

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KİL ÇEKİRDEKLİ TOPRAK DOLGU ATIK BARAJLARINDA SIZMANIN
NÜMERİK METOTLARLA ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erdal KESGİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

Ocak, 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KİL ÇEKİRDEKLİ TOPRAK DOLGU ATIK BARAJLARINDA SIZMANIN
NÜMERİK METOTLARLA ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Erdal Kesgin
(501111515)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Necati Ağırlioğlu

Ocak, 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111515 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Erdal KESGİN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Kil Çekirdekli Toprak Dolgu Atık Barajlarında Sızmanın Nümerik Metotlarla Araştırılması**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Necati AĞIRALIOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Mehmet ÖZGER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet DOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **02 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **19 Ocak 2015**

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında emeği geçen öncelikle tez danışmanım Prof. Dr Necati Ağırlioğlu'na, YTÜ öğretim üyelerinden Prof. Dr. Hayrullah Ağaçcıoğlu'na, Doç. Dr. Ahmet Doğan'a, İTÜ doktora öğrencisi Mustafa Nuri Balov'a ve son olarak bana desteklerini esirgemeyen kardeşlerim Erdoğan ve Emirhan Kesgin'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak 2015

Erdal KESGİN
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xv
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Konu ve Kapsam	2
1.2 Yöntem	2
2. KONUS İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR	3
3. ATIK BARAJLAR.....	7
3.1 Genel	7
3.1.1 Atık.....	7
3.1.2 Atık baraj.....	8
3.1.3 Atık baraj gölü	8
3.2 Atık Baraj Yapım Yöntemleri	8
3.2.1 Toprak dolgu baraj yapım yöntemi	8
3.2.2 Menba yapım yöntemi	9
3.2.3 Mansap yapım yöntemi	11
3.2.4 Merkez yapım yöntemi	12
3.3 Atık Baraj Yapım Yöntemlerinin Karşılaştırılması	12
3.4 Atık Barajların Su Barajlarıyla Karşılaştırılması	15
3.5 Atık Barajlarda Sızma Kontrolü.....	16
3.5.1 Atık barajlarda sızma suyu kaynakları	16
3.6 Atık Baraj Güvenliği	16
4. BARAJLARDA SIZMA	19
4.1 Sızma ile İlgili Genel Denklemler.....	19
4.1.1 Darcy denklemi	19
4.1.2 Laplace denklemi	20
4.2 Sızma Ağı	22
4.2.1 Akım ağı.....	22
4.2.2 Anizotropik zeminlerde akım ağının çizimi.....	24
4.2.3 Homojen olmayan tabakalı zeminlerde akım ağı.....	25
4.2.4 Kil çekirdekli bir gövdede akım ağı.....	26
4.3 Sızma ve Hidrolik İletkenlik	27
4.4 Freatik Hat Hesaplama Yöntemleri.....	28
4.4.1 Freatik hat	28
4.4.2 Freatik hattın belirlenmesinde ve hesaplanmasında kullanılan yöntemler	29
4.4.2.1 Kozeny Parabolü	29
4.4.2.2 Schaffernak ve Van Iterson çözümü	31

4.4.2.3 Casagrande çözümü.....	31
4.4.2.4 Pavlovsky çözümü.....	32
4.4.2.5 Elektrik benzeşim modeli.....	34
4.4.2.6 Grafik metot	34
4.4.2.7 Dupuit çözümü	36
4.4.3 Kil çekirdekli barajlarda sızma durumu	37
4.4.3.1 Dikdörtgen kil çekirdekli barajlarda sızma durumu.....	37
4.4.3.2 Trapez kil çekirdekli barajlarda sızma durumu.....	39
5. SIZMA HESABI İÇİN KULLANILAN YÖNTEMLER	43
5.1 Sızma Hesabı ve Kullanılan Yöntemler	43
5.2 Klasik Sonlu Farklar Metodu	43
5.2.1 Sınır şartları	45
5.2 Sonlu Elemanlar Metodu.....	47
5.3 Akım Ağı Metodu.....	47
6. KLASİK SONLU FARKLAR METODU VE GEOSTUDIO SEEP/W PROGRAMI UYGULAMALARI	49
6.1 Klasik Sonlu Farklar Metodu Uygulaması	49
6.1.1 Tablolama analizi	50
6.1.2 Akım Çizgileri, Eş Potansiyel Çizgiler ve Sızma Ağı	52
6.1.3 Sızma miktarı hesabı	55
6.2 GeoStudio SEEP/W Uygulaması	55
6.3 Sonlu Farklar Metodu ve GeoStudio SEEP/W Karşılaştırılması	57
7. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR.....	59
KAYNAKLAR.....	61
EKLER.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	73

KISALTMALAR

DSİ	: Devlet Su İşleri
ICOLD	: International Commission on Large Dams
İSKİ	: İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
WRD	: Water Retention Dams

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Atık baraj yapım yöntemleri arasındaki farklar.	14
Çizelge 3.2 : Atık barajlar ile Su barajları arasındaki farklar.	15
Çizelge 4.1 : α_1 'ya göre $\Delta a/(a + \Delta a)$ 'nın belirlenmesi	30
Çizelge 4.2 : Darcy ve Ohm kanununun benzer özellikleri	34
Çizelge 6.1 : Atık baraj bölümlerine ait hidrolik iletkenlik katsayıları	50
Çizelge 6.2 : GeoStudio SEEP/W ve sonlu farklar metodu sonuçlarının karşılaştırılması	57

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Toprak Dolgu Baraj YapımYöntemi, (Vick,1990).	9
Şekil 3.2 : Menba yapım yöntemi aşamaları, (Vick,1990).	9
Şekil 3.3 : Menba yapım yönteminde hidrolik eğimin yerini etkileyen durumlar. a) Atık su etkisi. b) Atıkların oluşturduğu Şev yüzeyinin dane dağılımı etkisi. c) Temeldeki hidrolik eğimin etkisi (Vick, 1990).	10
Şekil 3.4 : Mansap yapım yöntemi aşamaları, (Vick,1990).	11
Şekil 3.5 : Merkez yapım yöntemi aşamaları, (Vick,1990).	12
Şekil 3.6 : Atık baraj tipleri. a) Menba, b) Mansap, c) Merkez veya Toprak Dolgu Tipi	13
Şekil 3.7 : Atık baraj yıkılmasının sosyo-ekonomik etkilere göre dağılımı.(Azam&Li,2010).	17
Şekil 3.8 : Atık baraj yıkılmasının kıtalara göre dağılımı.(Azam&Li,2010).	17
Şekil 3.9 : Atık baraj yıkılmasının sebeplere göre dağılımı.(Azam&Li,2010).	18
Şekil 4.1 : Darcy Kanunu ile ilgili deney düzeneği	19
Şekil 4.2 : Doymuş bir zemindeki 2 boyutlu hız bileşenleri	20
Şekil 4.3 : Akım ağı	23
Şekil 4.4 : Baraj gövdesindeki akım ağı	23
Şekil 4.5 : Barajda alttan sızmalar için akım ağı	24
Şekil 4.6 : Anizotropik zeminlerde akım ağı çizimi	25
Şekil 4.7 : Anizotropik zeminlerde akım ağı	25
Şekil 4.8 : Homojen olmayan tabakalı zeminlerde akım ağı	26
Şekil 4.9 : Zeminlerde hidrolik iletkenlik katsayıları	27
Şekil 4.10 : Serbest su yüzeyi veya Freatik hat	28
Şekil 4.11 : Kozeny Parabolü	29
Şekil 4.12 : Schaffernak ve Van Iterson çözümü	31
Şekil 4.13 : Casagrande çözümü.....	32
Şekil 4.14 : Pavlovsky Çözümü.....	32
Şekil 4.15 : Baraj en kesitinde analitik formülleri için mesafeler	35
Şekil 4.16 : Grafik çözüm ile çözülmüş bir barajın en kesiti.....	36
Şekil 4.17 : Dupuit çözümü ile freatik hat	37
Şekil 4.18 : Kaya dolgu dikdörtgen kil çekirdekli bir barajda sızma çizgisi.....	37
Şekil 4.19 : Kaya dolgu dikdörtgen kil çekirdekli bir barajda sızma çizgisi hesabı	38
Şekil 4.20 : Trapez çekirdekli toprak baraj gövdesindeki sızma. a) çekirdek kesiti ve a noktası sağa çekilmiş halde b) çıkış noktası b'nin grafiksel hesaplanması c) çıkış yüzeyindeki basınç dağılımı.....	39
Şekil 5.1 : Sonlu farklar yöntemindeki i,j düğüm noktaları	44

Şekil 5.2 : Geçirimsiz bölge için sınır şartları	45
Şekil 5.3 : Farklı geçirimsiz durumlar için h_i, j değerlerinin bulunması.....	46
Şekil 5.4 : Düzgün olmayan sınır şartları hesabı	46
Şekil 6.1 : Toprak dolgu baraj tipi atık baraj kesiti	49
Şekil 6.2 : Tablolama analizinde Akım Çizgileri için sınır şartları	50
Şekil 6.3 : Tablolama analizinde Eş Potansiyel Çizgileri için sınır şartları.....	51
Şekil 6.4 : Akım Çizgileri için 100 iterasyona göre sonlu farklar değerleri	51
Şekil 6.5 : Eş Potansiyel Çizgiler için 100 iterasyona göre sonlu farklar değerleri.....	52
Şekil 6.6 : Akım Çizgileri	52
Şekil 6.7 : Eşpotansiyel Çizgileri.....	53
Şekil 6.8 : Sonlu Farklar metoduna göre freatik hat	53
Şekil 6.9 : Sonlu farklar metoduna göre Sızma Ağı	54
Şekil 6.10 : GeoStudio için sınır şartları ve ağ aralıkları.....	56
Şekil 6.11 : GeoStudio programına göre freatik hat ve toplam sızma miktarı	56

SEMBOL LİSTESİ

V	Akım hızı
k	Hidrolik iletkenlik, Permeabilite katsayısı
i	Hidrolik eğim
Q	Debi
q	Birim genişlik debisi
V_x , V_z	Yatay ve düşey yönde akımın hızı
φ	İçsel sürtünme açısı
H	Piyozemetrik yükseklik
Co	Freatik hattın mansap şevini kestiği nokta
D	Parabolün su yüzeyini kestiği noktanın apsisi
H_u , h	Haznedeki su derinliği
Δa	Freatik hattın mansap şevini kestiği noktalar arasındaki mesafe
y₀	Parabolün y eksenini kestiği noktanın ordinatı
B	Dolgu barajın taban uzunluğu
D	Parabolün su yüzeyini kestiği noktanın apsisi
α	Mansap şevinin yatayla yaptığı açı
A	Sızma hattının mansap şevini kestiği noktanın merkeze uzaklığı
a	Sızma yüzeyinin uzunluğu
m	Akım çizgisi sayısı
n	Eşpotansiyel çizgi sayısı
L	Sızma uzunluğu
m₁, m₂	Şev eğimleri
B	Sızma çizgisi çıkış yüzeyi
D_d	Çıkış yüzeyindeki su yüksekliği
d	İki eşpotansiyel çizgi arasındaki uzaklık

KİL ÇEKİRDEKLİ TOPRAK DOLGU ATIK BARAJLARINDA SIZMANIN NÜMERİK METOTLARLA ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Sızma, bütün ayrıntılarıyla açıklanamayan önemli baraj stabilite problemlerinden biridir. Sızma basit olarak suyun barajın memba kısmından mansap tarafına doğal yollarla hareketi olarak tanımlanır. Suyun bu hareketi hem klasik su barajlarında hem de atık barajlarında baraj ömrüne ve baraj stabilitesine önemli derecede etki eder. Baraj gövdelerinde borulanma oluşması ve içsel erozyonun meydana gelmesi bu etkinin sonuçlarındandır.

Atık barajlar, çeşitli yollarla elde edilmiş atıkları depolamaya yarayan ve yine çeşitli yollarla üzerinde biriken suyu mansaba aktaran yapılardır. Atık baraj birçok yönüyle klasik su barajlarından farklılık gösterir. En önemli farklardan biri barajın ömrüdür. Su barajlarında ömür sınırlıyken, atık barajın ise atık üreten madenin faaliyetleri bitse bile çok daha uzun zaman stabil kalması gerekmektedir. Diğer bir fark ise atık barajın çevre açısından büyük risk oluşturan atıkların depolamaya olanak vermesidir. Bu durumdan dolayı herhangi bir sızmaya karşı çevreye verilebilecek zarar büyük olacağından, tasarım kriterleri açısından sızmanın hayati bir durum teşkil ettiği aşikârdır. Diğer bir taraftan atık barajlarda sızma mekanizmasını açıklayacak literatür çalışmalarının sayısı sınırlıdır.

Bu çalışmada, 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 elemanlar tabanlı GeoStudio SEEP/W programı ile mukayese edilmiştir. İki modelde de gözlenen sonuçlar tatmin edici olup aradaki farklar kabul edilebilir seviyededir. Bu durum uygulama açısından karmaşık sızma problemlerine kolay ve uygulanabilir bir bakış açısı getirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sızma, Atık Baraj ve Sonlu Farklar Metodu

NUMERICAL INVESTIGATION OF SEEPAGE IN TAILINGS EARTHEN DAM WITH CLAY CORE

SUMMARY

Seepage is one of the most important dam stability problems that could not be explained fully in detail. Seepage is identified as the natural way of water from upstream to downstream of a dam along the dam body. It has significant impacts on dam life and dam stability in both water retention dams (WRD) and tailings dam directly, e.g., internal erosion and piping are observed through the dam body.

"Tailings" or "tails" is the name given to fine-grained industrial wastes commonly, though not exclusively, produced as a waste product from mining and quarrying activities. The particles range from sand to clay-size fraction. The technology of tailings dam design is based on the same geotechnical principles as water dams, however the presence of saturated tailings solids as the stored medium, versus water only, presents unique challenges and design benefits. The tailings dam is an embankment designed to enable the deposited tailings to settle, and to retain tailings and process water.

The gradation of mine tailings typically varies from silty medium fine sand to clayey silt. Tailings dam design sections vary considerably. For example, the dam can be made entirely out of unprocessed tailings with upstream construction, or the dam may be made out of borrow material with little or no reliance on the tailings. Impounded tailing solids have hydraulic conductivity and shear strength properties that can be used to the advantage of the designer. On the other hand, sulphide rich mine tailings have a potential to oxidize and leach metals through acid rock drainage. Seepage control, for environmental, becomes a critical design parameter which can lead to much lower tolerances for seepage losses from the impoundment, compared to water dams.

Tailings dam differs from WRD in many cases. Design, construction, operation, and closure of tailing dams have some fundamental differences when compared to conventional water storage dams. One of the significant differences is life time of the

dam. WRD's design life is finite, on the contrary a tailings dam needs to be stable over long time periods even after the closure of mining activities. Furthermore, leakage in tailings dam would be hazardous for environment because of deposition of mining waste material. Therefore, seepage is a very crucial design criteria for tailings dam. However, the number of studies aiming at understanding the seepage mechanism of tailings dams is limited in literature.

In this work, seepage through a typical tailings earthen dam was investigated using a mathematical model-spreadsheet analysis- based on the finite difference solution method. The spreadsheet analysis is a very powerful tool with a wide range of mathematical related capabilities. It provide a comprehensive and practical tool for organizing numbers and performing numerical calculations. For the finite difference application a template is created to include the problem domain and all applicable boundaries.

As the boundaries, the base of the dam and the impervious boundary with limitation to only straight horizontal and vertical lines can be included in the template. The finite difference grid with the value of potential or head at each node can also be combined in the template. Finally, the template become a ready to analysis and solve the system. These steps make twice to calculate streamlines and potential lines values. After these calculations, the streamlines and potential lines graphics are drawn according to the number of iterations. In this study, seepage problem analyzed by making 100 iterations. Furthermore, a couple of different iterations were made and these solutions were shown in appendix part. The reason of choosing 100 iterations is that all iterations after 100 are very close each other. This enable study to be had reasonable and applicable solutions.

In addition to the suggested mathematical model, the analyses were performed using finite elements based software Geostudio SEEP/W. This software shows how easy it is to find the downstream seepage face and amount of seepage. The upstream boundary nodes are designated as head boundaries with total head equal to the water level in the reservoir. The downstream toe is assigned a total head of zero m ($H = \text{elevation}$). The downstream slope is assigned a potential seepage face type of boundary condition. A potential seepage face review boundary is a Q (seepage discharge) = zero boundary with the potential seepage face review option checked. After tailings dam section draws, materials are identified and materials properties like hydraulic conductivity also enter to the system software.

Finally, the amount of seepage flows through dam body and phreatic line figure obtain at the end of the successful seepage analysis.

The seepage values were observed with both the finite difference method and SEEP/W. In the spreadsheet analysis, nine streamlines and twelve potential lines are obtained. By using these solutions in graphical method, seepage flow net, phreatic line and amount of seepage are also found. Comparison between finite difference results and Geostudio results determines the main goal of the study. The results showed that differences between the seepage values obtained by two different models were acceptable and satisfying. In addition, the results bring a new and feasible perspective to complex seepage problems in terms of application.

Keywords: Seepage, Tailings Dam, Finite Difference Method

1. GİRİŞ

Baraj gövdelerinde meydana gelen sızma, baraj stabilitesine doğrudan etki ettiğinden dolayı sızma, baraj tasarımı için kullanılan önemli parametrelerden biridir. Meydana gelen sızmaların izin verilen miktar dışında olması, baraj içerisinde borulanma ve içsel erozyona bağlı yıkımlara sebebiyet vereceğinden dolayı sızma kontrolü baraj güvenliği açısından vazgeçilemez bir unsurdur. Eğer baraj içerisinde kil çekirdek mevcutsa, baraj gölünde biriken suyunun kil çekirdek içindeki sızma hızı ve freatik hat, baraj dolgu malzemesinin yatay ve düşey geçirimsizlik katsayısı değerlerine, boşluk suyu basınçlarına ve suyun sızma süresi gibi parametrelere bağlıdır. Baraj içinde oluşan sızmaların miktarı özellikle çekirdeğin ve diğer bölgelerin geçirimsizlik durumuyla ilgilidir

Sızma kontrolü geleneksel barajlarda olduğu gibi atık barajlarda da önemli bir tasarım kriteridir. Atık barajlar, belli miktarda maden atığının ve suyun depolandığı yapılardır. Atık baraj birçok yönüyle geleneksel su barajlarından farklılık gösterir. En önemli farklardan biri barajın ömrüdür. Su barajlarında ömür sınırlıyken, atık barajın çok daha uzun zaman stabil kalması gerekmektedir. Atık barajın çevre açısından büyük risk oluşturan atıkların depolamaya olanak vermesi ise diğer önemli farklarından biridir. Bu durumdan dolayı herhangi bir sızmaya karşı çevreye verilebilecek zarar büyük olacağından, tasarım kriterleri açısından sızmanın hayati bir önem teşkil ettiği aşikârdır.

Su barajlarından farklı olarak çok daha uzun süre stabil kalma koşulu ve herhangi bir yıkılma durumunda çevre açısından potansiyel bir tehlike oluşturduğundan dolayı sızma kontrolü bu tür barajlar açısından daha da önem kazanmaktadır.

Atık baraj yıkılmaları tarih boyunca çok sayıda insanı etkilemiş olup, çevre ve yaşanılan alanlar için önemli bir tehlike oluşturmıştır. Yapılan araştırmalar atık baraj yıkılmalarının önemli bir kısmının sızmadan dolayı olduğunu göstermektedir. 1985 yılında İtalya’da meydana gelen atık baraj yıkılması sonucunda 268 kişi ölmüş, çok sayıda bina ve köprü yıkılmıştır. 1998 yılında ise İspanya’da meydana gelen kazada ise yaklaşık 46 milyon m² ekolojik çevre etkilenmiş ve yeraltı sularına baraj

yıkılması sonucu metal iyonları karışmıştır. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında insan hayatını ve toplumu tehdit eden çevresel felaketlerin önlenmesi açısından atık barajlarda sızma kontrolü yapılmalıdır

1.1 Konu ve Kapsam

Atık barajlarda sızma kontrolü, barajın uzun süre stabil kalabilmesi için gerekli bir durumdur. Sızma mekanizmasını anlamak için, baraj gövdesinde çizilecek olan akım ve eş potansiyel çizgilerin oluşturduğu sızma ağını anlamak gerekir. Bu çalışmada öncelikle baraj gövdesinden geçen akım ve eş potansiyel çizgiler belirlenip, daha sonra sızma ağı çizilecektir. Kil çekirdekli bir baraj için sızma ağının çıkarılıyor olması ve matematik modelin uygulama alanının farklılık gösteriyor olması yönüyle yapılacak olan çalışma diğer çalışmalardan ayrılmaktadır. Ayrıca, sızma ağını oluşturan akım çizgilerinin en üst çizgisi olan freatik hattın ve bu kesitten geçen sızma miktarının GeoStudio SEEP/W programı ile destekleneceği ve bu iki model için ortaya çıkan sonuçların birbirinden ne kadar farklı olacağı durumu bu çalışmada incelenecektir. Genel olarak bu çalışmada amaç, atık barajda meydana gelen sızmaların uygulama açısından daha kolay ve anlaşılabilir olan sızma miktarı için grafik metod (akım ağı metodu), sızma ağı için sonlu farklar metodu ve freatik hat için GeoStudio SEEP/W metodunu kullanarak sonuçlar elde etmek olacaktır.

