KAYSERİ CİVARINDAKİ TURBA ZEMİNLERİN JEOMEKANİK KARAKTERİSTİKLERİNİN VE DİNAMİK DAVRANIŞLARININ ARAZİ, LABORATUVAR VE SAYISAL MODELLEME TEKNİKLERİYLE ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE GEOMECHANICAL CHARACTERISTICS AND THE DYNAMIC BEHAVIORS OF PEATY SOILS IN THE VICINITY OF KAYSERİ USING FIELD, LABORATORY AND NUMERICAL MODELLING TECHNIQUES

NAZLI TUNAR ÖZCAN

PROF. DR. REŞAT ULUSAY
Tez Danışmanı

DOÇ. DR. NİHAT SİNAN IŞIK
İkinci Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Nazlı TUNAR ÖZCAN'ın hazırladığı "**Kayseri Civarındaki Turba Zeminlerin Jeomekanik Karakteristiklerinin ve Dinamik Davranışlarının Arazi Laboratuvar ve Sayısal Modelleme Teknikleriyle Araştırılması**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Erdal ÇOKÇA
Başkan .....

Prof. Dr. Reşat ULUSAY
Danışman .....

Prof. Dr. Harun SÖNMEZ
Üye .....

Doç. Dr. Ergün TUNCAY
Üye .....

Yrd. Doç. Dr. Nejan HUVAJ SARIHAN
Üye .....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarında uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- tez içindeki tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

17/12/2015

NAZLI TUNAR ÖZCAN

ÖZET

KAYSERİ CİVARINDAKİ TURBA ZEMİNLERİN JEOMEKANİK KARAKTERİSTİKLERİNİN VE DİNAMİK DAVRANIŞLARININ ARAZİ, LABORATUVAR VE SAYISAL MODELLEME TEKNİKLERİYLE ARAŞTIRILMASI

Nazlı TUNAR ÖZCAN
Doktora, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Reşat ULUSAY
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nihat Sinan IŞIK
Aralık 2015, 210 sayfa

Turba; nemli ve ılık veya soğuk iklim koşullarında, oksijensiz sulak alanlarda bitki artıklarının depolanmasıyla oluşan, yüksek organik madde içeriğine sahip bir zemin türüdür. İleri derecede sıkışabilen, oldukça yüksek su içeriği ve geçirimliliğe sahip olan turbalar, başlıca oturma, şev duraysızlığı ve zemin büyütmesi gibi önemli mühendislik sorunlarının gelişmesine neden olabildiklerinden dolayı mühendislik yapıları için genellikle uygun temel zeminleri değillerdir. Kanada, Rusya, Malezya ve Endonezya gibi ülkelerdeki kadar yaygın olmasa da, ülkemizde de turba oluşumları bulunmakta olup, en tipik turbalık alanlardan biri üzerinde sanayi tesislerinin de kurulu olduğu Kayseri girişindeki Ambarköy ve civarıdır. Kayseri'de sanayi bölgelerinin bu zemin üzerinde hızlı bir gelişme göstermesi, kente yakın konumlu deprem üretebilecek aktif fayların varlığı ve ülkemizde turbaların jeomekanik özellikleri ve dinamik davranışlarıyla ilgili çalışmaların çok sınırlı olması gibi hususlar dikkate alınarak, bu tez çalışmasında; Kayseri Serbest Bölge'de zemini oluşturan turbaların mineralojik, fiziksel ve indeks özellikleriyle birlikte makaslama dayanımlarının belirlenmesi, konsolidasyon ve oturma karakteristiklerinin araştırılması, arazide gerçekleşecek oturma miktarının tahminine yönelik bir yaklaşımın önerilmesi, dinamik davranışının analiz edilmesi ve sismik yer tepkisinin belirlenerek mevut tasarım spektrumlarıyla karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda; inceleme alanında

sondaj ve örnekleme çalışmaları yapılmış, jeofizik ölçümlerle turba zeminin kalınlığı ve makaslama dalgası hızları belirlenmiş, turbanın laboratuvar deneyleriyle jeomekanik ve dinamik özellikleri tayin edilmiş, arazide inşa edilen bir gözlem dolgusunda uzun süreli oturma ölçümleri alınmış, geriye dönük oturma analizleri gerçekleştirilmiş ve turbaların sismik yer tepkisinin belirlenmesi için dinamik analizler yapılmıştır. Deney sonuçları, incelenen turbaların jeomekanik özellikleri açısından Dünya literatüründe verilen değişim aralıklarıyla genel olarak uyumlu, bununla birlikte söz konusu aralıkların alt sınırlarına daha yakın olduğunu göstermiştir. Yüzeye yakın derinliklerdeki kalın lifler içeren turbalar liflerin makaslama kuvvetine karşı gösterdiği direnç nedeniyle yüksek makaslama dayanımı parametrelerine sahipken, daha derindeki ince lifli ve amorf turbaların dayanımlarının ise daha düşük olduğu belirlenmiştir. İncelenen turba zeminlerin sıkışma sürecinin birincil ve ikincil konsolidasyon ile üçüncül sıkışma olmak üzere üç aşamada gerçekleştiği gözlenmiştir. İncelenen turbalar, birincil konsolidasyon sürecini 54 kPa'dan düşük normal gerilmeler altında 1 dakikadan daha kısa sürede tamamlamakta ve ikincil sıkışma indisleri ise zamanla doğrusal olmayan şekilde artmaktadır. Arazideki gyözlem dolgusundaki oturma miktarını kestirebilmek için bazı konsolidasyon parametrelerinin farklı bir yaklaşımla tekrar değerlendirilip kullanılmasıyla yapılan geriye dönük analizlerden hesaplanan zamana bağlı oturma miktarları ile arazide ölçülen oturma miktarlarının uyumlu olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla inceleme alanındaki turbalar ile buna benzer özelliklere sahip turba zeminlere ilişkin oturma analizlerinde, konsolidasyon parametrelerinin bu çalışmada önerildiği gibi kullanılması halinde arazide gerçekleşebilecek oturma miktarları daha sağlıklı olarak tahmin edilebilecektir. İncelenen turbaların modül azalım ilişkisi dikkate alındığında, bu turbaların plastisite indeksi PI=0 olan zeminlere kısmen benzer şekilde davrandığı anlaşılmaktadır. Turba zeminlerin sismik yer tepki analizleri sonucunda elde edilen tepki spektrumlarının Türkiye Deprem Yönetmeliği ve Avrupa Yapısal Tasarım Standartları Yönetmeliği tarafından önerilen spektrumlarla uyumlu olmadığını ve onları aştığı anlaşılmıştır. Bu bulgu, incelenen turba zeminlerin, düşük periyotlarda deprem dalgalarını sönümleyeceğini, ancak 0.3-0.5 saniyeden daha büyük periyotlarda büyüteceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Turba, Kayseri, konsolidasyon, oturma, sismik yer tepkisi analizi, tasarım spektrumu, rezonans kolonu deneyi.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE GEOMECHANICAL CHARACTERISTICS AND DYNAMIC BEHAVIOURS OF THE PEATY SOILS IN THE VICINITY OF KAYSERİ USING FIELD, LABOARTORY AND NUMERICAL MODELLING TECHNIQUES

Nazlı TUNAR ÖZCAN
PhD, Department of Geological Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Reşat ULUSAY
Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK
December 2015, 210 pages

Peat is a soil type, having high organic material content, consists of decomposed remains of vegetation, which have accumulated in waterlogged areas under moist and warm or cold climatic conditions. Peats, which have high compressibility, considerably high water content and high permeability, are often unsuitable for supporting structures of any kind due to the facts that they mainly cause settlement, slope instability and soil amplification. When compared to those in Canada, Russia, Malaysia and Indonesia, although they are not common, there are also some peat formations in our country and among them one of the most typical formations is at Ambarköy and its vicinity at the entrance of Kayseri where industrial structures have also been built. By considering the fast development of industrial zones on peaty soils in Kayseri, the presence of active faults, which are very close to Kayseri and can cause earthquakes, and the limited studies on the geomechanical and dynamic properties of peats in Turkey, in this PhD thesis, it was aimed to determine the mineralogical, physical and index properties with shear strength of the peaty soils in the Kayseri Free Zone, to investigate their consolidation and settlement characteristics, to develop an approach for the estimation of in-situ settlement in peats, to analyse their dynamic behaviour and to determine their seismic site response spectra and to compare them with the design spectra suggested by current seismic codes. For these purposes;

boreholes were drilled and sampling study was conducted, the thickness of the peaty soil and its shear wave velocity were determined with the aid of seismic measurements, geomechanical and dynamic properties of the peat samples were determined in laboratory, long-term settlements were measured from a externally loaded concrete platform, which was constructed in the study site, and dynamic analyses were conducted to determine the seismic site response spectra of the investigated peat. The test results indicated that in terms of their geomechanical properties, the peats investigated are generally consistent with those reported in the literature, however, they are closer to the lower bounds of the reported ranges. It was determined that the peats, which include thick fibres and locate near to the ground surface, have high shear strength parameters due to the resistance of the fibres against shearing force, while the peats including thinly fibres and amorphous peats have lower shear strength. It was observed that the compression process of the investigated peats realized in three stages, namely primary and secondary consolidation and tertiary compression. These peats complete their primary consolidation shorter than 1 minute under normal stresses smaller than 54 kPa and their secondary compression indices increase in a non-linear trend. The amounts of settlement calculated for the estimation of the settlement beneath the concrete platform in the field from the back-analyses, which were based on the rearrangement of the consolidations parameters, showed a good agreement with those measured in the field. Therefore, in the settlement analyses for these kinds of soil, the amount of settlement in the field can be more precisely estimated if the consolidation characteristics of the soil are employed as suggested in this study. When the modulus reduction behaviour of the investigated peats are taken into consideration, it can be concluded that their behaviour is partly similar to those of the soils with a plasticity index of PI=0. Site response analyses showed that the seismic site response spectra obtained for the investigated peat are not consistent with those recommended by the Turkish Seismic Codes and European Structural Design Standards and exceed them. This finding indicates that at low periods the investigated peats will attenuate the earthquake waves, but at the periods greater than 0.3-0.5 second they will cause an increase in soil amplification.

Key Words: Peat, Kayseri, consolidation, settlement, seismic site response analysis, design spectra, resonant column test.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her aşamasında bilgi ve tecrübeleri ile çalışmalarıma yön veren, ilgi ve katkılarını esirgemeyen ve tezin son şeklini almasında büyük emeği geçen tez danışmanım değerli hocam Prof. Dr. Reşat ULUSAY'a,

Çalışmanın başından beri desteğini esirgemeyen, çalışma sırasında karşılaştığım her güçlükte sıklıkla yardımını aldığım ikinci tez danışmanım değerli hocam Doç. Dr. Nihat Sinan IŞIK'a,

Tez çalışması süresince yapıcı eleştirileri ile teze yön veren Tez İzleme Komitesi Üyesi değerli hocam Doç. Dr. Ergün TUNCAY'a,

Aydınlatıcı yorumları ve fikirleriyle tez çalışmasının son şeklini almasında katkıda bulunan Tez İzleme Komitesi Üyesi değerli hocam Prof. Dr. Erdal ÇOKÇA'ya,

Çalışmam süresince manevi desteğini esirgemeyen ve tez savunmasında katkıda bulunan jüri üyesi değerli hocam Prof. Dr. Harun SÖZMEZ'e,

Tez savunması sırasında katkıda bulunan jüri üyesi değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Nejan HUVAJ SARIHAN'a,

Bu çalışma için 013 D12 602 001-425 No.lu proje kapsamında maddi destek sağlayan Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne,

Saha çalışmaları sırasında lojistik destek sağlayan ve yardımlarını esirgemeyen Kayseri Serbest Bölgesi Genel Müdürü İnşaat Müh. Mehmet ÖZKANTAR'a, KAYSER çalışanlarına, Kayseri Büyük Şehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürü Maden Müh. Ender BATUKAN'a, KASKİ çalışanlarına, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Kayseri İl Temsilciliği Başkanı Jeoloji Müh. Adnan EVSEN ile temsilcilik çalışanlarına, Jeo. Müh. Şükrü Yaşar YILDIRIM'a, Jeo. Müh. Betül ÇARMAN ŞİMŞEK'e ve Gökhan UĞUZ'a,

Tez sahasındaki jeofizik incelemelerin gerçekleştirip, değerlendiren ve bunların sonuçlarının çalışmada kullanılmasına olanak sağlayan Prof. Dr. Ahmet T. BAŞOKUR'a, Yrd. Doç. Dr. İrfan AKÇA ve Dr. Yıldırım GÜNDOĞDU'ya,

Tez çalışması kapsamında konsolidasyon deneylerinin bir kısmının yapılmasında destek olan Karayolları Genel Müdürlüğü Zemin Mekaniği ve Tüneller Şubesi Müdürü İnşaat Müh. Sina KİRİZLİOĞLU ve şube personeline,

Tez çalışması kapsamındaki dinamik deneylerin gerçekleştirilmesini sağlayan Prof. Dr. Giovanni BARLA ile Dr. Marco BARLA ve Torino Politeknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Jeoteknik Laboratuvarı sorumlusu Dr. Oronzo PALLARA'ya,

Laboratuvar çalışmaları sırasında yardımlarını ve desteklerini aldığım H.Ü. Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nın değerli teknisyenleri Özgür EROL ve Ahmet BAY'a,

Çalışmam süresince beni teşvik eden ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili hocam Prof. Dr. Murat ERCANOĞLU'na,

Tezin her aşamasında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Dr. Gülseren DAĞDELENLER'e, Araş. Gör. Aycan KALENDER'e, Dr. Pınar AVCI'ya, Yrd. Doç. Okay ALTUN ve Dr. Emre YILMAZKAYA'a,

Çalışmalarım süresince her konuda manevi desteklerini üzerimde hissettiğim, bu aşamaya gelmemde büyük emekleri olan canım aileme,

Son olarak, tez çalışmamın her aşamasında yanımda olan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, bu süreç boyunca sabır ve anlayış gösteren sevgili eşim Genco ÖZCAN ve biricik kızım Nehir ÖZCAN'a

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Nazlı TUNAR ÖZCAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT iii
TEŞEKKÜR v
İÇİNDEKİLER vii
SİMGELER VE KISALTMALAR x
1. GİRİŞ 1
1.1. Amaç 1
1.2. Kapsam 5
2. TURBALARIN DAĞILIMI, OLUŞUMU, SINIFLANDIRILMASI VE GENEL ÖZELLİKLERİ 8
2.1. Turbaların Dağılımı 8
2.1. Turbaların Oluşumu 10
2.2. Turbaların Sınıflandırılması ve Genel Özellikleri 13
3. TURBALARIN JEO-MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE İLİŞKİN ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 21
3.1. Turba Zeminlerin Fiziksel ve İndeks Özellikleri İle Bu Tür Zeminlerde Örnekleme Sırasında Karşılaşılan Güçlüklere İlişkin Çalışmalar 21
3.2. Turba Zeminlerin Sıkışma Karakteristiklerine İlişkin Çalışmalar 24
3.3. Turba Zeminlerin Makaslama Dayanımına İlişkin Çalışmalar 40
3.4. Turba Zeminlerin Dinamik Özelliklerine İlişkin Önceki Çalışmalar 43
3.5. Kayseri Civarındaki Turbalara İlişkin Jeoteknik Çalışmalar 47
3.6. Önceki Çalışmalara İlişkin Genel Değerlendirme 51
4. İNCELEME ALANININ TANITIMI 53
4.1. İnceleme Alanının Konumu ve Morfolojisi 53
4.2. İklim ve Bitki Örtüsü 57
4.3. İnceleme Alanının Jeolojik Özellikleri 57
4.5. İnceleme Alanındaki Turba Zeminlerin Kalınlığı ve Rezervi 60
4.6. İnceleme Alanının Yapısal Özellikleri ve Diri (Aktif) Faylar 62
4.7. İnceleme Alanının Depremselliği 65
5. ARAZİ ÇALIŞMALARI 68
5.1. Araştırma Çukurları ve Sondajlar 68
5.2. Örnekleme Çalışmaları 76

5.3. Jeofizik Ölçümler ve Değerlendirilmesi 77
5.4. Arazide Gözlem Platformunun İnşası ve Turbada Uzun Süreli Oturmanın İzlenmesi 88
5.5. Saha Gözlemleri 90
6. LABORATUVAR DENEYLERİ 96
6.1. Fiziksel ve İndeks Özellikler 96
6.2. İncelenen Turbanın Tanımı, Sınıflandırılması, Jeolojik ve Mineralojik Özellikleri 103
6.3. Zemin Makaslama Deneyleri 110
6.4. Konsolidasyon Deneyleri 117
6.5. Gözenek Suyu Basıncı Ölçümü 131
6.6. Dinamik Deneyler 133
6.6.1. Rezonans Kolonu Deneyi 133
6.6.2. Tekrarlı Torsiyonel Makaslama Deneyi 137
6.6.3. Dinamik Deney Sonuçları 139
7. TURBA ZEMİNLERİN OTURMA DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ 149
7.1. Uzun Süreli Konsolidasyon Deney Sonuçlarının ve Gözlem Platformunda Ölçülen Oturmanın Değerlendirilmesi 149
7.2. Gözlem Platformunda Ölçülen Oturmanın Laboratuvar Verisi Kullanılarak Kestirimi 154
7.3. Turba zeminlerin konsolidasyon parametrelerinin ve bazı fiziksel özelliklerinin birbirleriyle ilişkilerinin araştırılması 168
8. TURBA ZEMİNİN DİNAMİK DAVRANIŞI 172
8.1. Sismik Yer Tepki Analizlerinde Kullanılan Girdi Parametrelerinin Belirlenmesi 172
8.1.1. Dinamik analizlerde kullanılacak zemin profilinin oluşturulması ve bu profildeki zemin seviyelerinin makaslama dalgası hızlarının belirlenmesi 173
8.1.2. Makaslama modül azalım (G/G_{max}) ilişkisi ve sönümlenme oranlarının (D) belirlenmesi 175
8.1.3. En Büyük Yatay Yer İvmesinin Belirlenmesi ve Tasarım Yer Hareketi Kaydının Seçimi 181
8.3. Sismik Yer Tepkisi Analizleri 187
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 193
KAYNAKLAR 199

ÖZGEÇMİŞ 210
EK

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	İvme ölçer okuması
A	Alan
c	Kohezyon
C_c	Birincil sıkışma indisi
$C\alpha$	İkincil sıkışma indisi
C_s	Şişme indisi
C_v	Sıkışma indisi
d	Örneğin dış çapı
D	Sönümlenme oranı
e	Boşluk oranı
G	Makaslama modülü
E	Elastisite modülü
G_{max}	En büyük makaslama modülü
G_s	Özgül ağırlık
h	Yüzeyden derinlik
J_p	Polar eylemsizlik momenti alanı
k	Geçirgenlik katsayısı
m	Örneğin kütlesi
M_D	Depremin süre büyüklüğü
M_L	Lokal deprem büyüklüğü
M_s	Yüzey dalgası büyüklüğü
M_w	Moment büyüklüğü
m_v	Hacimsel sıkışma katsayısı
p	Rezonans periyodu
r	Örneğin yarı çapı
S_u	Drenajsız makaslama dayanımı
t	Zaman
t_{50}	%50 konsolidasyona karşılık gelen süre
t_{90}	%90 konsolidasyona karşılık gelen süre
T	Tork

T_v	Zaman faktörü
V_s	Makaslama dalgası hızı
w_n	Su içeriği
α	Burulma açısı
ϕ	İçsel sürtünme açısı
I	Kütle polar eylemsizlik momenti
ω	Doğal döngüsel frakans
λ	Histeretik sönümlenme oranı
ν	Poisson oranı
γ	Birim deformasyon
γ_c	Tekrarlı makaslama birim deformasyonu
γ_d	Kuru birim hacim ağırlık
γ_n	Doğal birim hacim ağırlık
γ_s	Doygun birim hacim ağırlık
ρ	Yoğunluk
τ	Makaslama gerilmesi
σ	Normal gerilme
σ'	Efektif gerilme
σ_c	Tek eksenli sıkışma dayanımı

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AÇ	Araştırma çukuru
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAP	Bilimsel araştırma projesi
CPT	Konik Penetrasyon Deneyi
DAD	T.C. Bayındırlık Bakanlığı Deprem Araştırma Dairesi
DAÖ	Doğru akım özdirenç yöntemi
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
KAFZ	Kuzey Anadolu Fay Zonu
KAYSER	Kayseri Serbest Bölge
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü

KOSB	Kayseri 1. Organize Sanayi Bölgesi
LL	Likit limit
MASW	Aktif kaynaklı yüzey dalgası yöntemi
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
OAFZ	Orta Anadolu Fay Zonu
OCR	Aşırı konsolidasyon oranı
PGA	En büyük yatay yer ivmesi
OM	Organik madde içeriği
PI	Plastisite indeksi
PL	Plastik limit
SEM	Taramalı electron mikroskobu
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi
TÜSİAD	Türk Sanayicileri ve İşadamları Derneği
YASS	Yeraltısuyu seviyesi

1. GİRİŞ

1.1. Amaç

Turba, oksijensiz koşullarda bitki köklerinin ayrışıp depolanmasıyla oluşan ve önemli miktarda organik madde içeriğine sahip olan bir zemin türüdür. İçerdiği organik maddenin kökeni ile oluştuğu ortamın sıcaklık ve nem koşullarına bağlı olarak turba zeminlerin bileşimi değişim göstermektedir [1]. Turbalar, turbalık adı verilen sulak arazilerde oluşmaktadırlar ve oluşum süreçleri çok yavaş olup, 1 cm kalınlığında bir turba seviyesinin oluşması için yaklaşık olarak 10 yıl geçmesi gerekmektedir [2]. Turbalıklar, alansal olarak, yeryüzünün yaklaşık % 5-8'lik bir kısmını kaplamaktadır. 170.000.000 hektarlık bir alanla Kanada turbaların en fazla görüldüğü ülke olup, ayrıca Rusya, Endonezya, Finlandiya ve İsveç gibi ülkelerde de büyük turbalık alanlar bulunmaktadır [3]. Bu ülkelerdeki kadar yaygın olmamakla birlikte, ülkemizde günümüze değin yapılan çalışmalarla 19 ilimizin sınırları içerisinde çeşitli büyüklüklerde turba oluşumları belirlenmiştir [4]. Dünya Enerji Konseyi'nin 1998 istatistiklerinde, ülkemizdeki bu oluşumların 56.000 hektarlık bir alanı kapladığı belirtilmektedir [5].

Çok düşük makaslama dayanımına, %500 ile 2000 arasında değişebilen su içeriğine ve ileri derecede sıkışabilme özelliğine sahip olmaları nedeniyle, turba zeminlerde başlıca oturma ve şev duraysızlıkları gibi önemli mühendislik sorunları gelişebilmektedir. Geçmişte mühendisler, turba zeminlerin davranışı konusunda sınırlı bilgiye sahip olmaları nedeniyle turba zeminlerin bulunduğu alanlarda mühendislik yapılarının inşasından kaçınmaktaydılar. Ancak, turbalıkların bazı ülkelerde önemli miktarda alanlar kapladığı dikkate alındığında, hızla gelişen kentleşme ve sanayileşme sürecinde sayıları giderek artan yol, baraj, sanayi binaları, konut vb. türde yapıların inşası için alternatif uygun alanlar bulunamadığı durumlarda, bu yapıların turba zemin üzerine konuşlandırılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Dolayısıyla, turba zeminlerin mühendislik özelliklerinin daha fazla araştırılması ve daha iyi anlaşılması gereği doğmuştur [6]. Bununla birlikte; kil, silt vb. gibi inorganik zeminlerin

özellikleri ve davranışları ile turba zeminlerin bu özellikleri arasındaki önemli farklılıklar nedeniyle, inorganik zeminlerle ilgili kazanılmış deneyimlerin ve geliştirilmiş kuram ve yöntemlerin turba zeminlere uygulanması çoğu kez yeterli olamamıştır. Özellikle inorganik zeminler için uygulanan konsolidasyon karakteristiklerini belirleme ve oturma yaklaşımları turba zeminlere uygulandığında uyumlu sonuçlar elde edilemeyebilmektedir. Bunun yanı sıra, ince ve iri taneli diğer zeminlerde laboratuvarda ve arazide uygulanabilen zemin mekaniği deneylerinden bazılarının turba zeminlerde uygulanabilirliğiyle ilgili sınırlamalar da söz konusudur. Bu sınırlamalar ve belirsizlikler; turba zeminler ile inorganik zeminlerin (kil, silt vb.) davranışları arasındaki benzerliklerin ve farklılıkların daha net belirlenmesi ve bazı katkıların sağlanması açısından turba zeminlerde yeni çalışmaların yapılmasını gerekli kılmaktadır.

Jeolojik malzemelerin, özellikle toprak zemin türü gevşek çökellerin dinamik davranışları uzun yıllardır mühendislerin ilgisini çeken bir araştırma ve uygulama konusu olmuştur. Bu çerçevede bir çok araştırmacı, önemli düzeyde organik bileşen içeren killer de dahil olmak üzere, inorganik zeminlerin dinamik özelliklerini ve ayrıca sıvılaşma, zemin büyütmesi vb. gibi depremler sırasında yapı ve zemin hasarlarına neden olabilen dinamik zemin davranışlarını incelemişlerdir. Bu süreçte turba zeminlerin dinamik özelliklerine pek ilgi duyulmamıştır. Ancak 1989'da meydana gelen Loma Prieta (Kaliforniya, ABD) depreminde turba zemin üzerine inşa edilmiş olan Struve Slough Köprüsü'nün yıkılması sonucunda turba zeminlerin dinamik özelliklerinin ve davranışlarının araştırılması ve değerlendirilmesi de önem kazanmıştır [7]. 90'lı yılların sonuna doğru önem kazanan turbaların dinamik açıdan ele alındığı çalışmalar sınırlı sayıda olup, özellikle "yapı tasarımı-zemin davranışı ilişkisi" açısından önem taşıyan tasarım ivme spektrumu konulu çalışmaların sayısı turba zeminler için birkaçı geçmemektedir.

Ülkemizde turba oluşumlarının gözlendiği en tipik alanlar; Kayseri (Ambarköy ve civarı), Yeniçağa (Bolu), Yüksekova (Hakkari), Ağaçbaşı Yaylası (Trabzon), Abant Gölü (Bolu) ve Yeşilırmak deltası çevresi olup, MTA tarafından yapılan çalışmaya

göre, Kayseri Ambarköy yöresindeki turbaların rezervi 105 milyon ton olarak hesaplanmıştır [8]. Kayseri'deki bu turbalık alanlarda günümüzde Kayseri 1. Organize Sanayi Bölgesi (KOSB) ve Kayseri Serbest Bölgesi (KAYSER) gibi sanayi bölgeleri inşa edilmiştir.

Ülkemizde yukarıda belirtilen sınırlı sayıda alanda yayılım gösteren turba zeminlerin jeo-mühendislik özellikleri ve mekanik davranışları konusunda sadece Kayseri (Ambarköy)'de yapılmış iki çalışma [9], [10], [11] dışında başka bir araştırma bulunmamaktadır. Sert ve Önalp [9], Kayseri Serbest Bölge'de turba zemin üzerinde inşa edilmiş bir tesisin rijit platformunda meydana gelen oturma sorunu ve bunun kontrolü üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, zeminde gerçekleşen oturma miktarı değerlendirilmiş ve alınabilecek önlemler tartışılmıştır. Ulusay vd. [10], [11], yaptıkları çalışmada Kayseri 1. Organize Sanayi Bölgesi'nde ve Serbest Bölge'de bulunan turba zeminleri lifli ve amorf olmak üzere tanımlamışlar, turbanın yapılarda neden olduğu oturma sorununa değinmişler ve alansal yayılımını belirtmişler, ayrıca bu zeminlerin bazı fiziksel, mekanik ve konsolidasyon özelliklerini belirleyip değerlendirerek sonuçları diğer ülkelerde turbalarla ilgili yapılmış bazı çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Sınırlı olanaklarla ve sınırlı sayıdaki veriyle gerçekleştirilmiş olması nedeniyle araştırmacılar, bu çalışmanın bir ön değerlendirme niteliğinde olduğunu vurgulamışlardır. Bu nedenle; söz konusu inceleme alanında daha fazla sayıda sondaj, gözlem, örnek alımı ve laboratuvar deneylerinin yapılarak, turba zeminin oturma karakteristikleri ile dinamik özelliklerinin ve davranışlarının inceleneceği daha geniş çaplı bir araştırmanın hem turbaların jeo-mühendislik özelliklerinin ve davranışlarının daha iyi anlaşılmasına, hem de bu alanda turba zeminlerle ilgili uygulamaya yönelik değerlendirmelere ve ilgili zemin sorunlarının çözümüne katkı sağlayacağını belirtmişlerdir.

Kayseri kenti ve yakın çevresi, her ne kadar aletsel dönem boyunca büyüklüğü 6'dan fazla olan depremlere maruz kalmamışsa da, bu yöredeki aktif fayların varlığı ve geçmişte kaydedilen depremler dikkate alındığında, özellikle turba zeminin bulunduğu alanlar depremsellik açısından öneme sahip alanlardır. Turba vb. gibi organik

zeminlerin aşırı düzeyde su içermeleri ve yumuşak zeminler olmalarından dolayı, bu tür zeminlerin deprem kaynaklı dinamik yüklemeler sırasında deprem dalgalarıyla ilgili zemin büyütmesine neden olmaları beklenir. Bu durum, yapı-zemin etkileşimi açısından olumsuzluklara neden olabilecek bir davranış olarak bilindiğinden, Ulusay vd. [10] Kayseri'deki turbaların bu açıdan da ayrıca incelenmesinin önem taşıdığını belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra, ülkemizde meydana gelen son büyük depremlere ait kuvvetli yer hareketi kayıtlarının ivme spektrumlarının deprem yönetmeliğindeki tasarım ivme spektrumları ile karşılaştırılması sonucunda bazı bölgeler için spektral ivme değerlerinin daha büyük olduğu ve tasarım spektrumundaki ivme değerlerinin arttırılması gerektiği de belirtilmektedir (örneğin; [12], [13], [14]). Özellikle turba zeminlerde büyütme konusunda yapılmış çok sınırlı sayıda çalışma bulunması ve ülkemizde bu konuda herhangi bir çalışmanın olmaması, turba zeminin dinamik özelliklerinin araştırılmasının önemine işaret etmektedir. Kayseri'de yapılaşmanın ve özellikle yüksek yapıların giderek artması ve bazı yapıların turba zeminde inşa ediliyor olması, bu konunun Kayseri özelindeki önemini de arttırmaktadır.

Bu çerçevede;

a. Yukarıdaki paragraflarda kısaca değinilen ve ayrıntısı 3. Bölüm'de verilecek olan turba zeminlerin jeo-mühendislik özellikleri ve davranışları diğer zeminlerinkinden oldukça farklı olup, bunların belirlenmesi ve değerlendirilmesiyle ilgili bazı belirsizliklerin ve/veya sınırlamaların varlığı ve bunların giderilmesi yönünde yeni çalışmalara gereksinim duyulması,

b. Kayseri'de turba zeminin geniş bir alan kaplaması, sanayi bölgelerinin bu zemin üzerinde gelişme göstermesi ve kente yakın konumlu aktif fayların varlığı nedeniyle turba zeminin jeomekanik özelliklerinin ve deprem kaynaklı dinamik etki altındaki davranışının araştırılmasının önemli olacağı

dikkate alınarak, bu hususların bir doktora tezi kapsamında çalışılmasının hem turba zeminlerin jeo-mühendislik özellikleri ve dinamik davranışına yönelik bilimsel

literatüre, hem de Kayseri özelinde turba zeminlerde inşa edilen yapılar açısından yerel anlamda bir katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Bu amaçla KAYSER sahası inceleme alanı olarak seçilmiştir. Bu düşünce esas alınarak; bu tez çalışmasında başlıca;

i. Turba zeminin davranışının değerlendirilmesinde yararlanılmak üzere; turbanın mineralojik, fiziksel, indeks ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesi,

ii. Turba zeminin konsolidasyon ve oturma karakteristiklerinin laboratuvar deneyleri ve arazide inşa edilecek bir yükleme platformu aracılığıyla izlenip araştırılması, sonuçların karşılaştırılması ve bu zeminde arazide gerçekleşecek oturma miktarının tahminine yönelik bir yaklaşımın önerilmesi,

iii. Turba zeminin dinamik davranışının analiz edilmesi ve sismik yer tepkisinin belirlenerek inceleme alanında turba zemin üzerine inşa edilecek yapılar için analizler sonucunda elde edilen normalize edilmiş tasarım spektrumlarının Türkiye Deprem Yönetmeliği'nde önerilen spektrumla karşılaştırılması,

iv. Bu çalışmada belirlenen özelliklerle diğer ülkelerdeki bazı turbaların belirlenmiş özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

1.2. Kapsam

Yukarıda belirtilen amaçlar doğrultusunda, tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar aşağıda ana hatlarıyla sunulmuştur.

a. Turba zeminlerin jeo-mühendislik özellikleri ve jeomekanik davranışlarıyla ilgili literatür taramasına ve değerlendirmesine tez çalışmasının planlanmasından tezin yazımına değin devam edilmiştir.

b. Turba zeminin inceleme alanındaki konumunun belirlenmesi, jeomekanik laboratuvar deneyleri için örnek alınması ve su tablası derinliğinin belirlenmesi amacıyla, KAYSER alanı içinde yetkililerin izin verdikleri yerlerde araştırma çukurları açılmış ve sondajlar yapılmıştır. Ayrıca hem çukurlardan hem de sondajlardan deneyler için örselenmemiş ve örselenmiş turba örnekleri alınmıştır.

c. İnceleme alanındaki bazı yapılarda oturmanın varlığını ve bunun yapılara etkilerini belirlemeye yönelik amaçlarla yapıların dış cephelerinde gözlemler yapılmıştır.

d. Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nce yürütülen ve tez danışmanının da görev aldığı bir BAP projesi kapsamında yapılan jeofizik ölçümlerle inceleme alanındaki turba zeminin kalınlığı ve makaslama dalgası hızı da belirlenmiş olup, bu veri turba zemin için yapılan dinamik analizlerde kullanılmıştır.

e. Alınan turba örneklerinin mineralojik özellikleri (X-ışınları kırınım analizleri), fiziksel ve indeks özellikleri (su, kül ve organik madde içerikleri, özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, tane boyu dağılımı, Atterberg limitleri), makaslama dayanımı ve konsolidasyon karakteristikleri yapılan laboratuvar deneyleriyle tayin edilmiştir. Ayrıca dinamik analizlerde kullanılmak üzere gereksinim duyulan turbaya ait dinamik özellikler de, Torino Politeknik Üniversitesi (Torino, İtalya) jeoteknik laboratuvarına gönderilen örnekler üzerinde yapılan rezonans kolonu deneyleriyle tayin edilmiştir.

f. İnceleme alanında turba zemin üzerine inşa edilmiş bazı yapılarda gözlenen oturma sorunu dikkate alınarak, bu zeminlerin sıkışma karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan konsolidasyon deneylerinin yanı sıra, arazide oluşturulan beton bir platform üzerinde gözlem dolgusu inşa edilerek, bu dolguda 14 ay süreyle oturma ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerle

konsolidasyon deneylerinden belirlenen parametreler kullanılarak yapılan oturma hesapları karşılaştırılarak yapılan değerlendirmeyle turbada arazideki oturmanın tahminine yönelik bir yaklaşım getirilmiştir.

g. İncelenen turbaya ait dinamik özellikler, sahaya ilişkin jeofizik veriler ve sahanın sismotektonik karakteristikleri esas alınarak dinamik analizler yapılmış ve turba zeminlerin sismik yer tepkisi ortaya konulmuştur.

h. Diğer bazı ülkelerde incelenen turba zeminlerin literatürde verilen mühendislik özellikleriyle bu çalışmada incelenen turbanın özellikleri karşılaştırılmış ve konuyla ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

2. TURBALARIN DAĞILIMI, OLUŞUMU, SINIFLANDIRILMASI VE GENEL ÖZELLİKLERİ

2.1. Turbaların Dağılımı

Turbaların nemli ve ılık veya soğuk iklim koşullarında oluşmaları nedeniyle, turba oluşumlarının büyük çoğunluğu kuzey yarıkürede yer almaktadır. Turba oluşumu; yukarıda belirtilen iklim koşulları ile sınırlı olmayıp, arktikten tropiğe kadar değişen buzullar, kıyılar ve eski göl yatakları gibi farklı ortamlarda da görülebilmektedir. Turbalıklar yeryüzünde yaklaşık 4.000.000 km^2'lik bir alan kaplamakta olup, bu alanın %43.5'i Kuzey Amerika'da, %28.08'i Asya'da ve %24.02'lik kısmı ise Avrupa'da bulunmaktadır. Yeryüzündeki en büyük turba rezervi Asya'da olup, daha sonra sırasıyla Avrupa, Kuzey Amerika ve Okyanusya'da da turba rezervleri bulunmaktadır. Turbaların yeryüzündeki dağılımları Şekil 2.1'de görülmektedir.

Yüzölçümlerinin %1'den fazlası turbalık olan ülkeler, turbalıkların kapladığı alanlar ve bu alanların her ülkenin yüzölçümüne oranı Çizelge 2.1'de verilmiştir. Çizelge 2.1'e göre, turba zeminlerin dünyada en fazla yayılım gösterdiği ülkenin 1.295.000 km^2'lik bir alanla Kanada olduğu görülmektedir.

Diğer ülkelerdeki kadar yaygın olmamakla birlikte, ülkemizde de şimdiye kadar yapılan çalışmalarla 19 ilimizin sınırları içerisinde çeşitli büyüklüklerde turba oluşumları belirlenmiştir. Bunlardan en önemlileri Kayseri (Ambarköy ve civarı), Hakkari (Yüksekova), Trabzon (Ağaçbaşı Yaylası), Bolu (Abant gölü, Yeniçağa) ve Yeşilırmak deltası turbalarıdır. Kayseri-Ambarköy turba yatağının orijinal bazda görünür rezervi 105 milyon ton [8], Hakkari-Yüksekova turba yatağının orijinal bazda 74,5 milyon, havada kuru bazda ise 18,8 milyon tondur [4]. Türkiye'nin toplam turba alanı, Dünya Enerji Konseyi'nin 1998 istatistiklerinde 56.000 hektar olarak belirtilmektedir [5].

Şekil 2.1. Yeryüzünde turbalık alanların dağılımı [15].

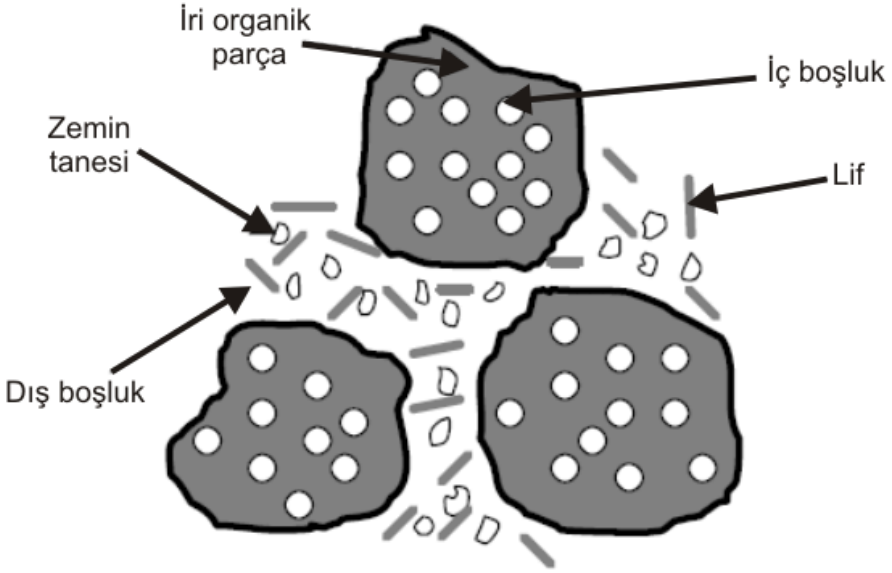
Çizelge 2.1. Toplam yüzölçümlerinin % 1'inden fazlası turbayla kaplı olan ülkeler ve turbalık alanların ülke alanlarına oranları ([16]; [6]'dan).

Ülke adı	Turbalıklar tarafından kaplı alan yüzdesi	Turbalık alan (km^2)
Finlandiya	33.5	100000
Kanada	18.4	1295000
İrlanda	17.2	11788
İsveç	17.1	15000
Endonezya	13.7	7000
Kuzey İrlanda	12.4	1668
İskoçya	10.4	8214
İzlanda	9.8	10000
Norveç	9.4	30000
İngiltere Adaları	8.6	26842
Galler	7.7	1588
Malezya	7.2	23600
Eski Rusya	6.7	715000
Hollanda	6.1	2500
Almanya	4.6	16180
Polonya	4.4	15000
Küba	3.9	2000
ABD	3.3	75100
İngiltere	2.8	3617
Avusturya	2.8	220
Danimarka	2.8	600
İsviçre	1.3	550
Macaristan	1.1	1000

2.1. Turbaların Oluşumu

Kuru zemine düşen bitki parçaları, mikroorganizmalar ve bakteriler tarafından ayrıştırılıp çürütülmektedirler. Bitkilerdeki karbon ve hidrojen atmosferdeki oksijen ile tepkimeye girdiğinde CO_2, su ve bataklık gazlarına ayrılmakta ve organik malzeme yok olmaktadır [17]. Turbalar genellikle asidik-anaerobik koşullar altında çürümenin gerçekleşmediği, oksijensiz ve sulak alanlarda bitki artıklarının depolanmasıyla oluşurlar [18]. Turba zeminlerin içyapısında boşluk içeren iri organik parçalar, lifler ve zemin taneleri bulunmaktadır (Şekil 2.2). Turbaların oluşum süreci çok yavaştır. 1 cm kalınlığındaki bir turba seviyesinin oluşması için yaklaşık olarak 10 yıl geçmesi gerekmektedir [2]. Organik malzeme miktarına, iklime ve topoğrafik koşullara bağlı

olarak turba oluşum hızı değişim göstermektedir [6]. Şekil 2.3'te 10 m kalınlığındaki bir turba seviyesi görülmektedir.



Şekil 2.2. Turba zeminlerin yapısının şematik gösterimi [19].

Şekil 2.3. Yaklaşık 10 m kalınlığındaki bir turba seviyesi [20].

Farklı çevre koşullarına sahip turba oluşum süreçleri aşağıdaki gibi üç grupta toplanabilirler:

a. *Soğuk iklim turba oluşumları:* Kıtasal buzulların erimesini (13.000–12.000 yıl) izleyen dönemde su dolu çöküntülerde turba oluşturan ve suda yaşayan bitkiler yetişmiştir. Bu süreçte, bitkilerin büyümesi için gerekli kaynak çevredeki yükseltilerden su akışıyla taşınmakta ve bitki artıkları çöküntünün merkezi kısmında basamak oluşturacak şekilde birikmektedir. Bu artıklar zamanla turbaya dönüşürler.
b. *Ilık iklim turba oluşumları:* Bu tür oluşumlarda turba birikim süreci, turbada daha yüksek bir mineral içeriğiyle sonuçlanan kubbe şeklindeki bir dışbükeylik dışında, soğuk iklimlerde oluşan turbalarınkiyle aynıdır. Çökelmenin tabanında, sığ gölleri dolduran ve derelerin önlerini tıkayarak bataklık bitkilerinin büyümesi için düz ortamlar yaratan saprik turbalar bulunmaktadır. Bitkilerin çevrimsel olarak büyümeleri, yaşamlarını yitirmeleri ve çürümeleri sonucunda turba yüzeyi yükselmekte ve yavaşça yükselen turba çökellerini oluşturmaktadır [21].
c. *Tropik turba oluşumları:* Bu oluşumlar, esas olarak, bataklık ormanı bitkilerine ait odunumsu malzemeden oluşan kubbemsi çökellerdir. Turba seviyesinin altında kalın kil ve kum çökelleri bulunur. Bu tür oluşumlarda; tabanda havza kenarlarındaki bitkilerin ayrışmasıyla oluşmuş sıkı ve odunumsu turba bulunurken, üst kesimlerde ormandaki ve açık bataklık düzlüğündeki bitkilerden oluşmuş uzun kökler ve kökümsü parçalar içeren lifli turba yer almaktadır.

Turbalar sulak alanlarda oluşmaktadır. Bu sulak alanlarda turba seviyelerinin bulunduğu kesimler turbalık olarak adlandırılmakta olup, aşağıda verilen 4 alt gruba ayrılmaktadır [2].

a. *Turbalık (peatland):* Yüzeyde doğal şekilde birikmiş turbanın bulunduğu alan.
b. *Çamur bataklık (mire):* Turbanın güncel olarak oluşup biriktiği turbalık.
c. *Bataklık düzlüğü (fen):* Suyu ve malzemesini yağmur ve/veya kardan olduğu kadar, toprak, kaya ve yeraltısuyundan da alan turbalık.

d. *Örtü bataklığı (bog):* Suyunu yüzeye düşen yağmur ve/veya kardan alan turbalık.

Turba oluşumları kökenlerine göre artık (otokton) ve taşınmış (allokton) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Artık turbalar, bitki artıklarının taşınmadan bulundukları yerde çökelmesiyle oluşmuş olup, lif içermektedirler. Taşınmış turbalar ise, bitki artıklarının çökelme ortamından taşındığı sedimanter özellikteki turbalar olup, lifsiz, kolloidal tane boyunda ve plastik özelliktedirler [6].

2.2. Turbaların Sınıflandırılması ve Genel Özellikleri

Mineralli topraklar için önerilen sınıflama sistemleri genel olarak; bileşim, tane boyu, tane şekli, Atterberg limitleri ve organik madde içeriğine dayalıdır [22]. Bazı turba türlerinin tane boyunun, likit limit ve plastik limit değerlerinin belirlenmesinde karşılaşılan güçlükler nedeniyle bu sınıflama sistemlerinin turba zeminler için kullanılması pratik değildir. Mevcut zemin sınıflama sistemleri kullanılarak turbaların sınıflandırılmasında yaşanan güçlükler nedeniyle çeşitli araştırmacılar kullanım amaçlarına bağlı olarak farklı turba sınıflama sistemleri önermişlerdir. Sınıflandırılması konusunda halen üzerinde tam bir görüş birliği bulunmayan turbalar, farklı ülkelerde değişik disiplinlerin kendilerine özgü gereksinimleri esas alınarak sınıflandırılmaya çalışılmaktadır [23]. Turbaların doku, organik madde içeriği, mineral içeriği, pH, renk, su içeriği, çürüme derecesi, fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal özellikleri sınıflamalarda dikkate alınan başlıca özelliklerdir [24]. Bu sistemlerden en yaygın olarak kullanılanlarına aşağıda ana hatlarıyla değinilmiştir.

Kanada'daki turbalar üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda Radforth [25] turbaları dokularına göre; ince lifli, iri lifli ve amorf taneli olmak üzere üç ana grup altında 17 alt kategoride sınıflandırmıştır (Çizelge 2.2). Amorf taneli turbalar diğer turbalarla karşılaştırıldığında, daha yüksek oranda kolloidal mineral içeriğine sahiptir. Bu nedenle, amorf taneli turbalar tane yapılarında çok miktarda su adsorbe edebilmektedirler. Lifli turbalar ise odunumsu yapıda olup, suyu serbest su şeklinde

bünyelerinde tutarlar. Bu 17 turba türü, önemli mühendislik özelliklerinin çoğunu etkileyen ana turba oluşumunun morfolojisini yansıtır [2].

Hümifikasyon; organik maddenin niteliksel ve niceliksel değişimi ve böylece hümik madde oluşumudur [26]. Fiziksel tanımlama, hümifikasyon derecesi ve örneklerin elle sıkıştırılmasına bağlı gözlemleri esas alan Von Post sınıflaması [27] diğer bir sınıflama sistemidir. Bu sınıflama sistemi, H simgesi ile gösterilen ve H1'den H10'a kadar değişen alt sınıflardan oluşmaktadır (Çizelge 2.3).

Turbaların asitlik, bitki besin maddesi durumu ve kül içeriği gibi özellikleri botaniksel kökenini belirlemektedir. Yüz ölçümünün 11.2 milyon hektarlık kısmı turbalık olan Finlandiya'da bilim insanları yapısal özelliklerini ve botaniksel kökenlerini esas alarak turbaları; su yosunu turbası (moos peat), saz-kamış turbası (sedge peat) ve odun turbası (wood peat) olmak üzere 3 kategoride sınıflandırmışlardır [23].

Ayrışma derecesi dikkate alındığında turbalar; fibrik (düşük derecede ayrışmış), hemik (orta derecede ayrışmış) ve saprik (yüksek derecede ayrışmış) olmak üzere sınıflandırılmışlardır. Kırmızımsı kahverengi fibrik turbalar ince lifli olup, yosun ve çalı köklerinden oluşmaktadırlar [6]. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Tarım Bakanlığı tarafından yapılan sınıflamaya göre, %66'dan fazla lif içeren turbalar fibrik, %33-66 oranında lif içerenler hemik, %33'ten az lif içerenler ise saprik olarak tanımlanmıştır. Fibrik, hemik ve saprik turbaların elektron mikroskop altındaki SEM görüntüleri Şekil 2.4'te sunulmuştur.

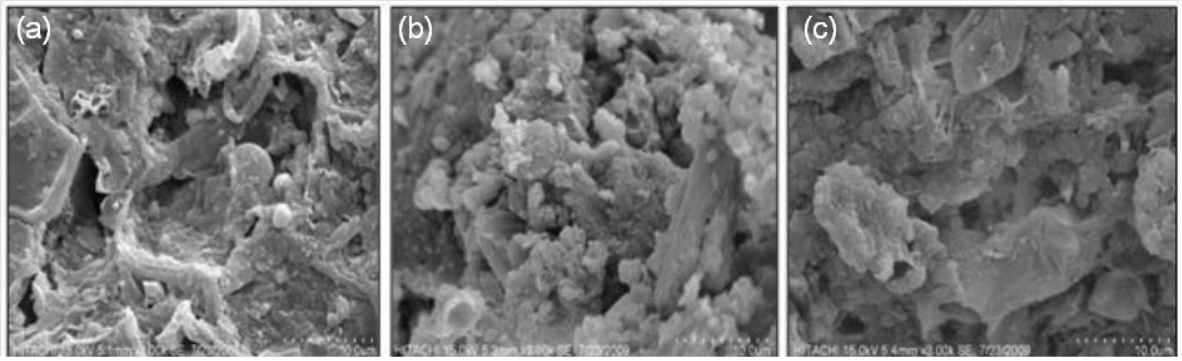
Turba sınıflamasında organik madde içeren seviyenin kalınlığı da önem taşımaktadır. Kanada [28], ABD [29] ve Malezya [30] toprak sınıflama sistemlerine göre bir toprağın organik olarak adlandırılabilmesi için o toprağın organik madde içeren kısmının kalınlığının en az 40-120 cm arasında olması gerekmektedir [31].

Çizelge 2.2. Dokularına göre turba sınıflaması [25].

Başlıca karakteristik	Sınıf	Tanım
Amorf-taneli	1	Amorf-taneli turba
	2	Odunumsu olmayan, ince lifli turba
	3	Odunumsu olmayan, ince lifler içeren amorf-taneli turba
	4	Odunumsu ince lifler içeren, amorf-taneli turba
	5	Odunumsu olmayan ince lifler içeren, başlıca amorf-taneli ve ince lifli bir yapıya sahip turba
	6	Odunumsu ince lifler içeren, başlıca amorf-taneli iri lifli yapıya sahip turba
	7	Odunumsu olmayan, ince lifli turba ile amorf-taneli ve odunumsu olmayan ince lifler içeren turba ardalanması
İnce lifli	8	Odunumsu olmayan ve iri lifler de içeren ince lifli turba
	9	Odunumsu, ince lifli turba, iri lifli yapıya sahip
	10	Odunumsu olmayan kısım içinde odunumsu taneler içeren ince lifli turba
	11	İnce lifli turba içinde odunumsu ve odunumsu olmayan taneler
İri lifli	12	Odunumsu, iri lifli turba
	13	İnce lifli turbayı kesen iri lifler
	14	Odunumsu olmayan ve odunumsu, iri lifli bir yapı içinde ince lifli turba
	15	Odunumsu bir lif ağına sahip, ince lifler içeren amorf-taneli turba taneleri
	16	Saçılmış halde odunumsu iri parçalar içeren odunumsu, iri lifli turba
	17	Yakın aralıklı dizilmiş kökler ağacımsı parçalar içeren iri lifli turba

Çizelge 2.3. Hümifikasyon derecesine göre turbalar için Von Post sınıflaması [27].

Sembol	Tanımlama
H1	Tamamen turbaya dönüşmemiş ve çamur içermeyen turba. Elde sıkıldığında sadece berrak su verir ve içerdiği bitki artıkları kolaylıkla ayırt edilebilir.
H2	Pratik olarak tam olarak turbaya dönüşmemiş ve çamur içermeyen malzeme. Elde sıkıldığında temiz ve renksiz bir su verir. Bitki artıkları kolaylıkla ayırt edilebilir.
H3	Çok az derecede ayrışmış (çürümüş) veya çok az çamurumsu turba. Elde sıkıldığında çamurlu su verir, ancak parmaklar arasından herhangi bir malzeme geçmez. Sıkılmış olan artık malzeme kalındır. Bitki artıkları, ayırt edilebilme özelliklerini kısmen yitirmiştir.
H4	Az miktarda ayrışmış (çürümüş) veya az miktarda çamurumsu turba. Elle sıkıldığında belirgin çamurlu su verir ve sıkılmış olan artık kalındır. Bitki artıkları, ayırt edilebilme özelliklerinin çoğunu yitirmiştir.
H5	Orta derecede ayrışmış (çürümüş) veya çamurumsu turba. Büyüme yapısı belirgin, ancak az miktarda kaybolmuş. Elde sıkıştırıldığında bir miktar amorf turba malzemesi parmaklar arasında geçer, ancak geçen genellikle çamurlu sudur. Sıkıştırılmış artık çok kalındır.
H6	Orta derecede ayrışmış (çürümüş) veya çamurlu, belirgin olmayan bir büyüme yapısına sahip turba. Elde sıkıştırıldığında turba malzemesinin yaklaşık 1/3'ü parmaklar arasından geçer. Geriye kalan malzeme ise oldukça kalın, ancak sıkıştırılmamış turbaya göre büyüme yapısı daha belirgindir.
H7	Nispeten iyi derecede ayrışmış (çürümüş) veya belirgin derecede çamurlu ve belirsiz bir büyüme yapısına sahip turba. Elde sıkıştırıldığında turba malzemesinin yaklaşık yarısı parmaklar arasından geçer. Parmaklar arasından suyun da geçmesi halinde bu su koyu renkli ve turbalıdır.
H8	Çok iyi derecede ayrışmış (çürümüş) veya çamurlu ve belirsiz bir büyüme yapısına sahip turba. Elde sıkıştırıldığında turba malzemesinin yaklaşık 2/3'ü ile yoğun bir akışkan parmaklar arasından geçer. Kalan malzeme özellikle daha dirençli lifler ile köklerden oluşur.
H9	Pratik olarak tamamen ayrışmış (çürümüş) veya çamur gibi olmuş turba. Turbada büyüme yapısı gözlenmez. Elde sıkıştırıldığında parmaklar arasından geçen malzeme tamamen uniform kıvamlı bir malzemedir.
H10	Tamamen ayrışmış (çürümüş) veya çamur turba ve hiç bir büyüme yapısı gözlenmiyor. Elde sıkıştırıldığında tüm turba malzemesi parmaklar arasından geçer.



