

**T. C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TOPRAK DOLGU BARAJ GÖVDESİNDEKİ
VE ALTINDAKİ SIZMA OLAYININ
İNCELENMESİ**

Süleyman Bahadır KESKİN

Yüksek Lisans Tezi

DENİZLİ - 2005

**TOPRAK DOLGU BARAJ GÖVDESİNDEKİ
VE ALTINDAKİ SIZMA OLAYININ
İNCELENMESİ**

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tarafından Kabul Edilen
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

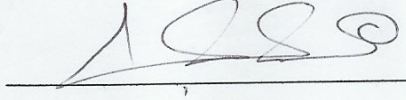
Süleyman Bahadır KESKİN

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 10.08.2005

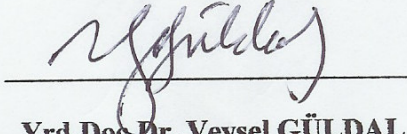
DENİZLİ - 2005

TEZ SINAV SONUÇ FORMU

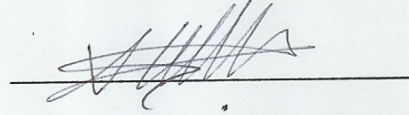
Bu tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.



Yrd.Doç.Dr.Mahmud GÜNGÖR
(Yönetici)



Yrd.Doç.Dr. Veysel GÜLDAL
(Jüri Üyesi)



Yrd. Doç.Dr. A.Cem KOÇ
(Jüri Üyesi)

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet Ali SARIGÖL
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez danışmanlığımı üstlenen, çalışmamın her aşamasında bilgilerinden istifade ettiğim ve yakın ilgisini esirgemeyen değerli hocam **Yrd.Doç.Dr. Mahmud GÜNGÖR** 'e öncelikle teşekkür ederim.

Yrd.Doç.Dr. Veysel GÜLDAL ve **Yrd.Doç.Dr. A. Cem KOÇ**'a çalışmaya yaptıkları katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Arş.Gör. Mahmut FIRAT 'a ve **İnşaat Yüksek Mühendisi Alper BOZTEPE**'ye, arkadaşlarıma ve büyüklerime teşekkür ederim.

Hayatım boyunca, benden maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen, sevgilerini her an hissettiğim aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Süleyman Bahadır KESKİN

ÖZET

Bu çalışmada, öncelikli olarak toprak dolgu baraj gövdesindeki sızmadan dolayı meydana gelen potansiyel ve hız dağılımları incelenmiştir. Bununla birlikte palplanş ve bağlama gibi yapıların altında meydana gelen potansiyel ve hız dağılımları da incelenmiştir.

Skaler alan problemlerinin çözümünde geleneksel olarak kullanılan sonlu eleman yöntemi yardımıyla çeşitli palplanş, bağlama ve toprak baraj modelleri incelenmiştir. Modellerde, kullanılan zeminin ve dolguların gerek geometrik, gerekse hidrolik özellikleri değiştirilerek farklı alternatifler için çözümler yapılmıştır.

Palplanş modelleri hazırlanırken, zeminin hidrolik iletkenlik katsayısı, palplanş boyu değiştirilerek çözüm yapılmıştır.

Bağlama modellerinin hazırlanmasında, bağlama önünde memba blanketi bulunması bağlama altında palplanş bulunması ve bulunmaması durumları göz önüne alınmıştır.

Baraj modellerinin hazırlanmasında, memba yüzeyi betonarme kaplamalı, merkezi kil çekirdekli ve geçirimsiz perdeli tiplerdeki toprak dolgu barajlar göz önüne alınmıştır.

Anahtar Kelimeler : Toprak dolgu baraj, bağlama, palplanş, sızma, sonlu elemanlar, potansiyel ve hız.

Süleyman Bahadır KESKİN

ABSTRACT

In this study, the potential and the velocity distributions due to the seepage inside and under the body of earth dam were investigated priorly. In addition to this, potential and velocity distributions were also investigated under structures like sheetpiles and spillways.

Various sheetpile, spillway and earth dam models were studied by using finite elements method which is used conventionally in field problems. The solutions were made by changing whether geometrical or hydraulic properties of the soils and fillings.

The sheetpile models were prepared by changing coefficient of hydraulic conductivity or by changing the length of the sheetpile.

In modelling the spillway, the situations for the existence of spring blanket behind the spillway and sheetpiles under the spillway has taken into consideration.

The earth dam models were prepared for the earth dam types which are concrete covered spring faced, centrally clay cored and impermeable cored.

Key Words: Earth dam, spillway, sheetpile, seepage, finite elements, potential and velocity.

Süleyman Bahadır KESKİN

İÇİNDEKİLER

Teşekkür	IV
Özet	V
Abstract	VI
İçindekiler	VII
Şekiller Dizini	X
Çizelgeler Dizini	XII
Simgeler Dizini	XIII

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1. GİRİŞ.....	1
---------------	---

İKİNCİ BÖLÜM

YERALTI SUYUNUN HAREKETİ

2. YERALTI SUYUNUN HAREKETİ.....	4
2.1 Darcy Yasası	4
2.1.1 Hidrolik İletkenlik ve Geçirgenlik	9
2.2 Hidrolik Yük (Akışkan Potansiyeli).....	11
2.3 Yeraltı Suyu Akımının Süreklilik Denklemi	13
2.4 Yeraltı Suyu Hareketini İfade Eden Diferansiyel Denklem	15

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

DOLGU BARAJLAR VE SIZMA

3. DOLGU BARAJLAR.....	18
3.1 Genel Bakış.....	18
3.2 Toprak ve Kaya Dolgu Barajlar	18
3.3 Memba Yüzü Betonarme Kaplamalı Kaya Dolgu Barajlar	19

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

GEÇİRİMLİ ORTAMDAKİ SIZMA PROBLEMİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

4. GEÇİRİMLİ ORTAMDA SIZMA OLAYININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ.....	21
4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	21
4.1.1 Sonlu Eleman Yönteminin Üstünlükleri.....	23
4.1.2 Sonlu Eleman Yönteminin Yararları.....	23
4.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması.....	24
4.3 Sızma Probleminin Sonlu Elemanlar Formülasyonu.....	26
4.3.1 Sınır Şartları.....	27
4.3.2 Çözüm Bölgesi.....	29

BEŞİNCİ BÖLÜM

MODELLER VE ANALİZLER

5. MODELLER VE ANALİZLER.....	35
5.1 Modeller.....	35
5.1.1 Palplanş.....	35
5.1.1.1 Palplanş 1.....	37
5.1.1.2 Palplanş 2.....	37
5.1.1.3 Palplanş 3.....	37
5.1.1.4 Palplanş 4.....	37
5.1.2 Bağlama.....	39
5.1.2.1 Bağlama 1.....	40
5.1.2.2 Bağlama 2.....	42
5.1.2.3 Bağlama 3.....	42
5.1.2.4 Bağlama 4.....	43
5.1.3 Baraj.....	44
5.1.3.1 Baraj 1.....	47
5.1.3.2 Baraj 2.....	50
5.1.3.3 Baraj 3.....	52
5.2 Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeler.....	54
5.2.1 Palplanş.....	54
5.2.1.1 Palplanş 1.....	55
5.2.1.2 Palplanş 2.....	57
5.2.1.3 Palplanş 3.....	59
5.2.1.4 Palplanş 4.....	61

5.2.2 Bağlama	68
5.2.2.1 Bağlama 1	69
5.2.2.2 Bağlama 2	71
5.2.2.3 Bağlama 3	73
5.2.2.4 Bağlama 4	75
5.2.3 Baraj.....	82
5.2.3.1 Baraj 1.....	83
5.2.3.2 Baraj 2.....	85
5.2.3.3 Baraj 3.....	87

ALTINCI BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	95
Kaynaklar.....	95
Özgeçmiş	98

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1: Darcy yasasını ifade eden deneysel düzenek	6
Şekil 2.2: Yeraltı suyu akımının makroskobik ve mikroskobik kavramları	7
Şekil 2.3 Darcy'nin yaptığı deneyin genelleştirilmesi	9
Şekil 2.4: Dikdörtgenler Prizması Şeklinde Bir Kontrol Hacmi	14
Şekil 4.1: Birim kalınlıkta iki ayrı sonlu eleman (a) ve düğüm noktalarında birleştirilme işlemi(b)	25
Şekil 4.2: Dolgu barajda sızma ve sınır şartları	27
Şekil 4.3: Bağlama tabanındaki sızma probleminde sınır şartlarının oluşumu	28
Şekil 4.4: Tipik üçgen e _i elemanı	30
Şekil 5.1: Palplanş modeli	36
Şekil 5.2: Palplanş 1, Palplanş 2 ve Palplanş 3 için kullanılan sonlu elemanlar ağı	38
Şekil 5.3: Palplanş 4 için kullanılan sonlu elemanlar ağı.....	39
Şekil 5.4: Bağlama Modeli	39
Şekil 5.5: Bağlama 1 için kullanılan sonlu elemanlar ağı	41
Şekil 5.6: Bağlama 2 için kullanılan sonlu elemanlar ağı	42
Şekil 5.7: Bağlama 3 için kullanılan sonlu elemanlar ağı	43
Şekil 5.8: Bağlama 4 için kullanılan sonlu elemanlar ağı	43
Şekil 5.9: Boşluk suyu basıncı-Hidrolik iletkenlik ilişkisi	45
Şekil 5.10: Baraj dolgusu için seçilen hidrolik iletkenlik ilişkisi	46
Şekil 5.11: Barajın altı için seçilen hidrolik iletkenlik fonksiyonu	46
Şekil 5.12: Barajın kil çekirdeği için seçilen hidrolik iletkenlik fonksiyonu	47
Şekil 5.13: Baraj 1 için sınır şartları ve geometrik özellikler	48
Şekil 5.14: Baraj 1 için kullanılan sonlu elemanlar ağı	49
Şekil 5.15: Baraj 2 için sınır şartları ve geometrik özellikler	50
Şekil 5.16: Baraj 2 için kullanılan sonlu elemanlar ağı	51
Şekil 5.17: Baraj 3 için sınır şartları ve geometrik özellikler	52
Şekil 5.18: Baraj 3 için kullanılan sonlu elemanlar ağı	53
Şekil 5.19: Palplanş 1 için potansiyel dağılımı	55
Şekil 5.20: Palplanş 1 için hız vektörleri	56
Şekil 5.21: Palplanş 2 için potansiyel dağılımı	57
Şekil 5.22: Palplanş 2 için hız vektörleri	58
Şekil 5.23: Palplanş 3 için potansiyel dağılımı	59
Şekil 5.24: Palplanş 3 için hız vektörleri	60
Şekil 5.25: Palplanş 4 için potansiyel dağılımı	61
Şekil 5.26: Palplanş 4 için hız vektörler	62
Şekil 5.27 Palplanş 1 için y=25 m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi.....	64
Şekil 5.28: Palplanş 1 için y=18 m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi	64
Şekil 5.29: Palplanş 2 için y=25 m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi.....	65
Şekil 5.30: Palplanş 2 için y=18 m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi	65
Şekil 5.31: Palplanş 3 için y=25 m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi.....	66
Şekil 5.32: Palplanş 3 için y=18 m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi	66
Şekil 5.33: Palplanş 4 için y=25 m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi.....	67

Şekil 5.34: Palplanş 4 için $y=9$ m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi	67
Şekil 5.35: Palplanş modelleri için yüzeye en yakın düğümlerde potansiyel değerlerinin karşılaştırılması.....	68
Şekil 5.36: Bağlama 1 için potansiyel dağılımı	69
Şekil 5.37: Bağlama 1 için hız vektörleri	70
Şekil 5.38: Bağlama 2 için potansiyel dağılımı	71
Şekil 5.39: Bağlama 2 için hız vektörleri	72
Şekil 5.40: Bağlama 3 için potansiyel dağılımı	73
Şekil 5.41: Bağlama 3 için hız vektörleri	74
Şekil 5.42: Bağlama 4 için potansiyel dağılımı	75
Şekil 5.43: Bağlama 4 için hız vektörleri	76
Şekil 5.44: Bağlama 1 için $y=4.9$ m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi	78
Şekil 5.45: Bağlama 1 için $y=3$ m ve $y=4$ m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi	78
Şekil 5.46: Bağlama 2 için $y=4.9$ m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi	79
Şekil 5.47: Bağlama 2 için $y=4.9$ m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi	79
Şekil 5.48: Bağlama 3 için $y=4.5$ m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi	80
Şekil 5.49: Bağlama 3 için $y=3$ m ve $y=4.1$ m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi	80
Şekil 5.50: Bağlama 4 için $y=4.5$ m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi	81
Şekil 5.51: Bağlama 4 için $y=3$ m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi	81
Şekil 5.52: Bağlama modelleri için yüzeye en yakın düğümlerde potansiyel değerlerinin karşılaştırılması	82
Şekil 5.53: Baraj 1 için potansiyel dağılımı	83
Şekil 5.54: Baraj 1 için hız vektörler	84
Şekil 5.55: Baraj 2 için potansiyel dağılımı	85
Şekil 5.56: Baraj 2 için hız vektörleri	86
Şekil 5.57: Baraj 3 için potansiyel dağılımı	87
Şekil 5.58: Baraj 3 için hız vektörleri	88
Şekil 5.59: Baraj 1 için yüzeye ve sızma hattına en yakın düğümlerde Potansiyel- Yatay uzaklık ilişkisi	89
Şekil 5.60: Baraj 2 için yüzeye ve sızma hattına en yakın düğümlerde Potansiyel- Yatay uzaklık ilişkisi	90
Şekil 5.61: Baraj 3 için yüzeye ve sızma hattına en yakın düğümlerde Potansiyel- Yatay uzaklık ilişkisi	91

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 5.1: Palplanş modellerinde kullanılan değerler.....	36
Çizelge 5.2: Bağlama modellerinde kullanılan değerler.....	40

SİMGELER DİZİNİ

A	Alan
D	İncelenecek bölgenin iç kısmı
e_i	Sonlu eleman gösterimi
g	Yer çekimi ivmesi
h	Piyozemetrik yükseklik
H	Su yükü
i	Hidrolik eğim
i, j, m	Düğüm noktaları gösterimi
k	Permeabilite katsayısı
K	Hidrolik iletkenlik katsayısı
l	Yatay uzunluk
P	Basınç
Q	Debi
q	Birim genişlik debisi
R	İncelenecek bölgenin tümü
S	İncelenecek bölgenin sınırları
v	Özgül debi, sızma hızı
x, y, z	Kartezyen koordinatlar
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Sonlu elemanların her biri için farklı değerdeki sabitler
χ	Eleman etkisi
μ	Dinamik viskozite

ρ	Yoğunluk
Z	Geometrik yükseklik
ϕ	Akışkan potansiyeli

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1. GİRİŞ

Hayatın vazgeçilmez bir parçası olan suya duyulan ihtiyaç, yüzyıllar boyunca insanları suyun biriktirilmesine zorlamış, bu zorunluluk insanların, su kaplarından kuyulara, kuyulardan uçsuz bucaksız baraj göllerine kadar çok farklı haznelerde çok farklı amaçlar için su biriktirmesine sebep olmuştur. İnsanlar, önceleri günlük ihtiyaçlarını giderecek su kapları yaparken, zamanla suya olan ihtiyacın artmasıyla büyük su yapıları yapmaya başlamışlardır. Bu biriktirme yapılardan en önemlisi barajlardır. Günümüzde barajlar, tarım alanlarının zamanında ve verimli bir şekilde sulanması, hidroelektrik enerji üretimi, içme, kullanma ve endüstri için gerekli olan suyun düzenli olarak sağlanması, yerleşim ve tarım alanlarının taşkından korunması gibi pek çok amaçlar için inşa edilmektedir.

Günümüzde su kaynaklarına olan ihtiyacın giderek artması büyük su yapıları inşa edilmesini zorunlu hale getirmektedir. Su yapılarının büyüklüğü arttıkça verebilecekleri zararın da artması, güvenli bir şekilde inşa edilmelerini, işletilmelerini ve hesaplarının daha hassas yapılmasını gerekli kılmaktadır. Birçok mühendislik probleminde zemin içindeki suyun durumunun ve hareketinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Bu problemlerden biri de su tutan dolgu barajların gövdelerinden ve temel zeminlerinden geçen su miktarının tespiti.

Yeraltı suyu terimi, yerin yüzeyi altında bulunan bütün suları tanımlamak için kullanılır. Ancak hidrologlar, yeraltı suyu terimini doymuş bölgedeki suyu tanımlamak için kullanırlar. Tarımsal alanların drenajında ise yeraltı suyu terimi, su tablasının üstündeki kısmî doymuş tabakalardaki suyu ifade eder. Zeminlerdeki suyun hareketi pratikte sıklıkla karşımıza çıkar. Zemin içindeki suyun hareketi, sızma ve yeraltı suyu olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir (Bear ve Verruijt, 1987).

Doğada meydana gelen birçok olay fizik kanunlarıyla tanımlanabilmektedir. Bu fizik kanunları, ele alınan problemin yapısına bağlı olarak cebirsel, diferansiyel veya integral denklemler yardımıyla büyük oranda ifade edilebilirler. Mekanik, termal veya aerodinamik yüklere maruz bir kanaldaki basınç dağılımı, atmosfer veya deniz suyundaki kirleticilerin konsantrasyonunun belirlenmesi, bir baraj gövdesindeki basınç dağılımının veya sızma miktarının belirlenmesi başlıca karşılaşılan problemlerdendir. Böylesi fiziksel olayları ifade eden denklemlerin elde edilmesi zor olmamakla birlikte, elde edilen denklemlerin analitik olarak çözülmesi, ya çok zor yada imkansızdır. Bu nedenle denklemlerin çözümü için bazı yaklaşık yöntemler geliştirilmiştir (Ardıçlıoğlu, 1990).

Bu çalışmada, toprak dolgu bir baraj gövdesindeki ve altındaki sızma olayının modellenmesinde yaklaşık çözüm yöntemlerinden birisi olan ve temelleri 1941 yılında atılan Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır.

İKİNCİ BÖLÜM

YERALTI SUYUNUN HAREKETİ

2. YERALTI SUYUNUN HAREKETİ

Suyun zemin içinde bulunduğu bölge, doymamış bölge ve doymuş bölge olarak ikiye ayrılır. Doymamış bölgede, zeminin gözeneklerinde su ve gaz beraber bulunur. Doymuş bölgede ise, suyun zeminin gözeneklerini tamamen doldurduğu kabul edilir. Doymuş bölgede bulunan su, yeraltı suyu olarak adlandırılır.

Yeraltı suyunun özellikleri şunlardır:

- a) Yeraltı suyu serbest su kütesidir. Yani, suyu zemin danelerine doğru çeken moleküler karakterdeki çekim kuvvetleri yeraltı suyuna etki etmez.
- b) Yeraltı suyu yerçekimi ve basıncın etkisiyle hareket eder.

Yeraltı suları, zeminin birbiri ile irtibatlı gözenekleri içinde hareket ederler. Bu gözenekler, bir boru ağı oluştururlar. Ağın yapısı çok karmaşıktır çünkü, borucukların cidarları çok düzensiz yüzeylerden meydana gelir. Bu konuyu, Jacob çalışmasında “Geçirimli zeminin kanalları tekrar tekrar darlaşır ve genişler, kollara ayrılır, bu kollar, tekrar birleşir” sözü ile ifade etmektedir. Slichter, ağın karmaşık yapısını, “Zeminin meydana getirdiği ağın yapısı çok karmaşıktır. O kadar karmaşıktır ki, bir noktada, sıvı zerresinin istediği doğrultuda hareket edeceğini düşünebiliriz” diye ifade etmektedir.

Bu açıklamalardan anlaşıldığı üzere, gözeneklerin meydana getirdiği borucukların cidarlarını matematik bağıntılarla ifade etmenin güçlüğü apaçık ortadadır. Bundan dolayı zeminin gözeneklerinin meydana getirdiği boru ağında hareket eden akışkan zerresi için sınır şartlarını yazmak imkansız denecek kadar zor ve karmaşıktır.

Sınır şartları ifade edilemediği için de, yeraltı suyu akımı Navier-Stokes ve süreklilik denklemlerinden oluşan denklem takımı ile incelenemez. Bu sebeplerden dolayı, yeraltı suyu akımı 1856 yılına kadar rasyonel bir şekilde analiz edilememiştir (Omay, 1975).

Yeraltı suyu akımı, geçirimli zeminin komplike yapısı içerisinde meydana gelen viskoz bir sıvı akımıdır. Suyun sıkışmaz bir akışkan olduğu kabul edildiğinde; Navier-Stokes ve süreklilik denklemlerinin yeraltı suyu hareketinin izahına yeterli olduğu ilk bakışta düşünülebilir. Belli bir problemi çözmek için sınır şartlarını da bu diferansiyel denklemlere ilave etmek gerekir. Olayları mikroskobik görüşle açıklayan bu denklemlerin, yeraltı suyu problemlerine uygulanmasında ise ilk zorluk sınır şartlarının ifadesinde ortaya çıkmaktadır. Sınır şartlarının ifadesi, diferansiyel denklemleri çözmek için gerekli ilk adım olduğuna göre, yeraltı suyu hareketini de Navier-Stokes, süreklilik ve sınır şartlarından ibaret olan ve olayları mikroskobik görüşle açıklayan diferansiyel denklem takımı ile açıklamak şimdilik imkansız gibi görünmektedir.

Diğer taraftan; yeraltı suyu hareketini mikroskobik görüşle açıklayabilsek bile; bulacağımız değerler pratik bakımından faydalı olmayacaktır. Çünkü; pratikte ortalama değerler hidrolik olayların izahına yetmemektedir. Şu halde; yeraltı suyu hareketini izah etmek için akışkanlar mekaniğinin denklemleri dışında bir bağıntıya ihtiyaç vardır (Omay, 1977).

2.1 Darcy Yasası

Yeraltı suyu hidrolojisinin bir nicel bilim olarak doğuşu 1856 yılında Henry Darcy isimli Fransız bir hidrolik mühendisinin Fransa'nın Dijon kentinin su bilançosu raporunu hazırlamasıyla başlar. Darcy, bu raporda, kumlarda suyun akışını inceleyen bir laboratuvar deneyi tanımlamış ve deney sonuçlarını kendi adını taşıyan amprik yasa şeklinde genelleştirmiştir(Freeze ve Cherry, 2003).

Yeraltı sularının hareketi yüzey sularından farklıdır. Yeraltı suları zikzaklı, kesitleri farklı ve birbirleriyle bağlantılı kanallardan akar. Bu nedenle, yeraltı sularının gerçek hızlarını ölçmek de mümkün değildir. Arazide ve laboratuvarında ölçülen hız, görünür hız olarak tanımlanmaktadır.

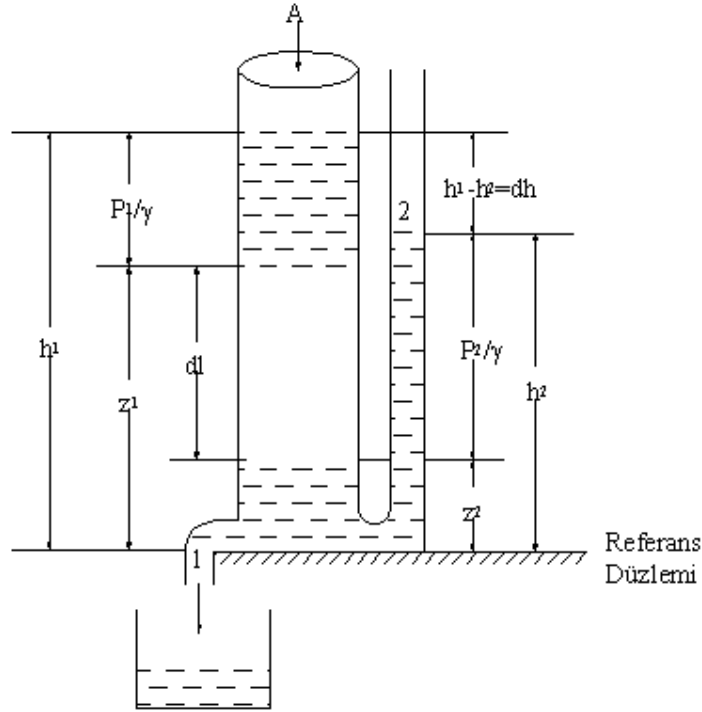
Yeraltı suları, basınç farklarının meydana getirdiği yüksek enerji seviyelerinden daha düşük enerji seviyelerine doğru akar. Yeraltı suları akarken dar kanalların yüzeylerine sürtünerek enerjilerinin bir kısmını kaybeder. Birim mesafede kaybettikleri enerjiye hidrolik eğim denir. Hidrolik eğim, kum gibi daneli malzemeler içinde akım hızıyla doğru orantılıdır. Yeraltı sularının hızları ile hidrolik eğimleri arasındaki doğrusal ilişkiye Darcy yasası denir. Darcy, deneylerinde, akan suyun debisinin (Q) enerji kaybıyla doğru, kumun kalınlığıyla ters orantılı olduğunu tespit etmiştir (Güngör, 1989).

Şekil 2.3’de gösterilen deney düzeneği incelenirse, enine kesit alanı A olan silindir, kumla dolu ve iki ucu da tıpalıdır. İki adet manometrenin yerleştirildiği silindirin bir ucunda su giriş tüpü, diğer ucunda su çıkış tüpü bulunmaktadır. Silindir içine, tüm gözenekler suya doymuş hale gelinceye ve giriş debisi Q , çıkış debisine Q eşit olana kadar su verilmektedir. $z=0$ gibi keyfi bir referans düzlemine göre, manometre girişleri z_1 ve z_2 , tüplerdeki akışkanın yükseklikleri h_1 ve h_2 ’dir. Manometre girişleri arasındaki mesafe Δl ’dir.

Silindir içindeki özgül debi, v

$$v = Q / A \quad (2.1)$$

olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.1: Darcy yasasını ifade eden deneysel düzenek

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

$$v = -K(\Delta h / \Delta l) \quad (2.2)$$

şeklinde veya

$$v = -K(dh / dl) \quad (2.3)$$

diferansiyel formunda yazılabilir. (2.3) eşitliğinde h ; hidrolik yük ve dh/dl ; hidrolik eğim olarak adlandırılır. K bir oransallık sabitidir. Silindir içindeki hidrolik eğimi sabit tutulduğunda K zeminin bir özelliği olmaktadır. Bu halde özgül debi zemin cinsine göre değişir. Başka bir ifadeyle, dh/dl sabit tutulursa, v ile K doğru orantılı olacaktır. Bu durumda K parametresi hidrolik iletkenlik olarak adlandırılır. K değeri, kum ve çakıllarda yüksek olduğu halde, çoğu kayalarda ve killerde düşüktür. Δh ve Δl 'nin

birimleri uzunluk [L] olduğundan (2.2) bağıntısından hareketle K'nın boyutunun hız boyutu nda [L/T] olduğu görülmektedir.

Darcy yasasının alternatif bir şekli (2.1) eşitliği ile (2.3) eşitliği bileştirilerek elde edilebilir.

$$Q = -K(dh/dl)A \quad (2.4)$$

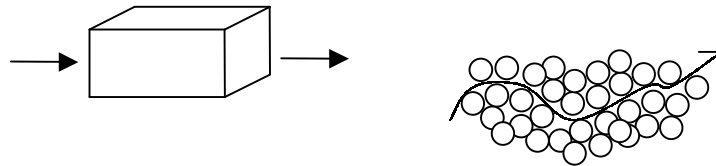
Bu eşitlik daha da kısaltılarak,

$$i = - dh/dl \quad (2.5)$$

$$Q = -KiA \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir. (2.5) denkleminde, dh/dl'nin önüne (-) işareti konmasının sebebi, yük kaybını ifade etmesindedir. (dh/dl) mutlak değer oranına hidrolik eğim denir ve (i) ile gösterilir.

Darcy yasası uzayda herhangi bir yöndeki yeraltı suyu akışı için geçerlidir. Şekil 2.1'e ve (2.3) eşitliği esas alınarak, deney düzeneğinin Şekil 2.3'teki gibi düşeyle bir θ açısı yaptığı göz önüne alınırsa; hidrolik eğim (dh/dl) ve hidrolik iletkenlik (K), sabit tutulduğunda; özgül debi (v), θ açısından bağımsız olmaktadır. Su akışı yerçekiminin aksi yönde, silindirin yukarısına doğru olduğu zaman (θ açısı 90° 'den büyük olduğunda), bile özgül debi (v), θ açısından bağımsız olmaktadır.



Şekil 2.2: Yeraltı suyu akımının makroskobik ve mikroskobik kavramları

Özgül debi v hız boyutuna sahip olduğundan, Darcy hızı olarak da adlandırılabilir ve bir makroskobik kavram olduğundan kolaylıkla ölçülebilir. Özgül debinin, su partiküllerinin akışları sırasında karşılaştıkları kum partiküllerinin etrafını dolaşırken, (Şekil 2.2) oluşturdukları mikroskobik hızdan farklı olduğuna dikkat edilmelidir. Mikroskobik hızlar gerçek hızdır ancak, ölçülmeleri imkansızdır (Freeze ve Cherry, 2003).

Şekil 2.1'deki hidrostatik denge hali, enerjinin korunumu kanununa göre Bernoulli denklemi şeklinde yazılabilir:

$$Z_1 + (P_1 / \gamma) + (v_1^2 / 2g) = Z_2 + (P_2 / \gamma) + (v_2^2 / 2g) \quad (2.7)$$

Kum içinde v_1 , v_2 hızları eşit olup, ihmal edilecek kadar küçüktür. Yeraltı suları akımının potansiyel akım teorisine uyduğu kabul edildiğinden (2.7) denklemi (2.8) denklemi şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$h = Z - (P / \gamma) + \text{sabit} \quad (2.8)$$

Burada:

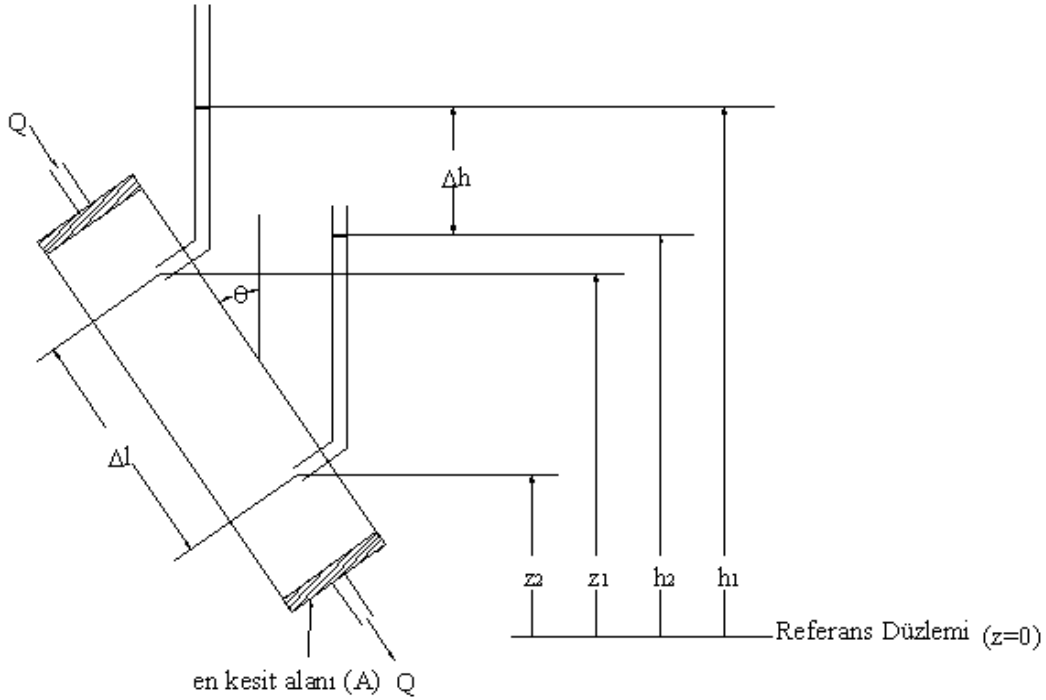
h ; Yeraltı su seviyesi (piyezometrik seviye) olarak tanımlanır. (2.4) bağıntısı (2.9) denklemi şeklinde yazılabilir:

$$Q/A = K i = -K dh/dl \quad (2.9)$$

Q/A : Birim zamanda, birim alandan geçen su miktarıdır. Hız boyutunda olan bu büyüklük sızma hızı diye adlandırılır. Bu büyüklük (q) ile gösterilir ve (2.8) bağıntısı ile (2.9) bağıntısı birleştirilirse;

$$q = Ki = -K d(z + P/\gamma)/dl \quad (2.10)$$

bağıntısı elde edilir (Güngör, 1989).