1.2 Yöntem

Klasik sonlu farklar metodu, inşaat mühendisliğinde karşılaşılan fiziksel problemleri çözebilen en eski ve en kolay sayısal çözüm yöntemidir. Sonlu elemanlar ve sonlu hacimler gibi sayısal metotlardan farklı olarak sonlu farklar metodu, çok daha rahat anlaşılabilir ve uygulanabilir bir yöntemdir. Bu çalışmada, kil çekirdekli toprak dolgu baraj tipi bir atık barajda sızma ağının bulunabilmesi için sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Sonlu farklar kullanılarak yapılan çalışma için herhangi bir kod ya da program yazılmaksızın, basit bir matematik model kurularak tablolama analizi yapılmıştır. Sınır şartları atık baraj kesitine uygun bir şekilde girilerek tablolama analizi çözülmüş akım çizgileri, eş potansiyel çizgiler ve sızma ağı için gerekli değerler hesaplanmıştır. Klasik sonlu farklar yöntemi kullanılarak atık baraj kesiti için sızma ağı oluşturulmuştur.

2. KONU İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Atık baraj güvenliği açısından sızma faktörü en belirleyici ve en temel etkenlerden biridir. Atık barajda sızma durumunu etkileyecek olan parametreler bu bakımdan çok önemli bir yere sahiptir. Cowherd ve diğerleri (1993) çalışmalarında, kömür atık barajında uzun zaman diliminde oluşan freatik hattın çeşitli yollarla belirlenerek SEEP programıyla mukayesesi yapmıştır. Genel olarak bu tür barajlarda sızma hattının önemli olduğu verimlilik açısından vurgulanmıştır. Atık olarak barajda depolanan malzemenin kaba ve ince daneli olması durumuna göre freatik hattın değişimi gözlenmiştir. Ayrıca, bu çalışmada karşılaştırılan freatik hatlar, depolanan atık üzerinde oluşan eğimin (beach slope) sızma üzerindeki etkisini, kaba daneli dolgu üzerinde yatay hidrolik iletkenliğin dikey olana oranının daha doğru tahmin edilebileceğini göstermiştir. Özel olarak bu çalışmada 6 tane atık barajın uzun dönemli freatik hat değişimleri hesaplanmış ve bilgisayar programıyla karşılaştırılmıştır. Bu çalışma yapılırken hidrolik iletkenlik ve anisotropi ile ilgili bazı varsayımlar yapılmıştır. Sonuç olarak, kaba daneli kömür atığının drenaj karakteristiklerini uzun zaman boyunca devam ettirebileceği anlaşılmıştır. İnce daneli atığın barajın memba kısmında geçirimsiz bir örtü gibi davrandığı görülmüştür. Ayrıca memba yüzündeki atık sıvısından dolayı uzun dönem su tutma yapılarına dayanan geleneksel olarak kaba daneli yapılardaki sızma tasarımının çok tutucu olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak, kaba daneli kömür atık seddelerinin herhangi bir drenaja ihtiyaç duymadığı, buna ek olarak makul miktarda içsel drenajının yapılması tavsiye edilmiştir.

Sızma probleminin nasıl kolay ve doğru bir şekilde araştırılacağı konusu problemin kendisi kadar önemlidir. İran'da yapılmış bir çalışmada toprak dolgu barajlarda meydana gelen sızma problemine karşı sonlu farklar yöntemiyle çözüm bulunmaya çalışılmıştır. Ayrıca ortaya çıkan sonuçlar sonlu farklar tabanlı bilgisayar yazılımı olan Geostudio SEEP/W ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma için örnek bir baraj kesiti

seçilerek sınır şartları belirlenmiş ve sonlu farklar 5 nokta metodu ile Geostudio SEEP/W programı sonuçları ile karşılaştırılıp, ortaya çıkan farklar belirlenmiştir. Bunun için farklı ağ aralıkları göz önüne alınmıştır. Ağ aralıklarının küçük olması durumunda ($\Delta x=1m$ ve $\Delta z=1m$) çalışma sonuçlarını yeterli ve kabul edilebilir seviyede tatmin edici olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, sonlu farklar yöntemi daha karmaşık olan sonlu elemanlar ve sonlu hacim metotları yanında sızma problemi için bir çözüm yöntemi olabileceği ve başarıyla uygulanabileceği gösterilmiştir (Karmani ve Barani, 2012).

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 değerlendirilmiştir. Schaffernak (1917) ve Stello (1987) gibi sızma miktarı hesaplama yöntemine ek olarak Fakhari ve Ghanbari tarafından belli limitler içerisinde sızma faktörüne bağlı bir model geliştirilmiştir. Burada sızma faktörü barajda tutulan su yüksekliği de dahil olmak üzere birçok parametre ekseninde hesaplanarak formülize edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucu önerilen denklemin kabul edilebilir hata seviyesi ile birlikte, sızma debisi hesaplama açısı verimli bir model olduğu gösterilmiştir.

Kritik hidrolik eğim sonucunda, boşluklu ortam içinde oluşan parçacık hareketinin meydana getirdiği içsel erozyonun baraj stabilitesine etkisi büyüktür. Geleneksel toprak dolgu barajlarının aksine atık barajların da çok uzun zaman stabil kalması gerekir. Yapılan diğer bir çalışmada sızmanın, içsel erozyon ve hidrolik eğimle ilgili en önemli parametre olduğu üzerinde durulmuştur. Hidrolik iletkenlik ve hidrolik eğim değerleri farklı modeller üzerinde değerlendirilmiştir. Atık baraj fonksiyonunu yerine getiren farklı İsveç jeolojik formasyonları üzerinde uzun dönemli kritik hidrolik eğimler gözlemlenmiştir. Çok uzun zamanlı stabilite kontrolü açısından sızma ve içsel erozyon kontrolünün önemli olduğu vurgulanıp, maksimum hidrolik eğimin baraj ömrü ve stabilitesi açısından vazgeçilemez bir parametre olduğu açıklanmıştır (Jantzer ve Knutsson, 2007).

Zhenzhong ve diğerleri (2009) tarafından yapılan çalışmada Çin'de bulunan Ekou demir madeni atık barajı ile ilgili sızma kontrolü açısından güvelik analizi yapılmıştır. 3 boyutlu bir baraj analizi yapılarak, freatik hat altında meydana gelen su akımının yüksek ve düşük olması durumlarına göre baraj güvenliği incelenmiştir.

Farklı hidrolik iletkenlik değerlerine göre drenaj tabakası etkisi karşılaştırılmıştır. Güvenlik ve evre gibi iki önemli ayağı olan bu çalışma, sızma açısından güvenlik yönetimi, kirlilik takibi evre dengesi durumlarını da kapsamaktadır. Tüm bunlar göz önüne alındığında sızma faktörü, herhangi bir atık barajda baraj güvenliği ve baraj gölü evre etkisi bakımından en önemli etkenlerden biridir. Freatik hat, doğrudan atık güvenliğini etkilediğinden, su seviye kontrolü atık baraj açısından çok önemlidir.

3. ATIK BARAJLAR

3.1 Genel

Atık barajlar (Tailings Dams), geleneksel toprak barajlar kadar yaygın olmamakla birlikte inşaat mühendisliğin temel uygulama alanlarından biridir. Atık barajlar ile ilgili uygulamalar çok uzun zamandır yapıldığı halde bu konu ile ilgili ulaşılabilecek bilgi çok kısıtlı seviyededir. Türkiye şartlarında değerlendirecek olursak, ülkemizde atık baraj bulunmakla beraber herhangi bir proje ve işletme geçmişine sahip değildir. Yakın zamanda meydana gelen Kütahya'daki gümüş çıkartılan madene ait atık barajın kısmen yıkılması sonucu, etrafa saçılan zararlı atıklar civar halkı ve çevre için büyük bir problem teşkil etmiştir. Bu durum ışığında atık barajlar ile ilgili çalışmalar yapmak gerekli bir durum haline gelmiştir. Öncelikle, atık barajlar ile ilgili genel bir terminoloji vermek faydalı olacaktır.

3.1.1 Atık

Atık barajlar içerisinde kullandığımız atık terimi, herhangi bir maden ve taş ocağı aktivitesi sonucunda oluşmuş ince daneli atık malzeme (tailings) olarak isimlendirilir (ICOLD,1996c). Atık içerisindeki parçacıkların dağılımı kum ve silt arasında olmakla beraber kil boyutunda da olabilir. Atık sıvısı ya da bulamacı (slurry) atık toplama sahasına borularla transfer edilir.

Atık içerisindeki kum gibi kaba daneli malzemeler deşarj noktasına yakın yerleşir, balçık (slime) olarak isimlendirilen silt ve kil gibi ince daneli malzemeler de atık su içine atık boyunca dökülür (Vick,1990).

Genel olarak atık içeren 6 endüstriden bahsedilebilir (Green,1980). Bunlar kömür ocağı, metal ocağı, fosfat ocağı, alüminyum işletme tesisleri, kum ve çakıl ocakları ve kille ilgili yapılan çalışmalardır. Bu atık malzemenin üretiminin gerçekleştiği işlemler çok yüksek nem oranına sahip bulamaç kıvamında malzemenin oluşmasıyla sonuçlanır. Ekonomik ve uygunluk açısından bu atık malzemeler sahaya bu kıvamda taşınır (ICOLD,1982).

3.1.2 Atık baraj

Atık barajlar (Tailings Dams), çeşitli aktiviteler sonucu oluşmuş atık malzemelerin depolanması ve atık suların uzaklaştırılması için tasarlanan yapılar olarak tanımlanır. Genel olarak, madenlerde faydalı mineral konsantrasyonlarının çok küçük bir yüzde teşkil etmesinden dolayı çok büyük miktarlarda atık üretilmektedir. Bu atıkların büyük bir kısmı depolanmadığı takdirde çevre için çok zararlı bir hale geleceği çok açıktır. Bu durum atık baraj konusunu maden faaliyetleri içinde en kritik faktörlerden biri yapmaktadır.

3.1.3 Atık baraj gölü

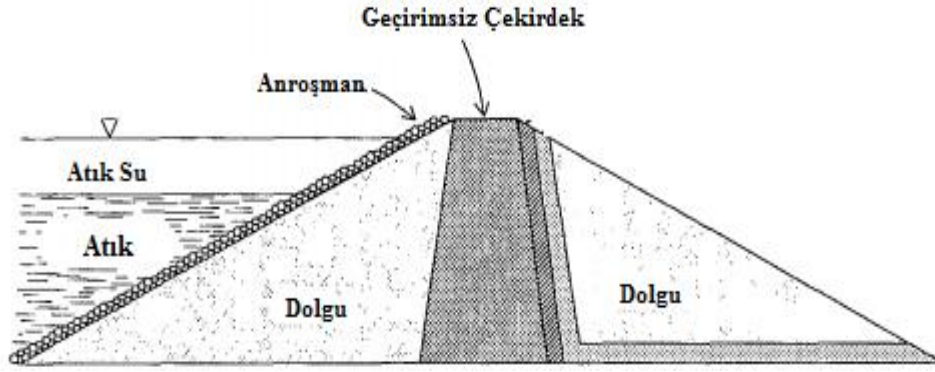
Atık baraj gölü (Tailings Pond), maden faaliyeti sonucunda atık sıvısı içerisindeki malzemelerin çökmesi sonucu üstte birikmiş su kısmı olarak tanımlanır. Bu su miktarının kontrollü de baraj güvenliği açısından önemli bir durum teşkil etmektedir. İçsel erozyon gibi baraj stabilitesini tehdit eden önemli unsurlardan biri, kontrol edilmeyen atık su sonucu oluşabilir.

3.2 Atık Baraj Yapım Yöntemleri

3.2.1 Toprak dolgu baraj yapım yöntemi

Şekil 3.1, geleneksel toprak baraj yöntemi ile yapılmış atık baraj kesitini göstermektedir. Geleneksel toprak dolgu baraj yapım yöntemi, diğer aşamalı yükselen atık baraj tipleriyle kıyaslandığında daha pahalı bir yöntemdir. Su baraj tipi bu tür atık barajlar, genel olarak atık barajlar içinde atık toplamak için çok fazla mühendislik çalışması olarak algılanır.

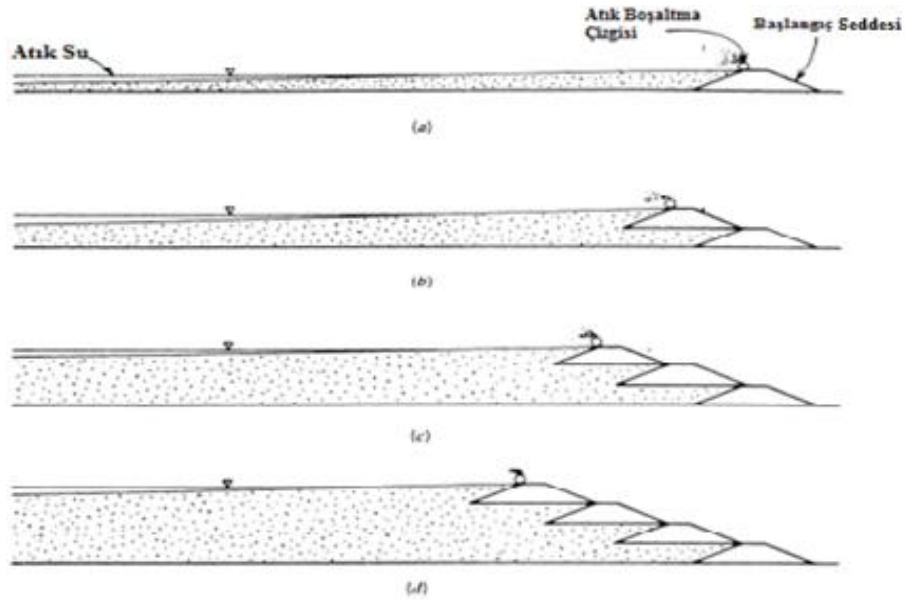
Bu tür atık barajlarının temel üstünlüğü atık suyun, herhangi bir taşkın anında bulunduğu yer itibarıyla ve üstünde hava payı olması durumuyla devrilme ve yıkılmaya karşı daha korunaklı olması ile açıklanır. Toprak dolgu baraj tipi atık barajların menba şev eğimi su barajlarınınkinden daha dik olabilir çünkü bu tür barajlar da hızlı su seviye alçalması görülmez (Vick, 1990).



Şekil 3.1 : Toprak Dolgu Baraj Yapım Yöntemi, (Vick,1990).

3.2.2 Menba yapım yöntemi

Atık baraj yapım yöntemlerinden olan menba yapım yöntemi Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Öncelikle atık malzeme mevcut değilken başlangıç seddesi inşa edilir. Daha sonra, atık boşatılmaya başlanır ve atık malzeme sedde yüksekliğince doldurulur. Şekil 3.2a’da görüldüğü gibi atık boşalma çizgisi boyunca atık sevi oluşur. İlk sedde dolduktan sonra ikinci sedde inşa edilir. Bu işlem atık baraj yüksekliğine ulaşınca kadar devam eder (Şekil3.2b-d).



Şekil 3.2 : Menba yapım yöntemi aşamaları, (Vick,1990).

Menba yapım yönteminin üstünlükleri, (Vick,1990):

- Ucuz maliyet ve kolay yapılabilirlik,

- Sedde yapımının insan gücüyle ve kumdan oluşmuş atıklardan inşa edilebilmesi,
- Bu yöntem sonucunda uzun dönem için düşük hidrolik eğim elde edilmesi,

olarak sıralanabilir.

Menba yapım yönteminin zayıflıkları, (Vick,1990):

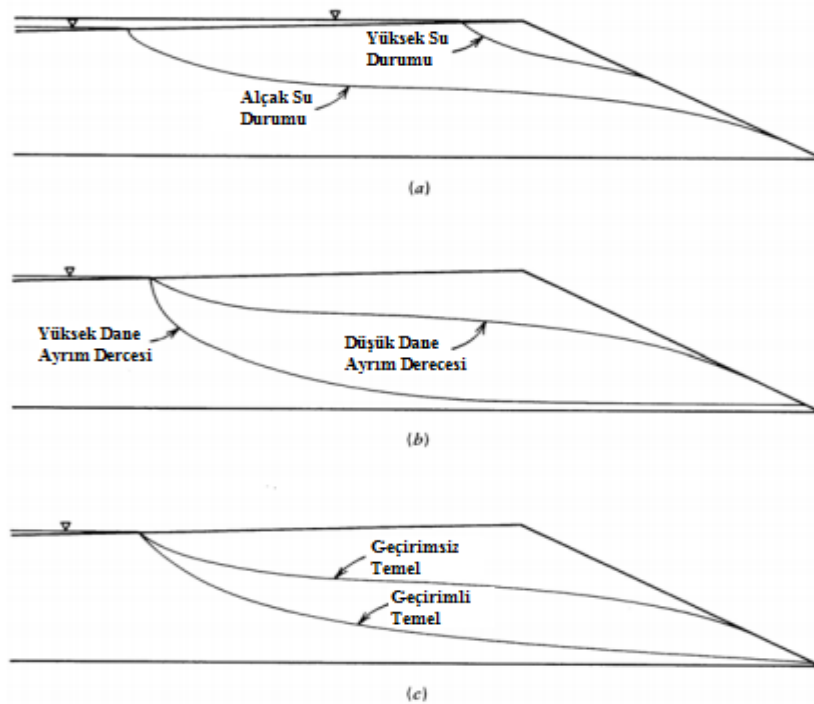
- Hidrolik eğim kontrolü,
- Su tutma kapasitesi,
- Sismik sıvılaşma duyarlılığı,
- Yükselme oranı,

olarak sıralanır.

Hidrolik eğimin konumu, atık baraj stabilitesini kontrol etmek açısından önemlidir.

Bu yer, genel olarak Şekil 3.3'de görüldüğü gibi 3 temel parametre ile ilişkilidir.

Bunlar;



Şekil 3.3 : Menba yapım yönteminde hidrolik eğimin yerini etkileyen durumlar. a) Atık su etkisi. b) Atıkların oluşturduğu Şev yüzeyinin dane dağılımı etkisi. c) Temeldeki hidrolik eğimin etkisi (Vick, 1990).

- Atık miktarına göre temelin hidrolik iletkenliği,
- Baraj tepesine göre atık suyun bulunduğu yer,

- Dane irilik dağılımı derecesi ve atık içerisindeki yanal hidrolik iletkenlik değişimleridir.

3.2.3 Mansap yapım yöntemi

Mansap yapım yöntemi, Şekil 3.4 'de gösterilmiştir. Öncelikle, herhangi bir atık yokken başlangıç seddesi inşa edilir. Daha sonra atıklar bu bölgeye ulaştırılır ve ilk sedde dolduktan sonra, mevcut sedde üzerine mansap eğimi verilecek şekilde barajın yükselmesi sağlanır (Şekil 3.4b). Bu durum, geleneksel toprak dolgu baraj yönteminde olduğu gibi hidrolik eğimin kontrolü açısından barajın iç bölgelerinin birleşmesine olanak verir. Mansap yapım yöntem aşamaları Şekil 3.4a-d 'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu yöntemin genel olarak üstünlükleri yanı sıra zayıflıkları da mevcuttur (Vick,1990).

