

**İNCE DANELİ ZEMİNLERİN KONİ
PENETRASYONUNDA BOŞLUK SUYU BASINÇLARININ
SÖNÜMLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Yeşim YEKTE
0709071039**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Mayıs 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Haziran 2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Akın ÖNALP
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Ersin AREL
Yrd. Doç. Dr. Sedat SERT (SAÜ)**

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmanın konusu ince daneli zeminlerin koni penetrasyonunda boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesidir.

Çalışmamın başından itibaren bana her konuda yardımcı olan, hiçbir zaman bilgisini ve yardımını esirgemeyen, kendisinden her türlü desteği gördüğüm ve öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyduğum danışman hocam Prof. Dr. Akın Önalp'e teşekkür ederim.

Tüm çalışmam süresince desteklerini esirgemeyen hocalarım; Yrd. Doç. Dr. Ersin Arel, Yrd. Doç. Dr. Sedat Sert, Yrd. Doç. Dr. Aşkın Özocak, Yrd. Doç. Dr. Ertan Bol ve Yrd. Doç. Dr. Nazile Ural, sönümlenme eğrilerinin modellenmesi konusunda yardımcı olan Penn State Üniversitesi öğretim üyelerinden Prof. Dr. Derek Elsworth, İstanbul Kültür Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarından çalışma arkadaşlarım İlhan Burak Duran, Suat Yakut ve Aykut Aydın'a teşekkür ederim.

Varlığıyla bana güç veren manevi kardeşim Selin Kuşçuoğlu, kuzenim Seda Arık ve dostlarım Aslı Karabal, Ece Akçura, Esra Kılıçvuran ve Öznur Tetikoğulları'na teşekkür ederim.

Ayrıca eğitim hayatım süresince maddi ve manevi olarak her zaman yanımda olan babam Mehmet Yekte, annem Sema Yekte, abim Murat Yekte ve eşi Serpil Yekte, teyzelerim Sevim-Serap Arık ve dedem Enver Arık'a teşekkür ederim.

Haziran 2009

Yeşim YEKTE

İÇİNDEKİLER	
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	1
1.2. Yöntem	1
1.3. Adapazarı Zeminlerinin Özellikleri	1
1.4. Sondalama	6
2. KONİ PENETRASYON DENEYİ	7
2.1. Deneyin Tanıtılması	7
2.1.1. Deneyin yararları	8
2.1.2. Deneyin olumsuz yanları	8
2.2. Deneyin Uygulanması	9
2.3. Ölçümler ve Tanımlamalar	9
2.3.1. Hesaplamalarda kullanılan koninin geometrik özellikleri	10
2.3.2. CPT sistemi ile elde edilen veriler	10
2.3.3. CPTU sistemi ile elde edilen veriler	12
3. SÖNÜMLENME İLE ÖLÇÜM	14
3.1. Sönümlenme Deneyi	14
3.1.1. Tekdüze sönümlenme	17
3.1.2. Genleşme (Kabarma) sönümlenmesi	17
3.1.3. Sönümlenmeyi etkileyen faktörler	18
3.1.4. Sönümlenme deneyinden elde edilen veriler	21
3.1.4.1. Zorlanma modülü	21
3.1.4.2. Rijitlik indisi	25

3.1.4.3. Akım ve konsolidasyon özellikleri	27
4. SÖNÜMLENME EĞRİLERİ	37
4.1. Eğrilerin Modellenmesi	37
4.2. COMSOL Programının Tanıtılması	42
4.2.1. Modelleme	42
4.2.2. Çözümlemede kullanılacak denklemlerin tanımlanması	46
4.2.3. Çözümleme	50
5. ARAZİDE GERÇEKLEŞTİRİLEN SÖNÜMLENME DENEYLERİNİN ANALİZİ	56
5.1. Arazi CPTU Sönümlenme Eğrilerinin COMSOL Programı ile Analizi	56
5.1.1. Tip 1 eğrisi	60
5.1.2. Tip 2 eğrisi	62
5.1.3. Tip 3 eğrisi	64
6. BULGULARIN TARTIŞILMASI	66
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	68
KAYNAKÇA	69
EKLER	71
ÖZGEÇMİŞ	85

KISALTMALAR

CPT	: Koni penetrasyon deneyi
CPTU	: Boşluk suyu ölçümü yapılan koni penetrasyon deneyi
SCPTU	: Boşluk suyu ölçümü yapılan sismik koni penetrasyon deneyi
DPRR	: Boşluk suyu basıncı oranı
RR	: Aşırı konsolide aralıkta sıkışma oranı

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Killi zeminler için zorlanma modülünün tayini.....	22
Tablo 3.2. Değiştirilmiş zaman faktörü (T*).....	29
Tablo 3.3. \sqrt{z} zaman çiziminde sönümlenme eğrilerinin eğimi (M).....	32
Tablo 3.4. Killerin hidrolik iletkenlik oranı (k_h / k_v).....	34
Tablo 3.5. Robertson vd. 1986 ve 1990 CPT zemin davranışı tiplerinden hidrolik iletkenlik tahmini.....	35
Tablo 5.1. Tip 1 sönümlenme eğrileri listesi.....	60
Tablo 5.2. Tip 2 sönümlenme eğrileri listesi.....	62
Tablo 5.3. Tip 3 sönümlenme eğrileri listesi.....	64

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Adapazarı zemin haritaları.....	3
Şekil 1.2 : a) Yenigün Mahallesi (CTYG02) zemin profili b) Karaosman Mahallesi (CTKO13) zemin profili.....	5
Şekil 2.1 : Kablosuz (akustik) CPT sistemi.....	8
Şekil 2.2 : Koni penetrasyon deneyi aleti.....	9
Şekil 2.3 : Sonda ve konik ucun şematik gösterimi.....	10
Şekil 3.1 : Boşluk suyu basıncı elemanı yerleri.....	15
Şekil 3.2 : Yumuşak kilde tipik tekdüze sönümlenme eğrisi.....	17
Şekil 3.3 : Aşırı konsolide kilde genişleme tipi sönümlenme eğrisi.....	18
Şekil 3.4 : Doygun killerde boşluk suyu basıncı dağılımı.....	19
Şekil 3.5 : Silt ve kumlarda koni etrafında oluşan boşluk suyu basıncı dağılımı.....	19
Şekil 3.6 : Tipik sönümlenme eğrileri, Aşırı Konsolide Gault Kili Madingley, İngiltere.....	20
Şekil 3.7 : Zorlanma Modülü (M) - Düzeltilmiş koni uç direnci.....	22
Şekil 3.8 : Zorlanma modülünün değişimi.....	23
Şekil 3.9 : Zorlanma modülü ile net koni direnci arasındaki ilişki.....	24
Şekil 3.10 : Rijitlik indisinin tayini.....	25
Şekil 3.11 : Rijitlik indisinin OCR ve I_p 'den tayini.....	26
Şekil 3.12 : Bothkennar deney alanından sönümlenme deneyi sonuçları.....	27
Şekil 3.13 : Teorik çözümle normalleştirilmiş sönümlenme eğrileri.....	30
Şekil 3.14 : Ortalama laboratuvar c_h değerleri ve CPTU sonuçları.....	31
Şekil 3.15 : c_h 'ın t_{50} 'den tayini.....	32
Şekil 3.16 : 10 cm ² 'lik piyezokonide k_h 'ın bulunması.....	35
Şekil 3.17 : Tek düze tipte sönümlenme eğrisinde t_{50} değerinden k 'nın tayini....	36
Şekil 4.1 : Boşluk geometrisi modeli.....	37

Şekil 4.2	: Fazla boşluk suyu basıncı dağılımlarının a) $G/C_u = 2$, b) $G/C_u = 20$, c) $G/C_u = 200$ değeri için A_f ile değişimi.....	40
Şekil 4.3	: Fazla boşluk suyu basıncı dağılımlarının mutlak değerlerinin a) $G/C_u = 2$, b) $G/C_u = 20$, c) $G/C_u = 200$ değerleri için A_f ile değişimi...	41
Şekil 5.1	: Log t – (1-U) eksenlerine göre CPT arazi sönümlene eğrileri tipleri.....	56
Şekil 5.2	: Tip 1 ve Tip 2 eğrilerinin karşılaştırılması.....	57
Şekil 5.3	: Tip 4 ve Tip 6 eğrilerinin karşılaştırması.....	58
Şekil 5.4	: u_2 sondasında gözlemlenen yeni eğri tipleri.....	59
Şekil 5.5	: Zemin sınıflarına göre Tip 1 eğrileri.....	61
Şekil 5.6	: Zemin sınıflarına göre Tip 2 Eğrileri.....	63
Şekil 5.7	: Zemin sınıflarına göre Tip 3 eğrileri.....	65
Şekil A.1	: Tip 1 eğrileri ML zemin sınıfı.....	72
Şekil A.2	: Tip 1 eğrileri MI zemin sınıfı.....	73
Şekil A.3	: Tip 1 eğrileri SM zemin sınıfı.....	75
Şekil A.4	: Tip 1 eğrisi SW-SM zemin sınıfı.....	76
Şekil B.1	: Tip 2 eğrileri CH zemin sınıfı.....	79
Şekil B.2	: Tip 2 eğrisi MH zemin sınıfı.....	79
Şekil B.3	: Tip 2 eğrisi SM zemin sınıfı.....	80
Şekil B.4	: Tip 2 eğrisi CL zemin sınıfı.....	80
Şekil C.1	: Tip 3 eğrileri ML zemin sınıfı.....	84
Şekil C.2	: Tip 3 eğrileri MI zemin sınıfı.....	84

SEMBOL LİSTESİ

u_1, u_2, u_3	: Penetrasyon sırasında meydana gelen boşluk suyu basınçları
q_c, q_t	: Koni uç direnci
f_s, f_t	: Sürtünme direnci
v_s	: Kayma dalgası hızı
a	: Uç alanı faktörü
b	: Sürtünme alanı faktörü
R_f	: Sürtünme oranı
I_f	: Sürtünme indisi
u_{w0}	: Denge boşluk suyu basıncı
Δu_w	: Oluşan boşluk suyu basıncı
Q_t	: Normalleştirilmiş koni uç direnci
σ_{v0}	: Düşey gerilme
σ'_{v0}	: Efektif düşey gerilme
F_r	: Normalleştirilmiş sürtünme oranı
U_{wt}	: t zamanda normalleştirilmiş fazla boşluk suyu basıncı
u_{wt}	: t zamanda fazla boşluk suyu basıncı
u_{wi}	: Penetrasyon durduğundaki (t=0) başlangıç fazla boşluk suyu basıncı
M	: Zorlanma modülü
m	: Boyutsuz modül sayısı
p_a	: Referans gerilmesi
I_r	: Rijitlik indisi
E	: Eşdeğer young modülü
G	: Kayma modülü
ν	: Poisson oranı
S_u, C_u	: Drenajsız kayma direnci
I_p	: Plastisite indisi
c	: Konsolidasyon katsayısı
k	: Hidrolik iletkenlik

- T_{50}** : Teorik çözümlerden bulunan zaman faktörü
 t_{50} : %50 sönümlenme için geçen zaman
 r_0 : Penetrometre yarıçapı
 A : Skempton parametresi
 κ : Hidrolik sönümleme katsayısı

ÖZET

İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı Programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmanın amacı; ince daneli zeminlerde CPTU sönümlenme deneyi ile elde edilen boşluk suyu basıncı sönümlenme eğrilerinin COMSOL Multiphysics yazılımı yardımıyla Elsworth ve diğ. (2006)'nin boşluk genişmesi teorisine dayanarak modellenmesidir.

Bu çalışmada, koni penetrasyon deneyi (CPT)'nin olumlu ve olumsuz yanları, deneyin uygulanması, ölçümler sonucu elde edilen veriler ele alınmıştır. Esas olarak; CPTU sönümlenme deneyi incelenmiştir. Deneyin yapılışı, avantajları, sönümlenmeyi etkileyen faktörler ve deneyden elde edilen zorlanma modülü(M), rijitlik indisi(Ir), konsolidasyon katsayısı(c) ve hidrolik iletkenlik(k) ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Arazi CPTU sönümlenme eğrilerinin modellenmesi konusunda Elsworth ve diğ. (2006)'nin önerdiği boşluk genişmesi modeli kullanılmıştır. Bu modelde boşluk suyu basıncı artışları izotrop ve deviatörük gerilmelerin etkisinde drenajsız kayma direnci C_u , kayma modülü G ve Skempton A parametresi ile tanımlanmaktadır.

Zemin sınıflarına göre farklılık gösteren arazi sönümlenme eğrileri üç tipe ayrılmıştır. Tip 1 sönümlenme eğrisi çoğunlukla siltli (ML, MI) ve kumlu (SM, SW-SM) zeminlerde görülmektedir. Tip 2 sönümlenme eğrisi çoğunlukla killi (CH, CL) zeminlerde karşımıza çıkmaktadır; ancak nadiren de olsa siltli ve kumu zeminlerde de görülmektedir. Tip 3 sönümlenme eğrisi ise siltli zeminlerde (ML, MI) karşımıza çıkmaktadır. Bu eğri tiplerine göre boşluk genişmesi teorisine dayanarak COMSOL Multiphysics yazılımı ile analizler yapılmıştır. Tip 1 eğrilerinde SM ve SW-SM kumlar dışında siltli olan zeminlerde arazi eğrileri ile programın eğrileri uyum göstermiştir. Tip 2 eğrilerinde killi ve siltli olan örneklerde uyum yakalanmıştır ancak SM kumda uyum gözlenmemiştir. Tip 3 eğrilerinde arazi ve program sonucu elde edilen eğriler arasında tam bir uyum gözlenmiştir. Analizler sonucu kumlu(SM, SW-SM) zeminler dışında diğer zemin sınıflarının sönümlenme eğrisi tiplerinin (Tip 1, Tip 2, Tip 3) Elsworth ve diğ., (2006)'nin boşluk genişmesi modeli ile temsil edilebileceği açıklanmıştır.

Anahtar kelimeler : CPT, CPTU, Sönümlenme, Boşluk Genleşmesi, COMSOL Multiphysics

SUMMARY

This thesis discusses the procedures to model the process of the dissipation of excess porewater pressures induced by the penetration of a rigid object into fine grained soils during a cone penetration test (CPTU). The model is selected after the numerical solutions proposed by Elsworth et al.(2006) using the cavity expansion theory.

The numerical solutions are provided using the software COMSOL Multiphysics. An introduction for the applications of the cone penetration test(CPTU) quoting its implementation, advantages and disadvantages is given . A description of the dissipation test is made in detail whereby the constrained modulus(M), rigidity index (I_r), coefficient of consolidation (c), and the coefficient of hydraulic conductivity (k) is provided.

The dissipation curves obtained after the penetration of the cone is arrested have been modelled using the cavity expansion model proposed by Elsworth et al(2006). This model describes how the porewater pressures rise under the influence of the isotropic and deviatoric stresses induced by the penetration using the undrained shear strength (c_u), shear modulus(G) and the Skempton pore pressure parameter B.

Three groups of dissipation curves have thus been identified. Curve Type 1 is obtained mostly for silts(ML,MI) and sandy soils (SM,SW-SM). Type 2 curves appear for clays (CH,CL). Type 3 Curve is encountered in ML,MI silts. The curves obtained from numerical analysis by COMSOL agree well with the Type 1 dissipation curves for silts, whereas same agreement is not observed for SM,SW-SM sands. Agreement has been obtained for silty and clayey soils but not for SM sands for Type 2 curves. Almost perfect agreement was achieved for Type 3 curves by numerical analysis and the field curves for all cases excepts sands. It was concluded that apart from sandy soils, the dissipation curves can be modelled by the numerical methods using the cavity expansion theory.

Keywords : Cone penetration test, piezocone, cavity expansion, penetration, dissipation, COMSOL Multiphysics

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, 1999 depreminde zemin Adapazarı kentinde zemin özelliklerinden kaynaklanmış yapı hasarlarına neden olduğu düşünülen zemin yumuşaması ve sıvılaşmanın nedenlerini araştırmaya yönelik bir ölçüm yöntemi geliştirilmesidir.

1.2 Yöntem

Zemin özellikleri en sağlıklı biçimde arazi deneyleri ile ölçülebilir. Bu deneylerin en gelişmişlerinden biri de koni sondalama yöntemidir (CPTU). Bu gelişmiş akustik/elektronik deneyde koninin batık zemine itilirken oluşturduğu su basınçları duyarlı biçimde ölçülebilmektedir.

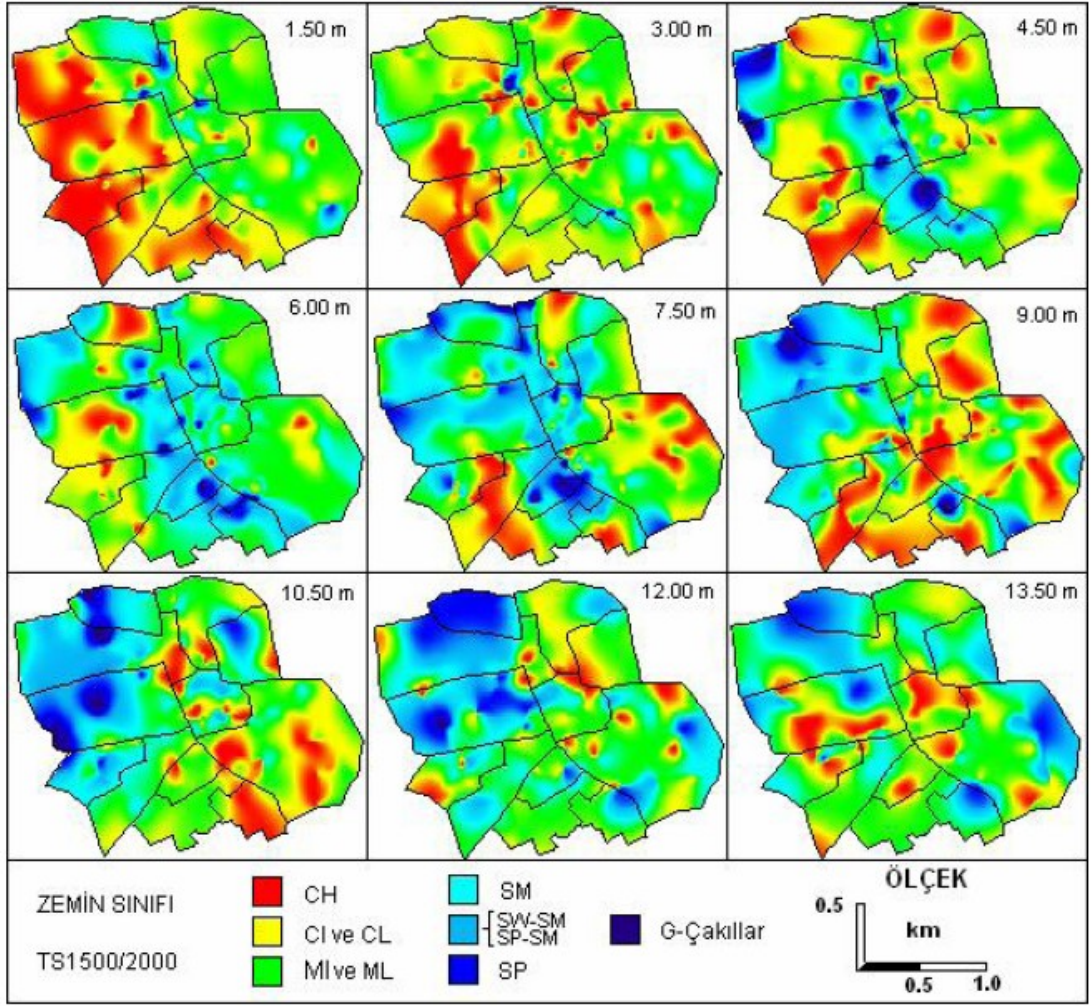
Bu tezde penetrasyon sırasında yükselmiş/düşmüş boşluk suyu basınçlarının koni durdurulup bağlandıktan sonra sönümlenme sürecinin değerlendirilmesi ve buradan gelen bilgilerle zemin özelliklerinin tanımlanmasına çalışılmıştır.

1.3 Adapazarı Zeminlerinin Özellikleri

Adapazarı Türkiye'nin kuzey batısında yaklaşık 32 yükseltisinde, Karadeniz'den 50 km. güneydedir. Sakarya Nehri güncel olarak güneyden gelip şehrin ortasından geçerek Karadeniz'e yönelir. Ayrıca şehrin merkezine yakından geçen ve Sapanca gölünün fazla sularını boşaltan eden Çark Deresi de Sakarya nehrinin bir kolunu oluşturur. Adapazarı %90'ı genç akarsu ve bunların taşkın ürünü çökeller (alüvyon) üzerine, geri kalan bölümü ise tortul kayalar üzerinde kurulmuştur. Nehrin taşıdığı çökeller ve genç oluşumlardan meydana gelen zeminlerinin güney batı kesimlerindeki kayaların, alüvyon dolgusu altından çıkarak yüzeylendiği bölge inceleme alanının güneybatı kesimlerindeki yüksek kesimlerdir. Alçak kesimdeki zeminlerde çok genç kil, silt ve kum tabakaları egemendir. Yeraltı su seviyesi çoğu

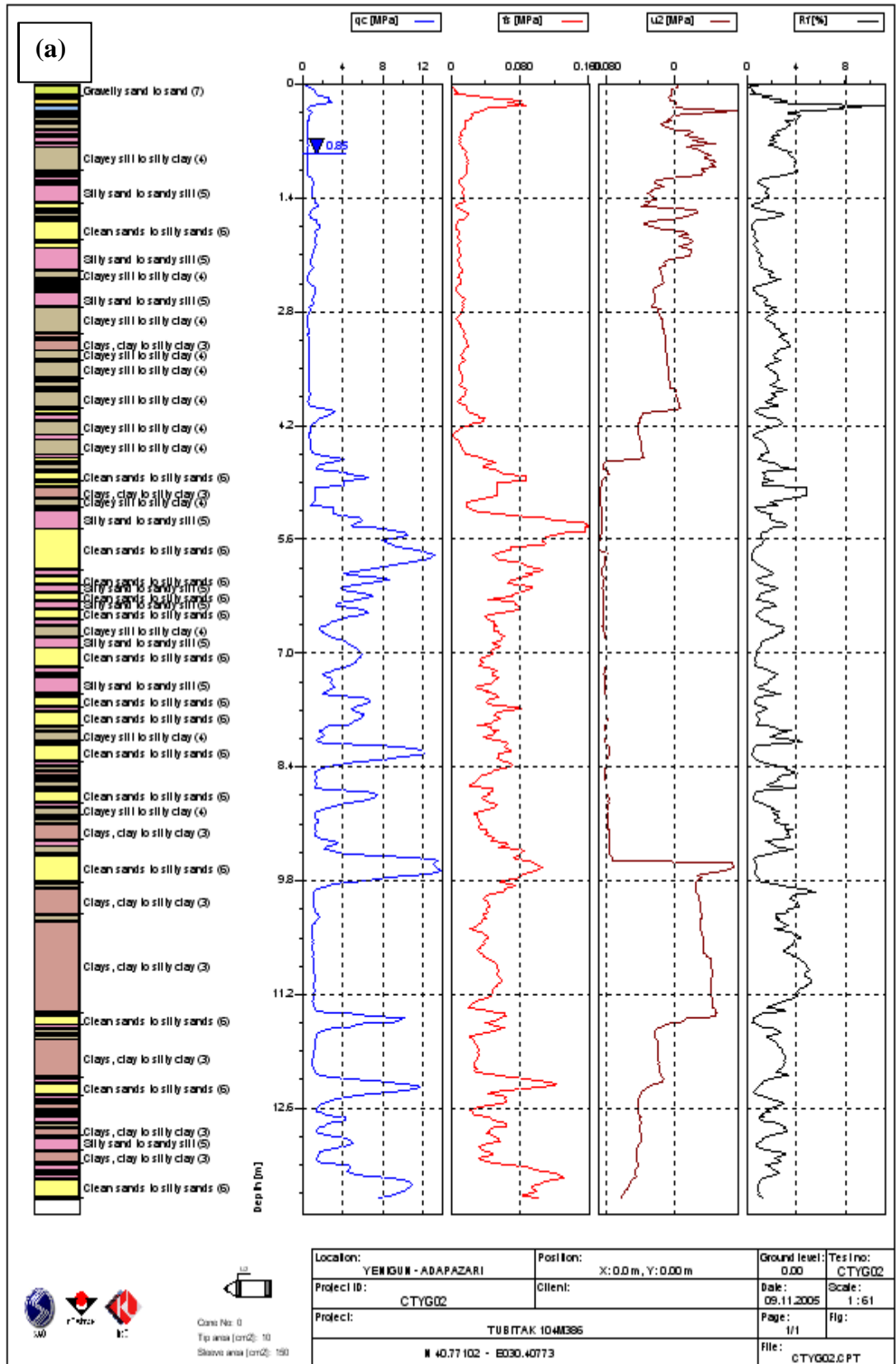
zaman yüzeye yakındır, Çark Deresi ve Sakarya Nehri'ne yönelmektedir. Y.A.S.S. mevsimsel olarak 0.60–3.95 m arasında değişmektedir(Bol, 2003, 72-88).

Yapılan sondaj çalışmalarından elde edilen örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan sınıflandırma deneyleri sonucunda 1.5 m derinlikte kentin batısında orta ve yüksek plastisiteli killer, doğusunda ise orta ve yüksek plastisiteli siltler hakimdir. 3.00 m derinlikte siltlerin daha yaygın olduğu görülmektedir. 4.50 m derinlikte ise eski nehir yatağını temsil eden çakıllar kentin ortasından kuzeye doğru yönelmişlerdir. 6.00 m' de bu eski nehir yatağı daha da belirginleşmektedir. 7.50 m' de batıdan gelen başka bir kolun bu yatakla birleştiği görülmektedir. 9.00 ve 10.50 m derinliklerde kentin ortasında yatağın kaybolduğu ve batıdaki yatağın hakimiyetinin öne çıktığı görülmektedir. 12.00 ve 13.50 metrelerde ise kentin batı ve doğusunda iki ayrı nehir yatağının tekrar egemen olduğu gözlenebilir. Şekil 1.1'de yüzeyde 15.00 m derinliğe kadar olan Adapazarı'nın 1.5 metrede bir karşılaşılan zemin cinsleri verilmiştir(Bol ve diğ., 2007).

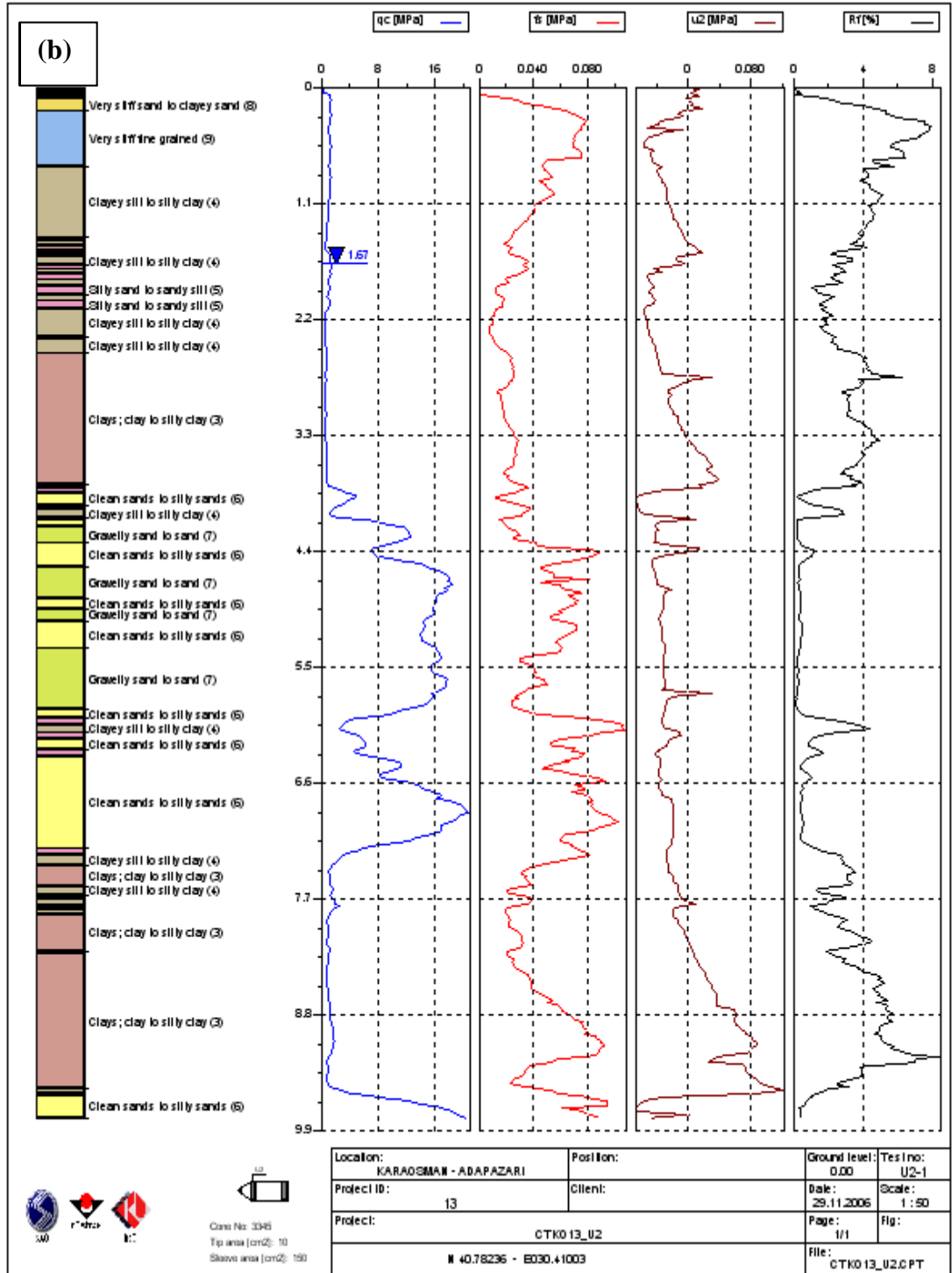


Şekil 1.1 : Adapazarı zemin haritaları (Bol ve diğ., 2007)

Adapazarı alçak kesimlerindeki zemin yapısı derinlikle büyük değişkenlik gösterir. Bu değişkenlik Şekil 1.2’de verilmiş örnek profillerde açık olarak görülebilmektedir.



Case No: 0
Tip area (cm2): 10
Shaft area (cm2): 190



Şekil 1.2 : a) Yenigün Mahallesi (CTYG02) zemin profili b) Karaosman Mahallesi (CTK013) zemin profili (Önalp ve diğ., 2007)

1.4 Sondalama

Sondalama alışmaları ilk olarak 1920'li yıllarda Hollanda'da kumlarda uygulanmaya başlanmıştır. İlk konik penetrometre testi bir mekanik alet ile Rijkswaterstraat'da (Bayındırlık) mühendis olan P.Barentsen tarafından 1932 yılında Hollanda'da yapılmıştır. Farklı özelliklerde olan mekanik koni penetrometreler, Belçika, İsveç, Almanya, Fransa ve Rusya gibi ülkelerde geliştirilmiştir (Broms ve Flodin,1988; Sanglerat 1972). Broms ve Flodin'e uygun olarak ilk elektrik donanımlı koni penetrometre 2. Dünya Savaşı sırasında Berlin'de Deutsche Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (DEGEBO)'de geliştirilmiş ve birçok dünya ülkesinde kullanımı yaygınlaşmıştır.

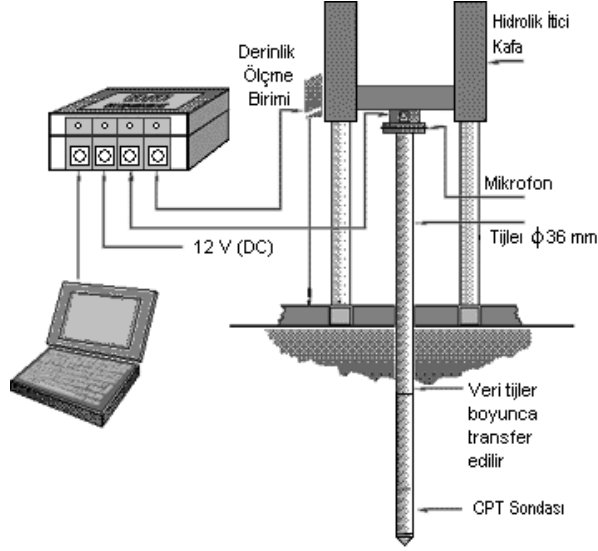
Güncel elektrikli piyezometre (piyezokoni-CPTU) 1974 yılında Norveç Geoteknik Enstitüsünde tarafından geliştirilmiştir. Penetrasyon sırasında boşluk suyu basıncı ölçümü ise Janbu ve Senneset (1974) ve Schmertmann (1974) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Koni penetrasyon deneyi (CPT) yönteminin çalışma prensibi, aşağı doğru itilen konik uçlu bir elik sondaya zeminin gösterdiği direncin ölçümü şeklinindedir. Günümüzde uç direnci ve çevre sürtünmesinin yanında (CPT), boşluk suyu basınçlarını (CPTU) ve kayma dalgası hızlarını ölçebilen sistemler (SCPTU) geliştirilmiştir.

BÖLÜM 2. KONİ PENETRASYON DENEYİ

2.1 Deneyin Tanıtılması

Koni penetrasyon deneyi, özellikle yumuşak/gevşek ince daneli zeminlerden çakıl boyutundaki iri daneli zeminlere kadar kesit boyunca karşılaşılan zemin tabakalarında zemin özelliklerinin örselenme olmaksızın yerinde belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Deneyin temel amacı zemin profilinin tanımlanması, zemin tabakalarının geoteknik özelliklerinin ve tasarıma yönelik parametrelerin ölçüm sonuçlarından belirlenmesidir. CPT deneyinde, kesit alanı 10 cm^2 , konik uç açısı 60° olan silindir şeklinde bir sonda 20 mm/s sabit hızla zemine itilir. Bu işlem esnasında koni ucunda oluşan direnç (q_c), silindirik gömlekte oluşan sürtünme direnci (f_s) ve konik ucun farklı kısımlarında penetrasyon sırasında meydana gelen boşluk suyu basınçları (u_1, u_2, u_3) elektronik olarak ölçülerek zemin kesiti ve zemin sınıfları elde edilmektedir. Ayrıca istenilen derinliklerde penetrasyon durdurulduğunda boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi izlenerek zeminin geçirimsizlik özellikleri hakkında bilgi edinilebilmekte, aynı zamanda statik boşluk suyu basınçları da belirlenebilmektedir. Son yıllarda geliştirilen kablosuz (akustik) CPT sisteminde, ölçülen değerler bir mikroişlemci tarafından ses sinyaline çevrilerek yüzeye yollanmaktadır. Bu sinyal sondanın bağlandığı mikrofon tarafından algılanarak ara bağlantısı yapılmış veri toplayıcıya aktarılmaktadır (Şekil 2.1). Veri toplayıcıda ayrıca sinyallerin gönderildiği derinliğin kaydı da yapılmaktadır (Önalp ve diğ., 2006).



Şekil 2.1 : Kablosuz (akustik) CPT sistemi (Önalp ve diğ., 2006)

Deney ölçüm sisteminin ilk yüksek maliyeti nedeniyle Türkiye’de henüz yaygın uygulama bulamamış ise de özellikle ince aluviyal formasyonlarda ve su altında ölçüm yapma potansiyeli bu deneyin kısa zamanda geniş uygulama bulacağını göstermektedir (Önalp ve Sert, 2006, 71).

