

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TOPRAK DOLGU BARAJLARIN GÖVDELERİNDEKİ SIZMALARIN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ: BÜYÜKÇEKMECE
BARAJI UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Hamdi ÇİLİNGİR**

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği**

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Necati AĞIRALIOĞLU

HAZİRAN 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TOPRAK DOLGU BARAJLARIN GÖVDELERİNDEKİ
SIZMALARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
İNCELENMESİ: BÜYÜKÇEKMECE BARAJI UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Hamdi ÇİLİNGİR
(501041508)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Haziran 2007**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Necati AĞIRALIÖĞLU

Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. M. Emin SAVCI

Prof. Dr. Orhan ŞEN

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum çalışmalar esnasında bana göstermiş olduğu yardımlardan dolayı Sayın Prof. Dr. Necati Ağırlioğlu'na, Büyükçekmece barajı verilerine ulaşmamda yardımcı olan XI. Bölge Müdürlüğünde Proje İnşaat Şube Müdürü olarak görev yapan Sayın Hayri Çilingir'e, İstanbul DSİ XIV. Bölge Müdürlüğü Etüt ve Plan Şube Müdürlüğü'ne yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürler ederim.

MAYIS, 2007

Hamdi ÇİLİNGİR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
KISALTMALAR.....	v
TABLO LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
SEMBOL LİSTESİ.....	ix
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1-GİRİŞ	1
1.1 Konu	2
1.2 Kapsam.....	3
1.3 Yöntem	3
2. KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	5
3. BARAJ GÖVDESİNDEN SIZMA	7
3.1 Sızma Denklemleri.....	7
3.1.1 Darcy :	7
3.1.2 Laplace Denlemi:	8
3.2 Sızıntı Ağının Çizilmesi	10
3.2.1 Akım Ağlarının Özellikleri.....	10
3.2.2 Zeminlerde Permeabilite	11
3.3 Anizotropik Zeminlerde Akım Ağının Çizimi	12
3.4 Sızma Yüzeyi Ve Sızma Çizgisi	14
3.4.1 Freatik Hat	16
3.4.2 Freatik Hat Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler	16
4-FREATİK HAT HESAPLAMA YÖNTEMLERİ	20
4.1 Dupuit Denklemi.....	20
4.2 Schaffernak ve Van Iterson Denklemi	21
4.3 L. Casagrande Denklemi	21
4.4 Kashef Denklemi	23
4.5 Pavlovsky denklemi	25
4.6 Elektrik Benzeşim Modeli	27
4.7 Grafik Metot	28
5. SIZMA HESAPLAMA YÖNTEMLERİ	30
5.1 Sonlu Elemanlar Metodu	30
5.1.1 Sonlu elemanlar akım vektörü	30
5.1.2 Zamana Bağlı İntegral	32
5.1.3 Nümerik İntegrasyon.....	32
5.1.4 Hidrolik Geçirgenlik Matrisi	33
5.1.5 Akımın Sınır Vektörü.....	34
5.2 Sonlu Farklar Metodu	37
5.3 Sınır Şartları.....	39
5.4 Akım Ağı Yöntemi	40
6. UYGULAMA İÇİN SEÇİLEN BÜYÜKÇEKMECE BARAJININ VERİLERİ	42
6.1 Barajın Kesiti.....	42
6.2 Barajın Karakteristik Özellikleri.....	43
7. BÜYÜKÇEKMECE BARAJINDA SIZMA HESABI UYGULAMALARI	45
7.1 Freatik Hatın Belirli Yöntemlerle Çözümü Ve Karşılaştırılması	45

7.1.1 Kozeny Yöntemine Göre Freatik Hat	45
7.1.2 Dupuit Teoremi Göre Freatik Hat.....	47
7.1.3 Kashef Yaklaşımına Göre Freatik Hat	49
7.1.4 Su Çıkış Yükseklikleri	52
8. SIZAN AKIM HESABI VE UYGULAMALAR.....	55
8.1 Kozeny`e Göre Birim Genişlik Debisi.....	55
8.2 Dupuit Yaklaşımına Göre Birim Genişlik Debisi.....	55
8.3 Kashef Yöntemine Göre Birim Genişlik Debisi.....	55
8.4 Sonlu Elemanlar Yöntemine Göre Birim Genişlik Debisi	55
9. HESAPLARIN ÖLÇÜM VERİLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI	56
9.1 Dsi Gözlem Verilerine Göre Su Yüküne İle Sızmanın Değişimi	56
10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR.....	61
EKLER.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	71

KISALTMALAR

EP	: Extend Pressure
DSİ	: Devlet Su İşleri
DAMOC	: Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı öncülüğünde konsorsiyum

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1	Zeminlerin permeabilite katsayıları (cm/s)	12
Tablo 3.2	Birim genişlik debisinin çeşitli metotlara göre hesap formül tablosu	18
Tablo 3.3	α açısına göre $\frac{\Delta a}{a + \Delta a}$ belirlenmesi	19
Tablo 4.1	Darcy Kanunu ve Ohm Kanunu arasındaki benzeşim	27
Tablo 6.1	Büyükçekmece barajına ait değerler	44
Tablo 7.2	Sızan suyun mansap şevinden çıkış yüksekliği	52
Tablo 9.1	1992 yılına ait DSİ yapmış olduğu aylık gözlemlerin ortalaması	57

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1: Darcy kanuna göre hazneye giren ve çıkan debi	7
Şekil 3.2: Doymuş geçirimli zemin de x ve z yönlerindeki akım hızı bileşenleri	8
Şekil 3.3: Toprak barajda gövde içerisinde oluşan akım ağı	11
Şekil 3.4: Anizotropik zeminlerde akım ağları	13
Şekil 3.5: Zonlu bir gövdede farklı geçirimlilik dolayısı	13
Şekil 3.6: Sızma çizgisinin farklı giriş ve çıkış şartlarına göre durumu	14
Şekil 3.7: Homojen barajda Drenaj blanketi ile serbest su yüzü çizgisi değişimi	15
Şekil 3.8: Homojen barajlarda yatay ve düşey drenlerin olması halinde serbest yüzey	15
Şekil 3.9: Geçirimsiz çekirdeğin içerisinde yer alan akım	17
Şekil 4.1: Dupuit yöntemine göre freatik hat	20
Şekil 4.2: Van Iterson yöntemine göre freatik hat	21
Şekil 4.3: L. Casagrande yöntemine göre freatik hat	22
Şekil 4.4: Casagrande yöntemine göre freatik hat	23
Şekil 4.5: Kasef yöntemine göre freatik hat	23
Şekil 4.6: Pavlosvsky Casagrande yöntemine göre freatik hat	25
Şekil 4.7: Baraj en kesitinde analitik formülleri için mesafeler	28
Şekil 4.8: Grafiksel olarak çözülmüş baraj en kesiti	29
Şekil 5.1: Hidrolik geçirgenlik matrisi parametreleri	33
Şekil 5.2: Elementin birim kalınlığı	35
Şekil 5.3: Asimetik elementin birim radyan kalınlığı	36
Şekil 5.4: Sonlu farklar metodundaki i,j düğüm noktaları	37
Şekil 5.5 : Geçirimsiz bölgenin sınır şartları	39
Şekil 5.6: Köşelerin 45° eğimli ve geçirimsiz sınırlarda $h_{i,j}$ değerlerinin bulunması.	40
Şekil 5.7: Akım ağı modeli	41
Şekil 6.1: Büyükçekmece barajının kesiti	42
Şekil 7.1: Kozeny parabolü yardımıyla freatik hat	46
Şekil 7.2: Dupuit yöntemine göre freatik hat	48
Şekil 7.3: Kasef yöntemine göre freatik hat	50
Şekil 7.4: Kozeny, Dupuit ve Kasef yaklaşımlarına göre freatik hattın karşılaştırılması	51
Şekil 7.5: Akımın baraj gövdesi ve temelindeki hareketi (akım çizgileri)	53
Şekil 7.6: Eş potansiyel akım çizgilerinin belirlenmesi	54
Şekil 9.1: Büyükçekmece Barajı'nda çeşitli rezervuar su seviyelerinde ölçülen kaçak su debileri	58

Şekil A.1:	Toplam su yükü dağılımı, eş potansiyel çizgileri ve akımın izlediği yol(akım çizgileri)	64
Şekil A.2	Su yükü etkisiyle oluşan basınç dağılımı	65
Şekil A.3:	X yönünde oluşan akımın hızı ve dağılımı	66
Şekil A.4:	Eşpotansiyel çizgileri, akım çizgileri, freatik hat, birim genişlik debisi	67
Şekil A.5:	Akımın izlediği yol	68
Şekil B.1:	Haznedeki su yükü sonucu basıncın mesafe ile değişimi (Şekil A.5’ deki 1-22 noktaları arasında)	69
Şekil B.2:	Su hacminin mesafe ile değişimi (Şekil A.5’ deki 1-22 noktaları arasında).....	69
Şekil B.3:	X yönündeki geçirimsizliğin mesafe ile değişimi(Şekil A.5’ deki 1-22 noktaları arasında).....	70
Şekil B.4:	X yönündeki hızın mesafe ile değişimi(Şekil A.5’ deki 1-22 noktaları arasında)	70

SEMBOL LİSTESİ

V	: Akım hızı
K	: Permeabilite katsayısı
I	: Hidrolik eğimi
Q	: Debi
Q_e, q_1	: Akifere giren ve çıkan debi
Q	: Birim genişlik debisi
V_x, v_z	: Yatay ve düşey yönde akımın hızı
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
H	: Piyozometrik yükseklik
Co, zo	: Freatik hattın mansap şevini kestiği nokta
D	: Parabolün su yüzeyini kestiği noktanın apsisi
Dx	:
H_u, h	: Haznedeki su derinliği,
α	: Mansap şevinin yatayla yaptığı açı,
A	: Sızma hattının mansap şevini kestiği noktanın merkeze uzaklığı,
Δa	: Freatik hattın ile parabolün mansap şevini kestiği nokta arasındaki mesafe
L	: Kayma yüzeyi uzunluğu
S	: Serbest su yüzeyi uzunluğu
K'	: İletkenlik Katsayısı,
A'	: Enkesit Alanı
I	: Akım
L	: Sızma yolu uzunluğu
A	: Enkesit alanı
L'	: Akım yolu uzunluğu
T	: Zaman değişimi
H_1	: Zamanın sonundaki yükseklik
H_0	: Başlangıç yüksekliği
Q_1	: Çıkış noktası debisi
Q_0	: Başlangıç noktasında debi
$[K]$	: Elementin karakteristik matrisi
$[M]$	: Küme matrisi
$\{Q\}$	: Uygulanan elementin akım vektörü
J	: İntegrasyonu alınacak nokta
N	: İntegrasyon sayısı
$[C_j]$	: İstenen noktadaki permeabilite matrisi
$[B_j]$	: İntegrasyonu yapılan noktadaki element matrisi
$\det J_j$	: Jacobian determinant matrisi
$W_{1j}W_{2j}$	: Ağırlık faktörleri

T	: Element kalınlığı
A	: Plandaki alan
Nf	: Akım kanalı sayısı
Nd	: Eş potansiyel sayısı
L	: Dilim kayma yüzeyi uzunluğu
Γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı
Ψ	: Akım potansiyeli
T	: Kayma gerilmesi
B	: Memba şevinin yatayla yaptığı açı
E	: Freatik hattın masap şevinden çıkış yüksekliği

ÖZET

Sızma barajın memba kısmından mansap kısmına doğru suyun devamlı hareketidir. Zemindeki iç erozyon veya toprak barajların içerisindeki sızıntılar borulanma olarak bilinmektedir. Bütün barajlarda haznede tutulan su gövde içerisinde veya temelden dirençle karşılaşsa dahi kendine bir yol bularak sızıntı oluşmasına neden olur. Bu sızma, hesaplanan emniyet değeri ölçüsüne kadar müdahale gerektirmez ancak bu değerin üzerinde ise belirli önlemler alınmalıdır.

Sızıntı kontrolü, sızıntı miktarına ,oluştğu bölgeye ve içeriğine göre değişir. Baraj inşaatından sonra oluşacak sızıntı miktarını azaltmak çok zor ve maliyetli bir işlem gerektirir. Bu nedenle barajın yapılacağı bölgelerde gerekli jeolojik araştırmalar yapılarak sızmaların yerleri ve büyüklükleri bulunur. Projelendirme safhasındaki analizler sayesinde emniyet ve ekonomi açısından optimum çözümler sağlanır.

Bu çalışmada matematiksel model olarak seçilen Büyükçekmece barajının gövdesinde oluşan sızmaların Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Geo-Studio bilgisayar programından yararlanmak suretiyle sızma analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar DSI'nin yapmış olduğu sızma gözlemleri verileri ile karşılaştırılmıştır. Uygulamada öncelikle çeşitli metotlarla serbest su yüzeyi çizgisi çizilip, sızıntının barajın mansap şevinden çıkış noktası ve birim genişlik debisi belirlenerek toplam sızma debisi değerine ulaşılmıştır. Yapılan uyulama sonucunda teorik hesaplar ve gözlemler doğrultusunda elde edilen verilerin tutarlılığı ile baraj içerisindeki sızmaların tehlikeli boyutta olup olmadığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Sızma, sonlu elemanlar yöntemi, su yüzü çizgisi, debi, freatik hat

ABSTRACT

Seepage is the natural and continuous way of water from upstream of dam towards to downstream of dam. “Seepage” is identified as the erosion surface or the leakage in the dam foundation. In all dams, water can find a way for create a leakage towards all effect either in the foundation or through earth fill dam. To a specified secure amount of leakage is normal, after this amount there must be interfered.

Leakage control is depend on the amount, place and content of leakage. After establishing of dam it takes much more cost to decrease the amount of leakage. Because of this, the area which plans to establish the dam, should be researched via geological experts for identify the potential leakage places and amounts. In the Project phase, by the help of analyst the solutions for security level and economical level can be optimised.

In this study, the leakage analyse of the sellected dam of Büyükçekmece for mathematical model is done by using Finite Element methods and Geo-Studio software program. The results of this model is compared with the observing data of DSI.

First of all, Büyükçekmece Dam was chosen for applications and the free surface line of the seepage flow was estimated outflow points and quantity of seepage using different methods such as Kozeny, Dupuit, Kashef. The results of methods were compared with each other. End of the application, making a decision for the quantity of seepage is going to be damage to dam stability based on these results and observing data of DSI.

Keywords: Seepage, finite element methods, dam, phreatic line, quantity of seepage

1-GİRİŞ

Sızma barajın memba kısmından mansap kısmına doğru suyun devamlı hareketidir. Zemindeki iç erozyon veya toprak setlerin içerisindeki sızıntılar borulanma olarak bilinmektedir. Genel olarak iç erozyon gövdenin mansap topuğundan rezervuara doğru devam eder. Baraj altındaki borulanma veya oluşan su kanalları barajın yıkılmasına neden olabilir. Baraj yıkılmaları genellikle borulanma sonucu oluşan boşlukların çökmesi veya baraj üzerinden suyun aşması ile oluşur. Meydana gelen borulanma, permeabilite' nin çok yüksek olduğu bölgelerde oluşarak baraj inşaatının bitmesinden yıllar sonra anlaşılabilir.

Baraj temelini ve gövdesinin dayanıklılığı zeminin plastisitesine, malzemenin değişkenliği ile zeminin sıkışma derecesine bağlıdır. Plastik killerin plastisite index <15 olanlar için iyi sıkışma yapılması durumunda borulanmaya karşı en çok direnç gösterirler. Minimum borulanma direncini ise iyi sıkıştırma yapılmayan ve kolezyonu düşük malzemeli zeminler gösterirler. Dayanımlı malzemelerden oluşan zeminde barajın oturması sonucu oluşacak çatlaklar da borulanma meydana gelmesine neden olur.

Borulanma mansap tarafındaki çıkış eğimi kritik değere ulaştığında oluşur. Borulanmayı engellemek için hidrolik eğim ve sızıntı hızı azaltılarak mansap tarafında güvenli sızma değerlerine ulaşılmalıdır. Bu değerlere ulaşmak için herhangi bir baraj temelinde 1 metrelik üst tabakanın sıyırma kazısı yapılmalıdır. Alüvyonlu topraklarda 1 metrelik bu üst tabaka yüksek miktarda organik madde içerir. Kayalık topraklarda ise genellikle hava teması sonu çürümüş tabakalar bulunur.

Tam veya kısmen su geçirmez bariyerler (cut-off) yardımıyla sığ ve derin temellerde zeminden su sızıntısını azaltmak kullanılır.

Darcy kanununa göre sızıntı miktarı zeminin permeabilite' si ve hidrolik eğimi biliniyorsa hesaplanabilir. Permeabilite bize bir çok parametreyi tanımlamamıza yardımcı olur. Burada sızıntı yolunun uzunluğunu bulmak zordur. Bunun için

hesaplanacak duruma göre uyarlanır. Bütün bunlardan anlaşıldığı gibi baraj içerisinde ve temelinde oluşacak borulanmadan kaçınılmalıdır.

1.1 Konu

Barajlarda haznede tutulan su gövde içerisinde veya temelden dirençle karşılaşsa dahi kendine bir yol bularak sızıntı oluşmasına neden olur. Bu sızmalara hesaplanan emniyet değerleri ölçüsüne kadar müdahale gerektirmez ancak bu değer üzerinde ise gerekli önlemler alınmalıdır. Sızıntı toprak barajlarda masap şevinde erozyonlara neden olup, beton barajların ise yapısına zarar vermektedir. Sızıntı her iki tür barajın temelinde içinde tehlikeli boyutta olursa, meydana gelen borulanma sonucu mansap tarafı şevinde kaymalara ve temelde ciddi oturmalar neden olarak barajın yıkılmasına dahi sebep olur. Sızıntı ilk önce yavaş olarak başlar daha sonra pınarlaşma şeklini alır. Sızıntı olan bölgelerde yosunlaşma, sazlık, koyu yeşil çimenler ve bataklık bitkileri oluşur.

Sızıntı kontrolü, sızıntı miktarına, olduğu bölgeye ve içeriğine göre değişir. Baraj inşaatından sonra oluşacak sızıntı miktarını azaltmak çok zor ve maliyetli bir işlem gerektirir. Sızıntıyı azaltma yöntemlerinde en çok kullanılan metodlar memba yüzüne yapılan geçirimsiz örtüler veya enjeksiyon yöntemleridir. Morden dizaynlarda ise sızma kontrolü, gövde içerisinde sızdırmazlık perdesi (cut off) yapılacak yöne içten filtre sistemleri konularak ve yeterli drenaj sistemleri oluşturularak sağlanır.

Barajların düzenli olarak gözlenerek sızmalarının tespit edilip baraj yıkılmalarına karşı önlemler alınması gerekir. Barajların sızma kayıtlarına bakılarak sızma miktarındaki değişimine, ıslak gövde miktarına ve akışkanın içerdiği malzemeye göre tedbirler alınmalıdır. Gözlem amaçlı yapılan(V-notch veirs) savak üzerindeki çentik yardımıyla sızıntı akımının oranı ve piyozmetereler yardımıyla da doygun haldeki zeminin su seviyesini yani freatik hattın belirlenmesi sağlar.

Sızıntı oranını tahmin etmek ve sızıntı zonlarının detaylı olarak belirtilmesi, çekirdek veya temel içerisindeki oluşmuş veya oluşması muhtemel borulanmalar barajın stabilitesi açısından çok önemlidir. İç erozyon, sızıntı akımı yardımıyla barajda mevcut olan ince taneli zeminlerin dışarı çıkması olup, yaygın olan baraj yıkılmalarının sebebidir. En tehlikelisi ise oluşan sızıntı akımlarının baraj

çekirdeğinde açtığı çatlak ve yarıklardır. Baraj yıkılmaları; toprak erozyonlarına, can kayıplarına, bölgesel olarak ciddi elektrik kesintilerine, içme ve sulama suyu sıkıntılarına, barajın bulunduğu yerleşim alanlarına tehlikeli boyutta zararları olacaktır.

Tabi gerilme metodu ölçümleri toprak barajlar içerisindeki normal olmayan sızıntı zonlarının tanımlanmasında kullanılır. Bu yöntemin en büyük faydası uzun zaman içerisinde uygulama kolaylığı sağlamasıdır. Bu yöntem nitel olarak yorum yapılmasına yardımcı olup toprak özellikleri hakkında bilgi vermez.

1.2 Kapsam

Bir toprak barajın gövdesi, hazne içerisinde biriken suya engel oluşturarak mansab bölgesine geçmesini önler. Bununla birlikte gövdeyi meydana getiren malzemeler geçirimsiz olsa bile bir kısım su gövde içerisinde sızarak mansap şevinden dışarı çıkar. Baraj gövdesi arkasında biriken hazne suyunun çekirdek içindeki sızma hızı ve eğrisi, suyun hazne içerisinde belli bir seviyede kalma süresine, malzemenin yatay ve düşey geçirimsizlik katsayısı değerlerine, seddenin sıkışma derecesine, boşluk suyu basıncına ve suyun sızma süresine bağlıdır. Islak toprak kitlesi hava ve suyun dışarı çıkmasına izin verilmeksizin yüklendiği zaman bu yük toprak tanelerinin elastik deformasyon yapmasına yada plastik olmayan biçimde düzenlerini değiştirmek zorunda kalmalarına sebep olur. Ancak katı hacimlerinde önemli bir değişiklik olmayıp yükün bir kısmı toprak taneleri tarafından taşınırken geri kalan diğer kısmı ise boşluklarda bulunan hava ve sudaki gerilmeyle taşınır ve boşluk suyu basıncı adını alır. Freatik çizginin altındaki boşluk suyu basınçları toprak kitlesinin kayma direncini azaltır.

1.3 Yöntem

Sonlu Elemanlar Analizi mühendislerin karşılaştığı karmaşık ve zor fiziksel problemleri kabul edilebilir bir yaklaşımla çözebilen sayısal bir çözüm yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi fizik ve mühendislikte karşılaşılan bir çok problemin çözümünde kullanılan en yaygın ve etkin sayısal yöntemlerden biridir. Bu metodu matematikçilerden ziyade daha çok mühendisler tarafından geliştirilmiştir.