Şekil 2.4. (a) Fibrik, (b) saprik ve (c) hemik turbaların elektron mikroskop görüntüsü [3].

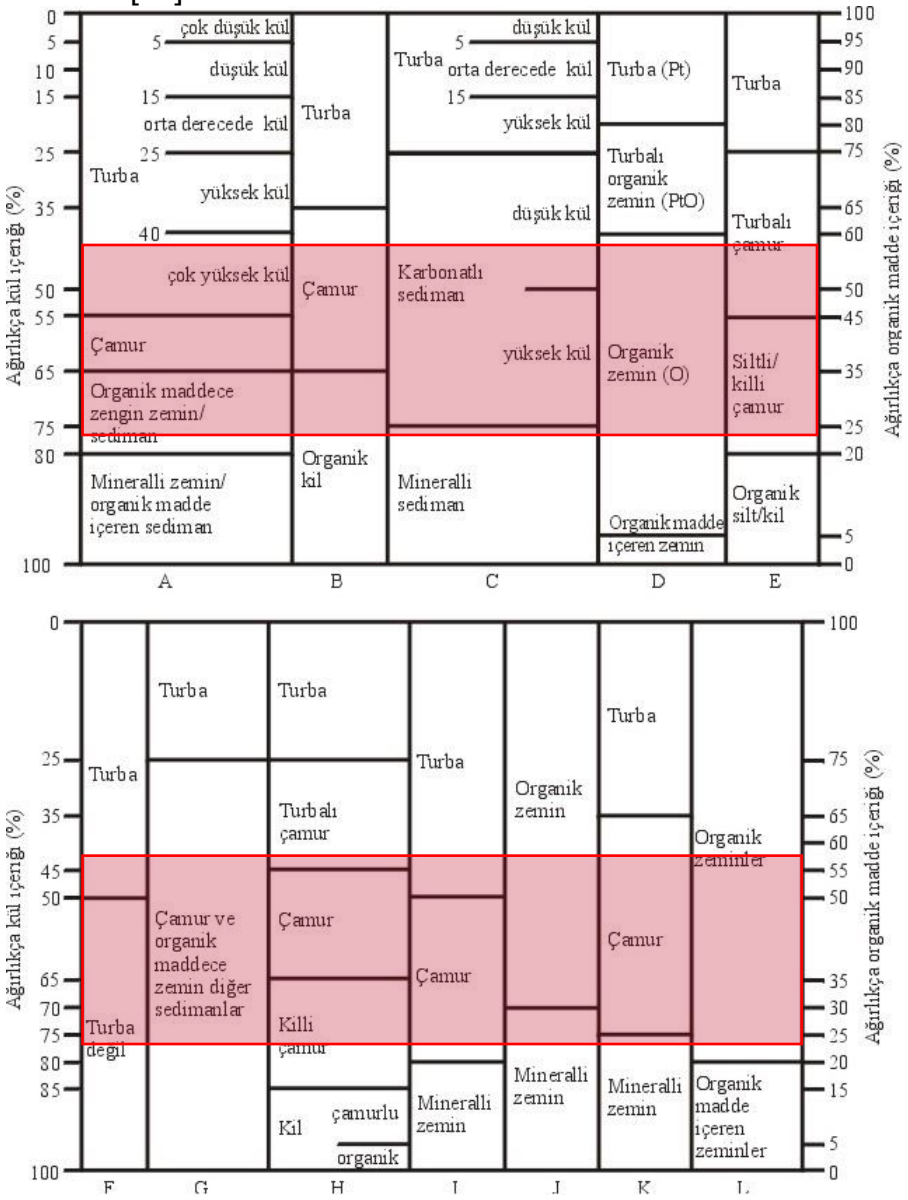
Turbalar ayrıca jeoteknik açıdan da sınıflandırılmaktadırlar. Birleşik Zemin Sınıflaması (USC) organik zeminlerin sınıflandırılması konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu amaçla Raya ve Jarret [32] tarafından önerilen sınıflamaya göre organik madde içeriği %75'ten büyük olan zeminler turba olarak tanımlanmıştır (Çizelge 2.4a). Literatürde yer alan bazı mühendislik çalışmalarında farklı organik madde içerikleri dikkate alınarak önerilmiş çok sayıda sınıflama sistemi bulunmaktadır. Wüst vd. [31] bu sistemleri karşılaştırmalı olarak değerlendirmiş (Çizelge 2.4b) ve Raya ve Jarret [32]'in önerdiği sınıflama sisteminde organik madde içeriğinin alt sınırı %75 iken, bazı sınflama sistemlerinde bu sınırın %45'e kadar düştüğünü belirtmişlerdir. Çizelge 2.4b'de verilen sistemlerden A simgesi ile gösterilen sınıflama Wüst vd. [31]'ne aittir. Bu sistem, mevcut turba sınıflama sistemlerinde genellikle; (i) sadece enerji hammaddesi açısından değerlendirilerek %75 gibi bir organik madde alt sınırının esas alınması ve (ii) altında yer alan organik malzemeden bileşim ve/veya hümifikasyon derecesi açısından farklılık gösteren sadece sınırlı kalınlıktaki organik içerikli bir kontrol seviyesinin dikkate alınması nedeniyle turba tanımlamasıyla ilgili olarak ortaya çıkan sorunların giderilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Çizelge 2.4b'den görüleceği gibi, bu sistemde; %45 ile 100 arasında değişen organik madde içeriğine sahip zeminler turba zemin olarak tanımlanmakta ve turba sınıfına giren zeminler de, kendi aralarında kül içeriklerinin değişim aralığına göre, çok düşük kül içerenden çok yüksek kül içeren turbalara kadar gruplandırılmaktadır. Ayrıntısına tezin 5. Bölümünde değinileceği gibi, inceleme alanındaki turbalar Çizelge 2.4'te pembe fonla gösterilen aralığa düşmektedir.

Çizelge 2.4. Turba sınıflandırmaları.

(a) Organik madde içeriklerine göre zemin sınıflaması [32].

Ana zemin türü	Tanım	Simge	Organik madde içeriği (%)
Kil veya silt veya kum	Çok az organik	o	3-20
Organik zemin		O	20-75
Turba		Pt	>75

(b) Turba ve organik zeminler için kül ve organik madde içeriğine bağlı değişik sınıflama sistemleri [31].



(A) Wüst vd. [31]'nin sınıflaması, (B) Moris sınıflaması [33], (C) Güney Karolina Üniversitesi Organik Sedimanlar Araştırma Merkezi sınıflaması [34], (D) ASTM sistemi [35], (E) Jarrett sistemi [36], (F) Rus sınıflaması [37], (G) ASTM'nin önceki sınıflaması [38], (H) Louisiana Jeolojik Araştırma sistemi [39], (I) Uluslararası Turba Derneği sınıflaması [40], (J) Kanada Zemin Sınıflama sistemi (28), (K) Davis sınıflaması (41), (L) Arman sistemi (42).

Zeminlerin kimyasal özellikleri; örnekleme, örnekleri muhafaza etme, tanımlama, sınıflama gibi işlemler sırasında önemli rol oynamaktadır. Turbaların kimyasal özellikleri; kimyasal bileşimleri, depolanma ortamları ve ayrışma dereceleri tarafından etkilenmektedir. Kimyasal olarak turbalar; karbon, hidrojen, oksijen ve az miktarda nitrojen içermektedir. Soper ve Osbon [17] ile daha sonra Chynoweth [43], Schelkoph vd. [44] ve Cameron vd. [21] tarafından ABD'deki 500'den fazla sayıda turba oluşumunda yapılan analizlere göre; bu turbalardaki ortalama karbon, oksijen, hidrojen ve nitrojen miktarları sırasıyla % 40-60, % 20-40, % 4-6 ve % 0-5 arasında değişmektedir. Turba zeminler genellikle asidik olup, pH değerleri 7 ve altındadır. Waksman ([45]; [6]'den) turba zeminlerin asitliğinin derinlikle azaldığını belirtmiştir.

Çökelme morfolojisinin bir sonucu olarak, turba oluşumlarında hem yatay hem de düşey yönde farklılıklar söz konusudur. 10 m derinlik içinde yatay yönde önemli bir değişim söz konusu olup, değişim bazen düşey yönde de gözlenebilir. Bu farklılık; turbaların oluşumu sırasındaki farklı iklim koşulları, su seviyesi ve organik madde depolanması sırasında araya karışan inorganik bileşimden kaynaklanmaktadır [6]. Turbalar farklı renk, doku, su içeriği, birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık gibi fiziksel özelliklere sahiptir.

Turbaların renkleri açık sarı-sarımsı, kırmızımsı ve koyu kahverengiden siyaha kadar değişmektedir. Turbanın rengi, geçirmiş olduğu değişimin (çürümenin) derecesine işaret etmektedir [6].

Turbaların en belirgin özelliklerinden biri de, yüksek su içeriğine (w) sahip olmalarıdır. Kuzey yarıküredeki turbalarda "w" genellikle % 200 ile 2000 arasında değişmekte ve bazı lifli turbalarda % 2500'e kadar çıkabilmektedir [6]. w<% 500 koşulu, turbada yüksek miktarda mineral fraksiyonlarının bulunduğunu gösterir [2].

Kül içeriği turba türlerinin tanımlayıcı bir özelliği olup, turba örneklerinin yanma işleminden sonra geriye kalan kuru kısmın yüzdesi kül içeriği olarak adlandırılmaktadır. Turbaların kül içerikleri %2-20 arasında değişim göstermektedir [2].

Ulusay vd. [10], [11], turbalarla ilgili derledikleri önceki çalışmalara ait verileri değerlendirdiklerinde, turbaların doğal su içeriği değerlerinin % 82 ile 1590 arasında değiştiğini saptamışlardır (bknz. Çizelge 3.1). Önemli ölçüde kırılgan ve gözenekli yapıya sahip olmaları nedeniyle, turbaların laboratuvarda tayin edilen su içerikleri, turbanın orjinal yerinden alındığı andaki su içeriğiyle tamamen aynı olmayabilir [46]. Bunun başlıca nedeni, turbanın yerinden alındığı sırada suyun bir kısmının yer çekimiyle makro gözeneklerden drene olmasıdır.

Organik madde miktarı turba zeminlerin saflık derecesini ifade etmektedir. Organik bileşim, toplam madde miktarından kül içeriğinin çıkarılmasıyla belirlenmektedir. Turbaların sınıflandırılmasında önemli rol oynayan organik madde miktarı, turba birikimlerinin morfolojisiyle fazlasıyla ilişkili olup, turba türlerine göre çeşitlilik göstermektedir [6].

Özgül ağırlık; turbaların bileşimine ve içerdiği inorganik madde miktarına bağlı olarak değişim göstermekte olup, hümifikasyon derecesi ile doğrudan ilişkilidir. Lifli turbalarda özgül ağırlık tayini oldukça güçtür [6]. %75'ten fazla organik madde içeriğine sahip turbaların özgül ağırlıkları 1.3 ile 1.8 arasında değişim göstermektedir [6].

Doğal yoğunluk; turbanın su ve mineral içeriğine bağlı olup, amorf-taneli turbalarda 1.2 g/cm^3 (birim hacim ağırlık olarak 12 kN/m^3), odunumsu lifli turbalarda ise 0.6 g/cm^3 (6 kN/m^3)'tür [2].

3. TURBALARIN JEO-MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE İLİŞKİN ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Turba zeminlerin yaygın olduğu ülkelerde günümüze değin çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiş olmakla birlikte, bunlar genellikle; turbaların fiziksel ve indeks özellikleri, dayanım ve deformasyon özellikleri, sıkışma davranışları ile bu zeminlerde karşılaşılan mühendislik sorunları ve zemin iyileştirmesi konularında yoğunlaşmıştır. Literatürde turba zeminlerde gerçekleşen heyelanların değerlendirilmesine ilişkin çalışmalar da bulunmasına karşın, inceleme alanında herhangi bir şev duraysızlığı sorunu beklenmediğinden, bu bölümde bu konudaki çalışmalara değinilmemiştir. Turbaların dinamik davranışı konusunda yapılmış çalışmalar oldukça sınırlı sayıda olup, bu çalışmalar belirli bölgelerde bulunan turba zeminlerin dinamik özelliklerinin (makaslama modulü, makaslama dalgası hızı, sönümlenme oranı vb.) ve sismik yer tepkilerinin belirlenmesine yöneliktir. Bu bölümde, tezin amaç ve kapsamı dikkate alınarak yapılan literatür araştırmasında turba zeminlerin, ağırlıklı olarak, konsolidasyon ve makaslama dayanımı gibi mühendislik özellikleri ve dinamik davranışları ile inceleme alanındaki turba zeminlere ilişkin önceki yıllarda gerçekleştirilmiş çalışmalar ana hatlarıyla sunularak değerlendirilmiştir.

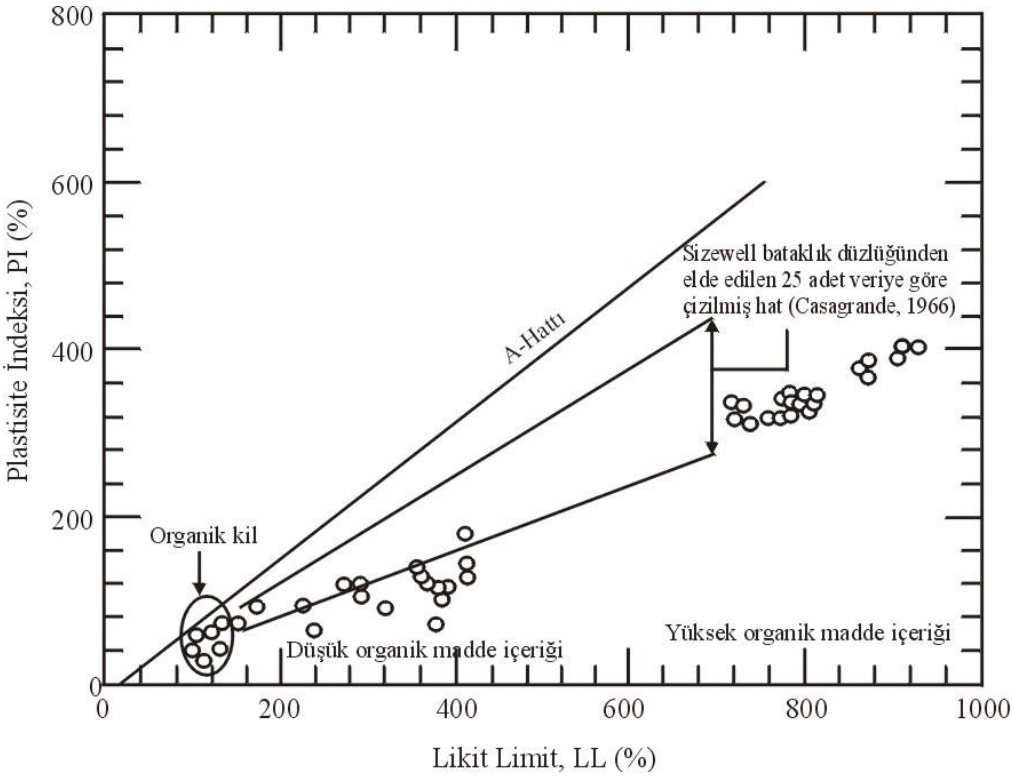
3.1. Turba Zeminlerin Fiziksel ve İndeks Özellikleri İle Bu Tür Zeminlerde Örnekleme Sırasında Karşılaşılan Güçlüklere İlişkin Çalışmalar

Turbaların ileri derecede geçirgen, çok hassas, lifli yapıda ve yüksek boşluk oranına sahip olmaları nedeniyle, bu zeminlerden örselenmemiş örnek alınmasında güçlükler yaşanmaktadır [6]. Coley [47] ve Hobbs [48] gibi araştırmacılar, turba zeminler örneklenirken örselenme derecesinin en aza indirilmesi amacıyla gözlem çukurlarından kesilerek (traşlanarak) blok örneklerin alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Landva vd. [35], örnekleme sırasında turbalarda gaz ve nem kaybı sonucu hacimsel azalma ve liflerin tahribi sonucunda ise yapısal bozulma gerçekleşebileceğini belirtmişlerdir. Bu araştırmacılar ayrıca, piston ve blok örnekleyici kullanılarak turbalardan örnekleme yapılmasının örselenmeyi azaltacağına değinmişlerdir. Fox vd. [49], Shelby tüpü ve blok örneklerden elde ettikleri

örselenmemiş örnekler üzerinde konsolidasyon deneyleri yapmış olup, Shelby tüpüyle alınan örneklerde yapılan deneylere ait sonuçların temsil edici olmadığını ifade etmişlerdir. Blok örnekleme yöntemi turba zeminlerden örselenmemiş örnek alımı için en iyi yöntem olarak değerlendirilmesine rağmen, ucu sivriltilmiş kesici başlıklı tüp örnekleyiciler kullanılarak da yüksek kalitede örnek alınabilmektedir [6].

Turba zeminlerin lifli yapısı, bu zeminlerde Atterberg limitlerinin belirlenmesini güçleştirmektedir [50]. Hobbs [48], likit limit değerinin ancak hümifikasyon derecesi yüksek lifli turbalarda belirlenebileceğini ve yalnızca kil içeren turba zeminlerin plastik limitlerinin saptanması gerektiğini vurgulamıştır. Bu durum, Atterberg limitlerinin turbaların sınıflandırılmasında ve jeo-mühendislik özelliklerinin tahmin edilmesinde kullanılmasının yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Ayrıca, pek çok araştırmacının likit limit ve plastik limit tayini amacıyla önerdikleri özel yöntemler de başarılı olamamıştır [6]. Cassagrande [51], amorf turbaları düşük plastisiteli, lifli turbaları ise plastik olmayan zemin olarak değerlendirmiştir. Araştırmacı, turbalarda plastisitenin değişim aralığını plastisite abağı üzerinde göstermiş olup; turbalara ait tüm noktaların A-çizgisinin altında kaldığını belirtmiştir (Şekil 3.1). Lewis [52], İngiltere'deki lifli turbaların likit limitlerini % 670, plastik limitlerini ise %230 olarak belirlemiştir. Olson ve Mesri [53], likit limit ve plastik limitlerin lifli turbalarda LL=%325-650, PL=%100-375 aralığında, amorf turbalarda ise LL=%150-300, PL=%50-150 arasında değiştiğini rapor etmiştir (Çizelge 3.1).

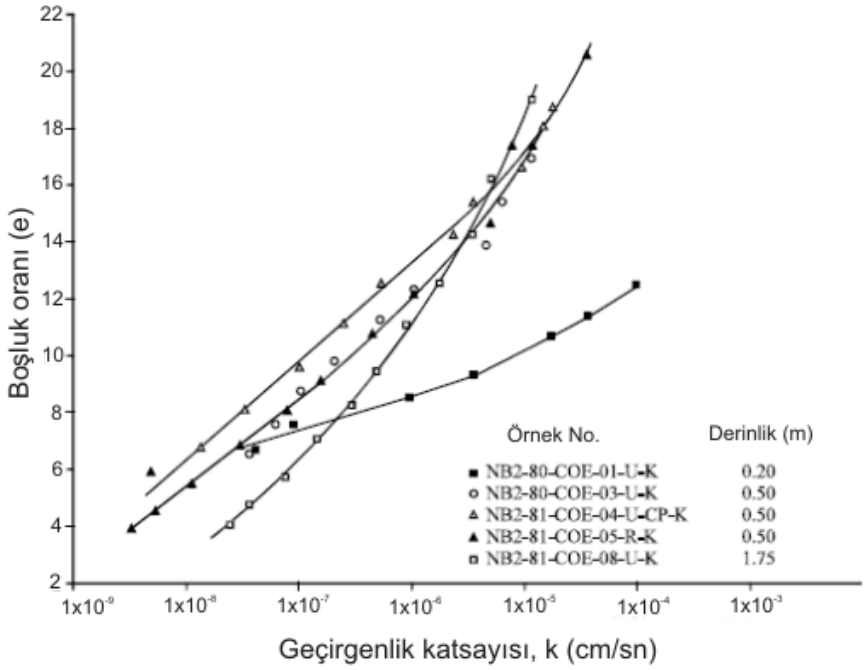
Turbaların geçirgenliği, bu zeminlerin konsolidasyon hızını ve makaslama dayanımını büyük ölçüde etkilemesi nedeniyle en önemli özelliklerinden biridir [6]. Geçirgenlik; boşluk oranı, hümifikasyon derecesi ve mineral içeriği gibi özelliklere bağlı olarak değişmektedir. Geçirgenlik, tam doygun turba örneği boyunca hidrolik yük farkı uygulandığında ölçülen akış hızından belirlenebilmektedir. Lifli turbalar gözenekli ve çok yüksek boşluk oranına sahip olmaları nedeniyle yüksek geçirimli zeminler olarak değerlendirilmektedir. Ancak temiz kum zeminler turbalardan daha yüksek geçirimliliğe sahiptirler [3]. Turbaların üzerine yük uygulanması durumunda, geçirgenlikte ani bir azalma izlenmektedir. Doğal koşullarında geçirgenliği



Şekil 3.1. Turbalarda plastisite değişim aralığının plastisite abağı üzerindeki gösterimi [48].

10^{-2} – 10^{-4} cm/s arasında değişen turba zeminlerde, bir dolgu yükü altında bu değer 10^{-8} – 10^{-9} cm/s'ye kadar azalmaktadır [2]. Mesri vd. [54], odometre deneyleri sırında ikincil konsolidasyon aşamasında Middleton (ABD) turbalarının geçirgenliklerini belirlemişlerdir. Araştırmacılar, bu turba zeminlerin ilksel geçirgenliğinin yumuşak kil ve silt çökellerinin geçirgenliğinden 100 ile 1000 kat daha fazla olduğunu saptamışlardır. Ancak sıkışma süreci sonrasında turbaların killerle çok benzer geçirgenlik özellikleri gösterdiklerini ifade etmişlerdir. Gofar [55], turbaların yanal yöndeki geçirgenlik katsayısının düşey yöndeki geçirgenlik katsayısından daha yüksek olduğunu saptamıştır. Lefebvre vd. [56], iki farklı lokasyondan (NBR2 ve NBR3) alınan James Bay turbalarının farklı hücre basınçlarındaki geçirimliliklerini ölçmüşlerdir. Buna göre araştırmacılar; NBR-2 ve NBR-3 no.'lu lokasyonlardan alınan örneklerin düşey yöndeki geçirgenlik katsayılarının sırasıyla 10^{-6} - 10^{-8} m/s ile $3x10^{-5}$ - $5x10^{-7}$ m/s arasında değişmekte olduğunu belirtmişlerdir. NBR-2 no.'lu lokasyona ait turba örneklerinin geçirgenlik katsayının boşluk oranıyla değişimi Şekil 3.2'de sunulmuştur. Hobbs [48], turba zeminler için farklı araştırmacılar tarafından belirlenen

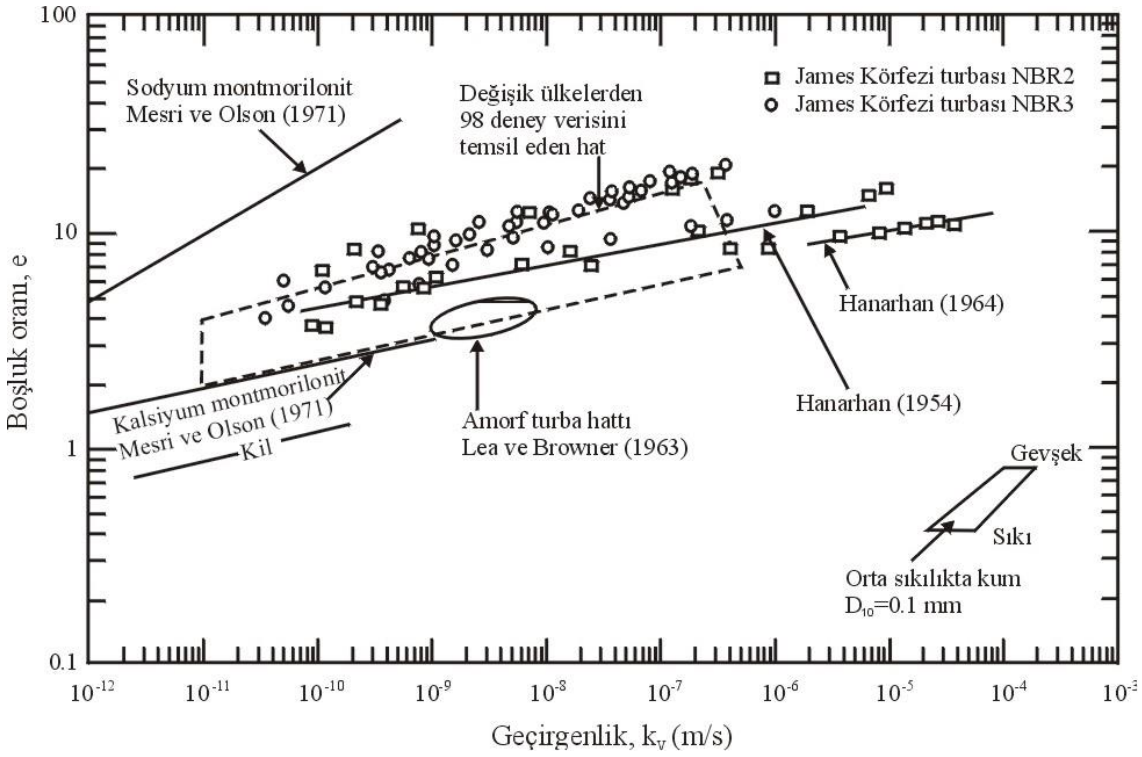
geçirgenlik değerlerinin boşluk oranıyla değişimini değerlendirmiş (Şekil 3.3) ve boşluk oranındaki azalmaya koşut olarak, geçirgenlik katsayısında önemli bir azalmanın olduğunu ifade etmiştir. Araştırmacı, hem lifli hem de amorf turbaların düşey yöndeki geçirgenlik değerlerinin geniş bir aralık içine düştüğünü, az miktarda ayrışmış turbaların ise bu aralığın üst sınırlarında yer aldığını belirtmiştir.



Şekil 3.2. James Bay turbalarının boşluk oranı-geçirgenlik katsayısı ilişkisi ([56]; [19])'dan

3.2. Turba Zeminlerin Sıkışma Karakteristiklerine İlişkin Çalışmalar

Turba zeminlerin sıkışabilirliği birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Munro [2], yük altındaki turba zeminlerin konsolidasyon ve oturma davranışının çok karmaşık olduğunu ve oturma miktarı ile hızının tahmin edilmesi konusunda sorun yaşandığını ifade etmiştir. Turba zeminlerin yük altında yavaş ve hızlı olmak üzere iki şekilde konsolide olduğunu belirten bu araştırmacı, yavaş konsolidasyon sürecinde zemine hafiften ağıra doğru giderek artan yükler uygulanarak zeminin sıkışması sağlanmakta ve zeminin dayanımı zamanla arttırılmış olmaktadır. Hızlı konsolidasyon sürecinde ise, hacimsel değişim olmadan turba zeminlerde makaslama yenilmesiyle birlikte ani oturma gerçekleşmektedir. Munro [2], turbaların konsolidasyonunun ve oturmasının



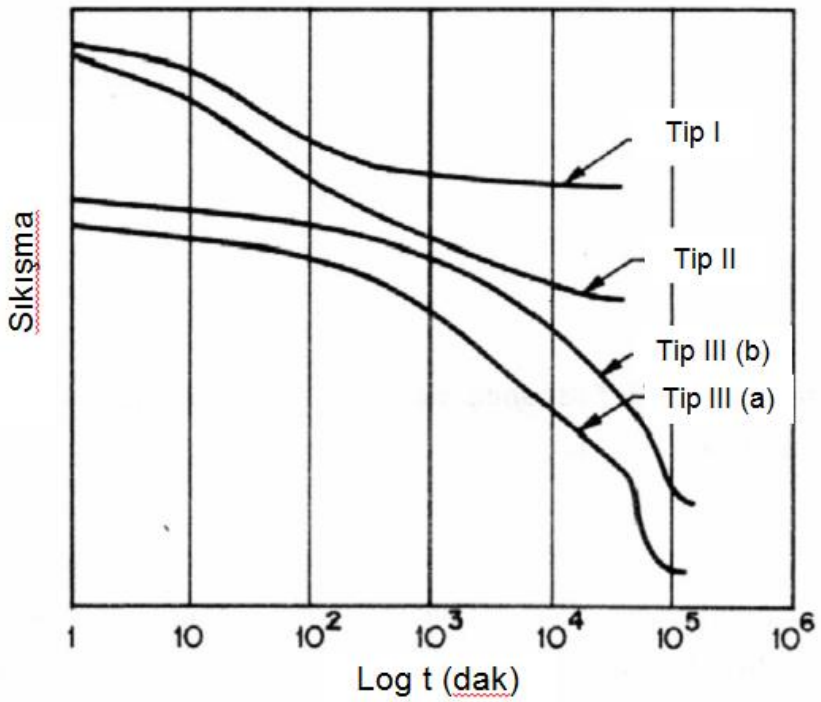
Şekil 3.3. Turbalarla birlikte diğer malzemeler için belirlenmiş geçirgenlik katsayılarının değişiminin boşluk oranıyla karşılaştırılması [48].

birincil ve ikincil sıkışma olarak adlandırılan iki süreçten oluştuğuna değinmiştir. Çok yüksek boşluk oranı ve sıkışma indeksine sahip olan turba zeminlerin ilksel konsolidasyonlarının bir kaç gün ya da hafta gibi çok kısa sürede tamamlanması nedeniyle turba zeminler için ikincil sıkışma süreci ilksel sıkışma sürecine göre daha fazla önem taşımaktadır. Turbalar zeminler arasında en yüksek ikincil sıkışma indisi ($C\alpha$) ve ilksel sıkışma indisi (Cc) oranına sahip zeminlerdir [54]. Literatüre göre turbaların sıkışma indisleri 0.056 ile 15 arasında değişmektedir (Çizelge 3.1).

Killi zeminlerin sıkışması genel olarak; ani oturma, birincil konsolidasyon ve ikincil konsolidasyon olmak üzere üç aşamada gerçekleşmektedir. Şıkışma; zeminlerin geçirimlilik özelliğine bağlı olarak, kum-çakıl gibi kohezyonsuz zeminlerde kısa sürede, siltli-killi zeminlerde daha uzun sürede gerçekleşmektedir. Turba zeminlerde ise, boşluk oranı ve ilksel geçirimliliğin yüksek olması nedeniyle birincil konsolidasyon kısa sürede tamamlanmakta ve sıkışma sürecinin büyük bir kısmını ikincil konsolidasyon oluşturmaktadır. Robinson [57], Gofar [55] ve Azari [58] gibi

araştırmacılar, diğer zeminlerden farklı olarak, turba zeminlerde e-log P grafiklerinde birincil konsolidasyon ile ikincil konsolidasyon süreçleri birbirlerinden net bir şekilde ayrılamamaktadır. Robinson [57], gözenek suyu basıncını ölçerek yapmış olduğu konsolidasyon deneylerinde, gözenek suyu basıncının oturma eğrisinin kırılma noktasından belirlenen zamandan daha önce sönümlendiğini saptamıştır.

Leonards ve Griault [59], laboratuvar deneyleri yaparak farklı türlerdeki zeminler için Şekil 3.4'te verilen 3 farklı tipte "sıkışma-zaman" ilişkisi belirlemişlerdir. Tip I eğrisi, Terzaghi'nin konsolidasyon teorisinde tanımladığı klasik S-şekilli eğridir. Bu tipte davranan zeminlerde ikincil sıkışma başlangıç zamanı log t ve $\sqrt{t}$ yöntemleriyle kolaylıkla belirlenebilmektedir. Tip II ve Tip III eğrilerini gösteren zeminlerde ise, birincil konsolidasyon hızla tamamlanmakta ve bunu doğrusal şekilde devam etmeyen ikincil sıkışma davranışı izlemektedir. Bu tür zeminlerde ikincil sıkışma davranışının belirlenmesi için klasik yöntemler kullanıldığında, gerçek ikincil sıkışma değerlerinden daha düşük değerler hesaplanmaktadır [55].



Şekil 3.4. Konsolidasyon deneylerinden belirlenen sıkışma-zaman eğrileri ([59]; [55]'dan).

Çizelge 3.1. Turbaların önceki çalışmalarda belirlenen başlıca kimyasal, fiziksel, indeks, dayanım ve konsolidasyon özelliklerinin değişim aralıkları ([10]'dan da yararlanılarak hazırlanmıştır).

Kaynak	Hümifikas-yon derecesi	Organik madde içeriği (%)	Lif içeriği (%)	Kül içeriği (%)	γ_b (kN/m³)	γ_d (kN/m³)	w (%)	Gs	e (%)	LL	PL	q_u (kPa)	Makaslama dayanımı			Konsolidasyon parametreleri			
													S_u (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	m_v (m²/MN)	C_c	c_v(m²/yıl)	C_α
Mutalib vd. 1991; Ong ve Yogeswaran, 1991; ve Yogeswaran, 1995 (Singh vd., 2003'den)	H1-H10			< 10	9.8-19.6	0.59-2.65	100-1300						10 (2-11)						
Sing vd., 2008a, 2008b ve 2008c	H4	96.45	90.39	4	10.18		668.3	1.4	800-960			4.5-18				0.655-7.807 (12.5-800 kPa)	3.928	12.8-50.95 (12.5-800 kPa)	0.03-0.021
Hashim ve Islam, 2008	H4	96.45 (88.61-99.06)	90.39 (90.25-90.49)	3.55 (0.94-11.39)	10.17 (10.15-10.20)		555 (414-674)	1.24 (0.95-1.34)	932.9 (799.9-964.6)	208.39 (202.3-220.65)		4							
Abdullah vd., 2007		93-98	2-7		7.75-8.24	1.47-2.26	500	1.52-1.58		213			9-17			0.12-7.69	1.4-1.8	0.5414	0.077
Asapo ve Coles, 2008	H3 (H6 ile karışık)				6.08		82												
AGEC Ltd., 2004	H3-H5												19 (4-37)						
Ampera ve Aydoğmuş, 2005		95.8	25		9.47	0.81	1169	1.27	1580										
Alwi 2008 (Deboucha vd. 2008'den)	H4		84.99		10.39	1.099	700-850	1.343	1099	173.75	115.8								
Cola ve Cortelazzo, 2005	H6	68-75	11-27		10.3-10.7		330-421	1.55-1.58	5.74				90-160						
Cola ve Cortelazzo, 2005	H5	70-72	25		10.3-10.8		606-790	1.46-1.6	10.75				20-110						
Hebib ve Farrel, 2003	H2	98-99					1200							5-10	-		6.5		
Hebib ve Farrel, 2003	H6-H9	94-98					850										6.1		
Hanzawa vd., 1994							103-417												
Fox ve Tuncer, 1996	H4			6.1-10.8			491-622		866-1131										
Ajlouni, 2000		90-95			9.1-10.2		510-850	1.53-1.65	920-1420										
Ajlouni, 2000		96			8.3-10		1000-1340	1.50-1.64	1800-2350										

γ_b: Doğal birim hacim ağırlık; γ_d: Kuru birim hacim ağırlık; w: Su içeriği; Gs: Özgül ağırlık; e: Boşluk oranı; LL: Likit limit; PL: Plastik limit; q_u: Tek eksenli sıkışma dayanımı; S_u: Kanatlı kesici deneyinden tayin edilmiş drenajsız makaslama dayanımı; c: Kohezyon; ϕ: İçsel sürtünme açısı; m_v: Hacimsel sıkışma katsayısı; C_c: Birincil sıkışma katsayısı; c_v: Sıkışma indeksi; C_α: İkincil sıkışma katsayısı

Çizelge 3.1. (devam ediyor)

Kaynak	Hümifikasyon derecesi	Organik madde içeriği (%)	Lif içeriği (%)	Kül içeriği (%)	γ_b (kN/m³)	γ_d (kN/m³)	w (%)	Gs	e (%)	LL	PL	q_u (kPa)	Makaslama dayanımı			Konsolidasyon parametreleri			
													S_u (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	m_v (m²/MN)	C_c	c_v (m²/yıl)	C_α
Hanrahan ve Walsh, 1965; Hanrahan vd., 1967 (Long, 2005'ten)														5.5-6.1	36.6-43.5				
Pigott vd.,1992 (Long, 2005'den)													5-20						
Farrell ve Hebib, 1998 (Long, 2005'den)	H2	98					1200-1400							5	55^U				
Farrell ve Hebib, 1998 (Long, 2005'den)	H2	98					1200-1400								38^D				
Farrell ve Hebib, 1998 (Long, 2005'den)	H2	98					1200-1400								31^D				
Hebib, 2001 (Long, 2005'den)	H6-H9	94-98					750-950								21^R				
Hebib, 2001 (Long, 2005'den)	H2	98													68^U				
Farrell vd., 1998 (Long, 2005'den)							600 (400-900)								34^D				
Farrell vd., 1998 (Long, 2005'den)							600 (400-900)								48^U				
Masawi, 2004		98,26					473,44	0,865		404,17	316,42					0.285-3.656 (25-400 kPa)	0.374-1.21 (25-200 kPa)	4.866-10.115 (25-400 kPa)	
Masawi, 2004		94,53					319,45	0,748		392,47	235,37					0.304-2.626 (25-400 kPa)	0.078-0.9127 (25-200 kPa)	4.127-10.392 (25-400 kPa)	
Masawi, 2004		83,64					219,92	0,809		267,47	171,63					0.240-1.348 (25-400 kPa)	0.056-0.7377 (25-200 kPa)	5.542-9.599 (25-400 kPa)	
Duraisamy vd., 2007	H4-H5	77-88	68-77		7.956-9.378	1.334-1.668	286-350	1.42-1.51	789.5-1048	310-398							1.453-3.211 (40-320 kPa)		0.0374-0.0901 (40-320 kPa)
Duraisamy vd., 2007	H5-H7	73-76	55-65		8.397-9.888	1.668-2.335	181-266	1.52-1.55	552.2-754.1	250-285							1.29-2.78 (40-320 kPa)		0.0225-0.0881 (40-320 kPa)
Duraisamy vd., 2007	H8	70-80	31-32		9.771-9.996	2.443-2.776	140-300	1.49-1.56	412.5-482.4	240-330							1.15-2.44 (40-320 kPa)		0.014-0.0851 (40-320 kPa)
Boylan ve Long, 2007	H5/H6-H7												5-7						
Boylan ve Long, 2007	H5/H6-H8	>95			10,1		1000-1500						5-10						
Boylan ve Long, 2007	H5/H6-H7	>94			10,2		800-1100							$10\text{-}15^{CU}$					

Çizelge 3.1 (devam ediyor)

Kaynak	Hümifikasyon derecesi	Organik madde içeriği (%)	Lif içeriği (%)	Kül içeriği (%)	γ_b (kN/m³)	γ_d (kN/m³)	w (%)	Gs	e (%)	LL	PL	q_u (kPa)	Makaslama dayanımı			Konsolidasyon parametreleri			
													S_u (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	m_v (m²/MN)	C_c	c_v (m²/yıl)	C_α
Herle ve Herle, 2001													12-23	6-10[UU-CU]	27[CU]				
Baudin vd., 1999					11		400		250	45				5-18	18-26[CU]			0.62	
Warburton vd., 2002					10-10.9		85-90							5	23[D]				
Dykes vd., 2008	H2-H9			3.7		1.08	570-1030			700-850	350-430		15-25						
Dykes vd., 2008				1.5		1.275	450-590			630-1000	320-520		7-37	2.6	30.4				
Dykes vd., 2008	H7-H10			2.1		1.275	655-990			720-770				3.4	29.6				
Petrone vd., 2008	H1					0.49		1.47-1.58											
Petrone vd., 2008	H2					0.39-0.88		1.41-1.97											
Petrone vd., 2008	H3					0.785-1.47		1.34-1.58											
Moczar, 2003						1.86-2.35	260-500												
Mesri vd., 1997		90-95			9.1-10.2		623-846	1.53-1.65	1010-1420										
Colley, 1950 (Ajlouni, 2000'den)				17			484-909												
Thompson ve Palmer, 1950 (Ajlouni, 2000'den)					9.32-11.08		240-341	1.79-2.04											
Hanrahan, 1954 (Ajlouni, 2000'den)					9.32-10.1		850	1.1-1.8									10	10	
Lewis, 1956 (Ajlouni, 2000'den)							520												
Lea ve Brawner, 1963 (Ajlouni, 2000'den)					8.63-11.97		500-1500	1.5-1.6									2.5-3	14-17	
Adams, 1965 (Ajlouni, 2000'den)				12.2-22.5			200-600	1.62											

Çizelge 3.1. (devam ediyor)

Kaynak	Hümifikasyon derecesi	Organik madde içeriği (%)	Lif içeriği (%)	Kül içeriği (%)	γ_b (kN/m³)	γ_d (kN/m³)	w (%)	Gs	e (%)	LL	PL	q_u (kPa)	Makaslama dayanımı			Konsolidasyon parametreleri			
													S_u (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	m_v (m²/MN)	C_c	c_v (m²/yıl)	C_α
Adams, 1965 (Ajlouni, 2000'den)				15.9			355-425	1.73											
Tessier, 1966 (Ajlouni, 2000'den)				7-13	9.12-10.1		200-890	1.9-2.7											
Keene ve Zaodniak, 1968 (Ajlouni, 2000'den)				14			850	1.5									4.7-10.3	55.6	
Forrest ve MacFarline, 1969 (Ajlouni, 2000'den)				7-13			850-1050	1.41											
Samson ve LaRochell, 1972 (Ajlouni, 2000'den)				4.6-15.8	8.53-10.2		605-1290	1.41-1.7											
Berry ve Vickers, 1975 (Ajlouni, 2000'den)				9.4	10.2		613-886	1.5										9.1	
Levesque vd., 1980 (Ajlouni, 2000'den)				4.8			350												
Levesque vd., 1980 (Ajlouni, 2000'den)				1			778												
Berry, 1983 (Ajlouni, 2000'den)				14.3	10.3		202-1159	1.5									6.4		
Ng ve Eischens, 1983 (Ajlouni, 2000'den)				23.9	10.3		660	1.58											
Ng ve Eischens, 1983 (Ajlouni, 2000'den)				31.2	10.3		418	1.68											
Ng ve Eischens, 1983 (Ajlouni, 2000'den)				9.4	10.3		336	1.73											
Edil ve Mochtar, 1984 (Ajlouni, 2000'den)				19.5	9.42		600	1.72											
Edil ve Mochtar, 1984 (Ajlouni, 2000'den)				15	9.42		460	1.68											
Edil ve Mochtar, 1984 (Ajlouni, 2000'den)				12	8.93		510	1.41											
Edil ve Mochtar, 1984 (Ajlouni, 2000'den)				6.9-8.4	8.24		173-757	1.56											

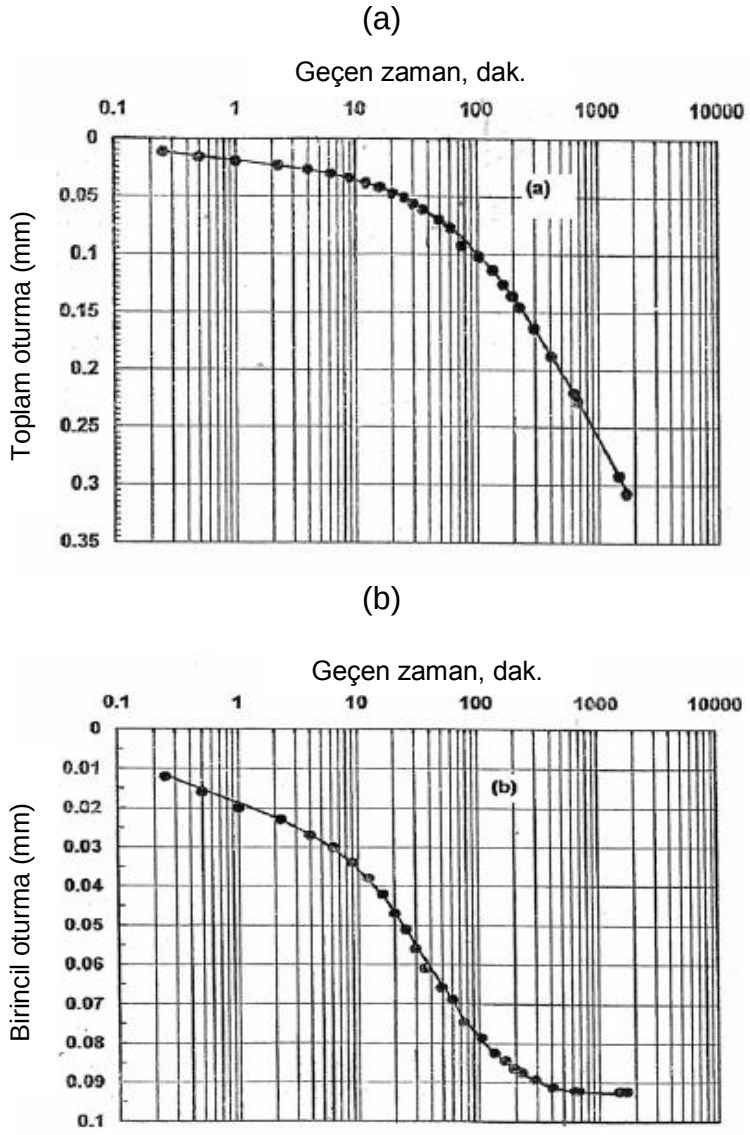
Çizelge 3.1 (devam ediyor)

Kaynak	Hümifikas-yon derecesi	Organik madde içeriği (%)	Lif içeriği (%)	Kül içeriği (%)	γ_b (kN/m³)	γ_d (kN/m³)	w (%)	Gs	e (%)	LL	PL	q_u (kPa)	Makaslama dayanımı			Konsolidasyon parametreleri			
													S_u (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	m_v (m²/MN)	C_c	c_v(m²/yıl)	C_α
Olson ve Mesri, 1970 (Kazemian vd., 2011'den)					10.1-12.1		200-875												
Huat vd., 2004		65-85			10.5-11.1		310-450												
Huat vd., 2004		65-97			8.3-11.5		200-700	1.38-1.70											
Huat vd., 2004		41-99			8.0-14.0		467-1224	1.5-1.77											
Moreno ve Rodriguez, 2004				36	11.8		205		4.1										
Edil vd., 1994		%93	50				550		10.5										
Gabrys ve Szymanski, 2010					9.7-9.9	1.17-1.37	641-760												
Leong ve Chin, 2000				3,29			198	1.47		182	148								
Leong ve Chin, 2000				1.2			632	1.42		260	196								
Ulusay vd., 2010	H3-H4	22.3-71.7			9.0-12.5	3.38-4.49	118-211	1.63-2.14	3.35-4.68					2.9-5.8	42.-60^0	0.1601-2.333	0.634-2.421	0.5233-4.3221	0.00025–0.02558
Ulusay vd., 2010	H5-H7	55-58			11.1-13.8	4.28-6.26	105-559	1.66-2.44	2.19-2.98							0.2354-3.067	0.497-0.707	0.7664-1.9458	0.00326–0.00864
Forrest ve MacFarlane, 1969		87-93					850-1200	1.41									6.2		
Sert ve Önalp, 2007					10.12-13.45		115-213		173-694	114-238	99-199	35-150		14-24			0.275-1.58		
Lefebre vd., 1984 (Ajlouni, 2000'den)				0.1-32			660-1590	1.53-1.68									4.5-15		
Olson, 1984 (Ajlouni, 2000'den)					9.22-11.28		660-890												
Olson, 1984 (Ajlouni, 2000'den)					10.2-12.07		200-875												
Yamaguchi, vd., 1985 (Ajlouni, 2000'den)				22-45			125-375	1.55-1.63											

Çizelge 3.1 (devam ediyor)

Kaynak	Hümifikas-yon derecesi	Organik madde içeriği (%)	Lif içeriği (%)	Kül içeriği (%)	γ_b (kN/m³)	γ_d (kN/m³)	w (%)	Gs	e (%)	LL	PL	q_u (kPa)	Makaslama dayanımı			Konsolidasyon parametreleri			
													S_u (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	m_v (m²/MN)	C_c	c_v (m²/yıl)	C_α
Jones vd., 1986 (Ajlouni, 2000'den)				22-45	9.81		419	1.61											
Yamaguchi vd., 1987 (Ajlouni, 2000'den)				20-33			490-1250	1.45-1.8											
Nakayama vd., 1990 (Ajlouni, 2000'den)				22-35			630-1200	1.58-1.71											
Yamaguchi, 1990 (Ajlouni, 2000'den)				5-15	9.71-10.79		400-1100	1.47-2											
Hansbo, 1991 (Ajlouni, 2000'den)					9.81		700-800											3-6	
Termaat ve Topolnicki, 1994 (Ajlouni, 2000'den)				20.8	9.5		669	1.52											
Abdullah vd., 2007		93-98	2-7		7.75-8.24	1.47-2.26	500	1.52-1.58		213			9-17			0.12-7.69	1.4-1.8	0.54	
Hashim ve İslam, 2008	H4	88.61-99.06	90.25-90.49	0.94-11.37	10.56-10.61		414-674	0.95-1.34	800-965	202-221		4.7-6.9					2.43-2.84		
Dykes ve Warburton, 2008				4.6	9.87		591												
Hendriadi ve Salokhe, 2002		46.36-54.85	37.12-49.21				446.4												
Gofar ve Sutejo, 2007	H4	97	90		10.02		608	1.47	900									3.259-5.689 (25-200 kPa)	
Nichol ve Farmer, 1998		61.5-86.2			9.9-11.6	0.94-1.61	561-971	1.51-1.73	924-1740							8.76-11.77	4.13-9.33		
Genel değişim aralığı		**46.36-99.1**	**2-90.5**	**0.94-45**	**6.1-19.6**	**0.4-2.78**	**82-1590**	**0.75-2**	**173-2350**	**45-1000**	**99-520**	**4-150**	**2-160**	**2.6-24**	**18-68**	**0.12-11.77**	**0.056-15**	**0.54-55.6**	**0.014-0.0901**

Tip III türünde sıkışma-zaman davranışını gösteren zeminlerde, konsolidasyon deneylerinden elde edilen sıkışma-zaman eğrilerinden ikincil sıkışma indisi (C_α), t_{50}, t_{90} ve C_v parametrelerinin belirlenmesi hususunda sorun yaşanmaktadır. Robinson [60], bu sorunun giderilmesi için konsolidasyon deneyleri sırasında gözenek suyu basıncını ölçerek birincil sıkışmanın tamamlandığı anı belirlemiş ve birincil sıkışma sürecinde gerçekleşen ikincil sıkışma miktarını birincil sıkışma süresinde izlenen oturma miktarlarından çıkararak kuramsal S eğrisini oluşturmuştur (Şekil 3.5).



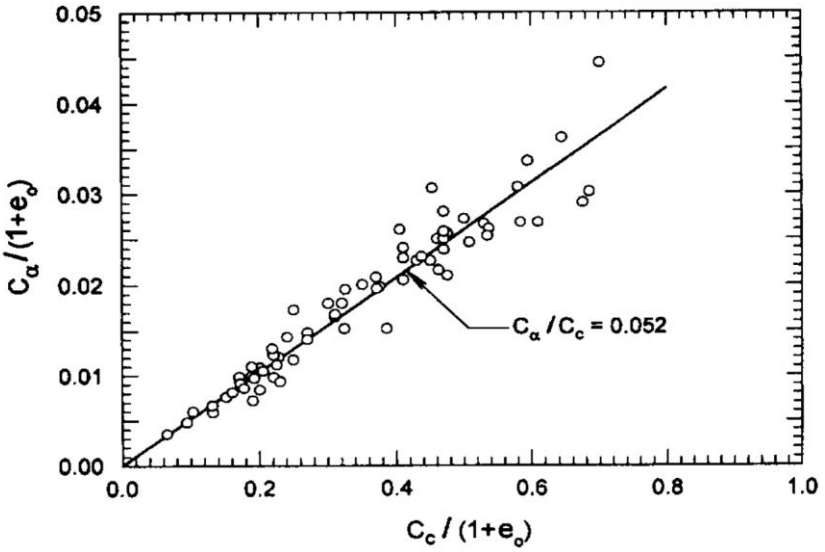
Şekil 3.5. Robinson [60] tarafından yapılan konsolidasyon deneyinde bir turba örneği için elde edilen (a) toplam oturma-zaman eğrisi, (b) ikincil oturma çıkartıldıktan sonraki oturma-zaman eğrisi.

Forrest ve MacFarlane [61], turba zeminlerin sıkışma davranışlarını plaka yükleme ve konsolidasyon deneyleri yaparak değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar, laboratuvarda ve arazide yapılan deneylerin her ikisinde de gözenek suyu basıncının sönümlenmesinden sonra ölçülen oturma miktarının, toplam oturmanın ¼'ü kadar olduğunu belirtmişlerdir. Boşluk oranının ve logaritmik efektif basınç (e-logP) eğrilerinin eğiminin laboratuvarda yapılan deneylerde arazide yapılan deneylere oranla iki kat daha dik olduğunu saptamışlardır. Bunların yanı sıra, turba zeminlerin ilksel ve ikincil konsolidasyon oturmalarının sınırlarının belirgin olmadığı da bu araştırmacılar tarafından vurgulanmıştır.