2.1.1 Deneyin yararları

- Hızlı olması ve zemin profilinin gerçeğe yakın şekilde belirlenebilmesi
- Zemin parametrelerinin numune alınmasına ve laboratuvar çalışmasına gerek duyulmadan elde edilebilmesi
- Sonuçların deneyi yapan operatörün müdahalesine bağlı olmaması
- Numune alımı çok zor olan yumuşak killer ve siltli zeminler için uygun olması
- Konsolide olmamış zeminlerde kullanılabilmesi
- Deney sonuçlarının yorumlanması için teorik yöntemlerin bulunması
- Verilerin bilgisayar tarafından belirli derinlik aralıklarında gerçek zamanlı olarak kaydedilebilmesi

2.1.2 Deneyin olumsuz yanları

- Türkiye’de ekipmanın sınırlı olması
- Deneyin uzman bir operatör tarafından yapılması gerekliliği
- Aletin belirli aralıklarla kalibrasyon gerektirmesi

- Zemin numunesi alınamaması
- Katı/sert zeminlerde uygulanamaması

2.2 Deneyin Uygulanması

Koni penetrasyon aleti kamyon ya da paletli bir araç üzerine bindirilmiş şekilde çalışmaktadır. Kullanılan sondanın tipine göre ölçülebilecek maksimum uç direnci, çevre sürtünmesi ve boşluk suyu basıncı değerleri değişmektedir. Deneyin yapılacağı alana getirilen araç helezon ankrajlar vasıtasıyla zemine sabitlendikten sonra sonda zemine itilmeye başlanır. Deneyin bilgisayar kontrollü olarak yapılması sebebiyle tijlerin düşeyliği sürekli gözlenmekte, böylece hatalı veri alınmasına izin verilmemektedir. Deney esnasında veri toplama aralıkları 1 cm'ye kadar düşürülebilmektedir. Bu da zemin özelliklerinin ölçümünde süreklilik sağlamaktadır (Önalp ve diğ., 2007).

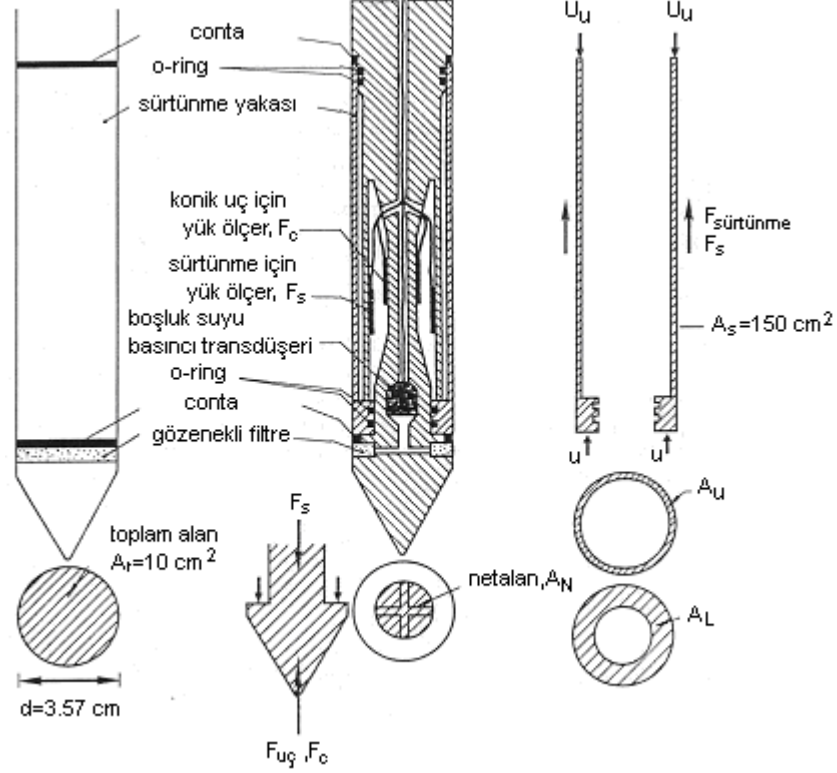


Şekil 2.2 : Koni penetrasyon deneyi aleti (Önalp ve diğ., 2007)

2.3 Ölçümler ve Tanımlamalar

Koni zemine itilirken uçta ölçülen kuvvetin kesit alanına bölünmesi ile bulunan uç direnci (q_c), yan yüzeydeki kuvvet hücresinin ölçtüğü toplam yükün sonda yanak alanına bölünmesiyle bulunan çevre sürtünme/yapışması (f_s); boşluk suyu basınçları (u_1, u_2, u_3) sistemi denetleyen bilgisayarca sürekli kaydedilmektedir. Buna ek olarak CPTU sistemlerde istenilen derinlikte sönümlenme deneyi ; ve SCPTU sistemlerde

kayma dalgası hızları (v_s), gaz ölçümü yapılabilmektedir. Alınan ölçüm sonuçlarından zemin sınıfları tayin edilmekte, zeminin taşıma gücü ve sıvılaşma davranışı hakkında fikir edinilebilmektedir (Önalp ve diğ., 2006).



Şekil 2.3 : Sonda ve konik ucun şematik gösterimi (Önalp ve diğ., 2006)

2.3.1 Hesaplamalarda kullanılan koninin geometrik özellikleri

- A_N : Koni ucu net alanı
- A_T : Koni ucu toplam kesit alanı
- A_L : Sürtünme gömleğinin son alt kısmında kesit alanı
- A_U : Sürtünme gömleğinin son üst kısmında kesit alanı
- A_S : Sürtünme gömleği yüzey alanı

2.3.2 CPT sistemi ile elde edilen veriler

Uç alanı faktörü (a) : Uç direncinin ölçülen değerlerinin düzeltilmesi için kullanılır.

$$a = \frac{A_N}{A_T} = \frac{(A_T - A_L)}{A_L} \quad (2.1)$$

Sürtünme alanı faktörü (b) : Yanakta oluşan sürtünme direncinin ölçülen değerlerinin düzeltilmesi için kullanılır.

$$b = \frac{(A_L - A_U)}{A_S} \quad (2.2)$$

Koni direnci (q_c-q_t): Koni direnci koni ucunun karşılaştığı toplam eksenel yükün koni ucunun kesit alanına bölünmesi ile elde edilir. Burada q_t: düzeltilmiş koni uç direncidir.

Boşluk suyu basıncının sıfıra yakın olduğu (u ≈ 0) olduğu özel durumlarda q_c ≈ q_t 'dir. Koni direnci MPa veya kPa birimi ile ifade edilir.

$$q_c = \frac{F_T}{A_T} \text{ (düzeltilmemiş)} \quad (2.3)$$

$$q_t = q_c + u \cdot (1 - a) \text{ (düzeltilmiş)} \quad (2.4)$$

Sürtünme direnci (f_s-f_t) : Sürtünme direnci sürtüne gömleğinin karşılaştığı toplam eksenel yükün sürtünme gömleğinin dış yüzey alanına bölünmesi ile elde edilir. Burada f_t: düzeltilmiş sürtünme direncidir. Boşluk suyu basıncının sıfıra yakın (u ≈ 0) olduğu özel durumlarda f_c ≈ f_t ' dir. Koni direnci MPa veya kPa birimi ile ifade edilir.

$$f_s = \frac{F_s}{A_s} \text{ (düzeltilmemiş)} \quad (2.5)$$

$$f_t = f_s - u \cdot b + 0.3 \cdot \Delta u \cdot \frac{(1 - a)}{(15 - b)} \text{ (düzeltilmiş)} \quad (2.6)$$

Sürtünme oranı (R_f) : Sürtünme oranı sürtünme direncinin koni uç direncine bölünmesiyle elde edilir.

$$R_f = \frac{f_t}{q_t} \cdot 100 (\%) \quad (2.7)$$

Sürtünme indisi (I_f) : Koni uç direncinin sürtünme direncine bölünmesiyle elde edilir.

$$I_f = \frac{q_t}{f_t} \quad (2.8)$$

2.3.3 CPTU sistemi ile elde edilen veriler

Koni zemine sabit bir hızla itilirken kaydedilen boşluk suyu basınçları (u_1, u_2, u_3) dinamik değerlerdir. ($u = u_0 + \Delta u$). Deney esnasında statik boşluk suyu basıncında (u_0) meydana gelen değişiklik (Δu) zemin cinsine göre pozitif veya negatif değer alabilir. Deney sırasında koni ucunda ve arkasında oluşan dengelenmemiş boşluk suyu basınçlarının etkisini ortadan kaldırmak amacıyla uç direnci ve çevre sürtünmesi için boşluk suyu basıncına göre düzeltme yapılmalıdır. (Larsson, 1995)

Denge boşluk suyu basıncı (u_{w0}) : Deneyden önce arazideki mevcut boşluk suyu basıncıdır. Penetrasyonu izleyerek yükselen boşluk suyu basıncının sönümlenmesi ile eşitlenir.

Oluşan boşluk suyu basıncı (Δu_w) : Penetrasyon sırasında koni etrafında üretilen boşluk suyu basıncındaki değişimdir.

$$\Delta u_w = u_{(1,2,3)} - u_{w0} \quad (2.9)$$

Boşluk suyu basıncı oranı (DPRR) : Oluşan boşluk suyu basıncının ölçüm seviyesinde koni uç direncine oranıdır.

$$DPRR = \frac{\Delta u_w}{q_t} \quad (2.10)$$

Normalleştirilmiş koni uç direnci (Q_t) :

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}} \quad (2.11)$$

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0 \quad (2.12)$$

σ'_{v0} : efektif düşey gerilme

Normalleştirilmiş sürtünme oranı (F_r) :

$$F_r = \frac{f_s}{(q_t - \sigma_{v0})} \quad (2.13)$$

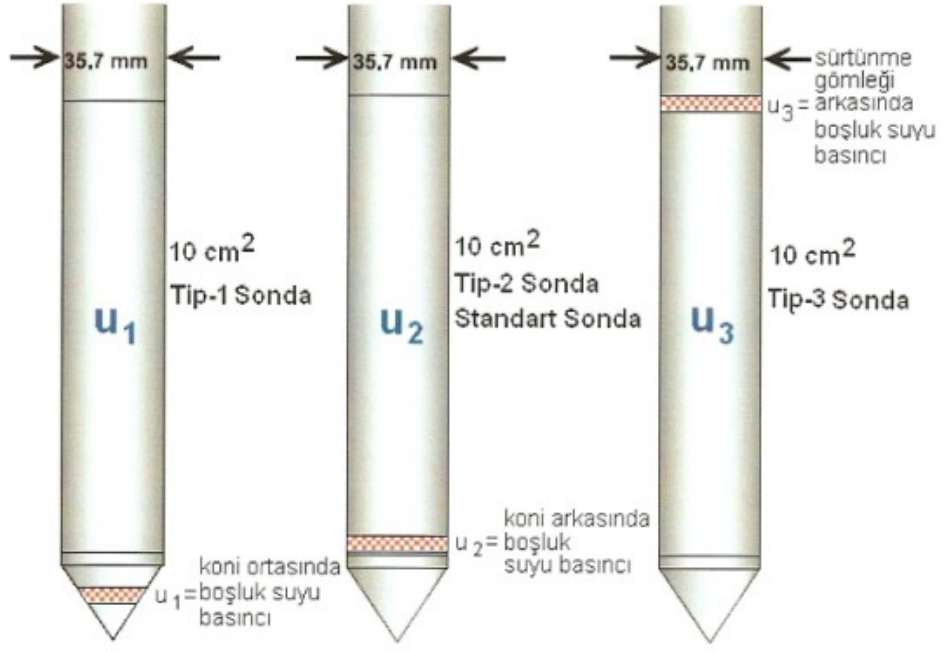
3. SÖNÜMLENME İLE ÖLÇÜM

3.1 Sönümlenme Deneyi

CPTU'da (piyezokoni) penetrasyonun herhangi bir aşamasında durulduğunda koni etrafında oluşan fazla boşluk suyu basınçları sönümlenmeye başlar. Sönümlenmenin hızı konsolidasyon katsayısına, zeminin sıkışabilirliğine ve hidrolik iletkenliğe bağlıdır.

Sönümlenme deneyi penetrasyonun durdurulmasının ardından istenilen derinlikte boşluk suyu basınçlarının (u) zamana bağlı olarak ölçümüyle gerçekleştirilir. u değişkeni filtrenin yerine göre u_1, u_2 veya u_3 şeklinde ifade edilir.

- u_1 : koni ucuna veya yüzeyine yerleştirilen filtrede ölçülen boşluk suyu basıncı
- u_2 : koninin hemen arkasında sürtünme gömleğinin altına yerleştirilen filtrede ölçülen boşluk suyu basıncı
- u_3 : sürtünme gömleğinin arkasına yerleştirilen filtrede ölçülen boşluk suyu basıncı



Şekil 3.1 : Boşluk suyu basıncı elemanı yerleri (Önalp ve diğ., 2007)

Boşluk suyu basınçlarının sönümleme oranı tijlerin kilitlenip kilitlenmediğine ve penetrasyonun durup durmadığına da bağlı olabilir. Tijler sabit tutulsa bile bunların içinde gelişen elastik deformasyon enerjisinden ve koni yükünün azalmasından dolayı çok yavaş ta olsa bir hareket oluşabilir. Söz konusu bu hareket konik ucun etrafındaki zeminde toplam gerilmeyi değiştirebilir. Bu da boşluk suyu basınçlarının zamana bağlı olan dağılımlarını etkiler.

Boşluk suyu basıncı ölçümlerinde de koni penetrasyon testinin (CPTU sönümleme testi) kullanılması çeşitli avantajlar sağlamaktadır.

Bunlar ;

- Koni penetrasyonu sırasında drenaj koşullarının ayırtlanabilmesi devam ederken drenaj durumunun belirlenebilmesi
- Hatasız koni penetrasyon direnci ölçümü (q_c)
- Doğal yer altı suyu durumunun belirlenmesi
- Zemin profilinin oluşturulması
- Geoteknik parametrelerin değerlerinin daha doğru değerlendirilebilmesi düzeltilmesi
- Akım ve konsolidasyon karakteristiklerinin (c , k) ölçülebilmesi

Tüm zeminler için sönümlenme deneyine, sönümlenmenin belli bir periyoduna veya önceden belirlenmiş bir sönümlenme oranına ulaşınca kadar devam edilir.

Koninin herhangi bir noktasında (u_1, u_2, u_3) yapılan penetrasyon boşluk suyu basıncı ölçümleri ikiye ayrılmaktadır:

1. Yerel yer altı suyu rejimi tarafından kontrol edilen doğal denge değeri (u_{w0})
2. Zemin davranışının ve koni geometrisinin fonksiyonu olan koni penetrasyonundan üretilen fazla boşluk suyu basıncı (Δu_w).

Fazla boşluk suyu basıncının zamanla çürümesi zeminin konsolidasyon katsayısı hakkında bilgi sağlamaktadır. Üretilmiş fazla boşluk suyu basıncının sönümlenmesini değerlendirmek için koni penetrasyon durdurulur ve boşluk suyu basıncının çürümesi zamana karşı kaydedilir. Boşluk suyu basıncındaki değişiklikler zamana karşı grafik üzerinde işaretlenir. Grafikteki zaman eksenini çoğunlukla logaritmiktir. Fazla boşluk suyu basıncı veya normalleştirilmiş fazla boşluk suyu basıncı çürümesi grafik üzerinde gösterilebilir.

$$U_{wt} = \frac{(u_{wt} - u_{w0})}{(u_{wi} - u_{w0})} \quad (3.1)$$

U_{wt} = t zamanda normalleştirilmiş fazla boşluk suyu basıncı

u_{wt} = t zamanda fazla boşluk suyu basıncı

u_{wi} = penetrasyon durduğundaki ($t=0$) başlangıç fazla boşluk suyu basıncı

u_{w0} = arazide dengedeki boşluk suyu basıncı

U_{wt} değeri genellikle fazla boşluk suyu basıncı sönümlenmesi tamamlandığında ve $u_{wt}=u_{w0}$ olduğunda 1 ($t=0$) ile 0 arasında değişmektedir (Robertson ve diğ., 1992a).

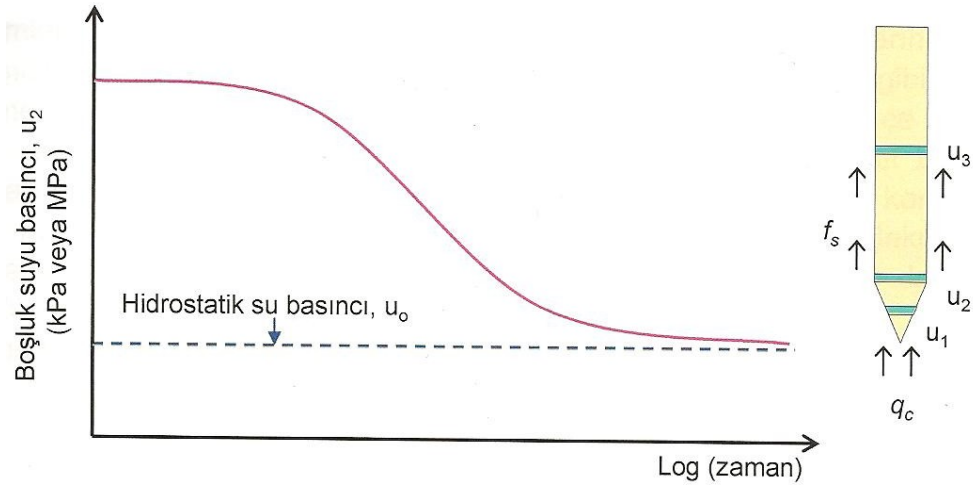
Deney genellikle boşluk sönümlenme oranının en az %50'ye ulaştığı zamana kadar sürdürülür. Denge boşluk suyu basıncını elde etmek gerekiyorsa deneye boşluk suyu basınçlarında herhangi bir değişim gözlenmediği ana kadar devam edilir. Oluşan fazla boşluk suyu basınçlarına genellikle penetrasyon boşluk suyu basıncı denir. Orta ve iri daneli kumlarda oluşan fazla boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi hızlı bir şekilde gerçekleşir. Bu tür zeminlerde boşluk suyu basıncı penetrasyonu ölçümü çoğu kez eşit veya statik denge boşluk suyu basıncına yakındır. Bu nedenle penetrasyon süreci drenajlı olabilir. Silt ve kil gibi ince daneli zeminlerde penetrasyon süreci drenajsızdır ve büyük penetrasyon boşluk suyu basıncı oluşabilir.

Boşluk suyu basınçları zamana karşı kaydedilir. Sönümlenme deney başlangıcında hızlı geliştiğinden veri toplanmasına sönümlenmenin oldukça erken safhalarında başlanmasına dikkat edilmelidir (Burns ve Mayne, 1998).

3.1.1 Tekdüze sönümlenme

Killerde yapılan sönümlenme deneyinde Tip 1 konilerinde u_1 her zaman için zamanla azalma gösterir. Buna karşın Tip 2 konilerde yumuşak killerde Δu_2 zamanla azalırken aşırı konsolide killerde önce artmakta, bir maksimum değere ulaşmakta ve tekrar hidrostatik su basıncı seviyesine doğru yönelmektedir (Sully, 1991). Tip 1 ve Tip 2 konileri Şekil.3.1’de görülmektedir.

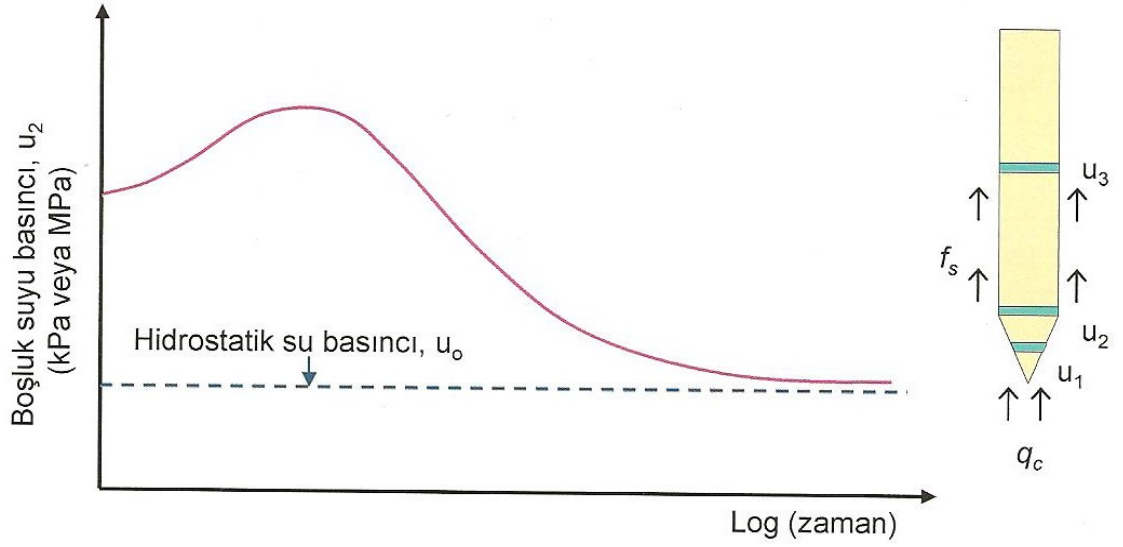
Temsili bir tek düze sönümlenme deney sonucu Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu tip sönümlenmede eğri zamana bağlı olarak devamlı bir azalma göstermekte ve hidrostatik su basıncı seviyesine kadar kararlı olarak düşmektedir.



Şekil 3.2 : Yumuşak kilde tipik tekdüze sönümlenme eğrisi (Önalp ve diğ., 2007)

3.1.2 Genleşme (Kabarma) sönümlenmesi

Birçok aşırı konsolide kil ve fisürlü ortamda yapılan sönümlenme deneylerinde Δu ’da başlangıçta zamanla bir artış olmakta ve bir doruk değere ulaşılmaktadır. Sönümlenmenin ileri aşamalarında u_w zamanla düşerek statik su seviyesine yönelmektedir. Bu davranış kabarmanın bir sonucu olduğundan bu tip sönümlenmeye kabarma sönümlenmesi denmektedir (Şekil 3.3). Bu durumda t_{50} tayini kesin olarak yapılamadığından konsolidasyon katsayısının hesaplanması da mümkün olmamaktadır (Önalp ve diğ., 2007).

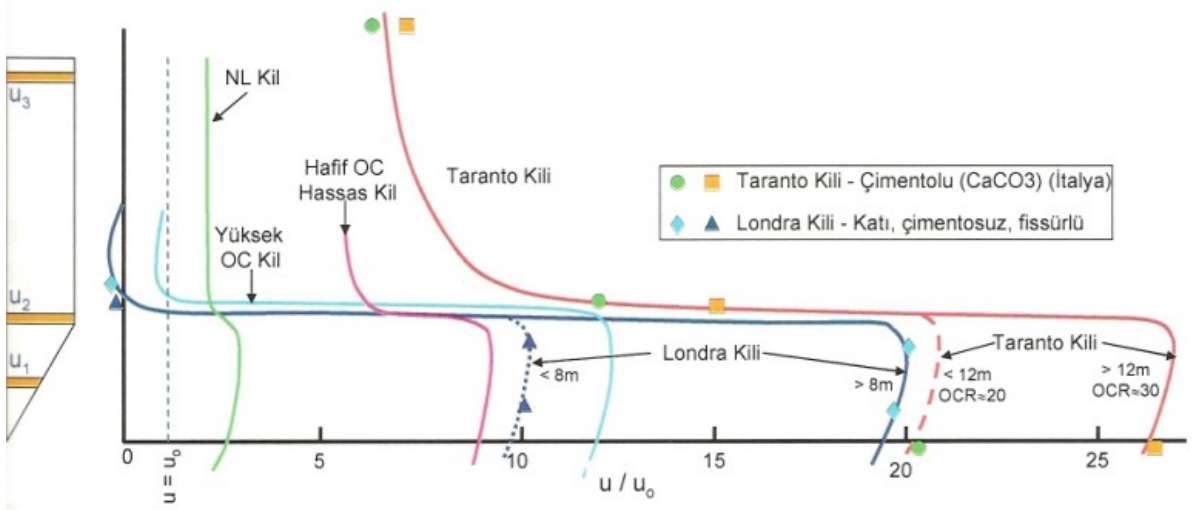


Şekil 3.3 : Aşırı konsolide kilde genişleme tipi sönümlenme eğrisi
(Önalp ve diğ., 2007)

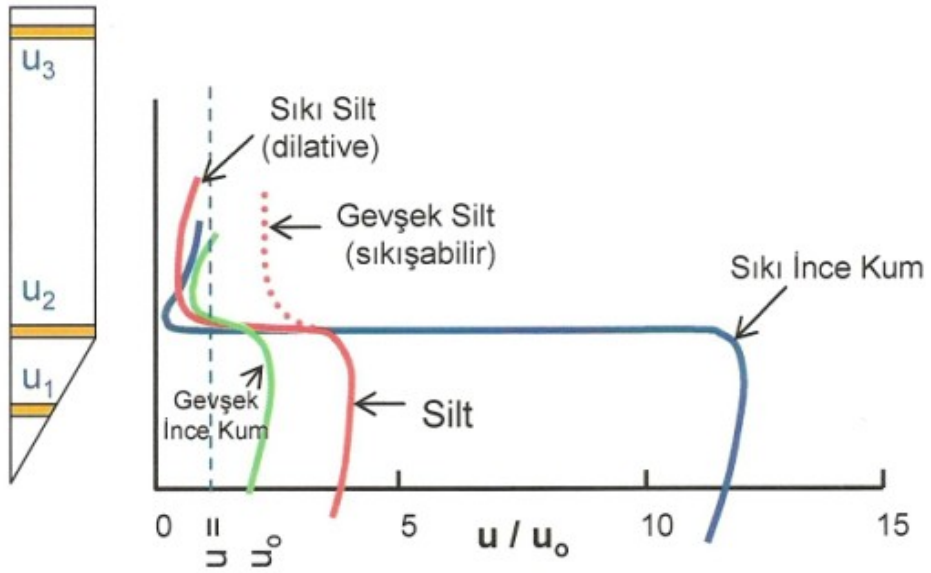
3.1.3 Sönümlenmeyi etkileyen faktörler

a) Başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımı

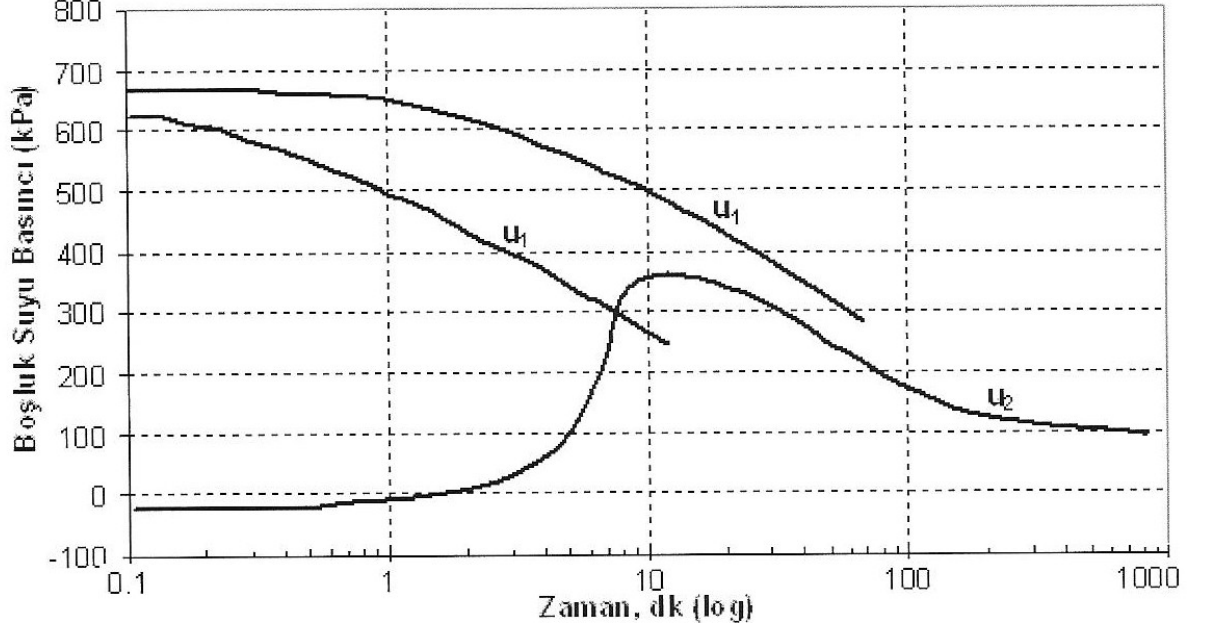
Deneyimlere göre koni etrafındaki başlangıç boşluk suyu basıncı Şekil 3.4'de gösterildiği gibi koniden uzaklaştıkça ve koni shaftı boyunca değişmektedir. Ağır derecede aşırı konsolide killerde koniden gövdeye doğru giderken oluşan boşluk suyu basıncı değerlerinde çok büyük eğimler vardır. Bu nedenle bu tür zeminlerde negatif boşluk suyu basınçları gözlenebilir. Sıkı kumlarda oluşabilecek dilatasyondan(kabarma) dolayı koni arkasında ölçülen (u_2) boşluk suyu basınçlarında negatif okumalar alınabilir(Şekil 3.5). Boşluk suyu basıncı sönümlenmesi başlamadan önce, koninin arkasındaki boşluk suyu basıncında başlangıçta artmasına yol açan yerel yeniden dağılım gerçekleşmektedir(Şekil 3.6).



Şekil 3.4 : Doygun killerde boşluk suyu basıncı dağılımı (Sully vd., 1988)



Şekil 3.5 : Silt ve kumlarda koni etrafında oluşan boşluk suyu basıncı dağılımı (Önalp ve diğ., 2007)



Şekil 3.6 : Tipik sönümlenme eğrileri, Aşırı Konsolide Gault Kili
Madingley, İngiltere (Lunne ve diğ., 1997, 220)

Teorik analizlerin laboratuvar ve arazi deneyi sonuçları ile karşılaştırılması, piyezokoni testlerinden elde edilen konsolidasyon katsayısı tahmininin güvenilirliği geliştirmek için $t=0$ zamanda başlangıç boşluk suyu basıncının (u_{wi}) belirlenmesi gerektiğini göstermiştir.

Başlangıç boşluk suyu basıncı değerinin en iyi şekilde belirlenmesi için, sönümlenme başlangıcında zemin numunesinin fonksiyonu olacak sık zaman aralığında boşluk suyu basıncı kaydı alınması esastır. Karekök zaman çiziminin lineer gösterimi u_{wi} (başlangıç fazla boşluk suyu basıncı) için güvenilir bir tahmin sağlamaktadır (Lunne ve diğ., 1997, 79).

Powell ve Quatermann'a (1997) göre; yumuşak killerde karekök zaman çiziminden belirlenen u_{wi} 'nin kullanılması normalleştirilmiş sönümlenme eğrilerinin yinelenabilirliğini önemli bir şekilde geliştirir.

b) Penetrasyon sırasında zeminde meydana gelen örselenmenin etkisi

Bu etki örselenmemiş zeminden daha düşük geçirimsizliğe sahip olan koni etrafında örselenen zemin bölgesinde penetrasyon sırasında oluşabilmektedir (Lunne ve diğ., 1997, 79).

c) Hem Yatay Hem Düşey Sönümlenmenin Önemi

Her ne kadar sönümlenmenin çoğunlukla radyal konsolidasyon katsayısı tarafından yönetildiği söylene de (Levadoux ve Baligh,1986) c_v ve c_h 'ın görelî (relatif) önemiyle ilgili zeminin anizotropisine bağılı bazı belirsizlikler olabilir(Lunne ve diğ., 1997, 79).

d) Zeminin Anizotropisi

Çoğu zeminlerde geçirimsizlik ve konsolidasyon katsayısı yatay yönde daha yüksektir. Ancak bu özellik zeminden zemine değişebilmektedir(Lunne ve diğ., 1997, 79).

3.1.4 Sönümlenme deneyinden elde edilen veriler

3.1.4.1 Zorlanma modülü (M)

Farklı zemin türleri için zeminin sıkışabilirliği efektif gerilmenin değeriyle değişebilen zorlanma modülü ile ifade edilebilir (Janbu, 1963) :

$$M = mp_a \left(\frac{\sigma_v'}{p_a} \right)^{(1-a)} \quad (3.2)$$

Burada;

m : boyutsuz modül sayısı

p_a : referans gerilmesi (100 kPa)

a : gerilme üstlüğü (aşırı konsolide yanda $a=1$, normal yüklenmiş ayakta $a=0$)

Ödometre deneyinden elde edilen zorlanma modülü ile koni uç direncinden elde edilen değer arasındaki genel ilişki aşağıdaki şekildedir:

$$M = \alpha \cdot q_c \quad (3.3)$$

Sanglerat (1972) koni uç direnci ile zorlanma modülü arasında Tablo 3.1'de verilen bağıntıyı geliştirmiştir.

