

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SERBEST YÜZEYLİ SIZMA PROBLEMLERİNİN SAYISAL
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UBEYDULLAH HALAZA

DENİZLİ, ŞUBAT - 2023

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**SERBEST YÜZEYLİ SIZMA PROBLEMLERİNİN SAYISAL
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UBEYDULLAH HALAZA

DENİZLİ, ŞUBAT - 2023

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

UBEYDULLAH HALAZA

ÖZET

SERBEST YÜZEYLİ SIZMA PROBLEMLERİNİN SAYISAL ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UBEYDULLAH HALAZA

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. DEVRİM ALKAYA)

DENİZLİ, ŞUBAT - 2023

Baraj inşası, büyük yatırım ve işgücü gerektiren yapılardır. İnşa edilecek yerin seçimi, kullanılacak malzemelerin seçimi ve teminini sağlamak önemli faktörler arasında yer almaktadır. Projelendirme aşamasında baraj tipi, geoteknik ve hidrolik deneylere önem verilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında baraj gövdesinde stabiliteyi etkileyen önemli parametrelerden, serbest yüzeyli sızma analizi incelenmiştir. Sızma, barajın memba bölümünden mansap kısmına doğru su akışı olarak ifade edilmektedir. Her ne kadar sızmanın gerçekleşmesi istenilmeyen bir durum olsa da baraj haznesinde bulunan su, temelden ve gövde içerisinden sızıntı oluşturmaktadır. Gerçekleşen sızma miktarını, projelendirme sırasında hesaplanan değere eşit veya daha küçük olması gerekmektedir. Aksi takdirde barajda içsel erozyon veya borulanma olayları gerçekleşecektir. Bunun sonucunda baraj üzerinde geoteknik önlemler alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada toprak dolgu baraj kesiti belirlendikten sonra sonlu farklar metoduyla, sızma ağı çizgileri çıkartılmış ve sızma miktarı hesaplanmıştır. Geostudio SEEP/W programı ile toprak dolgu baraj sisteme tanımlandıktan sonra analiz yapılmıştır. Sonlu farklar metodu ile GeoStudio SEEP/W programında elde edilen sonuçlar benzerlik göstermektedir. Bunun sonucunda mühendislik problemlerinin farklı bakış açılarıyla ve uygulanabilir yöntemlerle benzer sonuçlara ulaşabileceğini göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Serbest Yüzeyli Sızma, Toprak Dolgu Baraj, Sonlu Farklar Metodu

ABSTRACT

NUMERICAL ANALYSIS FOR FREE SURFACE SEEPAGE PROBLEMS

MSC THESIS

UBEYDULLAH HALAZA

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR:ASST. PROF. DEVRİM ALKAYA)

DENİZLİ, FEBRUARY 2023

Dam construction is structures that require large investment and workforce. The selection of the place to be built, the selection and supply of the materials which will be used are among the important factors. During the project phase, attention should be paid to dam type, geotechnical and hydraulic tests. In this thesis study, one of the important parameters which affects the stability of the dam body, free surface permeation analysis was investigated. Permeation is expressed as the flow of water from the upstream section of the dam to the downstream section. Despite the fact that leakage is an undesirable situation, the water in the dam reservoir causes leakage from the groundwork and inside the body. The actual leakage amount should be equal to or less than the value calculated during the project design. Otherwise, internal erosion or piping events will occur in the dam. As a result of this situation, geotechnical measures should be taken on the dam.

In this study, after the earth fill dam cross-section was determined, the infiltration network lines were extracted by using the finite difference method and then the infiltration amount was calculated. After the earth fill dam was defined to the system with the Geostudio SEEP/W program, the analysis was carried out. The results obtained from the finite difference method and the GeoStudio SEEP/W program shows similarity. It is concluded from the study that engineering problems can obtain similar results with different perspectives and applicable methods.

KEYWORDS:Free Surface Seepage, Eart Fill Dam, Finite Difference Method

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	2
1.2 Literatür Çalışması	2
2. BARAJLAR	6
2.1 Barajın Önemi	6
2.2 Baraja Ait Kısımlar	6
2.2.1 Barajda Gövde	7
2.2.2 Barajda Dolusavak	7
2.2.3 Barajda Derivasyon.....	8
2.2.4 Barajda Diğer Tesisler	8
2.3 Kullanılan Malzeme ve İnşa Tekniğine Göre Baraj Türleri.....	8
2.4 Baraj Gövdesinde Bulunan Ölçüm Cihazları	12
2.5 Baraj Gövdesinde Borulanma ve Alınabilecek Geoteknik Önlemler.....	13
3. BARAJ GÖVDESİNDE SIZMA.....	16
3.1 Zeminlerde Permeabilite	16
3.1.1 Permeabilite Katsayısını Belirleme Yöntemleri	17
3.1.1.1 Laboratuvar Deneyleri	17
3.1.1.2 Arazi Deneyleri	19
3.2 Darcy Kanunu.....	20
3.3 Laplace Denklemi.....	21
3.4 Sızma Ağları.....	23
3.4.1 İzotropik Zeminlerde Akım Ağı Çizilmesi.....	23
3.4.2 Anizotropik Zeminlerde Akım Ağı Çizilmesi	24
3.4.3 Homojen Olmayan Tabakalı Zeminlerde Akım Ağı	25
3.5 Freatik Hat Hesaplama Yöntemleri	27
3.5.1 Kozeny Parabolü.....	28
3.5.2 Casagrande Denklemi	30
3.5.3 Pavlovsky Çözümü	31
3.5.4 Dupuit Yaklaşımı	32
3.5.5 Schaffernak ve Van Iterson Yaklaşımı	33
3.5.6 Elektrik Benzeşim Modeli	34
3.5.7 Grafik Metot Yaklaşımı	35
4. BARAJLARDA SIZMA HESABI YÖNTEMLERİ	36
4.1 Sonlu Farklar Metodu.....	36
4.1.1 Sızma Denklemleri	36
4.1.2 Sınır Şartlarının Belirlenmesi	42
4.2 Akım Ağı Yöntemi	45

5. TABLOLAMA ANALİZİ İLE GEOSTUDIO SEEP/W PROGRAMININ KARŞILAŞTIRILMASI	47
5.1 Tablolama Analizi	47
5.1.1 Toprak Dolgu Barajda Tablolama Analizi.....	48
5.1.2 Ağ Çizimlerinin Kesit Üzerinde Gösterimi	50
5.1.3 Sızma Miktarının Elde Edilmesi.....	51
5.2 Geostudio SEEP/W Programı	51
5.3 Tablolama Analizi İle GeoStudio SEEP/W Programının Karşılaştırılması	
53	
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	54
7. KAYNAKLAR.....	55
8. ÖZGEÇMİŞ.....	58



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1: Torak dolgu barajın gövde kesiti	7
Şekil 2. 2 : Dolgu barajın boy kesit görünümü	9
Şekil 2. 3: Dolgu barajın gövde kesit görünümü	10
Şekil 2. 4: Emiroğlu (1999)'a göre baraj gövdelerin sınıflandırılması	11
Şekil 2. 5 : Helvacı (2009)'a göre baraj gövdelerin sınıflandırılması	12
Şekil 2. 6: Borulanmanın engellenmesinde alınacak geoteknik önlem	15
Şekil 3. 1: Sabit düzeyli permeabilite deney düzeneği	18
Şekil 3. 2: Düşen düzeyli permeabilite deney düzeneği	19
Şekil 3. 3: Serbest akifer ve basınçlı akifer kuyu düzeneği	20
Şekil 3. 4: Darcy kanunu su akış kesiti	20
Şekil 3. 5 : Laplace denkleminin zemin kesiti üzerinde gösterimi	21
Şekil 3. 6: Akım ağı ve eşpotansiyel ağın görünümü	24
Şekil 3. 7: Anizotropik zeminlerde akım ağı ve eşpotansiyel ağ çizilmesi	25
Şekil 3. 8: Permeabilitesi farklı zeminlerde su akışının görünümü	26
Şekil 3. 9: Permeabilitesi farklı zeminlerin su akışı geçişlerinin kesit üzerinde görünümü	27
Şekil 3. 10: Serbest sızma yüzeyinin kesit üzerinde görünümü	28
Şekil 3. 11: Kozeny parabolü kesiti	28
Şekil 3. 12: Casagrande'ye göre freatik hat yöntemi	31
Şekil 3. 13: Pavlovsky'ye göre freatik hat yöntemi	31
Şekil 3. 14: Dupuit yaklaşımının kesit üzerinde görünümü	33
Şekil 3. 15: Schaffernak ve Van Iterson yaklaşımının kesit üzerinde görünümü	34
Şekil 3. 16: Grafik metot yaklaşımının kesit üzerinde görünümü	35
Şekil 4. 1: Akış bölgesindeki düğüm noktaları	37
Şekil 4. 2: Sızmanın gerçekleştiği düğüm noktaları	38
Şekil 4. 3 : Geçirimsiz yüzeyde sızma düğüm noktaları	39
Şekil 4. 4: Sızmanın gerçekleştiği düğüm noktalarının aynı seviyede incelenmesi	40
Şekil 4. 5: Farklı permeabilite katsayılarında gerçekleşen sızma düğüm noktaları	41
Şekil 4. 6: Sızmanın (i,j) düğüm noktalarına göre görünümü	42
Şekil 4. 7: Sınır şartları için düğüm noktaları	43
Şekil 4. 8: Farklı şev eğimdeki sınır şartlar için düğüm noktaları	44
Şekil 4. 9: Dik kenarlarda geçirimsiz sınır şartları için düğüm noktası	44
Şekil 4. 10: Farklı geçirimsiz durumdaki sınır şartları için düğüm noktaları	45
Şekil 4. 11: Baraj gövdesindeki sızmanın akım ağı yöntemiyle gösterimi	46
Şekil 4. 12: Baraj tabanındaki sızmanın akım ağı yöntemiyle gösterimi	46
Şekil 5. 1: Toprak Dolgu Baraj Kesiti	47
Şekil 5. 2: Akım ağı çizgileri için sınır şartları	48
Şekil 5. 3: Eşpotansiyel ağı çizgileri için sınır şartları	49
Şekil 5. 4: Akım ağı çizgileri için sonlu farklar değerleri	49
Şekil 5. 5: Eşpotansiyel ağı çizgileri için sonlu farklar değerleri	50
Şekil 5. 6: Tablolama analizinde akım ağlarının çizimi	50
Şekil 5. 7: Tablolama analizinde eşpotansiyel ağlarının çizimi	51

Şekil 5. 8: Toprak dolgu barajın Geoslope SEEP/W programında sınır şartları ve düğüm noktaları kesit üzerinde gösterimi.....	52
Şekil 5. 9: GeoStudio SEEP/W programında freatik hat ve sızma miktarı.....	53



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3. 1: Zemin türlerine ait permeabilite katsayıları (m/s)	17
Tablo 3. 2: a derecesine göre $\Delta a/(a+\Delta a)$ değerinin belirlenmesi.....	29
Tablo 3. 3: Sızma Akışının ve Elektrik Benzeşim Modelinin Parametreleri	34
Tablo 5. 1 : Toprak Dolgu Baraj Kesite Ait Zeminlerin Permeabilite Katsayıları	48
Tablo 5. 2: Metotlar arası debi değerleri karşılaştırılması	53



SEMBOL LİSTESİ

k	:	Permeabilite katsayısı
v	:	Akım hızı
h	:	Basınç yüksekliği
A	:	Su akışının olduğu sızma alanı
Q	:	Sızma miktarı (debi)
L	:	Sızmanın gerçekleştiği uzunluk
d	:	Eş potansiyel ağ çizgileri arasındaki mesafe
∂	:	Kısmi türev işlemi
i	:	Hidrolik eğim
q	:	Birim genişlik debisi
φ	:	İçsel sürtünme açısı
B	:	Dolgu barajın taban uzunluğu
y₀	:	Barajda oluşan parabolün y eksenini kestiği noktanın ordinatı
C	:	İletkenlik katsayısı
l'	:	Akım yolu uzunluğu
y₀	:	Parabolün y eksenini kestiği noktanın ordinatı
α	:	Mansap şevinin yatayla yaptığı açı
i,j	:	Düğüm noktaları
ΔH	:	Memba ve mansap arasındaki basınç yükseklik farkı
n	:	Akım ağı çizgi sayısı
m	:	Eşpotansiyel çizgi sayısı
β	:	Memba şevinin temel ile yaptığı açı

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında destekleri ve katkılarından dolayı öncelikle tez danışmanım Doç. Dr. Devrim ALKAYA olmak üzere Prof. Dr. Gürhan GÜRARSLAN, Dr. Öğr. Üyesi Engin NACAROĞLU ve Arş. Gör. Gökhan İMANÇLI hocalarıma, yüksek lisans öğrenimim boyunca emekleri bulunan tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.



1. GİRİŞ

Baraj, vadi arasına nehir yataklarının yolu kesilerek arkasında göl alanı oluşturmak amacıyla inşa edilen yapıdır. Barajın inşa edilmesinin amaçları; arazileri taşkından korumak, daha uzakta bulunan arazilere su götürmek, içme ve kullanma suyu sağlamak, kuraklığa karşı suyu göl alanında toplamak, balıkçılık ve tekne gezilerine imkan sağlaması, en önemli amaç ise elektrik üretimi yapmaktır. Baraj yapımının canlılar üzerinde olumsuz etkileri de bulunmaktadır. Baraj inşasının yapıldığı alanda yaşayan insanlar evlerini taşıması gerekmektedir. Bitkiler ve hayvanlar, suyun yükselmesinden kaynaklı olumsuz etkilenmektedirler.

Baraj, membada bulunan göl alanı ile mansap arasında potansiyel fark oluşturan mühendislik yapısıdır. İnşası sırasında olabildiğince geçirimsiz yapılmaya çalışılmaktadır. Ancak temel zemini ve gövde kısmında kullanılan malzemelerin geçirimli olmasından dolayı göl alanında bulunan su, baraj temelinden ve baraj gövdesinden mansaba doğru sızmaya çalışacaktır. Bu durumun baraj stabilitesine etkisi çok büyüktür. Baraj tasarımı esnasında sızma miktarının izin verilebilir miktarda olması gerekmektedir. Sızma miktarı hesabının fazla olması durumunda baraj yapısında içsel erozyon, şev kayması ve borulanma meydana gelmektedir. Sonucunda ise barajın stabilitesinin bozulmasına, hasar görmesine ve yıkılmasına sebep olmaktadır.

Barajların yıkımları tüm dünyada çok sayıda insanın yaşamını etkilemiş olup, doğal çevreye de zararları büyük olmuştur. Yapılan araştırmada, ABD'nin Idaho Eyaletinin doğusunda dik yamaçlı, geniş ve düz bir tabana sahip kanyon tipi bir vadide, enerji, sulama ve taşkın koruma amaçlı olarak inşa edilen 100 metre yüksekliğe sahip Teton Barajı zonlu toprak ve kaya dolgu baraj tipindedir. Baraj gövdesinde geçirimsizliği sağlayacak olan kil çekirdeğin inşa sırasında iyi sıkıştırılamaması sebebiyle sağ sahilde barajın yamaca yakın kısmında içsel erozyon meydana gelmiştir. Gövdeden mansaba sızan sular, 5 Haziran 1976 tarihinde yaklaşık 7.5 milyon metreküp dolguya sahip barajın birkaç saat içerisinde yıkılmasına sebep olmuştur. Bu o yıkılma sonrası yaklaşık 350 milyon metreküp su

hacmi mansapta yer alan düz arazide taşkına neden olmuş, çok sayıda ev ve iş yeri sular altında kalarak yıkılmış ve tarımsal araziler büyük zarar görmüştür (Koç M. vd., 2009).

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, barajın memba bölümünden mansaba doğru gövdeden sızan suyun etkisi incelenecektir. Baraj tipi olarak toprak dolgu baraj seçilecektir. Sızma durumu incelenirken akım ağları, eşpotansiyel çizgiler hakkında bilgi verilecektir. Toprak dolgu barajın gövdesinde kullanılan siltli çekirdeğin freatik hatta etkisi gözlemlenecektir. Matematiksel olarak sızma problemi, sonlu farklar metodu ile tablolama analizleri kullanılarak değerler bulunacaktır. Sızma miktarının hesaplanmasında akım ağı metodu kullanılacaktır. Geostudio SEEP/W programı ile toprak dolgu baraj kesiti oluşturulacak ve analizler yapılacaktır. Sonlu farklar metodu ile Geostudio SEEP/W programında bulunacak sızma miktarı değerleri karşılaştırılacaktır. Barajın daha güvenilir ve stabilitesini koruması için geoteknik önlemler alınması gerektiği belirtilecektir.

1.2 Literatür Çalışması

Orhon (1997) tarafından yapılan çalışmada, barajı oluşturan yapılardan bahsetmiştir. Bunlar, rezervuardaki baraj gölü, memba ve mansap arasında bulunan baraj gövdesi, ve barajın su tahliyesi için boşaltım yapıları kısımlarından meydana gelmektedir. Genel olarak barajları dört ana bölümde; gövde, derivasyon-dipsavak, dolusavak ve diğer tesis bölümleri olarak ayırmıştır.

He (1998) tarafından yapılan çalışmada; doğrusal olmayan bir problemi sayısal ve teorik Darcy Kanunu kullanarak sızma problemini incelemiştir. Çalışmasında değişken iterasyon yöntemini geliştirmiş ve yöntemini literatürdeki çeşitli çalışmalarla karşılaştırmıştır.

Zhang ve Ark. (2001) tarafından yapılan çalışmada; kaya ve toprak dolgu barajlardaki sızma olayı için sonlu elemanlar metodundaki iterasyon işlemini suyun

mansap bölgesinden çıkan kısmında yaparak sonlu elemanlar metodu çözümlerine göre kullanışlı bir çözüm elde etmiştir.

Ağıralioğlu ve Erkek (2002) taraflarınca yapılan çalışmada baraj gövdesinde bulunan yapılar, suyun savaklanmasını sağlamak için yaklaşım kanalı, suyun nehir yatağına ulaşımını sağlamak için dolusavak kontrol kesiti, boşaltım kanalı, suyun sahip olduğu enerjiyi azaltarak döküldüğü bölüme zarar vermesini önlemek için enerji kırıcı tesis, baraj rezervuarında değişik seviyelerden su almak için su alma ağız ve dipsavak, istenilen su seviyesini ayarlamak için su yükseltme ve vana odası, suyun çıkışını sağlamak için tahliye büzü, ulaşım yolu olarak belirlemiştir.