Fox ve Edil [62], düşey efektif gerilme ve sıcaklığın Middleton (Wisconsin, ABD) turbalarının ikincil sıkışma davranışına etkilerini laboratuvar deneyleri ve arazi modelleri ile araştırmışlardır. Bu çalışmada araştırmacılar; Middleton turbalarının ilksel su içeriği, boşluk oranı ve kül içeriğini belirlemişler ve bu turbaları Von Post sınıflama sistemine göre H4 sınıfı olarak tanımlamışlardır. Fox ve Edil [62], farklı gerilme artışı ve sıcaklıklar altında tek boyutlu sabit-halkalı pirinçten yapılmış odometre ile konsolidasyon deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar; ısı kontrolü amacıyla her odometreyi ısıtılmış su kabına yerleştirmiş ve ilksel konsolidasyonun tamamlandığını ise gözenek suyu basıncı ölçümleri ile belirlemişlerdir. İlksel konsolidasyonun 8 dakikada tamamlandığı, daha sonra ikincil sıkışmanın etkisiyle oturmanın devam ettiği ve gerilmenin uygulandığı yöne bağlı olarak, turba liflerinin yöneliminin ikincil sıkışmaya etki ettiği bu araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Fox ve Edil [62], büyük sıcaklık artışlarının turbaların oturma miktarlarında ani artışlara neden olduğunu saptamış olup, turbaların soğutulmasıyla önce bir miktar şişmenin gözlendiğini daha sonra ise şişme ve oturmanın gözlenmediğini rapor etmişlerdir. Fox ve Edil [62], laboratuvar çalışmalarına ek olarak turbalık bir alanda basamak boyutları (13x13x1) m ve (13x13x1) m olmak üzere iki basamaklı kare şekilli iki adet deney dolgusu inşa etmişlerdir. Oturma miktarı, sıcaklık, gözenek suyu basıncı ve yanal deformasyonun ölçümü amacıyla bu dolgulara oturma plakaları, termometre, piyezometre ve inklinometre yerleştirmişlerdir. Araştırmacılar bu çalışmanın sonucunda, ikincil sıkışma sabitinin (C_α) zamanla sürekli artması nedeniyle, C_α

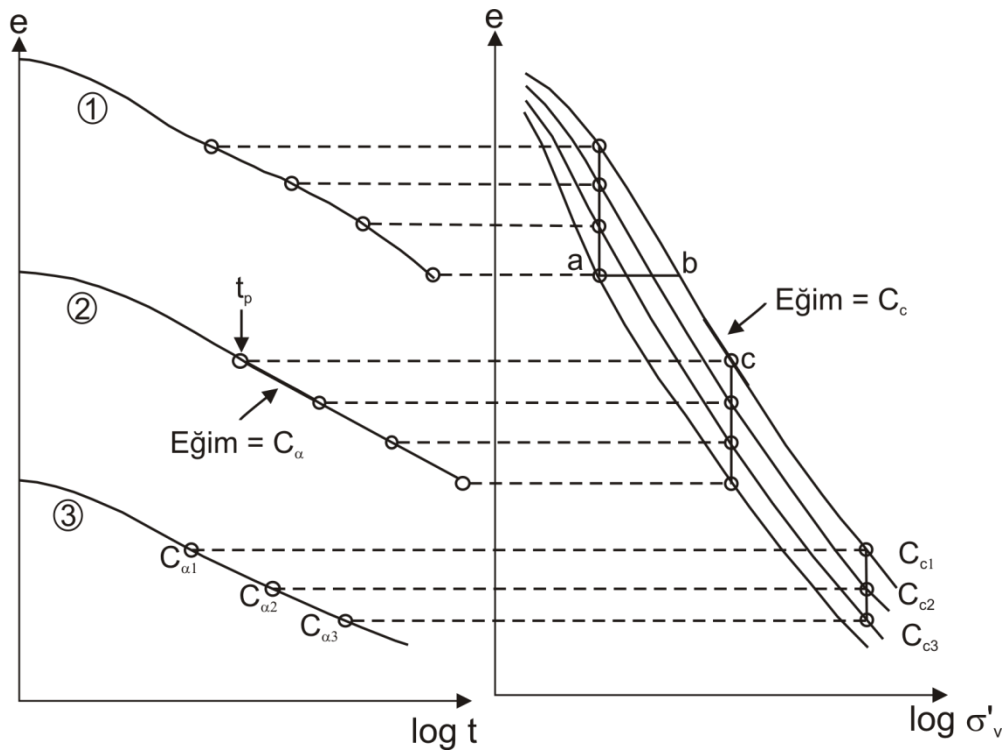
yaklaşımının turbalarda uzun süreli oturmanın tahmini için geçerli olmadığını ortaya koymuşlardır. Bunun yanı sıra bu araştırmacılar, ikincil sıkışma sırasındaki boşluk oranının sıcaklık ile üstel olarak arttığını, turbaların krip davranışının ısıl olarak tetiklendiğini ve turbaların soğutulmasının ikincil sıkışma hızında bir azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, turba zeminlerin yüksek boşluk oranı ve geçirimliliğe sahip olmaları nedeniyle inşaat sonunda konsolidasyonun tamamlandığını, ancak ikincil sıkışma nedeniyle oturmanın yapının kullanım süresi boyunca devam ettiğini de vurgulamışlardır.

Mesri ve Godlewski [63], zeminlerin farklı gerilmeler altında belirlenen birincil ve ikincil sıkışma katsayıları (C_α/C_c) arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ortaya koymuş olup, turba zeminlerin ikincil sıkışma miktarının belirlenmesinde bu ilişkiden yararlanmışlardır (Şekil 3.6). Araştırmacılar, zeminlerin sıkışma katsayısını konsolidasyon deneylerinden elde ettikleri e-log P eğrileri üzerinde her gerilme aralığı için bu eğrinin eğiminden hesaplamış olup, ikincil sıkışma katsayısını ise e-log t eğrilerinden, birincil sıkışma katsayısını belirledikleri yük aralığında birincil oturmanın tamamlanma zamanından sonraki kısımda kalan eğrinin eğimini kullanarak belirlemişlerdir (Şekil 3.7). Buna göre, inorganik yumuşak killer için C_α/C_c oranının 0.04 ± 0.01, organik plastik killer için ise 0.05 ± 0.01 olduğunu saptamışlardır.



Şekil 3.6. Middleton (ABD) turbalarının birincil ve ikincil skışma katsayıları arasındaki ilişki [54].

Middleton turbaları üzerinde konsolidayon deneyleri yaparak bu zeminlerin ikincil oturma davranışlarını değerlendiren Mesri vd. [54], turbaların birincil konsolidasyon süresinin kısa olduğunu, bu nedenle yapının inşası tamamlandıktan hemen sonra ikincil konsolidasyonun gerçekleştiğine dikkat çekmişlerdir. Bu araştırmacılar, turba zeminler üzerinde inşa edilecek yapıların güvenliği açısından, turbaların ikincil konsolidasyon parametrelerinin doğru tahmin edilmesinin önemini vurgulamışlardır.



Şekil 3.7. C_α/C_c ilişkisinin belirlenmesi [64].

Ajlouni [6], Middleton (Wisconsin, ABD) ve James Körfezi (Quebec, Kanada) olmak üzere iki farklı yerden aldığı turba örneklerinin jeomekanik özelliklerini incelemiş ve ayrıca geniş bir literatür araştırması yaparak turbaların jeolojik ve jeomekanik özelliklerini konu alan çalışmaları derlemiştir. Araştırmacı, Casagrande tarafından önerilen görgül (ampirik) yaklaşımı kullanarak turba zeminler için belirlediği ilksel konsolidasyonun tamamlandığı zaman ile aşırı gözenek suyu basıncı ölçümlerinden tayin ettiği zamanın neredeyse birbiriyle aynı olduğunu saptamıştır. Çok yüksek sıkışma indeksine ve boşluk oranına sahip olmaları nedeniyle turba zeminler için

ikincil sıkışabilirliğin önem taşıdığını vurgulayan araştırmacı, ikincil sıkışma davranışının zamana bağlı değişiminin e-log P (boşluk oranı-gerilme) grafiği ve C_α/C_c ilişkisinin ortalamasından belirlenebileceğini ifade etmiştir. Ajlouni [6], ikincil sıkışma indisinin zamana bağlı davranışının birincil sıkışma indisine paralel olduğunu; yani aynı efektif gerilme seviyesinde birincil sıkışma indisi zamanla artıyor, azalıyor ya da sabit kalıyorken; ikincil sıkışma indisinin de aynı davranışı gösterdiğini gözlemlemiştir. Middleton ve James Bay turbalarının ikincil sıkışma indisleri ile birincil sıkışma indisleri arasında doğrusal bir ilişki olduğuna değinen Ajlouni [6], C_α/C_c oranının Middleton turbaları için 0.053, James Bay turbaları için ise 0.059 olduğunu belirtmiştir. Ayrıca araştırmacı, turba zeminlerin ilksel su içeriğinin (w_0) 100'e bölünmesiyle birincil sıkışma indisinin (C_c) tahmin edilebileceğini; yeniden sıkışma indisinin birincil sıkışma indisine oranının (C_r/C_c) Middleton ve James Bay turbaları için sırasıyla 0.15-0.3, 0.03-0.15, şişme indisinin birincil sıkışma indisine oranının (C_s/C_c) ise 0.02-0.15 arasında değiştiğini belirlemiştir. Ajlouni [6], sıcaklığın ve hümifikasyon derecesinin turbaların konsolidasyon davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılmasının gerekliliğine dikkat çekmiştir.

Birim hacim ağırlık, lif içeriği, P-dalgası hızı, Von Post numarası ve kütle yoğunluğu gibi fiziksel özellikleri kullanılarak, turba zeminlerin sıkışabilirliğinin tahmin edilmesi Price vd. [65] tarafından araştırılmıştır. Bu araştırmacılar çeşitli lokasyonlardan aldıkları turba örneklerinin yukarıda değinilen fiziksel özelliklerini ve konsolidasyon parametrelerini (Rowe hücresi kullanarak) belirlemişlerdir. Price vd. [65], bu parametrelerin birbirleriyle ilişkilerini değerlendirmiş ve turba zeminlerin fiziksel özelliklerinden yararlanılarak sıkışabilirliğinin belirlenemeyeceği sonucuna varmışlardır.

Masawi [66], turba ve organik zeminleri aşırı yumuşak zeminler olarak tanımlamış ve bu zeminlerde gözlenen aşırı oturmaların inşaat-tasarım aşamasında sorunlara neden olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı, turba zeminlerdeki organik madde içeriğinin likit limit ve konsolidasyon parametreleri üzerindeki etkisini de incelemiştir. Masawi [66], 3 farklı lokasyonda örnekleme yapmış, bu örneklerin nem içeriği, organik madde

miktarı, özgül ağırlık ve likit limit değerlerini belirlemiştir. Bunların yanı sıra, odometre deneyleri yaparak örneklerin konsolidasyon özelliklerini de tayin etmiştir. Araştırmacı, organik madde miktarının artmasıyla nem içeriği, likit limit ve hacimsel sıkışabilirlik katsayısının (m_v) arttığını ve konsolidasyon katsayısında önemli bir değişim olmadığını belirtmiştir. Buna karşın, organik madde miktarının artmasıyla sıkışma indisi (C_c) ve ikincil sıkışma sabiti (C_α) değerlerinde bir azalma gözlemlemiştir. Masawi [66], turba zeminlerde fiziksel özelliklerin ve konsolidasyon parametrelerinin organik madde içeriğine karşı duyarlı olduğunu belirtmiş ve daha sağlıklı sonuçlar elde edilmesi için mevcut deney yöntemlerinin gözden geçirilmesi gerektiğine değinmiştir.

Duraisamy vd. [67], Malezya'da üç farklı yerden aldıkları fibrik, hemik ve saprik olmak üzere farklı türdeki tropikal turba zeminlerin mühendislik özellikleri ile su içeriği, organik madde içeriği ve likit limit gibi özellikleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymayı amaçlamışlardır. Araştırmacılar, turba örneklerinin organik madde içeriği arttıkça likit limitlerinin arttığını, doğal su içeriği arttıkça kuru birim hacim ağırlıklarının azaldığını, organik madde içeriği arttıkça özgül ağırlığın azaldığını ve konsolidasyon basıncı arttıkça sıkışma indisinin arttığını belirtmişlerdir. Konsolidasyon parametreleri Rowe hücresi ve klasik odometre kullanılarak iki farklı şekilde belirlenmiştir. Rowe hücresi ile gerçekleştirilen deneyde boşluk suyu basıncı da ölçülmüştür. Araştırmacılar, Rowe hücresi kullanılarak tayin edilen konsolidasyon parametrelerinin klasik odometre deneyinden elde edilen parametrelerden daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Fibrik, hemik ve saprik tropikal turbaların ikincil sıkışma indisinin (C_α) 0.08-0.09 arasında ve sıkışma oranının ($C_C/1+e_o$) ise 0.2-0.4 arasında değişim gösterdiği Duraisamy vd. [67] tarafından ortaya konulmuştur. Çalışmada incelenen turbalar; ikincil sıkışma indisine göre aşırı derecede ikincil sıkışabilir, sıkışma oranına göre ise çok sıkışabilir olarak sınıflandırılmışlardır. Araştırmacılar oturma miktarının tropikal fibrik turbada en büyük, sonra sırasıyla hemik ve saprik tür turbada olacağını belirtmişlerdir.

Petrone vd. [68], Utikuma Gölü (Alberta, Kanada) çevresinde bulunan turbalık alanlarda mevsimsel olarak meydana gelen oturma miktarlarını ölçmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla, araştırmacılar Price [69] tarafından önerilen yöntemi kullanarak arazide oturma deneyleri yapmışlar ve en büyük oturmayı 2.3 cm olarak ölçmüşlerdir. Petrone vd. [68], daha önce farklı turbalarda yapılan çalışmalarda ölçülen oturmaların 10 cm ([70]) ve 8cm ([69]) olduğunu belirterek, kendi çalışmalarında bu değerin daha düşük bulunduğu ifade etmişlerdir. Araştırmacılar bunun nedenini, inceleme alanında üst seviyelerde bulunan turbaların fibrik özellikte ve yüksek gözenekliliğe sahip oldukları için sıkışmaya karşı daha fazla direnç göstermeleri olarak açıklamışlardır. Ayrıca araştırmacılar turba zeminlerde deformasyonların meydana gelmesinde konsolidasyon, büzülme ve oksidasyondan dolayı ayrışma (decomposition) süreçlerinin etkili olduğunu belirtmişlerdir.

3.3. Turba Zeminlerin Makaslama Dayanımına İlişkin Çalışmalar

Örneklemede karşılaşılan sorunlar nedeniyle turba zeminlerin makaslama dayanımlarının laboratuvarda doğru bir şekilde tayin edilmesi güçtür. Makaslama dayanımı; turbaların nem içeriğine, hümifikasyon derecesine ve mineralojik yapısına bağlıdır. Turbaların makaslama dayanımı; mineral içeriği arttıkça artmakta iken, su içeriği ve hümifikasyon derecesi arttıkça azalım göstermektedir [2]. Turba oluşumlarında derinliğe bağlı olarak lifli yapıdan amorfa doğru bir karakter değişimi olması nedeniyle makaslama dayanımı derinlikle azalmaktadır. MacCulloch [71], sığ derinliklerde bulunan lifli turbaların daha derindeki amorf turbalara göre daha yüksek dayanım gösterdiğini belirtmiştir. Ulusay vd. [10] bu durumun nedenini turbanın içerdiği liflerin makaslama hareketine direnç göstermesi olarak açıklamışlardır.

Japonya'nın Niigata Bölgesi'ndeki turba zemin üzerine inşa edilen bir otoyol dolgusunun kalite kontrolü ve tasarımı Hanzawa vd. [72] tarafından değerlendirilmiştir. Bu amaçla, turbada doğrudan makaslama ve konik penetrasyon deneyleri yapan araştırmacılar, deney sonuçlarını makaslama dayanımının derinliğe bağlı değişimi halinde sunmuşlardır. Bu sonuçlara göre, turba zeminlerin drenajsız

makaslama dayanımlarının 10-40 kPa arasında değiştiği saptanmıştır. Hanzawa vd. [72], tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden belirlenen drenajsız makaslama dayanımının çok tutucu, arazi kanatlı kesici deneyinden elde edilen sonuçların ise güvensiz olduğuna değinerek, bu deneylerin turbaların makaslama dayanımlarının belirlenmesi için uygun yöntemler olmadıklarını belirtmişlerdir.

Cola ve Cortellazzo [73], İtalya'nın Adria ve Correzzola adlı iki farklı yöresinden aldıkları biri normal diğeri aşırı konsolide turba örneklerinde lif içeriğinin ve aşırı konsolidasyonun turbanın makaslama dayanımına etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, turba örneklerinin bazı fiziksel ve indeks özelliklerini belirlemişler, örselenmiş ve örselenmemiş turba örnekleri üzerinde drenajsız üç eksenli deneyler ve turbaların bir boyutlu sıkışma davranışının incelenmesi amacıyla konsolidasyon deneyleri yapmışlardır. Cola ve Cortellazzo [73], turbaların içerdiği liflerin çekme dayanımına karşı bir güçlendirme etkisi yaratacağını belirtmişlerdir. Bu gerekçeyle araştırmacılar, turbaların makaslama dayanımını değerlendirirken Hausmann [74] ve Hausman ve Lee [75] tarafından önerilen çift doğrusal (bilinear) yenilme ölçütünü kullanmışlardır. Cola ve Cortellazzo [73], örselenmiş turba örneklerinden tayin edilen makaslama dayanımının örneklerin matriksinin dayanımı olduğunu ve yoğrulma sırasında tahrip olan liflerin dayanıma katkısının ihmal edildiğini öne sürmüşlerdir. Bu nedenle, yoğrulmuş örneklerin üç eksenli deneylerden belirlenen makaslama dayanımı parametreleri ile halka tipi makaslama kutusu deneyinden elde edilecek parametrelerinin benzer olduğu bu araştırmacılar tarafından belirtilmektedir. Aşırı konsolide olan Adria turbalarında izlenen ani dayanım azalması, makaslama dayanımının aşırı konsolidasyona karşı duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Araştırmacılar, liflerinin yoğrulmasının turba örneklerinin genel gerilme-birim deformasyon ilişkisini değiştirmediğini saptamışlardır. Cola ve Cortellazzo [73], turba zeminlerde üç eksenli deney sonuçlarının değerlendirilmesi için uygun bir yenilme ölçütünün mevcut olmaması sorununa değinerek, dayanımın deney türüne ve uygulanan gerilme yoluna (stres path) bağlı olarak değiştiğini vurgulamışlardır.

Long [76], turba zeminlerin dayanımı, karakterizasyonu ve bu zeminlerde gerçekleşebilecek şev duraysızlıklarının modellenmesi konuları üzerine yapılmış önceki çalışmaları derleyerek, bu çalışmalarda kullanılan yöntemleri değerlendirmiştir. Araştırmacı, turba zeminlerdeki liflerin genellikle yatay yönde konumlanmış olmaları nedeniyle, doğrudan ve halka tipi makaslama deneylerinde bağlayıcı malzemenin dayanımı belirlenirken, üç eksenli deneylerde ise liflerin direncinden dolayı lif ve bağlayıcı malzemenin dayanımının ölçüldüğünü, dolayısıyla daha yüksek dayanım değerleri bulunduğunu belirtmiştir. Long [76] yaptığı değerlendirmeler sonucunda; şev duraylılığı analizlerinde doğrudan makaslama deney sonuçlarının, taşıma gücü hesaplarında ise üç eksenli deney sonuçlarının dikkate alınması gerektiğini ifade etmiştir. Long [76], turba zeminlerin makaslama dayanımının tayin edilmesi için yapılan drenajlı üç eksenli deneylerde gerilme farkı arttıkça hacimsel birim deformasyonun da artmaya devam etmesi nedeniyle, yenilme yükünün ölçülemediğine dikkat çekmiş ve literatürde yer alan çalışmalarda, deney sırasında %20-50 eksenel birim deformasyona karşılık gelen gerilme değerlerinin yenilme anındaki dayanım olarak kabul edildiğini saptamıştır. Araştırmacı, turba zeminlerin anizotropik yapısından dolayı, liflerin konumuna bağlı olarak makaslama dayanımının farklılık gösterdiğini ve hümifikasyon derecesi arttıkça içsel sürtünme açısının azaldığını belirtmiştir. Long [76], turbaların sayısal modellemesi için bu zeminlerin hangi yenilme ölçütüne uygun olarak davrandığı konusunda araştırmacılar arasında bir görüş birliği bulunmadığına dikkat çekmiştir. Örneğin, sayısal analizlerde turba zeminler için Brinkgreve vd. [77] doğrusal Mohr-Coulomb yenilme ölçütünü kullanırken, Topolnicki ve Niemunis [78] elastoplastik davranış modelini, Sellmeijer [79] ise anizotropik ve elastoplastik modellerin kombinasyonundan oluşan davranış modelini esas almaktadır. Bu saptama, konunun araştırmaya açık olduğunu göstermektedir.

Singh vd. [80], Malezya'nın Sarawak bölgesinde 16.500 km^2'lik bir alanda yayılım gösteren turba zeminleri toprak bilimi ve jeoteknik mühendisliği açısından değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar, bölgedeki turbaları organik madde içeriği ve hümifikasyon derecesine göre sınıflamışlar, ayrıca turbaların su içeriği, kül içeriği,

birim hacim ağırlığı, tane boyu dağılımı, pH değeri ve hümifikasyon derecesi olmak üzere bazı fiziksel ve jeomekanik özelliklerini incelemişlerdir. Singh vd. [80], Sarawak turbasının su içeriği arttıkça aşırı derecede düşük makaslama dayanımına ve ihmal edilebilir düzeyde tek eksenli sıkışma dayanımına sahip olduğunu belirlemişlerdir. Derinlere inildikçe kendi yükü altında sıkışan turbanın birim hacim ağırlığının arttığı aynı araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir.

Boylan ve Long [81], turba zeminlerin karakterizasyonunda kullanılabilecek birer araç olan T-çubuk tipi ve küresel penetrometrelerin performansını arazide kanatlı kesici ve üç eksenli sıkışma deneylerinden de yararlanarak değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar, CPT deneyleri sırasında turba zeminlerin içerdiği lifler ile penetrometrenin etkileşiminin dayanım parametrelerinin doğru tahmin edilmesini güçleştirdiğini belirtmişlerdir. Boylan ve Long [81], özellikle T-çubuk penetrasyon deneyinin turba zeminlerin makaslama dayanımı parametrelerinin tayininde çok hassas sonuçlar verdiğini saptamışlardır. Ayrıca bu araştırmacılar, turbaların hümifikasyon derecesinin belirlenmesinde küresel penetrasyon deneyinin oldukça kullanışlı olduğunu da vurgulamışlardır.

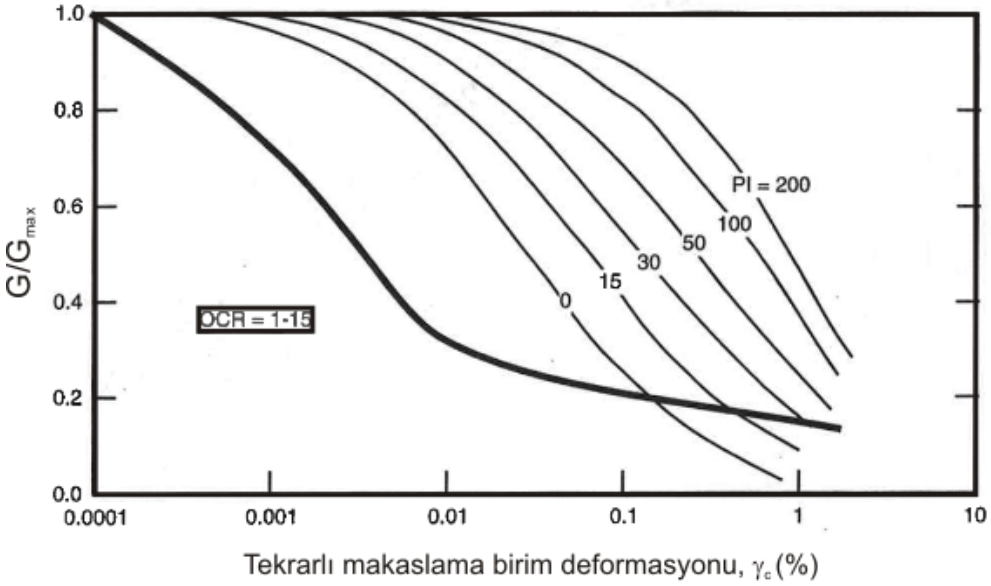
3.4. Turba Zeminlerin Dinamik Özelliklerine İlişkin Önceki Çalışmalar

Üzerinde önemli köprülerin bulunduğu, bir kaç km^2'lik bir alanda yayılım gösteren ve yaklaşık 20 m kalınlığındaki Mercer Slough (Washington, ABD) turbalarının dinamik özelliklerini ve sismik yer tepkisini inceleyen Kramer [7], turba örnekleri üzerinde 21 adet rezonans kolonu deneyi gerçekleştirmiştir. Araştırmacı, bu deneylerden bir kısmında rezonans kolonu cihazına çok hassas minyatür bir burulma (tork) hücresi yerleştirmiş olup, birim deformasyon-gerilme eğrilerinin belirlendiği burulma-dönme davranışını ölçmüştür. Rezonans kolonu deney sonuçlarına göre araştırmacı turbaları; çok yumuşak, kohezyonsuz ve sıkılığı efektif çevre basıncıyla artan zeminler olarak tanımlamıştır. Araştırmacı, Mercer Slough turbalarının modül azalım davranışının efektif çevre basıncından etkilendiğini, yüksek etkin çevre basınçlarında daha doğrusal bir davranış ve düşük sönümlenme gösterdiğini saptamıştır. Kramer

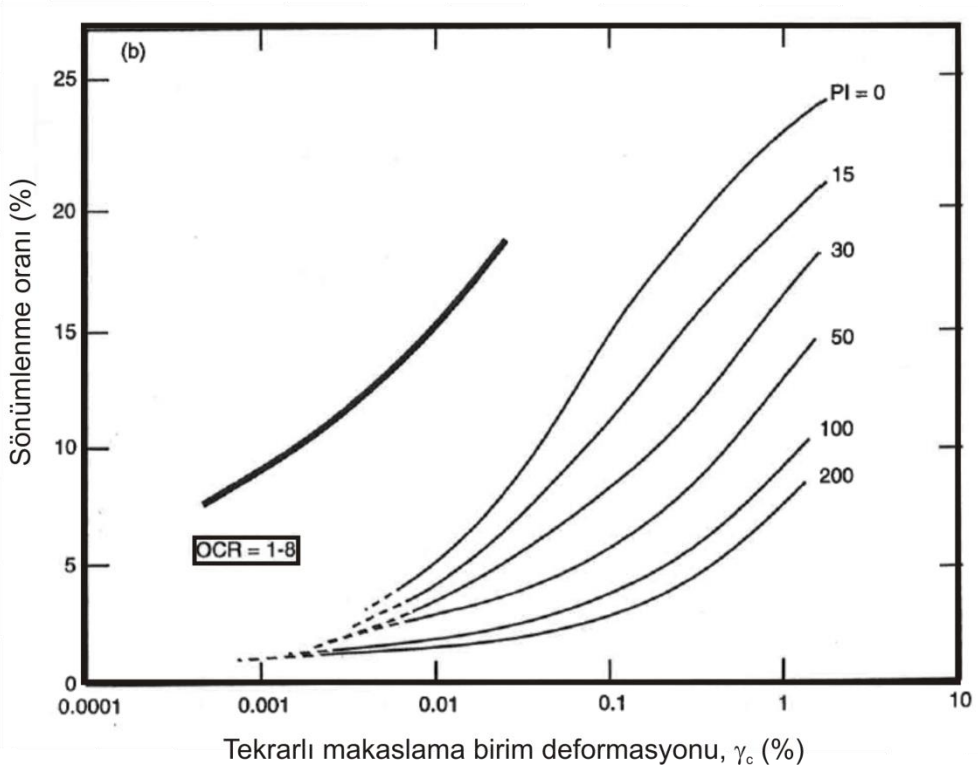
[7], Mercer Slough turbalarının modül azalım eğrilerinin, önceki çalışmalarda ([82]; [83]; [84]) farklı turbalar için belirlenen eğriler ile karşılaştırdığında, yüksek birim deformasyon değerlerinde birbirleriyle büyük ölçüde benzerlik gösterdiklerini de ifade etmiştir. Düşük birim deformasyon değerlerinde ise, bu turbalarının modül azalım eğrisi Vucetic ve Dobry [85] tarafından plastisite indeksi (PI) 0 olan zeminler için önerdikleri eğri ile benzerlik göstermektedir (Şekil 3.8). Araştırmacı, bu çalışmada belirlediği modül azalım ilişkisini kullanarak, iki farklı deprem dalgası ile Mercer Slough turbalarının sismik yer tepkisini değerlendirmiştir. Kramer [7], turbaların sismik yer tepkilerinin belirlenmesi için yaptığı analizler sonucunda Mercer Slough turbalarının deprem dalgalarını büyütebileceğini ortaya koymuştur.

Boulanger vd. [86], Sherman Adası (Kaliforniya, ABD)'ndaki turbaların dinamik özelliklerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, adanın güney kesimindeki su setinin altında bulunan turba zeminlerde sondaj çalışmaları yapmışlar ve düşey gerilmenin 132 kPa olduğu yaklaşık 13 m derinlikten Shelby tüpleri ile turba örnekleri almışlardır. Bunların yanı sıra bu çalışmada, CPT deneyleri ve yerinde makaslama dalgası hızı ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. Boulanger vd. [86], turbaların dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla tekrarlı dinamik üç-eksenli ve bender element deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar, deney serisinin bender element deneyi ile başlayıp daha sonra tekrarlı üç-eksenli deney ile devam ettiğini ifade etmişlerdir. Bender element deneylerinden Sherman Adası turbalarının makaslama dalgası hızını 81-87 m/s olarak belirleyen araştırmacılar, bu değerlerin P-S loglama sistemi kullanarak kuyu içinde 83-90 m/s olarak ölçtükleri makaslama dalgası hızlarıyla uyumlu olduğunu saptamışlardır. Boulanger vd. [86], örnekleri farklı yükler altında konsolide ederek, gerilme koşullarındaki değişimin üç eksenli deney sonuçlarına etkisini de incelemişlerdir. Boulanger vd. [86], 66 ve 200 kPa yük altında konsolide edilen örnekler için hesaplanan en büyük makaslama modülü (G_{max}) değerlerinin yerinde (arazide) düşey gerilme değeri olan 132 kPa için hesaplananlarla çok benzer olduğunu ifade etmişlerdir. Monotonik deneyler sırasında Sherman Adası turbalarında yükleme hızının gözenek suyu basıncına etkisinin killerdekine göre daha

(a)



(b)



Şekil 3.8. Union Bay turbalarının (a) modül azalım ilişkisi ve (b) sönümlenme oranının farklı plastisiteye sahip zeminler için Vucetic ve Dobry (85) tarafından önerilen ilişkiler ile karşılaştırılması [7].

fazla olduğunu belirleyen araştırmacılar; belirledikleri makaslama modülü azalım (G/Gmax)-sönümlenme oranı ilişkisini Vucetic ve Dobry [85] tarafından önerilen eğrilerle karşılaştırarak, bu ilişkinin PI'si 100-200 arasında olan yüksek plastik killeri temsil eden eğri ile uyumlu olduğunu saptamışlardır. Ayrıca, modül azalım-sönümlenme oranı ilişkisinin yapısal anizotropi, yükleme şekli ve örnek boyutundan nasıl etkilendiğinin araştırılmasının gerekliliğine de dikkat çekmişlerdir.

Arulnathan vd. [87], santrifüj deneyleri yaparak ve sayısal modelleme tekniklerini kullanarak organik zeminlerin yer tepkisi karakteristiklerini araştırmışlardır. Bu araştırmacılar; tabaka kalınlığı, deprem frekans içeriği ve sarsma seviyesi gibi fiziksel özellikleri zeminlerin yer tepkisine etkilerinin incelenebilir olması nedeniyle santrifüj yönteminin organik zeminlerin yer tepkisinin belirlenmesi için çok pratik bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Arulnathan vd. [87] zemin modellerini üst ve altta sırasıyla; 3.8 ve 2 cm kalınlığında sıkı kum tabakası, ortada ise 11.5 cm kalınlığında Sherman Adası'ndan alınmış turba seviyesi olacak şekilde hazırlamışlardır. Santrifüj uygulaması sırasında makaslama dalgası hızını ölçen araştırmacılar, düşük birim deformasyon modülünü (G_{max}) hesaplamışlardır. Arulnathan vd. [87], her modeli küçük sarsıntılardan büyüğe doğru ilerleyen deprem dalgalarına tabi tutmuşlar, makaslama dalgası hızı profilinin sarsıntılardan nasıl etkileneceğini incelemek amacıyla her sarsıntıdan önce ve sonra makaslama dalgası hızı ölçümleri almışlardır. Bunların yanı sıra araştırmacılar, yukarıda belirtilen zemin profili için SHAKE 91 [88] programını kullanarak sayısal modelleme yapmışlardır. Modelleme sırasında Boulanger vd. [86] tarafından belirlenen modül azalım-sönümlenme ilişkisini ve santrifüj modellerinden hesapladıkları G_{max} değerlerini girdi parametresi olarak kullanan Arulnathan vd. [87], iki yöntemle kaydettikleri ve hesapladıkları sismik yer tepkilerinin birbirleriyle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, organik zeminlerin büyütme/azalım karakteristiklerinin belirlenmesinin önemine de değinmişler ve bu tür bir çalışmanın uzun zaman gerektireceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca bu tür bir çalışmanın, kuvvetli yer hareketi kayıtlarının alınması ve zeminlerin dinamik özelliklerinin laboratuvarda tayin edilip bu özellikler kullanılarak tahmin edilen

ile kaydedilen yer hareketinin karşılaştırılması aşamalarından oluşması gerektiğini de vurgulamışlardır.

Moreno ve Rodriguez [89], sismik anlamda aktif bir bölge olan Bogota'daki turba zeminlerin statik koşullardaki özellikleri (indeks özellikler, drenajsız makaslama dayanımı, sıkışabilirlik) ile dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Moreno ve Rodriguez [89], turba zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla, kuyu içi jeofizik deneyleri ile rezonans kolonu ve dinamik üç eksenli laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar; makaslama modülünü (G) düşük birim deformasyonlu rezonans kolonu deneyinden belirlemiş, en büyük makaslama modülünü (G_{max}) ise Nakagawa'nın hiperbolik modelini kullanarak hesaplamışlar ve turba zeminler için oluşturdukları modül azalım eğrisini diğer araştırmacıların eğrileri ile karşılaştırmışlardır. Moreno and Rodriguez [89], turbaların fiziksel özelliklerinin, dinamik davranışı üzerine etkilerinin anlaşılması için bu parametrelerin sağlıklı bir şekilde belirlenmesinin önem taşıdığını vurgulamışlardır.

3.5. Kayseri Civarındaki Turbalara İlişkin Jeoteknik Çalışmalar

Sert ve Önalp [9], Kayseri Serbest Bölge'de eski bataklık kalıntısı olan kalın turba seviyesi üzerinde boru dilme makinesi taşıyacak rijit bir platformdaki (12 m x 20 m boyutlarında) oturma problemini değerlendirmişlerdir. Bu kapsamda araştırmacılar, sondaj ve örnekleme çalışmaları yapmışlardır. Araştırmacılar, turba derinliğini 9 m olarak ölçmüşler, bunun altında 4 m kadar turba ara seviyeli kil, 16 m'den sonra ise siltli zemin olduğunu gözlemlemişlerdir. Sert ve Önalp [9], sondajlardan alınan örneklerin fiziksel ve indeks özellikleri ile dayanım ve konsolidasyon parametrelerini tayin etmişlerdir (Çizelge 3.2). Turba ve turba ara seviyeli killerin deney sonuçlarının birbirine çok yakın olduklarını saptamışlardır. Araştırmacılar, temel inşaasının başlamadan önce 10 cm kalınlığındaki bitkisel toprağın kaldırılıp, yaklaşık 80 cm kalınlığında iri taneli dolgu malzemesinin yerleştirildiğini ve bunun üzerine de her birinin arasında jeotekstil serilmiş olan 30'ar cm kalınlığında iki tabaka dolgu yapılmış olduğunu belirtmişlerdir. Sert ve Önalp [9], turba zemin üzerindeki gerilmeyi büyük ölçüde arttırması nedeniyle bu uygulamanın hatalı olduğunu vurgulamışlar ve

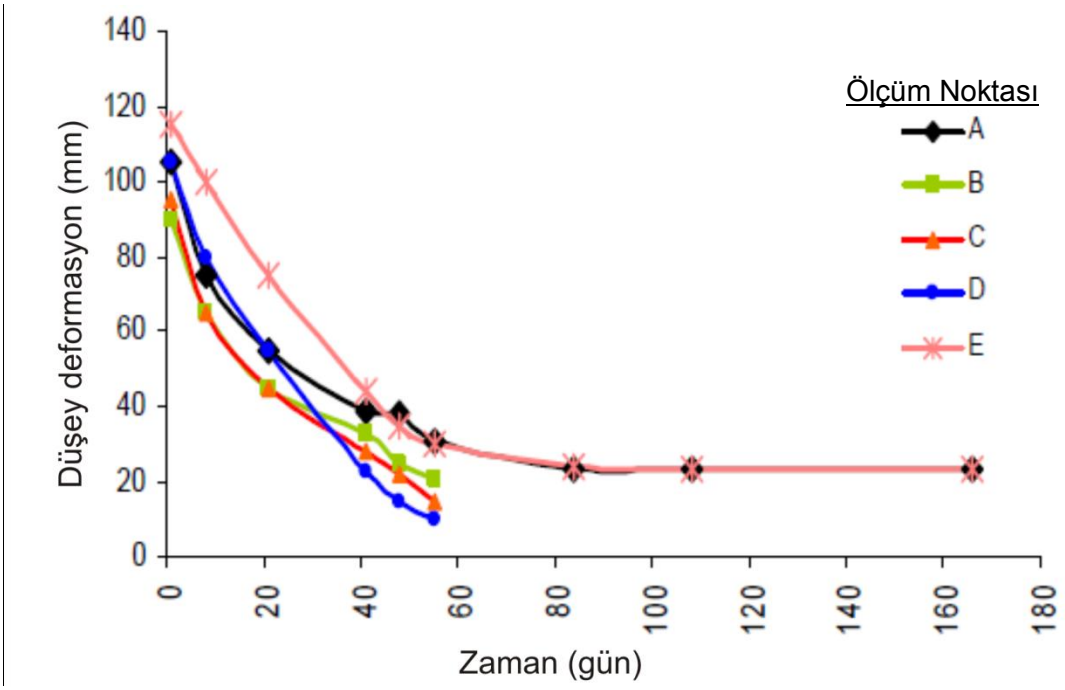
platform inşaatının bitiminden sonra platform üzerindeki 5 noktadan oturma ölçümleri almaya başlamışlar ve o zamana kadar da yaklaşık 500 mm'lik oturma olduğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar tarafından platfomda alınan zamana bağlı oturma ölçümleri Şekil 3.9.'da sunulmuştur. Bu ölçümlere göre, oturmaların 55. günde (platformun inşasından zemin iyileştirme uygulamasına kadar geçen süre) dahi yavaşlamadığını, aksine hızlanma eğilimine girdiğini ifade etmişlerdir. Oturmaların kontrolünün sağlanması amacıyla jet-grout yönteminin kullanılmasını öneren Sert ve Önalp [9], mevcut ve jet-grout yöntemi ile iyileştirilmiş durumlar için platform altında gözlenen oturmayı Plaxis 3D programını kullanarak modellemişlerdir. Analizler sonucunda; zemin iyileştirilmeden önce yüklemenin %75'inde 500 mm civarında oturma artışı hesaplanmakta iken, kolonlar uygulandıktan sonra bu değerlerin 100 mm civarında kaldığı belirtilmiştir. Sert ve Önalp [9], gelecek 10 yıl içinde platformun toplam 250 mm'lik bir oturmaya maruz kalacağını tahmin etmişlerdir.

Çizelge 3.2. KAYSER alanından Sert ve Önalp [9] tarafından alınmış turba örneklerinin bazı özellikleri.

Derinlik (m)	w_n (%)	γ_n (kN/m^3)	Sr (%)	e_0	c_u (kPa)	E_u (kPa)	C_c	t_{90}
4	213	10.12	97	6.94	21	820		
7	189	11.06	100	4.93	24	1520	1.580	
10	149	12.14	98	2.79	14	640		
13	115	13.45	100	1.73	20	890	0.275	9.4
16	27	14.65	100	0.43	134	11030	0.086	2.7

w_n: Su içeriği; γ_n: Doğal birim hacim ağırlık; Sr: Doygunluk derecesi; e_0: Boşluk oranı; C_c: Birincil sıkışma katsayısı; E_u:Elastisite modülü; t_{90}: % 90 oturmaya karşılık gelen süre.

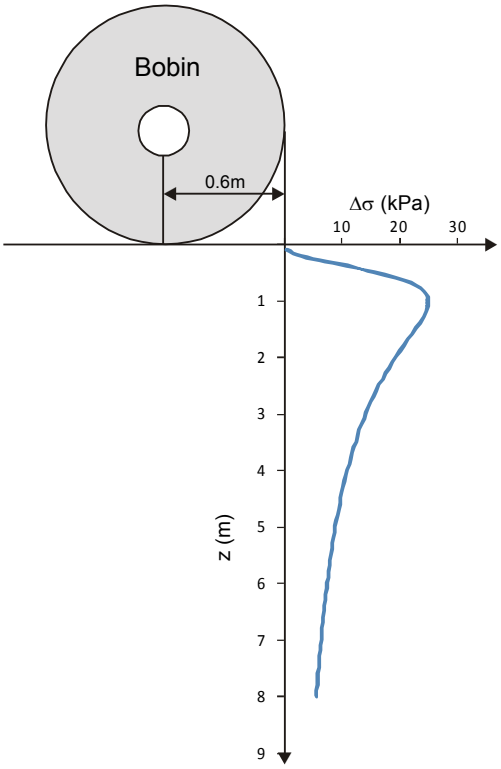
Kayseri 1. Organize Sanayi Bölgesi ile Serbest Bölge'deki turba zeminlerin fiziksel, mekanik ve konsolidasyon özellikleri Ulusay vd. [10], [11] tarafından araştırılmıştır. Çalışma kapsamında 2 adet araştırma çukuru açılmış ve 2 adet zemin sondajı yapılmıştır. Araştırmacılar, çukurların üst kesimlerinde lif-silt-kil içeren turbanın yanı sıra, yer yer daha çok lif ve yaprak kalıntıları içeren ve elde kolaylıkla sıkılarak bol miktarda su çıkışının gözlendiği turba ile karşılaşıldığını ifade etmişlerdir. Sondajlar sırasında 1 m aralıklarla SPT deneyleri yapan ve Shelby tüpleri ile örselenmemiş turba örnekleri alan araştırmacılar; turba zeminlerin SPT darbe sayısı değerlerinin 3-4



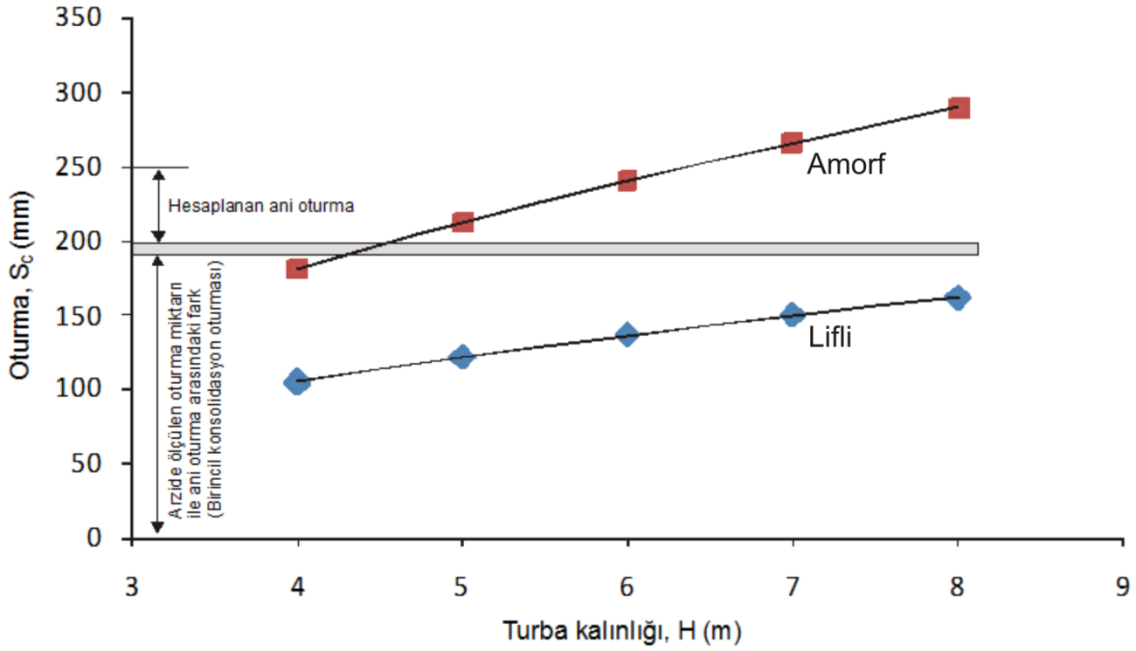
Şekil 3.9. KAYSER alanındaki turba seviyesi üzerinde boru dilme makinesi taşıyacak rijit bir platformda Sert ve Önalp [9] tarafından alınan oturma ölçümleri.

olduğunu ve yeraltısuyu seviyesinin yüzeyden 1.5-5.5 m arasında değişim gösterdiğini belirtmişlerdir. Ulusay vd. [10], [11], bu çalışmada, turba zeminlerin sıkışma karakteristiklerini, tek eksenli sıkışma dayanımını, makaslama dayanımını, organik madde içeriğini, mineralojik bileşimini, fiziksel ve indeks özelliklerini belirlemişlerdir. Araştırmacılar belirledikleri bu özellikleri diğer ülkelerdeki turba zeminlerin özellikleri ile karşılaştırmışlardır. Ulusay vd. [10], [11], sığ derinliklerde daha çok lifli, silt-kil içerikli altlarda amorf karaktere sahip turbalar izlemişler, derinlik arttıkça turbaların organik madde içeriğinin arttığını saptamışlar ve lifli turbaların tek eksenli sıkışma dayanımlarının amorf turbalara göre daha yüksek olduğunu ortaya koymuşlardır. Ulusay vd. [10], [11], arazide gözledikleri oturma miktarları ile laboratuvarda belirledikleri değerleri karşılaştırmak amacıyla geriye dönük oturma analizleri yaparak oturma miktarını hesaplamışlar ve bir tesiste turba zemin üzerine konulmuş bobinler altında gözlenen oturma miktarını ölçmüşlerdir. Araştırmacılar, çapı 1.2 m, uzunlukları 1.27 m ve ağırlıkları 9430 kg olan bu bobinlerin bir şerit halinde dizildiği kesimde oturma miktarını 25 cm olarak belirlemişler ve bobinlerin merkezinden 0.6 m uzaklıktaki hat boyunca gerilmenin derinliğe bağlı değişimini hesaplamışlardır (Şekil 3.10). Tesisin bulunduğu bölgede turba kalınlığının 4 ile 8 m

arasında değiştiğini dikkate alan Ulusay vd. [10], [11], farklı kalınlık değerleri ve farklı turba türleri (lifli, amorf) için geriye dönük analizler yapmışlardır. Bu analizler sonucunda hesapladıkları hesaplanan birincil konsolidasyon oturması eğrileri Şekil 3.11'de sunulmuştur. Araştırmacılar, ölçülen ve hesaplanan oturma miktarlarını karşılaştırdıklarında bunların büyük ölçüde uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Ulusay vd. [10], [11], turba zemin üzerine kurulu sanayi yapılarının inşasının hızla geliştiğini, bu zeminlerin jeo-mühendislik özellikleri ile statik ve dinamik yükleme koşulları altındaki davranışlarının ayrıntılı şekilde araştırılmasının gerekliliğini vurgulamışlardır.



Şekil 3.10. KAYSER alanında turba zemin üzerine konmuş bir bobinin merkezinden 0.6 m uzaklıktaki hat boyunca Ulusay vd. [10], [11] tarafından belirlenen gerilmenin derinliğe bağlı değişimi.



Şekil 3.11. Ulusay vd. [10] tarafından KAYSER alanında bir bobinin merkezinden 0.6 m uzaklıktaki hat boyunca turba kalınlığına bağlı olarak hesaplanan birincil konsolidasyon oturması eğrileri [10].

3.6. Önceki Çalışmalara İlişkin Genel Değerlendirme

Özellikle turbaların yaygın olarak bulunduğu ülkelerde, bu zeminlerin jeo-mühendislik özellikleri, mekanik davranışları ve bunlarla ilgili mühendislik sorunlarının giderilmesine ve zemin iyileştirmesine yönelik amaçlarla birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların bir çoğunda turba zeminler sınıflandırılmış, bazı fiziksel özellikleri belirlenmiş, dayanım ve sıkışabilirlik davranışları incelenmiş olup, bu özelliklerin birbirleriyle ilişkileri de araştırılmıştır. Bu çalışmalarda, araştırmacıların sıklıkla değindiği dikkat edilmesi gereken hususlar ve eksik görülen noktalar aşağıda genel hatlarıyla değerlendirilmiştir.

Coley [47], Hobbs [48], Landva vd. [35], Fox vd. [49] ve Ajlouni [6] turba zeminlerin ileri derecede geçirgen, çok hassas ve lifli yapıya sahip olmaları nedeniyle, bu zeminlerden örselenmemiş örnek alımını sırasında yaşanabilecek güçlüklerin bulunduğunu belirtmişler ve örnekleme sırasında dikkatli olunması gerektiğini vurgulamışlardır.

Cola ve Cortellazzo [73], Long [76], Anggraini [90], MacCulloch [71], Selvam [22] ve Boylan vd. [91] turba zeminlerin makaslama dayanımlarını değerlendirmişlerdir. Turbaların makaslama dayanımı parametrelerinin lif içerikleri nedeniyle deney yöntemlerine göre değişiklik gösterdiği belirtilmiş ve sayısal analizlerde özellikle lifli turbalar için hangi yenilme ölçütünün kullanılacağı tartışma konusu olmuştur. Ayrıca araştırmacılar, turba zeminler için farklı bir yenilme ölçütünün geliştirilmesinin gerekliliğine de değinmişlerdir.

Turba zeminlerde sıkışma davranışını inceleyen Samson ve La Rochelle [92], Forrest ve MacFarlane [61], Fox ve Edil [62], Mesri vd. [54], Mesri ve Castro [64], Ajlouni [6], Masawi [66] ve Gofar [55], ilksel konsolidasyonun kısa sürede tamamlandığını belirterek, turbaların oturma davranışlarının ortaya konması açısından ikincil sıkışma davranışlarının daha ayrıntılı olarak ele alınması gerektiğine dikkat çekmişlerdir. Ajlouni [6], sıcaklık ve ayrışma derecesinin konsolidasyon parametreleri üzerindeki etkilerinin araştırılmasını ve farklı boyuttaki hücreler kullanılarak yapılacak konsolidasyon deneylerinin sonuçlarının değerlendirilmesi gerektiğini ifade etmiştir.

Diğer özelliklerine göre çok daha az araştırılan turba zeminlerin dinamik özellikleri başlıca; Seed ve Idriss [82], Kramer [83], Stokoe vd. [84], Kramer [7], Boulanger vd. [86] ile Moreno ve Rodriguez [89] tarafından incelenmiş olup, bu çalışmalar belirli bölgelerde bulunan turba zeminlerin dinamik özelliklerinin (makaslama modülü, makaslama dalgası hızı, sönümlenme oranı vb.) ve sismik yer tepkilerinin belirlenmesini konu edinmektedir. Araştırmacılar, turba zeminlerin büyütme/azalım karakteristiklerinin ortaya konulmasının ve fiziksel özelliklerinin dinamik davranış üzerindeki etkilerinin belirlenmesinin önemini vurgulamışlardır.

Bu görüş ve önerilere dayanılarak, hem bilimsel literatüre hem de Kayseri özeline katkı sağlanması amacıyla bu tez çalışması kapsamında inceleme alanındaki turba zeminlerin fiziksel, indeks ve başlıca jeomühendislik özellikleri (konsolidasyon-oturma ve makaslama dayanımı) ile dinamik davranışlarının belirlenmesi, turbalarda oturma miktarının tahminine yönelik bazı yaklaşım ve önerilerde bulunulması hedeflenmiştir.