Tablo 3.1 : Killi zeminler için zorlanma modülünün tayini (Sanglerat,1972)

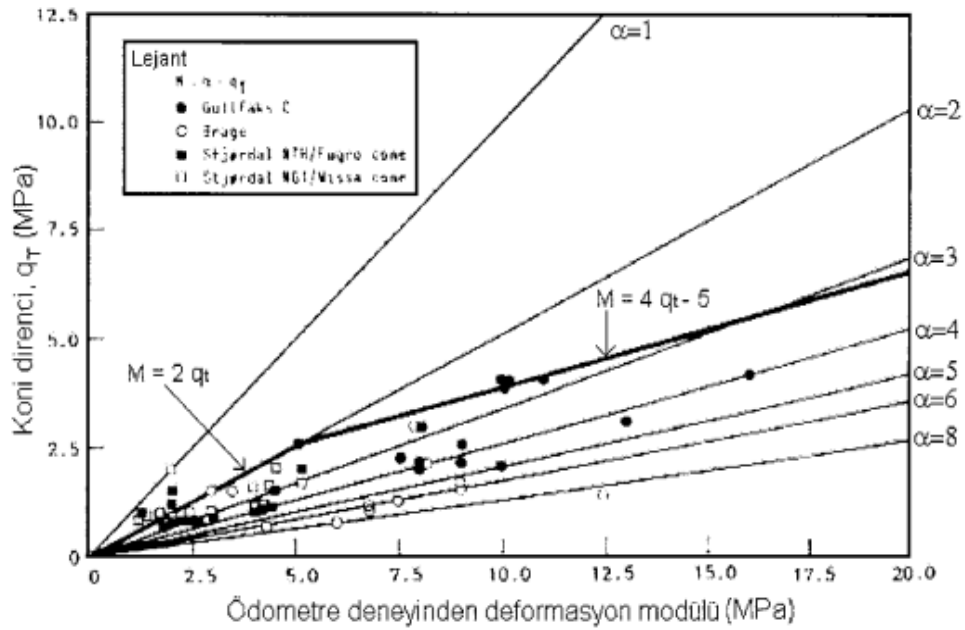
q_c (Mpa)	$M = 1 / m_v = \alpha \cdot q_c$	
$q_c < 0.7$	$3 < \alpha < 8$	Düşük plastisiteli Kil (CL)
$0.7 < q_c < 2.0$	$2 < \alpha < 5$	
$q_c > 2.0$	$1 < \alpha < 2.5$	
$q_c > 2.0$	$3 < \alpha < 6$	Düşük plastisiteli Silt (ML)
$q_c < 2.0$	$1 < \alpha < 3$	
$q_c < 2.0$	$2 < \alpha < 6$	Yüksek plastik silt ve killer (MH,CH)
$q_c < 1.2$	$2 < \alpha < 8$	Organik siltler (OL)
$q_c < 1.2$	$1.5 < \alpha < 4$	Turba ve organik killer (Pt,OH)
$50 < w < 100$	$1 < \alpha < 1.5$	
$100 < w < 200$	$0.4 < \alpha$	
$w > 200$	< 1.0	

Senneset ve diğerleri (1988) siltli zeminler için zorlama modülü ile düzeltilmiş koni uç direnci arasında doğrusal bir bağıntı elde etmişlerdir.

$$q_t < 2.5 \text{ MPa ise} \quad M = 2 \cdot q_t \quad (3.4)$$

$$2.5 < q_t < 5 \text{ MPa ise} \quad M = 4 \cdot q_t - 5 \quad (3.5)$$

Zorlanma modülü ve koni uç direnci arasındaki ilişki Şekil.3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 : Zorlanma Modülü (M) - Düzeltilmiş koni uç direnci (q_t) (Senneset vd 1988)

Senneset ve diğeri (1988) aşırı konsolide durumlar için zorlanma modülünü net koni direnci ile doğrusal bir enterpolasyonla ilişkilendirmişlerdir.

$$M_p = \alpha_p \cdot q_n = \alpha_p \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \quad (3.6)$$

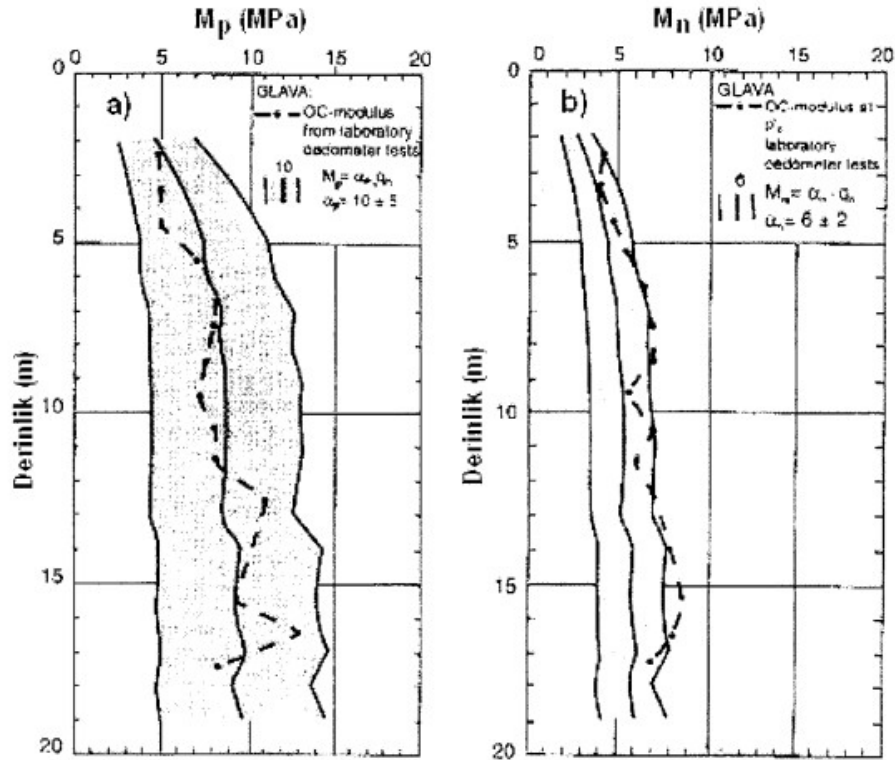
Burada α_p 5 ile 15 arasında değişir. σ_{v0} toplam eşdeğer örtü yükü, q_t düzeltilmiş koni uç direncidir.

Senneset ve diğeri (1988) normal konsolide durum için de aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir:

$$M_n = \alpha_n \cdot q_n = \alpha_n \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \quad (3.7)$$

Burada bir çok kil için $\alpha_n = 6 \pm 2$ 'dir.

Senneset ve diğ. (1988) Glava killeri için, sıkışma eğrisinin aşırı konsolide kesimi için zorlanma modülünün Şekil 3.8a'da gösterildiği gibi $10q_n \pm 5q_n$ olmasına karşın normal yüklenmiş kesimde Şekil 3.8.b'de görüleceği gibi $8q_n$ üst limiti dolayında olacağını ve CPT verilerinin kullanımı ile killerde sıkışma modüllerinin sağlıklı tahmin edilebileceğini bildirmişlerdir.

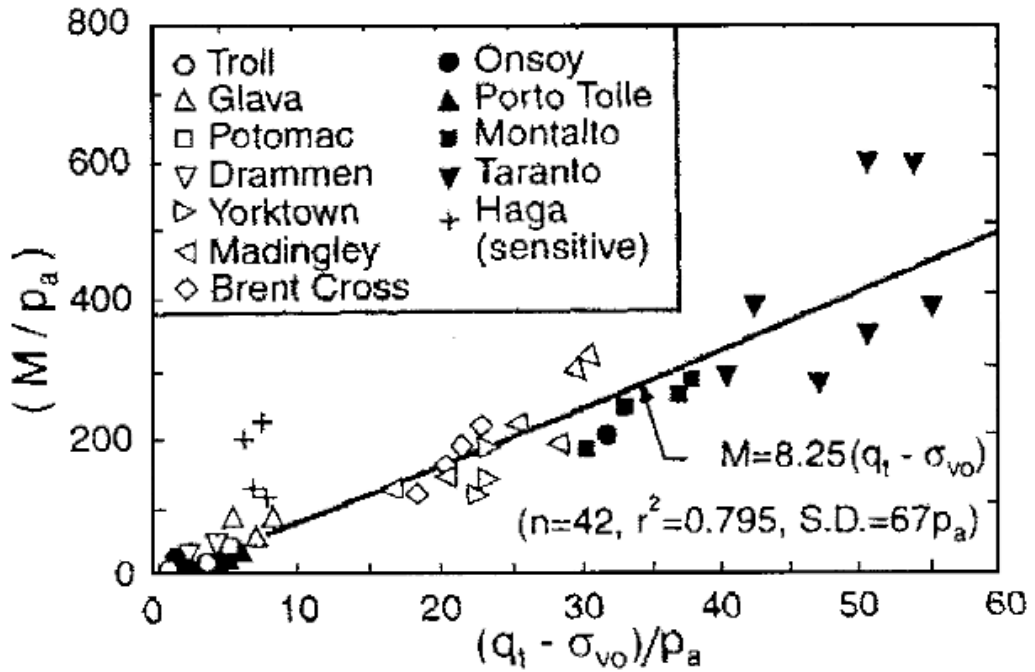


Şekil 3.8 : Zorlanma modülünün değişimi (Senneset vd. 1989)

Kulhawy ve Mayne (1990) zorlanma modülü (M) ve net koni uç direnci ($q_t - \sigma_{v0}$) arasındaki ilişki üzerinde yaptıkları çalışmalar sonucu farklı zemin türleri için aşağıdaki ilişkiyi önermişlerdir:

$$M = 8.25 \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \quad (3.8)$$

Bazı durumlarda bu ilişkiler iyi sonuçlar verse de, yerel deneyimler farklı zemin tiplerinde uç direnci ile zorlanma modülü arasındaki korelasyonun daha da geliştirilmesi için önem taşımaktadır. Şekil 3.9 zorlanma modülü ile net koni direnci arasında genel bir ilişki sunmaktadır.



Şekil 3.9 : Zorlanma modülü ile net koni direnci arasındaki ilişki
(Kulhawy ve Mayne, 1990)

Senneset ve diğ. (1988) ($\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v$) gerilme aralığında, ortalama zorlanma modülünün hesaplanması için aşağıdaki ilişkiyi önermişlerdir:

$$M_{av} = M \sqrt{\frac{\sigma'_{v0} + 0.5\Delta\sigma'_v}{\sigma'_{v0}}} \quad (3.9)$$

3.1.4.2 Rijitlik indisi (I_r)

Killer için drenajsız rijitlik indisi kayma modülü (G)'nin kayma direnci (S_u)'ya oranıdır. Farklı yollardan elde edilebilir:

- Üç eksenli deneyde gerilme şekil değiştirme eğrisi (Şekil 3.10)
- Presiyometre deneyi
- Ampirik korelasyonlar

Drenajsız koşullarda yapılan üç eksenli deneyde rijitlik indisi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$I_r = \frac{E}{2(1+\nu)S_u} = \frac{G}{S_u} \quad (3.10)$$

Burada;

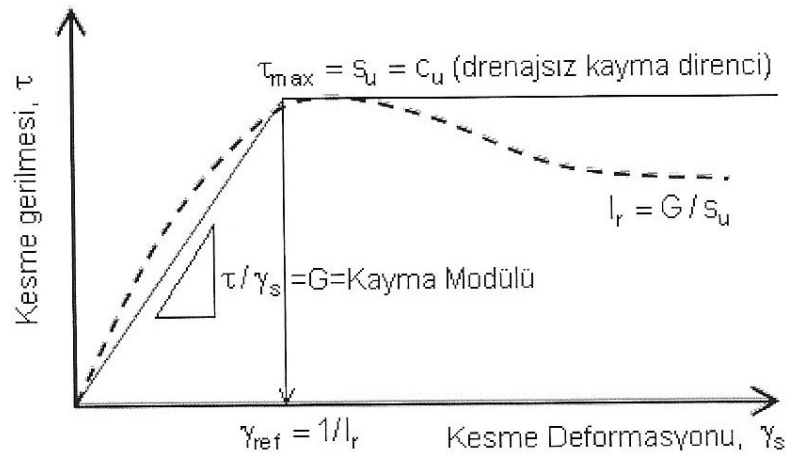
E : Eşdeğer Young Modülü [$2G(1+\nu)$]

G : Kayma Modülü

ν : Poisson Oranı (drenajsız durumda $\nu = 0.5$)

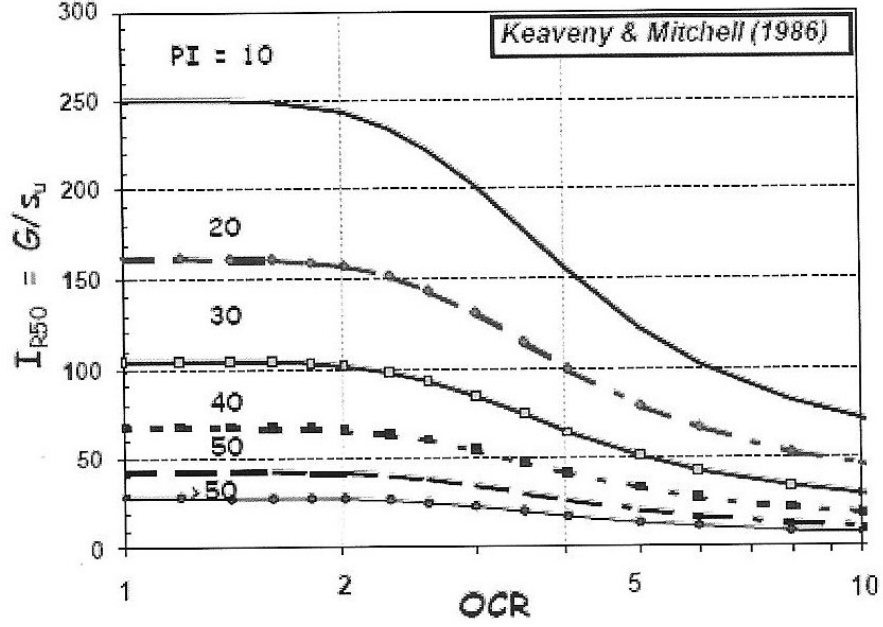
S_u : Drenajsız Kayma Direnci

Şekilde $\sigma - \varepsilon$ diyagramı yerine kesme kutusunda gösterildiği gibi $\tau - \gamma$ eksenlerinde verilmiştir. Bu durumda $\nu = 0.5$ alınrsa eksenler $\tau = \sigma/2$ ve $\gamma = \varepsilon/2$ olarak düzenlenebilir. Aynı şekilde kayma modülü de $G = E/3$ olacaktır (Önalp ve diğ., 2007).



Şekil 3.10 : Rijitlik indisinin tayini (Önalp ve diğ., 2007)

Anizotrop konsolidasyonlu üç eksenli sıkışma deney verisine dayanan bir bağıntı Şekil 3.11 de gösterildiği gibi I_r 'yi OCR ve I_p terimleriyle birlikte irdeleyerek vermektedir(Keaveny ve Mitchell,1986).



Şekil 3.11 : Rijitlik indisinin OCR ve I_p 'den tayini (Keaveny ve Mitchell, 1986)

Programlamada kullanım açısından yaklaşık ampirik bağıntı:

$$I_r \approx \frac{\exp\left[\frac{137 - PI}{23}\right]}{\left[1 + \ln\left\{1 + \frac{(OCR - 1)^{3.2}}{26}\right\}\right]^{0.8}} \quad (3.11)$$

Bazı araştırmacılar da rijitlik indisinin CPTU verilerinden doğrudan tayini için aşağıdaki formülün kullanılmasını önermişlerdir. (Mayne,2001):

$$I_r = \exp\left[\left(\frac{1.5}{M} + 2.925\right)\left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{q_t - u_2}\right) - 2.925\right] \quad (3.12)$$

3.1.4.3 Akım ve konsolidasyon özellikleri

Zeminin akım ve konsolidasyon karakteristikleri, genellikle konsolidasyon katsayısı (c) ve hidrolik iletkenlik veya permeabilite (k) bakımından tarif edilir. Bunlar birbirine bağlı bir formülle ifade edilir:

$$c = k \frac{M}{\rho_w} \quad (3.13)$$

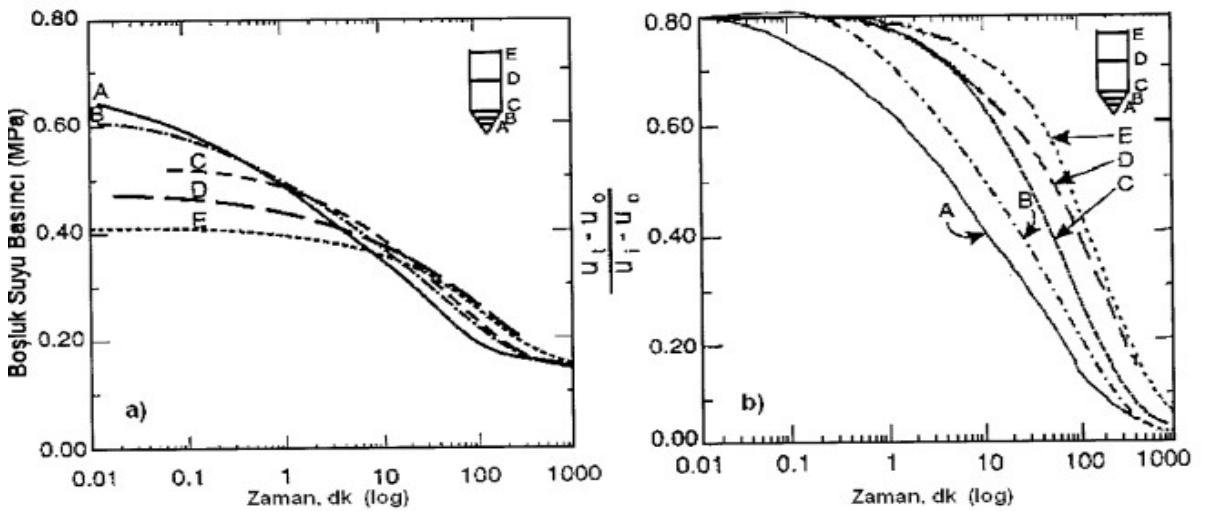
Burada M; problem modeli ilgili zorlanma modülü

Ancak, c ve k geoteknik mühendisliğinde ölçümü zor olan parametreler arasındadır. Zeminin anizotropisinden dolayı hem c hem de k düşey(c_v, k_v) ve yatay(c_h, k_h) yönde farklı değerlere sahiptirler. İlgili tasarım değerleri drenaj ve yükleme yönüne bağlıdır(Lunne ve diğ., 1997, 74-75).

a) Konsolidasyon katsayısı

Konsolidasyon parametrelerinin oranına, piyezokoni deneyinde ilerlemenin durdurulmasıyla, sönümlenmenin ölçümü veya boşluk suyu basınçlarının zamana göre azalmasının izlenmesiyle değer biçilebilir. Şekil 3.12a'da yumuşak kil için logaritmik zaman ölçeğinde çizilmiş tipik sönümlenme eğrisi gösterilmektedir. Sonuçlar filtrenin yerine göre değişiklik göstermektedir.

Şekil 3.12a'daki sonuçlar normalleştirilerek Şekil 3.12b'de yeniden çizilmiştir.



Şekil 3.12 : Bothkennar deney alanından sönümlenme deneyi sonuçları

(Lunne ve diğ., 1997, 76)

Son 10-15 yıl içinde teorik ve yarı ampirik çözümler, boşluk suyu basıncı sönümleme verilerinden konsolidasyon katsayısını elde etmek için geliştirilmiştir.

Torstensson(1975,1977) boşluk genişmesi teorisine dayanarak bir model geliştirmiştir. Başlangıç boşluk suyu basıncı küresel veya silindirik boşluk genişlemesi teorisi ve elasto-plastik zemin modeli kabulüne göre hesaplanmıştır. Torstensson daha sonra boşluk suyu basıncı sönümlemesini hesaplamak için lineer birleştirilmemiş (*uncoupled*) tek boyutlu konsolidasyon teorisini kullanmıştır ve konsolidasyon katsayısının %50 sönümde aşağıdaki formülle değerlendirilmesi gerektiğini söylemektedir.

$$c = \frac{T_{50}}{t_{50}} r_0^2 \quad (3.14)$$

T_{50} : teorik çözümlerden bulunan zaman faktörü

t_{50} : %50 sönümlenme için geçen zaman

r_0 : penetrometre yarıçapı(silindirik model) veya küresel model için eşdeğer penetrometre yarıçapı

Uygun model seçimi gözenekli (poroz) elemanın konumuna bağlıdır. Filtre elemanı konik ucun herhangi bir yerinde ise küresel çözümler çok daha uygun olacaktır. Eğer filtre silindirik gövde üzerinde ve koninin uzağında yer alıyorsa, silindirik çözümler uygun olacaktır.

Levadoux ve Baligh (1986) , rijitlik indisi $I_r=500$ ile normal konsolide Boston Mavi Kilinin başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımını tahmin etmek için deformasyon izi metodunu kullanmışlardır. Sonlu eleman metodu sonraki birleştirilmiş ve bağımsız lineer izotrop konsolidasyon analizleri için kullanılmıştır.

Levadoux ve Baligh (1986)'in çalışmasının bazı önemli sonuçları vardır:

- Basit birleştirilmemiş çözümler sönümlenme sürecinin uygun doğru tahmin edilmesini sağlamaktadır.
- Sönümlenmenin %50'den az olduğu durumlar için konsolidasyon ağırlıklı olarak yeniden sıkışma modunda sürmektedir.

- Sondanın çevresindeki fazla boşluk suyu basıncının başlangıçtaki dağılımının sönümleme süreci üzerinde önemli bir etkisi vardır.
- Sönümlenme çoğunlukla yatay yöndedir.

Houlsby ve Teh (1988) birim deformasyon izi metodu ve büyük deformasyonlu sonlu eleman analizini birleştirerek CPTU’da aşırı boşluk suyu basınçlarının başlangıç dağılımını hesaplamak için bir başka yöntem geliştirmişlerdir. Bu metot Von Mises’in ideal elastik- tam plastik yaklaşımını kullanmaktadır. Terzaghi-Rendulic ayrık(*uncoupled*) konsolidasyon teorisini kullanan sonlu farklar metodu ise aşırı boşluk suyu basıncı dağılımının analizi için kullanılmıştır. Zeminin rijitliğinin etkisini hesaba katarak Houlsby ve Teh (1988) değiştirilmiş zaman faktörünü (T^*) Tablo 3.2’de verildiği gibi açıklamışlardır.

Tablo 3.2 : Değiştirilmiş zaman faktörü (T^*)(Houlsby ve Teh, 1988)

Konsolidasyon Yüzdesi	Filtrenin Yeri			
	u_1	u_2	Koni tabanından 5 çap yukarıda	Koni tabanından 10 çap yukarıda
20	0.014	0.038	0.294	0.378
30	0.032	0.078	0.503	0.662
40	0.063	0.142	0.756	0.995
50	0.118	0.245	1.110	1.458
60	0.226	0.439	1.650	2.139
70	0.463	0.804	2.430	3.283
80	1.040	1.600	4.100	5.240

$$T^* = \frac{(c_h \cdot t)}{(r^2 \cdot \sqrt{I_r})} \quad (3.15)$$

c_h : koni eksenine dik yöndeki konsolidasyon katsayısı, genellikle yatay

r : koninin yarıçapı, genellikle 35.7 mm

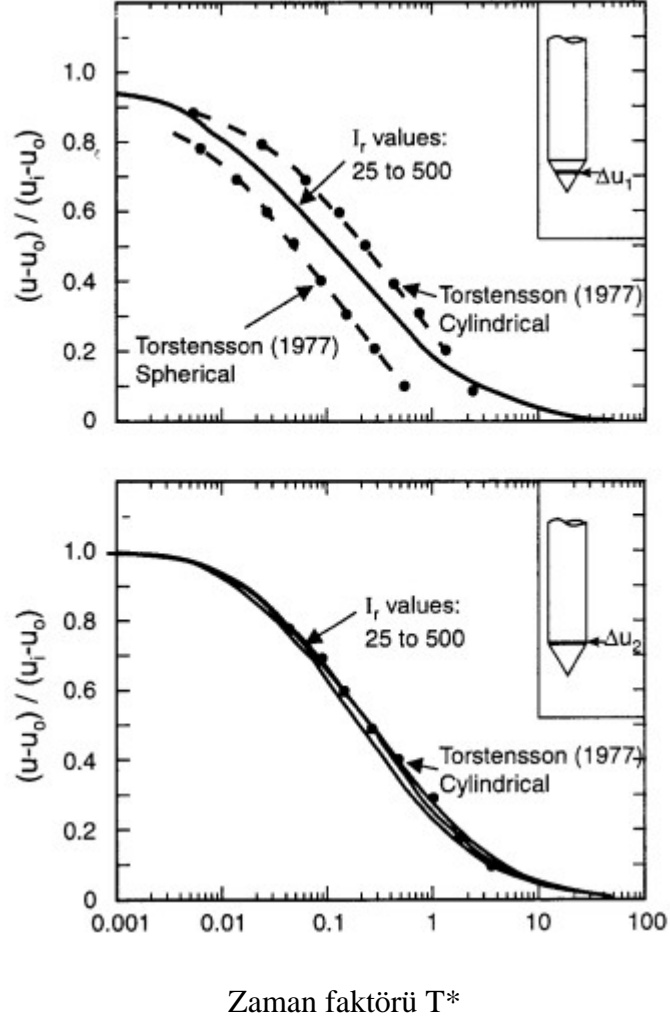
I_r : rijitlik indisi, G/S_u

G : kayma modülü

S_u : drenajsız kayma direnci

Yukarıdaki çözümler elasto-plastik zemin modellerine dayanmaktadır ve bu nedenle rijitlik indisi normalleştirilmiş eşdeğer elastik rijitliği ifade etmektedir.

Şekil 3.13 Houlby ve Teh (1988) tarafından türetilmiş T^* değerlerini göstermekte ve koni ucu ve hemen arkasında normalize edilmiş sönümlenme eğrileri Torstensson(1977)'in değerleri ile karşılaştırılmaktadır.

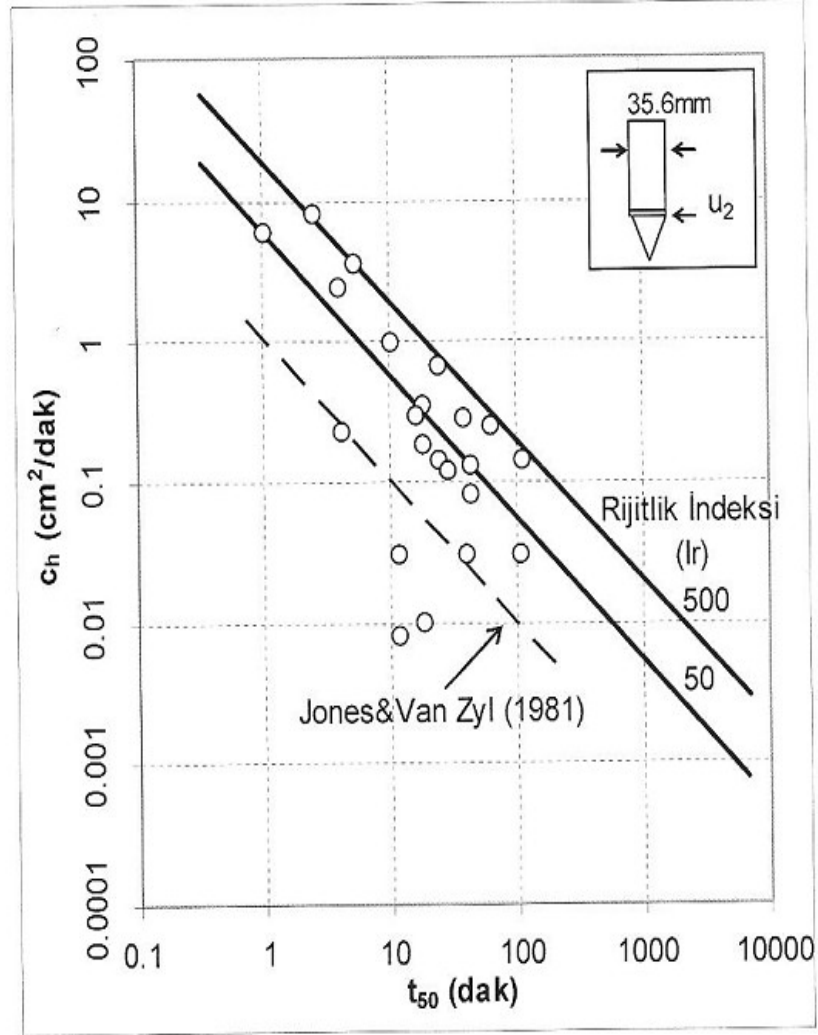


Şekil 3.13 : Teorik çözümlerle normalize edilmiş sönümlenme eğrileri
(Teh ve Houlby, 1991)

Robertson ve diğerleri (1992b) konsolidasyon katsayısını tahmin etmek için laboratuvar deneylerinden ve arazi gözlemlerinden elde edilen referans değerleri ile Houlby ve Teh (1988)'in çözümlerini kullanarak piyezokoni deneyinden elde edilen sönümlenme verilerini gözden geçirmişlerdir. Bunun sonucunda Houlby ve Teh (1988)'in çözümlerinin c_h için kabul edilebilir değerler sağladığı görülmektedir.

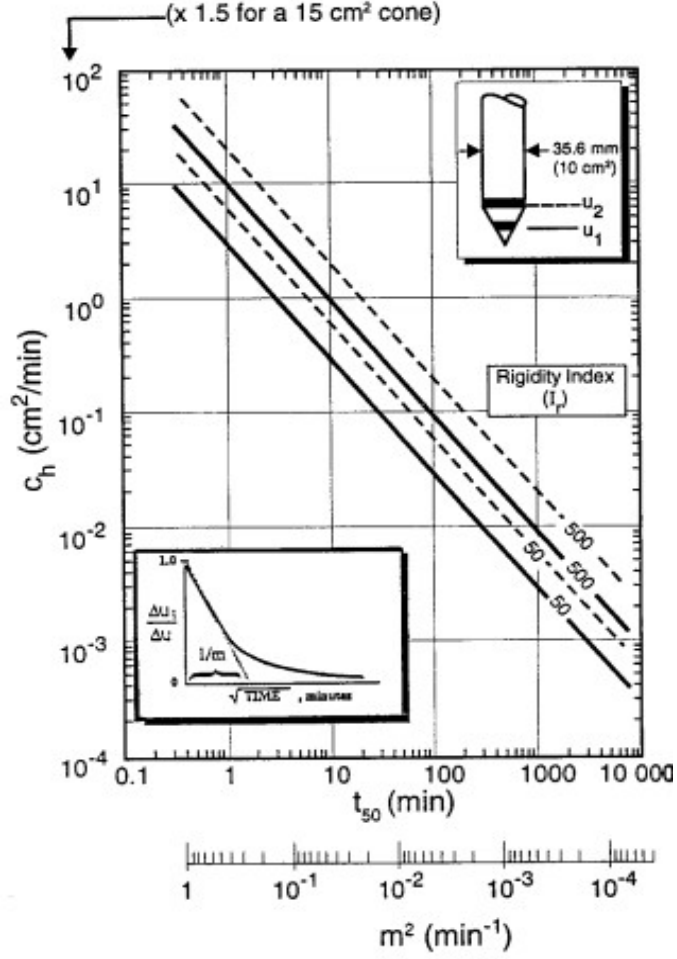
Sonuçlar farklı filtre yerlerinden elde edilen boşluk suyu basıncı verileri için değerlendirilmiştir ve en az saçılımlı dağılım koninin hemen üzerinde (u_2) elde

edilmiştir. Robertson ve diğerleri tarafından sunulan bazı sonuçlar Şekil 3.14'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14 : Ortalama laboratuvar c_h değerleri ve CPTU sonuçları
(Robertson vd. , 1992b)

Powell ve Quaternmann'ın(1997) yumuşak killerde farklı filtre konumlarına göre normalleştirilmiş sönümlenme eğrileri biçim olarak Teh ve Houlsby'in kilerine oldukça yakındır. Ancak, konumları göreceli olarak farklıdır. Teh ve Houlsby yaklaşımı kullanılarak çıkartılan c_h değerleri filtre yeri u_1 ve u_2 için birbirlerine çok yakındır, ancak u_3 için diğerlerinde düşük çıkmaktadır.



Şekil 3.15 : c_h 'ın t_{50} 'den tayini (Robertson vd.,1992b)

Boşluk suyu basıncı sönümlenmesi karekök zaman ölçeğinde çizilirse, lineer kısmın eğimi m Şekil 3.15'de gösterildiği gibidir. Böylece, c_h aşağıdaki eşitlik ile değerlendirilebilir. m 'nin değerleri Tablo 3.3'de verilmiştir.

$$c_h = \left(\frac{m}{M} \right)^2 \cdot \sqrt{I_r} \cdot r^2 \quad (3.16)$$

Burada, M : verilen sonda geometrisi ve filtrenin yeri için teorik eğrinin eğim karşılığı
 m : başlangıçta ölçülen lineer sönümlenme eğrisinin eğimi (karekök zaman)

Tablo 3.3 : \sqrt{z} zaman çiziminde sönümlenme eğrilerinin eğimi (M),(Teh,1987)

Filtre Yeri →	u_1	u_2	Koniden 5 çap yukarıda u_3
Sönümlenme eğrisinin eğimi (m)	1,63	1,15	0.62

Kısa sönümleme deneyi için ve/veya başlangıç fazla boşluk suyu basıncının(u_{wi}) belirsiz olduğu yerlerde karekök zaman metodunun kullanılması yararlı olmaktadır.

Konsolidasyon katsayısını tahmin etmek için tavsiye edilen işlem, koni arkasına(u_2) takılan piyezometreden elde edilen sönümleme verilerinin kullanılmasıdır. Bununla birlikte, her ne kadar verileri u_2 filtresine göre daha az tutarlı olsa da diğer filtre yerleri (u_1, u_3) de kullanılabilir.

Değerin ölçüm ve hesaplamasında önerilen yol aşağıdaki gibidir:

- log-zaman veya karekök zamanda arttırılmış ölçekte sönümlemenin ilk kısımlarının (%10'dan daha az sönüm) çizimi yapılır ve başlangıç fazla boşluk suyu basıncı(u_{w0}) tayin edilir.
- Arazideki yer altı su seviyesinden u_{w0} belirlenir.
- Normalize edilmiş fazla boşluk suyu basıncı

$$U_w = \frac{(u_{wt} - u_{w0})}{(u_{wi} - u_{w0})}$$

karekök veya log-zaman ölçeğinde çizilir.

- t_{50} %50 sönüme göre belirlenir
- c_h 'ı tahmin etmek için Şekil 3.15'deki eğriler ve t_{50} kullanılır. Kabul edilebilir doğrulukta veri yoksa, Şekil 3.15'deki aralığın arasındaki ortalama rijitlik indisi(I_r) kullanılır.
- t_{50} 'nin belirlenmesi için yapılan sönümleme yeterince sürmemişse eğim, Şekil 3.15'deki karekök zaman ölçeği kullanılarak çizilecek olan grafikten sönümleme eğrisinin başlangıç kısmındaki doğrusal bölümden belirlenir ve c_h tahmin edilir(Lunne ve diğ., 1997, 80)

Deneyimler, bu prosedüre göre bulunan c_h 'ın değerinin gerçeğin \pm yarısı kadar bir değerde bulunmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Düşey konsolidasyon katsayısının kaba tahmini ise Çizelge 3.4'de verilen düşey ve yatay yöndeki geçirimsizlik oranı kullanılarak sağlanabilir.

$$c_v = k_v \frac{M}{\rho_w} \quad (3.17)$$

$$c_h = k_h \frac{M}{\rho_w} \quad (3.18)$$

b) Hidrolik iletkenlik

Balig ve Levadoux (1980) yatay konsolidasyon katsayısının aşağıdaki ifade ile tahmin edilmesini önermişlerdir ;

$$k_h = \frac{\rho_w}{2.3\sigma'_{v0}} RR.c_h \quad (3.19)$$

Burada RR (*compression ratio in overconsolidated range:c_r*) : aşırı konsolide aralıktaki sıkışma oranıdır ve değerleri $0.5 \times 10^{-2} < RR < 2 \times 10^{-2}$ arasında değişir.

Zeminin anizotrop özelliğinden dolayı yatay hidrolik iletkenlik (k_h) düşey hidrolik iletkenliğe (k_v) göre daha büyüktür. Bu nedenle, çoğunlukla yatay konsolidasyon katsayısı düşey konsolidasyon katsayısından daha büyüktür ($c_h > c_v$). Koni çevresinde konsolidasyonu c_h 'ın yönettiği belirtilmiştir. Zemin izotrop varsayılırsa (burada; $m_h = m_v$) aşağıdaki denklem kullanılır:

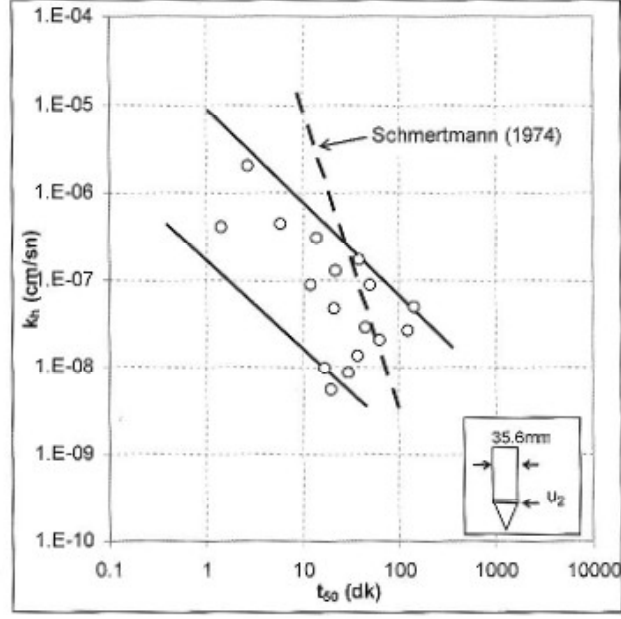
$$c_v = c_h \frac{k_v}{k_h} \quad (3.20)$$

Numune boyutu etkisi, numune örselenmesi ve numunelerde bulunan fisür ve çatlaklar sebebiyle zeminin arazi anizotropisini laboratuvarında belirlemek oldukça zordur. Bu sebeple c_v 'nin belirlenmesi için k_v/k_h değerleri Çizelge 3.4'den de alınabilir.