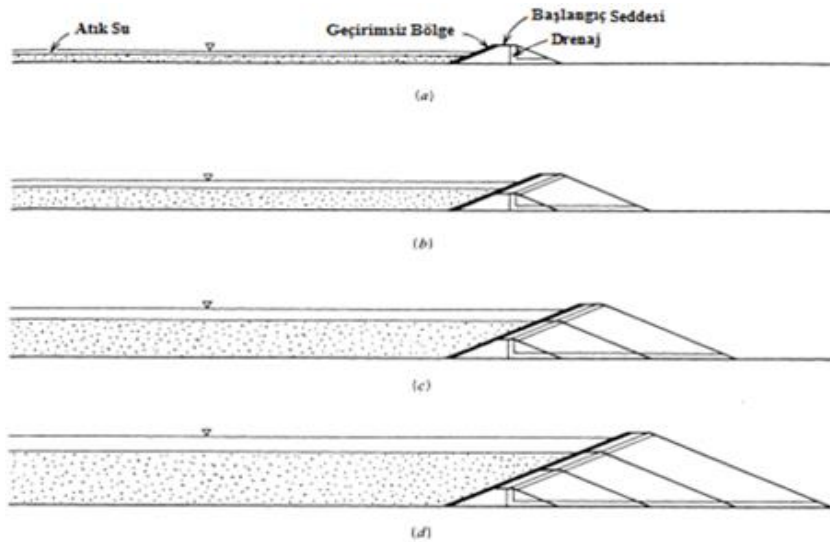
Üstünlükleri;

- Herhangi bir çeşit atık için uygun oluşu,
- Sıvılaşmaya karşı diğer metotlardan daha dirençli oluşu,

olarak sıralanabilir.

Zayıflıkları;

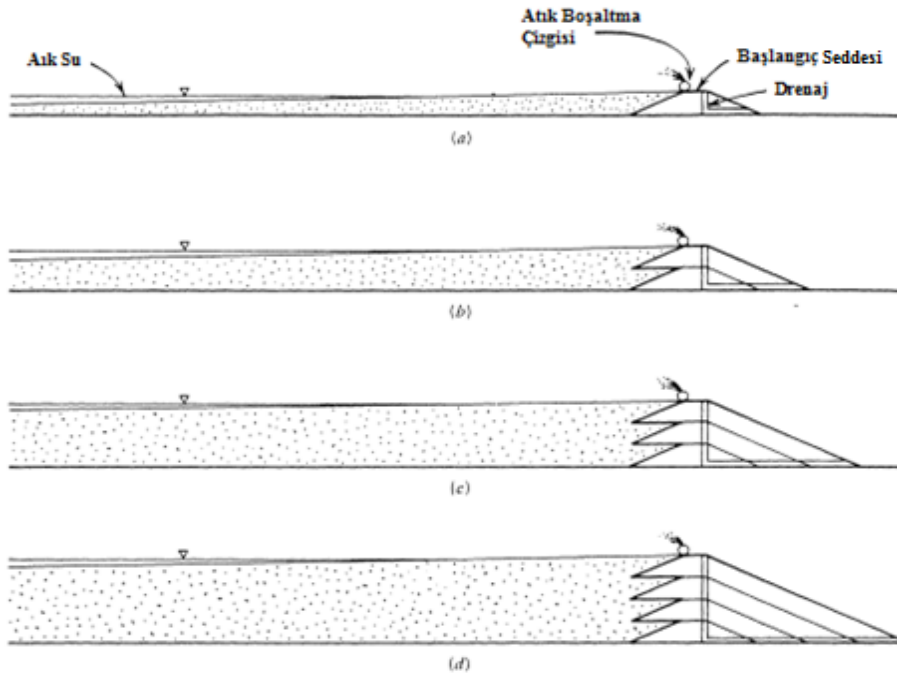
- Her yükseliş için baraj topuğunun dışa doğru hareket etmesi,
- Yapımı için gerekli olan dolgu malzemenin maliyetinin fazla olması,
- Barajın son yüksekliğine erişmeden baraj ıslahı ve iyileştirmesine olanak sağlamaması olarak gösterilir.



Şekil 3.4 : Mansap yapım yöntemi aşamaları, (Vick,1990).

3.2.4 Merkez yapım yöntemi

Merkez yapım yöntemi Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Başlangıç seddesi inşa edildikten sonra, diğer aşamalar için atık malzeme merkezden dışa doğru kıyı veya şev formunu oluşturmak için dökülür. Daha sonra Şekil 3.5b-d’de görüldüğü gibi baraj inşa edilir. Merkez yapım yöntemi bazı yönleriyle menba yöntemine, bazı yönleriyle ise mansap yöntemine benzer. Aynı zamanda bu iki yöntemin bir karışımı olarak tanımlanabilir. Merkez yapım yöntemi, menba ve mansap yöntemlerinin üstünlüklerini birleştirir ve zayıflıklarını ise diğer iki yönteme göre azaltır. Gerekli olan atık miktarı ve maliyetler menba ve mansap yöntemlerinin ortalaması şeklindedir. Deprem dayanıklılığı kabul edilebilir seviyede olup, yükselme oranı boşluk suyu basıncı tarafından sınırlandırılmamıştır. Bu durum, merkez yapım yönteminde baraj yüksekliğinin izin verilenden daha kısa olacağı anlamına gelir. Diğer bir deyişle, menba yöntemindeki baraj yüksekliği daha büyüktür.



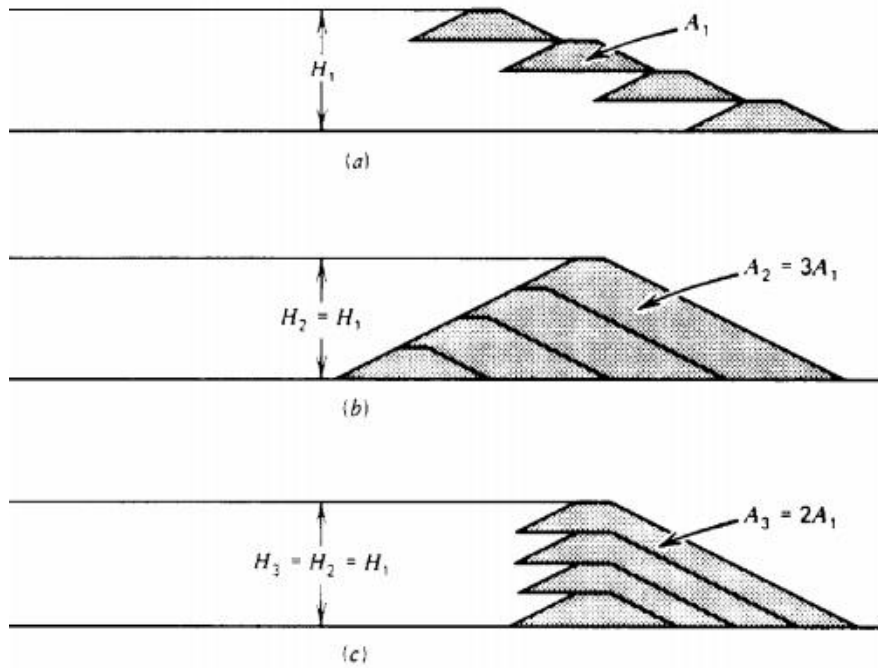
Şekil 3.5 : Merkez yapım yöntemi aşamaları, (Vick,1990).

3.3 Atık Baraj Yapım Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Atık baraj yapım yöntemleri karşılaştırıldığında, toplam dolgu miktarları ile ilgili olan maliyet fazlaca önem taşımaktadır. Yaklaşık olarak bu yöntemlere ait dolgu hacimleri karşılaştırıldığında menba yöntemindeki dolgu hacmi V ise, bu hacim

merkez yapım yönteminde 2V ve mansap yönteminde ise 3V olarak hesaplanır (Vick, 1990). Eğer baraj yüksekliği artarsa dolgu hacimleri arasındaki farklar ve maliyetler de buna mukabil artacaktır (Şekil 3.6).

Genel olarak yapılacak olan atık barajda yapım yöntemi seçimi için, birçok durumda tarihi emsal kombinasyonları, ampirik gözlem ve düzenleyici gereklilikler yerine her bir alternatifin katı bir biçimde akılcı olarak değerlendirilmesiyle doğru karar verilecektir (Vick,1990).



Şekil 3.6 : Atık baraj tipleri. a) Menba, b) Mansap, c) Merkez veya Toprak Dolgu Tipi.

Atık baraj teknolojisi su barajlarından farklı olarak daha çok deneme yanılma yöntemiyle gelişmektedir. Farklı yöntemler, farklı alanlarda en iyi sonuçları vermektedir. Örneğin, menba yapım yöntemi ABD'nin güney batısında çok sıklıkla bakır madenleri için kullanılırken, aynı yöntem Güney Afrika'nın altın madenlerinde atık baraj yapımında kullanılmaktadır. Bu bölgelerdeki depremselliğin az oluşu da buna etki etmektedir. Kuzey Idaho'da ise kuşun-çinko atık barajları için aynı yöntem farklı sebeplerden dolayı kullanılmaktadır. Zeminin geçirgen alüvyonlardan oluşması bu alanlarda üstünlük sağlamaktadır. Missouri ve Britanya Columbia'sında yüksek yağış oranı, sarp topoğrafyası ve depremsellik nedeniyle daha çok merkez yapım yöntemi kullanılmaktadır. Genel olarak atık baraj yapım yöntemleri arasındaki farklar Çizelge 3.1 'de detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Atık baraj yapım yöntemleri arasındaki farklar.

Baraj Tipi	Atık Gereksinimleri	Deşarj Gereksinimleri	Su tutma Kapasite Yeterlilikleri	Sismik Dirençleri	Yükselme Oranı Kısıtlamaları	Dolgu Malzeme Gereksinimleri	Dolgu Maliyetleri	Az Geçirimli Çekirdek Bölge Yapımı
Toprak Dolgu Baraj Yapım Tipi	Her atık için uygun.	Her şartta uygun.	İyi	İyi	Tüm baraj başlangıçta inşa edilir.	Doğal dolgu malzemesi	Yüksek	Mümkün
Menba Yapım Tipi	En az %60 Kum.	Kontrollü sahil yüzeyi oluşturmak için merkezden dışa doğru yapılır.	Uygun değil.	Zayıf	15-30 yıl içerisinde yükselme uygun, 50 yıldan sonra tehlikeli.	Yerli dolgu malzemesi, Atık kum, Atık kaya	Düşük	Mümkün Değil.
Mansap Yapım Tipi	Her atık için uygun.	Tasarım kriterlerine göre değişir.	İyi	İyi	Yükselme kısıtı yok.	Atık kum, Atık kaya, Yerli dolgu malzemesi	Yüksek	Mümkün (Eğimli Koni)
Merkez Yapım Tipi	Kum ve düşük plastisite'den oluşmuş balçık(Slime)	Merkezden dışa doğru yapılır.	Kalıcı su tutma için uygun değil, geçici olabilir.	Kabul edilebilir.	Genel bir kısıt yok, spesifik uygulamalar olabilir.	Atık kum, Atık kaya, Yerli dolgu malzemesi	Orta	Mümkün (Merkez Koni)

3.4 Atık Barajların Su Barajlarıyla Karşılaştırılması

Su barajları genel olarak enerji ya da su temini amacıyla inşa edilir. Atık barajlar ise bilindiği gibi silt ya da kil gibi atıkları depolamak için yapılır. Atık barajların yapımı için gerekli malzeme atıklardan temin edilebildiği için su barajlarından maliyet açısından daha avantajlıdır. Ancak çok fazla miktarda su depolama gereksinimi ve çok fazla miktarda yağışın görüldüğü bölgelerde atık barajlar ve normal su barajları benzer tasarıma sahip olabilirler. Çünkü bu tür durumlarda atık barajlardan fazla suyu boşaltmak gerekeceğinden benzer bir tasarım durumu gerçekleştirmek gerekir.

Son yıllarda maden ihtiyacının artması ve teknolojinin de gelişmesiyle, buna mukabil maden faaliyetleri artmış ve çok fazla miktarda maden çıkartılmıştır. Benzer bir yaklaşımla çıkartılan madene ek olarak atık miktarı artmış ve atık baraj teknolojisi gelişmeye başlamıştır. Gelişmiş ülkelerde su barajlarına ait muhtemel çalışma alanları geliştiği halde, atık barajlarla ilgili alanlar ise daha yeni gelişmeye başlamıştır ve bu konu ile ilgili geliştirilebilecek alan sayısı yeterli miktardadır. Genel olarak söyleyebileceğimiz atık ve su barajları arasındaki farklar Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Atık barajlar ile Su barajları arasındaki farklar.

	SU BARAJLARI	ATIK BARAJLAR
Yapım Süresi	Kısa Süreli, Tek Aşamalı.	Uzun Süreli ve Çok Aşamalı.
Çevre Etkisi	Çevreye Etkisi Kısıtlı, Atık yok.	Atık Depolama, Yüzey ve Yer Altı Sularına Muhtemel Etki, Faunaya ve Havaya Verilecek Zarar.
Hizmet Ömrü	Sınırlı (50-100 yıl)	Sınırsız. (Maden aktivitesi son bulduktan sonra da devam eder.)
Yıkılma Oranı	0.01%	0.1% (Azam & Li, 2010)

3.5 Atık Barajlarda Sızma Kontrolü

Sızma kontrolü, genel olarak barajlar için önemli bir stabilite kontrolüdür. Barajlardaki su seviyesinin yeri, boşluk suyu basıncı ve freatik hattın kontrolü baraj tasarımı için düşünülmesi gereken önemli parametrelerden birkaçıdır. Aşırı boşluk suyu basıncı ve sızma eğimleri baraj yıkılmasına kadar dahi varabilecek büyük bir etkiye sahiptirler. Geleneksel su barajlarında olduğu gibi atık barajlarda da bu kontrol uygun bir şekilde yapılmalı ve uygulanmalıdır.

3.5.1 Atık barajlarda sızma suyu kaynakları

Klohn(1979)'a göre atık barajlar için sızma kontrolü sağlamak için araştırılması gereken başlıca sızma suyu kaynakları:

- Atık üzerinde meydana gelen atık su,
- Yapı inşaatı sırasında çeşitli şekillerde oluşmuş su,
- Atık malzemenin konsolidasyonundan sonra kalan su,
- Yağışlarla beraber barajda biriken su,
- Atıkların borularla taşınması sırasında oluşan su,

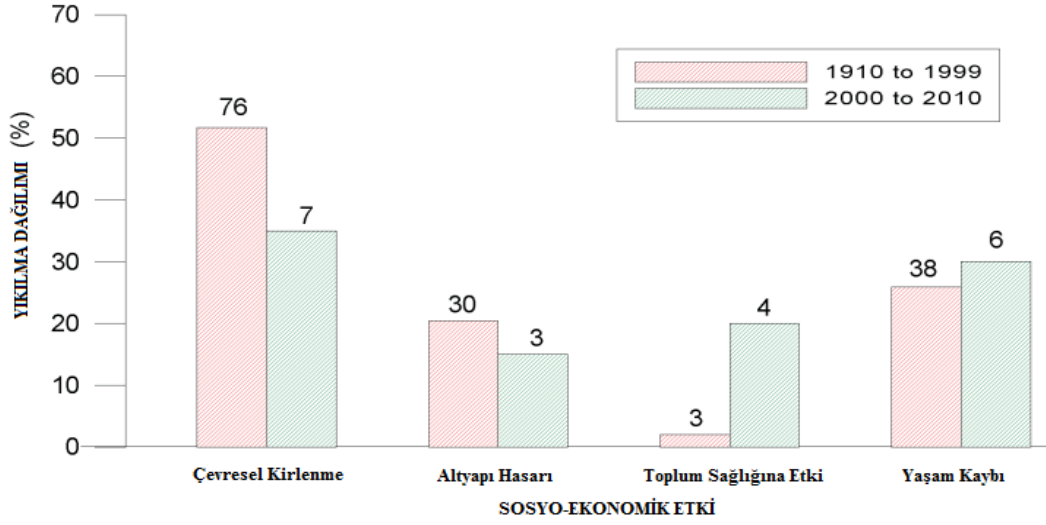
olarak sıralayabiliriz.

3.6 Atık Baraj Güvenliği

Genel olarak su faktörü, barajların yıkılması hususunda en önemli nedenlerden biridir. Atık barajlar için de benzer bir durum söz konusudur. Aşırı miktarda kontrol edilemeyen sızmanın ortaya çıkardığı hidrolik eğimler ince daneli malzemelerin taşınmasına neden olur ve hidrolik iletkenliğin artması sonucu baraj içerisinde erozyonlar oluşur. Bu durum baraj stabilitesinin bozulmasına ve işlevinin tam olarak yerine getirilmemesine neden olur.

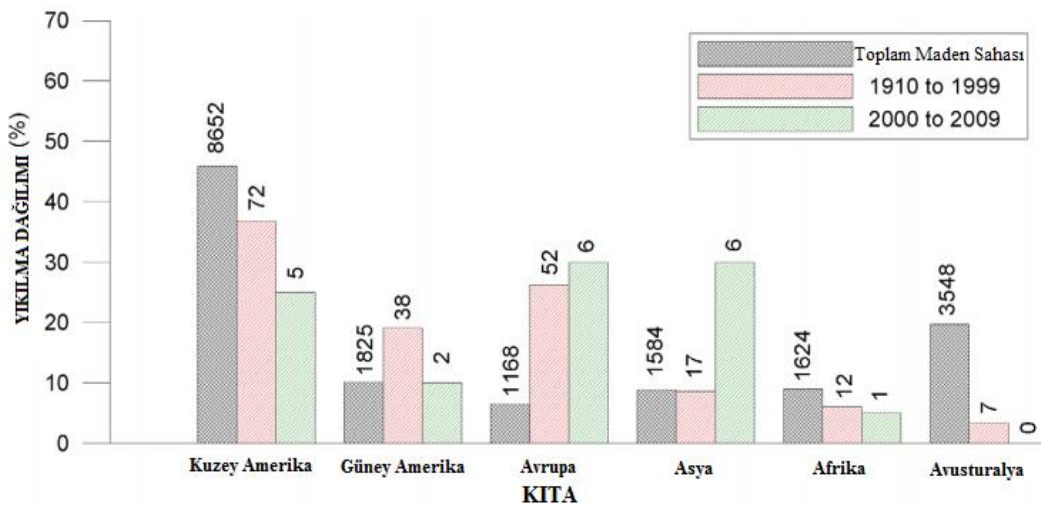
Geçen yüzyıl içinde dünya genelindeki 18401 maden sahası dikkate alınarak yapılan araştırmada atık barajların yıkılma oranı yüzde 1.2 iken bu oran geleneksel su barajlarında sadece yüzde 0.01'di (ICOLD, 2001). Atık baraj yıkılmaları içerdikleri atık itibarıyla çevreye ve insanlara karşı daha büyük ve tehlikeli etkiye sahiptir. Güney Afrika'daki Merriespruit (1994), İspanya'daki Los Frailes (1998), Romanya'daki Baia Mare (2000), atık baraj yıkılmaları çok sayıda insanı etkilemiş, çevresel etkileri muazzam boyutlara ulaşmıştır. Genel olarak bu durum sosyo-

ekonomik açıdan Şekil 3.7’de gösterildiği gibi değerlendirilirse, insan hayatı ve çevrenin bu durumdan ne kadar tehlikeli boyutta etkilendiğinin göstergesi olabilir.



Şekil 3.7 : Atık baraj yıkılmasının sosyo-ekonomik etkilere göre dağılımı.(Azam&Li,2010).

Şekil 3.8, atık baraj yıkılmalarının kıtalara göre dağılımının göstermektedir. Amerika kıtasındaki maden faaliyetleri ve atık baraj sayıları dikkate alınırsa, bu yıkılma oranlarının şaşırtıcı olmaması gerekir. Şekil 3.9 ise yıkılmaların, bu yıkılmaya sebep olan durumlara göre dağılımını göstermektedir. Genel olarak olumsuz hava koşullarını bir yana bırakacak olursak yapısal olarak atık baraj yıkılmalarının başlıca sebeplerinden biri sızmadır.



Şekil 3.8 : Atık baraj yıkılmasının kıtalara göre dağılımı.(Azam&Li,2010).



Şekil 3.9 : Atık baraj yıkılmasının sebeplere göre dağılımı.(Azam&Li,2010).

