İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YERALTI SUYUNUN KUM ZEMİNLERDEKİ KAZI CUKURLARININ STABİLİTESİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Berkay ADIGÜZEL
501021270

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Mayıs 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Haziran 2006

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mete İNCECİK

Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. İsmail Hakkı AKSOY

Yrd.Doç.Dr. Mehmet BERİLGEN (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının meydana gelmesinde kıymetli tavsiyeleri ve ilmiyle ışık tutan sayın hocam Prof. Dr. Mete İncecik'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, bana tez çalışmamda faydalanmam için kaynak kitap yardımında bulunan ve yol gösteren sayın hocam Doç. Dr. İsmail Hakkı Aksoy'a, çalışmam sırasında yardımlarını ve imkânlarını esirgemeyen sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet Berilgen'e ve değerli araştırma görevlisi arkadaşım Müge Balkaya'ya da teşekkür ederim.

Tez çalışmamda, çizimleriyle yardımcı olan değerli arkadaşım Yük. Mim. Mehmet Emin Şalgamcıoğlu'na, İngilizce çevirilerde yardımcı olan sevgili arkadaşım Elektronik Müh. Ali Şevki Öztürk'e ve tez çalışmam boyunca beni motive eden, her zaman yanımda olduğunu bildiğim Biricik arkadaşım Mak. Yük. Müh. Berrak Karaca'ya da teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenimim boyunca maddi ve manevi desteklerini hep yanımda hissetiğim babam İnş. Yük. Müh. Şadi Adıgüzel, annem Perihan Adıgüzel, ağabeyim İnş. Yük Müh. Çağatay Adıgüzel'e ve arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Haziran 2006 Berkay ADIGÜZEL

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **x**
ÖZET **xiii**
SUMMARY **xiv**

1. GİRİŞ **1**

2. YERALTI SUYU AKIMI **2**
2.1. Yeraltı Suyu Akımının Tanımı 2
2.2. Permeabilite (Su Geçirgenliği) 3
2.2.1. Darcy kanunu 3
2.3. Yeraltı Suyu Akımının Matematiksel İfadesi 6
2.3.1. Laplace denklemi 6
2.3.2. Potansiyel ve akım fonksiyonları 9

3. AKIM AĞLARI **13**
3.1. Akım Ağının Grafiksel Olarak Çizilmesi 14
3.2. Akım Ağından Sızma Miktarının Hesaplanması 15
3.3. Anizotropik Zeminlerde Akım Ağları 17
3.4. Homojen Olmayan Zemin Tabakalarında Akım Ağı 19

4. YERALTI SUYU AKIMININ ETKİLERİ **24**
4.1. Sızma Kuvveti 24
4.2. Kaynamaya Karşı Güvenlik Tahkiki 28
4.2.1. Harza metodu 29
4.2.2. Terzaghi metodu 30

5. UYGULAMADA BİR ÖRNEK: KÜÇÜKKÖY, BALIKESİR, TM6 TERFİ MERKEZİ İNŞAATI **32**
5.1. Giriş 32
5.2. Sahanın Zemin Profili 32
5.3. Arazide ve Laboratuarda Yapılan Deneyler 33
5.4. TM6 Terfi Merkezi Kazısı ve İksa Sistemi 34

6. PLAXIS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE TM6 TERFİ MERKEZİ'NİN KAZI ÇUKURUNUN STABİLİTESİNİN İNCELENMESİ **40**
6.1. Plaxis Sonlu Elemanlar Programının Tanıtımı 40
6.2. Plaxis Programı ile TM6 Terfi Merkezi Kazı Çukurunun Modellenmesi 45
6.3. Plaxis Programı ile Yapılan Modellemenin Sonuçlarının Değerlendirilmesi 48

6.3.1. Güvenlik sayıları 48
6.3.2. Yatay ve düşey deplasmanlar 50
6.3.3. İksa duvarına etkiyen yanal gerilmeler 51
6.3.4. İksa duvarında oluşan moment, kesme ve normal kuvvetler 54
6.3.5. Ankraj kuvvetleri 58

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 61

KAYNAKLAR 63

EKLER 65

ÖZGEÇMİŞ 89

KISALTMALAR

SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
YASS	: Yer Altı Su Seviyesi
HS	: Hardening Soil
MC	: Mohr Coulomb

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 **:** Çeşitli kum zemin tipleri için yaklaşık permeabilite katsayısı değerleri 6
Tablo 6.1 **:** Modellemede Kullanılan Zemin Parametreleri 46
Tablo 6.2 **:** Modellemede kullanılan kazığın malzeme parametreleri 47
Tablo 6.3 **:** Modellemede kullanılan ankrajların malzeme parametreleri 47
Tablo 6.4 **:** Modellemede kullanılan ankraj kök bölgelerinin malzeme parametreleri 47

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Yeraltı suyu ile alakalı problem çeşitlerinden bazıları (Sırayla kazılarda, toprak barajlarda, kuyulara doğru yer altı suyu akımları) 3
Şekil 2.2 : Darcy Kanunu 4
Şekil 2.3 : Süreklilik Denkleminin Oluşumu 8
Şekil 2.4 : Akım terimlerinin tasviri 11
Şekil 3.1 : Palplanj perde etrafındaki Akım ağı 14
Şekil 3.2 : Akım Kanalı 17
Şekil 3.3 : Dönüştürülen ölçekte akım ağı 19
Şekil 3.4 : Gerçek ölçekte akım ağı 19
Şekil 3.5 : Geçiş Şartı 20
Şekil 3.6 : Farklı permeabiliteye sahip tabakalar arasındaki sınırda akım kanalı (k1 > k2) 22
Şekil 3.7 : Farklı permeabiliteye sahip tabakalar arasındaki sınırda akım kanalı (k1 < k2) 22
Şekil 3.8 : Homojen olamayan ara zemin tabakalarında akım ağı 23
Şekil 4.1 : Sızma kuvvetinin bulunuşu 25
Şekil 4.2 : Zemindeki aşağı doğru sızma 26
Şekil 4.3 : Zemindeki yukarı doğru sızma 26
Şekil 4.4 : Dayanma yapısı yanında oluşan sızmanın efektif gerilmelere etkileri 27
Şekil 4.5 : Sızma kuvvetlerinden zarar görmüş bir kazı çukuru [5] 29
Şekil 4.6 : Terzaghi'ye göre Kaynama Durumu 31
Şekil 4.7 : Kaynamaya karşı filtre malzemesi 31
Şekil 5.1 : Sondaj profilleri ve SPT değerleri 33
Şekil 5.2 : Kazının planı ve İksa sisteminin yerleşimi 35
Şekil 5.3 : Kazının planlanan düşey enkesiti ve İksa sisteminin yerleşimi 36
Şekil 5.4 : Deplasmanların gerçekleştiği haliyle kazı planı 37
Şekil 5.5: Deplasmanların gerçekleştiği haliyle kazının enkesiti 37

Şekil 5.6 : TM6 Kazı çukuru....38
Şekil 5.7 : TM6 Kazı çukurunun iksa sistemi....38
Şekil 5.8 : Kazı çukuru kenarında oluşan deplasmanlar....39
Şekil 5.9 : Oluşan deplasmanların yakın görüntüsü....39
Şekil 6.1 : Plaxis programında genel ayarlar....41
Şekil 6.2 : Input ana penceresi....41
Şekil 6.3 : Malzeme değerlerinin girildiği pencere....43
Şekil 6.4 : Oluşturulmuş sonlu elemanlar ağı....43
Şekil 6.5 : Hesaplama penceresi ve safhalar....44
Şekil 6.6 : Güvenlik Sayılarının Kazı Derinliğine Göre Dağılımı....49
Şekil 6.7 : Yatay Deplasmanlar....50
Şekil 6.8 : Düşey deplasmanlar....51
Şekil 6.9 : MC Modelde kazı derinliğiyle iksa duvarı kenarında değişen toplam gerilmeler....52
Şekil 6.10 : HS Modelde kazı derinliğiyle iksa duvarı kenarında değişen toplam gerilmeler....52
Şekil 6.11 : MC modelde kazı derinliğiyle iksa duvarı kenarında değişen efektif gerilmeler....53
Şekil 6.12 : HS modelde kazı derinliğiyle iksa duvarı kenarında değişen efektif gerilmeler....53
Şekil 6.13 : HS ve MC modellere göre Kazı-5 safhasındaki toplam gerilmeler....54
Şekil 6.14 : HS ve MC modellere göre Kazı-5 safhasındaki efektif gerilmeler....54
Şekil 6.15 : MC modele göre kazıkta oluşan eğilme momentlerinin kazı derinliğiyle değişimi....55
Şekil 6.16 : HS modele göre kazıkta oluşan eğilme momentlerinin kazı derinliğiyle değişimi....55
Şekil 6.17 : MC modele göre kazıkta oluşan normal kuvvetlerin kazı derinliğiyle değişimi....56
Şekil 6.18 : HS modele göre kazıkta oluşan normal kuvvetlerin kazı derinliğiyle değişimi....56
Şekil 6.19 : MC modele göre kazıkta oluşan kesme kuvvetlerinin kazı derinliğiyle değişimi....57
Şekil 6.20 : MC modele göre kazıkta oluşan kesme kuvvetlerinin kazı derinliğiyle değişimi....57

Şekil 6.21 : MC ve HS modellere göre ankraj kuvvetlerinin kazı safhalarındaki değişimi....58
Şekil 6.22 : Ankraj-1'in kök bölgesine etkiyen eksenel kuvvetlerin kazı safhalarına göre değişimi....59
Şekil 6.23 : Ankraj-2'in kök bölgesine etkiyen eksenel kuvvetlerin kazı safhalarına göre değişimi....59
Şekil 6.24 : Ankraj-3'in kök bölgesine etkiyen eksenel kuvvetlerin kazı safhalarına göre değişimi....60
Şekil 6.25 : Ankraj-4'in kök bölgesine etkiyen eksenel kuvvetlerin kazı safhalarına göre değişimi....60
Şekil A.1 : Sondaj-1 logu- Sayfa 1....66
Şekil A.2 : Sondaj-1 logu- Sayfa 2....67
Şekil A.3 : Sondaj-2 logu- Sayfa 1....68
Şekil A.4 : Sondaj-2 logu- Sayfa 2....69
Şekil B.1 : Kazı-1 sonundaki eşpotansiyel çizgileri....71
Şekil B.2 : Kazı-2 sonundaki eşpotansiyel çizgileri....72
Şekil B.3 : Kazı-3 sonundaki eşpotansiyel çizgileri....73
Şekil B.4 : Kazı-4 sonundaki eşpotansiyel çizgileri....74
Şekil B.5 : Kazı-5 sonundaki eşpotansiyel çizgileri....75
Şekil B.6 : Kazı-6 sonundaki eşpotansiyel çizgileri....76
Şekil C.1 : Kazı-1 sonunda oluşan toplam deplasmanlar....78
Şekil C.2 : Kazı-2 sonunda oluşan toplam deplasmanlar....78
Şekil C.3 : Kazı-3 sonunda oluşan toplam deplasmanlar....79
Şekil C.4 : Kazı-4 sonunda oluşan toplam deplasmanlar....79
Şekil C.5 : Kazı-5 sonunda oluşan toplam deplasmanlar....80
Şekil C.6 : Kazı-6 sonunda oluşan toplam deplasmanlar....80
Şekil D.1 : Kazı-1 sonunda oluşan plastik noktalar....82
Şekil D.2 : Kazı-2 sonunda oluşan plastik noktalar....82
Şekil D.3 : Kazı-3 sonunda oluşan plastik noktalar....83
Şekil D.4 : Kazı-4 sonunda oluşan plastik noktalar....83
Şekil D.5 : Kazı-5 sonunda oluşan plastik noktalar....84
Şekil D.6 : Kazı-6 sonunda oluşan plastik noktalar....84
Şekil E.1 : Kazı-1 sonu için yaklaşık kayma yüzeyi....86
Şekil E.2 : Kazı-2 sonu için yaklaşık kayma yüzeyi....86

Şekil E.3 : Kazı-3 sonu için yaklaşık kayma yüzeyi.....87
Şekil E.4 : Kazı-4 sonu için yaklaşık kayma yüzeyi.....87
Şekil E.5 : Kazı-5 sonu için yaklaşık kayma yüzeyi.....88

SEMBOL LİSTESİ

A	: Kesit alan
A_{em}	: Emniyetli ankraj çekme kuvveti
b	: İki eşpotansiyel çizgisi arasındaki mesafe
D	: Kazığın penetrasyon derinliği
D_{10}	: Efektif dane çapı
e	: Boşluk oranı
h_a	: Ortalama ilave hidrolik yük
h_A , h_B	: Basınç yükü, Hidrolik yük
Δh	: Yük kaybı
H	: Toplam enerji yükü, Nihai kazı derinliği
i	: Hidrolik eğim
j_s	: Birim kütleye etki eden sızma kuvveti
k	: Permeabilite katsayısı
L	: Kesitler arası uzaklık
ML	: Çok az plastik siltli ince kum
N_d	: Hidrolik yük kaybı adımı sayısı
N_f	: Akım kanalı sayısı
p	: Basınç
q	: Sızma miktarı (sızma debisi)
S	: Zemin danelerinin özgül yüzeyi
SM	: Siltli kum
U	: Hidrolik kaldırma kuvveti
W_a	: Zemin prizmasının su altındaki ağırlığı
z	: Yükseklik (Yerçekimi yükü)
ν	: Akım hızı (Sızma hızı, Boşaltma hızı)
γ_w	: Suyun birim hacim ağırlığı
γ_{doy}	: Doygun birim hacim ağırlığı
γ_a	: Su altındaki birim hacim ağırlığı
τ	: Çapraşıklık faktörü (tortuosity)
ρ	: Yerçekimi kuvveti
υ	: Suyun viskozitesi

YER ALTI SUYUNUN KUM ZEMİNLERDEKİ KAZI ÇUKURLARININ STABİLİTESİNE ETKİSİ

ÖZET

Yeryüzüne yağışlarla düşen suyun önemli bir kısmı zemin içine sızarak yerçekimi kuvveti etkisi altında düşey ve yatay yönde hareket eder. Suyun, zemin içerisindeki bu hareketine genel olarak "Yeraltı Suyu Akımı" denilmektedir. Zemin içinde hareket eden suyun hızı ve miktarı akımın meydana geldiği iki nokta arasındaki hidrolik yük farkına ve zeminin su geçirgenliğine bağlıdır.

Zeminlerde su akımını tanımlamakta kullanılan Laplace denkleminin çözümünü elde etmek için değişik yöntemlerden yararlanmak mümkündür. Matematiksel olarak tanımlanabilen mühendislik problemlerinde, ideal olan her türlü sınır koşulları için geçerli kapalı analitik çözümler geliştirilebilmektedir. Zeminlerde su akımı problemleri için bu mümkün olamamaktadır. İnşaat mühendisliğinde Laplace denkleminin çözümünde yaygın olarak sayısal ve grafik yaklaşık yöntemler kullanılmaktadır. Bu yaklaşık yöntemlerden biri grafik çözüm yolu olan akım ağlarıdır.

Yeraltı suyu, zemin içinde hareket ederken zemin danelerine sürtünerek onlara bir kuvvet uygulamaktadır. Bu kuvvete "sızma kuvveti" denilmektedir. Zamanla, kazı derinliği artıkça kazı tabanından çukurun içine doğru gelen suyla birlikte zemin daneleri de gelmeye başlamaktadır. Bu noktada, zeminin kazı tabanındaki toplam gerilme değeri, su basıncına eşit olmuştur, yani zemin danelerinin efektif gerilmeleri sıfır olmaktadır. Bu olaya "Kaynama" yada "Borulanma" denilmektedir. Bunun sonucunda, kazı çukuru içinde iksa sistemine destek azalmakta ve hatta artmakta, en sonunda iksa sisteminin stabilitesi bozulmaktadır. Bu kaynama durumunu tahkik etmek için Harza ve Terzaghi'nin bulduğu iki metot bulunmaktadır.

Bu çalışmada, Balıkesir, Küçükköy'deki bir kanalizasyon projesinin Terfi Merkezi inşası ele alınmıştır. TM6 Terfi Merkezi tabanında nihai kazı derinliğine yaklaşıldığı

aralıkta deplasmanların meydana gelmeye başlaması nedeniyle kazı durdurulmuş ve önlemler alınmıştır. Oluşan bu deplasmanlara zeminde kaynama olmasının neden olduğundan şüphelenilmiştir. Bu çalışmada da amaç, Plaxis sonlu elemanlar programıyla bu kazıyı modellemek, kazı çukuru tabanında kaynama olup olmadığını analiz etmek ve eğer kaynama varsa iksa sistemine yaptığı etkileri incelemektir.

Bu modelleme sonucunda kazının nihai seviye geldiği sırada göçeceği görülmüştür. Kaynamanın olma durumunun tahkiki için Terzaghi ve Harza'nın geliştirdiği kaynama tahkikleri, Plaxis programıyla yapılan modelleme sonucunda elde edilen veriler kullanılarak yapılmıştır. Bu tahkikler sonucunda, bu kazıda kaynamanın gerçekleştiği ortaya çıkmıştır. Bunların yanında, Plaxis programı vasıtasıyla kazının iksa sisteminde oluşan gerilmeler ve deplasmanlar yaklaşık olarak hesaplanmıştır.

EFFECT OF UNDERGROUND WATER TO THE STABILITY OF EXCAVATIONS IN SAND SOILS

SUMMARY

An important portion of the rains falling to the earth leaking to the ground moves vertically and horizontally with the gravity. This movement in the ground is generally called “Underground Water Flow”. The amount and velocity of the moving water in the ground is subject to the hydraulic head difference between the flow points and water permeability of the ground.

There are various methods to solve the Laplace equation defining the water flow in the ground. Valid closed analytic solutions can be developed within the ideal boundary conditions in the engineering problems those can be defined mathematically. However, this is not valid for the water flow problems in the ground. Generally, approximate numerical and graphical methods are used for the solution of Laplace equation in civil engineering. Thus, a flow net, a graphical solution, is one of the methods.

Underground water forces to the ground particles by rubbing them while moving in the ground. This force is called “seepage force”. Ground particles are carried by the water coming from excavation area towards to the cavity with the increasing depth of the excavation in the course of time. At this point, the total stress value on the excavation ground equals to the water pressure, in other words ground particles’ effective stress equal to zero. This fact is called “Heaving” or “Piping”. Thus, support to the retaining structure in the excavation cavity diminishes and the load to the retaining structure increases, finally stability of the retaining system is distracted. To verify this heaving condition two methods by Harza and Terzaghi are valid.

In this study, construction of the Advancement Center in a drainage project in Balıkesir, Küçükköy is discussed. The excavation was halted then precautions were taken due to the occurrence of displacements when it was approached to the final

stage of excavation in TM6 Advancement Center's ground. Thus, displacements are suspected to be derived from the heaving in the ground. The aim of this study is to model the excavation with the Plaxis finite elements program, to analyze if there exists heaving on the excavation cavity ground, and if so, examine the effects to the retaining structure.

With the results of the modelling, it was observed that excavation would be collapsed at its final stage. Heaving verifications developed by Terzagi and Harza for the verification of a possible heaving were done by using the data exerted from the modeling with Plaxis program. As the result to these verifications, it was seen that there actually existed a heaving in the excavation. Furthermore, stress and displacements in the retaining structure were approximately calculated with the Plaxis program.

1. GİRİŞ

Yağışlarla yeryüzüne düşen suyun önemli bir kısmı zemin içine sızarak yerçekimi kuvveti etkisi altında düşey ve yatay yönde hareket eder. Böylece yeraltında su akımları oluşur.

İnşaat mühendisliği yapılarının tasarım ve inşasında zemin içinde akan suyun hızı ve miktarı ile zemine uyguladığı kuvvetlerin doğru olarak hesaplanamaması uygulamada sık karşılaşılan problemler oluşturmaktadır. Bu nedenle, zemin mekaniği konuları içinde, yeraltı suyunun akım özelliklerinin incelenmesi önemli bir yer tutmaktadır. Yeraltı suyu akımı zemin özelliklerinden etkilendiği gibi aynı zamanda su akımından zeminlerin mühendislik davranışları da etkilenmektedir.

Zeminlerde su akımını tanımlamakta kullanılan matematiksel denklemlerin çözümünü elde etmek için değişik yöntemlerden yararlanmak mümkündür. Matematiksel olarak tanımlanabilen mühendislik problemlerinde, ideal olan her türlü sınır koşulları için geçerli kapalı analitik çözümler geliştirilebilmektedir. Zeminlerde su akımı problemleri için bu mümkün olamamaktadır. İnşaat mühendisliğinde bu denklemlerin çözümü için yaygın olarak sayısal ve grafik yaklaşık yöntemler kullanılmaktadır. Bilgisayar kullanımının yaygınlaşmasıyla sayısal yöntemler gittikçe daha fazla kullanım alanı bulmaya başlamıştır.[12]

Bu çalışmada da amaç, yeraltı suyu akımının etkisiyle gerçekte hasar görmüş bir kazı çukurunun, bilgisayar programı yardımıyla modellenmesi ve yapıda oluşturduğu etkileri görebilmektir.

2. YERALTI SUYU AKIMI

2.1. Yeraltı Suyu Akımının Tanımı

Yeraltı suyu yer çekimi kuvveti etkisi altında zemin içinde hareket edebilme özelliğine sahiptir. Suyun, zemin içerisindeki bu hareketine genel olarak "yeraltı suyu akımı" denilir. Bu olaya "sızma" da denilmektedir. Suyun zemin içindeki akışı, inşaat mühendisliğindeki birçok sistemin analizi, tasarımı ve inşasında göz önünde bulundurulması gereken çok önemli bir etkendir. [5]

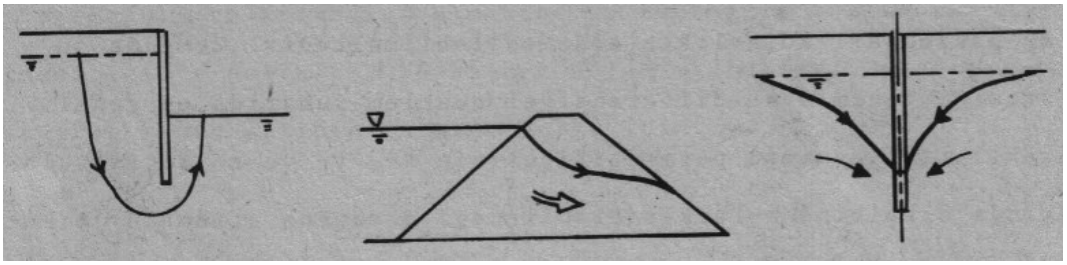
Yeraltı suyu akımı ile alakalı problemleri genel olarak üç gruba ayırabiliriz.

1. Kuyulara, yapının inşası sırasında açılan çukurlara giren suyun miktarının tahmini ve barajlardan vb. yapılardan depolanmış suyun kaçması.

2. Sızma basıncının şev, kazı, temel vb. yapıların stabilitesine olan etkileri.

3. Yük artışına maruz kalan ince daneli zeminlerdeki drenaj.

Şekil 2.1 de yukarıdaki akım problem türlerinden birkaçına örnek verilmiştir. Zemin mekaniğindeki birçok benzer problemlerdeki gibi yeraltı suyu akımı analizi için suyun geçtiği zeminin homojen olduğu gibi kabuller yapılmaktadır. Fakat, bu tür hidrolik problemleri için yapılan kabullerin gerçeğe yakın olmaları diğer zemin mekaniği problemlerine göre daha büyük önem arz etmektedir. Örneğin, stabilite veya oturma problemlerinde zemin özelliklerinin ortalama değerlerinde büyük sapmalar olsa bile bunların kabulü uygulamada bir sorun oluşturmaz. Öte yandan, mesela bir kum zemindeki palplanj perdenin mansap tarafında sızma basınçlarının hesabı yapılırken kesintisiz ince kil tabakalarının varlığı sonucu tamamen değiştirmektedir ve bu tabakaların varlığı herhangi pratik bir yolla da bulunamaz. Bu yüzden hidrolik problemlerinde daha itinalı tetkikler yapılmalıdır.[14]



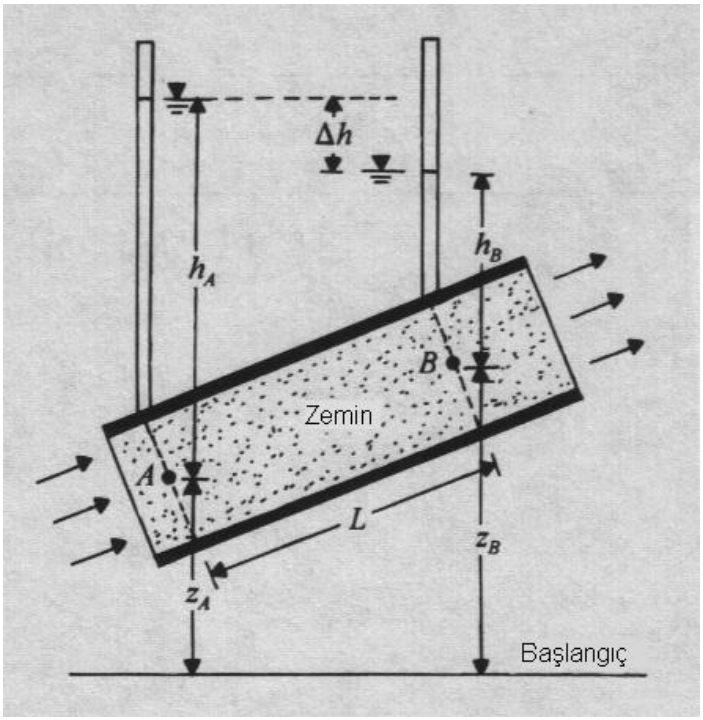
Şekil 2.1 : Yeraltı suyu ile alakalı problem çeşitlerinden bazıları (Sırayla kazılarda, toprak barajlarda, kuyulara doğru yer altı suyu akımları)

2.2. Permeabilite (Su Geçirgenliği)

Bir zemin kütlesi; çeşitli boyutlardaki katı parçacıklar ve birbirine bağlı boşluklardan meydana gelmektedir. Zemin içindeki sürekli boşluklar, suyun yüksek enerjili bir noktadan düşük enerjili bir noktaya doğru akmasına izin verir. Permeabilite de zeminin, içindeki birbirine bağlı boşluklardan sıvıların sızmasına müsaade etme özelliğinin adıdır. [7]

2.2.1. Darcy Kanunu

Belirli şartlar altında, zemin kütlesinden geçen sızma miktarını temel bir ilişkiye oturtmak için Şekil 2.2 deki gibi bir durumu ele alalım. Zeminin kesit alanı A ve sızma oranı q'dur.



Şekil 2.2 : Darcy Kanunu

Bernoulli'nin enerji teoremine göre, zeminin herhangi bir kesitindeki akım için toplam yük;

$$H = z + \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2\rho} \qquad \textbf{(2.1)}$$

Toplam Yük = Yerçekimi Yükü + Basınç Yükü + Hız Yükü

şeklinde verilir. Bu denklemin birinci ve ikinci terimleri hidrostatik ve artezyen etkilerini kapsamaktadır. Üçüncü yük olan hız yükü, zeminde su hareketinin çok yavaş olması nedeniyle ihmal edilebilir düzeydedir. [11] Buna göre A ve B kesitindeki toplam yükler;

Toplam Yük A = $z_A + h_A$

Toplam Yük B = $z_B + h_B$

A ve B kesitleri arasındaki yük kaybı (Δh);

$$\Delta h = (z_A + h_A) - (z_B + h_B) \quad \textbf{(2.2)}$$

Hidrolik eğim i;

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad \textbf{(2.3)}$$

Darcy, 1856 yılında sızma hızı ile hidrolik eğim arasında lineer bir ilişki olduğunu bulmuştur.

$$v = ki \quad \textbf{(2.4)}$$

Buna göre sızma miktarı q,

$$q = kiA \quad \textbf{(2.5)}$$

şeklinde verilebilir. A kesit alanı, akım yönüne diktir.

Denklem 2.4 ve 2.5'deki Darcy kanunu veren ifadedeki "*k"* sabiti, permeabilite katsayısı olarak tanımlanmaktadır.

İri daneli zeminlerin geçirimliliğinin bulunmasında kullanılan çeşitli ampirik bağıntılar bulunmaktadır. Bunlardan biri Hazen'in 1911' de ince ve üniform kumlar için bulduğu;

$$k = 100 D_{10}^2 \quad \textbf{(2.6)}$$

bağıntısıdır. Burada, D_{10} efektif dane çapıdır. Fakat bu bağıntı diğer daneli zeminlerde geçerli olamamaktadır. Daha sonraları yapılan araştırmalarda geçirimlilik katsayısının zeminin dane dağılımına, boşluk oranına, dokusuna, bileşimine ve doygunluk derecesine bağlı olduğu bulunmuş ve geçirimlilik Kozeny-Carman denklemiyle doygun durumda;

$$k = \frac{1}{\tau S^2} \frac{\gamma_w}{v} \frac{e^3}{1+e} \quad \textbf{(2.7)}$$

olarak ifade edilmiştir. Burada τ suyun ortamda ne denli akım yönünde hareket ettiğini gösteren çapraşıklık faktörü ve S de zemin danelerinin özgül yüzeyidir. [11]

Tablo 2.1: Çeşitli kum zemin tipleri için yaklaşık permeabilite katsayısı değerleri

Kum Tipi	**k (cm/s)**
Kumlu Silt	0,0005 - 0,002
Siltli Kum	0,002 - 0,005
Çok İnce Kum	0,005 - 0,02
İnce Kum	0,02 - 0,05
İnce-Orta Kum	0,05 - 0,1
Orta Kum	0,1 - 0,15
Orta-Kaba Kum	0,15 - 0,2
Kaba Kum- Çakıl	0,2 - 0,5

Çeşitli zemin tipleri için yaklaşık permeabilite katsayıları Tablo 2.1'de verilmiştir.[13]

Bu ampirik yaklaşımların dışında zeminlerin geçirimliliği, laboratuar ve arazide yapılan çeşitli deneylerle bulunmaktadır.

2.3. Yeraltı Suyu Akımının Matematiksel İfadesi

2.3.1. Laplace Denklemi

Yeraltı suyu akımı ile ilgili problemlerde, akım hesabı "Akım ağı" adını verdiğimiz grafikler kullanılarak yapılır. Akım ağı, Laplace süreklilik denklemi ile tanımlanır. Bu denklem, zemin kütlesinin bir noktasındaki laminer akım durumunu tarif eder.