Çizelge 3.4 : Killerin hidrolik iletkenlik oranı (k_h / k_v) (Jamiołkowski vd.,1985)

Kilin Doğası	k_h / k_v
Tabakalanma yok	1 - 1.5
Hafif tabakalanma, arada sırada devamsız merccekler ve yüksek geçirimli malzeme tabakaları içeren çökel killer	2 - 4
Tabakalı killer ile gömülü ve çok veya az süreklı geçirimli tabakalar içeren diğer birikintiler	3 - 15

Robertson ve diğ.(1992a) Şekil 3.16'da gösterildiği gibi sönümlenme verileri ile laboratuvarında elde edilen k_h değerleri arasındaki ilişkiyi özetlemişlerdir. Bu şekil c_h 'ın t_{50} 'den tayini için de kullanılabilir.



Şekil 3.16 : 10 cm²'lik piyezokonide k_h'ın bulunması (Robertson vd.,1992a)

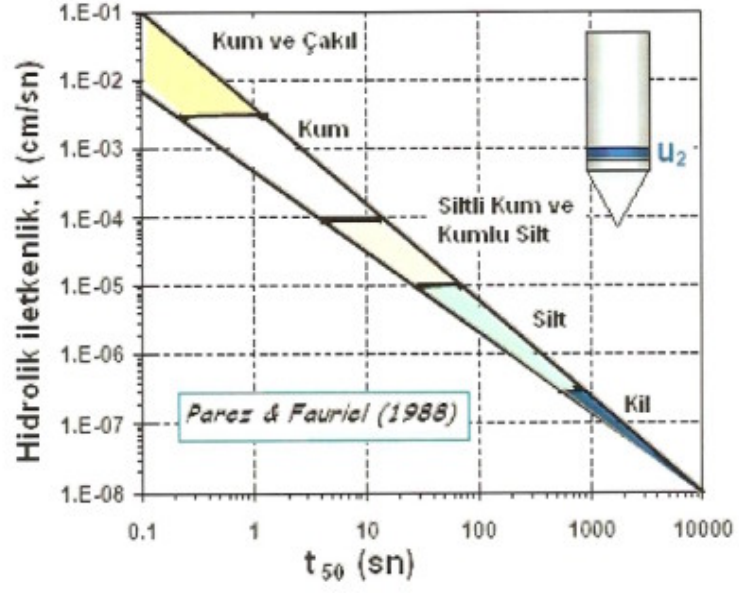
Zeminlerin hidrolik iletkenliği ayrıca Çizelge 3.5'de gösterildiği gibi zemin CPTU'daki davranışı tiplerinden tahmin edilebilir.

Çizelge 3.5 : Robertson vd. 1986 ve 1990 CPT zemin davranışı tiplerinden hidrolik iletkenlik tahmini

Bölge	Zemin Davranış Tipi (Robertson ve diğ. 1986)	k(m/sn)	Bölge	Zemin Davranış Tipi (Robertson,1990)	k(m/sn)
1	Hassas ve ince daneli	3x10 ⁻⁹ -3x10 ⁻⁸	1	Hassas ve ince daneli	3x10 ⁻⁹ -3x10 ⁻⁸
2	Organik zemin	1x10 ⁻⁸ -1x10 ⁻⁶	2	Organik zemin	1x10 ⁻⁸ -1x10 ⁻⁶
3	Kil	1x10 ⁻¹⁰ -1x10 ⁻⁹	3	Kil	1x10 ⁻¹⁰ -1x10 ⁻⁹
4	Siltli kil-kil	1x10 ⁻⁹ -1x10 ⁻⁸	4	Siltli karışımlar	3x10 ⁻⁹ -1x10 ⁻⁸
5	Killi silt- siltli kil	1x10 ⁻⁸ -1x10 ⁻⁷	5	Kum karışımları	1x10 ⁻⁷ -1x10 ⁻⁶
6	Kumlu silt-killi silt	1x10 ⁻⁷ -1x10 ⁻⁶	6	Kumlar	1x10 ⁻⁵ -1x10 ⁻³
7	Siltli kum- kumlu silt	1x10 ⁻⁵ -1x10 ⁻⁶	7	Çakıllı kum-kum	1x10 ⁻³ -1
8	Kum-siltli kum	1x10 ⁻⁵ -1x10 ⁻⁴	8	*Çok katı kum- killi kum	1x10 ⁻⁸ -1x10 ⁻⁶
9	Kum	1x10 ⁻⁴ -1x10 ⁻³	9	*Çok katı ince daneli	1x10 ⁻⁹ -1x10 ⁻⁷
10	Çakıllı kum-kum	1x10 ⁻³ -1			
11	*Çok katı ince daneli	1x10 ⁻⁹ -1x10 ⁻⁷			
12	*Çok sıkı kum-killi kum	1x10 ⁻⁶ -1x10 ⁻⁵			

Şekil 3.17 Tip 2 piyezokoni için (u₂) t₅₀ okuması ile geçirimsizliği değerlendirmek için kullanılır. Ortalama ilişki aşağıdaki şekildedir (Parez ve Fauriel,1988) :

$$k = \frac{1}{(251t_{50})^{1.25}} (cm/s) \quad (3.21)$$

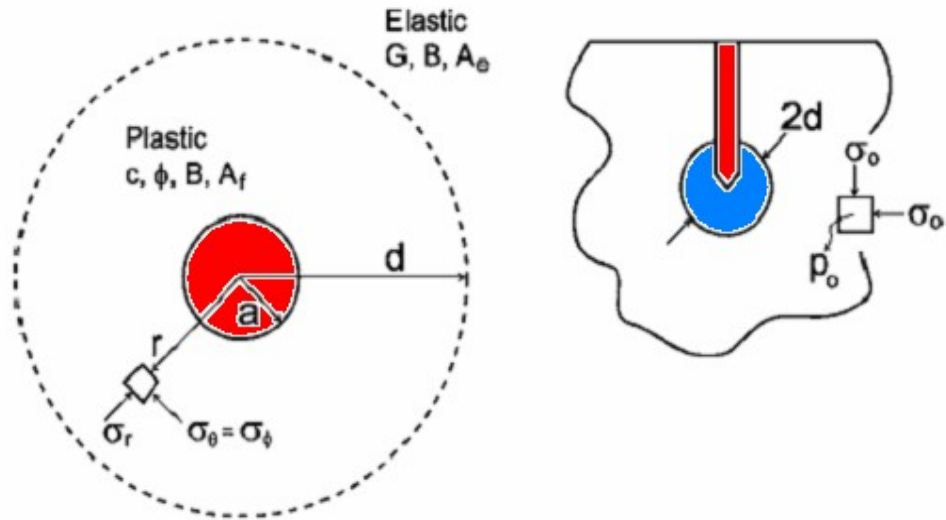


Şekil 3.17 : Tek düze tipte sönümlenme eğrisinde t_{50} değerinden k 'nın tayini (Perez ve Fauriel,1988)

4. SÖNÜMLENME EĞRİLERİ

4.1 Eğrilerin Modellenmesi

Arazi CPTU sönümlenme eğrilerinin modellenmesi konusunda Elsworth ve diğ. (2006) bir boşluk genişmesi modeli önermiştir. Bu modelde boşluk suyu basınçlarının artışı izotrop ve deviatörük gerilmelerin etkisinde drenajsız kayma direnci C_u , kayma modülü G ve Skempton A parametresi ile tanımlanmaktadır.



Şekil 4.1 : Boşluk geometrisi modeli (Elsworth ve diğ.,2006)

Burada a boşluğun yarıçapı, σ_o toplam gerilme, u_{w0} başlangıç boşluk suyu basıncı ve σ_r r uzaklıktaki radyal gerilmeyi göstermektedir.

Şekil 4.1'de penetrasyon sonucu mavi bölgede drenajsız yenilen zeminde boşluk suyu basıncı artışı aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir.

$$\delta u_w = u_w - u_{w0} = \frac{4}{3} \zeta \left[\left(1 + \ln \frac{G}{\zeta} \right) - \frac{3}{2} (1 - Af) + 3 \ln \frac{a}{r} \right] \quad (4.1)$$

$r=a$ yarıçapındaki boşluğun etrafında $d = a\left(\frac{G}{\zeta}\right)^{1/3}$ şeklinde tanımlanmakta elastik bölge $(a < r < a\left(\frac{G}{\zeta}\right)^{1/3})$ içinde sıfır alınmaktadır. Penetrasyonun durmasını izleyerek problem sönümleme evresine geçmekte ve bir “difüzyon” problemine dönüştüğünden denklem

$$\kappa \left[\frac{\partial^2 u_w}{\partial r^2} + \frac{2\partial u_w}{r\partial r} \right] = \frac{\partial u_w}{\partial t} \quad (4.2)$$

biçiminde belirmektedir.

Hidrolik sönümleme katsayısı κ yaklaşık olarak konsolidasyon katsayısı c_v ' ye eşittir. Sönümleme denklemini

$$\frac{\partial^2 U_D}{\partial r_D^2} + \frac{2\partial U_D}{r_D \partial r_D} = \frac{\partial U_D}{\partial t_D} \quad (4.3)$$

olarak yazalım. Bu denklemde D alt indisi boyutsuz anlamına gelmektedir.

Burada;

$$U_D = (u_w - u_{w0})/C_u \quad (4.4)$$

$$t_D = \kappa t / a^2 \quad (4.5)$$

$$r_D = r/a \quad (4.6)$$

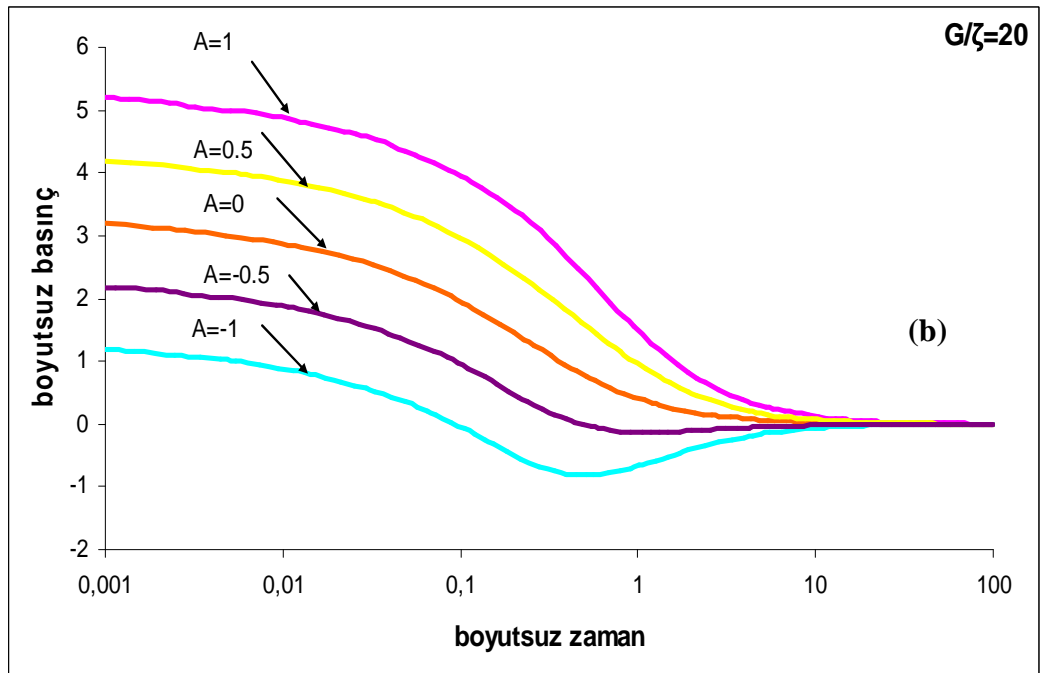
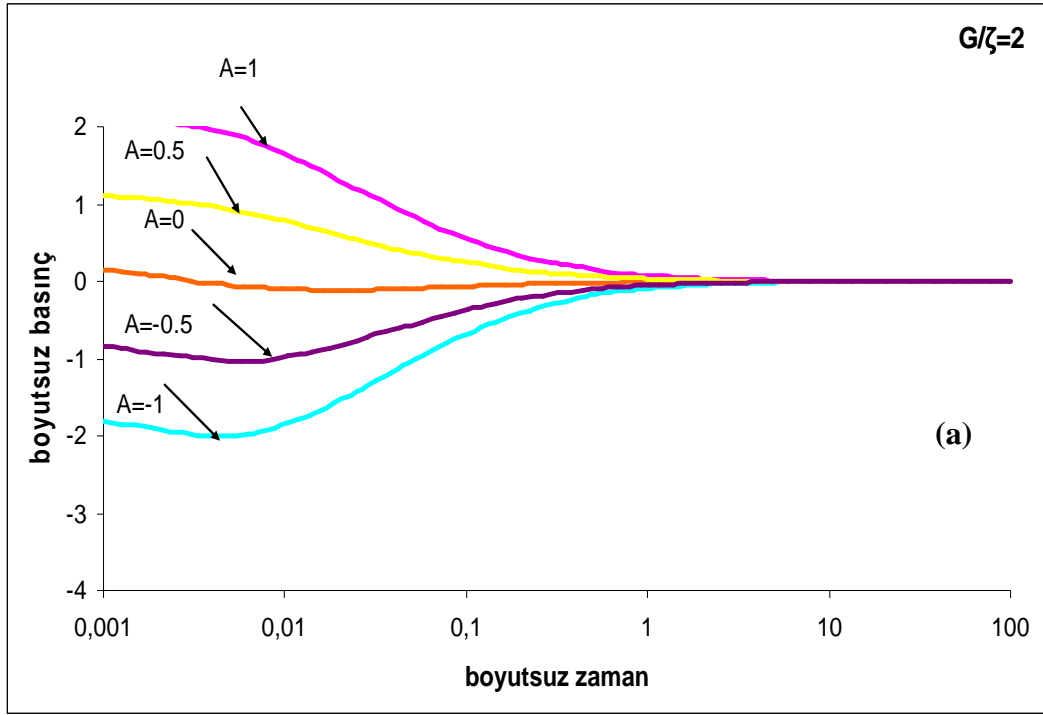
biçiminde verilmekte olup ;

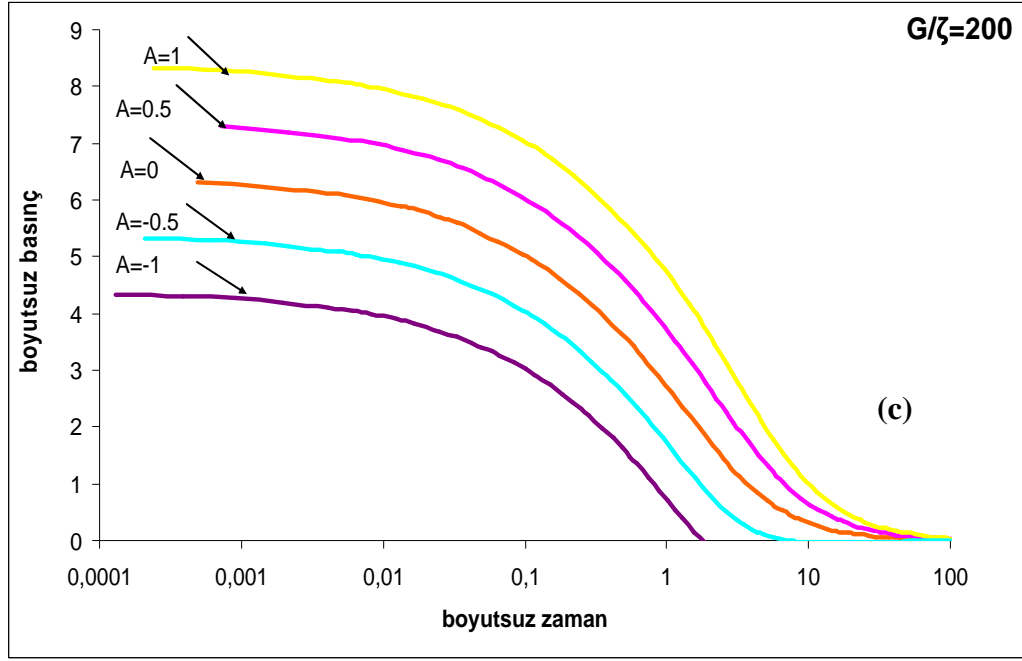
Sınır koşulları ise $r_D = 1$ 'de $\delta U_D / \delta r_D = 0$ ve

$r_D = \infty$ ' da $U_D = 0$ şeklindedir.

Genişleme yüzeyinde ($r_0=1$) sönümleme yanıtı ($U_D; t_D$) benzersiz bir şekilde kesme modülünün dirence oranı $\left[\frac{G}{\zeta} \right]$ olan iki parametre ve Skempton boşluk basıncı parametresi (A_f) için gösterilebilir.

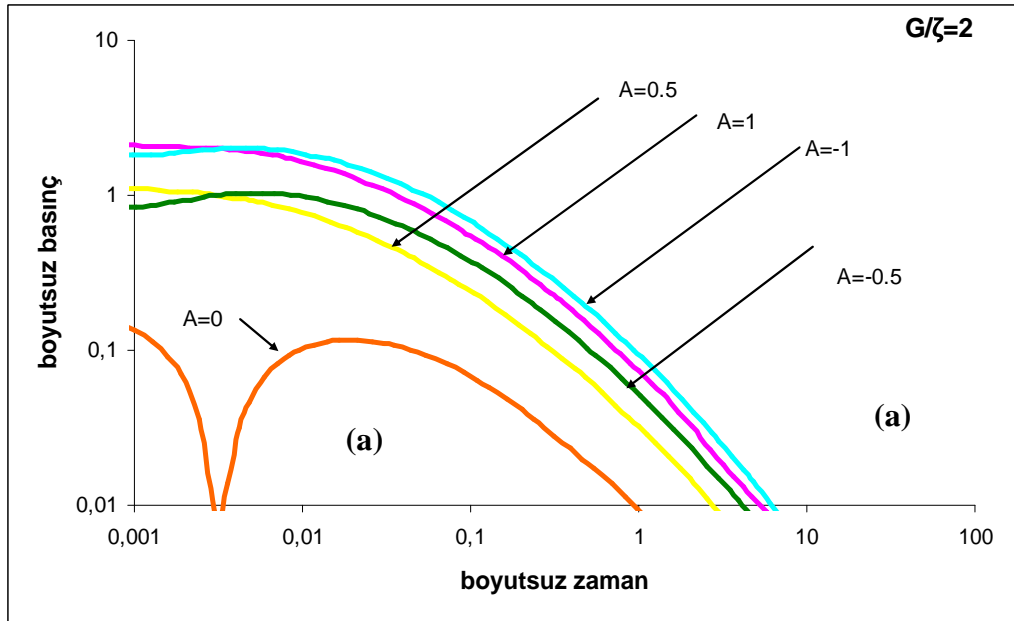
Sönümleme yanıtı, $\left[\frac{G}{\zeta} \right]$ 'nın üç temsili büyüklüğü için $\left[\frac{G}{\zeta} = 2,20 \text{ ve } 200 \right]$ ve $-1 < A_f < +1$ aralığı için Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.

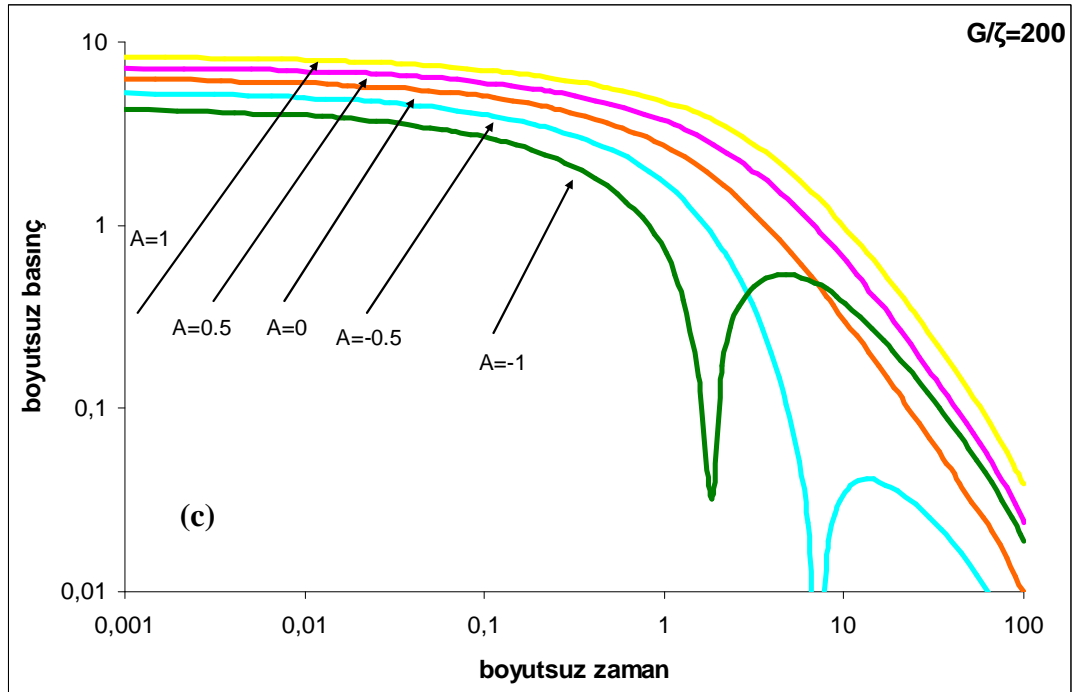
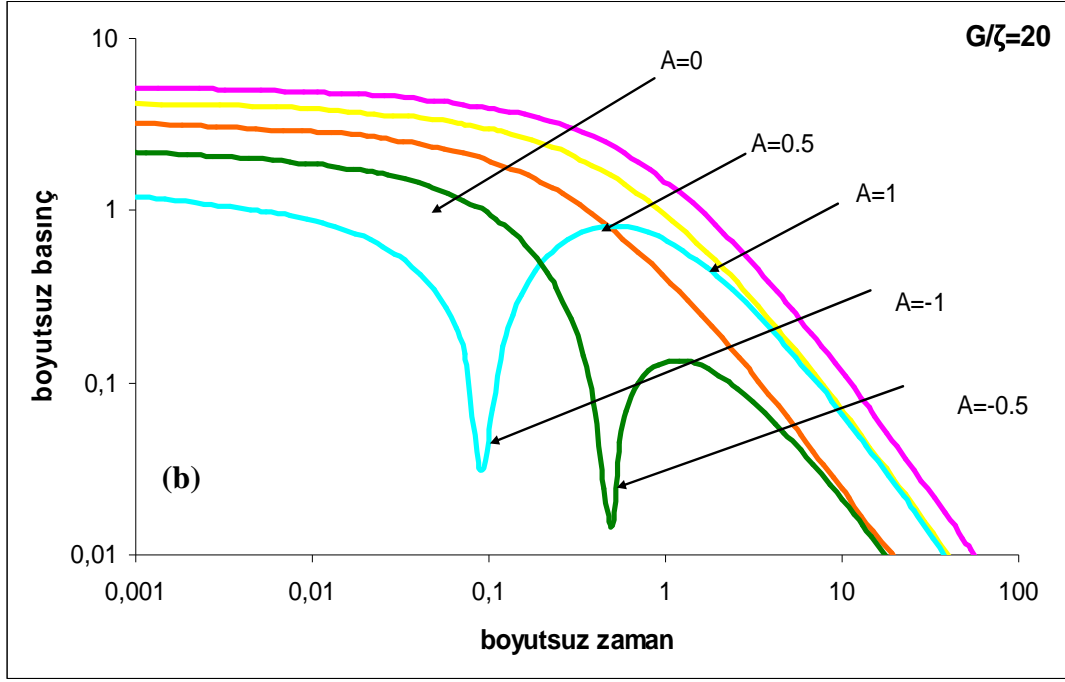




Şekil 4.2 : Fazla boşluk suyu basıncı dağılımlarının $a) G/C_u = 2, b) G/C_u = 20, c) G/C_u = 200$ değeri için A_f ile değişimi (Elsworth ve diğ., 2006)

Elde edilen eğri tipleri arazide yapılan CPT deneyi sonucu elde edilen eğrilerle doğrudan karşılaştırılabilir. Arazi verileri ile eşleştirmede log-zaman grafiğine karşı log-basıncın mutlak büyük köklerini karşılaştırmak uygun olmaktadır. Bunlar Şekil 4.2'de gösterilenlerin sadece yeniden çizilmiş halleridir. Burada negatif basınçlar mutlak değerleri ile gösterilmektedir(Elsworth ve diğ., 2006).





Şekil 4.3 : Fazla boşluk suyu basıncı dağılımlarının mutlak değerlerinin

a) $G/C_u = 2$, b) $G/C_u = 20$, c) $G/C_u = 200$ değerleri için A_f ile değişimi

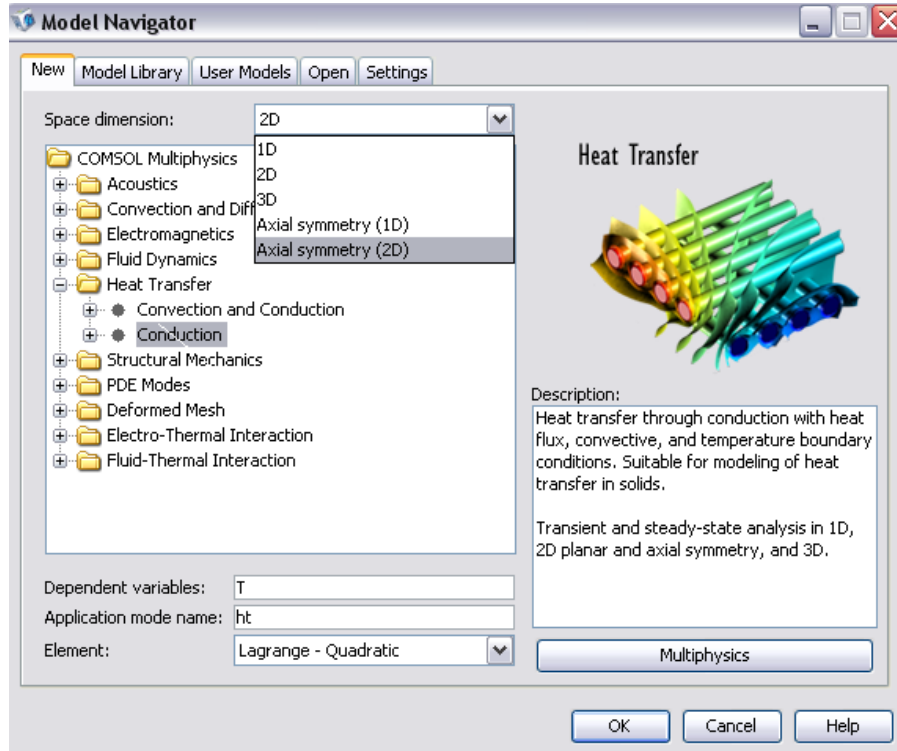
(Elsworth ve diğ., 2006)

(4.1) Denklemin çözümü COMSOL Multiphysics yazılımı ile yapılabilmektedir.

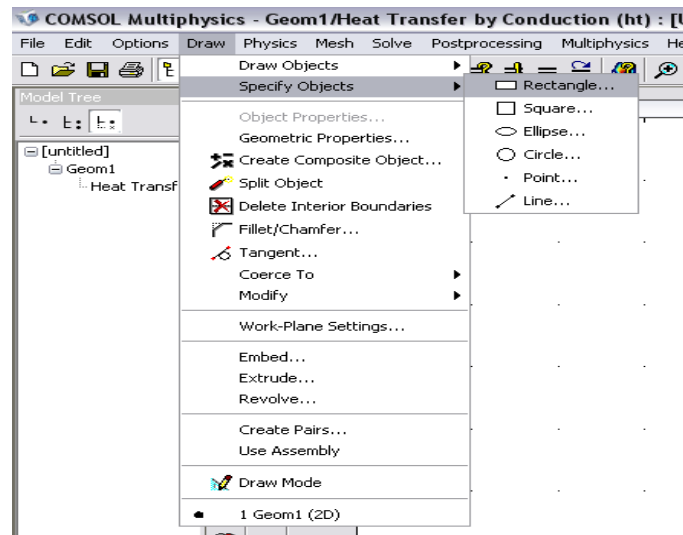
4.2 COMSOL Programının Tanıtılması

4.2.1 Modelleme

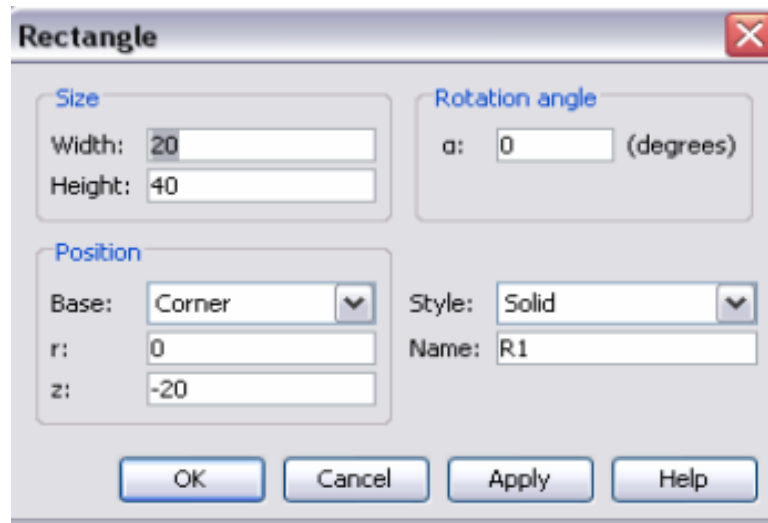
Modellemeye başlamadan önce yapılması istenen, modelleme için en uygun olan menünün program açılış aşamasında belirlenmesidir. Üzerinde çalışılmış olan örnek CPT çözümünde kullanılması uygun menü “heat transfer_conduction” ve “space dimension” olarak da “axial symmetry(2D)” ’dir.



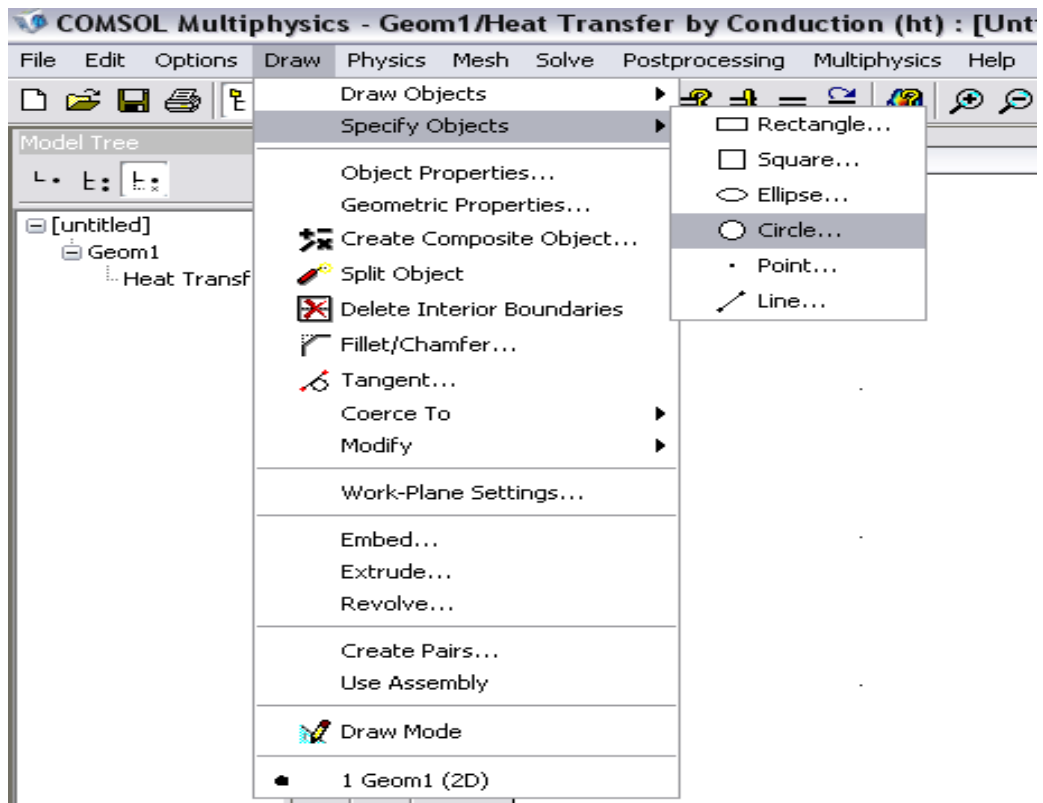
Modelleme aşamasında öncelikle, zemini modellemek için “draw” menüsünden “specify objects” kısmından “rectangle” seçilir.



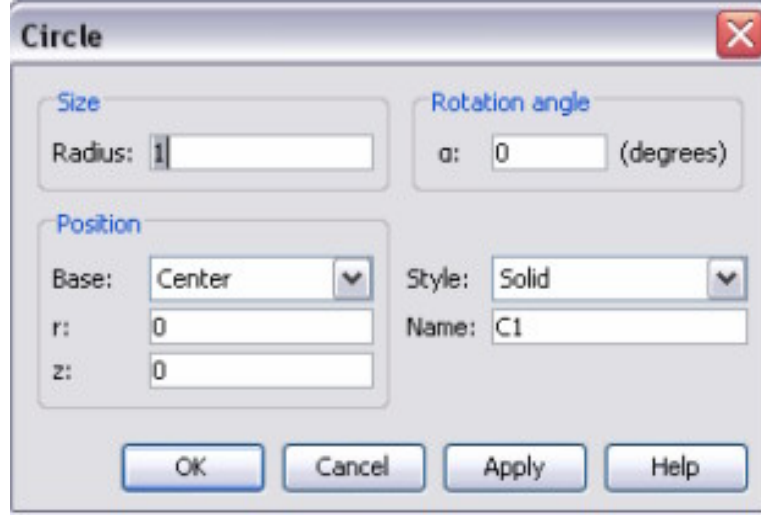
Boyutlar ve pozisyon belirlenip girildikten sonra “OK” tuşuna basılır.