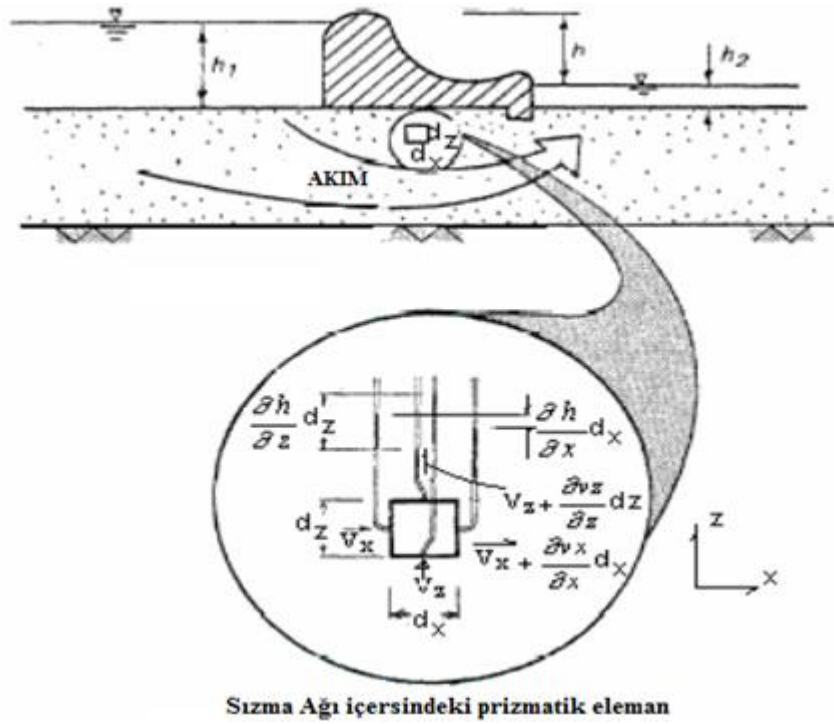
$$V = ki = k \frac{\Delta h}{L} \quad (4.1)$$

$$Q = kA \frac{h_1 - h_2}{L} = kA \frac{\Delta h}{L} = kAi \quad (4.2)$$

ifadesi elde edilmiştir (k: hidrolik iletkenlik katsayısı).

4.1.2 Laplace denklemi

Laplace denklemi sıkışmayan bir akışkanın, sıkışamaz geçirgen malzeme içerisinde akış kuralını belirler. Laplace denklemini kullandığımız zemin, izotropik, homojen ve gözeneklidir. Akım kararlı bir akımdır ve Darcy kanunu geçerlidir. Laplace Denklemi, süreklilik denklemi ve Darcy kanunu kullanılarak 2 boyutlu, geçirimli ve izotropik zeminler için, doymuş zemindeki bir sızma ağı içerisindeki prizmatik bir elaman incelenirse;



Şekil 4.2 : Doymuş bir zemindeki 2 boyutlu hız bileşenleri.

Hidrolik eğimler;

$$i_x = -\frac{\partial h}{\partial x} \quad , \quad i_z = -\frac{\partial h}{\partial z} \quad (4.3)$$

Süreklilik denklemini kullanarak birim hacme, birim zamanda giren su miktarı;

$$q_{giren} = v_x dz dy + v_z dx dy \quad (4.4)$$

Birim hacimden birim zamanda çıkan su miktarı;

$$q_{çıkan} = v_x dz dy + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx dz dy + \frac{\partial v_z}{\partial x} dz dx dy \quad (4.5)$$

Bunların birbirine eşit olması gerekir. Denklemler birbirine eşitlenirse;

$$q_{giren} = q_{çıkan} \text{ eşitliğinden};$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} dx dz dy + \frac{\partial v_z}{\partial x} dz dx dy = 0 \quad \text{denklemini, buradan da};$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (4.6)$$

elde edilir.

İzotropik zeminler için Darcy kanunu kullanırsa hidrolik iletkenlik katsayıları her iki yönde birbirine eşit olur ve hızlar sırasıyla;

$$k_x = k_z = k \text{ eşit olursa};$$

$$v_x = k i_x = -k \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4.7)$$

$$v_z = k i_z = -k \frac{\partial h}{\partial z} \quad \text{yazılır.} \quad (4.8)$$

Hız Potansiyeli;

$$\Phi = kh \quad (4.9)$$

olarak ifade edilirse ve (4.7) ve (4.8) denklemleri (4.9) 'da yerine konulursa;

$$v_z = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad , \quad v_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x}$$

hızları elde edilir. Bu denklemler de (4.6) denklemi ile birleştirilir, en genel haliyle 2 boyutlu zeminler için de tekrar düzenlenirse, baraj gövdesinden ve temelinden olan sızmaların analizinde kullanacağımız Laplace denklemi haline dönüşür. Denklem;

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (4.10)$$

olarak bulunur.

4.2 Sızma Ağı

Toprak dolgu barajlarda sızma ağının oluşturulabilmesi için akım ağının çizilmesi gerekir. Akım ağı sızmaların nasıl bir yol izlediği hakkında açıklayıcı bir sistemdir. Sızma ağı, akım çizgilerinden ve onlara dik olan eş basınç çizgilerinin oluşturduğu karesel bir akım ağını meydana getirir. Barajların geçirimsizlik perdesi ve içerisindeki freatik hat çizgisi ile geçirimsiz temel sınır şartlarını oluşturmaktadır. Freatik hat atmosfer basıncına sahip olan noktaları birleştirir ve serbest yüzey olarak tanımlanır.

4.2.1 Akım ağı

2 boyutlu zeminler için elde edilen Laplace denklemi incelendiği zaman, zemin içindeki sızmaların farklı zemin bölgelerinde çok çeşitli basınç yüksekliklerinde ve akım doğrultularında olduğunu görülür. Bu ağı oluşturan iki grup çizgi vardır. Şekil 4.3'deki bu çizgilere akım çizgileri ve eş potansiyel çizgileri adı verilir. Bir eş potansiyel çizgisi üzerinde her noktada suyun piyezometrik seviyesi aynıdır. Akım çizgileri su parçacıklarının hareketini temsil eder. Sızmaların olduğu yere göre baraj gövdesinde ya da baraj altından sızmalar için akım ağı çizilebilir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 'de sırasıyla baraj gövdesinden ve baraj altından sızmaların oluşturduğu akım ağı gösterilmiştir.

Akım ağı yardımıyla zemindeki basınç ve temeldeki sızma miktarı hesaplanabilir. Bir akım ağında (m) adet akım çizgisi, (n) adet eş potansiyel çizgi aralığı varsa, toplam sızma miktarı için birim genişlik debisi;

$$q = k.h.\frac{m}{n} \quad (4.11)$$

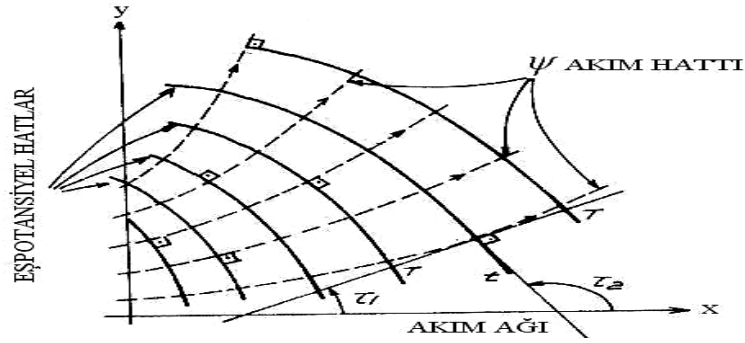
olarak bulunur.

Burada, k: permeabilite katsayısı, h: menba ve mansap su seviyeleri arasındaki fark, m: akım çizgisi aralıkları sayısı, n: eşpotansiyel çizgileri aralıkları sayısıdır.

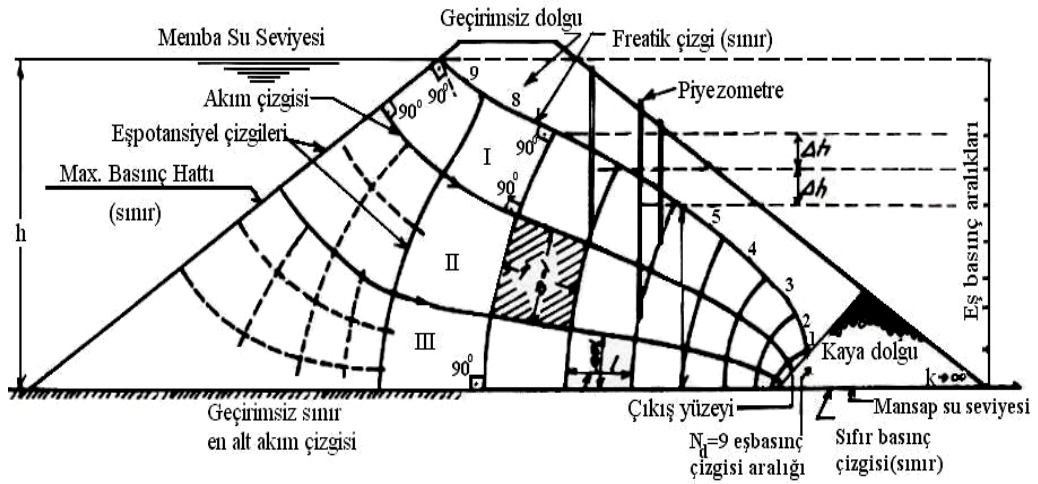
Akım ağının temel özellikleri;

1. Akım ağı homojen olan ortamlarda irrasyonel olan akımlar için de çizilebilir. Akımın bir süreklilik içermesi gerekmez.

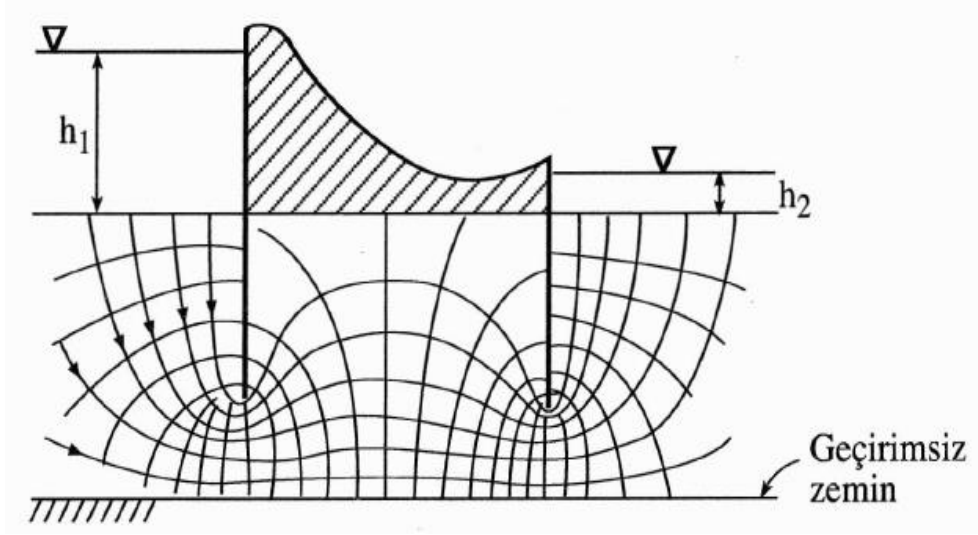
2. Akım hızı ve hidrolik eğim, akım ağı çizgileri ara mesafeleri ile ters orantılıdır. Akım hızı vektörü eş potansiyel çizgiye diktir.
3. Belirlenen noktalardan geçecek şekilde eşbasınç çizgileri çizilir. Bu çizgiler geçirimsiz temele mümkün olduğunca dik geçirilir.
4. Eş basınç çizgilerine ve dolgunun memba şevine dik olacak şekilde akım çizgileri çizilir.
5. Akım ağında birbirini takip eden herhangi iki akım çizgisinin teşkil ettiği akım kanalından aynı miktarda su geçer ve bunların toplamı sızma miktarını verir.
6. Akım ağında birbirini takip eden herhangi iki eşpotansiyel çizgisi arasındaki yük kaybı sabittir.
7. Elde edilen karesel ağın her bir karesini bulmak için şeklin tepe noktalarını birbirine bağlayan çizgilerin birbirine dik olmasından yararlanılır.



Şekil 4.3 : Akım ağı.



Şekil 4.4 : Baraj gövdesindeki akım ağı.

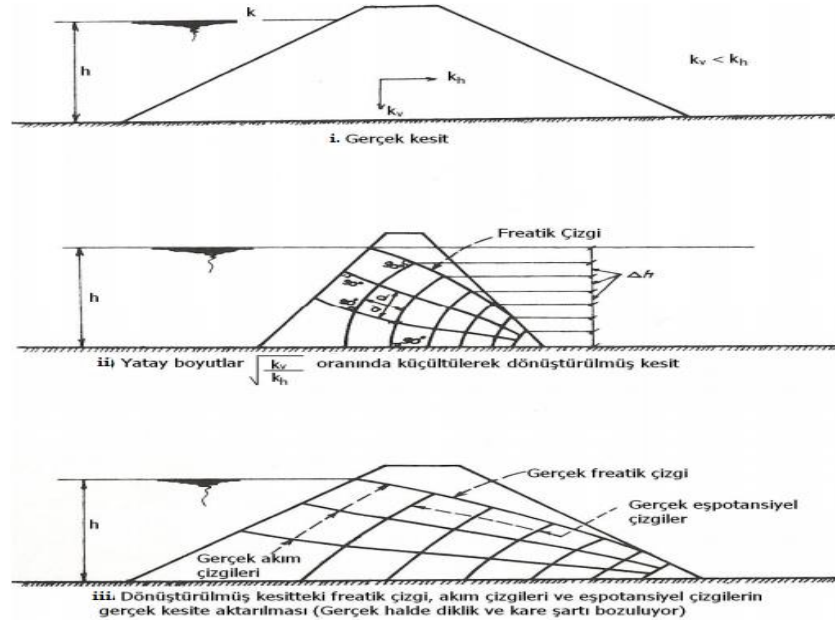


Şekil 4.5 : Barajda alttan sızmalar için akım ağı.

4.2.2 Anizotropik zeminlerde akım ağının çizimi

Zeminlerin tabiatta homojen olmasının zor olduğu gibi aksine farklı derecelerde tabakalı zeminler oluşmuş olabilir. Bu durumda izotropik zemin varsayımının geçerli olduğu Laplace denkleminde göre çizilmiş akım ağı ile gerçek durum arasında büyük farklılıklar meydana gelir. Bu sebepten ötürü, k_v yatay ve k_h düşey permeabilite değerleri önce yatay boyutlar düşey boyutlara göre $\sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ sayısı kadar azaltılarak akım ağı çizilir. Bu akım ağı, düşey ve yatay yöndeki permeabilitesi $\sqrt{k_h \cdot k_v}$ olan bir zemin meydana getirir. Bu diyagramdan elde edilen sızma miktarı, düşey ve yatay permeabilitesi farklı olan normal zemin için gerçek miktarı verir.

Anizotropik zeminde bir akım ağının çizilişi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Burada düşey ölçek değiştirilmemiş, yatay ölçek $\sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ oranında küçültülmüştür. Bu durumda değiştirilmiş akım ağı, anizotropik zemin için gerçek akım ve eşpotansiyel çizgilerini gösterir. Bu çizgiler, artık birbirlerini dik açılarda kesmezler. Şekil 4.6'da anizotropik zeminlerde akım ağı çizimi gösterilmiştir. En genel haliyle izotrop olmayan zeminlerde akım ağı Şekil 4.7'deki gibidir.



Şekil 4.6 : Anizotropik zeminlerde akım ağı çizimi.

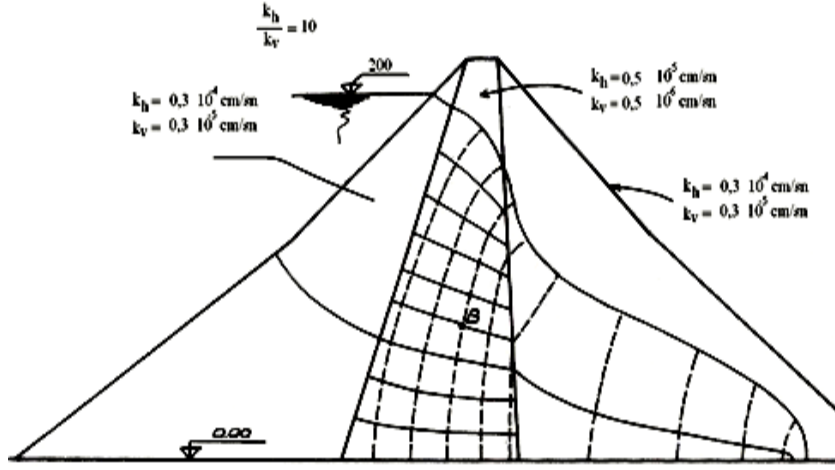


Şekil 4.7 : Anizotropik zeminlerde akım ağı.

4.2.3 Homojen olmayan tabakalı zeminlerde akım ağı

Sızma analizi içeren projeler genelde tek tabakalı olmayıp, farklı parametrelere sahip farklı jeolojik tabaklardan oluşurlar. Bu durumda, iç sınırlar arası geçiş yapan akım çizgilerine, potansiyel çizgilere ve farklı geçirgenliğe olan zeminler arasında geçiş yapan sızma hatlarında belirli kurallar uygulanır.

Bu tür zeminlerde akım yüksek geçirgenlikteki zeminden düşük geçirimli zemine geçerken akım çizgileri arasındaki mesafe artar ve bunun sonucunda eş potansiyel çizgiler arasındaki mesafe azalır. Yük kaybı, aynı uzunluk için yüksek geçirgenlikteki zemin için düşüğe göre daha az olmaktadır. Akım çizgileri tabaklara arasındaki geçişlerde kırılır. Tüm durumlarda akım ve potansiyel çizgiler geçişlerde sürekliliklerini korurlar. Ayrıca akım kanallarının sayısı Şekil 4.8’de görüldüğü gibi akımın tamamında sabit olmalıdır.



Şekil 4.8 : Homojen olmayan tabakalı zeminlerde akım ağı.

Homojen olmayan farklı tabakalardan oluşan zeminde düşey permeabilite,

$$k_v = \frac{L}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3}} \quad (4.12)$$

Yatay permeabilite ise,

$$k_h = \frac{\frac{k_1}{L_1} + \frac{k_2}{L_2} + \frac{k_3}{L_3}}{L} \quad (4.13)$$

olarak bulunur.

Burada k_1, k_2, k_3 sırasıyla zeminlerin permeabilite katsayıları; L_1, L_2, L_3 ise bu zeminlerdeki sızma uzunluklarıdır. L ise toplam sızma uzunluğudur. Yatay permeabilite, k_h ; düşey permeabilite ise, k_v olarak gösterilir. Bu durumda ortalama permeabilite,

$$k_{\text{ortalama}} = \sqrt{k_k \cdot k_v} \quad (4.14)$$

olarak bulunur.

4.2.4 Kil çekirdekli bir gövdede akım ağı

Gövdede kullanılan malzeme farklı çeşitlilikte olabilir. Bu durum genel itibariyle merkezi kısımda geçirimsiz malzeme olan silt veya kil kullanılarak, gövdenin geri

kalan kısmında ise fazla miktarda geçirimli olan çakıllı kum malzeme ile inşa edilerek ortaya çıkar. Böyle bir durumda sızma hesaplarında yalnızca merkezi çekirdek üzerinde hesaplamalar yapılması, nispeten geçirimli diğer kısımların toplam sızmaya etkisi bakımından ihmal edilebilir. Bu kabulü yapmak için merkezi çekirdek kısmının geçirimliliğinin diğer bölgelere nispetle en aşağı yüz kat daha az olması gereklidir. Farklı malzemelerin geçirimlilikleri birbirine çok yakınsa freatik hat gerçeğe yakın bir şekilde bulunabilir. Kullanılan malzemelerden en büyük geçirimliliğe sahip olanın geçirimlilik katsayısı kabul edilerek, gövde homojen malzemeden yapılmış gibi freatik hat tayini yapılabilir. Bununla beraber tüm bölge sızmalarının hesaplanması, sızma ağının çizilmesi ve baraj stabilitesi açısından faydalı olacaktır.