Şekil 2.3 Darcy'nin yaptığı deneyin geliştirilmesi

Darcy yasası ampirik bir yasa olup sadece deneysel ispata dayanmaktadır. Darcy yasasını daha temel fiziksel yasalardan türetmek için pek çok çalışma yapılmıştır. Bear, bu çalışmaların tamamını incelemiş, en doğru yaklaşımların, akışkanlar mekaniğinde çok iyi bilinen Navier-Stokes denklemlerinin, gözenekli ortamdaki akıma uygulanması ile ilgili çalışmalar olduğu şeklinde ifade etmiştir. Hubbert ve Irmay bu tür çalışmaları yapan ilk araştırmacılardandır (Freeze ve Cherry, 2003).

2.1.1 Hidrolik İletkenlik ve Geçirgenlik

Hubbert'in işaret ettiği gibi, Darcy yasasının hidrolik iletkenlikte artık evrenselleşmiş olan oransallık sabiti, sadece gözenekli ortamın bir fonksiyonu olmayıp, aynı zamanda akışkanın da bir fonksiyonudur. Deney düzeneğinde aynı kumun kullanılması halinde, Δh ve Δl 'nin sabit tutulduğu iki değişik deneyden birincisinde akışkan olarak su, ikincisinde ise, pekmez kullanılırsa, ikinci deneydeki özgül debinin birinci deneydekinden daha düşük olduğu görülecektir. Bu gözlemin ışığında, gözenekli

ortamın iletkenlik özelliklerini içinden akan akışkandan bağımsız olarak tanımlayacak bir parametrenin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu amaca yönelik olarak, d çapındaki üniform cam boncuklardan oluşan ideal bir gözenekli ortamda deneyler yapılmış, dh/dl sabit hidrolik eğimi altında düzenekte değişik yoğunluk (ρ) ve dinamik viskozitedeki (μ) akışkanların akması halinde aşağıdaki oransallık ilişkileri elde edilmiştir.

v ile d^2 doğru orantılı

v ile ρg doğru orantılı

v ile μ ters orantılı

Darcy'nin orijinal gözlemindeki $-dh/dl$ ile v doğru orantılı olup, bu üç eşitlikle birlikte değerlendirilirse Darcy yasasının bir yeni versiyonu olan,

$$v = -\frac{Cd^2 \rho g}{\mu} \frac{dh}{dl} \quad (2.11)$$

bağıntısı bulunur. Bağıntıdaki C bir diğer oransallık katsayısıdır. Bu katsayı, gerçek zeminlerde ortalama dane çapından başka, dane boyu dağılımı, danelerin yuvarlaklığı ve küreselliği ile sıkışma biçimleri gibi diğer ortam özelliklerini de yansıtmaktadır.

(2.14) eşitliği, orijinal Darcy yasasını tanımlayan (2.3) eşitliği ile karşılaştırılırsa

$$K = \frac{Cd^2 \rho g}{\mu} \quad (2.12)$$

denklemini elde edilir. Bağıntıdaki ρ ve μ akışkanın; Cd^2 de ortamın özellikleridir.

$$k = Cd^2 \quad (2.13)$$

tanımlaması yapılırsa,

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (2.14)$$

bağıntısı elde edilir. Buradaki k , özgül ve gerçek geçirgenlik olarak adlandırılır. K , hidrolik iletkenlik olduğundan, k katsayısını da geçirgenlik olarak adlandırmak daha uygun olmaktadır.

2.2 Hidrolik Yük (Akışkan Potansiyeli)

Akış ile ilgili fiziksel süreçlerin analizinde genellikle potansiyel eğimin bilinmesi gereklidir. Sözelimi; katılardaki ısı akışının, yüksek sıcaklık derecelerinden düşük sıcaklık derecelerine ve devrelerdeki elektrik akımının da, yüksek voltajdan düşük voltaja doğru olduğu bilinmektedir. Bu süreçler için sıcaklık derecesi ve voltaj, potansiyel miktarlar olup, ısı ve elektrik akış oranları bu potansiyel eğimler ile doğru orantılıdır. Gözenekli ortamda sıvı akışını kontrol eden potansiyel eğimin Hubbert tarafından yeraltı suyu akışını ele alan eserinde dikkatlice irdelenmesi, bir avantajdır.

Hubbert, potansiyeli “uzayda yöne bağımlı olmayan, akış miktarının yüksek değerlerdeki bölgelerden daha düşük değerlere doğru olduğu, akış sistemi içinde herhangi bir noktada ölçülebilen bir büyüklük” olarak tanımlamaktadır. Darcy deneyinde (Şekil 2.3) manometrelerdeki su seviyeleri ile ifade edilen hidrolik yük h , bu tanımlamayı karşılar gibi görünmektedir; ancak, bu durum; Hubbert’in de işaret ettiği gibi “daha ileri bir araştırma yapmadan bunu ampirik olarak kullanmak aynen sıcaklığın fiziksel olarak ne anlama geldiğini bilmeden termometredeki civa kolonunun yüksekliğini okumaya benzer”.

Potansiyel büyüklük için iki muhtemel bileşen, geometrik kot ve akışkan basıncıdır. Darcy düzeneğindeki silindirin düşey konuma getirilmesi halinde ($\theta = 0$) silindirdeki akış, yerçekimine bağlı olarak aşağı doğru (yukarı kottan düşük kota doğru) olurdu.

Diğer taraftan, silindirin yatay konumda olması ve yerçekimi etkisinin akışta devre dışı kalması halinde ($\theta = 90^\circ$) silindirdeki akış ancak bir uçta basıncın yükselip diğer tarafta düşmesi durumunda gerçekleşecektir. Tek başına ne geometrik kot ne de basınç yeterli bir potansiyel oluşturmaktadır; ancak ikisi beraber toplam potansiyel miktarını belirlemektedir.

Potansiyel miktarın anlaşılmasında en iyi yol, akış sürecindeki enerji ilişkilerini incelemektir. Matematikçi ve fizikçilerin klasik potansiyel tanımı, akış süreci sırasında yapılan iştir. Akış sistemi içinde iki nokta arasında hareket eden akışkanın birim kütlede yapılan iş ise, birim kütledeki enerji kaybının bir ölçüsüdür.

Gözenekli ortamlarda sıvı akışı mekanik bir süreçtir. Akışkanı hareket ettirmeye zorlayan kuvvetler, hareket halindeki akışkan ile gözenekli ortamın taneleri arasındaki sürtünme kuvvetlerinden büyük olmalıdır. Bu nedenle, akımla birlikte sürtünmeden dolayı mekanik enerjiden ısı enerjisine tersinmez (geri dönüşü olmayan) bir dönüşüm gerçekleşir. Bu yüzden, uzaydaki akışın yönü, akışkanın birim kütle başına mekanik enerjisinin yüksek olduğu bölgelerinden düşük olduğu bölgelerine doğru olmalıdır. Burada, akış sisteminde herhangi bir noktada birim kütle başına mekanik enerji, akışkanın birim kütle başına bir noktadan diğerine taşımak için gerekli iş olarak tanımlanabilir. Açıkça görüldüğü gibi, bu durumda Hubbert'in potansiyel tanımına (akışın yönü bakımından) ve klasik tanıma (yapılan iş bakımından) uymayan bir fiziksel büyüklük ortaya çıkmaktadır. Gözenekli ortamdaki akışkan potansiyeli, işte bu sebepten dolayı akışkanın birim kütle başına mekanik enerji miktarıdır (Freeze ve Cherry, 2003).

2.3 Yeraltı Suyu Akımının Süreklilik Denklemi

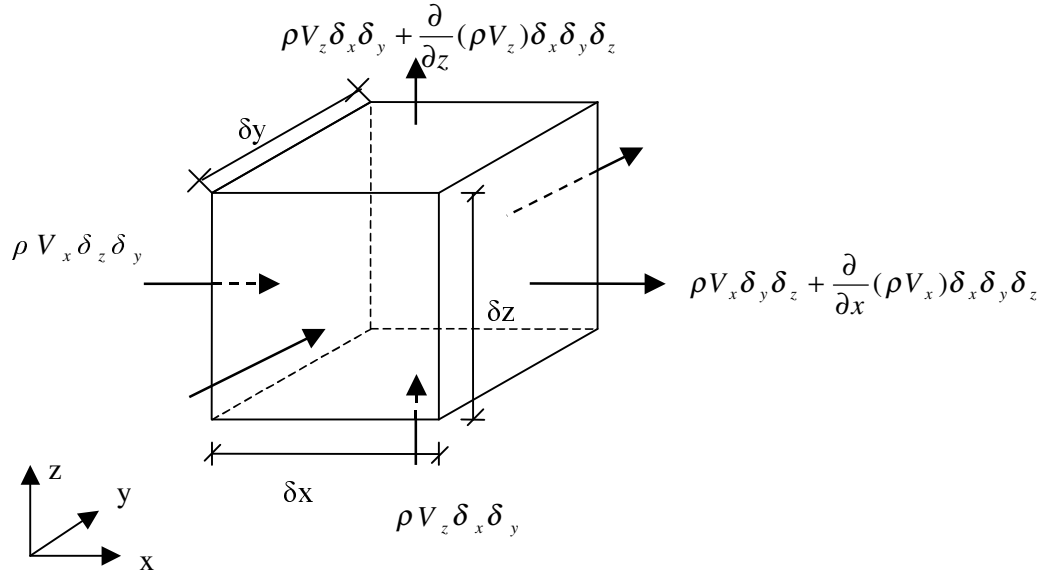
2.3.1 Kontrol Hacmi Kavramı

Yeraltı suyu akımında, süreklilik denklemi elde ederken; daha kolay uygulanabilir olduğundan, Euler metodu kullanılmaktadır. Bu metodda; uzayda tesbit edilmiş, kontrol

hacmi diye adlandırılan belli bir hacim göz önüne alınır. Kontrol hacminin şekli gelişigüzedir. Bu hacim, kontrol yüzeyi diye adlandırılan yüzleri kapalı bir hacim bölgesi meydana getirir. Kontrol hacminin içindeki maddenin miktarı, zamanla değişebilir. Fakat, bu hacmin şekil ve pozisyonu değişmez. Bu hacim, incelenen probleme göre, çok küçük ya da sonlu olmak şartıyla büyük boyutlu olabilir. İncelemeleri kolaylaştırmak için kontrol hacmi, kullanılan koordinat sistemine uygun herhangi bir formda düşünülebilir. Çünkü, seçilen form sonuçta elde edilen denklemlere etki etmez.

2.3.2 Süreklilik Denklemi

(x,y,z) kartezyen koordinat sisteminde, geçirimli zeminin herhangi bir P(x,y,z) noktası etrafında, kenarlar uzunlukları δ_x , δ_y , δ_z olan dikdörtgenler prizması şeklinde bir kontrol hacmi göz önüne alınırsa,



Şekil 2.4: Dikdörtgenler Prizması Şeklinde Bir Kontrol Hacmi

Gözenekli ortamlar için süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial(\rho.V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho.V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho.V_z)}{\partial z} = -\frac{\partial(\rho.n)}{\partial t}$$

şeklinde veya,

$$\text{div}(\rho.\vec{V}) + \frac{\partial(\rho.n)}{\partial t} = 0 \quad (2.15)$$

biçiminde elde edilir. Deformasyon yapmayan bir geçirimli zeminde, n sabittir. Bu durumda (2.15) bağıntısı;

$$\text{div}(\rho.\vec{V}) + n\frac{\partial\rho}{\partial t} = 0 \quad (2.16)$$

şeklinde yazılır.

2.4 Yeraltı Suyu Hareketini İfade Eden Diferansiyel Denklem

Yeraltı suyu akımında süreklilik denklemini yazmak için (2.16) bağıntısı

$$\rho.\text{div}\vec{V} + \vec{V}.\vec{\text{grad}}\rho + n\frac{\partial\rho}{\partial t} = 0 \quad (2.17)$$

şeklinde yazılabilir.

Pratik problemlerin çoğunda, $\vec{V} \cdot \vec{grad} \rho \ll n \frac{\partial \rho}{\partial t}$, dir. Yani ρ 'nun noktadan noktaya değişmesi, zamanla değişmesinden çok daha küçüktür. Bu durum da (2.17) bağıntısının aşağıdaki gibi yazılabileceğini ifade etmektedir:

$$\rho \cdot \text{div} \vec{V} + n \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.18)$$

v 'nin yerine bağımlı değişken olarak $\phi = \phi(x, y, z, t)$ kullanılabilir. İzotrop ve homojen olmayan geçirimli bir zeminde, yani $k_x = k_x(x, y, z)$; $k_y = k_y(x, y, z)$; $k_z = k_z(x, y, z)$ iken, sıkıştırılabilen bir sıvının akımı göz önüne alınır, bu akım için, (2.16) bağıntısı;

$$\text{div} \left(\rho^2 \cdot g \frac{k}{\mu} \cdot \vec{grad} \phi \right) = n \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho^2 \frac{g \cdot k_x}{\mu} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho^2 \frac{g \cdot k_y}{\mu} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho^2 \frac{g \cdot k_z}{\mu} \right) = n \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.20)$$

şeklinde yazılabilir.

$g \cdot \vec{grad} \phi = g \cdot z \cdot (1/\rho) \cdot \vec{grad} P$ olduğundan, (2.20) bağıntısı;

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_x \cdot \rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_y \cdot \rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_z \cdot \rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \right] + \rho \cdot g = n \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.21)$$

şeklinde ifade olunur.

Bir çok pratik problemde yerçekiminin etkisini ifade eden $\rho \cdot g$ terimi, $\frac{\partial p}{\partial z}$ basınç gradyanından çok küçüktür. Bundan dolayı $\rho \cdot g$ ihmal edilebilir.

Eğer geçirimli zemin homojen ve izotrop ise, (2.19) bağıntısı

$$k \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{g \cdot \rho^2}{\mu} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{g \cdot \rho^2}{\mu} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{g \cdot \rho^2}{\mu} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right] = n \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.22)$$

şeklinde yazılabilir.

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \text{ şeklinde ifade edilen hidrolik iletkenlik yaklaşık olarak sabit kabul}$$

edilirse,

$$K \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + g \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) = n \cdot g \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.23)$$

bağıntısı elde edilir. Sıkışmayan bir sıvıda, ρ ve μ sabittir. Bu şart altında $\phi = z + P/\gamma$ ve $K = k \cdot \rho \cdot g / \mu$ yazılabilir. Bu takdirde (2.21) bağıntısından,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0$$

denklemini veya

$$\text{div}(K \vec{\text{grad}} \phi) = 0 \quad (2.24)$$

denklemini elde edilebilir.

Eğer akışkan sıkışmaz ve geçirimli zemin anizotrop ve homojen ise, (2.21) ve (2.23) denklemlerinden;

$$K_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0;$$

$$K_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.25)$$

bağıntıları elde edilir. Eğer sıvı sıkışmaz, zemin homojen ve izotrop ise,

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0; \quad \text{div}(\vec{\text{grad}} \phi) = 0 \quad (2.26)$$

veya,

$$\nabla^2 P = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0; \quad \text{div}(\vec{\text{grad}} P) = 0 \quad (2.27)$$

denklemleri elde edilir.

Görülüyor ki; deformasyon yapmayan bir geçirimli zeminde, sıkışmayan bir akışkan hareketinin meydana getirdiği akım alanında ϕ potansiyelinin veya P basıncının dağılımı Laplace denklemini sağlamaktadır (Güngör, 1989).

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

DOLGU BARAJLAR VE SIZMA

3. DOLGU BARAJLAR VE SIZMA

3.1 Genel Bakış

Barajlar gövdenin statik projelendirilmesinde esas alınan gövde şekline göre; ağırlık baraj, kemer ağırlık baraj, kemer baraj, payandalı baraj, toprak ve kaya dolgu baraj olarak sınıflandırılabilirler gibi gövde dolgusunda kullanılan malzeme cinsine göre de sınıflandırılabilirler.

Dolgu barajlar, su basıncını dolgu gövdesinin ağırlığı ile temele aktaran barajlardır. Dolgu baraj sızma suyu kayıpları belirli sınırlar içinde kalacak şekilde sıkıştırılmalı ve mümkün olan bütün yükleme durumlarında yeterli emniyetli olmalıdır.

3.2 Toprak ve Kaya Dolgu Barajlar

Bütün baraj tiplerinde emniyetli bir temel oluşturmak için alttan sızma önlenmelidir. Bu husus dolgu barajlarda çekirdek bölgesini geçirimsiz tabakaya kadar devam ettirerek sağlanır. Geçirimsiz tabakanın çok derinde olduğu yerlerde ve palplanş, beton perde, enjeksiyon ve çekirdek bölgesinin membaya doğru uzatılması gibi çözümler aranır. Ayrıca baraj gövdesindeki sızma hattını düşürmek ve stabilizeyi arttırmak için topuk drenaj, boşaltım kuyuları gibi önlemler alınır. Yıkılan toprak barajların önemli bir bölümünde yıkılma sebebinin baraj gövdesinin temel ve yamaçlara iyi bağlanamaması olduğu anlaşılmıştır. Bu sebeple baraj gövdesinin temel ve yamaçlara bağlanmasına özel bir önem verilmelidir.

Bütün baraj temelleri az veya çok miktarda geçirimlidir. Rezervuarda depolanmış suyun muhafazası ve önemli sızmalar ile temeldeki ince partiküllerin yıkanarak tesisi tehlikeye sokabilecek borulanma olayının önlenmesi için temelin geçirimsizliğinin yok denebilecek mertebede sağlanması gerekmektedir.

3.3 Memba Yüzü Betonarme Kaplamalı Kaya Dolgu Barajlar

Kaya dolgu barajlar genelde merkezi kil çekirdekli olarak inşa edilirken, geçirimsiz malzeme bulmadaki zorluk, çevre ve iklim koşulları, inşaat süresi ve ekonomi gibi nedenlerle; geçirimsizliğin memba yüzünde ve kilden başka malzemelerle sağlanması yoluna gidilmiştir. Memba yüzü betonarme kaplamalı kaya dolgu baraj kavramı, bu düşünceden hareketle doğmuş ve son yıllarda dünyada yaygın olarak uygulanan bir baraj tipi haline gelmiştir. Ülkemizde ise, Trabzon yakınlarında inşa edilmekte olan Kürtün Barajı ve Antalya yakınlarındaki Dim Barajı bu tipin ilk örneklerindedir.

Memba kaplamalarında önemli olan nokta, kaplamanın rezervuar basıncına ciddi bir sızmaya neden olmadan direnç gösterebilmesi ve aynı zamanda da zati yük ve su basıncından kaynaklanan dolgunun oturmalarına uyum gösterebilmesidir.

Memba yüzü betonarme kapamalı kaya dolgu barajlar; membadan mansaba doğru inceden iriye çok iyi derecelenmiş ve sıkıştırılmış kaya dolgu gövdeden, ön yüzde kalınlığı tabandan krete doğru azalan beton kaplamadan, taban ve yamaçlarda beton kaplamanın yaslandığı beton topuk plağından oluşmaktadır. İnşaat sırasında barajın kaya dolgu gövdesi öncelikle tamamlanıp, konsolidasyon oturmalarının sağlanması için üzerinden bir sezon geçmesi beklendikten ve dolgudan bağımsız olarak yapılan topuk plağı tamamlandıktan sonra; ön yüzü betonu, gövde üzerinden kontrol edilen bir çeşit “finisher” ile tabandan krete doğru yaklaşık 12-15 m genişlikte şeritler halinde ve betonun prizini alma hızına uygun bir hareket hızıyla dökülmektedir.

Memba yüzü beton kaplı kaya dolgu barajlar, diğer kaya dolgu tipindeki barajların inşa edilebileceği her yerde inşa edilebilirler. Ancak topuk plağının sağlam zemine

oturmasına ve dolguda kullanılan kaya dolgu malzemesinin temiz, iyi derecelenmiş, aşırı oturmalara neden olmayacak sağlam kaya niteliğinde olmasına özen gösterilmelidir.

Baraj gövdesinin % 100 su geçirmemesi diye bir şartın gerçekleşmesi imkansızdır. Ancak gövdeden sızan sular tabii bir durum göstermezlerse bu tiplerde barajın emniyeti tehlikeye girer. Mesela gövdeden sızan sular gövde içindeki ince damarların devamlı olarak yıkanmasına (dahili erozyon) sebep olacak kadar yüksek hızlara sahip oldukları takdirde sızma durumu tabii değildir. İnce damarların taşınması ile akım hızı artmakta , dolayısıyla daha kaba taneleri sürükleyecek bir durum doğmaktadır . Bu stabilite bozulması devam ettiği takdirde gövde içinde borulanmalar olmakta ve bu borulanmalardan akan su gövdeyi süratle aşındırarak çok kısa bir zamanda barajın yıkılmasına yol açmaktadır (Orhon, 1997).

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

GEÇİRİMLİ ORTAMDAKİ SIZMA PROBLEMİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

4. GEÇİRİMLİ ORTAMDA SIZMA PROBLEMİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili ilk çalışmalar Hrennikoff (1941) tarafından geliştirilen yarı analitik çözüm yöntemleridir. Argyis ve Kelsey (1960) virtuel iş prensibini kullanarak bir direkt yaklaşım metodu geliştirmiştir. Turner ve diğ. (1956), bir üçgen eleman için rijitlik matrisini oluşturmuştur. "Sonlu Elemanlar" terimi ilk defa Clough tarafından telâffuz edilmiştir.

Yapı alanı dışındaki problemlerin sonlu elemanlar yöntemiyle çözümü 1960'lı yıllarda başlamıştır. Örneğin Zienkiewicz ve diğ. (1965), sonlu elemanlar yöntemi ile Poisson denklemini çözmüştür. Bugün, daha da geliştirilmiş olan sonlu elemanlar yöntemi, ısı transferi, yeraltı sularının akımı, manyetik alan ve diğer bir çok alana uygulanmaktadır.

Genel amaçlı sonlu elemanlar paket programları 1970'li yıllardan itibaren ortaya çıkmaya başlamıştır. 1980'li yılların sonlarına doğru artık paket programlar mikro bilgisayarlarda kullanılmaya başlanmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi matematikçilerden daha çok mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Yöntem ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır. Tüm bu uygulamalarda bir büyüklük alanının hesaplanması istenmektedir. Bu alan, gerilme analizinde deplasman alanı veya gerilme alanı; ısı analizinde sıcaklık alanı veya ısı akışı; akışkan problemlerinde ise akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonudur.

Sonlu elemanlar yönteminde çözüm bölgesi, davranışı daha önce belirlenmiş olan bir çok alt elemana bölünür. Elemanlar düğüm adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler. Bu şekilde cebrik bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler düğümlerdeki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Matematik modelleme işleminin, modelin varyasyonel problem olarak ifade edilmesinden sonraki aşaması, bilgisayarda çözümlenmesi hedeflenen ayrık modelin oluşturulması safhasıdır. Günümüzde, diferansiyel denklemlerle ilgili matematik modellerin ayrık benzeşiklerinin oluşturulması ve elde edilen ayrık problemin bilgisayarda çözümlenmesi açısından en kapsamlı ve evrensel yöntem, sonlu elemanlar yöntemidir. Bu yöntemin klasik sonlu farklar yönteminden en önemli farkı, modelin sınır değer problemini değil, varyasyonel problemi temel almasıdır (WEB_1, 2005).

Sonlu elemanlar yönteminin sınırlandırılmış sızma akımına uygulanması ilk kez Zienkiewicz, ve diğ. (1965) tarafından yapılmış ve zonlu izotropik olmayan akım bölgeleri için çözümler **toplam enerji dağılımı** şeklinde elde edilmiştir. Aynı problemin sınırlandırılmış akıma uygulanması Finn (1967) tarafından ele alınmış ve ilave olarak **akımın debisi** hesaplanmıştır. Guvanasen ve Wadsworth (1986) tarafından doymun ve gözenekli ortamda üç boyutlu sonlu eleman çalışmaları yapılmış, Cividini ve Gioda (1984) tarafından serbest yüzeyli sızma akımı analizi için yaklaşık sonlu eleman çözümü yapılmıştır. Tracy ve Marino (1987) doymun gözenekli ortamda sızma olayını analiz etmiştir. Leontiev ve Huacasi (2000) basınçsız sızma akımı problemleri için matematiksel programlama yaklaşımı geliştirmiş, Xu ve diğ. (2002) doymun-doymun olmayan sızma akımı modeli kullanarak dolgu barajların optimum hidrolik tasarımını ele almışlardır. Güngör (1989) sonlu elemanlar yardımıyla bağlama altındaki potansiyel ve hız dağılımlarını incelemiş, sabit bir sızma hattı altında doymun bölgede bir toprak dolgu baraj için modelleme çalışması yapmıştır. Ardıçlıoğlu (1990) bir dolgu baraj kil çekirdeği için potansiyel dağılımı sonlu elemanlar yöntemiyle modellemiş, sonuçları gerçek değerlerle karşılaştırmıştır.

4.1.1 Sonlu Eleman Yönteminin Üstünlükleri

1. Sonlu elemanlar, boyutları ve şekillerinin esnekliği nedeniyle, verilen bir cismi temsil edebilir, hatta karmaşık şekilli bir cisimde daha güvenilir olabilir.
2. Çok bağlantılı bölgeler (yani bir veya çok delikli cisimler) veya köşeleri olan bölgeler zorluk çekilmeksizin incelenebilir.
3. Değişik malzeme ve geometrik özellikleri bulunan problemlerde ek bir zorluk göstermez. Geometri ve malzeme doğrusal olmama özellikleri, kalıtsal olsa bile (örneğin zamana bağlı) malzeme özellikleri kolaylıkla göz önüne alınabilir.
4. Sebep-sonuç bağıntılarına ait problemler tümel rijitlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş "kuvvetler" ve "yerdeğiştirmeler" cinsinden formüle edilebilir. Sonlu eleman metodunun bu özelliği problemin anlaşılmasını ve çözülmesini hem mümkün kılar, hem de basitleştirir.
5. Sınır şartları kolayca uygulanır.
6. Sonlu eleman metodunun çok yönlülük ve esnekliği karmaşık yapılarda, sürekli ortam, alan ve diğer problemlerde sebep sonuç ilişkilerini hesaplamak için çok etkin bir şekilde kullanılabilir. Analitik ve deneysel metotlardan daha hassas sonuç verir.

Sonlu elemanlar yönteminin günümüzdeki uygulamaları oldukça fazla olup diferansiyel eşitliklerle düzenlenen tüm fiziksel problemleri kapsar. Sonlu elemanlar yönteminin bu üstünlükleri ona geniş bir uygulama alanı oluşturmaktadır.

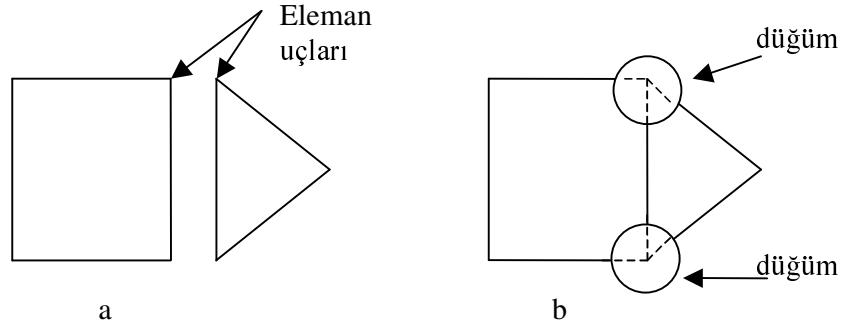
4.1.2 Sonlu Eleman Yönteminin Yararları

1. Bitişik elemanlardaki malzeme özellikleri aynı olmayabilir. Bu özellik bir kaç malzemenin birleştirildiği cisimlerde uygulanabilmesine imkan vermektedir.

2. Düzgün olmayan sınırlara sahip şekiller, eğri kenarlı elemanlar kullanılarak analiz edilebilirler.
3. Eleman boyutları kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Böylece problemin önemli değişiklikler beklenen bölgelerinde daha küçük elemanlar kullanılarak hassas işlemler yapılabilir ya da aynı problemin diğer bölgeleri büyük elemanlara bölünerek işlem hızı arttırılabilir.
4. Süreksiz yüzey yüklemeleri gibi sınır durumları yöntem için zorluk oluşturmaz. Karışık sınır durumları kolaylıkla ele alınabilir.

4.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması

Bu yöntemin uygulanmasında, tek boyutlu problemlerde çizgiler, iki boyutlu problemlerde düzlemler, üç boyutlu problemlerde hacimler kullanılarak çözüm bölgesi sonlu sayıda elemana bölünür. Tek boyutlu problemlerde elemanlar eşit uzunlukta olmayabilir. İki ve üç boyutlu eleman kullanılması gereken durumlarda elemanlar farklı büyüklükte ve şekilde olabilirler. Bütün elemanlar birbirlerine düğüm noktalarıyla bağlıdır. Böylece sonlu elemanlar yönteminde çözüm bölgeleri birbirine bağlı elemanlar ve düğüm noktalarıyla temsil edilirler. Örneğin Şekil 4.1'de birim kalınlıkta biri dikdörtgen diğeri üçgen şeklinde iki düzlemsel sonlu eleman görülmektedir. Cismi meydana getiren sonlu elemanların birbirlerine düğümlerle kenetlendiği anlaşılmaktadır. Yine şekilden açıkça görüldüğü gibi bunlar birbirlerinden ayrı ve hiçbir şekilde ilişkili değildir. Birbirlerine uçlarından düğümlerle bağlı elemanlar düğümler kaldırıldığında birbirlerinden uzaklaşırlar.



Şekil 4.1: Birim kalınlıkta iki ayrı sonlu eleman (a) ve düğüm noktalarından birleştirilme işlemi (b).

Sonlu elemanlar yöntemin analizdeki bir sonraki adımını bölgeyi temsil eden her bir elemanın eleman rijitlik matrisinin belirlenmesidir. Daha sonra bu matrisler süperpoze edilerek bölgenin toplam rijitlik matrisini oluşturacaklardır. Bu şekilde

$$[K]\{\delta\}=\{P\} \quad (4.1)$$

matris denkleminde ulaşılır. Burada $[K]$; toplam rijitlik matrisini veya toplam iletkenlik matrisini ifade eder. $\{P\}$; düğümlere uygulanan dış kuvvetleri veya sınır şartlarını, $\{\delta\}$; düğümlerin hidrolik potansiyelini ifade eder.