Laplace denkleminde bazı kabuller yapılmıştır. Bunlar;

1. Darcy kanunu geçerlidir.

2. Zemin homojen ve suya doygundur.

3. Zemin ve su sıkıştırılamaz.

4. Hacim değişikliği meydana gelmez.

Akımın süreklilik denklemini elde etmek için, Şekil 2.3 de gösterilen bir hidrolik yapısının, bir A noktasında basit bir zemin prizması ele alalım. Prizmaya x, y ve z yönlerinde giren akımları Darcy kanununa göre verirsek;

$$q_x = k_x i_x A_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x} dydz \tag{2.8}$$

$$q_y = k_y i_y A_y = k_y \frac{\partial h}{\partial y} dxdz \tag{2.9}$$

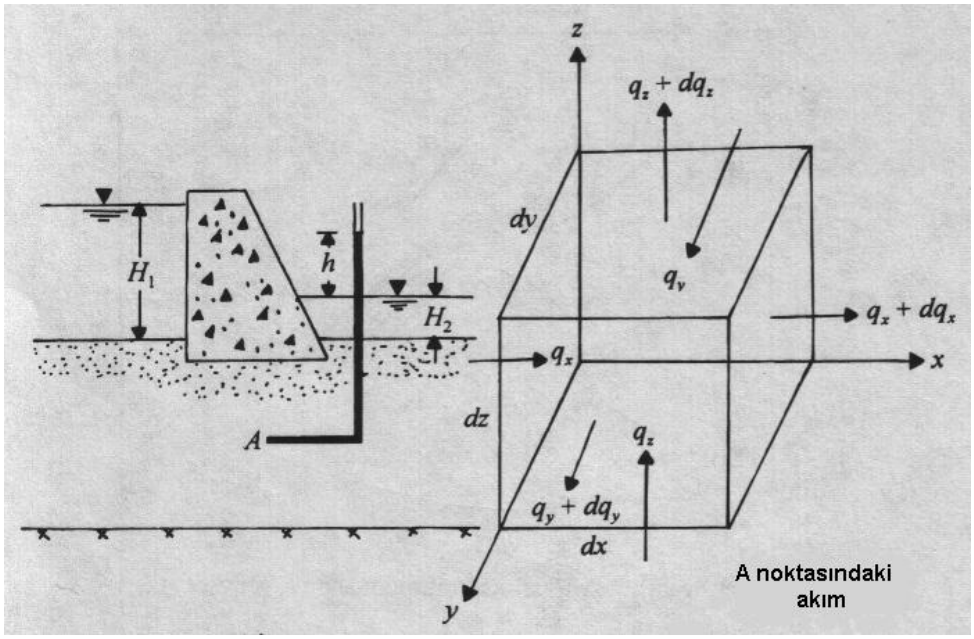
$$q_z = k_z i_z A_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z} dxdy \tag{2.10}$$

Prizmadan x, y, z yönlerinde çıkan akımlar,

$$q_x + dq_x = k_x (i_x + di_x) A_x = k_x (\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} d_x) d_y d_z \tag{2.11}$$

$$q_y + dq_y = k_y (\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} d_y) d_x d_z \tag{2.12}$$

$$q_z + dq_z = k_z (\frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} d_z) d_x d_y \tag{2.13}$$



Şekil 2.3 : Süreklilik Denkleminin Oluşumu

şeklindedir. Sıkıştırılamayan bir ortamdaki laminer akımda, prizmaya giren akım ile çıkan akım birbirine eşittir. Öyleyse,

$$q_x + q_y + q_z = (q_x + dq_x) + (q_y + dq_y) + (q_z + dq_z) \qquad \textbf{(2.14)}$$

(2.8 - 2.14) Denklemlerini birleştirirsek;

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \qquad \textbf{(2.15)}$$

elde ederiz. XZ düzlemindeki iki boyutlu akım için (2.15) Denklemi;

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \qquad \textbf{(2.16)}$$

şeklini alır. Eğer zemin izotropik ise ($k_x = k_y = k$). Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \qquad \textbf{(2.17)}$$

şeklinde sadeleşir. Bu denklem genel olarak Laplace denklemi olarak adlandırılır.

2.3.2. Potansiyel ve Akım Fonksiyonları

Bir Φ(x,z) fonksiyonu;

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = v_x = -k\frac{\partial h}{\partial x} \qquad \textbf{(2.18)}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = v_z = -k\frac{\partial h}{\partial z} \qquad \textbf{(2.19)}$$

ele alalım. Eğer, (2.18) bağıntısının x'e göre, (2.19) bağıntısının z'ye göre diferansiyeli alınıp, (2.17) bağıntısında yerine yazılırsa;

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \qquad \textbf{(2.20)}$$

elde edilir. Böylece Φ(x,z) Laplace denklemini sağlamış olur. (2.18) ve (2.19) denklemlerinden;

$$\phi(x,z) = -kh(x,z) + f(z) \qquad \textbf{(2.21)}$$

$$\phi(x,z) = -kh(x,z) + g(x) \qquad \textbf{(2.22)}$$

elde edilir. x ve z birbirlerinden bağımsız olarak değişebildikleri için , f(z) = g(x) = c. c bir sabittir. O halde;

$$\phi(x,z) = -kh(x,z) + c$$

ve

$$h(x,z) = \frac{1}{k}\left[c - \phi(x,z)\right] \qquad \textbf{(2.23)}$$

Eğer h(x,z), h_1'e eşit olan bir sabitse, (2.23) denklemi xz düzleminde bir eğriyi temsil etmektedir. Bu eğri için, Φ'nin sabit bir Φ_1 değeri olacaktır. Bu bir eşpotansiyel çizgisidir. O halde, Φ'ye Φ_1, Φ_2, Φ_3,… gibi değerler vererek h = h_1, h_2, h_3,…

boyunca eşpotansiyel çizgileri elde ederiz. Bir eşpotansiyel çizgisi Φ,boyunca eğimin türevini alabiliriz.

$$d\phi = \frac{\partial \phi}{\partial x} dx + \frac{\partial \phi}{\partial z} dz \qquad \textbf{(2.24)}$$

Eğer eğri boyunca Φ bir sabitse, dΦ = 0. Buradan,

$$\left(\frac{dz}{dx}\right)_{\phi} = -\frac{\frac{\partial \phi}{\partial x}}{\frac{\partial \phi}{\partial z}} = -\frac{v_x}{v_z} \qquad \textbf{(2.24)}$$

Tekrardan, ψ(x,z) bir fonksiyon;

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = v_x = -k\frac{\partial h}{\partial x} \qquad \textbf{(2.25)}$$

ve

$$-\frac{\partial \psi}{\partial x} = v_z = -k\frac{\partial h}{\partial z} \qquad \textbf{(2.26)}$$

(2.18) denklemi ile (2.25) denklemini birleştirirsek;

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} \qquad \textbf{(2.27)}$$

elde ederiz. Tekrar, (2.19) denklemi ile (2.26) denklemini birleştirirsek;

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

$$-\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \qquad \textbf{(2.28)}$$

(2.27) denklemi ve (2.28) denkleminden,

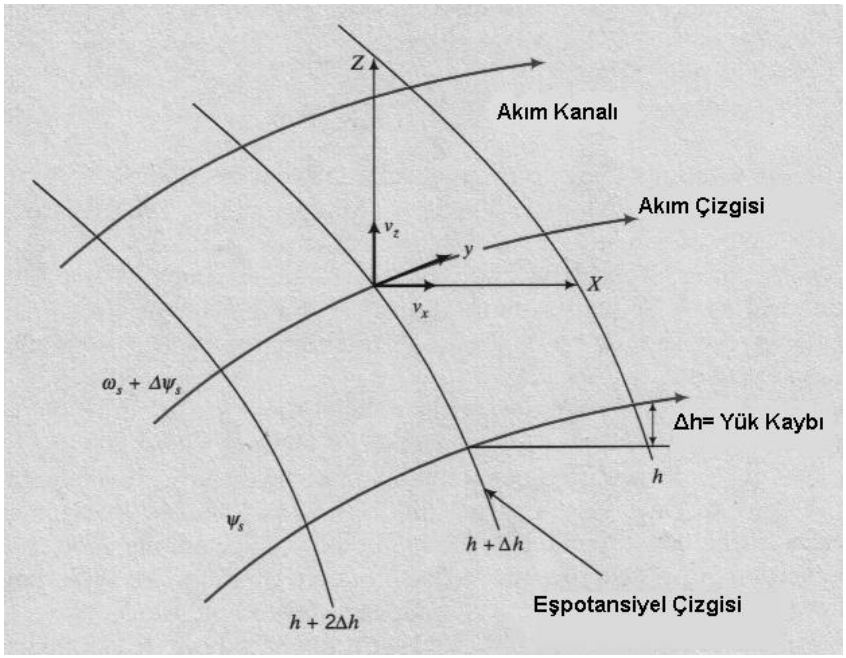
$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}=-\frac{\partial^2\phi}{\partial x\partial z}+\frac{\partial^2\phi}{\partial x\partial z}=0$$

Böylece ψ(x,z)'de Laplace denklemini sağlamıştır. Eğer ψ(x,z)'e ψ_1, ψ_2, ψ_3,… gibi değerler verirsek, xz düzleminde bir eğriler topluluğu elde ederiz.

$$d\psi=\frac{\partial\psi}{\partial x}dx+\frac{\partial\psi}{\partial z}dz \qquad \textbf{(2.29)}$$

Verilen bir eğride, eğer ψ sabitse dψ = 0'dır. Böylece, (2.29) denkleminden;

$$\left(\frac{dz}{dx}\right)_{\psi}=-\frac{\frac{\partial\psi}{\partial x}}{\frac{\partial\psi}{\partial z}}=\frac{v_z}{v_x} \qquad \textbf{(2.30)}$$



Şekil 2.4 : Akım terimlerinin tasviri

$(dz/dx)_{\psi}$ eğimi, bileşke hız ile aynı yöndedir. Bundan dolayı, $\psi = \psi_1, \psi_2, \psi_{3,}...$ eğrileri, akım çizgileridir.

(2.24) denklemi ve (2.30) denkleminden herhangi bir (x,z) noktasında eşpotansiyel çizgisi ile akım çizgisi orthogonal olduğu ortaya çıkar.

Sırasıyla $\Phi(x,z)$ ve $\psi(x,z)$ fonksiyonları potansiyel ve akım fonksiyonu olarak adlandırılır. Şekil 2.4 de bahsettiğimiz akım terimleri resmedilmiştir.[5,7]

3. AKIM AĞLARI

Zeminlerde su akımını tanımlamakta kullanılan Laplace denkleminin çözümünü elde etmek için değişik yöntemlerden yararlanmak mümkündür. Matematiksel olarak tanımlanabilen mühendislik problemlerinde, ideal olan her türlü sınır koşulları için geçerli kapalı analitik çözümler geliştirilebilmektedir. Zeminlerde su akımı problemleri için bu mümkün olmamaktadır. Genel ve uygulamaya yönelik problemlerde yaklaşık çözümlere başvurulmaktadır. Bu yaklaşık yöntemlerden biri grafik çözüm yolu olan akım ağlarıdır. [7,12]

Akım ağı, bir dizi akım çizgileri ve eşpotansiyel çizgilerinden oluşmaktadır. Akım çizgisi, su zerresinin takip ettiği çizgiye denir. Eşpotansiyel çizgisi ise, aynı piyezometre yüksekliğine (hidrolik yük = h(x,z) = sabit) sahip noktaların birleşmesiyle oluşan çizgidir. Şekil 3.1 de örnek olarak tek sıra palplanj perde için akım ağı verilmiştir. Geçirgen tabaka izotropiktir, yani permeabilite katsayısı $k_x = k_y = k$'dır. Şekil 3.1'deki düz çizgiler akım çizgileri ve kesikli çizgiler eşpotansiyel çizgileridir. Bir akım ağını çizerken sınır koşullarını göz önünde bulundurmalıyız. Şekil 3.1'deki sınır koşullarına örnek vermek gerekirse;

1. AB bir eşpotansiyel çizgidir.

2. EF bir eşpotansiyel çizgidir.

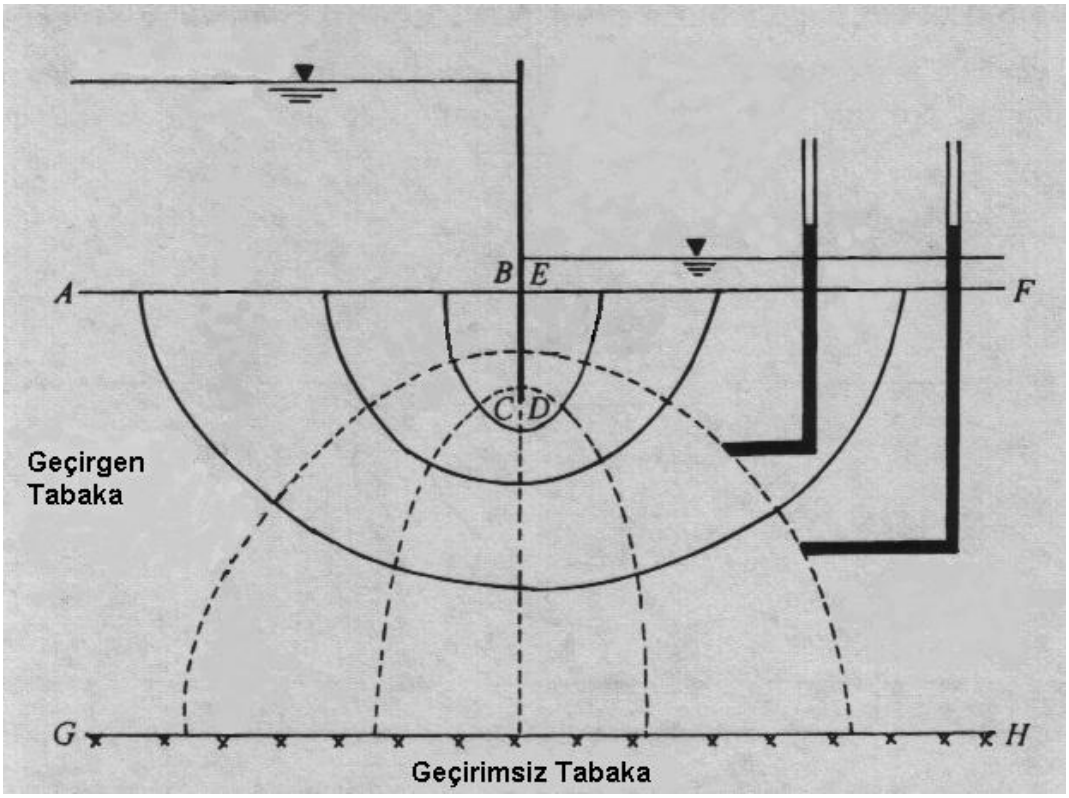
3. BCDE (palplanjın iki tarafı) bir akım çizgisidir.

4. GH bir akım çizgisidir.

Doğru çizilmiş bir akım ağının hangi özelliklere sahip olması gerektiğini incelememiz yararlı olacaktır. Bu özellikleri şöyle sıralayabiliriz.

1. Akım çizgileri ve eşpotansiyel çizgileri birbirlerini dik açılarla kesmelidir. (Sınırlar dahil)

2. Birbiri ile kesişen akım ve eşpotansiyel çizgilerinin oluşturduğu eğri kenarlı dikdörtgenler birbirine benzer olmalıdır. (genişlik / uzunluk oranı sabit olmalıdır.)



Şekil 3.1 : Palplanj perde etrafındaki Akım ağı

3. Birbirini takip eden eşpotansiyel çizgileri arasındaki hidrolik yük farkı sabit olmalıdır. (h1 – h2 = h2 – h3 = h3 – h4 = ….)

4. Akım kanalları arasından eşit miktarda su geçmelidir. (1. ve 2. koşullar sağlanınca bu da sağlanmış olur.)

5. Sınırları oluşturan yüzeyler de (akım çizgisi veya eşpotansiyel çizgisi olmalarına göre) sınır koşulları ile uyum sağlamalıdır.

3.1. Akım Ağının Grafiksel Olarak Çizilmesi

Laplace denklemi kuramsal olarak sonsuz sayıda akım çizgisi ve eşpotansiyel çizgisinden oluşmaktadır. Akım ağının deneme-yanılma yöntemiyle grafiksel olarak elde edilmesinde ise, akım ve eşpotansiyel çizgilerinden sadece belli sayıda çizilmesi ile yetinilmektedir. Bunların sayısı arttıkça daha duyarlı bir çözüm elde edilmesi

mümkündür. Fakat uygulamada genellikle çok sık çizgilerden oluşan akım ağına gerek yoktur. [5]

Akım ağının çizilmesinde aşağıdaki adımların izlenmesi yararlı olmaktadır:

1. Bir kâğıt üzerine ölçekli olarak akım bölgesinin sınırları çizilir.

2. Akım bölgesi için çizilecek akım kanalı sayısı belirlenerek bunları verecek akım çizgileri çizilir. İlk denemede akım çizgileri aşağı yukarı eşit aralıklı olarak çizilebilir. Akım çizgilerinin eşpotansiyel çizgisi oluşturan sınır yüzeylerine dik doğrultuda olmasına dikkat edilmelidir.

3. İkinci adımda çizilen akım çizgilerini dik açıyla kesecek ve bunlarla genişlik / uzunluk oranı sabit dikdörtgenler oluşturacak şekilde eşpotansiyel çizgileri çizilir. Genellikle akım ağları dikdörtgenlerin genişlik / uzunluk oranı bire eşit olacak şekilde çizilmekle beraber, bu oranın sabit olması yeterlidir. Eşpotansiyel çizgilerinin de akım çizgisi oluşturan geçirimsiz sınır yüzeylerine dik olmasına dikkat edilir.

4. Daha önce verilmiş olan doğru çizilmiş bir akım ağının sahip olması gereken koşullar ile uyumlu bir akım ağı edilip edilmediği kontrol edilir. Genellikle bir deneme olarak çizilen akım ağının bütün bu özelliklere sahip olması beklenmemelidir. Uyumsuzluk gösteren kısımlar silinerek yeniden çizilir ve bu şekilde deneme-yanılma yöntemiyle yavaş yavaş bütün uyumsuzluklar giderilerek doğru çözüm geliştirilir.[6]

3.2. Akım Ağından Sızma Miktarının Hesaplanması

Akım kanalı, iki komşu akım çizgisi arasında kalan şerit kısımdır. Sızma miktarını hesaplamak için Şekil 3.2 ‘deki gibi bir akım kanalını ele alalım.

Şekil 3.2 de akım kanalını kesen eşpotansiyel çizgileri ve onların sahip olduğu hidrolik yükler de gösterilmiştir. Darcy kanununa göre;

$$\Delta q = kiA = k\left(\frac{h_1 - h_2}{l_1}\right)(b_x \times 1) = k\left(\frac{h_2 - h_3}{l_2}\right)(b_2 \times 1) = k\left(\frac{h_3 - h_4}{l_3}\right)(b_3 \times 1) = \ldots \qquad \textbf{(3.1)}$$

Eğer akım elemanları kare şeklinde çizilirse;

$$l_1 = b_1, l_2 = b_2, l_3 = b_3, ...$$

Öyleyse; (3.1) denkleminden,

$$h_1 - h_2 = h_2 - h_3 = h_3 - h_4 = ... = \Delta h = \frac{h}{N_d} \qquad \textbf{(3.2)}$$

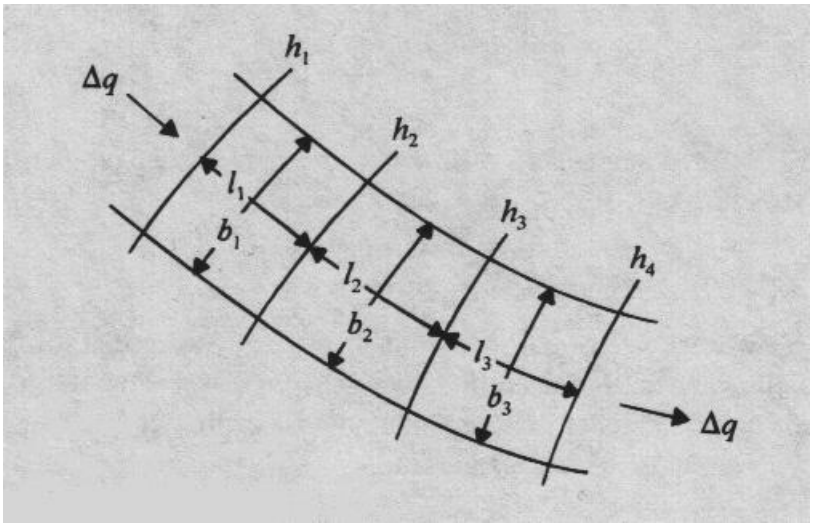
elde edilir. Burada N_d, hidrolik yük kaybı sayısını vermektedir. (3.2) denklemi, ardışık iki eşpotansiyel çizgisi arasındaki yük kaybının aynı olduğunu göstermektedir. (3.1) ve (3.2) denklemlerini birleştirdiğimizde, bize

$$\Delta q = k \frac{h}{N_d} \qquad \textbf{(3.3)}$$

verir. Eğer akım ağında N_f kadar akım kanalı varsa, birim uzunluktaki sızma miktarı,

$$q = N_f \Delta q = kh \frac{N_f}{N_d} \qquad \textbf{(3.4)}$$

Genellikle akım ağını oluşturan akım elemanlarını kareye yakın oluştururuz. Ama akım ağının tüm akım elemanlarını dikdörtgen olarak oluşturabiliriz. Bunu yaparken akım ağının genişlik-uzunluk oranları sabit olmalıdır.



Şekil 3.2 : Akım Kanalı

$$\frac{b_1}{l_1} = \frac{b_2}{l_2} = \frac{b_3}{l_3} = ... = n \qquad \textbf{(3.5)}$$

Bu tür akım ağlarının birim uzunluk için sızma miktarı,

$$q = kh\frac{N_f}{N_d}n \qquad \textbf{(3.6)}$$

şeklinde verilebilir.

3.3. Anizotropik Zeminlerde Akım Ağları

Daha önceki bölümlerde akım ağını çizerken geçirgen tabakaların izotropik olduğunu yani, $k_{yatay} = k_{düşey} = k$ olarak kabul etmiştik. Bu bölümde, permeabilite bakımından izotrop olmayan zeminlerdeki yeraltı suyu akımı için akım ağını oluşturmayı ele alacağız. İki boyutlu akım problemleri için; (2.16) denklemini ele alırsak;

$$k_x\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Burada $k_x = k_{yatay}$ ve $k_z = k_{düşey}$ 'dir. Bu denklemi,

$$\frac{\partial^2 h}{(k_z / k_x)\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \qquad \textbf{(3.7)}$$

şeklinde tekrar yazabiliriz. Burada $x' = \sqrt{k_x / k_z}\, x$ kabulü yaparsak;

$$\frac{\partial^2 h}{(k_z / k_x)\partial x^2} = \frac{\partial^2 h}{\partial x'^2} \qquad \textbf{(3.8)}$$

elde edilir. (3.8) ifadesini (3.7) denkleminde yerine yerleştirirsek,

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \qquad \textbf{(3.9)}$$

elde edilir. Bu denklem; izotropik zeminlerdeki gibi akımı temsil eden ve x'z düzleminde birbirlerine dik iki eğri takımını temsil eder. [7,14]

İzotropik olmayan zeminlerde akım ağını oluşturmak için aşağıdaki adımlar izlenmelidir.

1. Önce yapıyı çizmek için bir düşey ölçek kabulü yapılır.

2. $\sqrt{\frac{k_z}{k_x}} = \sqrt{\frac{k_{düşey}}{k_{yatay}}}$ belirlenir.

3. $\text{Ölçek}_{\text{yatay}} = \sqrt{\frac{k_z}{k_x}}$ ($\text{Ölçek}_{\text{düşey}}$) şeklinde bir yatay ölçek oluşturulur.

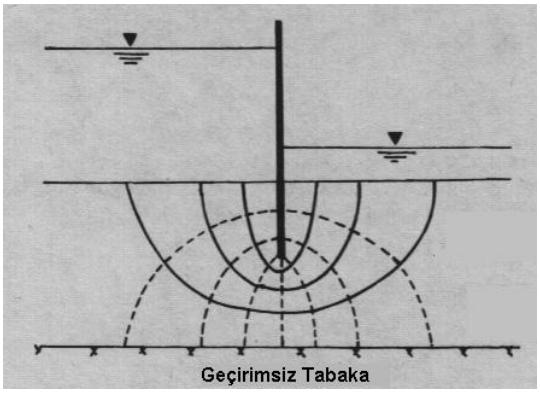
4. (1) ve (3) adımlardaki ölçeklere göre yapının kesiti çizilir.

5. (4) adımda dönüştürülen yapı için, izotropik zeminmiş gibi akım ağı çizilir.

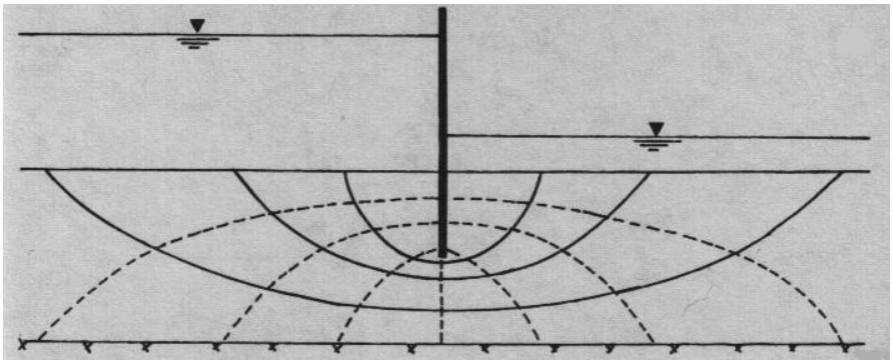
Ortamın birim genişlik için sızma miktarı:

$$q = \sqrt{k_x k_z}\, h \frac{N_f}{N_d} \qquad \textbf{(3.10)}$$

şeklinde hesaplanır. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4 de sırasıyla dönüştürülen ve gerçek ölçekteki akım ağları görülmektedir.



Şekil 3.3 : Dönüştürülen ölçekte akım ağı



Şekil 3.4 : Gerçek ölçekte akım ağı

3.4. Homojen Olmayan Zemin Tabakalarında Akım Ağı

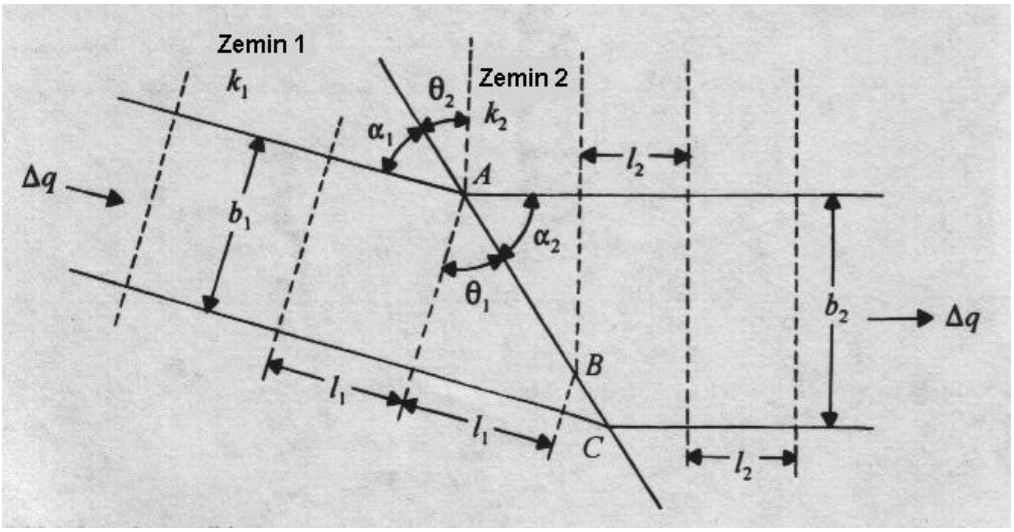
Bu bölüme kadar homojen olan zemin tabakalarındaki akım ağlarının oluşturulmasından bahsettik. Nadiren de olsa ideal durumlar olmasına rağmen, çoğunlukla tabakalar şeklinde oluşmuş zemin katmanlarıyla karşılaşırız. Farklı permeabiliteye sahip iki zemin tabakasının sınırından geçen akım ağı oluşturulurken, akım ağı sınırı geçtiği an izlediği yoldan sapma gösterir. Bu durum geçiş şartı olarak adlandırılır. Şekil 3.5 de iki zemin tabakasının sınırında oluşan akım kanalının genel durumu gösterilmiştir. Birinci ve ikinci zemin tabakalarının permeabiliteleri sırayla k_1 ve k_2' dir. Şekil üzerindeki kesikli çizgiler eşpotansiyel çizgileridir.

İki eşpotansiyel çizgisi arasındaki hidrolik yük Δh olsun. Buna göre, birim genişlik için akım kanalındaki sızma miktarı;

$$\Delta q = k_1 \frac{\Delta h}{l_1}(b_1 \times 1) = k_2 \frac{\Delta h}{l_2}(b_2 \times 1)$$

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{b_2 / l_2}{b_1 / l_1} \qquad \textbf{(3.11)}$$

şeklindedir. l1, b1 ve l2, b2 zemin tabakası 1 ve 2'deki akım elemanlarının sırayla uzunluk ve genişlikleridir.



Şekil 3.5 : Geçiş Şartı

Şekil 3.5'e dayanarak;

$$l_1 = AB\sin\theta_1 = AB\cos\alpha_1 \qquad \textbf{(3.12a)}$$

$$l_2 = AB\sin\theta_2 = AB\cos\alpha_2 \qquad \textbf{(3.12b)}$$

$$b_1 = AC\cos\theta_1 = AC\sin\alpha_1 \qquad \textbf{(3.12c)}$$

$$b_2 = AC\cos\theta_2 = AC\sin\alpha_2 \qquad \textbf{(3.12d)}$$

(3.12a) ve (3.12c) denklemlerinden,

$$\frac{b_1}{l_1} = \frac{\cos\theta_1}{\sin\theta_1} = \frac{\sin\alpha_1}{\cos\alpha_1}$$

$$\frac{b_1}{l_1} = \frac{1}{\tan\theta_1} = \tan\alpha_1 \qquad \textbf{(3.13)}$$

elde edilir. Bunun yanında, (3.12b) ve (3.12d) denklemlerinden,

$$\frac{b_2}{l_2} = \frac{\cos\theta_2}{\sin\theta_2} = \frac{\sin\alpha_2}{\cos\alpha_2}$$

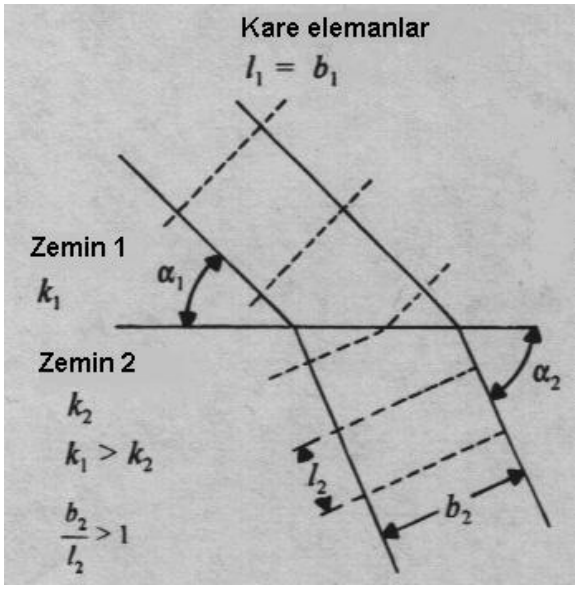
$$\frac{b_2}{l_2} = \frac{1}{\tan\theta_2} = \tan\alpha_2 \qquad \textbf{(3.14)}$$

elde edilir. (3.11), (3.13) ve (3.19) denklemlerini birleştirirsek,

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\tan\alpha_2}{\tan\alpha_1} \qquad \textbf{(3.15)}$$

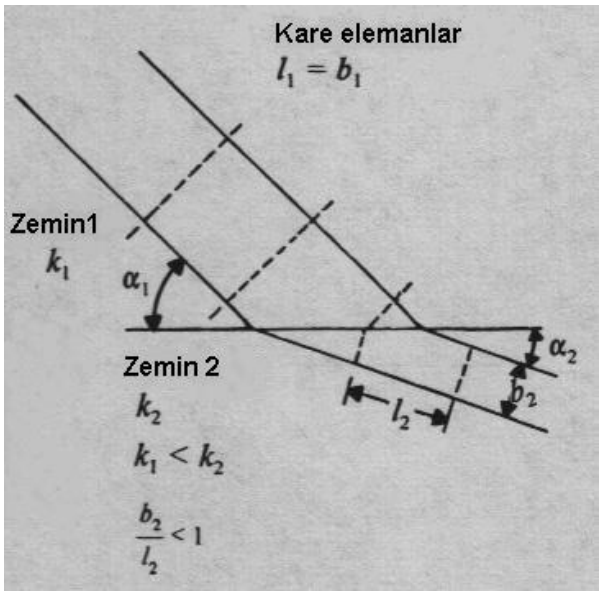
Homojen olmayan zemin tabakalarında akım ağı, (3.15) denkleminde verilen ifadelerle ve daha önceki bölümlerde tarif edilen genel prensipler dahilinde oluşturulur. Bunlarla birlikte, aşağıda belirtilecek hususların göz önünde bulundurulması akım ağı oluşturulurken yararlı olacaktır:

1. $k_1 > k_2$ Durumu: Zemin 1'de kare akım elemanları çizebiliriz. Bu, (3.11) denkleminde $l_1 = b_1$ demektir. Öyleyse $k_1 / k_2 = b_2 / l_2$'dir. Buna göre, zemin 2'deki akım elemanları dikdörtgen formunda olacaktır ve genişlik-uzunluk oranları k_1 / k_2 'ye eşit olacaktır. Bu durum Şekil 3.6 da gösterilmiştir.