4.3 Sızma ve Hidrolik İletkenlik

Barajlarda meydana gelen sızma, gövdeden ve baraj temelinden olmak üzere iki türlü olarak gerçekleşmektedir. Sızma miktarları zemin tipine göre farklılıklar içermektedir. Suyun zeminler içerisinde hareket etmesi sonucu oluşan sızma miktarını oluşturacak değerler geçirimlilik olarak isimlendirilir ve geçirimlilik katsayısı (permeabilite kat. veya hidrolik iletkenlik kat.) olarak tanımlanır. Kısaca, permeabilite suyun iletilme kapasitesi olarak isimlendirilir. Zeminlerin geçirgenliğini, dane şekli ve düzeni, zeminlerde boşluk oranı, akış türü, zeminlerin birim hacim ağırlığı gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir.

	10^2	10^1	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
DRENAJ ÖZELLİKLERİ				İYİ DRENAJ					ZAYIF DRENAJ			GEÇİRİMSİZ
TOPRAK BARAJ VE SEDDELERDE KULLANILMA YERİ	TOPRAK BARAJ VE SEDDELERİN GEÇİRİMLİ KISIMLARINDA						TOPRAK BARAJ VE SEDDELERİN GEÇİRİMSİZ KISIMLARINDA					
ZEMİN CİNSİ	TEMİZ ÇAKIL			TEMİZ KUM TEMİZ KUM VE ÇAKIL KARIŞIMI			ÇOK İNCE KUM,ORGANİK VE İNORGANİK SİLT,KUM,SİLT KİL KARIŞIMI,TABAKALI KİLLER			GEÇİRİMSİZ TOPRAKLAR AYRISMIŞ KISIMLAR ALTINDAKİ HOMOJEN KİLLER		

Şekil 4.9 : Zeminlerde hidrolik iletkenlik katsayıları.

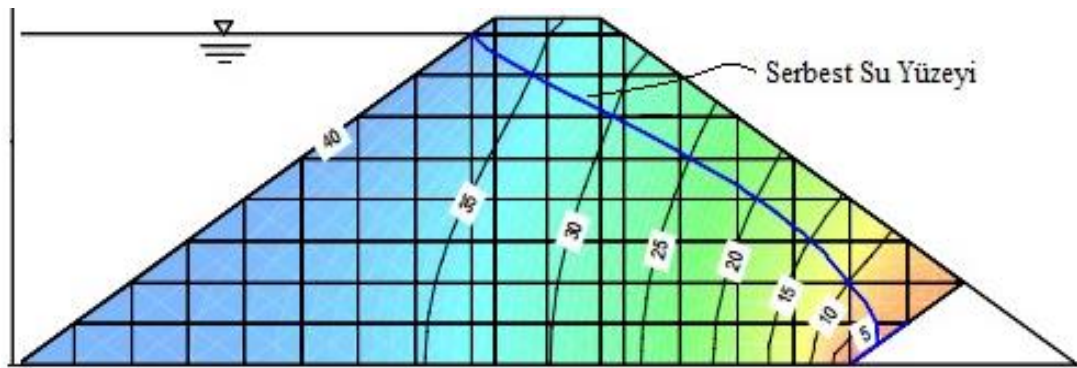
Zemin mekaniğinde, bu katsayı sabit ve değişken seviyeli permeabilite deneyleriyle hesaplanabilmektedir. Çeşitli zemin türlerine göre hidrolik iletkenlik katsayıları Şekil 4.9'daki gibidir (Terzaghi ve Peck, 1967). Buna göre hidrolik iletkenlik katsayısı çakılda en büyük daha sonra sıralama kum ve kil olarak gelmektedir.

4.4 Freatik Hat Hesaplama Yöntemleri

4.4.1 Freatik hat

Baraj gövdesi içerisindeki sızmalarda, sızma akımının meydana gelebileceği bir en üst yüzey vardır. Bu yüzey üzerinde meydana gelen basınçlar atmosfer basıncına eşittir ve bu çizgi sıfır basınç çizgisi olarak isimlendirilir. Şekil 4.10'da görülen, doygunluğu temsil eden bu çizgiye doygunluk çizgisi, serbest su yüzeyi veya freatik hat olarak denir. Bu hat üzerinde herhangi bir akım söz konusu değildir ama zeminlerde oluşan kapilerite etkisiyle meydana gelen kılcallık sonucu, bazı durumlarda bu çizgi üzerinde de doygunluk meydana gelebilir. Genel olarak, kapilerite sonucu oluşan bu etkiler küçük olduğundan ihmal edilir ve toplam sızma miktarına katılmaz.

Freatik hat belirlendikten sonra akım çizgileri ve eşpotansiyel çizgileri belirlenir. Dolgu gövdesindeki sızmalarda freatik hattın mansap şevini kestiği yer ve sızma miktarının belirlenmesi büyük önem taşır. Aynı zamanda dolgu şevinde meydana gelebilecek göçmeler veya kaymalar freatik hattın yeri açısından önem taşır.

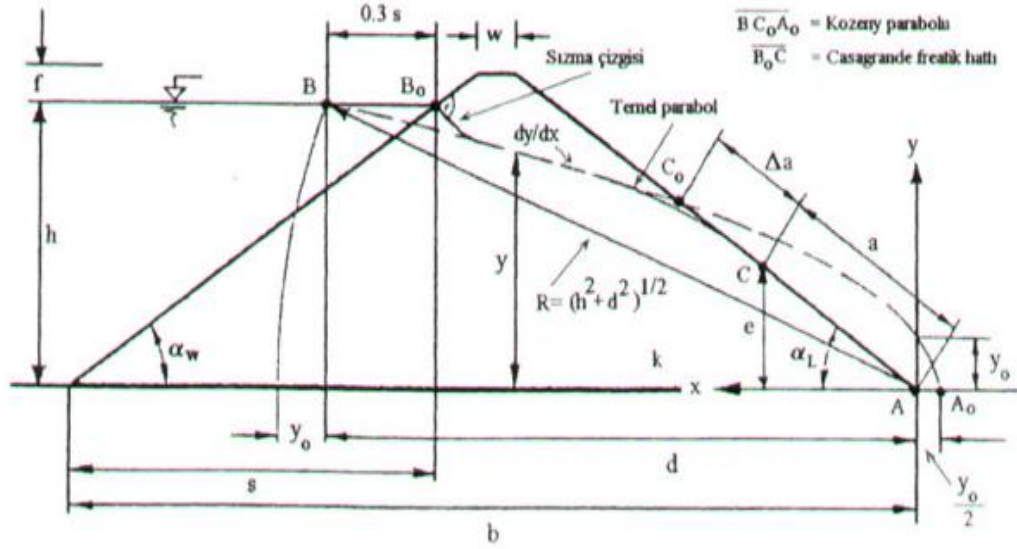


Şekil 4.10 : Serbest su yüzeyi veya Freatik hat.

4.4.2 Freatik hattın belirlenmesinde ve hesaplanmasında kullanılan yöntemler

4.4.2.1 Kozeny Parabolü

Kozeny parabolü olarak isimlendirilen sızma çizgisi aşağıdaki denklemler kullanılarak çıkartılmıştır. Şekil 4.11'deki C noktası Kozeny Parabolünün, C_o ise freatik hattın mansap şevini kestiği noktadır.



Şekil 4.11 : Kozeny Parabolü.

$$(x + y_0)^2 = x^2 + y^2 \quad (4.15)$$

genel denklemi ile Kozeny parabolü elde edilir.

$$d = b - 0,7s \quad (4.16)$$

b ve s geometri yardımıyla belirlendikten sonra 4.16 denkleminde d bulunur.

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \quad (4.17)$$

$$a + \Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha_1} \quad (4.18)$$

4.17 denkleminde y_0 ve 4.18 denklemi ve Çizelge 4.1 yardımıyla a değeri belirlendikten sonra sızma çizgisi çizilir.

Burada x ve y sırasıyla yatay ve dikey eksenleri temsil etmektedir. Aynı zamanda:

y_0 : Parabolün y eksenini kestiği noktanın ordinatı,

b: Dolgu barajın taban uzunluğu,

d: Parabolün su yüzeyini kestiği noktanın apsisi,

s: Su yüzeyi ile menba şevinin kesiştiği noktanın menba şevi taban ucuna yatay mesafesi,

h: Haznedeki su derinliği,

α : Mansap şevinin yatayla yaptığı açı,

a: Sızma hattının mansap şevinin kestiği noktanın merkeze uzaklığı,

Δa : Freatik hattın mansap şevinin kestiği nokta ile parabolün mansap şevinin kestiği nokta arasındaki mesafeyi

göstermektedir.

Çizelge 4.1 : α_1 'ya göre $\Delta a/(a + \Delta a)$ 'nın belirlenmesi.

α_1^0	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

Çizelge 4.1 de görüldüğü gibi $30^\circ < \alpha < 180^\circ$ için $\Delta a/(a + \Delta a)$ değerleri verilmiştir. Ara değerler için enterpolasyon yapılabilir.

Kozeny Parabolü için birim genişlikten sızan su miktarı, q;

$$q = k \cdot y \frac{dy}{dx} = k \cdot y_0 = k \left(\sqrt{h^2 + d^2} - d \right) \quad (4.19)$$

denklemini ile bulunur.

$\alpha < 30^\circ$ olması durumunda:

$$a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \times \cot^2 \alpha} \quad (4.20)$$

değeri hesaplanarak birim genişlikten sızan su miktarı:

$$q = k \cdot a \cdot \sin^2 \alpha \quad (4.21)$$

ampirik formülü ile hesaplanabilir.

4.4.2.2 Schaffernak ve Van Iterson çözümü

Sızma miktarını hesaplamak için kullanılan yöntemlerden biri de Schaffernak ve Van Iterson yaklaşımıdır. Bu yaklaşıma göre, Şekil 4.12’de görüldüğü gibi baraj iki bölgeye ayrılır. Birinci bölge memba su yüzeyi ile sızma en üst yüzeyinin kesiştiği yeri kapsar. İkincisi ise sızma yüzeyinin altında kalan alandır. Öncelikle iki bölgeye Darcy Kanunu uygulanır ve gerekli geometrik eşitlikler de yazılırsa birim genişlikten geçen debi, q ;

$$q = k \sin \alpha \tan \alpha \quad (4.22)$$

formülü ile bulunabilir. Burada,

k:hidrolik iletkenlik,

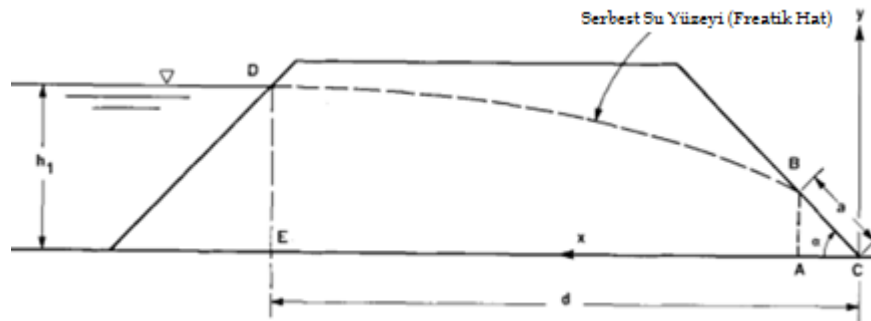
a: sızma yüzeyinin uzunluğu,

α :mansap şevinin yatayla yaptığı açıdır.

Sızma yüzeyinin uzunluğu, a ;

$$a = \frac{d}{\cos\alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2\alpha} - \frac{h^2}{\sin^2\alpha}} \quad (4.23)$$

formülü ile hesaplanır.



Şekil 4.12 : Schaffernak ve Van Iterson çözümü.

4.4.2.3 Casagrande çözümü

Birim genişlikten geçen debi, q ;

$$q = K a \sin \alpha^2 \quad (4.24)$$

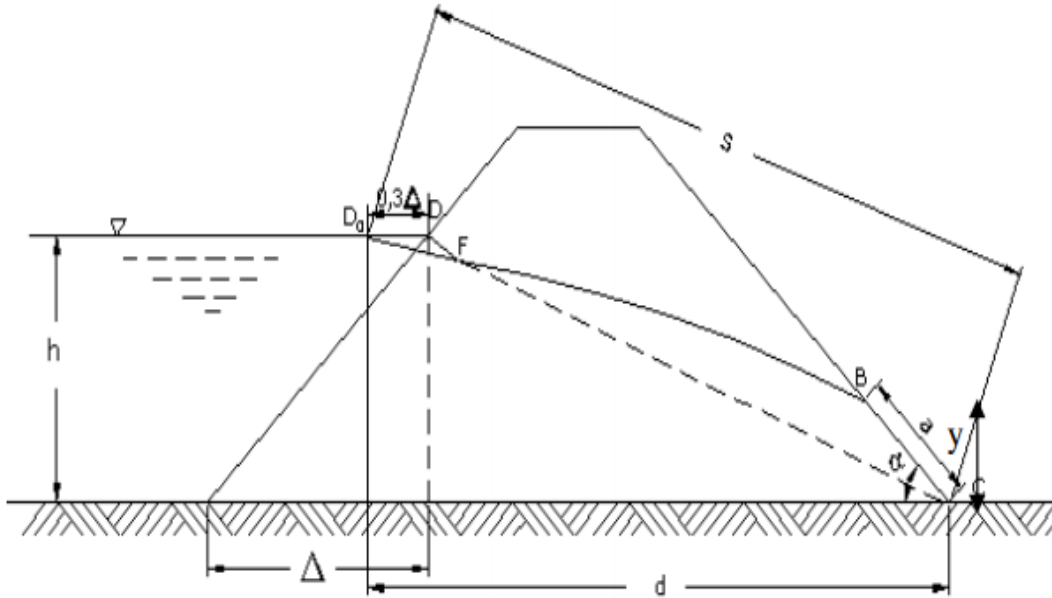
formülü ile hesaplanır.

Şekil 4.13’de gösterilen a, S, L değerleri aşağıdaki formüllerle bulunur.

$$a = S - \sqrt{S^2 - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}} \quad (4.25)$$

$$S = \sqrt{\sqrt{d^2 + h^2}} \quad (4.26)$$

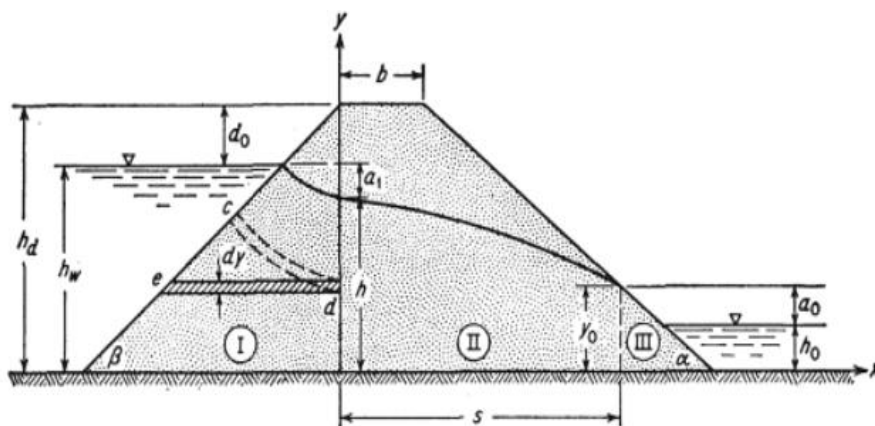
$$d = L + 0.3\Delta \quad (4.27)$$



Şekil 4.13 : Casagrande çözümü.

4.4.2.4 Pavlovsky çözümü

Pavlovsky yaklaşımına göre baraj kesiti üç bölgeye ayrılarak sızma hesabı yapılmıştır. Bölgeler Şekil 4.14 üzerinde işaretlenmiş olup eğrisel CD akım çizgisi yerine eşdeğer uzunluktaki ED akım çizgisi oluşturulup, incelenmiştir (Pavlovsky, 1922).



Şekil 4.14 : Pavlovsky Çözümü.

Birinci bölge için q hesabı:

$$\text{Hidrolik eğim} = \frac{a_1}{m_1(h_d - z)} \quad (4.28)$$

$$dq = k \left(\frac{a_1}{m_1(h_d - z)} \right) dz \quad (4.29)$$

Sızma debisi, q:

$$q = k \left(\frac{h_1 - h}{m_1} \right) \ln \frac{h_d}{h_d - h} \quad (4.30)$$

olarak hesaplanır.

İkinci bölge için q hesabı:

İkinci bölge sızma değeri için Dupuit Denklemi kullanılmıştır.

$$q = k \left(\frac{h^2 - (a_0 + h_0)^2}{2l} \right) \quad (4.31)$$

olarak hesaplanır.

Üçüncü bölge için q hesabı:

- $z_0 = 0$ için,

$$\int_0^q dq = k \frac{1}{m_2} \int_0^{a_0} dz \quad (4.32)$$

4.32 denklemi entegre edilirse,

$$q = k \frac{a_0}{m_2} \quad (4.33)$$

elde edilir.

- $z_0 > 0$

$$\frac{q}{k} = \int_{h_0}^{z_0} \frac{dz}{m_2} + \int_0^{h_0} \frac{z_0 - h_0}{m_2(z_0 - z)} dz \quad (4.34)$$

$$q = k \frac{a_0}{m_2} \left(1 + \ln \left(\frac{a_0 + h_0}{a_0} \right) \right) \quad (4.35)$$

olarak bulunur. Burada m_2 menba şevinin eğimidir.

4.4.2.5 Elektrik benzeşim modeli

Laplace denkleminin genel olarak kullanım alanları çok geniştir. Sızma akımında kullanıldığı gibi elektrik akım hesaplarında da kullanılır. Bu yüzden yeraltı suyu akımı ile elektrik akımı arasında benzerlikler mevcuttur. Bu benzerlikler Çizelge 4.2 de gösterilmiştir.

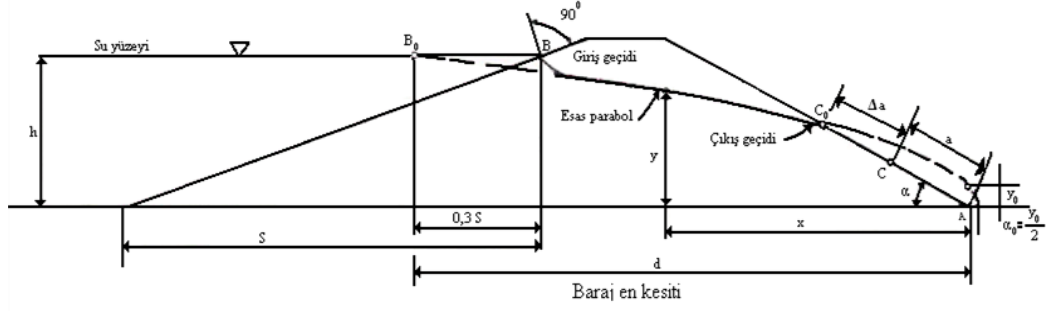
Çizelge 4.2 : Darcy ve Ohm kanununun benzer özellikleri.

$Q = \frac{K \cdot A \cdot h}{l}$	$I = \frac{C \cdot A' \cdot V}{l'}$
Q = sızma debisi h = basınç yüksekliği K = permeabilite katsayısı l = sızma boyu A = <u>enkesit alanı</u>	I = elektrik akım şiddeti V = elektrik gücü (voltaj) C = iletkenlik katsayısı l' = akım yolu boyu A' = <u>enkesit alanı</u>

Yapılacak olan benzeşim de sızma sızma ortamı yerine elektrik akım ağı oluşturularak sınır şartları akım için belirlenir. Burada elektrik potansiyelindeki düşme hızı sızmadaki basınç düşmesine permeabilite katsayısı, elektrik geçirgenliği katsayısına benzetilerek uygulama yapılır. Genel olarak bu method toprak barajlar açısından çok tercih edilen bir method değildir. Elektrik benzeşimler ıslak ve kuru olmak üzere iki türlü yapılmaktadır. Islak modellerde freatik hattı olmayan, doymuş, poroz bir zemin modellenir. Kuru modellerde ise arazi şartları iki boyutlu plan ya da kesite dönüştürülerek iletken kâğıt modelleriyle akım ağı oluşturulabilir. Farklı geometrilere uygundur. Ancak değişik hidrolik iletkenlik katsayılarına sahip zeminlerin benzeşimini yapmak zordur ve kararlı akıma sahip akiferlere uygulanabilirler.

4.4.2.6 Grafik metot

Sızmalar hem temelden hem de gövdeden meydana gelir. Her iki ortamda da akım ağının çizilmesi gereklidir ve bunun için çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Bunlar içinde en basit yol grafik metottur (Ağırlioğlu, 2011). Şekil 4.15'de gösterilen baraj kesitindeki değişkenler:



Şekil 4.15 : Baraj en kesitinde analitik formülleri için mesafeler.