Sonlu elemanlar yönteminin uygulanışında işlem sırası aşağıdaki gibidir:

- Sürekli ortamın, sonlu sayıda elemanlar sistemine bölünmesi.
- Eleman rijitlik matrisinin ve ortamı temsil eden her elemanın diğer özelliklerinin türetilmesi.
- Toplam rijitlik matrisinin $[K]$ ve toplam kuvvet vektörünün $\{P\}$ belirlenmesi.
- (4.1) denkleminin belirlenen sınır şartları altında çözülerek aranan $\{\delta\}$ değerlerinin bulunması.

Karmaşık problemlere sonlu elemanlar metoduyla çözüm ararken, incelenen sürekli ortamın iç ve dış geometrisine ve ortamın özelliklerine göre eleman geometrisi belirlenir. İki boyutlu sürekli ortamda, şekle bağlı olarak, üçgen ve çokgen elemanlar eğrili ve düzgün olmayan sınır şartları açısından dikdörtgen elemandan daha uygun olabilir. Üç boyutluda da aynı şekilde tetrahedron elemanlar dikdörtgenler prizması

şeklindeki elemanlara göre daha avantajlıdır. Bölgenin şekline göre bazen birden fazla eleman şeklinin kullanıldığı karışık alt bölümlere ayırmak daha uygun olabilmektedir.

4.3 Sızma Probleminin Sonlu Elemanlar Formülasyonu

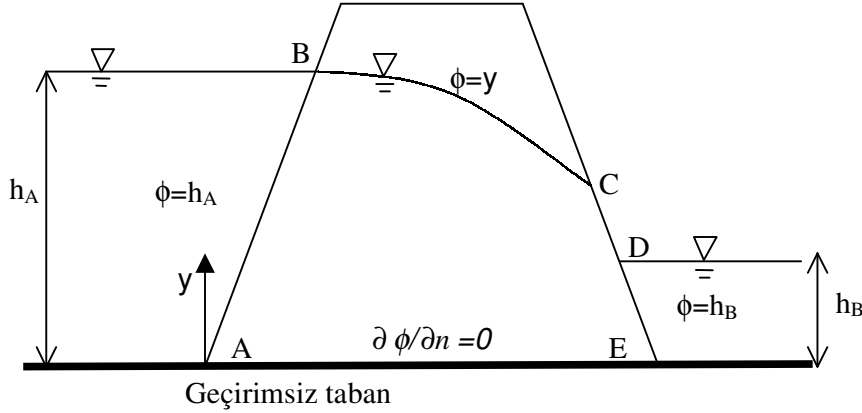
Belirli şartlar altında arazi drenajında meydana gelen su akımı ve barajların altındaki sızma olayları iki boyutlu olarak Laplace denklemiyle aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.25)$$

Burada $\phi = \phi(x, y)$ hidrolik potansiyel (veya hidrolik yük) ve K_x, K_y , sırasıyla x ve y doğrultularındaki hidrolik iletkenliklerdir. Akışkanın hız bileşenleri Darcy yasasından $v_x = -K_x (\partial \phi / \partial x)$, $v_y = -K_y (\partial \phi / \partial y)$ olarak elde edilir. $\phi =$ sabit çizgileri eş potansiyel çizgileri olarak adlandırılır.

Şekil 4.2'de (2.25) denklemine uygun sınır şartları bir toprak dolgu baraj gövdesindeki sızma problemi örneğinde gösterilmiştir. Bu örnekte sızma hattı sınır şartı olarak kabul edilmiş, barajın memba ve mansabı, barajın geçirimsiz tabanı ve sızma hattının sınırladığı bölge için problem ele alınmıştır.

4.3.1 Sınır Şartları



Şekil 4.2: Dolgu barajda sızma ve sınır şartları

Geçirimsiz taban doğal sınır şartlarını ifade eder. n yüzeyin normali olmak üzere $\partial \phi / \partial n = 0$ 'dır ve eleman matrisine etki etmez. Burada ϕ aranan potansiyel değerdir. Sızma hattı için (freatrik hat veya serbest yüzey); $\partial \phi / \partial n = 0$ ve y koordinatının değerine eşittir.

$$\phi = y$$

Bu sınır şartı, konumu belli olmadığından sonlu eleman analizinin iteratif çözümünü gerektirir. Öncelikle yüzeydeki i düğümleri için $\phi = y_i$ alınarak tahmini bir sızma hattı belirlendikten sonra çözüm yapılır. Sonra $\phi = \bar{\phi}$ için çözüm yapılarak $(\bar{\phi} - y_i)$ hatası kontrol edilir. Bu hataya dayanarak düğümlerin koordinatları güncellenir ve yeni bir sızma hattı elde edilir. Bu işlemler hata yeterince küçülene kadar devam eder. Şekil 4.2'deki CD parçası sızma yüzeyi olacaktır. Böylelikle \bar{y} yüzeyin koordinatı olmak üzere $\phi = \bar{y}$ sınır şartı elde edilmiş olur (Chandrupatla ve Belegundu, 1991).

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 ; \quad x=L \quad (4.2d)$$

denklemlerinde verilen sınır şartlarıyla birlikte

$$\nabla^2 \phi = K_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \quad (4.3)$$

denkleminde verilen laplace operatörü uygulanır. Problem bölgesi (R), problemin çözüm bölgesi(D) ve sınırlarından(S) oluşur.

4.3.2 Çözüm Bölgesi

(4.1)-(4.3) denklemleri doğrudan uygulanmayıp bunun yerine eşdeğer değişken bir formülasyon uygulanmaktadır. $\phi(x,y)$ çözümünü gösteren denklem;

$$\chi = \frac{1}{2} \iint_D [K_x \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 + K_y \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^2] dx dy \quad (4.4)$$

şeklinindedir. Burada $\phi(x,y)$ D bölgesinde kabul edilebilir deneme fonksiyonudur. Deneme fonksiyonu D bölgesinde sürekli ve ilk kısmi türevi de D bölgesinde sürekli ise kullanılabilir. Ancak deneme fonksiyonunun (4.1) denklemleriyle ifade edilen sınır şartlarını da sağlaması gerekir. (4.4) deneme fonksiyonu, (4.2) denklemleriyle ifade edilen Neuman sınır şartlarını sonlu elemanların doğal bir sonucu olarak kendiliğinden sağlamaktadır.

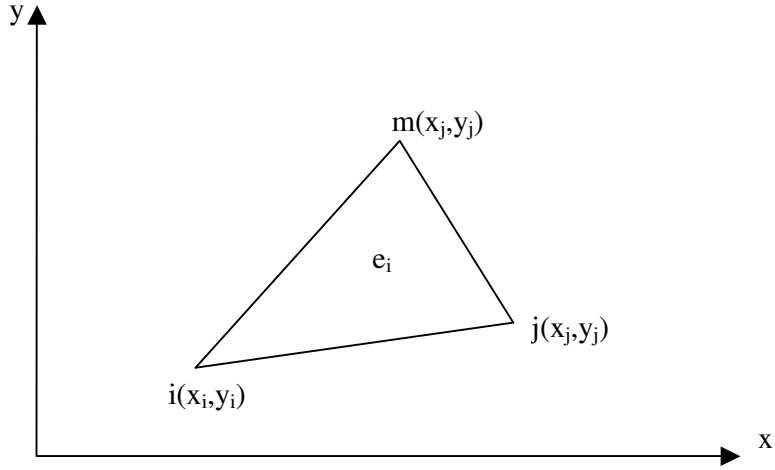
Çözüm bölgesi l sayıda sonlu üçgen elemana bölünür. Toplam düğüm sayısı n ile ifade edilir. İki ve üç boyutlu problemlerde toplam eleman sayısı ve toplam düğüm sayısı arasında belirli bir ilişki yoktur. Çözüm bölgesinin alt bölgelere bölünmesi ve süreklilik şartlarının deneme fonksiyonuna uygulanması (4.4) deneme fonksiyonu

$$\chi = \sum_{i=1}^I \chi^{ei} \quad (4.5)$$

şeklinde yazılır. Burada eleman etkisi χ^{ei} ;

$$\chi^{ei} = \frac{1}{2} \iint_{e_i} \left[\left(\frac{\partial \phi^{ei}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi^{ei}}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (4.6)$$

olarak tanımlanır.



Şekil 4.4: Tipik üçgen e_i elemanı

Şekil 4.4'da görüldüğü gibi i, j ve m düğüm tanımlayıcıların saatin ters yönünde düğümlere atandığı tipik bir eleman ele alalım. Herhangi bir e_i elemanı için deneme fonksiyonu lineer olarak seçilirse;

$$\phi^{ei}(x, y) = \alpha_1^{ei} + \alpha_2^{ei} + \alpha_3^{ei} \quad (4.7)$$

(x, y e_i üzerinde) burada α_1^{ei} , α_2^{ei} ve α_3^{ei} değerleri her eleman için genelde farklı olan sabitlerdir. Bu sabitleri elde etmek için (4.7) denklemi,

$$\phi_i = \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i \quad (4.8a)$$

$$\phi_j = \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j \quad (4.8b)$$

$$\phi_m = \alpha_1 + \alpha_2 x_m + \alpha_3 y_m \quad (4.8c)$$

denklemleri i, j ve m düğümlerinin her birine ardışık olarak uygulanır. ϕ_i, ϕ_j, ϕ_m sırasıyla i, j ve m düğümlerindeki ϕ potansiyel değerleridir. Kolaylık olması için e_i üst indisi atılabilir.

(4.8) denklem sisteminin α_1, α_2 ve α_3 sabitleri için tek çözümü vardır. Katsayılar matrisinin determinanı

$$2\Delta = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \end{vmatrix} \neq 0 \quad (4.9)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \phi_m \end{bmatrix}$$

şeklindedir (Güngör, 1989).

(4.9) eşitliğinden de belirtildiği gibi bu determinantın değeri üçgen elemanın alanının iki katıdır. Üçgen elemanın alanını $\Delta \neq 0$ olacağından, α_1, α_2 ve α_3 için tek bir çözüm mevcuttur:

$$\alpha_1 = \frac{1}{2\Delta} (a_i \phi_i + a_j \phi_j + a_m \phi_m), \quad (4.10a)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2\Delta} (b_i \phi_i + b_j \phi_j + b_m \phi_m) \quad (4.10b)$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2\Delta} (c_i \phi_i + c_j \phi_j + c_m \phi_m) \quad (4.10c)$$

burada;

$$\begin{aligned}
 a_i &= x_j y_m - x_m y_j, & b_i &= y_m - y_j, & c_i &= x_m - x_j \\
 a_j &= x_m y_i - x_i y_m, & b_j &= y_m - y_i, & c_j &= x_i - x_m \\
 a_m &= x_i y_j - x_j y_i, & b_m &= y_i - y_j, & c_m &= x_j - x_i
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

a, b, c ve α 'lardaki e_i üstel ifadeleri atılırsa, (4.10) denklemleri (4.7) denkleminde yerine yazılırsa

$$\bar{\phi}^{ei}(x, y) = \frac{1}{2\Delta} [(a_i + b_i x + c_i y)\phi_i + (a_j + b_j x + c_j y)\phi_j + (a_m + b_m x + c_m y)\phi_m] \tag{4.12a}$$

elde edilir, ya da

$$\bar{\phi}^{ei} = N_i \phi_i + N_j \phi_j + N_m \phi_m = N^e \phi^e \tag{4.12b}$$

şeklinde yazılabilir. Burada ϕ şekil fonksiyonu matrisi;

$$N^e = [N_i \ N_j \ N_m] \tag{4.13a}$$

ve eleman düğüm vektörü;

$$\phi^e = \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \phi_m \end{bmatrix} \tag{4.13b}$$

şeklinde tanımlanır.

(4.12) eşitliğinden gerekli türevler aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\frac{\partial \phi^{ei}}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta} [b_i \phi_i + b_j \phi_j + b_m \phi_m] \tag{4.14a}$$

$$\frac{\partial \phi^{ei}}{\partial y} = \frac{1}{2\Delta} [c_i \phi_i + c_j \phi_j + c_m \phi_m] \quad (4.14b)$$

(4.14) denklemlerinin (4.6) denkleminde yazılmasıyla aşağıdaki ifade elde edilir;

$$\chi^{ei} = \frac{1}{8\Delta^2} \iint_{J_{ei}} [(b_i \phi_i + b_j \phi_j + b_m \phi_m)^2 + (c_i \phi_i + c_j \phi_j + c_m \phi_m)^2] dx dy \quad (4.15)$$

(4.15) denklemindeki x ve y bağımsız değişkenler olduğundan ve

$$\iint_{J_{ei}} dx dy = \Delta \quad (4.16)$$

şeklinde yazılabileceğinden (4.15) denklemi

$$\chi^{ei} = \frac{1}{8\Delta} [(b_i \phi_i + b_j \phi_j + b_m \phi_m)^2 + (c_i \phi_i + c_j \phi_j + c_m \phi_m)^2] \quad (4.17)$$

şeklinde yazılabilir.

(4.17) denklemi her eleman için elde edildikten sonra tümünü (4.5) denklemine yerleştirmekle (4.4) denkleminde yazarak bütün düğüm değerlerinin $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ bir fonksiyonu olarak;

$$\chi = \chi(\bar{\phi}_1, \bar{\phi}_2, \dots, \bar{\phi}_n) \quad (4.18)$$

şeklinde yazmak mümkündür. Burada, önceden tanımlı veya değişken olan bütün düğüm değerleri için

$$\frac{\partial \chi}{\partial \bar{\phi}_p} = 0, \quad p = 1, 2, \dots, n \quad (4.19)$$

yazılabilir. (4.19) ve (4.5) denklemlerinin birleştirilmesiyle

$$\frac{\partial \chi}{\partial \bar{\phi}_p} = \sum_{i=1}^l \frac{\partial \chi^{ei}}{\partial \bar{\phi}_p} = 0 \quad , \quad p = 1, 2, \dots, n \quad (4.20)$$

elde edilir.

(4.17) denkleminin uygun $\bar{\phi}_p$ 'ye göre türevi alınması, e_i elemanın (4.20)'de verilen $\partial \chi^{ei} / \partial \bar{\phi}_p$ etkisinin elde edilmesini sağlar. Bunun için e_i elemanın i, j ve m olan düğüm numaraları, p, q ve r sistem düğüm numaralarına dönüştürülüp, (4.17) denkleminin $\bar{\phi}_p$ 'ye göre türevi alınırsa

$$\frac{\partial \chi^{ei}}{\partial \bar{\phi}_p} = \frac{1}{4\Delta} [b_p (b_p \bar{\phi}_p + b_q \bar{\phi}_q + b_r \bar{\phi}_r) + c_p (c_p \bar{\phi}_p + c_q \bar{\phi}_q + c_r \bar{\phi}_r)] \quad (4.21)$$

Bütün düğümlerin etkisi sistem matrisi şeklinde ifade edildikten sonra

$$[K]\{\alpha\} = \{\phi\} \quad (4.22)$$

denkleminin çözülmesiyle tüm düğüm noktalarındaki potansiyel değerleri bulunmuş olur. Burada $\{\alpha\}$ aranan potansiyel değerleri, $[K]$ sistem rijitlik matrisi, $\{\phi\}$ ise bilinen potansiyel değerleridir (Norrie ve Vries, 1978).

BEŞİNCİ BÖLÜM

MODELLER VE ANALİZLER

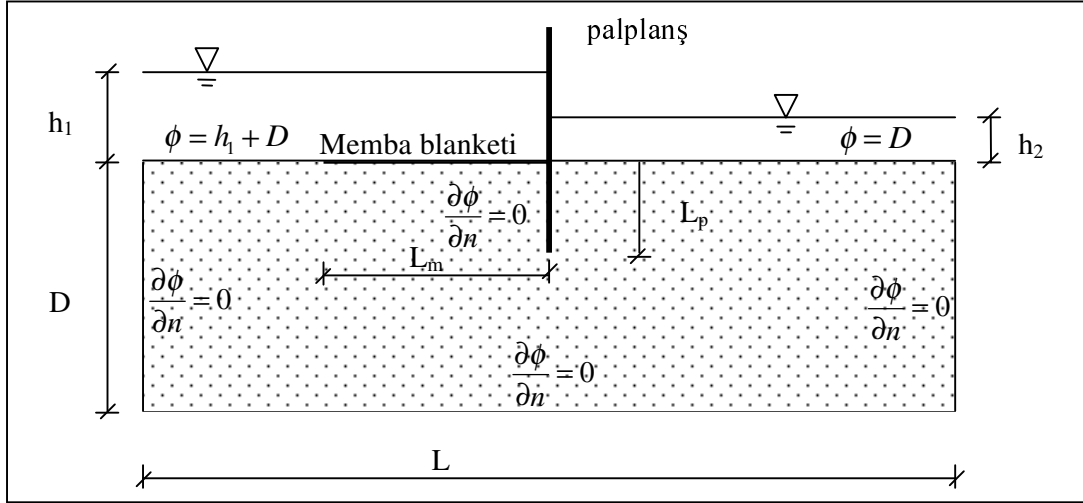
5. MODELLER VE ANALİZLER

Toprak dolgu baraj gövdesindeki ve altındaki sızma olayının incelenmesinde Geoslope Seep/W programı kullanılarak çeşitli modeller üzerinde çalışılmış ve teze konu olan modellerde sızma olayı iki boyutlu olarak incelenmiştir. Modellerde üçgen elemanlar seçilmiştir. Her bir elemanın ağırlık merkezindeki potansiyel değeri ile yatay ve düşey hız bileşenleri tespit edilmiş, daha sonra her bir eleman için bileşke hızlar bulunmuştur. Çözüm bölgesi boyunca elde edilen potansiyel dağılımları ve bileşke hız vektörleri grafikler halinde verilmiştir. Teze konu olan sızma olayının daha iyi anlaşılması için uygulamalarda toprak dolgu baraj modelleri yanında palplanş ve bağlama altından su sızması problemi de incelenmiştir. Bu amaçla 4 adet palplanş, 4 adet bağlama ve 3 adet baraj modeli üzerinde çeşitli alternatif durumlar göz önüne alınarak modelleme çalışmaları yapılmıştır.

5.1 Modeller

5.1.1 Palplanş

Bu modelde 32 m derinliğindeki geçirimli zemin üzerine inşa edilen ve memba tarafında 11 m yüksekliğinde su bulunan bir palplanşda, Şekil 5.1 ve Çizelge 5.1'de verilen farklı durumlar göz önüne alınarak modeller hazırlanmıştır.



Şekil 5.1: Palplanş modeli

Çizelge 5.1: Palplanş modellerinde kullanılan değerler

Palplanş Modeli	D (m)	L (m)	L _p (m)	L _m (m)	h ₁ (m)	H=D+h ₁ (m)	h ₂ (m)	K _x (m/s)	K _y (m/s)
1	32	150	14	32	11	43	0	3.15*10 ⁻⁵	3.15*10 ⁻⁵
2	32	150	14	32	11	43	0	9.45*10 ⁻⁵	3.15*10 ⁻⁵
3	32	150	14	32	11	43	5	3.15*10 ⁻⁵	3.15*10 ⁻⁵
4	32	150	23	32	11	43	0	3.15*10 ⁻⁵	3.15*10 ⁻⁵

5.1.1.1 Palplanş 1

Bu modelde 32 m yüksekliğinde ve 150 m genişliğindeki geçirimli zemin üzerine inşa edilmiş, 14 m zemin içerisine giren, önünde 32 m uzunluğunda memba blanketi bulunan palplanş, memba tarafı 11 m yüksekliğinde su dolu, mansap tarafı ise boş olacak şekilde modellenmiştir. Hidrolik iletkenlik $K_x=K_y=3.15*10^{-5}$ m/s alınmıştır.

Palplanş 1 için sınır şartları olarak palplanşın membasında (mema blanketine kadar olan kısımda) $H=43$ m, palplanşın mansabında $H=32$ m olmak üzere geçirimli ve sınırın geri kalanı için geçirimsiz kabulü yapılmıştır. Modellemede kullanılan sonlu eleman ağı Şekil 5.2'de verilmiştir.

5.1.1.2 Palplanş 2

Bu modelde Palplanş 1'de kullanılan geometrik ve hidrolik özellikler aynı olup yalnızca hidrolik iletkenlik $K_x= 9.45*10^{-5}$ m/s ve $K_y= 3.15*10^{-5}$ m/s alınmıştır. Modellemede kullanılan sonlu eleman ağı Şekil 5.2'de görülmektedir.

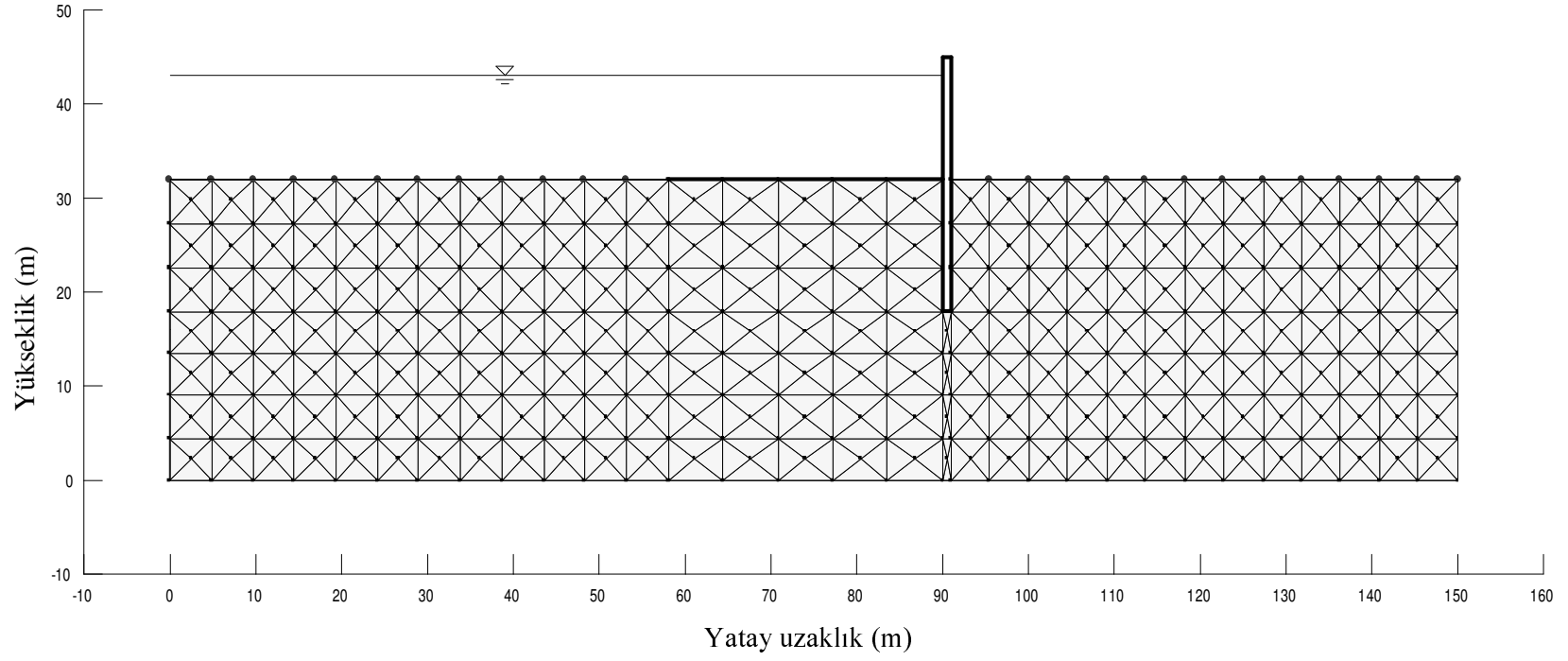
5.1.1.3 Palplanş 3

Bu modelde, Palplanş 1'de kullanılan geometrik ve hidrolik özellikler aynı olup, yalnızca mansab tarafına 5 m yüksekliğinde su olduğu kabulüne göre modelleme yapılmıştır.

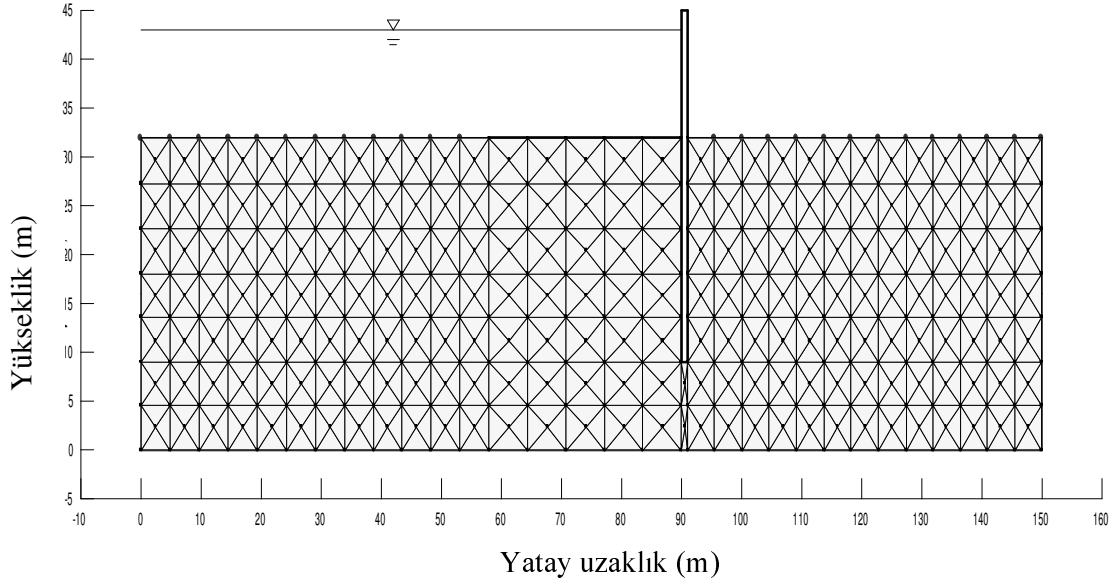
Bu durumda, Palplanş 3 için sınır şartları palplanşın memba tarafında memba blanketine kadar olan kısımda $H=43$ m, palplanşın mansabında $H=37$ m olmak üzere geçirimli ve sınırın geri kalanı için geçirimsiz kabulü yapılmıştır. Modellemede kullanılan sonlu eleman ağı Şekil 5.2'de görülmektedir.

5.1.1.4 Palplanş 4

Bu modelde, Palplanş 1'de kullanılan geometrik ve hidrolik özellikler aynı olup, yalnızca palplanşın zemin içine 14 m yerine 23 m girdiği kabulüne göre modelleme yapılmıştır. Modellemede kullanılan sonlu eleman ağı Şekil 5.3'de verilmiştir.



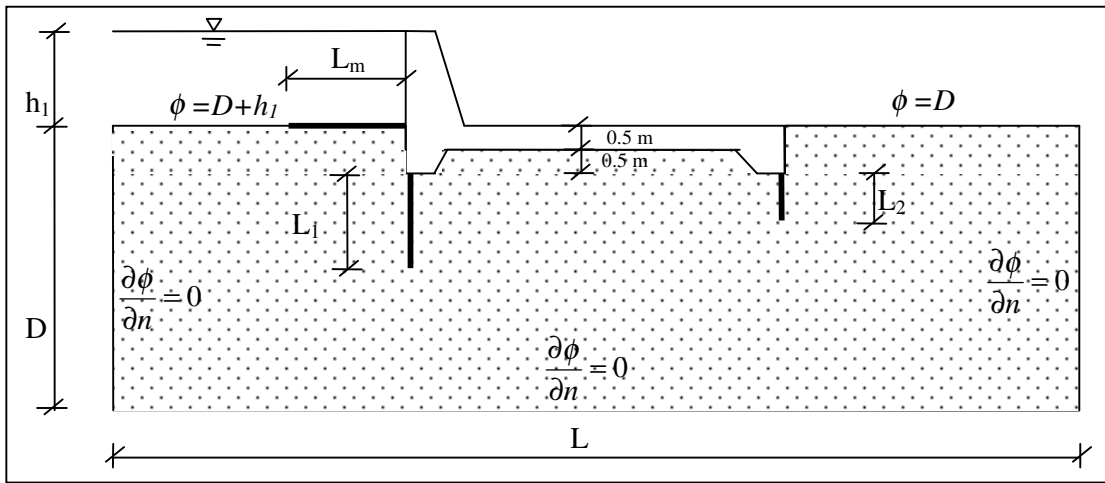
Şekil 5.2: Palpaş 1, Palpaş 2 ve Palpaş 3 için kullanılan sonlu elemanlar ağı ve sınır şartları



Şekil 5.3: Palplanş 4 için kullanılan sonlu elemanlar ağı

5.1.2 Bağlama

Bu modelde 6 m kalınlığında, 37 m genişliğinde geçirimli bir zemin üzerine inşa edilen ve memba tarafında 3 m yüksekliğinde su bulunan bir bağlama yapısı için, Şekil 5.4 ve Çizelge 5.2'de verilen farklı durumlar göz önüne alınarak modeller hazırlanmıştır.