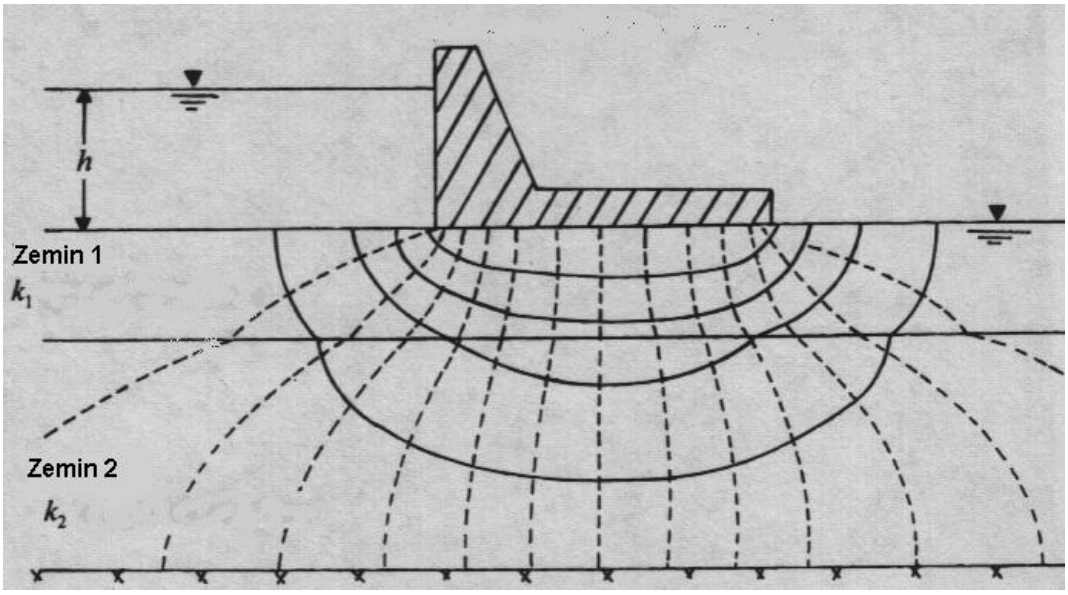
Şekil 3.6 : Farklı permeabiliteye sahip tabakalar arasındaki sınırda akım kanalı (k1 > k2)

2. k1 < k2 Durumu: Zemin 1'de kare akım elemanları çizebiliriz. Bu, (3.11) denkleminde l1 = b1 demektir. Öyleyse k1 / k2 = b2 / l2'dir. Buna göre, zemin 2'deki akım elemanları dikdörtgen formunda olacaktır ve genişlik-uzunluk oranları k1 / k2 'ye eşit olacaktır. Bu durum Şekil 3.7 de gösterilmiştir.[7]



Şekil 3.7 : Farklı permeabiliteye sahip tabakalar arasındaki sınırda akım kanalı (k1 < k2)

Homojen olmayan zemin tabakalarında akım ağının oluşturulmasını daha iyi görebilmek için Şekil 3.8 deki örneğe bakabiliriz.



Şekil 3.8 : Homojen olamayan ara zemin tabakalarında akım ağı

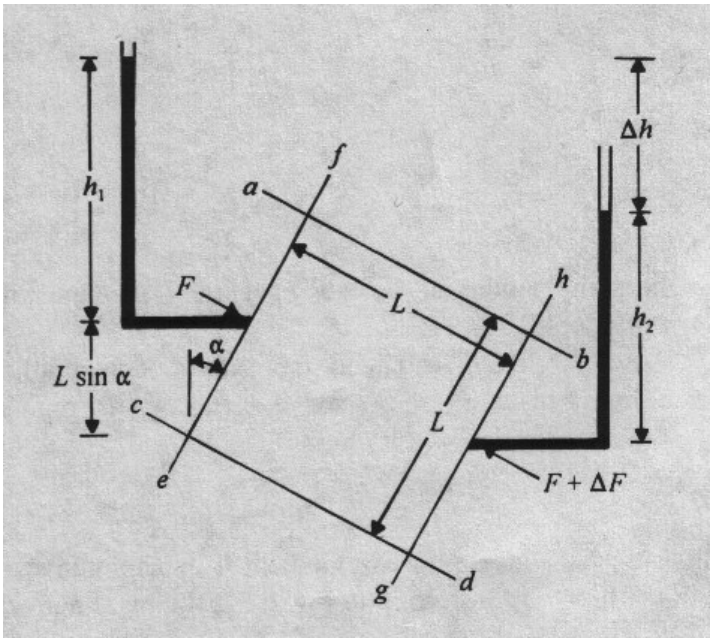
4. YERALTI SUYU AKIMININ ETKİLERİ

4.1. Sızma Kuvveti

Zemin içinde hareket eden suyun sürtünmeden dolayı zemine bir kuvvet uygular. Bu kuvvete sızma kuvveti denmektedir. Bu kuvvet akım yönüne paraleldir.

Birim zemin elemanına etkiyen sızma kuvvetini bulmak için Şekil 4.1 de gösterildiği gibi ab ve cd akım çizgileri ve ef ve gh eşpotansiyel çizgileriyle sınırlanmış zemin kütlesini ele alalım. Zemin kütlesinin gösterilen kesite dik yönde birim kalınlığı mevcuttur. Zemin kütlesinin kendi ağırlığı; (uzunluk) (genişlik) (kalınlık) (γ_{doygun}) = (L) (L) (1) (γ_{doygun}) = L^2 γ_{doy} . Zemin kütlesinin ef tarafındaki hidrostatik kuvvet; (hidrolik yük) (L)(1) = h_1 γ_w L. Zemin kütlesinin gh tarafındaki hidrostatik kuvvet; h_2 γ_w L. Sistemdeki dengeyi yazdığımızda;

$$\Delta F = h_1 \gamma_w L + L^2 \gamma_{sat} \sin\alpha - h_2 \gamma_w L \qquad \textbf{(4.1)}$$



Şekil 4.1 : Sızma kuvvetinin bulunuşu

Diğer tarafta, $h_1 + L\sin\alpha = h_2 + \Delta h$ 'dir. Öyleyse;

$$h_2 = h_1 + L\sin\alpha - \Delta h \qquad \textbf{(4.2)}$$

(4.1) ve (4.2) denklemlerini birleştirirsek;

$$\Delta F = h_1\gamma_w L + L^2\gamma_{doy}\sin\alpha - (h_1 + L\sin\alpha - \Delta h)\gamma_w L$$

veya $$\Delta F = L^2(\gamma_{doy} - \gamma_w)\sin\alpha + \Delta h\gamma_w L = L^2\gamma_a\sin\alpha + \Delta h\gamma_w L \qquad \textbf{(4.3)}$$

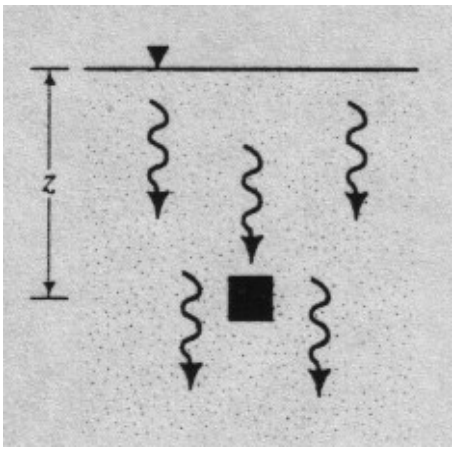
= zeminin su altındaki birim ağırlığı **+** sızma kuvveti

$\gamma_a = \gamma_{doy} - \gamma_w$. (4.3) denkleminden de görüldüğü üzere zemin kütlesine etki eden sızma kuvveti $\Delta h\gamma_w L$ 'e eşittir. Bundan dolayı;

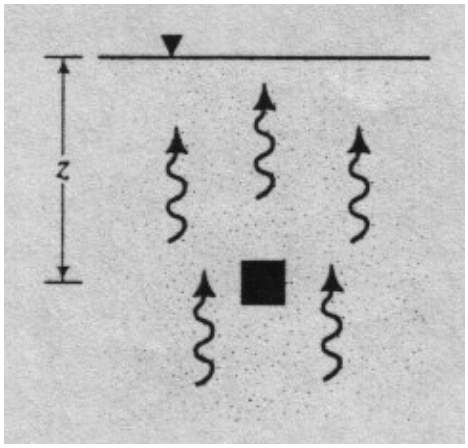
$$\text{Birim kütleye etki eden sızma kuvveti} = \frac{\Delta h\gamma_w L}{L^2}$$

$$j_s = \gamma_w \frac{\Delta h}{L} = \gamma_w i \qquad \textbf{(4.4)}$$

Burada i hidrolik eğimdir.[7,12]



Şekil 4.2 : Zemindeki aşağı doğru sızma



Şekil 4.3 : Zemindeki yukarı doğru sızma

Eğer sızma Şekil 4.2 deki gibi aşağı doğru oluşursa, sızma basınçları efektif gerilmeler ile aynı yönlü olur. Statik dengeden toplam düşey efektif gerilme;

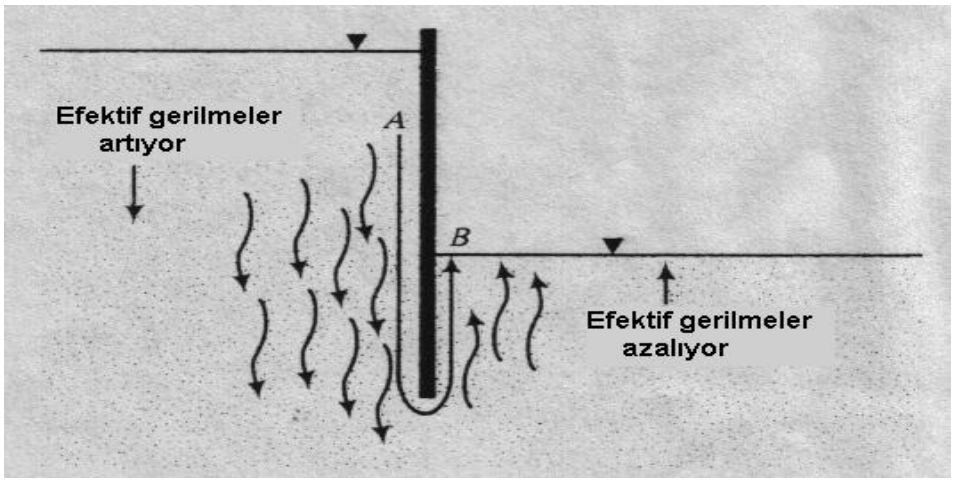
$$\sigma'_z = \gamma' z + iz\gamma_w = \gamma' z + j_s z \qquad \textbf{(4.5)}$$

şeklindedir. Eğer sızma Şekil 4.3 deki gibi yukarı doğru olursa, sızma basınçları efektif gerilmeler ile ters yönlü olur. Bu sefer, statik dengeden toplam düşey efektif gerilme;

$$\sigma'_z = \gamma' z - iz\gamma_w = \gamma' z - j_s z \tag{4.6}$$

şeklinde ifade olunur.

Sızma kuvvetleri, geoteknik yapıların stabilitesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, Şekil 4.4 deki gibi bir palplanş dayanma duvarının stabilitesi, zemine gömülü olan kısmının derinliğine bağlıdır. Palplanş dayanma duvarının sol tarafındaki zemin, dışarı doğru duvara yanal bir basınç uygular. Bu yanal basınca, duvarın sağ tarafındaki zemin tarafından karşı konulur. Eğer duvarın sol tarafındaki zeminde sabit seviyeli su olursa duvarın sağ tarafına doğru bir akım oluşur. Suyun takip edeceği yol Şekil 4.4 de AB olarak gösterilmiştir. Su, A noktasından B noktasına giderken yük kaybı oluşmaktadır. Duvarın sol tarafındaki sızma gerilmeleri yerçekimi etkisiyle oluşan gerilmeler ile aynı yöndedir. Bu sebeple, efektif gerilmeler artmakta ve duvarın sol tarafından dışarı doğru yanal bir kuvvet uygulanmaktadır. Duvarın sağ tarafında ise, sızma gerilmeleri yukarı yöndedir ve bu da efektif gerilmeleri azaltmaktadır. Bu yüzden de duvarın gömülü bölümünün sağladığı yanal direnci azalmaktadır. Sonuç olarak, bu tür problemlerdeki sızma gerilmeleri, hem yıkıcı yanal gerilmeleri arttırarak, hem de bu gerilmelere karşı koyan yanal direnci azaltarak geoteknik yapıların stabilitesini çift yönlü olarak bozan bir rol oynamaktadır.[5]



Şekil 4.4 : Dayanma yapısı yanında oluşan sızmanın efektif gerilmelere etkileri

4.2. Kaynamaya Karşı Güvenlik Tahkiki

Yeraltı suyunun yukarı doğru olduğu durumda hidrolik eğim (i), kritik hidrolik eğim (i_{cr}) ye ulaşırsa zemin kütlesinde denge bozulur ve zemin yukarı doğru hareket eder. Zemin yüzeyi kabarır ve zemin-su karışımı yüzey üstüne çıkar. Bu olaya kabarma, kaynama veya borulanma da denilmektedir.

$$i_{cr} = \frac{\gamma_a}{\gamma_w}$$

$$\gamma_a = \gamma_{doy} - \gamma_w = \frac{G_s\gamma_w + e\gamma_w}{1+e} - \gamma_w = \frac{(G_s - 1)\gamma_w}{1+e}$$

Buradan,

$$i_{cr} = \frac{\gamma_a}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1+e} \qquad \textbf{(4.7)}$$

Zeminlerdeki G_s ve e 'nin kombinasyonlarına göre, i_{cr} 0,85- 1,10 arasında çeşitlilik gösterir. Şekil 4.5 de sızma kuvvetlerinden zarar görmüş, kaynamaya maruz kalmış bir kazı çukuru gösterilmektedir.



Şekil 4.5 : Sızma kuvvetlerinden zarar görmüş bir kazı çukuru [5]

4.2.1. Harza Metodu

Harza 1935 yılında hidrolik yapılarının borulanmaya karşı güvenliğini araştırdı. Yaptığı bu araştırmalara göre borulanmaya karşı güvenlik sayısı GS;

$$GS = \frac{i_{cr}}{i_{çıkış}} \tag{4.8}$$

şeklinde tanımlanır. Burada, $i_{çıkış}$ maksimum çıkış hidrolik eğimidir. Maksimum çıkış hidrolik eğim akım ağından belirlenebilir. Maksimum çıkış hidrolik eğimi $\Delta h/l$ şeklinde verilir (Δh, iki eşpotansiyel arası hidrolik yük kaybı ve l, akım elemanının uzunluğudur.). Hidrolik yapılarının güvenliği için güvenlik sayısının 3–4 olması uygundur. Geçici yapılar için bu sayı 1,5–2 arasında alınabilir.[7-9]

Tek sıra palplanj perdeden oluşan yapılarda maksimum hidrolik eğimin belirlenmesi için teorik bir çözüm de vardır. Bu çözüm,

$$i_{çıkış} = \frac{1}{\pi} \frac{\text{maksimum hidrolik yük}}{\text{palplanjın penetrasyon derinliği}} \tag{4.9}$$

şeklindedir.

4.2.2. Terzaghi Metodu

Terzaghi, 1922 yılında tek sıra palplanj perdeler üzerinde bazı model deneyler yürütmüştür. Bu deneylerde borulanmanın meydana gelebileceği kritik bölgenin, palplanjın penetrasyon derinliği D ise, palplanj perdeden D/2 ötesine kadar olan bölge olduğunu bulmuştur. Buna göre, yapının stabilite durumunu belirlemek için akışın olacağı tarafta bir zemin prizması ele alınır. Bu durum Şekil 4.6 da gösterilmiştir. Bu zemin prizmasının birim genişlikte ve D × D/2 boyutlarındadır. Bu prizmaya etki eden hidrolik kaldırma basıncı akım ağından yaralanarak;

$$U = \frac{1}{2}\gamma_w D h_a \qquad \textbf{(4.10)}$$

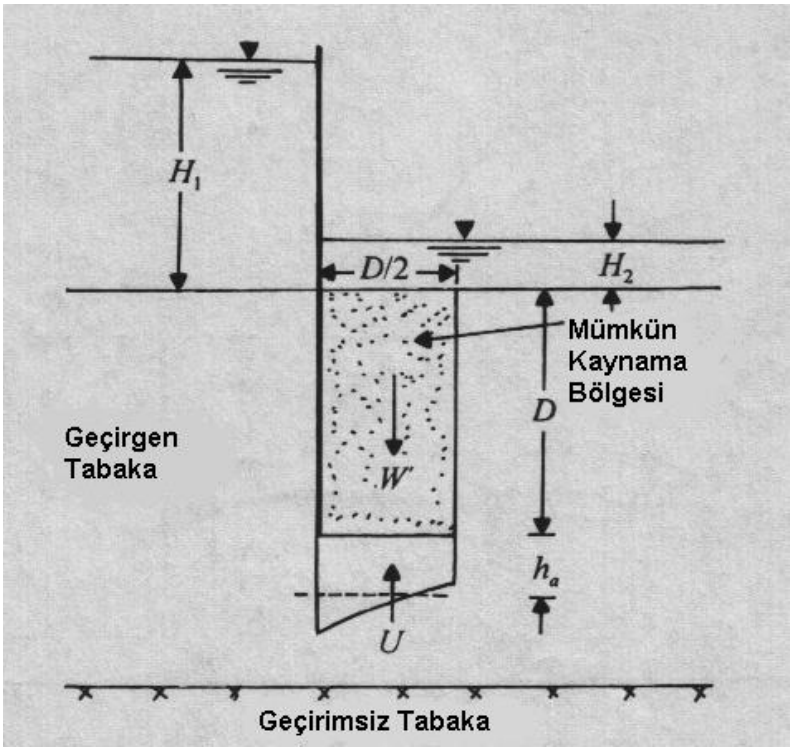
şeklinde belirlenir. Burada, h_a zemin prizmasının tabanındaki ortalama hidrolik yükünü temsil etmektedir. Bunların yanında, zemin prizmasının düşey yönde su altındaki ağırlığı da,

$$W_a = \frac{1}{2}\gamma_a D^2 \qquad \textbf{(4.11)}$$

şeklinde belirlenir. Bunlara göre, zeminin kaynamaya karşı güvenlik sayısı,

$$GS = \frac{W_a}{U} = \frac{\frac{1}{2}\gamma_a D^2}{\frac{1}{2}\gamma_w D h_a} = \frac{D\gamma_a}{h_a \gamma_w} \qquad \textbf{(4.12)}$$

Hidrolik yapılarının güvenliği için güvenlik sayısının 4 olması uygundur. Geçici yapılar için bu sayı 1,5–2 arasında alınabilir. Harr' a göre hidrolik yapılarının güvenli durumda kalmaları için güvenlik sayısını 4–5 alınmasını tavsiye etmiştir.[7,10]

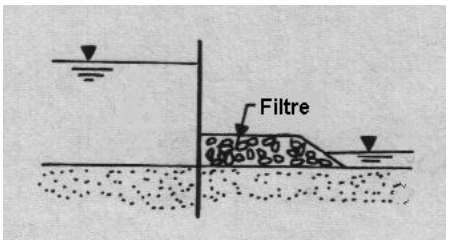


Şekil 4.6 : Terzaghi'ye göre Kaynama Durumu

Güvenlik sayısı düşük çıktığı takdirde, bu sayıyı arttırmak için Şekil 4.7 de gösterildiği gibi kaynamanın olduğu yerin yüzeyine W_a ağırlığını arttıracak yönde ters filtre malzemesi yerleştirilir. Filtrenin varlığı, U ilave hidrostatik basıncını değiştirmemekle beraber prizmanın efektif ağırlığını, W_a'dan W_a + W 'ye çıkarır. Böylece, kaynamaya karşı güvenlik sayısı, GS artmış olur.

$$GS' = \frac{W_a + W}{U} \qquad \textbf{(4.13)}$$

Ters ağırlık filtrelerinin dengeleyici etkisi, deneyler ve inşa edilen filtrelerle korunmuş yapılardan edinilen tecrübe ile iyice anlaşılmıştır.



Şekil 4.7 : Kaynamaya karşı filtre malzemesi

5. UYGULAMADA BİR ÖRNEK: KÜÇÜKKÖY, BALIKESİR, TM6 TERFİ MERKEZİ İNŞAATI

5.1. Giriş

Bu tezde, incelenecek örnek olay; İller Bankası Genel Müdürlüğü'nün Balıkesir Küçükköy'deki kanalizasyon inşaatı bünyesindeki TM6 Terfi merkezinin kazı çukurudur. Kazı çukurunda fore kazık perde destekli iksa sistemi uygulanmaktadır. Kazının nihai derinliğine yaklaşıldığı sırada kazı tabanında kabarma meydana gelmesi ile kazıklarda bir miktar hareket gözlemlenmiştir.

5.2. Sahanın Zemin Profili

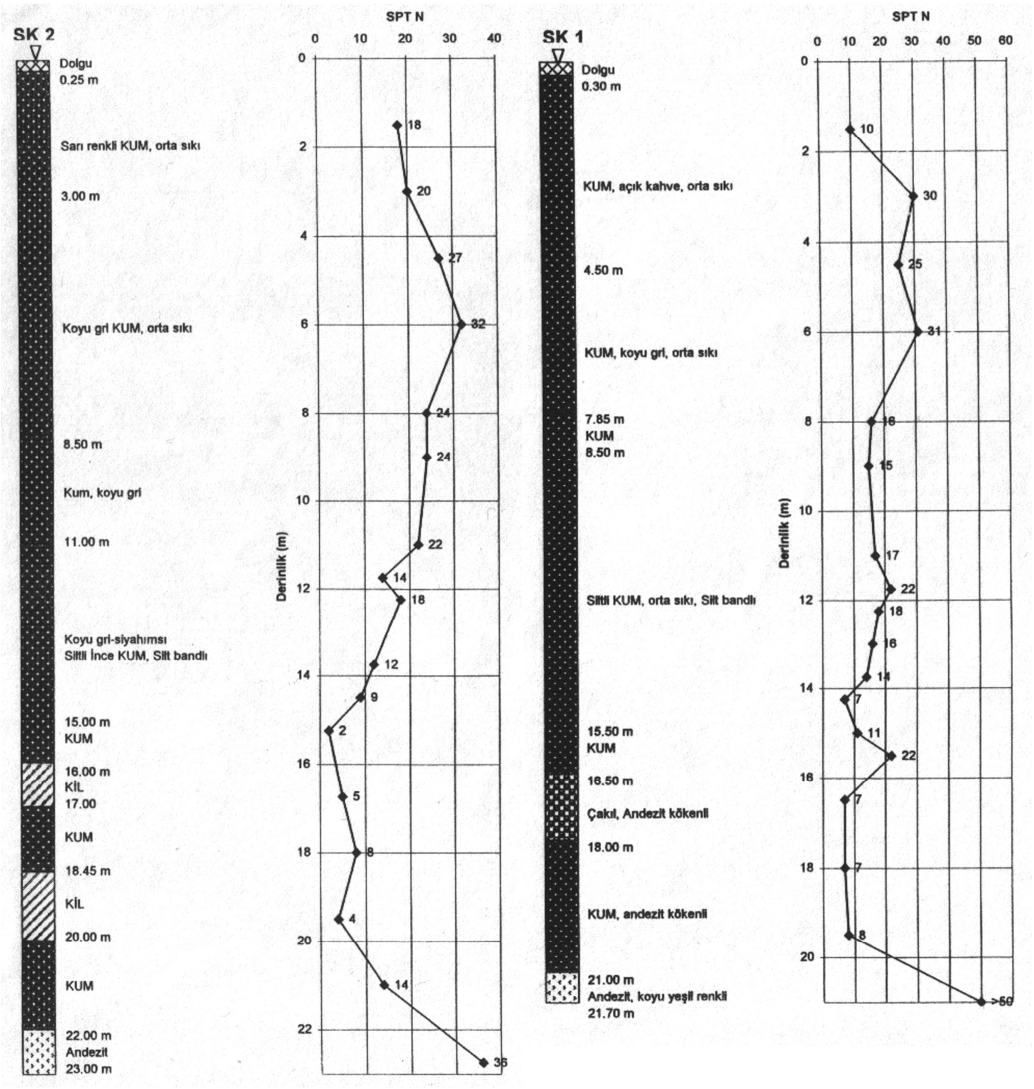
Sahanın zemin profili iller Bankası tarafından yaptırılan 2 adet sondaj ve kazı tabanının kabarmasından sonra Terfi Merkezinin çevresinde yapılan 2 adet yeni sondajla belirlenmiştir. Yapılan bu yeni sondajla belirlenen profiller Şekil 5.1 de gösterilmiştir. Ayrıca son yapılan sondaj logları Ek A da mevcuttur.

Mevcut sondaj sonuçlarına göre sahanın genel zemin profilini vermek gerekirse; Yüzeyde 0,30 m kalınlığında dolgu zemin örtü tabakasını bulunmaktadır. Bunun altında 3,0 ile 4,5 m derinliğe kadar sarı-açık kahve, orta sıkı kum geçilmiştir. Bu tabakanın altında 8,50 m derinliğe kadar koyu gri, az çakıllı, siltli kum yer almaktadır. Yapılan Standart Penetrasyon deneylerinden kum serilerinin orta sıkı yerleşimde olduğu anlaşılmaktadır.

8,50 m derinlikten itibaren koyu gri – siyahımsı renkli, siltli ince kuma girilmiştir. 16,00 – 16,50 m derinliklere kadar devam eden bu kum serileri genelde orta sıkı yerleşimde olup belli oranlarda kavkı ve silt içermektedir. Bu kum serilerinin altında 21,00 – 22,00 m derinliklere kadar andezit çakıllı kum, andezit kökenli çakıl ve kil ardalanması geçilmiştir.

21,00 ve 22,00 m derinliklerden itibaren taban kayası olan koyu yeşil renkli andezite girilmiştir. Sondaj sonuna kadar bu formasyon devam etmiştir.

Yeraltı suyu zemin yüzünden 1,0 m derinlikte tespit edilmiştir.



Şekil 5.1 : Sondaj profilleri ve SPT değerleri

5.3. Arazide ve Laboratuarda Yapılan Deneyler

Sondajlar sırasında sahada Standart Penetrasyon ve Permeabilite deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Şekil 5.1 de görülebilmektedir. Ayrıca son yapılan sondaj logları Ek A da mevcuttur.

Zemin yüzünden 16,50 m derinliğe kadar yer alan kum serilerinin genelde orta sıkı ve geçirimli oldukları anlaşılmaktadır.

Sondaj çukuru içinde yapılan permeabilite deneylerinde kum birimlerinde permeabilite katsayısı $k = 5 \times 10^{-3}$ cm/s – 5×10^{-4} cm/s mertebelerinde bulunmuştur.

Numuneler üzerinde yapılan Elek ve Kıvam Limitleri deneylerinden üst seviyelerdeki zemin birimlerinin genelde SM ve alt seviyelerdeki birimlerin SM/ML sınıflarına girdiği anlaşılmıştır. ML olarak sınıflandırılan zeminlerin genelde düşük plastisiteli silt olduğu ve bunların dane çapı bakımından silt sınıfına girdiği halde siltli ince kum permeabilitesine yakın değerlere sahip olduğu bilinmektedir. Sondajlar sırasında yapılan permeabilite deneyleri de bunu göstermiştir.

5.4. TM6 Terfi Merkezi Kazısı ve İksa Sistemi

Planda 10,20 x 20,80 m^2 alana haiz temel çukuru, +1,55 m de zemin yüzü kotu ve -9,86 m kotunda da kazı tabanına haizdir.

Çukur yüzeyleri Φ 65 cm çaplı kesişen fore kazıklarla desteklenmiş ve kazık perdeleri kuşaklama kirişleri üzerinden 4 sıra ankrajla tutulmuştur.

Kazık üst kotu +0,55 m ve alt kotu -13,50 m tutularak, toplam kazık boyu 14,05 m elde edilmiştir.

Kazıklara 0,90 x 0,60 m^2 kesit alanlı bir başlık kirişi yerleştirilmiştir.