B_0 : parabol ve su yüzeyinin kesim noktası,

a : baraj topuğu ile deşarj noktası arasındaki eğik mesafe,

α : deşarj yüzeyinin yatayla yaptığı açı,

a_0 : baraj topuğu ile parabol tepe noktası arasındaki baraj tabanı boyunca olan mesafe

x, y : parabol üzerinde herhangi bir noktanın baraj topuğundan ölçülen koordinatları,

y_0 : parabolün baraj topuğundaki ordinatı,

C : freatik hattın mansap yüzeyini kestiği nokta,

C_0 : parabolün mansap yüzeyini kestiği nokta,

k : toprağın hidrolik iletkenlik katsayısıdır.

Grafik çözüm olarak Şekil 4.16'daki gibi grafik elde edilir. Genel olarak denklem de

$$a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha} \quad (4.36)$$

grafiksel olarak çözülmek istenirse B_0 'dan geçen ve mansap yüzeyi uzantısını 1 nolu noktada kesen A merkezli bir yay çizilir. Daha sonra merkezi mansap yüzeyi üzerinde olan ve 1 nolu nokta ile A noktasından geçen bir yarım çember çizilir. Su yüzeyi hattı, mansap yüzeyini kesene kadar, B noktasından geçecek şekilde uzatılır. Mansap yüzeyini kestiği nokta 2 nolu noktadır. Yarıçapı 2-A mesafesi kadar olan ve merkezi A olan bir çember yayı daha önce çizilen yarım çemberi kesecek şekilde çizildiğinde yarım çemberi kesim noktası 3 nolu noktadır. Yarıçapı 1-3 mesafesi kadar olan ve merkezi 1 noktası olan bir yay pergelle mansap yüzeyini kesecek şekilde çizildiğinde mansap yüzeyini kesim noktası C noktasıdır. Elde edilen A-C mesafesi elde etmek istediğimiz a değeridir.

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \quad (4.37)$$

grafiksel olarak çözülmek istenirse Şekil 4.16'da görüldüğü gibi B_0 'dan geçen, merkezi A'da olan R yarı çaplı bir yayla baraj yatay tabanı kestirildiğinde elde edilen bu noktadan d mesafesinin çıkarılmasıyla elde edilen mesafe bize y_0 değerini verir ($y_0 = R - d$).

Elde edilen sonuçlar analiz edilirse;

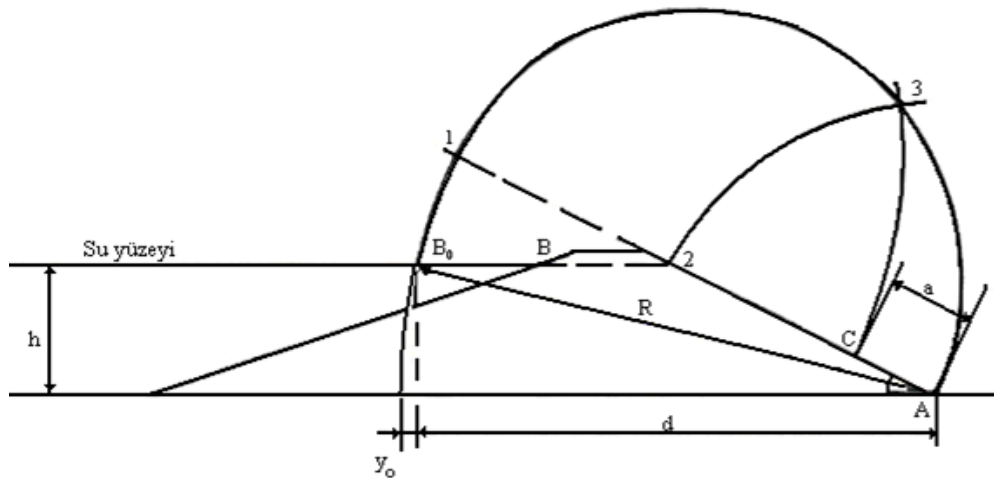
$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0} \quad (4.38)$$

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2} \quad (4.39)$$

Birim genişlik debisi,

$$q = k a \sin \alpha^2 \quad (4.40)$$

olarak bulunur.



Şekil 4.16 : Grafik çözüm ile çözülmüş bir barajın en kesiti.

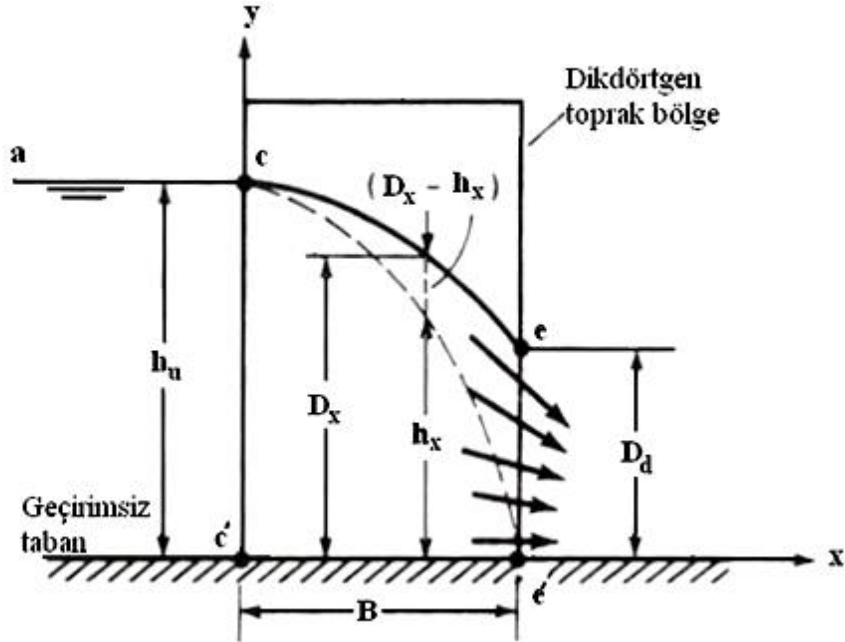
4.4.2.7 Dupuit çözümü

Birim genişlik debisi Dupuit yaklaşımı ile Şekil 4.17’deki kesitte;

$$q = -ky \frac{\partial y}{\partial x} \quad (4.41)$$

olarak tanımlanır.

Şekil 4.19'daki h_u : memba su yüksekliğini, h_x : Dupuit yaklaşımına göre x uzaklığındaki su yüksekliğini, D_x : x uzaklığındaki noktanın gerçek su yüksekliğini, D_d : su çıkış yüksekliğini, B : taban genişliğini ifade etmektedir.



Şekil 4.19 : Kaya dolgu dikdörtgen kil çekirdekli bir barajda sızma çizgisi hesabı.

İki bölge arasındaki sınırlandırılmış akım için Polubarinova-Kochina (1962) tarafından geliştirilen denklem;

$$q = K \frac{h_u^2}{2B} \quad (4.44)$$

olarak verilir.

D_d yüksekliği de Polubarinova-Kochina (1962) tarafından 4.40 denklemi olarak verilmiştir.

$$D_d = 0,742 \frac{q}{K} = \sqrt{0,55} \frac{q}{K} \quad (4.45)$$

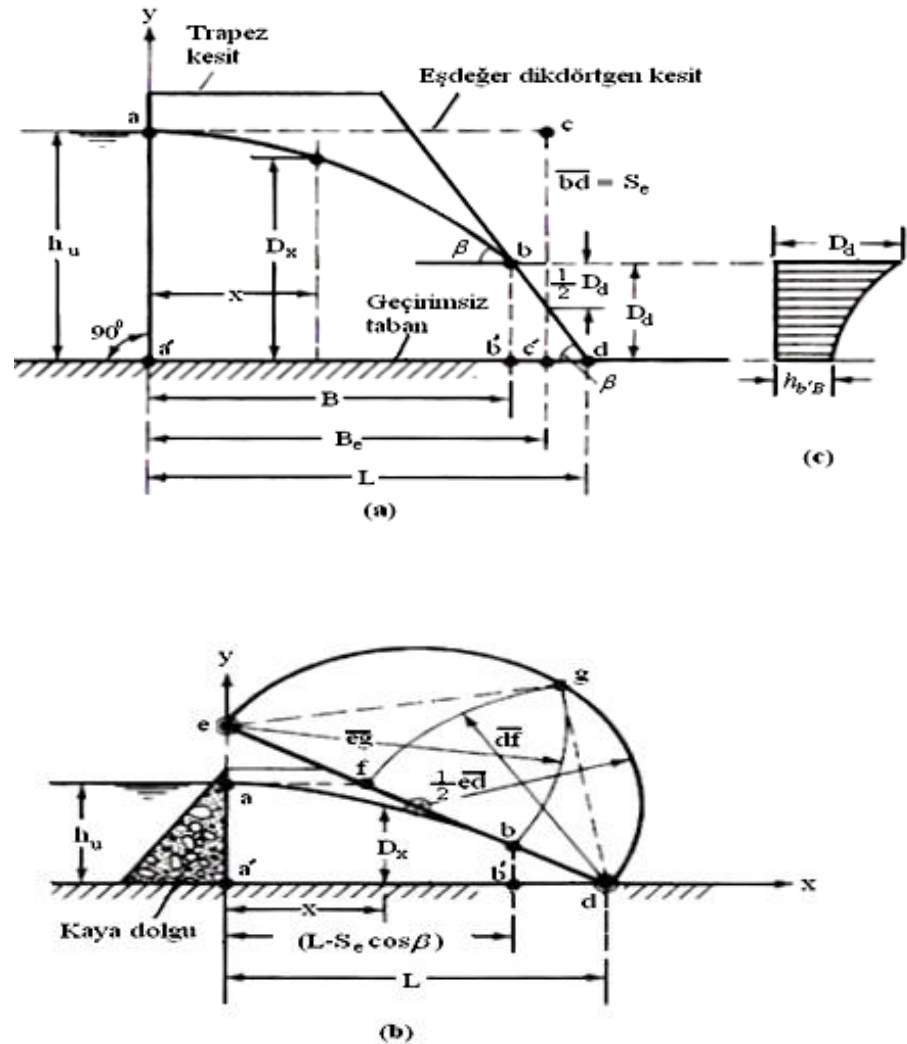
denklemi ile hesaplanmıştır. Serbest yüzey ise;

$$D_x \cong h_u \sqrt{1 - \frac{x}{B} \left(1 - \frac{1}{7,27m^2} \right)} \quad (4.46)$$

şeklindedir. Burada $m = B/h_u$ 'dur. Sınır şartları kullanılarak, $x = 0$ için $D_x = h_u$ ve $x = B$ için de $D_x = D_d$ değerini vermektedir.

4.4.3.2 Trapez kil çekirdekli barajlarda sızma durumu

Trapez kil çekirdekli barajlarda sızma analizi yapılırken a noktası Şekil 4.20' de görüldüğü gibi sağa kaydırılarak kolaylık sağlanmıştır.



Şekil 4.20 : Trapez çekirdekli toprak baraj gövdesindeki sızma. a) çekirdek kesiti ve a noktası sağa çekilmiş halde b) çıkış noktası b'nin grafiksel hesaplanması c) çıkış yüzeyindeki basınç dağılımı.

Mansap şev açısı β 'nın küçük olması durumunda, Schaffernack ve Iterson, Kashef (1987), Casagrande (1937) 'nin $\beta \leq 30^\circ$ olması durumu için geliştirdiği bağıntılara ek olarak, Dupuit yaklaşımını da geliştirerek, birim genişlik debisi için;

$$q = K \cdot S_e \cdot \sin\beta \cdot \tan\beta \quad (4.47)$$

denklemini, çıkış yüzeyinin yeri için de;

$$S_e = \frac{L}{\cos\beta} - \sqrt{\frac{L^2}{\cos^2\beta} - \frac{h_u^2}{\sin^2\beta}} \quad (4.48)$$

denklemini geliştirmişlerdir.

β açısı 30° 'den büyük ise bu bağıntı geçerli değildir.

Kashef (1965) trapez kesitteki q/K oranının, genişliği B_e olan dikdörtgen ile aynı olduğunu ifade etmiştir.

$$B_e = L - \frac{1}{2} D_d \cot\beta = \frac{1}{2} (L + B) \quad (4.49)$$

olarak hesaplanır ve değerler yerine konulursa, B_e değeri

$$B_e = \frac{1}{2} L + \frac{1}{2} \sqrt{L^2 - \frac{h_u^2 \cdot \cot^2\beta}{\left(1 - \frac{2}{3} \sin^2\beta\right)}} \quad (4.50)$$

denkleminde hesaplanır. Burada:

B: sızma çizgisinin çıkış yüzeyini,

D_d : Çıkış yüzeyindeki su yüksekliğini belirtir.

Buna göre toplam sızma miktarı (Kashef, 1965);

$$q = K \frac{h_u^2 - D_d^2 \left(1 - \frac{2}{3} \sin^2\beta\right)}{2B} \quad (4.51)$$

denkleminde hesaplanabilir. D_d ve B değerleri,

$$D_d = L \cdot \tan\beta - \sqrt{L^2 \tan^2\beta - \frac{h_u^2}{1 - \frac{2}{3} \sin^2\beta}} \quad (4.52)$$

$$B = L - D_d \cot\beta = \sqrt{L^2 - \frac{h_u^2 \cot^2\beta}{1 - \frac{2}{3} \sin^2\beta}} \quad (4.53)$$

formülleriyle hesaplanır.

5. SIZMA HESABI İÇİN KULLANILAN YÖNTEMLER

5.1 Sızma Hesabı ve Kullanılan Yöntemler

Çeşitli sızma durumları için Laplace denklemini tam ya da yaklaşık olarak çözen bazı metotlar geliştirilmiştir. Sızma analizi için bir metot seçebilmek ve uygulayabilmek için, problemin aşağıda bahsedilen hususları incelenmiş olmalıdır (Ağralıoğlu,2005b).

- Sızma olması beklenen bölge ve yapının boyutları,
- Yapı ve temeli oluşturan malzemelerin geçirimsizlik katsayıları,
- Yatay ve düşey geçirimsizlik katsayıları oranı,
- Geçirimsiz tabaka sınırları,
- Potansiyelin sabit olduğu giriş ve çıkışlar,
- Karasız akım durumundaki yük-zaman bağıntısı.

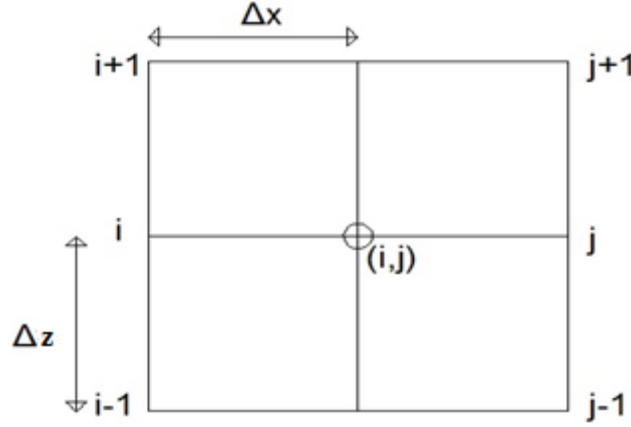
Bu çalışmada sızma ve sızma ağı hesabı için klasik sonlu farklar yöntemi kullanılmış olup, bu yöntemle beraber sonlu elemanlar yöntemi ve akım ağı yöntemi ile ilgili bilgi verilecektir.

5.2 Klasik Sonlu Farklar Metodu

Sonlu farklar yöntemi, Laplace denklemini matematiksel bir yaklaşım ile bir dizi lineer cebir ifadesine dönüştürür (Ağralıoğlu,2005b). Bu yöntem uygulama ve karmaşıklık açısından diğer yöntemlere göre çok daha kolay bir yöntemdir. Sonlu farklar çözümü için öncelikle akım alanı ya da problemin çözüm bölgesi, genellikle dikdörtgen olan bir karesel kafeslere bölünür. Bu bölümden elde edilen her düğüm bölgesi için akım denklemi geçerli olup, çözüm bu noktalar kullanılarak hesaplanır. Diğer bir deyişle, kaç tane düğüm noktası varsa o kadar denklem elde edilmiş olur. Daha doğru çözümler için denklem sayısı fazla tutulmalı ve çözüm ona göre

yapılmalıdır. Eğer düzensiz hücre bölgeleri mevcutsa o bölgeler problemin geometrisine uygun hale getirilmelidir.

Klasik sonlu farklar metodu çok katmanlı ve anizotropik koşullarda da kullanılmaktadır. Sonlu farklar için kullanılan düğüm noktaları Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Sonlu farklar yöntemindeki i,j düğüm noktaları.

Sonlu farklar yönteminde, diferansiyel denklemlerdeki ikinci mertebeye türevler yerine sonlu farklar eşdeğerleri yazılır. En genel haliyle 2 boyutlu zeminler için, baraj gövdesinden ve temelinden olan sızmaların analizinde kullanacağımız denklem;

$k_x = k_z$ olması durumunda,

$$\frac{\partial h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial h^2}{\partial z^2} = 0 \quad (5.1)$$

Burada h sızma alanının herhangi bir noktasının basınç yüksekliği olup, k_x toprağın yatay, k_z ise düşey permeabilite katsayısıdır. (5.1) denklemini sonlu farklar metodu kullanılarak;

$$\frac{k_x}{\Delta x^2} (h_{i+1,j} + h_{i-1,j} - 2h_{i,j}) + \frac{k_z}{\Delta z^2} (h_{i,j+1} + h_{i,j-1} - 2h_{i,j}) = 0 \quad (5.2)$$

i,j kesikli haline dönüştürülebilir. Burada Δx seçilen hesap ağının yatay aralığı, Δz düşey aralığıdır. Bu dönüştürülmüş denklem,

$k_x = k_z$ ve $\Delta x = \Delta z$ olması durumunda daha basit haliyle,

$$h_{i,j} = \frac{1}{4}(h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}) \quad (5.3)$$

dönüşür. Bu denklem belli sınır şartlarında çözülebilir.

5.2.1 Sınır şartları

Geçirimsiz tabakalar arasındaki sızma durumu belirtilen akım sınırları için toplam yük ve akım denklemleriyle tanımlanır.

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi geçirimsiz bir sınır için,

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad (5.4)$$

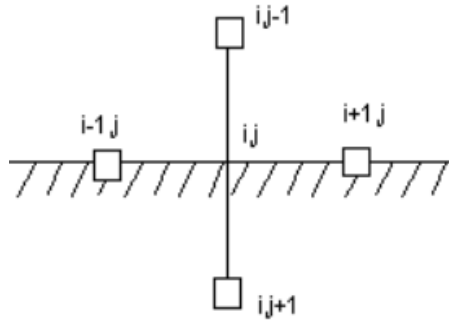
olarak belirlenir. Sızma alanının dışında fiktif bir noktanın varsayımı ile, merkezi sonlu farklar kullanılarak i,j noktasında,

$$\frac{\partial h}{\partial z} \approx h_{i,j+1} - h_{i,j-1} = 0 \quad (5.5)$$

olur. Bu durumdan dolayı bu sınırda,

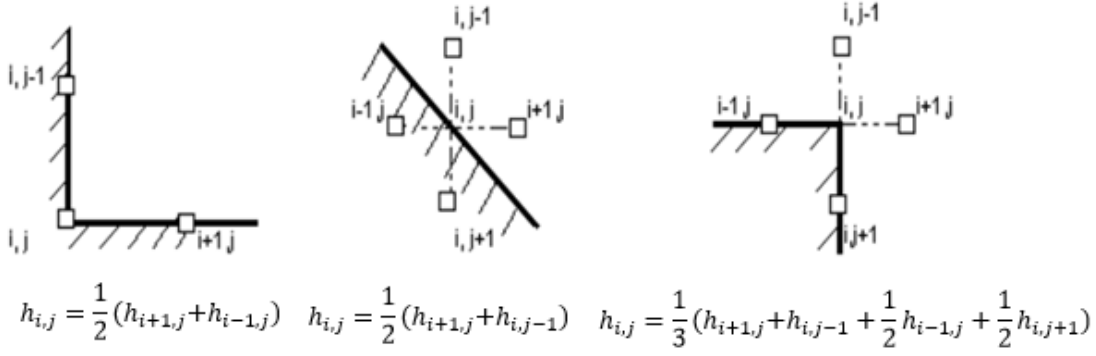
$$h_{i,j} = \frac{1}{4}(h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + 2h_{i,j-1}) \quad (5.6)$$

bağıntısı yazılabilir.