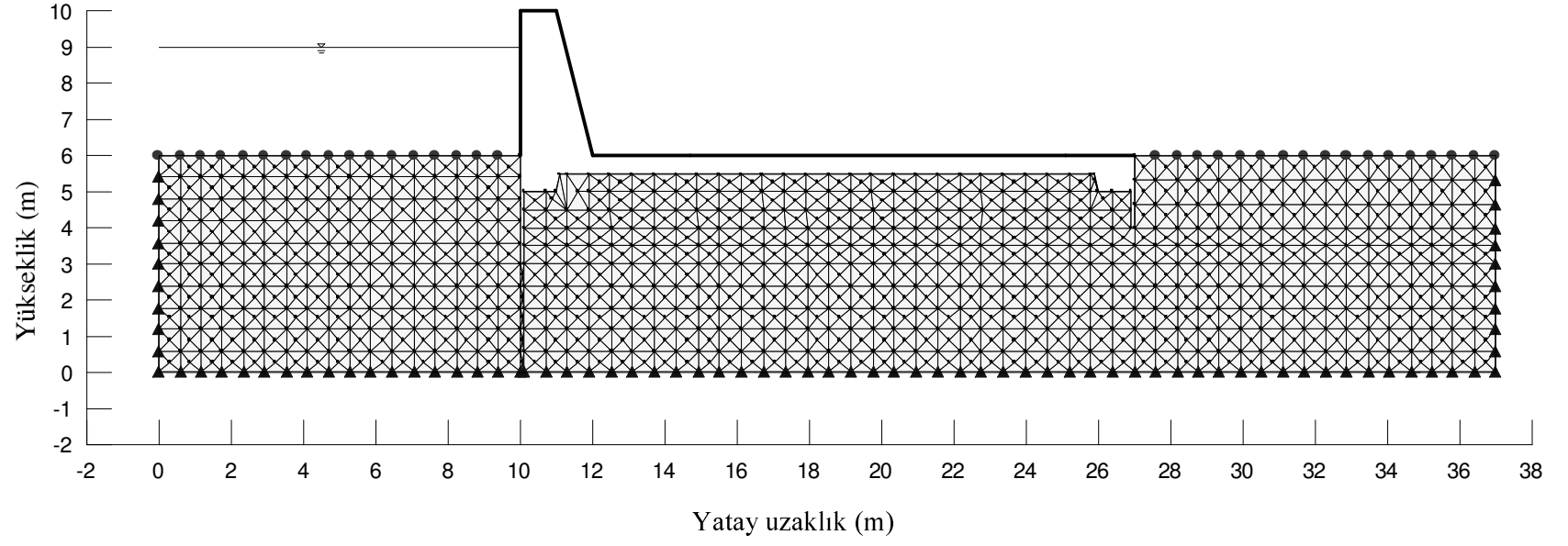
Şekil 5.4: Bağlama Modeli

Çizelge 5.2: Bağlama modellerinde kullanılan değerler

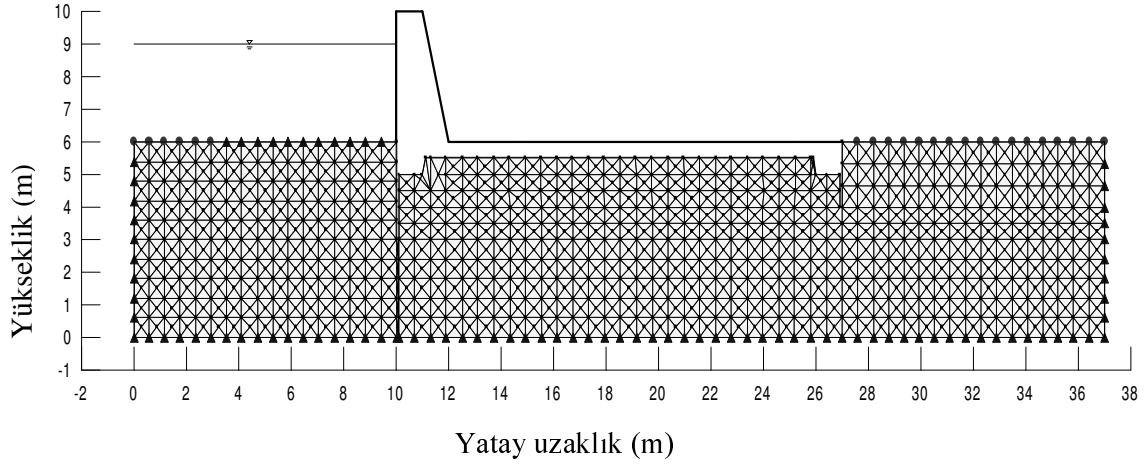
Bağlama Modeli	D (m)	L (m)	L ₁ (m)	L ₂ (m)	L _m (m)	h ₁ (m)	H=D+h ₁ (m)	K _x (m/s)	K _y (m/s)
1	6	37	2	1	0	3	9	9.10 ⁻⁶	3.10 ⁻⁶
2	6	37	0	0	0	3	9	9.10 ⁻⁶	3.10 ⁻⁶
3	6	37	2	1	6.5	3	9	9.10 ⁻⁶	3.10 ⁻⁶
4	6	37	2	0	0	3	9	9.10 ⁻⁶	3.10 ⁻⁶

5.1.2.1 Bağlama 1

Bu modelde 6 m derinliğinde, 37 m genişliğindeki geçirimli bir zemin üzerine inşa edilmiş ve memba tarafında 2m, mansab tarafında 1m derinliğinde palplanşlar bulunan bir bağlama, memba tarafında 3 m yüksekliğinde su bulunacak şekilde modellenmiştir. Hidrolik iletkenlik $K_x=9.10^{-6}$ m/s ve $K_y=3.10^{-6}$ m/s alınmıştır. Modellemede kullanılan sonlu eleman ağı Şekil 5.5’de verilmiştir.



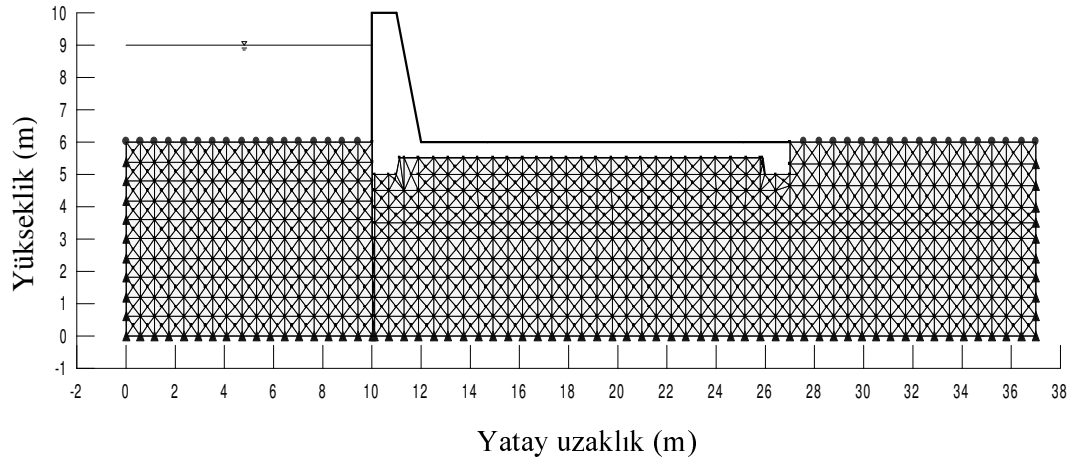
Şekil 5.5: Bağlama 1 için kullanılan sonlu elemanlar ağı



Şekil 5.7: Bağlama 3 için kullanılan sonlu elemanlar ağı

5.1.2.4 Bağlama 4

Bu modelde 6 m yüksekliğinde, 37 m genişliğindeki geçirimli bir zemin üzerine inşa edilmiş ve memba tarafında 2 m derinliğinde palplanş bulunan bir bağlama, memba tarafında 3 m yüksekliğinde su bulunacak şekilde modellenmiştir. Hidrolik iletkenlik $K_x=9.10^{-6}$ m/s ve $K_y=3.10^{-6}$ m/s alınmıştır. Modellemede kullanılan sonlu eleman ağı Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8: Bağlama 4 için kullanılan sonlu elemanlar ağı

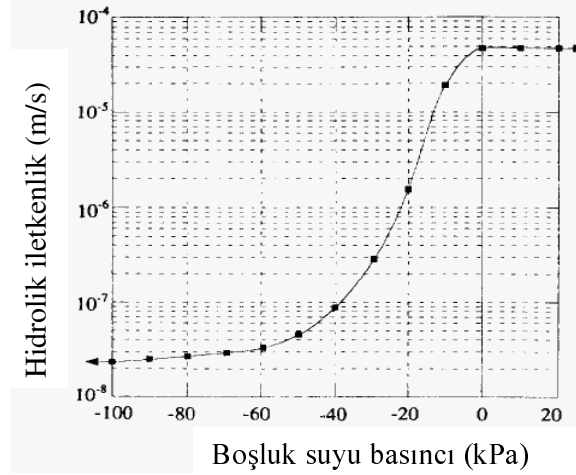
5.1.3 Baraj

Toprak dolgu baraj gövdesindeki ve altındaki sızma olayının incelenmesi amacıyla üç adet toprak dolgu baraj modeli hazırlanmıştır. Üç modelde de, aynı geometrik özelliklerdeki barajlar, memba yüzeyi betonarme kaplamalı, merkezi kil çekirdekli ve merkezi geçirimsiz perdeli olarak tasarlanmıştır.

Doygun zemin mekaniğinde, suyun doymayan ortamdaki (negatif boşluk suyu basınçlarının bulunduğu su tablasının üstü gibi) akamayacağı kabul edilir. Ancak bu kabul bir basitleştirme ve tam olarak doğru değildir. Su, basıncın sıfıra eşit olduğu hattın (sızma hattı) üzerinde, doymayan ortamda da akabilir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Doygun olmayan zeminlerdeki su akışı, doymayan zeminlerde olduğu gibi Darcy yasası ile ifade edilebilir. Doymayan ve doymayan zeminler arasındaki temel fark hidrolik iletkenlik katsayısıdır. Hidrolik iletkenlik katsayısı, genellikle doymayan zeminlerde sabit kabul edilmekte, doymayan zeminlerde ise, doymuluk derecesinin veya boşluk suyu basıncının bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Boşluk suyu basıncı doymayan bölgelerde genellikle negatif değerler alırken, doymayan bölgelerde pozitif değerler almaktadır. Bu farklara rağmen, iki durumda da akışın kısmi diferansiyel denklemleri (2.25) denklemindeki gibidir.

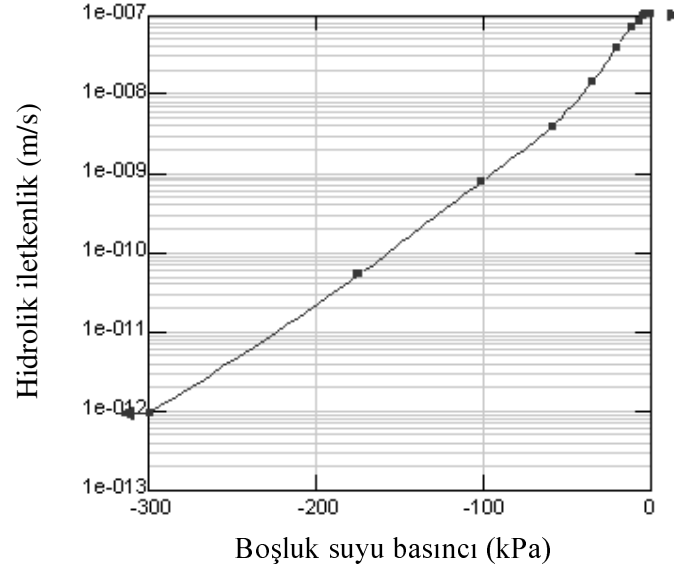
Zeminin su içeriği ile boşluk suyu basıncı arasındaki ilişkiden dolayı, hidrolik iletkenlik, boşluk suyu basıncının bir fonksiyonu olarak Şekil 5.9'daki gibi tanımlanabilmektedir (Ng ve Shi, 1998).



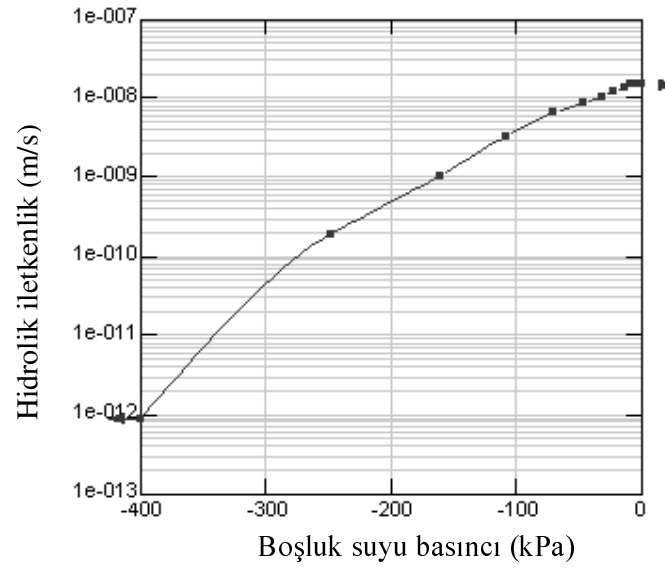
Şekil 5.9: Boşluk suyu basıncı-Hidrolik iletkenlik ilişkisi

Baraj modelleri hazırlanırken, hidrolik iletkenlik katsayısını sabit değer olarak, sadece sızma hattının altını (boşluk suyu basıncının sıfırdan büyük olduğu bölgeyi) modellemek yerine, hidrolik iletkenlik katsayısını basıncın bir fonksiyonu olarak, sızma hattının üstündeki kapilerite gibi kuvvetlerin oluşturduğu emme basınçları da göz önüne alınmış ve doymuş ve doymuş olmayan bölge birlikte modellenmiştir.

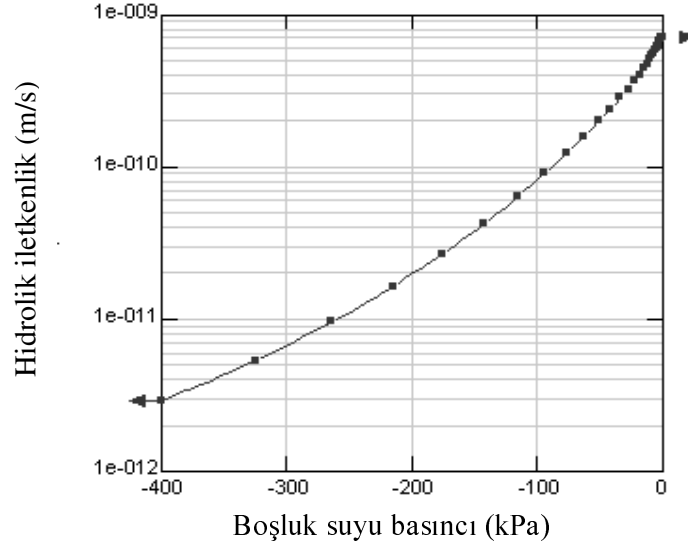
Baraj modellerinde kullanılan hidrolik iletkenlik fonksiyonları, barajın gövdesindeki toprak dolgu, gövdenin altındaki geçirimli bölge ve gövdedeki kil çekirdek için ayrı ayrı, kullanılan programında verilen fonksiyonlar içerisinde seçilmiştir. Kullanılan hidrolik iletkenlik fonksiyonları Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.10: Baraj dolgusu için seçilen hidrolik iletkenlik fonksiyonu



Şekil 5.11: Barajın altı için seçilen hidrolik iletkenlik fonksiyonu

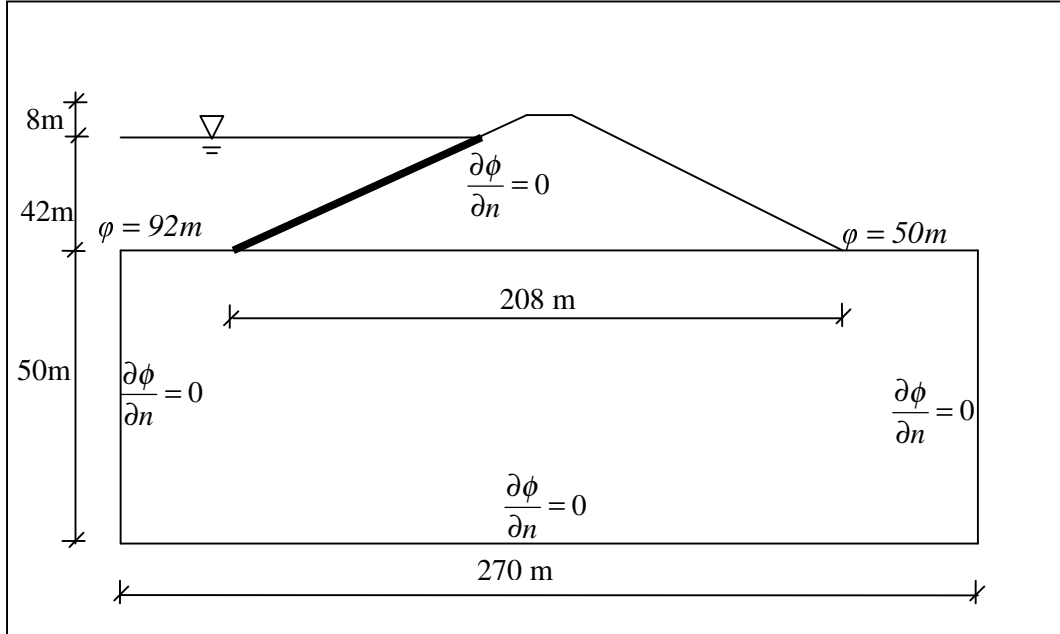


Şekil 5.12: Barajın kil çekirdeği için seçilen hidrolik iletkenlik fonksiyonu

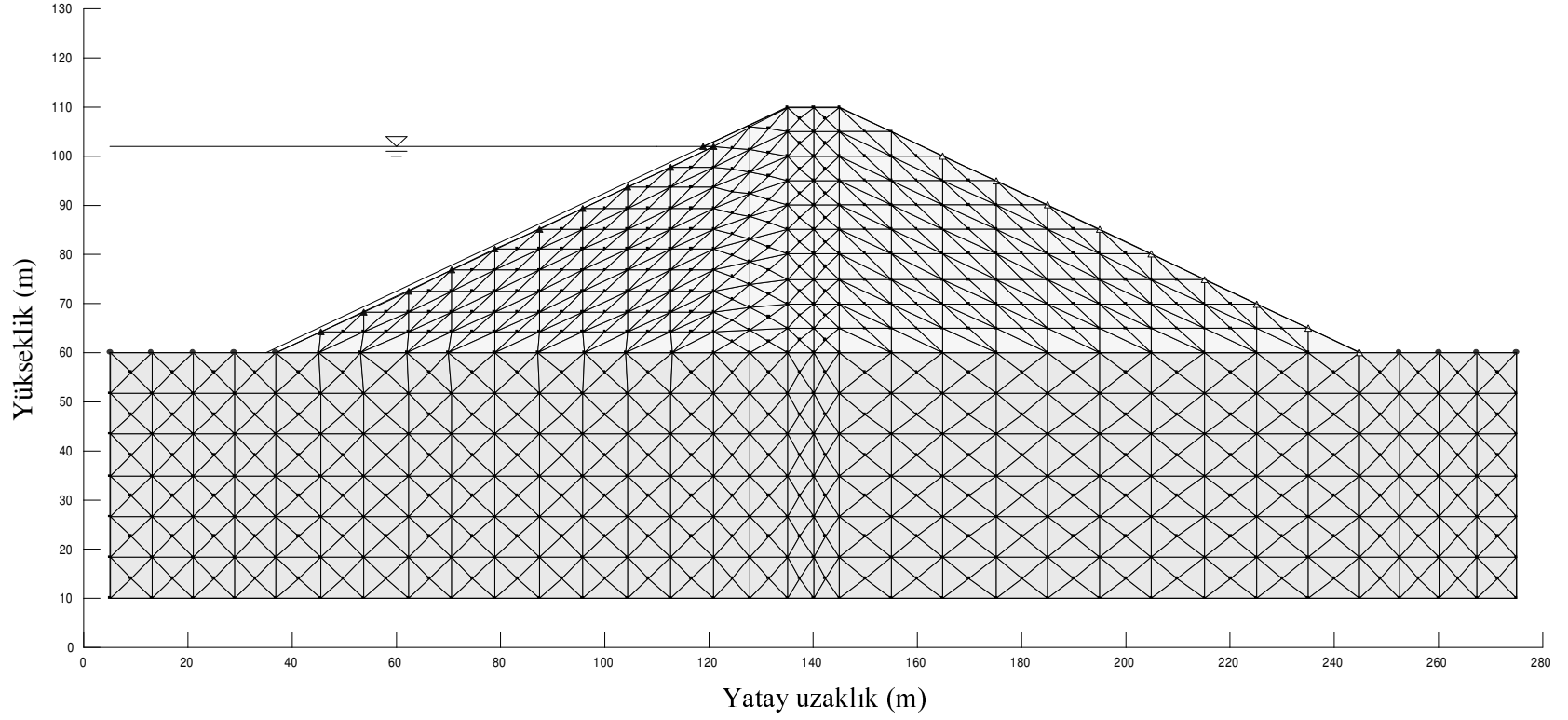
5.1.3.1 Baraj 1

Bu modelde 50 m kalınlığında, 270 m genişliğinde geçirimli bir zemin üzerine inşa edilen ve memba tarafında 42 m su yüksekliği bulunan, 50 m yüksekliğinde bir dolgu baraj, memba yüzü betonarme kaplı olarak modellenmiştir.

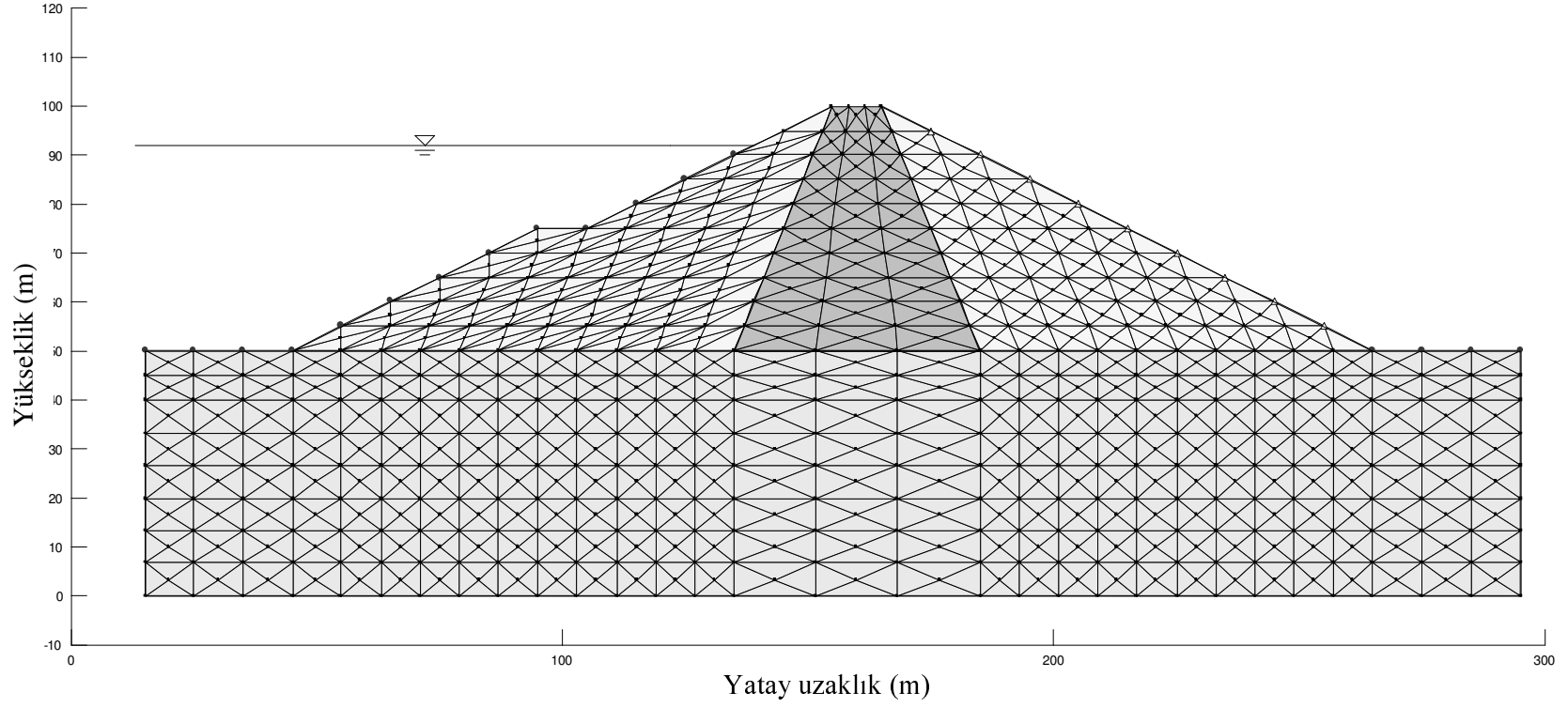
Modelle ilgili sınır şartları ve geometrik özellikler Şekil 5.13'de verilmiştir. Bu özelliklerin yanı sıra barajın dolgusu ve altındaki geçirimli zemin için seçilen hidrolik iletkenlik fonksiyonları Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de görülmektedir. Hidrolik iletkenler $K_x=K_y$ olarak alınmıştır. Modellemede kullanılan sonlu eleman ağı Şekil 5.14'de verilmiştir.



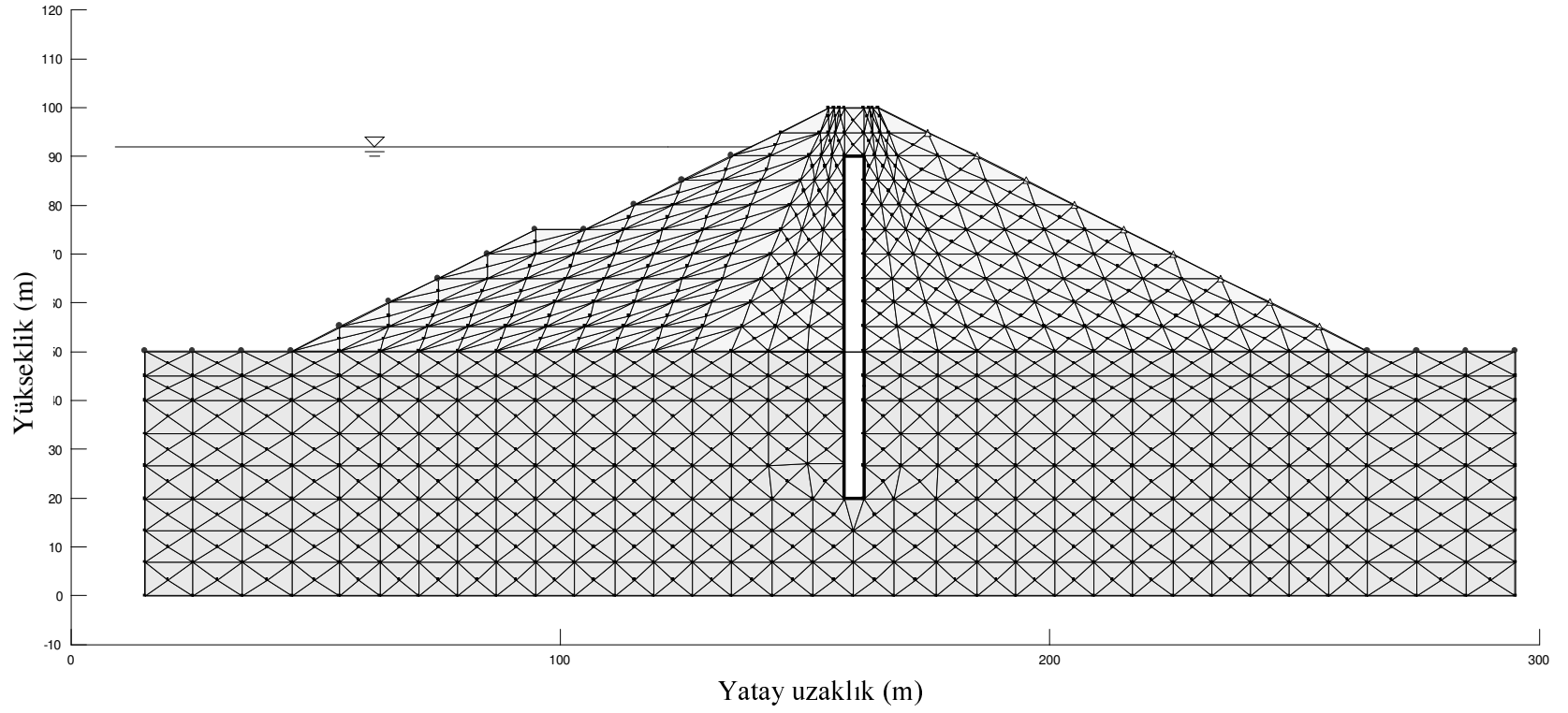
Şekil 5.13: Baraj 1 için sınır şartları ve geometrik özellikler



Şekil 5.14: Baraj 1 için kullanılan sonlu elemanlar ağı



Şekil 5.16: Baraj 2 için kullanılan sonlu elemanlar ağı



Şekil 5.18: Baraj 3 için kullanılan sonlu elemanlar ağı

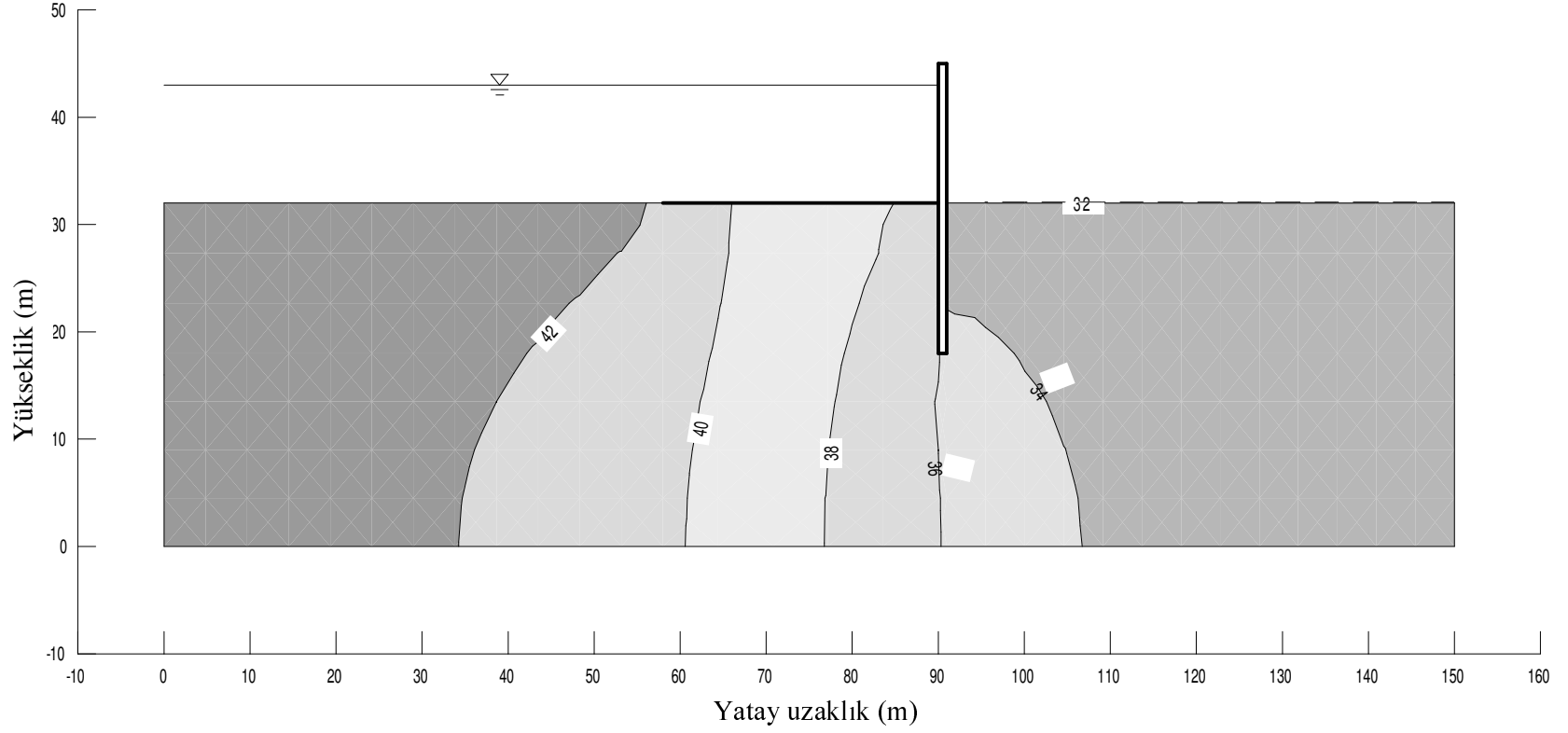
5.2 Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeler

Burada, modeller bölümünde anlatılan palplanş, bağlama ve baraj yapılarına ait her bir tip model için elde edilen çözümler ve analiz sonuçları ele alınmıştır. Çözüm bölgesindeki potansiyel dağılımı ve hız vektörleri her bir model için ayrı ayrı şekil olarak verilmiştir. Ayrıca, modeller arasında daha iyi karşılaştırma yapılabilmesi için belirli kesitlerde potansiyel dağılımları grafik olarak gösterilmiştir. Her modelin adı başlıkta belirtildikten sonra önce potansiyel dağılımları daha sonra modelin hız vektörleri verilmiştir.