Sonlu elemanlar metodu, sonlu farklar metodu ve akım ağları analizi gibi bir çok yöntem karmaşık olan sızma problemlerinin çözümü için yaklaşık sonuçlar elde edilmesine yardımcı olur. Günümüzde yapılan çalışmalarda bilgisayarlar yardımıyla gerçek değerlere yaklaşılmaktadır. Grafik olarak veya prosedürde günümüzdeki geniş alanda yürütülen sızıntı problemlerinin çözümü için çeşitli metodlar uygulanmaktadır. Karmaşık problemler için yapılan araştırmalarda karakteristik boyutları olan akım ağları özenli bir çalışma gerektirmektedir. Bilgisayarlar yardımıyla yapılan analizler 1956 yılında Pavlovsky' nin yapmış olduğu ve daha sonra Harry' nin geliştirdiği yöntemlere dayalı olarak tasarlanmıştır. Gelişen teknoloji sayesinde digital bilgisayarlar kullanılarak sızmanın hesaplanabilirliği daha kolay bir hal almıştır. Bu sayede tasarım için daha az zaman harcanıp ayrıntılar üzerinde çalışmak için vakit kazanılmış olmaktadır.

Serbest sızma yüzeyi problemlerinde akım, sınır şartları ile limitlendirilir. Norlineer çözüm teknikleri olan sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri uygulanarak, akım ağı ve düzenlenmiş ağlar yardımıyla çözümler yapılır. Sızma problemi ilk olarak Brezis H. tarafından (EP) "extend Pressure" metodu kullanılmıştır. Bu metod Darcy kanunu kullanılarak mevcut olan eşitsizlikleri basit eşitsizliklere dönüştürerek çözer. EP metodu çeşitli tipteki serbest sızma yüzeyi problemlerine ve nümerik çözüm için yapılan çalışmalarda uygulanmıştır. Nümerik metod mühendislik uygulamaların da yaygın kullanılan bir yöntem değildir. Bunun nedeni karmaşık türemeler ve uygulamada meydana gelen zorluklardır.

Tablolama programı ile basit çözümler yardımıyla sızma problemi çeşitli toprak tabakaları ve izotropik olan permabiliteye sahip malzemelerde kullanır. Bu çözüm yönteminde de akım sınır şartları ile belirli limitler içerisinde incelenmeye alınmaktadır. Günümüzde de sınırsız sızıntı problemleri için serbest sızıntı yüzeyi akımı uygulanır. Sonlu farklar yönteminde yapılan hesaplarda sınırsız sızıntılar için tablolama yöntemi kullanılabilir. Burada akımın değişkenliği korunarak uniform olmayan ve izotropik permabiliteye sahip olunmayan sınır şartlarına göre çıkarımlar yapılır. Bu yöntem bize uygulamada suyun toprak içerisindeki sızıntı akımı problemleri için pratik çözümler ve serbest su yüzü hesabı için kolaylıklar sağlamaktadır.

2. KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Suyun toprak içerisindeki hareketi baraj gövdesinden sızma ve toprak altı akımı şeklinde sınıflandırılır. Baraj gövdesi nehrin suyunu özel amaçları için tutulmasını sağlar. Bu nedenle baraj gövdesinde kullanılan malzemenin yapısı önemlidir. Toprak dolgu barajların gövdesinde ve tabanındaki sızma suyu akımı geçirimli zeminin komplike yapısı içerisinde meydana gelen viskoz bir sıvı akımıdır. Suyun sıkışmaz olduğu kabul edilirse zemin içerisindeki suyun hareketi Navier-Stokes ve Süreklilik denklemi ve sınır şartları yardımıyla çözüme gidilir. Olayları mikroskopik bir görüşle açıklamaya çalışan bu deklemlerin zemin içindeki suya tatbikinde ilk karşılaşılan zorluk sınır şartlarının ifadesidir. (Jacob 1950) ve (Slichter 1898) yaptıkları çalışmalardan yeraltı suyunun hareket ettiği zemin boşluklarının cidarlarını matematik bağıntılarla ifade etmenin imkansız olduğu anlaşılmaktadır.

Barajların gövdelerinde meydana gelen sızmalar, hazneden su kaybına neden olduğu gibi dolgu içerisinde de erozyonlar yaparak borulanma oluşmasına neden olur. Baraj gövdesinin geçirimsizliği su kaybın önemsiz bir miktara indirecek ve borulanma ihtimalini önleyecek şekilde yapılmalıdır.

Analitik sızma çözümlerinde fiziksel ve sayısal modeller özellikle sınır koşullarının karmaşık olduğu durumlarda kullanılır. Fiziksel modelde objeler laboratuvar koşullarına göre ölçümlendirilip modellemeler yapılır. Deney sonuçları ışığında yapılacak projenin kullanılabilirliği ve yapılabilirliği belirlenerek mevcut eksikliklerin giderilmesi sağlanmış olur.

Hele Show Analog modelinde aynı diferansiyel denklemleri kullanarak suyun akışının bir simülasyonunu yapmıştır.(Harry,1962) Hele-Show Analog genellikle iki boyutlu lamir akımlardaki gözenekli topraklarda kullanılmaktadır. (Todd,1964) Hele-Show modeli yatay veya düşey olarak uygulanabilir. (Bear,1972) benzer prensipler portatip model içinde kullanılır. Bu prensiplerde geometrik, kinematik ve dinamik benzerlikler en önemlileridir. Portatip ile fiziksel modeli ve karakteristik denklemleri

laplace açılımına dayanır. Toprak barajlardaki sızma ciddi bir problemdir. Birçok model geliştirilmesine rağmen deneysel dataların eksikliği giderilememiştir.

Toprak tabakalarının değişkenliği, özgül ağırlığı, su muhtevası ve granülometri değerlerine göre geçirimlilik değişkenlik göstermektedir. Terzagi ve Peck zeminlerin geçirimlilik değerlerine göre yaptığı çalışmalar sonucu toprak tabaklarını permeabilite değerlerine göre sınıflandırmıştır.

Griffin ve Fenton(1993) yılında rasgele alan teorisini ve sonlu elmanlar yöntemini Monte Carlo similasyonu ile uygulayarak yaptığı çalışmada baraj gövdesi altındaki sınırlı tabakalar için stokastik permeabilite ve suyun zemin içerisindeki yapısını incelemiştir. Çalışmalarında baraj temlindeki akım değerleri, suyun basınç etkisi ile standart devitasyon ve korelasyon yapılarının permeabilite ile olan ilgisi incelenmiştir.

Geçirimli zeminlerdeki toprak barajların çekirdeklerini güçlendirme ve zemin tabakalarının dağılımını incelenmiştir(Kalkani ve Michali 1994). Yaptıkları çalışmalarda sızıntının baraj temeli içerisindeki hareketini basite indirgemişlerdir.

Yapılan çalışmalar ve gözlemler sonucu dünyada barajlarda oluşan hasar istatistiklerinde hasarların en önemli nedeni baraj gövdelerinden ve temelden sızma, baraj gövdesi üzerinden suyun aşmasıdır. ABD’de yapılan araştırmalar sonucu 285 baraj ve gölet incelenmiş ve sadece %1’ nin sismik aktivitelerden dolatı zarar uğradığı ortaya konmuştur.

Dünyada bilinen ancak Türkiye’de yeni gelişme gösteren baraj güvenliği çalışmaları doğrultusunda mevcut barajların gövde ve temellerinde meydana gelen sızma debilerinin değerleri Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığınca incelenmektedir. Bu çalışmalar doğrultusunda barajlarda mevcut durumlar tespit edilip güvenlik açısından yapılacak iyileştirme çalışmaları için yöntemler geliştirilmektedir.

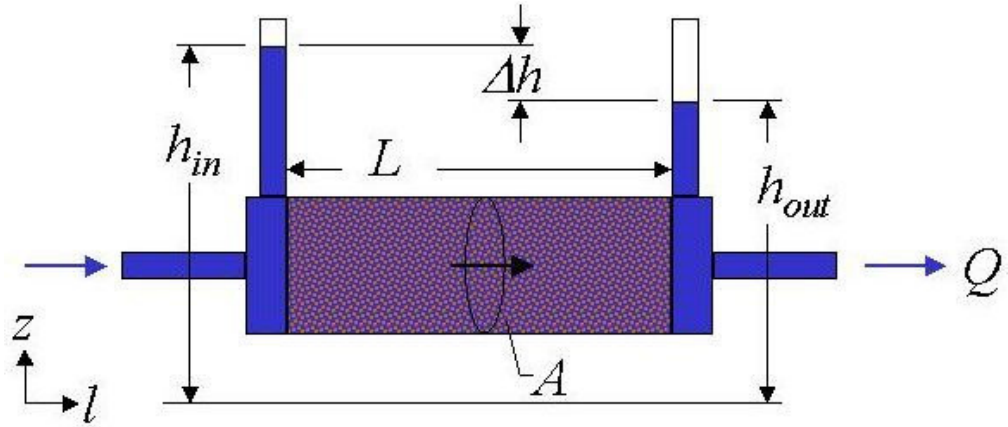
3. BARAJ GÖVDESİNDEN SIZMA

3.1 Sızma Denklemleri

3.1.1 Darcy :

Dolgu barajlarda temelde ve gövde içerisinde meydana gelebilecek sızıntıların sızma miktarının fazla olması hazne içerisindeki suyun kaybı bakımından değil meydana gelen sızıntı sonucu zemin tanelerini harekete geçirip baraj gövdesi dolgusunun veya temelini stabilitesini tehlikeye düşürmesi açısından önemlidir.

Fransız fizikçi Darcy toprak içerisindeki akışı incelemiş ve kohezyosuz granüler olan homojen ortamlarda suyun hareketini belirleyen Darcy kanunu bulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda da şekil 3.1’de ifade edildiği gibi sızan su debisinin Q (m^3/sn), kesit alanı A ve hidrolik eğimi (i) ifade eden $\Delta h/L$ oranı ile doğru orantılı olduğunu ispatlamıştır. Buna göre;



Şekil 3.1 : Darcy kanuna göre hazneye giren ve çıkan debi

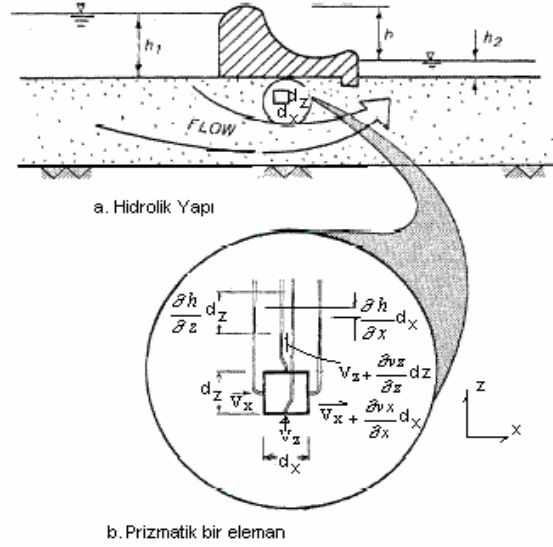
$$v = k i \quad (3.1)$$

$$Q = k.i.A \quad (3.2)$$

ifadesini elde etmiştir. Burada k permabilite katsayısını ifade eder.

3.1.2 Laplace Denlemi:

Oluşan sızmalar iki boyutlu ,geçirimli ve izotropik zeminler içerisinde gerçekleşmesi durumunda doymuş zemindeki toplam su yükü dağılımı şekil 3.2b’ deki prizmatik bir eleman için incelenirse;



Şekil 3.2: Doymuş geçirimli zemin de x ve z yönlerindeki akım hızı bileşenleri

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

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

Bu bağıntılarda eksi işareti eğimin artan piyozometrik yüke ters yönde olduğunu belirtmektedir.

Akımın sürekliliği şartları içerisinde de birim hacim de birim zamanda giren suyun

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

yine birim hacimden birim zamanda çıkan suyun debisi olan (q_1) eşit olduğu yola çıkmıştır.(y şekil düzlemine dik olan eksendir.)

$$q_1 = v_x dz dy + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx dz dy + v_z dx dy + \frac{\partial v_z}{\partial x} dz dx dy \quad (3.6)$$

denklem 3.5, 3.6' ya eşitlenirse :

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

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial x} = 0 \quad (3.7)$$

olur.

Darcy Kanunu (3.1 denklemi) kullanılarak x ve y yönlerinde hidrolik iletkenlik katsayısı değerlerinin aynı olduğu varsayımıyla aşağıdaki eşitlikler elde edilir :

$$v_x = k i_x = -k \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.8)$$

$$v_z = k i_z = -k \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.9)$$

Burada kh hız potansiyelini ifade eder ve genellikle ϕ ile gösterilir.

$$\phi = k h \quad (3.10)$$

(3.8) ve (3.9) denklemlerinde (3.10) yerine konulursa,

$$v_x = - \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad \text{ve} \quad v_z = - \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

elde edilir.

Yukarıdaki bağıntılar (3.7) denkleminde yerine konulursa,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.11)$$

En genel haliyle denklem;

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (3.11a)$$

halini alır.

3.2 Sızıntı Ağının Çizilmesi

Toprak barajlarda meydana gelen sızıntıların güzergahını tespit etmek, sızıntı miktarını ve sınır şartlarını incelemek amacıyla, sızıntı hatlarını gösteren akım ağlarını çizmek gerekmektedir.

3.2.1 Akım Ağlarının Özellikleri

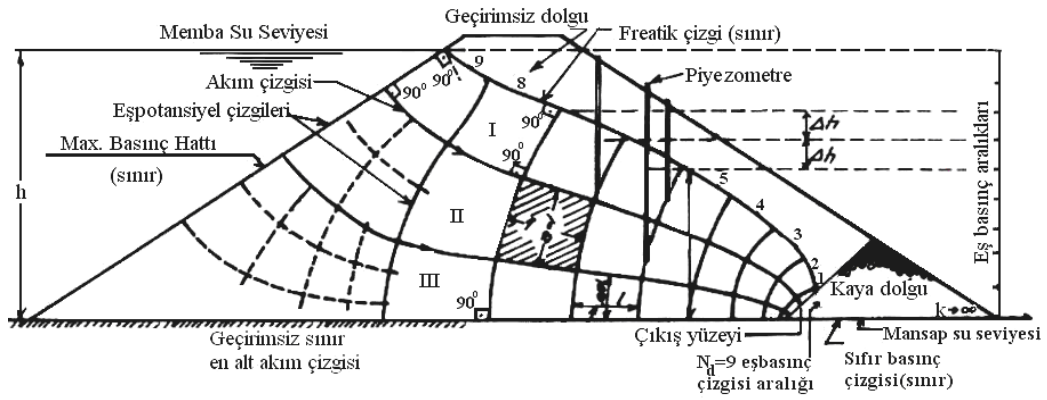
Sızıntı ağının çizilmesinde bazı temel kurallar vardır. Bunlar:

1. Sızıntı ağı homojen ortamlarda yer alan irrasyonel akımlar için çizilebilir. Akımın sürekli olması şart değildir.
2. Belirlenen sınır şartları için yalnızca bir ağ vardır. Barajların geçirimsizlik perdesi ve içerisindeki freatik hat çizgisi ile geçirimsiz temel sınır şartlarını oluşturmaktadır.
3. Sızıntı ağı, akım çizgilerinden ve onlara dik olan eş basınç çizgilerinin oluşturduğu karesel bir akım ağını meydana getirir.
4. Eş basınç çizgileri sabit sınırları dik olarak keser.
5. Üniform akım alanında meydana gelen kareler birbirine eşittir. Akımın iraksak olması halinde büyür, yakınsak olması halinde ise küçülür.

Akım ağı, su basıncına maruz bırakılmış bir ortamda suyun bir yönden diğer yöne hareketinde takip ettiği hatlarla, eş basınç hatlarının bir şekil üzerinde diyagram olarak ifadesidir. Akım ağı çizebilmek için;

- a. Akım ağını oluşturacak akım çizgisi sayısına karar verilir. Bu sayı n olarak ve hidrolik yük ifadesinde h olarak gösterilirse, eş basınç eğrilerinin freatik akım çizgilerini kestiği noktalar belirlenmiş olur.
- b. Belirlenen noktalardan geçecek şekilde eş basınç çizgileri çizilir. Bu çizgiler geçirimsiz temele mümkün olduğunca dik geçirilir.

- c. Eş basınç çizgilerine ve dolgunun memba şevine dik olacak şekilde akım çizgileri çizilir. Şekil 3.3' te görüldüğü gibi çizgilerin sayısı karesel ağıın oluşması durumu düşünülerek düzenlenir.
- d. Karesellik oluşturulamıyorsa yeni eğriler çizilerek en uygun ağ elde edilir.
- e. Elde edilen ağıın karesel olma şartı yeterlidir. Bu kareleri bulmak için şeklin tepe noktalarını birbirine bağlayan çizgilerin birbirine dik olmasından yararlanılır.
- f. Baraj geçirimli bir taban üzerine oturuyor ve geçirimsiz tabaka derinde bulunuyorsa akım çizgileri şekil 3.4.c gibi olabilir.



Şekil 3.3: Toprak barajda gövde içerisinde oluşan akım ağı

3.2.2 Zeminlerde Permeabilite

Haznede biriken su baraj temelinden ve gövdesinden belirli ölçüde sızacaktır. Geniş bir akım ağı ele alındığında kontrol edilebilir şartlar altında oluşan akımın hızı toprağın özelliklerini ifade eder. Suyun zemin içerisindeki hareketine sızma, ölçülmesi sonucu oluşan değerler geçirimsizlik, birimide geçirimsizlik katsayısı, k dır. Bu kat sayı birim alan da birim hidrolik eğimde meydana gelen sızma debinin ifadesidir.

Toprak tabakalarının değişkenliği, özgül ağırlığı, su muhtevası ve granülometri değerlerine göre geçirimsizlik değişkenlik göstermektedir.

Terzagi ve Peck zeminlerin geçirimsizlik değerlerini tablo 3.1' de şu şekilde ifade etmiştir:

Tablo 3.1: Zeminlerin permabilite katsayıları (cm/s)

	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 TAHALLÜL ETMİŞ KISIMLAR ALTINDAKİ HOMOJEN KİLLER		

3.3 Anizotropik Zeminlerde Akım Ağının Çizimi

Zeminlerin doğal ortamda homojen olması mümkün olamayacağı için yatay permeabilite düşey permeabilite' den çok daha büyük olabilir. Tablo 3.1' de zeminlerin çeşitli permeabilite katsayıları değerlerine göre özellikleri gösterilmiştir. Bu durum izotropik zemin varsayımının geçerli olduğu Laplace denkleminde göre çizilmiş akım ağı ile gerçek durum arasında büyük farklara yol açar. Bu sebepten

ötürü eğer k_v yatay ve k_h düşey permeabilite ise önce yatay boyutlar düşey boyutlara göre $\sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ sayısı kadar azaltılarak yeniden çizilerek akım ağı bilinen

yöntemlere göre belirlenir. Bu ağ düşey ve yatay yöndeki permeabilitesi $\sqrt{k_h \cdot k_v}$ olan bir zemin için doğrudur. Bu diyagramdan elde edilen akım miktarı, düşey ve yatay permeabilitesi farklı olan normal zemin için gerçek miktarı verir.

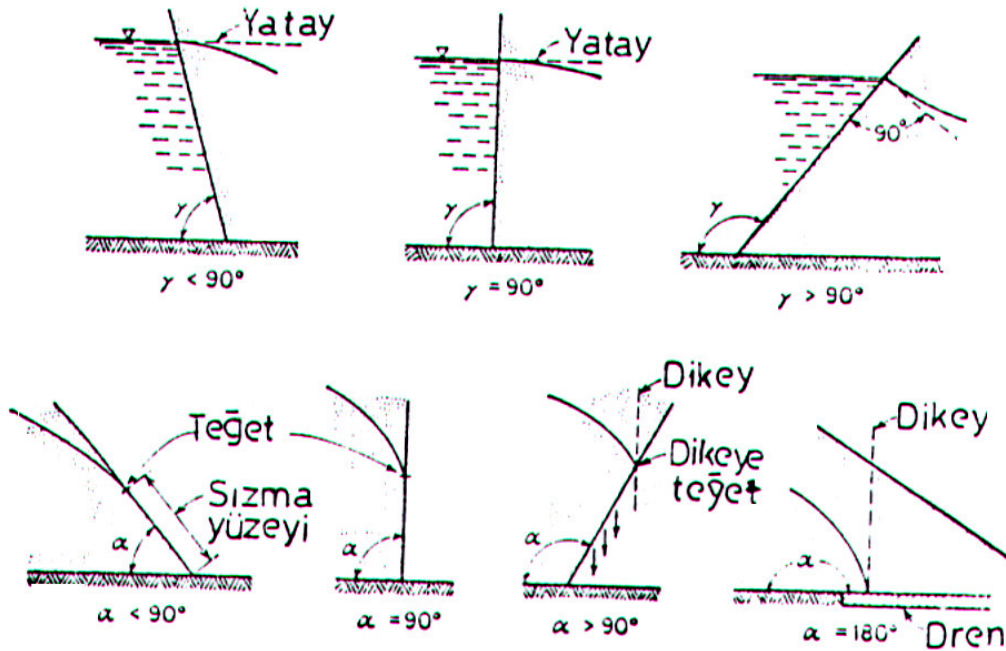
Anizotropik zeminde bir akım ağının çizilişi Şekil 3.5` te gösterilmiştir. Burada düşey ölçek değiştirilmemiş, yatay ölçek $\sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$ oranında küçültülmüştür.

Dönüştürülmüş kesitte akım ağı çizildikten sonra Şekil 3.4.c`deki gibi gerçek kesite aktarılır. Bu şekilde değiştirilmiş akım ağı anizotropik zemin için gerçek akım ve eşpotansiyel çizgilerini gösterir. Bu iki grup çizgiler, artık birbirlerini dik açılarda kesmezler.