Bardet ve Tobita (2002) tarafından yapılan çalışmada; serbest yüzeyli sızıntı problemini hesaplamak için elektronik tablo hesaplamalarına uygulanabilen Sonlu farklar metodunu kullanarak bir yöntem önermiştir. Çalışmadaki denklem genişletilmiş basınç yöntemine dayanmaktadır. Üst sınırlardaki küçük basınç değişimleri serbest su yüzeyinde büyük sapmalar meydana getirdiğini göstermiştir.

Tosun (2004) tarafından yapılan çalışmada barajların geoteknik açıdan geçirimli zeminlerde iyileştirme esaslarını incelemiştir. Barajların inşa edildiği yerin, barajın taşıma gücü ve sızma analizi gibi stabilite deneylerinin yapılmış olması gerektiğini söylemiştir. Baraj temel zeminini oluşturan geçirimli zeminleri tanımlamış, yaşanan problemlere değinmiş, bunlar ile ilgili alınması gereken geoteknik çözümleri ele almıştır.

Ayvaz (2004) tarafından yapılan çalışmada; toprak dolgu barajların gövdesinde oluşan serbest yüzeyli sızma durumunu ele almıştır. Serbest yüzeyli sızmayı kısmi diferansiyel denklemler kullanarak, zamana bağlı sonlu farklar metodu yardımıyla tablolama analizi yapmıştır. Analizde zemin özelliklerini değiştirip, belirlenen sınır koşulları altında çözmüştür. Baraj gövdesindeki bulunan ıslak ve kuru bölgeler arasında meydana gelen varyasyonel eşitsizlikleri yok etmek için sonlu fark denklemleri, basınç yöntemiyle geliştirilerek denklemler elde etmiştir. Geliştirilen yöntem yardımıyla uyumlu sonuçlar elde etmiştir.

Baykan (2005) çalışmalarında barajı gövde, barajın giriş bölümünde yer alan su alma yapıları (priz), suyun enerjisini azaltan enerji kırıcı yapılar, suyun kontrolünü

sağlamak amacıyla kapaklar, fazla suyun akıtılmasını sağlayan savaklar, suyun baraj içerisindeki hareketini sağlayan iletim yapıları olarak incelemiştir(Su Yapıları, 1989).

Akdil (2005) tarafından yapılan çalışmada; toprak dolgu barajları ele almıştır. Çalışmada, toprak dolgu barajlarda oluşan sızma analizi, toprak dolgu barajların proje adımları, stabilite analizleri, ve tipleri hakkında bilgi vermiştir. Toprak dolgu barajlarda oluşan serbest yüzeyli sızmanın çeşitli örneklerini araştırmış ve toprak dolgu baraj gövdesinde oluşan kararsız hal sızma durumu hakkında analizler yapmıştır.

Keskin (2005) tarafından yapılan çalışmada; toprak dolgu baraj gövdesinde oluşan sızmanın, potansiyel ve hız değişimlerini incelemiştir. Palplanş ve bağlama gibi yapıların oluşturduğu potansiyel ve hız değişimlerini incelenmiştir. Sonlu elemanlar metodu ile farklı palplanş, bağlama ve toprak baraj tiplerini incelemiştir. Palplanş modelleri incelenirken, zeminin hidrolik iletkenlik katsayısı, palplanş boylarında değişiklik yaparak analiz yapmıştır. Baraj modelleri incelenirken, memba yüzeyi betonarme kaplı, gövdesinde kil çekirdekli ve geçirimsiz perdeli modelleri esas almıştır.

Üşenmez (2005) tarafından yapılan çalışmada; Dalaman-Akköprü Barajında temelde oluşacak sızma kontrolünü enjeksiyon perdesi yardımıyla engellemektir. Enjeksiyon uygulamasında, temel kayaya kadar kazı işlemi yapılmış enjeksiyonda çimento, bentonit ve sudan oluşan farklı oranlardaki karışımlardan oluşmaktadır. Enjeksiyon işleminin tekniği ve sonuçlarını incelemiştir.

Mesci (2006) tarafından yapılan çalışmada; toprak dolgu barajların gövdede meydana gelen sızmanın büyük bir problem olduğunu belirtmiştir. Sızma olayı incelenirken sonlu farklar metodundan yararlanmıştır. Seferihisar Barajı'nda analizler yapmıştır. Toprak dolgu barajın serbest yüzey çizgisini farklı metotlarla belirleyerek metotların birbirleri ile değerlendirmiştir. Serbest yüzeyli sızmada Laplace denklemini kullanarak basınç yükseklik değerlerini hesaplamıştır. Akım ağı çizgileri ve eşpotansiyel çizgileri grafiksel olarak hesaplamıştır. Hız bileşenleri ve sızma miktarları farklı permeabilite değerlerini kullanarak hesaplamış ve birbirleri ile karşılaştırmıştır.

Çilingir (2007) tarafından yapılan çalışmada; Büyükçekmece Barajı'nın gövdesinde meydana gelen sızmaları sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplamıştır. Ayrıca Geostudio SEEP/W programını kullanarak baraj üzerinde sızma analizleri yapmıştır. Bulunan sonuçları DSI'nin sızma gözlemleri verileri ile kıyaslamıştır. Baraj üzerinde serbest sızma yüzeyi çizilip, mansap şevinden suyun çıkış noktasını ve toplam sızma debisi miktarına ulaşmıştır. Elde edilen değerlerin kabul edilebilir seviyede olduğunu belirtmiştir.

Sağlıca (2013) tarafından yapılan çalışmada; dolgu barajlarda, gövdede meydana gelen sızma olayını sonlu farklar metodunu kullanarak analiz etmiş ve diğer yöntemler ile karşılaştırmıştır. Sızma analizi sonucunda elde edilen sonlu farklar yönteminin analiz değerlerinin kullanılabileceği ve sonlu elemanlar metodu ile karşılaştırılabileceği sonucuna varmıştır.

Kesgin (2015) tarafından yapılan çalışmada; atık toprak dolgu barajın sonlu farklar metodu ile matematik sızma modelini ele almıştır. Atık toprak baraja ait sızma ağını oluşturup, toplam sızma miktarını ise GeoStudio SEEP/W programı ile kıyaslamıştır. Elde edilen sonuçların kabul edilebilir seviyede olduğunu görmüştür.

Al-Janabi ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada; toprak dolgu baraj modellemesi için yedi farklı parametreye sahip zemin yapısını ele alarak sızma analizini incelemiş ve en uygun zemin yapısını seçmiştir. Toprak dolgu barajda sızma analizini; fiziksel, matematiksel, nümerik metotlar yardımıyla modellemiştir. Bulunan değerleri SEEP/W programı ile değerlendirmiştir. Bulunan serbest yüzey sızma çizgilerini üç metotta da birbirine yakın olduğunu tespit etmiştir.

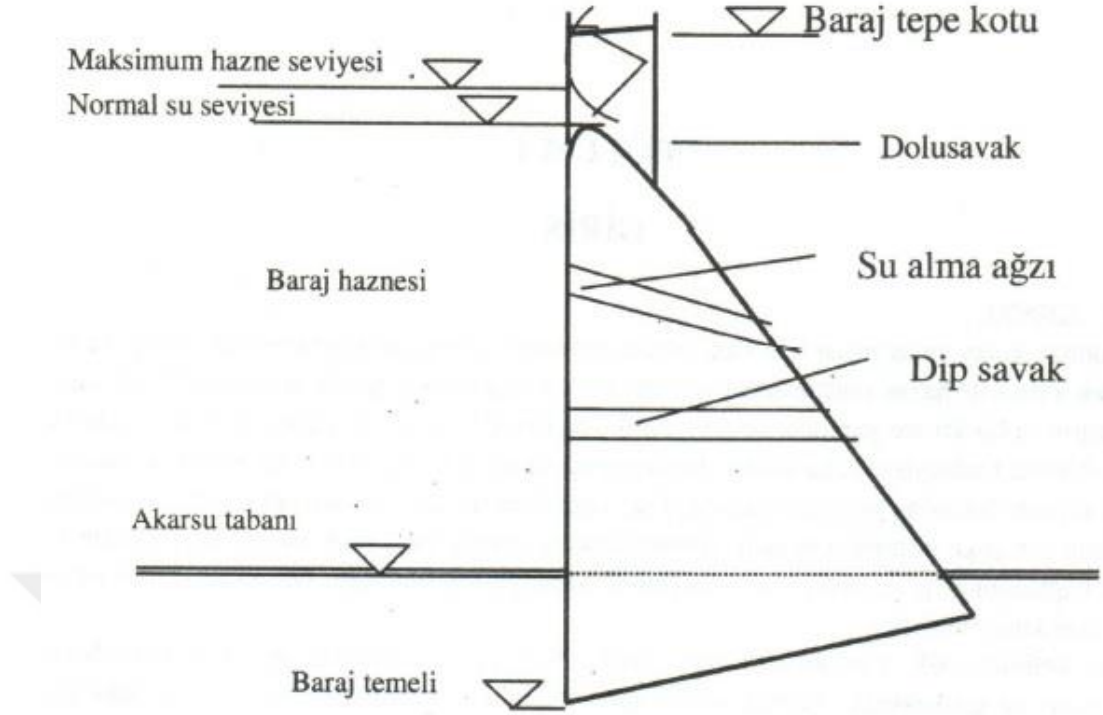
2. BARAJLAR

2.1 Barajın Önemi

Baraj, göl alanı oluşturarak suyu tutmak amacıyla nehir üzerine inşa edilen yapıdır. Devlet Su İşleri'ne (DSİ, 2022) göre, suyu haznede toplamanın amacı, su miktarının yetersiz olduğu dönemlerde kullanımını sağlamak ve taşkın esnasında suyu kontrol altına almak için yapıldığı belirtilmiştir. M.Ö. 4000 yıllarında inşa edilen ilk barajın, insanların temel ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla yapıldığı düşünülmektedir. Barajların insanoğluna katkıları saymakla bitmezken birkaçı şunlardır; içme suyu ihtiyacının karşılanması, suyun sahip olduğu enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme, göl alanında oluşacak yeni balık kültürü, uzak kesimlerdeki arazilere su taşınması, taşkın oluşumunu engelleyerek doğal çevreye zararın önüne geçilmesine katkı sağlamaktadır. Barajların sahip olduğu bu özelliklere göre ve yüksek maliyetli inşalarından dolayı hata oranının sıfıra indirgenmesinin önemi büyüktür.

2.2 Baraja Ait Kısımlar

Barajın bölümleri; baraj gövdesi, baraj gölü, su alma yapısı, yaklaşım kanalı, dipsavak-dolusavak, boşaltım kanalı, enerji kırıcı tesis, vana odası ve tahliye büzünden oluşmaktadır.



Şekil 2. 1: Toprak dolgu barajın gövde kesiti

2.2.1 Barajda Gövde

Baraj gövdesi, rezervuar alanını meydana getiren ve suyun geçişini engellemek için inşa edilen beton duvarı, dolgu malzemesi, membrandan meydana gelmektedir. Berkün'e (2005) göre baraj gövdesi, baraj gölünün oluşmasını sağlayan iki dağ arasına kurulup vadiyi kapatan çeşitli malzemeler kullanılarak inşa edilen banttir. Ağırlioğlu ve Erkek (2002) baraj gövdesini, su rezervuarını oluşturan, basınca dayanıklı olarak inşa edilen yapı olarak ifade etmişlerdir.

2.2.2 Barajda Dolusavak

Dolusavak, memba kısmında bulunan rezervuar suyunun mansap kısmına geçişini sağlayan ve su yüksekliğinin olması gereken seviyede kalmasını sağlamaktadır. Berkün (2005)'e göre dolusavak, barajda bulunan bölümlerin zarar görmesini engellemek amacıyla suyun memba bölümünden mansap bölümüne

geçişini sağlayan yapıdır. Ağırlioğlu ve Erkek (2002) ise dolusavağı, barajların güvende kalmasını sağlayan yapı olarak ifade etmişlerdir. Dolusavak genellikle suyun savak eşiğine gelmesini sağlayan yaklaşım kanalı, eşik yapısı, tabanda biriken tortunun tahliyesini sağlamak için boşaltım kanalı ve suyun sahip olduğu enerjiyi azaltmak için enerji kırıcı tesis bölümlerinden meydana gelmektedir (Su Yapıları, 1989).

2.2.3 Barajda Derivasyon

Derivasyon, suyu inşaat alanından uzaklaştırarak mansaba yönlendiren kısım iletim hattı, haznede bulunan suyu mansaba kontrollü olarak akışını sağlayan kısım ise dipsavaktır (Berkün, 2005; Ağırlioğlu 2002). Derivasyon, barajın bölümleri inşası esnasında nehir sularının alandan tahliyesini sağlamak amacıyla tünel biçimindeki yapıdır. Dipsavak, baraj rezervuarındaki fazla suyu ve nadir olarak da baraj gölü zeminindeki çöken malzemeyi boşaltmak için kullanılan savak yapısıdır. Taşkın esnasında fazla miktarda madde taşındığı için dip savaklar açılır ve maddeler su ile birlikte baraj rezervuarından uzaklaştırılır.

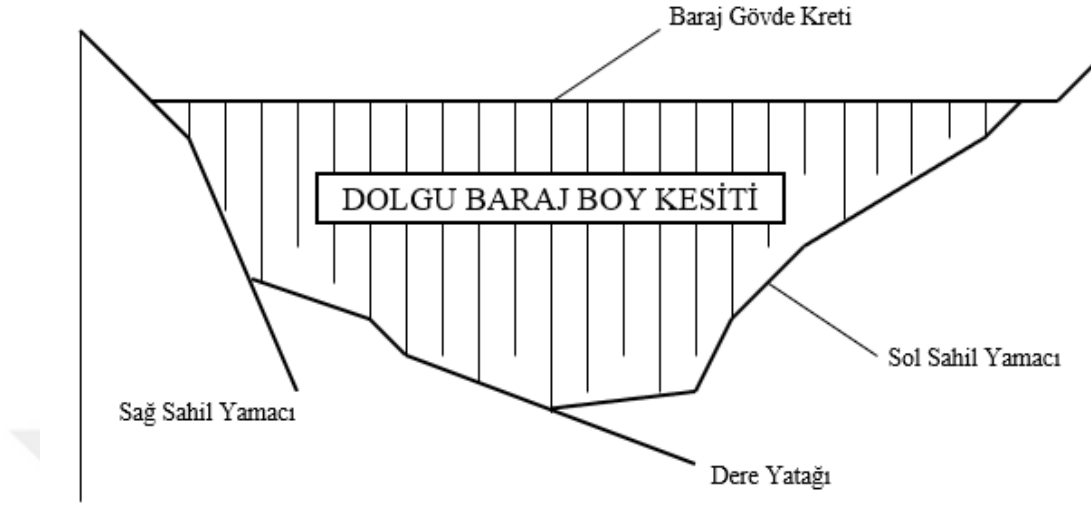
2.2.4 Barajda Diğer Tesisler

Barajların üzerinde kurulan çeşitli kullanımlarına göre inşa edilen yapılardır. Bunlardan birkaçı, hidroelektrik türbin sistemleri, suyu filtreler yardımıyla içilebilir hale getirmek için kurulan sistemler, barajın balık yaşam alanlarını kısıtlamasını engellemek amacıyla balık geçidi gibi kısımlardan meydana gelmektedir.

2.3 Kullanılan Malzeme ve İnşa Tekniğine Göre Baraj Türleri

Baraj gövdesi, memba kısmında yapay gölü oluşturan ve mansap kısmına doğru su geçişini sağlayan yapıdır. Baraj gövdesinin projelendirmesinde tüm deneylerin yapılması, baraj tipine göre malzemelerin seçilmesi ve gövde kısmının zarar görmesi engellenecek şekilde inşa edilmektedir. Baraj inşasında kullanılacak

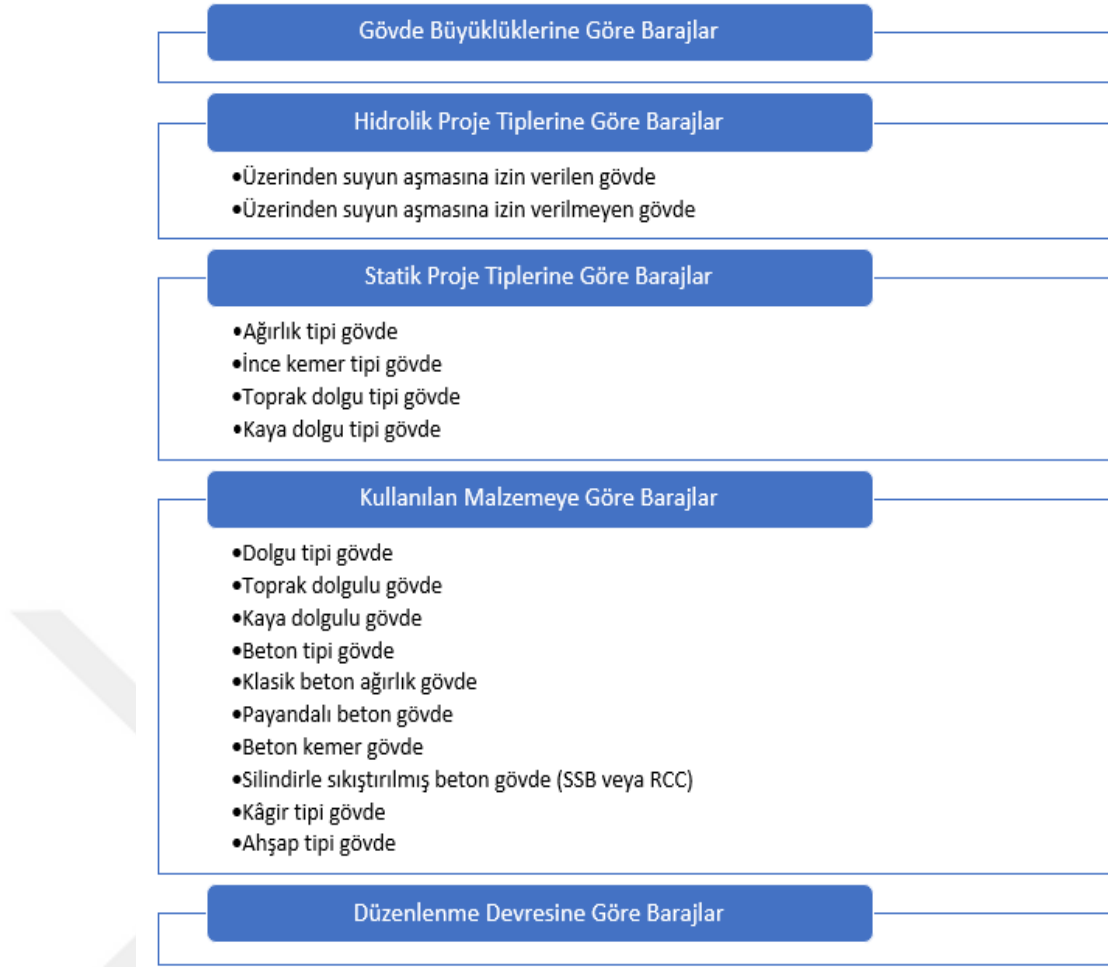
malzemelerin hesaplanan maliyet yaklaşımına dikkat edilmeli, malzemelerin şantiye alanına ulaşımı kolay olması gerekmektedir.