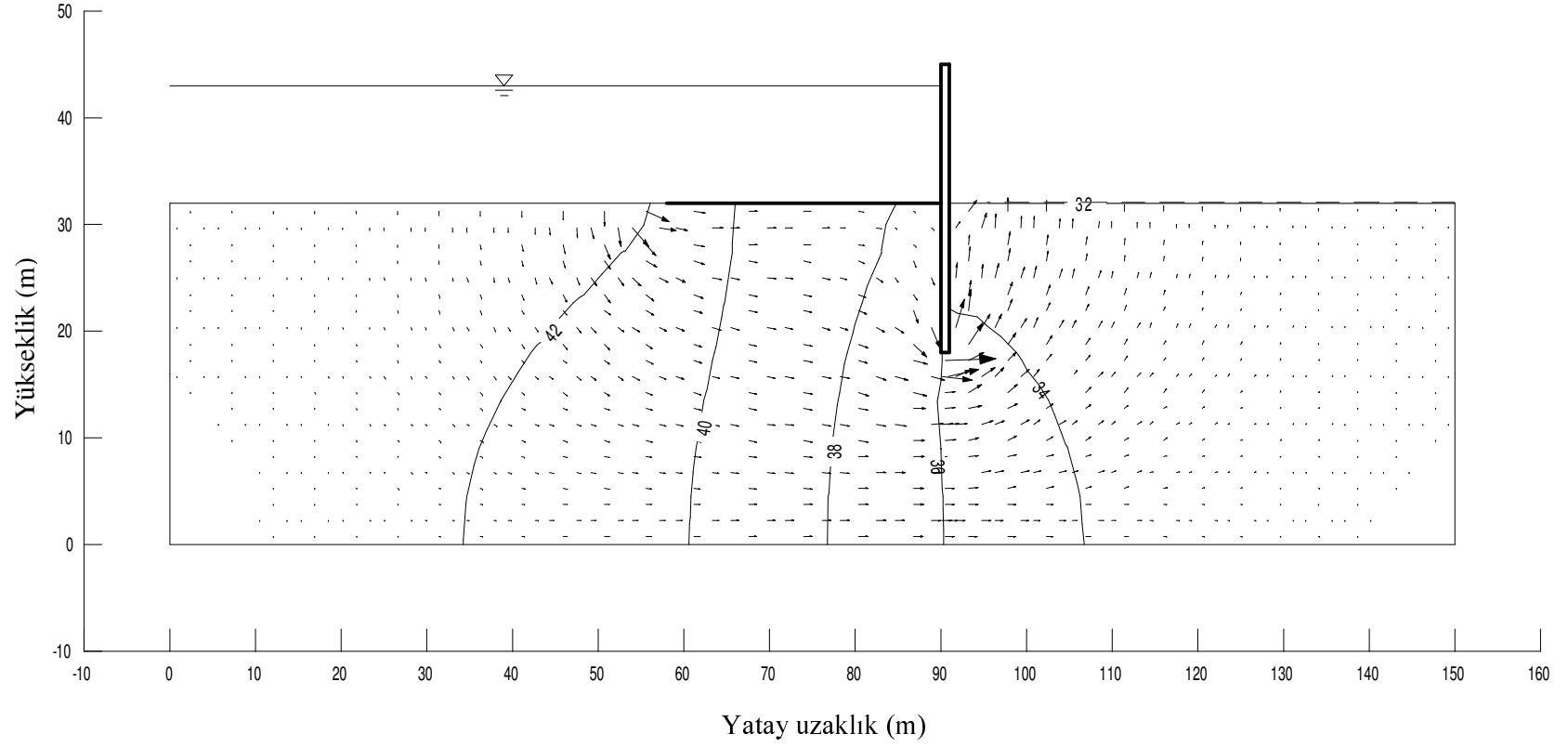
5.2.1 Palplanş

Palplanş modelleri için potansiyel dağılımları Şekil 5.19, Şekil 5.21, Şekil 5.23, Şekil 5.25 ve hız vektörleri Şekil 5.20, Şekil 5.22, Şekil 5.24, Şekil 5.26'da verilmiştir.

5.2.1.1 Palplanş 1

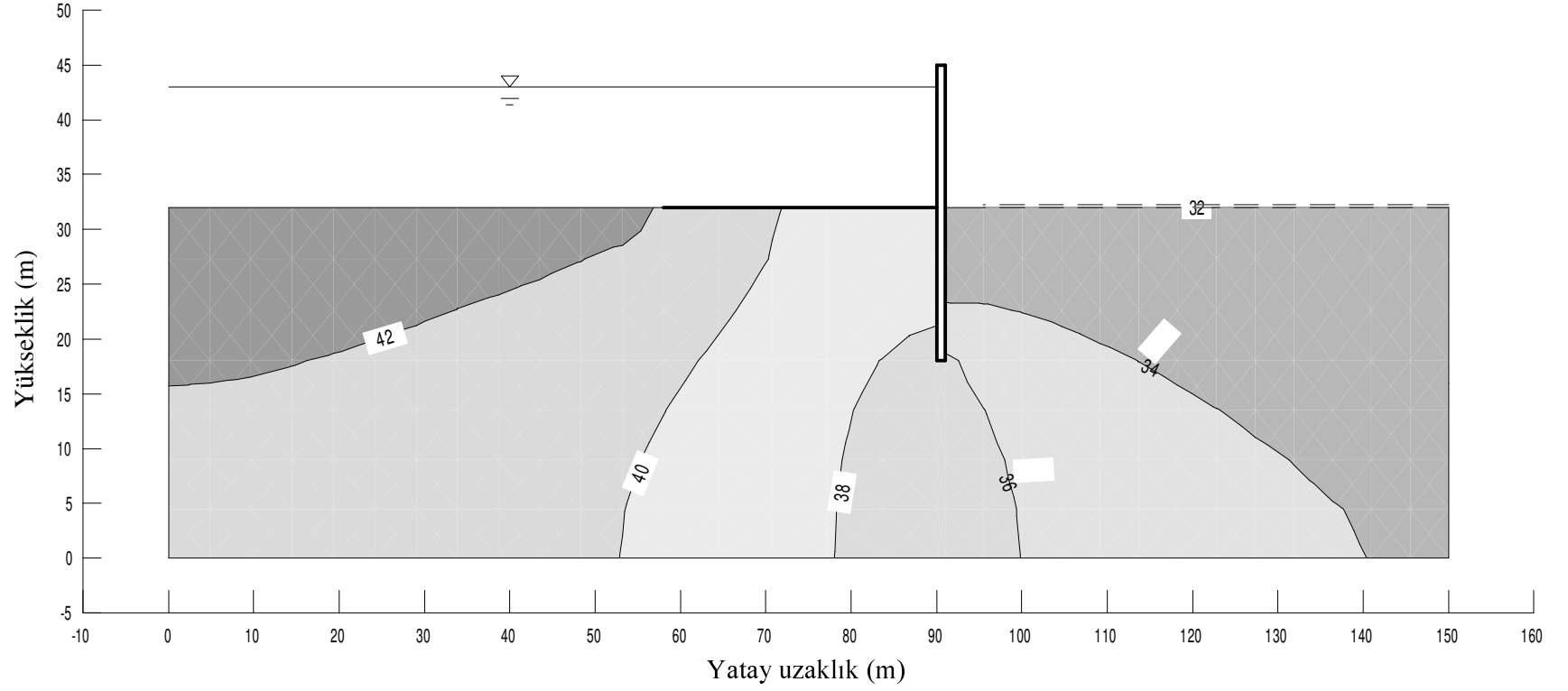


Şekil 5.19: Palplanş 1 için potansiyel dağılımı

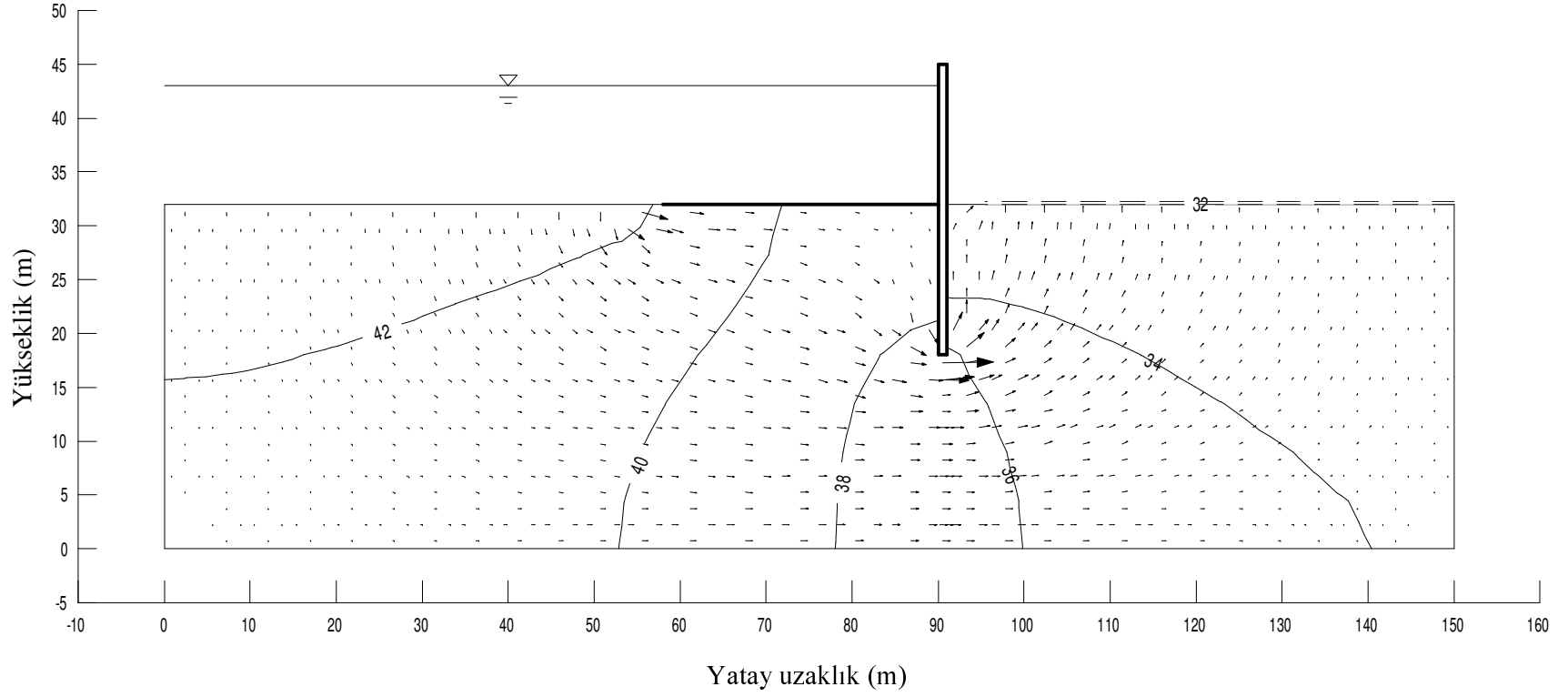


Şekil 5.20: Palplanş 1 için hız vektörleri

5.2.1.2 Palplanş 2

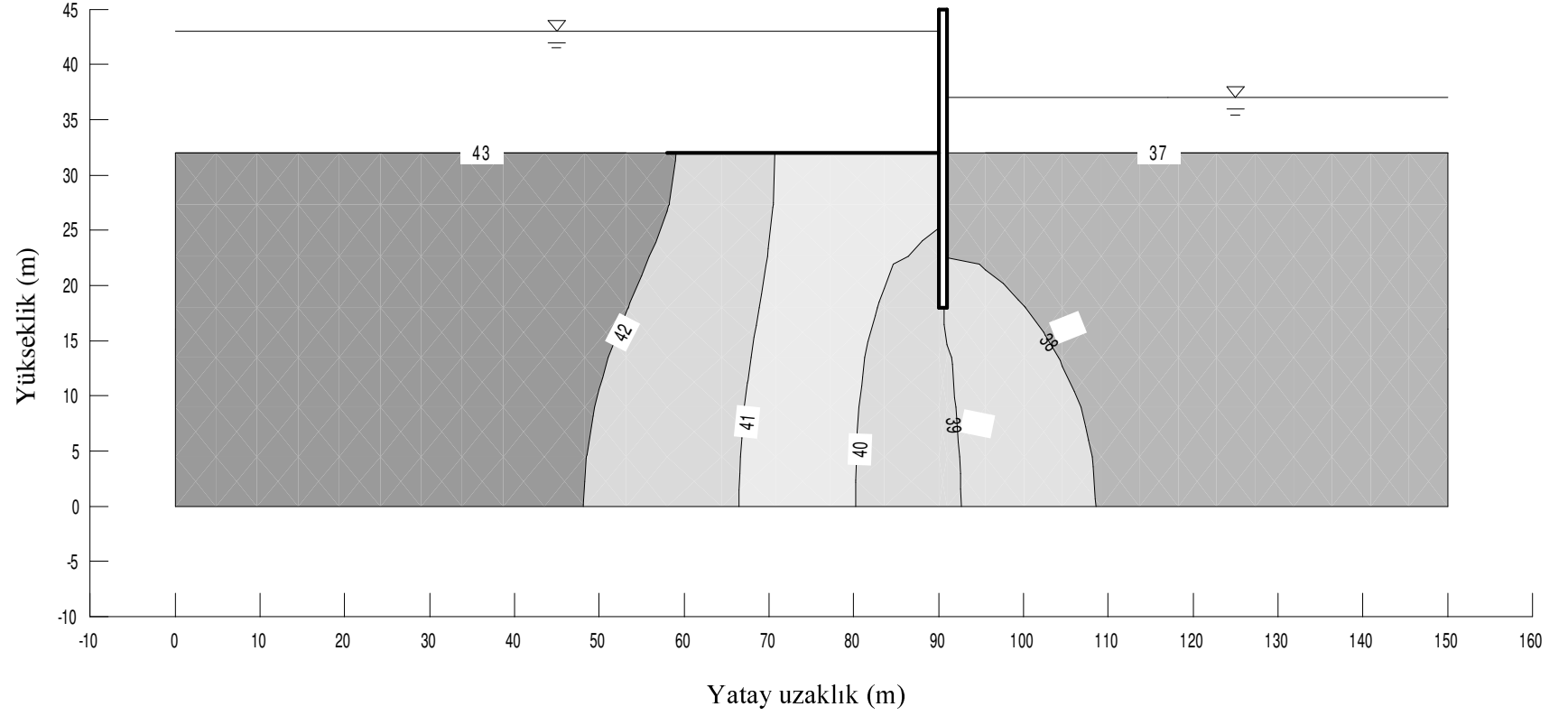


Şekil 5.21: Palplanş 2 için potansiyel dağılımı

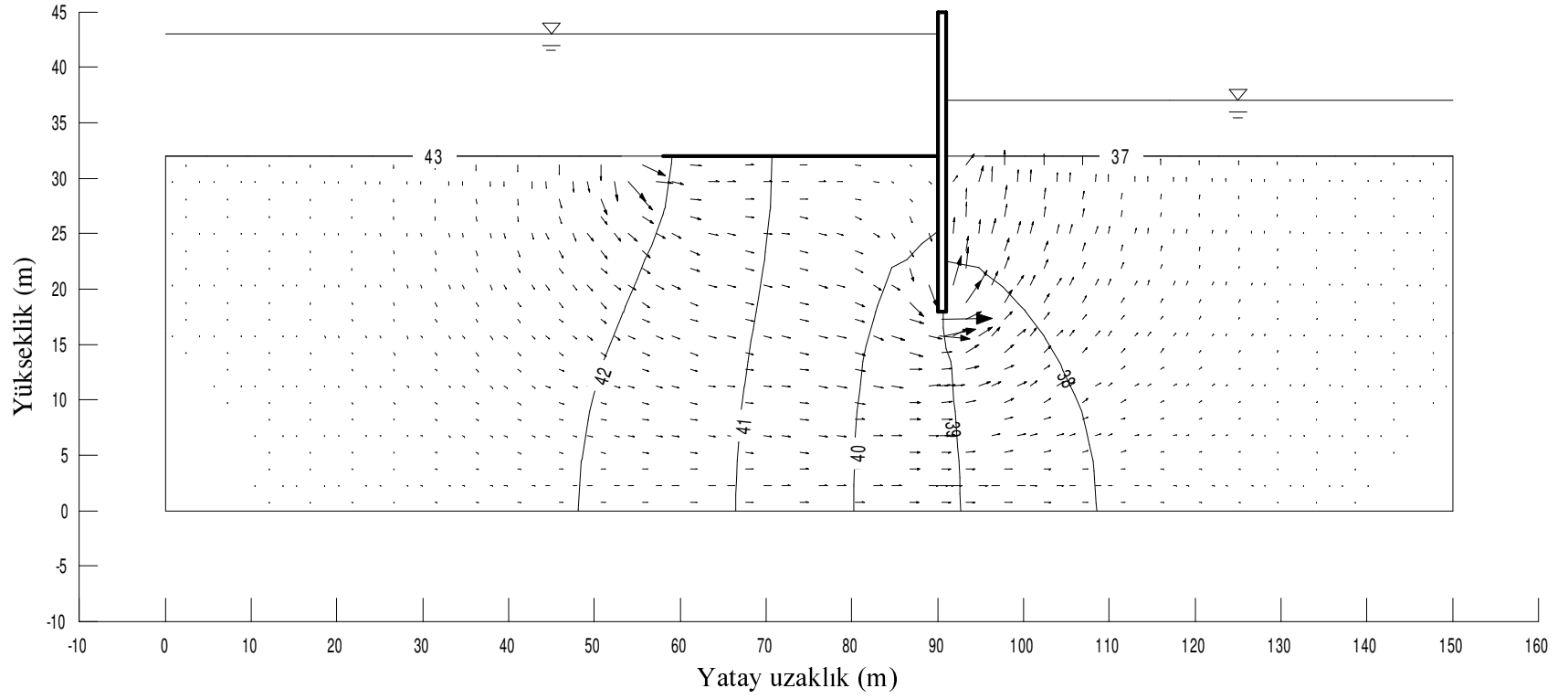


Şekil 5.22: Palplanş 2 için hız vektörleri

5.2.1.3 Palplanş 3

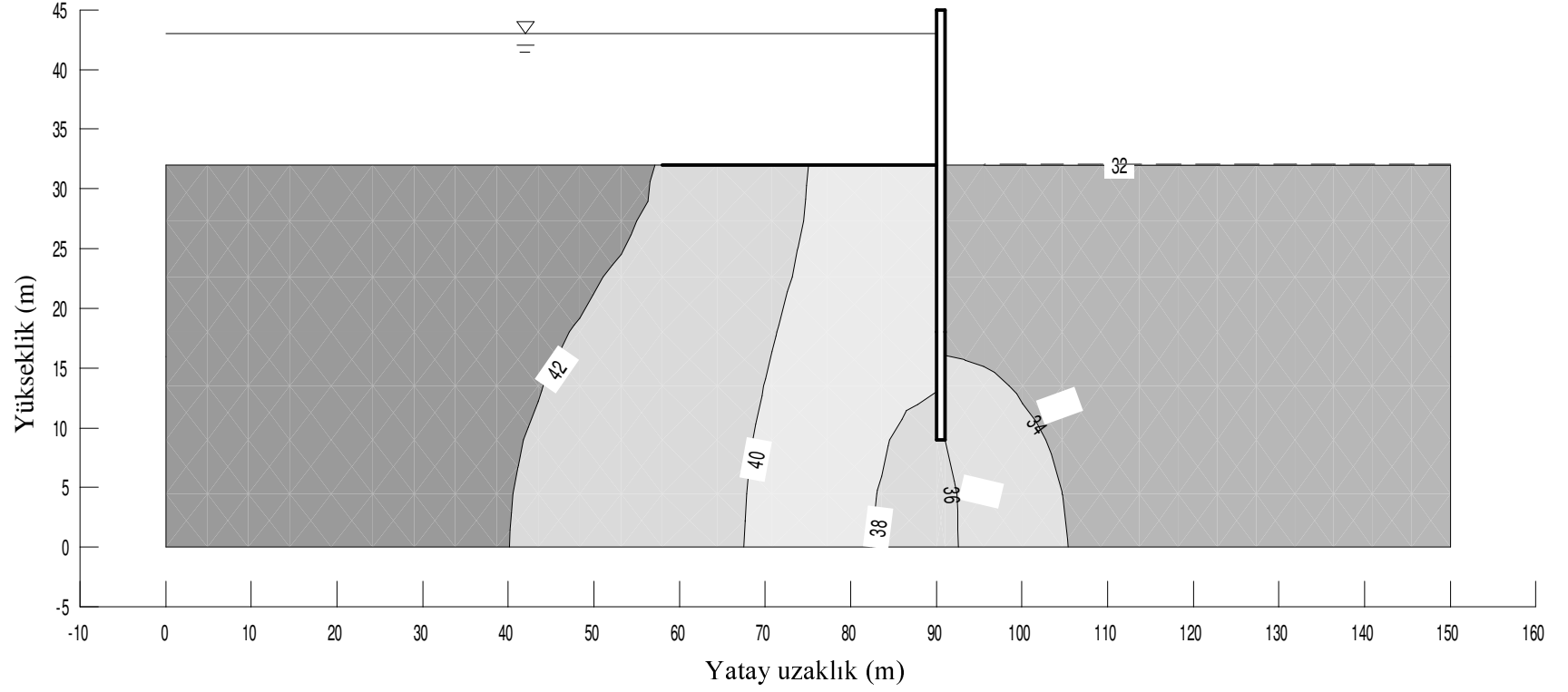


Şekil 5.23: Palplanş 3 için potansiyel dağılımı

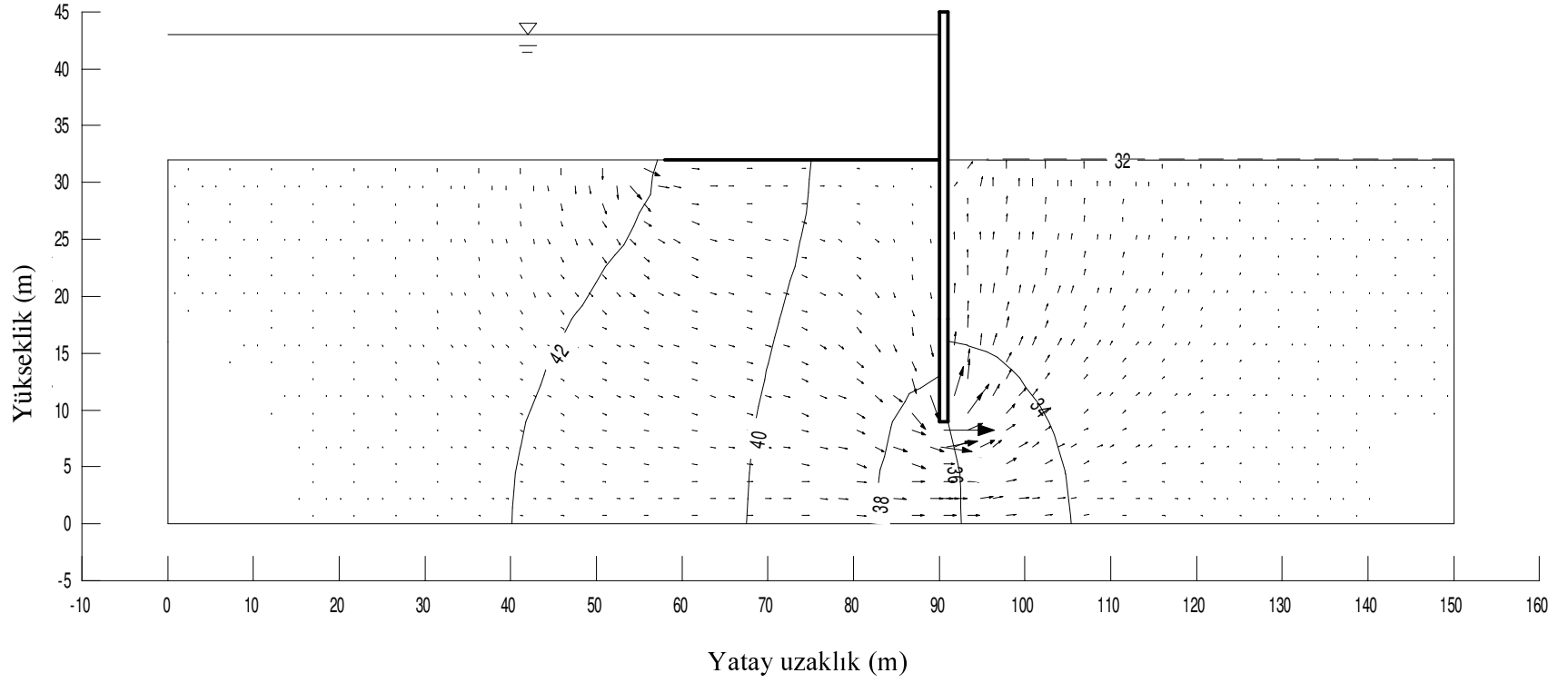


Şekil 5.24: Palplanç 3 için hız vektörleri

5.2.1.4 Palplanş 4



Şekil 5.25: Palplanş 4 için potansiyel dağılımı



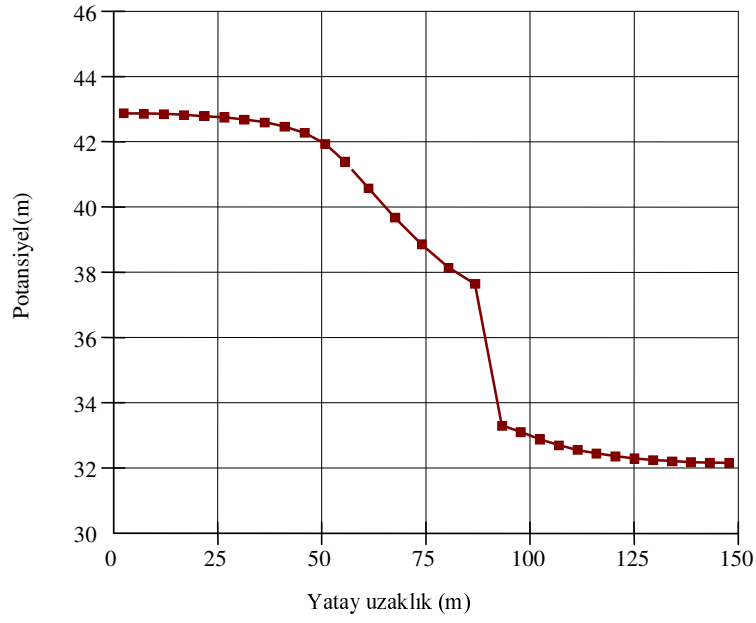
Şekil 5.26: Palplanş 4 için hız vektörler

Palplanş 1'de $3.15 \cdot 10^{-5}$ m/s alınan x doğrultusundaki hidrolik iletkenlik katsayısı Palplanş 2'de $9.45 \cdot 10^{-5}$ m/s alındığında bileşke hız değerleri düşmektedir. Potansiyel değerlerin ise, Palplanş 2'de Palplanş 1'e göre x doğrultusunda daha uzun bir mesafede değiştiği gözlenmekte, dolayısıyla hidrolik eğim küçülmektedir. Ayrıca, Şekil 5.28 ve Şekil 5.30'da görüldüğü gibi, hız dağılımları incelendiğinde palplanşın altındaki daralan kesitte olması gerektiği gibi bileşke hız değeri oldukça büyümektedir.

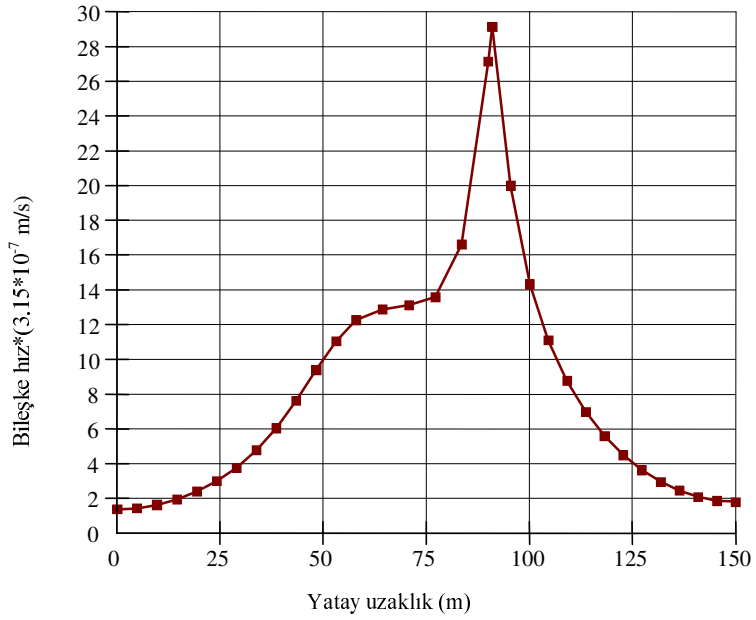
Palplanş 3'de ise palplanşın mansab kısmındaki 5 m su yüksekliği, incelenmekte olan aynı sızma alanı içerisinde daha az miktarda potansiyel dağılımına sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak da bileşke hız değerlerinde azalma gözlenmekte ve yine en büyük bileşke hız değerleri palplanşın altında meydana gelmektedir. Burada palplanşın, potansiyel değerin düşmesindeki etkisi de Palplanş 1'e göre azalmaktadır.

Palplanş 4'de palplanşın boyunun uzatılmasıyla birlikte, palplanşın altındaki kesit de daralmış olduğundan Şekil 5.34'de de görüldüğü gibi bileşke hız değerlerinin arttığı görülmektedir. Palplanş boyunun artmasıyla, potansiyeli düşürmedeki etkisinin de arttığı gözlenmektedir.

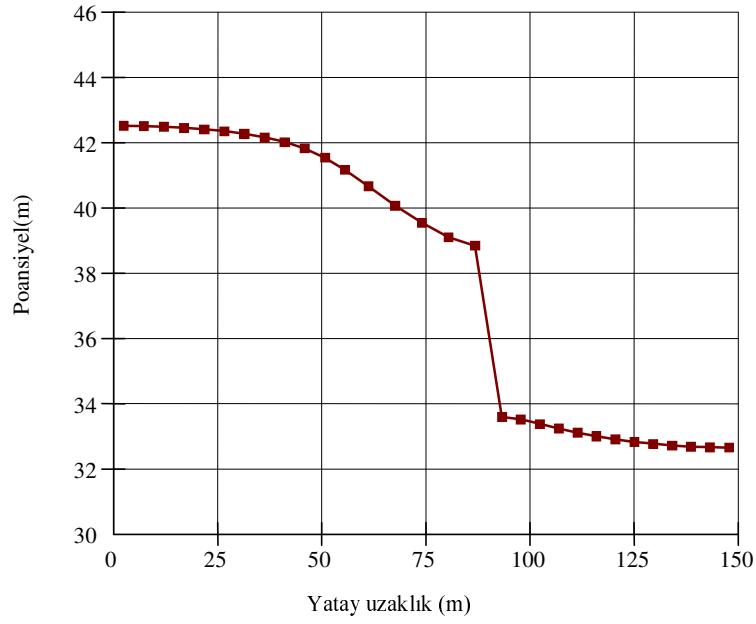
Palplanş modelleri için çeşitli kesitlerinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ve Potansiyel - Yatay uzaklık grafikleri Şekil 5.27-34'de verilmiştir.