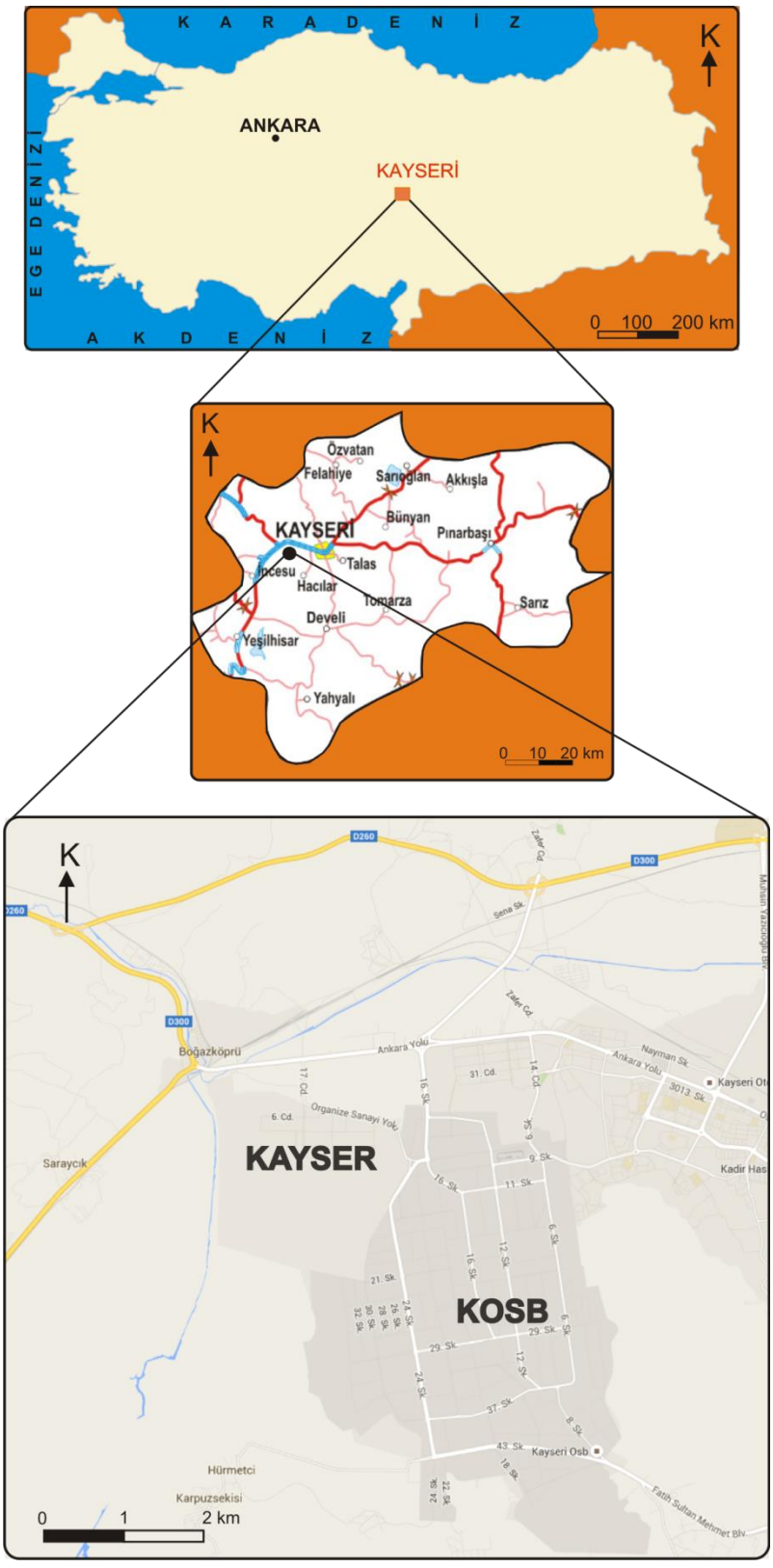
4. İNCELEME ALANININ TANITIMI

Bu bölümde; inceleme alanı olarak seçilen Kayseri Serbest Bölge (KAYSER)'nin konumu, morfolojisi ile bu sahayı da içine alan Kayseri kenti ve yakın çevresinin iklimi ve bitki örtüsü, jeolojik özellikleri ve depremselliği ana hatlarıyla sunulmuştur.

4.1. İnceleme Alanının Konumu ve Morfolojisi

İnceleme alanı; İç Anadolu Bölgesinin Orta Kızılırmak Bölümü'nde bulunan Kayseri iline bağlı Melikgazi ilçesinin Ambar Mahallesi'nin idari sınırları ve Kayseri K34-c1 topoğrafik haritasının sınırları içinde yer almaktadır (Şekil 4.1). Kayseri'nin Ankara giriş yolu üzerinde 1.Organize Sanayi Bölgesi (KOSB) ile komşu konumda olan Serbest Bölge'nin kent merkezine olan uzaklığı yaklaşık 15 km'dir [93].

1976'da kurulan KOSB, ilk kuruluşunda 12.500.000 m^2'lik bir alanı kaplarken, giderek artan sanayileşme talepleriyle alanını genişleterek 24.000.000 m^2'lik bir alana ulaşmıştır. Bu alanda çok sayıda prefabrik türde inşa edilmiş sanayi tesisleri bulunmaktadır. Bu alanın hemen yanındaki KAYSER, 1998 yılında 6.905.000m²'lik düz bir arazi üzerinde kurulmuştur (Şekil 4.2). Türkiye'nin en geniş Serbest Bölge (6.905.000m²) alanına sahip olan bölge, Devlet Demir Yolları Yükleme Boşaltma rampasına 900 m ve uluslararası karayoluna 600 m uzaklıkta bulunmasından dolayı her türlü yatırım için uygun bir arazi üzerindedir [93]. İnceleme alanı düz bir topoğrafyaya sahip olup, KB'ya doğru hafif eğimlidir. Alanın deniz seviyesinden yüksekliği yaklaşık 1040 m'dir. KAYSER ve yakın civarının uydu görüntüsü Şekil 4.3a'da görülmektedir. KAYSER sahasında da, KOSB'dakine benzer türde sanayi tesisleri bulunmakta olup, bu alanda turba yer yer doğrudan yüzeyde gözlenmektedir (Şekil 4.3b).



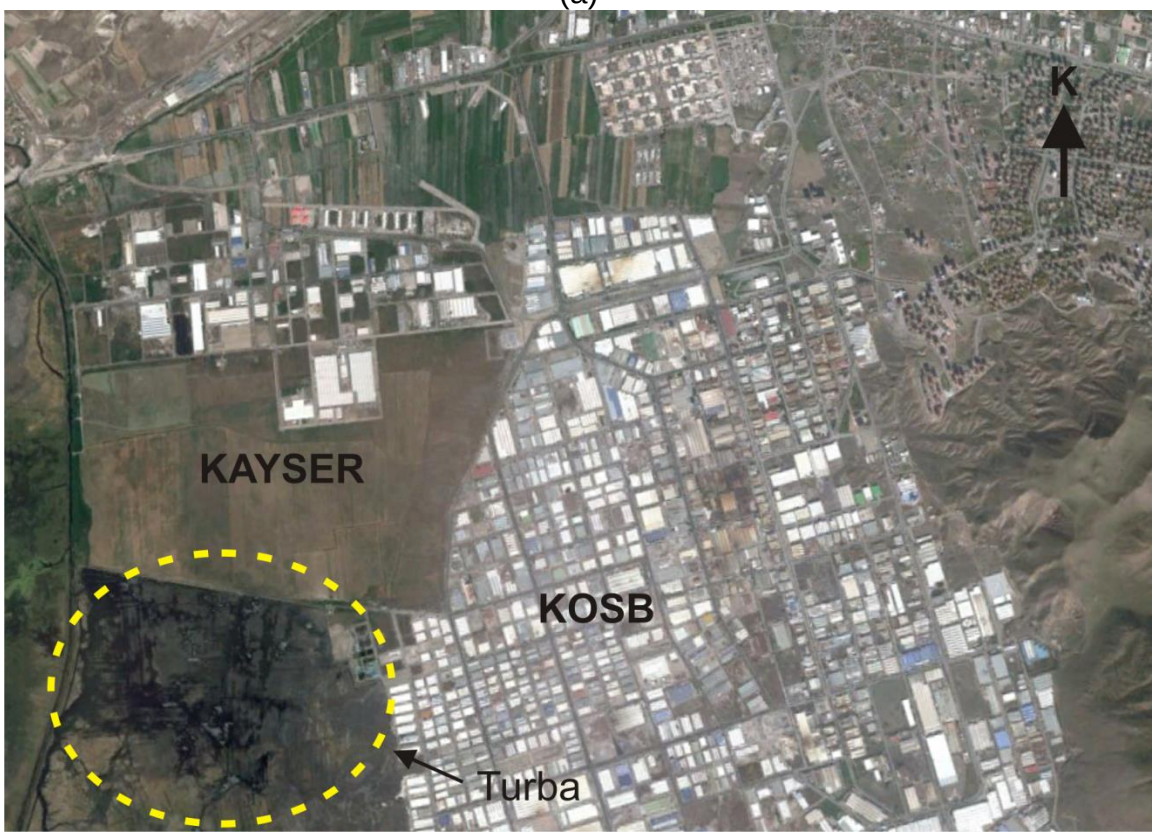
Şekil 4.1. İnceleme alanının yer bulduru haritası.

(a)

(b)

Şekil 4.2. (a) KAYSER ve KOSB çevresinin topoğrafik durumu, (b) KAYSER alanından bir görünüm [93].

(a)



(b)

Şekil 4.3. (a) KAYSER ve KOSB sahalarının uydu görüntüsü [94], (b) KAYSER'de turba zeminin yüzeyde görüldüğü bir kesim.

4.2. İklim ve Bitki Örtüsü

Kayseri ilinde kışları soğuk ve kar yağışlı, yazları ise sıcak ve kurak karasal nitelikli Orta Anadolu iklimi egemendir. Ancak ilin iklimi, yükseltiye göre yer yer farklılıklar gösterir. Buna bağlı olarak ilde iklim, çukurda kalan bölgelerde daha yumuşakken, yaylalardan dağlık kesimlere doğru gidildikçe sertleşir [95].

En sıcak dönem Temmuz ve Ağustos aylarında olup, sıcaklık 38 ºC'ye kadar yükselir. Bu ayların ortalama sıcaklığı ise yaklaşık 23 ºC'dir. En soğuk dönem ise Aralık, Ocak ve Şubat aylarında olup, sıcaklık -36 ºC'ye kadar düşmektedir. Kış ortalaması ise, –2 ºC ile 6 ºC arasındadır. Son altmış yıllık meteorolojik gözlemlere göre merkezde ortalama sıcaklık 10.4 ºC'dir [95].

Kayseri'de bozkır bitki örtüsü egemendir. İlin yüksek kesimlerinde yer yer yoğun orman örtüsüne rastlanılsa da, topraklar genellikle bozuk orman ve çalılıklar ile kaplıdır. Dağlar arasındaki çöküntü havzalarında ve ovalarında önceleri bozkır örtüsünün egemen olmasına karşın, bu kesimler daha sonra geniş ölçüde tarım alanı durumuna getirilmiştir [95].

4.3. İnceleme Alanının Jeolojik Özellikleri

Bu çalışmanın amacı Kayseri il merkezi girişindeki turba zeminlerin jeoteknik açıdan araştırılması olduğu için, inceleme alanını da içine alan bölgenin jeolojisi konusunda ayrıntıya girilmemesine özen gösterilmiş ve sahada daha önce yapılmış çalışmalardan yararlanılarak jeolojik özellikler yalınlaştırılmış olarak aşağıda verilmiştir.

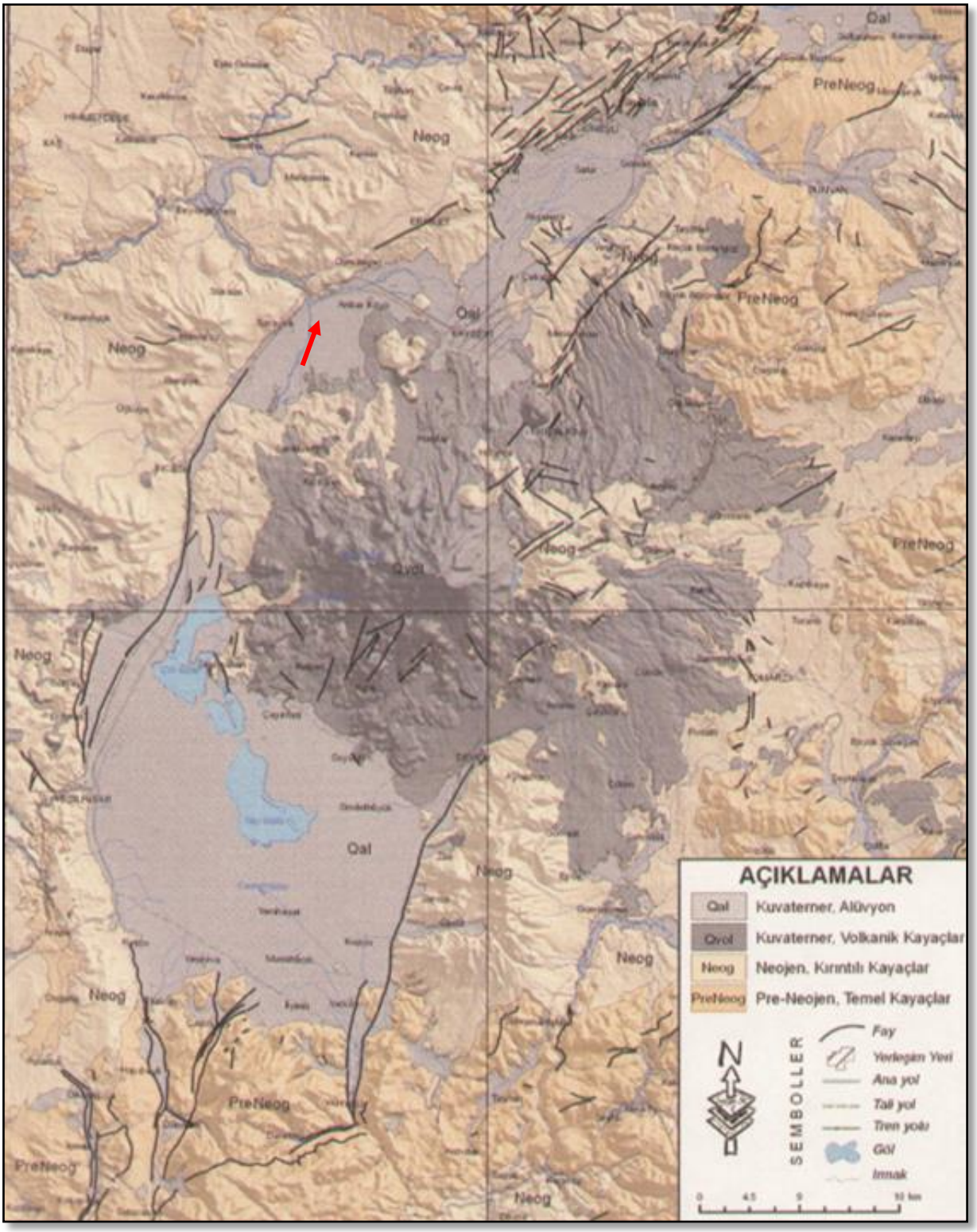
İnceleme alanının çevresinde, Paleozoyik yaşlı Kırşehir masifine ait metamorfik kayaçlar, yerleşim yaşı Üst Kretase olan ofiyolitik melanja ait kayaçlar ve bunları kesen Senoniyen yaşlı plütonik kayaçlar, Eosen yaşlı çökel kayaçlar, Orta Miyosen yaşlı volkanik kayaçlar, Üst Miyosen yaşlı karasal çökeller ve bunlara eşlik eden

Kuvaterner yaşlı volkanik kayaçlar yüzeylenmiştir [96]. Doğan vd. [97], bölgedeki jeolojik birimleri “Neojen öncesi kaya birimleri” ve “Neojen ve Kuvaterner birimleri” olmak üzere iki grupta değerlendirmektedir. Bu birimlerin konumları, zemin türü ayrıntısına girilmeksizin Şekil 4.4’te verilen Kayseri ve yakın çevresinin yalınlaştırılmış jeoloji haritasında gösterilmiştir.

Kayseri ve civarındaki paleotektonik döneme ait birimler Toros Kuşağı kayaları, Orta Anadolu kristalen karmaşığı, Sivas havzası kaya birimleri ve denizel-karasal geçiş örtü kayaları olarak Doğan vd. [97] tarafından ayırtlanmış ve “Neojen öncesi kaya birimleri” adı altında toplanmıştır. Neojen öncesi kaya birimleri Kayseri ilinin doğu, güneydoğu ve güneyinde geniş yayılım göstermektedirler.

Kayseri havzasının doğudan güneye kadar olan kesiminde yüzeylenmiş Toros kuşağı kayaları Tufanbeyli otokton istifini, dolomitli, kırıntılı, çörtlü ve kristalize kireçtaşları ile mermerden oluşan Toros ofiyolitlerini ve gabro, diyabaz, kumtaşı, kiltaşından oluşan Yeşiltaşyayla karışığını içerisinde bulundurmaktadır. Göncüoğlu vd. [98], tarafından Orta Anadolu kristalen karmaşığı olarak adlandırılan birim, Toros kuşağı kayaları ile yer yer tektonik dokanaklı olarak havzanın güneyinde yer almaktadır. Orta Anadolu Metamorfitleri, Orta Anadolu Ofiyolitleri, Orta Anadolu Granotoyitleri ve Karahıdır Volkaniklerini içeren karmaşık Anadolu’da geniş yayılım göstermektedir. Sivas havzasına ait kaya toplulukları Üst Kretase-Orta Eosen yaş aralığında metamorfik, kırıntılı ve karbonatlı kayaçları içermektedir. Denizel-karasal geçiş örtü kayaları havzanın kuzeyinde bulunmaktadır. Bu birimin içerdiği kırıntılı ve karbonatlı kayaçlardan Paleosen yaşlı olanlar karasal, Eosen yaşlı olanlar denizel, Alt Oligosen yaşlı kayaçlar ise denizel-karasal geçiş kayaları niteliğindedir [97].

Kayseri ve civarındaki Miyo-Pliyosen yaşlı akarsu-göl çökellerinden oluşan kırıntılı kayaçlar, Alt Miyosen volkanizması sonucu oluşan volkanik kayaçlar ve Kuvaterner yaşlı akarsu-akarsu kenar çökelleri “Neojen ve Kuvaterner birimleri” grubunda yer almaktadır. Neojen yaşlı kırıntılı ve karbonatlı kayaçlar Kayseri’nin kuzey ve

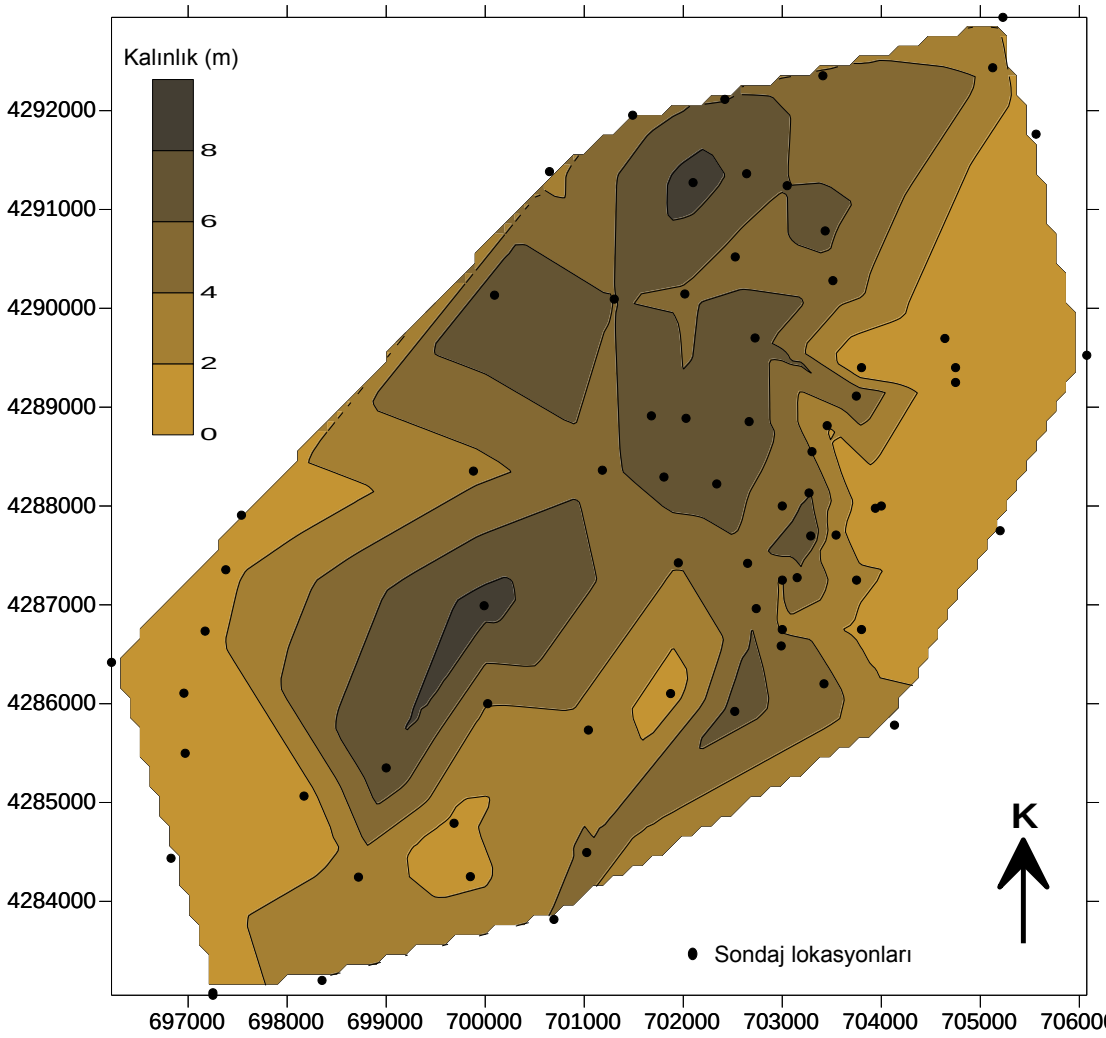


Şekil 4.4. Kayseri ve yakın civarının yalınlaştırılmış jeoloji haritası (MTA'nın 1:100 000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi'nden, Doğan vd. [97] tarafından hazırlanmıştır).

kuzeybatısında gözlenmektedir. Erciyes Dağı ve çevresinde yüzeylenen Develi ve Erciyes volkanizmasının ürünleri ile karbonatlı-kırıntılı kayaçların ardalanmasından oluşan volkano-sedimanter istif, bölgesel tektonizmanın etkisinde gelişen KD-GB uzanımlı normal faylar tarafından kesilmiştir. Bu süreçle çek-ayır niteliğinde açılmaya başlayan Kayseri havzası Pliyo-Kuvaterner yaşlı alüvyal çökellerle dolmuştur. Erciyes Dağı volkanizması havzayı doldurarak ikiye bölmüştür. Yapılan sondajlarda havzanın 100 m'den derin olduğu ve akarsu-göl çökellerinin volkanik malzeme ile ardalanmalı olduğu belirlenmiştir [97]. Kayseri ve civarındaki alüvyal çökeller KD-GB uzanımlı bir koridor halinde Erciyes Dağı'nın güneyindeki bir havzayı doldurmuşlardır (Şekil 4.4). Turba oluşumları Ambar Köyü'nün batısında ve Şekil 4.4'te okla gösterilen kesimde bulunmaktadır. Ancak bu birim; jeoloji haritalarında ayrı bir birim olarak gösterilmemiş olup, alüvyona dahil edilmiştir.

4.5. İnceleme Alanındaki Turba Zeminlerin Kalınlığı ve Rezervi

Kayseri ve çevresindeki turba arama çalışmaları ilk kez 1969 yılında Türk-Alman işbirliği çerçevesinde Otto-Gold firması ve MTA Genel Müdürlüğü tarafından yapılmıştır [8]. Ambar Köyü'nün GB'sındaki turba sahasında 44'ü 8-10 m derinlikte ve 12'si daha derin olmak üzere, toplam derinliği 2125 m olan 56 adet sondaj yapılmıştır. O dönemde sahanın hemen hemen tamamının sazlık ve yer yer geçici su birikintileriyle kaplı olması nedeniyle sondajların genellikle sondaj makinesinin girebildiği yerlerde yapıldığı belirtilmektedir [8]. Buna göre, 0-10 m derinlikler arasında linyit ve gidya (turba) olarak adlandırılan bir seviye ve 20-220 m derinlikleri arasında ise ikinci bir linyit ve turba seviyesi bulunduğu belirlenmiştir. Ulusay vd. [10], mevcut sondaj verisinden yararlanarak bu saha için turba kalınlığı haritası hazırlamışlardır (Şekil 4.5). Söz konusu haritaya göre inceleme alanındaki turbanın yayılımı KD-GB uzanımlıdır. Yüzeyde turba sadece 5 sondajda kesilmemişken, 22 sondajda ise turba doğrudan yüzeyde veya 25-30 cm gibi yüzeyde sayılabilecek çok sığ derinliklerde kesilmiştir. Şekil 4.5'ten sığ derinlikteki turba seviyesinin kalınlığının 1 ile 8 m, sahanın KD ve doğu kesimlerinde 5-7 m, batı kesiminde ise 1-1.5 m arasında değişim gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.5. İnceleme alanı ve civarında bulunan turba zeminlerin kalınlık değişimini gösteren harita [10].

Ulusay vd. [10], [11] tarafından verisine ulaşılarak değerlendirilen ve inceleme alanında turba zeminde yapılmış çok sınırlı sayıdaki zemin etüdü sondajlarına göre, turba zeminin genellikle yüzeyden 0 ile 9 m arasındaki derinliklerde gözlendiği ve bu bulguların MTA tarafından yapılan sondajlardan elde edilen bulgularla oldukça benzer olduğu anlaşılmaktadır.

Önceki sondajların 50 tanesinde kesilen birim MTA tarafından turba olarak değerlendirilmiş olup, Demirok [8] bu sahada gerçekleştirilen sondajların verisine göre görünür turba rezervini yaklaşık 105 milyon ton olarak hesaplamıştır. Önceki

sondajlardan alınan örneklerin laboratuvarda orijinal ve havada kuru su ve kül değerleri ile kuru kül değerleri de belirlenmiştir (Çizelge 4.1). Orijinal turbada kalori değerleri 100-150 KCal/kg arasında olup, en fazla 655 Kcal/kg'dır.

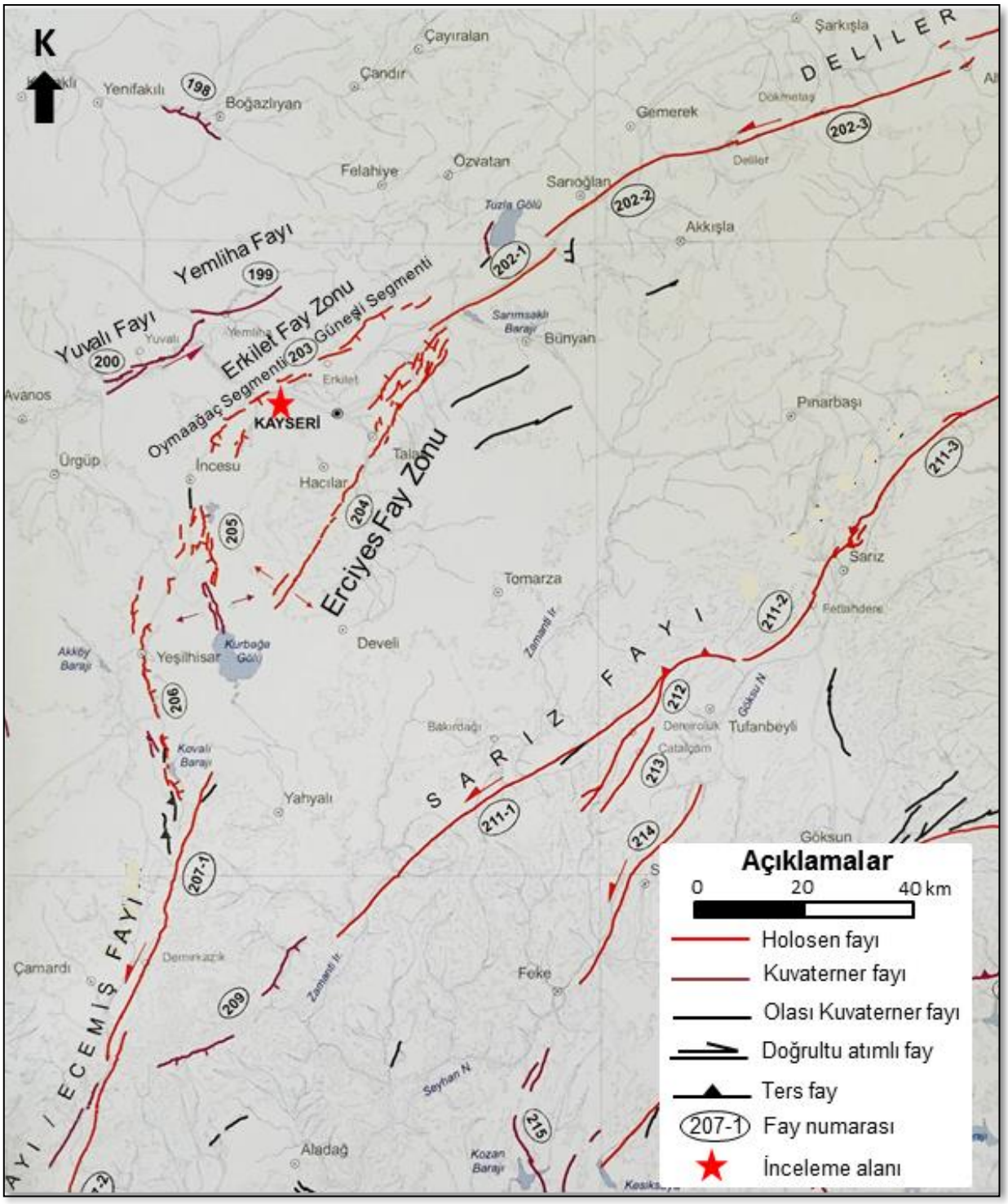
Çizelge 4.1. Kayseri Ambar köyündeki turba zeminlerin endüstriyel analiz ortalama değerleri ([8]'den).

	Orijinal turbada	Havada kuru turbada	Kuru turbada
Su (%)	64.97	10.00	-
Kül (%)	24.31	56.52	63.25

4.6. İnceleme Alanının Yapısal Özellikleri ve Diri (Aktif) Faylar

Kayseri havzası, Orta Anadolu Fay Zonu' nun (OAFZ) ilk evrelerinde KD-GB eksenli bir çek-ayır havza olarak gelişmiştir. Havza OAFZ'nun oluşturduğu yayın tam merkezinde bulunmaktadır. Kayseri ve çevresinde birçok faydan oluşan OAFZ, Erzincan havzasının batısından Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ile dar bir açıyla ayrılmakta ve yayvan bir büklüm şeklinde Anadolu Levhası içinde GB'ya doğru uzanmaktadır. Sol yönlü doğrultu atım karakterine sahip olan bu zonun karadaki uzunluğu 500 km civarında olup, genişliği Kayseri havzası civarında 35 km'ye ulaşır. Erciyes fayı, Erkilet fayı ve Ecemiş fayının Yeşilyurt segmenti ile Dündarlı segmenti OAFZ'nun ana elemanları ve Kayseri havzasını sınırlandıran faylardır. Kayseri havzası, günümüzde bir büklüm geometrisinin tepesinde Erkilet ve Yeşilhisar normal faylarına bağlı olarak gelişmesine devam etmektedir [97]. Kayseri ve civarındaki diri fayların konumları Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

İlk kez Güner vd. [99] tarafından tanımlanan Erciyes fayı, Kayseri il merkezinin GD'sundan geçmekte ve Sarıoğlan ile Yaygölü arasında uzanmaktadır (bkz. Şekil 4.6). Bu fay, yaklaşık olarak KD-GB uzanımlı sol yönlü doğrultu atımlı bir faydır. Kızık, Talas ve Sarımsaklı olmak üzere üç segmentten oluşan Erciyes fayı 87 km uzunluğundadır.



Şekil 4.6. İnceleme alanı ve yakın çevresinin diri fay haritası ([100]'den düzenlenmiştir).

Kayseri'nin KB'sından geçen, K40^{0}D doğrultulu ve 44 km uzunluğundaki kırık zonu Şaroğlu vd. [101] tarafından Erkilet Fay Zonu olarak tanımlanmıştır. İnceleme alanına en yakın konumda olan normal fay karakterine sahip hakim sol yönlü bu fay zonu, Güneşli ve Oymaağaç olmak üzere iki segmentten oluşmaktadır (bkz. Şekil 4.6). Erkilet fay zonunun doğu kısmını oluşturan 23 km uzunluğundaki Güneşli segmenti, Erkilet ile Güneşli arasında K50^{0}D doğrultusunda uzanmaktadır. 6 km uzunluğunda Hasanarpa ve 19 km uzunluğunda Akin olmak üzere iki alt bölümden oluşan segment, genellikle volkanosedimanter birimler içerisinde izlenmektedir. Doğan vd. [97] tarafından Güneşli segmenti üzerinde yapılan hendek çalışmasında 3 farklı eski depremin izleri saptanmış olup, her depremde fayın çalışma karakteristiğinin aynı olduğu ve 80 cm düşey 20-40 cm kadar da sol yönlü net atım meydana geldiği belirlenmiştir. Güneşli segmenti, Erkilet'te Erkilet fay zonunun batı kısmını oluşturan Oymaağaç segmenti ile keskin bir sola sıçramayla birleşir. Oymaağaç segmenti; Erkilet ile İncesu arasında 25 km uzunluğunda ve K40^{0}D genel doğrultulu olup, derelerde ve sırtlarda düşey bileşeninin yanında sol yönlü atımı net olarak gözlenmiştir [97]. Bu araştırmacıların yapmış oldukları incelemelere göre, Erkilet Fay Zonu'nun aktif olduğu ortaya konulmuştur.

OAFZ'nun güney kısmında yer alan KKD-GGB doğrultulu Ecemiş Fay Zonu, Kayseri havzası ile Çamlıyayla (Mersin) arasında uzanmaktadır (bkz. Şekil 4.6). Şaroğlu vd. [101], bu fay zonunun Dündarlı (Kayseri)-Gülek (Adana) arasında kalan yaklaşık 80 km'lik kısmının sol yönlü doğrultu atımlı bir fay karakteristiğine sahip olduğunu ve toplam uzunluğunun 107 km'ye ulaştığını belirtmişlerdir. Sulucaova ile Kayseri havzası arasında at kuyruğu şeklinde bir geometriye sahip olan Ecemiş Fay Zonu, bu bölgede Yeşilhisar ve Dündarlı olmak üzere iki segmente ayrılır [97].

Kayseri havzasında bulunan diri faylardan biri de Kayseri'nin 28 km KB'sından geçen 46 km uzunluğundaki Yemliha Fayı'dır (bkz. Şekil 4.6). Ebiç ve Yuvalı olmak üzere iki segmentten oluşan K60^{0}D doğrultulu bu fay sol yönlü doğrultu atım karakterindedir [97].

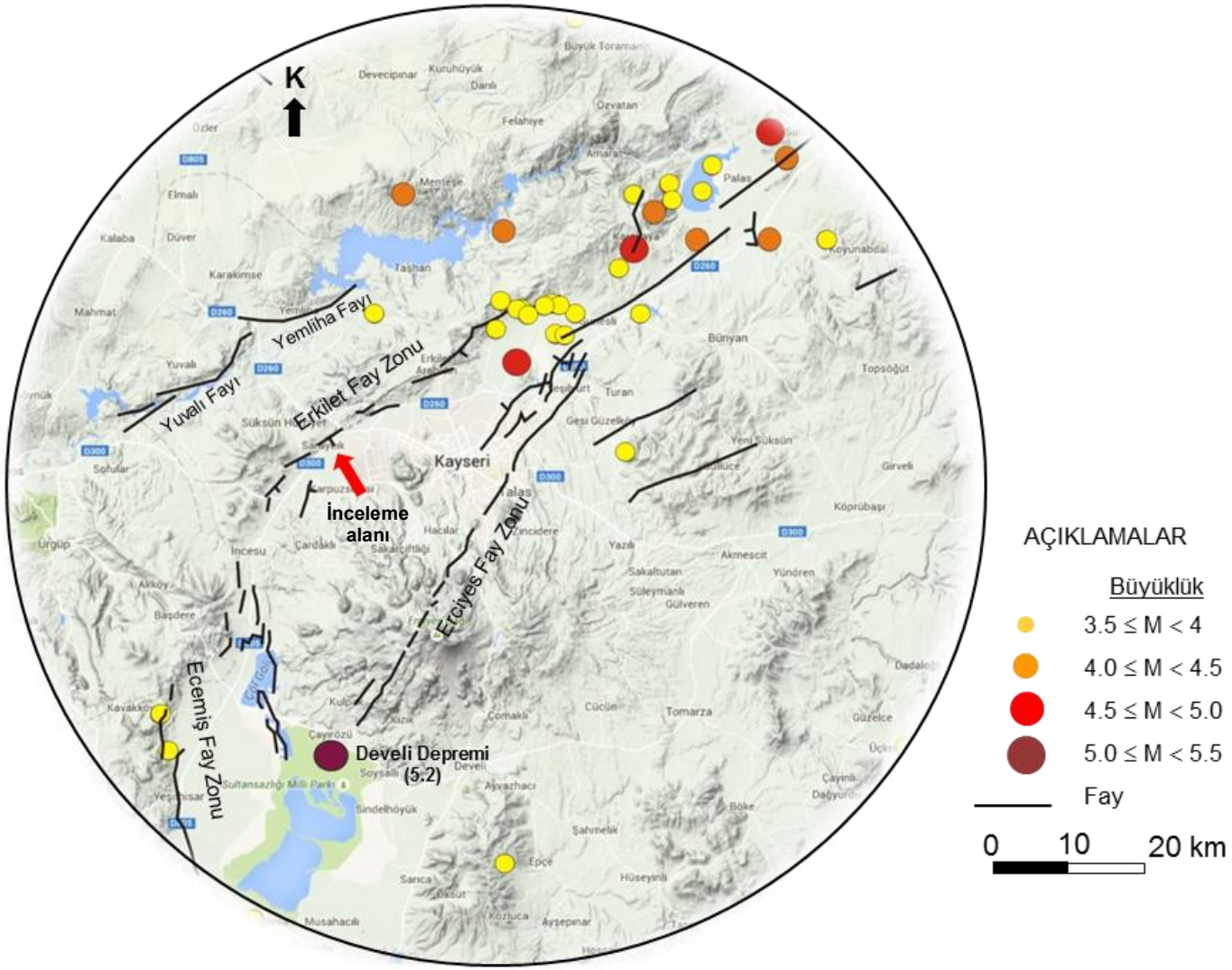
4.7. İnceleme Alanının Depremselliği

Turba zeminlerin dayanımlarının çok düşük ve genellikle suya doygun olmaları nedeniyle deprem kaynaklı dinamik yükler altında bu zeminlerin nasıl davranacağı ve yapıları nasıl etkileyecekleri önem taşımaktadır. Özellikle sığ derinliklerde yer alan turba zeminlerin depremler sırasında zemin büyütmesi ve azalım karakteristikleriyle ilgili çok sınırlı sayıda çalışmanın yapılmış olması konunun önemini arttırmaktadır. Gerek bu husus, gerekse Kayseri ve çevresinde deprem üretebilecek diri fayların varlığı dikkate alınarak, Kayseri ilinin depremselliği genel hatlarıyla değerlendirilmiştir.

Kayseri, Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası'na [102] göre 3. Derece deprem bölgesi içinde yer almaktadır. Doğan vd. [97], son 2000 yıl içerisinde meydana gelmiş tarihsel ve aletsel dönemlere ait deprem verilerini kullanarak Kayseri ve civarının deprem tehlikesini değerlendirmişlerdir. Doğan vd. [97]; Pınar ve Lahn [103], Soysal vd. [104] ve Ergin vd. [105] tarafından hazırlanmış deprem kataloglarından derledikleri bilgiler doğrultusunda son 2000 yılda Kayseri ve civarında hasar verici dört depremin meydana geldiğini belirtmektedirler (Çizelge 4.2).

Kayseri merkez olmak üzere, yaklaşık 120 km çaplı bir daire içerisinde kalan alanda aletsel dönemde meydana gelen ve deprem büyüklüğünün türü belirtilmemekle birlikte (M_d, M_s, M_b, M_w vd.), büyüklüğü 3.5'dan fazla olan depremlerin merkez üsleri Şekil 4.7'deki haritada gösterilmiştir. Bu depremler arasında en önemlisi 1940 yılında meydana gelen ve büyüklüğü 5.2 olan Kayseri-Develi depremidir. Bu deprem sonucunda, bir çok köyde hasar meydana gelmiş ve 37 kişi yaşamını yitirmiştir [105; 97]. Kayseri ve civarında meydana gelmiş depremlerin merkez üstlerinin dağılımı değerlendirildiğinde, bunların Erkilet ve Ecemiş fay zonlarına ait segmentler civarında yoğunlaştığı görülmektedir.

Kayseri'de ulusal sismik ağa bağlı herhangi bir kuvvetli yer hareketi kayıt istasyonu bulunmamaktadır. Bu nedenle, meydana gelen depremlere ait ivmeler komşu illerdeki



Şekil 4.7. Kayseri merkez olmak üzere, 120 km çapında bir daire içerisinde kalan alanda aletsel dönemde (1900-2015 arası) meydana gelmiş ve büyüklüğü 4'ten fazla olan depremlerin merkez üsleri (Fay haritası Emre vd. [100]'nden alınmış olup, depremlerin merkez üsleri için KOERİ, [106]'ten yararlanılmıştır).

istasyonlarda kaydedilmektedir. Kayseri'de üzerinde yerleşimin yoğun olduğu zayıf çökellerin bulunduğu kesimlerde ivmelerin ölçülmemesi nedeniyle, komşu illerden alınan kayıtlardan hesaplanan ivmelerin Kayseri yerleşimi için temsil edici olmadıkları söylenebilir.

Çizelge 4.2. Kayseri ve yakın çevresinde tarihsel dönemde hasara neden olmuş depremler ([104]; [97]).

Tarih	Enlem	Boylam	Şiddet (I_o)	Yer ve etki alanı	Açıklama
240	?	?	IX	Kayseri, Malatya, Sivas	
1205	38.70	35.50	VIII	Kayseri	Kayseri Ulu Camii önemli düzeyde hasara uğramıştır. Depremin merkez üstünün Ecemiş-Kayseri çukurluğunun kenar fayı üzerinde, Kayseri'de veya civarında bulunduğu tahmin edilebilir.
1714	38.70	35.50	VII	Kayseri	Bir kitabeye göre Ulu Cami hasar görmüştür.
23.08.1835	38.30	35.50	VIII	Develi-Kayseri	Kayseri merkez ve 20 köyde hasar olmuştur. Depremin merkez üstü Ecemiş-Kayseri çukurluğu ile ilgilidir.

Kayseri ve civarında bugüne değin büyüklüğü 5.2'yi aşan bir deprem gerçekleşmemiş olsa da, bölgede bulunan fayların uzunlukları dikkate alındığında daha büyük deprem üretme kapasitesine sahip olabilecekleri görülmektedir. Gerek kentin üzerinde kurulduğu zayıf çökellerin, gerekse üzerinde sanayinin hızla geliştiği turba zeminlerin deprem kaynaklı dinamik yükler altında sergileyecekleri davranış ve yaratacakları etkiler açısından bölgenin depremselliği göz ardı edilmemelidir.

Tez çalışması kapsamında turba zeminler için oluşturulması planlanan sismik yer tepkisi analizlerinde girdi parametresi olması gerekçesiyle, Kayseri ve civarında tarihsel ve aletsel dönemde gerçekleşmiş depremlere ilişkin veri ve fayların karakteristikleri dikkate alınarak bölgede gerçekleşebilecek herhangi bir deprem sonucunda oluşabilecek en büyük yer ivmesi hesaplanmıştır. Bu konuya ilişkin ayrıntılı bilgi, turba zeminlerin dinamik özelliklerinin ve davranışının incelenip tartışıldığı Tezin 8. Bölüm'ünde sunulmuştur.

5. ARAZİ ÇALIŞMALARI

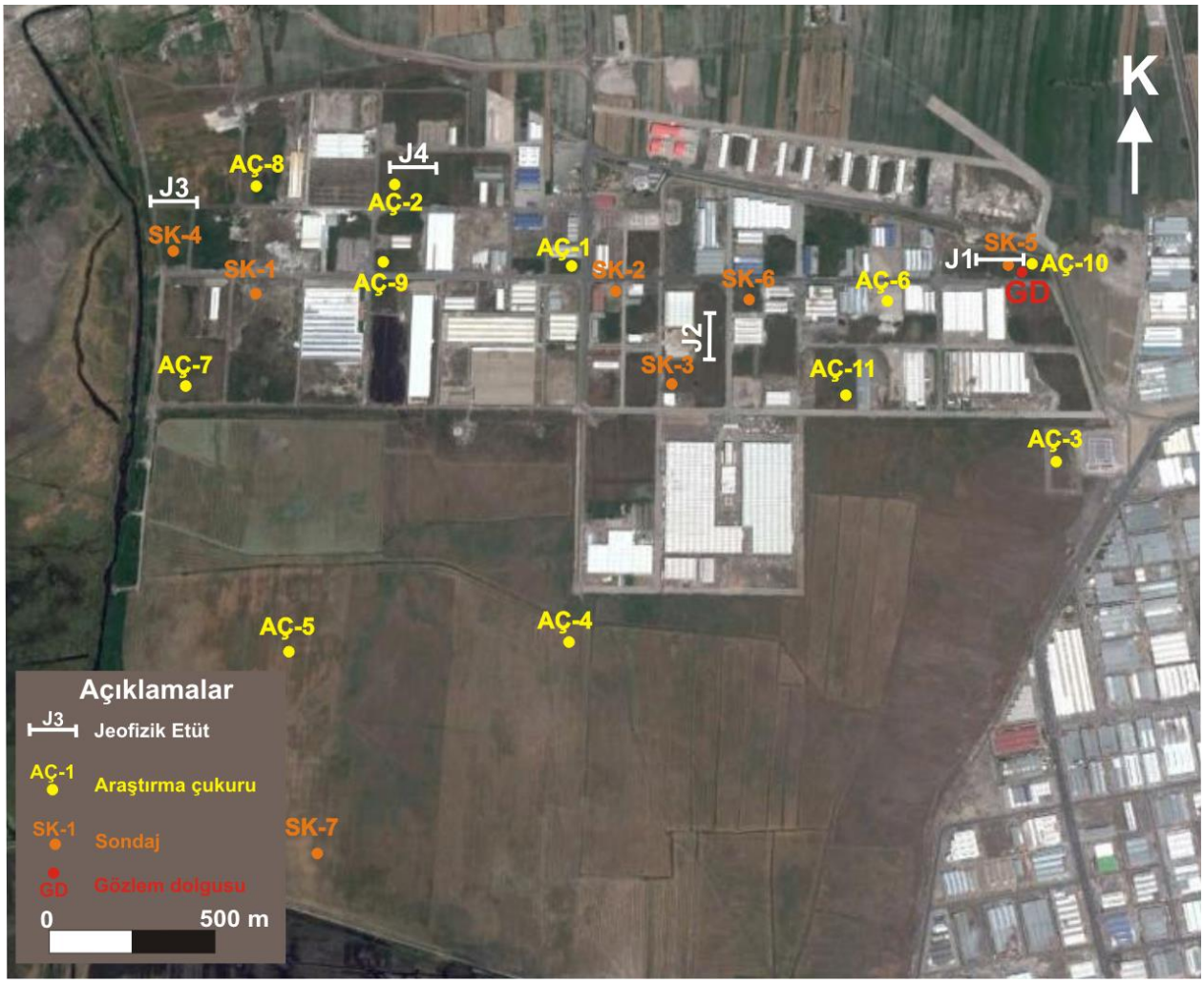
Turba zeminlerin jeo-mühendislik ve dinamik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla veri toplamak üzere inceleme alanında arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda; araştırma çukurları açılmış, sondajlar yapılmış, turba zeminden örselenmiş ve örselenmemiş örnekler derlenmiş ve jeofizik ölçümler alınmıştır. Bunların yanı sıra, turba zeminlerde uzun süreli oturma davranışının değerlendirilmesi ve laboratuvarda yapılan konsolidasyon deneylerinin sonuçlarıyla da karşılaştırılması amacıyla inceleme alanında turba üzerinde bir gözlem platformu inşa edilerek, turba zemindeki oturma miktarları belirli zaman aralıklarında ölçülmüştür. Bu çalışmaların gerçekleştirildiği yerler Şekil 5.1'deki uydu görüntüsü üzerinde gösterilmiştir. İnceleme alanında yapılan arazi çalışmalarına ilişkin amaç, kapsam, kullanılan yöntem vb. bilgiler aşağıdaki alt bölümlerde ana hatlarıyla sunulmuştur.

5.1. Araştırma Çukurları ve Sondajlar

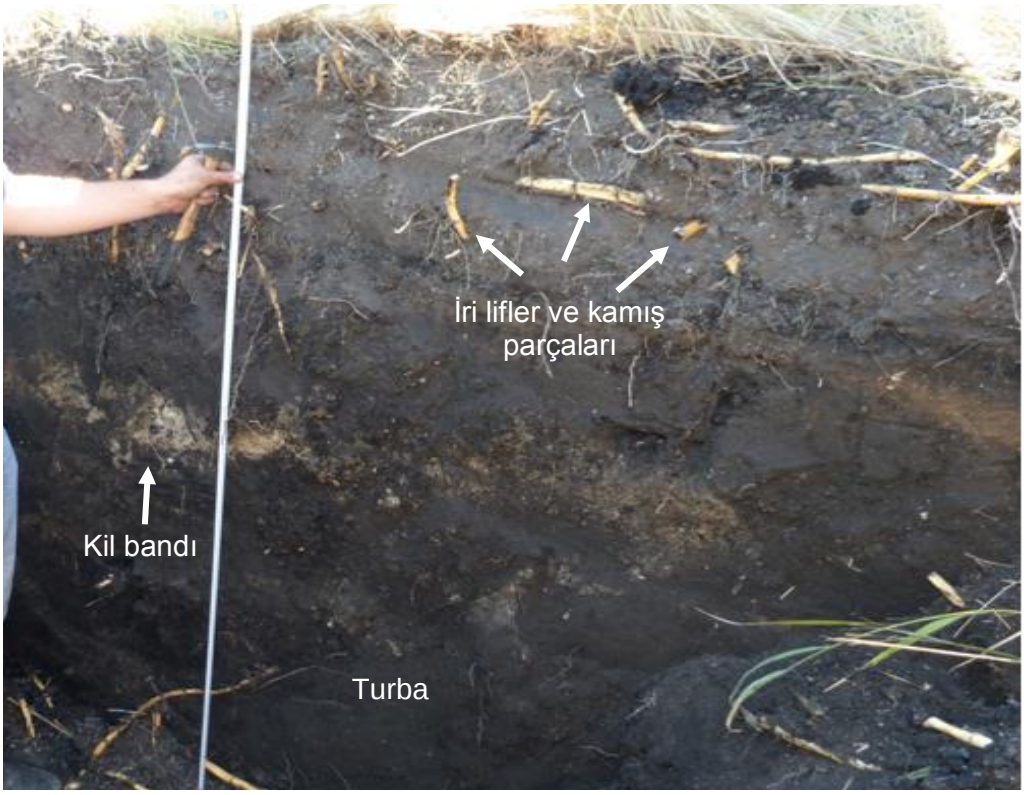
Arazi çalışmaları kapsamında; KAYSER alanında yapıların bulunmadığı yerlerin konumlarına ve KAYSER yetkililerinden alınan izne bağlı olarak, 11 adet araştırma çukuru (AÇ) açılmış ve SK kodlu 7 adet zemin sondajı yapılmıştır (bkz. Şekil 5.1). Ayrıca, bu çukur ve sondajlardan turba zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla örselenmiş ve örselenmemiş örnekler alınmıştır.

Yeraltısuyu seviyesinin altında gözlem ve örnekleme yapılması olanaklı olmadığı ve çukurların duvarlarında göçme sorunuyla karşılaşıldığı için, araştırma çukurları yeraltısuyu seviyesinin yüzeyden derinliğine bağlı olarak 1.4 m ile 3 m arasında değişen derinliklerde açılmıştır. Söz konusu çukurlarının genişlikleri 1.2-2.5 m ve uzunlukları 2.0-3.0 m arasında değişmektedir. Bu çukurlarda, yaklaşık ilk 0.5 m derinliğe kadar siltli-killi toprak, bunun altında ise turba gözlenmiştir. Turba seviyesi içinde kalınlıkları 5-20 cm arasında değişen kil bantları bulunmaktadır (Şekil 5.2). Araştırma çukurlarının üst seviyelerinde (yüzeyden yaklaşık 1-1.5 m derinliğe kadar) kamış, bitki kökleri ve iri lifler içeren turbanın, alt seviyelerde ise daha ince lifli ve

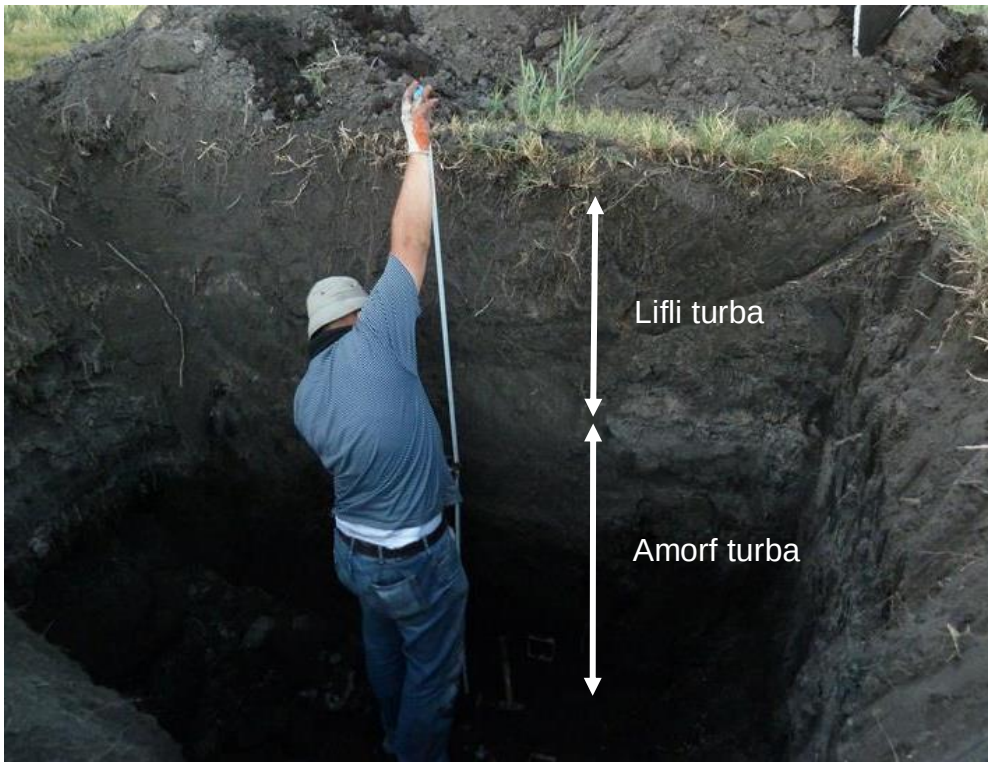
amorf turbanın olduğu görülmüştür (Şekil 5.3). Ayrıca, araştırma çukurlarının bazılarında yaprak ve odunsu parçalar içeren kahverengimsi siyah, kötü kokulu turba seviyelerine de rastlanılmıştır (Şekil 5.4). Araştırma çukurlarında izlenen birimlerin derinlikle değişimi Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Çalışma kapsamında alınan jeofizik ölçümlerin, açılan araştırma çukurlarının, yapılan sondajların ve inşa edilen gözlem dolgusunun KAYSER'in uydu görüntüsü üzerindeki konumları.