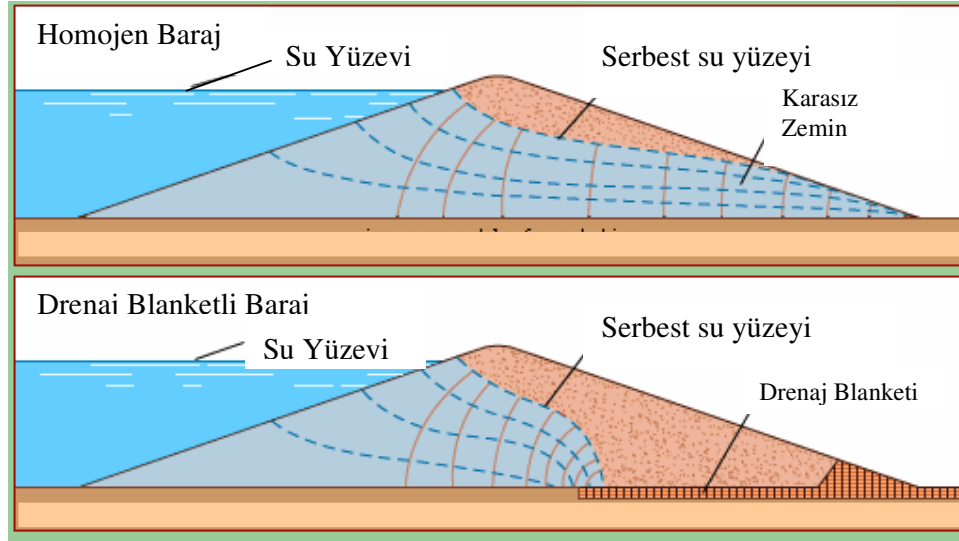
3.4 Sızma Yüzeyi Ve Sızma Çizgisi

Sızma yüzeyi, serbest yüzey akım bölgesinin üst çizgisidir. Bu yüzey akımın yer aldığı doygun bölge ile akımın olmadığı bölgeyi birbirinden ayırmaktadır. Serbest yüzey atmosfer basıncı etkisindeki en üst akım çizgisidir. Sızma çizgileri ile eş potansiyel çizgileri birbirini izler ve kesişirler. Sızma çizgisi bir akış çizgisidir. Sızma yüzeyi ise bir akış çizgisi değildir.

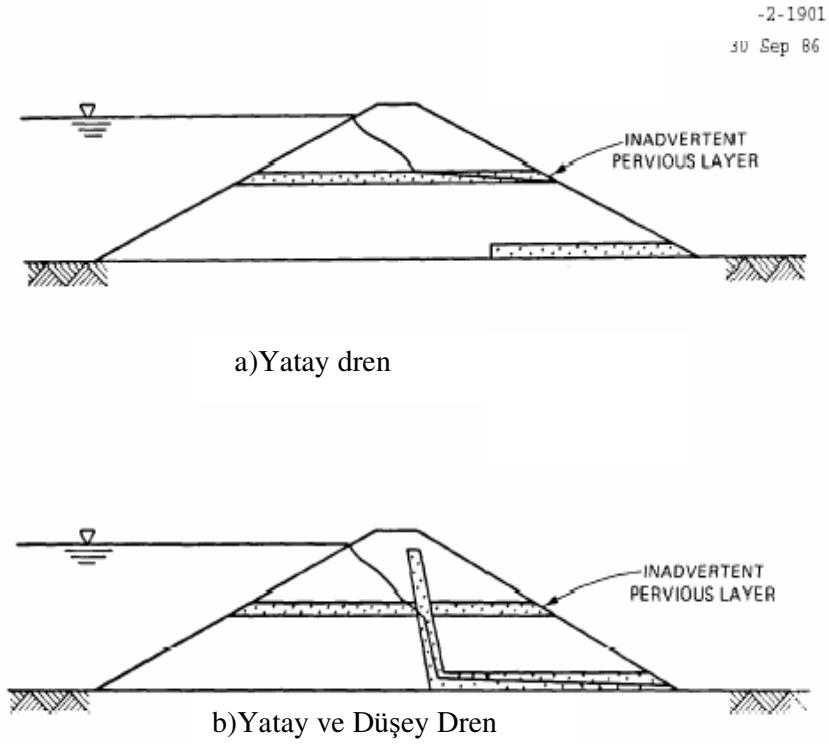
Yüksek boşluk suyu basınçlarının sebep olacağı şev kaymalarını önlemek için serbest sızma yüzeyi profilini, mansap yüzeyinden oldukça uzakta tutmak gerekir. Şekil 3.6' da sızan akımın farklı giriş ve çıkış şartlarına göre mansap şevindeki durumu ifade edilmiştir. Burada sızma yüzeyinin mansap yüzeyini kestiği en aşırı durumda, yerel ıslanma ve aşınma meydana gelip çamurlaşma olmasına neden olacaktır. İç erozyon ve parçacık taşınmasını önlemek için sızma basınçları ve hızları kontrol altına alınmalıdır. Uygun filtreler ve geçiş bölgeleri kullanılarak sisteme eklenecek düşey baca drenleri ve yatay dren tabakaları ile sızma kontrolü etkili hale getirilmelidir. Şekil 3.7 ve 3.8' de olduğu gibi drenaj blankeleri, yatay ve düşey diren filtreleri yardımıyla akımın gövde dolgusu içindeki hareketi ile mansap şevini olan etkisi azaltılmıştır.



Şekil 3.6: Sızma çizgisinin farklı giriş ve çıkış şartlarına göre durumu



Şekil 3.7: Homojen barajda Drenaj blanketi ile serbest su yüzü çizgisi değişimi



Şekil 3.8: Homojen barajlarda yatay ve düşey drenlerin olması halinde serbest yüzey

3.4.1 Freatik Hat

Dolgu içerisinde sızma akımının bir üst yüzeyi vardır. Barajların gövdesinde ve temelinde oluşacak sızmaların hesabı için akım ağları çizilir. Bu akım ağlarının üst sınırını oluşturan akım çizgisine freatik hat veya sıfır basınç eğrisi denir. Bu eğrinin üst kısmında yer alan zemin kılcal borulanma sonucu doymun halde olsa bile toplam sızmaya etkisi az olduğundan ihmal edilir. Freatik hat boyunca su basıncı atmosferik olduğu için bu yüzeye serbest su yüzeyi de denir. Hattın altında boşluk suyu basınçları zemin içerisindeki kayma direncini azaltır. Freatik hat belirlendikten sonra akım çizgileri ve eş potansiyel çizgileri belirlenir.

Dolgu gövdesindeki sızmalarda freatik çizginin mansap şevini kestiği nokta ve sızma miktarı belirlenmesi büyük önem taşır. Freatik hat dolgu şevini ne kadar yukarıda keserse şevin göçme riski o derece artar.

3.4.2 Freatik Hat Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

Toprak dolgu ve kil çekirdekli kaya dolgu barajlarda haznede suyun birikmesine sebep kil çekirdektir. Bu malzeme suyu zamanla mansaba geçirir. Ancak meydana gelen sızıntı debisi oldukça küçüktür.

Kozeny ve Cagrande oluşturduğu parabole göre freatik hat incelenirse:

Şekil 3.9' daki C noktası Kozeny parabolünün , Co ise freatik hattın mansap şevini kestiği noktalar. Parabol,

$$X = (y^2 - y_0^2) / (2y_0) \quad (3.12)$$

genel denklemi ile elde edilir.

$$d = B - 0,7s \quad (3.13)$$

$$s = h \cdot \cot \alpha \quad (3.14)$$

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \quad (3.15)$$

$$\text{Tablo 3.3 yardımıyla; } a + \Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha} \quad (3.16)$$

değeri bulunur.

$$e = \Delta a / (a + \Delta a) \quad (3.17)$$

Bu deklemlerde şekil 3.9’ da gösterildiği gibi:

x, y = sıra ile yatay ve düşey eksenler,

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,

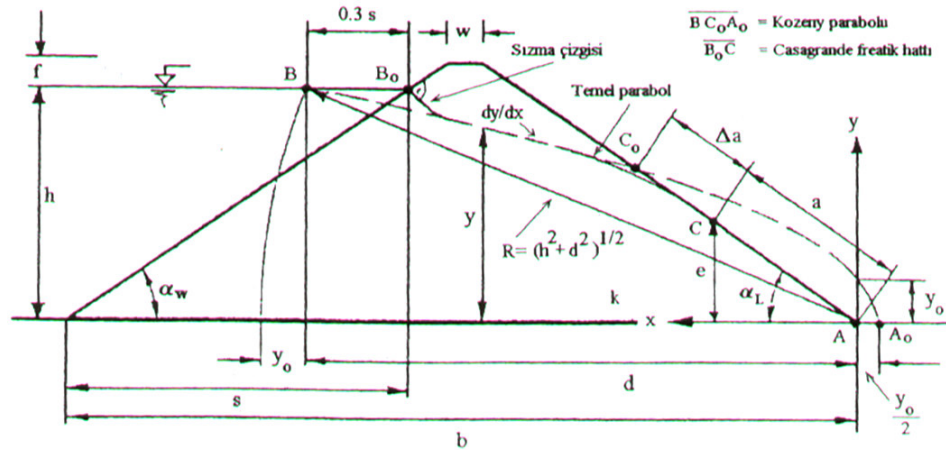
h = haznedeki su derinliği,

α = mansap şevinin yatayla yaptığı açı,

A = sızma hattının mansap şevini kestiği noktanın merkeze uzaklığı,

Δa = freatik hattın mansap şevini kestiği nokta ile parabolün mansap şevini kestiği nokta arasındaki mesafe,

olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.9: Geçirimsiz çekirdeğin içerisinde yer alan akım

Tablo 3.2: Birim genişlik debisinin çeşitli metotlara göre hesap formül tablosu

A	Metot	Denklemler
$<30^\circ$	SCHAFFERNAK-VAN İTERSON	$a = \frac{d}{\cos \alpha} = \frac{\sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}}}{\sin \alpha}$ $q = k a \sin \alpha \tan \alpha$
$\leq 90^\circ$	L.CASAGRANDE	$a = S_0 - \sqrt{S_0^2 - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}}$ FOR $\alpha \leq 60^\circ$, USE $S_0 = \sqrt{d^2 + h^2}$. FOR $60^\circ < \alpha < 90^\circ$, USE MEASURED $S_0 = \widehat{AC} + \overline{CD}$ $q = k a \sin^2 \alpha$
180°	KOZENY	$a_0 = \frac{y_0}{2} = \frac{1}{2} [\sqrt{d^2 + h^2} - d]$ $q = 2ka_0 = ky_0$
$30^\circ - 180^\circ$	A. CASAGRANDE	$q = k a \sin^2 \alpha$ OR $q = ky_0 = k [\sqrt{d^2 + h^2} - d]$

Casagrande Tablo 3.3' te görüldüğü gibi $\Delta a / (a + \Delta a)$ değerlerinin mansap tarafı şev açısına (α 'ya) bağlı olarak değiştiğini ispatlamıştır. Bu değerler $30^\circ < \alpha < 180^\circ$ için şeklinde gösterilebilir. Ara değerler için interpolasyon yapılabilir. Darcy eşitliği denklem 3.1 ve Kozeny parabolü yardımıyla birim boydaki seddeden sızan su miktarı için,

$$q = k \cdot y \frac{dy}{dx} = k \cdot y_0 = k (\sqrt{h^2 + d^2} - d) \quad (3.18)$$

bağıntısı yazılabilir. Tablo 3.2' de genel olarak çeşitli metodlarla birim genişlik debisini veren formüller belirtilmiştir.

Tablo 3.3: α açısına göre $\frac{\Delta a}{a + \Delta a}$ belirlenmesi

α^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

Δa mansap tarafındaki α_L açısına bağlı olarak değişir. Bu denklemler yatay ve düşey geçirimsizlik katsayıları eşit olduğunda kullanılır. Ancak farklı olduğu durumlarda barajın yatay boyutları $\sqrt{k_v/k_h}$ oranında küçültülmüş kesit üzerinde metod uygulanır.

α_L açısının 30^0 den küçük olması durumunda sızma debisi

$$q = k \cdot y \cdot \sin 2 \alpha_L \quad (3.19)$$

$$y = a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \times \cot^2 \alpha} \quad (3.20)$$

olarak belirlenir.

$\alpha_L = 180^\circ$ olması durumunda sızma debisi

$$q = k \cdot A(dy/dx) \quad (3.21)$$

olarak hesaplanabilir.

4-FERATİK HAT HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

4.1 Dupuit Denklemi

Dupuit denklemine göre barajın düşey kesitinden geçen birim debi ifadesi denklem 3.1 'deki Darcy formülünden yararlanarak;

$$q = -k \cdot y \frac{\partial y}{\partial x} \quad (4.1)$$

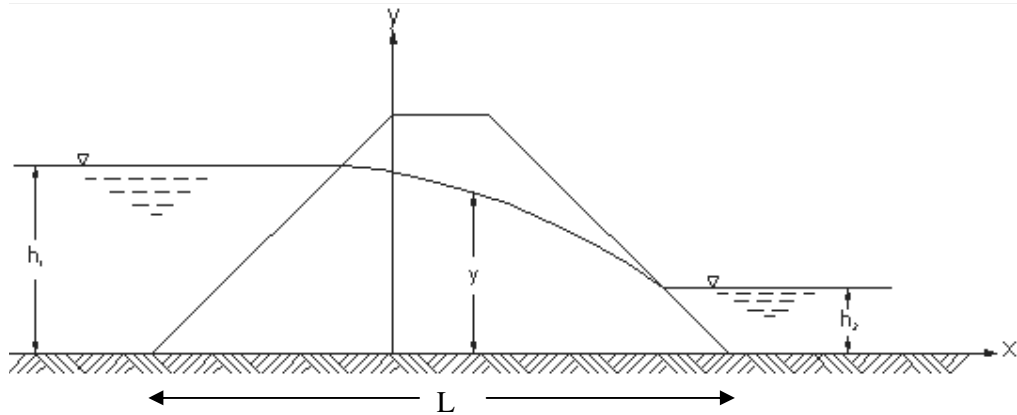
olarak bulunur.

Burada akımın sınır koşulları şekil 4.1' de belirtildiği gibi; $h=h_1$, $x=L$, $h=h_2$ olup integral alındığında

$$\int_0^L q dx = -K \int_{h_1}^{h_2} q dy \quad (4.2)$$

$$q = K \cdot \frac{h_1^2 - h_2^2}{2 \cdot L} \quad (4.3)$$

olan su yüzeyi parabolik olan Dupuit teoremi elde edilir.



Şekil 4.1: Dupuit yöntemine göre freatik hat

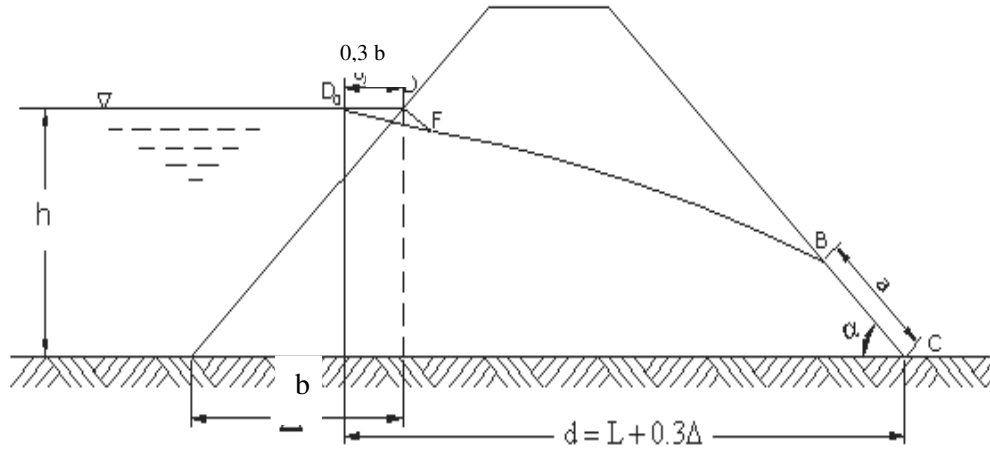
4.2 Schaffernak ve Van İtersen Denklemi

Van iterson sızıntı yüzeyini yaklaşık olarak ilk kez 1916 yılında keşfetmiştir. Mansap tarafında suyun olmadığı bir toprak dolgu barajda sızıntı akışı için birim genişlikten geçen debiyi:

$$q = K \cdot a \cdot \sin \alpha \cdot \tan \alpha \quad (4.4)$$

formülü ile hesaplamıştır. Burada K hidrolik iletkenlik, a ise şekil 4.2’de belirtildiği gibi sızma yüzeyinin uzunluğudur.

$$- \int_{a \cdot \sin \alpha}^h y dy = \int_{-a \cdot \cos \alpha}^{-d} a \sin \alpha \cdot \tan \alpha \cdot dx \quad (4.5)$$



Şekil 4.2: Van İtersen yöntemine göre freatik hat

$$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}} \quad (4.6)$$

burada α mansap şevinin baraj zeminini kestiği noktadaki açısıdır.

4.3 L. Casagrande Denklemi

Bu metod için q birim genişlik debisini tanımlarken hidrolik eğim $\frac{dy}{dx}$ değerinin

$\frac{dy}{ds}$ eşit olarak alınmıştır. Burada şekil 4.3’ te belirtildiği gibi serbest su yüzeyi

uzunluğu “s” ile gösterilmiştir. Şekil 4.3 ve şekil 4.4 yardımıyla aşağıdaki denklemler çıkarılır.

$$y = a \cdot \sin \alpha \quad (4.7)$$

darcy kanunu yardımıyla;

$$q = -k \cdot i = -k \cdot y \frac{\partial y}{\partial s} \quad (4.8)$$

$$q = k \cdot a \cdot \sin^2 \alpha \quad (4.9)$$

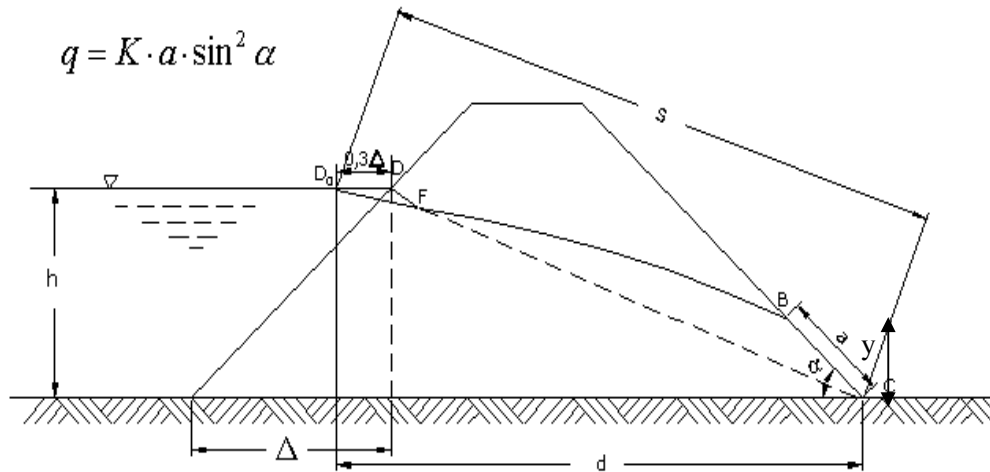
4.8 ve 4.9 denklemlerini birine eşitlersek;

$$- \int_h^{a \cdot \sin \alpha} y dy = -a \cdot \sin^2 \alpha \int_0^{s-a} ds \quad (4.10)$$

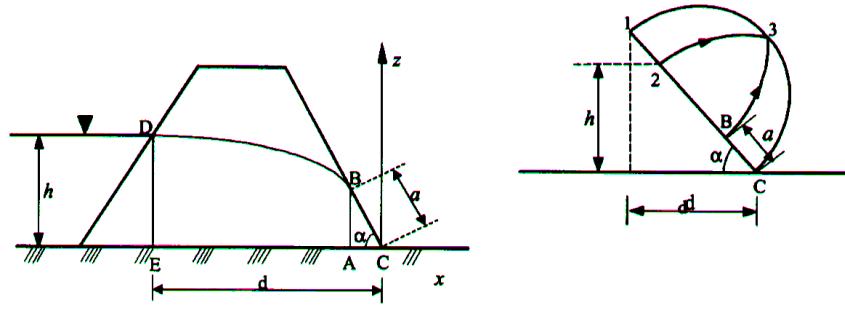
İntegral alınırsa;

$$\alpha = S - \sqrt{S^2 - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}} \quad S = \sqrt{d^2 + h^2} \quad d = L + 0.3\Delta \quad (4.11)$$

elde edilir.