Şekil 2. 2 : Dolgu barajın boy kesit görünümü

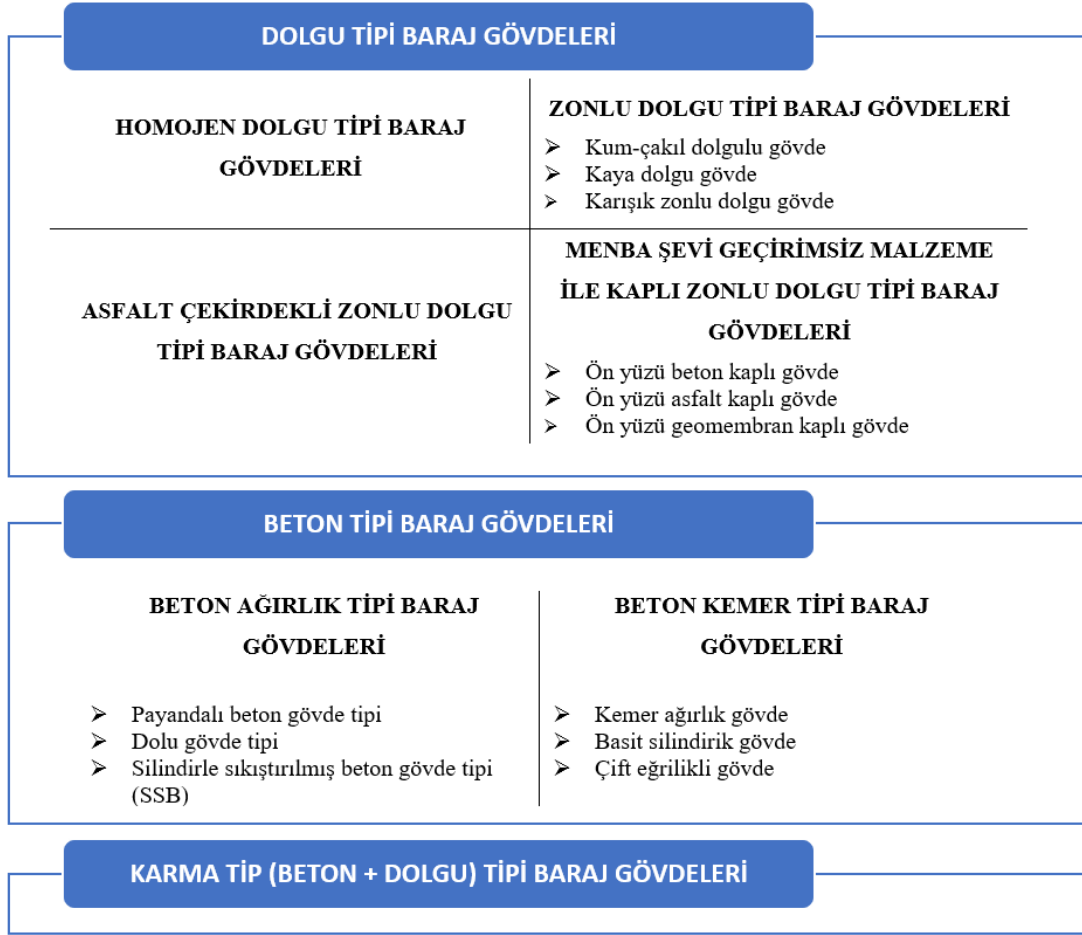
Baraj gövdesi inşasında kullanılan zemin parametreleri barajın güvenliği açısından önemli rol oynamaktadır. Birkaç zemin parametreleri şunlardır; permeabilite katsayısı, doğal birim hacim ağırlığı, boşluk oranı, dane büyüklüğü, boşluk suyu oranı gibi fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre değişmektedir. Bunun sonucunda, baraj gövdesinde yapılacak deneyler ve hesaplamalardan bazıları stabilite, sızma hattı, oturma hesabı gibi sismik ve dinamik yükler altında yapılmasıyla barajın güvenli kalması sağlanmaktadır.

Hesap sonuçlara göre bir optimizasyon yapılarak baraj gövdesinin boyutları, tipi ve zemin çeşidine karar verilmektedir.



Şekil 2. 4: Emiroğlu (1999)'a göre baraj gövdelerin sınıflandırılması

Helvacı (2009) çalışmasında, baraj gövdelerini üçe ayırmıştır. Bunlar dolgu, beton ve karma tip gövdedir. Baraj gövdesinde kullanılan malzeme çeşidine göre ve inşa tekniklerine göre alt başlıklar altında toplamıştır. Bunlar Şekil 2.5'de gösterilmiştir;



Şekil 2. 5 : Helvacı (2009)’a göre baraj gövdelerin sınıflandırılması

2.4 Baraj Gövdesinde Bulunan Ölçüm Cihazları

Barajın projelendirilme aşamasında gövde kısmın stabilitesi ve durabilitesi için çeşitli analizler yapılmaktadır. Yapılan analizler baraj hizmet vermeye başladıktan sonra barajın durumu hakkında tam bir bilgi vermemektedir. Bu yüzden baraj gövdelerinde inşa esnasında, yerleştirilen bazı ölçüm cihazları, su basıncı, su yüksekliği, çökme, kabarma gibi konular hakkında bilgi vermektedir. Genel olarak baraj gövdesinin en üst kısmında ölçüm odaları bulunmaktadır.

Ertan (2002) yapmış olduğu çalışmada, baraj gövdesi inşası için kullanılacak malzemelerin laboratuvar deneylerindeki karakteristik özellikleri ile inşa sonrası malzemelerin farklı şekillere benzediğini ifade etmiştir. Bu nedenle baraj gövdelerine yerleştirilecek ölçüm cihazlarla barajın güncel bilgileri takip edileceğini ifade etmiştir.

Çetin ve Bilge (2004) çalışmasında, baraj gövdesinde bulunan ölçüm cihazlarının, projelendirme aşamasında yapılan analizlerin karşılaştırılmasında, su tutma ve boşaltma işlemlerinde, baraj gövdesinin davranışı hakkında veriler toplamayı sağladığını ifade etmişlerdir.

DSİ Genel Müdürlüğü (2014) şartnamesinde, toprak dolgu baraj türü gövdeler için ölçüm cihazlarını; piyezometreler, toplam basınçölçer, düşey deplasmanları hesaplamak amacıyla magnetic extensometer ve su basınçölçer olarak ifade etmiştir.

2.5 Baraj Gövdesinde Borulanma ve Alınabilecek Geoteknik Önlemler

Baraj gövdelerinde sızma oluşmasının en büyük tehlikesi sızmanın borulanmaya sebep olma riskidir. Siltli çekirdek dolgu barajlarda veya homojen dolgulu barajlarda sızma sonucu oluşan borulanma kaçınılmaz olarak baraj gövdesinin yıkımına sebep olmaktadır. Bu tür dolgu barajlarda, baraj gövdesinde oluşacak sızmaların telafisi neredeyse mümkün olmamaktadır. Genel olarak iç erozyon gövdenin mansap topuğundan rezervuara doğru devam etmektedir. Baraj gövdesindeki borulanma veya oluşan su kanalları barajın yıkılmasına neden olmaktadır.

Demirköprü Barajı, 1954-1960 yılları arasında enerji üretimi ve sulama suyu ihtiyacı amacıyla inşa edilmiş bir toprak dolgu barajdır. Barajın kullanıma açıldıktan sekiz yıl sonra mansaptaki su sızıntıları nedeniyle hasar almıştır. Sızma nedeni için iki farklı neden ortaya atılmıştır. Birinci ihtimal, oturma sonucuyla geçirimsizlik perdesinde bulunan çatlak sonucu kil tabakadan bazalt tabakaya doğru borulanma meydana gelmiştir. İkinci ihtimal olarak, metamorfik kayalarda meydana gelen çatlaklardan dolayı olduğu tahmin edilmiş ve enjeksiyon yapılarak geoteknik önlemler alınmıştır.

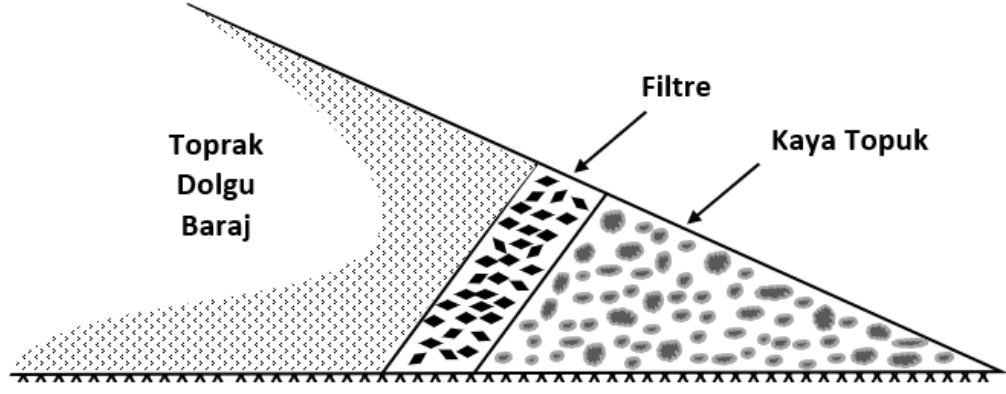
ABD'nin Idaho Eyaletinde bulunan Teton Barajı toprak dolgu baraj tipine sahiptir. Baraj gövdesinde geçirimsizliği sağlayacak olan kil çekirdeğin inşaatı sırasında iyi sıkıştırılamaması sonucu barajın yamaç kısmında içsel erozyon meydana

getirmiştir. Bu yıkım sonucu mansapta yer alan arazide taşkına neden olmuştur. Çok sayıda yerleşim yeri ve araziler sular altında kalmıştır.

ICOLD (The International Commission on Large Dams) barajların zarar görme ve yıkılmalarına ait istatistiki verileri 1974 ve 1995 yıllarında yayınlamıştır. 1975 ve 1988 yıllarında USCOLD (The United States Committee on Large Dams) ABD’de yer alan barajlarla ilgili inceleme yayımlamıştır. Bununla birlikte daha birçok araştırmacı istatistik metodunu kullanarak baraj yıkılma nedenlerini toplamış ve analizini yapmıştır (Zhang et al., 2009).

İstatistiksel olarak yapılan bir başka çalışmada ise tüm baraj türleri için ortalama hasar görme olasılığı yaklaşık 0,0001 olarak bulunmuştur. En çok hasar barajın işletilmeye başlamasını takip eden birkaç yıl içinde gerçekleşmiştir. Beton barajlardaki hasar olasılığının beton olmayan (toprak, kaya dolgu) barajlardan daha yüksek olduğu; ayrıca kayma, dolusavak yetersizliği ve gövde üzerinden aşma vakalarına göre borulanma ve temelden sızmanın daha fazla neden olduğu belirtilmiştir (Cheng S.T., 1993).

Erken tespit edilen sızmalarda baraj gölünü boşaltıp sızmanın meydana geldiği lokasyonda tamir yapmak, gövdenin o kısmını kaldırıp yeniden inşa etmek veya ön yüze ekstra bir geçirimsizlik perdesi (beton, jeotekstil vb.) oluşturmak, mansap kısmına filtre ve topuğun eklenmesi gerekmektedir. Ancak bu oldukça zahmetli ve yüksek maliyetli bir iş olmaktadır. Bunun dışında bu tür dolgu barajlar tam dolu ve işletmede ise baraj gövdesinde meydana gelecek sızmanın telafisi yoktur ve bu tür bir sızma önce borulanmaya daha sonra gövdenin yıkılmasına sebep olacaktır. Bu nedenle bu tür barajlarda inşasına özen göstermek gerekmektedir.



Şekil 2. 6: Borulanmanın engellenmesinde alınacak geoteknik önlem



3. BARAJ GÖVDESİNDE SIZMA

Sızma, barajın memba bölümünde bulunan suyun sahip olduğu potansiyelden dolayı baraj gövdesinden mansap bölümüne doğru hareketi olarak tanımlanmaktadır. Sızma olayını engellemek için baraj minimum boşluk oranına göre projelendirilmiş olsa da mevcut potansiyelden dolayı sızma hatları oluşmaktadır. Oluşan bu sızma hatlarını ve sızma miktarının hesaplanması gerekmektedir. Gövdedeki sızma miktarları belirli sınırlarda kaldığı sürece yapıya zarar vermeyecektir. Sızma değerinin izin verilenden fazla olması durumunda ise baraj içinde borulanmaya, içsel erozyona bağlı zarar görmesine neden olmaktadır. Bu amaçla geliştirilecek sayısal model, mevcut durumun tanımlanmasında çok önemli bir işlevi yerine getirecektir.

Yapımı tasarlanan herhangi bir biriktirme haznesinin gövde imalatı çok çeşitli malzemelerden ve çeşitli metotlarla inşa edilmektedir. Toprak dolgu, kil çekirdekli, beton kemer, silindire sıkıştırılmış beton, asfalt çekirdekli, membran kaplı gibi birçok değişik gövde tipi barajın yapılacağı yer ve malzemelerin uyumuna göre seçilmektedir. Tüm bu baraj tiplerinin birinci önceliği ise geçirimsizlik ve önünde oluşacak su basıncına karşı ayakta durmaktır.

3.1 Zeminlerde Permeabilite

Barajın memba bölümünden mansap bölümüne doğru suyun hareketi iki şekilde meydana gelmektedir. Baraj temelinden ve barajın gövdesinden sızma olayı gerçekleşmektedir. Sızan suyun miktarı ise zeminde bulunan danelerin çeşidi ve granülometrisine göre farklılık göstermektedir. Suyun daneler arasında hareket etmesi sonucu oluşan sızmayı hesaplanmasında parametrelerden biri geçirimsizlik ve geçirimsizlik katsayısı veya permeabilite katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Birimi m/s dir. Zeminlerin permeabilite değerleri, danelerin boşluk oranına, granülometri değerine, zeminlerin birim hacim ağırlığına göre değişmektedir.

Terzaghi ve Peck'e göre zemin sınıflandırılması ve geçirimsizlik sınıfları tablodaki gibi incelenmiştir. Dane boyutu azaldıkça hidrolik iletkenlik değeri azalmaktadır.

Tablo 3. 1: Zemin türlerine ait permeabilite katsayıları (m/s)

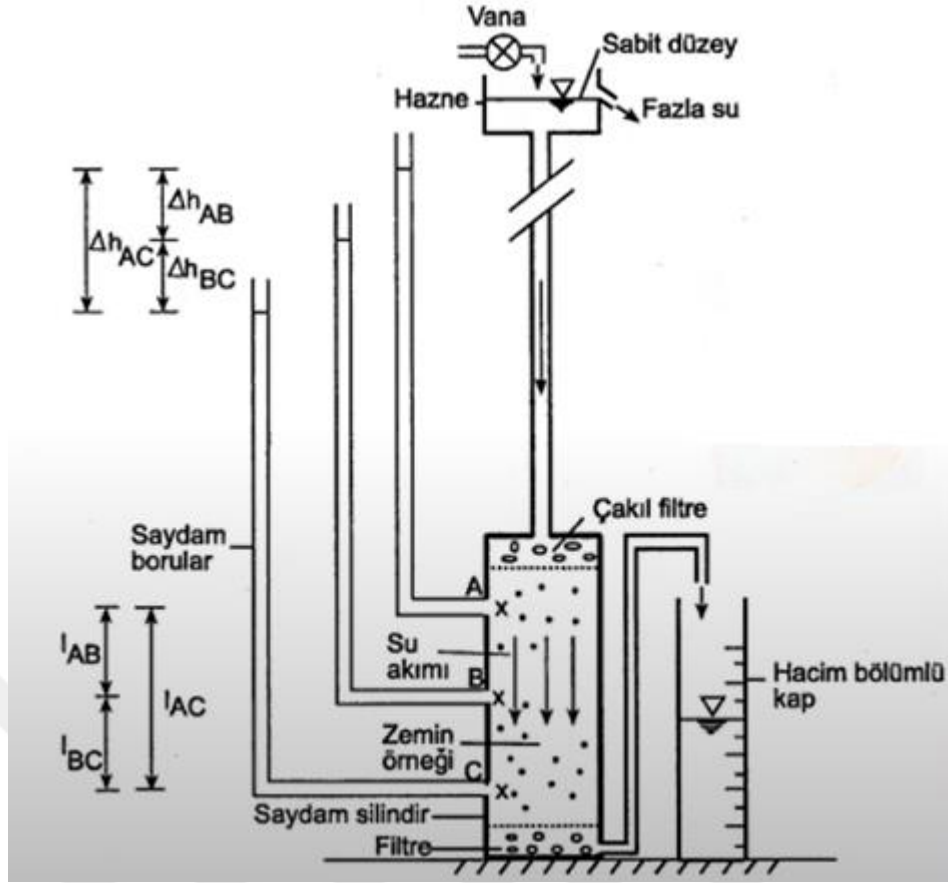
k (m/s)	10 ²		10 ⁰		10 ⁻⁴		10 ⁻⁶		10 ⁻⁹
Geçirimsizlik Sınıfı	Aşırı Geçirimli		İyi Drenaj Özelliği		Drenaj Güç		Geçirimsiz		
Zemin Türü	İri ve Temiz Çakıl		Temiz Kum, Kum ve Çakıl Karışımı		Çok İnce Kum Organik ve İnorganik Silt, Kum ve Silt		Ayrışma Bölgesinin Altında Homojen Killer		
Toprak Baraj Yapımında Kullanılan Kısımlar	Geçirimli Bölgelerde				Geçirimsiz Bölgelerde				

3.1.1 Permeabilite Katsayısını Belirleme Yöntemleri

Permeabilite katsayısı, arazide ve laboratuvarda yapılan ampirik deneyler yardımıyla hesaplanmaktadır. Laboratuvar deneyleri sabit seviyeli permeabilite deneyi ve düşen seviyeli permeabilite deneyi olarak ikiye ayrılmaktadır. Arazi deneyi ise kuyu (well point) yöntemi olarak bilinmektedir.