Şekil 5.2. Turba zemin içinde gözlenen kil bantları ve turbadaki lifli yapıdan bir görünüm (AÇ-1 no.lu araştırma çukuru).

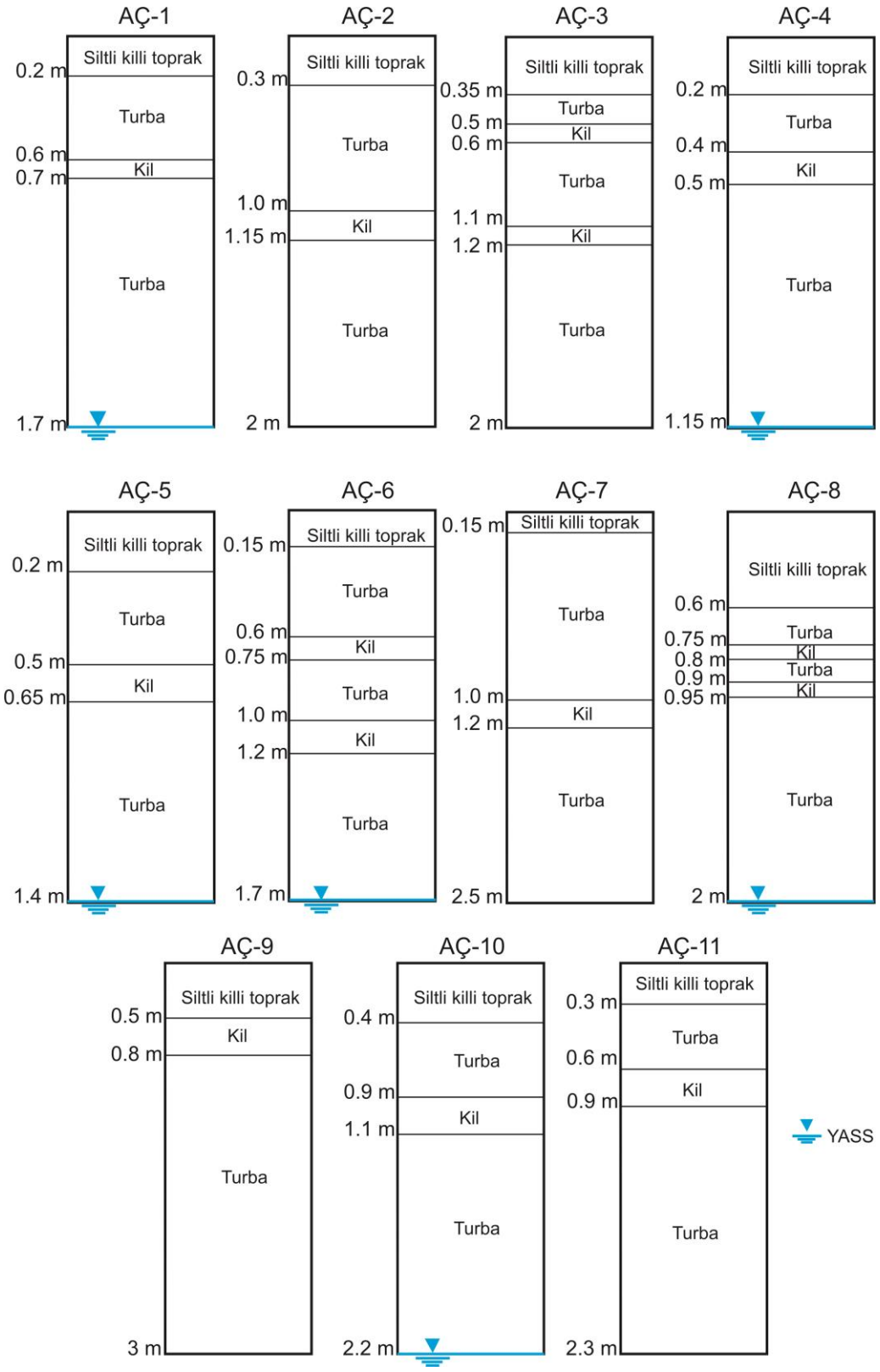


Şekil 5.3. AÇ-7 no.lu araştırma çukurunda turba zeminden bir görüntü.

Şekil 5.4. Yaprak ve odunsu parçalar içeren kahverengimsi siyah turba seviyesi.

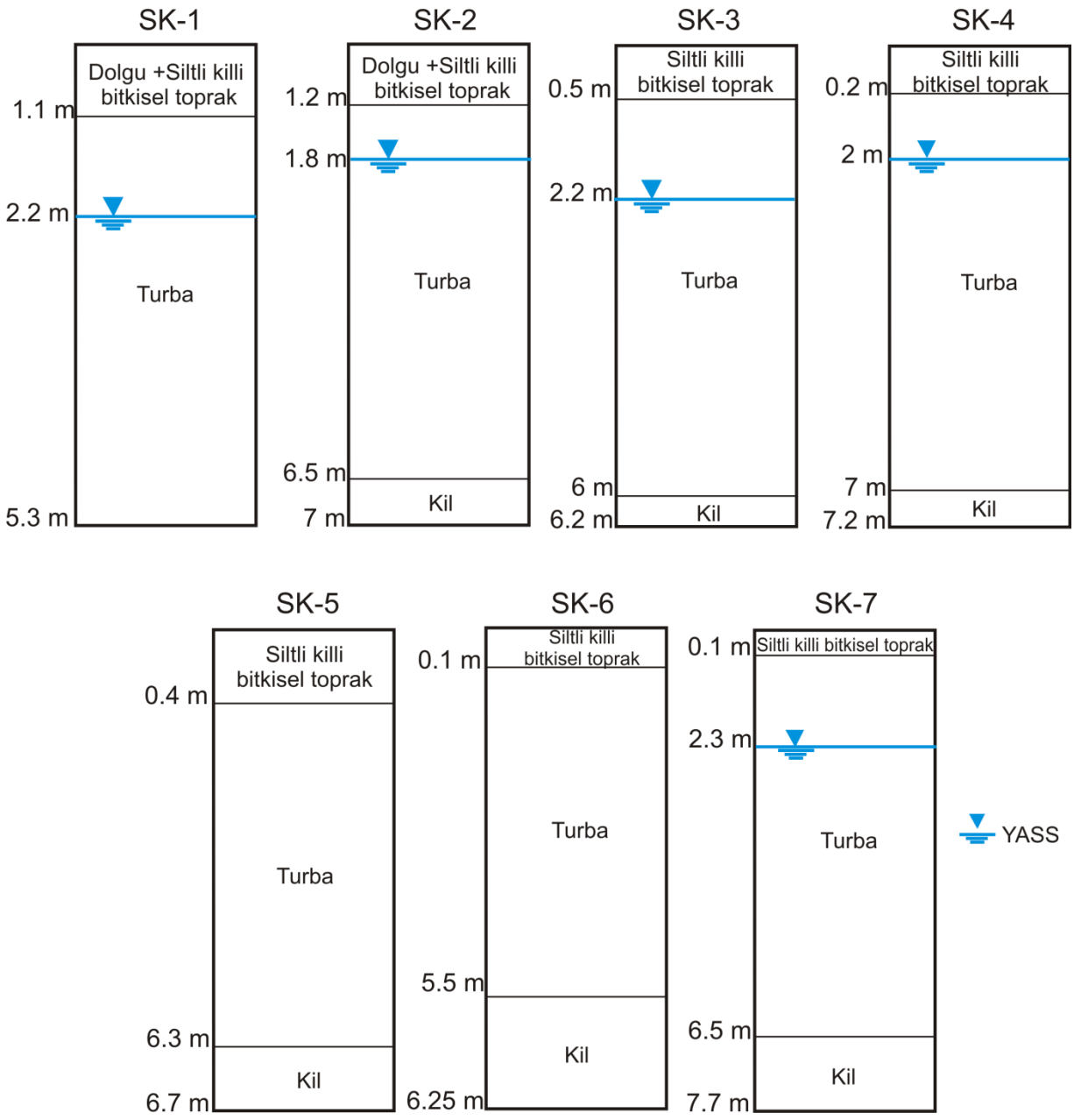
İnceleme alanında, bu tez çalışması kapsamında derinlikleri 5.3 m ile 7.7 m arasında değişen toplam 7 adet zemin sondajı yapılmıştır. Sondajlar D900 tipi sondaj makinesiyle yapılmış olup, ilerleme; dönel sondaj sisteminde, H tipi takım kullanılarak, ağır dönüş hızında, su kullanılmadan, karotiyerle ve 1 m'lik manevralarla gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.6). Sondajlarda izlenen zemin profilleri Şekil 5.7'de sunulmuştur. Araştırma çukurlarında da gözlendiği gibi, sondajlarda da turba yüzeye yakın derinliklerde başlayıp 6-7 m derinliğe kadar devam etmektedir. Tüm sondajlarda turbanın altında grimsi yeşil, siltli killi bir seviyenin bulunduğu gözlenmiştir. Sondajlarda kesilen turba; üst seviyelerde daha iri lifler ve odunumsu parçalar içerirken, derine inildikçe amorf özellik göstermektedir. Ara seviyelerde ise, beyaz canlı kavkıları (gastropoda ve diatome) ile kahverengi yaprak ve odun parçaları içeren turbalara rastlanılmıştır.

Önceki yıllarda KOSB ve KAYSER civarında Ulusay vd. [10], [11] tarafından iki adet zemin sondajı yapılmıştır. SK1 ve SK2 olarak adlandırılan bu sondajlarda kesilen zemin türleri ile elde edilen SPT darbe sayılarının derinlikle değişimi Şekil 5.8'de sunulmuştur.



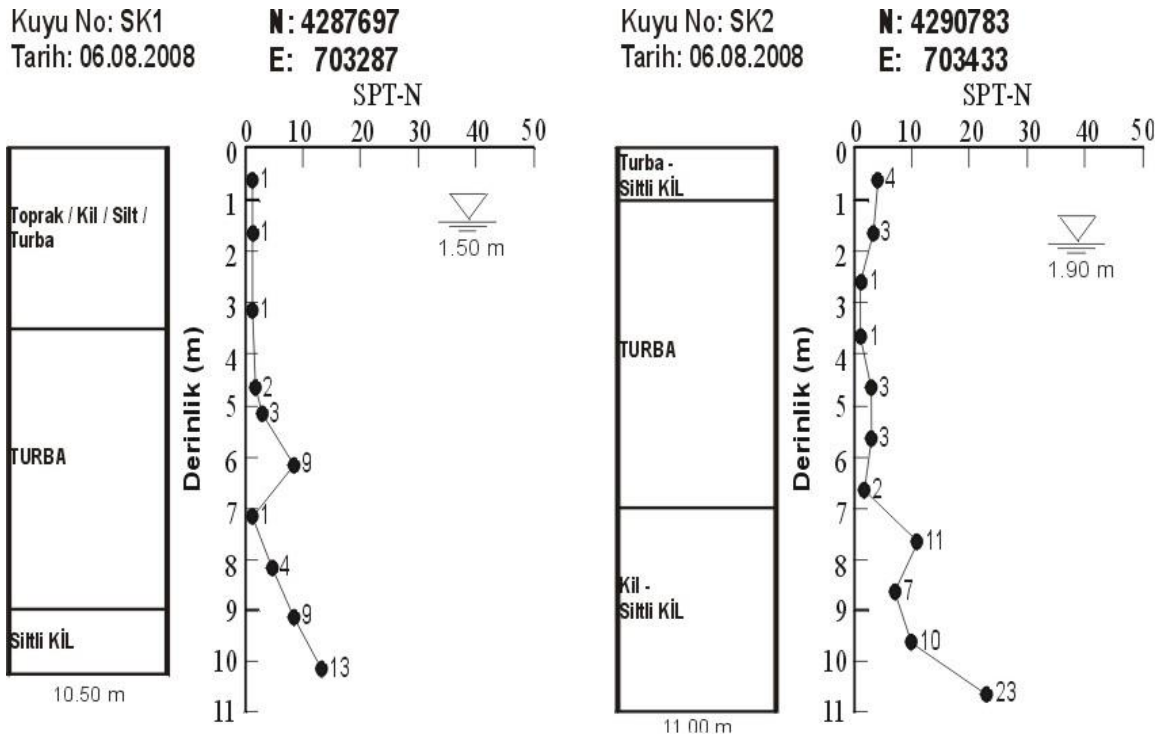
Şekil 5.5. Araştırma çukurlarında izlenen birimlerin derinlikle değişimi.

Şekil 5.6. Bu çalışma kapsamında KAYSER alanında yapılan sondajlardan ve ince çeperli tüple alınan örneklerden görüntüler.



Şekil 5.7. Sondajlarda kesilen zemin türlerinin derinlikle değişimi.

SK2 no.'lu sondaja ilişkin log incelendiğinde tez çalışması kapsamında yapılan sondajlarda elde edilen zemin profilleri ile çok benzer olduğu söylenebilir. Ulusay vd. [10], SK1 sondajında turbanın yüzeye yakın olduğunu, nebati toprak ve silt-kil-turba karışımı bir seviyenin altında yaklaşık 3.5 m derinlikte başladığını ve 9 m derinliğe kadar devam ederek 5.5 m kalınlığa ulaştığını belirtmişler, turba seviyesinin altında ise siltli kil birimi gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, KAYSER alanında yapmış oldukları SK2 no.lu sondajda yaklaşık yüzeyden itibaren ilk 1 m'de turba-kil karışımı bir seviyenin olduğunu, bunun altında turba seviyesinin başlayıp ve yaklaşık 7 m derinlikten itibaren de kil ve siltli kile geçildiğini belirtmişlerdir. Ulusay vd. [10], sondajlarda yapılan SPT deneylerinde belirlenen darbe sayılarının oldukça düşük ve bunların 1 ile 11 arasında değişmekle birlikte, turba içeren seviyelerde genellikle 1 ile 4 arasında olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 5.8. İnceleme alanı ve civarında Ulusay vd. [10] tarafından yapılmış olan sondajların logları ve SPT darbe sayılarının derinlikle değişimi.

Ulusay vd. [10] tarafından yapılan çalışmanın yanı sıra, KOSB ve KAYSER alanlarında bazı özel firmalar (Yada Jeolojik Jeoteknik Ltd. Şti. [107]; Nokta-Aktaş

Mühendislik Mimarlık [108]; Nokta Mühendislik Mimarlık ([109], [110]) tarafından da zemin etütleri yapılmıştır. Bu etütler kapsamında yapılan sondajların logları incelendiğinde turba seviyesin yüzeyden yaklaşık 0.3-1 m derinlikte başladığı ve 4-8 m derinliğe kadar kadar devam ettiği ve SPT darbe sayılarının 3 ile 6 arasında değiştiği görülmektedir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan sondajlarda, öncelikli hedefin turba zeminlerden örselenmemiş örnek alımı ve bu zeminlerin örselenmeye karşı oldukça duyarlı olması nedeniyle turba zeminin SPT deneyi sırasındaki darbelerden etkilenebileceği dikkate alınarak SPT deneyi yapılmamıştır.

5.2. Örnekleme Çalışmaları

Turba zeminlerin fiziksel ve indeks özelliklerinin belirlenmesi, makaslama dayanımının ve dinamik davranışının değerlendirilmesi, konsolidasyon ve oturma karakteristiklerinin araştırılması amacıyla yapılacak olan laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere açılan araştırma çukurları ve yapılan sondajlardan örselenmiş ve örselenmemiş örnekler derlenmiştir.

SK-1 ve SK-2 no.'lu sondajları yapan firmanın ekipmanının yetersiz olması nedeniyle bu sondajlarda örnekleme yapılamamış, sadece turba seviyesinin derinliği belirlenmiştir. Diğer sondajlarda derinliğe bağlı olarak su içeriğinin tayini için belirli derinliklerden örnekler alınıp, bu örneklerin nemli ağırlıkları arazide belirlenmiştir. Ayrıca, çapı 90 mm olan ve çeperleri keskinleştirilmiş ince çeperli tüplerle (bkz. Şekil 5.6b) 18 adet turba örneği ile turbanın alt seviyesinde bulunan grimsi yeşil kil biriminden örselenmemiş örnekler alınmıştır. Tüm sondajlardan alınan örneklerin sayısı ve örnekleme derinlikleri Çizelge 5.1'de sunulmuştur.

Araştırma çukurlarından 61 adet blok örneğin yanı sıra (Şekil 5.9), makaslama ve konsolidasyon deneylerinde kullanılmak üzere 6x6x2 cm ve 10x10x2 cm boyutlarında kesici metal kalıplar ile 28 adet (Şekil 5.10) ve 9 cm çapında ince çeperli tüpler (Şekil 5.11) kullanılarak 5 adet örselenmemiş turba örnekleri alınmıştır. Ayrıca tüm araştırma çukurlarından sınıflama ve indeks deneylerinde kullanılmak üzere

örselenmiş torba örnekler de alınmıştır. Kullanılan gereçlere göre araştırma çukurlarından alınan örselenmiş ve örselenmemiş tüm örneklerin sayısı Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Sondajlardan alınan örneklerin sayısı ve derinliği.

Sondaj No.	Su içeriği tayini için örnek sayısı (örnekleme derinliği)	Tüple alınmış örnek sayısı (örnekleme derinliği)
SK-1	-	-
SK-2	2 (5.5-6.5 m)	-
SK-3	12 (2-3-4-6 m)	4 (1.5-2.5-3.5-5.5 m)
SK-4	12 (2-3-5-6.5 m)	4 (1.5-2.5-5-6.5 m)
SK-5	12 (2-3.5-5-6.5 m)	4 (1.5-3-4.5-6 m)
SK-6	9 (2.5-4-6 m)	3 (2-3.5-5.5 m)
SK-7	12 (2-2.6-4.5-7.5 m)	3 (2-4-7 m)

5.3. Jeofizik Ölçümler ve Değerlendirilmesi

İnceleme alanındaki turba zeminlerin kalınlığının ve makaslama dalgası hızlarının (V_S) belirlenmesi amacıyla Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nde yürütülen ve tez danışmanının da görev aldığı bir BAP projesi [111] kapsamında, doğru akım özdirenç yöntemi (DAÖ) ve aktif kaynaklı yüzey dalgası yöntemleri (MASW) kullanılarak jeofizik ölçümler alınmıştır.

İnceleme alanındaki turba zeminlerin kalınlığının belirlenmesine yönelik rezistivite ölçümleri, her biri 110 m uzunluğunda dört profil boyunca yapılmış olup (bkz. Şekil 5.1), araştırma derinliği 4.5 ile 8 m arasında değişmektedir. Ölçümler SUPER STRING R8 IP cihazı kullanılarak, 56 elektrotlu çok kanallı ölçüm sistemiyle alınmıştır (Şekil 5.12a). Bu ölçümler sırasında elektrotlar pol-dipol ve dipol-dipol yöntemlerine göre 2 m'lik aralıklarla dizilmiştir (Şekil 5.12b, 5.13). Alınan ölçümlere göre rezistivite değerlerinin değişimini gösteren kesitler, aynı yerde yapılmış zemin sondajları ve

açılmış araştırma çukurlarında karşılaşılan zemin profilleriyle birlikte Şekil 5.14 ile 5.17 arasında verilmiştir.

Şekil 5.9. Araştırma çukurlarında turbadan blok örnek alımı.

Şekil 5.10. Araştırma çukurlarında kesici kalıplarla turbadan örnek alımı.

Şekil 5.11. AÇ-10 no.lu araştırma çukurunda 15 cm çapında ve 30 cm uzunluğunda tüpler kullanılarak turbadan örnek alımı.

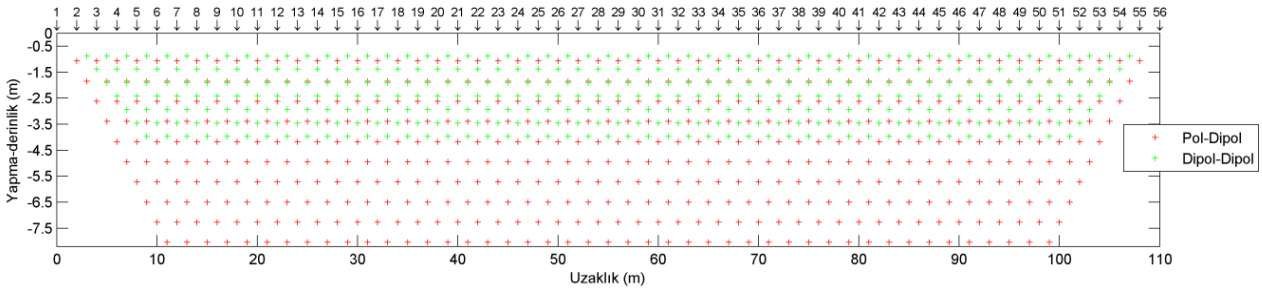
Çizelge 5.2. Kullanılan örnekleme gereçlerine göre araştırma çukurlarından alınan örselenmemiş ve örselenmiş örneklerin sayısı.

AÇ No.	Su içeriği tayini için	Kesici metal kalıp	Blok	Torba	İnce çeperli tüp
AÇ-1	4	4	-	3	-
AÇ-2	6	3	5	3	1
AÇ-3	5	5	7	4	1
AÇ-4	6	5	7	4	1
AÇ-5	6	3	5	4	-
AÇ-6	6	4	8	4	1
AÇ-7	6	4	5	4	1
AÇ-8	9	-	6	4	-
AÇ-9	9	-	9	4	-
AÇ-10	6	-	6	4	-
AÇ-11	6	-	3	5	-
Toplam	69	28	61	43	5

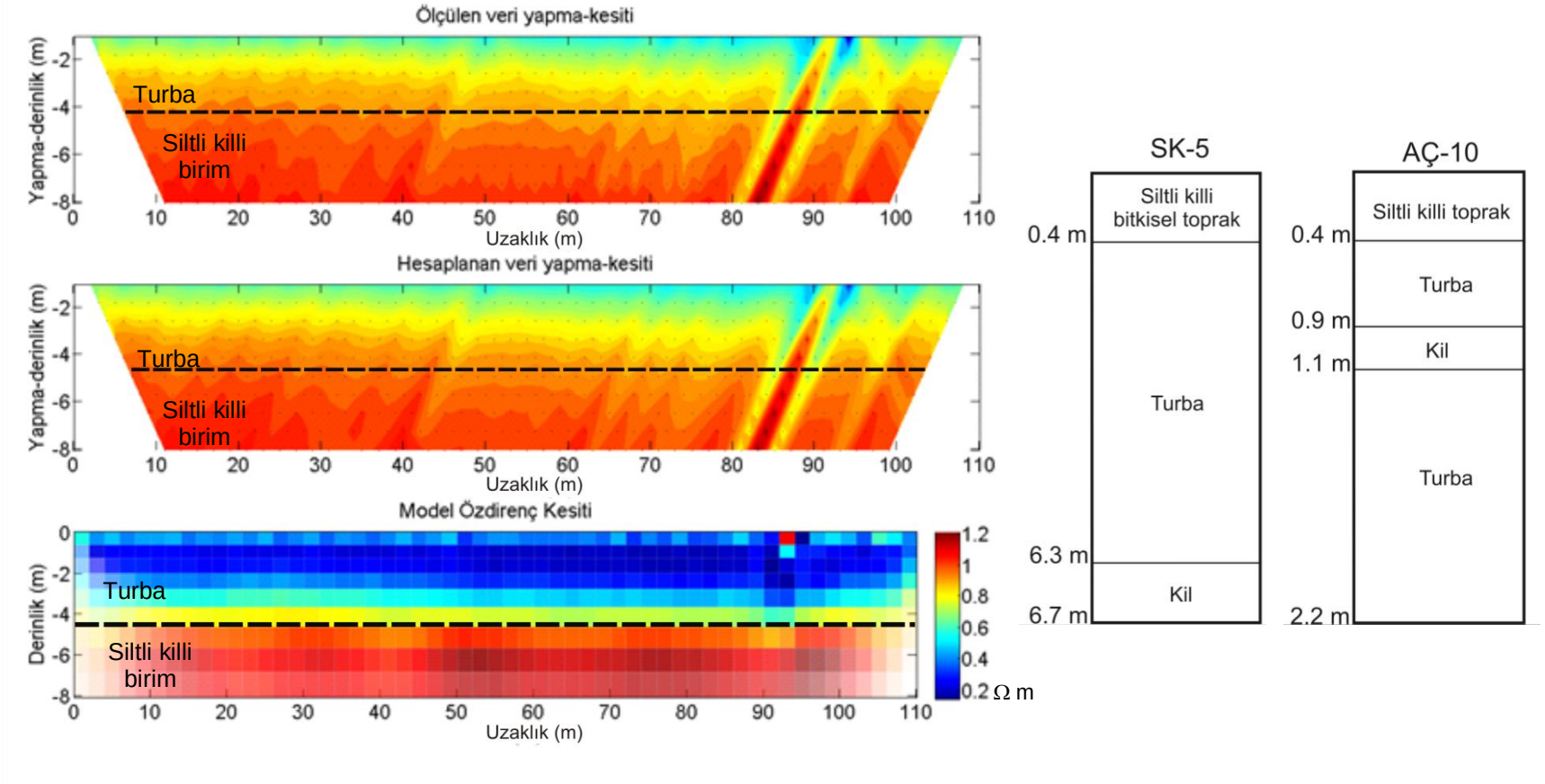
(a) (b)

(c) (d)

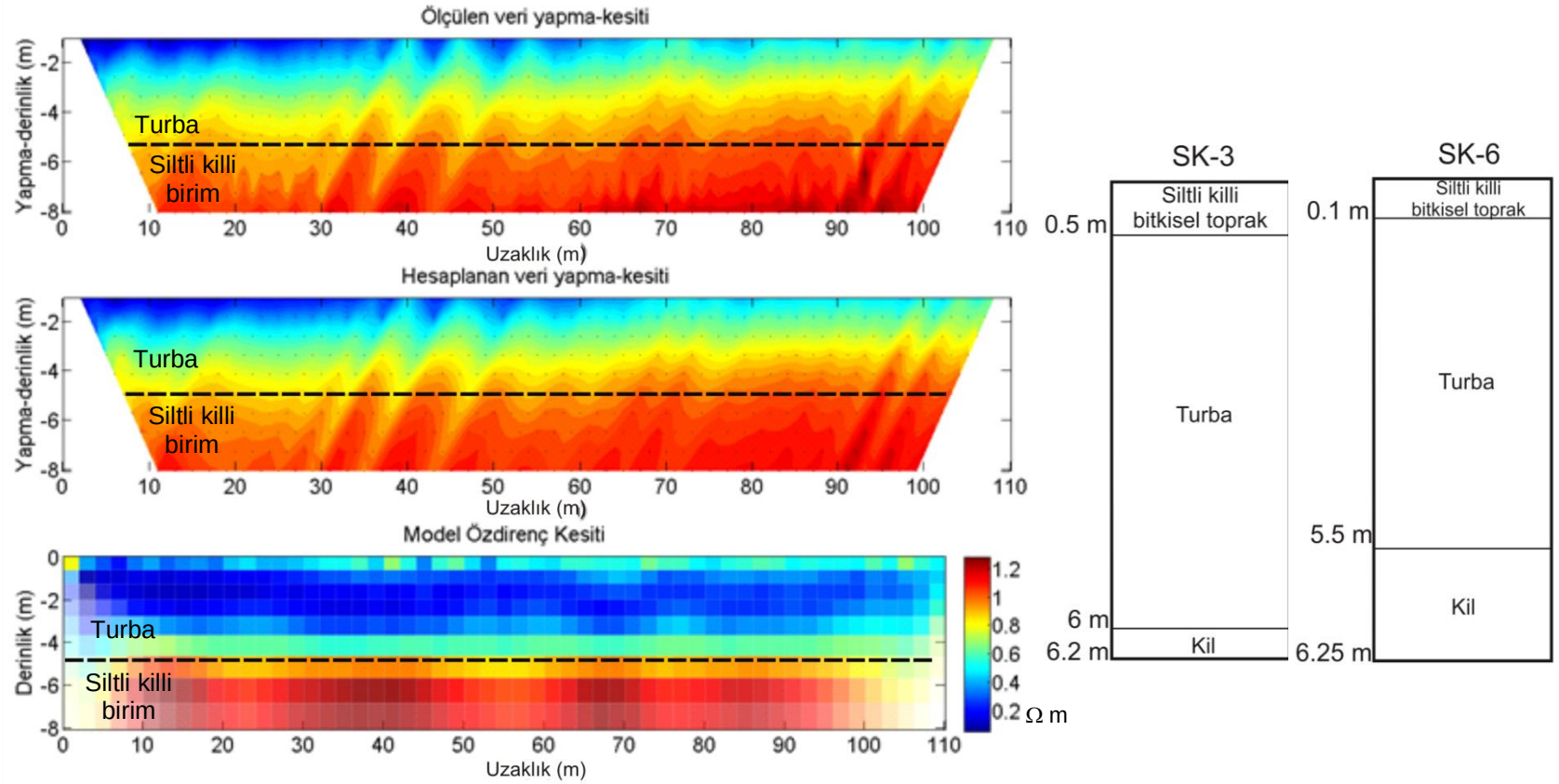
Şekil 5.12. (a) Rezistivite ölçüm cihazı, (b) elektrotların dizilimi, (c) jeofon ve elektrotlar, (d) sismik kaynaktan bir görünüm.



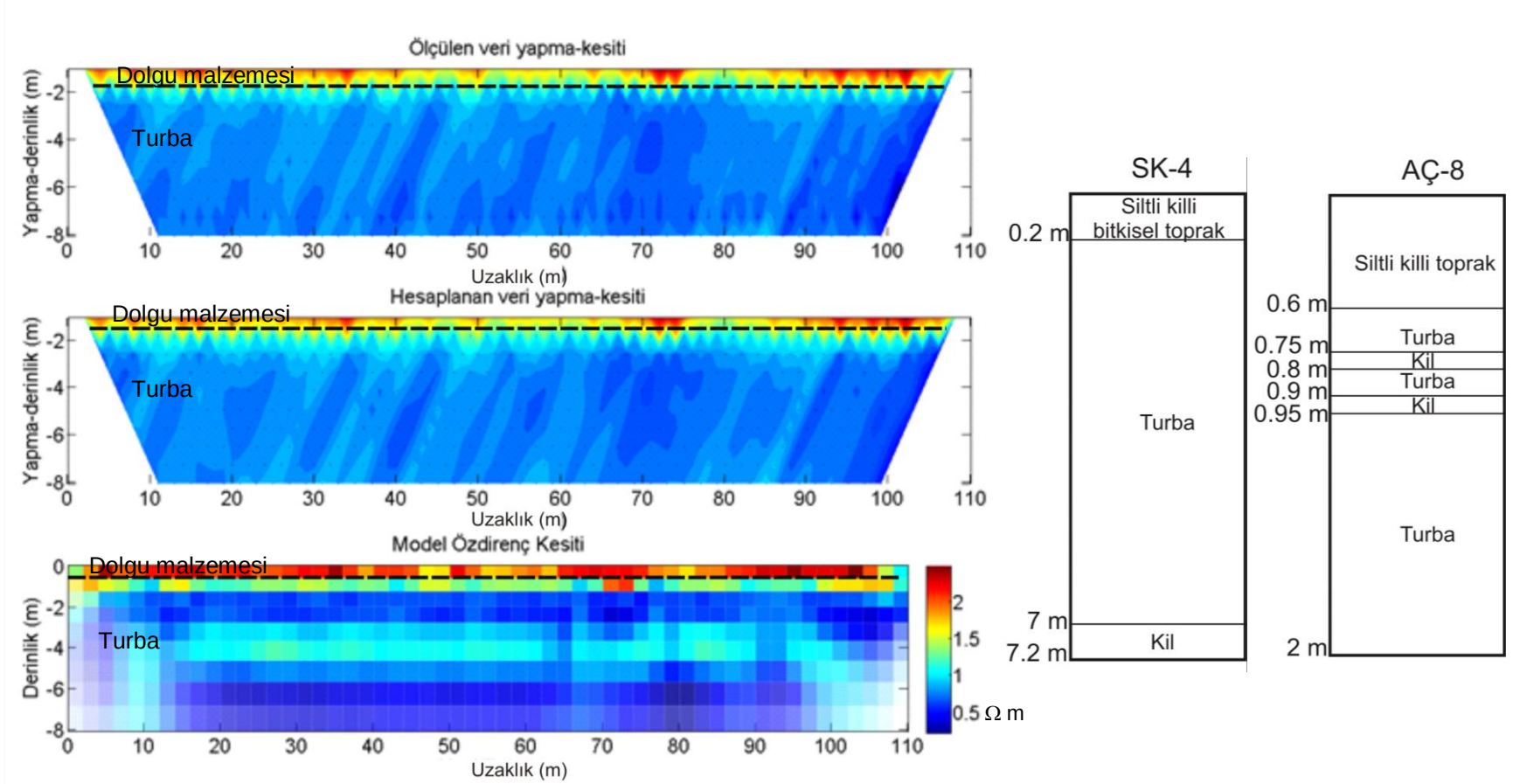
Şekil 5.13. DAÖ profilleri elektrot konumları ve dizilimlerin araştırma derinlikleri [111].



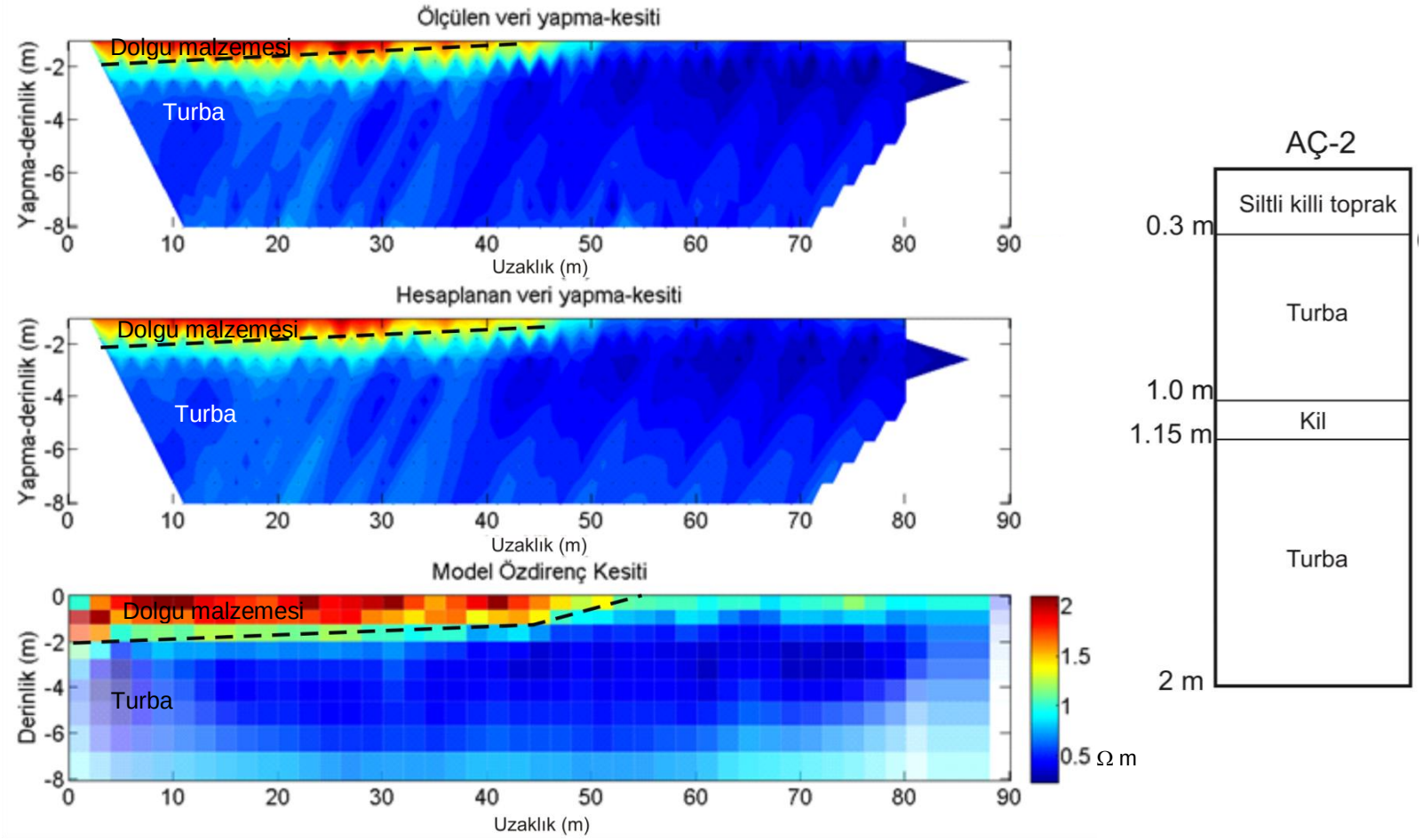
Şekil 5.14. J1 profili dipol-dipol (üst) ve pol-dipol (alt) özdirenç kesitleri [111] ve bu tez çalışmasında aynı yerde yapılan sondajda ve açılan araştırma çukurunda gözlenen zemin profilleri.



Şekil 5.15. J2 profili dipol-dipol (üst) ve pol-dipol (alt) özdirenç kesitleri [111] ve bu tez çalışmasında aynı yerde yapılan sondajda ve açılan araştırma çukurunda gözlenen zemin profilleri.



Şekil 5.16. J3 profili dipol-dipol (üst) ve pol-dipol (alt) özdirenç kesitleri [111] ve bu tez çalışmasında aynı yerde yapılan sondajda ve açılan araştırma çukurunda gözlenen zemin profilleri.



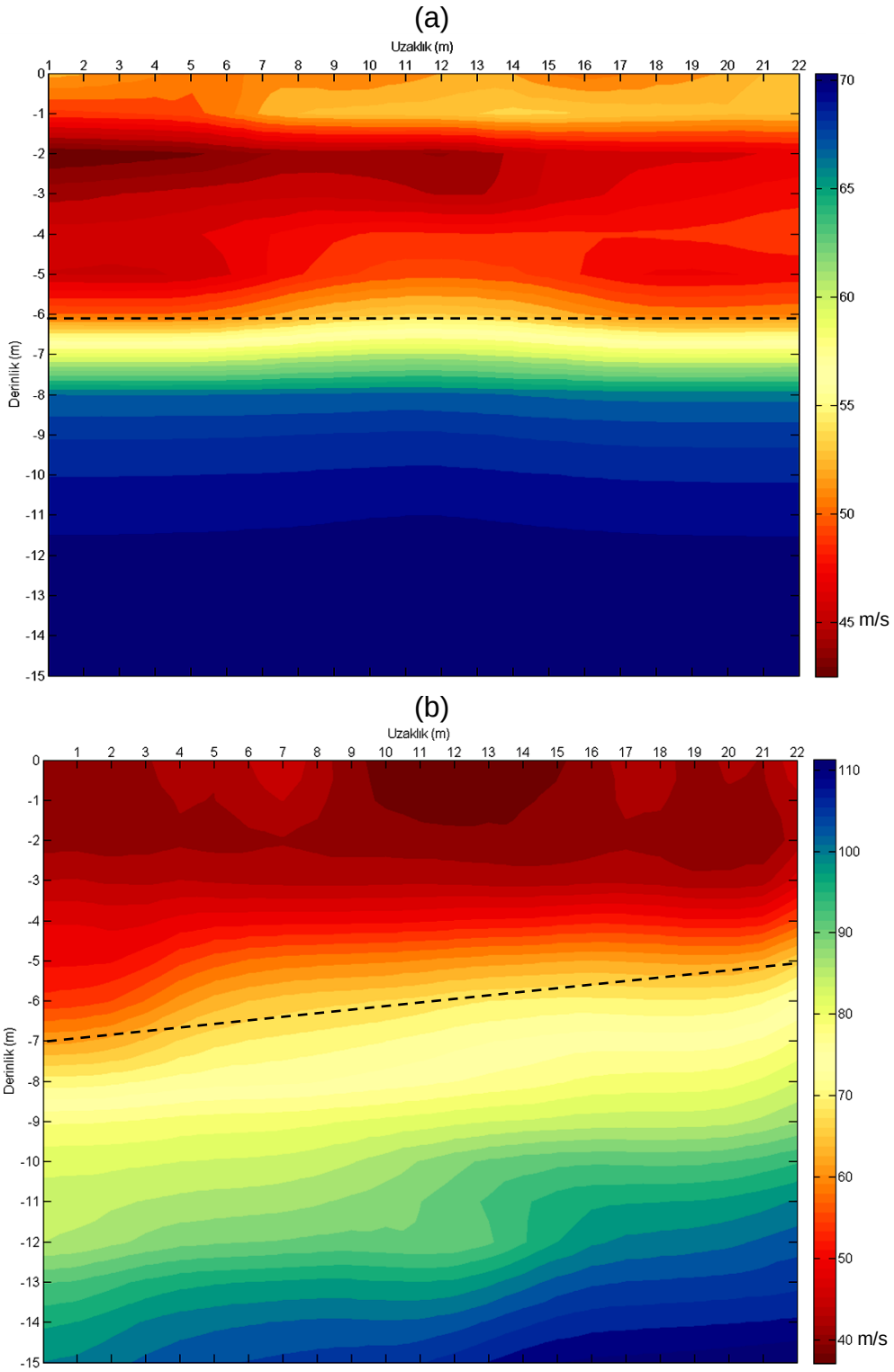
5.17. J4 profili dipol-dipol (üst) ve pol-dipol (alt) özdirenç kesitleri [111] ve bu tez çalışmasında aynı yerde açılan araştırma çukurunda gözlenen zemin profilleri.

Rezistivite ölçümlerine göre; J1 ve J2 profillerinde yüzeyden yaklaşık 5 m derinliğe kadar 0.2-0.8 Ωm arasında değişen özdirenç elde edilmiş olup, özdirenç bu derinlikten sonra 1.2 Ωm'ye yükselmektedir (Şekil 5.14 – 5.15). Ölçülen resistivite değerleri, ASTM-D6431 [112] tarafından tuzlu sular için belirtilen 0.3-1 Ωm aralığında olup, diğer zemin türleri için belirtilen değerlerden çok düşüktür. Zeminin suya doygunluğu arttıkça, ölçülen rezistivite değerleri düşmektedir. Söz konusu profillerde turba zeminin suya doygun halde bulunduğu söylenebilir. J3 profilindeki ölçümler, Şekil 5.1 ve Şekil 5.12b'den görüldüğü gibi, yaklaşık 2 m kalınlığında bir toprak yol dolgusu üzerinde alınmıştır. Bu durum, bu profilin Şekil 5.16'da sunulan özdirenç kesitinde de izlenmekte olup, üst kısımdaki 2 m'lik dolgu seviyesinin hemen altında turba zemin başlayıp kesitin sonuna kadar devam etmektedir. J4 profilinin ise yaklaşık 50 m'lik kısmı yol dolgusu üzerinde yapılmış olup, Şekil 5.17'de özdirenç kesiti sunulmuştur. Bu profilde de, J3 profiline benzer şekilde, 8 m derinliğe kadar (kesit sonu) turba zeminin devam ettiği belirlenmiştir.

Turba zeminlerin sismik yer tepkisinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılacak olan girdi parametrelerinden biri de makaslama dalgası hızıdır. İnceleme alanındaki turbaların makaslama dalgası hızlarının belirlenebilmesi için söz konusu BAP projesinde [111] ABEM 24 kanallı MK6 aleti kullanılarak, MASW yöntemiyle yukarıda belirtilen 4 profil boyunca sismik kırılma ölçümleri alınmıştır. Ölçümler sırasında kullanılan jeofonlar ve sismik kaynağa ilişkin görüntüler Şekil 5.12c-d'de sunulmuştur. Bu ölçümlerde araştırma derinliği yaklaşık 15 m olarak öngörülmüştür.

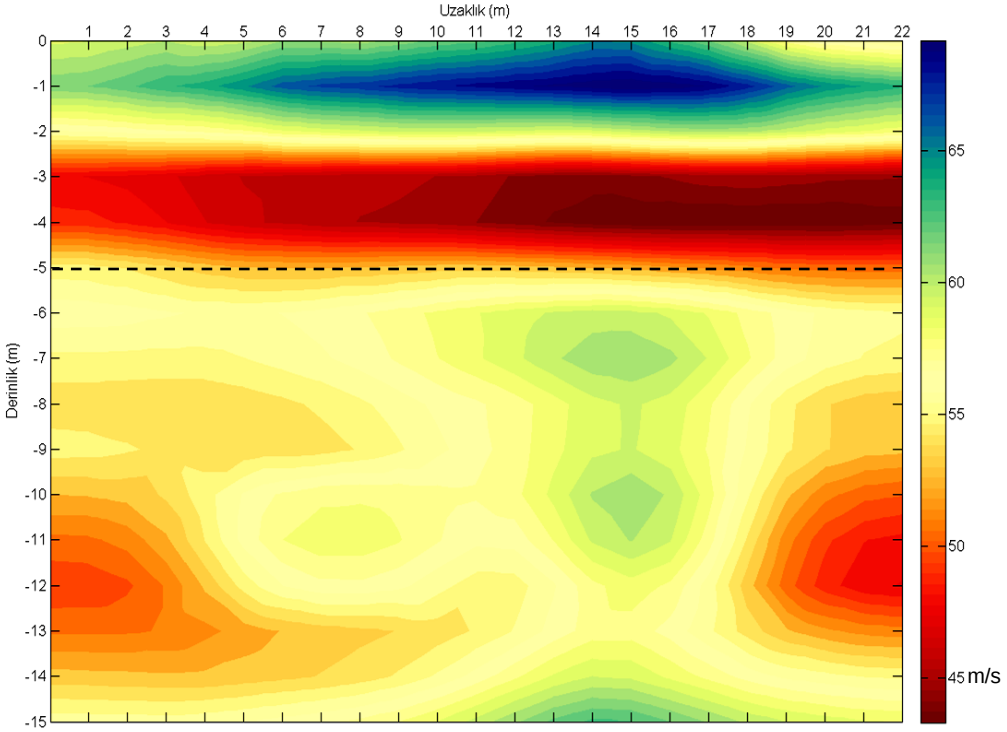
İnceleme alanında yapılan sismik ölçümlerin değerlendirilmesiyle elde edilen S dalgası hızı (V_S) kesitleri Şekil 5.18'de verilmiştir. Bu kesitlere göre inceleme alanında 0-15 m derinlikleri arasında turba seviyesi ve hemen altında bulunan siltli-killi seviye için ölçülen makaslama dalgası hızları oldukça düşük olup, 35-110 m/s arasında değişim göstermektedir. Turba seviyesinde ölçülen makaslama dalgası hızları ise 35-60 m/s arasında değişmektedir. Sismik kesitlerde turba seviyesinin kalınlığı rezistivite kesitlerine göre daha belirgin şekilde ayırt edilmekte olup, gerek sismik gerekse

rezistivite kesitlerinden belirlenen bu kalınlık inceleme alanında yapılan sondajlarda gözlenen turba kalınlıklarına benzerlik göstermektedir.

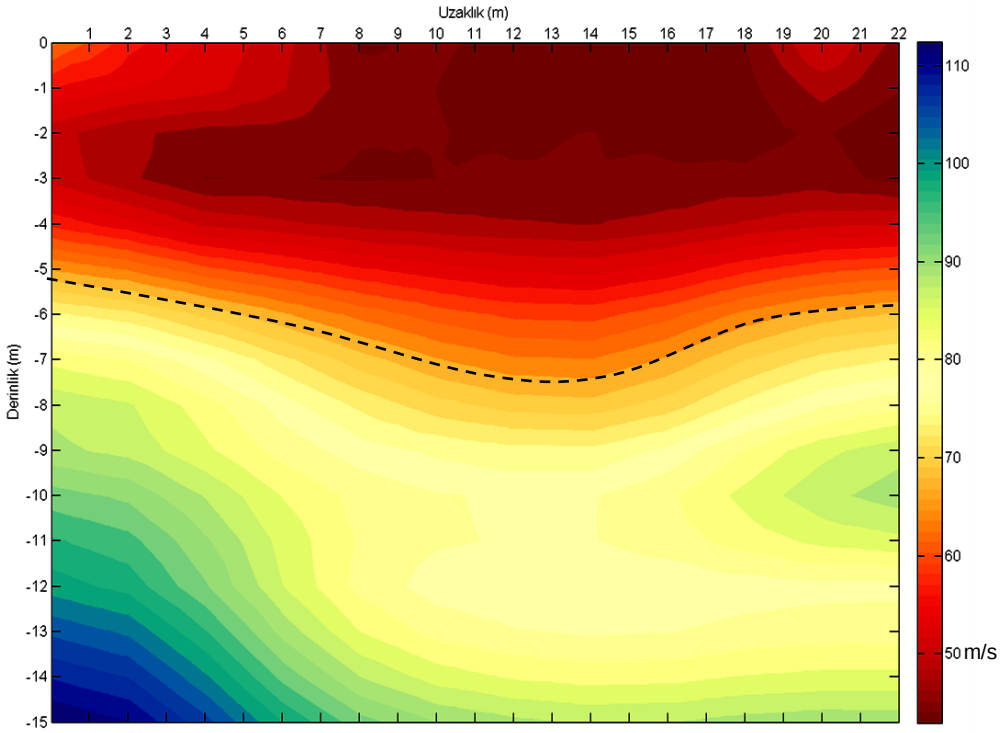


Şekil 5.18. (a) J1, (b) J2, (c) J3 ve (d) J4 profilleri için S dalgası hız (V_s) kesitleri [111].

(c)



(d)



(Şekil 5.18 devam ediyor).

5.4. Arazide Gözlem Platformunun İnşası ve Turbada Uzun Süreli Oturmanın İzlenmesi

Tez çalışması kapsamında; inceleme alanındaki turba zeminlerin sıkışma davranışının değerlendirilmesi ve bu zeminin zamana bağlı oturma miktarının tahmin edilmesi amacıyla laboratuvar deneyleri ve sayısal çözümlemelerin yanı sıra, turba üzerinde bir gözlem platformu inşa edilerek, bu platformdaki oturmanın da izlenmesinin yararlı olacağı düşünülmüştür. KAYSER yetkilileri tarafından izin verilen bir alanda inşa edilen bu gözlem platformunun altında yer alan turba zemindeki oturma miktarları Şubat 2014 – Mayıs 2015 tarihleri arasında 14 ay süreyle belirli zaman aralıklarında izlenmiştir. Gözlem platformunun inşa aşamaları ve alınan ölçümlere ilişkin değerlendirmeler aşağıda ana hatlarıyla sunulmuştur.

Gözlem platformu, tez çalışması kapsamında açtırılan AÇ-10 no.lu araştırma çukuru ile SK-5 no.lu sondajın hemen yakınındaki bir alanda inşa edilmiştir (bkz. Şekil 5.1). Gözlem platformunun kaya bloklarıyla yüklendiğinde zemine eşit olarak yük dağıtabilmesi amacıyla; turba zemin üzerine yaklaşık 8 cm'lik granüler bir dolgu malzemesi serilmiş ve bunun üzerine, toplam uzunluğu yaklaşık 151.6 m olan 14 mm çapında demirler kullanılarak betonarme bir platform imal edilmiştir (Şekil 5.19a, b, c). Boyutları 2.45 x 2.80 x 0.42 m olan platformun kalıbında kullanılan 14 mm'lik demirlerin 1 m'sinin ağırlığı 1.208 kg olup, platformda kullanılan betonun sınıfı C25 ve 1 m^3'ünün ağırlığı 2330 kg'dır. Buna göre, platformun zemine uyguladığı gerilme 9.85 kPa olarak hesaplanmıştır.

Oturma ölçümlerinin alınabilmesi için gözlem platformunun inşası sırasında beton dökülmeden önce yapılan kalıbın 4 köşesine demir çubuklar yerleştirilip sabitlenmiştir. Beton dökümünden önce ve hemen sonra, bu demir çubuklar ile belirlenen 4 noktadan "Leica TC 705 Total Station" aleti kullanılarak oturma ölçümleri alınmaya başlanmıştır. Betonun tam olarak donması için 28 gün beklenmiş olup, daha sonra bu

Şekil 5.19. Gözlem platformunun inşası: (a) beton platformun temel kalıbının yapımı, (b) beton dökümü, (c) betonun platformun kalıbı içerisinde düzeltilmesi, (d) vinç yardımıyla kaya bloklarının platforma yerleştirilmesi, (e) gözlem platformu, (f) oturma miktarının ölçümünden görüntüler.