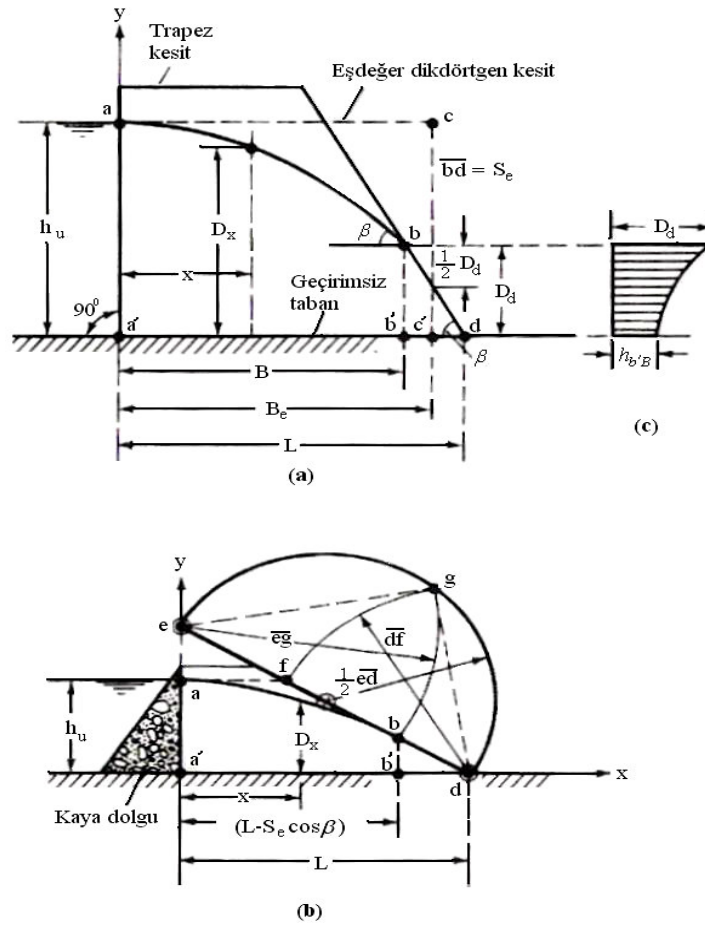


Şekil 4.3: L. Casagrande yöntemine göre freatik hat



Şekil 4.4: Casagrande yöntemine göre freatik hat

4.4 Kashef Denklemi



Şekil 4.5: Kasef yöntemine göre freatik hat

Serbest yüzey

$$D_x \cong h_u \sqrt{1 - \frac{x}{B} \left(1 - \frac{1}{7,27m^2} \right)} \quad (4.12)$$

olarak tanımlanmıştır..

$$m = B/h_u \quad (4.13)$$

$x = 0$ için

$$D_x = h_u$$

$x = B$ için

$$D_x = D_d$$

gerçek değerini vermektedir. Şekil 4.5' te sızma çizgisinin mansap şevinin kesiştiği nokta b ve çıkış yüzeyindeki su yüksekliği D_d ' nin bilinmesi ile toplam sızma miktarı (Kashef, 1965)

$$q = K \frac{h_u^2 - D_d^2 \left(1 - \frac{2}{3} \sin^2 \beta \right)}{2B} \quad (4.14)$$

eşitliği ile elde edilir. D_d serbest yüzeyin su çıkış yüksekliği ;

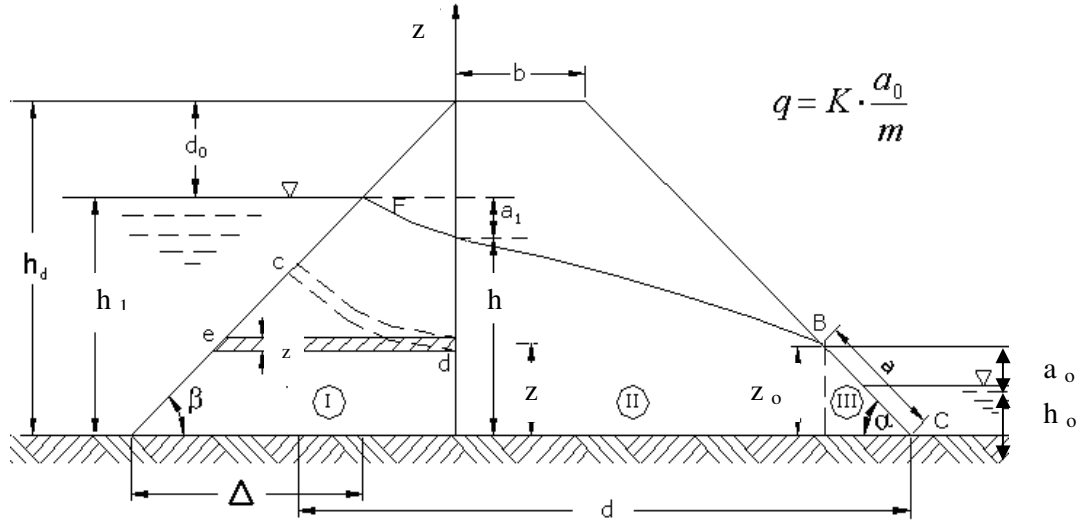
$$D_d = L \cdot \tan \beta - \sqrt{L^2 \tan^2 \beta - \frac{h_u^2}{1 - \frac{2}{3} \sin^2 \beta}} \quad (4.15)$$

denklemini ile elde edilir. B genişliği ise,

$$B = L - D_d \cot \beta = \sqrt{L^2 - \frac{h_u^2 \cot^2 \beta}{1 - \frac{2}{3} \sin^2 \beta}} \quad (4.16)$$

denklemini yardımıyla bulunur

Pavlosky mansap kısmında su olması ve suyun bulunmaması durumları için iki denklem geliştirmiştir. Şekil 4.6' da görüldüğü gibi baraj en kesitini üç bölgeye ayırmıştır. Buna göre yatay akım olduğu kabul edilen I. bölgede akım çizgileri eğri şeklindedir. CD akım çizgileri yerine eş değer uzunlukta ED yatay akım çizgilerini dikkate almıştır.



Şekil 4.6: Pavlosvksy Casagrande yöntemine göre freatik hat

Pavlovsky birinci bölge için sızma miktarı hesapları;

$$m_1 = \cot \beta \quad (4.18)$$

$$\text{ve hidrolik e\u0111im} = \frac{a_1}{[m_1(h_d - z)]} . \quad (4.19)$$

Buna göre birim genişlik debisi;

$$dq = k \frac{a_1}{[m_1(h_d - z)]} dz \quad (4.20)$$

$$q = \frac{k \cdot a_1}{[m_1]} \int_0^h \frac{d_z}{h_d - z} \quad (4.21)$$

integral alınırsa

$$\frac{q}{k} = \frac{h_1 - h}{m_1} \ln \frac{h_d}{h_d - h} \quad (4.22)$$

haline dönüşür.

İkinci bölge ise sızma değerleri için, denklem 4.3(Dupuit denklemi) kullanmıştır.

$$\frac{q}{k} = \frac{h^2 - (a_o + h_o)^2}{2l} \quad (4.23)$$

Üçüncü bölge için mansap bölgesindeki su yüksekliği olan z_o göre iki çözüm yapılmıştır.

$z_o = 0$ için,

$$\int_0^q d_q = k \frac{1}{\cot g \alpha} \int_0^{a_0} d_z \quad (4.24)$$

$$\cot g \alpha = m_2 \quad (4.25)$$

$$\frac{q}{k} = \frac{a_0}{m_2} \text{ olur.} \quad (4.26)$$

$z_o > 0$ için,

$$\frac{q}{k} = \int_{h_0}^{z_0} \frac{d_z}{m_2} + \int_0^{h_0} \frac{z_0 - h_0}{m_2 (z_0 - z)} d_z \quad (4.27)$$

$$\frac{q}{k} = \frac{a_0}{m_2} \left(1 + \ln \frac{a_0 + h_0}{a_0} \right) \quad (4.28)$$

Şekil 4.6'dan yararlanılarak;

$$l = b + m_2 [h_d - (a_o + h_o)] \quad (4.29)$$

$$a_o = \frac{b}{m_1} + h_d - \sqrt{\left(\frac{b}{m_2} + h_d \right)^2 - h^2} \quad (4.30)$$

$$a_o = \frac{m_2}{m_1} \left[(h_1 - h) \ln \frac{h_d}{h_d - h} \right] \quad (4.31)$$

Eşitlikleri kullanılarak a_o ve h ve çözüme ulaşılır. Sonuç olarak;

$z_o = 0$ için,

$$q = k \frac{a_0}{m_2} \quad (4.32)$$

$z_o > 0$ için,

$$q = k \frac{a_0}{m_2} \left(1 + \ln \frac{a_0 + h_0}{a_0} \right) \quad (4.33)$$

4.6 Elektrik Benzeşim Modeli

Elektriksel benzerlik yönteminde sızma akımları, akımın olduğu zemine benzer şekilde elektrik modeli kurularak çözülebilir. Modelde, sızma ortamı yerine elektrik akım ağı oluşturularak sınır şartları akım kaynağına ve kaynak çıkışına elektrik potansiyeli verilerek belirlenir. Burada elektrik potansiyelindeki düşme hızı sızmadaki basınç düşmesine benzetilir ve voltmetre ile ölçülür. Zeminlerin permeabilite katsayıları, modeldeki elektrik geçirgenliği katsayılarına benzetilerek uygulama yapılır.

Laplace denklemi iletken ortamlardaki elektrik akımlarını ölçmekte kullanıldığı zaman yeraltı suyu akımı ile elektrik akımı benzer özelliklerine göre oluşan denklem ve parametreler Tablo 4.1`de verilmiştir.

Tablo 4.1: Darcy Kanunu ve Ohm Kanunu arasındaki benzeşim

Darcy Kanunu	Ohm Kanunu
$Q=kAh/L$ $Q=Debi$	$I=k'A'V/L'$ $I=Akım$
$k=Hidrolik iletkenlik katsayısı$	$k'=İletkenlik Katsayısı$
$A=Enkesit alanı$	$A'=Enkesit Alanı$
$h= Akım oluşturan Yük$	$V= Akım oluşturan Voltaj$
$L=Sızma yolu uzunluğu$	$L'= Akım yolu uzunluğu$

Elektrik benzeşimler ıslak ve kuru olarak yapılabilir. Bu modeller için iki boyutlu iletken kağıt veya sulu solüsyon içeren üç boyutlu depolar kullanılabilir.

Islak Modeller: Islak elektrik analoglarında freatik hattı olmayan, doymuş, poroz bir zemin modellenir ve normalde iletken sulu bir solüsyon veya jel kullanılır. Islak

Kuru Modeller: Arazi şartları iki boyutlu plan ya da kesite dönüştürülerek iletken kağıt modelleriyle akım ağı oluşturulabilir. Genellikle uygulaması kolaydır ve değişik geometrilere uygulanabilir. Ancak değişik hidrolik iletkenlik katsayılarına sahip zeminlerin benzeşimini yapmak zordur ve kararlı akıma sahip akiferlere uygulanabilirler.

Şekil 4.7’ de y_0 parabolün baraj topuğundaki ordinatı, k toprağın permeabilite katsayısı, c freatik hattın mansap yüzeyini kestiği nokta, C_0 parabolün mansap yüzeyini kestiği nokta B_0 parabol ve su yüzeyi kesim noktası, a baraj topuğu ile deşarj noktası arasındaki eğik mesafe, α deşarj yüzeyinin yatayla yaptığı açı, x, y parabol üzerinde herhangi bir noktanın baraj topuğundan ölçülen koordinatları, a_0 baraj topuğu ile parabol tepe noktası arasındaki baraj tabanı boyunca olan mesafedir.

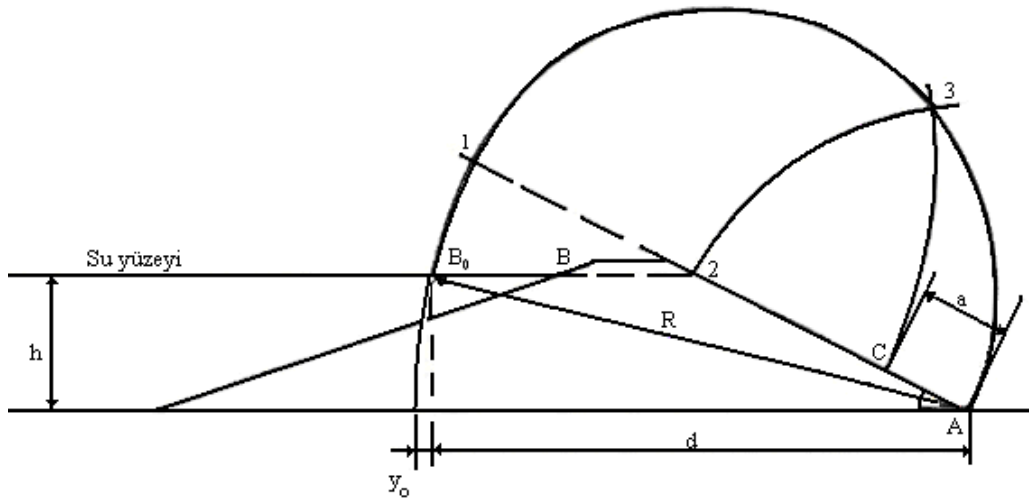
$$a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha} \quad (4.34)$$

28

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.

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \quad (4.35)$$

grafiksel olarak çözülmek istenirse 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 ($y_0 = R - d$).



Şekil 4.8: Grafiksel olarak çözülmüş baraj en kesiti

Sonuçlar denklem 4.34 ve 4.35 ten yararlanarak analitik hale dönüştürülürse

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0} \quad (4.36)$$

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2} \quad (4.36)$$

$$q = k.a.\sin^2\alpha \quad (4.37)$$

bulunur.

5. SIZMA HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

5.1 Sonlu Elemanlar Metodu

Nümerik çözümlerin ikinci bir yolu olan bu metot, problemin farklı elemanlara bölünmesi ve N bilinmeyenli N denklem sağlayan ağ sistemi (dikdörtgen olmak zorunda değil) oluşturulması esasına dayanmaktadır. Akım bölgesi elemanlara bölünerek her bir eleman için hidrolik iletkenlik katsayıları tanımlanır. Her bir elemandaki sınır şartları, yük ve akım oranları olarak tanımlanır ve değerler hesaplanır. Düğüm noktalarındaki yükler ve elemanlardaki akımların hesaplaması için bir denklemler sistemi çözülür. Serbest yüzeyli ya da geçirimsiz tabakalar arası sızma problemlerinin çözümü için iki ve üç boyutlu bilgisayar programları geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar metodunda ağ sisteminin oluşturulması için interaktif bir grafik işlemcisi vardır. Akım fonksiyonlarını ve potansiyelleri hesaplayarak akım ve potansiyel eğrilerini çizmek ve böylece akım ağını elde etmek mümkün olabilmektedir.

Daha kompleks sızma problemleri için sonlu elemanlar metodu sonlu farklar metoduna göre daha avantajlıdır. Bu avantajlar;

1. Malzemenin eğimli tabakaları gibi zor geometrik koşullar kolayca yerleştirilebilir.
2. Elemanların boyutları değiştirilerek sızma eğim veya hızlarının büyük olduğu bölgeler doğru bir şekilde modellenebilir.
3. Bir tabaka içindeki malzeme cepleri modellenebilir.

5.1.1 Sonlu elemanlar akım vektörü

Galarkin metodunda kalıcı yük için diferansiyel denklemi ,iki boyutlu sızma denklemlerinin çözümü için dönüştürüldüğünde deklemler;

$$\tau \int_A ([B]^T [C] [B]) dA \{H\} + \tau \int_A (\lambda < N >^T < N >) dA \{H\}, t = q \tau \int_L (< N >^T) dL \quad (5.1)$$

olur. Burada;

$[B]$ = eğim matrisi

$[C]$ = elementlerin sahip olduğu permeabilite matrisi

$\{H\}$ = başlanıç düğüm noktası vektörü

$<N>$ = enterpolasyon fonksiyonu vektörü

q = elementlerin bir ucundan diğer ucuna birim genişlik debisi

τ = elementin kalınlığı

t = zaman

λ = süreksiz sızıntı durumunda $m_w \gamma_w$ değerine eşittir

A = incelenen bölgenin toplam alanı

L = elementlerin uç noktaları arasındaki uzunluk

Asimetrik analizlerde eş eleman kalınlıkları ve yarıçap simetri eksenine göre farklıdır. Çevresel uzunluk $2\pi R$ radyandır. Seep/W bir radyan için formül edilmiş olup eşdeğer kalınlık R olarak alınmıştır. Asimetrik analizler için sonlu elemanlar denklemini;

$$\int_A ([B]^T [C] [B] R) dA \{H\} + \int_A (\lambda < N >^T < N > R) dA \{H\}, t = q \tau \int_L (< N >^T R) dL \quad (5.2)$$

şekline dönüşür. Burada radyal uzunluk R sabit değil değişkendir. Bu nedenle τ da iki boyutlu analilerde integral alınırken değişken olarak tanımlanır. Sızma denklemini kısa halde yazarsak;

$$[K] \{H\} + [M] \{H\}, t = \{Q\} \quad (5.3)$$

$[K]$ = elementin karakteristik matrisi

$[M]$ = küme matrisi

$\{Q\}$ = uygulanan elementin akım vektörü

Genel olarak denklem (5.3)' te sonlu elemanlar bağıntısı geçici sızma analizleri için kullanılır. Sabit akım durumunda analiz yapılırken yükseklik zamanın bir fonksiyonu

olarak ifade edilmez ve $\{H\}, t$ ihmal edilir ve (5.3) eşitliği $[K]\{H\} = \{Q\}$ haline dönüşür ve denklem (3.2) temel Darcy kanunu elde edilmiş olur.

5.1.2 Zamana Bağlı İntegral

Sonlu elemanlar yönteminde süreksiz akım analizi yapılırken $\{H\}, t$ zamanın bir fonksiyonudur. Zamanın integrasyonu sonlu farklar yönteminde olduğu gibi yazılırsa sonlu farklar denklemi;

$$(\omega \Delta t [K] + [M])\{H_1\} = \Delta t ((1 - \omega)\{Q_0\} + \omega\{Q_1\}) + ([M] - (1 - \omega)\Delta t [K])\{H_0\} \quad (5.4)$$

t = zaman değişimi

ω = 0 ile 1 arasında

H_1 = zamanın sonundaki yükseklik

H_0 = başlangıç yüksekliği

Q_1 = çıkış noktası debisi

Q_0 = başlangıç noktasında debi

$\omega = 1$ için (5.4) eşitliği düzenlenirse

$$(\Delta t [K] + [M])\{H_1\} = \Delta t \{Q_1\} + [M]\{H_0\} \quad (5.5)$$

şekline dönüşür. Çözüm için son çıkış noktasında oluşacak yeni su yüksekliğini bulmak için başlangıç noktasındaki su yükü artışı ve başlangıç koşulları yapılacak olan süreksiz akım analizi için bilinmesi gereken değerlerdir.

5.1.3 Nümerik İntegrasyon

Gauss nümerik integrasyon metodu kullanılarak elementlerin karakteristik matrisleri $[K]$ ve küme matris $[M]$ değerleri bulunur. integral alınırken modele ait elementlerin özellikleri tanımlanan noktalardaki ve toplamda bütün element için değerlerin bilinmesi gerekir.

$$[K] = \tau \int_A ([B]^T [C] [B]) dA \quad (5.6)$$

İntegrasyonu alınacak nokta için düzenlenirse,

$$[K] = \tau \sum_{j=1}^n [B_j]^T [C_j] \det|J_j| W_{1j} W_{2j} \quad (5.7)$$

Burada,

j = integrasyonu alınacak nokta

n = integrasyon sayısı

$[C_j]$ = istenen noktadaki permeabilite matrisi

$[B_j]$ = integrasyonu yapılan noktadaki element matrisi

$\det|J_j|$ = Jacobian determinant matrisi

$W_{1j} W_{2j}$ = ağırlık faktörleri

İntegrasyon sayısı düğüm noktası sayısına ve elementin şekline göre değişir.

5.1.4 Hidrolik Geçirgenlik Matrisi

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{12} \\ C_{21} & \dots & C_{22} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

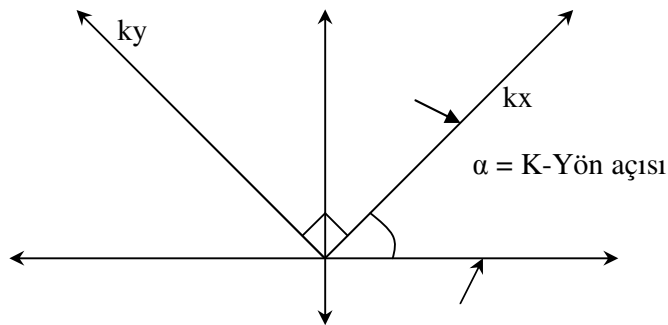
$$C_{11} = k_x \cos^2 \alpha + k_y \sin^2 \alpha$$

$$C_{22} = k_x \sin^2 \alpha + k_y \cos^2 \alpha$$

$$C_{12} = k_x \sin \alpha \cos \alpha + k_y \sin \alpha \cos \alpha$$

$$C_{21} = C_{12}$$

k_x , k_y ve α parametreleri Şekil 5.1'de tanımlanmıştır.



Şekil 5.1: Hidrolik geçirgenlik matrisi parametreleri

$\alpha = 0$ için

$$[C] = \begin{bmatrix} k_x \dots 0 \\ 0 \dots k_y \end{bmatrix} \text{şeklını alır.}$$

Hidrolik geçirgenlik fonksiyonu tanımlanırken k_x değeri önemli etki sağlamaktadır.
 k_y parametresi ise

$$K_y = k_x \cdot k_{\text{ratio}} \quad (5.9)$$

elde edilir.

5.1.5 Akımın Sınır Vektörü

İki boyutlu akımların analizinde düğüm noktalarındaki akım için sınır vektörü $\{Q\}$ ile tanımlanır. Buna göre,

$$\{Q\} = q \tau \int_L (< N >^T) dL$$

veya eksenler için simetri analizinde

$$\{Q\} = q \int_L (< N >^T R) dL \quad (5.10)$$

plan analizinde

$$\{Q\} = q \int_A (< N >^T < N >) dA \quad (5.11)$$

olarak tanımlanır.

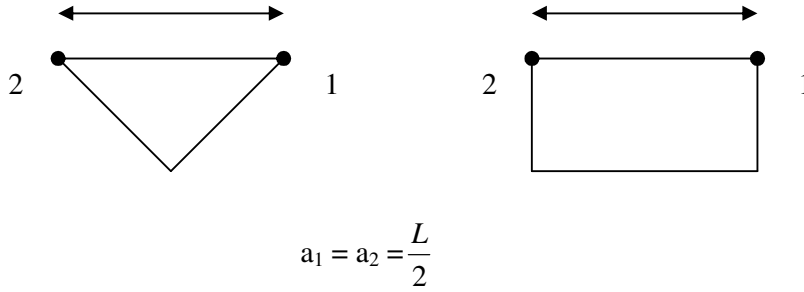
q = birim genişlik debisi

τ = element kalınlığı

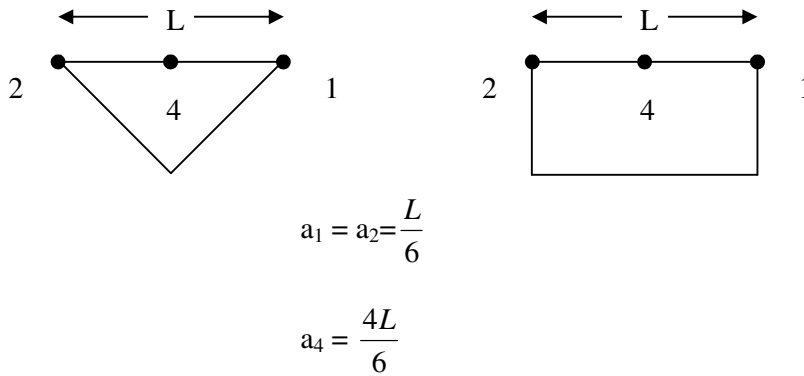
A = plandaki alan

R = simetri eksenini ile elementin köşesindeki düğüm noktası arasındaki radyel mesafe

İntegrallerin çözümü analiz çeşidine ve ikinci düğüm noktalarının durumuna göre değişir. İki boyu L ve asimetrik analizlerde integral şekli 5.2 ve 5.3'te gösterildiği gibi kapalı çözüm yapılır. Plan görünüşü analizlerinde düğüm noktasına katılan alan nümerik plandaki herbir düğüm noktası için parçalara ayrılarak düğüm noktaları etrafında Gauss iterasyonu yardımıyla bölgeleştirilip, alanlar herbir element için hesaplanır. Bu alanların standart bir şekli yoktur. Geo-studio programında toplam akım Q ve birim genişlik debisi için iki çeşit sınır şartı tanımlanmıştır. Q toplam debi için sınır şartları sınır düğüm noktaları olarak tanımlanır. Birim genişlik debisi için sınırsız şartları tanımlanırken elementin sınırları boyunca olmak zorundadır. Plan da yapılacak analizlerde sınır koşullarını belirlerken elementin uç noktaları tanımlanır. Seçilen elementin uç noktalarındaki bilgiler ışığında çözülen integrasyonlar ve saptamalar Q toplam debinin bulunması yönündedir. İki boyutlu akımlarda asimetrik analizlerde düğüm noktasında Q serbest yüzey alanından ve element kalınlığından bağımsızdır.