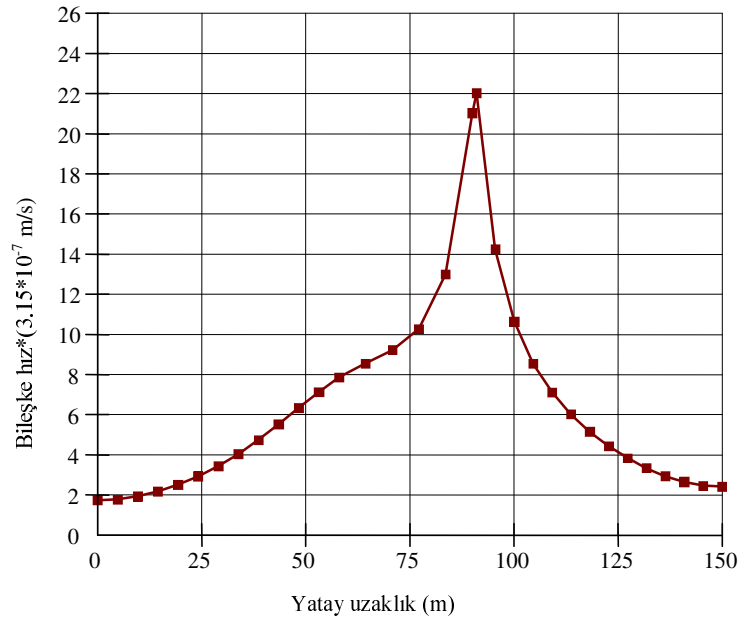
Şekil 5.27 Palplanş 1 için $y=25$ m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi



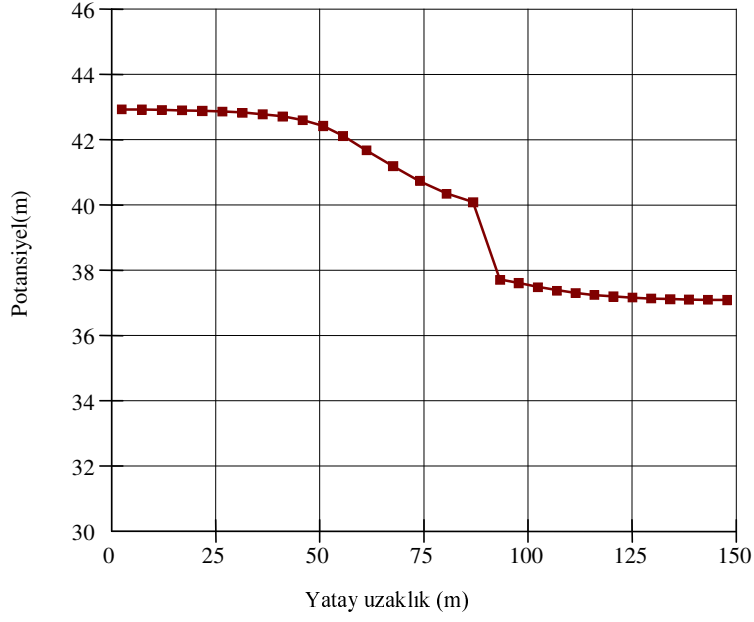
Şekil 5.28: Palplanş 1 için $y=18$ m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi



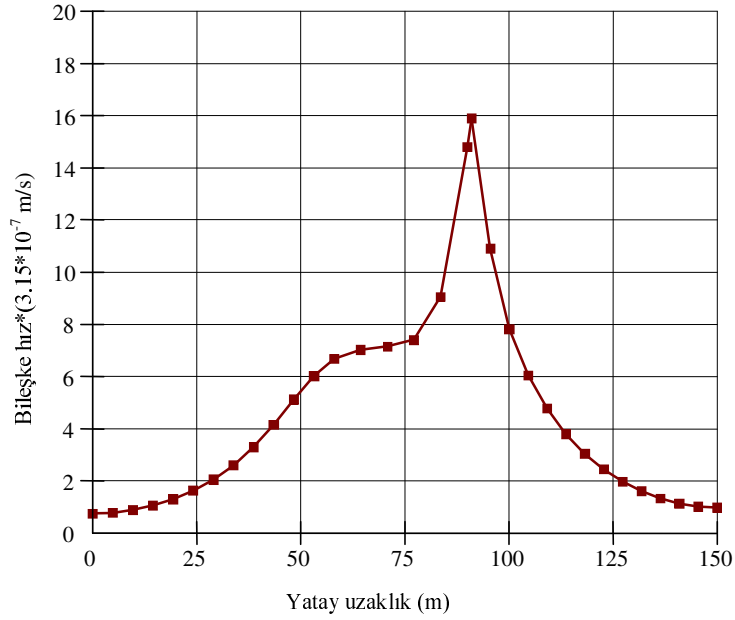
Şekil 5.29: Palplanş 2 için $y=25$ m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi



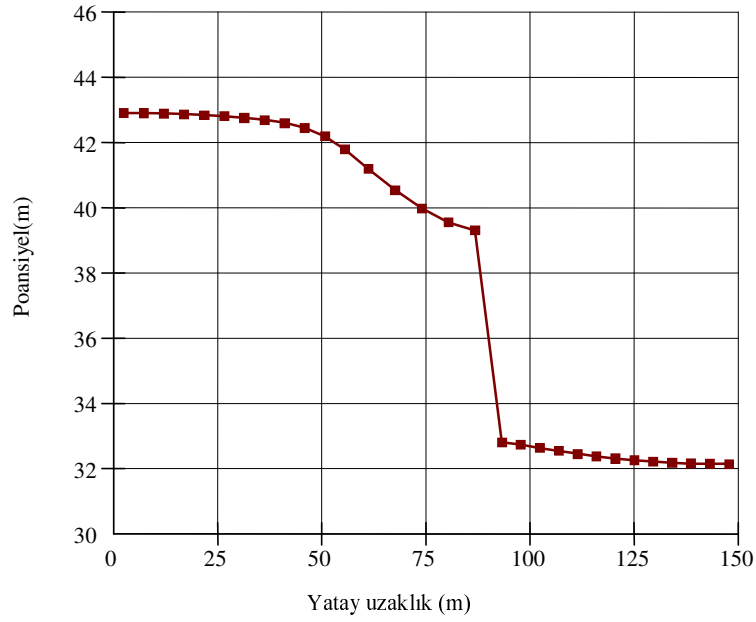
Şekil 5.30: Palplanş 2 için $y=18$ m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi



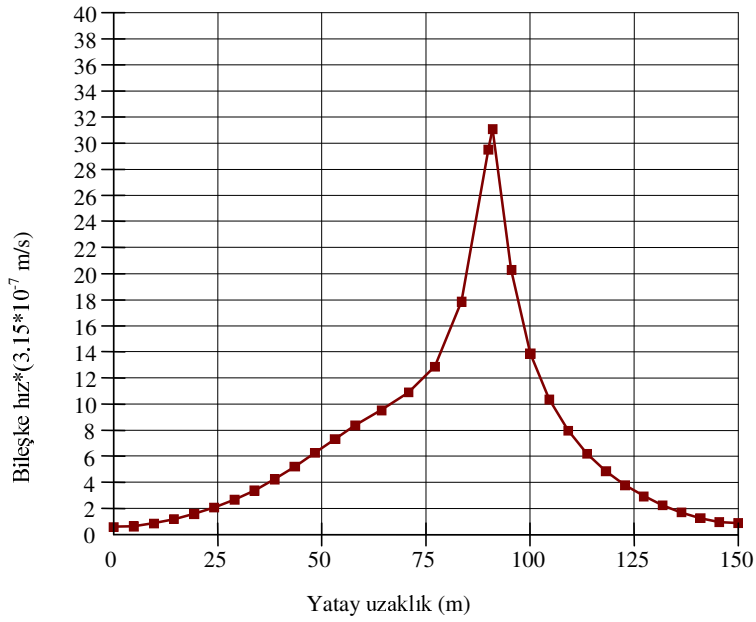
Şekil 5.31: Palplanş 3 için $y=25$ m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi



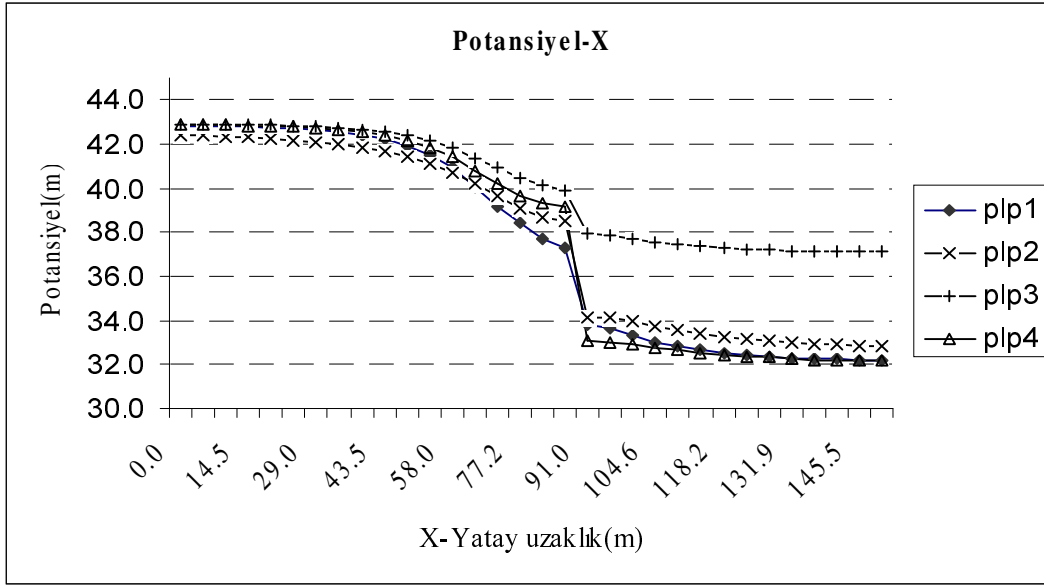
Şekil 5.32: Palplanş 3 için $y=18$ m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi



Şekil 5.33: Palplanş 4 için $y=25$ m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi



Şekil 5.34: Palplanş 4 için $y=9$ m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi



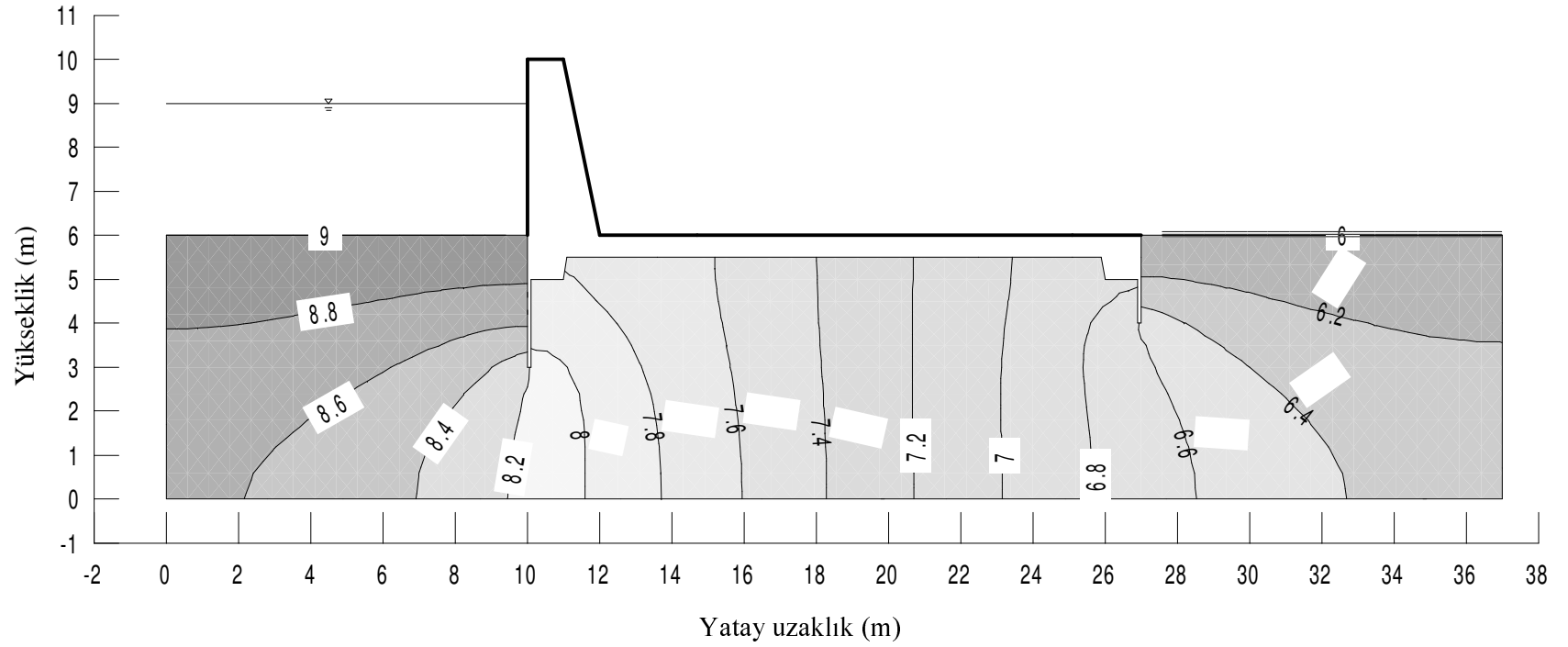
Şekil 5.35: Palplanş modelleri için yüzeye en yakın düğümlerde potansiyel değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.35’de palplanşlar için modellemede göz önüne alınan farklı durumlar sonucunda ortaya çıkan potansiyel dağılımlarının birbirine göre durumları görülmektedir. Palplanş 2 modelinde yataydaki hidrolik iletkenlik katsayısının düşeydekini üç katı alınması sonucunda palplanşın etkisinin azaldığı, Palplanş 3 modelinde memba tarafındaki su yüksekliğinin çözüm bölgesindeki potansiyel farkı azalttığı, Palplanş 4 modelinde ise palplanş boyunun uzatılması sonucu palplanş etkisinin arttığı açıkça görülmektedir.

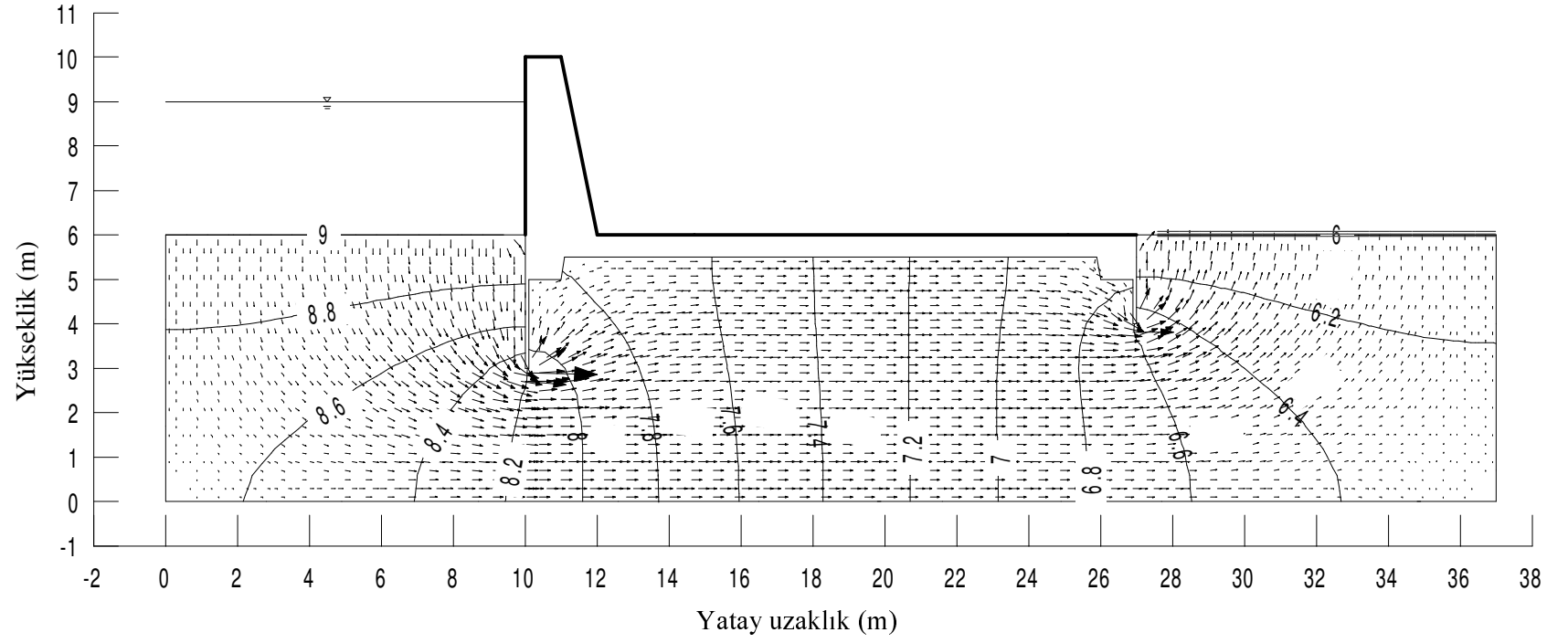
5.2.2 Bağlama

Bağlama modelleri için potansiyel dağılımları Şekil 5.36, Şekil 5.38, Şekil 5.40, Şekil 5.42 ve hız vektörleri Şekil 5.37, Şekil 5.39, Şekil 5.41, Şekil 5.43’de verilmiştir.