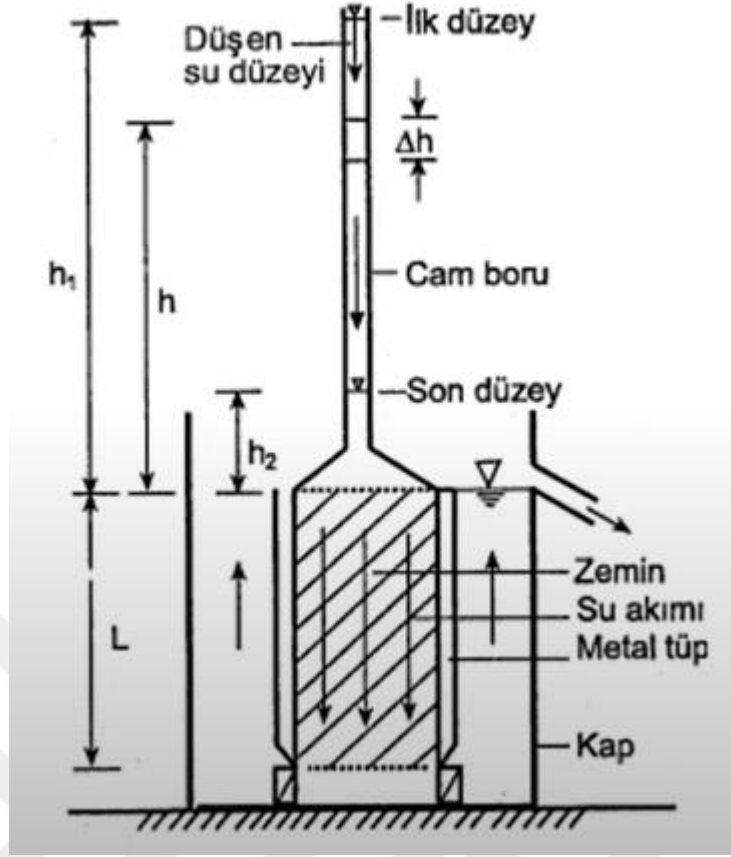
3.1.1.1 Laboratuvar Deneyleri

Laboratuvar deneylerinde ilk olarak sabit seviyeli permeabilite deneyi incelenmiştir. Bu deney, kaba daneli zeminler için uygundur. Geçirimsizliği ölçülmek istenilen zemin, arazideki sıkılığına benzer olarak saydam silindire yerleştirilmektedir. Zemin danelerin düzenden yıkanıp gitmesini engellemek için zemin numunesinin altına ve üzerine filtre oluşturulmaktadır. Sabit su düzeyli bir hazneden gelen su, zeminden geçerek hacim bölümlü bir kaptan toplanmaktadır. Kararlı akış elde edildikten sonra belli bir sürede kaptan biriken su debisi hesaplanmaktadır. Zemin numunesinin alt, üst ve orta kısımlarına bağlanan saydam borularda su düzeyleri kaydedilmektedir. Darcy yasasından permeabilite katsayısı değeri hesaplanmaktadır.



Şekil 3. 1: Sabit düzeyli permeabilite deney düzeneği

Laboratuvar deneylerin ikinci türü, düşen düzeyli geçirimlilik deneyidir. Bu deneyde geçirimliliği düşük olan ince daneli zeminler için kullanılmaktadır. Deney için kullanılan zemin numunesi, örselenmiş veya örselenmemiş şekilde silindirik metal kap içine yerleştirilmektedir. Zemin numunesine göre uygun kesitteki saydam bir boru zemin numunesinin üzerine takılmaktadır. Zemin danelerin düzenden yıkılıp gitmesini engellemek için zemin numunesinin altına ve üzerine filtre oluşturulmaktadır. Üst kısımda bulunan boruya doldurulan su, zemin numunesinden geçerek dışarı akmaktadır. Kararlı akış elde edildikten sonra deney başındaki ve deney sonundaki su yükseklikleri ile arada geçen zaman ve enkesit alanlarından, zemin numunesinin permeabilite katsayısı hesaplanmaktadır.



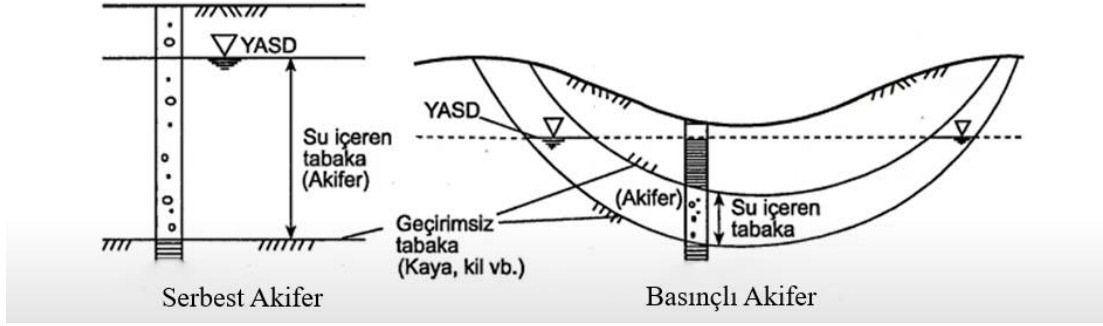
Şekil 3. 2: Düşen düzeyli permeabilite deney düzeneği

3.1.1.2 Arazi Deneyleri

Zeminde su içeren tabakalardan pompa yardımı ile su çekmek suretiyle yapılan deney türüdür. Su içeren geçirimli tabakaya akifer denilmektedir. Serbest ve basınçlı akifer olmak üzere iki türde incelenmektedir.

Serbest akiferde, zeminde açılan kuyudan sabit bir debi ile su çekilmektedir. Kararlı durumda yeraltı su seviyesi kuyu içinde alçalarak kuyu içinde sabit durumu almaktadır. Bu durumda kuyu merkeziyle aynı doğrultu üzerinde açılacak en az iki gözlem kuyusundan alçalan su düzeyi ölçülmektedir. Permeabilite katsayısını belirlemek için kuyu merkezinden itibaren belirlenen yarıçap ve yükseklikte silindirin dış yüzünden birim zamanda geçen su, süreklilik ilkesi gereği kuyudan çekilen debiye eşit kabul edilmektedir.

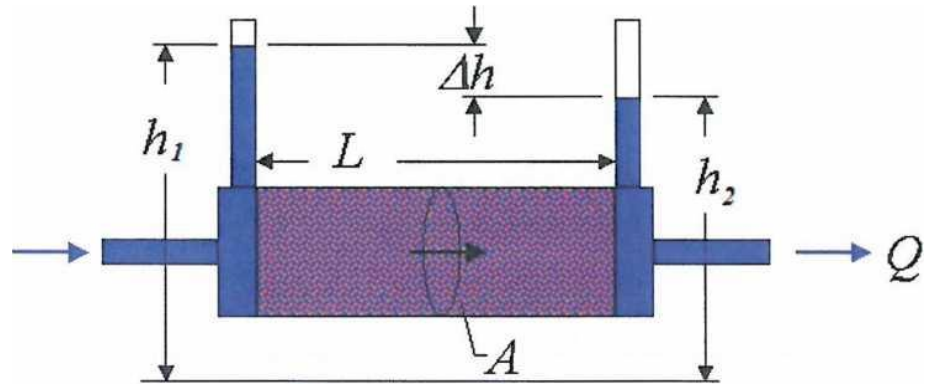
Basınçlı akiferde, benzer şekilde açılan kuyudan sabit debi su çekilerek kararlı durumda gözlem kuyularındaki su düzeyleri ölçülmektedir.



Şekil 3. 3: Serbest akifer ve basınçlı akifer kuyu düzeneği

3.2 Darcy Kanunu

Gözenekli ortamda akışı modelleyen en eski yasa Henry Darcy tarafından 1856 yılında yapılan deneysel çalışma sonucu ortaya çıkmıştır. Darcy'nin deney düzeneği, içinde kum bulunan dairesel kesitli bir borudan ibarettir. Akış çok yavaştır ve borunun üst kısmından giren su aşağı doğru kum taneleri arasından süzülerek iner. Akış daimi, gözenekli ortam homojen ve akış tek yönlüdür. Darcy, deney sırasında akışkanın kum ile dolu kısmına girdiği sütunun üst ve çıktığı alt seviyelerindeki basınç farkı ile akışkan akışı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu bulmuştur (Baytaş, 2006).



Şekil 3. 4: Darcy kanunu su akış kesiti (Çilingir,2007)

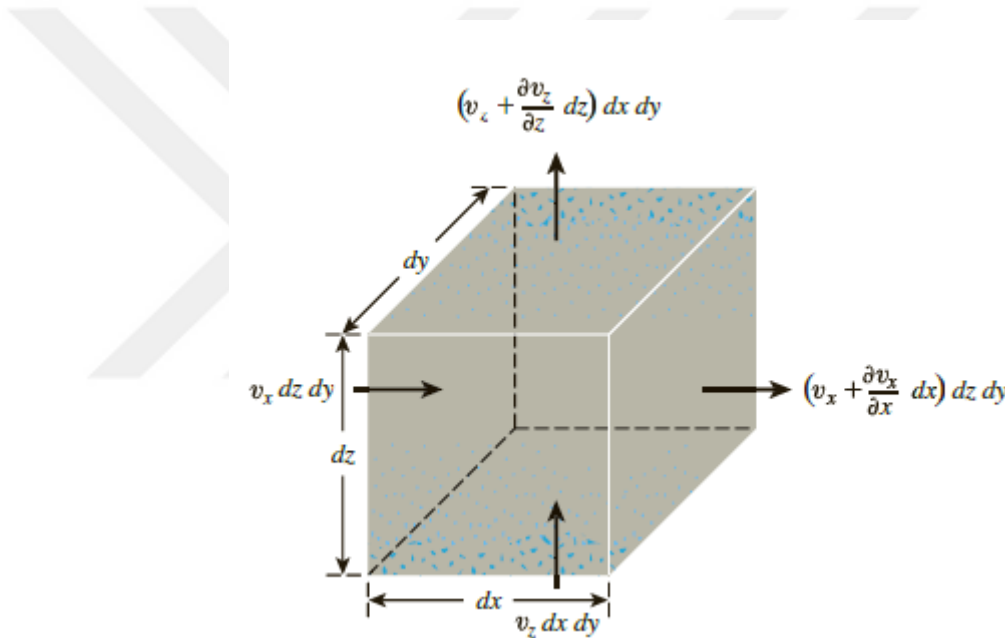
$$V = ki = k \frac{\Delta h}{L} \quad (3.1)$$

$$q = kAi = kA \frac{\Delta h}{L} = kA \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (3.2)$$

şeklinde bulmuştur. Formüldeki k değeri permeabilite (hidrolik iletkenlik) katsayısını ifade etmektedir.

3.3 Laplace Denklemi

Laplace denklemini, homojen ve izotropik olan sürekli zeminler için geçerlidir. Darcy Kanunu uygulanmaktadır. Su akımı sırasında zemin elemanın hacmi sabit kalmaktadır. Zemin elemanına birim zamanda giren ve çıkan su miktarı eşittir. Yoğunluk sabit kabul edildiği için kontrol altına giren ve çıkan debiler birbirine eşit olmaktadır.



Şekil 3. 5 : Laplace denkleminin zemin kesiti üzerinde gösterimi

x ve z yönündeki akımı inceleyecek olursak ;

$$\text{x yönündeki hidrolik eğim: } i_x = -\frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.3)$$

$$\text{z yönündeki hidrolik eğim: } i_z = -\frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.4)$$

(3.3) ve (3.4) denklemlerinde eksi işaretler piyezometrik yüke ters yönde olduğunu ifade etmektedir. Birim zamanda giren su miktarı:

$$q_g = v_x dz dy + v_z dx dy \quad (3.5)$$

Birim zamanda çıkan su miktarı:

$$q_{\zeta} = v_x dz dy + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx dz dy + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz dx dy \quad (3.6)$$

Su akımı sırasında zemin elemanın hacmi sabit kaldığı göz önüne alınarak birim zamanda giren ve çıkan su miktarı eşittir.

$$q_g = q_{\zeta} \quad (3.7)$$

$$v_x dz dy + v_z dx dy = v_x dz dy + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx dz dy + v_z dx dy + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz dx dy \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} dx dz dy + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz dx dy = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3.10)$$

olarak bulunmaktadır. İki boyutlu sızma probleminde izotropik zeminleri Darcy Kanunu'nu kullanarak her iki yöndeki hidrolik iletkenlik katsayı değeri birbirine eşittir ve hızları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k_x = k_z = k \quad (3.11)$$

$$v_x = k i_x = -\frac{\partial}{\partial x} * (kh) \quad (3.12)$$

$$v_z = k i_z = -\frac{\partial}{\partial z} * (kh) \quad (3.13)$$

olarak ifade edilir. Buradan da hız potansiyeli ;

$$\varphi = kh \quad (3.14)$$

olarak ifade edilirse hız formülleri yerine yazılırsa;

$$v_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (3.15)$$

$$v_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (3.16)$$

İki yöndeki hızlar elde edilir. Denklem (3.10) ile düzenlenirse iki boyutlu Laplace Denklemimin en genel hali ;

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (3.17)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir.

3.4 Sızma Ağları

Toprak dolgu barajlarda kullanılan akım ağı, bu barajlardaki sızmaların nasıl ilerlediğini gösteren bir sistemdir. Toprak dolgu barajlarının inşasında sızma ağını elde edebilmek akım ağının çizilmesiyle mümkün olmaktadır. Sızma ağları; akım çizgilerini ve bu akım çizgilerine dik olan eş basınç çizgilerinin meydana getirdiği karesel olan bir akım ağını ortaya çıkarmaktadır. Buna ek olarak sızma ağları barajların geçirimsizlik perdesi ve içerisinde yer alan freatik hat çizgisiyle geçirimsiz temelin sınır koşullarını meydana getirmektedir. Freatik hattın tanımına gelinirse de bu hat atmosfer basıncına ulaşan noktaları birleştirmektedir ve serbest yüzey olarak tanımlanmaktadır.

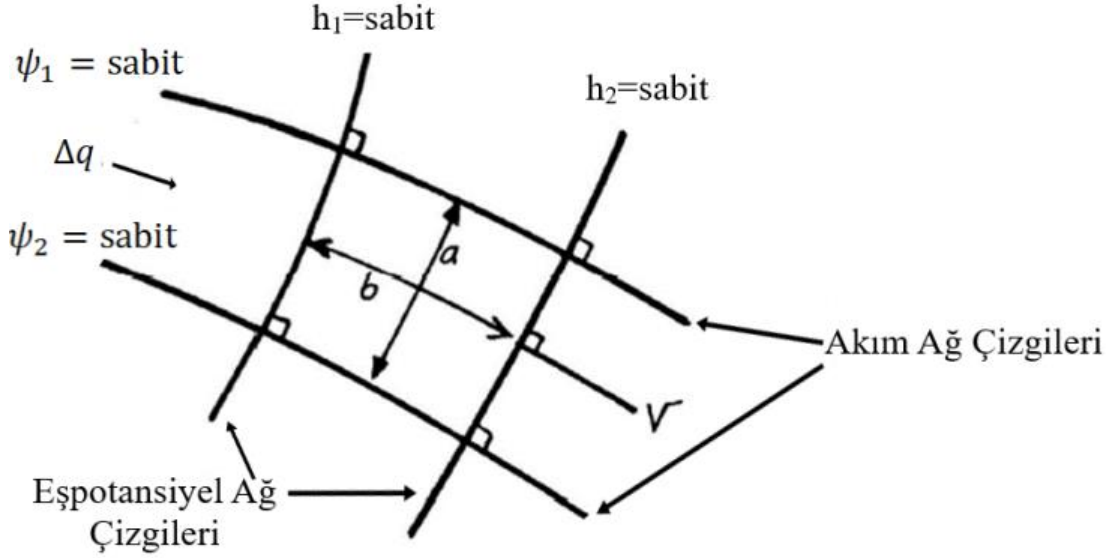
3.4.1 İzotropik Zeminlerde Akım Ağı Çizilmesi

Akım ağı, basınç sayesinde belli bir yönde ilerleyen su hatlarıyla eş basınç hatlarının ilişkisi olarak ifade edilmektedir. Akım ağının çizimi için aşağıdaki aşamalar gerçekleşmektedir;

Akım ağını meydana getirecek akım çizgilerinin adedi belirlenir. Akım çizgi sayısı ‘n’ sembolüyle, hidrolik yük sembolü ‘h’ ile gösterilmektedir.

Çizilecek eş basınç çizgileri, geçirimsiz yüzeye dik biçimde olmalıdır.

Akım ağ çizgileri, memba şevine ve eş basınç çizgilerine dik konumda olacak şekilde karesel ağı oluşturarak çizilmelidir.