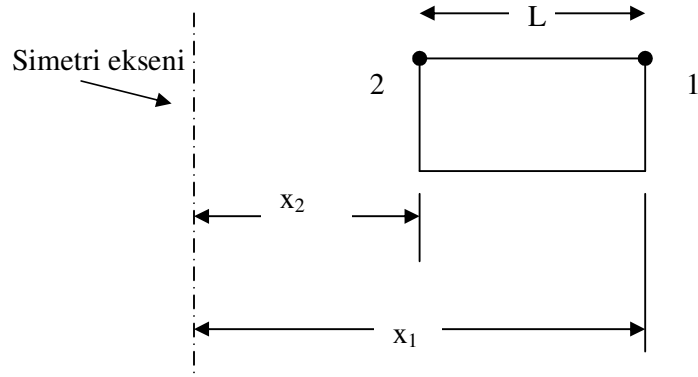


(a) orta nokta olmaması durumu



(b) Orta nokta olması durumu

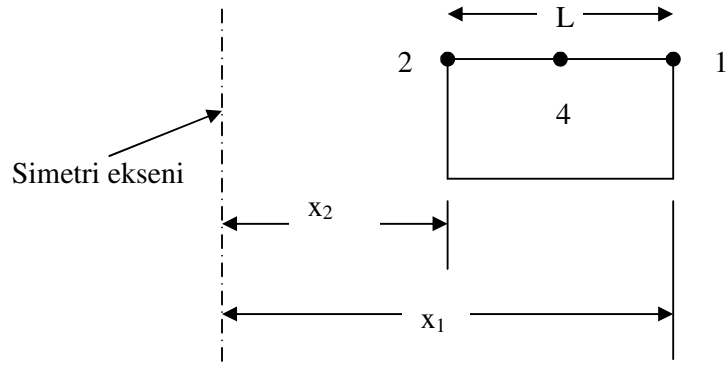
Şekil 5.2: Elementin birim kalınlığı



$$a_2 = \frac{L}{6}(2x_2 + x_1)$$

$$a_1 = \frac{L}{6}(x_2 + 2x_1)$$

(a) Orta nokta olmaması durumu



$$a_2 = \frac{L}{6}(x_2)$$

$$a_4 = \frac{2L}{6}(x_2 + x_1)$$

$$a_1 = \frac{L}{6}(x_1)$$

(b) Orta nokta olması durumu

Şekil 5.3: Asimetik elementin birim radyan kalınlığı

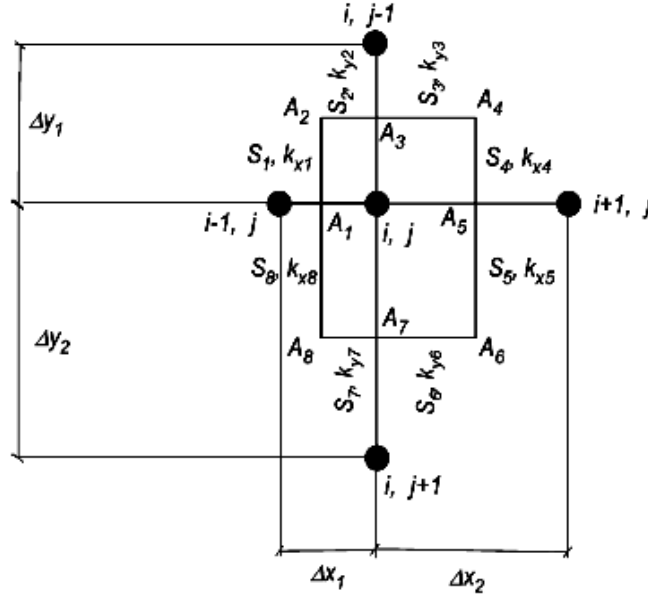
5.2 Sonlu Farklar Metodu

Sonlu farklar metodun da ,laplace denklemleri ,matematiksel bir yaklaşım ile bir dizi lineer cebir ifadesine dönüştürülür. Çözüm için akım alanı belirli aralıkları olan düğüm noktaları ile dikdörtgen bir ağ sistemine bölünür. Her düğüm noktasında akım denklemini geçerlidir. Buna göre N düğüm noktası ve N tane denklem elde edilir.Sonlu farklar metodu çok katmanlı ve anizotropik koşullarda da kullanılabilir.

Sonlu farklar metodunda, Darcy ve Laplace diferansiyel denklemlerdeki ikinci mertebe türevleri yerine eşdeğerleri yazılarak denklemlerin sonlu fark eşdeğerleri bulunur.

Buna göre Laplace dekleminin dönüştürülmüş hali şekil 5.4’ teki değerlerden yararlanılarak;

$$\frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{\Delta x_1} (k_{x1} S_1 + k_{x8} S_8) - \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x_2} (k_{x4} S_4 + k_{x5} S_5) + \frac{h_{i,j} - h_{i,j-1}}{\Delta y_1} (k_{y2} S_2 + k_{y3} S_3) - \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{\Delta y_2} (k_{y6} S_6 + k_{y7} S_7) = 0 \quad (5.12)$$



Şekil 5.4: Sonlu farklar metodundaki i,j düğüm noktaları

Burada $h_{i,j}$, $h_{i-1,j}$, $h_{i+1,j}$, $h_{i,j-1}$ ve $h_{i,j+1}$ toplam yük h olup $S_1, S_2, \dots, S_8$ değerleri $A_1, A_2, \dots, A_8$ konumlarını belirtir. X eksenindeki permeabilite k_{x1}, k_{x4}, k_{x5} ve k_{x8} , y eksenine göre ise k_{y2}, k_{y3}, k_{y6} ve k_{y7} dir. Buna göre ;

$$h_{i,j} = \frac{1}{D} \left(h_{i-1,j} \frac{k_{x1}S_1 + k_{x8}S_8}{\Delta x_1} + h_{i+1,j} \frac{k_{x4}S_4 + k_{x5}S_5}{\Delta x_2} + h_{i,j-1} \frac{k_{y2}S_2 + k_{y3}S_3}{\Delta y_1} + h_{i,j+1} \frac{k_{y6}S_6 + k_{y7}S_7}{\Delta y_2} \right) \quad (5.13)$$

D katsayısı;

$$D = \frac{k_{x1}S_1 + k_{x8}S_8}{\Delta x_1} + \frac{k_{x4}S_4 + k_{x5}S_5}{\Delta x_2} + \frac{k_{y2}S_2 + k_{y3}S_3}{\Delta y_1} + \frac{k_{y6}S_6 + k_{y7}S_7}{\Delta y_2} \quad (5.14)$$

olur.Bu çıkarılan sonuca göre denklem de

$$\begin{aligned} S_2 = S_3 = S_6 = S_8 = \Delta x/2; \quad S_1 = S_8 = S_4 = S_5 = \Delta y/2; \\ k_{x1} = k_{x3} = k_{x4} = k_{x5} = k_x; \quad k_{y2} = k_{y3} = k_{y6} = k_{y7} = k_y; \\ \Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x; \quad \Delta y_1 = \Delta y_2 = \Delta y \end{aligned}$$

$\beta = 1$ için;

$$h_{i,j} = \frac{1}{2(1 + \beta)} (h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + \beta(h_{i,j+1} + h_{i,j-1})) \quad (5.15)$$

$$\beta = \frac{k_y}{k_x} \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right)^2 \quad (5.16)$$

$$h_{i,j} = \frac{1}{4} (h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}) \quad (5.17)$$

elde edilir.

$$h_{i,j} = \frac{h_{i-1,j} + h_{i+1,j}\alpha + h_{i,j-1}(1 + \alpha)/2 + h_{i,j+1}(1 + \alpha)/2}{2(1 + \alpha)} \quad (5.18)$$

$$\alpha = k_2/k_1$$

$$S_5 = S_6 = S_7 = S_8 = 0; \quad k_{x1} = k_{x3} = k_{y2} = k_{y3} = k;$$

$$\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta y_1 = \Delta y_2 = \Delta x S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = \Delta x/2$$

$$h_{i,j} = \frac{1}{4}(h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + 2h_{i,j-1}) \quad (5.19)$$

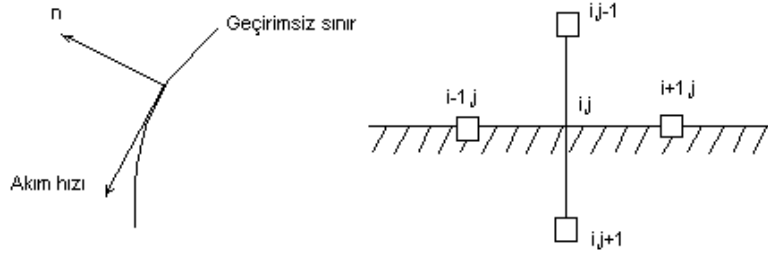
5.3 Sınır Şartları

Zeminin geçirimsiz tabakalar arasındaki sızma şartlarında, tüm sınırlar üzerindeki toplam yük veya toplam akım denklemleri tanımlanır. Belirtilen akım sınırları için, sadece geçirimsiz sınırlar göz önüne alınır. Geçirimsiz bir sınır için, sızma hızı sınıra teğetseldir.

$$\frac{\partial h}{\partial n} = 0 \quad (5.20)$$

Burada n , Şekil 5.2' de görülen sınır çizgisine normal doğrultuda olan koordinattır. Yatay bir yüzey için, $n=y$ olduğundan denklem (5.9) şu şekli alır:

$$\frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (5.21)$$



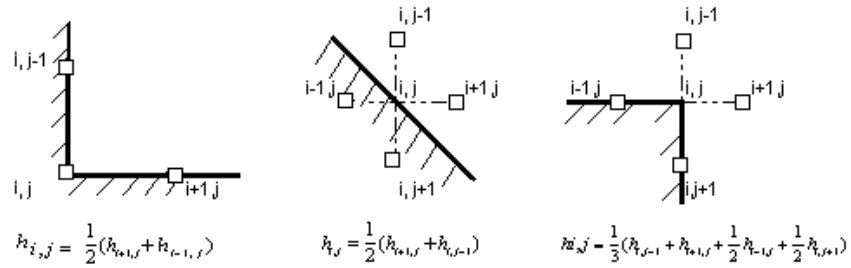
Şekil 5.5: Geçirimsiz bölgenin sınır şartları

Şekil 5.5' de görülen sızma alanının dışında fiktif bir noktanın olduğu varsayımı ile, birinci derece diferansiyel yaklaşımı olur: Merkezi sonlu farklar kullanılarak i,j noktasında,

$$\frac{\partial h}{\partial y} \approx h_{i,j+1} - h_{i,j-1} = 0 \quad (5.22)$$

olur, bu nedenle, $h_{i,j+1} = h_{i,j-1}$ 'dir. Fiktif $h_{i,j+1}$ noktasındaki toplam yük, (5.20) ve (5.22) denklemlerinin toplanmasıyla elimine edilmiş olur:

Benzer şekilde, akım bölgesinin diğer bir yatay sınırı olan üst kısmı ve dikey geçirimsiz sınırlar tanımlanabilir. Bu tanımlarda, yatay, geçirimsiz bir sınırın mevcut olması durumunda, fiktif noktalar tanımlamak gerekli değildir; ancak, (5.17) eşitliği yerine (5.19) eşitliği kullanılmalıdır. Denklem (5.19)'deki 2 katsayısı, sınır üzerinde değil, dışında yer alan noktalara uygulanır. Böylece (5.19) eşitliği, dikey bir sınır için de genelleştirilebilir. Şekil 5.6'da eğik ve çeşitli konumlarda bulunan köşeli sınırlarda yer alan noktalar için bazı eşitlikler verilmiştir. Tüm konumlar için eşitliklerde katsayılar toplamı 1'e eşittir.

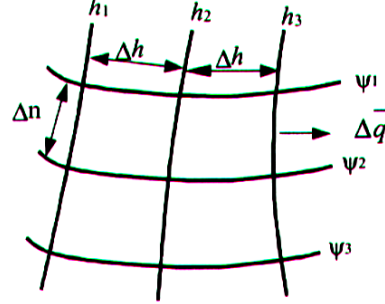


Şekil 5.6: Köşelerin 45° eğimli ve geçirimsiz sınırlarda $h_{i,j}$ değerlerinin bulunması.

5.4 Akım Ağı Yöntemi

Freatik hat çizildikten sonra, hidrolik su yükü olan h yüksekliği düşey olarak istenilen eş parçalara bölünür. Bu parçalar eş potansiyel kayıplarını göstermektedir. Burada eş basınç çizgileri, akım çizgilerine dik olan kareler şeklinde çizilerek akım ağları oluşturulup n sayıda eş potansiyel çizgisi elde edilir. Sızma ağı eşit parçalara bölündüğünde iki ardışık eş potansiyel arasındaki yük kaybı $\frac{h}{n}$ olur. İki eş potansiyel çizgisi arasındaki mesafe d ile gösterilirse yük kaybı olarak ifade edilen hidrolik eğim $\frac{h}{n.d}$ olarak yazılır. Birim genişlikten geçen debi, homojen gövdeli bir geçirimsizlik perdesindeki akım çizgileri ve (3.2) Darcy formülünden yararlanarak;

gövdeni geçirdiği su debisi (q) perdenin 1.0 m uzunluğundan geçirdiği debi olarak ifade edilir. Akım ağının tek bir açıklığı için Şekil 5.7’ de gösterildiği gibi



Şekil 5.7: Akım ağı modeli

$$\Delta q = k \cdot \frac{h}{n} \cdot \frac{1}{d} \cdot d = k \cdot \frac{h}{n} \quad (5.23)$$

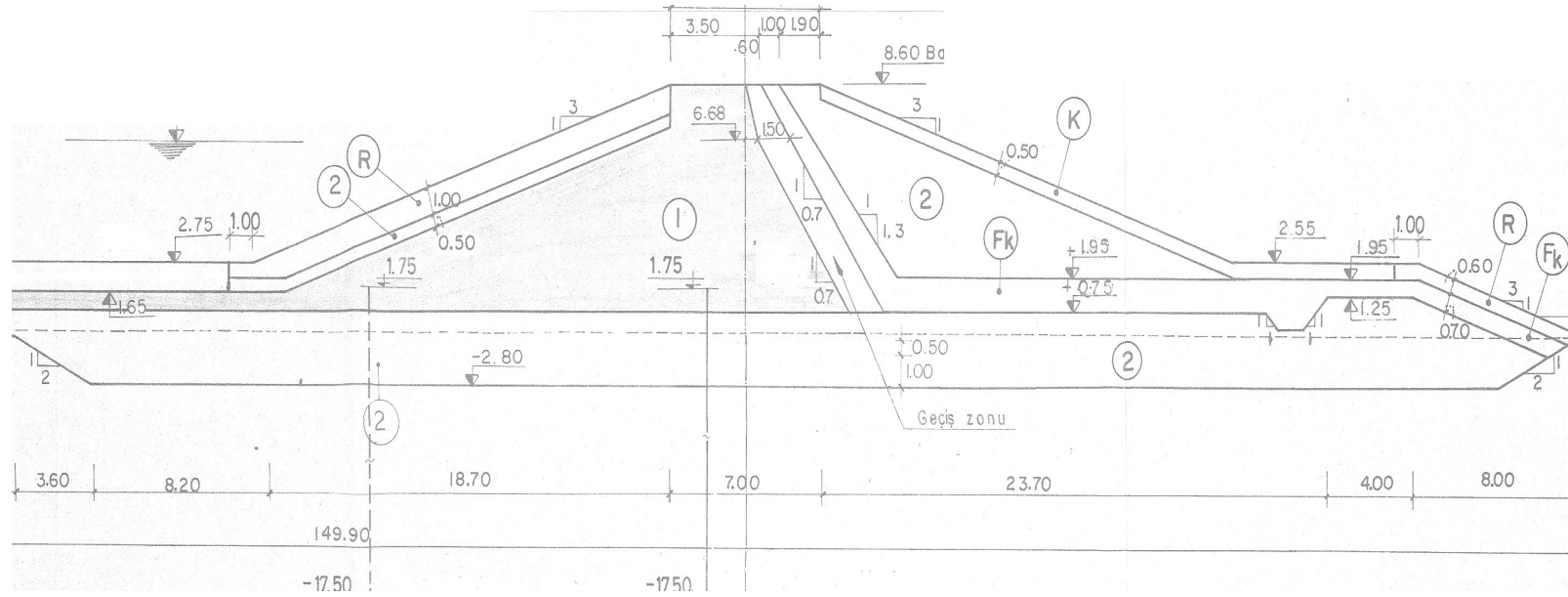
ifadesi elde edilmiş olur. Akım ağı şebekesinde N_f kadar akım çizgisi varsa birim genişlikten geçen toplam sızma

$$q = N_f \cdot \Delta q = N_f \cdot k \cdot \frac{h}{n} \quad (5.24)$$

olarak bulunur.

6. UYGULAMA İÇİN SEÇİLEN BÜYÜKÇEKMECE BARAJININ VERİLERİ

6.1 Barajın Kesiti



Şekil 6.1: Büyükçekmece barajının kesiti

6.2 Barajın Karakteristik Özellikleri

Büyük İstanbul İçme Suyu Projesi kapsamında bir tesis olan Büyükçekmece barajının yeri 1966-1970 yılları arasında DAMOC Konsorsiyumu tarafından "İstanbul Su Temini ve Kanalizasyon Master Planı ve Fizibilite Etüdü" nde seçilen baraj yeridir. Baraj alüvyonlu bir zemin üzerine inşa edilmiştir. Tablo 6.1'de uygulama için seçilmiş olan Büyükçekmece barajının karakteristik değerleri verilmiştir. Türkiye'de göl ve batık zemin içinde inşa edilmiş ilk baraj olan Büyükçekmece Barajı'nın gövde inşaatı sırasında Büyükçekmece lagününün denizle olan irtibatı kesilmiş ve depolama tesisine dönüştürülmüştür. Doğal hali ile 12 km² alanı olan ve 15.22 km²' lik Küçükçekmece Gölü'nden küçük olan Büyükçekmece Gölü'nün alanı, barajın kurulmasıyla normal göl alanı 28.47 km², minimum göl alanı ise 18.22 km²' ye ulaşmıştır. Büyükçekmece Barajı ve tesisleri genç çökellerin (taşlanmamış kil, çakıllı kum) oluşturduğu zemin üzerine oturmaktadır. Baraj gövdesi altında sadece temel zemini üzerinde gölün bırakmış olduğu ortalama 0.80 m kalınlığındaki gevşek, organik muhtevalı kumlu silt teressubat baraj inşası sırasında kaldırılmıştır.

Baraj inşaatını kuruda yapabilmek için tava seddeleri inşa edilmiştir. Ön batardo ile tava seddelerinin geçirimsizliğini temin için özel bir teçhizat kullanılarak batardo ve sedde aksları boyunca -17.50 m kotuna kadar dolomit, kalsit, çimento, bentonit ve su karışımı içeren ince duvar (thinwall) oluşturulmuştur. Dolusavak temelinde ise çapı 0.50 m, boyu 20.00 m, taşıma gücü 240 ton/adet olan 776 adet Franki kazık sistemi uygulanmıştır. Franki kazık sistemi de Türkiye'de ilk kez bu projede uygulanmıştır.

Büyükçekmece Barajı dolgu hacmi 2 milyon m³'tür. Kret kotu 8.60 m olan toprak dolgu tipindeki Büyükçekmece Barajın gövde inşaatı uygun nitelikte ve yeterli miktarda bulunamadığı için kil çekirdek ortalama +3 kotuna kadar yükseltilmiştir. DSİ Genel Müdürlüğü'nün de onayı ile üst kısımlarda hidrolik iletkenlik katsayısı $k=10^{-6}$ geçirimsizlik sağlanacak şekilde sıkıştırılmak suretiyle (2') no'lu malzeme kullanılmıştır.

Göl suyunun mevcut tuzluluğunu inşaat süresinde gidermek ve kısa sürede tatlılaşmasını sağlamak için 3 m yüksekliğinde bir memba batardosu ve sol sahilde geçici dolusavak tesisi inşa edilmiş, 13 Mayıs 1985 tarihinde gölün denizle irtibatı

kesilmiş, gölde toplanan suyun kotuna paralel olarak geçici dolusavaktan denize deşarj yapılmak suretiyle göldeki suyun tuzluluk derecesi istenen seviyeye getirilmiştir.