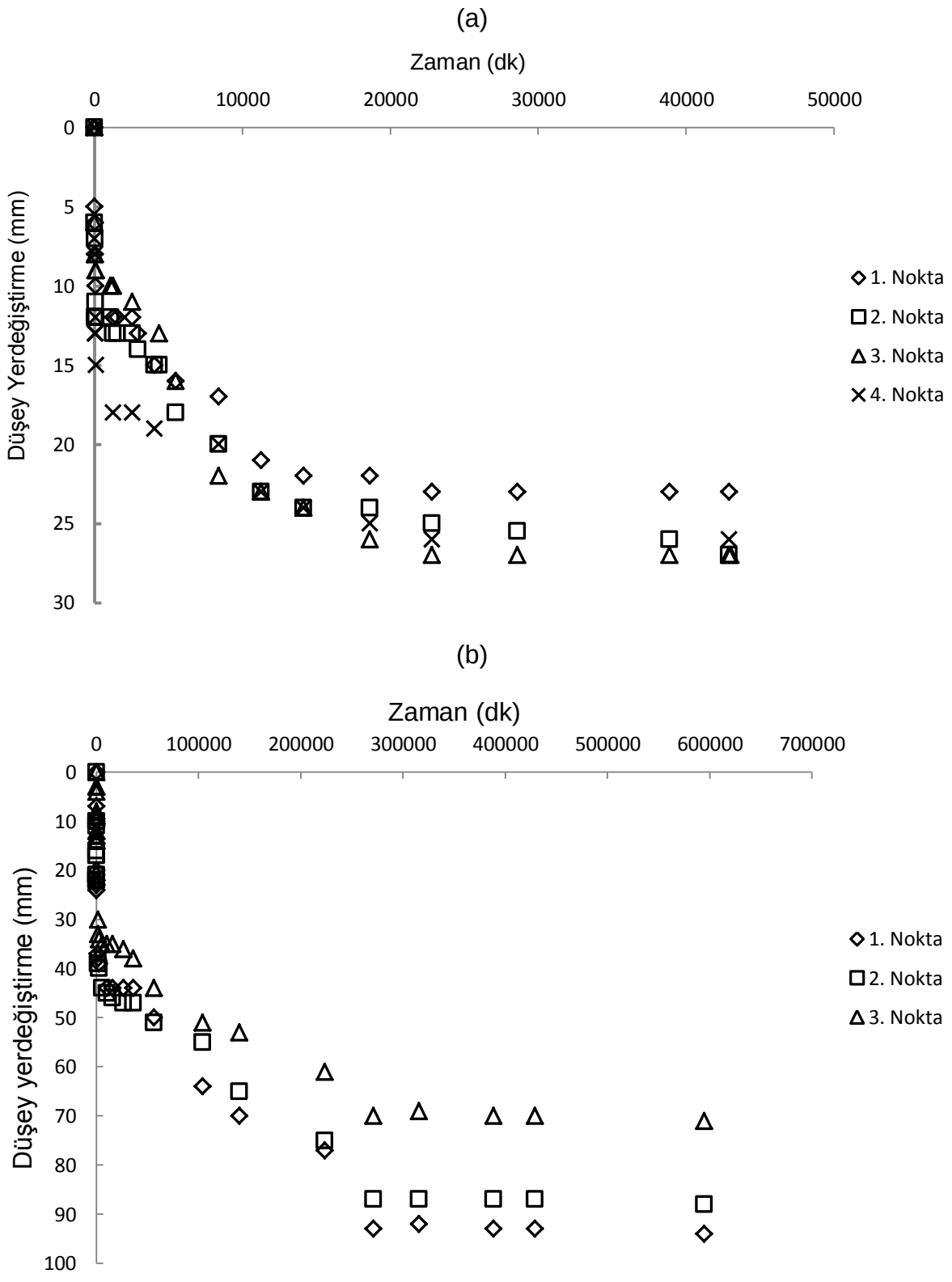
platformun üzerine toplam ağırlığı yaklaşık 17 ton olan dikdörtgen prizması şeklinde iki adet kaya bloğu vinç yardımıyla yerleştirilmiştir (Şekil 5.19d,e). Bloklar yerleştirildikten sonra ani oturmanın izlenmesi amacıyla sık aralıklarla total station kullanılarak oturma ölçümleri (Şekil 5.19f) alınmaya başlanmış ve daha sonra ölçüm aralıkları arttırılmıştır. Bu bloklarla birlikte platformun zemine uyguladığı gerilme 34.12 kPa olarak hesaplanmıştır.

Platform yüklendikten sonra 4. Ölçüm noktası kaya bloklarının arkasında kalmış ve Total Station tarafından görülemez hale gelmiştir. Bu nedenle, platform yüklendikten sonra 4. Ölçüm noktasından her okuma zamanında ölçüm alınamamış olup, ancak belirli dönemlerde bu noktadan ölçüm alınıp diğer noktalardaki oturma miktarı ile karşılaştırılmıştır.

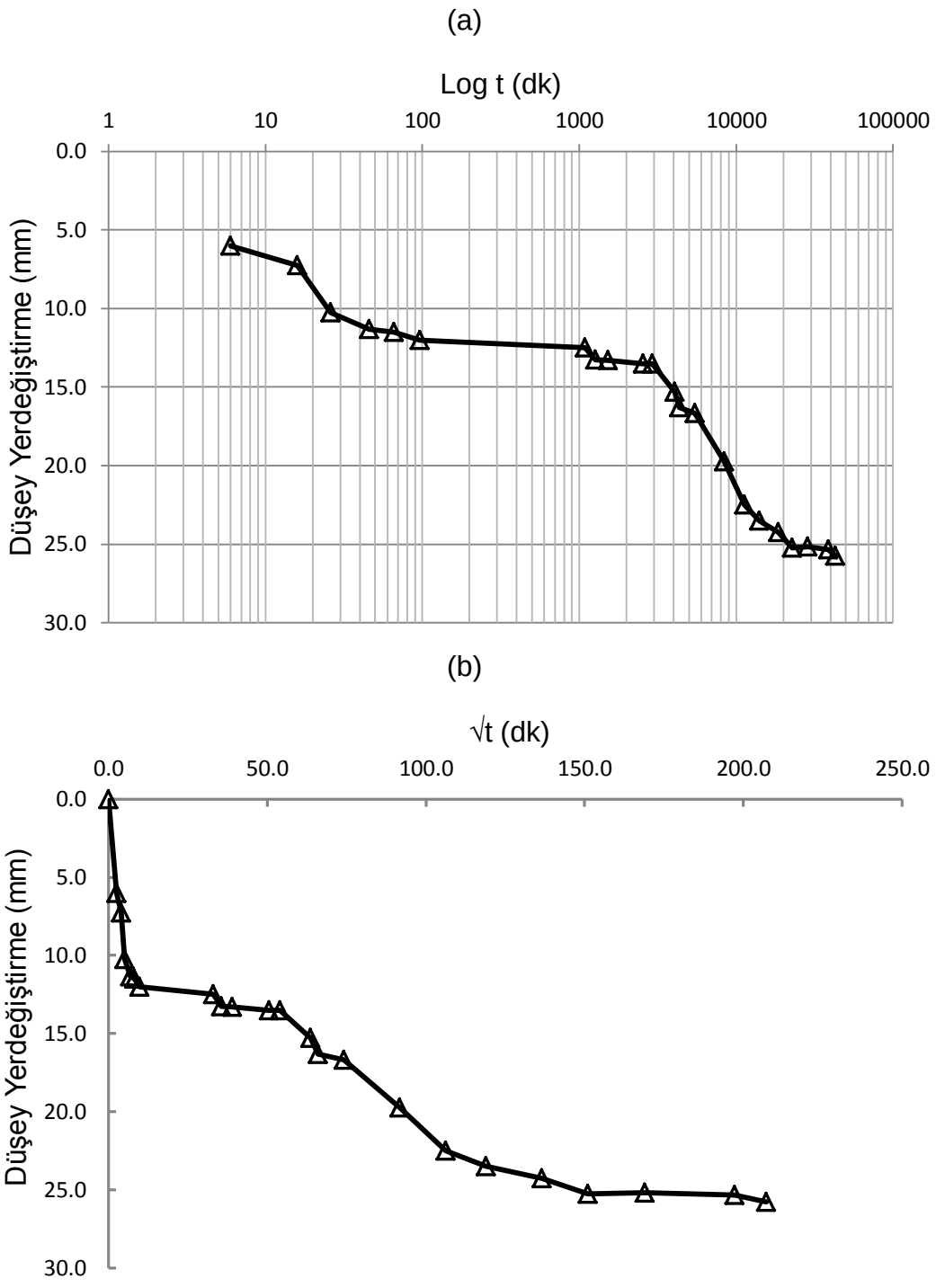
Platformun inşa edildiği 18.02.2014 tarihinden itibaren 7.05.2015 tarihine kadar geçen 443 günde turba zeminde meydana gelen oturmalar Şekil 5.20'deki grafiklerde verilmiştir. Gözlem dolgusundan alınan oturma ölçümlerine göre; platformun inşa edilmesinden itibaren yükleme aşamasına kadar geçen 28 günlük sürede turba zeminde ortalama 26 mm'lik oturma, kaya bloklarının platforma yüklenmesinden itibaren geçen sürede ise 83 mm'lik oturma gerçekleşmiş olup, toplam oturma miktarı 109 mm olarak ölçülmüştür. Bu yükleme aşamalarının her biri için "oturma-log t (zaman)" ve "oturma-$\sqrt{t}$ (zaman) grafikleri de çizilmiş ve sırasıyla Şekil 5.21 ve 5.22'de sunulmuş olup, platformda ölçülen oturma tezin 7. Bölümü'nde değerlendirilmiştir.

5.5. Saha Gözlemleri

Kayseri Serbest Bölge ve yakın çevresinde inşa edilmiş yapıların yükleri altında turba zeminde meydana gelen oturmanın bu yapılara etkisinin boyutları hakkında bir fikir elde edilmesi amacıyla da gözlemler yapılmıştır. Buna göre, bazı yapıların duvarlarında oturma nedeniyle gelişmiş kılcal çatlaklar, bazılarında ise belirgin

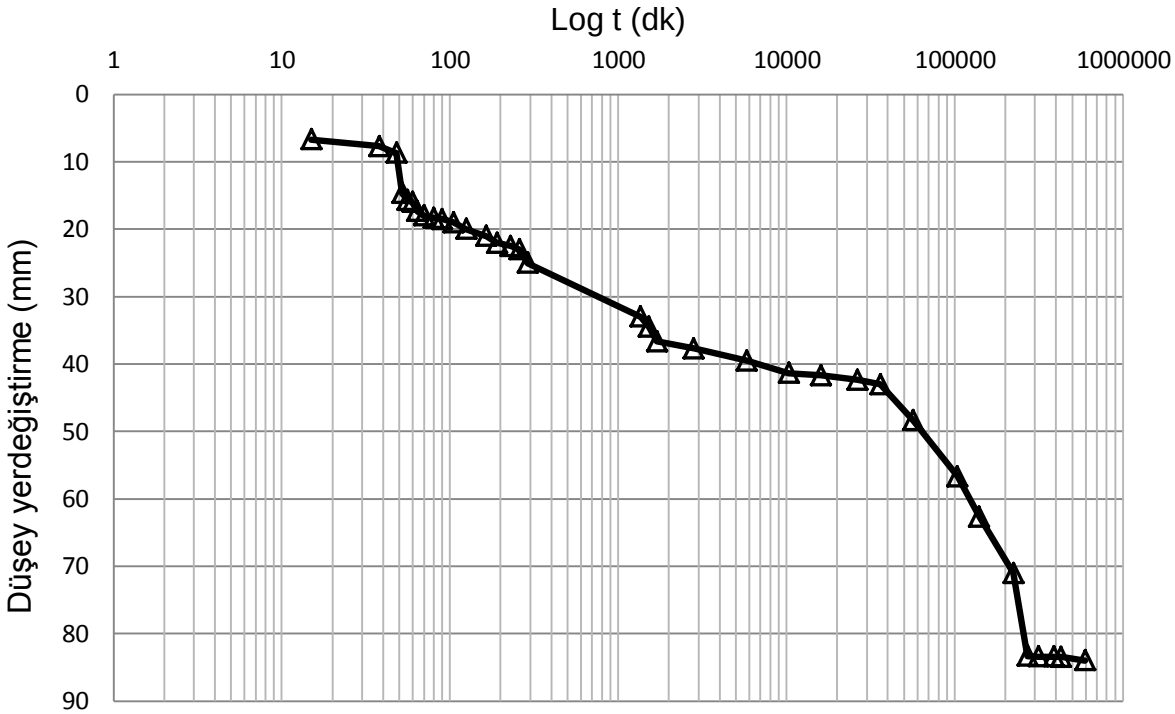


Şekil 5.20. Platformun kaya blokları ile yüklenmesinden (a) önce (28 gün) ve (b) sonra (300 gün) turba zeminde gözlenen zamana bağlı oturma grafikleri.

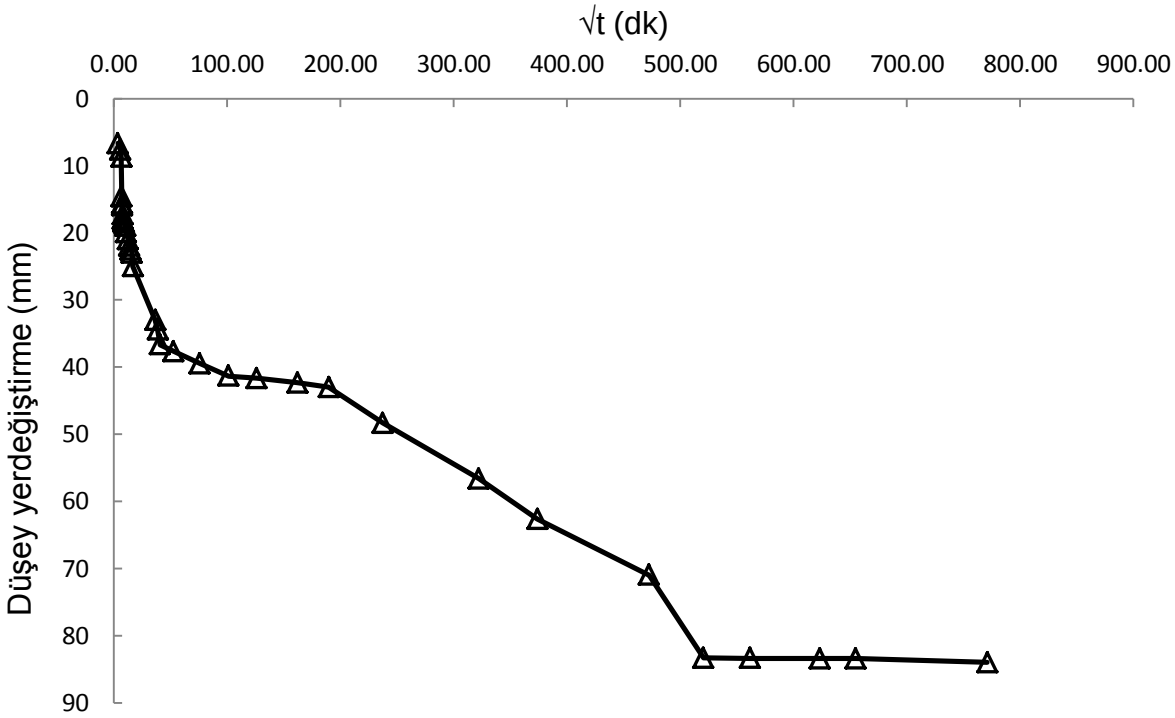


Şekil 5.21. Platformun inşa edilmesinden yükleme aşamasına kadar geçen 28 günde turba zemine ait (a) oturma – log t, (b) oturma - √t grafikleri.

(a)

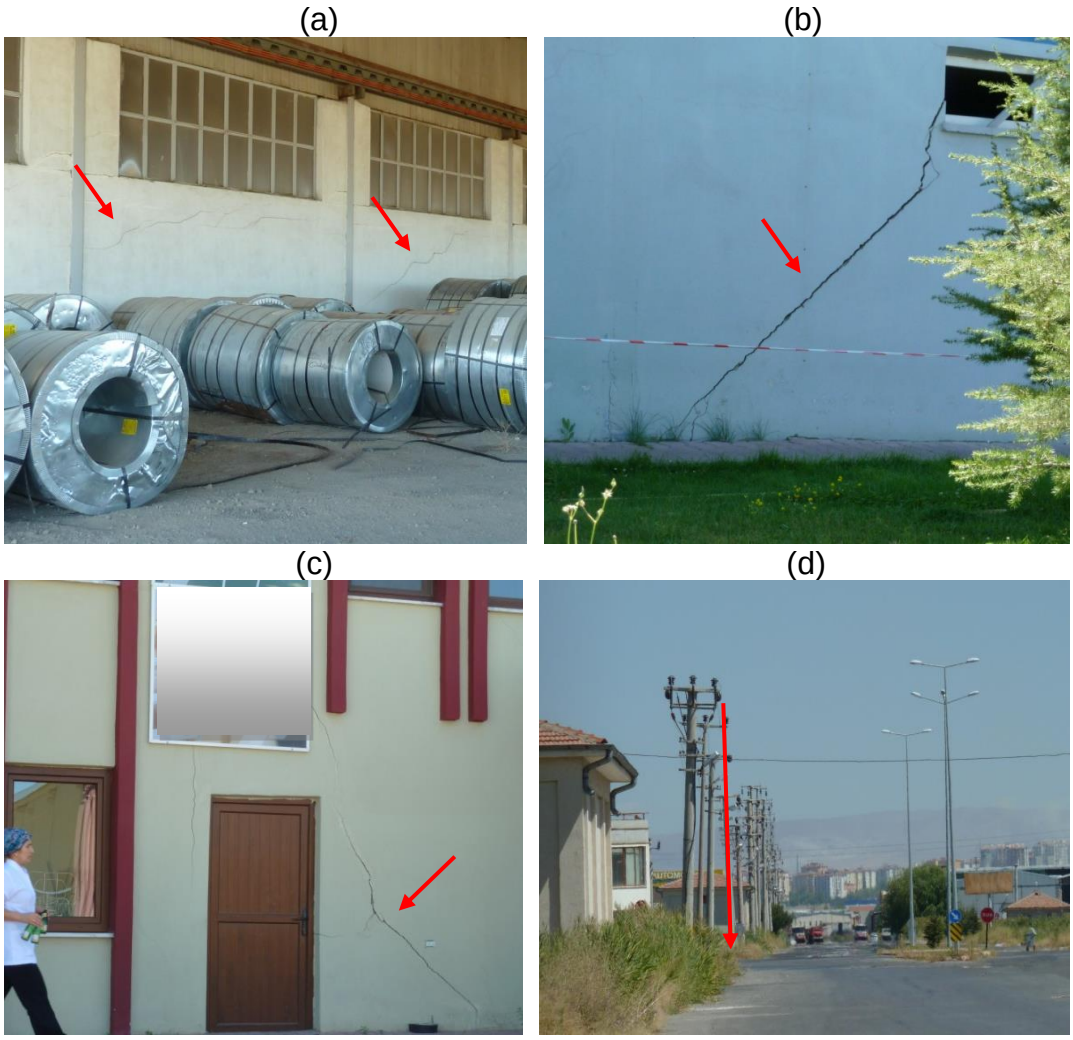


(b)



Şekil 5.22. Platformun kaya bloklarıyla yüklenmesinden sonra turba zemine ait (a) oturma – log t, (b) oturma - √t grafikleri.

çatlaklar gözlenmiştir. Ayrıca, elektrik direklerinde de oturma nedeniyle 2^0 – 4^0'lik düşeyden sapmalar izlenmektedir (Şekil 2.23).



Şekil 5.23. KAYSER alanındaki turba zemindeki oturmanın yapılara etkisiyle ilgili bazı görüntüler: (a) ağır bobinlerde oturma, (b) ve (c) yapı duvarlarında oturmaya bağlı olarak gelişmiş çatlaklar, (d) elektrik direklerinde yana yatmalar.

İnceleme alanında bulunan trafo binasının düşeyden 3^0'lik sapma gösterdiği ve bu yapıda farklı oturmanın gerçekleştiği gözlenmiştir (Şekil 5.24). Yapı üzerinde bir referans noktası baz alınarak yapılan ölçümlere göre yapının yaklaşık 15 cm oturduğu tahmin edilmektedir.

İnceleme alanında karşılaşılan oturma sorununa ilişkin diğer bir örnek de, bir tesisin kendisinin ve hemen yanında bulunan bobinlerin ağırlığı ile binanın zemine doğru batması şeklinde izlenmektedir (Şekil 5.25). Ulusay vd. [10], [11] yaptıkları analizler sonucunda bu bobinlerin altında gözlenen düşey yerdeğiştirme miktarını 25 cm olarak belirlemişlerdir.

Şekil 5.24. İnceleme alanında bir trafo binasındaki farklı oturma.

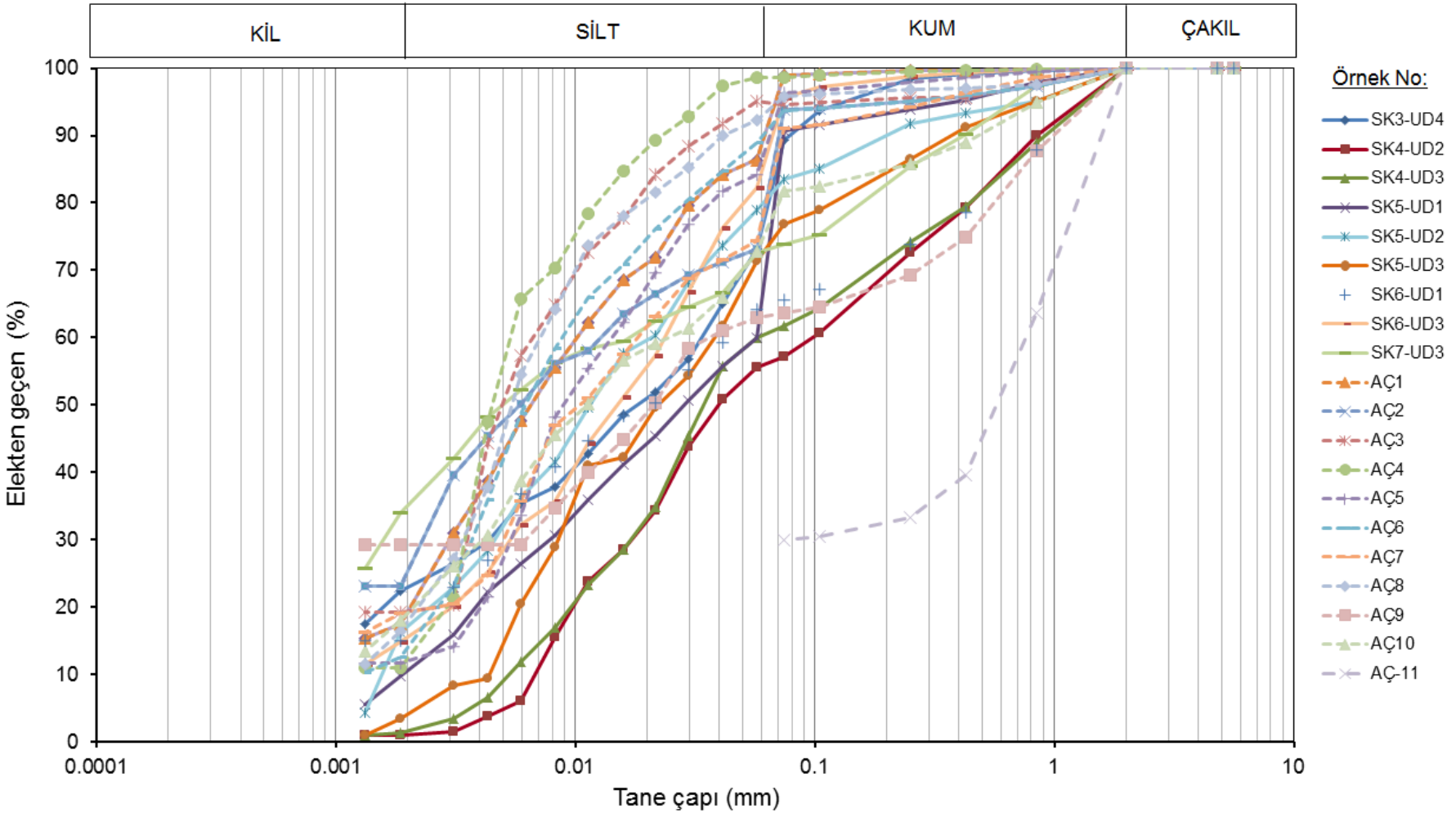
Şekil 5.25. Ağır bobinlerin bulunduğu bir tesis alanında turba zeminde oturma [10].

6. LABORATUVAR DENEYLERİ

Laboratuvar çalışmaları kapsamında, araştırma çukurları ve sondajlardan derlenen turba örneklerinin fiziksel ve indeks özelliklerinin belirlenmesi amacıyla tane boyu dağılımı analizleri, su, kül ve organik madde içerikleri, özgül ağırlık, likit limit tayinleri, X-ışınları kırınım analizleri (tüm kayaç) yapılmış ve SEM görüntüleri çekilmiştir. Bunların yanı sıra, turba zeminlerin makaslama dayanım parametrelerinin belirlenmesi amacıyla doğrudan makaslama deneyleri ve bu zeminlerin oturma davranışının değerlendirilmesi için konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, inceleme alanındaki turba zeminlerin sismik yer tepkisinin değerlendirilmesi için yapılan analizlerde girdi parametresi olarak kullanılan dinamik özellikler ise rezonans kolonu deneyleri yapılarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılacak örneklerin kurutulması aşamasında turbanın içerdiği organik maddenin yanacağı dikkate alınarak, etüvün sıcaklığı yaklaşık 80 ^{0}C'ye ayarlanmış ve kurutma işlemleri bu sıcaklıkta yapılmıştır. ASTM [113] standartlarına göre yapılan bu deneylere ilişkin sonuçlar ve açıklamalar aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur.

6.1. Fiziksel ve İndeks Özellikler

İnceleme alanında yapılan sondajlardan ve açılan araştırma çukurlarından alınan 20 adet turba örneğinin tane boyu dağılımı analizleri yapılmıştır. Bu analizler; kuru iri elek, kuru ince elek ve hidrometre deneyleri olmak üzere üç farklı aşamada gerçekleştirilmiş olup, elde edilen tane boyu dağılımı eğrileri Şekil 6.1' de sunulmuştur. Buna göre, incelenen örneklerin ağırlıklı olarak silt tane boyutundaki malzemeden oluştukları, ayrıca kil ve kum tane boyutunda malzemeyi de içerdikleri belirlenmiştir. Turba örneklerinin kum tane boyu olarak belirlenen kısmını, çoğunlukla, canlı kavkıları oluşturmaktadır. Hidrometre deneyleri sırasında turba zeminin içerdiği lifler su içerisinde dağılarak/saçınım göstererek, odunumsu bileşenler ise şişerek zemin tanelerinden farklı bir çökelme davranışı sergilemiştir.



Şekil 6.1. Sondajlardan (SK) ve araştırma çukurlarından (AÇ) alınmış turba örneklerinin tane boyu dağılımı eğrileri.

Araştırma çukurlarından ve sondajlardan alınan 133 adet turba ve siltli kil örneklerinin farklı derinliklerdeki su içerikleri, örneklerin suyunu kaybetmesine izin verilmeden, örnekleme yerinin hemen yakınında konuşlandırılan bir araç içinde taşınan hassas terazi yardımıyla yerinde (arazide) tayin edilmiştir. Çizelge 6.1'de verilen deney sonuçlarına göre; örneklerin su içerikleri derine doğru inildikçe artış göstermekte, ancak turbadan killi birime geçildiğinde ani bir şekilde azalmaktadır. İnceleme alanında bulunan turba zeminlerin yüzeye yakın derinliklerde su içeriği değerleri %71.7 ile % 178.2 arasında değişirken, daha derinlerde %135.5 ile %376 arasında değişim göstermektedir. Turba seviyesi için ortalama su içeriği %208.5 olarak belirlenmiştir. Bu değer, Ajlouni [6] tarafından turba zeminlerin su içeriği aralığı olarak belirtilen %200 - %2000 değerlerinin alt sınırına yakındır.

Turba ve turbanın altında yer alan siltli-killi seviyenin birim hacim ağırlıkları sondajlardan ve araştırma çukurlarından alınan 80 adet örselenmemiş örnek üzerinde tayin edilmiş olup, sonuçlar Çizelge 6.2'de sunulmuştur. Buna göre; inceleme alanındaki turbaların birim hacim ağırlıkları 9.0 ile 12.6 kN/m^3 arasında değişim göstermekte olup, ortalama birim hacim ağırlık 10.5 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. Turba zeminin hemen altında bulunan siltli killi seviyenin ortalama birim hacim ağırlığı ise 18.1 kN/ m^3 olarak hesaplanmıştır. Mesri vd. [54] tarafından da belirtildiği gibi, turba zeminlerin birim hacim ağırlıklarının neredeyse suyun birim hacim ağırlığı ile aynı olduğu görülmektedir. Munro [2], amorf ve taneli turbaların birim hacim ağırlıklarının 12 kN/ m^3, odunumsu lifli turbaların ise 6 kN/ m^3 olduğunu belirtmiştir.

Arazi çalışmaları kapsamında yapılan sondajlar ve açılan araştırma çukurlarından alınan 63 adet turba örneğinin özgül ağırlıkları ve likit limitleri de tayin edilmiş olup; deney sonuçları Çizelge 6.3'te verilmiştir. Buna göre, inceleme alanında bulunan turba zeminlerin özgül ağırlıkları 1.48 ile 2.11 ve likit limitleri ise %103.9 ile 204.5 arasında değişim göstermektedir. Belirlenen likit limit değerlerinin literatürden derlenmiş ve Çizelge 3.1'de verilen likit limit değerlerinin değişim aralığının alt sınırında yer aldığı, özgül ağırlık değerlerinin ise bazı araştırmacıların sonuçlarından

daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun inceleme alanındaki bazı turba seviyelerinin silt-kil türü malzeme içermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 6.1. Araştırma çukurları ve sondajlardan alınan örneklerin farklı derinliklerdeki su içerikleri (AÇ: Araştırma çukuru, SK: Sondaj).

Zemin Türü	Örnek No.	Derinlik (m)	Örnek Sayısı	Ortalama su içeriği (değişim aralığı) (%)
Turba	AÇ-1	1.2	4	198.6 (167.9-231.1)
	AÇ-2	1	3	76.5 (71.7-79.3)
	AÇ-2	2	3	170 (162.2-177.1)
	AÇ-3	1.5	6	157.3 (151.1-163.8)
	AÇ-4	1	6	141.9 (114.4-154.6)
	AÇ-5	1	6	149.5 (143-156)
	AÇ-6	1.3	6	184.2 (154.9-198.6)
	AÇ-7	2	6	216.1 (206-226.8)
	AÇ-8	0.5	3	129 (126.8-130.7)
	AÇ-8	1	3	115 (113.9-116.8)
	AÇ-8	1.5	3	178.2 (169.8-183.1)
	AÇ-9	1.5	3	118.8 (109.7-124.3)
	AÇ-9	2	3	278.1 (276.7-279.5)
	AÇ-9	2.5	3	280.7 (273.8-284.6)
	AÇ-10	1.5	3	158 (153.9-161.2)
	AÇ-10	2.2	3	291.6 (288.1-297.4)
	AÇ-11	1.3	3	147.7 (145.9-151)
	AÇ-11	2	3	293.6 (281.8-303.6)

Çizelge 6.1. (devam ediyor)

Zemin Türü	Örnek No.	Derinlik (m)	Örnek Sayısı	Ortalama su içeriği (değişim aralığı) (%)
Turba	SK-3	2	3	216.4 (205.6-227.2)
		3	3	314.7 (311-319.5)
		4	3	363.7 (342.6-383.9)
Kil	SK-3	6	3	33.9 (33.3-34.4)
Turba	SK-4	2	3	282.6 (275-296.8)
		3	3	141.6 (140.7-142.5)
		5	3	280.4 (272.8-286.3)
Kil	SK-4	6.5	3	376 (371.1-381)
Turba	SK-5	2	3	209.6 (197.9-215.8)
		3.5	3	279.9 (204.3-350)
		5	3	289 (281.7-302.4)
Kil	SK-5	6.5	3	52.2 (50.0-53.8)
Turba	SK-6	2.5	3	270.5 (239.1-291.1)
		4	3	256.3 (247.1-264.9)
Kil	SK-6	6	3	28.1 (27-29.6)
Turba	SK-7	2	3	135.5 (124.5-144.6)
		2.6	3	147.7 (143-153.5)
		4.5	3	205 (191.2-225.3)
Kil	SK-7	7.5	3	29.3 (28.3-30.6)

Çizelge 6.2. İnceleme alanından alınan bazı turba örneklerinin ortalama birim hacim ağırlık değerleri.

Örnek No.	Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	Örnek Sayısı
AÇ-3	10.9	8
AÇ-4	11.9	1
AÇ-6	11.4	9
AÇ-7	10.7	8
AÇ-10	9.0	9
SK3-UD1	10.4	1
SK3-UD2	10.0	1
SK3-UD3	10.6	9
SK3-UD4 (killi)	17.3	5
SK4-UD1	10.5	1
SK4-UD2	10.8	9
SK4-UD3	11.1	5
SK5-UD1	9.2	1
SK5-UD2	11.5	9
SK5-UD3	10.2	1
SK6-UD1	9.0	1
SK6-UD3 (killi)	18.9	1
SK6-UD3	12.6	1

Tezin 3. Bölümü'nde de değinildiği gibi, turba zeminlerin Atterberg limitlerinin belirlenmesinde bazı güçlüklerle karşılaşılmaktadır. Tez çalışması kapsamında Cassagrande yöntemiyle yapılan likit limit tayinlerinde, likit limit deney aletine yerleştirilen turba zeminin lifli yapısı nedeniyle bazı örneklerde oyuk açma işlemi sırasında sorun yaşanmıştır. Ayrıca, deney aletinin kabının düşüşleri sırasında turba zeminin içerdiği su örneğin yüzeyine çıkmış ve örnekte 1 cm'lik kapanmanın gerçekleştiği vuruş sayısı belirlenememiştir. Bu güçlüklerle karşılaşılmaması amacıyla, turba zeminlerin likit limit tayinleri koni batma yöntemiyle yapılmıştır.

İnceleme alanında bulunan turba zeminlerin organik madde içeriğine göre sınıflandırılması amacıyla Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Kömür Laboratuvarı'nda 60 adet turba örneğinin kül ve organik madde içeriği tayinleri yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 6.3'te sunulmuş olup, bu sonuçlara göre

Çizelge 6.3. İnceleme alanındaki turba zeminlerin bazı fiziksel, indeks ve tanımlayıcı özellikleri.

Örnek No.	Kül İçeriği (%)	Organik Madde İçeriği (%)	LL (%)	Özgül Ağırlık
AÇ-1	*76.7 (76.5-77.0)	*23.3 (23.0- 23.6)	130.9	*1.81 (1.73-1.94)
AÇ-2	76.5 (76.4-76.6)	23.5 (23.4-23.7)	107.1	2.06 (2.02-2.11)
AÇ-3	73.5 (73.0-74.0)	26.5 (26.0-26.9)	147.7	1.85 (1.79-1.94)
AÇ-4	71.4 (71.3-71.5)	28.6 (28.5-28.7)	138.6	1.78 (1.75-1.81)
AÇ-5	57.1 (56.8-57.3)	42.9 (42.7-43.2)	163.5	1.70 (1.66-1.77)
AÇ-6	71.1 (70.9-71.3)	28.9 (28.7-29.0)	126.9	1.8 (1.72-2.04)
AÇ-7	58.6 (58.2-58.9)	41.4 (41.1-41.8)	204.5	1.56 (1.50-1.61)
AÇ-8	73.7 (73.6-73.9)	26.3 (26.1-26.4)	138.9	1.72 (1.63-1.78)
AÇ-9	49.8 (49.7-49.9)	50.2 (50.1-50.3)	172.1	1.59 (1.58-1.60)
AÇ-10	59.6 (59.4-59.9)	40.42 (40.1-40.6)	144.9	1.77 (1.73-1.79)
AÇ-11	45.68 (45.6-45.7)	54.37 (54.34-54.39)	143.9	1.50 (1.48-1.52)
SK3-UD2	41.44 (41.1-41.9)	58.56 (58.1-58.9)	-	1.80 (1.76-1.91)
SK3-UD3	49.34 (49.2-49.6)	50.661 (50.4-50.8)	155.5	1.75 (1.65-1.81)
SK3-UD4**	-***	-	42.7	2.56 (2.38-2.77)
SK4-UD1	49.07 (49.0-49.2)	50.93 (50.9-51.0)	-	1.79 (1.66-1.87)
SK4-UD2	54.19 (54.14-5.25)	45.81 (45.8-45.9)	144.7	1.74 (1.60-1.79)
SK4-UD3	61.19 (60.8-61.4)	38.81 (38.6-39.2)	134.6	1.91 (1.87-1.97)
SK5-UD1	64.31 (64.1-64.5)	35.69 (35.5-35.9)	-	1.91 (1.82-1.96)
SK5-UD2	69.77 (69.2-70.1)	30.23 (29.9-30.8)	108.5	1.60 (1.56-1.64)
SK5-UD3	57.67 (57.5-58.0)	42.33 (42.0-42.5)	155.9	1.59 (1.52-1.66)
SK6-UD1	60.25 (57.6-62.7)	39.75 (37.3-42.4)	103.9	2.02 (1.93-2.11)

*Deneylerden elde edilen sonuçların ortalama değerleri verilmiştir. Parantez içindeki değerler değişim aralığını temsil etmektedir. ** Siltli-killi birimden alınmış örnek. ***Örnek yetersizliği nedeniyle tayin edilememiştir.

inceleme alanındaki turba zeminlerin kül içeriğinin %41.1-%77.0, organik madde içeriğinin ise ağırlıkça %23.0-%58.9 arasında değiştiği saptanmıştır. Organik madde içeriği turba zeminlerin saflık derecesini ifade etmektedir. Saf bir turba örneğinin yüksek likit limit ve organik madde içeriği ile düşük özgül ağırlık değerlerine sahip olması beklenmektedir [6]. İnceleme alanındaki turbaların bu özellikleri değerlendirildiğinde, organik madde içeriklerinin ve likit limitlerinin turba zeminler için verilen değişim aralığı değerlerinin alt sınırlarında olması dikkate alınarak inceleme alanındaki turba zeminin saf olmadığı söylenebilir.

6.2. İncelenen Turbanın Tanımı, Sınıflandırılması, Jeolojik ve Mineralojik Özellikleri

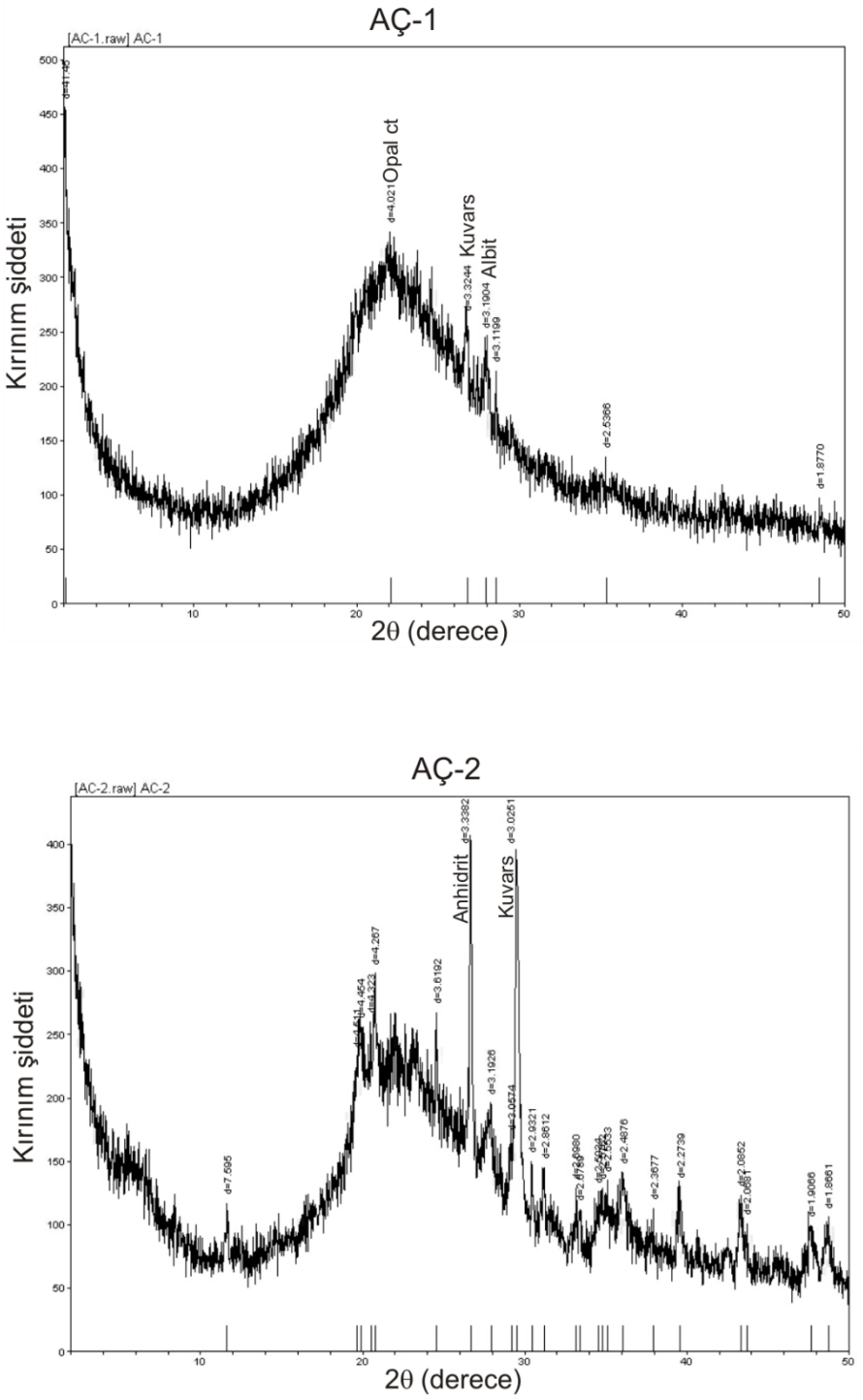
Araştırma çukurları ve sondajlarda yapılan gözlemlere göre inceleme alanında iri lifli, ince lifli, bol miktarda canlı kavkıları ile yaprak ve odunsu parçalar içeren kahverengimsi kötü kokulu ve amorf olmak üzere 5 farklı özellikte turba türü ayırtlanmıştır. İncelenen turbaların özellikle yüzeye yakın seviyelerde organik madde içeriğinin değişkenlik gösterdiği ve lifli heterojen bir yapıya sahip olduğu; ancak derinlik arttıkça, organik madde içeriği değişken olmakla birlikte, bir miktar artış göstererek turbaların hümifikasyon derecesinin de arttığı, nispeten daha homojen ve amorf bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durumun, turba zemin içinde kalınlığı yaklaşık 6-8 cm arasında değişen kil bantlarının bulunması nedeniyle yüksek oranda silt-kil içermesinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

Alınan örneklerin sınıflandırılmasında; turba ve organik zeminler için Çizelge 2.4'te verilen kül ve organik madde içeriğine bağlı değişik sınıflama sistemlerinden yararlanılmıştır. Turba örnekleri Raya ve Jarret [32] tarafından önerilen sınıflamaya göre "organik zemin", Wüst [31] sınıflamasına göre "yüksek kül içerikli turba-organik maddece zengin sediman", Jarret [36] sınıflamasına göre "turbalı çamur-siltli killi çamur", Kanada Zemin Sınıflama Sistemi [28]'ne göre ise "organik zemin-mineralli zemin" sınıfına girmektedir. Von Post ve Granlund [27] sınıflaması (bkz. Çizelge 2.3) dikkate alınarak yapılan değerlendirmelerde ise, yüzeye yakın kesimlerde H3-H4,

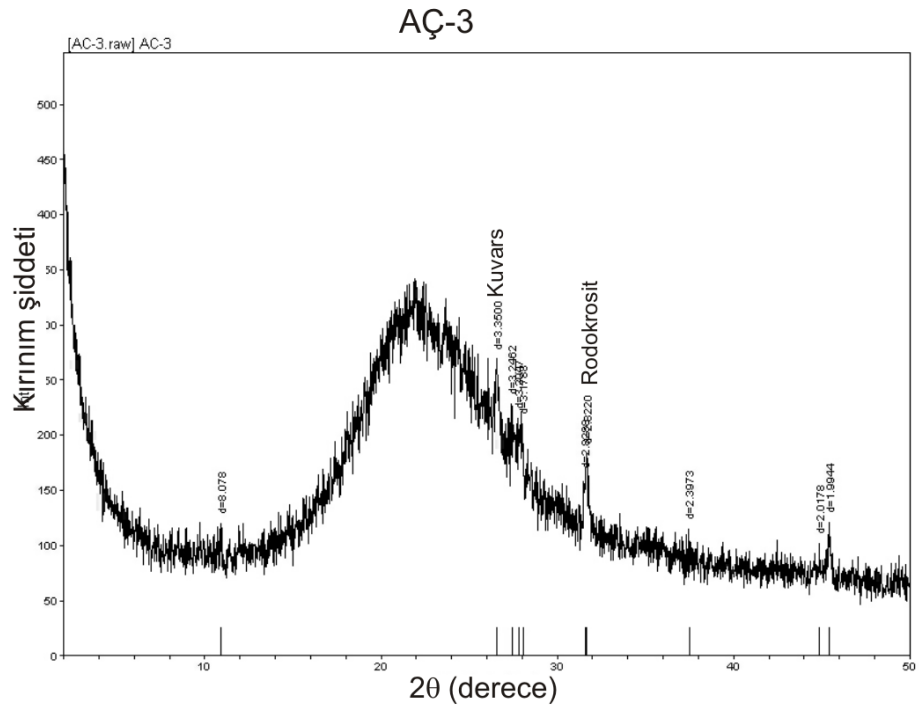
daha derinlere doğru H7'ye kadar değişen sınıflarda yer alan turbaların varlığı saptanmıştır.

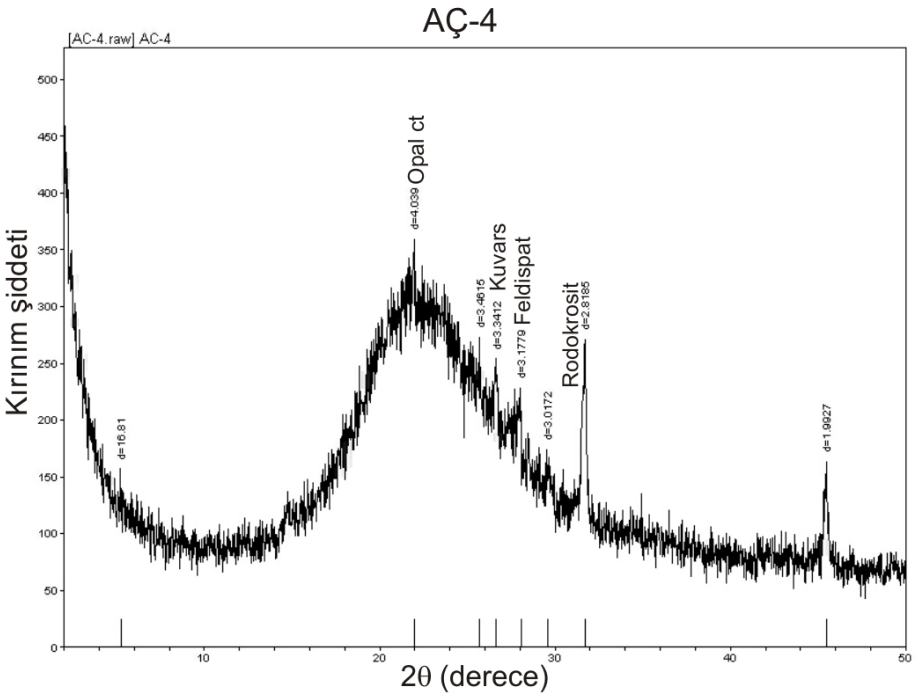
Turba zeminlerin mineral içeriğinin belirlenmesi amacıyla, her araştırma çukurundan alınan birer örnek üzerinde Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü X-Işınları Laboratuvarı'nda X-ışınları kırınım analizleri (tüm kayaç) gerçekleştirilmiş olup, örneklerin X-Işınları kırınım analizi difraktogramları Şekil 6.2'de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre; turba örneklerinin kuvars, kalsit, feldispat, jips, anhidrit, halit, opal ve rodokrosit mineralleri ile organik madde içeriğinin bir göstergesi olan amorf madde içerdikleri belirlenmiştir. Bu analizlerde, örnek içerisindeki minerallerin yüzde oranlarının verilebilmesi için tüm minerallerin yansıma değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu değerlerin tüm örneklerde belirlenememesi ve örneklerin amorf madde içermesi nedeniyle minerallerin yüzde oranları hesaplanamamıştır.

İnceleme alanındaki turba zeminlerin dokusal özelliklerinin belirlenmesi ve iç yapısının incelenmesi amacıyla SK5 no.'lu sondajdan ve AÇ 10 no.'lu araştırma çukurundan alınmış 4 turba örneğinin Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Taramalı Elektron Mikroskop Laboratuvarı'nda taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri çekilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde; turba örneklerinin silisyumca zengin, volkanik katkılı bir bağlayıcı malzeme içerisinde yoğun miktarda diatome fosili (Şekil 6.3 a-b) ve alg parçaları ile yer yer dokusu bozulmamış lif parçalarını (Şekil 6.3 b-c-d) içerdiği anlaşılmaktadır. Turba zeminlerin içerdiği diatome kavkılarının ve bitkisel lif parçacıklarının gözenekliliğinin çok fazla olması, turba zeminlerin boşluk oranını arttırmakta ve sıkışabilirliğini etkilemektedir.

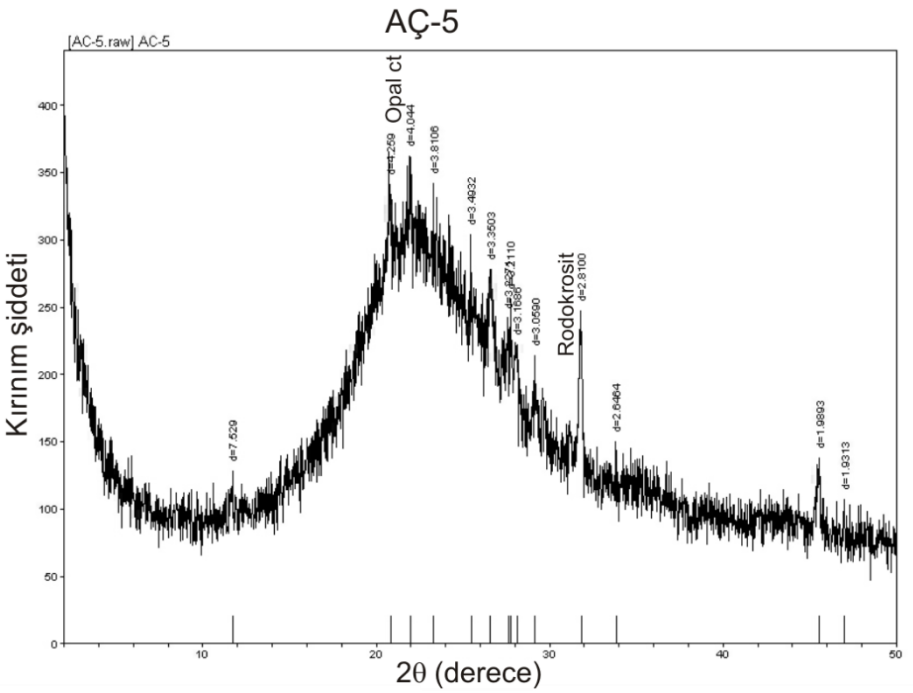


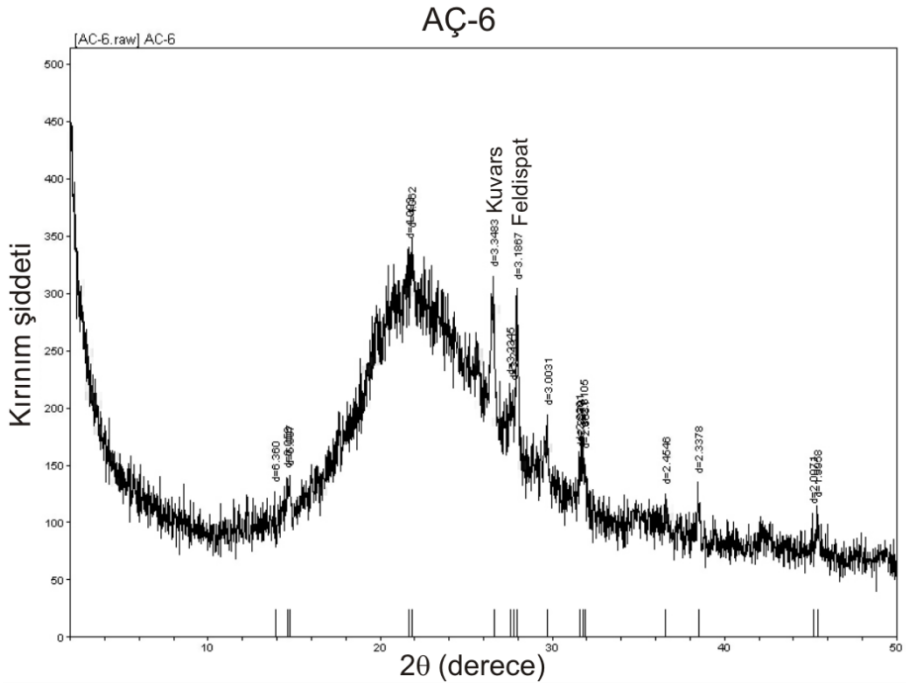
Şekil 6.2. Araştırma çukurlarından alınan turba örneklerinin X-ışınları kırınım analizi (tüm kayaç) difraktogramları.