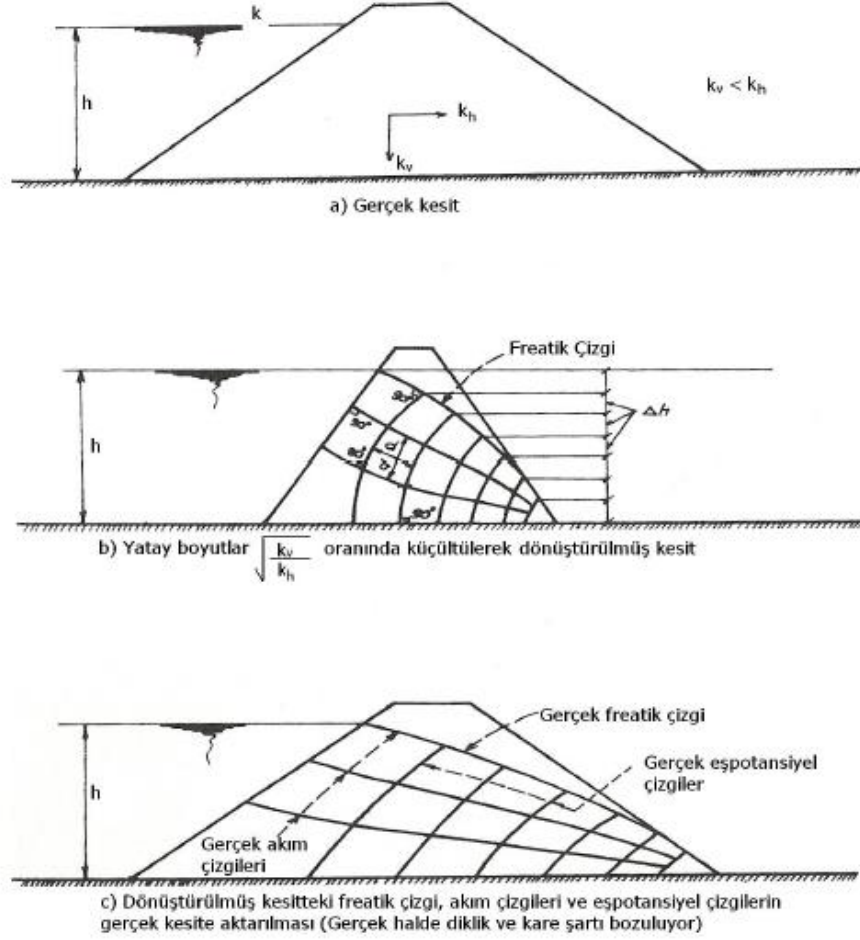
Şekil 3. 6: Akım ağı ve eşpotansiyel ağın görünümü

İzotropik ortamlardaki akımları ölçmek amacıyla çizilmektedir. Bu akımların devamlı olması koşulu aranmamaktadır. Her ağ için sınır şartları değişmektedir. Akım çizgileri, eş basınç çizgilerine dik olarak çizilmektedir. Birbirini takip eden akım ağlarından eşit miktarda su geçmektedir.

3.4.2 Anizotropik Zeminlerde Akım Ağı Çizilmesi

Zeminlerin bulunduğu katmanlarda homojen olarak dağılım göstermesi mümkün olamayacağı için yatay ve düşey permeabilite değerleri farklı olmaktadır. Bu durum Laplace denkleminin geçerli olduğu izotropik zeminlerde çizilmiş akım ağı ile günümüzdeki zemin problemlerinde akım ağı çizimleri değişkenlik göstermektedir.

Anizotropik zeminlerde akım ağı çizilirken ilk olarak yatay permeabilite değeri k_v şeklinde, düşey permeabilite değeri ise k_h ile ifade edilmektedir. Yatay değerler, düşey değerlere göre $\sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ değeri kadar azaltılarak akım ağı tekrar çizilmelidir. Böylelikle çizilen akım ağının permeabilitesi $\sqrt{k_h k_v}$ değerinde olan bir zemin meydana getirmiştir. Yeni çizilen akım ağlarında gerçek sızma miktarını hesaplanmaktadır.



Şekil 3. 7: Anizotropik zeminlerde akım ağı ve eşpotansiyel ağı çizilmesi (Kesgin,2015)

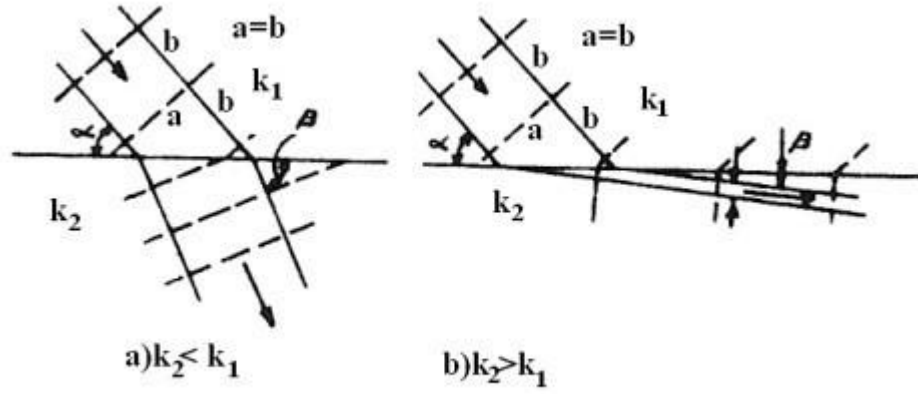
3.4.3 Homojen Olmayan Tabakalı Zeminlerde Akım Ağı

Zeminler homojen olarak dağılım gösterdiği zaman yatay boyutları anizotropik zeminlerdeki gibi çarpılarak yapılmaktadır. Ancak günümüzdeki mühendislik projelerinde zeminler farklı tabakalar ve bu tabakalara bağlı permeabilite katsayılarından meydana gelmektedir. Su, akımı sırasında farklı zeminlere geçerken kırılmaya uğramaktadır. Akım ağlarının geçirimli malzemelerde ilerlerken sıklaşmaya geçirimsiz malzemelerde açılmaya neden olmaktadır.

Homojen olmayan tabakalı zeminlerde permeabilite değeri hesaplanmasında düşey permeabilite için;

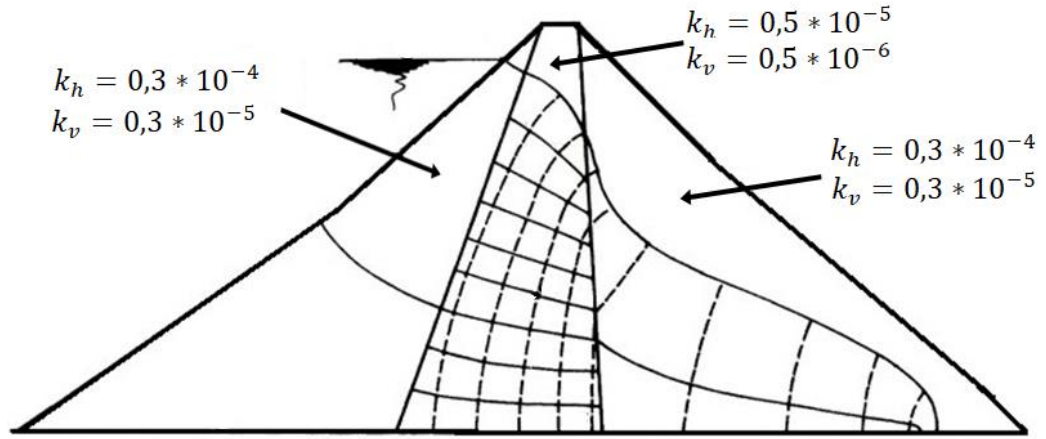
$$k_v = \frac{\frac{k_1}{L_1} + \frac{k_2}{L_2} + \frac{k_3}{L_3}}{\frac{L}{L}} \quad (3.18)$$

Şekil 3.5’de ilk kısımda permeabilite değeri büyük zeminden, permeabilite değeri küçük zemine doğru suyun akışını göstermektedir. İkinci şekilde ise permeabilite değeri küçük zeminden permeabilite değeri büyük zemine doğru suyun akışını göstermektedir.



Şekil 3. 8: Permeabilitesi farklı zeminlerde su akışının görünümü (Mesci,2006)

Şekil 3.7’de zonlu yapıda toprak dolgu barajın akım ağı gösterilmiştir. Ortada bulunan zeminin permeabilite değeri diğer iki bölgedeki zeminlerin permeabilite değerinden küçüktür.



Şekil 3. 9: Permeabilitesi farklı zeminlerin su akışı geçişlerinin kesit üzerinde görünümü (Mesci,2006)

3.5 Freatik Hat Hesaplama Yöntemleri

Toprak dolgu barajın gövde kısmının sızması esnasında en üst seviyeden geçen serbest sızma yüzeyi veya doygunluk çizgisi olarak adlandırılmaktadır. Serbest sızma yüzeyi çizgisindeki bütün basınçlar atmosfer basıncına eşittir ve çizgi üzerinde su akışı olmadığı için sıfır basınç çizgisi olarak da tanımlanmıştır.

Serbest sızma yüzeyi çizildikten sonra akım çizgileri ve eşpotansiyel çizgiler belirlenmektedir. Şekildeki toprak baraj kesitinde, A'D çizgisi gövde kısımdaki en üst akım çizgisini diğer adıyla freatik hattı oluşturmaktadır. Freatik hattın hesaplanmasında aşağıdaki yöntemler incelenmiştir.

(3.19) bağıntısı barajda oluşan parabolün konumu buldurmaktadır. Öncelikle B, s ve h baraj kesitinden belirlendikten sonra (3.20) bağıntısı d değerini vermektedir. (3.21) bağıntısından da y_0 bulunmaktadır. (3.22) bağıntısından a ve Δa elde edilerek parabolden sızma çizgisi oluşturulmaktadır.

Şekilde x ve y yatay ve düşey eksenler olmak üzere;

y_0 = Barajda oluşan parabolün y eksenini kestiği noktanın ordinatı,

d = Parabolün su yüzeyini kestiği noktanın apsisi,

B = Toprak dolgu barajın taban uzunluğu,

h = Haznedeki su yüksekliği,

s = Suyun yüzeyi ile memba şevinin kesiştiği noktanın memba şevi taban ucuna yatay mesafesi,

a = Sızma hattının mansap şevini kestiği noktanın merkeze uzaklığı,

a = Mansap şevinin yatayla yaptığı açı,

Δa = Freatik hattın mansap şevini kestiği nokta ile parabolün mansap şevini kestiği nokta arasındaki uzaklık,

Tablo 3. 2: a derecesine göre $\Delta a/(a+\Delta a)$ değerinin belirlenmesi

a°	30	45	60	90	120	150	180
$\frac{\Delta a}{a + \Delta a}$	0,37	0,34	0,32	0,26	0,19	0,09	0

Tablodaki a açı değerlerine göre $\Delta a/(a+\Delta a)$ değerleri verilmiştir. Tabloda bulunmayan açı değerleri için enterpolasyon işlemi yapılmaktadır.

Kozeny Parabolüne göre birim uzunluktan sızan suyun miktarı için;

$$q = ky \frac{dy}{dx} = ky_0 = k(\sqrt{h^2 + d^2} - d) \quad (3.23)$$

şeklinde bağıntı bulunmaktadır.

a açısı değerinin 30° 'dan küçük olması durumunda sızma hattının mansap şevini kestiği noktanın merkeze uzaklığı;

$$a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 a} \quad (3.24)$$

bağıntısı ile bulunmaktadır. Buradan da sızma miktarı bağıntısı;

$$q = k \sin^2 a \quad (3.25)$$

Kozeny Parabolü metodu toprak dolgu barajda kullanılan zeminin yatay ve düşey permeabilite değerlerinin eşit olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Farklı olması hallerde değerler $\sqrt{k_v/k_h}$ oranında azaltılarak yeni kesit oluşturulmuştur. Bu yeni kesit üzerinde freatik sızma çizgisinin ordinatları denk gelen apsis noktasına göre esas kesite taşınmaktadır.

3.5.2 Casagrande Denklemi

Casagrande'ye göre toprak baraj kesit üzerinde denklem oluşturmuştur;

$$a = s - \sqrt{s^2 - \frac{h^2}{\sin^2 a}} \quad (3.26)$$

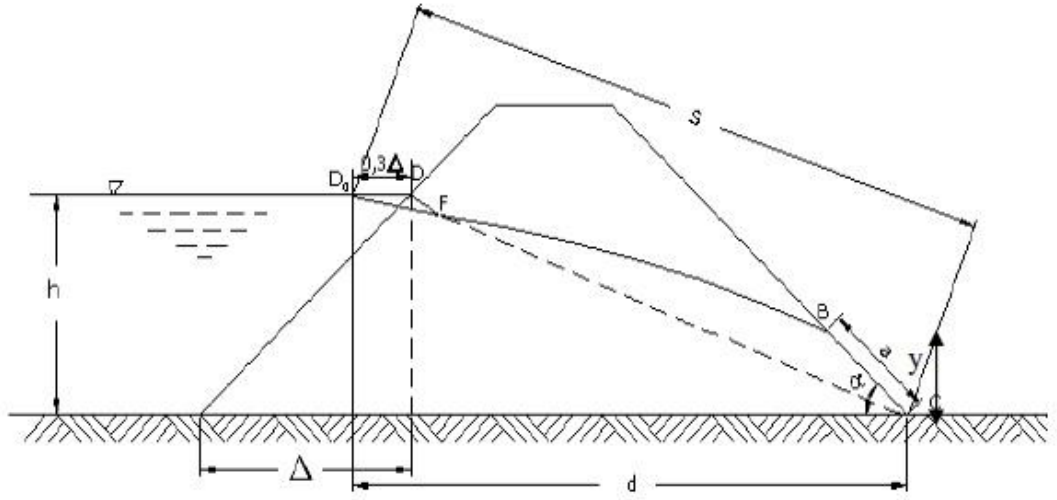
$$s = \sqrt{\sqrt{d^2 + h^2}} \quad (3.27)$$

$$d = L + 0.3\Delta \quad (3.28)$$

Birim genişlikte q akımı hesaplanırken;

$$q = K \sin^2 a \quad (3.29)$$

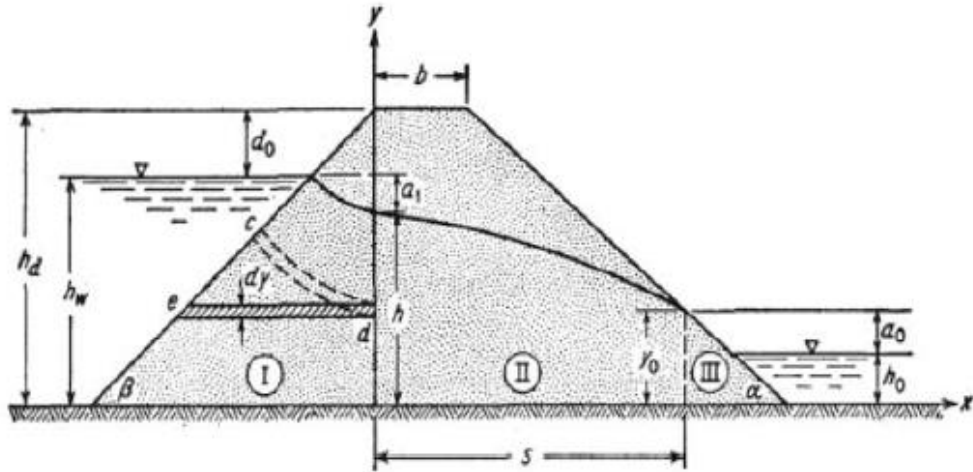
bağıntısı elde edilir.



Şekil 3. 12: Casagrande'ye göre freatik hat yöntemi (Çilingir,2007)

3.5.3 Pavlovsky Çözümü

Pavlovsky, toprak dolgu barajın mansap bölümünde suyun bulunup, bulunmaması hakkında denklemler geliştirmiştir. Barajın kesitini üç bölmeye ayırmıştır. Birinci kısımda yatay akımın olduğu varsayılan akım çizgileri eğri biçimindedir. CD eğrisi yerine ED eğrisini akım çizgisi kabul edip incelemiştir.



Şekil 3. 13: Pavlovsky'ye göre freatik hat yöntemi (Kesgin,2015)

Birinci bölgede sızma miktarı hesabı;

$$q = k \left(\frac{h_1 - h}{m_1} \right) \ln \left(\frac{h_d}{h_d - h} \right) \quad (3.30)$$

bağıntısı hesaplanmıştır.

İkinci bölgede sızma miktarı hesabı;

$$q = k \left(\frac{h^2 - (a_0 + h_0)^2}{2l} \right) \quad (3.31)$$

bağıntısı hesaplanmıştır.

Üçüncü bölgede sızma miktarı hesabı;

$$z_0 = 0 \text{ için : } q = \frac{a_0}{m_2} \quad (3.32)$$

$$z_0 > 0 \text{ için : } q = k \frac{a_0}{m_2} \left(1 + \ln \left(\frac{a_0 + h_0}{a_0} \right) \right) \quad (3.33)$$

bağıntısı hesaplanmıştır.

3.5.4 Dupuit Yaklaşımı

Dupuit yaklaşımında dikey yöndeki hız parametrelerini ihmal etmiş, yatay yöndeki akım yerine dikey düzlem doğrultusunda ortalama yatay eğim kullanmıştır. Buna bağlı olarak eşpotansiyel çizgiler dikey yönde çizgiler haline gelmiştir. Hidrostatik basınç her noktada eşittir.

Toprak dolgu barajın düşey yönden geçen sızma miktarı;

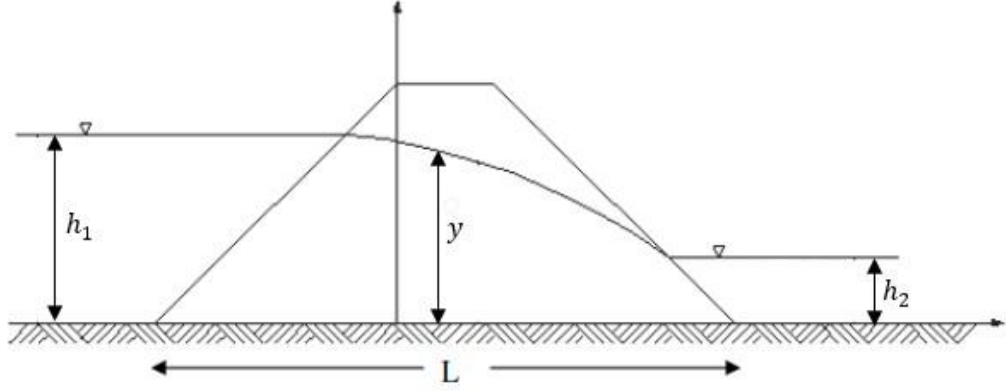
$$q = -ky \frac{\partial y}{\partial x} \quad (3.34)$$

bağıntısı oluşturulmuştur. Sınır şartlarını $h=h_1$, $h=h_2$ ve $x=L$ şeklinde boyutlandırılırsa;

$$\int_0^L q dx = -k \int_{h_1}^{h_2} q dy \quad (3.35)$$

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} \quad (3.36)$$

bağıntısı oluşturulmuştur.