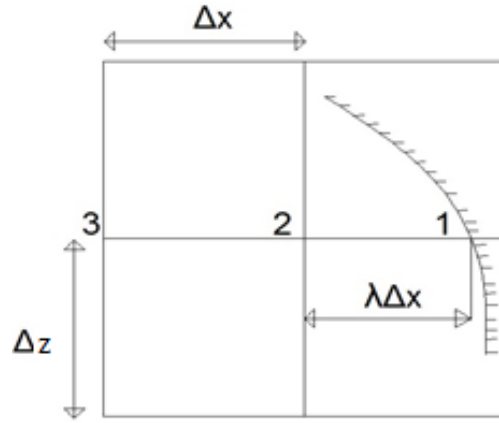
Şekil 5.2 : Geçirimsiz bölge için sınır şartları.

Faklı eğim ve durumlardaki geçirimsiz sınırlar için ise Şekil 5.2’deki hesaplamalar kullanılarak $h_{i,j}$ değerleri bulunabilir.



Şekil 5.3 : Farklı geçirimsiz durumlar için $h_{i,j}$ değerlerinin bulunması.

Eğer sınır şartları düzgün olmayan bir yapıda ise yukarıda kullanılan ifadeler bu sınır şartı için doğru olmayacaktır. Şekil 5.4’de verilen durumda 2 ve 3 numaralı değerler bilinmesine rağmen Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’deki hesaplamalar 1 noktasındaki sınır şartının bilinmesi için yeterli olmamaktadır.



Şekil 5.4 : Düzgün olmayan sınır şartları hesabı.

Taylor serisi açılımı yardımıyla 1 ve 3 noktasındaki değişkenleri kullanarak 2 noktasındaki 2. dereceden türev:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{1}{\Delta x^2} \left(\frac{2h_1}{\lambda(1+\lambda)} + \frac{2h_3}{(1+\lambda)} - \frac{2h_2}{\lambda} \right) \quad (5.7)$$

olarak bulunur (Koutitas,1983). Aynı durum x doğrultusunda olduğu gibi y doğrultusu için de geçerlidir. $\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$ ve $\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}$ bulunduktan sonra, toplam sızmaların hesaplanacağı (4.10) denklemi düzgün olmayan sınır şartlarında hesaplamalar yapılabilir.

5.2 Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu, çeşitli mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemidir. Bu yöntem kapsamında incelenecek problem, çok sayıda faklı elemanlara bölünerek denklem sistemi ağı oluşturulur. Sızma durumu için, akım bölgesi elemanlara bölünerek, her bir eleman için hidrolik iletkenlik katsayıları, sınır şartları, yük ve akım durumları belirlenir. Bu elemanlardaki akımların hesabı için, denklemler çözülür. Bu yöntem, geometrisi karmaşık şekillerin incelenmesine olanak sağlar, karmaşık malzeme özellikleri olan sistemlere uygulanabilir.

Sonlu farklar yönteminde olduğu gibi bu yöntem de 2 veya 3 boyutlu modellemeler için kullanılabilir. Sonlu Elemanlar yönteminde genel olarak öncelikle akım ağı vektörü oluşturulur. Akım ağı vektörü için gerekli olan sistem matrisleri çözüldükten sonra hidrolik iletkenlik matrisi ve sınır vektörleri tayin edilir.

5.3 Akım Ağı Metodu

Akım ağı metodu, baraj temellerinde ya da hidrolik yapılarla ilgili diğer projelerdeki gövde altından ve gövdeden sızan problemlerinde en çok kullanılanlardan ve Laplace denkleminin çözümü için en faydalı ve kabul edilebilir metotlardan biridir(Ağırlioğlu,2005b). Akım ağını oluşturan akım ve eş potansiyel çizgiler çizildikten sonra oluşan karesel ağda bu çizgilerin sayıları belirlenir. Toplam hidrolik su yükü farkı h olması durumunda n tane potansiyel çizgi için, her iki eş potansiyel çizgi arasında $\frac{h}{n}$ kadar yük kaybı oluşur. (4.2) Darcy denkleminden yararlanılarak akım ağının tek bir karesinden geçen birim genişlik debisi farkı:

$$\Delta q = k \frac{h}{n} \frac{1}{d} \quad (5.8)$$

olarak bulunur. Burada k : hidrolik iletkenlik katsayısı, d : iki eş potansiyel çizgi arasındaki uzaklıktır. Bu akım ağında toplam m tane akım çizgisi mevcutsa, birim genişlikten geçen toplam sızma miktarı:

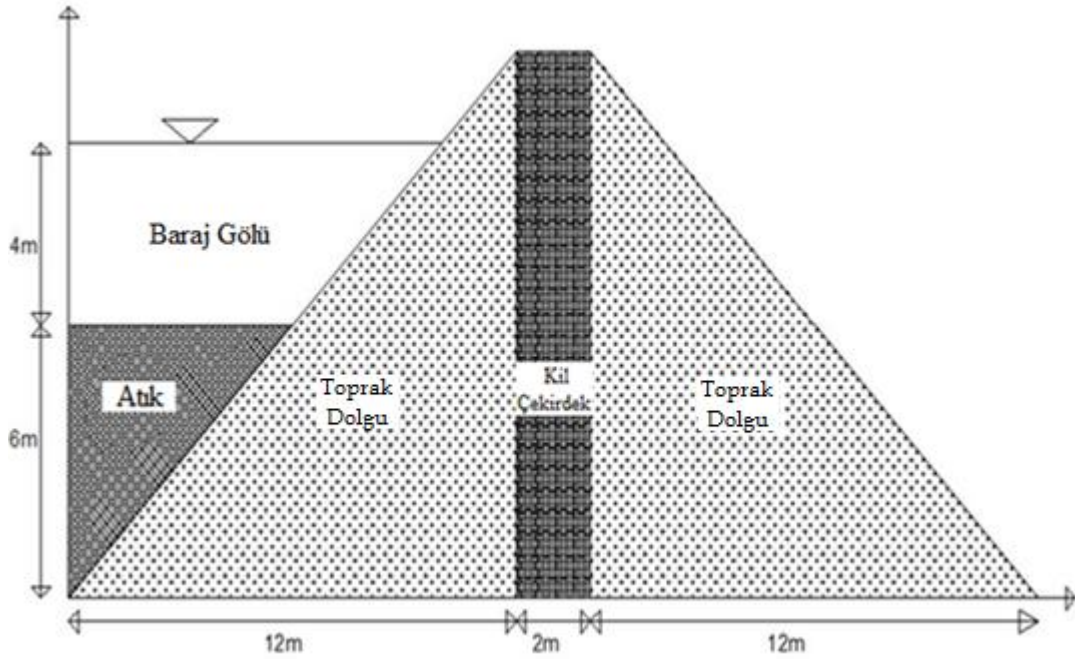
$$q = m \Delta q = m k \frac{h}{n} \quad (5.9)$$

olarak hesaplanır.

6. KLASİK SONLU FARKLAR METODU VE GEOSTUDIO SEEP/W PROGRAMI UYGULAMALARI

6.1 Klasik Sonlu Farklar Metodu Uygulaması

Sonlu farklar metodu uygulaması tablolama analizi yardımıyla Şekil 6.1’de görülen atık baraj kesiti kullanılarak yapılmıştır. Bu kesit, isotropik ve homojen koşullar altında hidrolik ve geoteknik açısından tipik bir toprak dolgu baraj tipi bir atık barajı temsil etmektedir (Chakraborty & Choudhury, 2009).

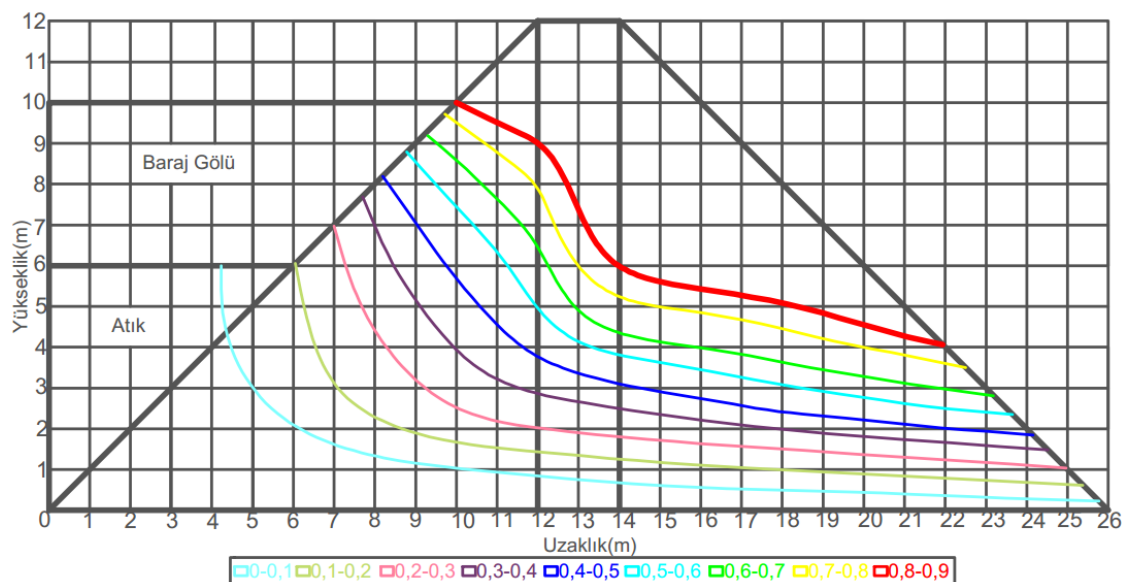


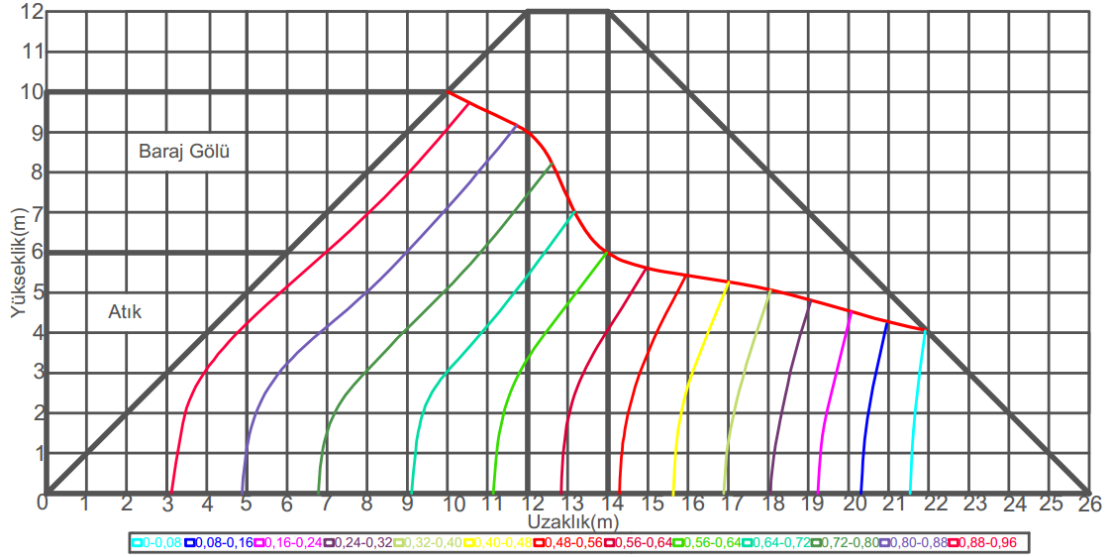
Şekil 6.1 : Toprak dolgu baraj tipi atık baraj kesiti.

Şekil 6.1’de görüldüğü gibi atık baraj depoladığı atıkla ve üzerinde çeşitli şekillerde biriken su ile beraber klasik toprak baraj görünümüne sahiptir. Ortada kil çekirdek olmak üzere aynı özelliklere sahip iki toprak dolgu kısmından oluşmuştur. Sonlu farklar metodu ile yapılacak sızma analizinde gerekli olan hidrolik iletkenlikler Tablo 6.1’ de verilmiştir.

[illegible]

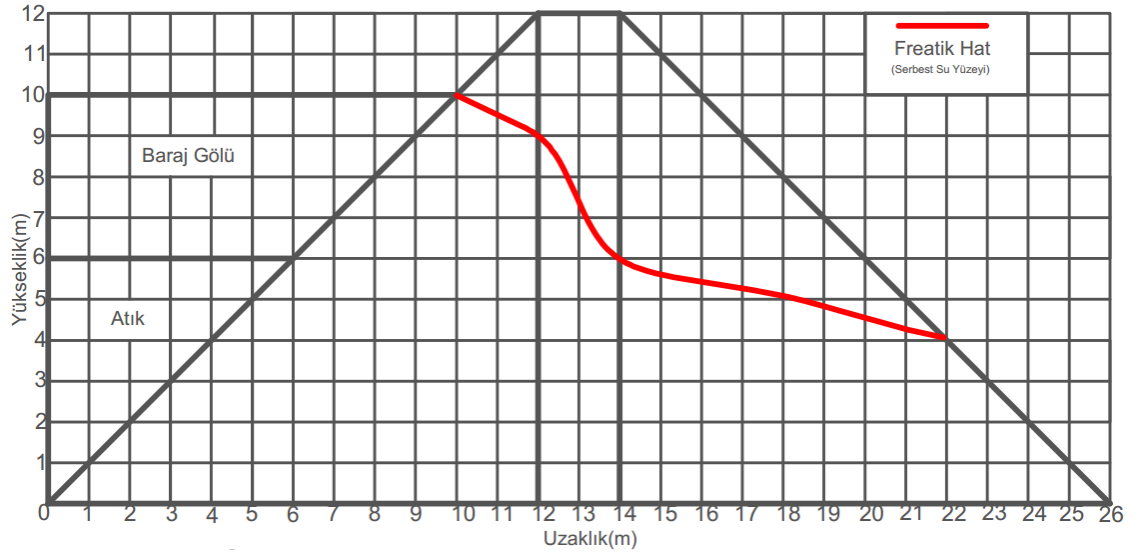
6.1.2 Akım Çizgileri, Eş Potansiyel Çizgiler ve Sızma Ağı





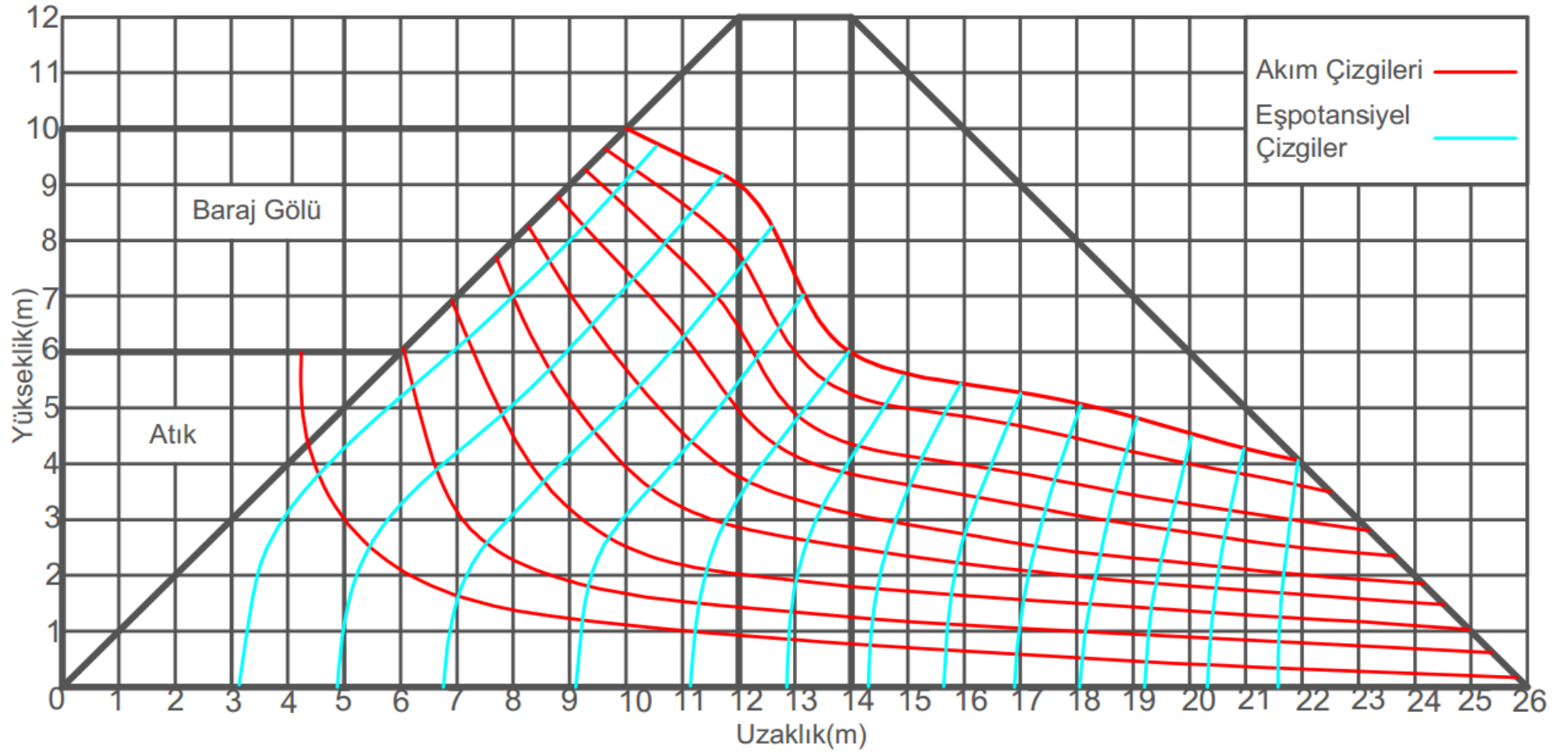
Şekil 6.7 : Eşpotansiyel Çizgileri.

Akım çizgileri ve eş potansiyel çizgiler çizildikten sonra, bu çizgilerin baraj kesiti üzerinde ortak olarak gösterilmesiyle bu baraj kesiti için gösterilen şartlarda sızma ağı elde edilir. Sızma ağı çizilirken dikkat edilecek durumlar, barajlarda sızma başlığı altında anlatılmıştı. Bu durumlar ışığında öncelikle Şekil 6.8'deki gibi freatik hat belirlenir.



Şekil 6.8 : Sonlu Farklar metoduna göre freatik hat.

Freatik hat akımın mevcut olduğu en üst seviyedir ve freatik hattın üzerinde herhangi bir akım söz konusu değildir. Son olarak Şekil 6.9'daki gibi sızma ağı çizilir. Sızma ağında kırmızı çizgiler akım çizgilerini, mavi çizgiler ise eş potansiyel çizgileri göstermektedir. En üstteki kırmızı çizgi ise freatik hattır



Şekil 6.9 : Sonlu farklar metoduna göre Sızma ağı.