Kazıklar 4 tendonlu ve 7,0 m kök boylu olarak tasarlanmıştır. Proje müellifi her bir ankraj için emniyetli ankraj çekme kuvvetini

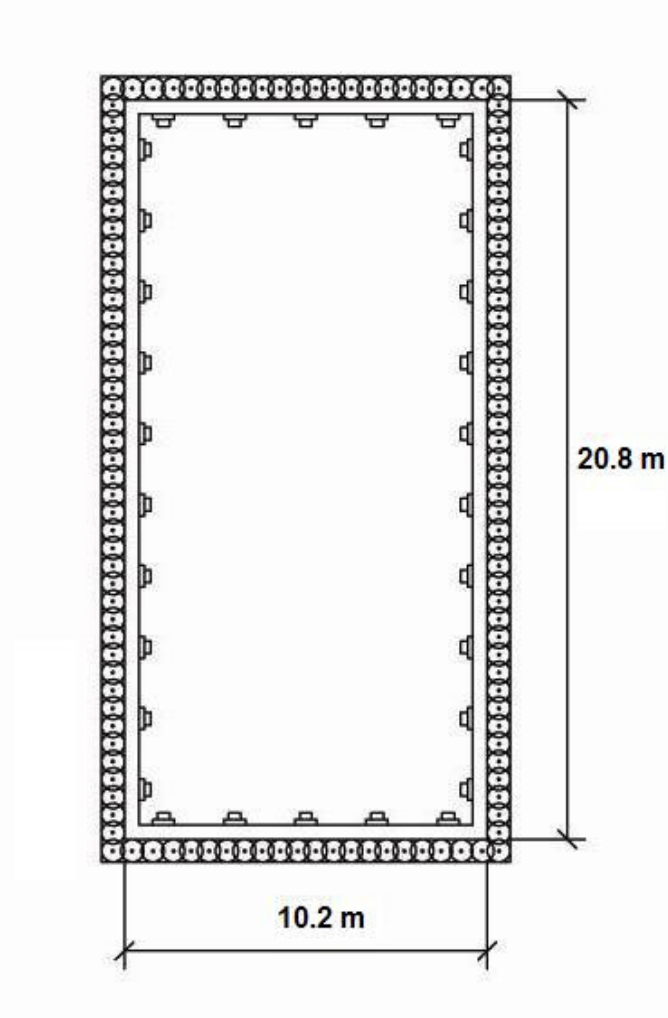
$$A_{em} = 32 \text{ ton}$$

olarak verirken, idare geçici amaçlı işlerde güvenlik katsayısının düşürülerek (GS = 1,5 için) emniyetli ankraj çekme kuvvetinin

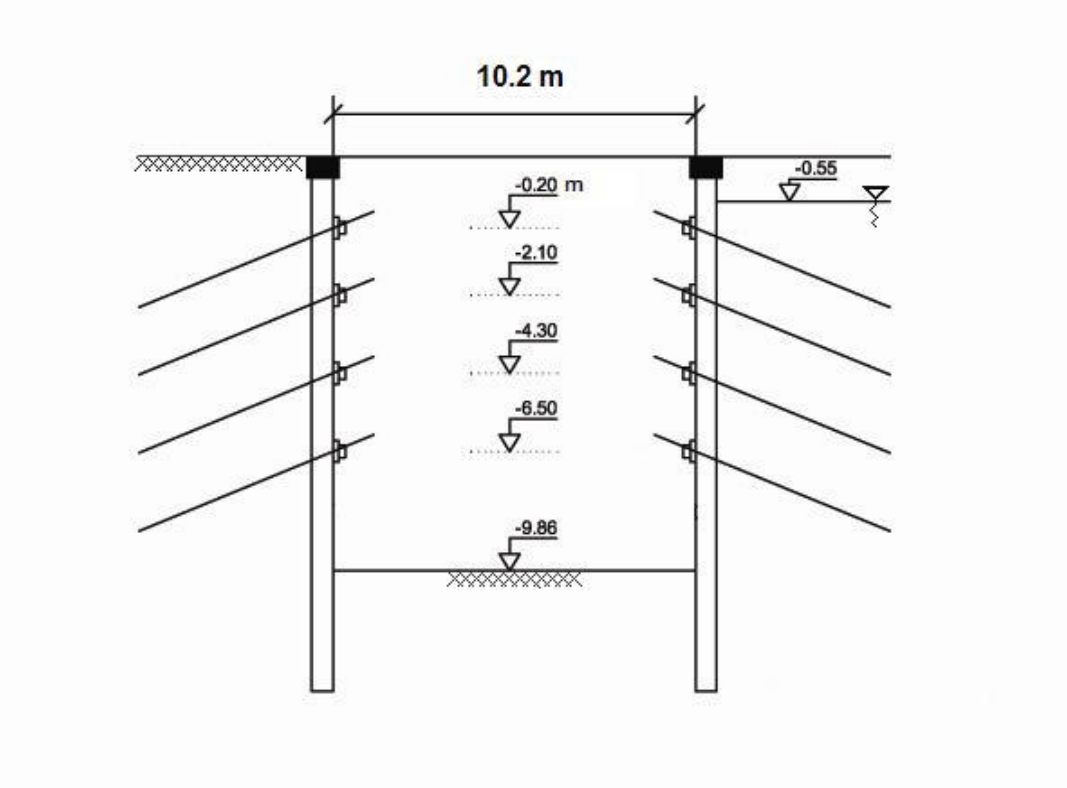
$$A_{em} = 54 \text{ ton}$$

kadar alınabileceğini belirtmiştir.

Kazı planını, iksa sisteminin yerleşimi ve kazının düşey enkesiti Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 de gösterilmiştir.

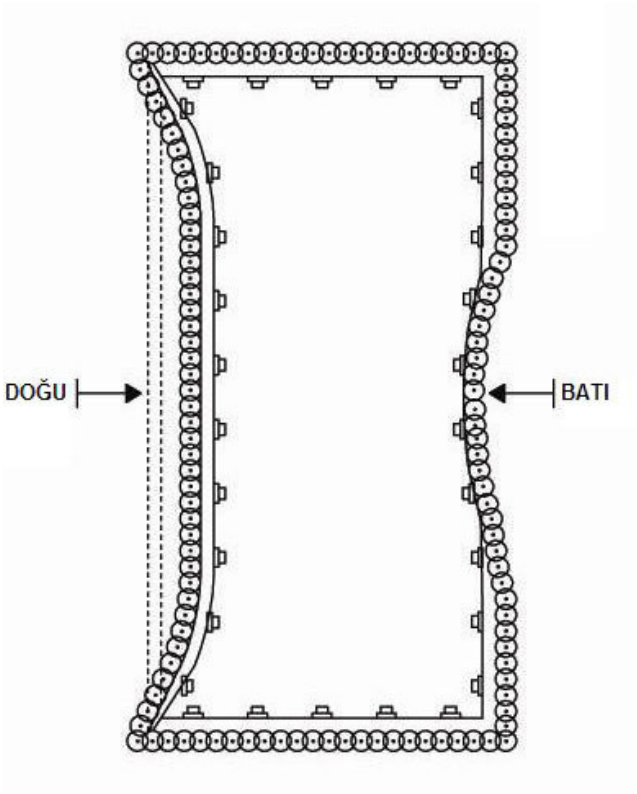


Şekil 5.2 : Kazının planı ve İksa sisteminin yerleşimi

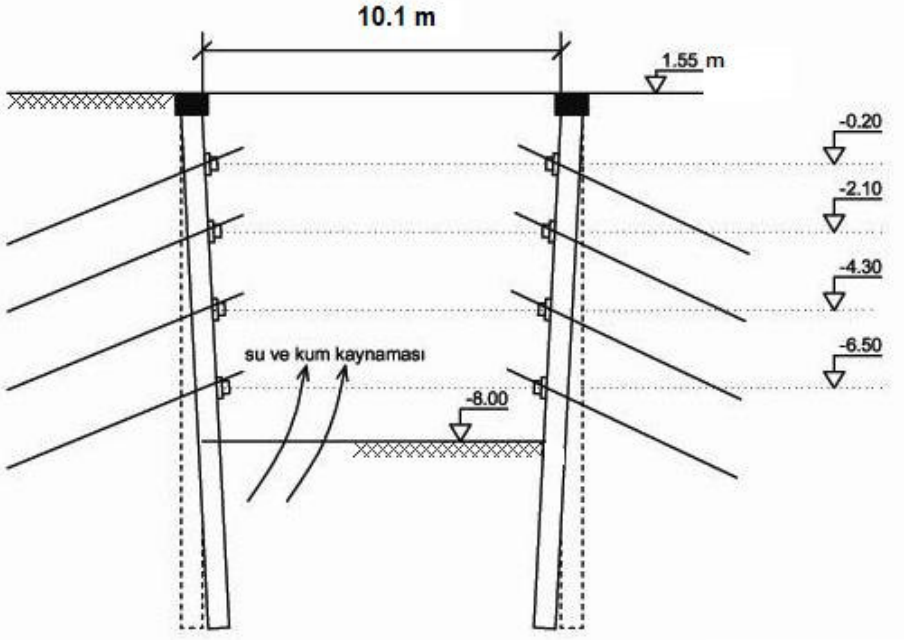


Şekil 5.3 : Kazının planlanan düşey enkesiti ve İksa sisteminin yerleşimi

Kazı Çukurunda yaklaşık -8,00 kotuna gelindiği sırada kazı tabanında kaynama olmuş, zemin hareketleri gözlenmiş ve bu arada doğu ve batı cephesindeki kazıklarda kazı çukuru içine doğru deplasmanlar gözlenmiştir. Deplasmanların yer, yönleri ve miktarı kabaca Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 de gösterilmiştir.



Şekil 5.4 : Deplasmanların gerçekleştiği haliyle kazı planı



Şekil 5.5: Deplasmanların gerçekleştiği haliyle kazının enkesiti

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 de TM6 kazı çukuru ve iksa sistemi görülmektedir. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da da kazı çukurunun iksa sisteminde oluşan deplasmanlar görülebilmektedir.



Şekil 5.6 : TM6 Kazı çukuru



Şekil 5.7: TM6 Kazı çukurunun iksa sistemi



Şekil 5.8: Kazı çukuru kenarında oluşan deplasmanlar



Şekil 5.9: Oluşan deplasmanların yakın görüntüsü

6. PLAXIS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE TM6 TERFİ MERKEZİ'NİN KAZI ÇUKURUNUN STABİLİTESİNİN İNCELENMESİ

6.1. Plaxis Sonlu Elemanlar Programının Tanıtımı

Sonlu elemanlar yöntemi, birçok mühendislik dalında karşılaştığımız matematiksel problemlere yaklaşık sonuçlar bulmak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, inşaat mühendisliğinde zemin-yapı etkileşimi, gerilme-şekil değiştirme, yükleme, konsolidasyon, taşıma gücü, akım ağı, zemin dinamiği konularında ve malzeme çeşitliliği olan durumlarda kullanılmakta ve gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir.

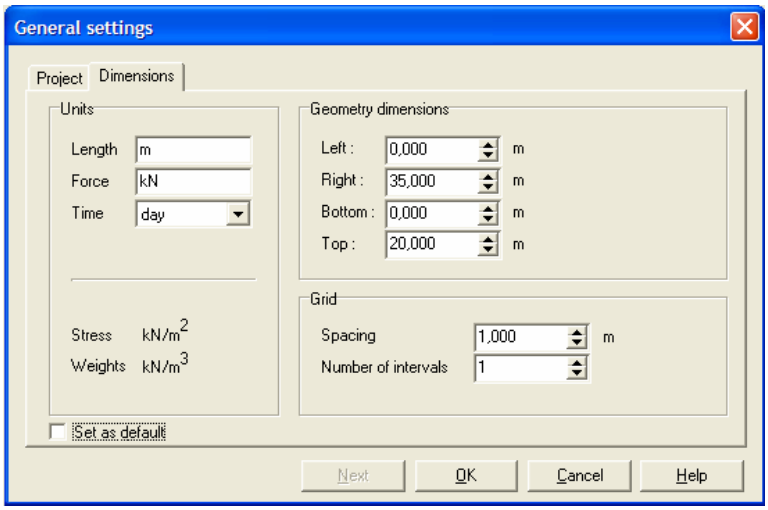
Plaxis programı, geoteknik mühendisliği projelerinin deformasyon ve stabilite analizlerini gerçekleştirmek amacıyla geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programıdır. Basit ve grafiksel veri girişi sayesinde ele alınan problemin basit ve detaylı bir şekilde incelenmesi ve çözüme ulaşılması sağlanmaktadır.

Plaxis programı ele alınan problemin grafiksel ve nümerik özelliklerinin girişine olanak sağlayan bir "INPUT", analizlerin gerçekleştirildiği "CALCULATION", analiz sonuçlarını grafik olarak sergileyebilen "OUTPUT" ve elde edilen sonuçlarla ilgili istenilen eğrilerin oluşturulmasına olanak sağlayan "CURVE" safhalarından oluşmaktadır.

Plaxis programı ile bir analize başlanırken öncelikle incelenecek projenin genel özelliklerinin verilmesi gerekmektedir. Şekil 6.1 de gösterilen genel ayarlarda proje ismi, düğüm noktası sayısı ve geometrik ölçüler girilerek analize başlanır.

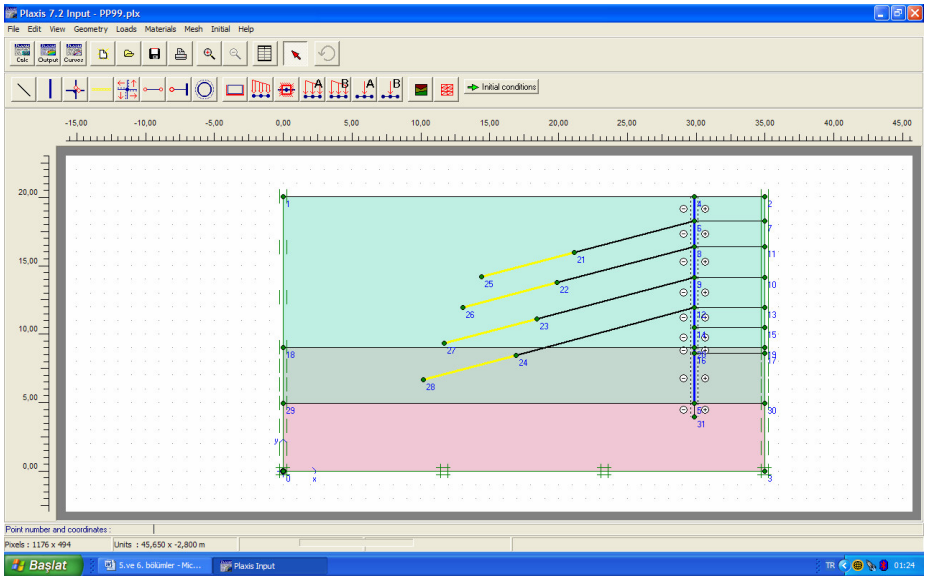
Plaxis programında sonlu elemanlar yöntemine göre deplasmanlar esas bilinmeyen olarak kabul edilmiştir. Sürekli ortam birçok elemana ayrılır ve her bir eleman üzerindeki düğüm noktaları iki serbestlik derecesine sahiptir. Plaxis programında sonlu elemanlar ağının oluşturulmasında üçgen elemanlar kullanılmaktadır. Bu üçgen

elemanlar 6 veya 15 düğüm noktalı olarak seçilebilmektedir. Gerilmelerin ve göçme yüzeylerinin daha hassas hesaplanabilmesi için 15 düğüm noktalı elemanın seçilmesi daha doğru olmaktadır.



Şekil 6.1 : Plaxis programında genel ayarlar

Programın kullanılması sırasında öncelikle geometrinin oluşturulması gereklidir. Bu amaçla Şekil 6.2'de görüldüğü üzere "lines" komutu ile çizgisel elemanlar kullanılabilir ve çalışma alanının sınırları belirlenir. Çok tabakalı bir zemin profili üzerinde çalışılacağı zaman yine bu çizgisel elemanlar yardımıyla arazi istenilen noktalardan ayrılarak farklı zemin tabakaları tanımlanabilir.



Şekil 6.2 : Input ana penceresi

Geometrinin oluşturulmasından sonra projede kullanılacak elemanlar (palplanj, ankraj) yerine "beam", "geotextile", "node to node anchor" komutları yardımıyla modellenir.

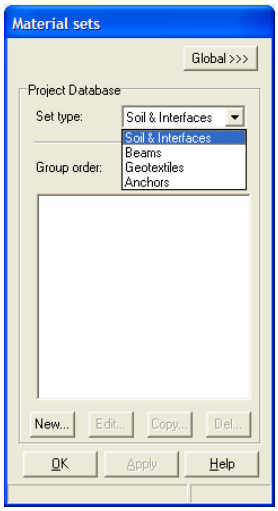
Malzeme özellikleri atanmadan önce, sınır şartlarını belirlemek amacıyla "Standard fixities" komutu kullanılır. Programda bu düğmeye basıldığında otomatik olarak düşey yönde harekete izin verirken yatay yöndeki hareket sınırlandırılır. Ancak, gerekli hallerde bu sınır şartlarına müdahale edilerek gerekli düzenlemeler yapılabilir.

Sınır şartları belirledikten sonra projede verilen zemin ve yapısal elemanların malzeme özellikleri girilir ve Şekil 6.3'te görüldüğü gibi malzeme özellikleri dört ana kategoriye ayrılmıştır.

Çubuk elemanlar (kazık) için "Beam element", Normal rijitlik (EA), Eğilme rijitliği (EI), duvar kalınlığı(d), eleman ağırlığı (w) ve poisson oranı (υ) ; ankraj elemanlarını tanımlamakta kullanılan "node to node anchor" komutu için Normal rijitlik (EA), destek aralığı (L_s) ve maksimum kuvvet (F_{max}) değerleri; ankraj kökünü tanımlamak için kullanılan "Geotextile" komutu için ise Normal rijitlik (EA) değerleri program girdileri kısmında verilmelidir.

Programda zemin özelliklerini belirlemek için Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil Model (HS), Soft Soil Creep Model (SSC) ve Lineer Elastic Model olmak üzere dört farklı zemin modeli kullanılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında Mohr-Coulomb modelinden ve Hardening Soil modelden yararlanılmıştır.

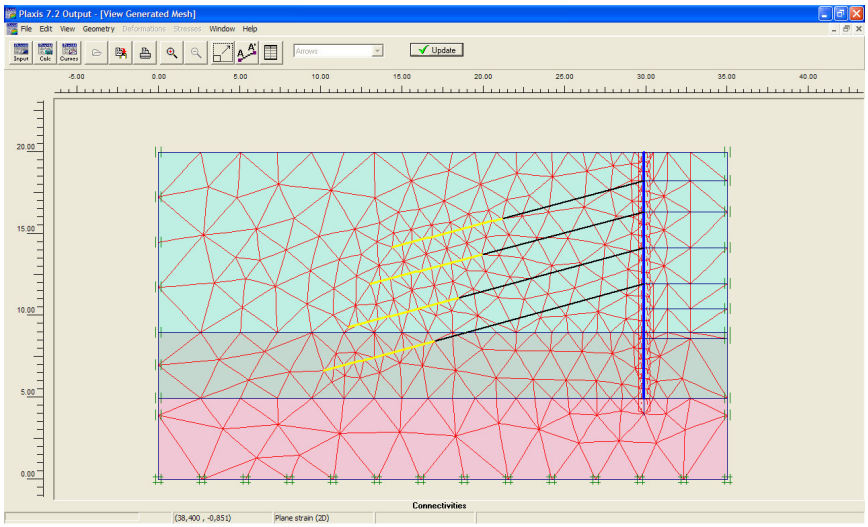
Bu modelde Young Modülü (E), poisson oranı (υ), içsel sürtünme açısı (ø), genleşme açısı (ψ), zeminin kuru ve doğal birim hacim ağırlıkları (γ_k , γ_n), yatay ve düşey permeabilite katsayıları (k_v , k_h) ve zeminin herhangi bir yapısal elemanla temasta olması durumunda ara yüzey elemanlar tanımlanmaktadır. Tüm malzeme parametreleri tanımlandıktan sonra her bir malzeme ilgili ortama atanarak sonlu elemanlar ağının oluşturulması safhasına geçilir.



Şekil 6.3 : Malzeme değerlerinin girildiği pencere

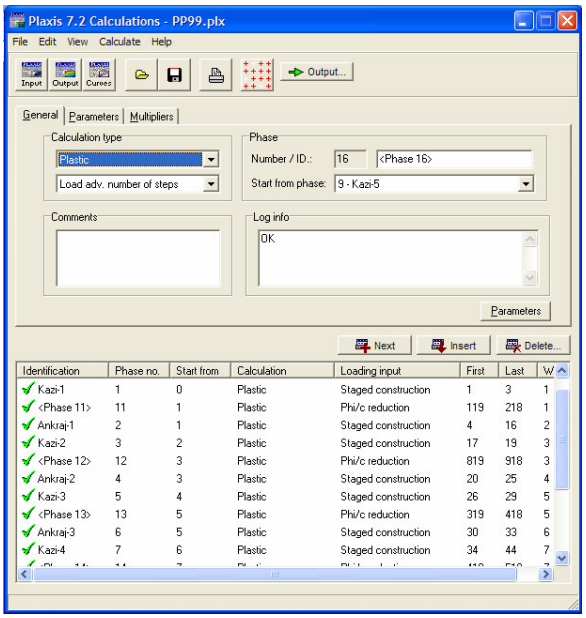
Zemin ve malzeme değerleri girildikten sonra "mesh" komutu ile Şekil 6.4'teki gibi sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Programın normal işleyişinde sonlu elemanlar ağı çok ince olarak oluşturulmamaktadır. Ancak istenildiği takdirde tüm zemin alanı ya da sadece incelenmek istenen bölge için kısmi çok ince sonlu elemanlar ağı oluşturulabilir.

Sonlu elemanlar ağı oluşturulduktan sonra başlangıç koşullarını belirlemek için "Initial conditions" safhasına geçilir. Bu bölümde varsa yeraltı suyu seviyesi çizilir ve boşluk suyu basıncı hesaplanır. Daha sonra zemin, üzerinde herhangi bir yapısal eleman olmayan ilk haline getirilir ve gerilmeler belirlenir.



Şekil 6.4 : Oluşturulmuş sonlu elemanlar ağı

Bu adımdan sonra Şekil 6.5'de gösterilen "Calculation" safhasına geçilerek hesaplamalara başlanır. Bu aşamada kademeli inşaat durumunda "Staged construction", tekil ya da yayılı yük tanımlaması durumunda ise "Total multipliers" komutuyla işlem yapılır. Tüm inşa aşamaları tanımlanıp ortam son haline geldiğinde "Calculate" komutuyla zemin ve yapısal elemanların bu şartlar altındaki davranışı görülür. Hesaplama safhasından sonra modelde oluşan deformasyonlar ve kuvvetler "Output" bölümünden görülebilmektedir. İstenildiği takdirde "Curves" komutuyla istenilen grafikler çizilerek gerekli karşılaştırmalar yapılabilir.



Şekil 6.5 : Hesaplama penceresi ve safhalar

Programda ayrıca güvenlik faktörünün hesaplanması amacıyla geliştirilmiş "Phi-c reduction" seçeneği de vardır. Burada zemin parametreleri tanø ve c kademeli olarak azaltılarak yapının göçtüğü an belirlenmekte ve bu şekilde kazı çukurundaki her kazı safhası için göçmeye karşı güvenlik katsayısı belirlenebilmektedir. Analizin herhangibir safhasında zemin dayanımı parametrelerinin değerinin belirlenmesinde toplam çarpan $\sum$ Msf kullanılmaktadır.

$$\sum Msf = \frac{\tan\phi_i}{\tan\phi_r} = \frac{c_i}{c_r} \qquad \textbf{(6.1)}$$

Burada parametrelerdeki i indisi malzeme özellikleri tanımlanırken girilen değerleri, r indisi ise analizlerde kullanılan azaltılmış değerleri belirtmektedir. Analizlerde

başlangıçta toplam çarpan, ∑Msf = 1 alınarak tüm malzeme parametreleri azaltılmamış değerine getirilmektedir. Daha sonra ise tanø ve c parametreleri kademeli olarak azaltılarak yapının göçme durumuna ulaşması sağlanmaktadır ve bu göçme anındaki güvenlik sayısı ise toplam çarpan ∑Msf'in göçme anındaki değerine eşit olmaktadır. Bu çalışmada da kazı safhalarının göçmeye karşı güvenliğinin belirlenmesinde "Phi-c reduction" analizlerinden faydalanılmıştır.[1,2,4]

6.2. Plaxis Programı ile TM6 Terfi Merkezi Kazı Çukurunun Modellenmesi

Bu bölümde, Bölüm 5 de bahsettiğimiz TM6 Terfi merkezinin kazı çukurun inşası sırasında iksa sisteminin ve kazı tabanının göstereceği davranış biçimlerinin, Plaxis sonlu elemanlar programı yardımıyla incelenmesi ve çözümlenmesi gerçekleştirilmiştir.

Modellemede, Mohr Coulomb ve Hardening Soil malzeme modelleri kullanılmıştır. Mohr Coulomb malzeme modelinde zeminin rijitliği olarak her hesaplama safhası için başlangıçta girilen değer kullanılmaktadır. Fakat, Hardening Soil modelinde zeminin rijitliği çevresel etkilere göre, yani her kazı durumuna göre her safha için yeniden hesaplamaktadır. Bu örnekte kazı yapıldığı için her kazı safhasında Young modülünün, rijitliğin yeniden hesaplanması daha gerçekçi olacaktır.

Kazının çukurunu modellerken, kazı çukurunun ortasında bir düşey simetri ekseni olduğunu farz edersek iki taraf da her bakımdan birbirinin aynıdır. Bu yüzden kazının sadece bir yarısının modellemesi yapılmıştır.

Kazının yapılacağı zemin genel olarak orta sıkılıkta kumdur. Modellemede kullanılacak zemin parametreleri, kazı alanında yapılan sondajlarda elde edilen SPT değerlerine bakılarak belirlenmiştir. Buna göre, 11,0 m derinlikte tabaka çizgisi konarak, zemin Alt Zemin ve Üst Zemin olarak iki farklı zemin tabakasına ayrılmıştır. Her iki zemin tabakası için ortalama bir SPT değeri belirlenip, Kaynak 3'deki SPT değerleri için Young modülü, İçsel sürtünme katsayısı, Poisson oranı korelâsyonlarından gerekli parametreler elde edilmiştir. Her iki tabakanın da Tablo 6.1 de modellemede kullanılan zemin parametreleri görülebilir.

Yeraltı suyu seviyesi zemin yüzeyinin 1,0 m altındadır. Suyun birim hacim ağırlığı, γ_w =10,0 kN/m^3 alınmıştır.

Modelleme sırasında simetri ekseni ve diğer kenar yan hareketlere karşı sınırlandırılmıştır.

Bunun yanında, modellenen alanın simetri ekseni olan kenarı, taban ve zemin yüzeyi dışarıdan su gelmesine karşı sınırlandırılmıştır. Diğer kenarda ise yeraltı su seviyesi sabitlenmiştir. Böylece, kazı içerisine doğru yeraltı suyu akımı oluşması sağlanmıştır.

Tablo 6.1- 6.4 de modellemede kullanılan zemin ve yapı elemanlarının malzeme parametreleri görülmektedir.

Tablo 6.1: Modellemede Kullanılan Zemin Parametreleri

Parametreler	**Sembol**	**Üst Zemin**	**Alt Zemin**	**Birim**
Davranış Biçimi	-	drenajlı	drenajlı	-
Kuru Birim Hacim Ağırlığı	γ_{dry}	17	17	kN/m^3
Suya Doygun Birim Hacim Ağırlığı	γ_{wet}	20	20	kN/m^3
Permeabilite	k	4,32	4,32	m/gün
Young Modülü	E_{ref}	50000	35000	kN/m^2
Poisson Oranı	ν	0,3	0,3	-
Kohezyon	c	1,0	1,0	kN/m^2
İçsel Sürtünme Açısı	Φ	32	30	(°)
Genleşme Açısı	ψ	2	0	(°)

Tablo 6.2: Modellemede kullanılan kazığın malzeme parametreleri

Parametreler	Sembol	Değer	Birim
Davranış Biçimi	-	Elastik	-
Normal Rijitlik	EA	$1{,}157.10^7$	kN
Eğilme Rijitliği	EI	336000	kNm^2/m
Duvar Kalınlığı	d	0,65	m
Eleman ağırlığı	w	10	kN/m/m
Poisson oranı	υ	0,15	-

Tablo 6.3: Modellemede kullanılan ankrajların malzeme parametreleri

Parametreler	Sembol	Değer	Birim
Davranış Biçimi	-	Elastik	-
Normal Rijitlik	EA	2.10^5	kN
Destek aralığı	L_s	2,0	m
Maksimum kuvvet	F_{max}	1.10^{15}	kN

Tablo 6.4: Modellemede kullanılan ankraj kök bölgelerinin malzeme parametreleri

Parametreler	Sembol	Değer	Birim
Normal Rijitlik	EA	2.10^5	kN/m

Plaxis programıyla gerçekleştirilen modelin analizi 10 safhadan meydana gelmektedir. Analizde gerçekleştirilen safhalar aşağıda verilmiştir:

1. **Kazı-1:** Kazığın oluşturulması ve -0,20 m kotuna kadar kazı yapılması.

2. **Ankraj-1:** Kazı-1 tabanı hizasında ankraj yapılması ve A_{em}= 270 kN'luk gerilmesi.

3. **Kazı-2:** -2,10 m kotuna kadar kazı yapılması.

4. **Ankraj-2:** Kazı-2 tabanı hizasında ankraj yapılması ve A_{em}= 270 kN'luk gerilmesi.

5. **Kazı-3:** -4,30 m kotuna kadar kazı yapılması.

6. **Ankraj-3:** Kazı-3 tabanı hizasında ankraj yapılması ve A_{em}= 270 kN'luk gerilmesi.

7. **Kazı-4:** -6,50 m kotuna kadar kazı yapılması.

8. **Ankraj-4:** Kazı-4 tabanı hizasında ankraj yapılması ve A_{em}= 270 kN'luk gerilmesi.

9. **Kazı-5:** Kaynamanın gözlemlendiği -8,00 m kotuna kadar kazı yapılması.

10. **Kazı-6:** Planlanan nihai kazı tabanı kotu olan -9,86 m kotuna kadar kazı yapılması.

6.3. Plaxis Programı ile Yapılan Modellemenin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

6.3.1. Güvenlik Sayıları

İlk olarak kazı çukurunun yapılmasında karşılaşılan kaynama problemini ele alacak olursak, bu durumu incelemek için daha önce Bölüm 4 de bahsettiğimiz; Harza ve Terzaghi'nin kaynama tahkiklerini Plaxis programıyla elde edilen verilerle yapmalıyız.

Harza'nın metodunda Güvenlik Sayısı;

$$i_{cr} = \frac{\gamma_a}{\gamma_w} = \frac{10,00}{10,00} = 1,0 \qquad \textbf{(6.2)}$$

$$GS = \frac{i_{cr}}{i_{maks.(çıkış)}} = \frac{1,0}{i_{maks.(çıkış)}} \qquad \textbf{(6.3)}$$

şeklinde her kazı safhası için $i_{maks.(çıkış)}$ belirlenerek hesaplanır.

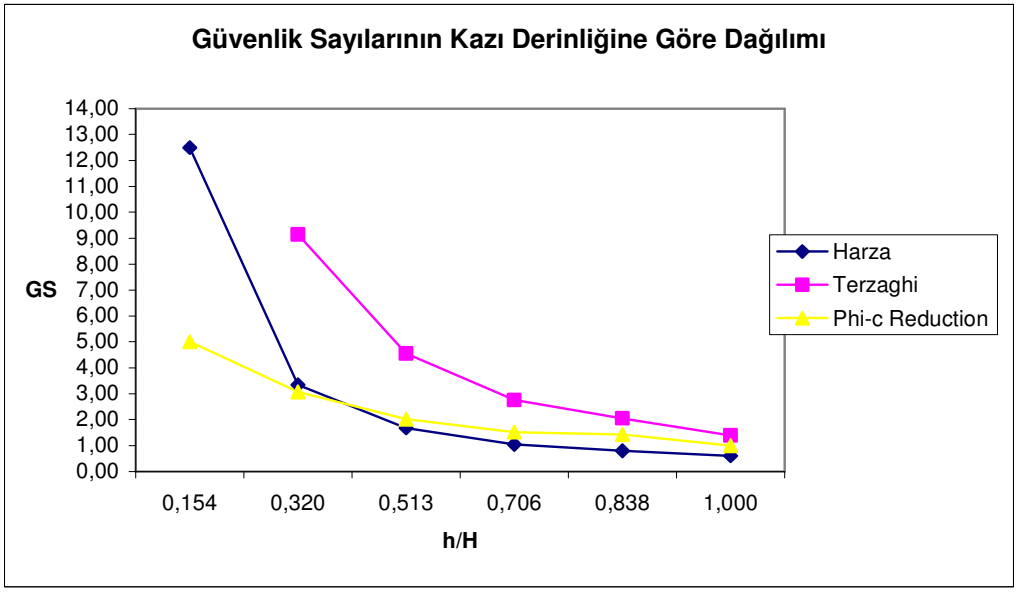
Terzaghi'nin metodunda Güvenlik Sayısı;

$$GS = \frac{W_a}{U} = \frac{\frac{1}{2}\gamma_a D^2}{\frac{1}{2}\gamma_w D h_a} = \frac{D\gamma_a}{h_a\gamma_w} \qquad \textbf{(6.4)}$$

$$GS = \frac{D\gamma_a}{h_a\gamma_w} = \frac{D10,0}{h_a 10,0} = \frac{D}{h_a} \qquad \textbf{(6.5)}$$

şeklinde her kazı safhası için D, Kazığın penetrasyon derinliği ve h_a, ilave hidrolik yük belirlenerek hesaplanır.