5.2.2.1 Bağlama 1

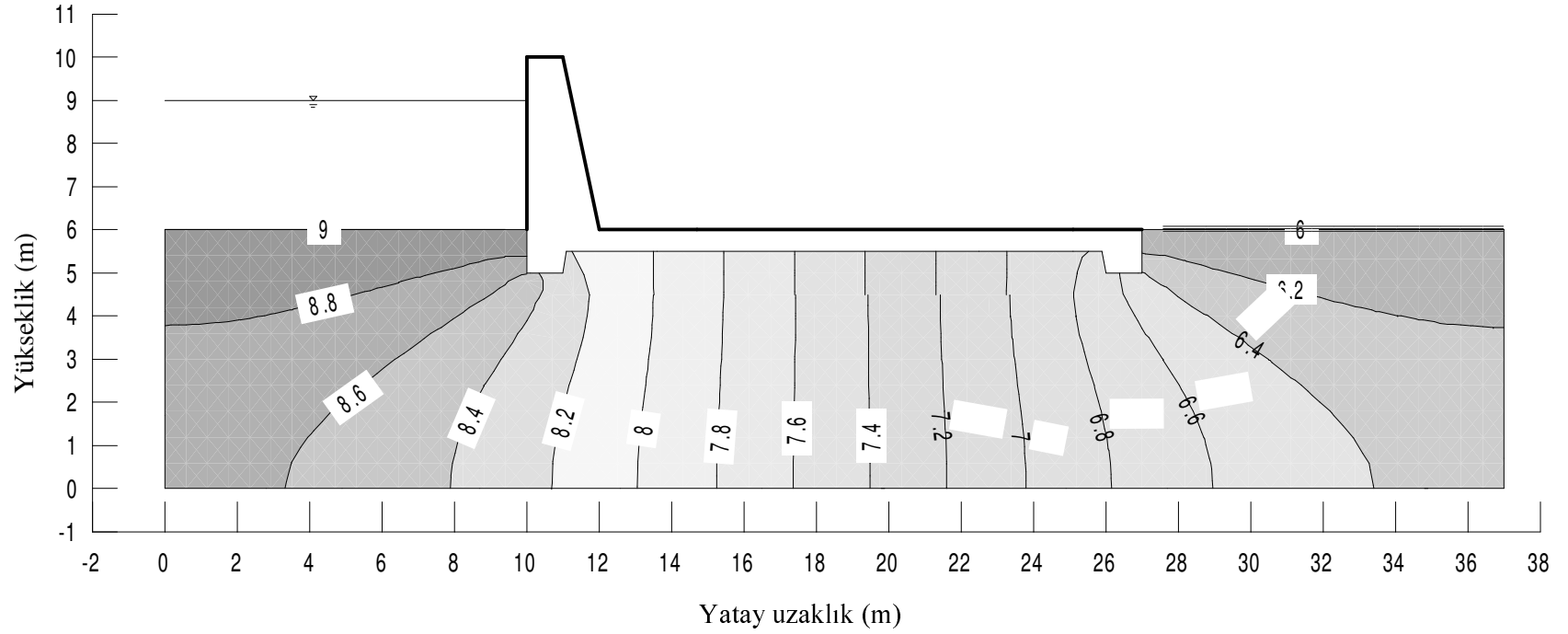


Şekil 5.36: Bağlama 1 için potansiyel dağılımı

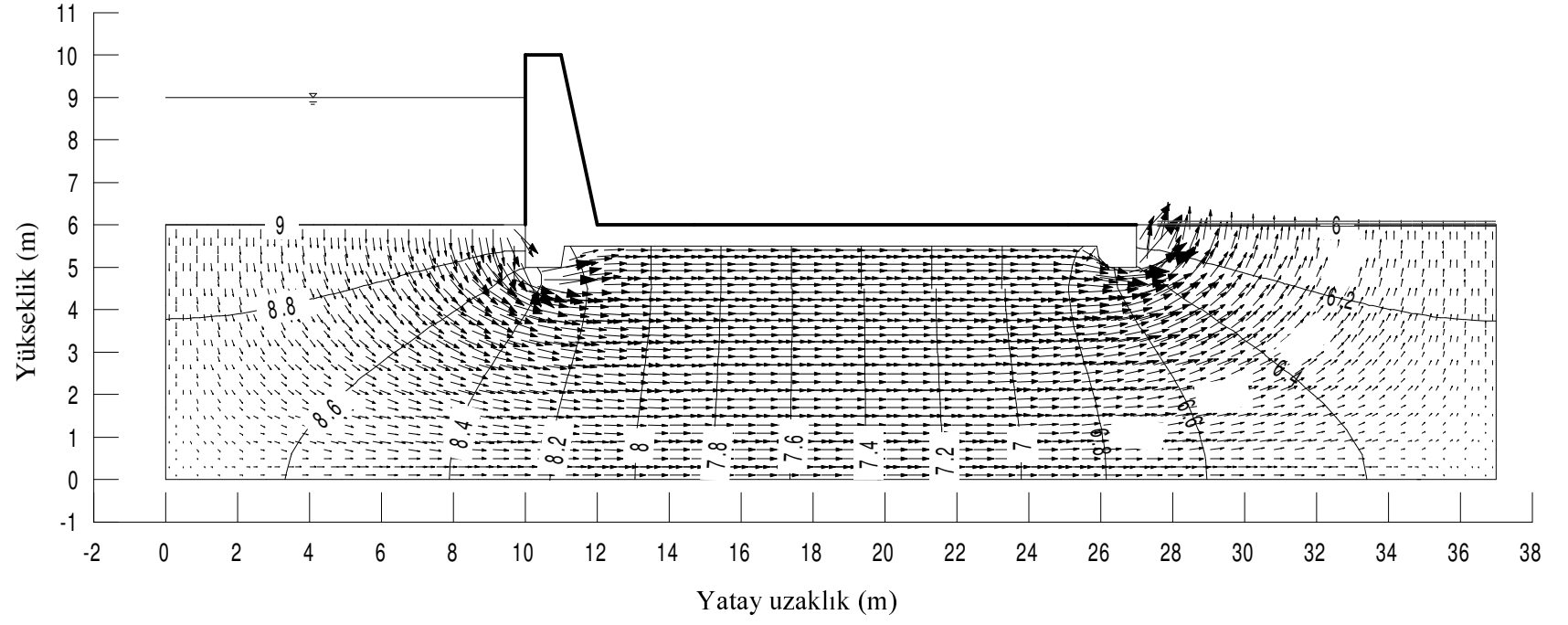


Şekil 5.37: Bağlama 1 için hız vektörleri

5.2.2.2 Bağlama 2

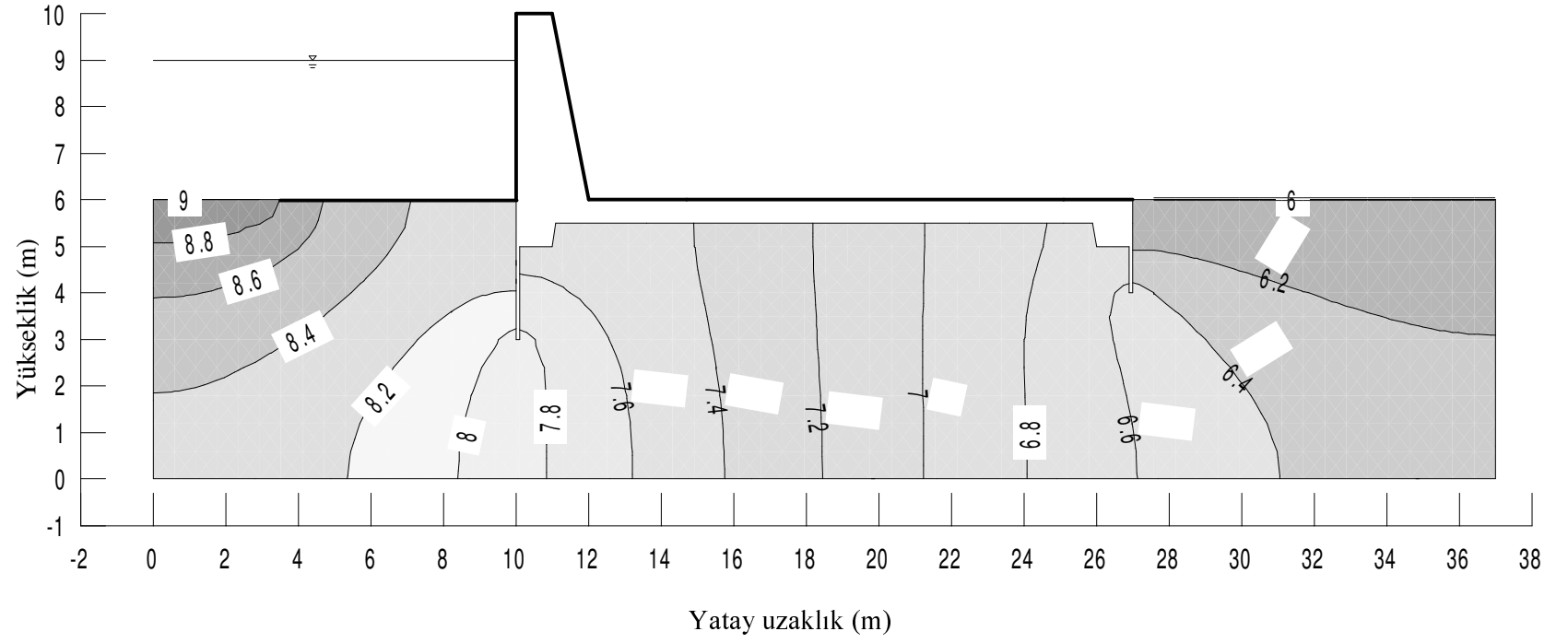


Şekil 5.38: Bağlama 2 için potansiyel dağılımı

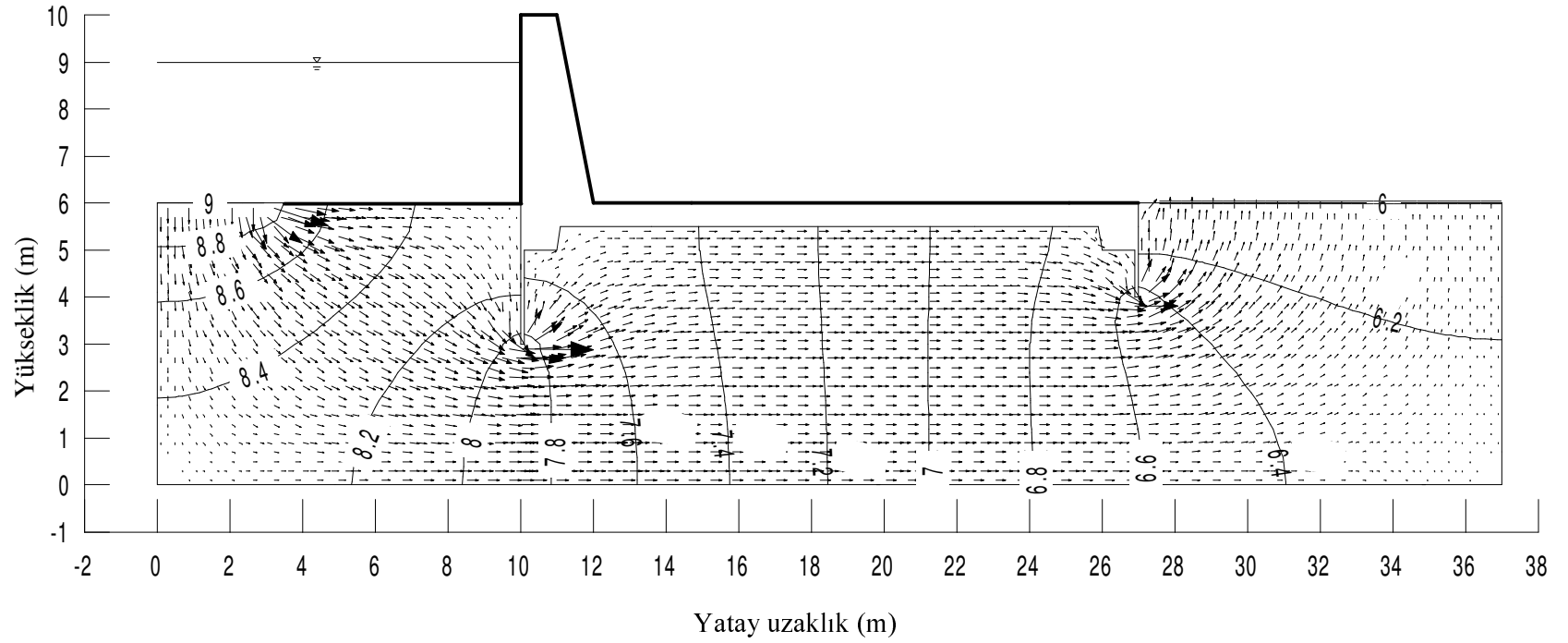


Şekil 5.39: Bağlama 2 için hız vektörleri

5.2.2.3 Bağlama 3

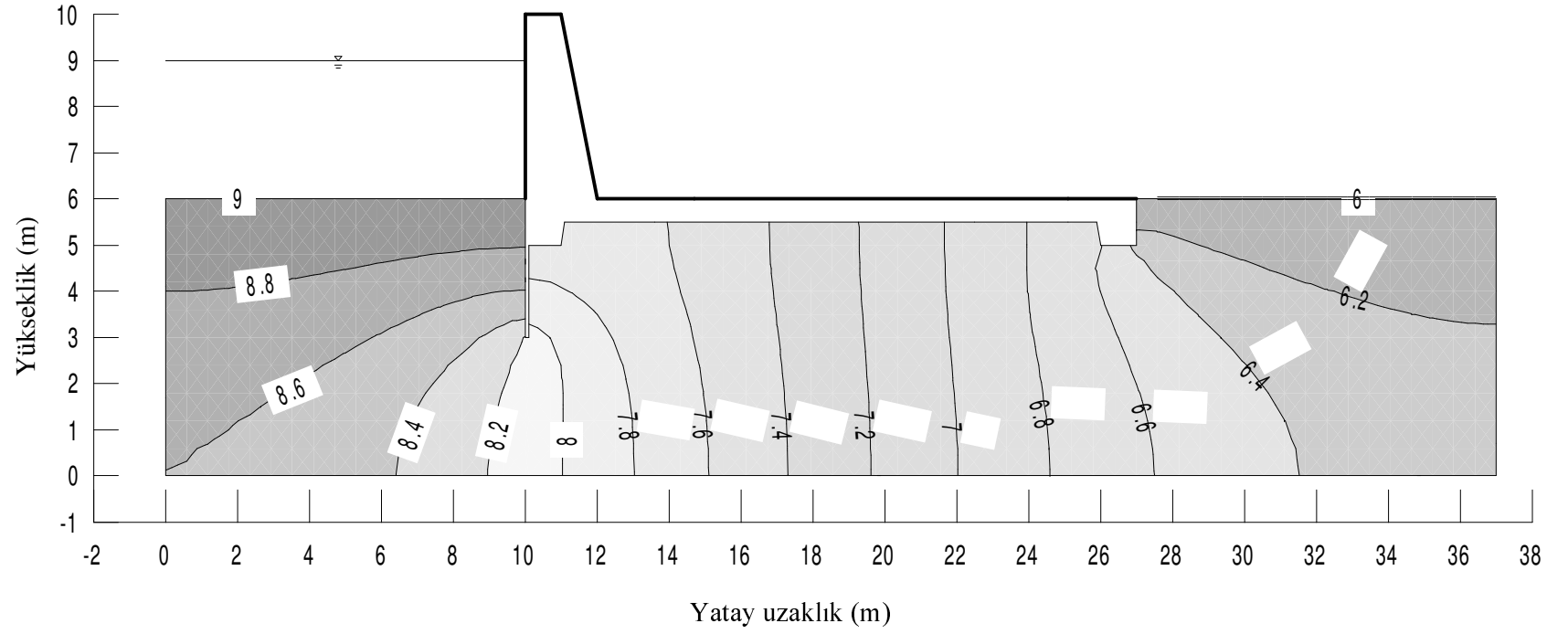


Şekil 5.40: Bağlama 3 için potansiyel dağılımı

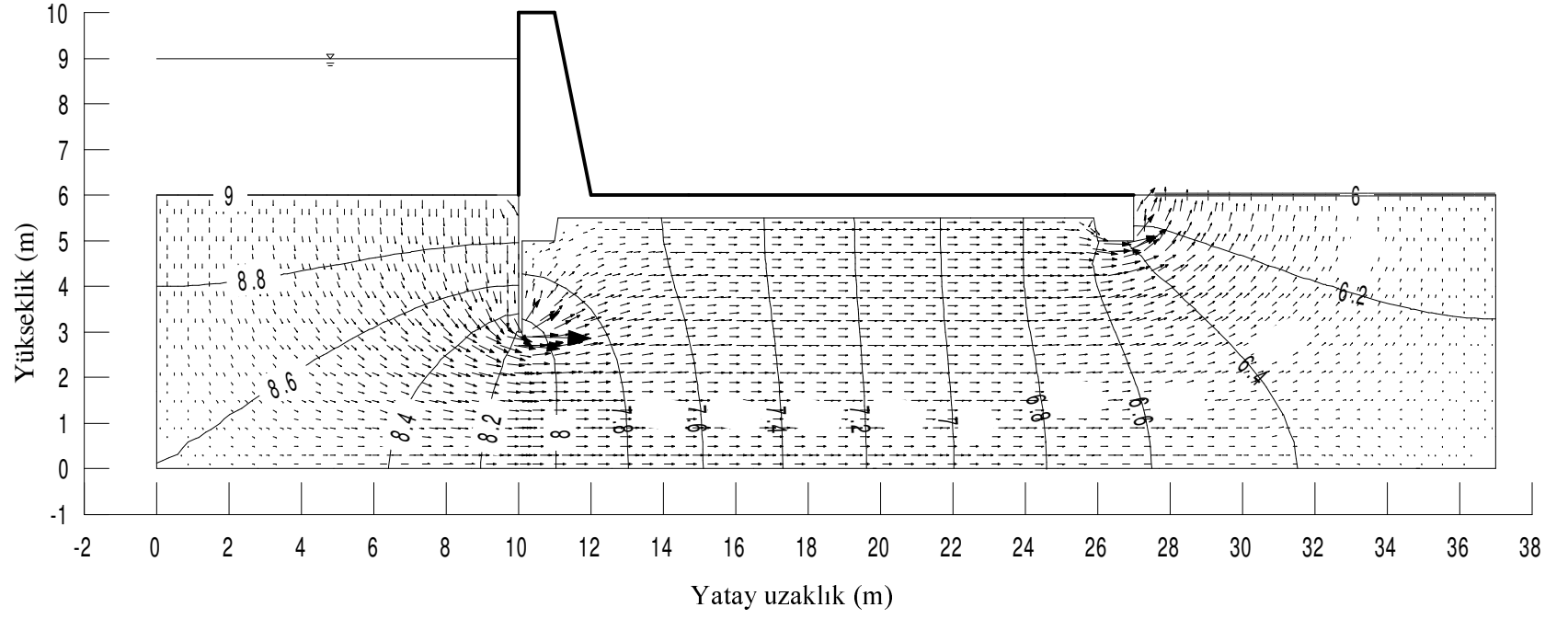


Şekil 5.41: Bağlama 3 için hız vektörleri

5.2.2.4 Bağlama 4



Şekil 5.42: Bağlama 4 için potansiyel dağılımı



Şekil 5.43: Bağlama 4 için hız vektörleri

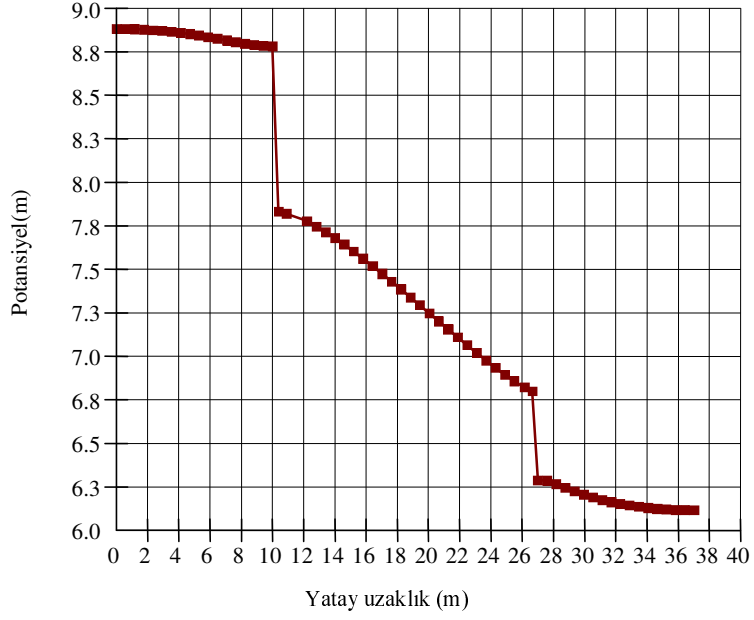
Bağlama 1'in incelenmesinde bağlamanın memba tarafındaki palplanşın, potansiyelin düşmesinde daha etkili olduğu görülmektedir. En büyük hız değerleri de buna bağlı olarak memba tarafındaki palplanşın altında gözlenmektedir.

Bağlama 2 incelendiğinde palplanşların kaldırılmasıyla bağlamanın memba ve mansab taraflarındaki parafuyların potansiyelin azalmasında etkili olduğu görülmekte, buna bağlı olarak da bileşke hız değerleri parafuyların altındaki bölgede büyümektedir. Parafuy derinlikleri eşit olduğundan iki parafuy da potansiyelin azalmasında hemen hemen aynı etkiyi göstermektedir.

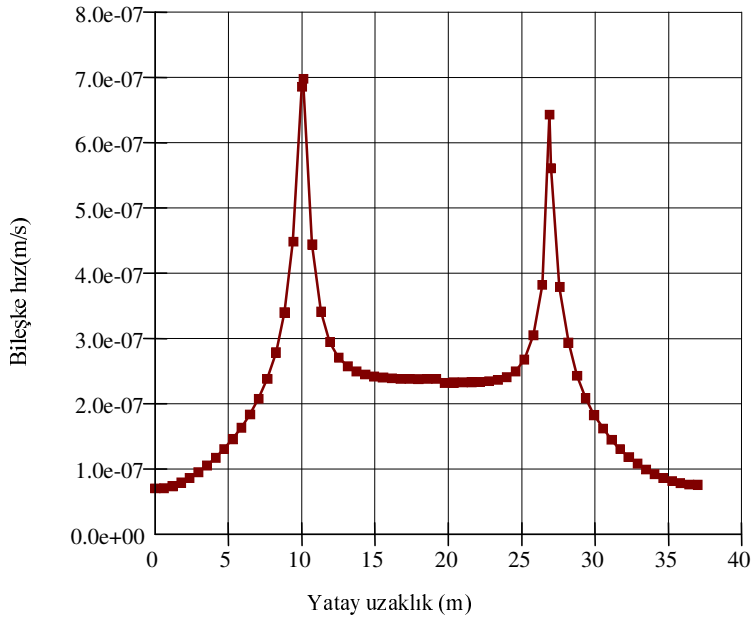
Bağlama 3'de potansiyel kayıplarının her iki palplanşın altında ve memba blanketinin önünde arttığı görülmekte, bu noktalarda bileşke hız değerlerinde de artışlar gözlenmektedir.

Bağlama 4'de mansab tarafındaki 1 m boyundaki palplanşın kaldırılmasıyla, iki palplanşın birlikte oluşturduğu potansiyel farkını memba tarafındaki palplanş, tek başına karşılamaya başlamakta, palplanşın altında, bileşke hız değerleri oldukça yükselmektedir.

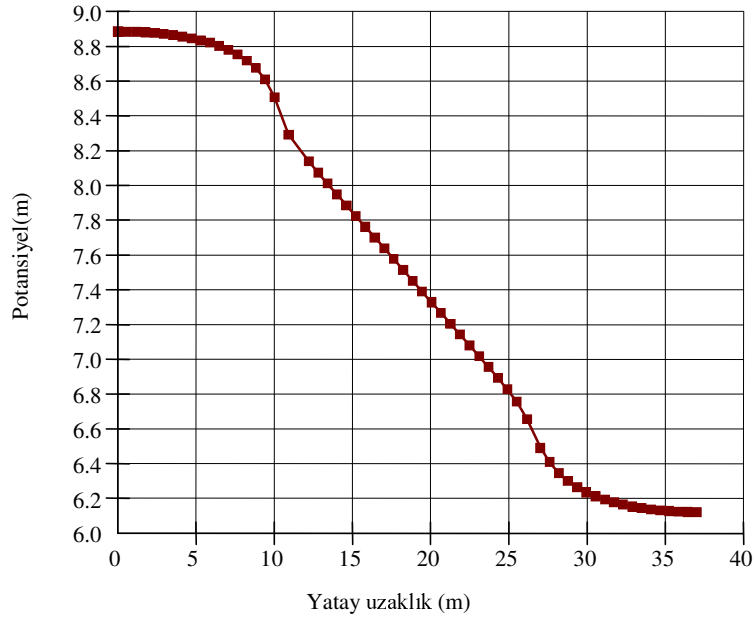
Bağlama modelleri için çeşitli kesitlerinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ve Potansiyel - Yatay uzaklık grafikleri Şekil 5.44-51'de verilmiştir.



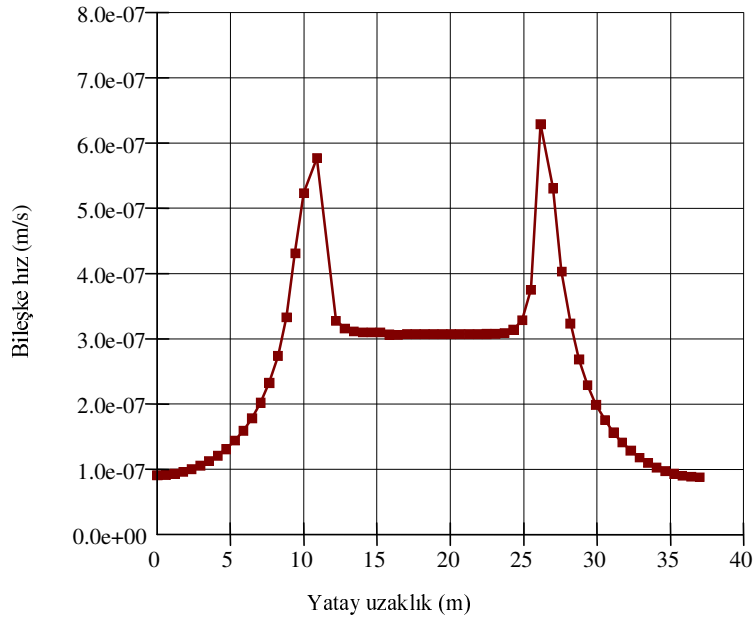
Şekil 5.44: Bağlama 1 için $y=4.9$ m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi



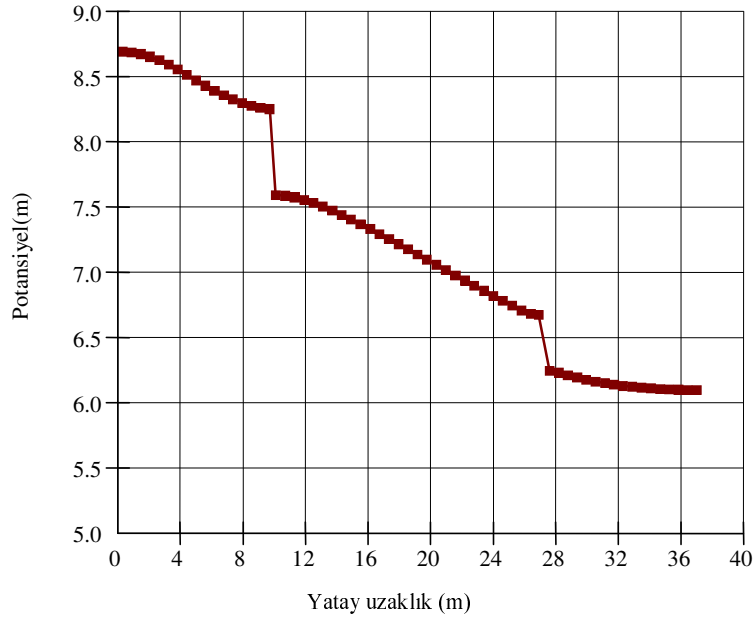
Şekil 5.45: Bağlama 1 için $y=3$ m ve $y=4$ m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi



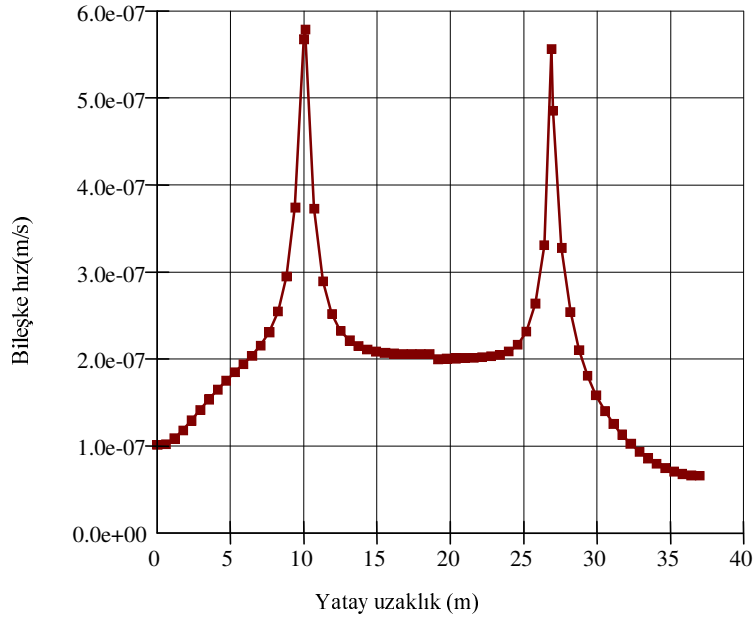
Şekil 5.46: Bağlama 2 için $y=4.9$ m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi



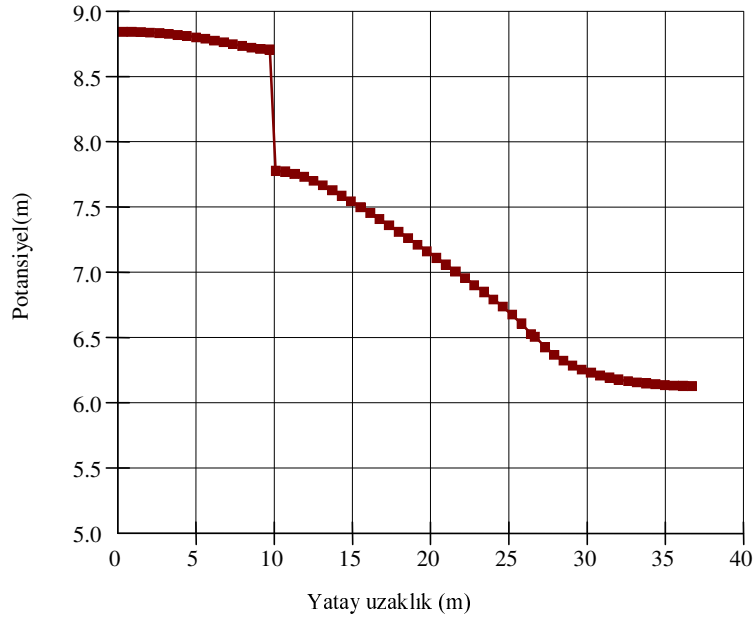
Şekil 5.47: Bağlama 2 için $y=4.9$ m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi



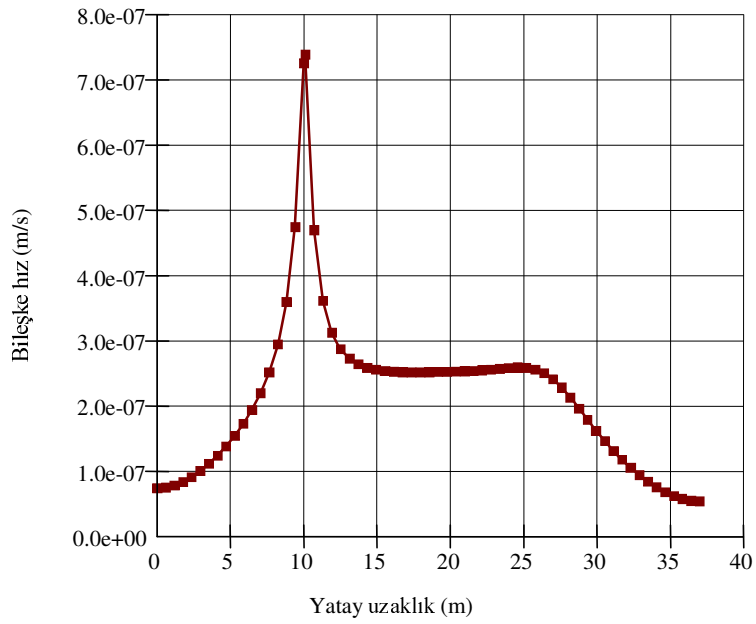
Şekil 5.48: Bağlama 3 için $y=4.5$ m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi



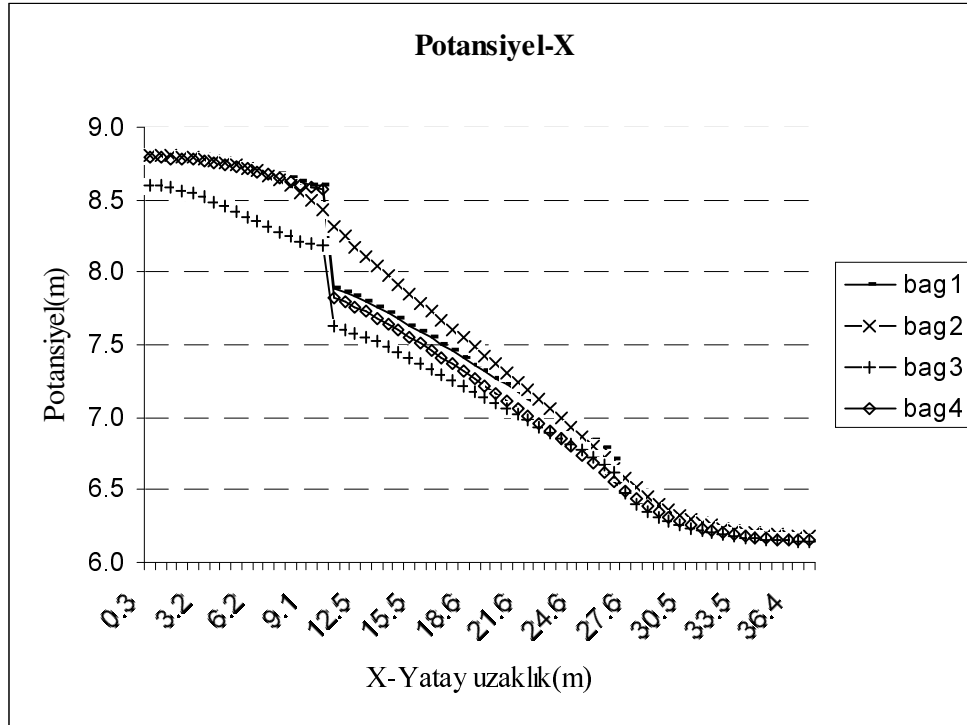
Şekil 5.49: Bağlama 3 için $y=3$ m ve $y=4.1$ m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi



Şekil 5.50: Bağlama 4 için $y=4.5$ m kesitinde Potansiyel - Yatay uzaklık ilişkisi



Şekil 5.51: Bağlama 4 için $y=3$ m kesitinde Bileşke hız - Yatay uzaklık ilişkisi



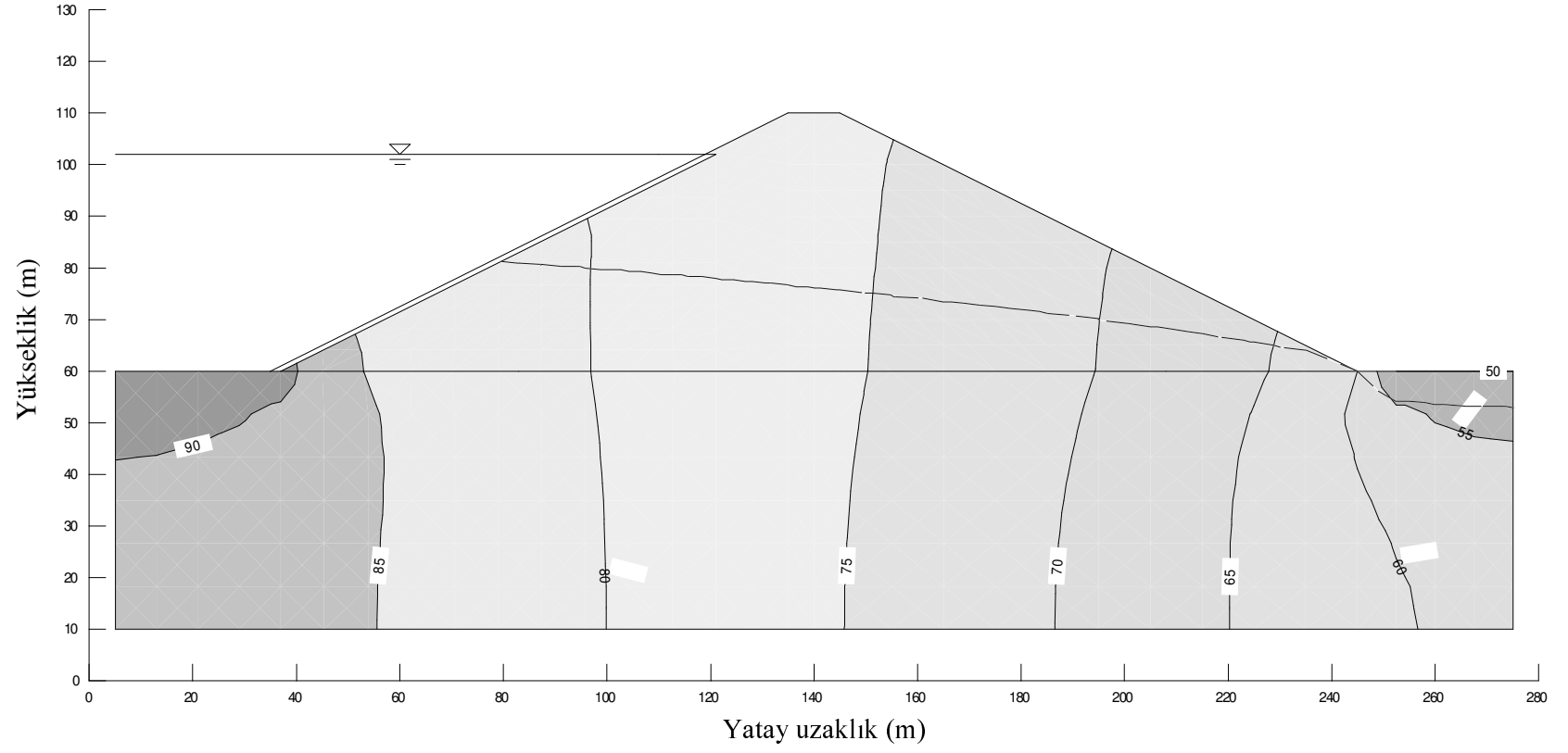
Şekil 5.52: Bağlama modelleri için yüzeye en yakın düğümlerde potansiyel değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.52’de bağlamalar için modellemede göz önüne alınan farklı durumlar sonucunda ortaya çıkan potansiyel dağılımlarının birbirine göre durumları görülmektedir. Bağlama 2 modelinde palpları kaldırılmasıyla potansiyeldeki ani düşüşlerin ortadan kalktığı, Bağlama 3 modelinde memba blanketinin potansiyelin azalmasında etkili olduğu ancak palpları etkisinin azaldığı, Bağlama 4 modelinde ise mansab tarafındaki palpları kaldırılmasıyla memba tarafındaki palpları etkisinin arttığı açıkça görülmektedir.

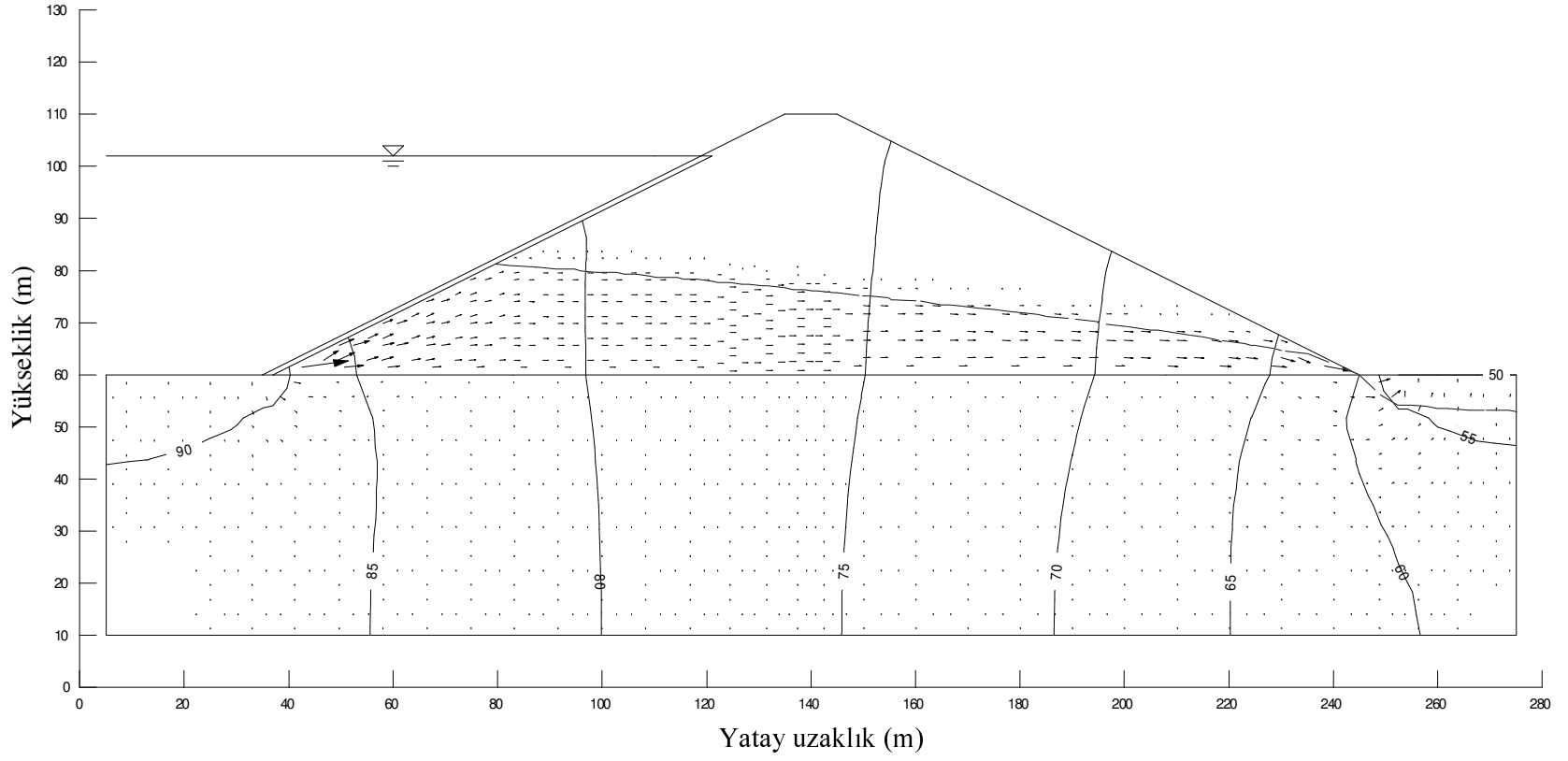
5.2.3 Baraj

Baraj modelleri için potansiyel dağılımları Şekil 5.53, Şekil 5.55, Şekil 5.57 ve hız vektörleri Şekil 5.54, Şekil 5.56, Şekil 5.58’de verilmiştir.