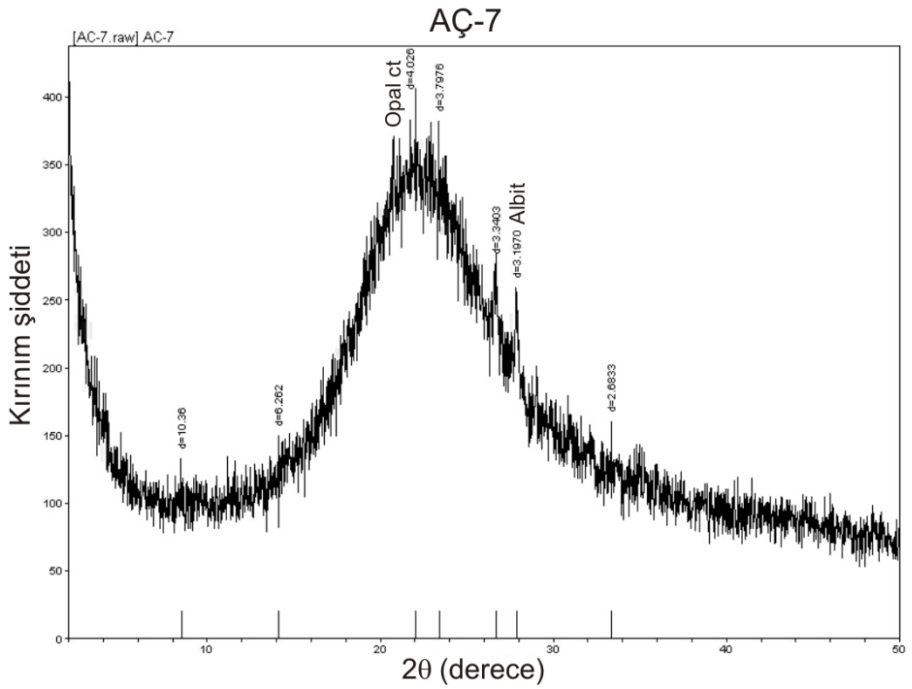


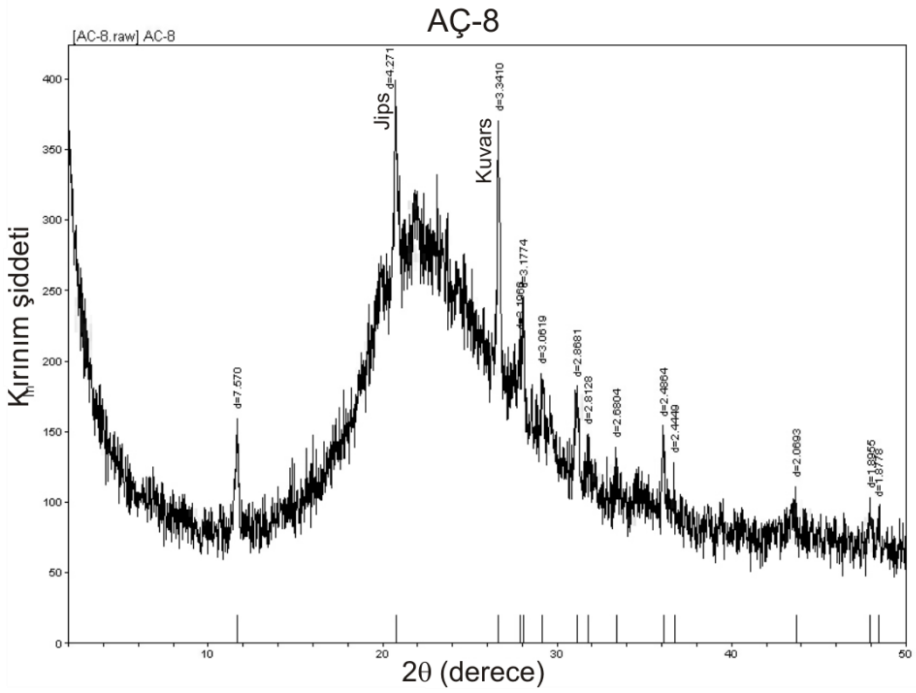
Şekil 6.2. (devam ediyor)



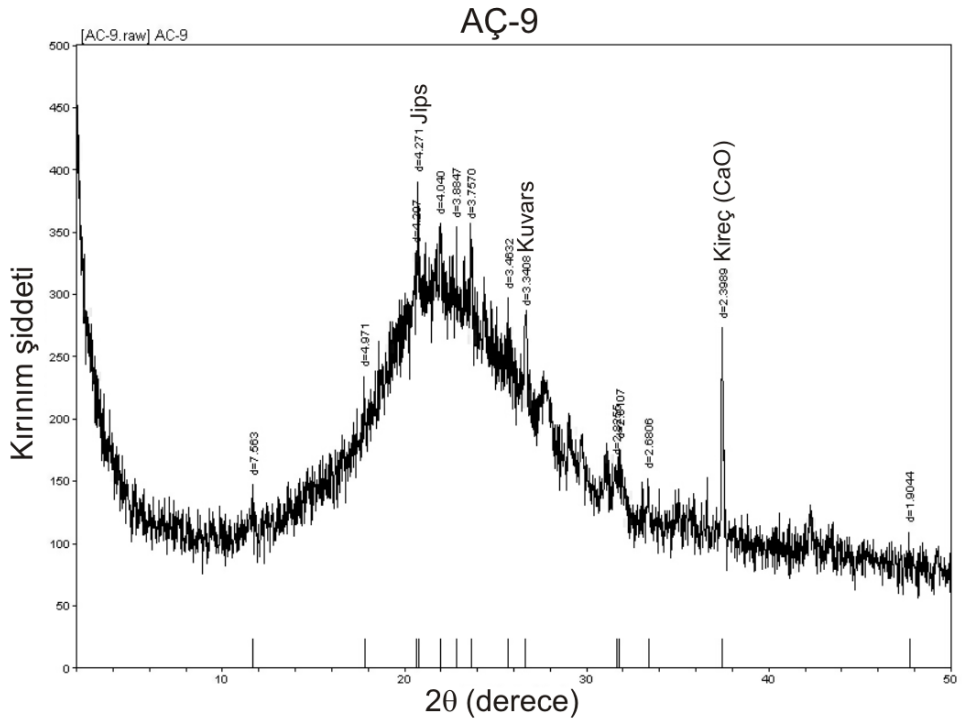


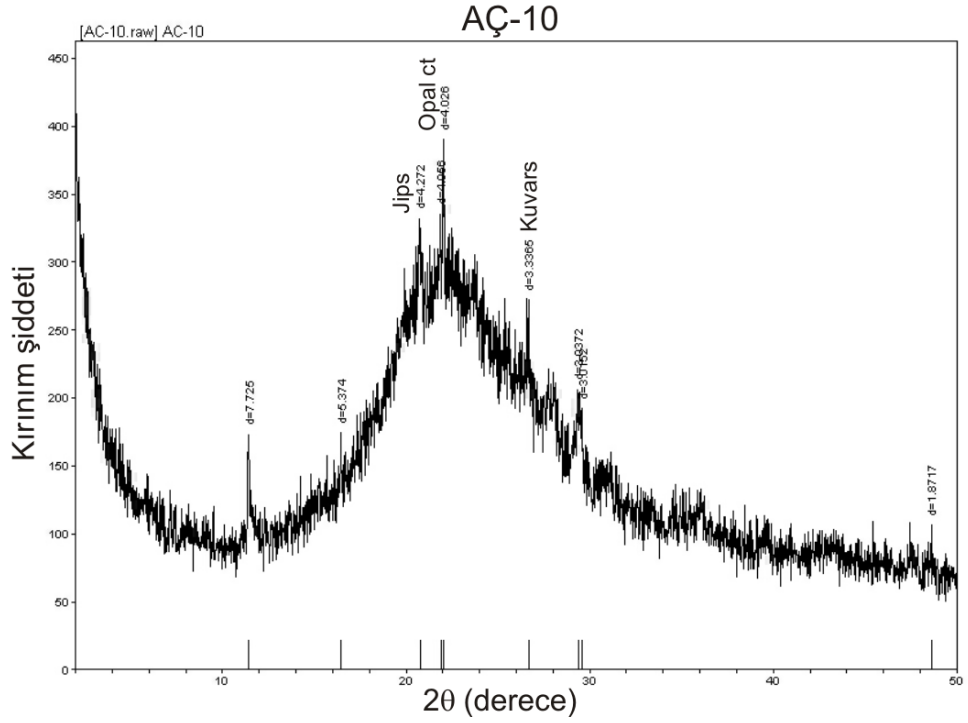
Şekil 6.2. (devam ediyor)



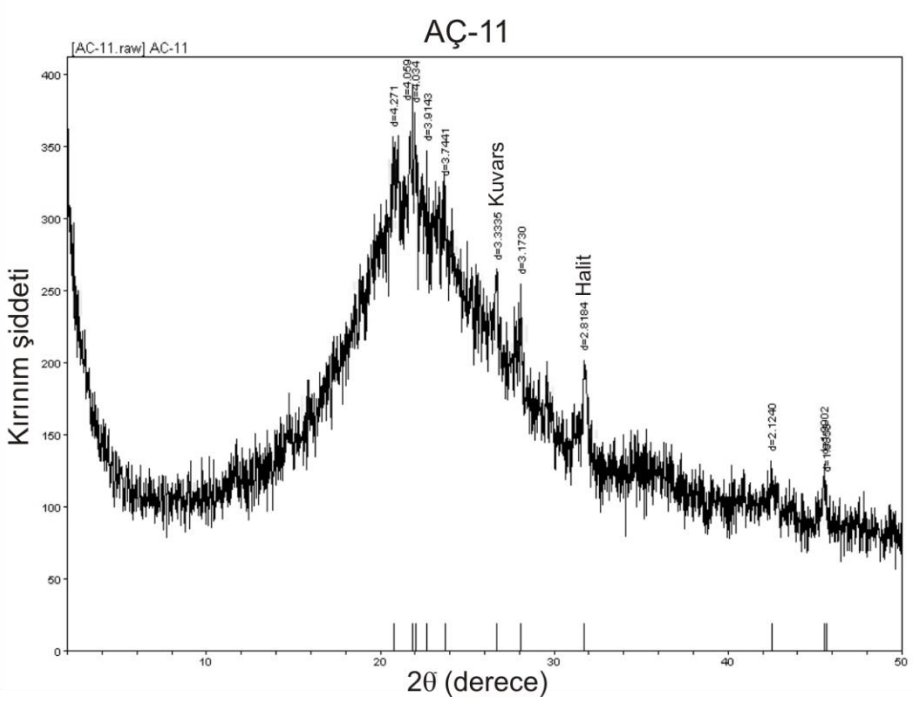


Şekil 6.2. (devam ediyor)





Şekil 6.2. (devam ediyor)

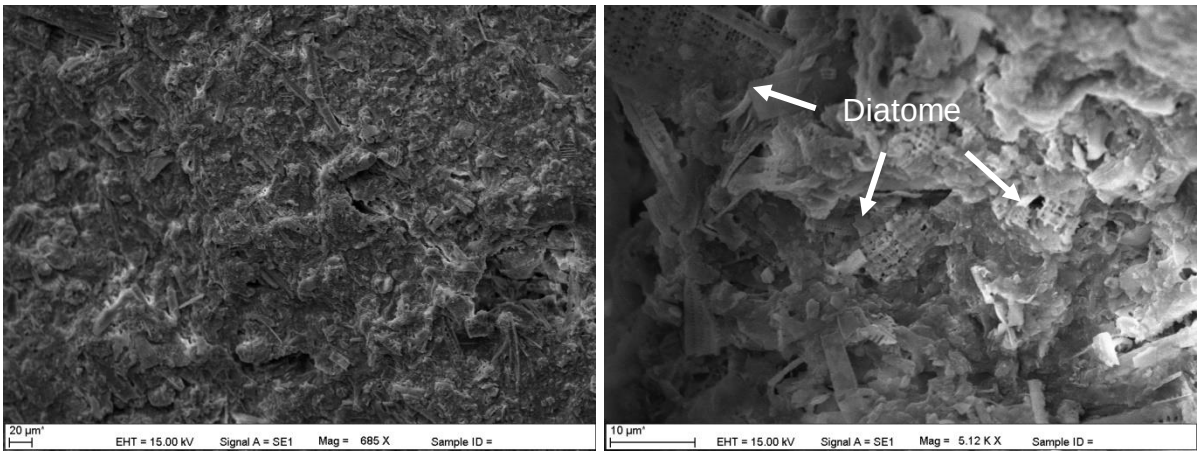


Şekil 6.2. (devam ediyor)

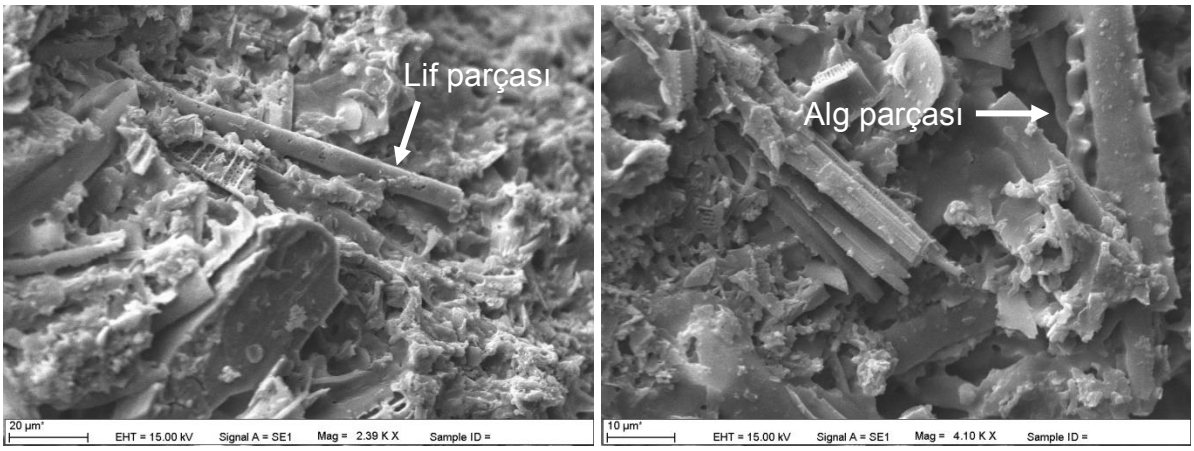
6.3. Zemin Makaslama Deneyleri

Turba zeminlerin makaslama dayanımı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla araştırma çukurlarından ve sondajlardan alınan örselenmemiş 6x6x2 cm boyutlarındaki 64 örnekten oluşan toplam 14 deney seti üzerinde, deformasyon kontrollü ve artık makaslama kapasiteli zemin makaslama cihazı kullanılarak konsolidasyonlu-drenajlı (7 deney seti) ve konsolidasyonsuz-drenajsız (7 deney seti) koşullarda doğrudan makaslama deneyleri yapılmıştır. Konsolidasyonlu-drenajlı deneyler sırasında drenajın sağlanması için 0.02 mm/dk'lık çok düşük bir makaslama hızı uygulanırken, drenajsız koşullarda yapılan deneylerde makaslama hızı 0.5 mm/dk olarak seçilmiştir. Örnekler konsolidasyonlu-drenajlı deneye tabii tutulmadan önce belirli düşey yükler altında yaklaşık 15 saatlik süreyle konsolidasyona maruz bırakılmışlardır. Deneyler sonucunda her örnek için elde edilen makaslama gerilmesi-makaslama birim deformasyonu grafikleri incelendiğinde yüksek normal gerilmeler altında doruk ve artık makaslama dayanımlarının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir (Şekil 6.4).

(a)

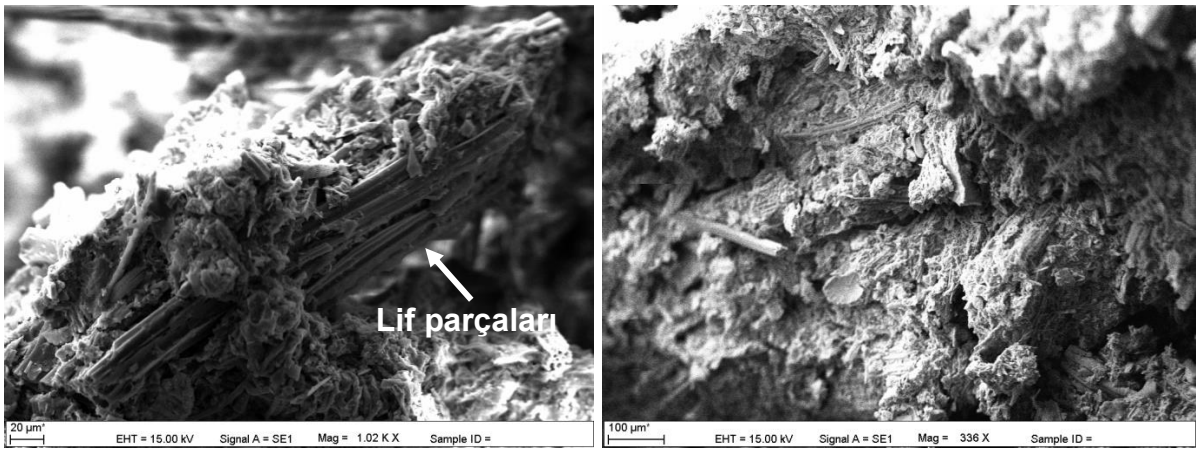


(b)

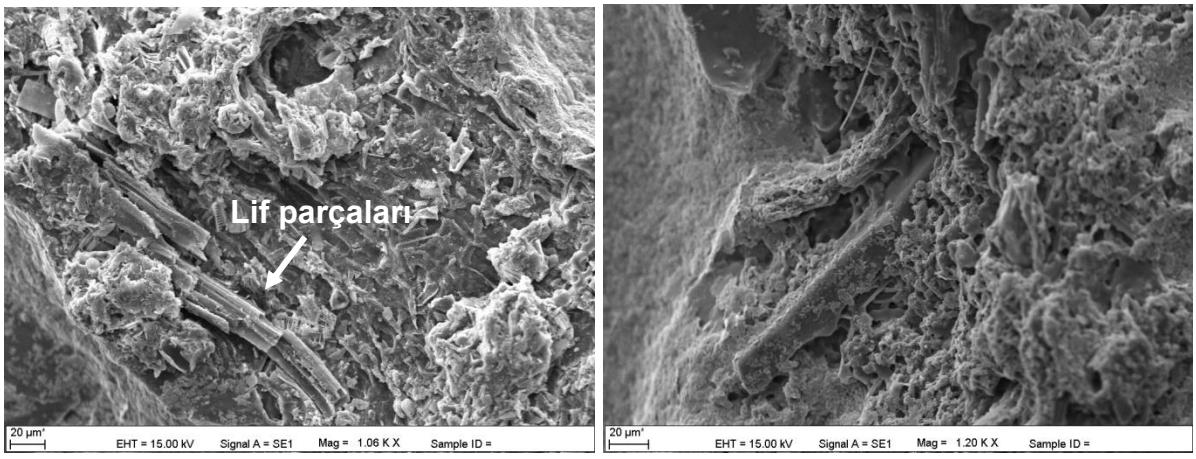


Şekil 6.3. İnceleme alanında (a) AÇ-10 no.lu araştırma çukuru ile (b) SK5-UD1, (c) SK5-UD2 ve (d) SK5-UD3 no.lu sondajlardan alınan turba örneklerinin SEM görüntüleri.

(c)

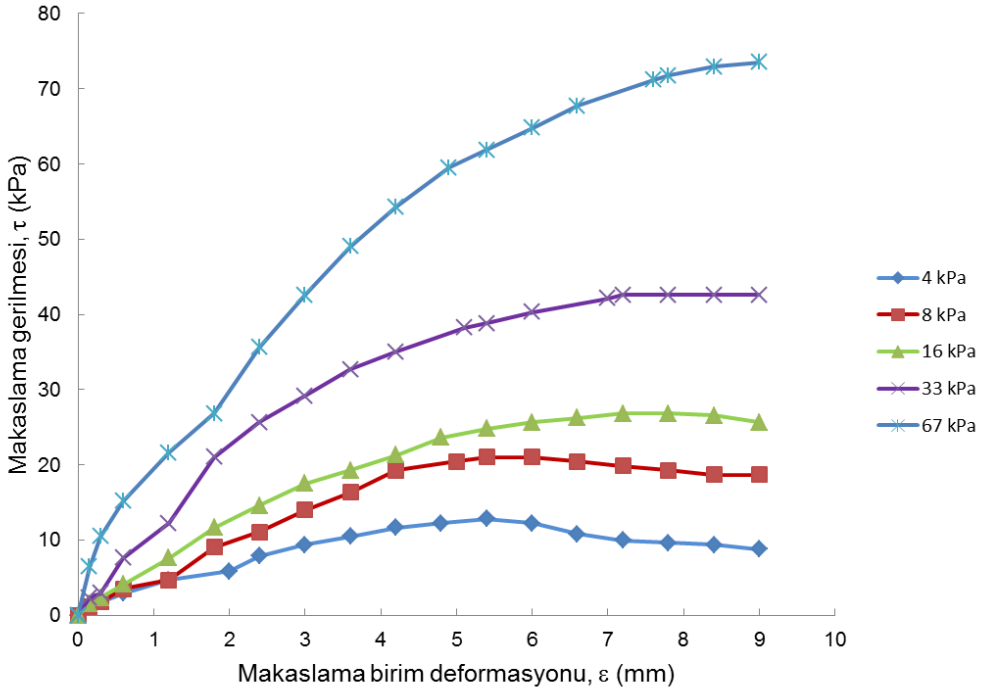


(d)

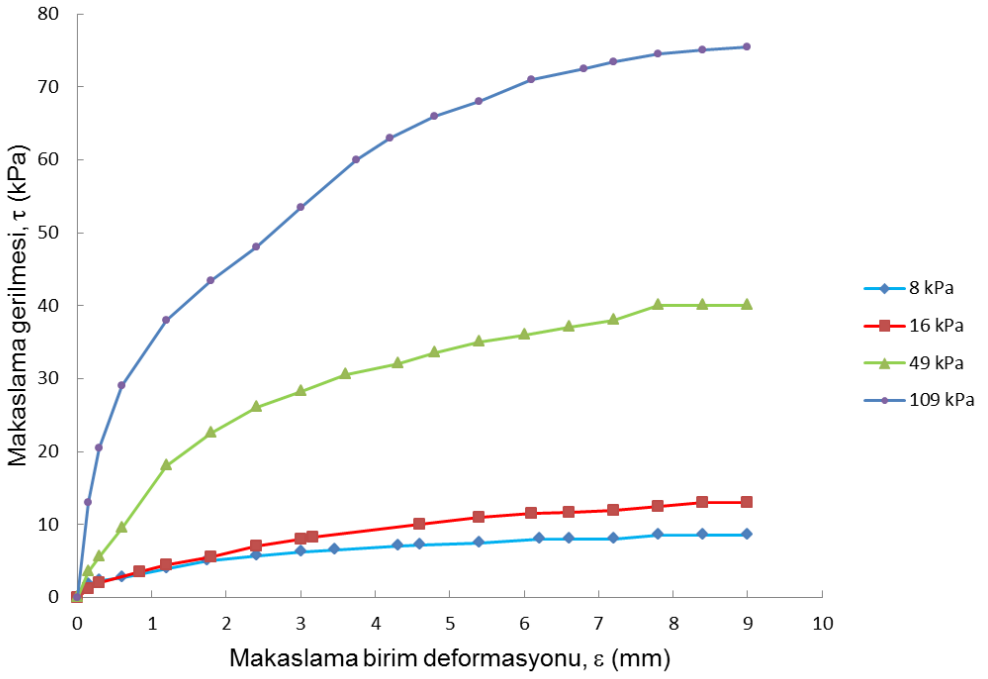


Şekil 6.3. (devam ediyor)

(a)



(b)



Şekil 6.4. Doğrudan zemin makaslama deneylerinden belirlenmiş makaslama gerilmesi-birim deformasyon grafiklerine örnekler: (a) AÇ-3 no.'lu araştırma çukuru ve (b) SK3-UD3 no.'lu sondajdan alınmış örnekler.

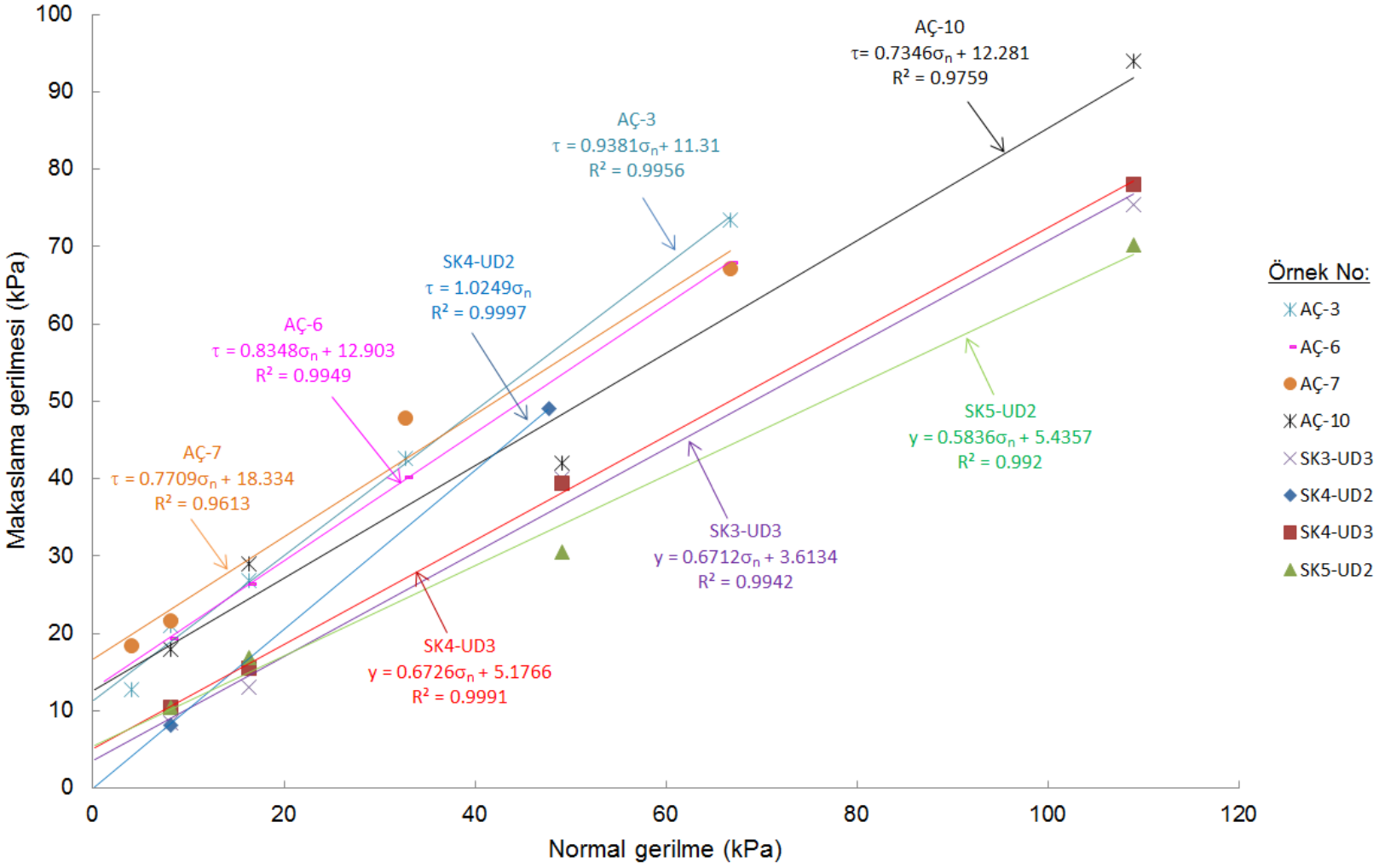
Makaslama deneyleri sonucunda turba zeminlere ilişkin yenilme zarfları çizilmiş ve Şekil 6.5'te verilen bu yenilme zarflarından hesaplanan kohezyon ve içsel sürtünme açıları ise Çizelge 6.4'te verilmiştir. Buna göre, inceleme alanındaki turba zeminlerin drenajlı ve drenajsız koşullardaki kohezyonlarının sırasıyla 0 – 18.3 kPa ve 5 – 17.8 kPa, içsel sürtünme açılarının ise sırasıyla 30.3^0 – 50.1^0 ve 28^0 – 36.8^0 arasında değiştiği belirlenmiştir. Yüzeye yakın derinliklerde bulunan ve daha kalın lifler içeren turbalar yüksek makaslama dayanımı parametrelerine sahipken, daha derindeki ince lifli ve amorf turbaların ise dayanımlarının daha düşük olduğu saptanmıştır. Bunun nedeninin, yüzeye yakın derinliklerdeki turba zeminlerin içerdiği liflerin makaslama dayanımına yaptığı arttırıcı etkiden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ulusay vd. [10], bu teze ait inceleme alanından aldıkları sınırlı sayıda turba örneği üzerinde yaptıkları doğrudan makaslama dayanımı deneylerinden drenajlı koşullarda belirlenen doruk makaslama dayanımı parametrelerinin, c_p ve ϕ_p, sırasıyla 2.9 – 5.8 kPa ve 42.6 – 59.8^0 arasında değiştiğini ifade etmişlerdir. Bu değerler, tez çalışması kapsamında belirlenen makaslama dayanımı parametreleri ile benzerlik göstermektedir.

Munro [2], turbaların makaslama dayanımlarının mineral içeriği arttıkça artmakta olduğunu, su içeriği ve hümifikasyon derecesinin artmasıyla azalım gösterdiğini belirtmiştir. MacCulluch [71] ise, sığ derinliklerdeki lifli turbaların daha derindeki amorf turbalara göre daha yüksek dayanıma sahip olduğunu ifade etmiştir. İnceleme alanındaki turbaların makaslama dayanımlarının derinlikle azalması, bu araştırmacıların çalışmalarında vardıkları sonuçlar ile benzerdir.

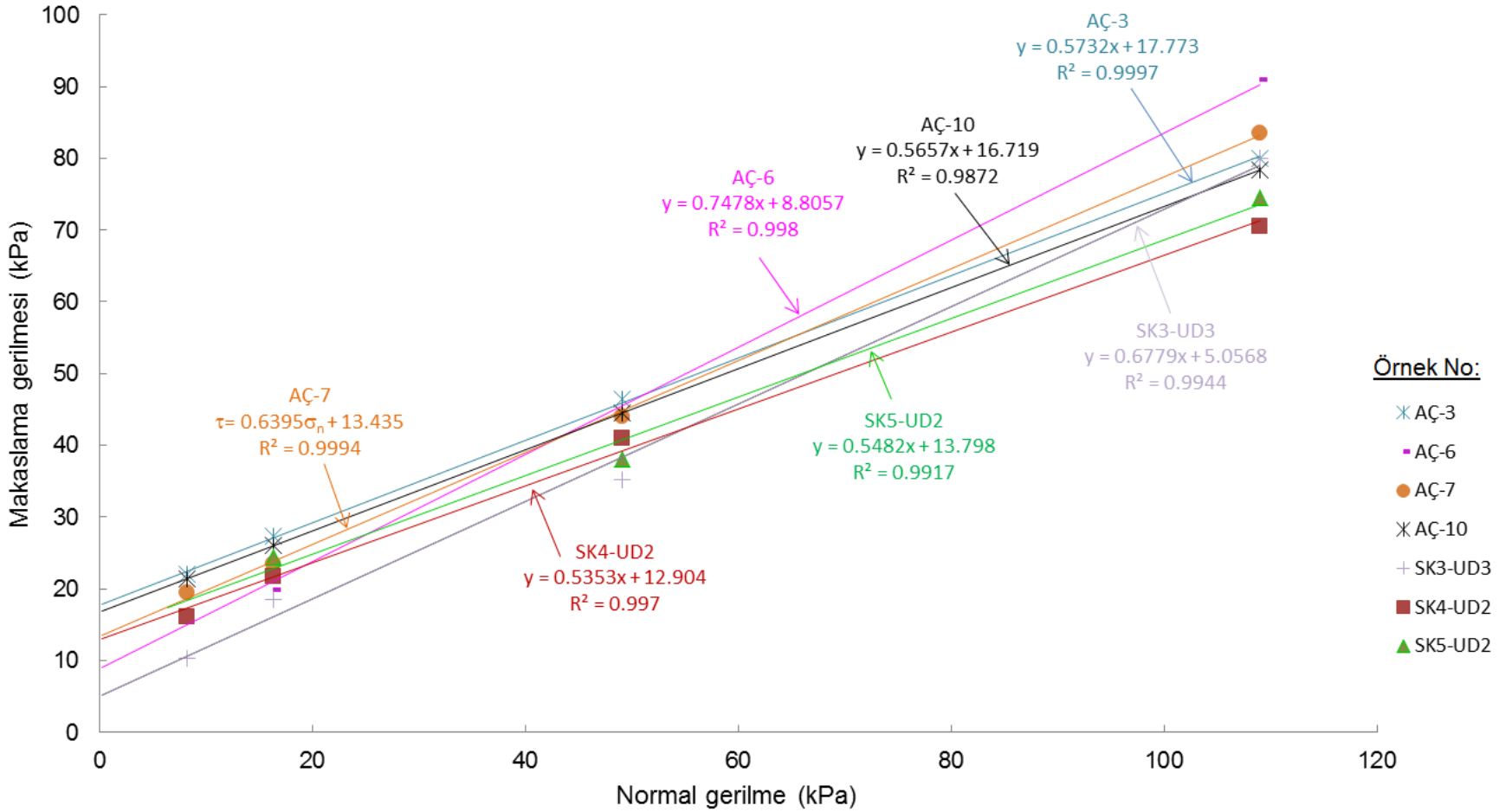
Edil ve Dhowian [114] ile Landva ve La Rochelle [115]; turba zeminlerin içsel sürtünme açılarının inorganik zeminlerinkinden daha yüksek olduğunu ve 3 ile 50 kPa arasında değişen normal gerilmeler altında içsel sürtünme açısının amorf-lifli turbalarda $53\text{-}57^0$, amorf-taneli turbalarda ise $27\text{-}32^0$ arasında değiştiğini belirtmişlerdir. İnceleme alanındaki turba örneklerinin drenajlı koşullardaki içsel

(a)



Şekil 6.5. Tüm turba örnekleri üzerinde yapılan (a) drenajlı ve (b) drenajsız doğrudan makaslama deneylerinin sonuçlarından belirlenmiş yenilme zarfları.

(b)



Şekil 6.5. (devam ediyor).

sürtünme açıları da amorf-lifli ve amorf-taneli turbalar için belirlenen bu değerlerlerin arasında yer almaktadır.

Çizelge 6.4. Turba örneklerinin doğrudan makaslama deneylerinden belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri.

Örnek No.	Örnekleme derinliği (m)	Drenajsız makaslama dayanımı parametreleri		Drenajlı makaslama dayanımı parametreleri	
		c (kPa)	ϕ (^{0})	c (kPa)	ϕ (^{0})
AÇ-3	1.5	17.8	29.8	11.3	43.17
AÇ-6	1.4	8.8	36.8	12.9	39.9
AÇ-7	2	13.4	32.6	18.3	37.6
AÇ-10	1.8	16.7	29.5	12.3	36.3
SK3-UD3	3.5	5.0	34.1	3.6	33.9
SK4-UD2	2.5	12.9	28.2	0	50.1
SK5-UD2	3	13.8	28.7	5.4	30.3

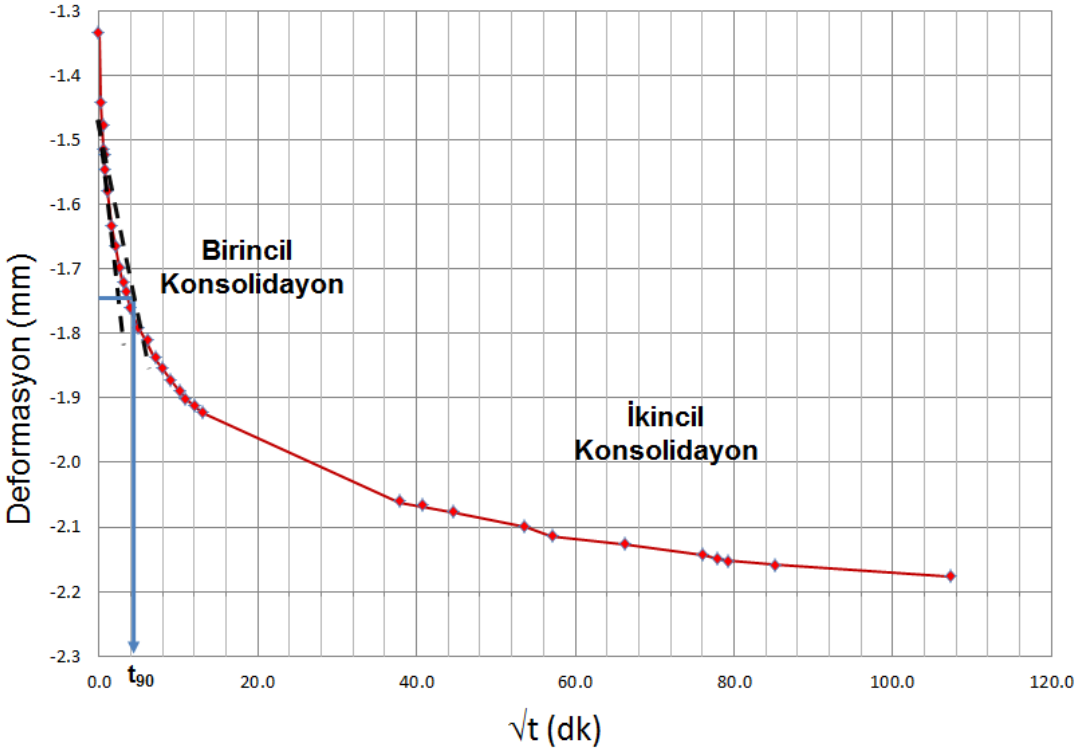
* Örnek yetersizliği nedeniyle belirlenememiştir.

6.4. Konsolidasyon Deneyleri

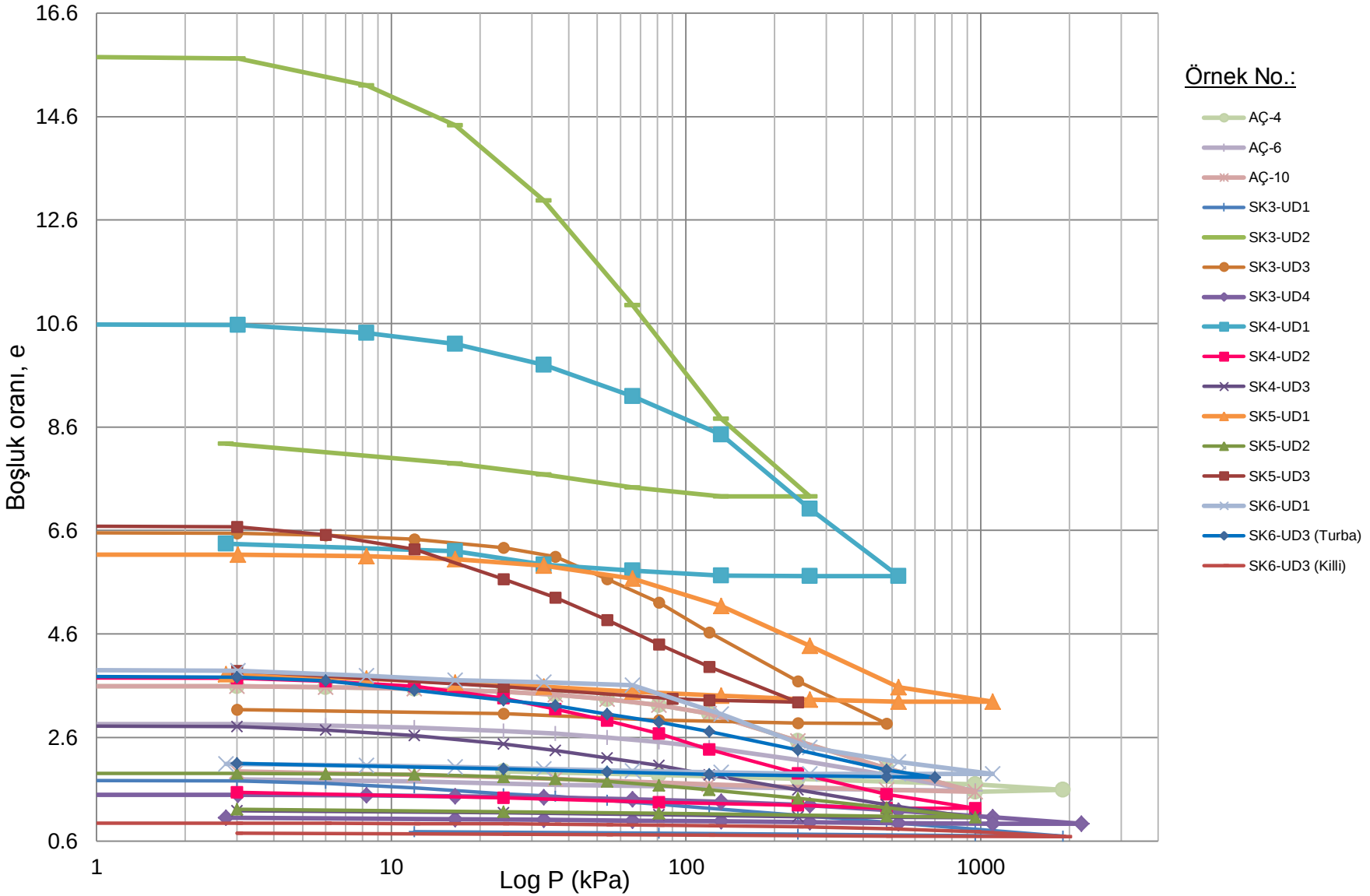
Turba zeminlerin oturma davranışının değerlendirilmesi amacıyla sondajlardan ve araştırma çukurlarından alınan turba örnekleri üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerin uzun sürede tamamlanacakları dikkate alınarak, Hacettepe Üniversitesi'ndeki ilgili laboratuvarda sınırlı sayıda odometre cihazı bulunması nedeniyle, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM)'nden de bu kuruluşun laboratuvarlarından yararlanılması konusunda destek talep edilmiş ve bu destek sağlanmıştır. Hacettepe Üniversitesi'ndeki deneylere başlanıldıktan bir süre sonra KGM laboratuvarında da deneyler yapılmaya başlanmıştır. Tez çalışması kapsamında; 11'i Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü laboratuvarında, 5'i de KGM Zemin Mekaniği Laboratuvarında olmak üzere, toplam 16 adet konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Bu deneyler, 3 kPa'dan 1900 kPa'a kadar değişen (3, 6, 9, 12, 24, 36, 54, 81, 120, 240, 480, 960, 1900 kPa) normal gerilmeler altında gerçekleştirilmiştir. Turba örneklerinin yüksek derecede sıkışabilir özellikte olması nedeniyle, normal gerilme uygulama aşamalarına çok küçük gerilmelerden başlanmış ve her gerilme aşaması bir önceki gerilme değerinin 1.5-2 katı kadar arttırılmıştır.

Turba zeminlerde ikincil oturmanın tahmin edilebilmesi ve uzun süreli oturma davranışının izlenebilmesi amacıyla sondajlardan alınan bir örnek 24 kPa'lık bir yük altında 8 gün boyunca konsolide edilmiştir. Deformasyonların yaklaşık 2500 dk'dan sonra düzenli bir artış gösterdiği Şekil 6.6.'de görülmektedir. Bu husus dikkate alınarak, yukarıda belirtilen normal gerilmeler altında tüm örnekler 48 saat boyunca konsolidasyona tabi tutulmuşlardır. Söz konusu tüm bu örnekler için çizilen boşluk oranı-gerilme (e-log P) grafikleri Şekil 6.7'de sunulmuştur.

Konsolidasyon deneylerinden turba örnekleri için belirlenen bazı konsolidasyon parametreleri ve bunların değişim aralıkları Çizelge 6.5'te verilmiştir. Literatüre göre turbaların sıkışma indisleri 0.056 ile 15 arasında değişmekte olup, inceleme alanındaki turbaların sıkışma indisleri bu aralığın alt sınırına yakındır.



Şekil 6.6. SK3-UD1 no.'lu sondajdan alınan örneğin 24 kPa'lık normal gerilme altında deformasyon-karekök zaman grafiği.



Şekil 6.7. Turba örneklerinin konsolidasyon deneyleriyle belirlenmiş gerilme-boşluk oranı ilişkileri.

Çizelge 6.5. İnceleme alanındaki turba örnekleri için belirlenen bazı konsolidasyon parametreleri ve bunların değişim aralıkları.

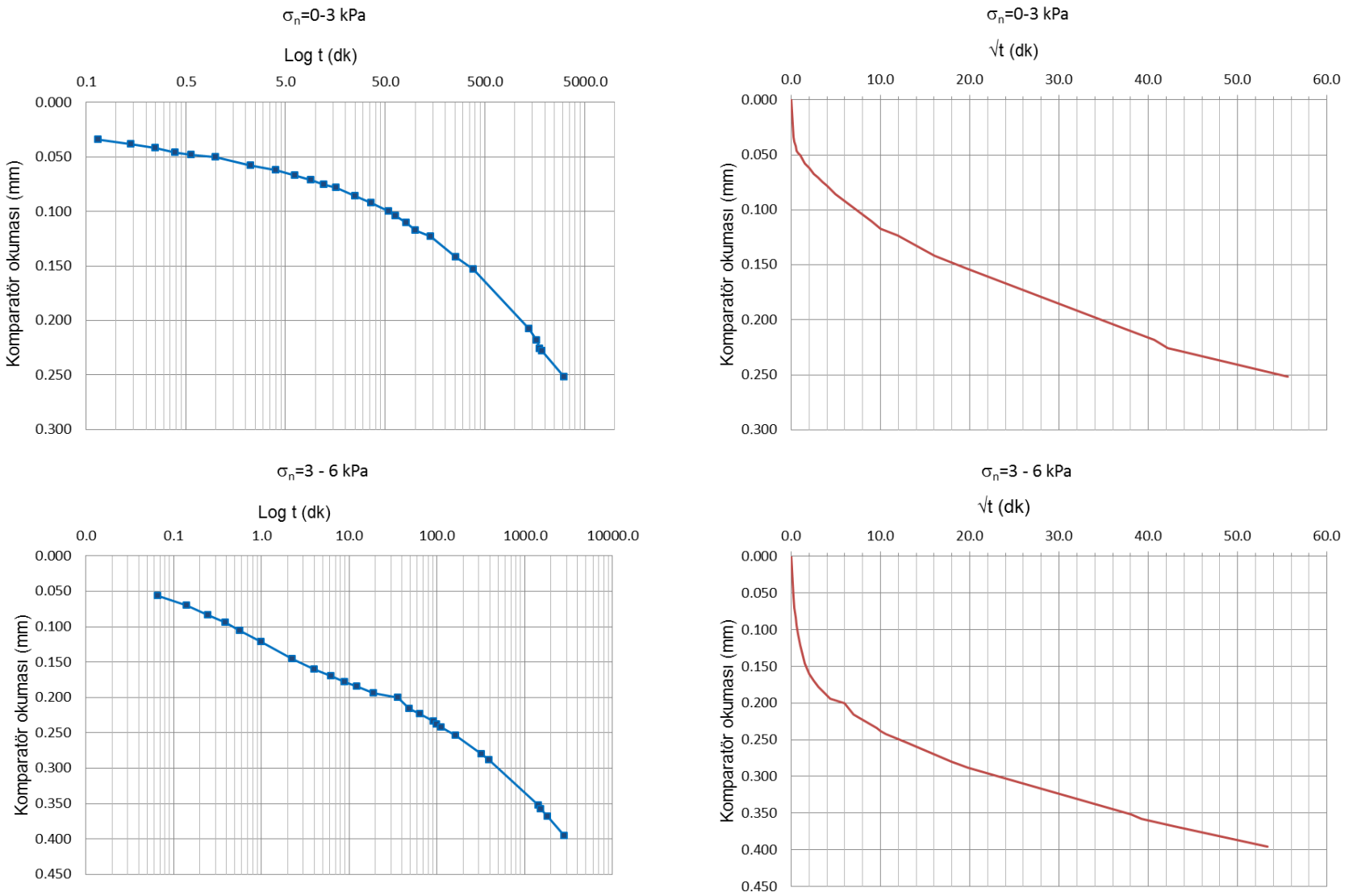
Örnek No.	Örnekleme derinliği (m)	Normal gerilme aralığı (kPa)	C_c	C_s	e	m_v (m^2/MN)	σ_p (kPa)	OCR
AÇ-4	1	3-1900	0.0000-0.6674	0.0207-0.0457	1.8783-1.1141	0.0065-0.4217	200	18.2
AÇ-6	1.5	3-960	0.0006-1.0286	0.0685-0.1350	1.5645-2.8587	0.0176-2.3685	110	6.6
AÇ-10	1.5	3-960	0.0004-1.7858	0.1151-0.2089	1.5502-3.5909	0.0307-2.6758	120	7.3
SK3-UD1	1.5	3-1900	0.0117-0.4689	0.0525-0.1650	0.6880-1.8170	0.0630-6.2008	13	0.8
SK3-UD2	2.5	3-264	0.0556-7.3034	0.0142-0.8538	7.2574-16.1355	0.0039-8.0460	18	0.7
SK3-UD3	3.5	3-480	0.0178-3.3949	0.0253-0.2237	6.6249-3.1326	0.0082-3.5001	60	1.3
SK3-UD4 (Siltli-Killi)	5.5	3-2196	0.0005-0.4194	0.0140-0.0608	0.9278-1.4932	0.0020-0.9874	127	2.1
SK4-UD1	1.5	3-527	0.0203-4.7953	0.0465-0.8904	5.7139-10.6793	0.0158-3.1620	90	5.5
SK4-UD2	2.5	3-960	0.0110-1.7693	0.0238-0.1871	1.2272-3.7939	0.0067-4.1467	25	0.9
SK4-UD3	5	3-960	0.0162-1.0644	0.0322-0.0753	1.0460-2.8823	0.0098-6.2335	20	0.4
SK5-UD1	1.5	3-1098	0.0009-2.6560	0.1233-0.3108	3.2925-6.1425	0.0328-3.1728	100	6.0
SK5-UD2	3	3-960	0.0000-0.6140	0.0499-0.0829	1.0585-1.9021	0.0118-1.3249	60	1.8
SK5-UD3	4.5	3-240	0.0218-2.6743	0.1239-0.3946	3.2843-6.7712	0.0725-6.6842	16	0.3
SK6-UD1	2	3-1098	0.0233-2.1439	0.0025-0.1280	1.8962-4.0382	0.0699-9.9498	*	*
SK6-UD3	5.5	3-700	0.0275-1.2688	0.0539-0.1651	1.8240-3.8875	0.0142-8.3972	20	0.33
SK6-UD3 (Siltli-Killi)	5.5	3-1947	0.0014-0.2953	0.0157-0.0328	0.6842-0.9507	0.0039-1.0655	194	3.2

C_c: Birincil sıkışma indisi, C_s: Şişme indisi, e: Boşluk oranı, m_v:hacimsel sıkışma katsayısı, σ_p: ön konsolidasyon basıncı, OCR: Aşırı konsolidasyon oranı. * Örneğin e-log P eğrisinden ön konsolidasyon basıncı hesaplanamamıştır.

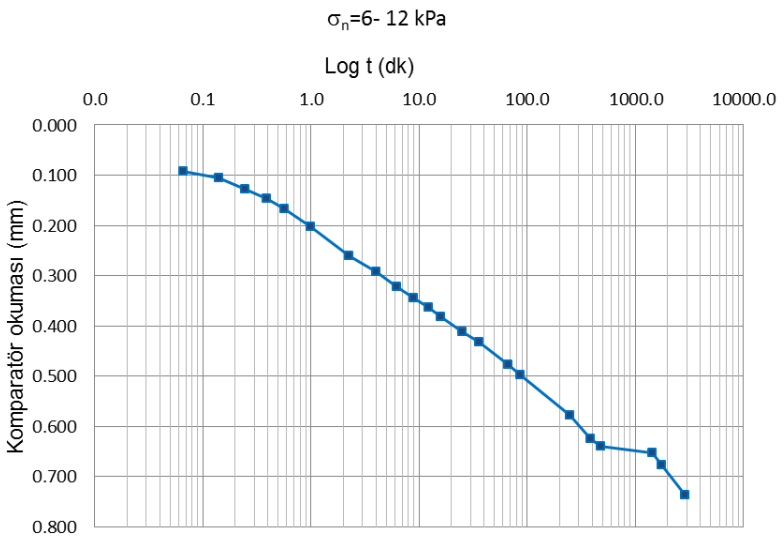
Tez çalışması kapsamında yapılan tüm konsolidasyon deneylerinde örneklere uygulanan her gerilme aralığı için elde edilen “deformasyon-karekök zaman” ve “deformasyon-logaritma zaman” grafikleri ayrı ayrı çizilmiştir. SK5-UD3 no.’lu turba örneği için çizilen bu grafikler Şekil 6.8’de örnek olarak sunulmuş, diğer örneklere ait grafikler ise EK-1’de verilmiştir. Sıkışma-zaman grafiklerine göre inceleme alanındaki turba zeminler, 3. Bölüm’de değinilen ve Şekil 3.4’te gösterilen Tip III türünde sıkışma-zaman davranışı sergilemektedir.

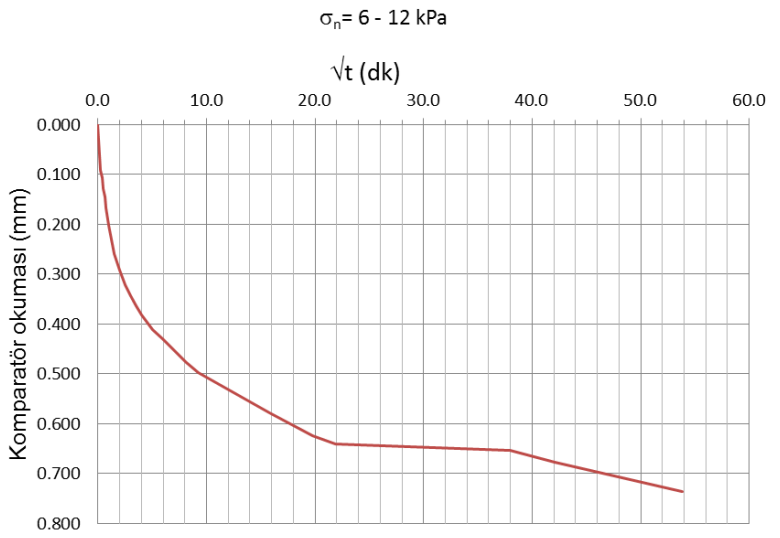
Bu deneylere ek olarak, sahada inşa edilen gözlem dolgusunda alınan oturma ölçümleri ile karşılaştırılması amacıyla, gözlem dolgusunun hemen yanında açılmış olan AÇ-10 no.’lu araştırma çukuru ile SK5 no.’lu sondajdan derlenen örnekler gözlem dolgusunun zemine aktardığı normal gerilmeler altında laboratuvarda konsolidasyona tabi tutulmuştur. İki yükleme aşamasından oluşan bu deneyler, platform ve kaya blokları tarafından zemine iletilen sırasıyla 9.85 kPa ve 34.12 kPa’lık normal gerilme seviyelerinin örneklerin alındığı derinliklere göre azaltılmasıyla hesaplanan yükler altında yapılmıştır. 1. yükleme aşaması, gözlem dolgusunun beton platform kısmının inşası sırasında zemine iletilen yükleme aşamasını temsil etmekte olup, 28 gün boyunca devam etmiştir. Turba örnekleri 2. yükleme aşamasında ise, kaya bloklarının platforma yerleştirilmesiyle zemine aktarılan yükler altında 120 gün süreyle konsolide edilmiştir. Bu yükleme aşamaları sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 6.9 ve 6.10’da sunulmuştur. Bu şekil üzerinde, gözenek suyu basınçlarının ölçülmesinden belirlenen birincil konsolidasyonun tamamlanma süresi ve gerilme ilişkisinden yararlanılarak hesaplanan birincil oturma süreleri gösterilmiş olup, ayrıntısı Bölüm 6.5’te tartışılmıştır.