Tablo 6.1: Büyükçekmece barajına ait değerler

	Proje Raporu Verileri	Güncel Veriler
Hidroloji		
Drenaj Alanı	620 km ²	
Yıllık Ortalama Yağış	700 mm	800 mm
Yıllık Ortama Akım	144.07 hm ³	125.42 hm ³
Q _{KAD}	1535 m ³ / s	2460.20 m ³ /s
V _{KAD}	38.70 hm ³	190 hm ³
Q ₅₀₀	204 m ³ /s	802 m ³ /s
Rezervuar		
Normal Su Kotu	6.30 m	
Nor. S.S.Göl Hacmi	161.610 x 10 ⁶ m ³	
Nor. S.S. Göl Alanı	28.473 x 10 ⁶ m ²	
Max. Su Kotu	6.68 m	
Max.S.S. Göl Hacmi	172.45 x 10 ⁶ m ³	
Max.S.S. Göl Alanı	28.58 x 10 ⁶ m ²	
Min. Su Kotu	0.75 m	
Min.S.S. Göl Alanı	18.218 x 10 ⁶ m ²	
Ölü Hacim	19.857 x 10 ⁶ m ³	
Aktif Hacim	141.75 x 10 ⁶ m ³	
Emniyetli Yıllık Verim	100.00 hm ³	82.2 hm ³
Gövde		
Tipi	Zonlu toprak dolgu	
Kret Kotu	8.60 m	10.10 m
Kret Genişliği	7 m	
Kret Uzunluğu	2.475.00 m	
Temel Kotu(Çekirdek)	-2.80 m	
Temelden Yüksekliği	11.40	12.90 m
Talveg Kotu	-0.80 m	
Talvegten Yüksekliği	9.40 m	10.90 m
Dolgu Hacmi	2 x 10 ⁶ m ³	
Dolusavak		
Tipi	Radyal kapaklı	
Dolusavak Kret Kotu(Kapak)	0.84 m	
Dolusavak Kret Gen.	54.50 m	
Dolusavak kapasitesi	1000 m ³ / s	
Kapak Sayısı / Ebatlar	6 Ad/7.00m(g)x5.80 m(y)	
Köprü Ayak Ad./Gen.	5 Ad./2.60 m	

7. BÜYÜKÇEKMECE BARAJINDA SIZMA HESABI UYGULAMALARI

7.1 Freatik Hatın Belirli Yöntemlerle Çözümü Ve Karşılaştırılması

7.1.1 Kozeny Yöntemine Göre Freatik Hat

$$B = 26.09 \text{ m}$$

$$H = 5.93 \text{ m}$$

Denklem 3.14 te değerler yerine yazılırsa

$$S = 5.93 \times 1/3 = 1.98$$

Denklem 3.13 'ten

$$d = B - 0.7s = 26.09 - 12.453 = 13.64 \text{ m}$$

ve 3.15 denklemi ile $y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d = 1.23 \text{ m}$ bulunur.

$$y = \sqrt{2 \times 1.23 X + 1.23^2}$$

3.16 ve 3.17 denklemlerinden

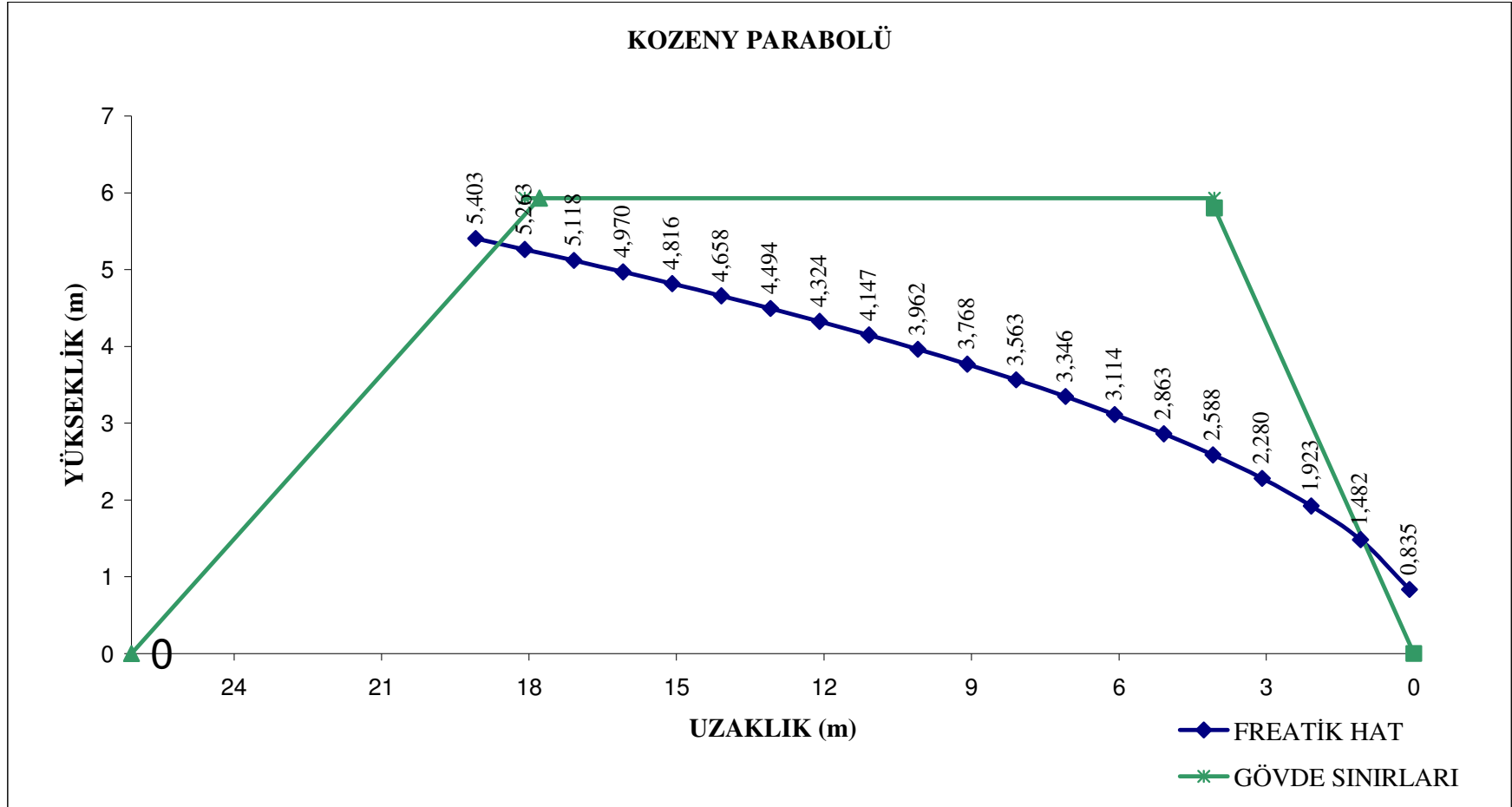
$$a + \Delta a = \frac{1.23}{1 - 0.7} = 4.1 \text{ m}$$

$$e = \frac{\Delta a}{a + \Delta a} = 0.327$$

$$\Delta a = 1.3407 \text{ m}$$

$$a = 2.76 \text{ m}$$

elde edilir.



Şekil 7.1: Kozeny parabolü yardımıyla freatik hat

7.1.2 Dupuit Teoremi Göre Freatik Hat

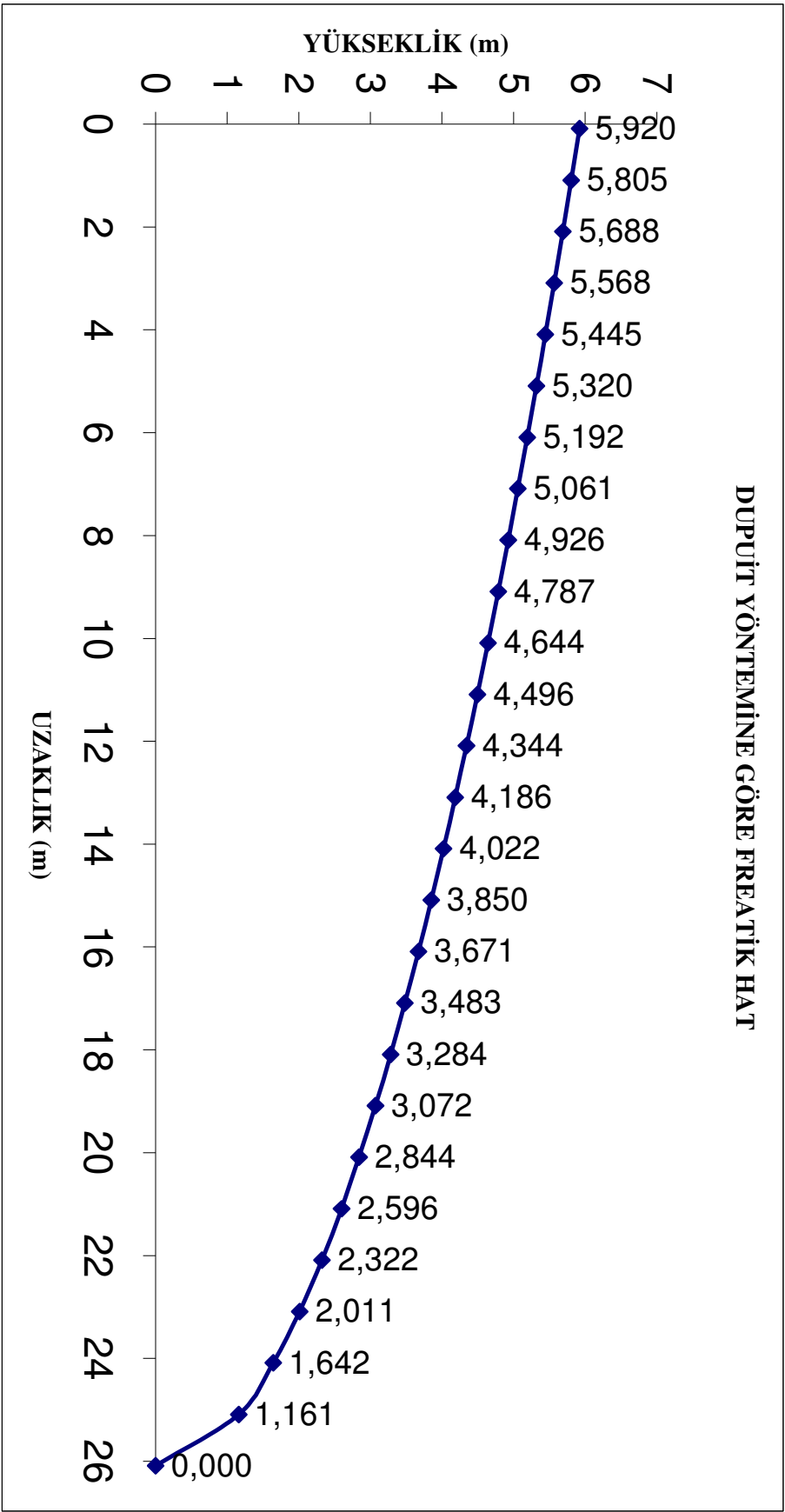
$$H = 5,93\text{m}$$

$$h_o = 0$$

X = 1 m aralıklarla seçildi

$$L = 26,09\text{m}$$

$$h = \sqrt{5,93^2 - (5,93^2 - h_o^2) \frac{x}{26,09}}$$



Şekil 7.2: Dupuit yöntemine göre freatik hat

7.1.3 Kashef Yaklaşımına Göre Freatik Hat

Freatik hat için (5.5) bağıntısı kullanılarak Şekil 7.5 teki sonuçlar elde edilir.

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

Ayrıca Kashef (1965) serbest yüzey çıkış yüksekliğini (5.17) bağıntısı ile tanımlamıştır.

$$L=42 \text{ m}$$

$$\beta = \text{atan}(2/1) = 63,435^\circ$$

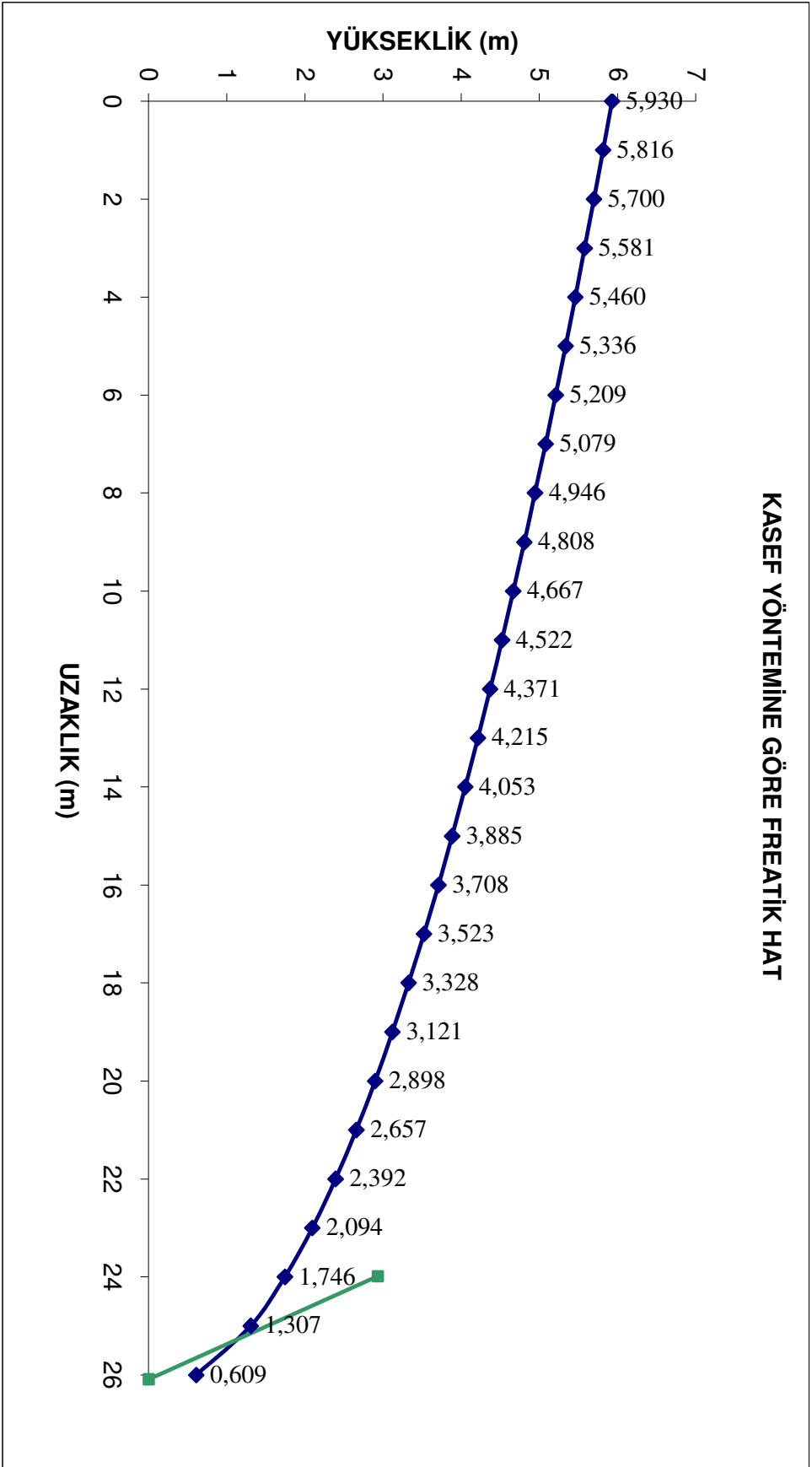
$$h_u = 15,153 \text{ m}$$

değerleri yerlerine konularak,

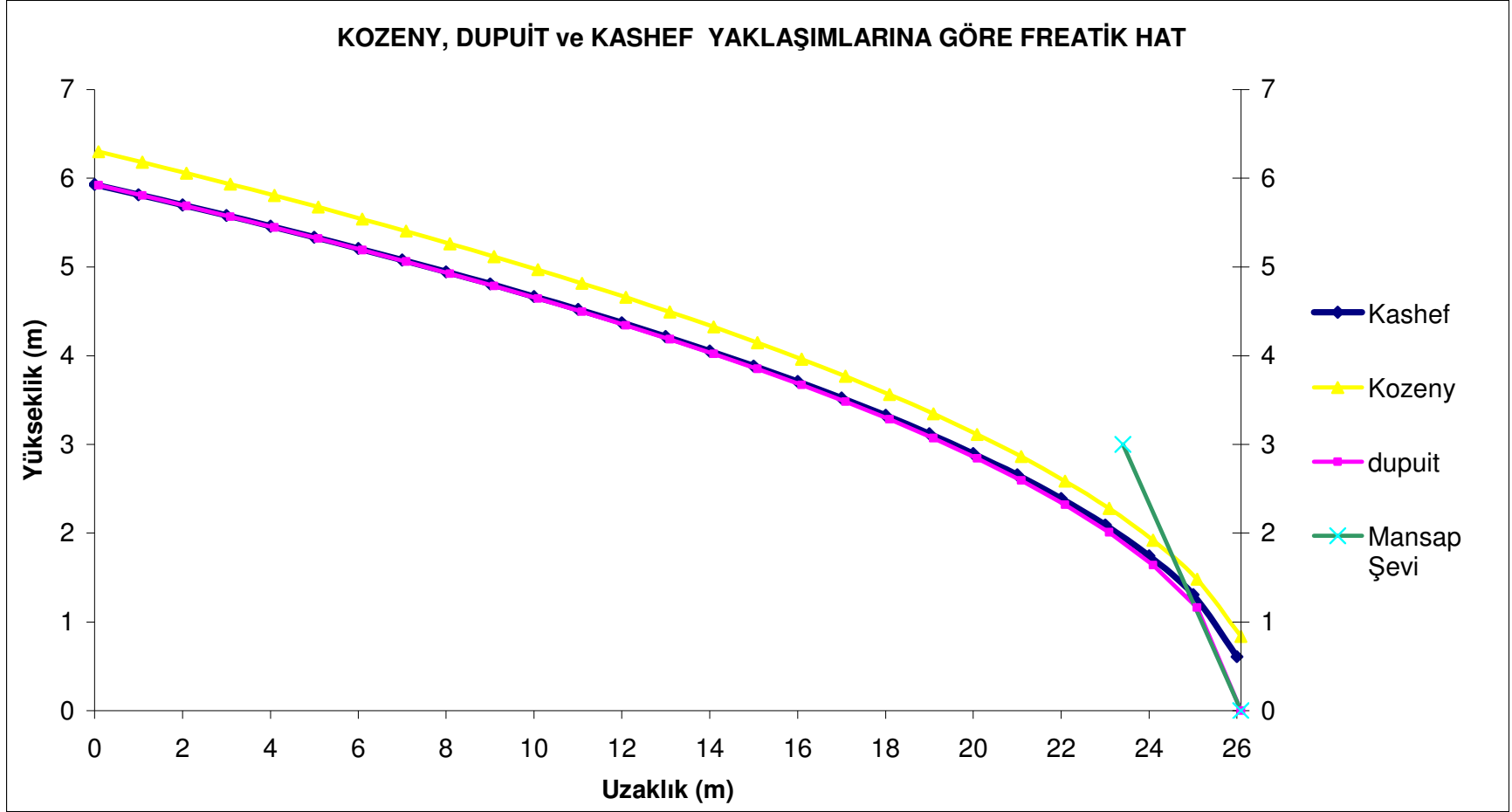
$$D_d = L \cdot \tan \beta - \sqrt{L^2 \tan^2 \beta - \frac{h_u^2}{1 - \frac{2}{3} \sin^2 \beta}}$$

$$D_d = 0,86$$

olarak bulunur.