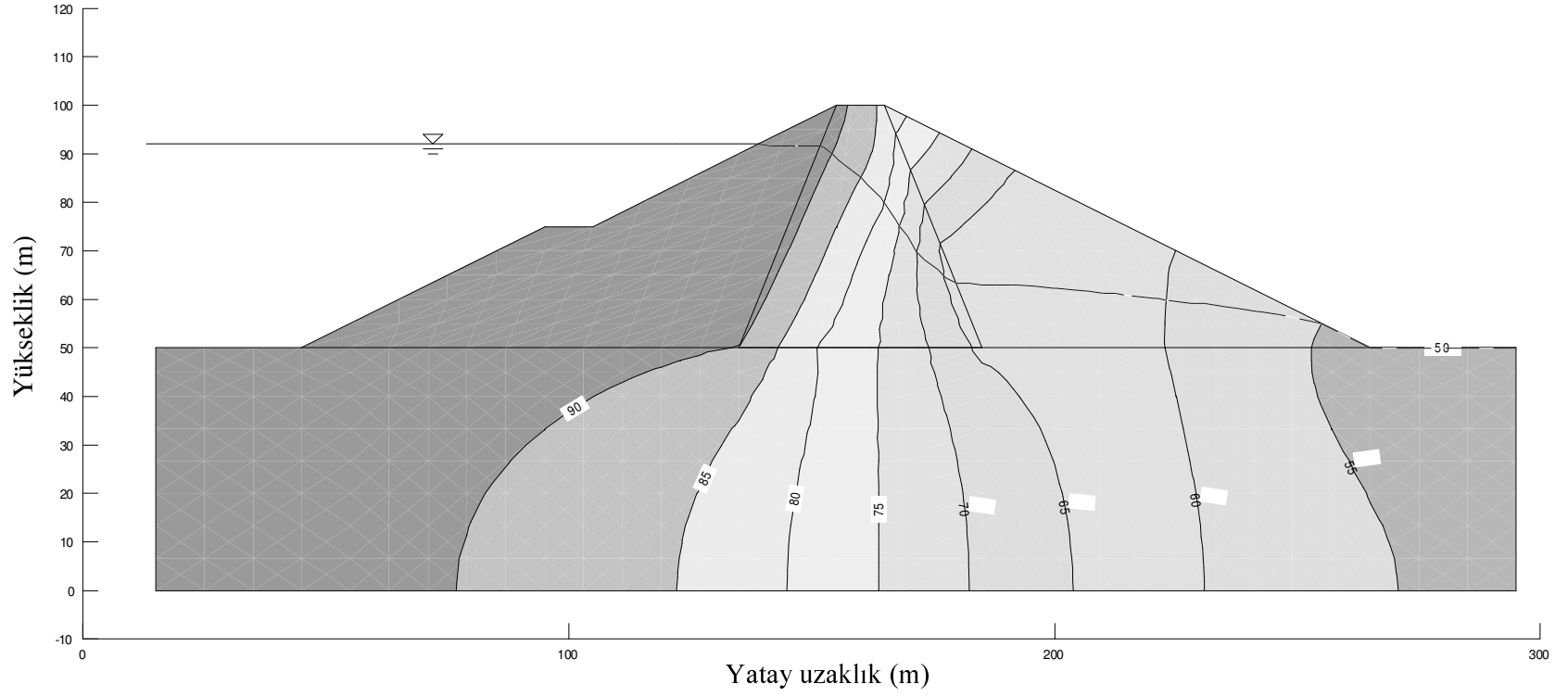
5.2.3.1 Baraj 1



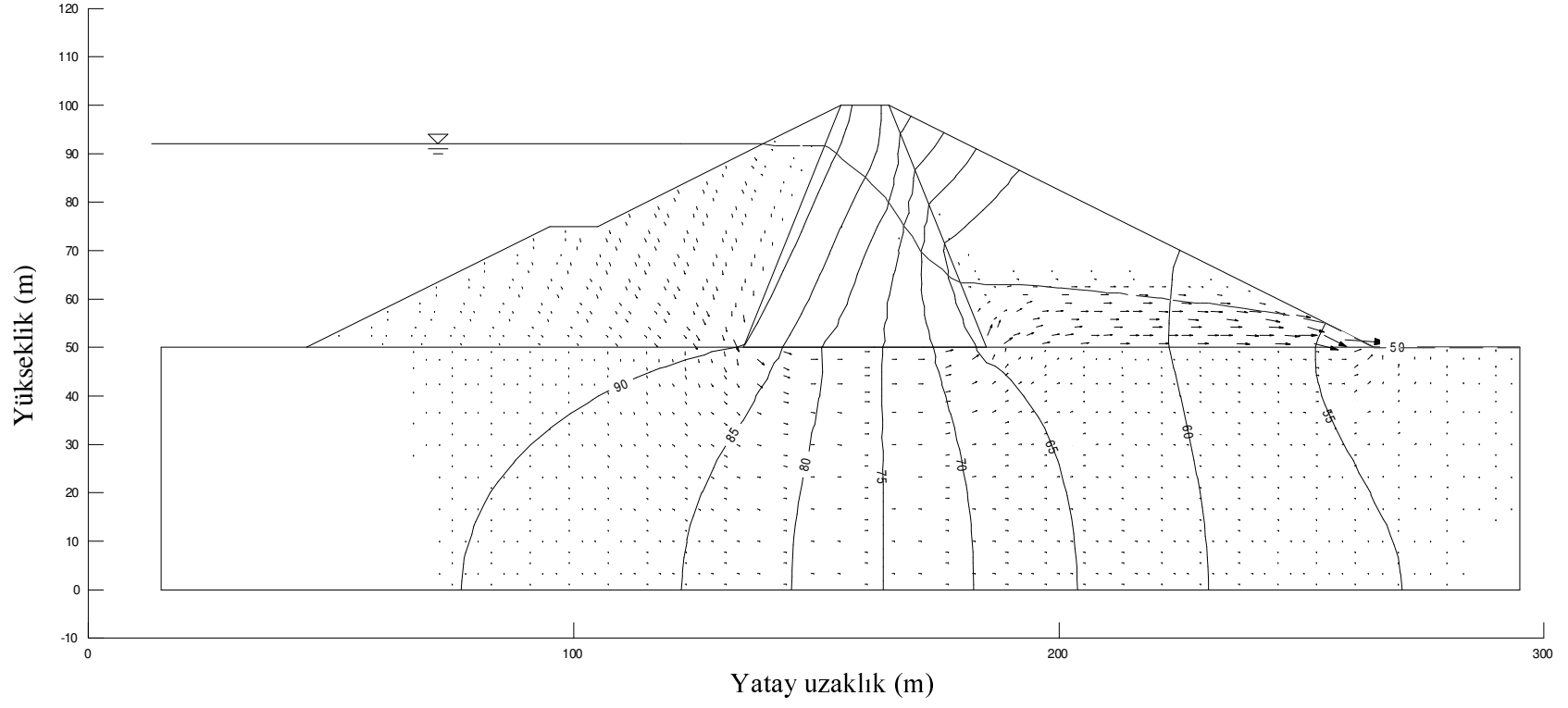
Şekil 5.53: Baraj 1 için potansiyel dağılımı



Şekil 5.54: Baraj 1 için hız vektörler

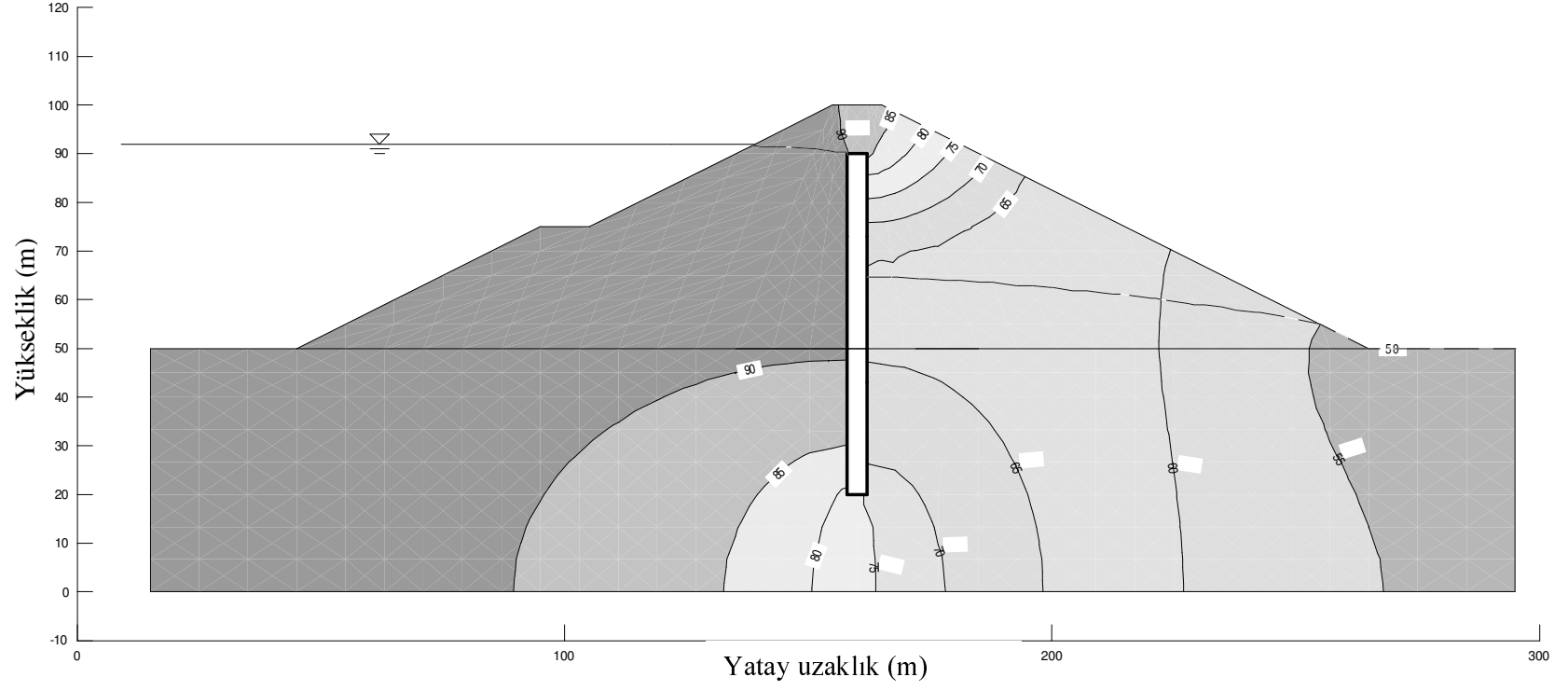
5.2.3.2 Baraj 2

Şekil 5.55: Baraj 2 için potansiyel dağılımı

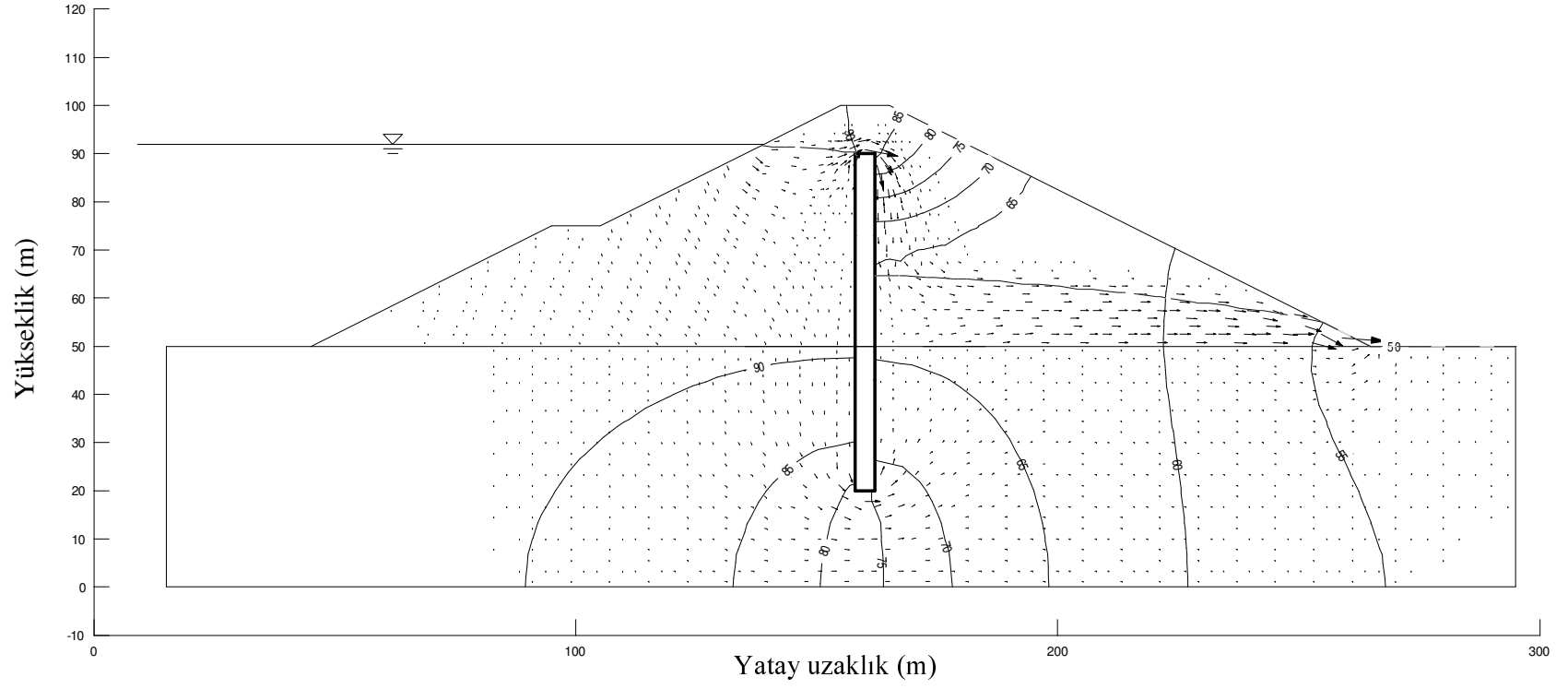


Şekil 5.56: Baraj 2 için hız vektörleri

5.2.3.3 Baraj 3

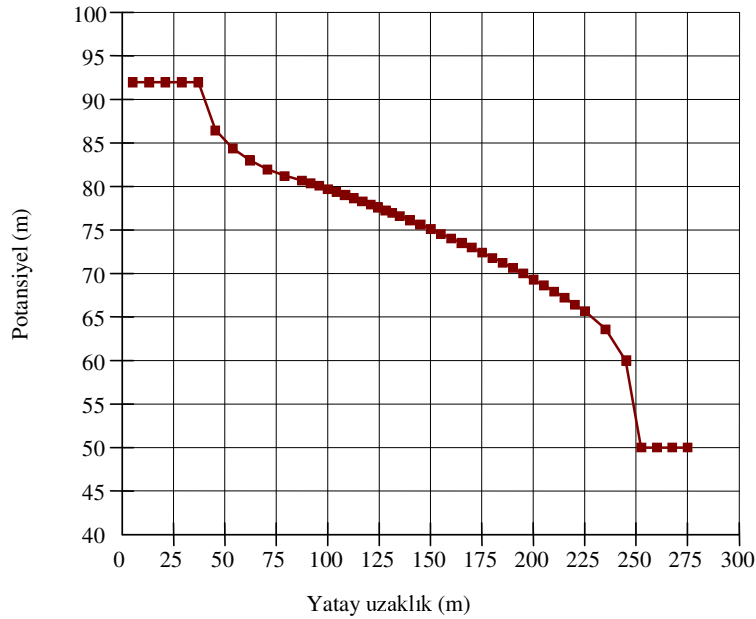


Şekil 5.57: Baraj 3 için potansiyel dağılımı



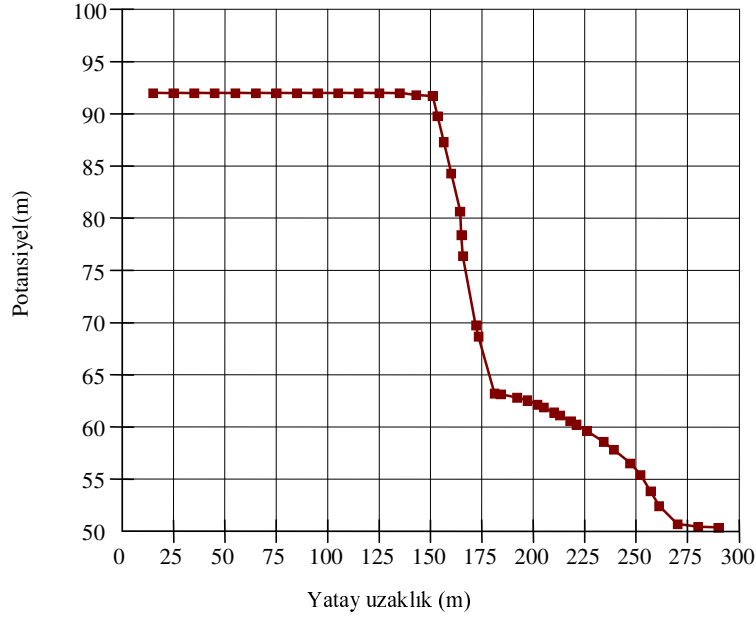
Şekil 5.58: Baraj 3 için hız vektörleri

Şekil 5.53'de verilen Baraj 1 modeli için elde edilen potansiyel dağılımı incelendiğinde, memba yüzündeki betonarme kaplamanın etkisiyle suyun sadece barajın altından sızarak, baraj gövdesi içinde yükseldiği görülmektedir. Şekil 5.54'deki bileşke hız dağılımları incelendiğinde; geçirimsiz memba yüzündeki betonarme kaplamanın altında bileşke hız değerlerinin büyüdüğü, aynı zamanda da bu bölgede potansiyeldeki azalmanın daha fazla olduğu gözlenmektedir. Bileşke hız değerlerinin yüksek olduğu noktalar özellikle suyun baraj gövdesine girdiği ve çıktığı noktalar olup, bu noktalar civarında potansiyel değerlerde de önemli ölçüde ani azalmalar olduğu görülmektedir. Gövde içinde, sızma hattının altında bileşke hızların, gövdenin altına göre, daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, gövdenin altındaki bölgenin hidrolik iletkenlik katsayısının, gövdenin içindeki hidrolik iletkenlik katsayısına göre daha küçük olmasıdır. Ayrıca, sızma hattının üstünde belirlenen hız vektörleri doygun olmayan bölgedeki kapilarite etkisinden dolayı ortaya çıkmaktadır. Ancak, Baraj 1 modelinde doygun olmayan bölgede oluşan bileşke hız vektörleri baraj gövdesinin üst noktalarında çok düşük değerler almıştır.



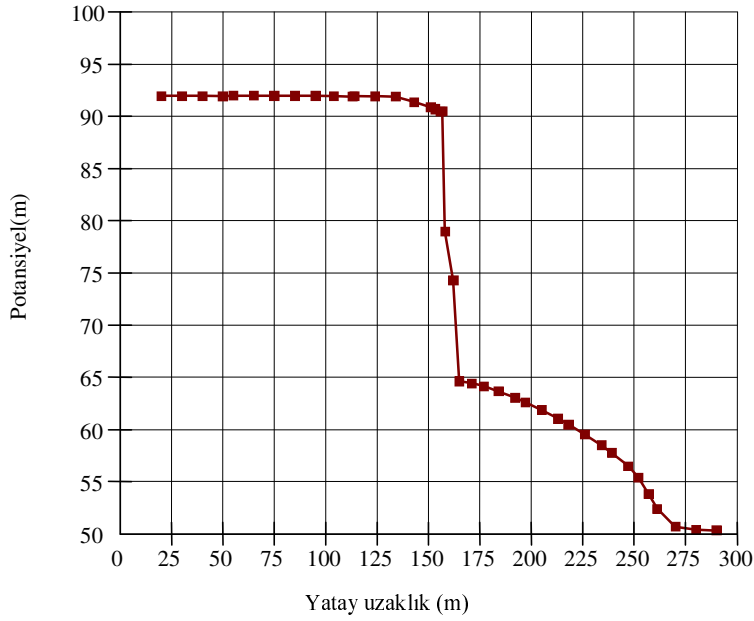
Şekil 5.59: Baraj 1 için yüzeye ve sızma hattına en yakın düğümlerde Potansiyel- Yatay uzaklık ilişkisi

Şekil 5.55’de görüldüğü gibi, Baraj 2 modeli için elde edilen potansiyel dağılımı incelendiğinde; potansiyelin, kil çekirdek içerisinde hidrolik eğimin büyüklüğüne bağlı olarak, çok kısa bir aralıkta hızla değiştiği, bununla birlikte, gövdenin altındaki bölgede hidrolik eğimin, gövde içindeki hidrolik eğime göre, daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 5.56’daki hız dağılımları incelendiğinde; bileşke hız değerlerinin, suyun gövdeden ayrıldığı noktalarda oldukça büyüdüğü görülmektedir. Kil çekirdekte ve gövdenin altında hidrolik eğim büyük olmasına rağmen, bileşke hızların en büyük değerleri baraj dolgusu içinde oluşmaktadır. Bunun sebebi Darcy yasasında, $v = Ki$ olarak ifade edilen hız, hidrolik iletkenlik katsayısı ve hidrolik eğim arasındaki ilişkiden de anlaşılacağı gibi, bu bölgelerde hidrolik iletkenlik katsayılarının düşük değerlerde olması nedeniyle hızlarda büyüme olmadan hidrolik eğimin artmasıdır. Sızma hattının üstünde ve kil çekirdekte bileşke hız değerlerinin oldukça düşük olduğu görülmüştür. Doygun olmayan bölgenin bu model üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı da sonuçlardan görülmektedir.



Şekil 5.60: Baraj 2 için yüzeye ve sızma hattına en yakın düğümlerde Potansiyel-Yatay uzaklık ilişkisi

Şekil 5.57’de görüldüğü gibi, Baraj 3 modeli için elde edilen potansiyel dağılımı incelendiğinde; potansiyel değerin geçirimsiz perdenin altında ani olarak azaldığı bununla birlikte bileşke hız değerlerinin büyüdüğü görülmektedir. Şekil 5.58’deki hız dağılımları incelendiğinde; bileşke hızların en büyük değerlerini, sızma hattının altında suyun baraj gövdesinden çıktığı noktalarda aldığı görülmektedir. Suyun baraja girdikten sonra geçirimsiz perdenin altından süzülerek geçirimsiz perdenin memba tarafında yükseldiği söylenebilir. Ancak, geçirimsiz perdenin üstündeki bölgeye bakıldığında; bu noktadaki bileşke hız değerlerinin de yüksek olduğu görülmektedir. Bu bölgenin doymun olmadığı düşünüldüğünde; suyun geçirimsiz perdenin altından sızmasının yanı sıra aynı zamanda geçirimsiz perdenin üstünde, doymun olmayan bölgede, bir su akışı olduğu görülmektedir. Buradan, doymun olmayan bölgenin bu model üzerinde önemli bir etkisinin olduğu söylenebilir.



Şekil 5.61: Baraj 3 için yüzeye ve sızma hattına en yakın düğümlerde Potansiyel-Yatay uzaklık ilişkisi

ALTINCI BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada çeşitli palplanş, bağlama ve toprak dolgu barajların gövdesindeki ve altındaki sızmadan dolayı meydana gelen potansiyel ve hız dağılımları, sonlu elemanlar yöntemiyle iki boyutlu olarak ele alınmıştır.

Potansiyel ve hız dağılımları araştırılırken gerek hidrolik iletkenlikleri farklı zeminler kullanılarak gerekse geometrik özellikler değiştirilerek farklı varyasyonların potansiyel ve hız dağılımına etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak:

Sızma boyunu uzatarak potansiyeli azaltma amacıyla yapılan palplanş türü yapıların, hız vektörlerinin büyümesine neden olduğu, bu büyümenin de palplanş boylarının artmasıyla doğru orantılı değiştiği belirlenmiştir. Bağlama altına palplanş yerleştirilmesinin potansiyelin azalmasında önemli rol oynadığı, hız vektörlerinin en büyük değerlerini palplanşların uzunluklarıyla orantılı olarak palplanşların altında aldıkları görülmüştür.

Yataydaki hidrolik iletkenlik katsayısının düşeydeki üç katı alınması durumunda potansiyelin geçirimli zemin içerisinde daha uzun bir aralıkta değiştiği görülmüş, palplanşın da potansiyelin düşmesinde daha etkili olduğu bununla birlikte hız vektörlerinin daha homojen dağıldığı belirlenmiştir.

Mansab tarafında su olması durumunda, geçirimli zeminde dağılması gereken potansiyel miktarındaki azalmanın sonucu hız vektörlerinin küçüldüğü görülmüştür.

Bağlama altında parafuy bulunmasının potansiyelin azalmasında etkili olduğu görülmüş, parafuyla birlikte palplanş bulunması durumuna göre sadece parafuy bulunan bağlamaların altında hız vektörlerinin çözüm bölgesinde daha homojen dağıldığı ve hız değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Bağlamanın mansabındaki palplanşın kaldırılıp sadece memba tarafında palplanşının kullanılmasında, memba ve mansap arasındaki potansiyel farkını memba tarafındaki palplanş önemli ölçüde karşılandığı, palplanşın altında, bileşke hız değerleri daha da yükseldiği anlaşılmıştır.

Baraj modelleri incelendiğinde, memba yüzeyindeki betonarme kaplamanın etkisiyle suyun, sadece barajın altından sızarak, baraj gövdesi içinde yükseldiği, geçirimsiz memba yüzündeki betonarme kaplamanın altında bileşke hız değerlerinin büyüdüğü, aynı zamanda da bu bölgede potansiyeldeki azalmanın daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Kil çekirdek kullanılan modelde; potansiyelin, kil çekirdek içerisinde hidrolik eğimin büyüklüğüne bağlı olarak, çok kısa bir aralıkta hızla değiştiği, bununla birlikte, gövdenin altındaki bölgede hidrolik eğimin, gövde içindeki hidrolik eğime göre, daha büyük olduğu izlenmiştir. Kil çekirdekte ve gövdenin altında hidrolik eğim büyük olmasına rağmen, bileşke hızların en büyük değerleri baraj dolgusu içinde gelişmiştir. Sızma hattının üstünde ve kil çekirdekte bileşke hız değerlerinin oldukça düşük olduğu görülmüştür.

Merkezi geçirimsiz perdeli model için elde edilen potansiyel dağılımı incelendiğinde, potansiyel değerlerin geçirimsiz perdenin altında ani olarak azaldığı bununla birlikte bileşke hız değerlerinin büyüdüğü görülmektedir. Suyun baraja girdikten sonra geçirimsiz perdenin altından süzülerek geçirimsiz perdenin memba tarafında yükseldiği söylenebilir. Ancak geçirimsiz perdenin üstündeki bölgeye bakıldığında, bu noktalardaki bileşke hız değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu bölgenin doygun olmadığı düşünüldüğünde, suyun geçirimsiz perdenin altından

sızmasının yanı sıra aynı zamanda geçirimsiz perdenin üstünden de doygun olmayan bölgede bir su akışı olduğu görülmektedir.

Genel olarak baraj modellerinde, bileşke hız değerlerinin yüksek olduğu noktalar özellikle suyun baraj gövdesine girdiği ve çıktığı noktalar olarak belirlenmiş olup, bu noktalar civarında potansiyel değerlerde önemli ölçüde ani azalmalar olduğu görülmektedir. Çözüm bölgesi içinde hız vektörleri ise hidrolik iletkenlik katsayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır.

Geçirimsiz kaplama veya perde ile potansiyeldeki azalmanın sağlanması durumuna bakıldığında da, bu yapıların potansiyelin azalmasında oldukça etkili olduğu görülmüştür. Ancak özellikle geçirimsiz perde kullanılması durumunda perdenin altında hız vektörlerinin çok büyük değerler aldığı gözlenmiştir. Bu durumun baraj için borulanma gibi tehlikeler oluşturabileceği görülmüştür.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, baraj göllerindeki su seviyesindeki alçalmalar ve yükselmeler de dikkate alınarak problemin zamana bağlı olarak çözülmesinde yarar görülmektedir. Bunun yanı sıra kesitlerin farklılık gösterdiği durumlar göz önüne alınarak toprak dolgu barajlarda potansiyel ve hız vektörleri dağılımının üç boyutlu olarak incelenmesinin de faydalı olacağı kanaatine varılmıştır.

KAYNAKLAR

Ardıçlıoğlu M., Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Aslantaş Baraj Gövdesinde Sızma Analizi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Adana, 1990.

Argyris J.H., Kelsey S., *Energy Theorems and Structural Analysis*, Butterworths, ISBN: 040847100, 86 s., London, 1960.

Bear J., ve Verruijt A., *Modelling Groundwater Flow and Pollution*, D. Reidel Publ. Co., ISBN:1556080158, 432 s., Dordrecht, Holland, 1987.

Chandrupatla R.T., Belegundu A.D., *Introduction to Finite Elements in Engineering*, Prentice Hall, ISBN 0-13-483082-2, 416 s., New Jersey, 1991.

Cividini A., Gioda G., An Approximate F. E. Analysis Of Seepage With A Free Surface, *International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics*, Vol.8, 549-566, 1984.

Finn, W.D., Finite Element Analysis Of Seepage Through Dams, *J. Soil. Mech. Div.*, 93(6), 41-48, 1967.

Fredlund D.G., Rahardjo H., *Soil Mechanics For Unsaturated Soils*, John Willey& Sons Inc., ISBN: 047185008, 544 s., 1993.

Freeze R.A., Cherry J.A, Yeraltı Suyu (Çev: Kamil Kayabalı), Gazi Kitabevi, ISBN: 0133653129, 549 s., Ankara, 2003.

Guvanasen V., Wadsworth T. D., A Three-Dimensional Finite-Element Model For Simulating Water Flow In Variably Saturated Porous Media, *Water Resources Research*, 22, 13, 1790-1808, 1986.

Güngör M., Bağlama Altındaki Sızmadan Dolayı Meydana Gelen Potansiyel ve Hız Dağılımı, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 1989.

Hrennikoff, H., Solutions of Problems In Elasticity by the Framework Method, J. Appl. Mech., A, 169-175, 1941.

Leontiev A., Huacasi W., Mathematical Programming Approach For Unconfine Seepage Flow Problem, Engineering Analysis With Boundary Elements, 25, 49-56, 2000.

Natch B., *Fundamentals of Finite Elements for Engineers*, The Athlone Press, ISBN: 0-485-11148-9, 256 s., London, 1974.

Ng C. W. W., Shi Q., A Numerical Investigation Of Stability Of Unsaturate Soil Slopes Subjected To Transient Seepage, Computers And Geotechnics, Vol. 22, No.1, Pp 1-28, 1998.

Norrie D.H., de Vries G., *An Introduction to Finite Element Analysis*, Academic Press, ISBN 0-12-521660-2, 301 s., New York, 1978.

Omay E., Alanlar Teorisinin Kavramları İle Yer Altı Suyu Akımının Analizi, İ.T.Ü.(D) Dergisi, 33, 1, 37-41, 1975.

Omay E., Yeraltı Suyu Akımının Matematik Modeli , İ.T.Ü.(D) Dergisi, 35, 1, 31-42, 1977.

Orhon M., Baraj Tipleri ve Yapım Kriterleri, Türkiye Mühendislik Haberleri, 391, 12-17, 1997.

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

Turner M.J., Clough R.W., Martin H.C., Topp L.J., Stiffness And Deflection Analysis of Complex Structures, J.Appl.Sci., 113 (2): 198-212, 1956.

Xu Y. Q., Unami K., Kawachi T., Optimal Hydraulic Design Of Earth Dam Cross Section Using Saturated-Unsaturated Seepage Flow Model, Advances In Water Resources, 26, 1-7, 2002.

Zienkiewicz O.C., Meyer, P., Cheung, Y.K., Solution Of An Isotropic Seepage By Finite Elements. J.Eng.Mech. Div. 92(1), 111-120, 1965.

WEB_1 <http://analiz.infotron.com.tr>, Infotron paket program internet sitesi, (10.03.2005).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Süleyman Bahadır KESKİN

Ana Adı : Hayriye

Baba Adı : İbrahim

Doğum Yeri ve Tarihi: Uşak / 20.10.1979

Lisans : Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2002

Çalıştığı yer : Sismik Yapı Denetimi San. Tic. Ltd. Şti.

Bildiği Yabancı Dil : İngilizce