6.1.3 Sızma miktarı hesabı

Sızma ağı belli olduktan sonra çok sık kullanılan ve kullanımı kolay olan grafik yöntem ile sızma miktarı hesaplanır. (5.9) denkleminin kullanımı ile kolayca bu değer bulunabilir. Bunun için kil çekirdek barajlarda kil çekirdeğin etkisi de düşünülerek büyük olan hidrolik iletkenlik katsayısı seçilmiştir. 13 tane eş potansiyel çizgi, 9 tane akım çizgisi olduğu ve 4 m'lik hidrolik su yükü ile beraber sızma debisi;

$$q = kh \frac{m}{n} = 10^{-6} \times 4 \times \frac{9}{13} = 2,76 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sm}$$

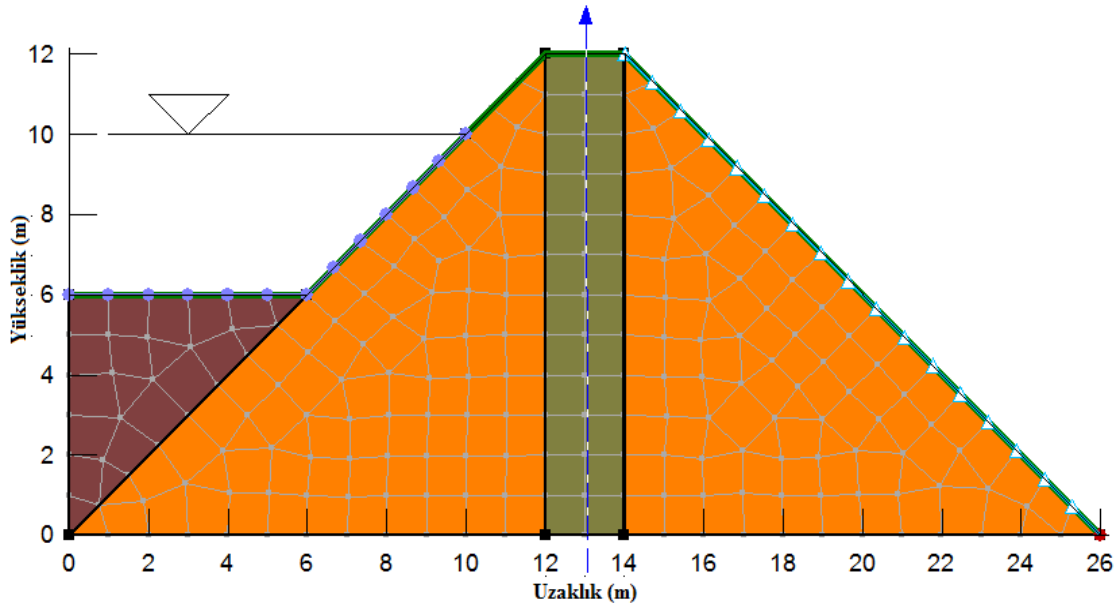
olarak bulunur.

Sonuç olarak, sonlu farklar tabanlı tablolama analizi yardımıyla $\Delta x = \Delta z = 1 \text{ m}$ ağ aralıkları olacak şekilde yapılan çalışmada sızma miktarı $2,76 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sm}$ olarak hesaplanmıştır.

6.2 GeoStudio SEEP/W Uygulaması

GeoStudio SEEP/W programı, sonlu elemanlar yöntemini temel alarak çalışan bir bilgisayar programıdır. Geleneksel barajlarda sızma problemine karşı bu yazılım çok sık kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise gelenekselin aksine atık barajlarda sızma miktarı araştırılacaktır. Bu çalışmada, atık baraj sızma çalışması açısından bir yenilik getireceği kadar, dolaylı olarak bize sonlu farklar ile sonlu elemanlar metotlarını karşılaştırma imkânı verecektir.

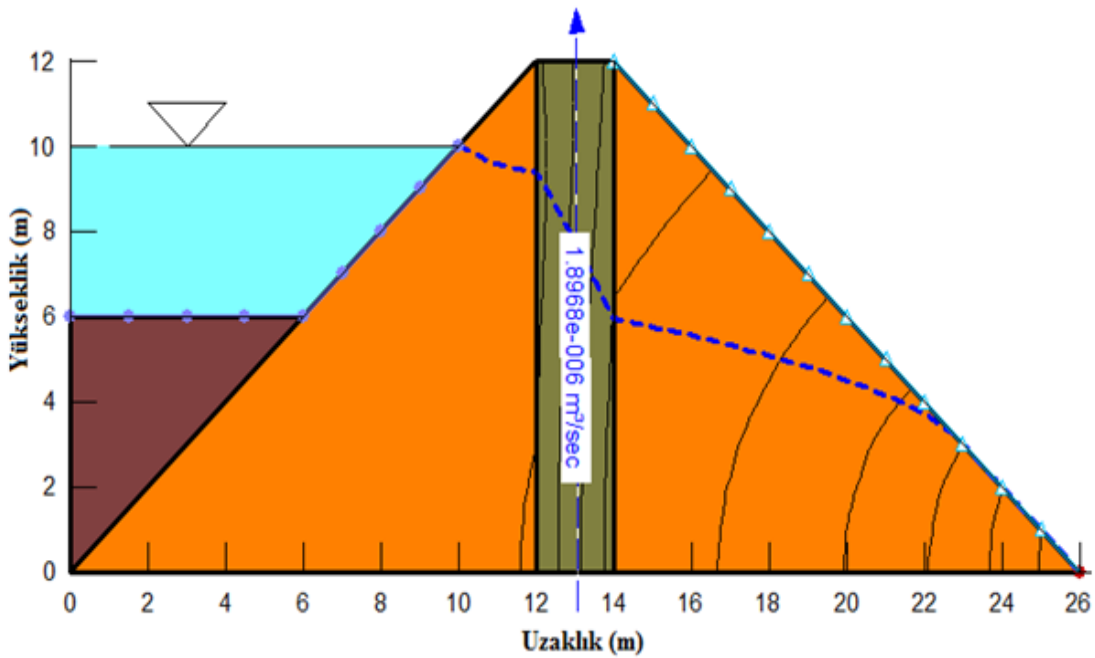
Öncelikle, atık baraj kesiti çizildikten sonra, her bir bölüm için ayrı ayrı malzeme özellikleri programa eklendi. Daha sonra uygun olan bölümler için sınır şartları sisteme girildi. Mansap sevi boyunca (potansiyel sızma yüzeyi), memba şevinin atık su ile temas bölgesinde (hidrolik yük) ve atık malzemenin üst kısmında (hidrolik yük) doğru olarak, mansabın çıkış noktasında (sıfır basınç) ise noktasal olarak sınır şartları belirlendi. Son olarak ise kesit üzerinde ağ aralıkları $\Delta x = \Delta z = 1 \text{ m}$ olarak seçildi. Şekil 6.10'da kesit üzerinde sınır şartları ve ağ sistemi görülmektedir.



Şekil 6.10 : GeoStudio için sınır şartları ve ağ aralıkları.

Sisteme gerekli olan datalar girildikten sonra sistem çalıştırılırsa Şekil 6.11'deki gibi program çıktısı elde edilir. Mavi kesikli çizgi freatik hat olup, sistemden geçen toplam sızma miktarı,

$q = 1,89 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sm}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.11 : GeoStudio programına göre freatik hat ve toplam sızma miktarı.

6.3 Sonlu Farklar Metodu ve GeoStudio SEEP/W Karşılaştırılması

Sonlu farklar metodu ile elde edilen freatik hat ile sonlu elamanlar tabanlı GeoStudio ile elde edilen freatik hat, büyük benzerlikler taşımaktadır. Sonlu farklar için oluşturulan tablolama analizinde kullanılan freatik hat sınır koşulları için GeoStudio programının baz alınarak oluşturulmuş olması, bu benzerliği beklenen bir durum haline getirmektedir. Bu durum, freatik hattı hesaplamak için anlatılan diğer yöntemlerin kil çekirdekli bir barajda, bu hattın bir bütün olarak hesaplanmasında kullanışlı olmamasından kaynaklanmaktadır. Aynı şekilde, sızma miktarının kabul edilebilir düzeyde birbirine yakın çıkması, sonlu farklar yöntemine ek olarak kolay ve uygulaması basit sızma miktarı hesaplama yöntemi olan grafik metodun (akım ağı metodu) kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada sızma ağı ve sızma miktarı için herhangi bir bilgisayar kodu kullanmadan ya da karmaşık matematik modeller çözmeden, klasik sonlu farklar için tablolama analizi ve GeoStudio SEEP/W programı kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bulunan sonuçlar, uygulama açısından gelişime açık olmasının yanında sızma durumu açısından tatmin edici olmuştur. Sonuçlar Çizelge 6.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2 : GeoStudio SEEP/W ve sonlu farklar metodu sonuçlarının karşılaştırılması.

	Toplam sızma değerleri, q (m³/sm)	Freatik hat	Kil çekirdek etkisi
GeoStudio SEEP/W	1.89x10 ⁻⁶	İki modelden elde edilen freatik hatlar birbirine benzer.	İki modelde de kil çekirdeğin etkisi gözlenmiş olup, akım çizgileri düşüşleri birbirine çok yakındır.
Sonlu Farklar Metodu	2,76x10 ⁻⁶		

7. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Sızma, herhangi bir baraj türü için önemli bir baraj stabilite kriteridir. Baraj güvenliği açısından sızma durumunu incelemek, sızma miktarını belli değerler içinde tutmak ve baraj içerisinde erozyona ya da borulanmaya mahal vermemek önemlidir. Projelendirme safhasında dikkat edilmesi gereken sızma koşulları, yeterince önemsenmeyerek yapılacak olan hatalarla telafisi mümkün olmayan durumların ortaya çıkmasına, ekonomik ve sosyal açıdan büyük bir zarar oluşmasına neden olur. Bu tür istenmeyen durumlar düşünüldüğünde, su barajlarında ortaya çıkabilecek sıkıntılar bilinirken, Atık barajlar ile ilgili oluşabilecek sıkıntıların sınırı tam olarak bilinmemektedir. Bu koşullar altında atık barajlar ile ilgili sızma konusu daha da önem kazanmaktadır. Atık barajlar ile ilgili sızma konusunda farkındalık oluşturması, yapılan çalışmanın önemine işaret etmektedir.

Yapılan tez çalışmasında, atık barajlar için sızmanın önemi konusundaki problemler üzerinde durulmuştur. Kil çekirdekli ve toprak dolgu baraj tipi seçilen atık barajın, klasik sonlu farklar yöntemi kullanılarak sızma ağı oluşturulmuştur. Klasik sonlu farklar yöntemi için, herhangi bir bilgisayar programı ya da kodla işlem yapılmamıştır. Kolay ve anlaşılır bir biçimde gerekli sınır şartları girildikten sonra tablolama analizi yapılarak farklı iterasyon değerlerine göre baraj kesiti için akım çizgileri ve eşpotansiyel çizgiler elde edilmiştir. Elde edilen bu çizgiler iterasyonlar sonucu oluşan sonlu farklar değerlerine göre oluşturulmuştur. Daha sonra, istenen sızma ağı çizilmiş ve freatik hat belirlenmiştir. Sızma ağını kullanarak kesitten geçen sızma miktarı bulunmuştur. Bulunan bu değerler, GeoStudio SEEP/W programı değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, programın sonlu elemanlar tabanlı bir bilgisayar programı olması açısından önem arz etmektedir. Sonlu farklardan bulunan freatik hat ve sızma miktarı dolaylı olarak sızma ağı GeoStudio'dan bulduğumuz değerler ile kıyaslanmıştır. Freatik hat açısından, iki modelde de bulunan şekillerin birbirine çok benzer çıkması istenen bir durumdur. Sızma miktarı ise iki model değerleri birbirine yakındır. Oluşan farkın, Tablolama analizi sırasında

hücreler arası keskin geçişten ve sonlu farklar ile GeoStudio programının ağ yapılarının geometri farkından olduğu düşünülmektedir.

Klasik sonlu farklar yöntemi kullanarak, bilimsel açıdan daha uygulanabilir ve kolay bir şekilde özgün olarak, atık barajda sızma ağı oluşturulmasının iki açıdan önemi büyüktür. Birinci olarak, normal toprak barajlardan farklı oluşan sızma ağında, barajın depoladığı atık kısmından da sızmaların olduğu gözlenmiştir. Atık barajı'nın atık depolanan kısmının bir süre sonra barajın gövdesi gibi davranacağı sonucuna ulaşılabilir. İkinci olarak ise çok karmaşık matematik modeller kurmadan ya da bilgisayar kodları yazmadan sızma ağı başarılı bir şekilde çizilmiştir. Tablolama analizi ile oluşturulan akım çizgileri ve eşpotansiyel çizgileri şekilleri üzerinde oluşan birtakım farklı çizgiler, hücresel keskin geçişlerden dolayı meydana gelmişlerdir. Bu durum, akım çizgileri ve eşpotansiyel çizgileri oluşum sürecini etkilememiş, sadece modelin hücre bazlı çalışıyor olmasından kaynaklanmaktadır.

GeoStudio SEEP/W programı ise freatik hat ve sızma miktarı açısından başarılı olup, kil çekirdekli bir baraj için sızma ağının oluşturulmasında birtakım zorluklar barındırmaktadır. Bu durum, sonraki tez ya da bilimsel çalışmalar için bir motivasyon kaynağı olabilir. Aynı şekilde, daha sonraki çalışmalar için, gerçek zamanlı ölçülmüş atık baraj sızma değerleri kullanarak modeller arasındaki ilişki ve modellerin gerçek sızma değerlerine olan yakınlığı incelenebilir.

Uygulamada geleneksel barajlar yerine, dünyada yaygın olsa da ülkemizde proje ve uygulama açısından çok yetersiz olan atık barajların seçilmesi hem bu alandaki gelişmeleri hızlandıracak ve yapılacak olan çalışmalara ışık tutmaya yardımcı olacaktır. Bu çalışmada ise atık barajın sızma açısından, diğer toprak dolgu barajlardan farklı olarak barajın atık olan kısmında eğer sızmak için yeterli miktarda hidrolik iletkenliği varsa buradan da sızma olacağı ve buranın barajın bir parçası gibi davranacağı durumu görülmüştür. Akım çizgilerinin bu bölgeden de çıkıyor olması bu durumu doğrulamaktadır. Akım çizgilerinin sayısı atık malzemelerin özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Ağralıoğlu, N.** (2011). "Baraj Planlama ve Tasarımı (Cilt 2)." İstanbul, Beta
- Ağralıoğlu, N., and Erkek, C.** (2013). "Su Kaynakları Mühendisliği." İstanbul, Beta.
- Azam, S., Li, Q.** (2010). "Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years" *WasteGeotechnics*, p. 50-53.
- Bjelkevik, A.** (2005a). "Water Cover Closure Design for Tailings Dam." State of the Art Report. Research Report.
- Bjelkevik, A.** (2005b). "Stability of Tailings Dam-Focus on Water Closure.", *Yüksek Lisans Tez*, Lulea University of Technology.
- Casagrande, A.** (1937). "Seepage through Earth Dams, in Contribution to Soil.
- Cedergren, H.R.** (1992). "Seepage, Drainage and Flow Nets." Wiley, New York.
- Chakraborty, D., and Choudhury, D.** (2009). "Investigation of the Behavior of Tailings Earthen Dam under Seismic Conditions." *American J. of Engineering and Applied Sciences*, p. 559-564.
- Cowherd, D.C., Miller, K.C., and Perlea, V.G.** (1993). "Seepage through Mine Tailings Dams." Third Int. Con. on Case Histories in Geotechnical Eng. Paper No: 2.3.
- Çilingir, H.** (2007). "Toprak Dolgu Baraj Gövdelerindeki Sızmaların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi.", *Yüksek Lisans Tez*, İTÜ.
- Dupuit, J.** (1863). Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméable, Dunod, Paris.
- Fakhari, A. and Ghanbari, A.** (2013). "A Simple Method for Calculating the Seepage from Earth Dams with Clay Core." *Journal of GeoEngineering*, 8, 27-32.
- Frey, P., and Buhan, M.** (2008) "The Finite Difference Method." Lecture Note.
- Giglou, A.N., Zeraatparvar, A.** (2012). "Seepage Estimation through Earth Dams" *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2(8), 7861-7865.
- Green P.V.** (1980), "The Need for Long Term Lagoons-A Literature Survey", Warren Springs laboratory, Dept. Industry Report LR 326(MP), 45p.
- Hasani, H., Mamizadeh, J. and Karimi, H.** (2013). "Stability of Slope and Seepage Analysis in Earth Fill Dam Using Numerical Models." *World App. Sc. J.*, 21(9), 1398-1402.
- Hoffman, J.D.** (2001). "Numerical Methods for Engineers and Scientist." McGraw-Hill. New York.

- Hongda, X.** (2001). "Statistical Analysis of the Accident to Chinese Tailings Dam." *Industrial Construction*, 31(1), 69-71.
- ICOLD** (1982). "Manual on Tailings Dams and Dumps", Bulletin - International Commission on Large Dams No. 45, Paris, 13-215.
- ICOLD** (1989). "Tailing Dam Safety-Guidelines", Bulletin-International Commission on Large Dams No. 74, Paris, 11-49.
- ICOLD** (1996c). "A guide to Tailings Dams and impoundments – Design, construction, use and rehabilitation." Bulletin - International Commission on Large Dams together with UNEP, United Nations Environmental Program. Imprimerie Louisjean 05003 Gap, France. ISBN 92-807-1590-7, ISSN 0534-8293.
- ICOLD** (2001). "Tailings Dams - Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences", Bulletin 121.
- Jantzer, I., and Knutsson, S.** (2007). "Seepage and Critical Hydraulic Gradients in Tailings Dam and Natural Formations." *Proceedings of the 2nd International Conference on Porous Media and its Applications in Science and Engineering*.
- Kashef, A. I.** (1965). *Seepage through Earth Dams*, J. Geophys. Res.
- Kermani, E. F. and Barani, G. A.** (2012). "Seepage Analysis through Earth Dam Based on Finite Difference Method" *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2(11), 11621-11625.
- Klohn, E. J.** (1979). "Seepage Control for Tailings Dams". *Proceedings of the First International Mine Drainage Symposium*, p. 671-725.
- Koutitas, C. G.** (1983). "Elements of Computational Hydraulics." Chapman and Hall, New York.
- LeFrançois, A.M.** (2010). "Stability and Seepage Analysis of the Bralorne Gold Mines Tailings Dam Following a Change in Usage from Tailings Dam to Water Retention Dam.", *Yüksek Lisans Tezi*, the University of British Columbia.
- Mesci, S.B.** (2006). "Dolgu Baraj Gövdelerindeki Sızmaların ve Freatik Hattın İncelenmesi: Seferihisar Barajı Uygulaması", *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ.
- Mechanics** 1925-1940, Boston Society of Civil Engineers, Boston, 295.
- Pavlovsky, N. N.** (1922). *The theory of movement of ground water under hydraulic structures and its main applications*, Pertograd, U.S.S.R.
- Polubarinova-Kochina, P. Y.** (1962). *Theory of Groundwater Movement*, Princeton University Press, Princeton.
- Schafferank, F.** (1917). "Über die Standicherheit durchlässiger geschütteter Damme, *Allge Eauzeitung*."
- Stello, W.** (1987). "Seepage chart for homogeneous and zoned embankment." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 113(9), 996-1012.
- Terzaghi, K., Peck, R. B.** (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Wiley, New York.

Vick, S.G. (1990).” Planning, Design, and Analysis of Tailings Dam.” Wiley, NY

Welch, J.P. (1993). “Water Flow through Tailings Dam.”, *Doktora Tez*, Durham University.

Zhenzhong, S., Ming, M., Liquan, X., and Lei, G. (2009). “Safety Analysis of Seepage Control on the Tailing Dam of Ekou Iron Mine.”IEEE Conference, p.1-6

EKLER

EK- A1: 30 iterasyon için sonlu farklar değerleri (Akım çizgileri)

EK- A2: 30 iterasyon için sonlu farklar değerleri (Eşpotansiyel çizgiler)

EK-B1: 40 iterasyon için sonlu farklar değerleri (Akım çizgileri)

EK- B2: 40 iterasyon için sonlu farklar değerleri (Eşpotansiyel çizgiler)

EK- C1: 50 iterasyon için sonlu farklar değerleri (Akım çizgileri)

EK- C2: 50 iterasyon için sonlu farklar değerleri (Eşpotansiyel çizgiler)

EK- D1: 100 iterasyon için sonlu farklar değerleri (Akım çizgileri)

EK- D2: 100 iterasyon için sonlu farklar değerleri (Eşpotansiyel çizgiler)

EK-E1: 1000 iterasyon için sonlu farklar değerleri (Akım çizgileri)

EK-E2: 1000 iterasyon için sonlu farklar değerleri (Eşpotansiyel çizgiler)

EK- F1: 10000 iterasyon için sonlu farklar değerleri (Akım çizgileri)

EK- F2: 10000 iterasyon için sonlu farklar değerleri (Eşpotansiyel çizgiler)

EK-A1:

[illegible]

FK-A2:

[illegible]

[illegible][illegible]

[illegible][illegible]

[illegible][illegible]

[illegible][illegible]

[illegible][illegible]

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Erdal Kesgin

Doğum Yeri ve Tarihi: Bartın, 04.06.1989

Adres: Topçular Mah. Şehit Kubilay Sok. No:5 D/7 Eyüp/İstanbul

E-Posta: kesginerdal@gmail.com

Lisans: İTÜ-İnşaat Mühendisliği

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Kesgin, E., & Ağırlioğlu, N. (2014). 'Numerical Investigation of Seepage Flow Net in Tailings Earthen Dam'. International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians 2014, Hydraulic and Hydrological Engineering. ICESA 2014 (International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians 2014).