Şekil 7.3: Kasef yöntemine göre freatik hat



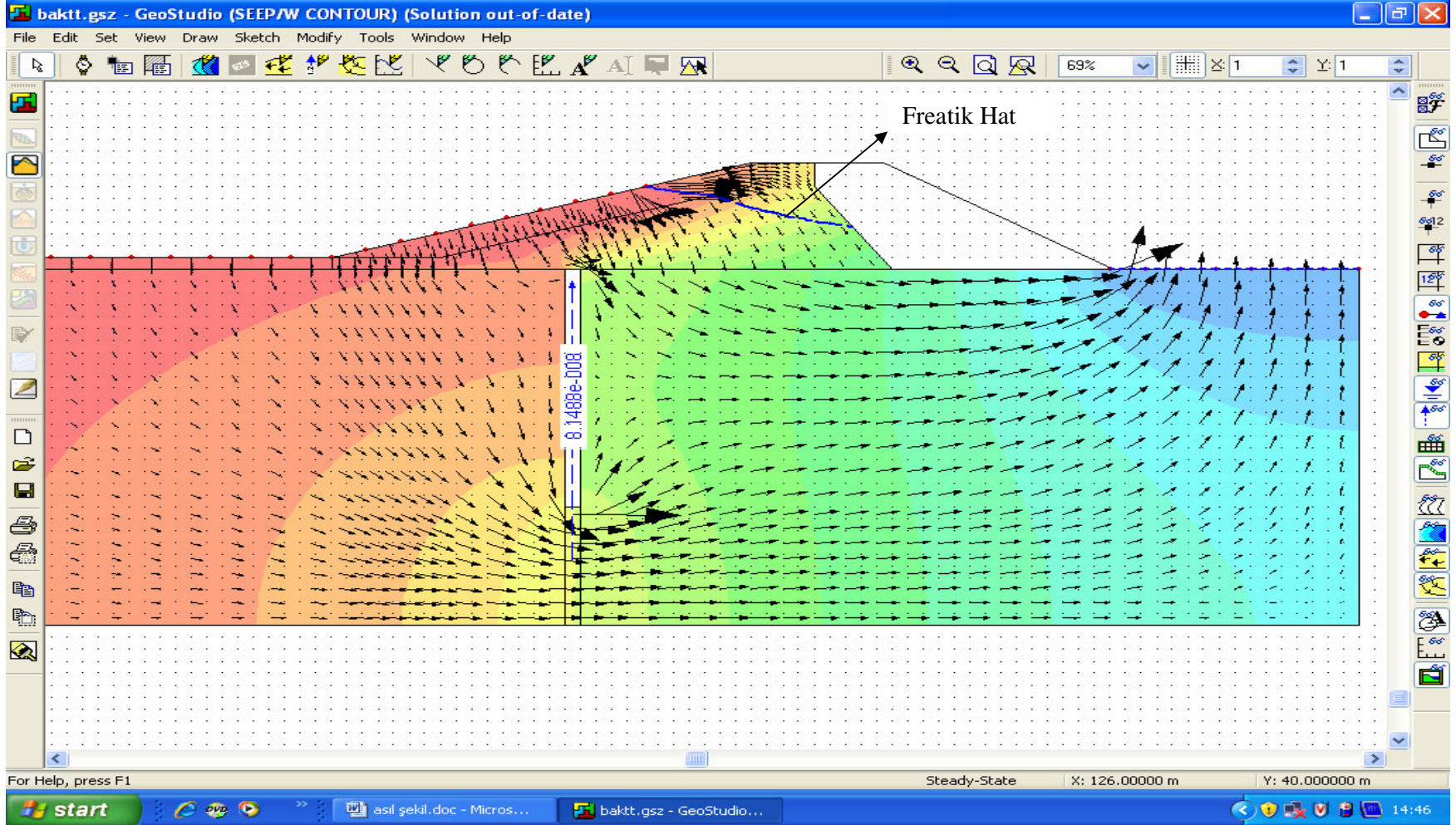
Şekil 7.4: Kozeny, Dupuit ve Kashef yaklaşımlarına göre freatik hattın karşılaştırılması

7.1.4 Su Çıkış Yükseklikleri

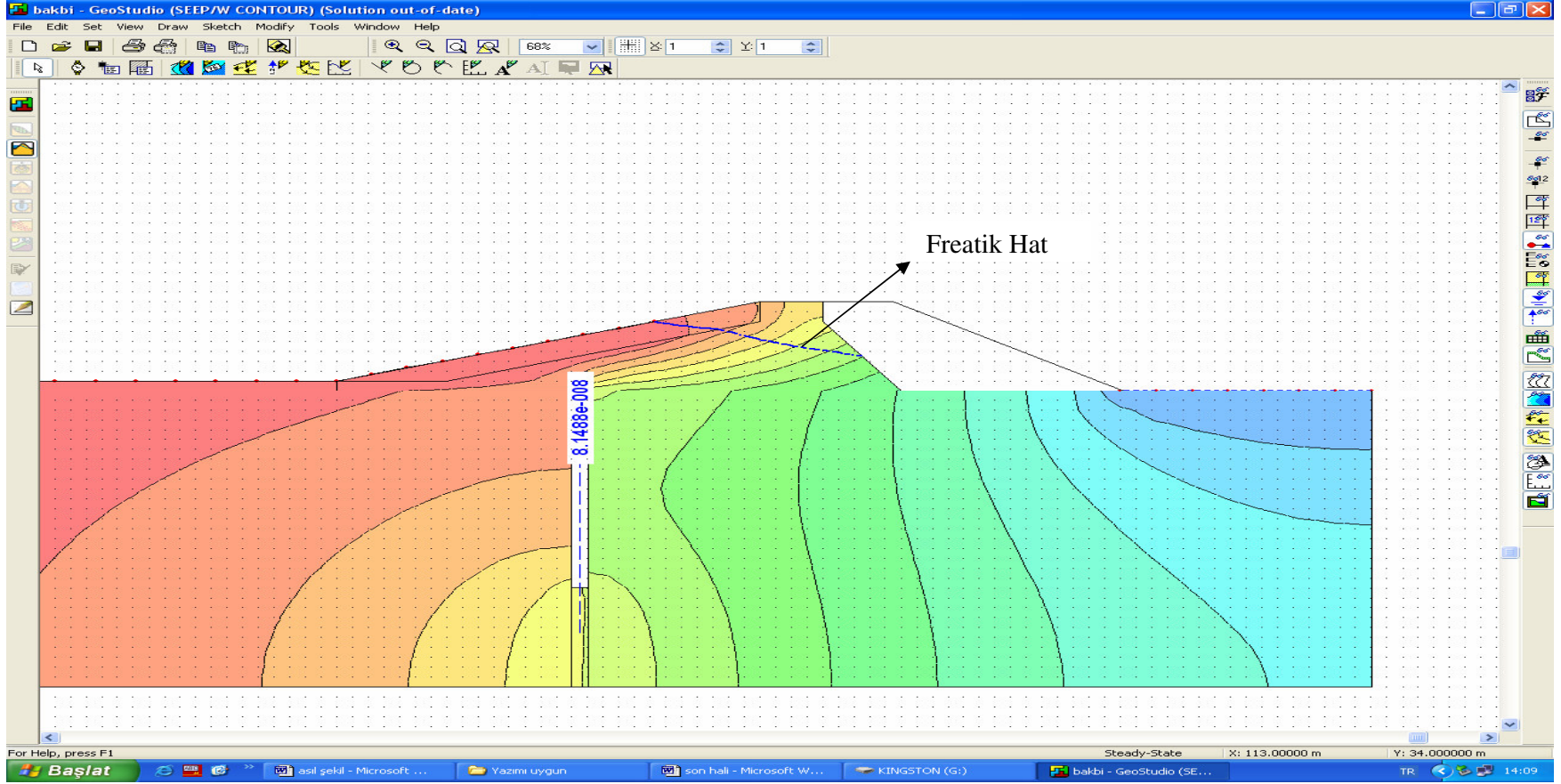
Tablo 7.2: Sızan suyun mansap şevinden çıkış yüksekliği

METOT	Su Çıkış Yüksekliği
Kozeny Parabolü	1,683
Kashef Yaklaşımı	1,378
Dupuit Yaklaşımı	0
Sonlu Elemanlar Yötemi	2,01

Tablo 7.2’ de gösterildiği gibi freatik hattın barajın mansap şevini kestiği noktaların değerleri verilmiştir. Buna göre Dupuit yönteminde su çıkışı olmadığı, sonlu elemanlar yönteminde ise en yüksek noktanın elde edildiği görülmektedir.



Şekil 7.5: Akımın baraj gövdesi ve temelindeki hareketi (akım çizgileri)



Şekil 7.6: Eş potansiyel akım çizgilerinin belirlenmesi

8. SIZAN AKIM HESABI VE UYGULAMALAR

8.1 Kozeny`e Göre Birim Genişlik Debisi

$$q = y.K = 1,000E-07 * 0,75 = 7,5-08 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

$$Q = 2435 \times q = 0,186 \text{ (l/s)}$$

8.2 Dupuit Yaklaşımına Göre Birim Genişlik Debisi

Denklem 4.3 'e göre

$$q = K \frac{H^2 - h_x^2}{2x} = 1,000E-07 * 6,739 = 6,763E-08 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

$$Q = 2435 \times q = 0,167 \text{ (l/s)}$$

8.3 Kashef Yöntemine Göre Birim Genişlik Debisi

$$q = K \frac{h_u^2 - D_d^2 \left(1 - \frac{2}{3} \sin^2 \beta\right)}{2B} = 6,706E-08 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

$$Q = 2435 \times q = 0,166 \text{ (l/s)}$$

8.4 Sonlu Elemanlar Yöntemine Göre Birim Genişlik Debisi

$$q = 8,148E-08 \text{ (m}^3/\text{s}/\text{m)}$$

$$Q = 2435 \times q = 0,198 \text{ (l/s)}$$

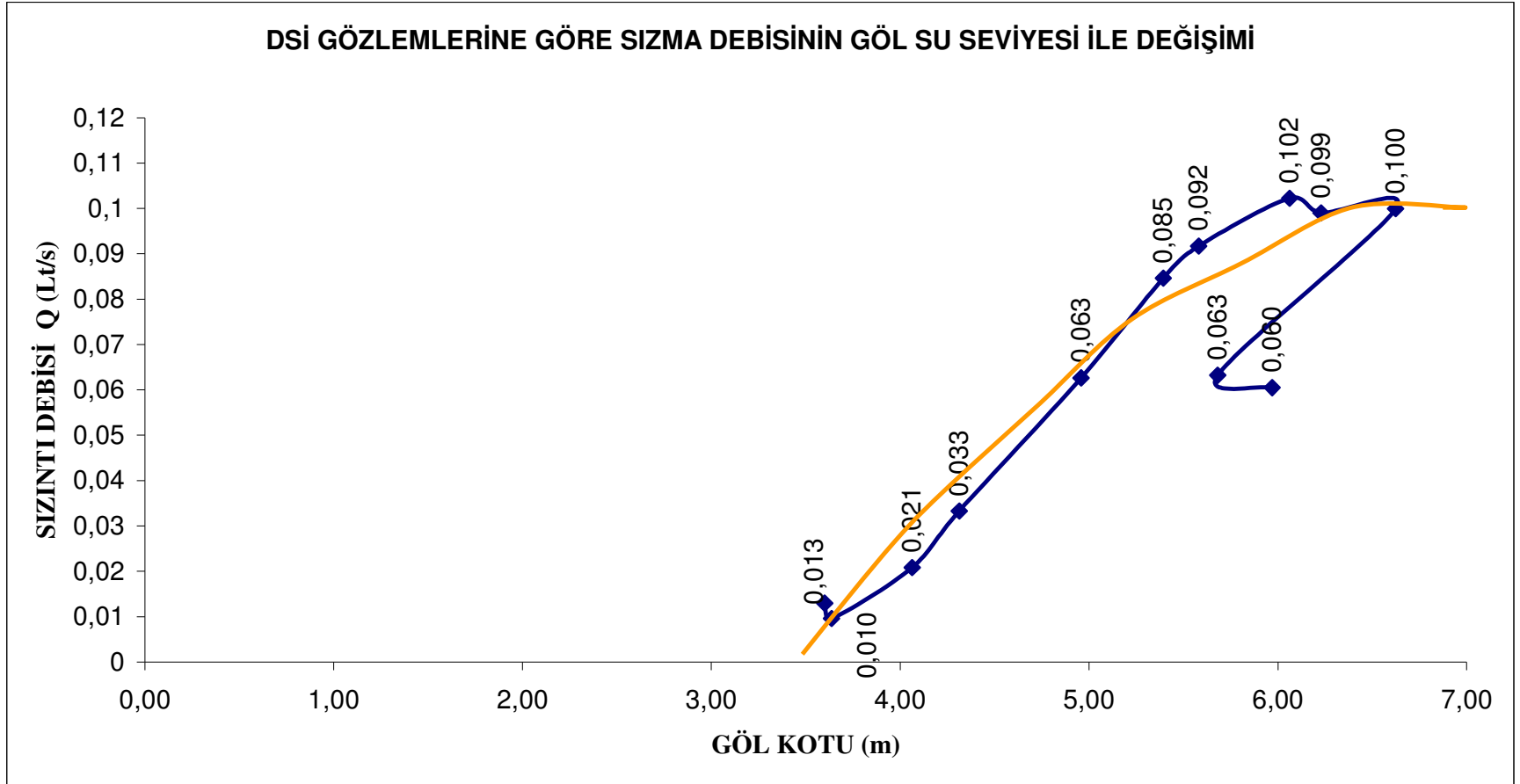
9. HESAPLARIN ÖLÇÜM VERİLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

9.1 Dsi Gözlem Verilerine Göre Su Yüküne İle Sızmanın Değişimi

Tablo 9.1 'de düzenlendiği gibi DSİ 'nin 1992 yılına ait verilerinin aylara göre ortalama değerleri alındığında hazne su seviyesi ile kaçak debisi arasındaki grafik şekil 9.1' deki gibi olur. Grafığe göre max kaçak debisi 0,1 lt/s dir. Grafikte su seviyesi arttıkça kaçak debisi de artmıştır. Ancak bir noktada su seviyesi artığı halde debi azalmaktadır. Bunun sebebi ise bugüne kadar gövde içerisinde herhangi bir iyileştirme uygulaması yapılamadığı için ancak sızıntının taşıdığı malzemeler nedeniyle sızıntı noktasındaki tıkanıklıktan kaynaklanıp su seviyesi arttığı halde kaçak debisinin azalması şekli ifade edilir.

Tablo 9.1: 1992 yılına ait DSİ yapmış olduğu aylık gözlemlerin ortalaması

1992 YILINA AİT SIZMA DEĞERLERİ		
TARİH	Hazne Su Seviyesi (Aylık Ortalama) H (m)	Kaçak Debisi (Günlük Ortalama) Q (Lt/s)
OCAK	5,9693	0,060484
ŞUBAT	5,682	0,063226
MART	6,6234	0,1
NİSAN	6,2287	0,099032
MAYIS	6,062	0,102258
HAZİRAN	5,58	0,091677
TEMMUZ	5,393	0,084677
AĞUSTOS	4,958	0,062677
EYLÜL	4,3129	0,03329
EKİM	4,06322	0,020839
KASIM	3,636	0,009581
ARALIK	3,5996	0,013



Şekil 9.1: Büyükçekmece Barajı'nda çeşitli rezervuar su seviyelerinde ölçülen kaçak su debiler

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Su sıkışmış bir dolgu veya temel toprağı içerisinde hareket ederken sahip olduğı hidrolik basıncı, toprak daneleri arasındaki küçük boşluklarda, akıma direnç gösteren yüzey gerilim kuvvetlerini yenmek için kullanarak sızma şeklinde baraj gövde veya temelinden akmaya çalışır. Barajlarda sızma stabiliteyi kötü yönde etkilediğı için istenen bir durum değildir.

Bir toprak baraj projelendirilirken şevlerin inşaat sırasında ve haznenin işletilmesi süresince kararlı olması, temellerde aşırı oluşacak basınçların önlenmesini, gövdeden meydana gelebilecek fazla sızıntıların kontrolünü, sedde üzerinden suyun aşmasını ve şevlerin erozyona karşı korunması kriterleri göz önüne alınarak yapılmalıdır.

Baraj inşaatı esnasında oluşan sıkışma hataları, labortuvar testlerinin düzgün şekilde yapılmaması, gövdenin dipsavak dolusavak ve yine gövdenin oturduğı yamaçlardaki kontak denilen birleşim bölgelerindeki sıkışmasının iyi yapılmaması ve oluşan farklı oturmalar ile gövde de meydana gelen çatlaklar sonucu sızıntı akımları oluşmaktadır.

Sızıntı hesabı için gövde veya temel içerisinde oluşacak akımlar Darcy ve Laplace deklemleri kullanılarak geliştirilen formüller ve bilgisayar programı desteğıyle daha kısa zamanda gerçeğe uygun sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır.

Yapılan tez çalışmasında Büyükçekmece barajının gövdesindeki kil çekirdekte sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Geo-Studio bilgisayar programı yardımıyla sızma analizleri yapılmıştır. Programın sonuç verileri incelendiğinde gövde üzerinde belirlenen noktalardaki akımın hız dağılımı, akım ağları ve eş potansiyel çizgileri ile gövdenin birim genişlik debisi ve toplam debi değerlerine ulaşılmıştır. Programın avantajları olarak baraj gövdesinde istenen notadaki sızma verilerine ulaşmak mümkündür. Program bize hızlı çözümler sağlayarak barajın şevinde veya zemin permeabilite değerlerinin değiştirilmesi sonucun da oluşacak sızma değerlerinin kısa zaman içerisinde analiz edilmesini sağlar. Bu çalışmada gövde içerisindeki analizlerin yanı sıra baraj temeli içinde grafik ve çözümler yapılarak sistemin bütünlüğü sağlanmıştır. Bölüm 4' te belirtilen metotlar kullanılarak freatik hattın baraj gövdesinden çıkış eğrilerine ve mansap şevini kestiğı değerler elde edilip karşılaştırmalar yapılmıştır. Buna göre su çıkış yüksekliğı en büyük sonlu elmanlar yöntemi değeri olup diğer metodların verilerine yakındır. Dupuit yöntemi ise su çıkışı olmamış gibi sonuç vermiştir. Birim genişlik debisi sonuçlarında da sonlu elemanlar yöntemi, kozeny yöntemi, Kashef yöntemi ve Dupuit yöntemi olarak büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır. Hesaplanan sızma değerlerinin ortalaması sonucu debi 0,179 lt/s olmaktadır.

Büyükçekmece barajı işletmeye açılmasından yaklaşık bir yıl içerisinde gövde mansabının sol sahilin sızmalar görülmüştür. DSI' nin yapmış olduğu gözlem verileri incelendiğinde maksimum sızma g l kotu değeri 6.00 m iken sızma debisi 0,102 lt/s olarak belirlenmiştir. Gözlemlenen debi değeri ile yapılan hesaplar sonucu elde edilen toplam sızma debi değerleri baraj gövdesinde tehlikeli boyutta sızmaların olmadığını göstermekte olup herhangi bir iyileştirme çalışması yapılmasına gerek olmadığı sonucunu vermektedir. Alına gözlem verilerinde sızma debisinin hazne seviyesi ile arttığı ancak bir noktada su seviyesi artarken sızıntı debisinin de azalma olmuştur. Bunun nedeni baraj gövdesinde bir iyileştirme çalışması yapılmaması nedeniyle nacak borulanma olan sızıntı yollarının tıkanması sonucu sızıntı debisi azalmış olabilir.

KAYNAKLAR

- Taft, B. and Speck, S. W. and Bartz, Dick.,** 1999. Dam Safety: Through The earth Dam, *Ohio department of Natural Resources Division of Water Fact Sheet*, 94-31
- Casagrande, L.,** 1932. Naehierungsmethoden zur bestmmung vpn art und menge der sickering dorch geschuettete daemme, Thesis, Technische Hochschule, Vienna, translated by U.S. Corps of Engineers, Waterways Exp. Sta., Vicksburg, Miss.
- Casagrande, A.,** 1937. Seepage Through Dams, J. N. Engl. Water Works Assoc.
- DSİ, Makine İkmal Dairesi Başkanlığı,** 1978. Baraj ve Göletler (Su Biriktirme Yapıları) Cilt 1, DSİ Basım ve Foto-Film İşletme Müdürlüğü Matbaası.
- Iterson, F. K. Th. V.,** 1917, Eenige theoretische beschouwingen over kwel, De Ingenieur.
- Dupuit, J.,** 1863. Etudes théroiques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméable, Dunod, Paris.
- Gilboy, G.,** 1933. Hydraulic-fill dam, Proc., Int. Comm. on Large Dams, Stockholm, Sweden.
- Kashef, A. I.,** 1965. Seepage through Earth Dams, J. Geophys. Res.
- Kashef, A. I.,** 1987. Groundwater Engineering, McGraw-Hill, New York.
- Mishra, G. C., Parida, P. B.,** 2006. "Earth Dam With Toe Drain On An Impervious Base", International Journal Of Geomechanics, Vol. 6, No. 6, 379-388.
- Emiroğlu M.E.,** 1992. Toprak Dolgu Barajlarda Kayma Düzlemlerinin Analitik Olarak Tayini, *Yüksek Lisans Tez*, Frat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Mishra, G. C., Singh, K.,** 2005. "Seepage Through A Levee", International Journal Of Geomechanics, Vol. 5, No. 1, 74-79.
- Pavlovsky, N. N.,** 1931. Seepage through earth dams, Instit. Gidrotekhniki Melioratsii, Leningrad, translated by U.S. Corps of Engineers.
- Polubarinova-Kochina, P. Y.,** 1962. Theory of Groundwater Movement, Princeton University Pres, Princeton.
- Schaffernak, F.,** 1917. Über die Standsicherheit durchlassessiger geschuetteter Damme, Allgem. Bauzeitung.

- Ağırlioğlu, N.**, 2005a. Computational Hydraulics Ders Notları.
- Ağırlioğlu, N.**, 2005. Baraj Planlama ve Tasarımı Cilt 2, Su Vakfı Yayınları.
- Berkün, M.**, 2005. Su Kaynakları Mühendisliği, Birsen Yayınları
- Mesci, B.S.**, 2006. Dolgu Baraj Gövdelerindeki Sızmaların ve Freatik Hattın İncelenmesi: Seferihisar Barajı Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Eynur, Z.**, 2004. Baraj Altındaki Sızmaların Analiz ve Kontrolü: Sazlıdere Barajı Uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Erkek C., Ağırlioğlu, N.**, 2002. Su Kaynakları Mühendisliği, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş.,
- Muhammed, H. G.**, 2004. Effects of Inclined Cut-offs and Foundation Soil on Seepage Flow Beneath a Hydraulic Structure, *PhD Thesis*, İstanbul Technical University, Institute of Science and Technology.
- Özal, K.**, 1967. Küçük Toprak Barajların Planlama, Projelendirme, İnşaat ve İşletme Esasları, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Sulama ve Kurak Bölge Araştırma Laboratuvarı.
- Altan E.**, 1986. Seddelerin Projelendirilmesi ve İnşaatı, *Devlet Su İşleri Matbaası, Ankara.*
- Sungur, T.** 1993. Su Yapıları, Cilt 1, Baraj ve Göletler (Su biriktirme yapıları, teknik rehber), *DSİ Basım ve Foto-Film İşletme Müdürlüğü Matbaası, Ankara.*
- Proje Raporu**, 1988. Büyükçekmece Barajı ve Tesisleri Uygulama Projesi Kesitleri, *(İSKİ-SUIŞ Proje Müh. ve Müh. Ltd. Şti., İstanbul)*
- Demirbaş, S.**, 1988. Şevlerin Dengesi, Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Tobita, T. and Barget, J.P.**, 2002. A Practical Method For Solving Free-Surface Seepage Problem, *Computers And Geotechnics*, 29, 451-475
- Leontiev, A. And Huacasi, W.**, 2001. Mathematical Programming Approach For Unconfined Seepage Flow Problem, *Engineering Analysis Boundary Elements*, 25, 49-56.