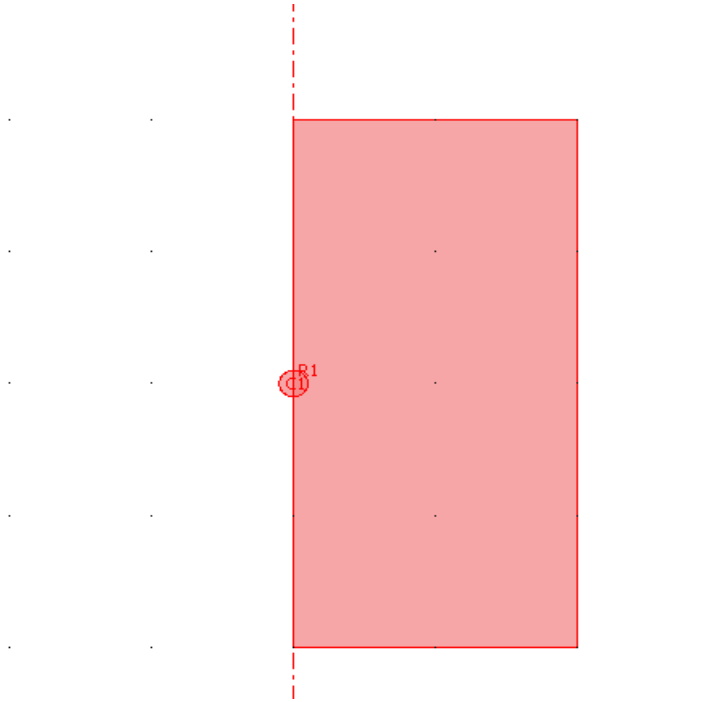
Daha sonra koni ucunun zemine gireceği boşluk belirlenir. “Draw” menüsü kullanılarak “specify objects” ’den “circle” seçilir.



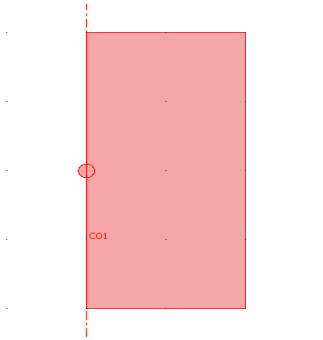
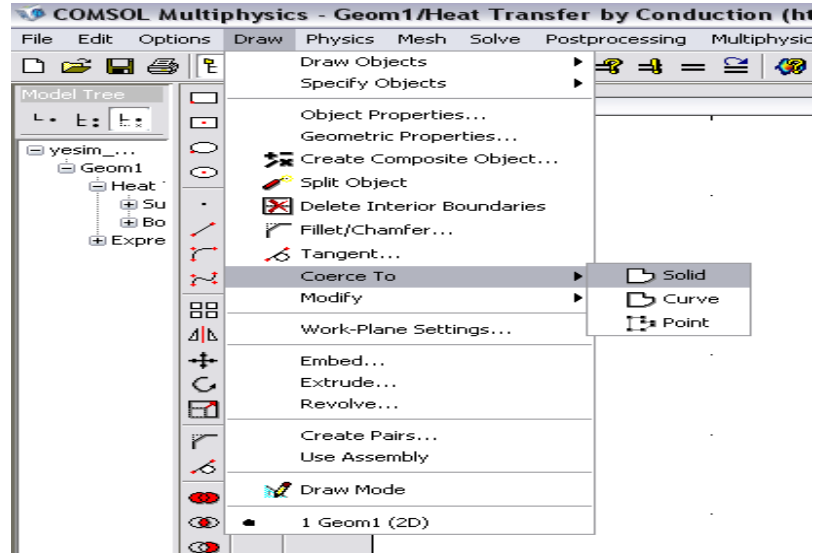
Değerler ve yeri belirlendikten sonra “OK” tuşuna basılır.



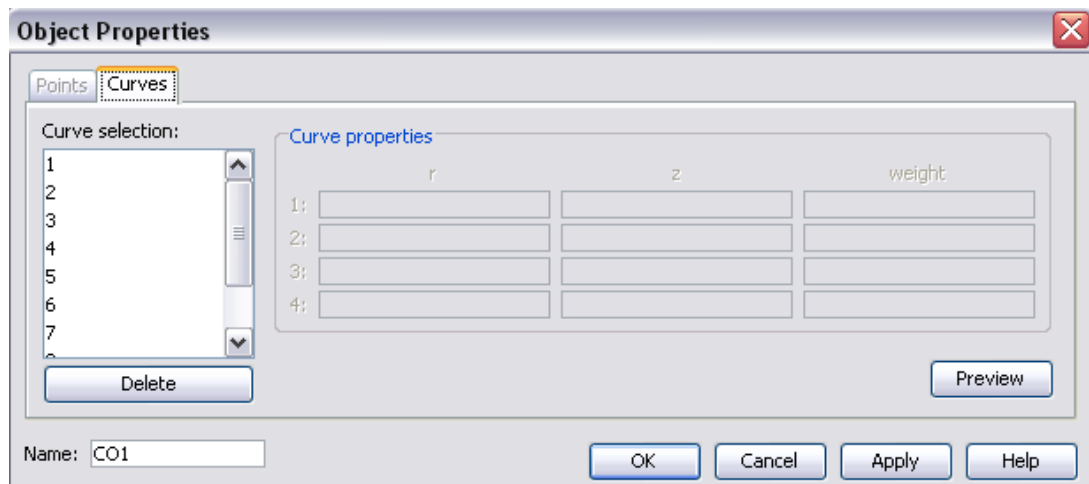
Zemin profili ve koni ucunun gireceği boşluk “rectangle” ve “circle” olarak ayrı ayrı modellenir.



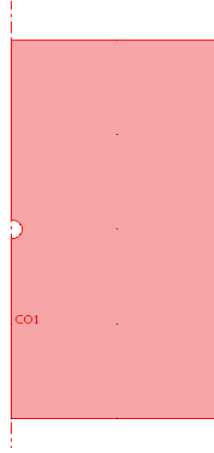
Daha sonra “rectangle” olarak modellenen zemin profili ve “circle” olarak modellenen CPT ucunun zemine girdiği kısım birlikte seçilerek blok haline getirilir. Bunun için de “draw” menüsündeki “coerce to solid” kullanılır.



Blok haline getirilen modelin üzerine tıklanır ve “object properties” penceresi açılır.

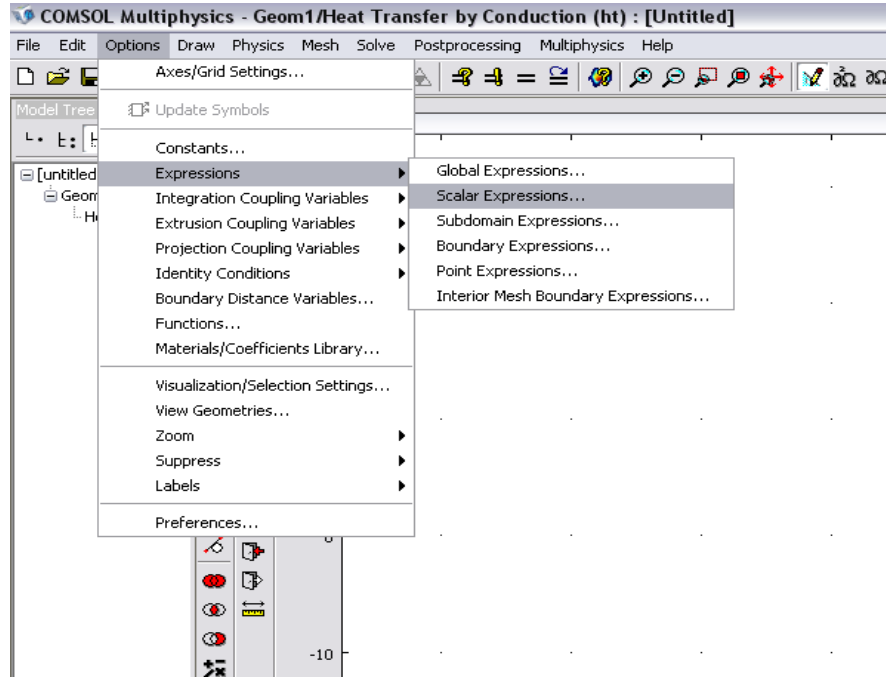


Modelde gerekli olmayan eğriler ve çizgiler silindikten sonra, model istenilen biçime getirilmiş olur.

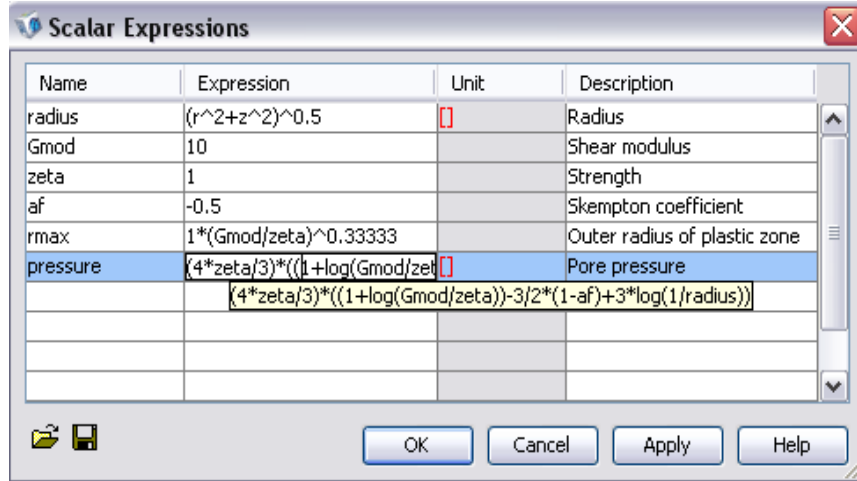


4.2.2 Çözümlemede kullanılacak denklemlerin tanımlanması

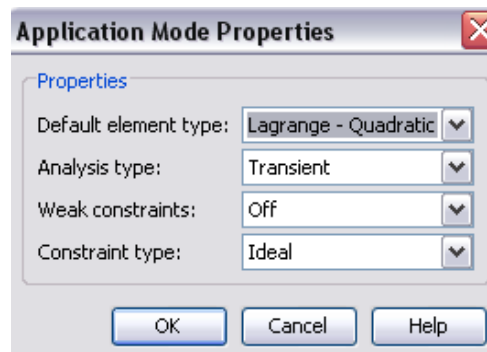
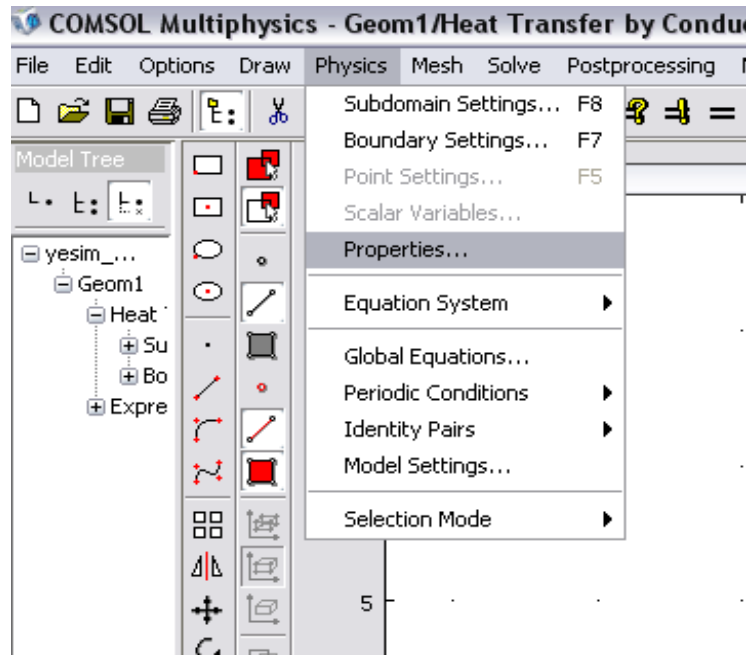
“Options” menüsü kullanılarak “expressions” ’dan “scalar expressions” seçilir.



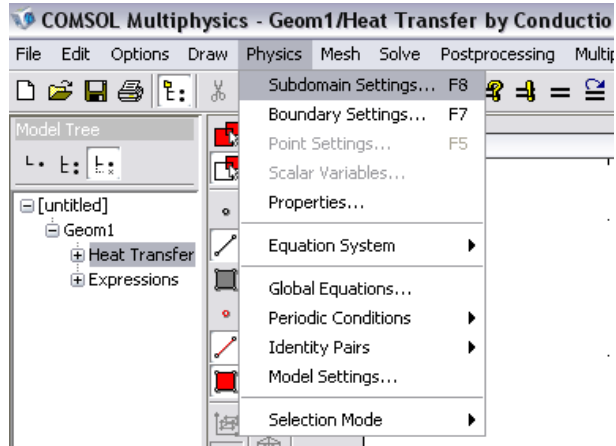
Yarıçap, kayma modülü (G), drenajsız kayma direnci (c_u veya S_u), boşluk suyu basıncı parametresi (A_f), plastik bölgenin dış çapı ve boşluk suyu basıncı tanımlanır.



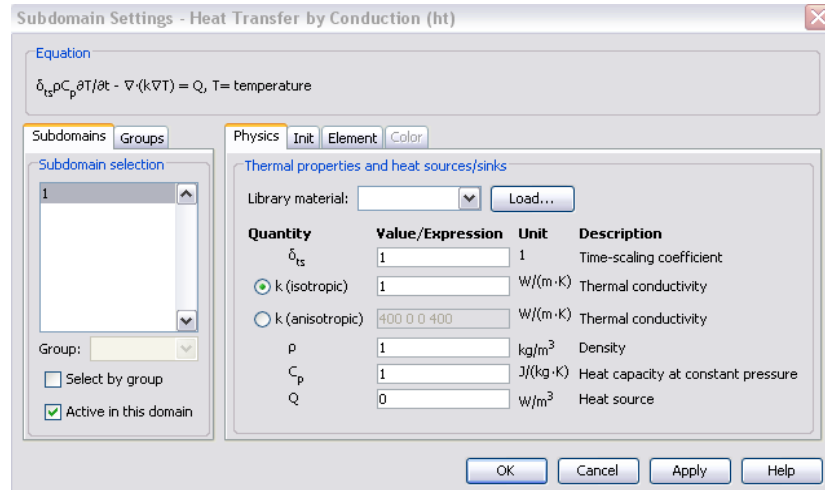
“Physics” menüsü kullanılarak “properties” butonu tıklanır. Açılan “application mode properties” penceresinde “anaysis type” kısmı “transient” (zamana bağımlı/geçici) hale getirilir.



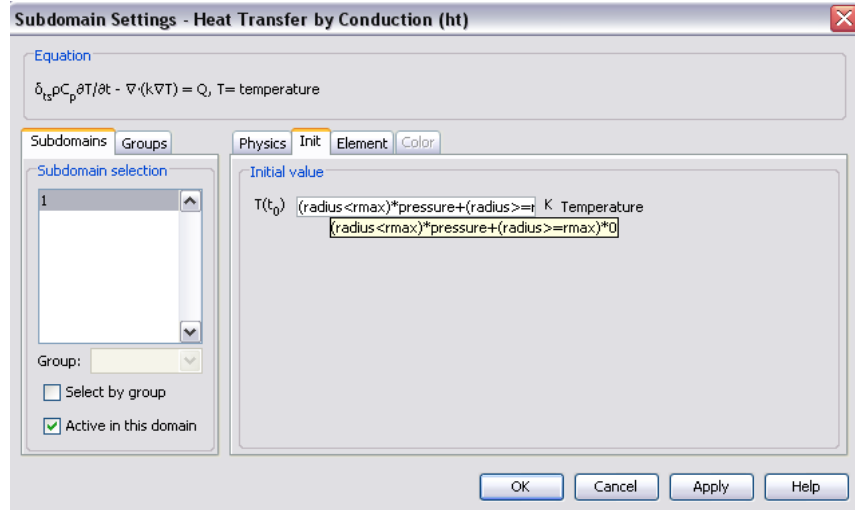
“Physics” menüsünden “subdomain settings” ’e girilir.



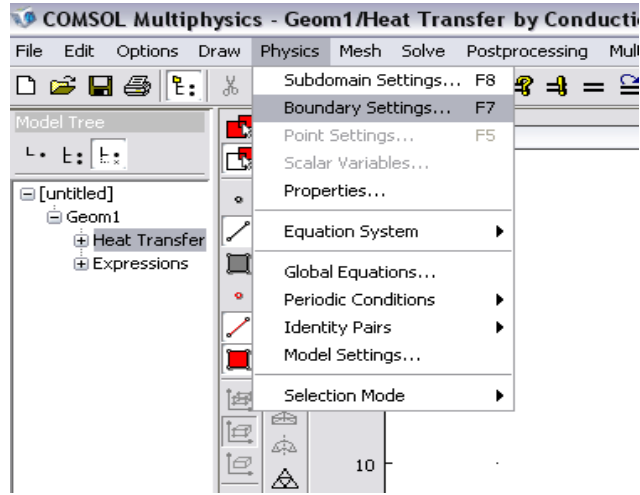
Zemini modellemek için kullanılan menü ısı transfer menüsü olduğu için ısı transferi ile ilgili olan parametreler 1 ve 0 olarak tanımlanır.



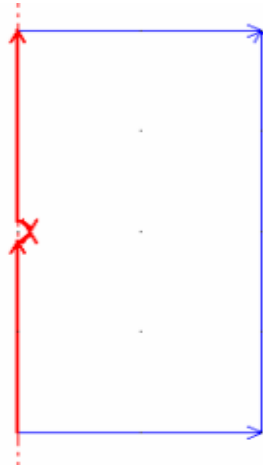
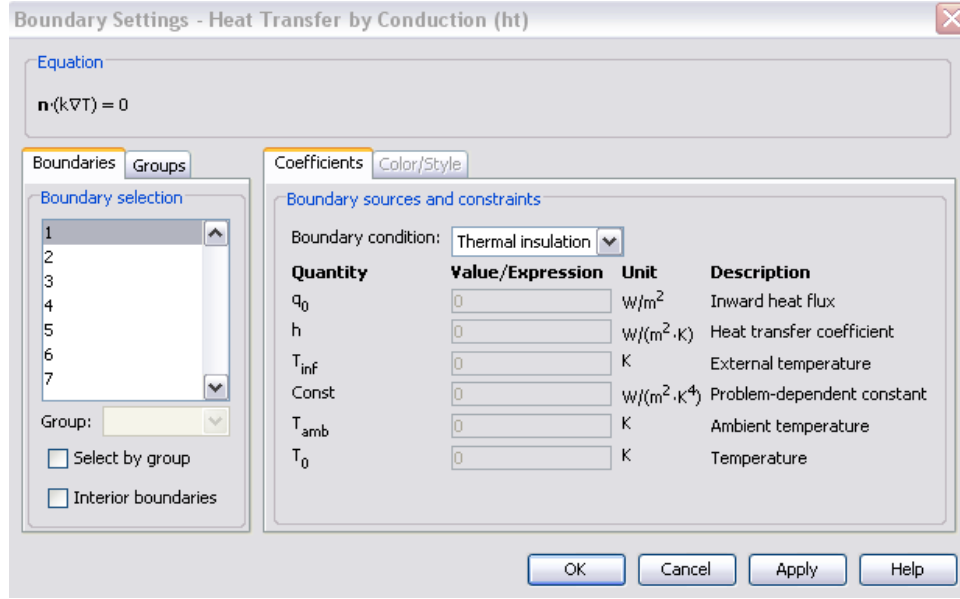
Aynı menüde “subdomains” seçili iken “init” menüsüne geçildiğinde başlangıç değeri CPT modelindeki parametrelere göre tanımlanır.



“Physics” menüsünden “boundary settings” ’e geçilir.

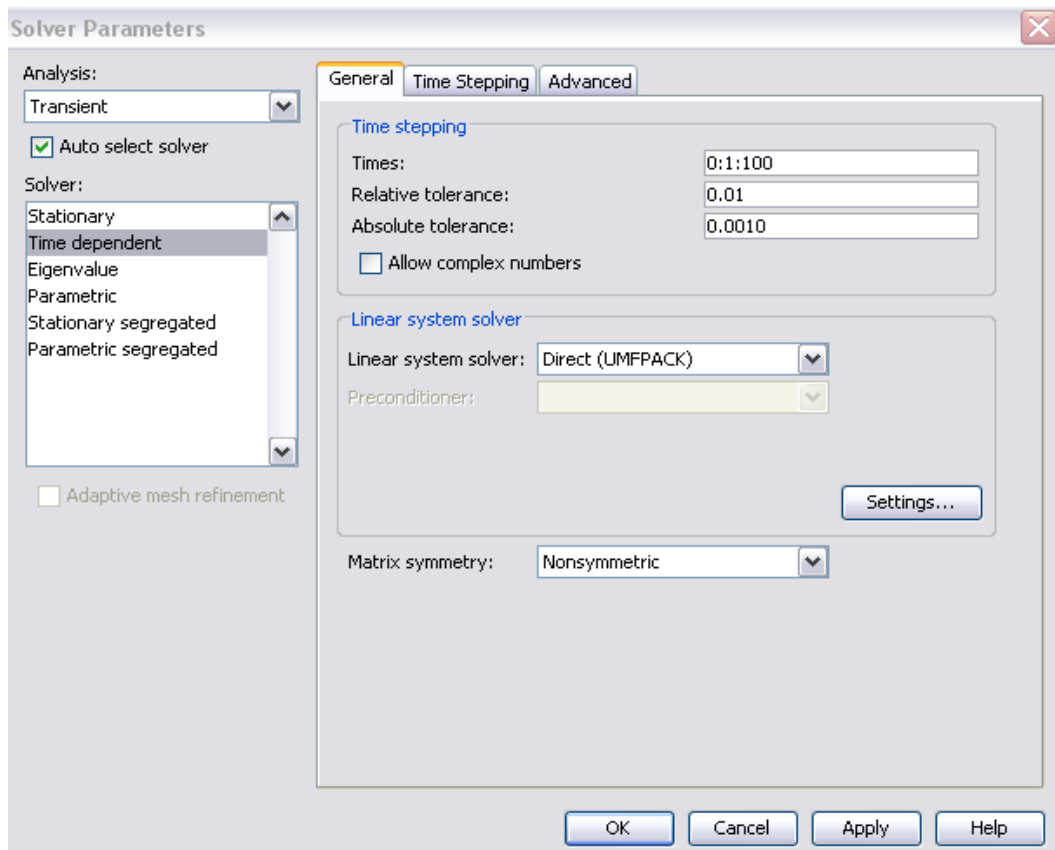
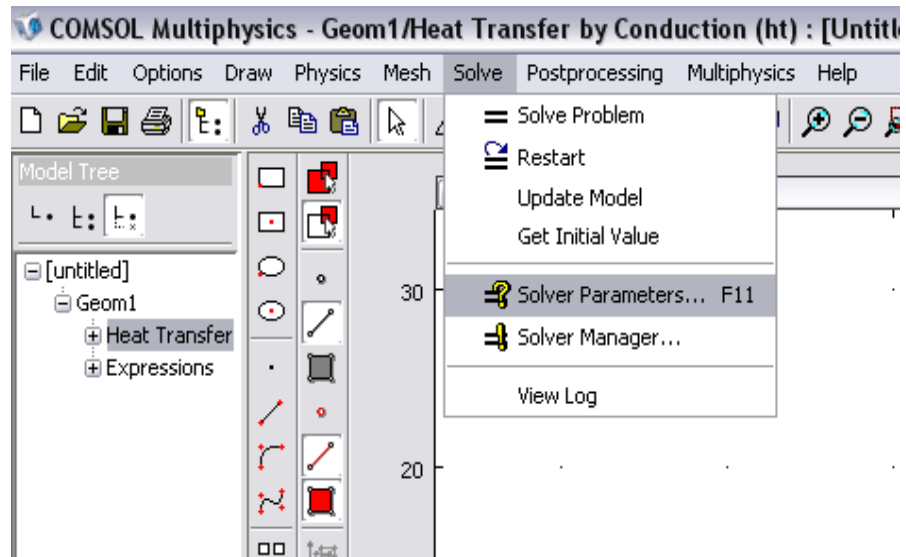


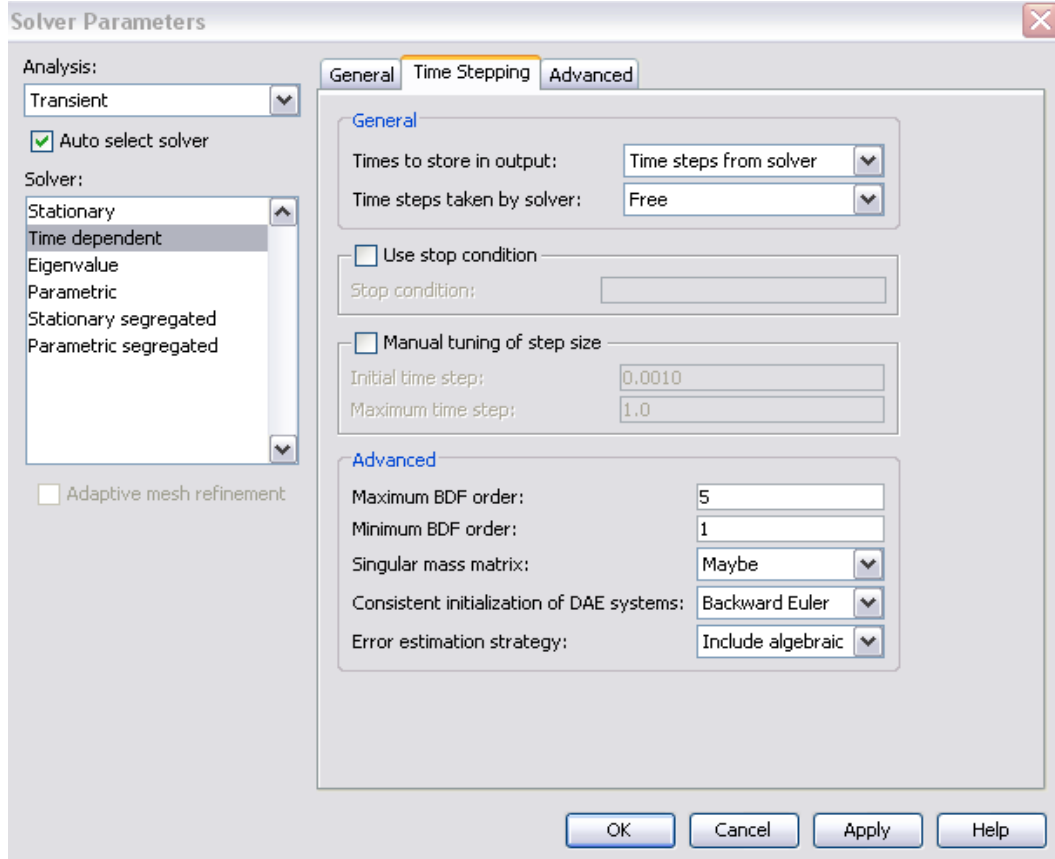
Zemin profilinin kırmızı ile seçili olan kısmı “thermal insulation” (ısı yalıtımı), mavi ile seçili olan kısmı ise “temperature” (sıcaklık) olarak tanımlanır.



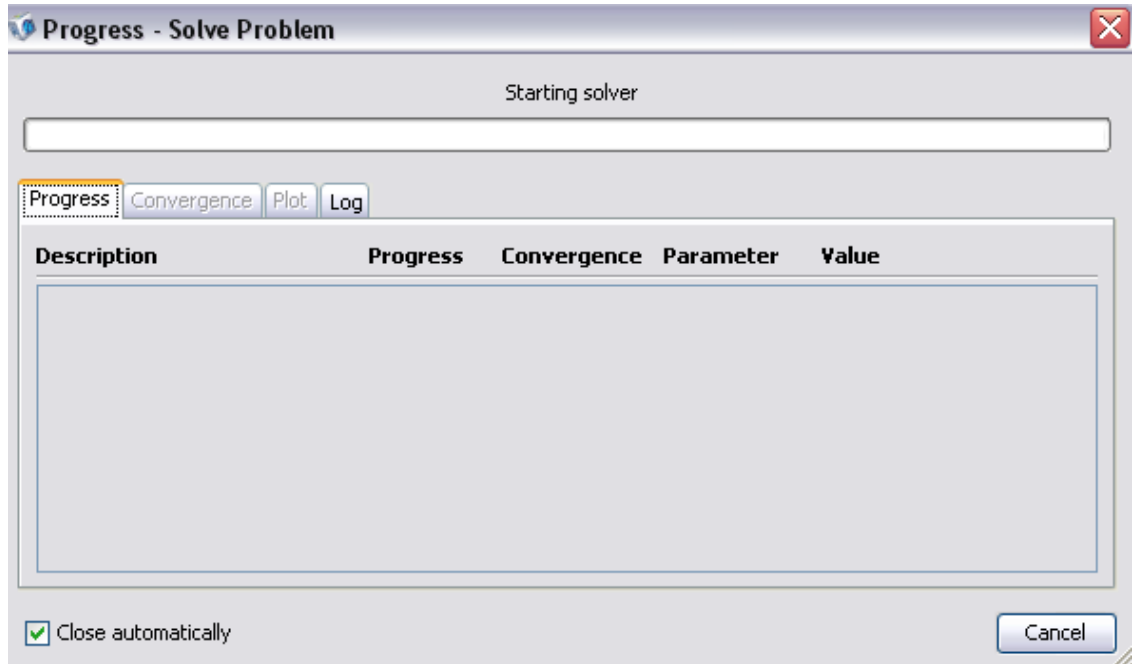
4.2.3 Çözümleme

Modelleme yapıp denklemler tanımlandıktan sonra “solve” menüsünden “solver parameters” butonuna basılır ve gerekli ayarlamalar şekillerde gösterildiği gibi yapılır.

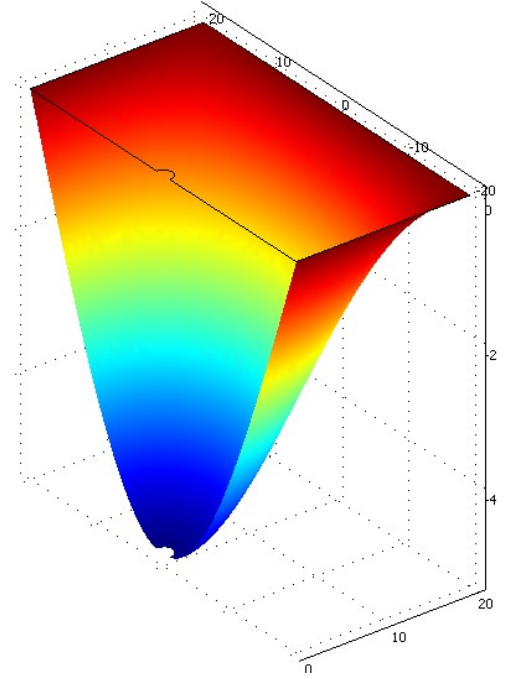
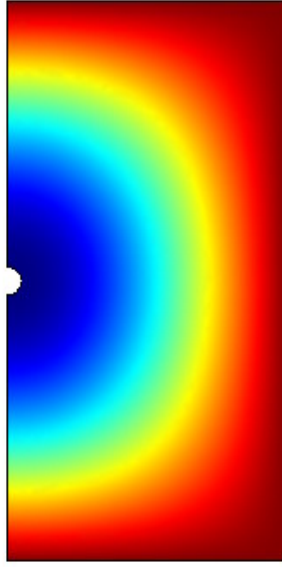




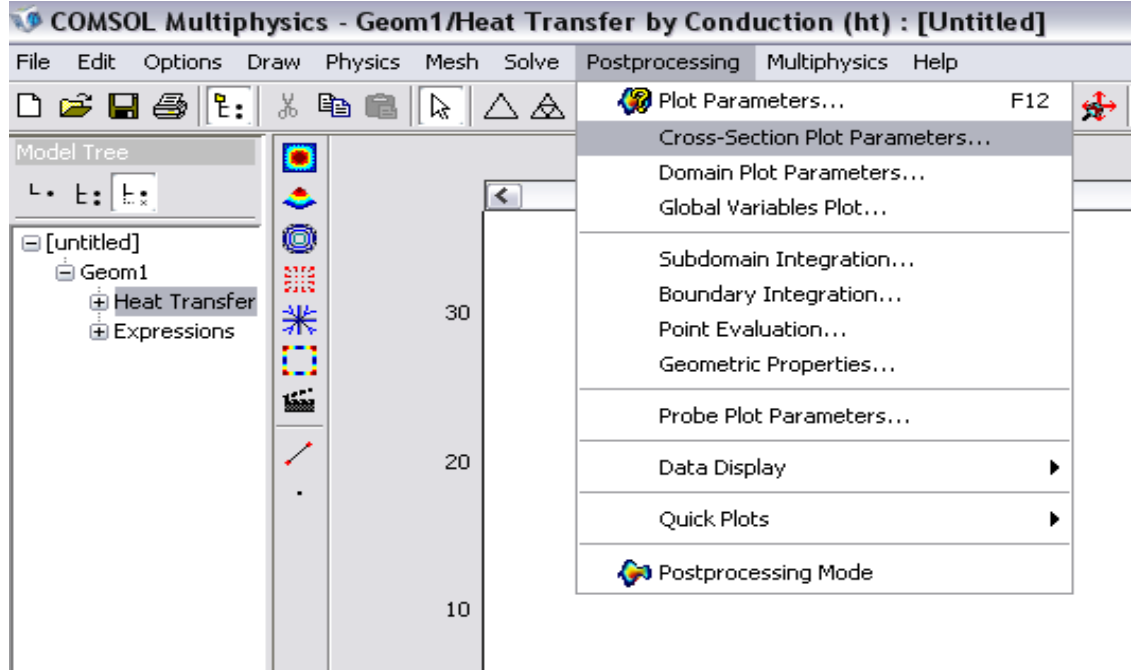
Tüm bu ayarlamalar yapıldıktan sonra “solve” butonuna basılarak çözümlene yapılır.



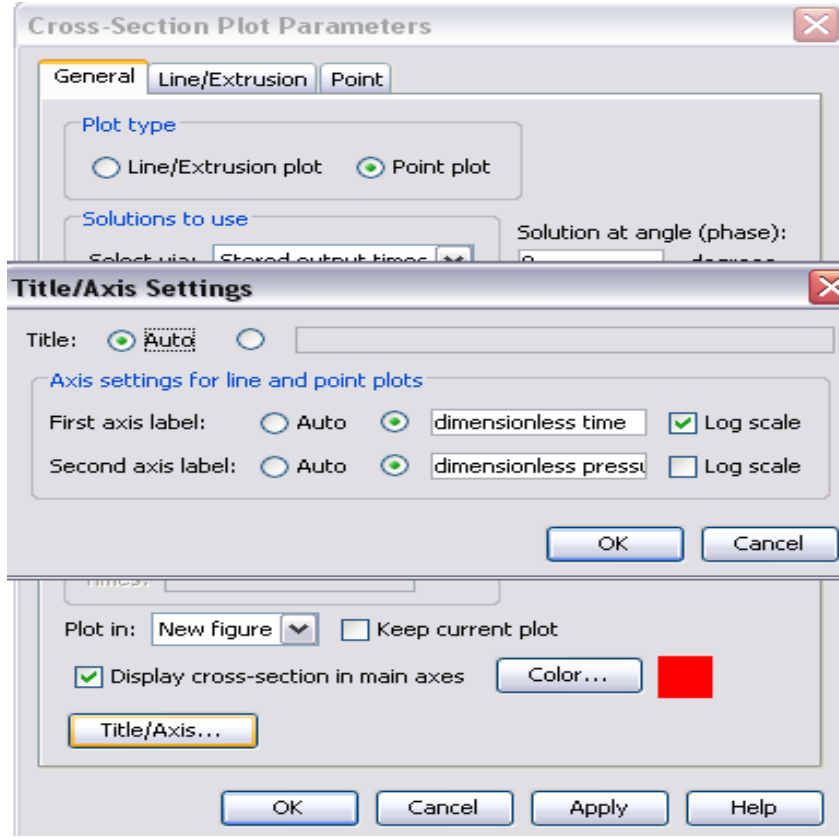
Çözümleme yapıldıktan sonra model aşağıdaki biçimleri alır.