Bunların yanında her kazı safhasından sonra Plaxis programının göçmeye ne kadar yaklaştığını göseteren kendi güvenlik sayısını belirleyen "phi-c reduction" hesap safhası yapılarak, her kazı safhasının Güvenlik sayısı hesaplanır. Her kazı safhası için elde edilen, Harza metodu, Terzaghi metodu ve Phi-c reduction güvenlik sayıları Şekil 6.6 daki grafikte gösterilmiştir.



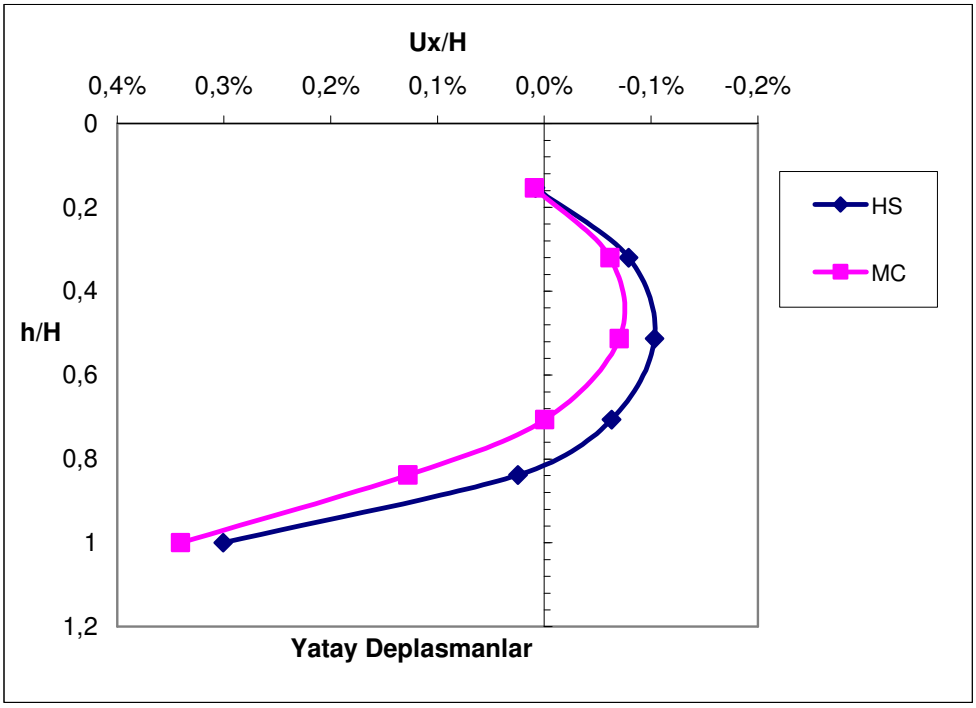
Şekil 6.6 : Güvenlik Sayılarının Kazı Derinliğine Göre Dağılımı

Şekil 6.6 daki grafikte Harza metoduyla elde edilen GS son iki kazı safhasında 1,0'in altına geçmiştir. Terzaghi metoduyla ise GS son safhada 1,3 civarına gelmiştir. Phi-c reduction 'da Hardening Soil modele göre son safhada 1,0 değerini almaktadır.

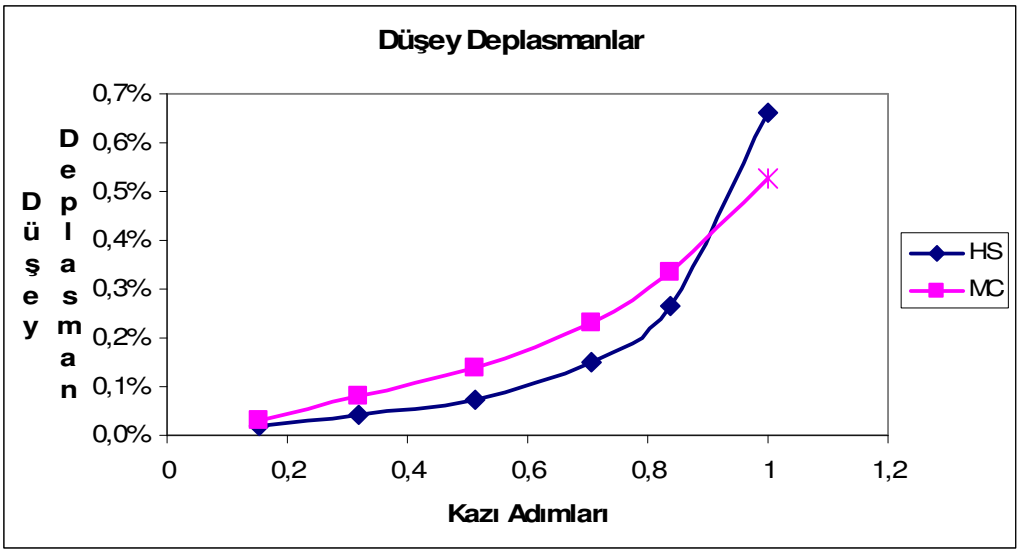
6.3.2. Yatay ve Düşey Deplasmanlar

Kazı safhalarında, kazıda gerçekleşen en büyük yatay deplasmanları görmek için kazık üst kotu civarında zemindeki bir nokta ele alındı ve her kazı safhasında bu noktada gerçekleşen HS ve MC modellere göre yatay deplasmanlar Şekil 6.7 de gösterilmiştir. 2., 3. ve 4. kazı safhalarında ters yönde deplasmanların olmasına ankrajlar neden olmaktadır. Kazı sonunda yatayda yaklaşık 40 mm'lik bir deplasman olmuştur.

Kazının her safhasında kazı çukuru tabanında meydana gelen kabarmalar Şekil 6.8 de gösterilmiştir. Kazı sonunda tabanda yaklaşık 60 mm'lik bir kabarma meydana gelmiştir.



Şekil 6.7 : Yatay Deplasmanlar

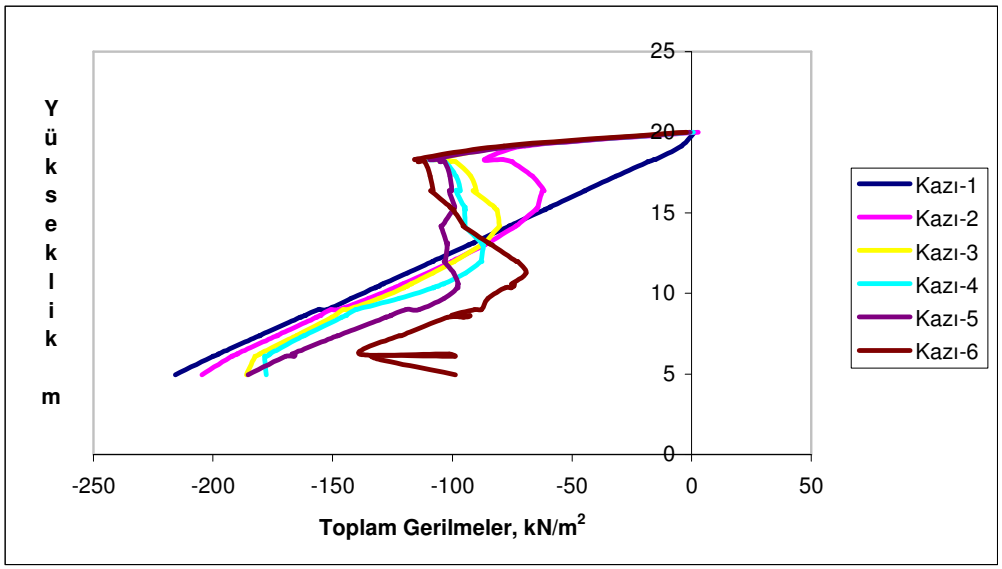


Şekil 6.8 : Düşey deplasmanlar

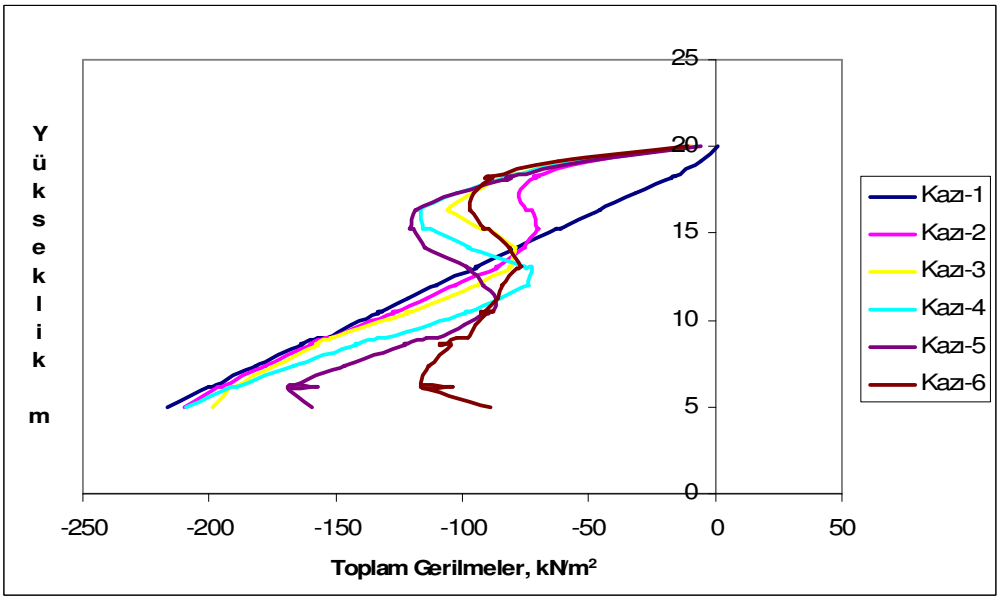
6.3.3. İksa Duvarına Etkiyen Yanal Gerilmeler

İksa duvarı yanında oluşan toplam gerilmelerin kazı derinliğe göre değişimi MC modele göre Şekil 6.9 da, HS modele göre Şekil 6.10 da gösterilmektedir. Derinlik artışıyla duvarın üst kısımlarında gerilmeler artmaktadır.

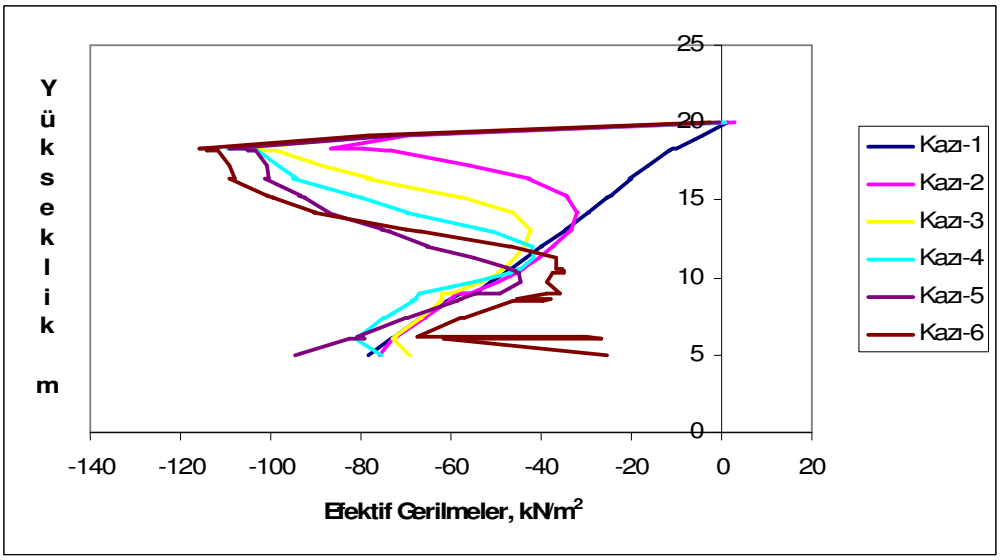
Bunun yanında, iksa duvarı yanında oluşan efektif gerilmelerin kazı derinliğine göre değişimi de MC modele göre Şekil 6.11 da, HS modele göre de Şekil 6.12 da gösterilmektedir. Burada da derinlik artışıyla duvarın üst kısımlarında efektif gerilmeler artmakta olduğu görülmektedir..



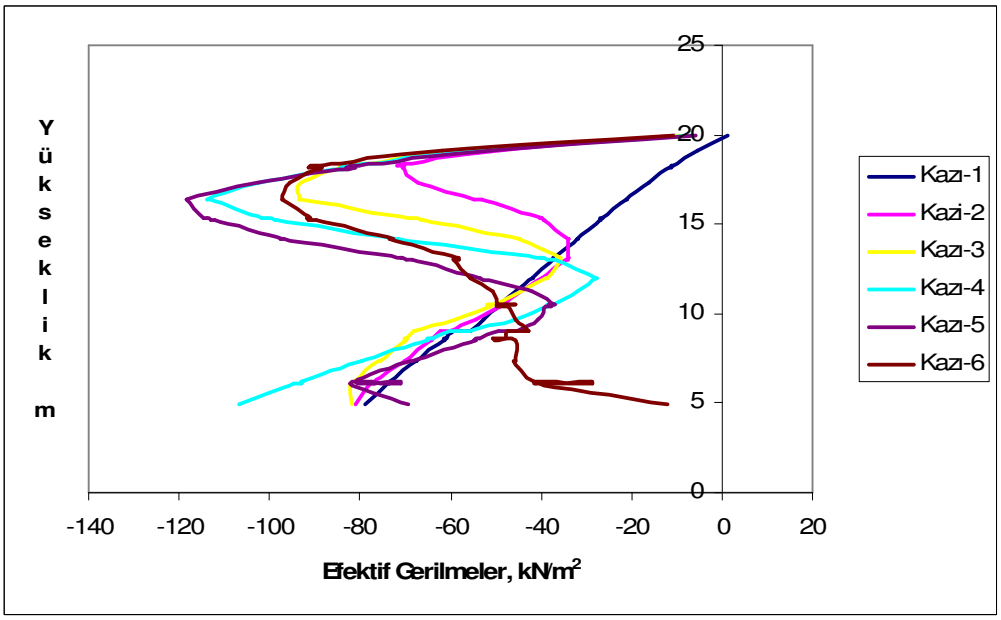
Şekil 6.9 : MC Modelde kazı derinliğiyle iksa duvarı kenarında değişen toplam gerilmeler



Şekil 6.10 : HS Modelde kazı derinliğiyle iksa duvarı kenarında değişen toplam gerilmeler

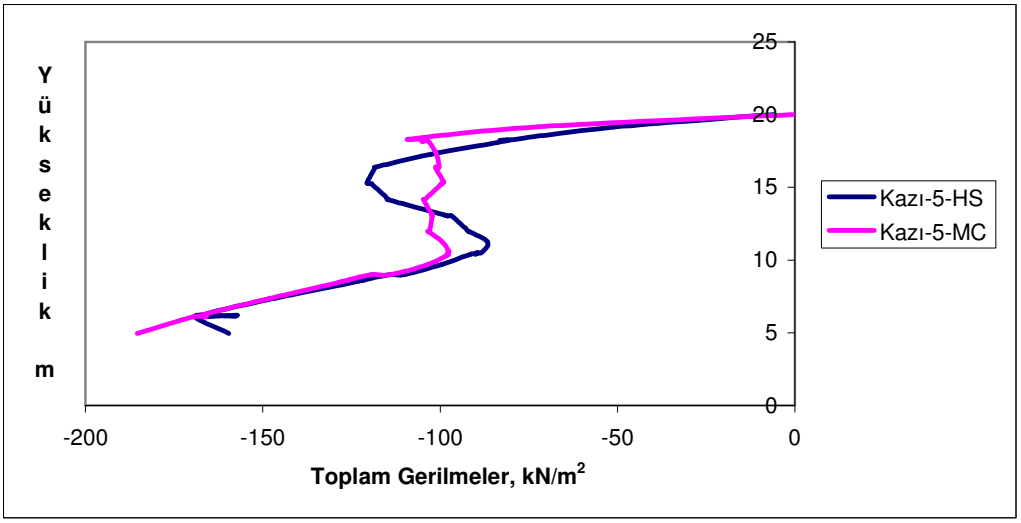


Şekil 6.11 : MC modelde kazı derinliğiyle iksa duvarı kenarında değişen efektif gerilmeler

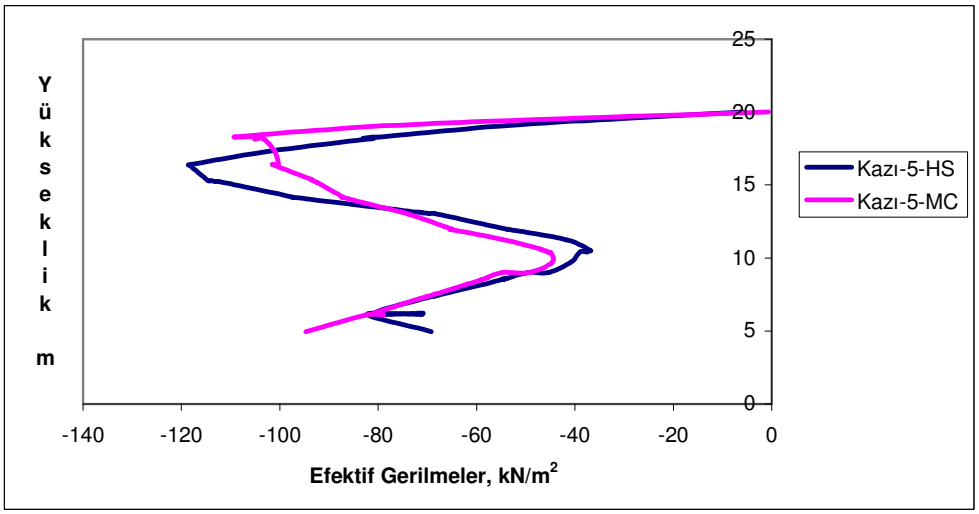


Şekil 6.12 : HS modelde kazı derinliğiyle iksa duvarı kenarında değişen efektif gerilmeler

HS ve MC modelleri kıyaslamak gerekirse, örnek olarak Kazı-5 safhasını ele aldığımızda bu safhadaki derinlikle değişen toplam ve efektif gerilmelerin değişimini sırasıyla Şekil 6.13 ve Şekil 6.14 de gösterilmiştir. Bu şekillerden de görülmektedir ki HS modeldeki gerilmeler daha büyük çıkmaktadır.



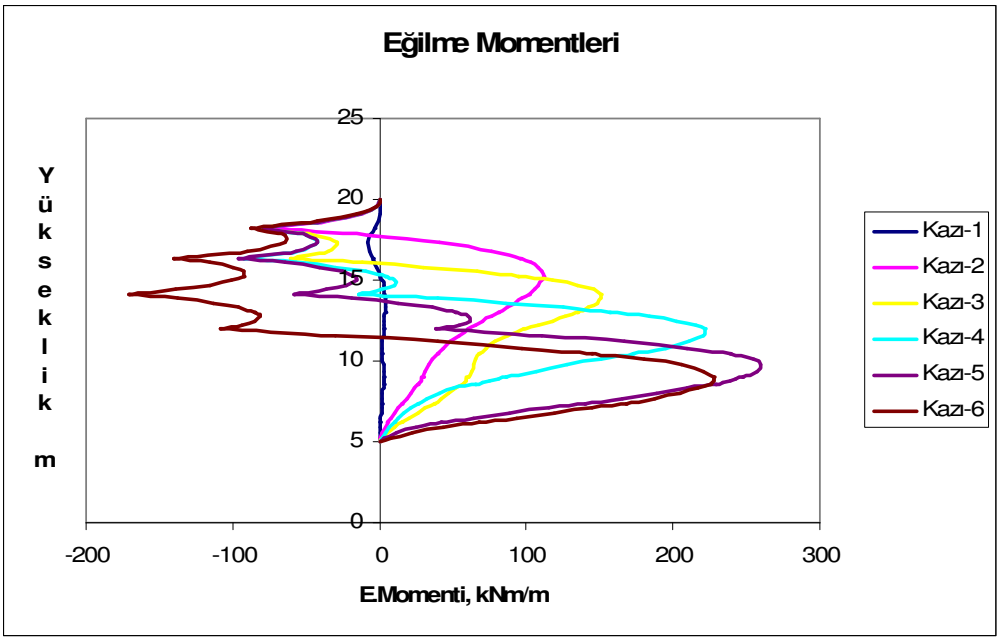
Şekil 6.13 : HS ve MC modellere göre Kazı-5 safhasındaki toplam gerilmeler



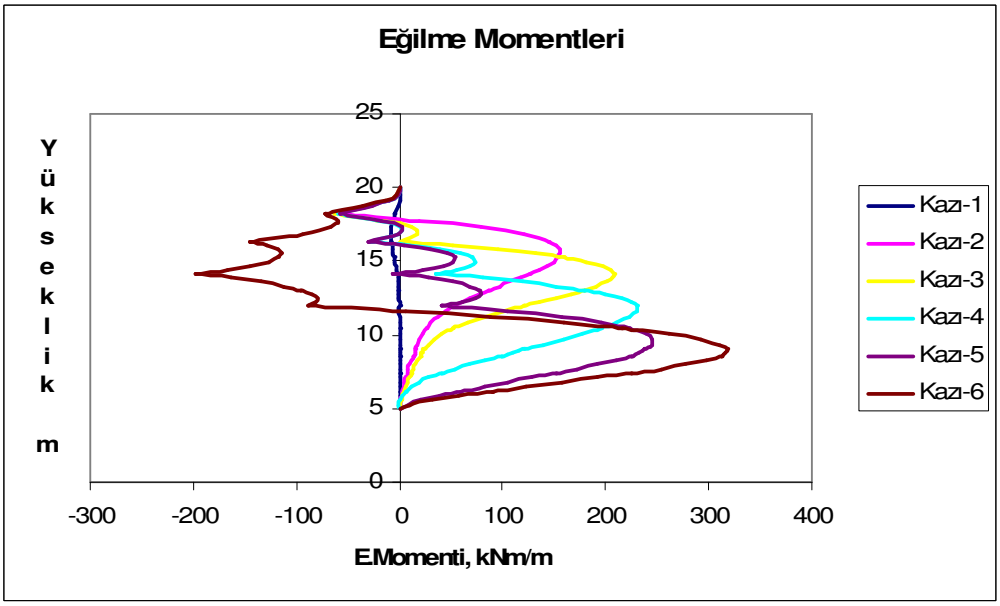
Şekil 6.14 : HS ve MC modellere göre Kazı-5 safhasındaki efektif gerilmeler

6.3.4. İksa Duvarında oluşan Moment, Kesme ve Normal Kuvvetler

İksa duvarı yani kazıklar üzerinde oluşan Eğilme momentlerinin kazı derinliğiyle değişimi MC ve HS modellere göre Şekil 6.15 ve Şekil 6.16 da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kazı derinliği arttıkça momentlerde artmaktadır.



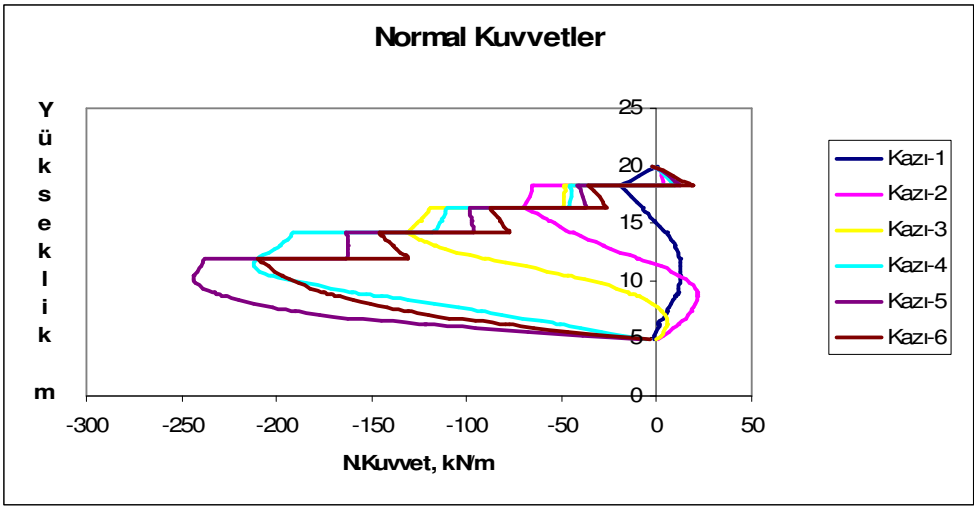
Şekil 6.15 : MC modele göre kazıkta oluşan eğilme momentlerinin kazı derinliğiyle değişimi



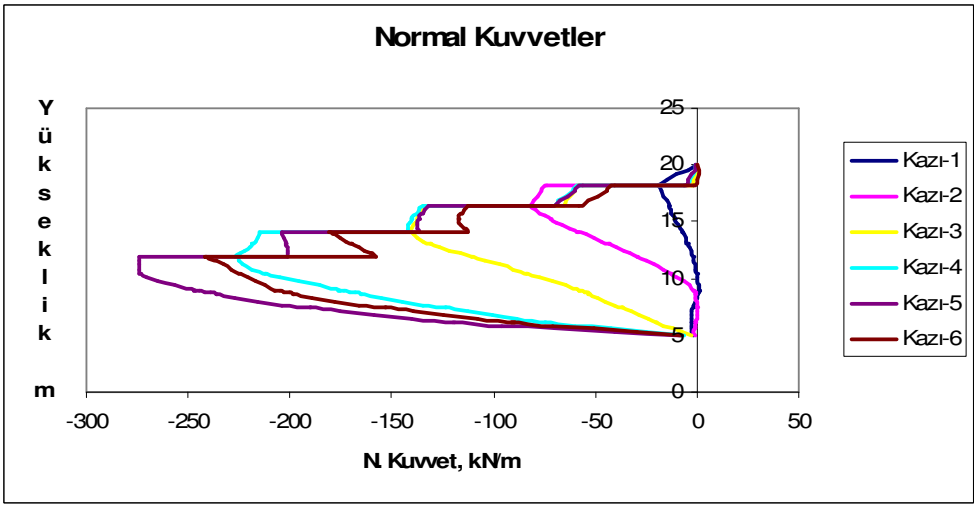
Şekil 6.16 : HS modele göre kazıkta oluşan eğilme momentlerinin kazı derinliğiyle değişimi

Bunların yanında, kazıklarda oluşan normal kuvvetlerin kazı derinliğiyle değişimi de MC ve HS modellere göre Şekil 6.17 ve Şekil 6.18 de, kazıklarda oluşan kesme kuvvetlerinin kazı derinliğiyle değişimi de MC modele göre Şekil 6.19 de ve HS modele göre Şekil 6.20 de gösterilmektedir. Bütün grafikler de kazı derinliği arttıkça

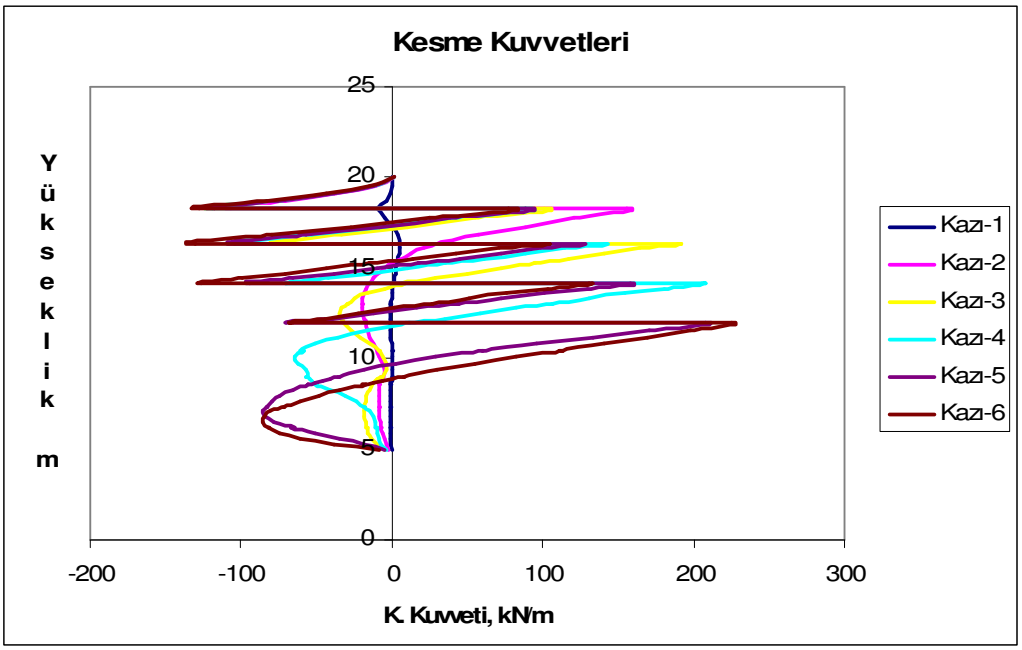
kuvvetlerin de arttığı görülmektedir. HS ve MC modelleri kıyasladığımızda HS modelde değerlerin daha büyük çıktığı görülmektedir.