Şekil 3. 14: Dupuit yaklaşımının kesit üzerinde görünümü

3.5.5 Schaffernak ve Van Iterson Yaklaşımı

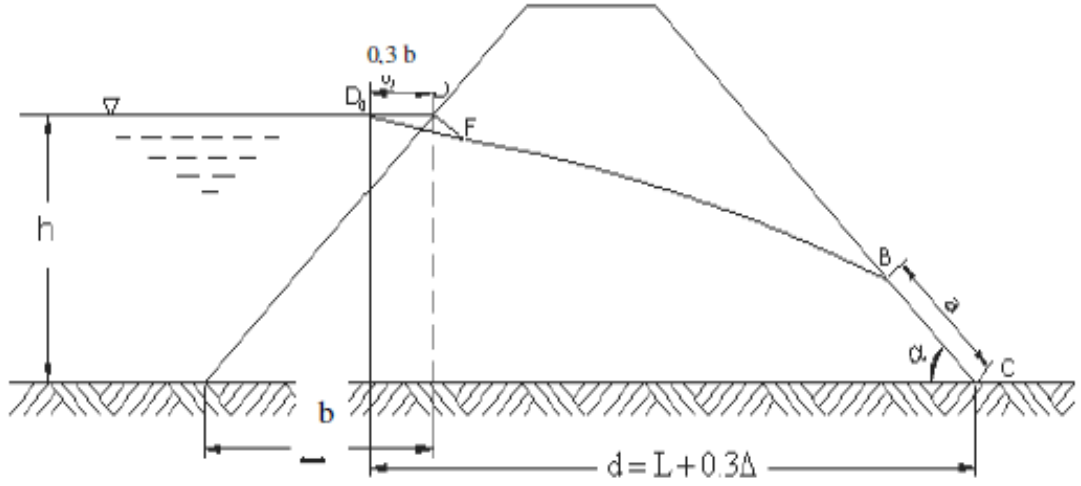
Toprak dolgu barajın, mansap kısmında suyun bulunmadığı durumda sızma miktarını;

$$q = ka(\sin a)(\tan a) \quad (3.37)$$

bağıntısıyla oluşturmuştur. a parametresi sızma yüzeyin uzunluğu olup;

$$a = \frac{d}{\cos a} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 a} - \frac{h^2}{\sin^2 a}} \quad (3.38)$$

bağıntısıyla hesaplanır. a açısı mansap şevinin yatayla yaptığı açıdır.



Şekil 3. 15: Schaffernak ve Van Iterson yaklaşımının kesit üzerinde görünümü
(Çilingir,2007)

3.5.6 Elektrik Benzeşim Modeli

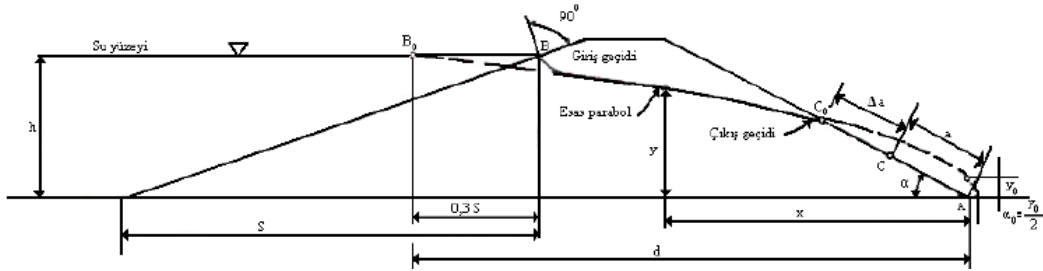
Mühendislik problemlerinde Laplace denkleminin kullanım alanı çok geniştir. Sızma akımında kullanılan parametreler, elektrik akımında kullanılan parametrelere benzerlik gösterir. Bu yüzden Laplace denklemi iletken düzende elektrik modeli kurularak çözüme ulaştırılmaktadır. Zeminde sızma akımı yerine elektrik akım ağı yapılarak sınır şartları belirlenmektedir. Sızma parametrelerinden biri olan geçirgenlik katsayısı modelde de elektrik geçirgenlik katsayısı olarak kullanılmaktadır.

Tablo 3. 3: Sızma Akışının ve Elektrik Benzeşim Modelinin Parametreleri

$Q = \frac{kAh}{l}$	$I = \frac{CA'V}{l'}$
Q = Sızma Debisi	I = Elektrik Akım Şiddeti
k = Permeabilite Katsayısı	C = İletkenlik Katsayısı
A = Enkesit Alanı	A' = Enkesit Alanı
h = Basınç Yüksekliği	V = Potansiyel Fark
l = Sızma Uzunluğu	l' = Akım Yolu Uzunluğu

3.5.7 Grafik Metot Yaklaşımı

Toprak dolgu barajda serbest sızma yüzeyinin belirlenmesinde en kullanışlı yöntem grafik metot yaklaşımıdır.



Şekil 3.16: Grafik metot yaklaşımının kesit üzerinde görünümü (Mesci,2006)

y_0 barajın topuk kısmındaki parabolün ordinat noktası, k zeminin geçirgenlik katsayısı, c serbest sızma yüzeyinin mansap yüzeyiyle kesiştiği nokta, C_0 parabol ile mansap yüzeyinin kesiştiği nokta, B_0 parabol ile su yüksekliğinin kesiştiği nokta, a barajın topuk kısmı ile deşarj noktası arasındaki eğimli uzaklık, a deşarj yüzeyi ile yatayın yaptığı açı, a_0 barajın topuk kısmı ile parabolün tepe noktası arasındaki kesit tabanı uzunluğundaki kısımdır.

$$a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 a} \quad (3.39)$$

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \quad (3.40)$$

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0} \quad (3.41)$$

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2} \quad (3.42)$$

bağıntıları kullanılarak sızma miktarı hesabı;

$$q = k \sin^2 a \quad (3.43)$$

şeklinde elde edilmektedir.

4. BARAJLARDA SIZMA HESABI YÖNTEMLERİ

Matematik problemlerinin çözümünde kullanılan Laplace denklemine yakın metotlar geliştirilerek çözüme ulaşmaya çalışılmıştır. Sızma analizinde kullanılacak yöntemlerde bazı hususlara sahip olması gerekmektedir. Toprak dolgu barajlardaki sızma hesabı için geliştirilen yöntemde; geçirimsiz tabaka sınırları, dikey ve yatay permeabilite katsayıları, potansiyelin sabit olduğu bölümler, sızmanın gerçekleşmesi düşünülen bölge ve boyutları gibi parametrelere sahip olması gerekmektedir.

4.1 Sonlu Farklar Metodu

Sonlu farklar metodu, serbest sızma yüzeyi problemlerinde kısmi diferansiyel denklemler kullanılarak çözüme ulaştırılan yöntemlerden biridir. Kullanılan diğer metotlara göre çok daha kolay ve doğru sonuçlar vermektedir. Laplace diferansiyel denklemi matematiksel olarak yorumlanarak lineer cebir ifadesi haline getirilmiştir. Bu yöntemde öncelikle matematiksel problemin çözüm alanı veya akım alanı belirlenen aralıklarla düğüm noktaları kullanılarak dikdörtgen bir ağ sistemine bölünmesi gerekmektedir. Akım alanında bulunan her düğüm noktasında matematiksel denklem bulunmaktadır.

4.1.1 Sızma Denklemleri

En genel iki boyutlu zeminler için baraj gövdesinden sızma denklemi;

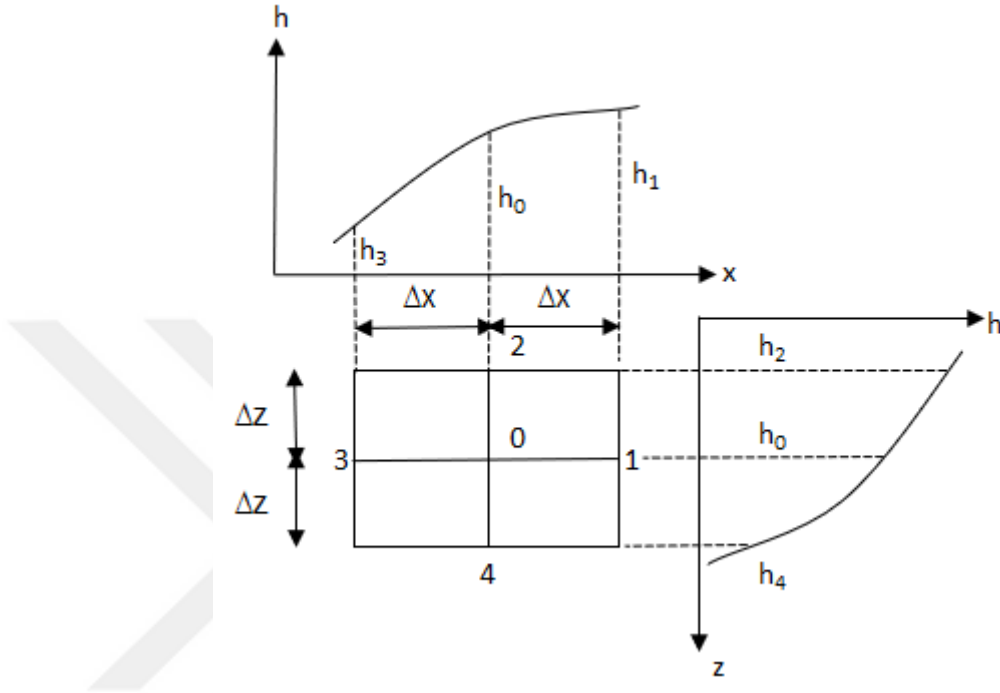
$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (4.1)$$

bağıntısındaki h sızmanın gerçekleştiği bir noktadaki basınç yüksekliğidir. k_x ve k_y zeminin yatay ve düşey permeabilite katsayılarıdır. Zeminin izotropik olması durumunda ($k_x=k_z$) denklem tekrar düzenlenirse;

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (4.2)$$

bağıntısı Laplace denklemini en basit şekilde elde edilmektedir. Akışın meydana geldiği bir bölgenin yatay yöndeki akış için Taylor Serisi;

$$h_1 = h_0 + \Delta x \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_0 + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right)_0 + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \left(\frac{\partial^3 h}{\partial x^3} \right)_0 + \dots \quad (4.3)$$



Şekil 4. 1: Akış bölgesindeki düğüm noktaları

$$h_3 = h_0 - \Delta x \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_0 + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right)_0 - \frac{(\Delta x)^3}{3!} \left(\frac{\partial^3 h}{\partial x^3} \right)_0 + \dots \quad (4.4)$$

(4.3) ve (4.4) bağıntısı birlikte yazacak olursa;

$$h_1 + h_3 = 2h_0 + \frac{2(\Delta x)^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right)_0 + \frac{2(\Delta x)^4}{4!} \left(\frac{\partial^4 h}{\partial x^4} \right)_0 + \dots \quad (4.5)$$

bağıntısında Δx değeri çok küçük değer alacağından ihmal edilmektedir.

Denklem tekrar düzenlenirse;

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right)_0 = \frac{h_1 + h_3 - 2h_0}{(\Delta x)^2} \quad (4.6)$$

Benzer şekilde düşey yönündeki akış bağıntısı için;

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right)_0 = \frac{h_2 + h_4 - 2h_0}{(\Delta z)^2} \quad (4.7)$$

(4.6) ve (4.7) bağıntıları birlikte yazılırsa;

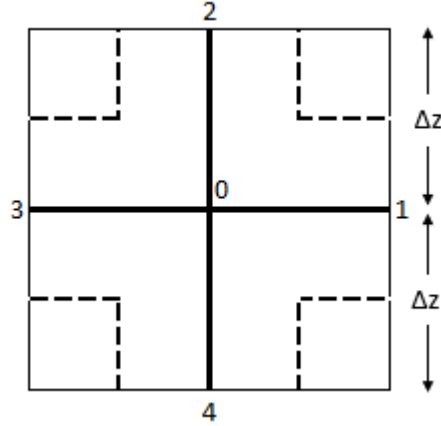
$$k_x \frac{h_1 + h_3 - 2h_0}{(\Delta x)^2} + k_y \frac{h_2 + h_4 - 2h_0}{(\Delta z)^2} = 0 \quad (4.8)$$

Bağıntısında $k_x=k_z$ ve $\Delta x=\Delta z$ olduğu varsayılp bağıntı düzenlenirse;

$$h_1 + h_2 + h_3 + h_4 - 4h_0 = 0 \quad (4.9)$$

$$h_0 = \frac{1}{4}(h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \quad (4.10)$$

bağıntısıyla genel denklem elde edilmektedir.



Şekil 4. 2: Sızmanın gerçekleştiği düğüm noktaları

Şekil 4.2’de gösterilen noktalardan sızma bağıntıları;

$$q_{1-0} = k \frac{h_1 - h_0}{\Delta x} \Delta z \quad (4.11)$$

$$q_{0-3} = k \frac{h_0 - h_3}{\Delta x} \Delta z \quad (4.12)$$

$$q_{2-0} = k \frac{h_2 - h_0}{\Delta z} \Delta x \quad (4.13)$$

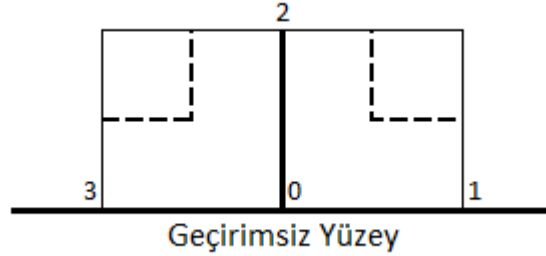
$$q_{0-4} = k \frac{h_0 - h_4}{\Delta z} \Delta x \quad (4.14)$$

Şekil 4.2’de yer alan 0 noktasına gelen sızan toplam akış miktarı, 0 noktasından çıkan toplam akış miktarına eşit olduğu için;

$$(q_{1-0} + q_{2-0}) - (q_{0-3} + q_{0-4}) = 0 \quad (4.15)$$

$\Delta x = \Delta z$ alınarak denklem 4.11’den 4.14’e kadar olan bağıntılarda yerine koyularak yazılırsa;

$$h_0 = \frac{1}{4}(h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \quad (4.16)$$



Şekil 4. 3 : Geçirimsiz yüzeyde sızma düğüm noktaları

bağıntısı elde edilmektedir. 0 noktası Şekil 4.3’de gösterildiği gibi geçirimsiz tabakada yer alıyorsa aşağıdaki gibi değiştirilmez;

$$q_{1-0} = k \frac{h_1 - h_0}{\Delta x} \left(\frac{\Delta z}{2}\right) \quad (4.17)$$

$$q_{0-3} = k \frac{h_0 - h_3}{\Delta x} \left(\frac{\Delta z}{2}\right) \quad (4.18)$$

$$q_{0-2} = k \frac{h_0 - h_2}{\Delta z} \Delta x \quad (4.19)$$

Akışın devamlılığı sağlanması için;

$$q_{1-0} - q_{0-3} - q_{0-2} = 0 \quad (4.20)$$

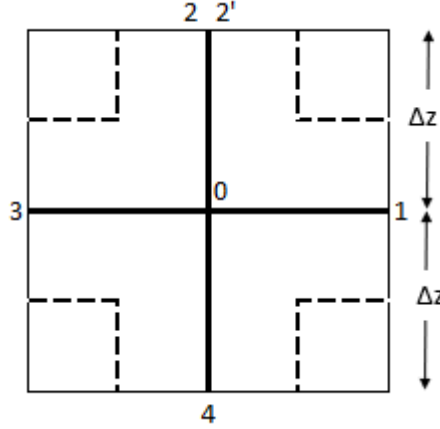
4.17 ve 4.20 arasındaki denklemleri birlikte $\Delta x = \Delta z$ olarak çözümlerse;

$$\frac{h_1 - h_0}{2} - \frac{h_0 - h_3}{2} - (h_0 - h_2) = 0 \quad (4.21)$$

$$\frac{h_1}{2} + \frac{h_3}{2} + h_2 - 2h_0 = 0 \quad (4.22)$$

$$h_0 = \frac{1}{4}(h_1 + 2h_2 + h_3) \quad (4.23)$$

denklemini elde edilmektedir.



Şekil 4. 4: Sızmanın gerçekleştiği düğüm noktalarının aynı seviyede incelenmesi

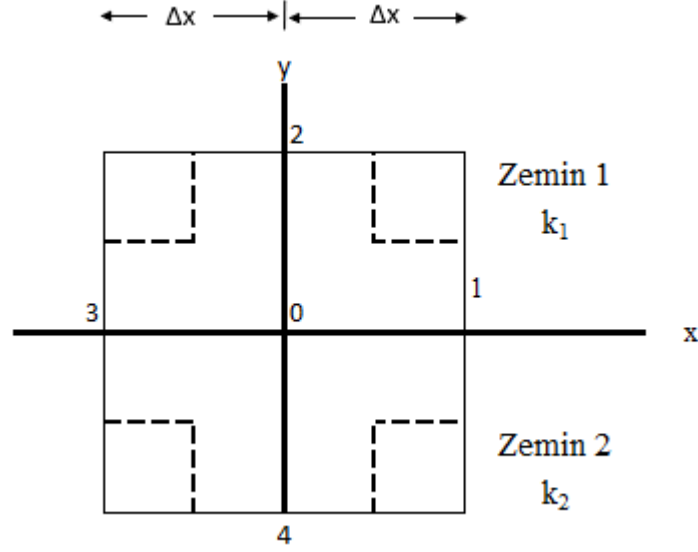
Şekil 4.4'de bulunan 0 noktasının bir yığının altında bulunduğu için akış sürekliliği sızma denklemi;

$$q_{1-0} + q_{4-0} - q_{0-3} - q_{0-2'} - q_{0-2''} = 0 \quad (4.24)$$

Şekil 4.4'de 2 ve 2' noktaları hidrolik yük açısından eşit olup zıt yönlerde bulunmasından dolayı sızma denklemi;

$$h_0 = \frac{1}{4} \left[h_1 + \frac{1}{2}(h_{2'} + h_{2''}) + h_3 + h_4 \right] \quad (4.25)$$

elde edilmektedir.