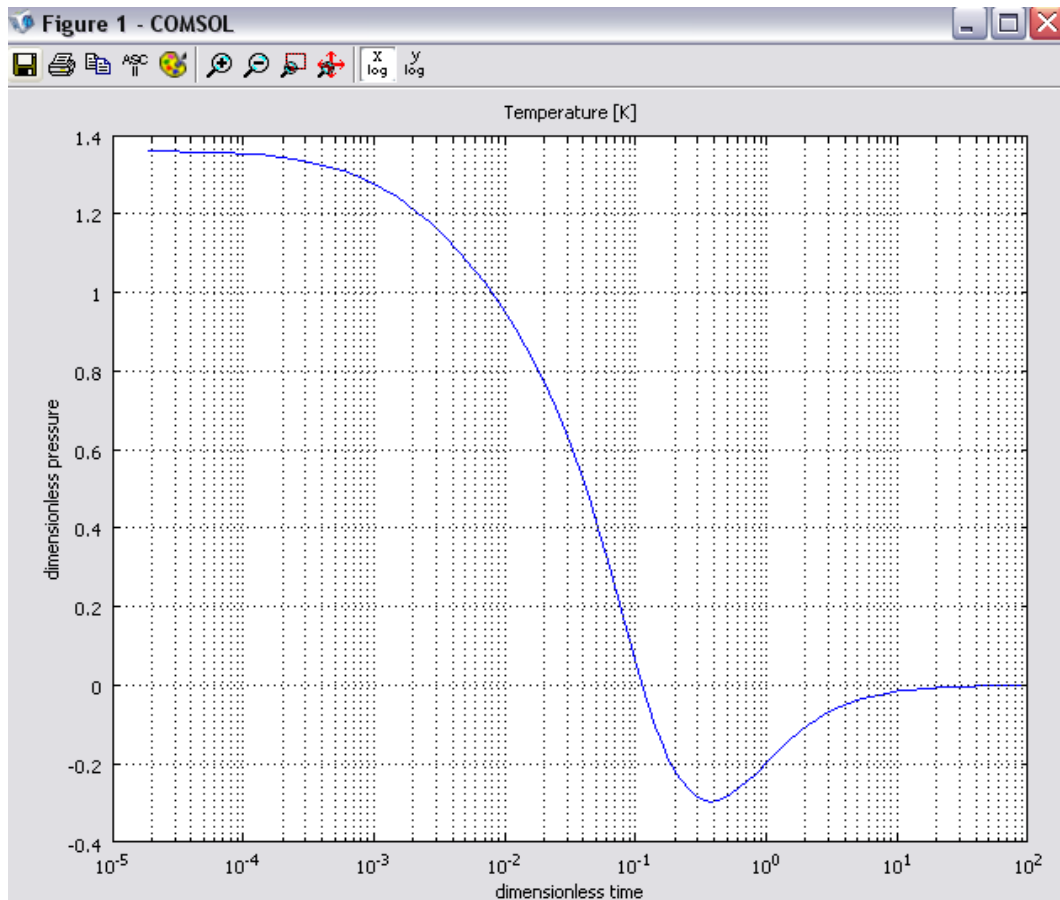
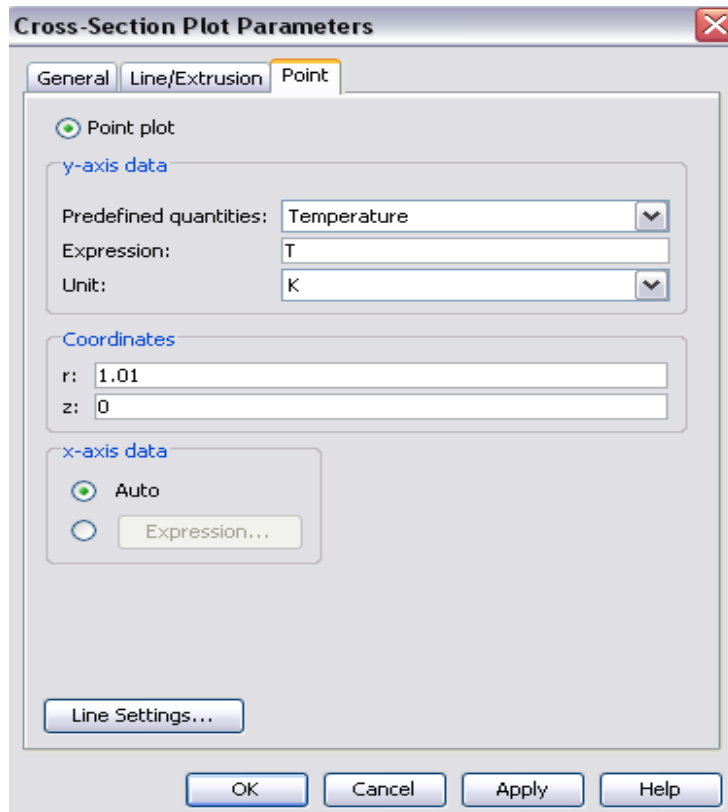
“Postprocessing” menüsü kullanılarak “cross-section plot parameters” ’a girilir.



“Cross-Section Plot Parameters” penceresi açıldıktan sonra “title/axis” butununa basılarak gerekli değiştirmeler yapılır.



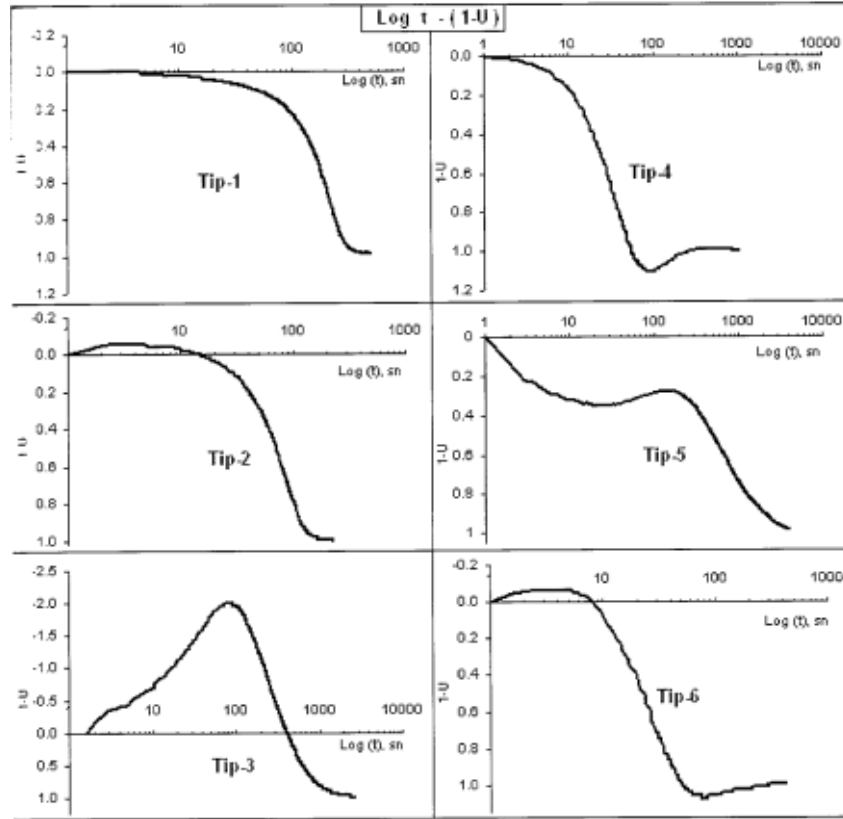
Aynı menüde “point” butonuna basılarak r koordinatı 1.01 olarak değiştirilir ve “apply” butonuna basılarak grafiksel çözüm elde edilir.



5. ARAZİDE GERÇEKLEŞTİRİLEN SÖNÜMLENME DENEYLERİNİN ANALİZİ

5.1 Arazi CPTU Sönümlenme Eğrilerinin COMSOL Programı ile Analizi

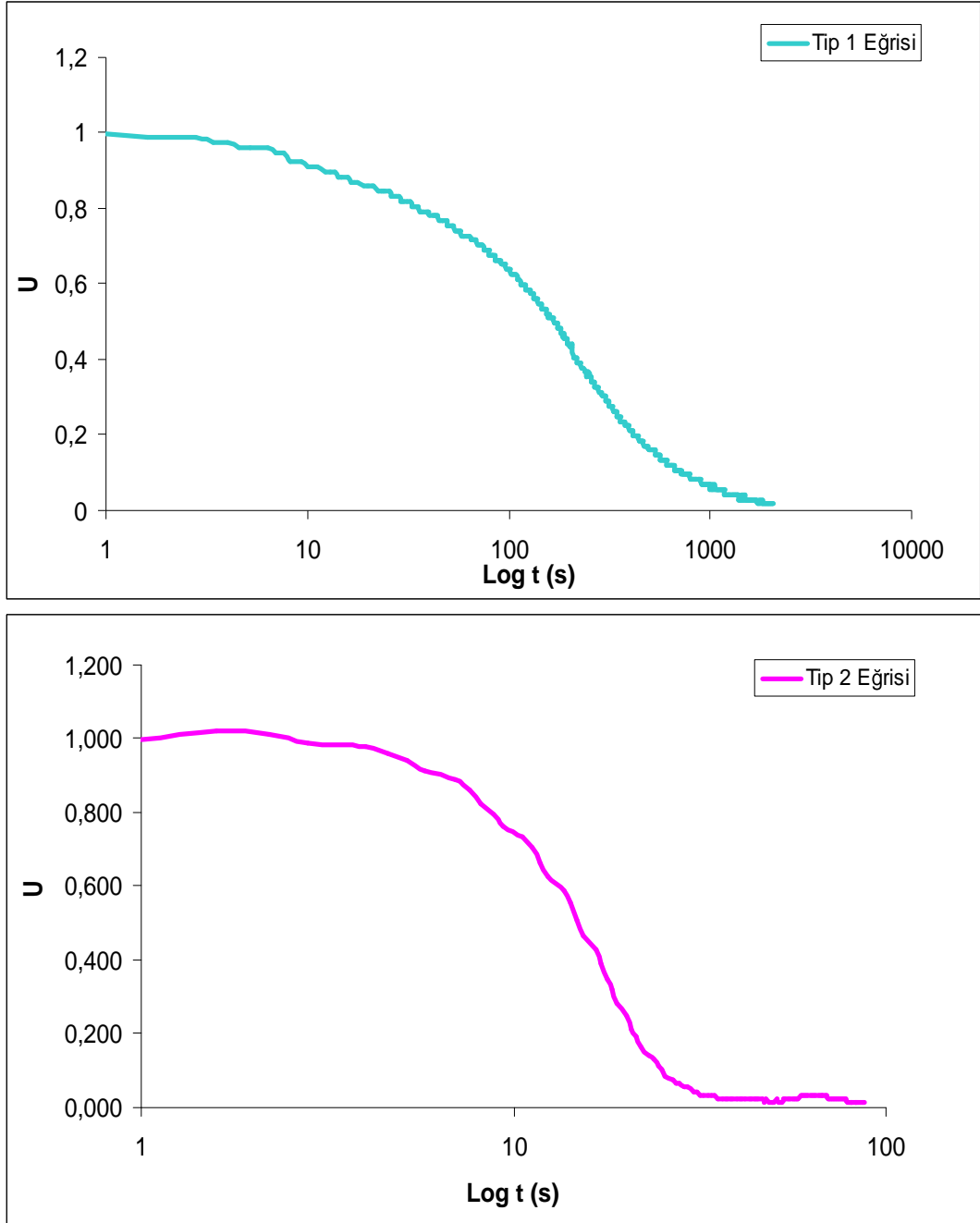
“Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesinde Koni Penetrasyon Deneyi Sönümlenme Yönteminin Uygulanması” adlı 104M387 No’lu TÜBİTAK Projesinde sönümlenme eğrisi tipleri aşağıdaki Şekil 5.1’de verilmiştir.



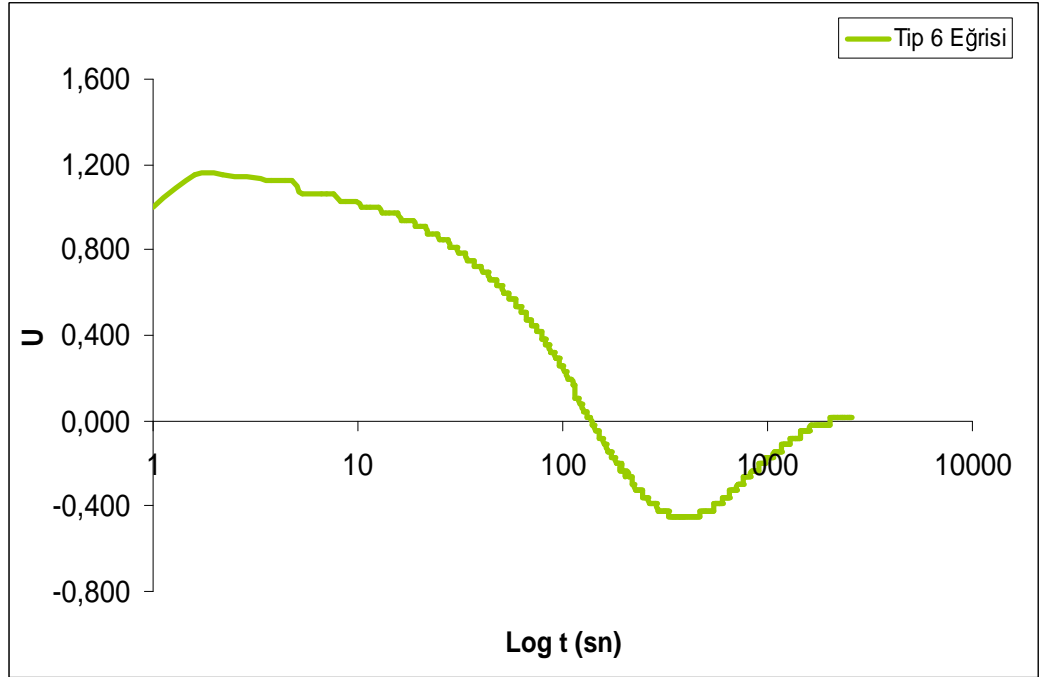
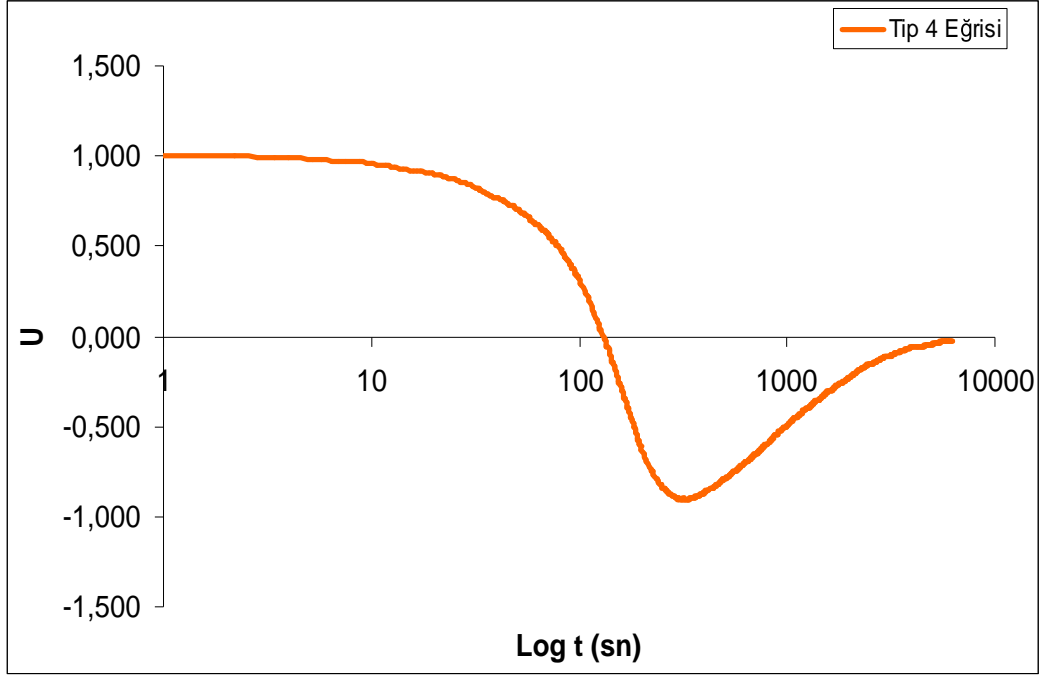
Şekil 5.1 : Log t – (1-U) eksenlerine göre CPT arazi sönümlenme eğrileri tipleri (Önalp ve diğ., 2007)

Bulgular Log t- U eksenlerine göre yapıldığında, eğri tipi sayısının 3’e düştüğü görülmektedir(Şekil 5.4). Tip 2 eğrileri Log t – U eksenine göre yeniden çizildiğinde kabarma olarak adlandırılan kısmın sadece 2-3 okumada gerçekleştiği ve çok küçük değerler olduğu gözlemlenmiş olup Tip 1 ile hemen hemen aynı eğriyi verdiği

görülmüştür(Şekil 5.2). Tip 6 eğrisi için boşluk suyu basıncı verileri $\log t - U$ eksenlerine göre çizildiği zaman kabarma belirgin olarak gözlenmekte ancak zemin sınıflarının Tip 4 eğrisiyle birebir uyuşması ve eğrilerin birbirine çok benzemesi sebebiyle aynı eğri tipi adı altında incelenebileceği düşünülmüştür(Şekil 5.3). Çalışmalar u_2 sondasında yapıldığından sadece u_1 sondasında karşılaşılmış olan Tip 5 incelenememiştir.

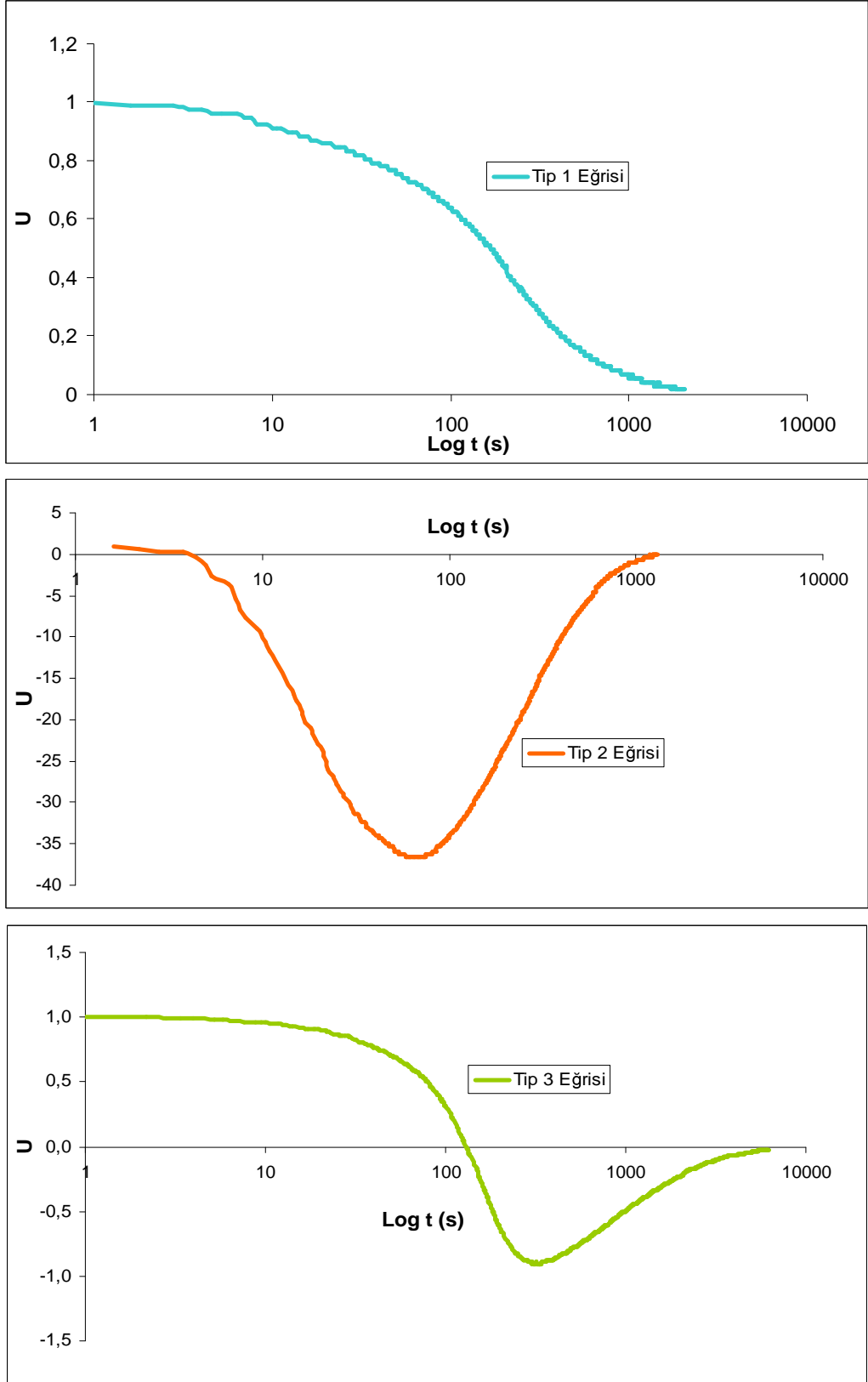


Şekil 5.2 : Tip 1 ve Tip 2 eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 5.3 : Tip 4 ve Tip 6 eğrilerinin karşılaştırması

Bu benzerlikler neticesinde Eğri Tipleri üç çeşit olarak aşağıdaki şekilde incelenmiştir:



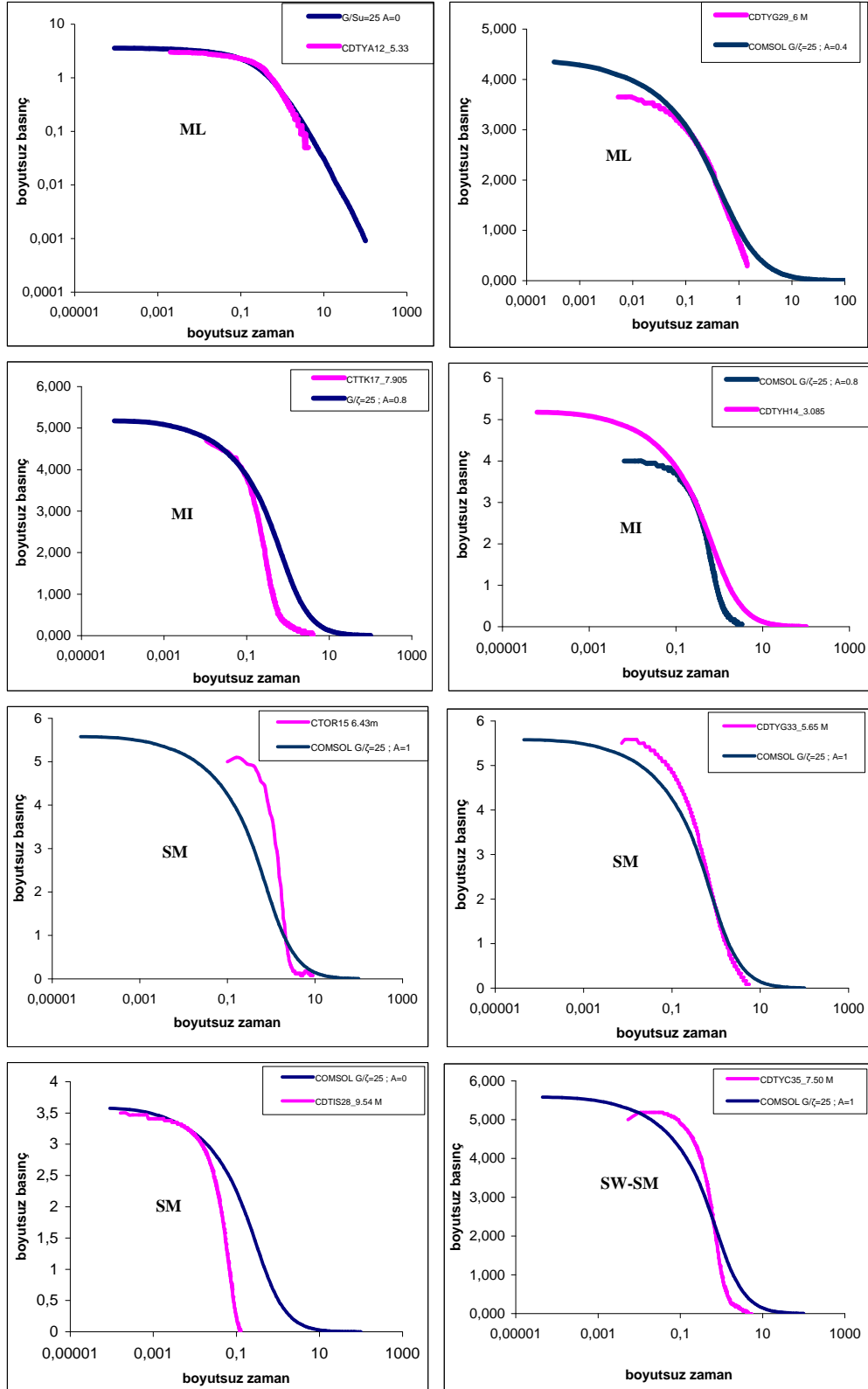
Şekil 5.4 : u_2 sondasında gözlemlenen yeni eğri tipleri

5.1.1 Tip 1 eğrisi

Tablo 5.1 : Tip 1 sönümlenme eğrileri listesi

İNCELENEN TİP 1 EĞRİ LİSTESİ				
YER	DERİNLİK	EĞRİ TİPİ	ZEMİN SINIFI	% ince
CDTYA12	5,330	TİP 1	ML, Silt (Nonplastik)	82
CDTYG29	6,000	TİP 1	ML	95
CDTYH14	3,085	TİP 1	MI	92
CTTK17	7,905	TİP 1	MI, Orta Plastisiteli Silt ve Az Kum	76
CDTIS28	9,540	TİP 1	SM	41
CDTHA26	7,550	TİP 1	SM	44
CTOR15	6,430	TİP 1	SM, Siltli Kum	16
CDTYG33	5,650	TİP 1	SM	49
CDTYC35	7,500	TİP 1	SW-SM	12

Tip 1 Sönümlenme Eğrisinin çoğunlukla siltli ve kumlu zeminlerde meydana geldiği Tablo 5.1'den görülmektedir. Bu eğriler Şekil 5.5'de gösterilmektedir.



Şekil 5.5 : Zemin sınıflarına göre Tip 1 eğrileri

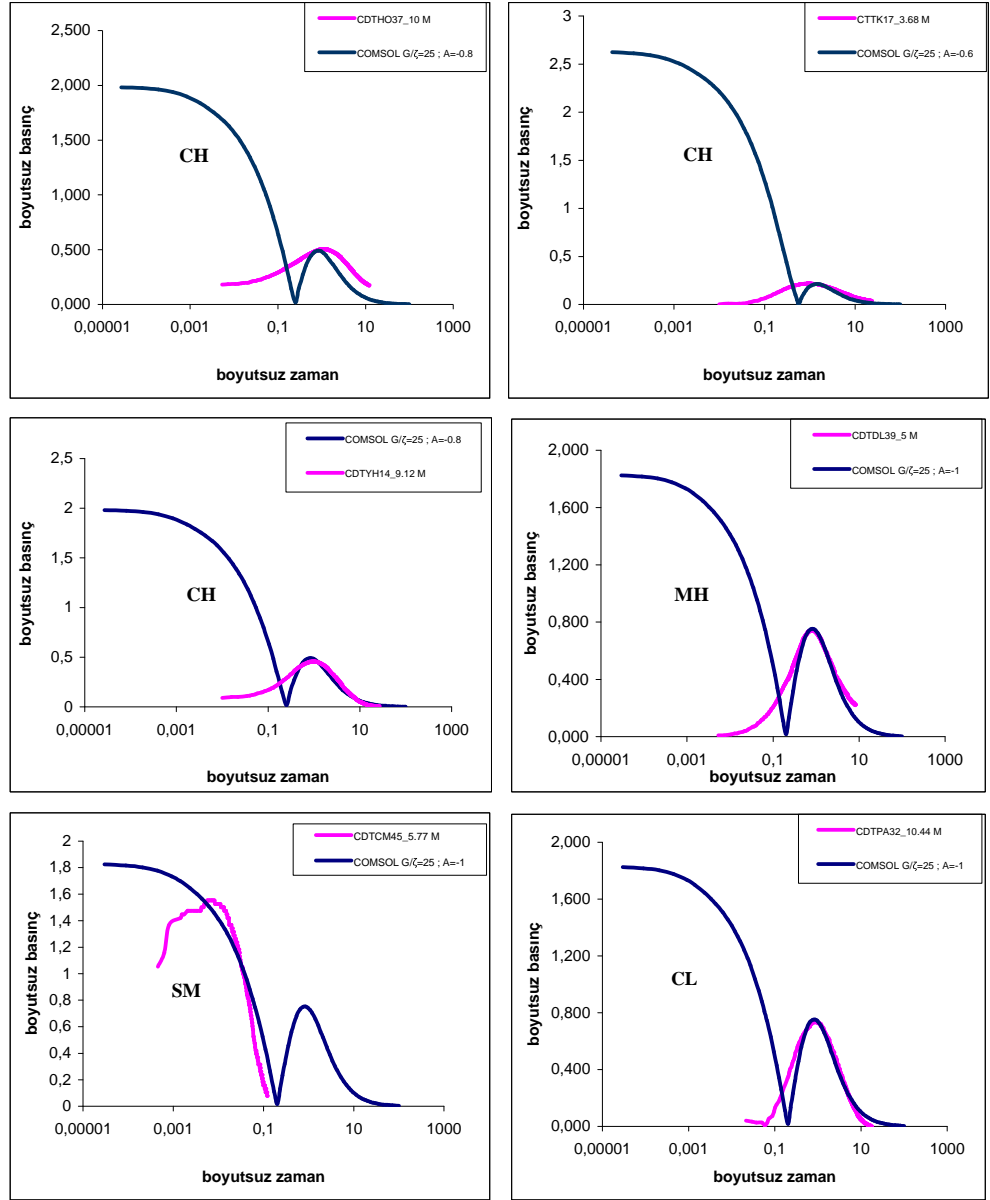
ML siltlerde COMSOL Multiphysics ile yapılan analiz sonucunda Elsworth'un boşluk genişlemesi modeli ile Tip 1 eğrisinin temsil edilebileceği görülmektedir. MI siltlerde yapılan Tip 1 analizinde de aynı şekilde bir uyum olduğu gözlemlenmektedir. Ancak zemin sınıfı SM olan siltli kumlara bakıldığında ise sadece eğrinin başlangıcında uyum sağladığı görülmektedir. Bu durum iri daneli zeminlerde boşluk suyu basıncı sönümlenmesinin ince daneli zeminlere göre çok daha hızlı gerçekleşmesinden kaynaklanabilmektedir. İnce dane yüzdesi arttıkça uyumun daha fazla olduğu görülmektedir. Örneğin ince dane yüzdesi %16 olan CTOR15_6.43 m analizindeki uyumsuzluk göze çarpmaktadır. Zemin sınıfı SW-SM olan arazi sönümlenme sonuçlarının COMSOL Multiphysics ile yapılan analizde uygun sonuç vermediği görülmektedir. Bunun sebebi iri daneli zeminlerde boşluk suyu basıncının hızlı bir şekilde sönümlenmesinden dolayı ölçümde net sonuç alınamamasıdır. Genel uyuma bakılarak Tip 1 sönümlenme eğrisinin Elsworth'un boşluk genişlemesi modeli ile temsil edilebileceği görülmektedir. Tip 1 eğrileri ayrıntılı olarak Ek-A'da verilmektedir.

5.1.2 Tip 2 Eğrisi

Tablo 5.2 : Tip 2 sönümlenme eğrileri listesi

İNCELENEN TİP 2 EĞRİ LİSTESİ			
YER	DERİNLİK	EĞRİ TİPİ	ZEMİN SINIFI
CDTHO37	10,000	TİP 2	CH, Yağlı Kil
CTTK17	3,680	TİP 2	CH, Yağlı Kil
CDTYH14	9,120	TİP 2	CH
CDTDL39	5,000	TİP 2	MH
CDTCM45	5,770	TİP2	SM
CDTPA32	10,440	TİP 2	CL

Tip 2 Sönümlenme Eğrisi Tablo 5.2'da görüldüğü gibi çoğunlukla killi zeminlerde karşımıza çıkmaktadır. Ancak nadiren de olsa siltli ve kumlu zeminlerde de görülebilmektedir. Bu eğriler Şekil 5.6'da gösterilmektedir.



Şekil 5.6 : Zemin sınıflarına göre Tip 2 Eğrileri

COMSOL Multiphysics yazılımı ile yapılan analizler sonucunda killi (CH,CL) ve siltli zeminlerde (MH) özellikle negatif basınçlarda önemli ölçüde uyum sağlandığı görülmektedir. Bu nedenle Elsworth'un boşluk genişmesi modeli ile Tip 2 sönümlenme eğrilerinin temsil edilebilmesi mümkün gözükmektedir. Negatif sonuçların mutlak değerleri alınarak COMSOL yazılımında modellenmesi uygun olduğundan arazi sönümlenme eğrileri de negatif değerlerin mutlak değerleri alınarak yeniden çizilip karşılaştırılmıştır. Ancak, sınıfı SM olan siltli kumlarda uyumsuzluk çok açık bir şekilde belirdiğinden boşluk genişlemesi modelinin Tip 2 sönümlenme

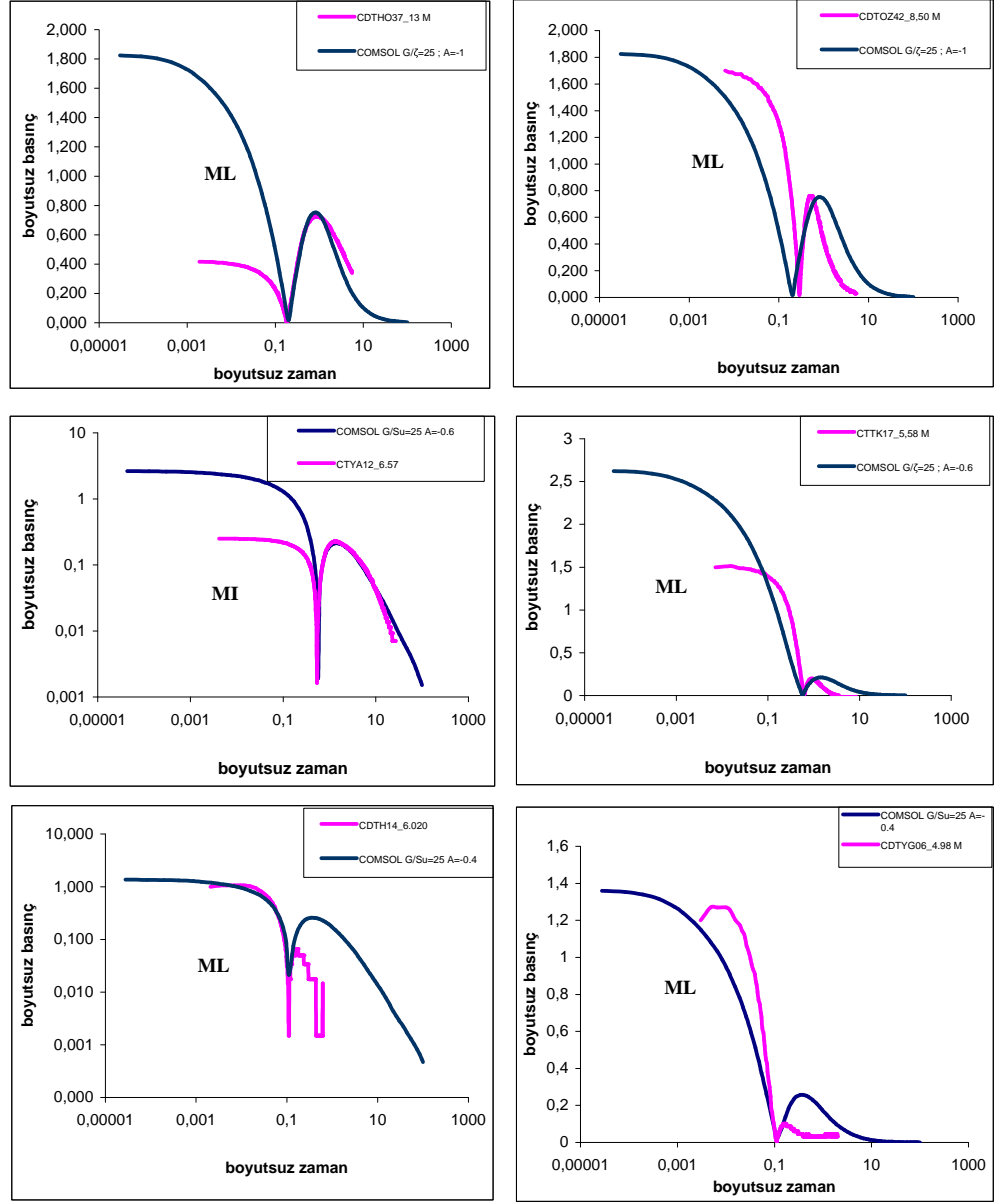
eğrisinde SM zeminler için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Tip 2 eğrileri ayrıntılı olarak Ek-B'de verilmektedir.