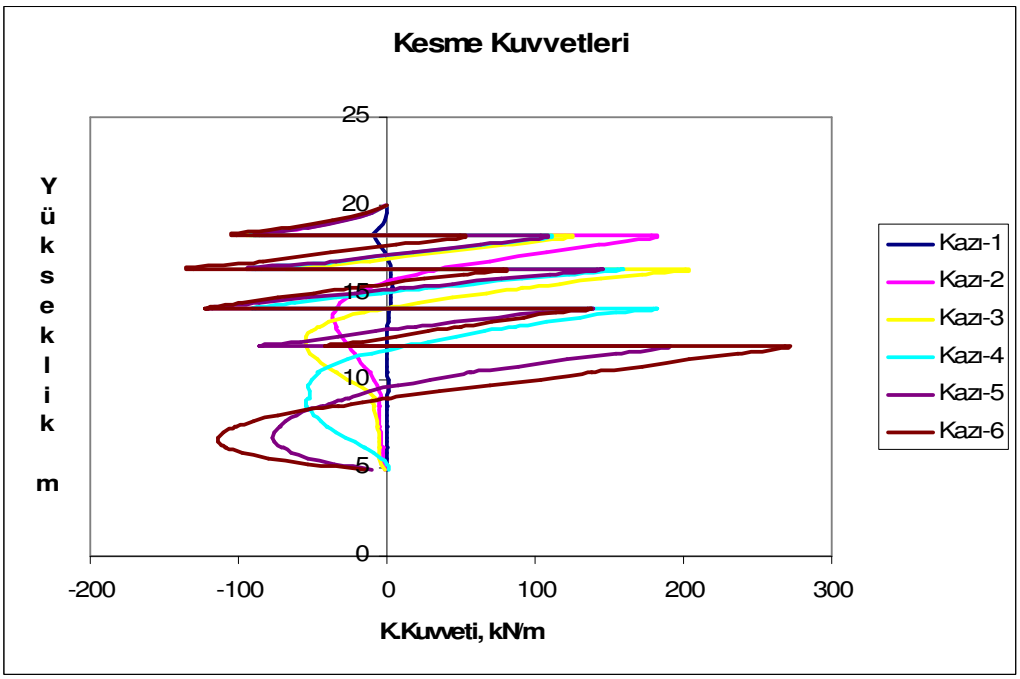
Şekil 6.17 : MC modele göre kazıkta oluşan normal kuvvetlerin kazı derinliğiyle değişimi



Şekil 6.18 : HS modele göre kazıkta oluşan normal kuvvetlerin kazı derinliğiyle değişimi



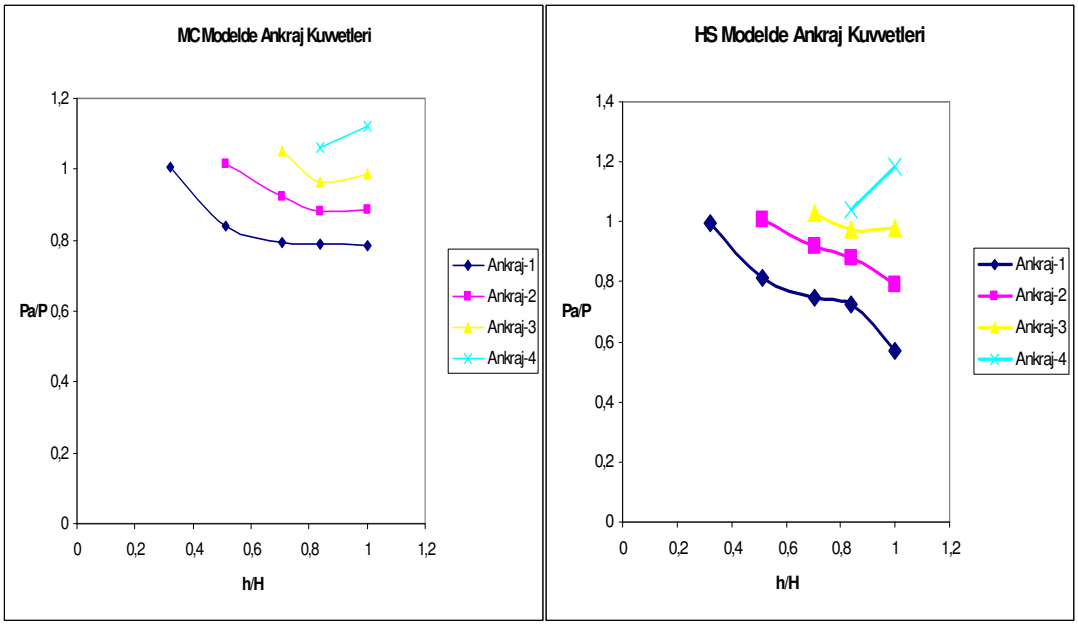
Şekil 6.19 : MC modele göre kazıkta oluşan kesme kuvvetlerinin kazı derinliğiyle değişimi



Şekil 6.20 : MC modele göre kazıkta oluşan kesme kuvvetlerinin kazı derinliğiyle değişimi

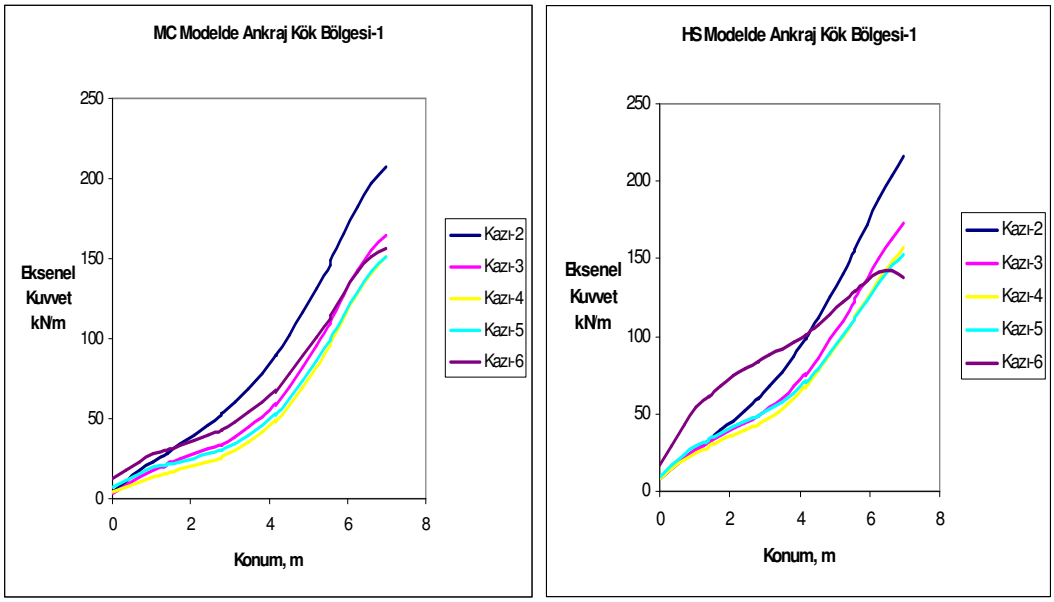
6.3.5. Ankraj Kuvvetleri

Her bir ankraj yerleştirildikten sonra bir metrelik genişlik için 270 kN ile gerilmişlerdir. Daha sonra kazı safhaları boyunca derinliğin artmasıyla birlikte diğer ankrajların devreye girmesiyle ankraj kuvvetleri azalmaktadır. Bu durum Şekil 6.21 de görülebilmektedir.

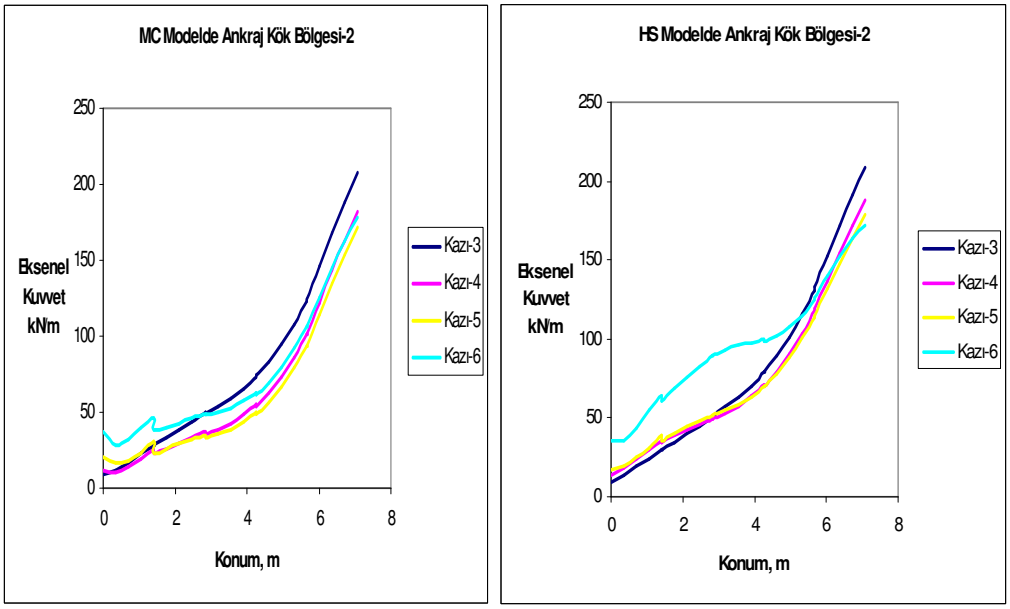


Şekil 6.21 : MC ve HS modellere göre ankraj kuvvetlerinin kazı safhalarındaki değişimi

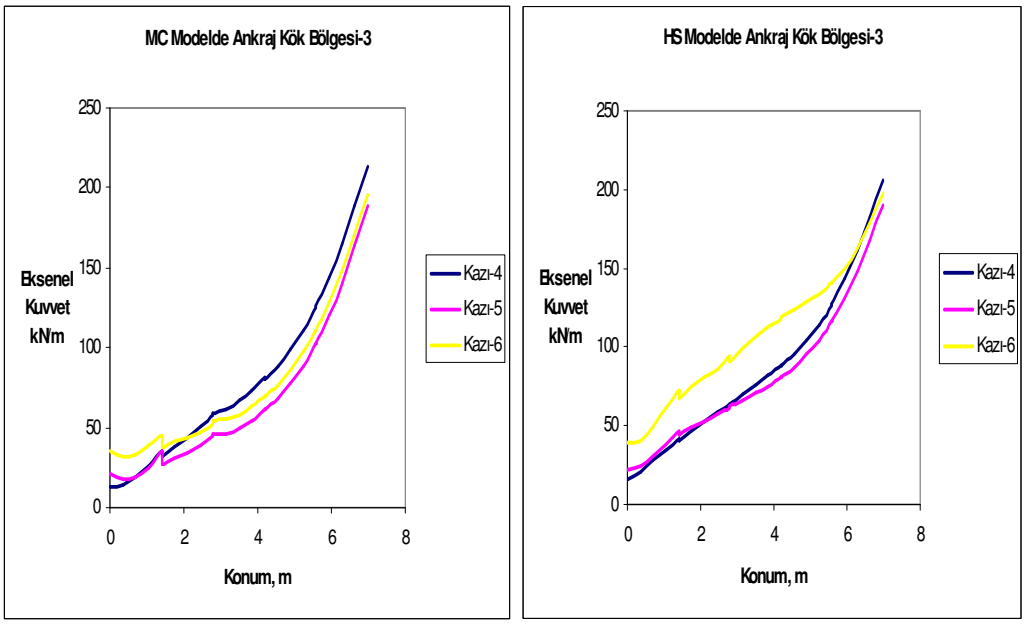
Her ankraj için, ankrajların kök bölgelerine etkiyen eksenel kuvvetlerin kazı safhalarına göre değişimi MC ve HS modele göre verilmiştir. Şekil 6.22 de Ankraj-1'e, Şekil 6.23 de Ankraj-2'ye, Şekil 6.24 de Ankraj-3'e, Şekil 6.25 de Ankraj-4'e etkiyen eksenel çekme kuvvetlerinin kazı safhalarına göre değişimi gösterilmiştir. Grafiklerden Kazı-5'e kadar kök bölgelerine etkiyen eksenel çekme kuvvetleri azaldığı görülmektedir. Fakat Kazı–6'da, göçme durumunda, eksenel çekme kuvvetlerinde bir artış görülmektedir.



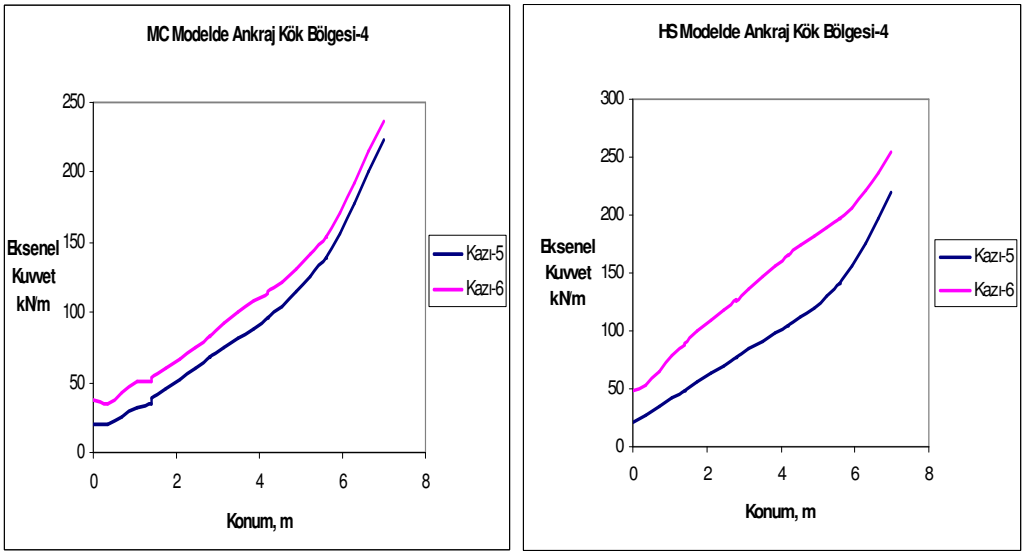
Şekil 6.22 : Ankraj-1'in kök bölgesine etkiyen eksenel kuvvetlerin kazı safhalarına göre değişimi



Şekil 6.23 : Ankraj-2'in kök bölgesine etkiyen eksenel kuvvetlerin kazı safhalarına göre değişimi



Şekil 6.24 : Ankraj-3'in kök bölgesine etkiyen eksenel kuvvetlerin kazı safhalarına göre değişimi



Şekil 6.25 : Ankraj-4'in kök bölgesine etkiyen eksenel kuvvetlerin kazı safhalarına göre değişimi

Plaxis programıyla elde edilen her kazı safhasındaki Hidrolik yükleri, Toplam Deplasmanları, Plastik noktaları ve "phi-c reduction" safhalarındaki yaklaşık kayma yüzeylerini gösteren şekiller sırasıyla Ek B, Ek C, Ek D ve Ek E de gösterilmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yeraltı suyu yer çekimi kuvveti etkisi altında zemin içinde hareket edebilme özelliğine sahiptir. Suyun, zemin içerisindeki bu hareketine genel olarak "yeraltı suyu akımı" denilmektedir. Yeraltı suyu, kaba daneli zemin, kum zemin içinde hareket ederken zemin danelerine sürtünerek onlara bir kuvvet uygulamaktadır. Bu kuvvete "sızma kuvveti" denilmektedir. İki nokta arasında yeraltı suyu akımı oluşabilmesi için bu iki nokta arasında hidrolik yük farkı olması gerekmektedir.

Sızma kuvvetleri, geoteknik yapıların stabilitesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bir kazıklı iksa duvarının stabilitesi, zemine gömülü olan kısmının derinliğine bağlıdır. Bu duvarın arka tarafındaki zemin, kazı çukuruna doğru duvara yanal bir basınç uygular. Bu yanal basınca, kazı çukuru içindeki zemin kütlesi tarafından karşı konulur. Duvarın arka tarafından çukur içine doğru sızma olduğu zaman, sızma gerilmeleri kazı çukuru içindeki zeminin efektif gerilmelerini azaltacak, duvarın arkasındaki zeminin efektif gerilmelerini arttıracak yönde etki gösterir. Bu sebeple duvarın gömülü bölümünün sağladığı yanal direnç çift yönlü olarak azalmış olur ve dayanma duvarının stabilitesi tehlikeye girer.

Bu çalışmada, Balıkesir, Küçükköy'deki bir kanalizasyon projesinin Terfi Merkezi inşası ele alınmıştır. Bu terfi merkezinin kazı çukurunun inşası sırasında, nihai kazı derinliğine yaklaşık 2 m. kala kazı çukurunun kazıklı iksa sisteminde deplasmanlar oluşmaya başladığı gözlemlenmiş ve kazı durdurulup kazı çukuru hemen suyla doldurularak deplasmanların artması engellenmiştir. Bu deplasmanların oluşmasına sebep olarak kazı tabanında "Kaynama" olduğu öngörülmüş, bu sebepten çukurun iksa sisteminin stabilitesinin bozulduğu düşünülmüştür.

Kazı tabanında kaynama olup olmadığını belirlemek için PLAXIS Sonlu Elemanlar programı kullanılarak kazı çukuru modellenmiştir. Bu modelleme sonucunda kazının nihai seviye geldiği sırada göçeceği görülmüştür. Kaynamanın olma durumunun tahkiki için Terzaghi ve Harza'nın geliştirdiği kaynama tahkikleri, Plaxis

programıyla yapılan modelleme sonucunda elde edilen veriler kullanılarak yapılmıştır. Bu tahkikler sonucunda, Güvenlik sayılarının 1,0'in altında olduğu, yani bu kazıda kaynamanın gerçekleştiği ortaya çıkmıştır.

Plaxis programıyla yapılan modelleme vasıtasıyla kazı nihai derinliğe inene kadar, her kazı safhasında kazı çukurunun iksa sistemini oluşturan fore kazıklar, ankraj ve ankraj kök bölgelerinde oluşan gerilmeler, kazı çukurunda oluşan deplasmanlar görülebilmiştir. Bu modellemede malzeme modeli olarak Mohr Coulomb ve Hardening Soil modelleri kullanılmıştır. Mohr Coulomb model, zeminin rijitliğini her durum için sabit almaktadır. Hardening Soil modelde ise çevresel etkileri dikkate alarak, her kazı safhası için zemin rijitliğini duruma göre değerlendirip belirlemektedir. Bundan dolayı, Hardening Soil modelde elde edilen gerilme değerleri daha gerçekçi olacaktır. Bu çalışmada da, Hardening Soil ile yapılan modellemede gerilme değerleri Mohr- Coulomb ile yapılanlara göre daha büyük çıkmıştır. Tasarımları bu değerlere göre yapmak daha uygun olacaktır.

Kazı tabanında kaynama olduğu belirlendiği için, bu durumu önleyecek önlemler almak gerekmektedir. Bunun için öncelikle, kaynama sırasında kazıklı perdenin arkasında zemin hareketleri meydana geldiği için mevcut kazıklı iksa perdesinin güçlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla kazıklı perdenin çukur içinden çelik borularla desteklenmesi uygun olacaktır. Bunun yanında, -13,50 m kotuna kadar olan kazıkların altından itibaren ortalama -22,0 m kotunda başlayan taban kayasına yaklaşık 50 cm kadar giren ve inşaat alanını çevreleyen jetgrout perde yapılarak, inşaat çukuruna tabandan yeraltı suyu girmesine mani olunabilir. Kaynama nedeniyle bazı kazıklarda küçük deplasmanlar gözlendiği ve iksa perdesinin geçirimsizliğinin sağlanması büyük önem arz ettiği için, varsa açıklıklar enjeksiyon, jetgrout veya benzer bir yöntemle kapatılmalıdır. Çukur içine doldurulan suyun indirilmesi kontrollü yapılmalı ve iksa perdesinin herhangi bir noktasından sızma tespit edildiği takdirde su çekilmesi durdurularak bu kısım sızdırmaz hale getirilmelidir.

KAYNAKLAR

[1] **Afatoğlu, H. A.,** 2004. Yumuşak Kil Zemine Oturan Kum Dolgunun Taşıma Gücü Güvenliğinin Geotekstiller ve Taş Kolonlarla Arttırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[2] **Balkaya, M.,** 2002. Zemine Gömülü Boruların Mühendislik Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[3] **Bowles, J. E.,** 1988. Foundation Analysis and Design, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company

[4] **Brinkgreve, R. B. J. and Vermeer, P.A.,** 1998. PLAXIs Version 7 Manual, Balkema, Rotterdam

[5] **Budhu, M.,** 2000. Soil Mechanics and Foundations, John Wiley &Sons, New York.

[6] **Cernica, J.N.,** 1995. Geotechnical Engineering: Soil Mechanics, John Wiley &Sons, Canada

[7] **Das, B. M.,** 1997. Advanced Soil Mechanics, Second Edition, Taylor&Francis, Washington.

[8] **Das, B. M.,** 1998. Principles of Geotechnical Engineering, Fourth Edition, PWS Publishing, Boston.

[9] **Das, B. M.,** 1999. Principles of Foundation Engineering, Fourth Edition, PWS Publishing, Boston.

[10] **Harr, M. E.,** 1962. Groundwater and Seepage, Mc Graw-Hill Book Company, U.S.A.

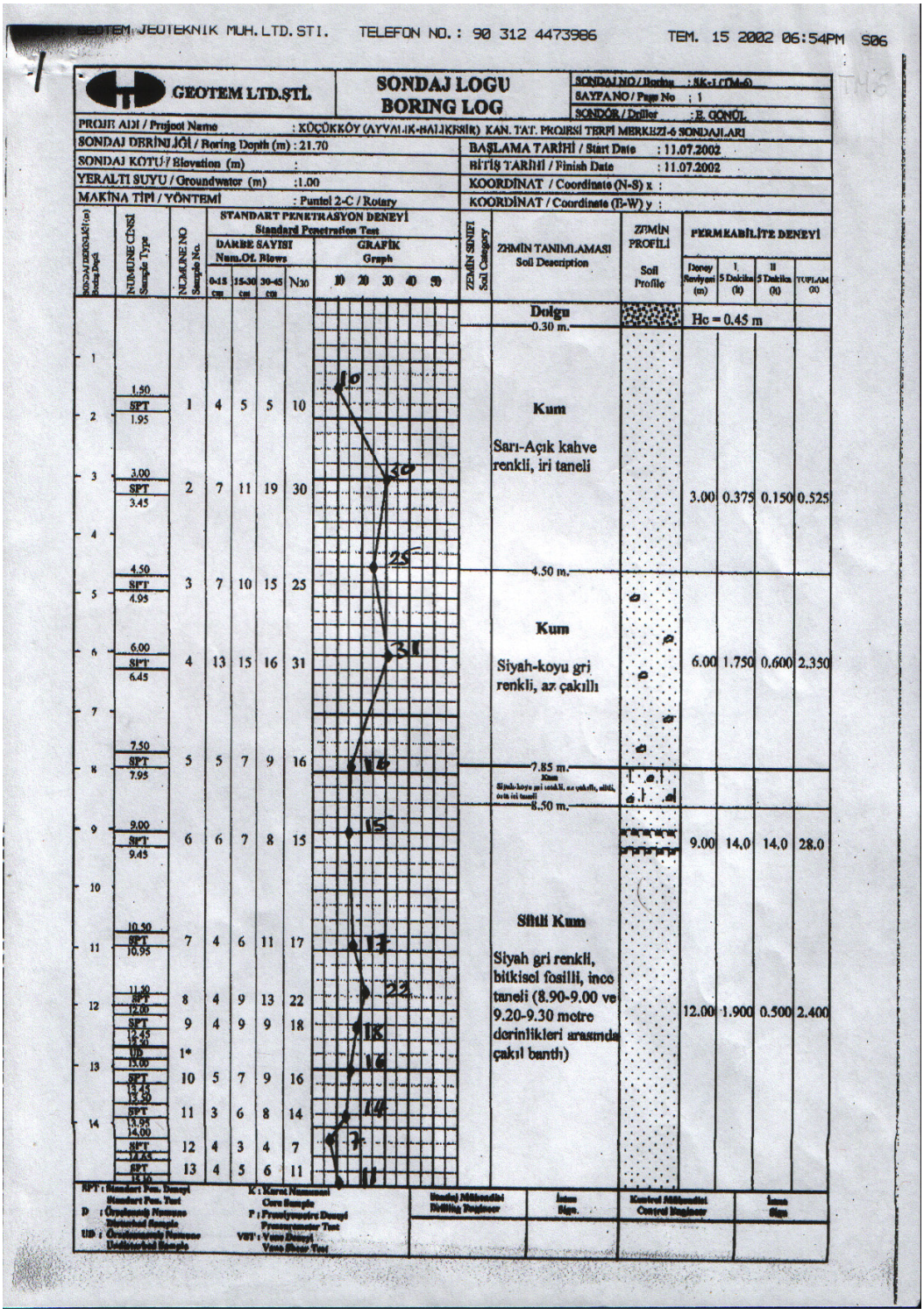
[11] **Önalp, A.,** 2002. Geoteknik Bilgisi I, Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği

[12] **Özaydın, K.,** 1989. Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul

[13] **Rowe, R. K.,** 2001. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts.

[14] **Terzaghi, K. and Peck, R. B.,** 1948. Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons.

EK A


GEOTEM JEOTEKNIK MUH. LTD. STI. TELEFON NO.: 90 312 4473986 TEM. 15 2002 06:54PM S06

GEOTEM LTD.ŞTİ.

SONDAJ LOGU
BORING LOG

SONDAJ NO / Boring : SK-1 (ÖM-6)
SAYFA NO / Page No : 1
SONDÖR / Driller : E. GÖNÜL

PROJE ADI / Project Name : KÜÇÜKKÖY (AYVALIK-BALIKESİR) KAN. TAT. PROJESİ TERFİ MERKEZİ-6 SONDAJLARI

SONDAJ DERİNLİĞİ / Boring Depth (m) : 21.70
SONDAJ KOTU / Elevation (m) :
YERALTI SUYU / Groundwater (m) : 1.00
MAKİNA TİPİ / YÖNTEMİ : Puntel 2-C / Rotary

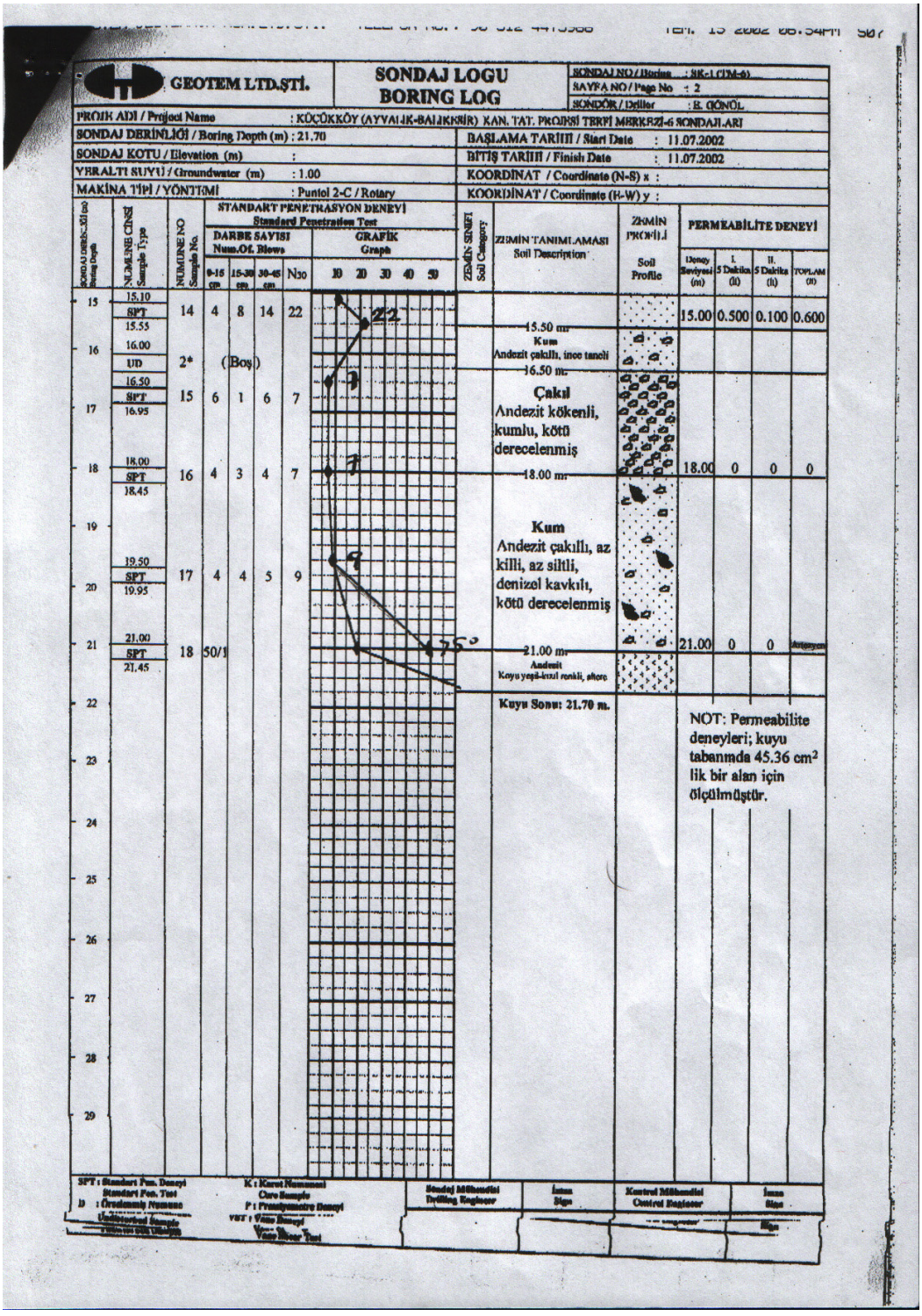
BAŞLAMA TARİHİ / Start Date : 11.07.2002
BİTİŞ TARİHİ / Finish Date : 11.07.2002
KOORDİNAT / Coordinate (N-S) x :
KOORDİNAT / Coordinate (E-W) y :

SONDAJ DERİNLİĞİ (m) Boring Depth	NUMUNE CİNSİ Sample Type	NUMUNE NO Sample No.	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standard Penetration Test — DARBE SAYISI Num.Of. Blows 0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	N30	GRAFİK Graph 10 20 30 40 50	ZEMİN SINIFI Soil Category	ZEMİN TANIMLAMASI Soil Description	ZEMİN PROFİLİ Soil Profile	PERMEABİLİTE DENEYİ — Deney Kotu (m)	I. 5 Dakika (lt)	II. 5 Dakika (lt)	TOPLAM (lt)
									Dolgu		Hc = 0.45 m			
									0.30 m.					
1														
1.50	SPT	1	4	5	5	10			Kum					
2	1.95								Sarı-Açık kahve renkli, iri taneli					
3.00	SPT	2	7	11	19	30					3.00	0.375	0.150	0.525
3	3.45													
4														
4.50	SPT	3	7	10	15	25								
5	4.95								4.50 m.					
6.00	SPT	4	13	15	16	31			Kum					
6	6.45								Siyah-koyu gri renkli, az çakıllı		6.00	1.750	0.600	2.350
7														
7.50	SPT	5	5	7	9	16								
8	7.95								7.85 m.					
									Kum Siyah-koyu gri renkli, az çakıllı, silttli, orta iri taneli 8.50 m.					
9.00	SPT	6	6	7	8	15					9.00	14.0	14.0	28.0
9	9.45													
10														
10.50	SPT	7	4	6	11	17			Siltli Kum					
11	10.95													
11.50	SPT	8	4	9	13	22			Siyah gri renkli, bitkisel fosilli, ince taneli (8.90-9.00 ve 9.20-9.30 metre derinlikleri arasında çakıl bantlı)					
12	12.00													
12.45	SPT	9	4	9	9	18					12.00	1.900	0.500	2.400
13.00	UD	1*												
13	13.00													
13.45	SPT	10	5	7	9	16								
13.95	SPT	11	3	6	8	14								
14	14.00													
14.45	SPT	12	4	3	4	7								
15.00	SPT	13	4	5	6	11								

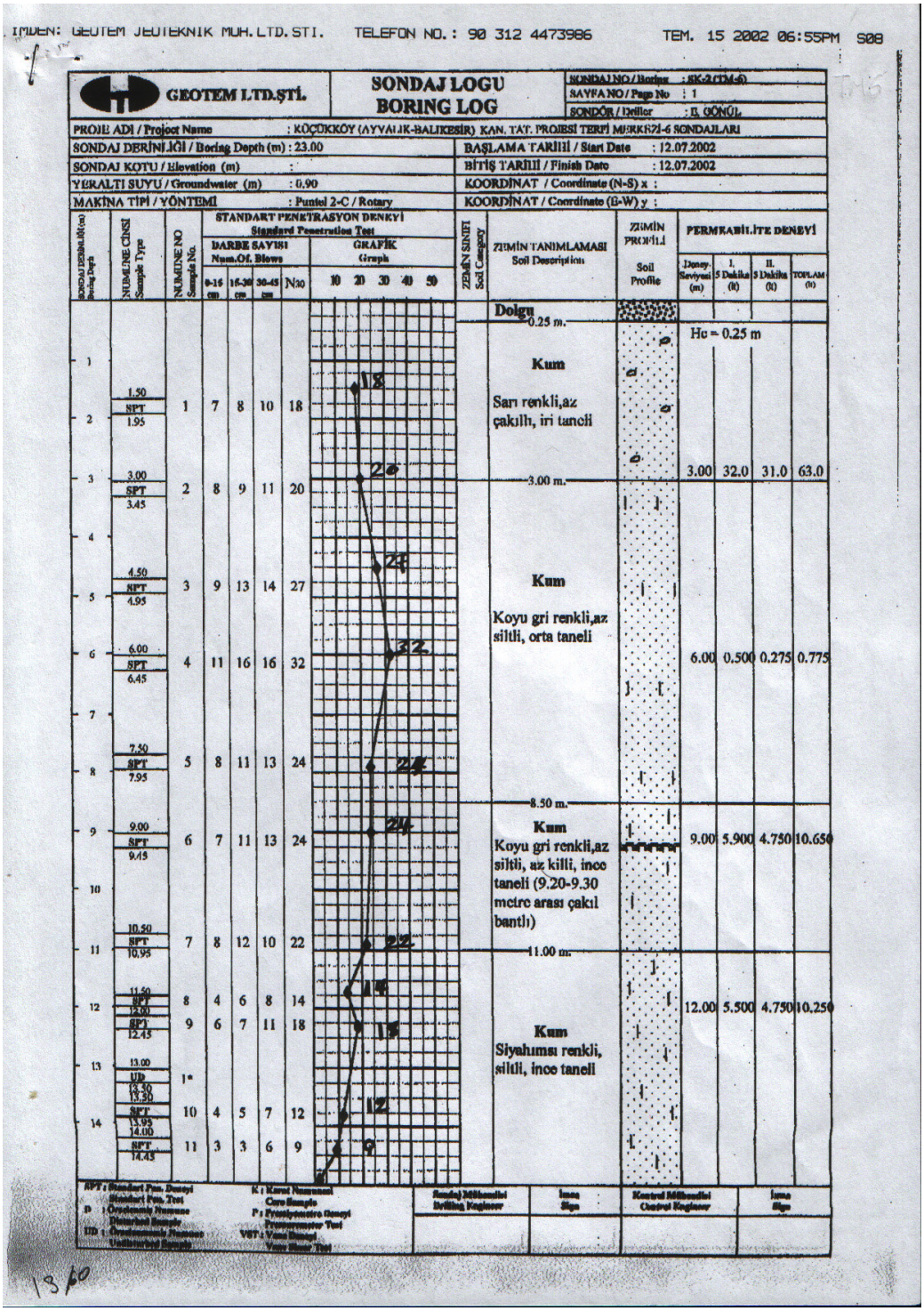
SPT : Standart Pen. Deneyi / Standart Pen. Test
D : Örselenmiş Numune / Disturbed Sample
UD : Örselenmemiş Numune / Undisturbed Sample
K : Karot Numunesi / Core Sample
P : Presiyometre Deneyi / Pressuremeter Test
VST : Vane Deneyi / Vane Shear Test

Sondaj Mühendisi / Drilling Engineer | İmza / Sign. | Kontrol Mühendisi / Control Engineer | İmza / Sign.