Şekil 4. 5: Farklı permeabilite katsayılarında gerçekleşen sızma düğüm noktaları

Şekil 4.5’de iki farklı permeabilite değerine sahip zeminler arasında sızma olayı gerçekleşirse permeabilite katsayıların ortalaması alınarak bağıntı kurulur;

$$k_{ort} = \frac{1}{2} (k_1 + k_2) \quad (4.26)$$

$$k_1 \frac{h_{4'} - h_0}{\Delta z} = k_2 \frac{h_{4'} - h_0}{\Delta z} \quad (4.27)$$

$$h_{4'} = \frac{k_2}{k_1} (h_4 - h_0) + h_0 \quad (4.28)$$

Denklem (4.1)’de yerine yazılırsa;

$$\left(\frac{k_1 + k_2}{2}\right) \left(\frac{h_1 + h_3 - 2h_0}{(\Delta x)^2}\right) + k_1 \frac{h_2 + h_{4'} - 2h_0}{(\Delta z)^2} = 0 \quad (4.29)$$

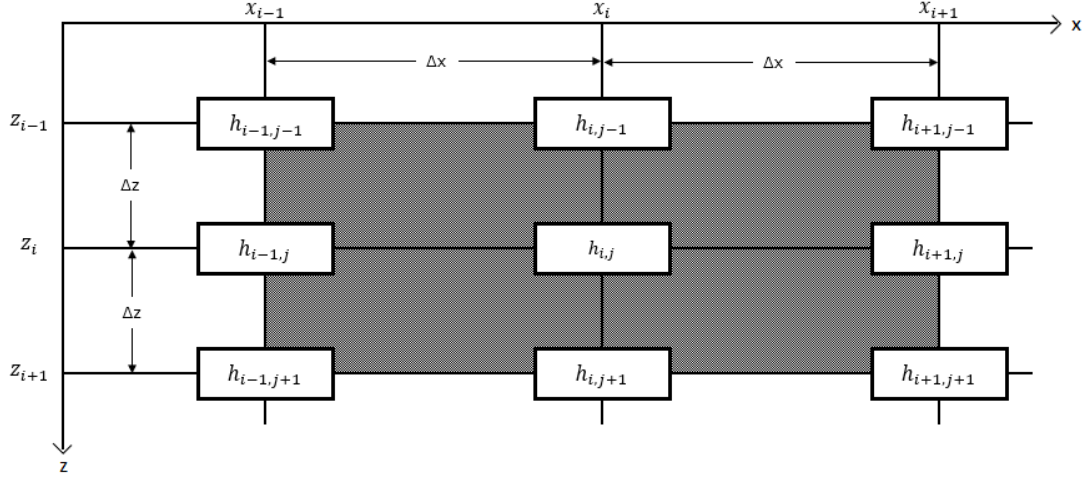
$\Delta x = \Delta z$ şeklinde 4.28 ve 4.29 yazılırsa;

$$\frac{1}{2} (k_1 + k_2) \left[\frac{h_1 + h_3 - 2h_0}{(\Delta x)^2} \right] + \frac{k_1}{(\Delta x)^2} \left\{ h_2 + \left[\frac{k_2}{k_1} (h_4 - h_0) + h_0 \right] - 2h_0 \right\} = 0 \quad (4.30)$$

$$h_0 = \frac{1}{4} (h_1 + \left(\frac{2k_1}{k_1 + k_2}\right) h_2 + h_3 + \left(\frac{2k_2}{k_1 + k_2}\right) h_4) \quad (4.31)$$

bağıntısıyla permeabilitesi farklı zeminlerde basınç yüksekliği bulunmaktadır.

Düğüm noktalarını (i,j) düzleminde gösterilmek istenirse ;



Şekil 4. 6: Sızmanın (i,j) düğüm noktalarına göre görünümü

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (4.32)$$

Denklem (4.26)'da h, sızmanın bulunduğu noktanın hidrolik yükü, zeminin yatay ve düşey permeabilite katsayıları k_x ve k_z dir.

$$\frac{k_x}{\Delta x^2} (h_{i+1,j} + h_{i-1,j} - 2h_{i,j}) + \frac{k_z}{\Delta z^2} (h_{i,j+1} + h_{i,j-1} - 2h_{i,j}) \quad (4.33)$$

Denklem (4.33)'de Δx ve Δz seçilen düğüm noktaları yatay ve düşey aralığıdır. Denklemlerde $k_x=k_z$ ve $\Delta x=\Delta z$ olması durumunda;

$$h_{i,j} = \frac{1}{4} (h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}) \quad (4.34)$$

4.1.2 Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Zeminlerin geçirimsiz tabakalar arasında olduğu sızma durumunda akım sınır şartları için toplam akım ve yük denklemleri belirlenmektedir.

Şekil 4.7’de geçirimsiz tabakalı zeminde sınır için ;

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad (4.35)$$

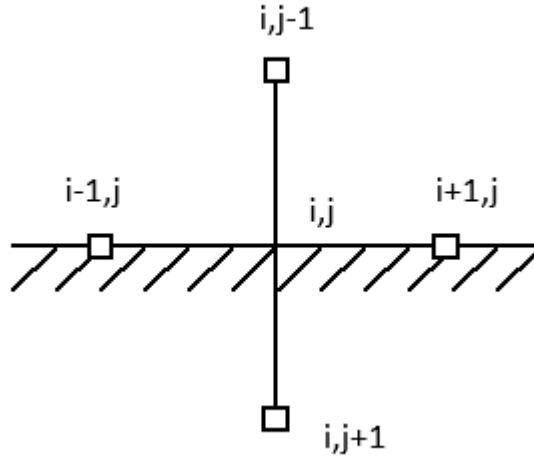
bağıntısıyla belirlenmektedir. Sızma ortamının dış kısmında olduğu varsayılan fiktif nokta ile sonlu farklar metodu kullanılarak i,j düğümünde;

$$\frac{\partial h}{\partial z} \approx h_{i,j+1} - h_{i,j-1} = 0 \quad (4.36)$$

bağıntısı olmaktadır. Sınır olarak;

$$h_{i,j} = \frac{1}{4} (h_{i+1,j} + 2h_{i,j-1} + h_{i,j+1}) \quad (4.37)$$

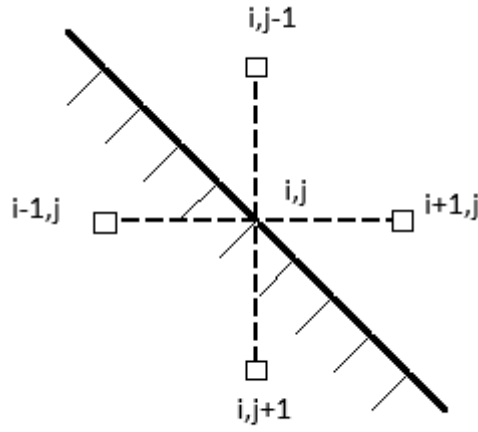
denkleminle tanımlanmaktadır.



Şekil 4. 7: Sınır şartları için düğüm noktaları

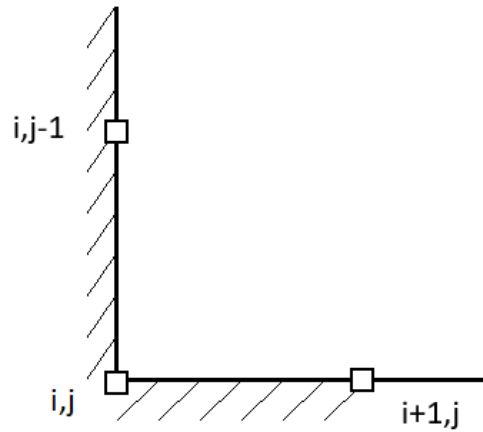
Farklı şev eğimi durumlarında geçirimsiz sınırlar için ;

$$h_{i,j} = \frac{1}{2} (h_{i+1,j} + h_{i,j-1}) \quad (4.38)$$



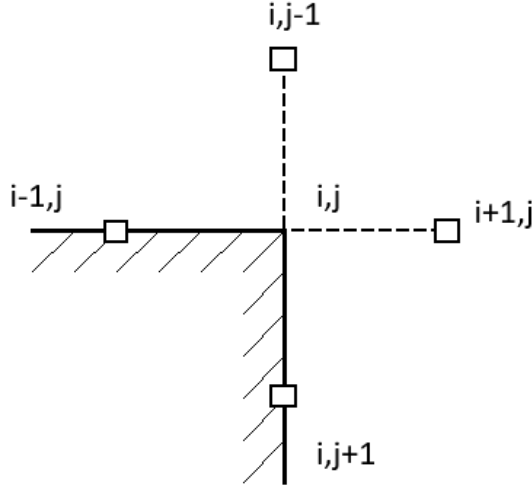
Şekil 4. 8: Farklı şev eğimdeki sınır şartlar için düğüm noktaları

$$h_{i,j} = \frac{1}{2} (h_{i+1,j} + h_{i-1,j}) \quad (4.39)$$



Şekil 4. 9: Dik kenarlarda geçirimsiz sınır şartları için düğüm noktası

$$h_{i,j} = \frac{1}{3}(h_{i+1,j} + h_{i,j-1} + \frac{1}{2}h_{i-1,j} + \frac{1}{2}h_{i,j+1}) \quad (4.40)$$



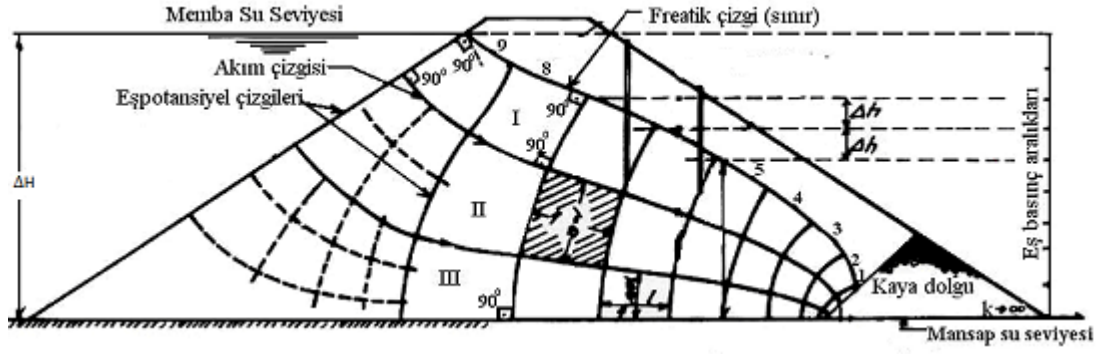
Şekil 4. 10: Farklı geçirimsiz durumdaki sınır şartları için düğüm noktaları

4.2 Akım Ağı Yöntemi

Akım ağı yöntemi, toprak dolgu baraj gövdelerinden ve baraj temel altındaki sızma problemlerinde kullanılan en faydalı yöntemdir. Akım ağları ve eşpotansiyel çizgiler çizilerek karasel ağ sayısı belirlenmektedir. Membada ve mansaptaki su seviyesi farkı ΔH olarak tanımlanmaktadır. m eşpotansiyel çizgi, n ise akım ağı sayılarını ifade etmektedir. $\Delta H/m$ ifadesi iki eşpotansiyel çizgi arasında oluşan yük kaybı ifadesidir. Darcy kanunundan yararlanılarak yazılacak olursa oluşan birim sızma miktarı farkı;

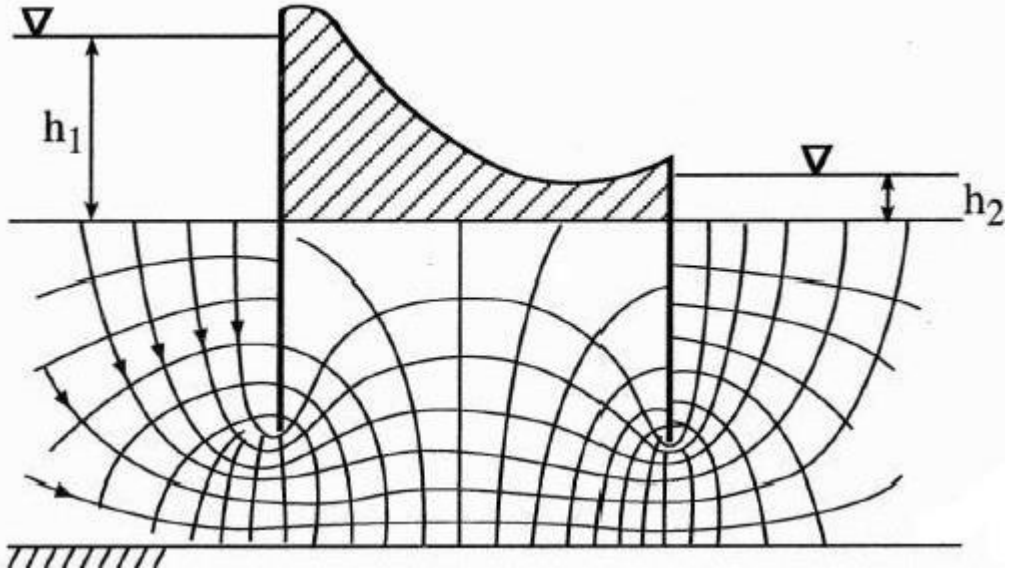
$$q = k\Delta H \frac{n}{m} \quad (4.41)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir. Şekil 4.3'de toprak dolgu barajın gövdesinden gerçekleşen sızmada kullanılan akım ağı yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 4. 11: Baraj gövdesindeki sızmanın akım ağı yöntemiyle gösterimi (Kesgin,2015)

Şekil 4.4’de baraj zemininden gerçekleşecek sızmanın akım ağı yöntemi kullanarak incelenmektedir.



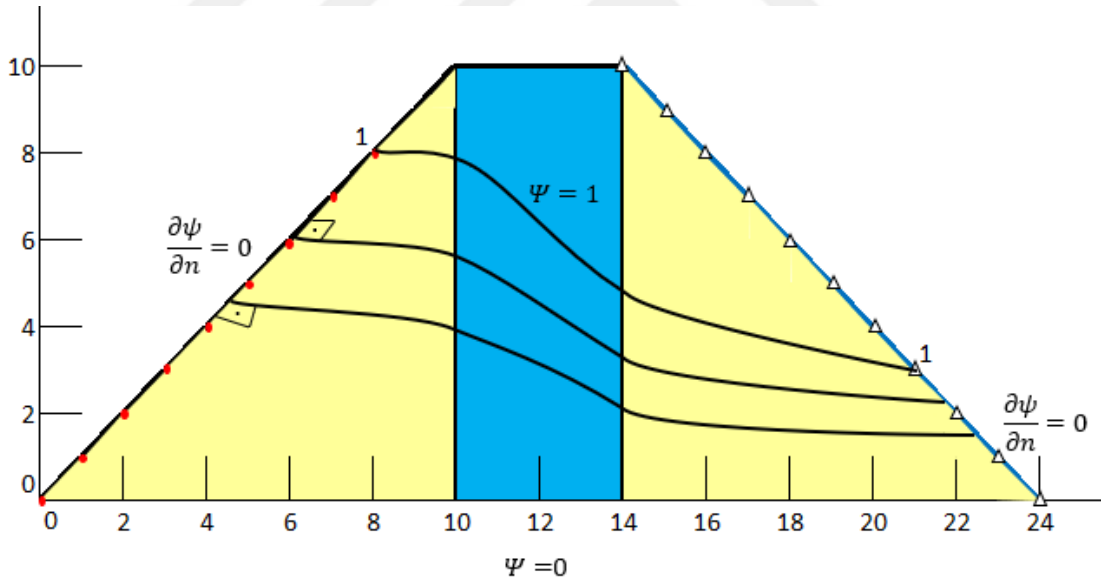
Şekil 4. 12: Baraj tabanındaki sızmanın akım ağı yöntemiyle gösterimi (Kesgin,2015)

Tablo 5. 1 : Toprak Dolgu Baraj Kesite Ait Zeminlerin Permeabilite Katsayıları

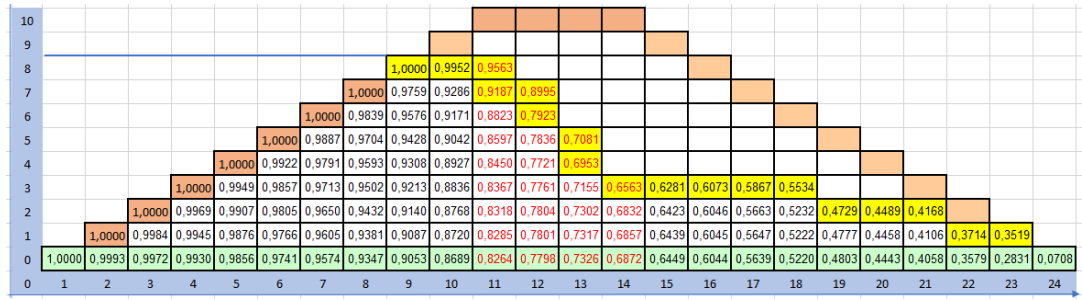
Zemin Türü	Permeabilite Katsayıları (m/s)
Siltli Çekirdek	10^{-6}
Toprak Dolgu	10^{-5}

5.1.1 Toprak Dolgu Barajda Tablolama Analizi

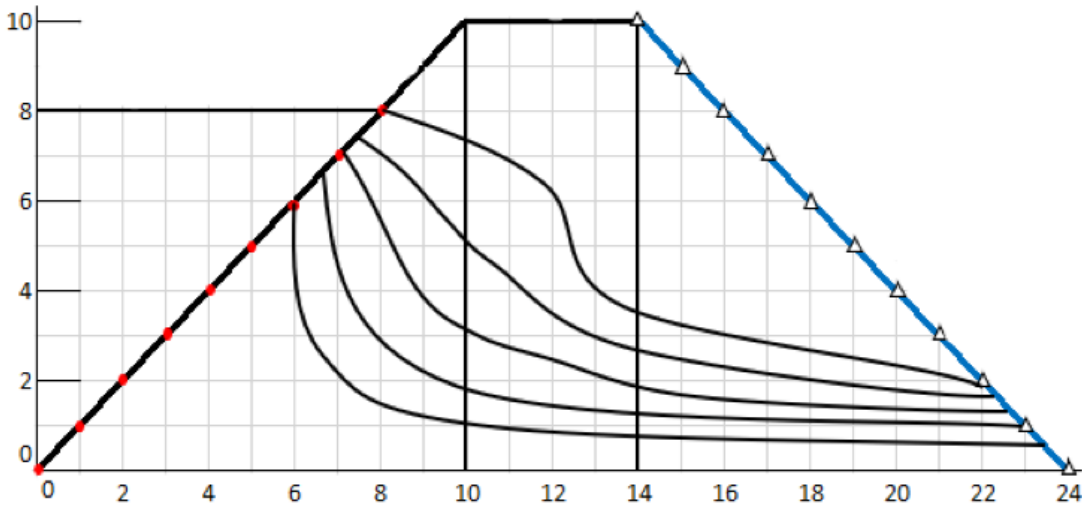
Toprak dolgu baraj kesit üzerinde sonlu farklar metodu yardımıyla tablolama analizinde düğüm noktaları arası uzaklık $\Delta x = \Delta y = 1$ metre alınarak işlemler yapılmıştır. Akım ve eşpotansiyel çizgiler sınır şartları sağlandıktan sonra ayrı ayrı çizilmektedir. Çizilen akım ve eşpotansiyel çizgiler baraj kesiti üzerinde gösterilmektedir. Kesit üzerindeki akışın sızma miktarı hesaplanmaktadır.