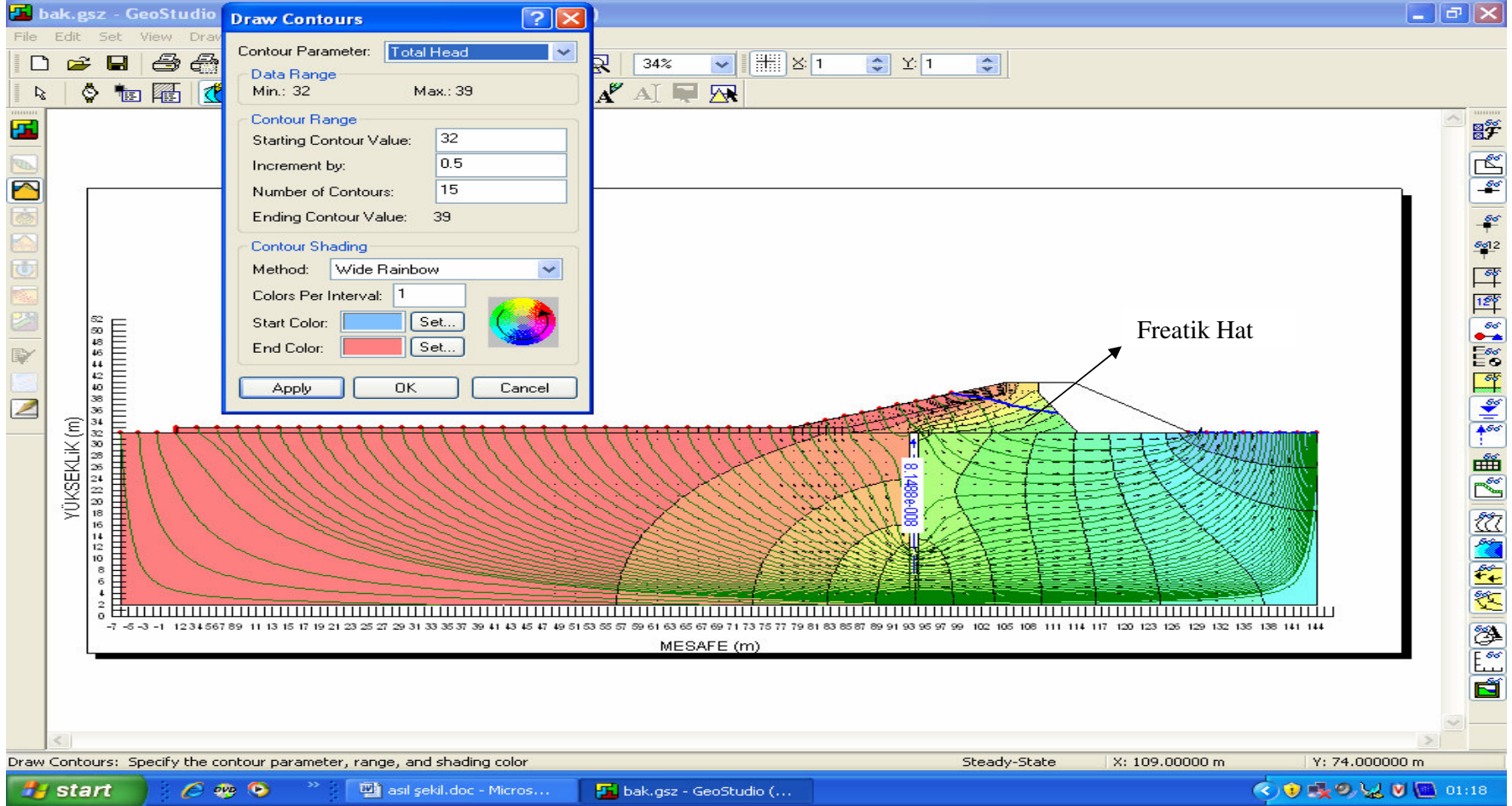
EKLER

EK-A

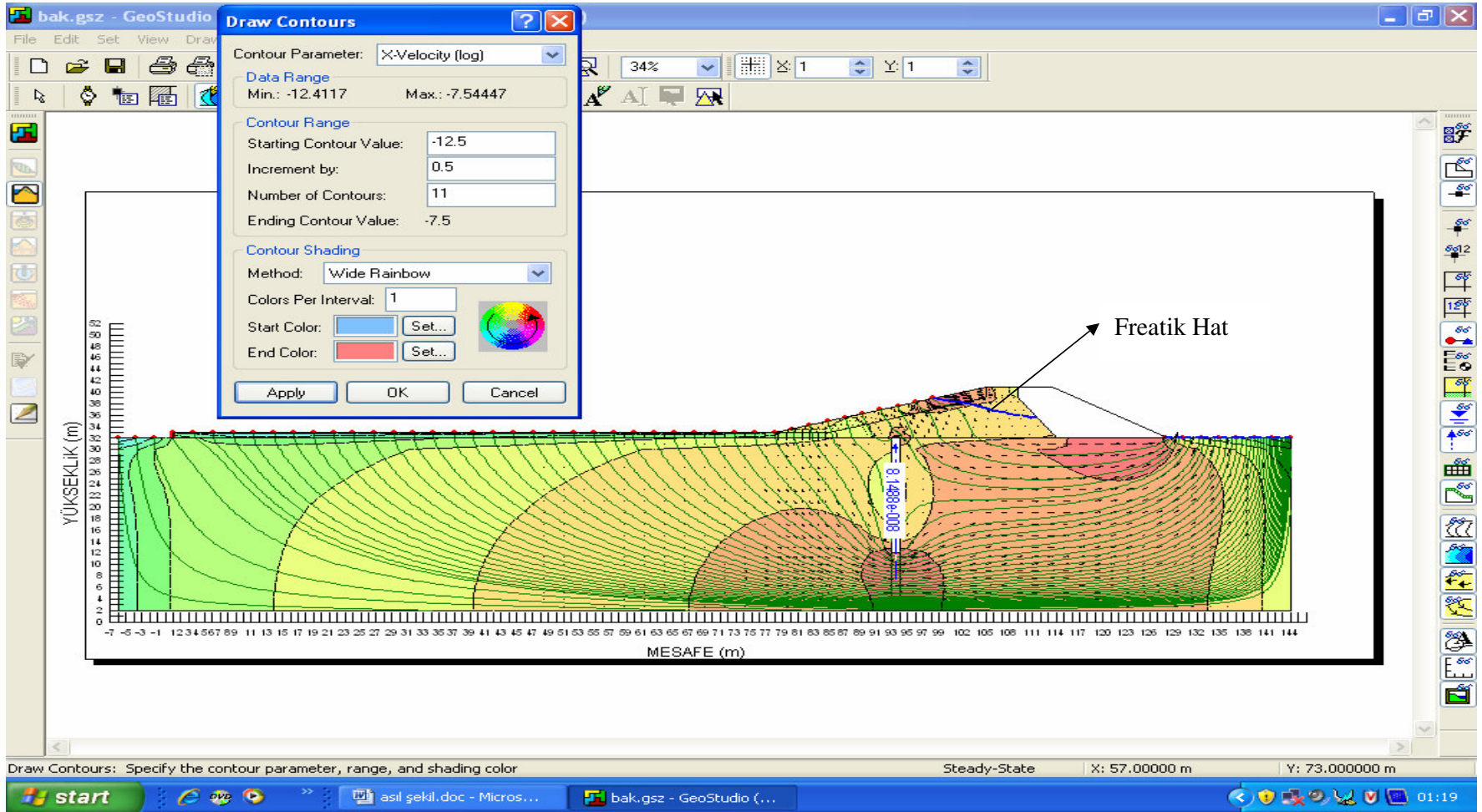
UYGULAMASI YAPILAN BÜYÜKÇEKMECE BARAJININ GEO-STUDIO PROGRAMI İLE ÇÖZÜMÜ SONUCU; FREATİT HAT ÇİZGİSİ, EŞPOTANSİYEL VE AKIM ÇİZGİLERİ, SU YÜKÜ ETKİSİ ALTINDA BASINÇ DAĞILIMI, X DOĞRULTUSUNDAKİ AKIM HIZI VE BİRİM GENİŞLİK DEBİSİ DEĞERLERİ

EK-B

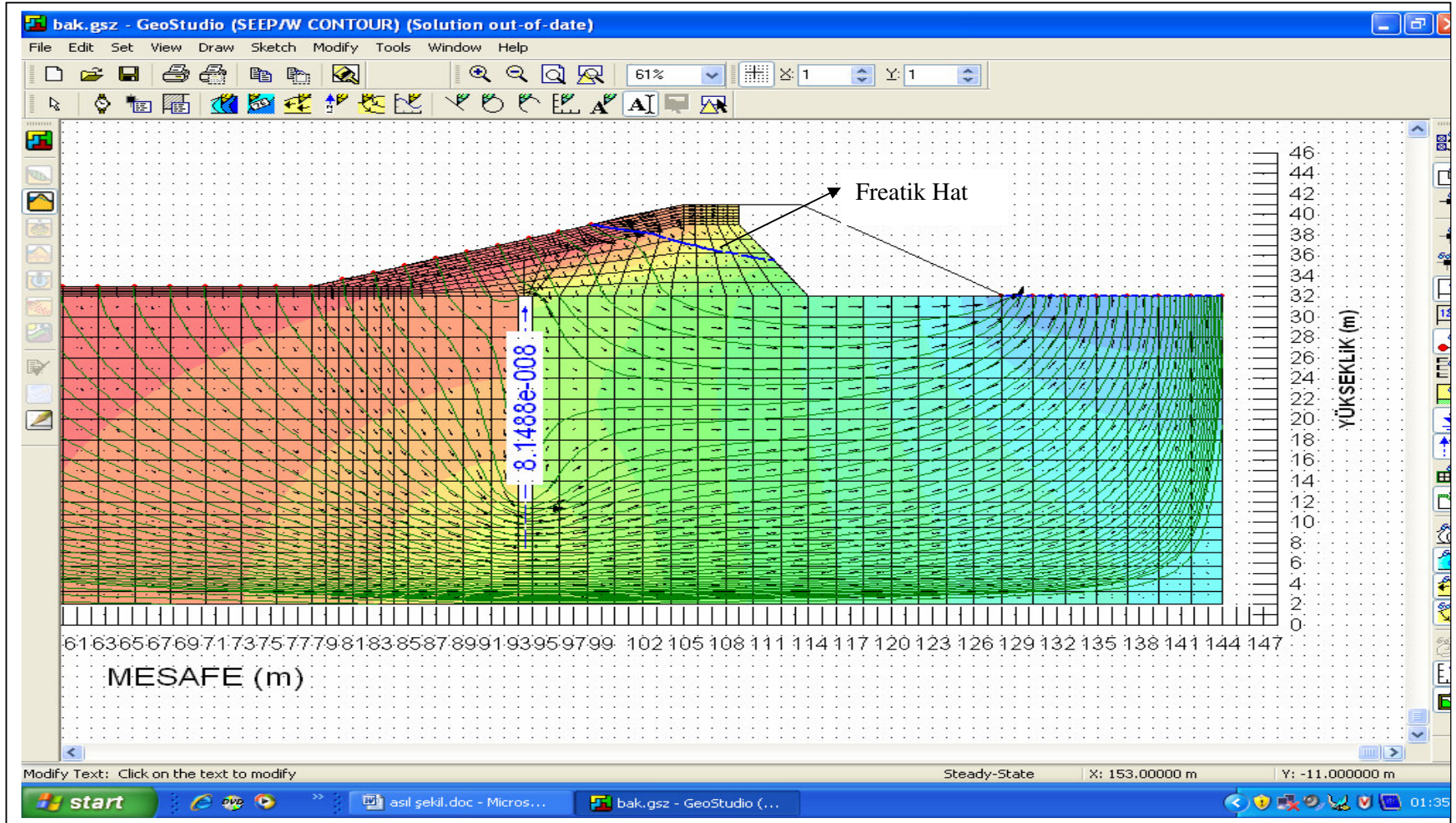
HAZNEDEKİ SU YÜKÜ ETKİSİYLE BELİRLENEN 1-22 NOKTALARI ARASINDAKİ; BASINÇ DEĞİŞİMİ, PERMEABİLİTE DEĞİŞİMİ, HACİM VE AKIM HIZINDAKİ DEĞİŞİM DEĞERLERİ



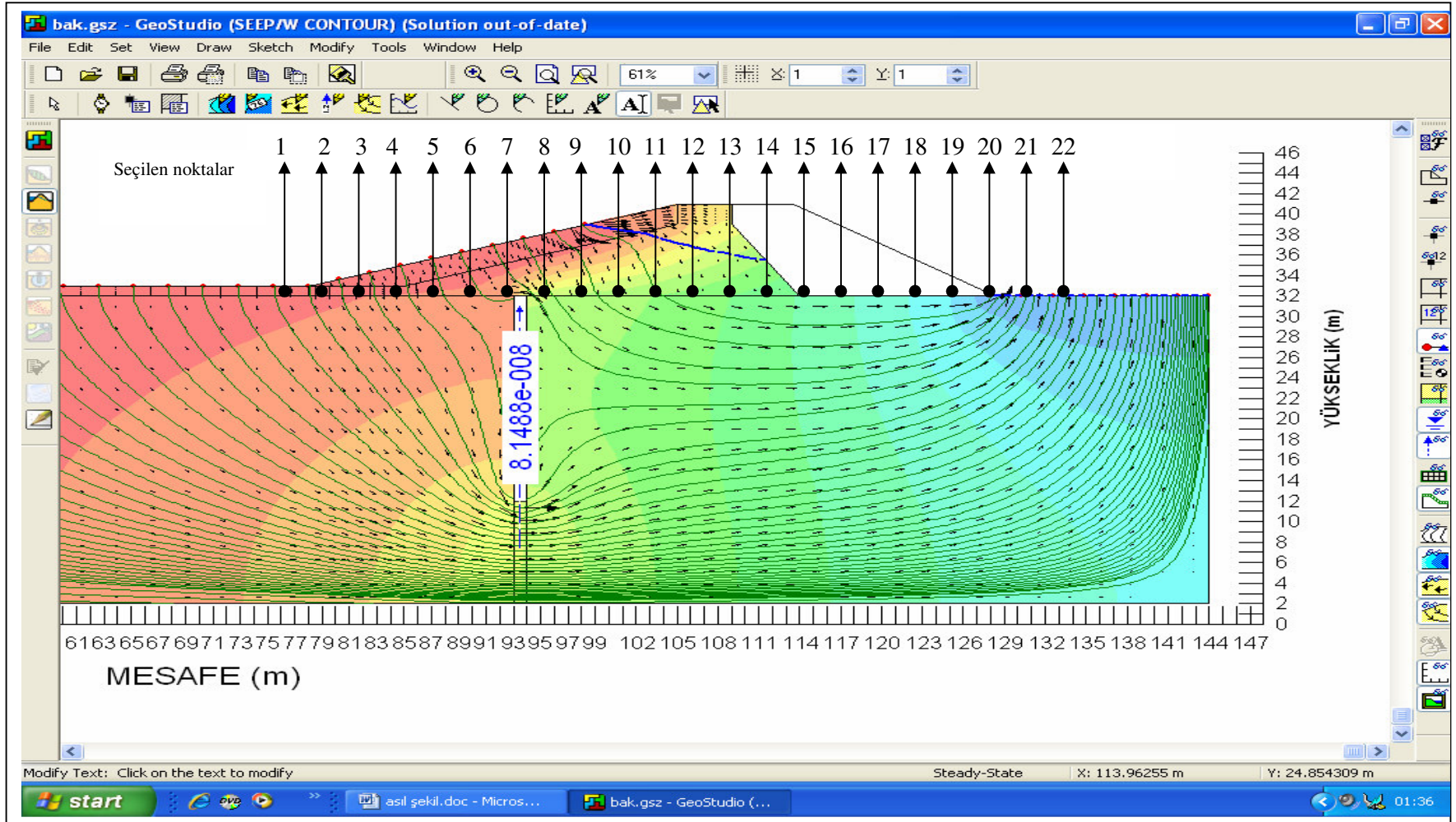
Şekil A.1: Toplam su yükü dağılımı, eş potansiyel çizgileri ve akımın izlediği yol(akım çizgileri)



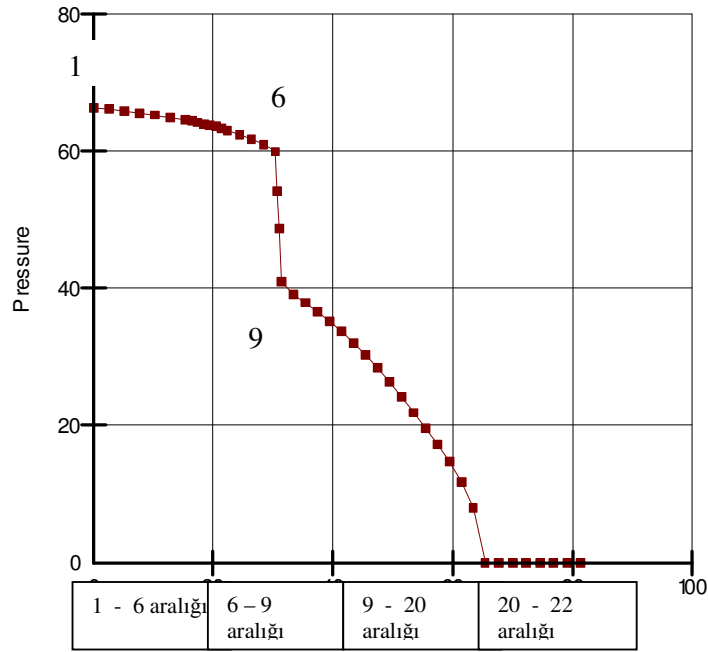
Şekil A.3: X yönünde oluşan akımın hızı ve dağılımı



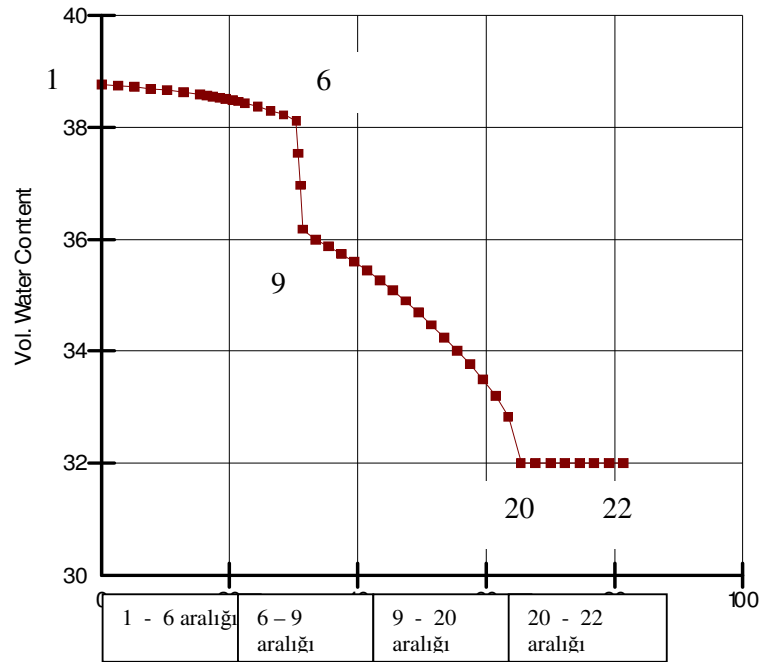
Şekil A.4: Eşpotansiyel çizgileri, akım çizgileri, freatik hat, birim genişlik debisi



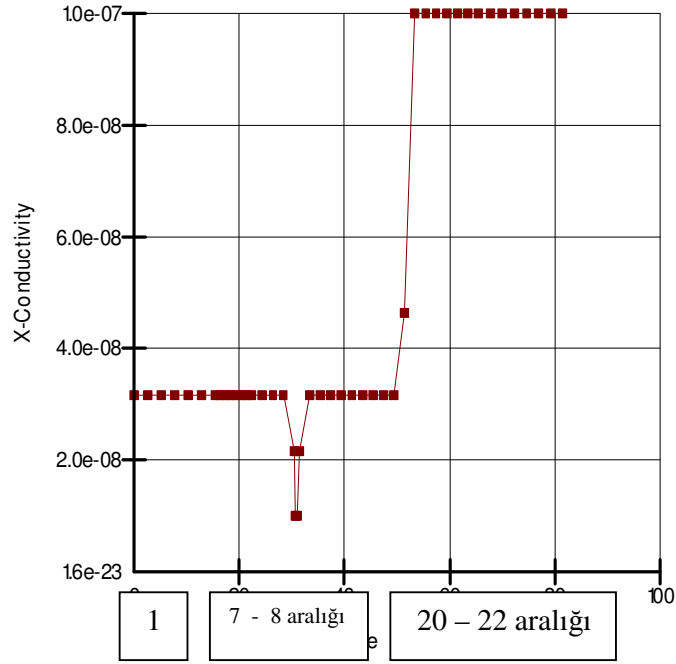
Şekil A.5: Akımın izlediği yol



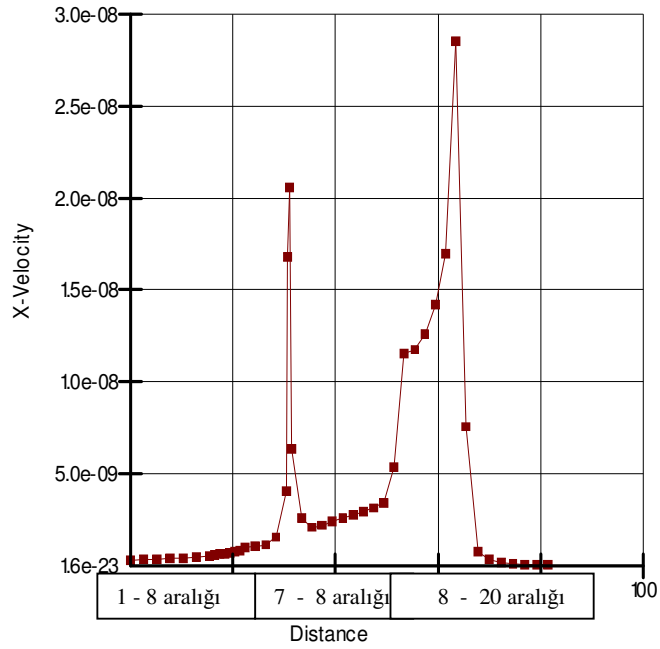
Şekil B.1: Haznedeki su yükü sonucu basıncın mesafe ile değişimi(Şekil A.5' deki 1-22 noktaları arasında)



Şekil B.2: Su hacminin mesafe ile değişimi(Şekil A5' deki 1-22 noktaları arasında)



Şekil B.3: X yönündeki geçirirmliliğin mesafe ile değişimi(Şekil A.5 deki 1-22 noktaları arasında)



Şekil B.4: X yönündeki hızın mesafe ile değişimi(Şekil A.5' deki 1-22 noktaları arasında)

ÖZGEÇMİŞ

Hamdi ÇİLİNGİR 1981 yılında EDİRNE' nin UZUNKÖPRÜ ilçesinde doğdu. İlk orta ve lise öğrenimini EDİRNE'nin İPSALA ve KEŞAN ilçelerin de tamamladı. 2000 yılında başladığı İSTANBUL Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2004 yılında mezun oldu. Bir yıldan beri EREN İNŞAAT TİC. VE SAN.LTD.ŞTİ' inin "EDİRNE-SULTANKÖY SULAMASI İNŞAATI'NDA Şantiye Şefi Yardımcısı olarak görev yapmaktadır.