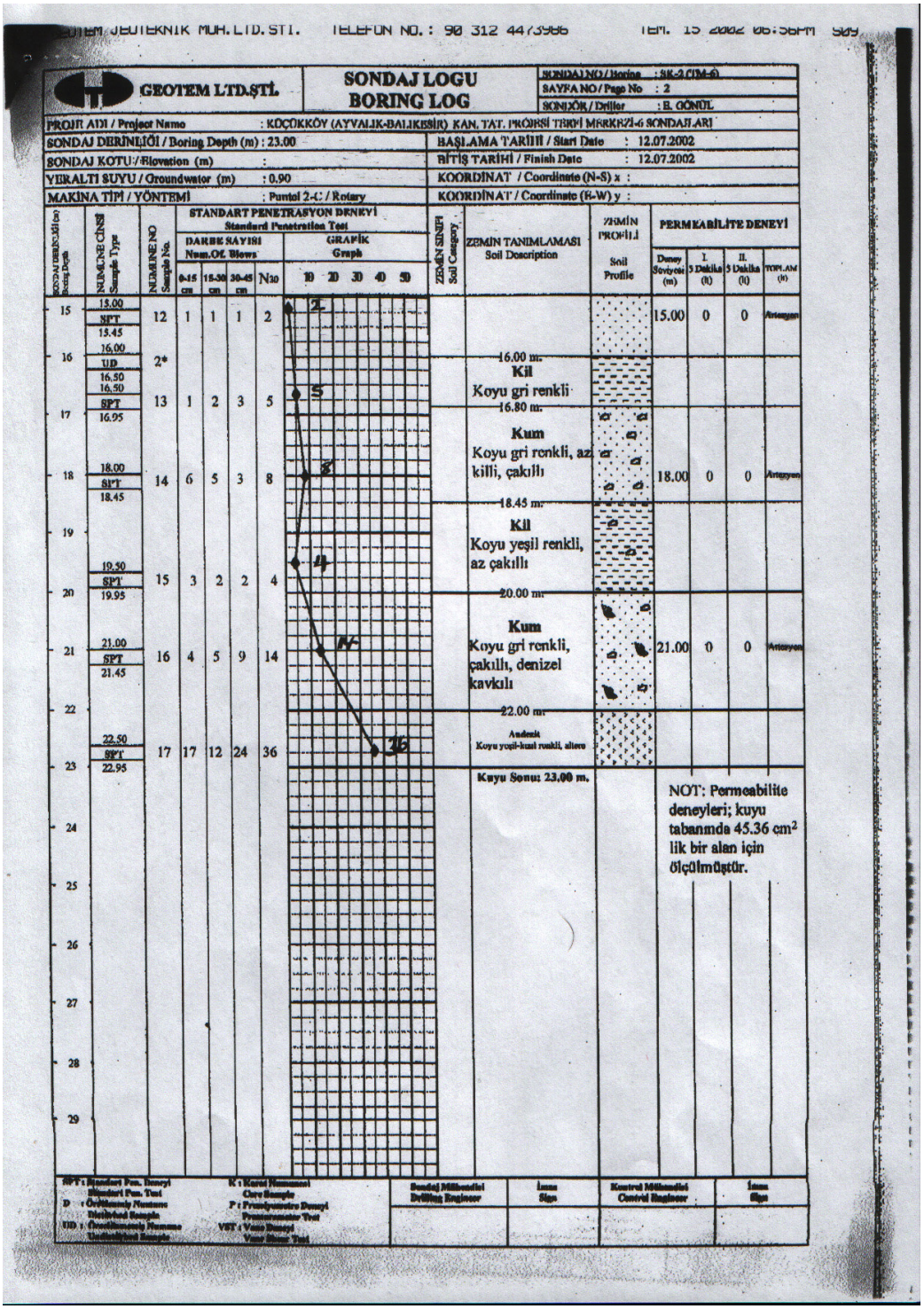
Şekil A.1 : Sondaj-1 logu- Sayfa 1



Şekil A.2 : Sondaj-1 logu- Sayfa 2

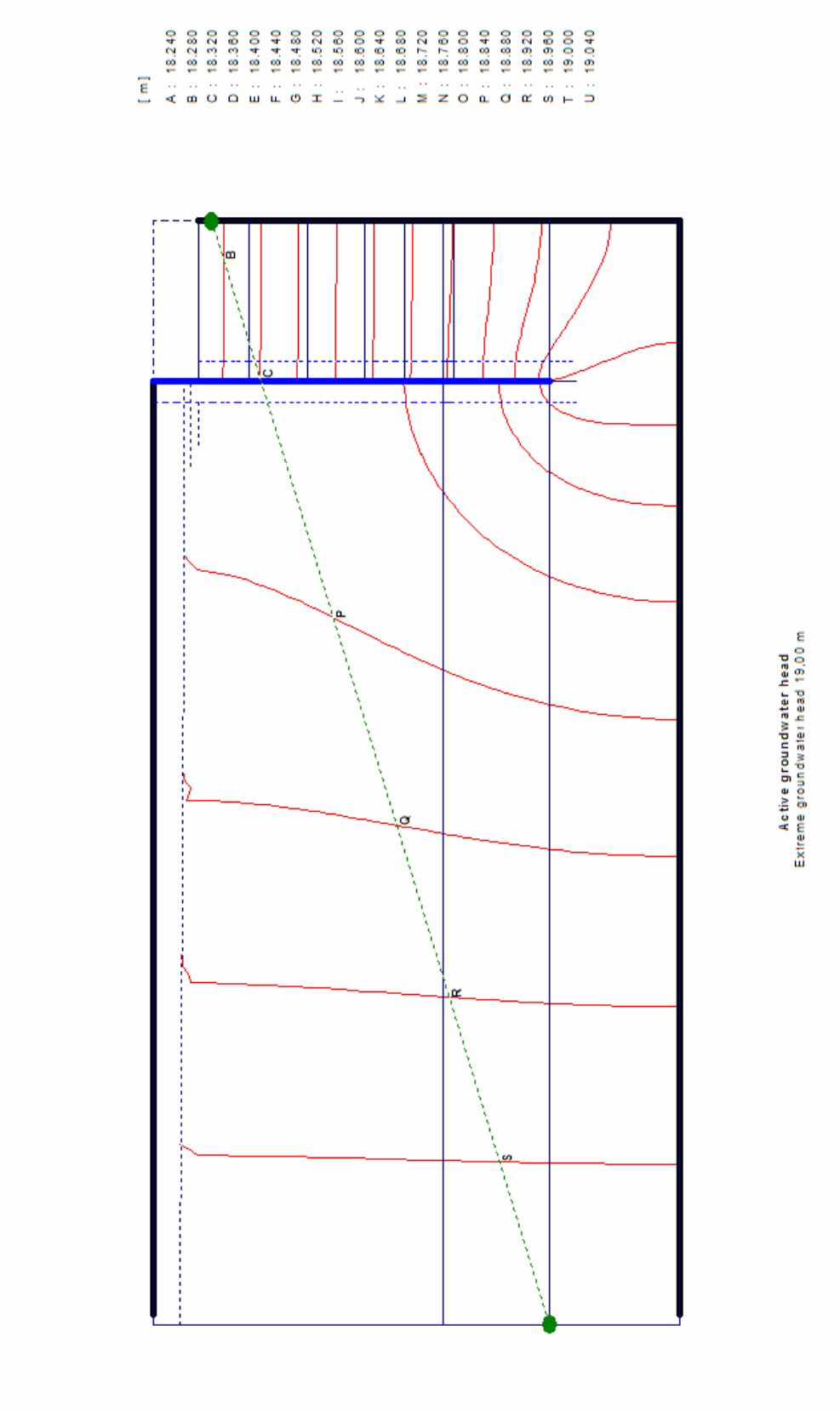


Şekil A.3 : Sondaj-2 logu- Sayfa 1

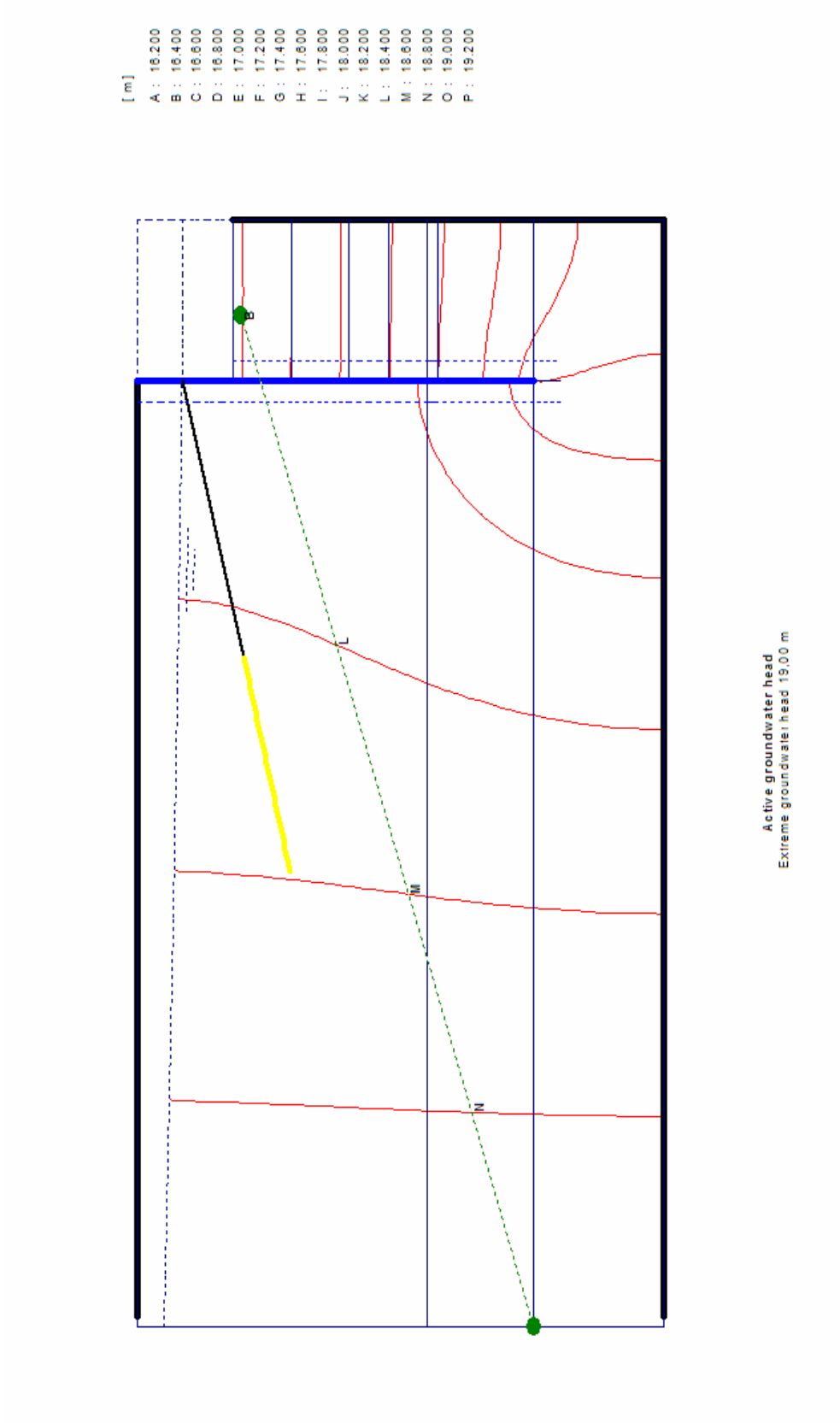


Şekil A.4 : Sondaj-2 logu- Sayfa 2

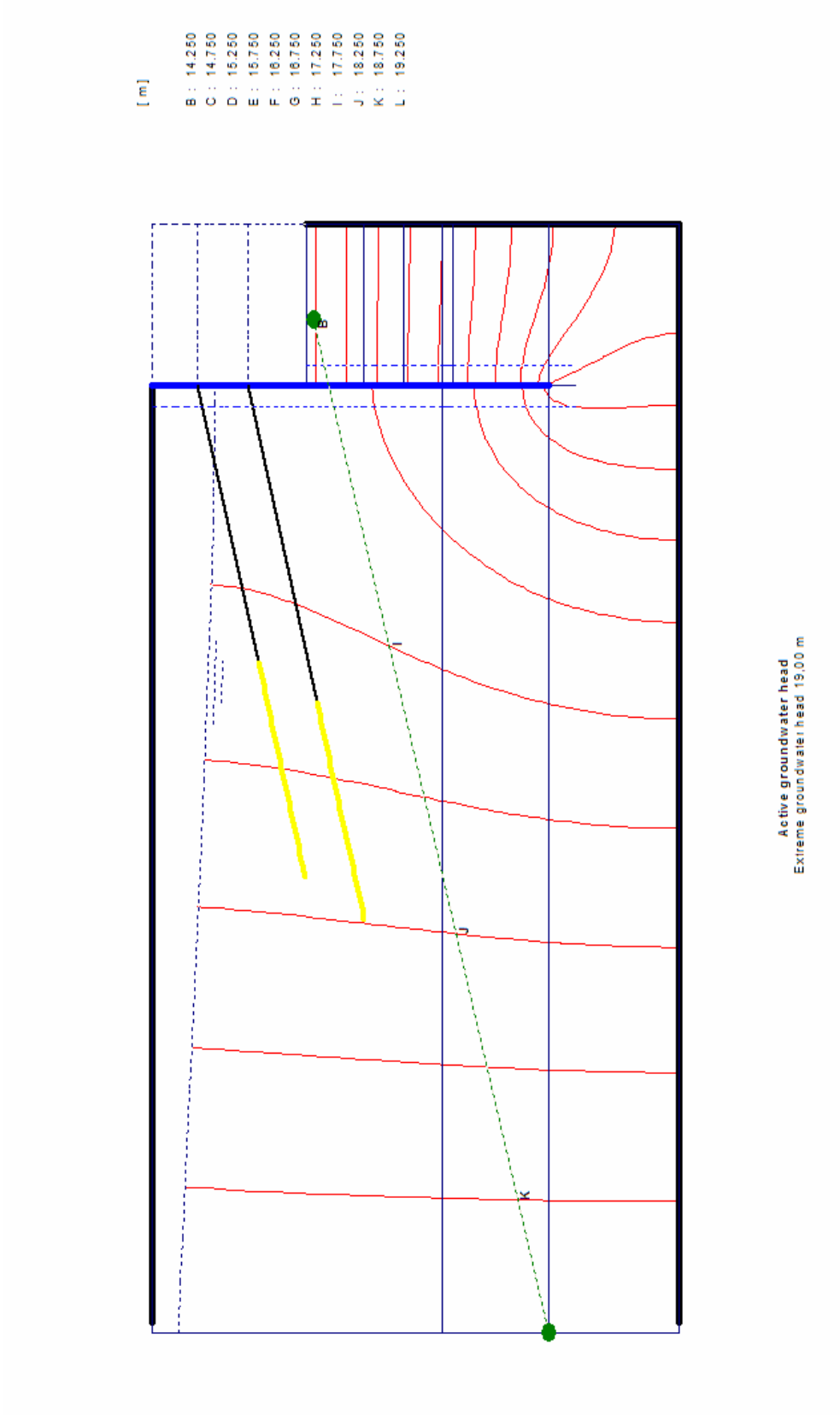
EK B



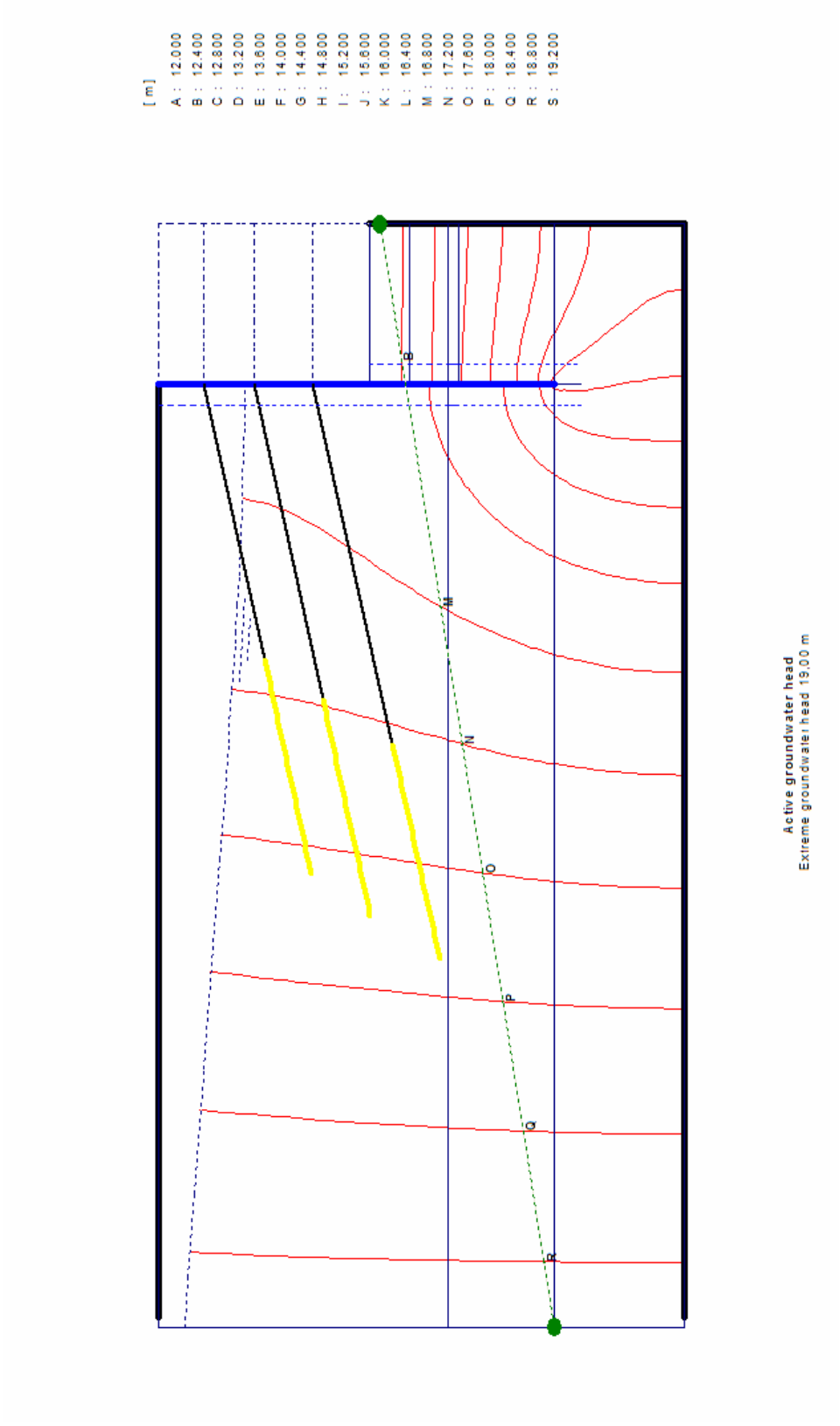
Şekil B.1 : Kazı-1 sonundaki eşpotansiyel çizgileri



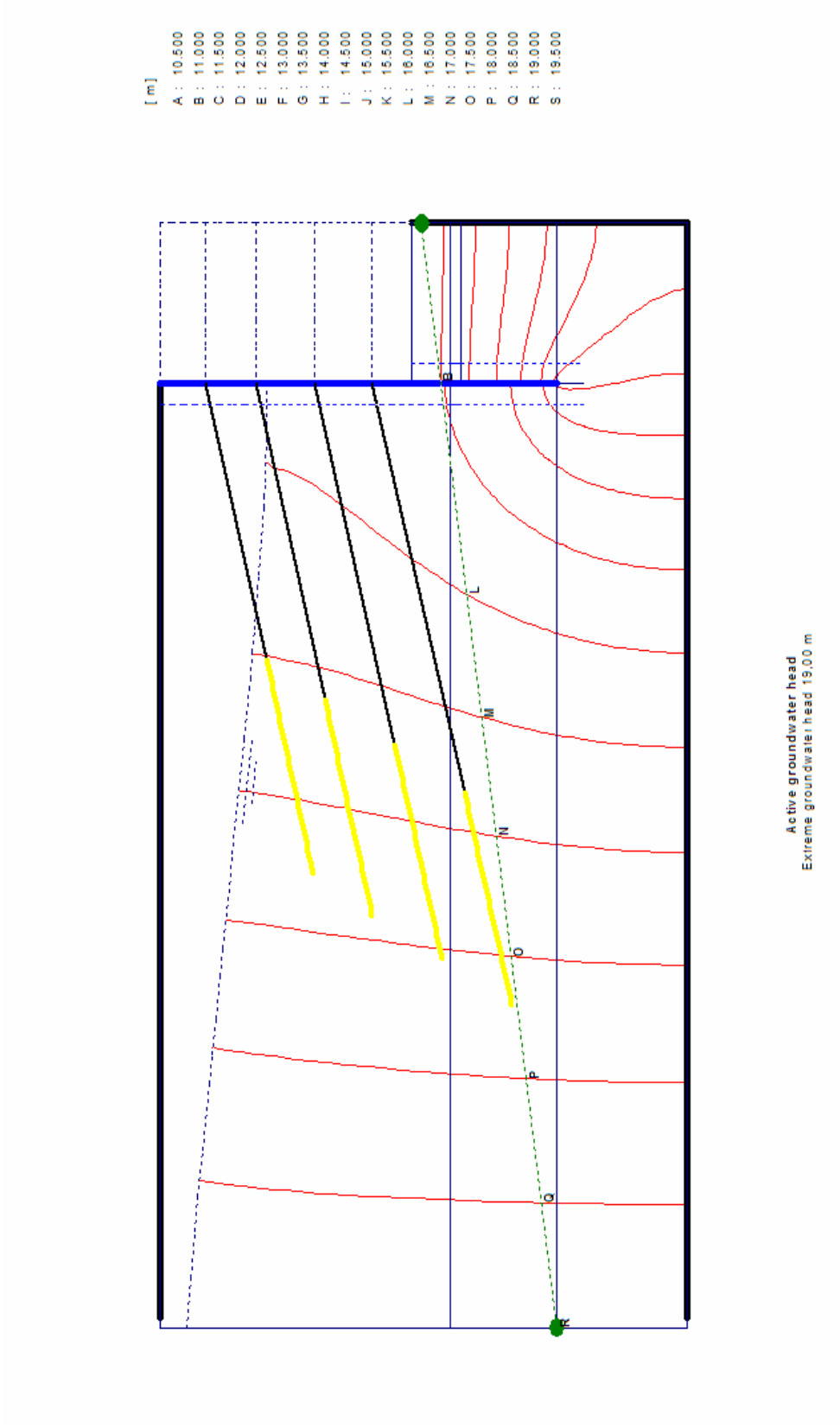
Şekil B.2 : Kazı-2 sonundaki eşpotansiyel çizgileri



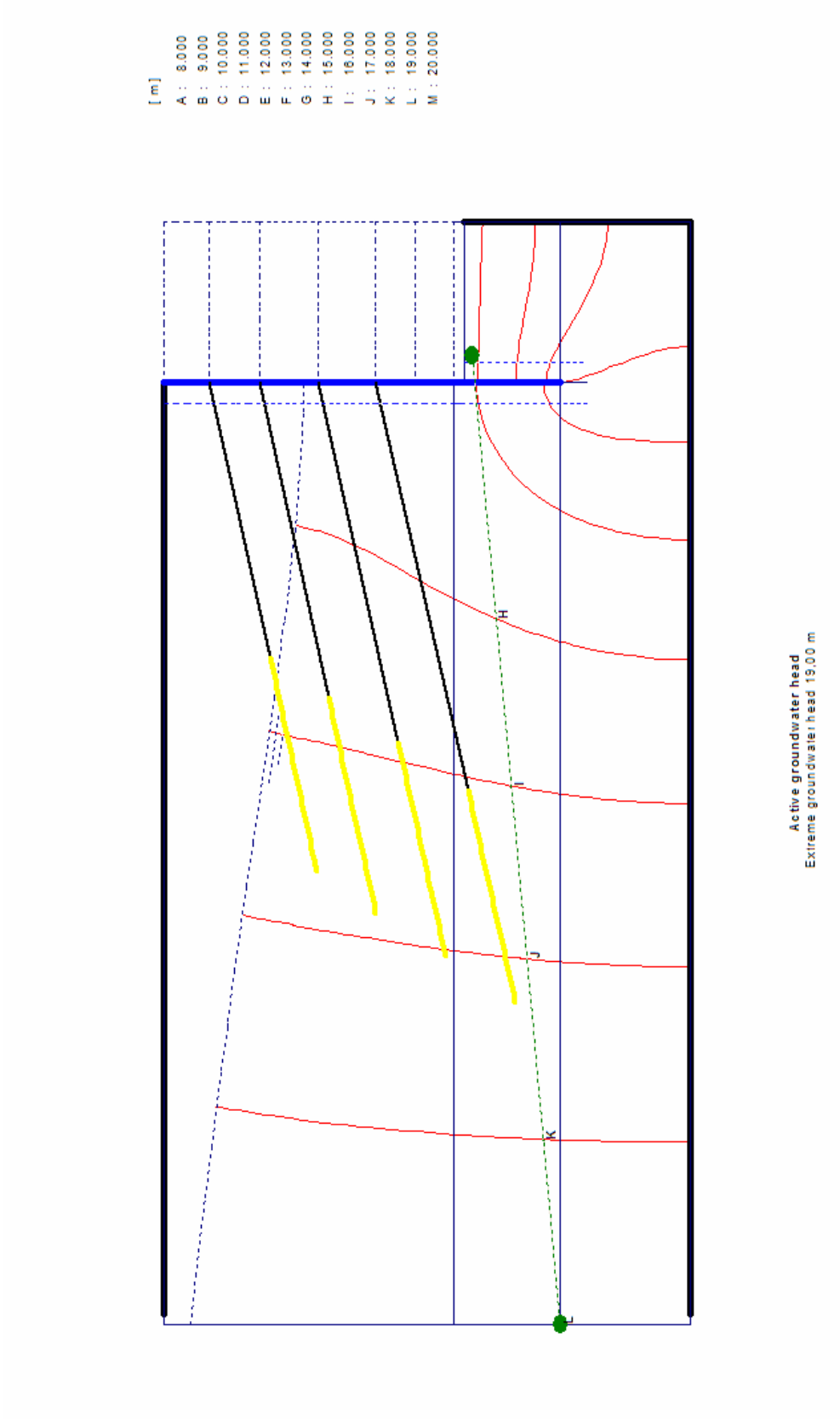
Şekil B.3 : Kazı-3 sonundaki eşpotansiyel çizgileri