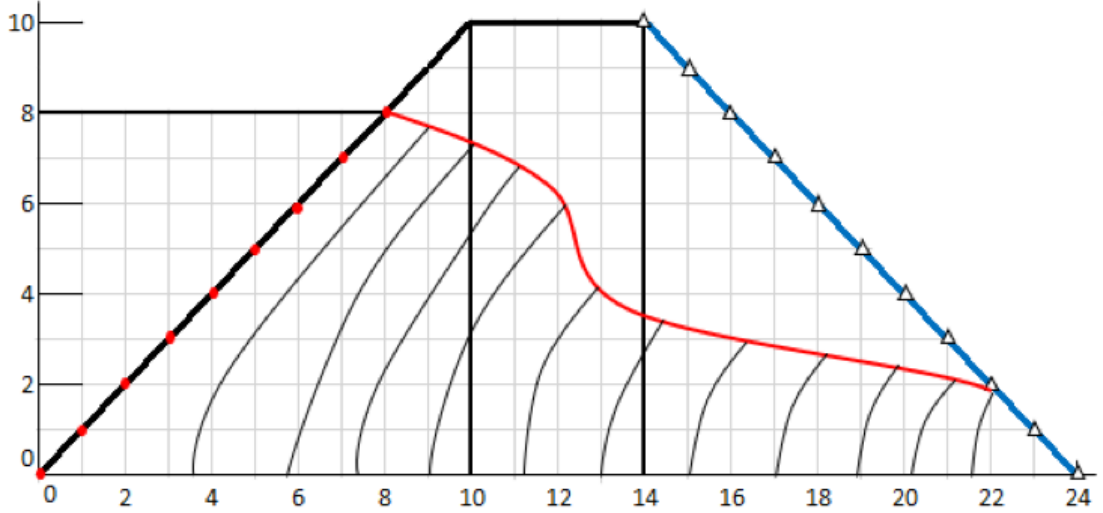


Şekil 5. 2: Akım ağı çizgileri için sınır şartları



5.1.2 Ağ Çizimlerinin Kesit Üzerinde Gösterimi





Şekil 5. 7: Tablolama analizinde eşpotansiyel ağlarının çizimi

5.1.3 Sızma Miktarının Elde Edilmesi

Toprak dolgu barajın gövdesinde sızma ağının elde edilmesinden sonra çözümü kolay olan akım ağı yöntemiyle (grafik) sızma miktarı hesaplanmaktadır. Gövde kısmında bulunan silt çekirdeğin permeabilite değeri seçilmiştir. 8 metre hidrolik yük, 5 adet akım ağı çizgisi, 11 adet eşpotansiyel ağ çizgisi bulunmaktadır.

Sızma debisi miktarı;

$$q = kh \frac{n}{m} = 10^{-6} * 8 * \frac{5}{11} = 3,64 * 10^{-6} m^3/s \quad (5.1)$$

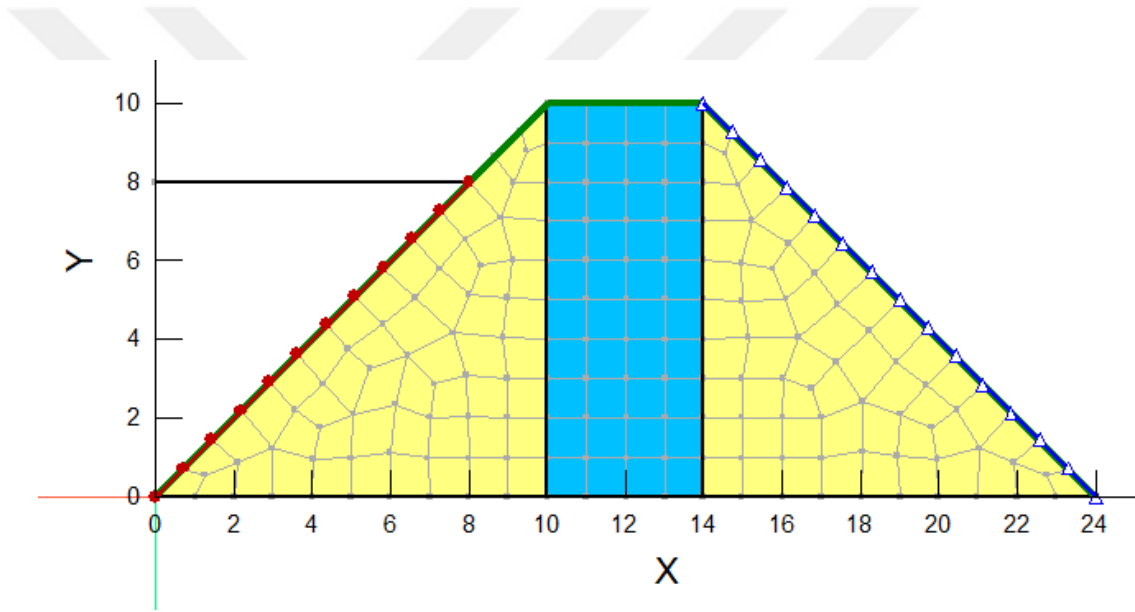
sonucuna ulaşılmıştır.

5.2 Geostudio SEEP/W Programı

GeoStudio SEEP/W programı, zemin içerisinde meydana gelen su akışını inceleyen geoteknik mühendisliğin en önemli konularından biri olmaktadır. SEEP modülü, su akışının nümerik olarak hesaplanması sağlamaktadır. Nümerik analiz, mühendislik problemlerin matematiksel olarak ifade edilmesidir. SEEP modülü kullanılırken ‘Steady-State’ (kararlı akım) ortamında analizi yapılmaktadır. Kesit

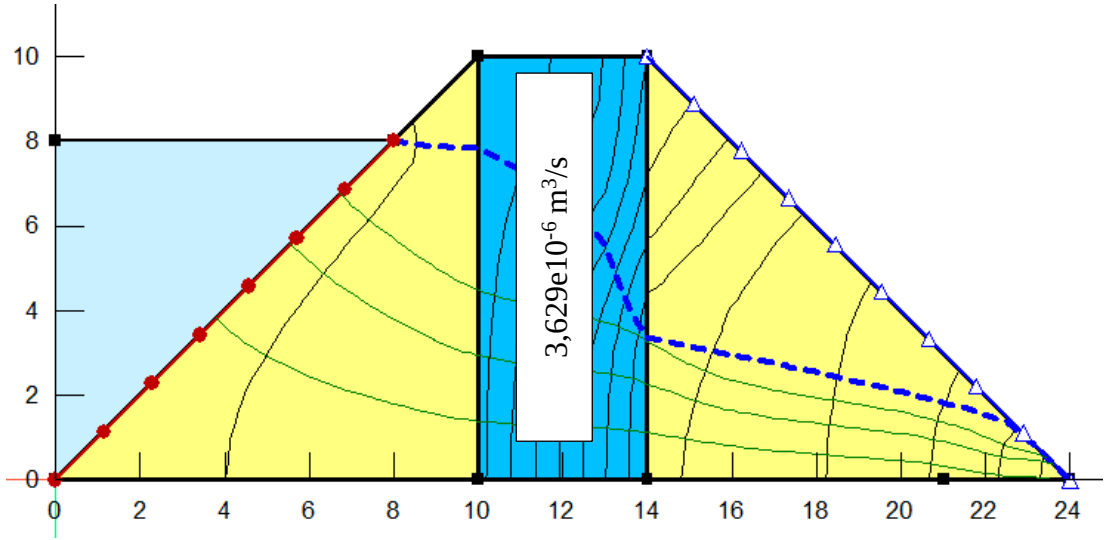
boyunca zeminin, homojen ve sürekli olduğunu göstermektedir. Kararlı akım durumu zamandan bağımsızdır ve akışın ne kadar sürede gerçekleştiği hakkında bilgi vermemektedir.

İki boyutlu bir toprak dolgu barajın boyutları karar verilip, 10 metre yükseklik ve 24 metre uzunluğunda kesit oluşturulmuştur. Baraj gövdesini oluşturan zeminler, iki eş toprak dolgu ile siltli çekirdekten oluşmaktadır. Memba su seviyesi 8 metre baraj kesitinde tanımlanmıştır. Sınır şartları ve düğüm noktası aralarındaki mesafeler $\Delta x = \Delta y = 1$ metre olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.6'da toprak dolgu barajın sınır şartları ve düğüm noktaları gösterilmiştir. Baraj kesiti üzerinde analiz yapılmıştır.



Şekil 5. 8: Toprak dolgu barajın Geoslope SEEP/W programında sınır şartları ve düğüm noktaları kesit üzerinde gösterimi

Modelde analiz yaptıktan sonra toprak dolgu baraj kesitinde akım ağlara, eşpotansiyel ağlara, ve akım ağlarının en üst çizgisi olan freatik hatta ulaşılmıştır. GeoStudio SEEP/W programında sızma miktarı $3,629 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ olarak bulunmuştur. Şekil 5.8'de kesit üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5. 9: GeoStudio SEEP/W programında freatik hat ve sızma miktarı

5.3 Tablolama Analizi İle GeoStudio SEEP/W Programının Karşılaştırılması

Toprak dolgu barajın gövdesinde incelenen serbest yüzeyli sızma analizleri farklı yöntemlerle yapılarak karşılaştırılmıştır. Sonlu farklar metodu ve GeoStudio SEEP/W programında sızma miktarı ve freatik hat çizgileri benzerlik taşıdığı görülmüştür. Oluşturulan freatik hat sınır şartları paket program ve tablolama analizinde ortak kullanılmıştır. Bu nedenle yakın sonuçlar elde edilmiştir. Akım ağı metodu ile basit ve uyumlu sonuçlar vererek işlevsel bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Geoteknik ve hidrolik açıdan uyumlu olan toprak dolgu barajda yapılan sızma analizleri, matematiksel olarak da modellenebileceğini göstermiştir.

Tablo 5. 2: Metotlar arası debi değerleri karşılaştırılması

	Sızma Miktarı (m^3/s)
Tablolama Analizi	$3,64 \cdot 10^{-6}$
GeoStudio SEEP/W	$3,62 \cdot 10^{-6}$

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Barajların yapım amacı suyu bir haznede biriktirmektir. Su seviyesinin yükselmesi baraja daha fazla basınç oluşturacağı anlamına gelmektedir. Bu yüzden barajlarda stabilite en önemli unsurlardan biri olmaktadır. Barajlarda stabiliteyi etkileyen başlıca faktör sızmadır. İnşa edilen barajda sızma miktarı değeri proje aşamasında gerekli zemin etütleri yapıp hesaplanması gerekmektedir. Hesabın yapılmaması veya yanlış yapılması durumunda ekonomik açıdan büyük zarar edilmesi ve canlıların yaşamını olumsuz yönde etkileyecektir. Barajın daha güvenilir olması ve sızmanın kabul edilebilir seviyede kalması için geoteknik önlemler alınması gerekmektedir.

Üzerinde çalışılan tez konusunda, öncelikle barajların önemi, bölümleri ve sızma konularıyla ilgili bilgiler verilmiştir. Çeşitli sızma yöntemlerine değinilmiştir. Seçilen toprak dolgu barajın serbest sızma yüzeyinin sayısal analizi iki farklı yöntem ile incelenmiştir. Toprak dolgu barajın gövdesinde silt çekirdek ve zemin dolgusu kullanılmıştır. Tablolama analizinde, sonlu farklar metodu yardımıyla denklemler kullanılarak belirlenen kesit üzerinde sayısal değerler elde edilmiştir. Akım ağ çizgileri ve eşpotansiyel ağ çizgileri çizilmiştir. Sızma ağı çizildikten sonra freatik hat çizgisi belirlenmiştir. Sızma ağı yardımıyla akım ağı metodunu (grafik metot) kullanarak sızma miktarı hesaplanmıştır. Geostudio SEEP/W programında seçilen kesit üzerine toprak dolgu baraj modellenmiştir. Zemin ve parametreleri tanımlanmıştır. Sınır şartları kesit üzerine tanımlandıktan sonra sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapılmıştır. Analiz sonucu iki yöntemde bulunan sızma miktarı ve freatik hat çizgisinin benzerliği görülmüştür.

GeoStudio SEEP/W programında barajların sızma değerleri ve freatik hat çizgilerini bulunabileceği bu çalışmada gösterilmiştir ve gelecekte yapılacak çalışmalar için değerli olabileceği düşünülmektedir. Günümüzde yapılmış olan barajların modellenmesi ile birlikte analizlere ulaşılabilmesi öngörülmektedir.

7. KAYNAKLAR

Advanced Soil Mechanics Third Edition, B.M. Das, 170-276, (1983).

Ağırlioğlu N. ve ErkekC., 2002. Su Kaynakları Mühendisliği, Beta Basım Yayım, İstanbul.

Ağırlioğlu N., 2005, Baraj Planlama ve Tasarımı, Cilt 1-2-3.

Akdil, H. Dolgu Baraj Gövdesinde Sızma Analizi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.

Ayvaz, M. T. Serbest Yüzeyle Sızma Problemlerinin Çözümü İçin Pratik Bir Yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.

Bardet, J. P. And Tobita, T., A Practical Method For Solving Free-Surface Seepage Problems, Comput. Geotech., Vol. 29, 451–475, 2002.

Baytaş A. C., 2006, Gözenekli ortamlarda taşınım olayı, İtü Dergisi, Cilt 4.

Berkün M., 2005. Su Kaynakları Mühendisliği, Birsan Yayın Evi, İstanbul.

Cheng S.T.,1993 Statistics on dam failure, reliability and uncertainty analyses in hydraulic design: a report, ASCE Publications 104, USA.

Çetin K. Ö, ve Bilge H.T., 2004, Dolgu Barajlarda Ölçüm Sistemleri (351-361), 1. Ulusal Barajlar ve Hidroelektrik Santraller Sempozyumu, DSİ Genel Müdürlüğü Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı, Ankara.

Çilingir, H. Toprak Dolgu Barajların Gövdelerindeki Sızmaların Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi: Büyükçekmece Barajı Uygulaması, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.

Dorum A., Akkaya U. Ve Polat H., 2010. Sürdürülebilirlik Açısından Baraj Gövde Tipinin Seçimini Etkileyen Faktörler, NWSA Engineering Sciences,5, 649-657.

DSİ Genel Müdürlüğü, Baraj Ölçüm Cihazları Teknik Şartnamesi, 2014, Ankara.

Emiroğlu M.E., 1999. Barajların Tip Seçiminin Belirlenmesinde Uzman Sistem Kullanımı, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Ertan Y., 2002. Toprak Ve Kil Çekirdekli Dolgu Baraj Ölçüm Tesisleri, DSİ Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Ankara.

He, J.H., Approximate Analytical Solution For Seepage Flow With Fractional Derivatives In Porous Media, Comp. Meth. in Appl. Mech. And Eng., 167, 57-68, 1998.

Helvacı D., 2009. Dim Barajının Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

ICOLD, 2010, Concrete Face Rockfill Dams, Concepts For Design And Construction, Bulletin 141.

Kesgin, E. Kil Çekirdekli Toprak Dolgu Atık Barajlarında Sızmanın Nümerik Metotlarla Araştırılması, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.

Keskin, S. B. Toprak Dolgu Baraj Gövdesindeki ve Altındaki Sızma Olayının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.

Koç M., Aydoğan D., Yavuz O. ve Filiz M.H., 2009 Taşkın - baraj emniyeti ve baraj emniyeti - taşkın ilişkisinin örneklerle değerlendirilmesi, II. Ulusal Taşkın Sempozyumu Tebliğler Kitabı.

Kucur T., 1988, Leakages in Demirköprü Dam, Seminar on Dam Safety, National Board of Water and Environment, Finland.

Orhon M., 1997. Baraj Tipleri ve Yapım Kriterleri, Türkiye Mühendislik Haberleri, 391, 12-16.

Sağlıca, O. Dolgu Baraj Gövdelerinde Sızma Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.

Seed H.B., and Duncan J.M., 1981, "The Teton Dam Failure—A Retrospective Review". Soil Mechanics And Foundation Engineering: Proceedings Of The 10th International Conference On Soil Mechanics And Foundation Engineering, Stockholm. 1981.

Sungur T., Su Yapıları Cilt-1 Baraj ve Göletler (Su Biriktirme Yapıları) (Teknik Rehber), Yayın No: 978, Ankara, 1989.

Tosun H., 2004, Baraj Mühendisliğinde geoteknik - geçirimli zeminler ve iyileştirme esasları, Türkiye Mühendislik Haberleri, 430.

Üşenmez K., Dalaman-Akköprü Barajı İnşaatı Enjeksiyon Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.

Zhang, J., Xu, Q. Ve Chen, Z., Seepage Analysis Based On The Unified Unsaturated Soil Theory, Mech. Research Communications, 28(1), 107-112, 2001.

Zhang L.M., Xu Y. and Jia J.S., 2009, Analysis of eart dam failures: a database abroach, Georisk V:3 No:3.