5.1.3 Tip 3 Eğrisi

Tablo 5.3'de görüldüğü gibi Tip 3 Sönümlenme eğrileri sadece siltlerde karşımıza çıkmaktadır. Bu eğriler Şekil 5.7'de gösterilmektedir

Tablo 5.3 : Tip 3 sönümlenme eğrileri listesi

İNCELENEN TİP 3 EĞRİ LİSTESİ			
YER	DERİNLİK	EĞRİ TİPİ	ZEMİN SINIFI
CDTYA12	6,570	TİP 3	MI, Orta Plastisiteli Silt
CTTK17	5,580	TİP 3	ML, Düşük Plastisiteli Silt
CDTHO37	13,000	TİP3	ML
CDTOZ42	8,500	TİP 3	ML
CDTYH14	6,020	TİP 3	ML
CDTYG06	4,980	TİP 3	ML, Silt (Nonplastik)



Şekil 5.7 : Zemin sınıflarına göre Tip 3 eğrileri

Tip 3 sönümlenme eğrileri COMSOL Multiphysics yazılımı ile analiz edildiğinde, özellikle orta plastisiteli siltlerde (MI) neredeyse tam bir uyum gözlenmiştir. Düşük plastisiteli siltlerde (ML) ise Tip 2 de olduğu gibi çoğunlukla eğrinin döndüğü negatif boşluk suyu basıncı okumaları alınmaya başlandığında uyum görülmektedir. Ancak bazı örneklerde tam bir uyuma rastlandığı görülmüştür. Eğrinin başlangıcı çoğu kez COMSOL yazılımının sonucuyla üst üste gelirse de biçim itibarıyla benzerlik bulunmaktadır. Bu sebeple, Elsworth'ün boşluk genişlemesi modeli ile Tip 3 sönümlenme eğrileri temsil edilebilmiştir. Tip 3 eğrileri ayrıntılı olarak Ek-C'de verilmektedir.

6. BULGULARIN TARTIŞILMASI

İnce daneli zeminlerde boşluk suyu basıncı sönümlenmesi kumlara oranla yavaştır. Ancak, siltte sönümlenme deney başlangıcında hızla gerçekleştiğinden sönümlenmenin erken aşamalarında sık aralıklarla veri toplanması gerekir.

Aşırı konsolide killerde yapılan sönümlenme deneylerinde Δu_w 'de başlangıçta zamanla bir artış görülmekte, bir doruk değere ulaşmakta ve zamana bağlı olarak u_w düşüş göstermektedir. Diğer deyişle, aşırı konsolide killerde kabarma sönümlenmesi gerçekleşmektedir(Tip 2 eğrisi). Bu sebeple boşluk suyu basınçlarında negatif okumalar alınabilir.

Piyezokoni deneyinden elde edilen konsolidasyon katsayısının güvenilir hesaplanabilmesi için $t=0$ zamanda başlangıç boşluk suyu basıncının (u_{wi}) belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için de boşluk suyu basıncı kaydının sık aralıklarla alınması gerekir.

Sönümlenme yatay yönde gerçekleşmektedir. CPTU sönümlenme deneyi ile yatay konsolidasyon katsayısını (c_h) belirlemek mümkündür. Düşey konsolidasyon katsayısı ise buna bağlı olarak formülden belirlenir.

Konsolidasyon katsayısının (c) en küçük hata ile belirlenmesi için u_2 'den elde edilen sönümlenme verilerinin kullanılması uygundur.

Zeminin anizotropisinden dolayı yatay hidrolik iletkenlik (k_h) düşey hidrolik iletkenliğe (k_v) göre daha büyüktür. Buna bağlı olarak çoğunlukla yatay konsolidasyon katsayısı (c_h) düşey konsolidasyon katsayısından (c_v) daha büyüktür.

Sönümlenme eğrileri sayısal olarak modellenmiştir. Bu modellemede boşluk suyu basınçlarının izotrop ve deviatörük gerilmelerin etkisinde artışı, drenajsız kayma direnci C_u , kayma modülü G ve Skempton boşluk suyu parametresi A_f 'nin kullanımı ile tanımlanmaktadır.

Sayısal çözüm Comsol Multiphysics yazılımının kullanımı ile değişen C_u , G ve A_f değerleri için yapılmıştır. Tip 1 eğrisi için $G/C_u = 25$ ve $0 \leq A_f \leq 1$ aralığındaki pozitif değerler ile analiz yapılmıştır. Tip 2 için; negatif boşluk suyu basınçlarından dolayı A_f 'nin negatif değerleri ($-1 \leq A_f < 0$) ve $G/C_u = 25$ değerleri ile analiz yapılmıştır. Tip 3 için de Tip 2'nin analizinde kullanılan değerler kullanılmıştır.

Tip 1 eğrisi ile temsil edilen düşük ve orta plastisiteli siltlerde (ML-MI) Comsol Multiphysics yazılımı ile yapılan analiz sonucu programın verdiği eğriler ile sönümlenme deneyi sonucu elde edilmiş eğriler arasında bir uyum olduğu gözlenmiştir. Bunun sonucunda ML-MI siltlerde Elsworth'ün boşluk genişmesi modeli ile Tip 1 eğrisinin temsil edilebileceği görülmüştür. Ancak Tip 1 eğrisi ile temsil edilen kumlu zeminlerde (SM) yapılan analiz sonucunda bir uyum gözlenmemiştir.

Tip 2 eğrisi incelendiğinde, özellikle bu eğri tipinin ağırlıklı olarak CH killerin davranışını yansıttığı görülmektedir. İncelenen diğer zemin sınıfları da dahil olmak üzere özellikle negatif boşluk suyu basıncı okumaları alınmaya başladıktan sonra bilgisayarda yapılan analiz ile arazi sönümlenme eğrileri arasında bir uyum gözlenmekte, buna bağlı olarak da Tip 2 eğrisinin Elsworth'ün boşluk genişmesi modeli ile temsil edilebileceği görülmektedir.

Tip 3 eğrisinin ağırlıklı olarak düşük plastisiteli siltleri (ML) temsil ettiği açık olarak saptanmıştır. Bu tip eğride de Tip 2'de olduğu gibi eğri üzerinde negatif basınçlara geçildikten sonra uyum sağlanmaktadır. Ancak, az sayıda örnekte karşılaşılsa da tam uyum gösteren sonuçlar da vardır. Bu sebeple, Elsworth'ün boşluk genişmesi modeli ile Tip 3 eğrisi temsil edilebileceği görüşüne varılmıştır.

Tip 3 eğrileri Comsol Multiphysics yazılımı ile analiz edildiğinde MI orta plastisiteli siltte tam bir uyum gözlenmiştir. Ancak genel bir sonuca varabilmek için elimizde bu zemin sınıfında (MI) yeterli veri bulunmamaktadır. MI zemin sınıfında arazi sönümlenme deneyi (CPTU) yapılarak yeni analiz yapılması önerilmektedir.

İncelemeler silte yönelik olduğundan orta ve düşük plastisiteli killerde (CI, CL) elde çok az veri bulunduğu görülmüştür. Bu sebeple bu tip zeminlerin hangi eğri tipiyle temsil edildiği bilinmemektedir. Bu zemin sınıflarında da arazi sönümlenme deneyi (CPTU) yapılması ve sayısal analizle değerlendirilmesi önerilmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında yapılmış olan arazi ölçümleri ve bunların değerlendirilmesi sonucunda aşağıdaki görüşler oluşmuştur.

1. CPTU deneyinden elde edilen verilerin kullanımı ile killerin sıkışma modülleri hatasız bir şekilde hesaplanabilir.
2. Kısa süren sönümlenme deneyleri için başlangıç fazla boşluk suyu basıncının (u_{wi}) belirsiz olduğu yerlerde konsolidasyon katsayısının (c) hesaplanmasında karekök-zaman metodunun kullanılması daha uygun bir yol olacağı düşünülmektedir.
3. Elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucu farklı zeminlerde üç farklı tip sönümlenme eğrisi belirlenmiştir.
4. u_2 filtresi ile sönümlenme deneyi gerçekleştirildiğinde düşük plastisiteli siltler (ML), siltli kumlar (SM) ve orta plastisiteli siltler (MI) yüksek olasılıkla Tip 1 eğri tipini, yüksek plastisiteli killer (CH) Tip 2 eğri tipini ve düşük plastisiteli siltler (ML) ağırlıklı olarak Tip 3 sönümlenme eğrisini vermektedir.
5. Bu çalışmanın sonucunda koni penetrasyonunda (CPT) sönümleme yöntemi ile zeminlerin sınıfı, geçirimsizlik ve konsolidasyon katsayılarının yeterli doğrulukta tahmin edilebileceği görülmüştür.
6. Genellikle aluviyal birikimler gösteren deprem bölgelerinde zemin yenilmesi ve sıvılaşma olasılığı bulunan kumlar ve siltlerde tanıma ise sıvılaşabilir bu zemin tiplerinin çok farklı geçirimsizlik özellikleri olması nedeniyle başarı ile yapılamamaktadır. Bu çalışma, sıvılaşabilirliğin siltli ortamlarda sönümleme ile sıvılaşma teşhisi yapılabileceği yönünde bilgi sağlamıştır.
7. Bundan sonraki aşamada sönümlenme eğrilerinin Adapazarı kriteri ile karşılaştırılarak uygulanabilir bir yöntem geliştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

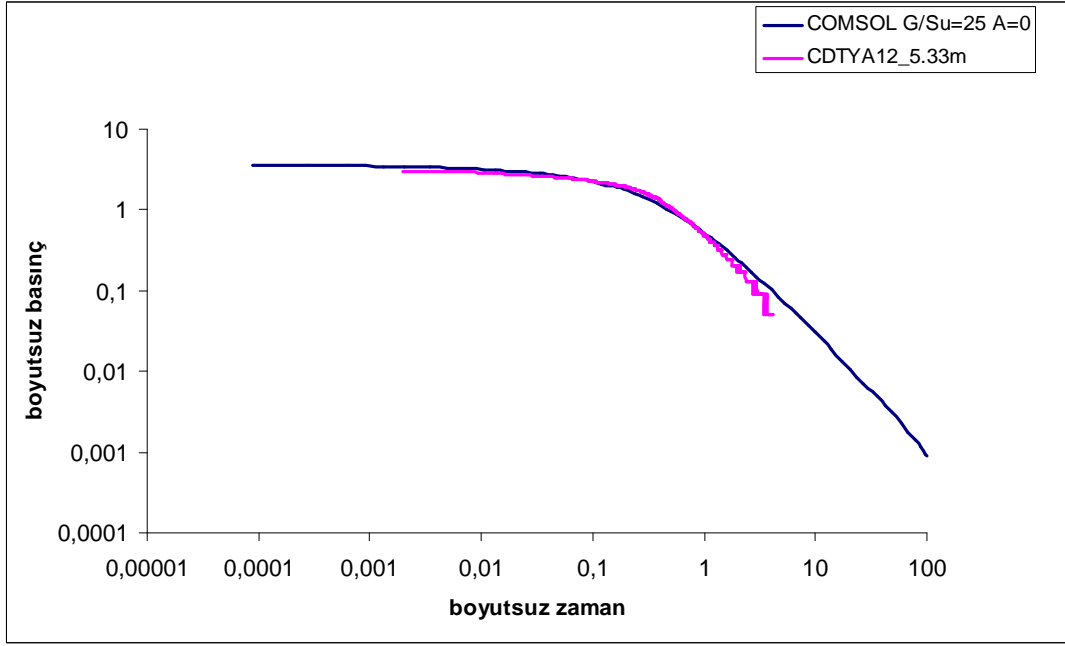
- Baligh, M.M. and Levadoux, J.N.**, 1980. Pore pressure dissipation after cone penetration, *Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering*, Cambridge, Mass., Report R80-11
- Bol, E.**, 2003. Adapazarı zeminlerinin geoteknik özellikleri, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adapazarı, Türkiye.
- Bol, E., Arel, E. ve Önalp, A.**, 2007. Yerel zemin koşullarının deprem hasarlarına etkisi-Adapazarı örneği, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, 16-20 Ekim, s.1-12
- Broms, B.B. and Flodin, N.**, 1988. History of soil penetration testing, *Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing*, ISOPT-1, Orlando, 1, Balkema Pub, Rotterdam, 157-220.
- Burns, S.E. and Mayne, P.W.**, 1998. Monotonic and dilatatory pore pressure decay during piezocone tests in clay, *Can Geotech. J.*, **35**, 1063-1073.
- Elsworth, D., Lee, D.S., Hryciw, R. and Shin, S.**, 2006. Pore pressure response following undrained uCPT sounding in a dilating soil, *American Society of Engineers (ASCE)*, 1485-1495.
- Houlsby, G.T. and Teh, C.I.**, 1988. Analysis of the piezocone in clay, *Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing*, ISOPT-1, Orlando, 2, Balkema Pub, Rotterdam, 777-83
- Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T. and Lancellotta, R.**, 1985. New developments in field and laboratory testing of soils, *State-of-the art report, Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, 1, 57-153, Balkema Pub., Rotterdam.
- Janbu, N.**, 1963. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests, *Proceeding of the European Conference on Soil Mechanic and Foundation Engineering*, Wiesbaden, **1**, 19-25.
- Janbu, N. and Senneset, K.**, 1974. Effective stress interpretation of in situ static penetration tests, *Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing*, ESOPT, Stockholm, 2.2, 181-93.
- Keaveny, J.M. and Mitchell, J.K.**, 1986. Strength of fine grained soils using the piezocone, *American Society of Engineers(ASCE)*, Blacksburg, 668-85
- Kulhawy, F.H. and Mayne, P.H.**, 1990. Manual on estimating soil properties for foundation design, *Electric Power Research Institute*, EPRI
- Larsson, R.**, 1995. Use of a thin slot as filter in piezocone tests, *Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing*, CPT'95, Linköping, Sweden, **2**, 35-40.
- Levadoux, J.N. and Baligh, M.M.**, 1986. Consolidation after undrained piezocone penetration, *Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Engineers(ASCE)*, **112(7)**, 707-26
- Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M.**, 1997. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, E&FN Spon, London, pp. 4-7, 71-81, 220.

- Mayne, P.W.**, 2001. Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests, *Proceedings, International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties & Case Histories [In-Situ 2001] Georgia Institute of Technology*, Atlanta, Georgia USA, May 21-24, 27-48.
- Önalp, A., Arel, E., Bol, E., Özocak, A. ve Sert, S.**, 2007. Sıvılaştırma potansiyelinin belirlenmesinde koni penetrasyon deneyi sönümlenme yönteminin uygulanması, *Tübitak Projesi*, Proje No: 104M387, Sakarya, Türkiye, s.17-100.
- Önalp, A., Özocak, A. ve Sert, S.**, 2006. Zemin incelemelerine çağdaş yaklaşım : Koni penetrasyon deneyi, *GAP V. Mühendislik Kongresi Bildiriler Kitabı*, Şanlıurfa, 26-28 Nisan, s.1-8.
- Önalp, A. ve Sert, S.**, 2006. Geoteknik Bilgisi III Bina Temelleri, Birsen Yayınevi, İstanbul, s.70-74.
- Parez and Fauriel**, 1988. Le piezocone ameliorations apportees a la reconnaissance de sols, *Revue Francaise de Geotech*, **44**, 13-27.
- Powell, J.J.M. and Quaterman, R.S.T.**, 1997. A study of piezocone dissipation tests in soft clays for consolidation properties, In preparation
- Robertson P.K.**, 1990. Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, **27(1)**, 151-8
- Robertson P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D.G. and Greig, J.**, 1986. Use of piezocone data, *American Society of Engineers(ASCE)*, Blacksburg, 1263-80.
- Robertson P.K., Sully, J.P., Woeller, D.J., Lunne, T., Powell, J.J.M. and Gillespie, D.G.**, 1992a. Estimating coefficient of consolidation from piezocone tests, *Canadian Geotechnical. Journal.*, **29(4)**, 539-557.
- Robertson P.K., Woeller, D.J. and Finn, W.D.L.**, 1992b. Seismic cone penetration test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading, *Canadian Geotechnical. Journal*, **29(4)**, 686-695.
- Sanglerat, G.**, 1972. The penetrometer and soil exploration, Elsevier, Amsterdam, 464.
- Schmertmann, J.H.**, 1974. Penetration pore pressure effects on quasi-static cone bearing, q_c , *Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing*, ESOPT, Stockholm, 2.2, 345-51.
- Senneset, K., Sandven, R., Lunne, T., By, T. and Amundsen, T.**, 1988. Piezocone tests in silty soils, *Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing*, ISOPT-1, Orlando, 2, Balkema Pub, Rotterdam, 955-966.
- Senneset, K., Sandven, R. and Janbu, N.**, 1989. The evaluation of soil parameters from piezocone tests, *Transportation Research Record*, No. 1235, 24-37.
- Sully, J.P.**, 1991. Measurement of in situ lateral stress during full-displacement penetration tests, *Ph.D. thesis*, University of British Columbia, Vancouver.
- Sully, J.P., Campanella, R.G. and Robertson, P.K.**, 1988. Overconsolidation ratio of clays from penetration pore water pressures, *Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Engineers(ASCE)*, **114(2)**, 209-215.
- Teh, C.I.**, 1987. An analytical study of the cone penetration test, *D.Phil. thesis*, Oxford University.
- Teh, C.I. and Houlsby, G.T.**, 1991. An analytical study of the cone penetration test in clay, *Geotechnique*, **41(1)**, 17-34.
- Torstensson, B.A.**, 1975. Pore pressure sounding instrument, *Proceeding of the ASCE Specialty Conference on In Situ Measurement of Soil Properties*, American Society of Engineers(ASCE), Raleigh, North Carolina, **2**, 48-54.
- Torstensson, B.A.**, 1977. The pore pressure probe, *Nordiske Geotekniske Mote*, Oslo, Norway, **34**, 1-15.

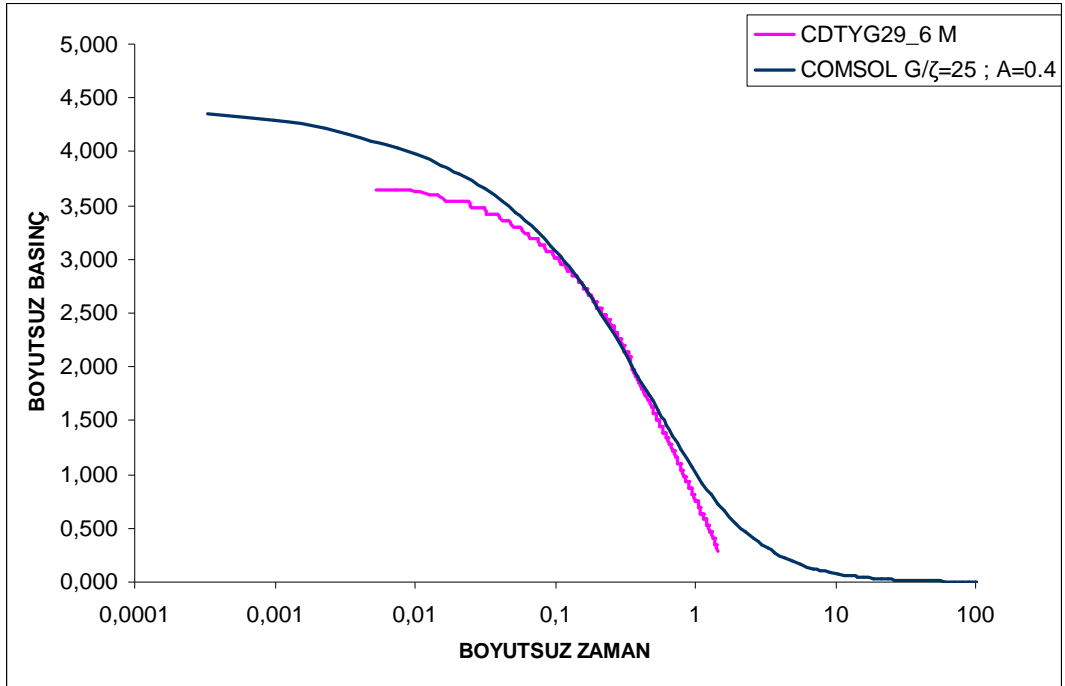
EKLER

EK A. : Tip 1 Eğrileri

a)

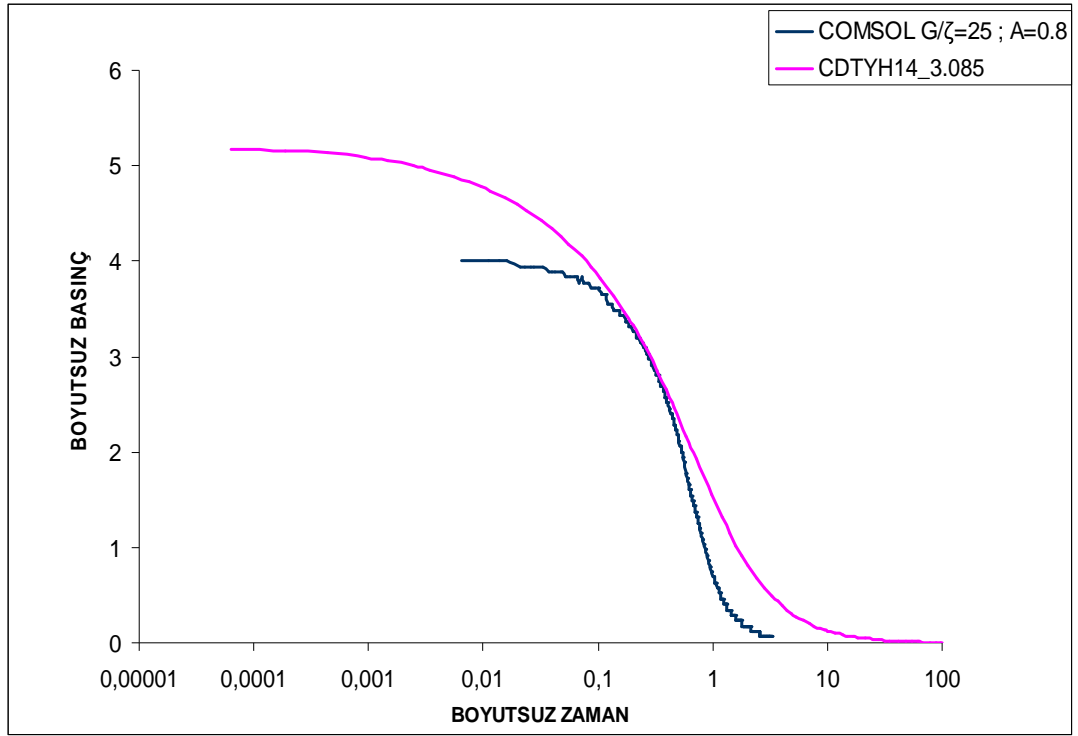


b)

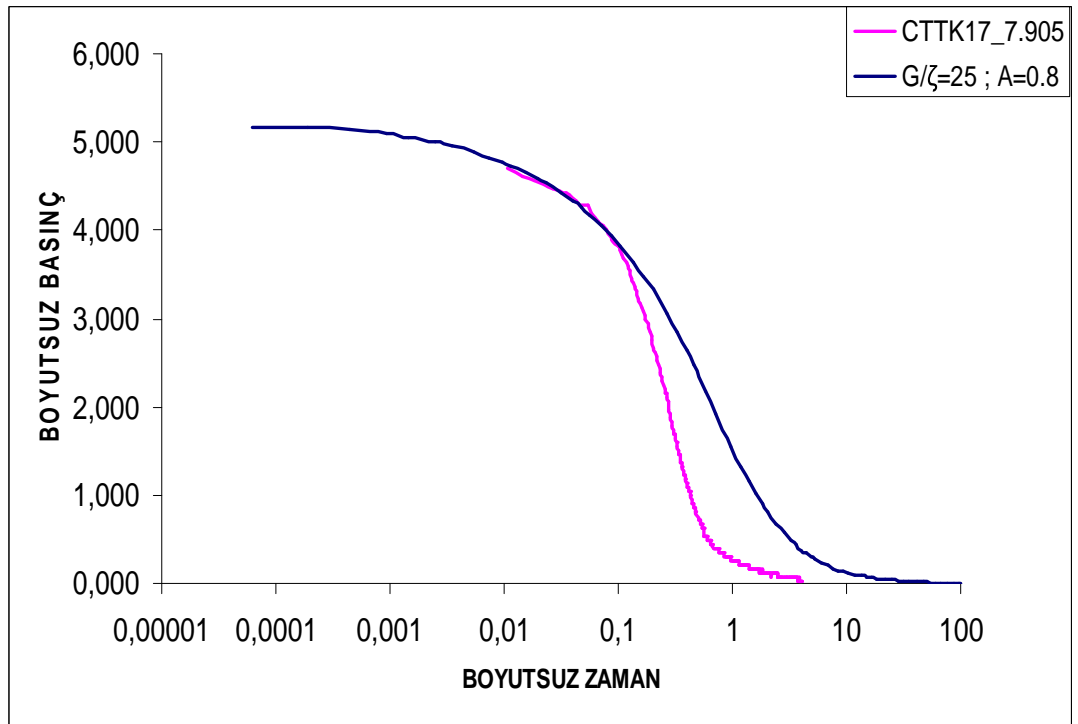


Şekil A.1 : Tip 1 eğrileri ML zemin sınıfı

a)

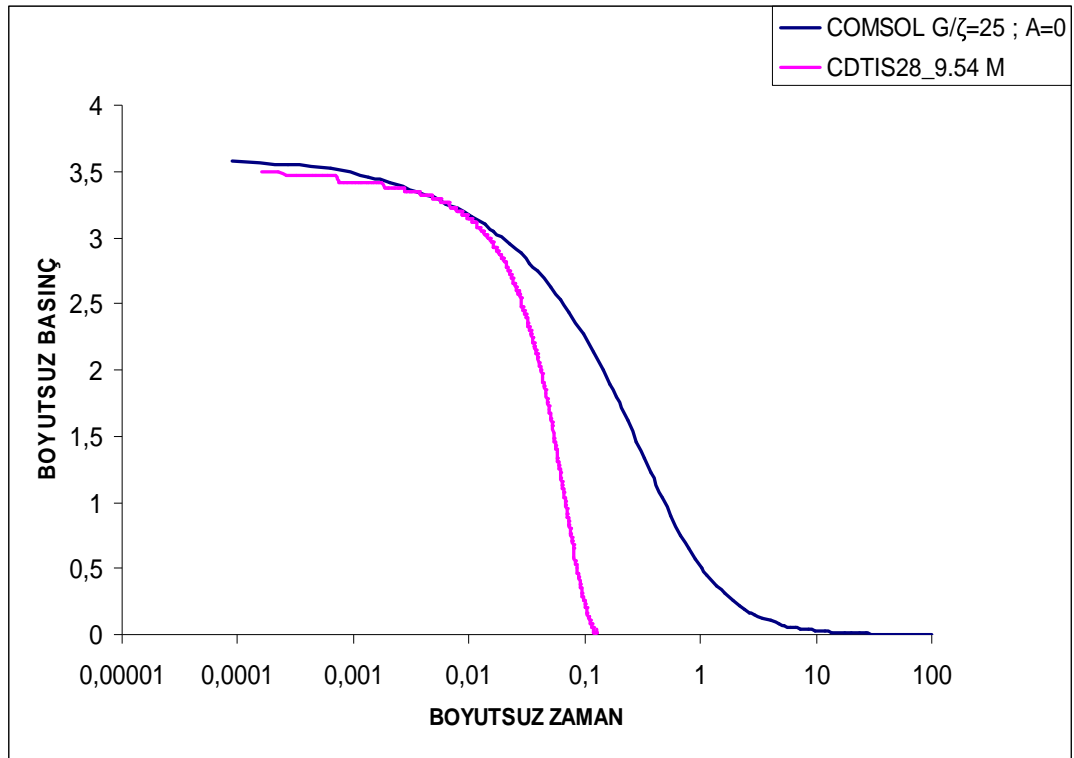


b)

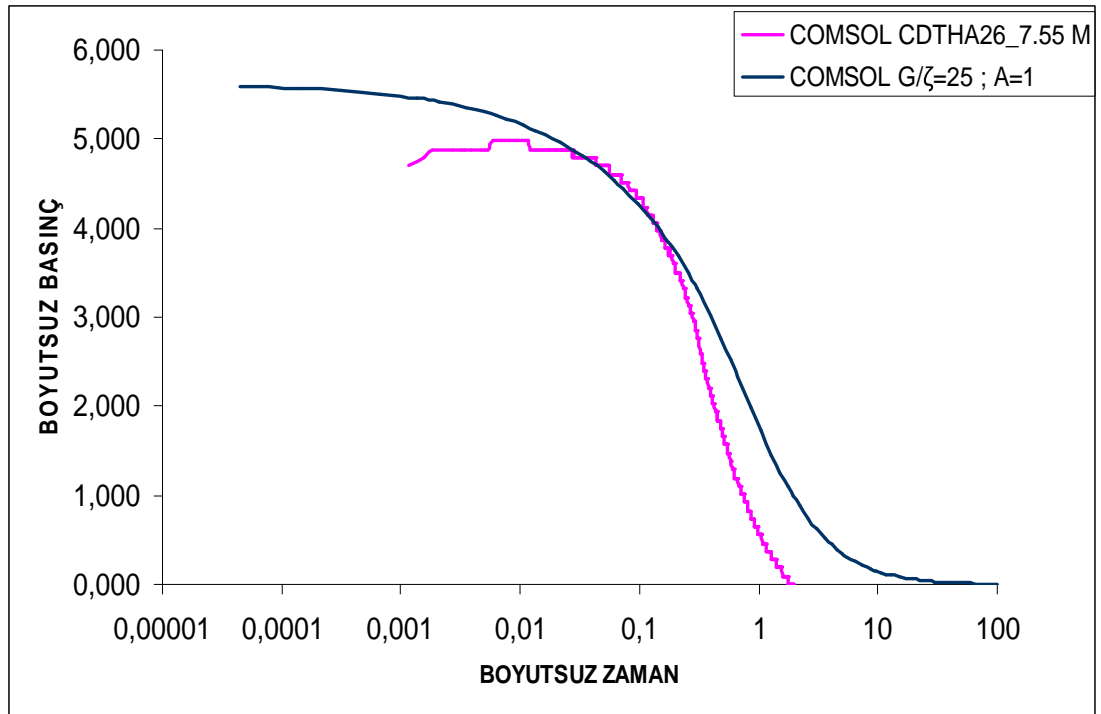


Şekil A.2 : Tip 1 eğrileri MI zemin sınfı

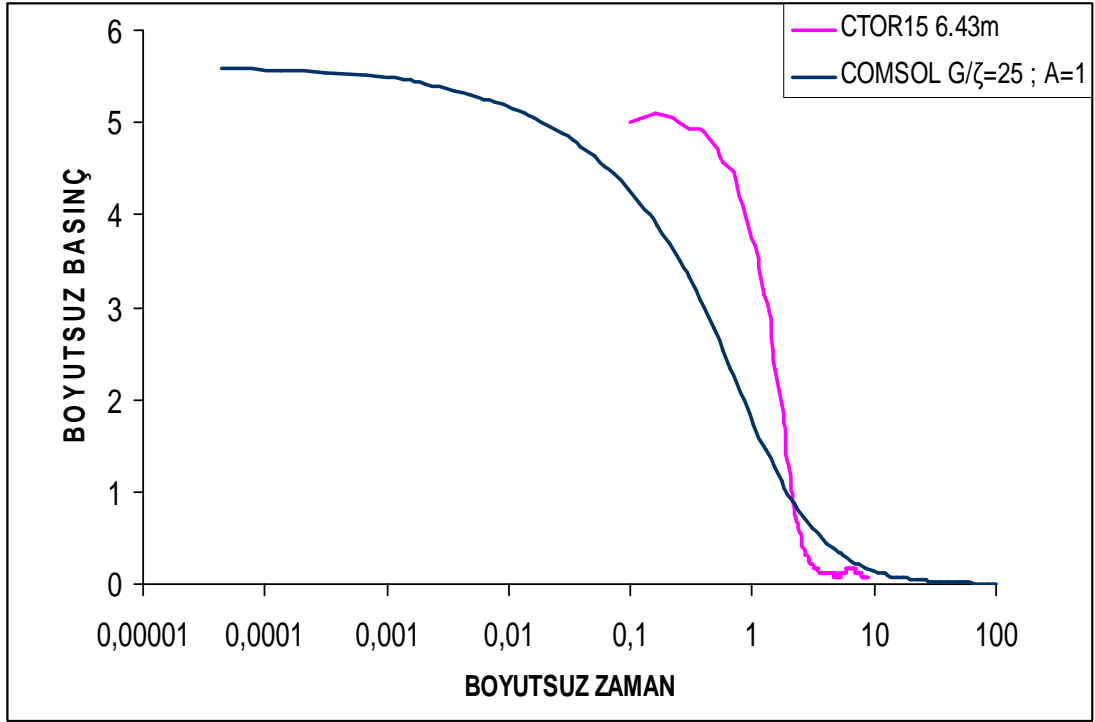
a)



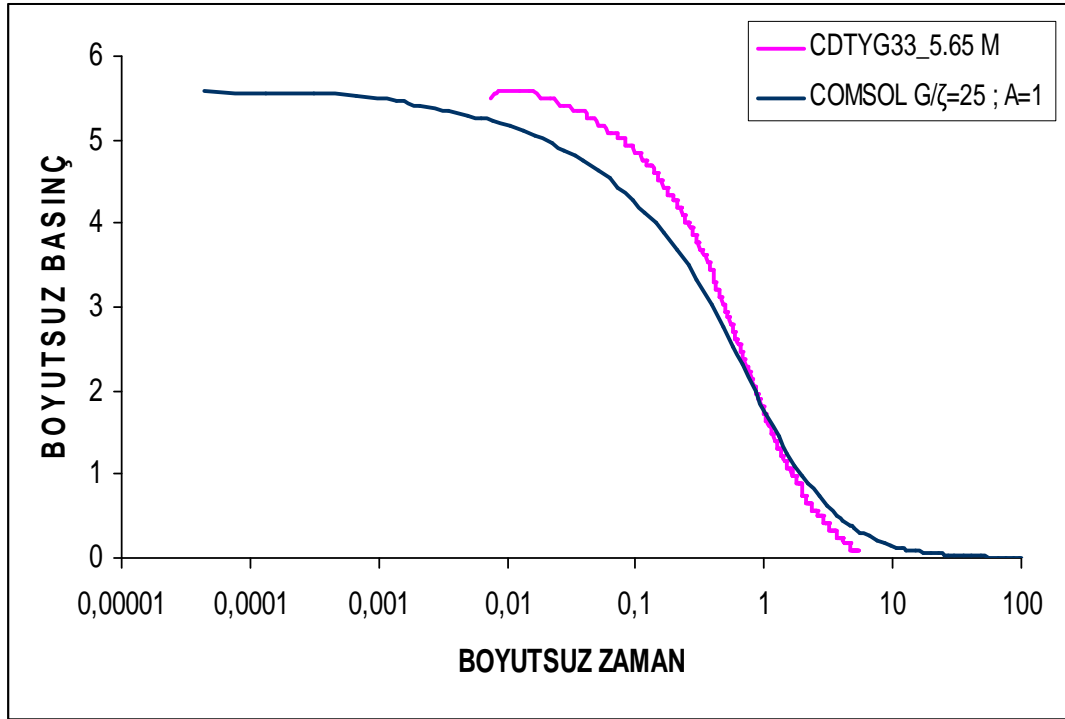
b)



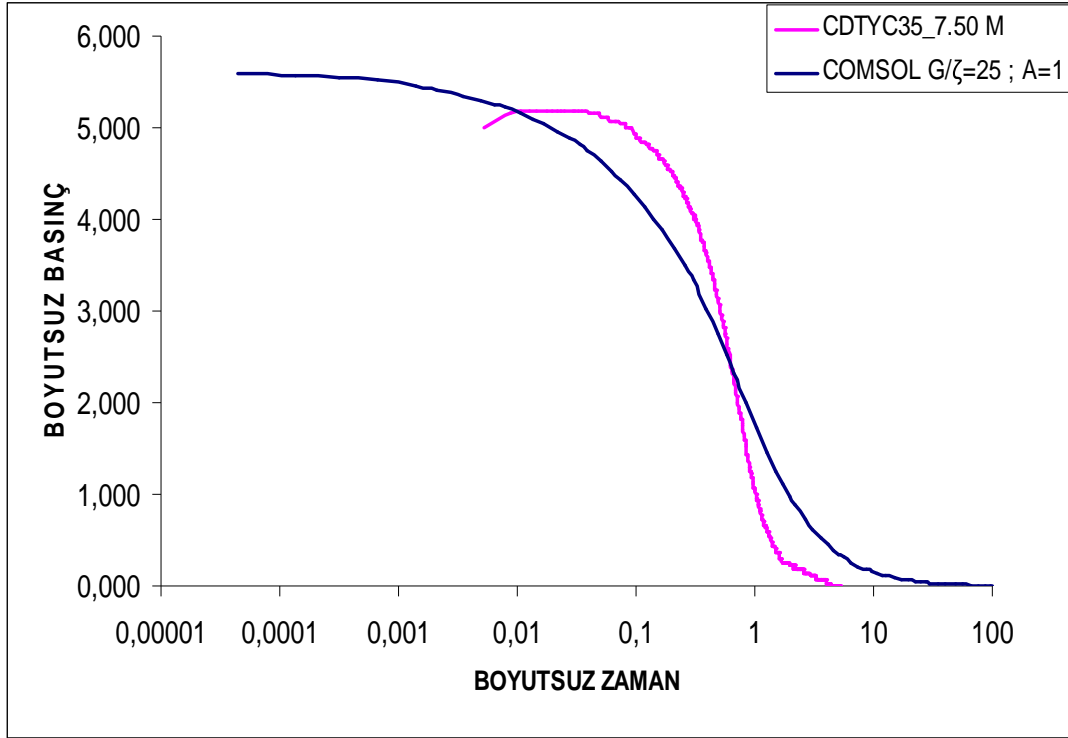
c)



d)



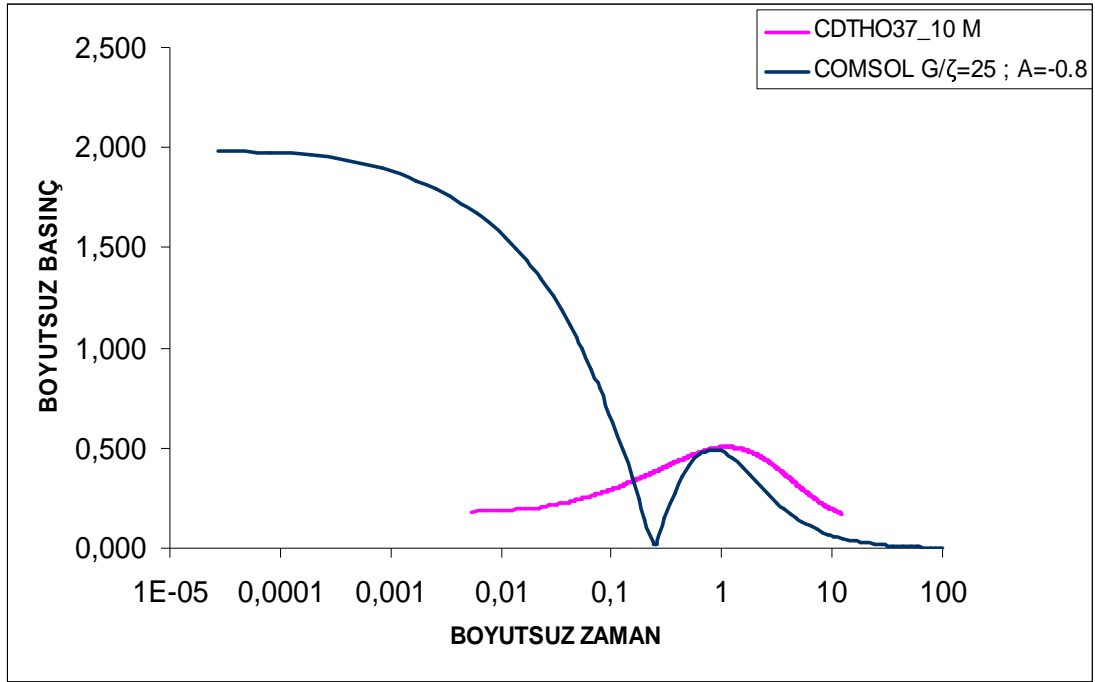
Şekil A.3 : Tip 1 eğrileri SM zemin sınıfı



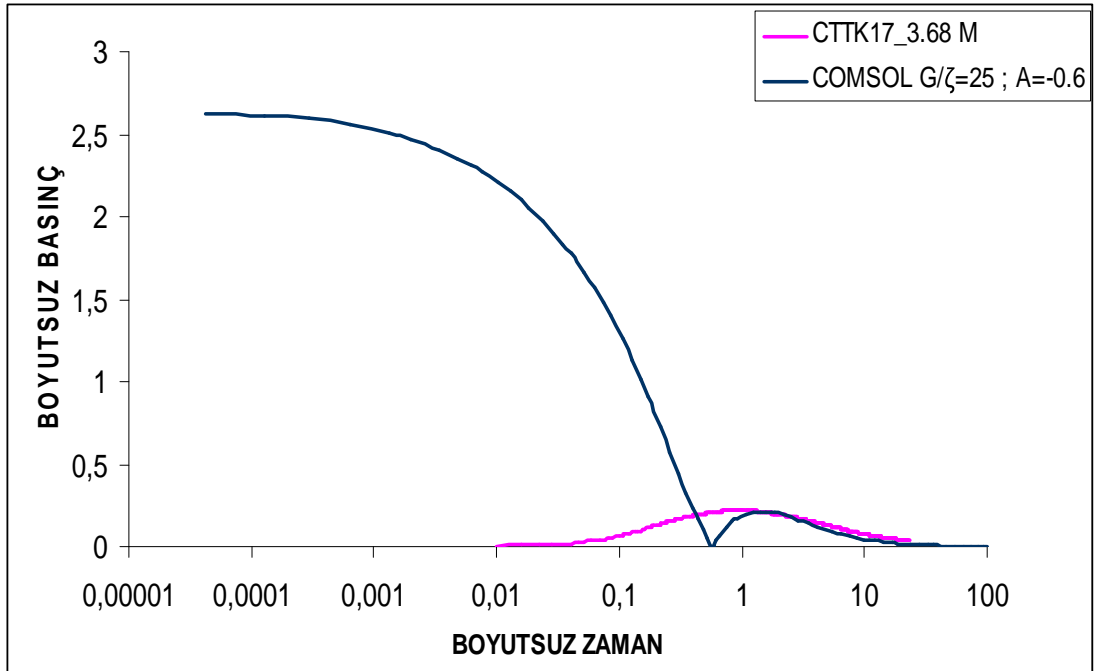
Şekil A.4 : Tip 1 eğrisi SW-SM zemin sınıfı

EK B : Tip 2 Eğrileri

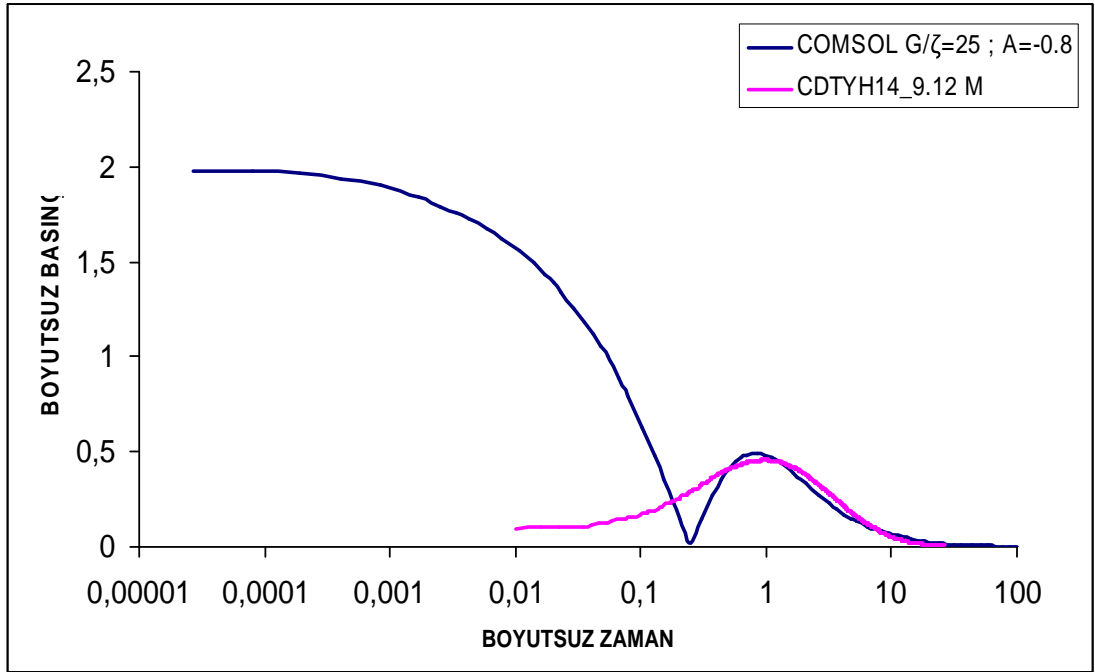
a)



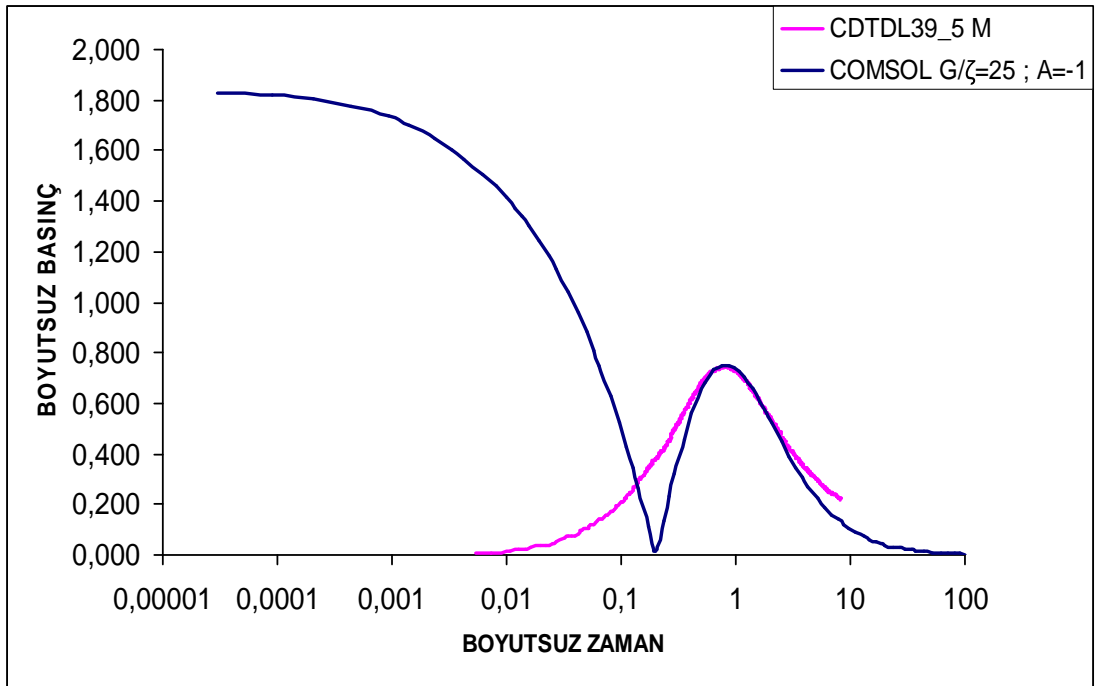
b)



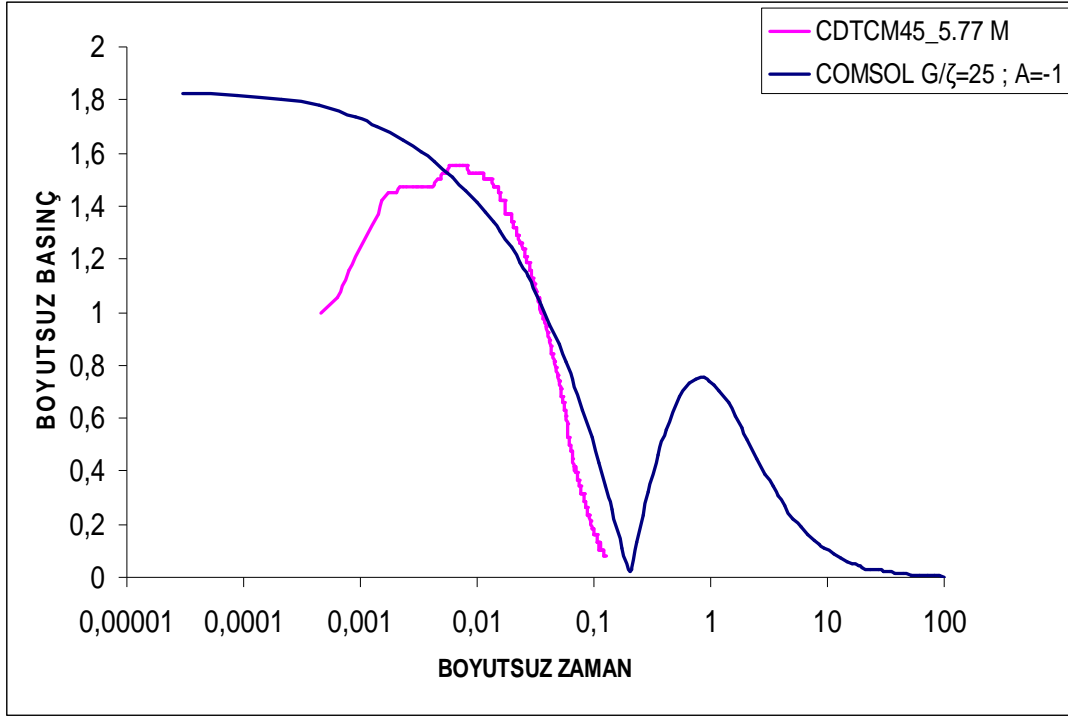
c)



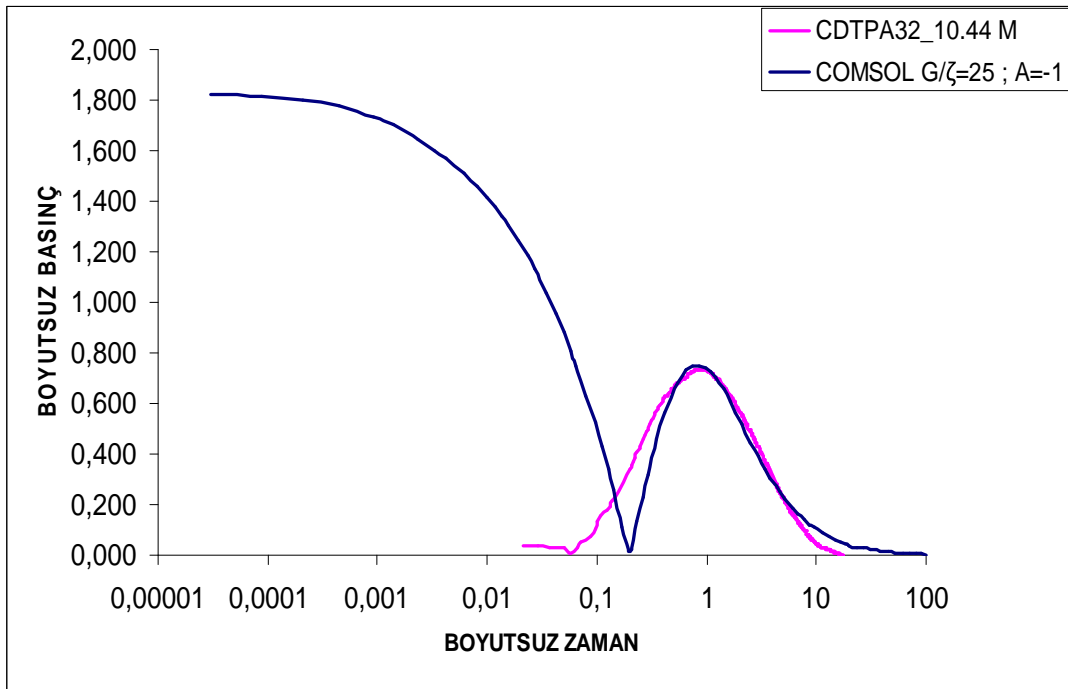
Şekil B.1 : Tip 2 eğrileri CH zemin sınıfı



Şekil B.2 : Tip 2 eğrisi MH zemin sınıfı



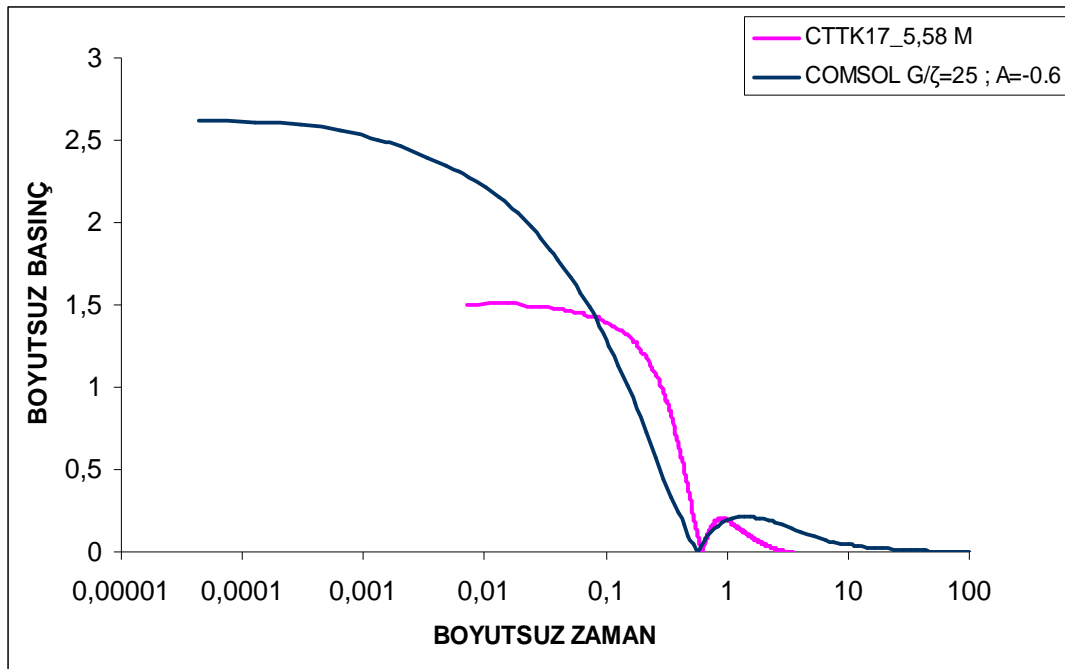
Şekil B.3 : Tip 2 eğrisi SM zemin sınıfı



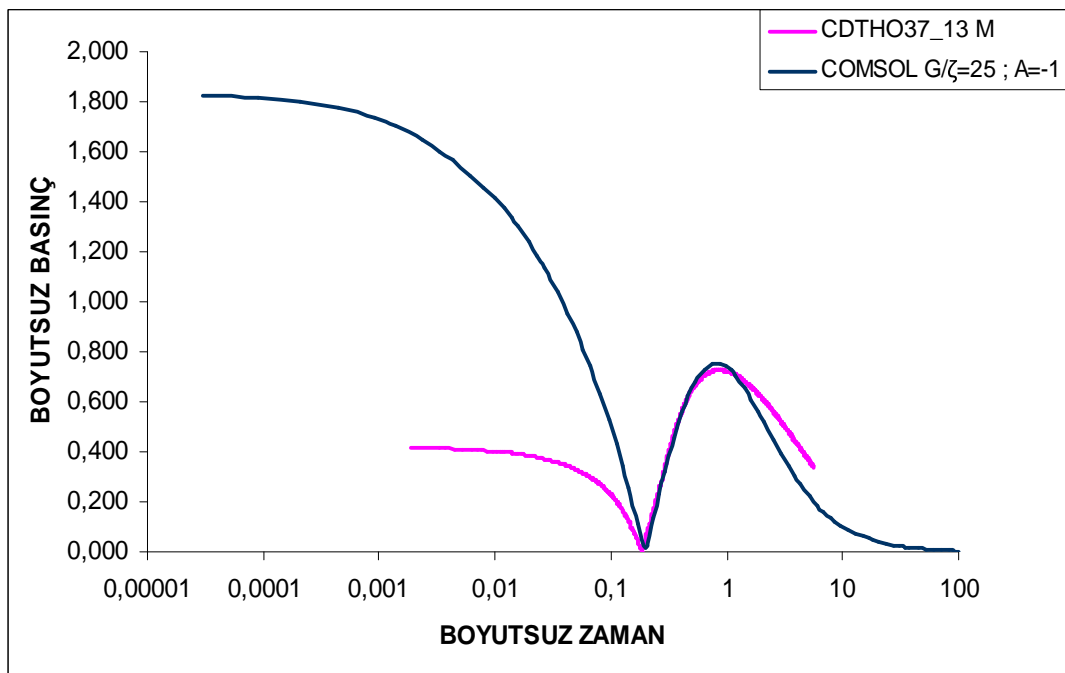
Şekil B.4 : Tip 2 eğrisi CL zemin sınıfı

EK C : Tip 3 Eğrileri

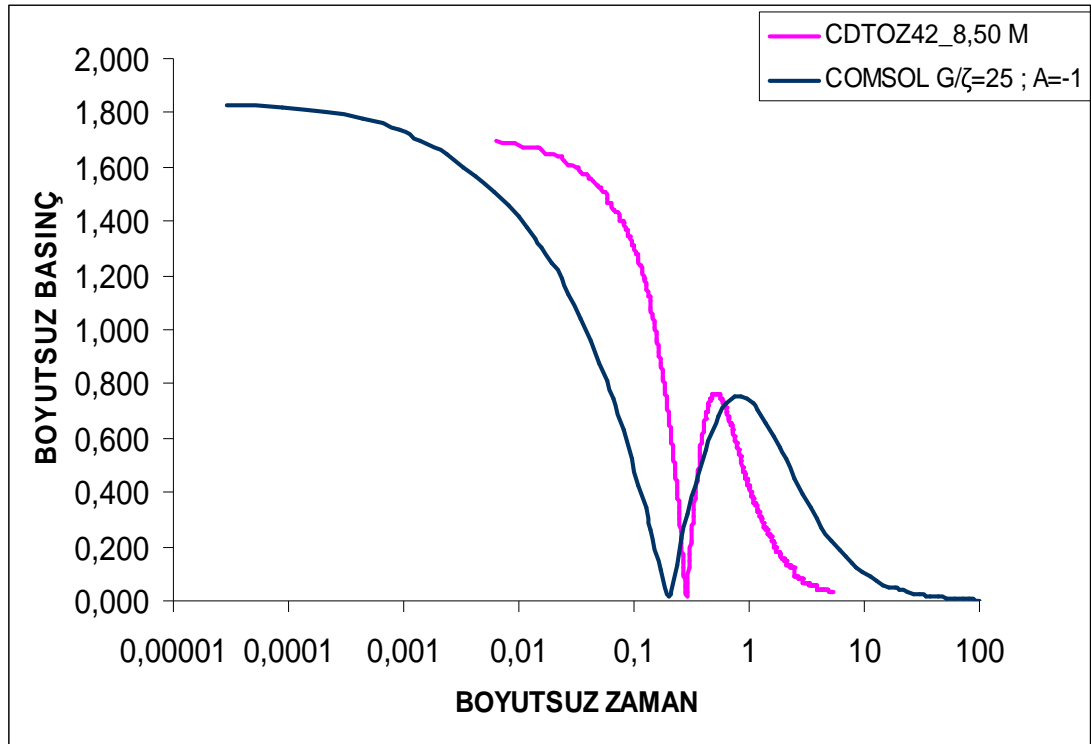
a)



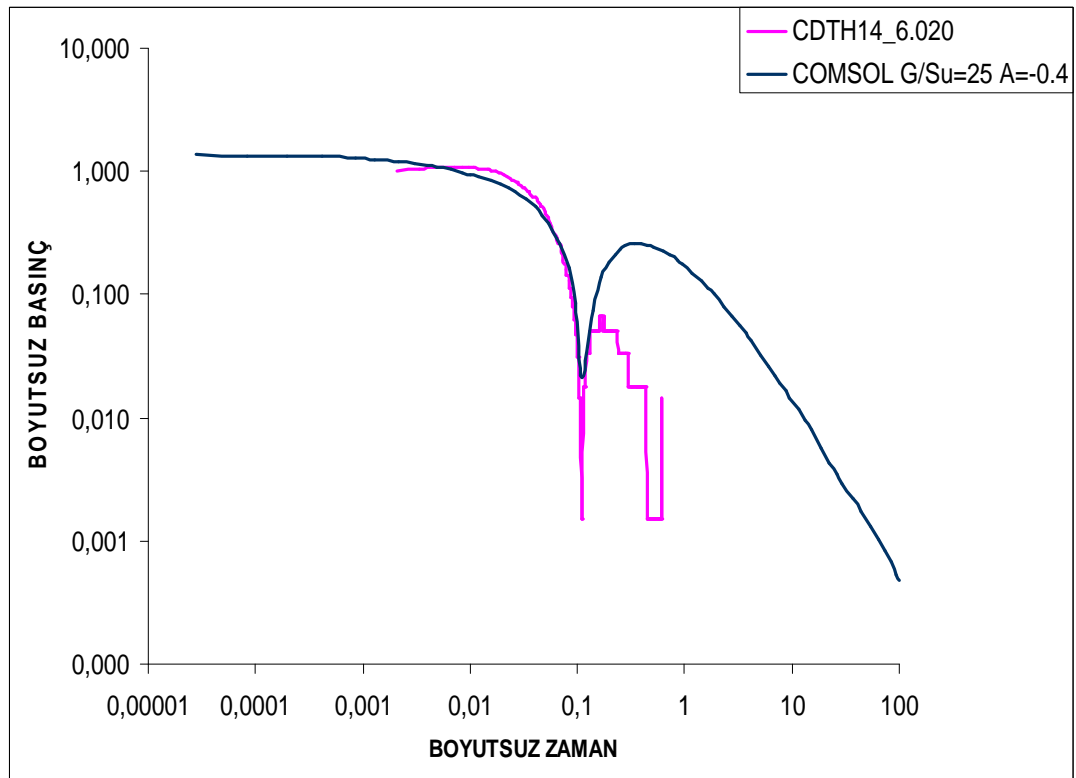
b)



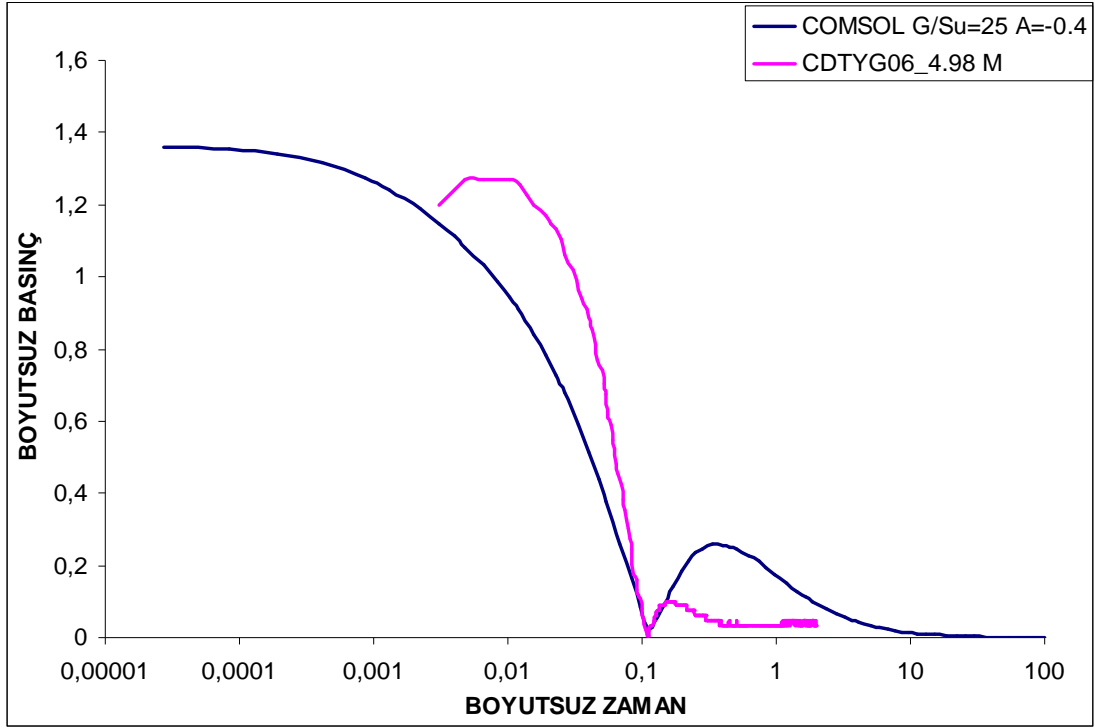
c)



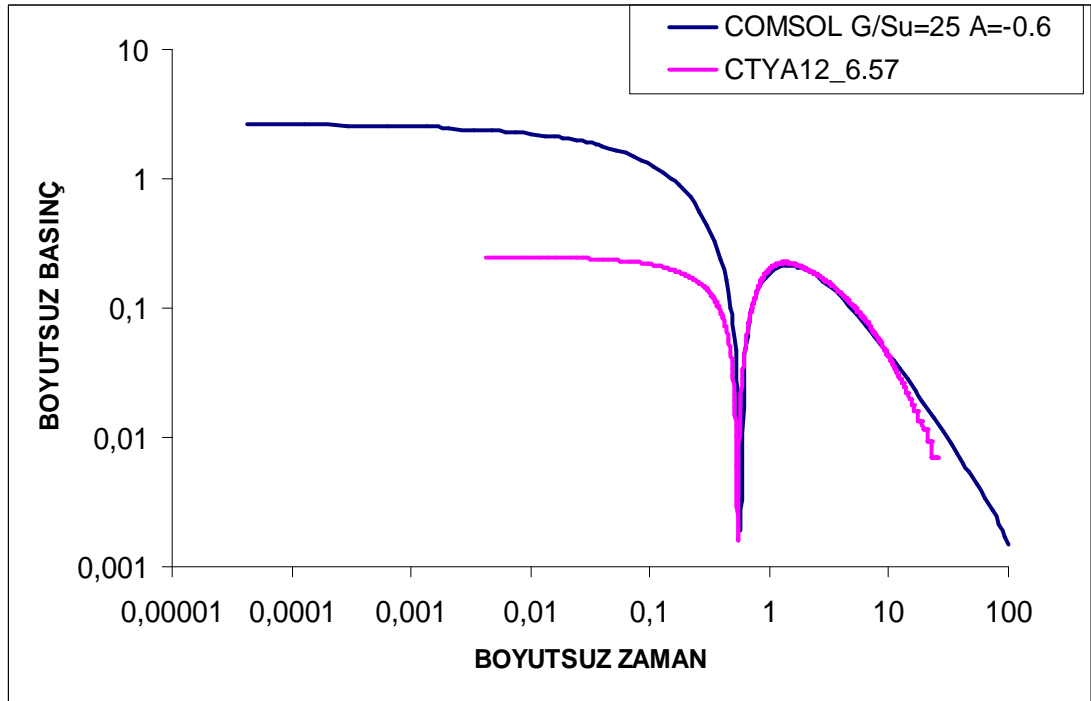
d)



e)



Şekil C.1 : Tip 3 eğrileri ML zemin sınıfı



Şekil C.2 : Tip 3 eğrisi MI zemin sınıfı

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Yeşim YEKTE

Doğum Yeri ve Tarihi: Kadıköy / 26.10.1984

Adres: Bağlarbaşı Mah. Kavala Cad. Serin Sok. No:1 Darıca / KOCAELİ

Lisans Üniversite: SAKARYA ÜNİVERSİTESİ

Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yapılan Çalışmalar:

- 11/2006-10/2007 : SAKARYA ÜNİV. - İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİV.
İnşaat Mühendisliği Bölümü GEOTEKNİK ABD
TÜBİTAK Projesi 104M387
'Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesinde Koni Penetrasyon
Deneyi (CPT) Sönümlenme Yönteminin Uygulanması'
Proje Yürütücüsü : Prof. Dr. Akın ÖNALP
Araştırmacı Öğrenci (Tam zamanlı)
- 10/2007-07/2008 : SAKARYA ÜNİV. - İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİV.
İnşaat Mühendisliği Bölümü GEOTEKNİK ABD
TÜBİTAK Projesi 106M042
'İnce Daneli Zeminlerin Sismik Koşullarda Yenilmesinin
Adapazarı Kriterleri ile Tanısında Dinamik Deneylerin Etkisi'
Proje Yürütücüsü : Prof. Dr. Akın ÖNALP
Araştırmacı Öğrenci (Tam zamanlı)

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.