Şekil B.4 : Kazı-4 sonundaki eşpotansiyel çizgileri

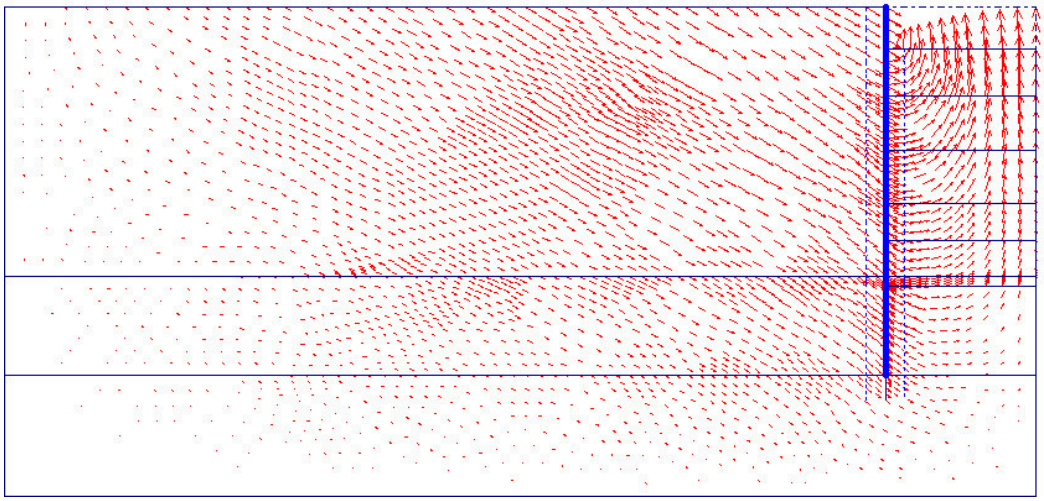


Şekil B.5 : Kazı-5 sonundaki eşpotansiyel çizgileri

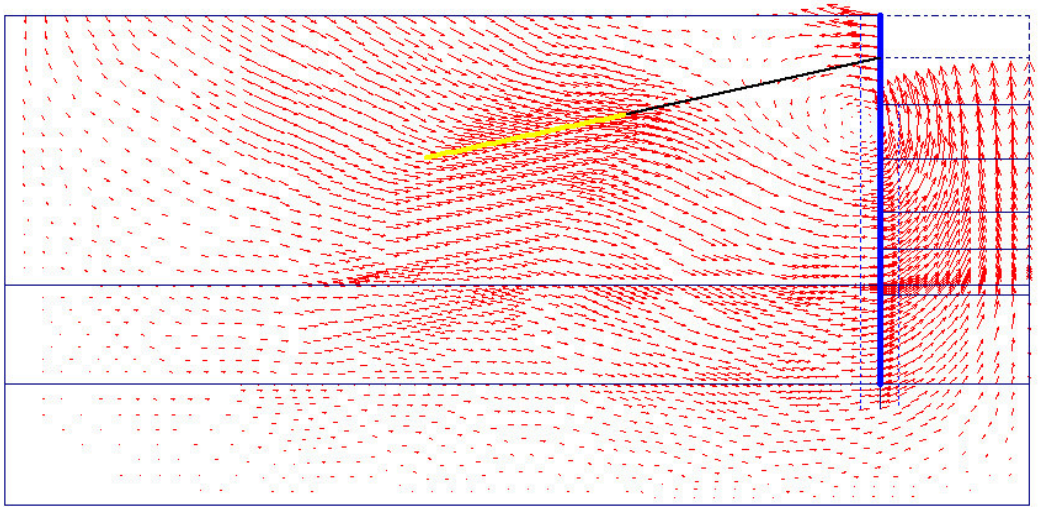


Şekil B.6 : Kazı-6 sonundaki eşpotansiyel çizgileri

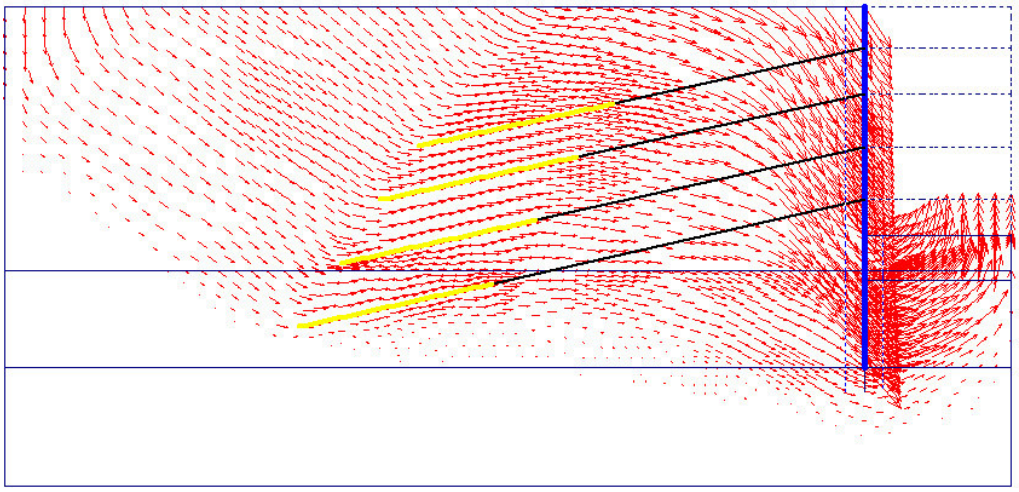
EK C



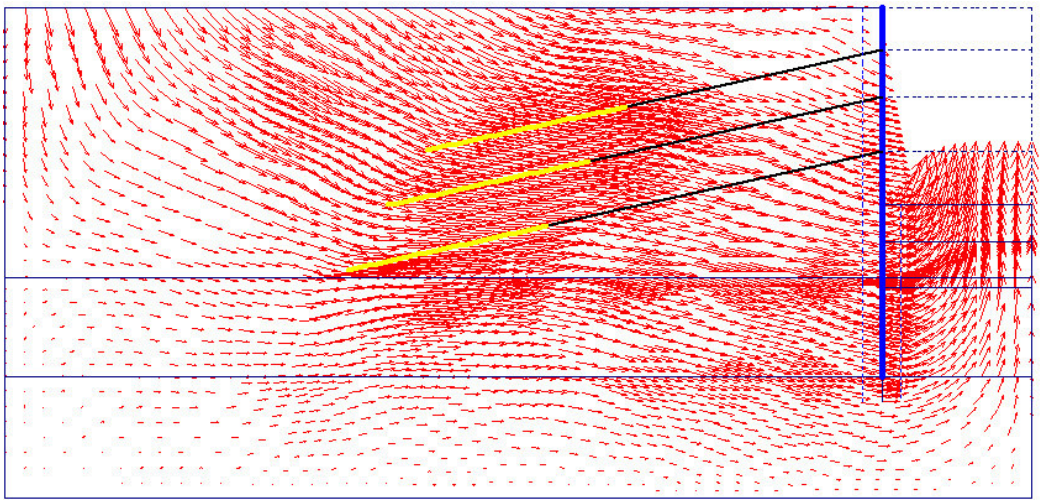
Şekil C.1 : Kazı-1 sonunda oluşan toplam deplasmanlar



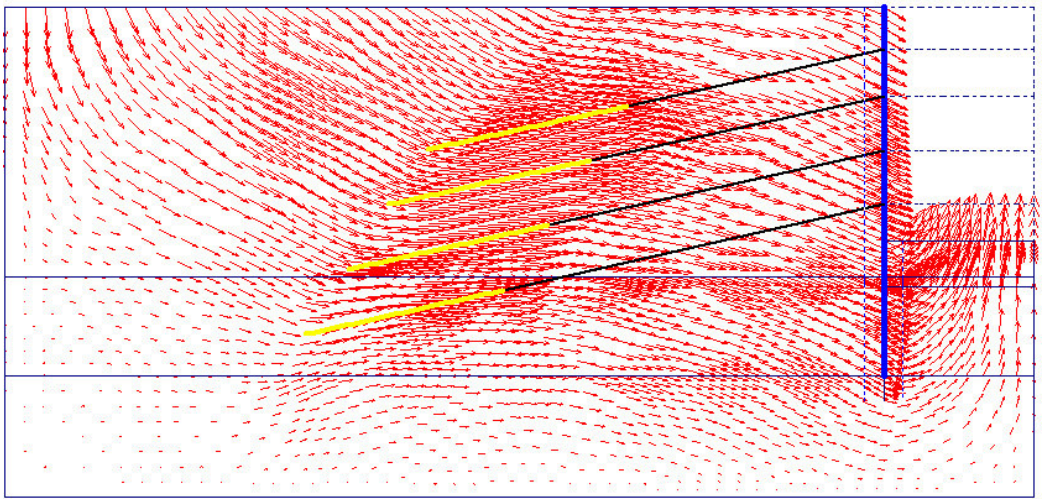
Şekil C.2 : Kazı-2 sonunda oluşan toplam deplasmanlar



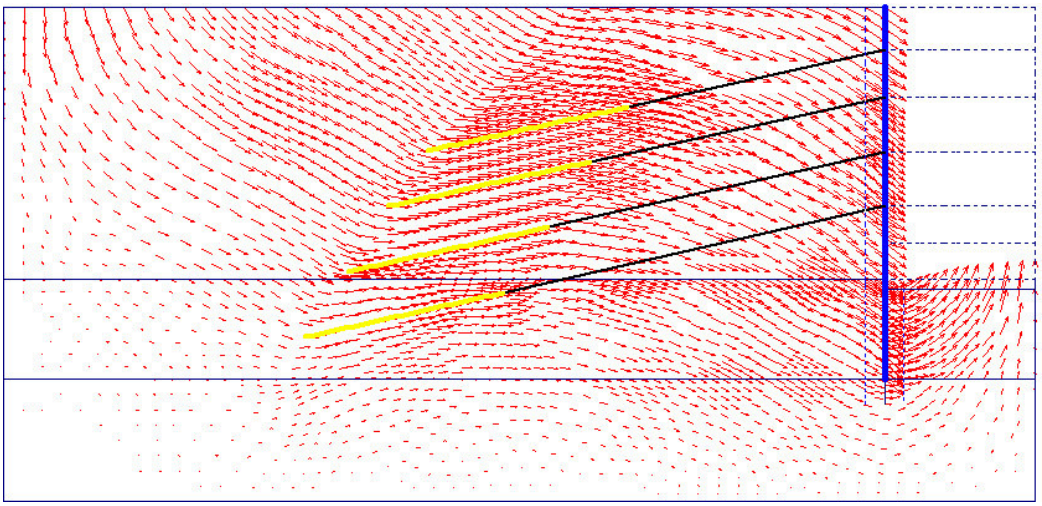
Şekil C.3 : Kazı-3 sonunda oluşan toplam deplasmanlar



Şekil C.4 : Kazı-4 sonunda oluşan toplam deplasmanlar

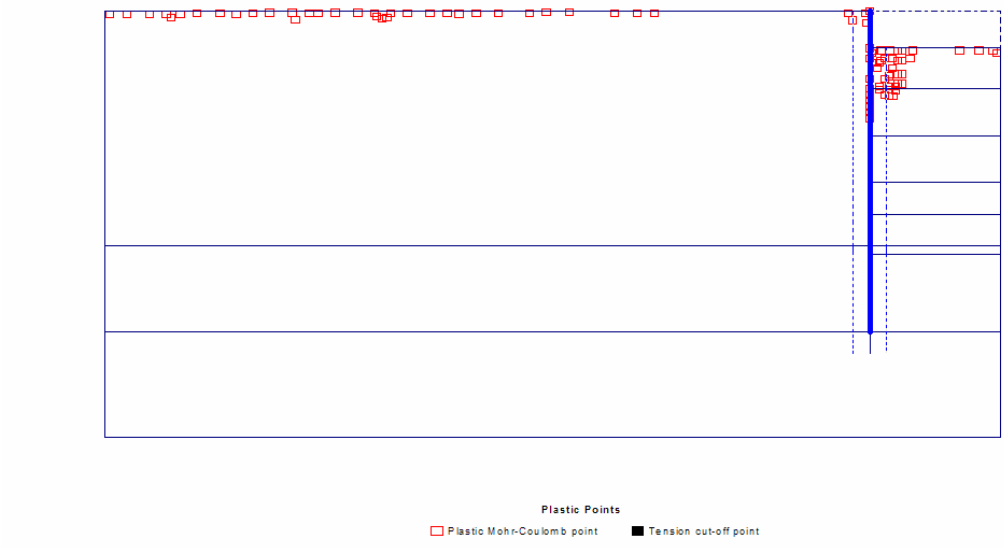


Şekil C.5 : Kazı-5 sonunda oluşan toplam deplasmanlar

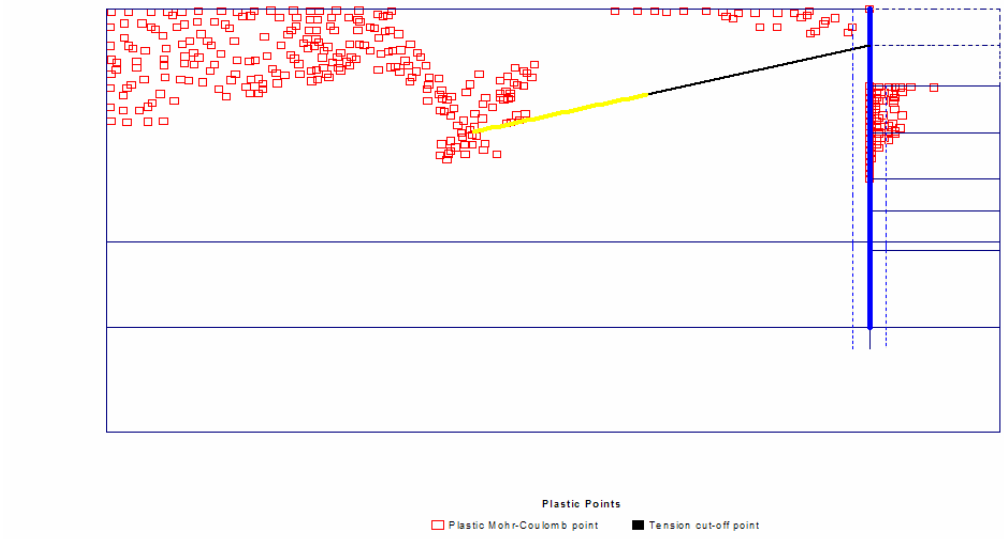


Şekil C.6 : Kazı-6 sonunda oluşan toplam deplasmanlar

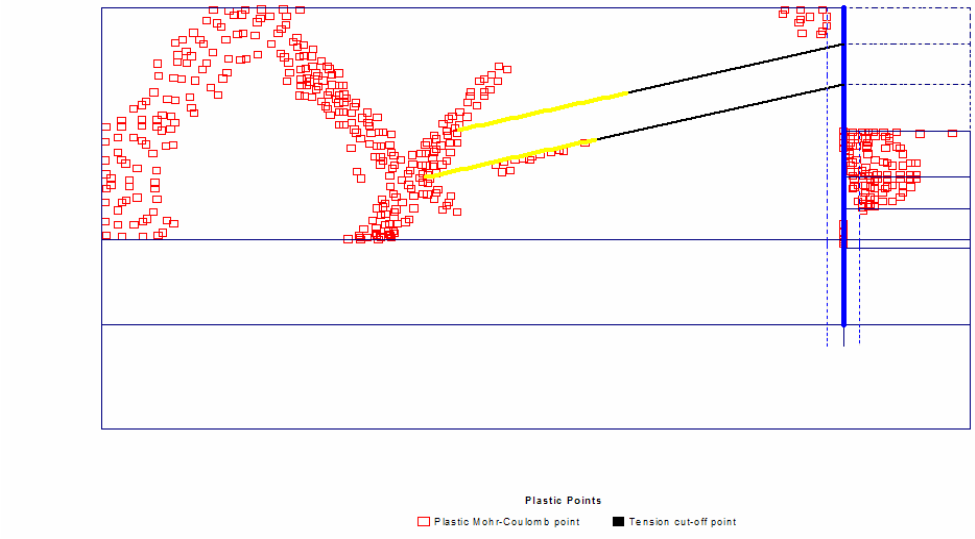
EK D



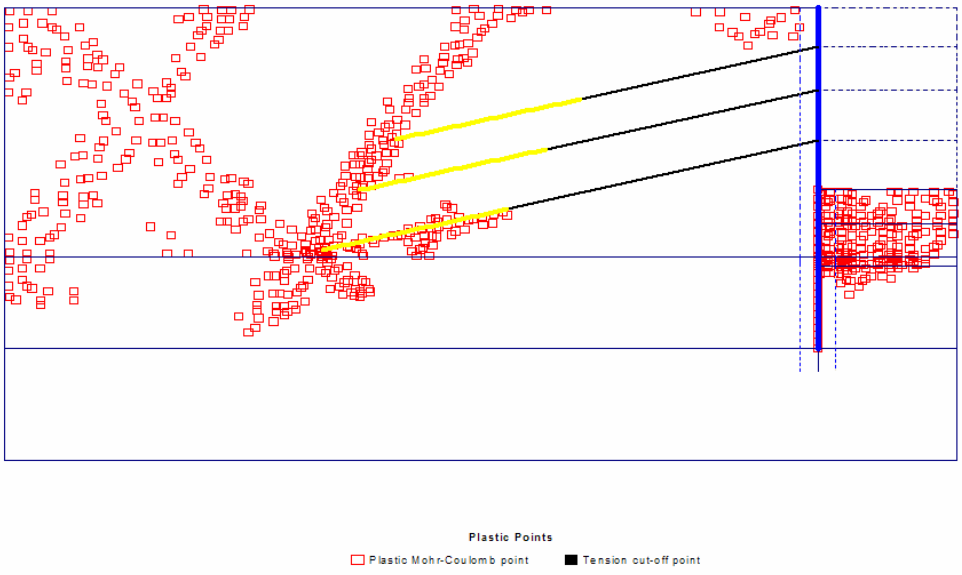
Şekil D.1 : Kazı-1 sonunda oluşan plastik noktalar



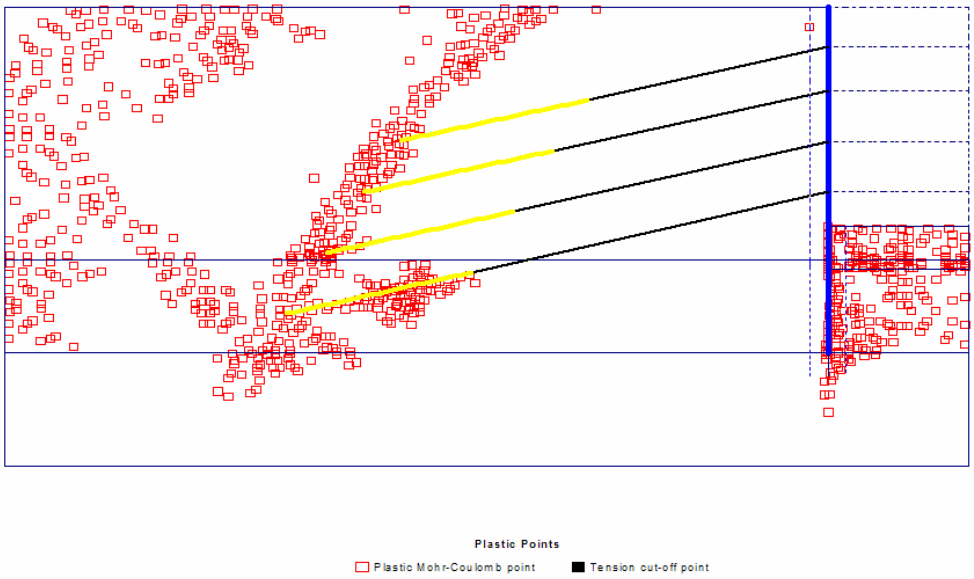
Şekil D.2 : Kazı-2 sonunda oluşan plastik noktalar



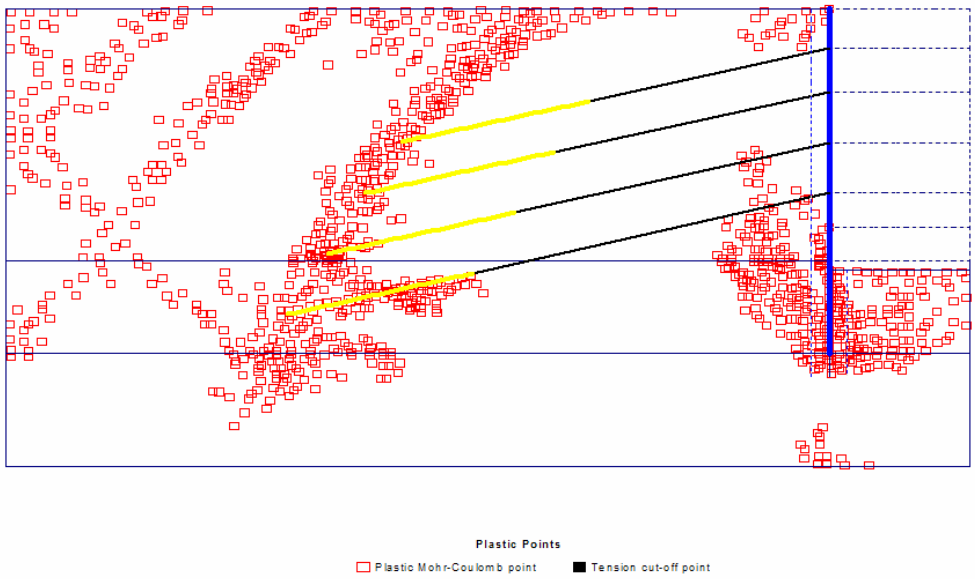
Şekil D.3 : Kazı-3 sonunda oluşan plastik noktalar



Şekil D.4 : Kazı-4 sonunda oluşan plastik noktalar

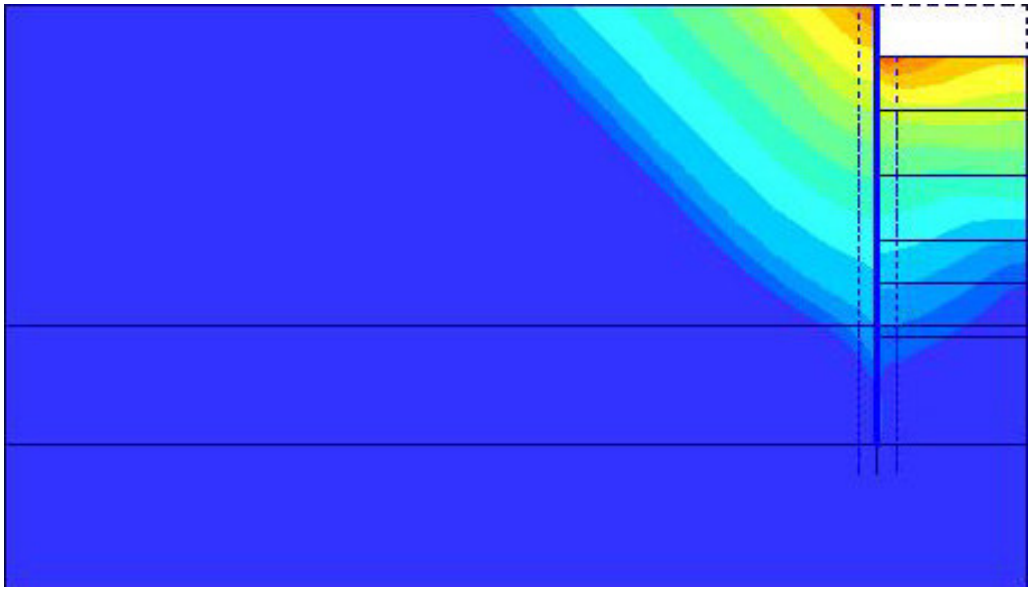


Şekil D.5 : Kazı-5 sonunda oluşan plastik noktalar

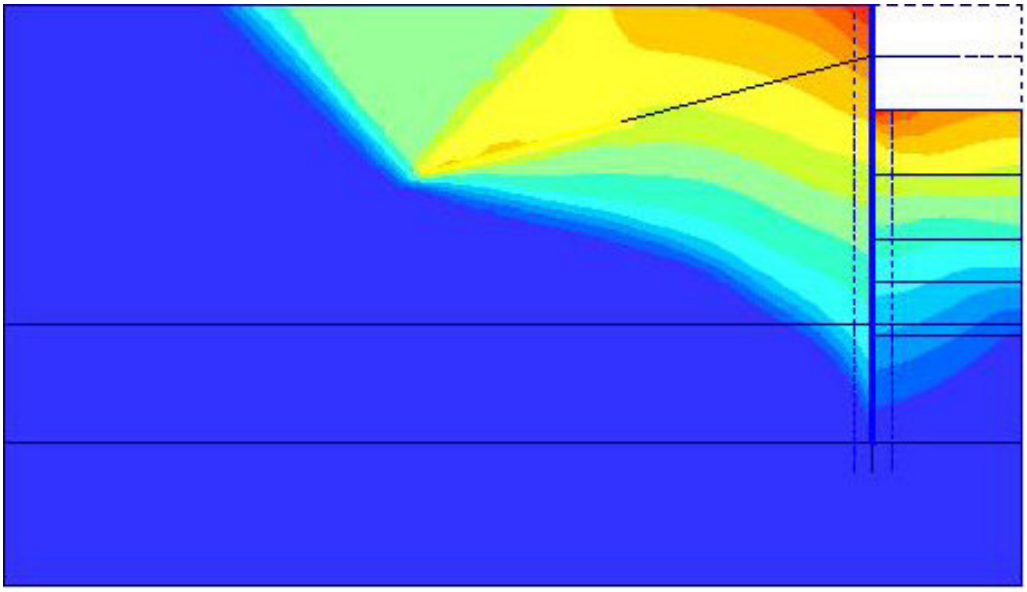


Şekil D.6 : Kazı-6 sonunda oluşan plastik noktalar

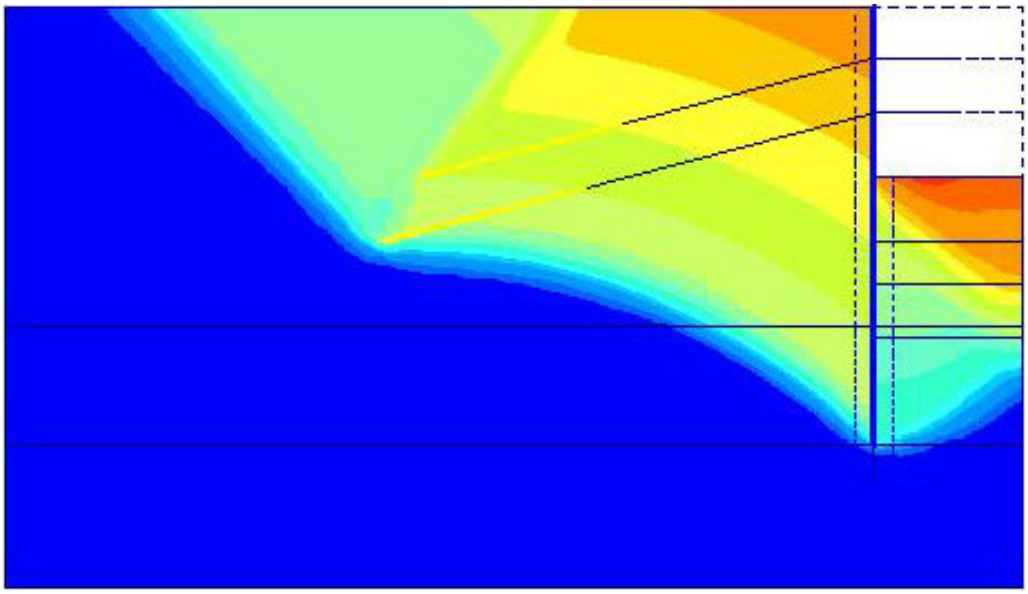
EK E



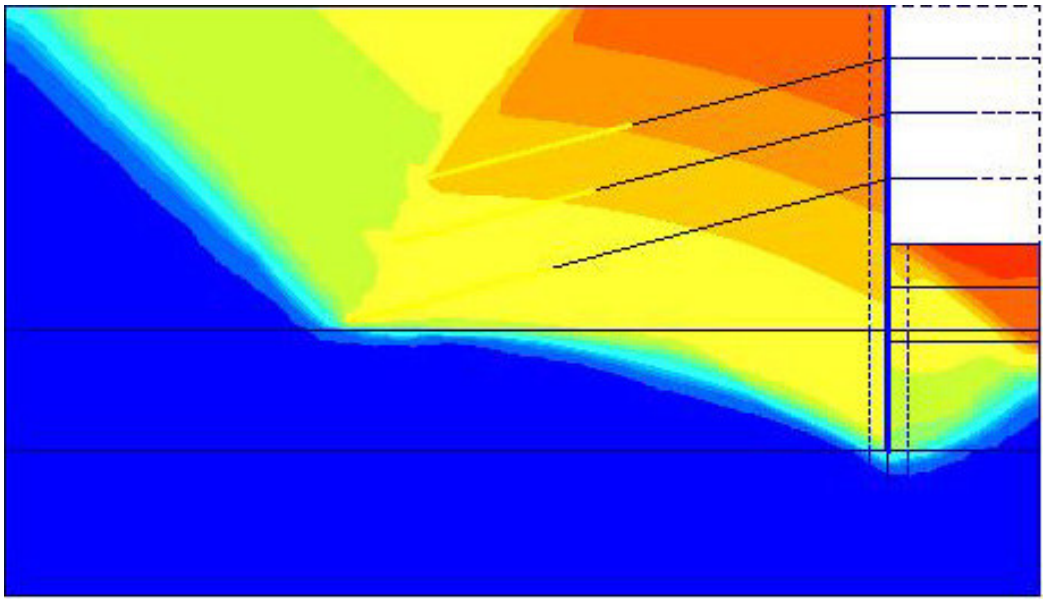
Şekil E.1 : Kazı-1 sonu için yaklaşık kayma yüzeyi



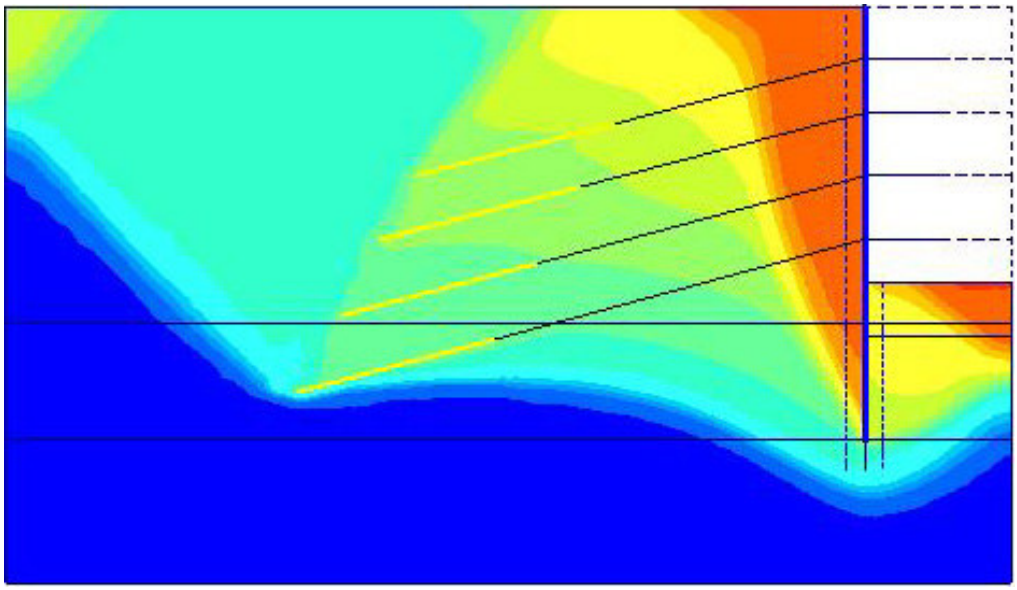
Şekil E.2 : Kazı-2 sonu için yaklaşık kayma yüzeyi



Şekil E.3 : Kazı-3 sonu için yaklaşık kayma yüzeyi



Şekil E.4 : Kazı-4 sonu için yaklaşık kayma yüzeyi



Şekil E.5 : Kazı-5 sonu için yaklaşık kayma yüzeyi

ÖZGEÇMİŞ

Berkay ADIGÜZEL, 1979 İstanbul doğumlu. 1997 yılında Fatih Fen Lisesi'nden, 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı.