıları.

Not : Yukarıdaki bilgiler malzeme çeşidi sayısı kadar alt alta verilmelidir !



Şekil a Sonlu elemanda numaralama sırası