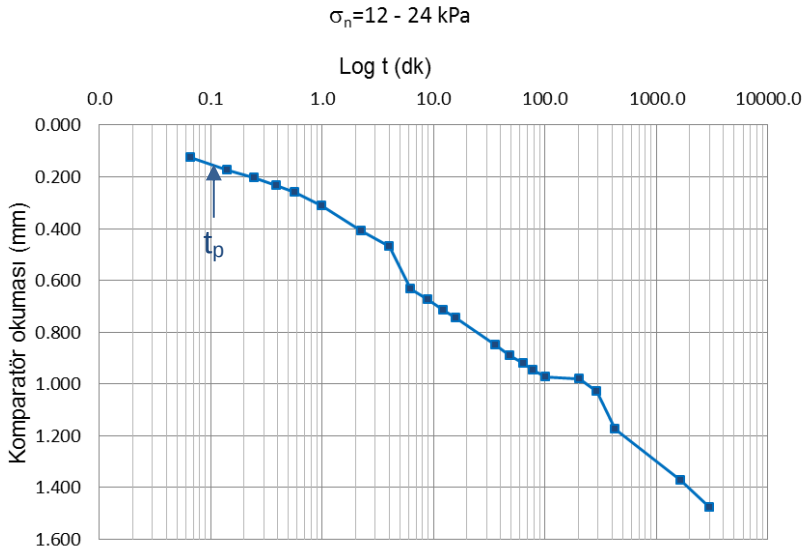
Bu deneyin sonuçlarına ilişkin kapsamlı değerlendirmelere ve yorumlara, inceleme alanındaki turba zeminlerin oturma davranışının değerlendirildiği 7. Bölüm’de yer verilmiştir.

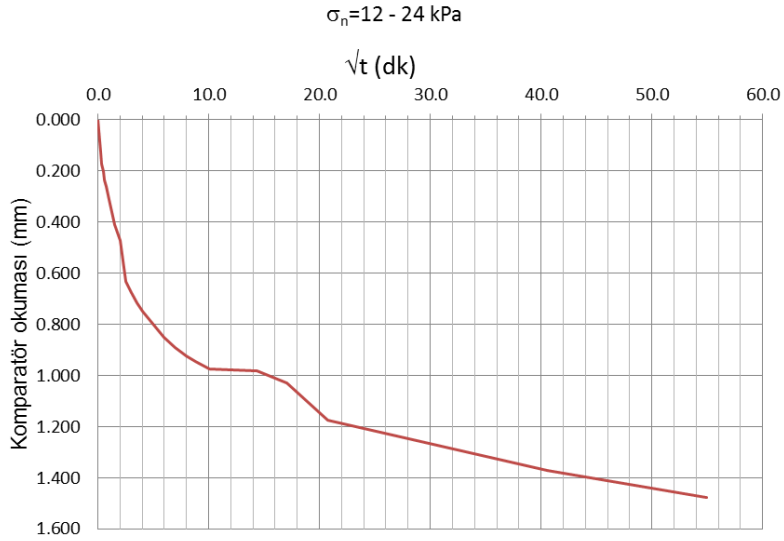


Şekil 6.8. SK5-UD3 no.'lu sondajdan alınan turba örneğinin farklı normal gerilmeler (σ_n) altındaki oturma-log (t) ve oturma-$\sqrt{t}$ grafikleri (t_p: Birincil oturmanın tamamlanma süresi) .

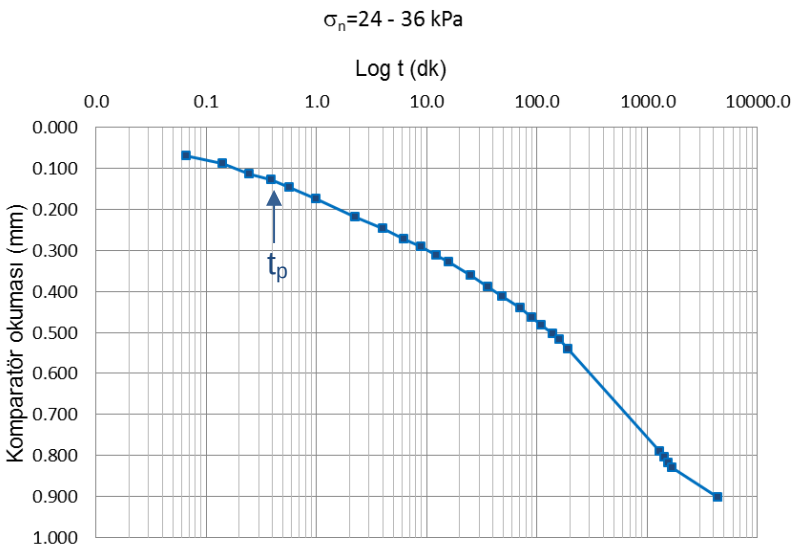


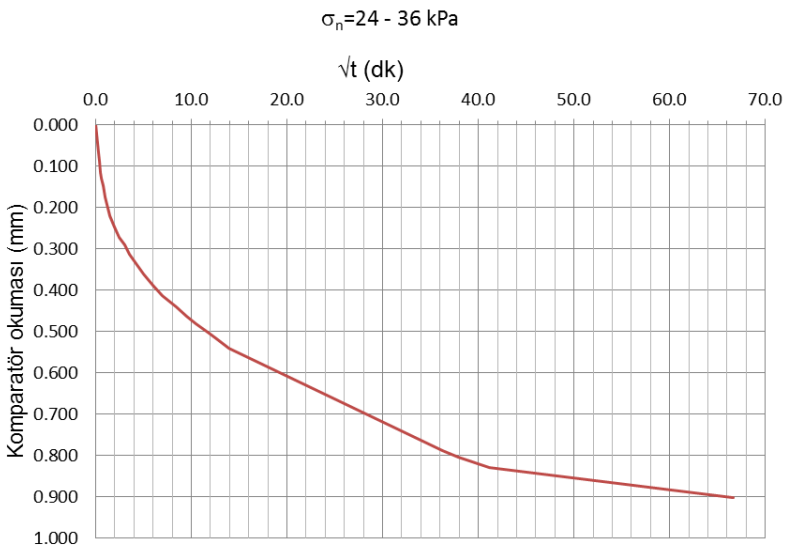


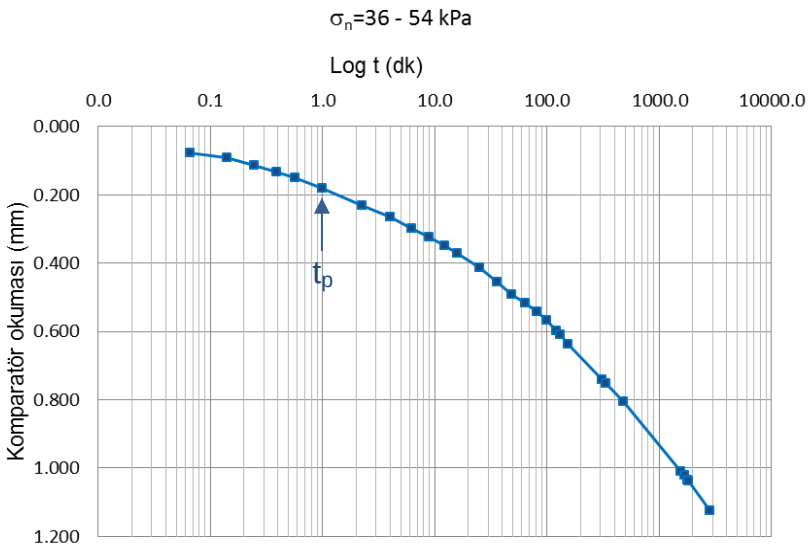


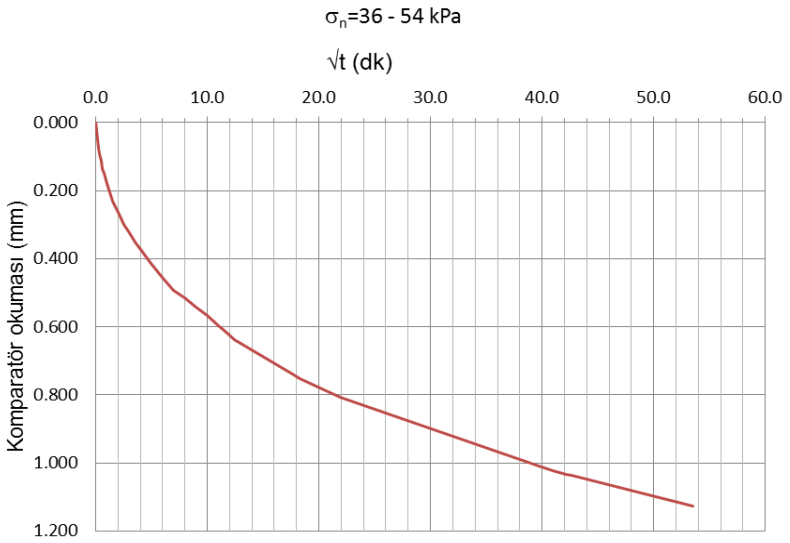


Şekil 6.8. (devam ediyor)

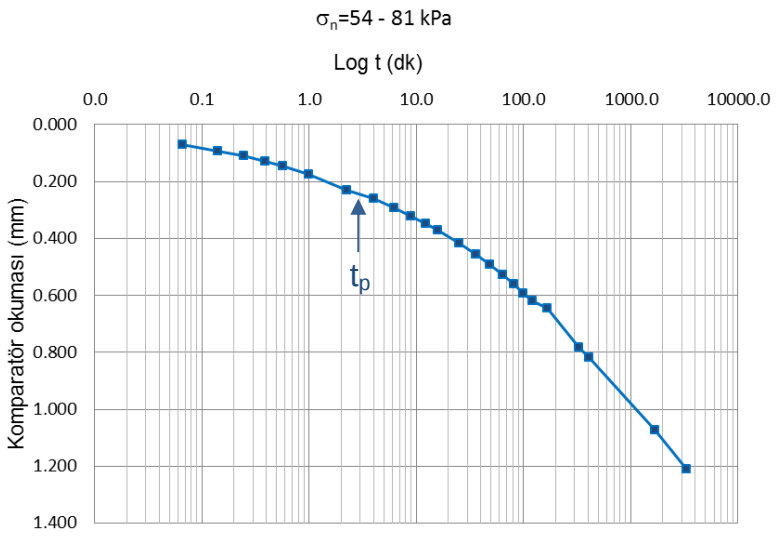


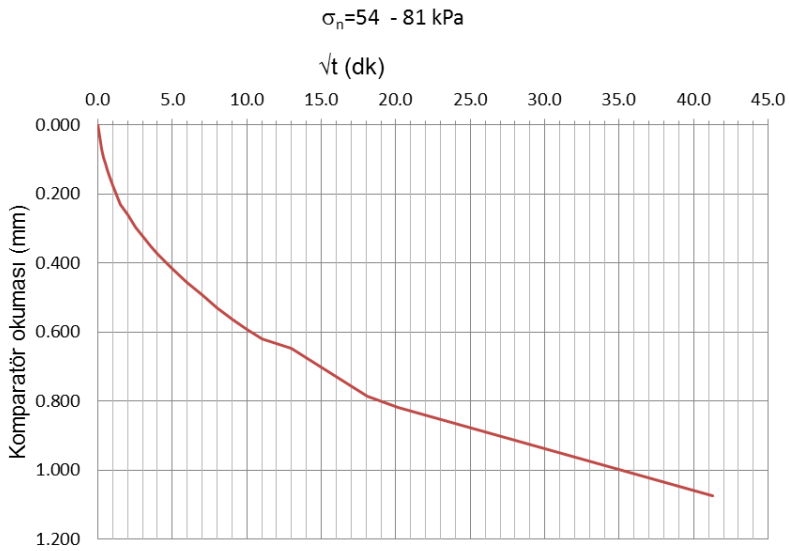


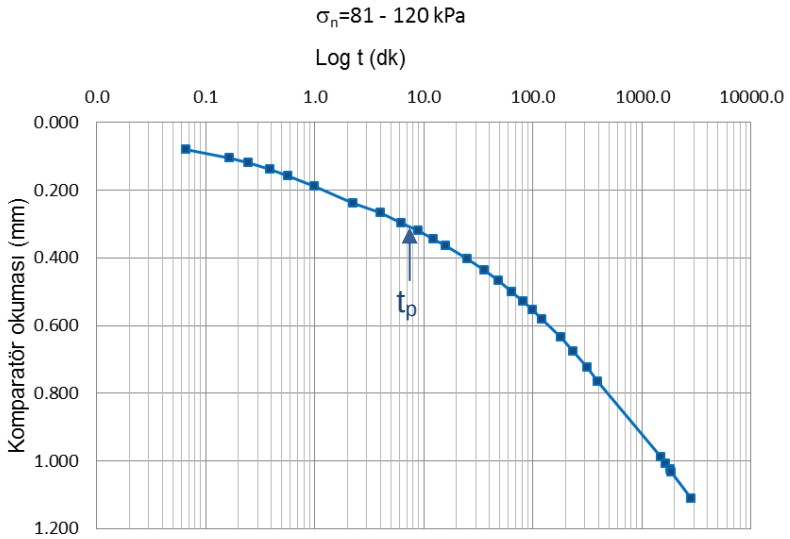


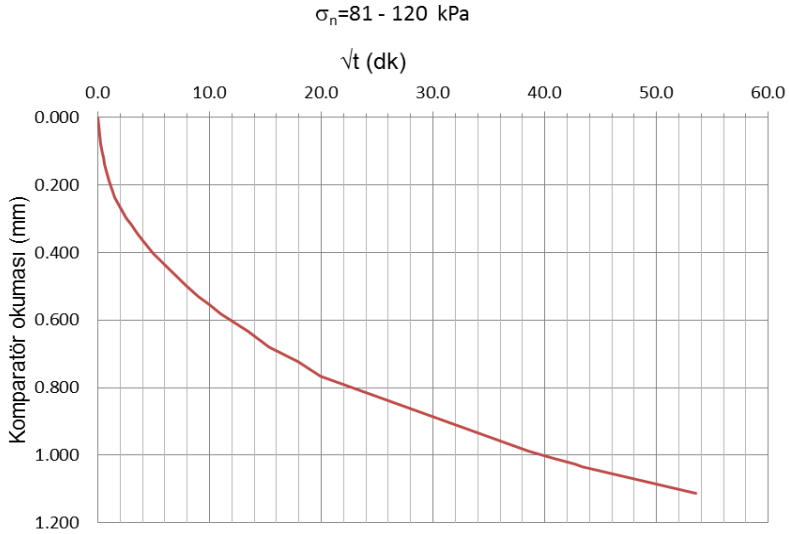


Şekil 6.8. (devam ediyor)

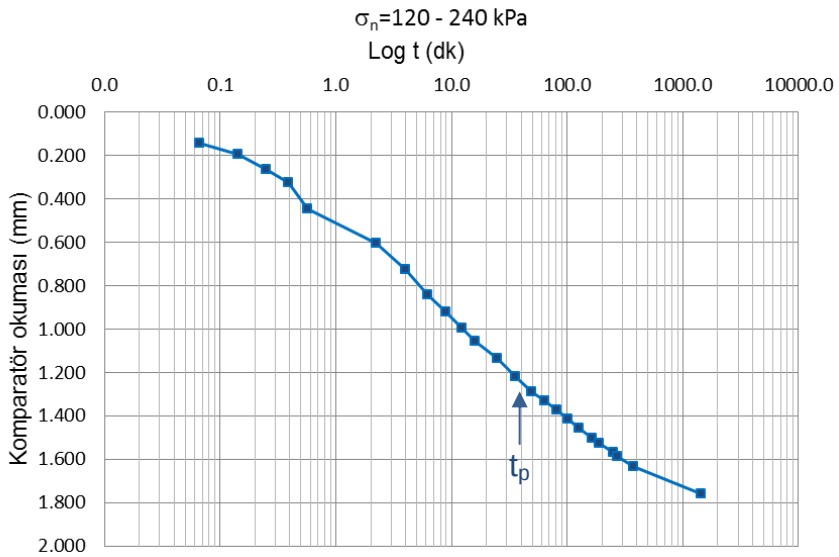


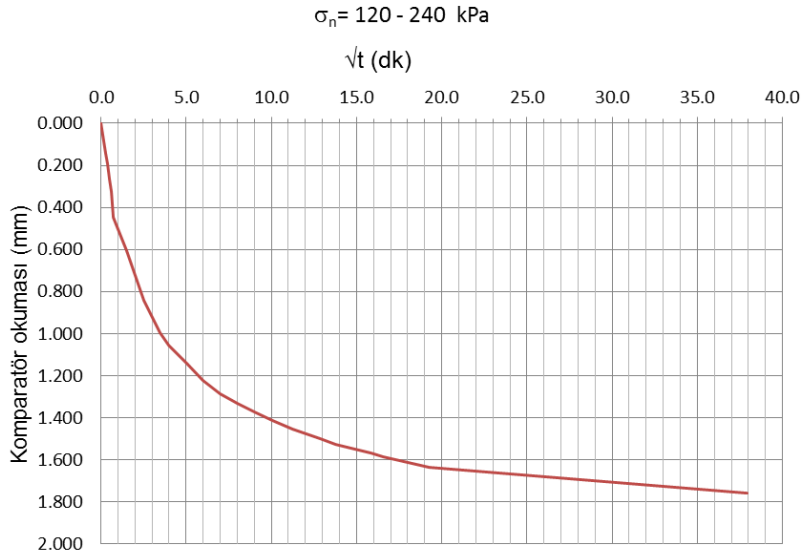






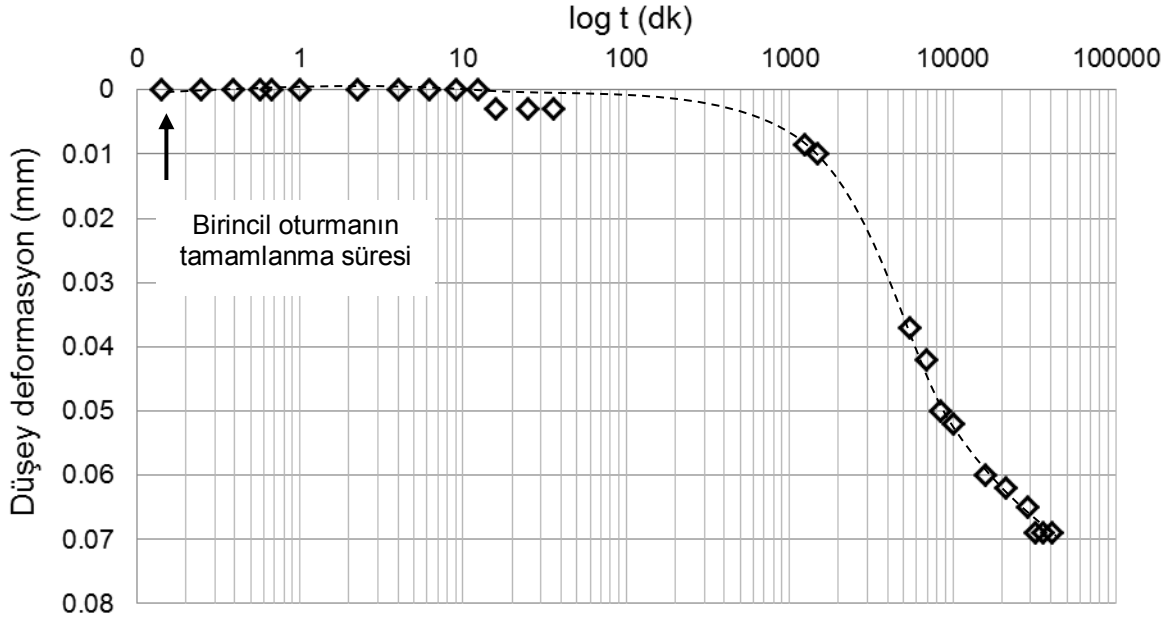
Şekil 6.8. (devam ediyor)

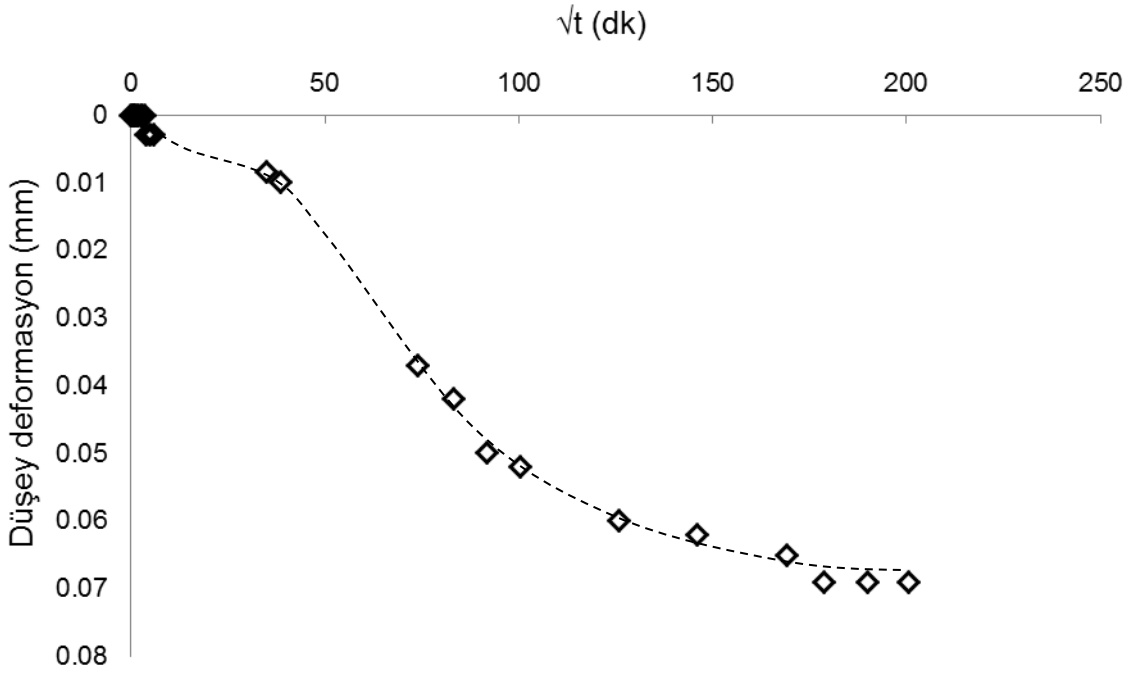




Şekil 6.8. (devam ediyor)

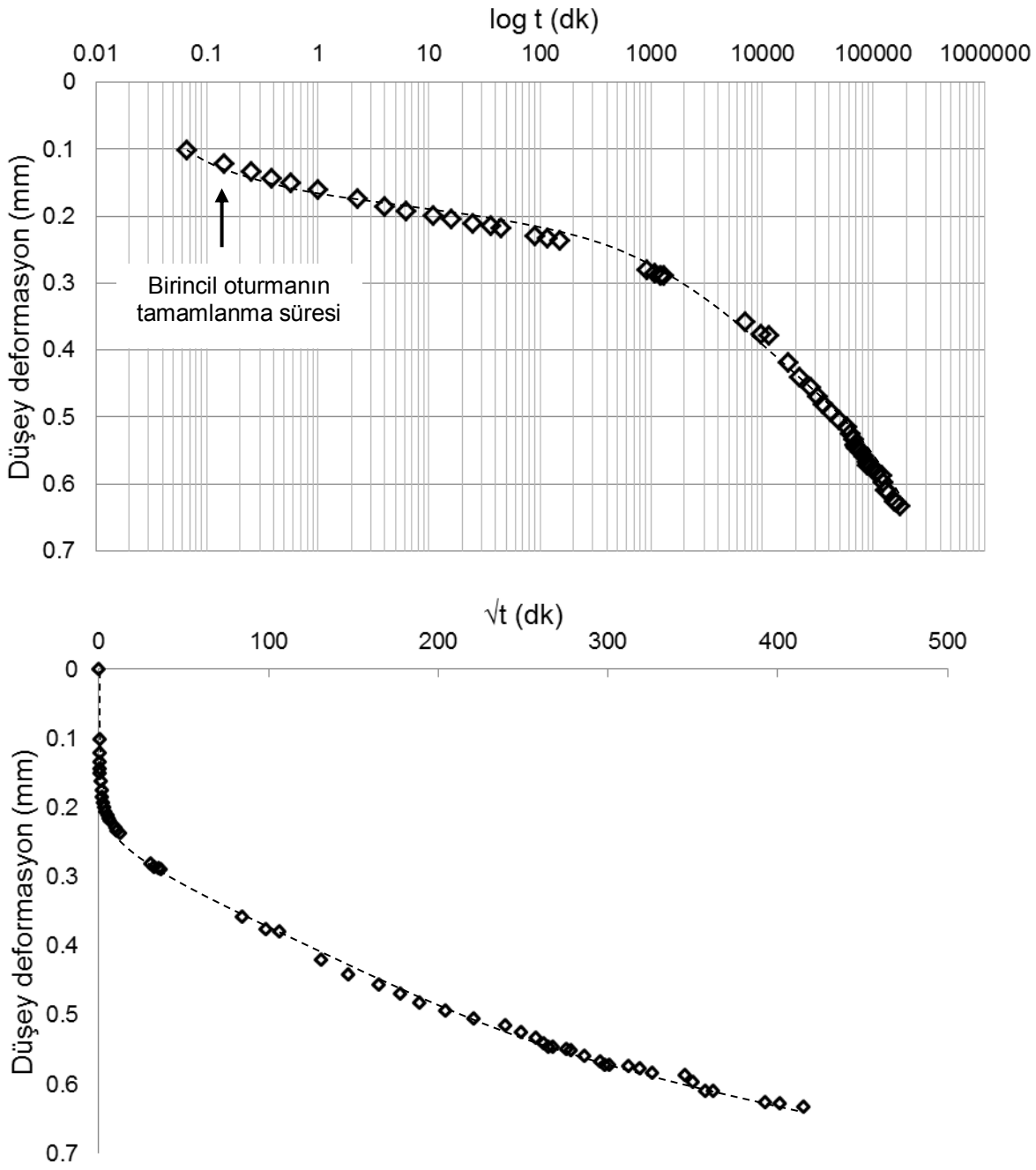
(a)





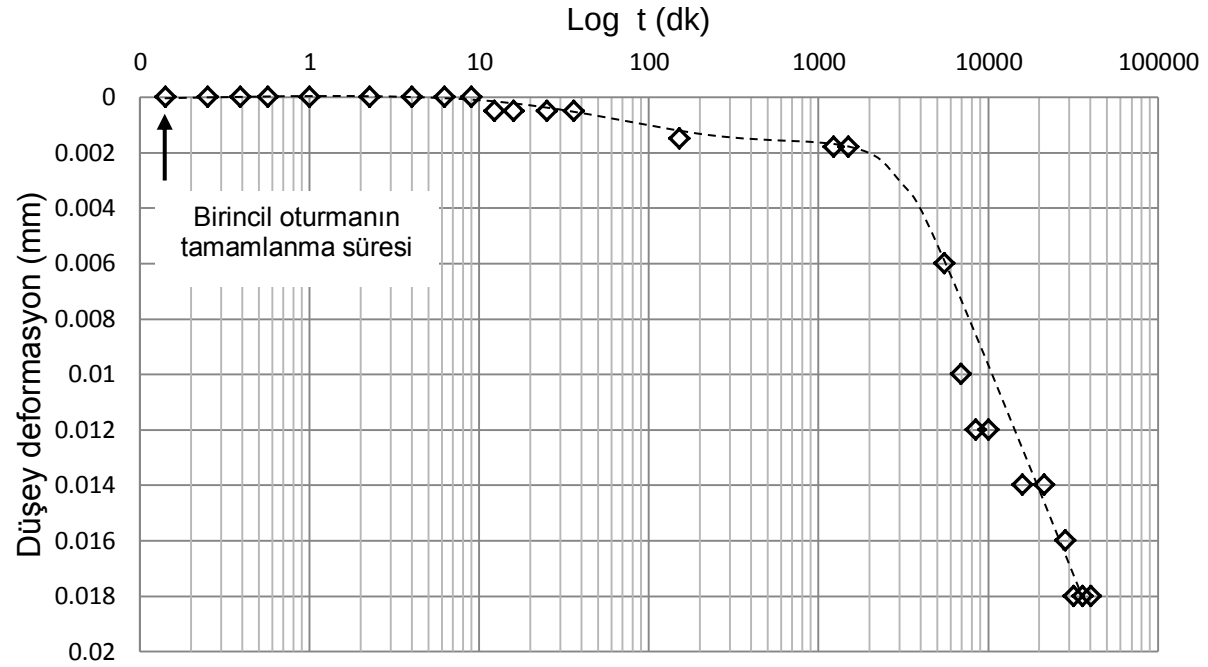
Şekil 6.9. AÇ-10 no.'lu araştırma çukurundan alınan örneğin gözlem dolgusundaki yükleme koşulları dikkate alınarak yapılan uzun süreli konsolidasyon deneyinden (a) I. yükleme (6.2 kPa) ve (b) II. yükleme (21.4 kPa) aşamaları için elde edilen düşey "deformasyon-log t" ile "düşey deformasyon- √t "grafikleri.

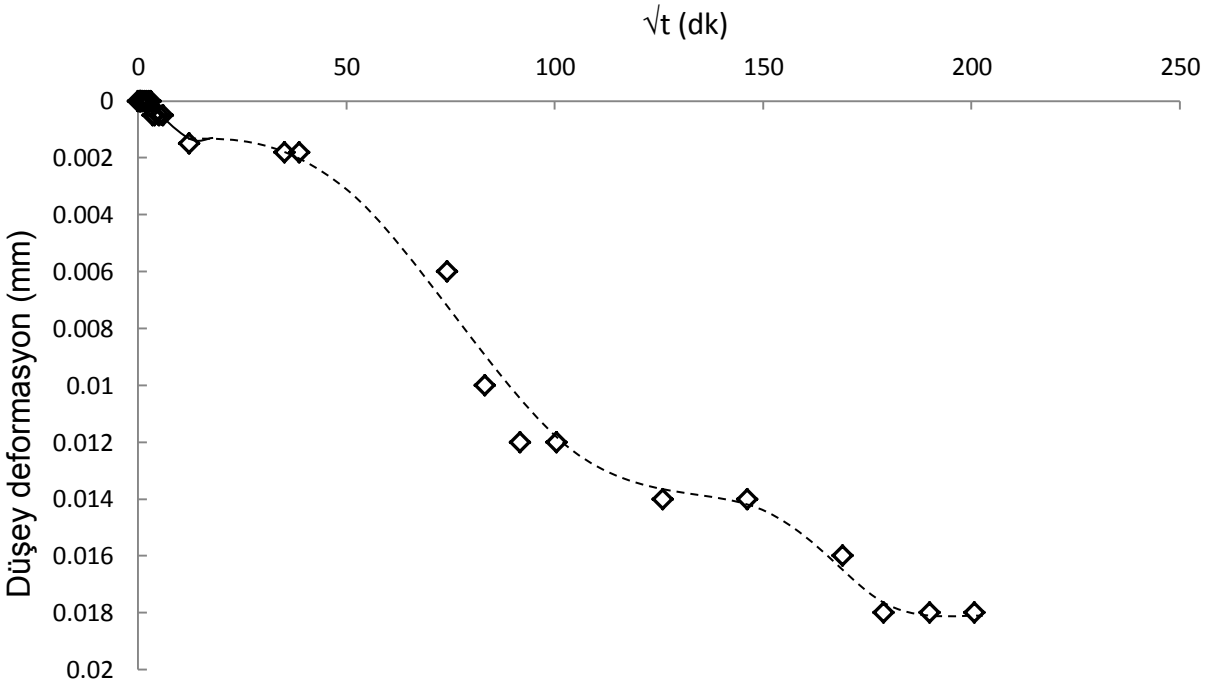
(b)



Şekil 6.9. (devam ediyor).

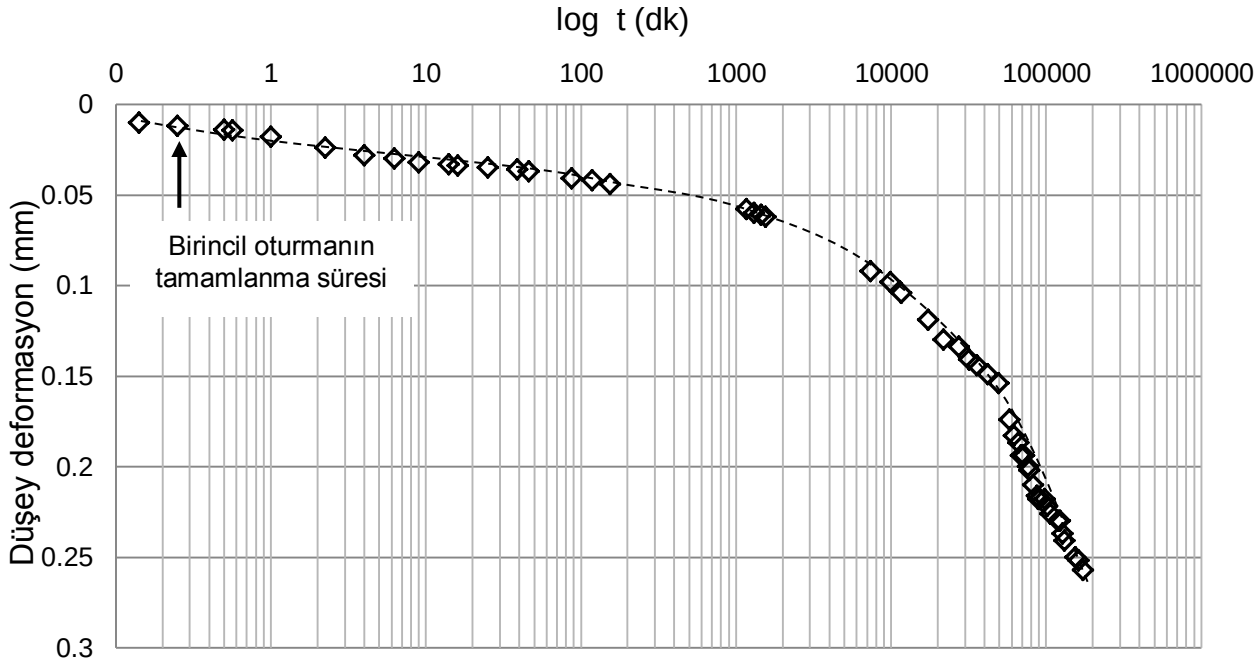
(a)

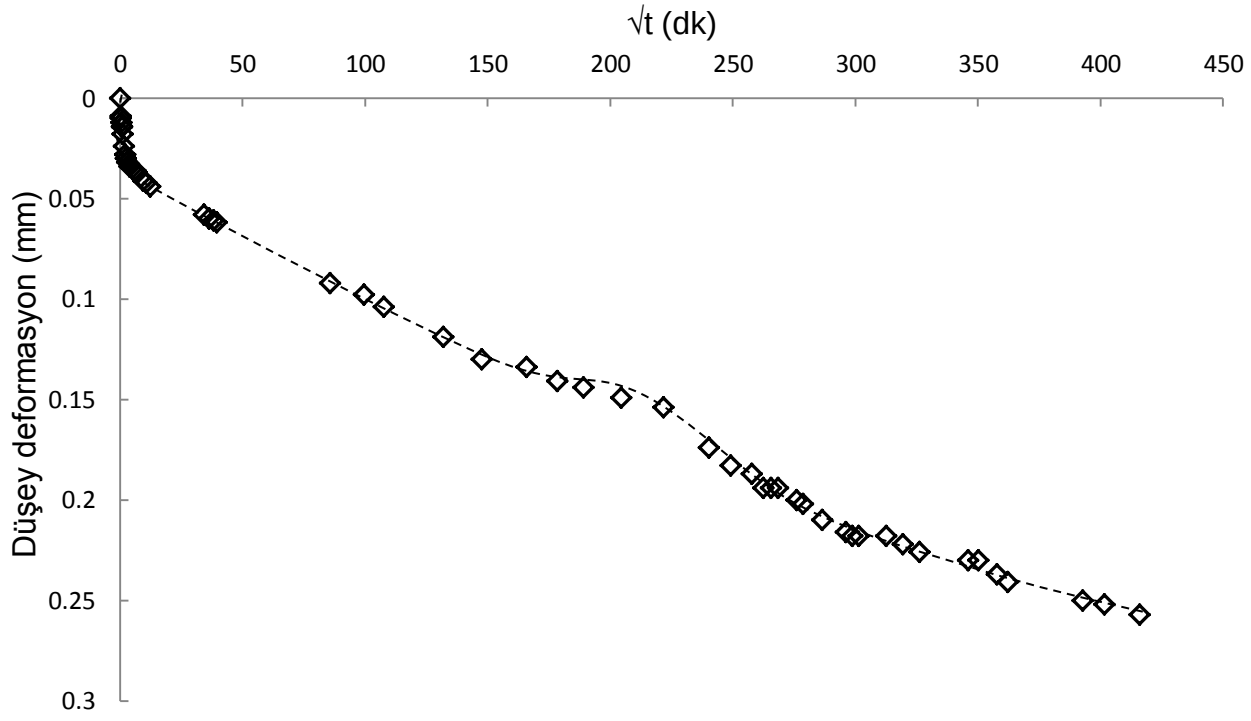




Şekil 6.10. SK5-UD3 no.'lu örneğin gözlem dolgusundaki yükleme koşulları dikkate alınarak yapılan uzun süreli konsolidasyon deneyinden (a) I. Yükleme (1.3 kPa) ve (b) II. Yükleme (4.4 kPa) aşamaları için elde edilen "düşey deformasyon-log t" ile "düşey deformasyon- √t" grafikleri.

(b)



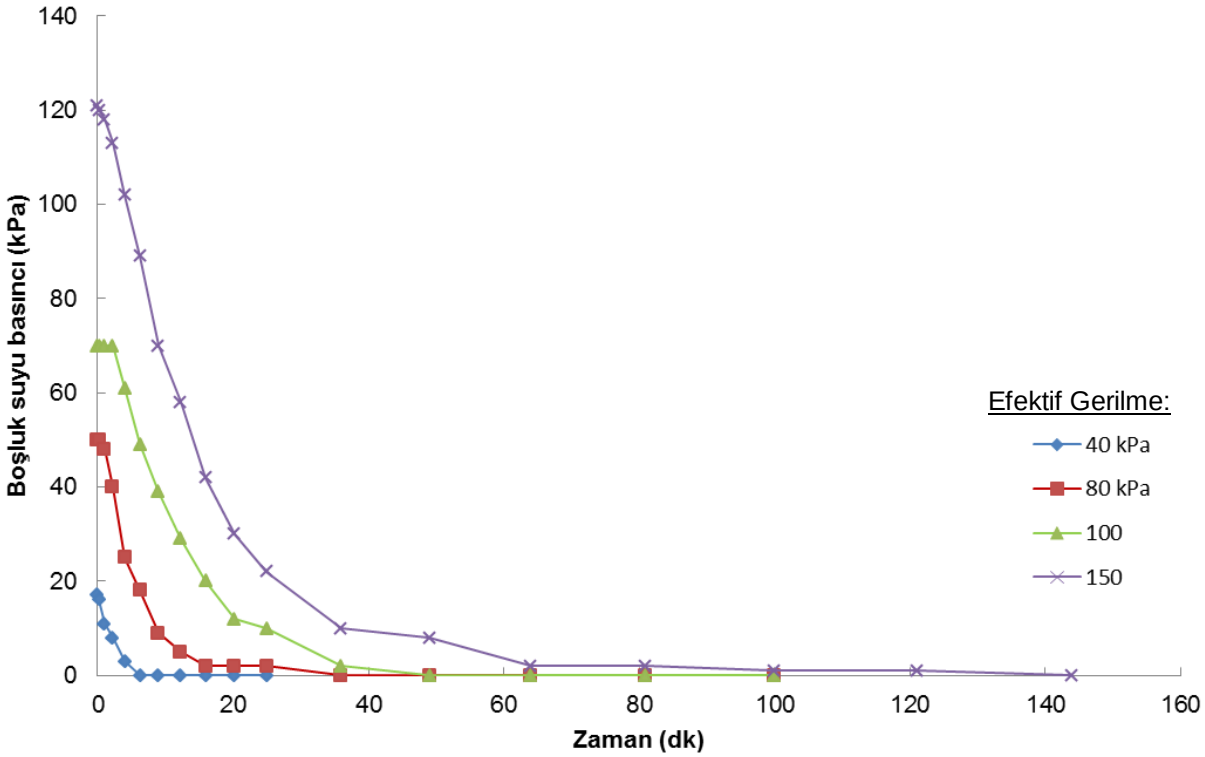


Şekil 6.10. (devam ediyor).

6.5. Gözenek Suyu Basıncı Ölçümü

Tez çalışması kapsamında yapılan konsolidasyon deneyleri sonucunda çizilen sıkışma-log zaman grafiklerine göre, inceleme alanındaki turba zeminler Şekil 3.4'te gösterilen Tip III türünde sıkışma-zaman davranışı sergilemektedir (bkz. Şekil 6.8). Klasik konsolidasyon eğrilerine benzememeleri nedeniyle bu eğrilerden C_v, C_α, t_{50} ve t_{90} gibi konsolidasyon parametrelerinin belirlenmesi hususunda sorun yaşanmaktadır. Turba zeminlerin sıkışma davranışının değerlendirilmesinde kullanılacak girdi parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için konsolidasyon deneyleri sırasında gözenek suyu basıncı ölçümü yapılması da önem taşımaktadır. Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'nda konsolidasyon deneyi sırasında gözenek suyu basıncını ölçebilecek bir düzenek bulunmaması nedeniyle tez çalışması kapsamında yapılmış olan deneylerde gözenek suyu basıncı ölçülememiştir. Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda diğer örnekleri temsil edici özellikte olan AÇ-10 no.'lu araştırma çukurundan alınmış 35 mm çapında 70 mm boyundaki turba örneğinin 40 kPa, 80 kPa, 100 kPa ve 150 kPa'lık efektif gerilmeler altında gözenek suyu basıncı değişimleri üç eksenli deney hücresinde ölçülmüştür (Şekil 6.11). Turba örneğinin farklı efektif gerilmeler altında gözenek suyu basıncının zamana bağlı değişimi Şekil 6.12'de sunulmuştur. Buna göre, 40 kPa, 80 kPa, 100 kPa ve 150 kPa'lık efektif gerilmelerde gözenek suyu basınçlarının sırasıyla 6.25, 36, 49 ve 144 dakikada sönümlendiği saptanmıştır. Bu sönümlenme süreleri ve deney örneğinin drenaj boyu dikkate alınarak, tez çalışması kapsamında yapılan oturma analizlerinde kullanılmak üzere konsolidasyon deneylerinde uygulanan normal gerilmeler altında turba zeminde gözenek suyu basıncının sönümlenme süreleri tahmin edilmiş olup, bu konu sözü edilen tahminlerle birlikte 7. Bölüm'de ana hatlarıyla tartışılmıştır.

Şekil 6.11. Turba zeminde gözenek suyu basıncı değişimlerinin ölçüldüğü deney düzeneği (ODTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü).



Şekil 6.12. AÇ-10 no.'lu araştırma çukurundan alınmış turba örneğinde farklı efektif gerilmeler altında gözenek suyu basınçlarının zamana bağlı değişimi.

6.6. Dinamik Deneyler

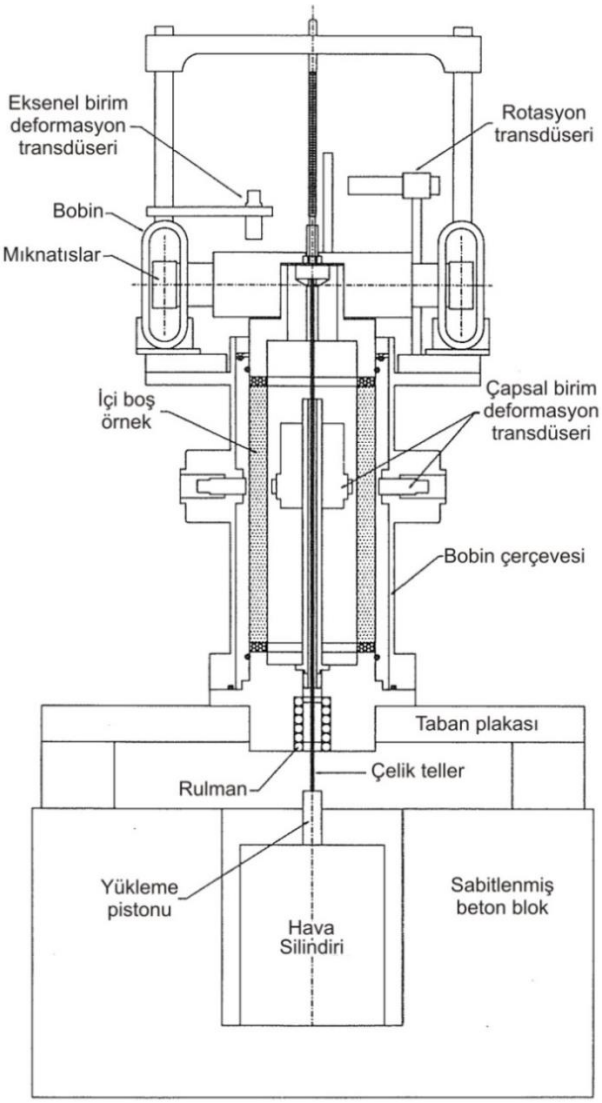
Tez çalışması kapsamında inceleme alanındaki turba zeminlerin sismik yer tepkisinin değerlendirilmesi için yapılan ve tezin 8. Bölümü'nde sunulan analizlerde girdi parametresi olarak kullanılan makaslama modülü (G), sönümlenme oranı (D) ve modül azalım ilişkisi gibi dinamik özelliklerin belirlenmesi amacıyla Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından sağlanan destekle 2 adet turba örneği üzerinde rezonans kolonu ve torsiyonel makaslama deneyleri Torino Politeknik Üniversitesi (İtalya) İnşaat Mühendisliği Bölümü Jeoteknik Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Bu alt bölümde, ASTM D4015 standartlarına [113] uygun olarak yapılmış bu deneyler hakkında genel bir bilgi verilmiş ve deney sonuçları sunulmuştur.

6.6.1. Rezonans Kolonu Deneyi

Rezonans kolonu deneyi zeminlerin düşük birim deformasyonlardaki dinamik özelliklerini ölçmek için en yaygın olarak kullanılan deney yöntemidir. Şekil 6.13'te deney düzeneğinin şematik bir görüntüsü sunulmuştur. Deney sistemi, prizmatik çubuklarda dalga yayılım kuramına (teorisine) dayalı olarak çalışmaktadır. Deney tekniği ilk kez 1930-1940 yılları arasında Japonya'da geliştirilmiştir [116]. Bu deney; silindirik karot şekilli deney örnekleri üzerinde yapılabildiği gibi, içi oyuk örnekler üzerinde de yapılabilmektedir. Rezonans kolonu deneyi $\%10^{-4}$-$\%10^{-1}$ arasında değişen makaslama birim deformasyonu düzeylerinde yapılmaktadır. Zeminlerin doğrusal elastik davranış gösterdiği en fazla $\%10^{-3}$'e kadar olan makaslama birim deformasyon düzeylerinde yapılan deneylere düşük genlikli rezonans kolonu (low amplitude resonant column), zeminlerin doğrusal olmayan davranış sergilediği bu makaslama birim deformasyon düzeyinden daha büyük deformasyon düzeylerinde yapılan deneylere ise yüksek genlikli rezonans kolonu (high amplitude resonant column) deneyi adı verilmektedir [117].

Deney, izotropik basınç altında örneğin konsolide edilmesiyle başlamaktadır. Daha sonra örneğe yükleme frekansı başlangıçta çok düşük olan, ancak en büyük tepki (deformasyon genliği) ölçülene kadar kademeli olarak frekansı arttırılan tekrarlı

gerilmeler uygulanmaktadır. Yükleme sırasında örnekte en büyük deformasyon genliği gözlendiği anda ölçülen en küçük frekans örneğin temel frekansı (rezonans frekansı) olarak adlandırılmaktadır [7]. Deney sonucunda belirlenen bu temel frekans kullanılarak zemin örneğinin makaslama dalgası hızı, makaslama modülü, sönümlenme oranı ve makaslama birim deformasyonu gibi dinamik özellikleri elastik ve viskoelastik kuramlardan aşağıda anlatıldığı gibi hesaplanmaktadır. Tez çalışması kapsamında yapılan deneylerde silindirik şekilli karot örnekleri kullanılmış olması nedeniyle, yalnızca bu örnek türü için kullanılan eşitliklere yer verilmiştir.



Şekil 6.13. Rezonans kolonu ve torsiyonel makaslama deney düzeneğinin şematik görünümü [118].

Makaslama dalgası hızını ve makaslama modülünü belirlemek amacıyla öncelikle deney örneğinin kütle polar eylemsizlik momenti (I) Eşitlik 6.1 kullanılarak hesaplanmaktadır [117].

$$I=\frac{md^2}{8} \tag{6.1}$$

Burada;
m: örneğin kütlesi (=ağırlık/yerçekimi ivmesi) ve
d: örneğin dış çapı (inç).

Makaslama dalgası hızı Eşitlik 6.2'nin çözümlenmesiyle belirlenmektedir.

$$\frac{I}{I_0} = \beta tan\beta \tag{6.2.}$$

Burada;
I_0 : Deney hareket sisteminin kütle polar eylemsizlik momenti

$$\beta = \frac{\omega l}{V_s}$$

ω: örneğin doğal döngüsel frekansı
l: örneğin uzunluğu

$$V_s = \frac{\omega l}{\beta} = \frac{2\pi l}{\beta p} \tag{6.3}$$

Burada;
p: rezonans periyodu (milisaniye).

Makaslama dalgası hızı belirlendikten sonra Eşitlik 6.4 kullanılarak deney örneğinin makaslama dalgası modülü hesaplanmaktadır.

$$G = \rho V_s \tag{6.4}$$

Burada; ρ örneğin kütle yoğunluğudur.

Rezonans kolonu deneyi sırasında ölçülen serbest titreşim azalım eğrisinin farklı çevrimlerdeki logaritmik azalımı (δ) kullanılarak deney örneğinin sönümlenme oranı (D) Eşitlik 6.5 ve 6.6'dan hesaplanır [117].

$$\delta = \frac{1}{n+1} ln \frac{z_1}{z_n} \tag{6.5}$$

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2+\delta^2}} \tag{6.6}$$

Burada;
n: δ'nin hesaplandığı çevrim sayısı ve
z: çevrimin genliği.

Rezonans kolonu deneyi sırasında örneğin üst kısmında bulunan hareketli plakaya yerleştirilen bir ivme ölçer yardımıyla torsiyonel yer değiştirmeler ölçülüp bu veriler kullanılarak deney örneğine ilişkin en büyük makaslama birim deformasyonu (γ) Eşitlik 6.7'den hesaplanır [117].

$$\gamma = 1.1067 \times 10^{-9} ap^2 \frac{d_0}{l} \tag{6.7}$$

Burada;
a: ivme ölçer okuması (mV),
p: rezonans periyodu (ms),
d_0: örneğin çapı (inç),
l: örneğin uzunluğu (inç)

6.6.2. Tekrarlı Torsiyonel Makaslama Deneyi

%10^{-3}'den daha büyük makaslama birim deformasyonlarında zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenebilmesi için rezonans kolonu deneylerinin yanı sıra, tekrarlı torsiyonel makaslama deneyleri de yapılmaktadır. Bu deney, rezonans kolonu deneyinin bitiminde aynı örnek ve aynı deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Deney sistemi, düşey eksenel kuvvet (F_z), burulma momenti (T), iç hücre basıncı (P_i) ve dış hücre basıncı (P_0) dış kuvvetlerinin otomatik olarak ölçülüp kaydedilmesinin yanı sıra; düşey eksenel yerdeğiştirme (DH), burulma açısı (D_q), iç hücre hacim değişimi (DV_i) ve örnek hacim değişimi (DV_s)'nin belirlenmesine olanak tanır. Burulma momenti, istenilen değer ve hızda tekrarlı olarak veya bir doğrultuda uygulanmaktadır [119]. Rezonans kolonu deneyinde örnek yüksek frekanslı (>50 Hz) yüklemelere maruz kalırken, torsiyonel makaslama deneyinde örnek daha düşük frekans (< 10 Hz) içeriklerinde yüklenmektedir. Rezonans kolonu deneyinde örneğe rezonans frekansında titreşim uygulandığında örnekte daha büyük makaslama birim deformasyonu gelişmektedir. Bu frekans etkisi makaslama modülü ölçümüne etki etmemekle birlikte, sönümlenme oranının belirlenmesinde önem taşımaktadır. Bu nedenle, rezonans kolonu deneyinin hemen ardından histeretik sönümlenme oranını belirlemek için torsiyonel makaslama deneyi yapılmaktadır. Düşük frekanslarda yapılan deneyler (torsiyonel makaslama) örneğin sönümlenme oranının belirlenmesinde daha etkin olarak kullanılmasına karşın, bu deneylerde örneğin makaslama gerilmesi büyüklüğü daha sınırlı bir aralıkta ölçülmektedir [120].

Rezonans kolonu deneyine benzer şekilde, torsiyonel makaslama deneylerinde de dinamik özellikler elastik ve viskoelastik kuramlardan hesaplanmaktadır. Bu deneyde zemin örneğinin makaslama modülü ve sönümlenme oranı, histeresis eğrilerinden belirlenmektedir. Torsiyonel makaslama deneyinde zemine ilişkin dinamik özelliklerin hesaplanma aşamaları aşağıda kısaca verilmiştir.

Torsiyonel makaslama deneyinden dinamik özellikleri belirleyebilmek için öncelikle deney sırasında uygulanan makaslama gerilmesi (τ) ve bu gerilme sonucunda örnekte meydana gelen birim deformasyon (γ) sırasıyla Eşitlik 6.8 ve 6.9'dan belirlenmektedir [117].

$$\tau = \frac{rT}{J_p} \tag{6.8}$$

Burada;

r: örneğin yarıçapı (inç),

T: uygulanan tork (ft lb),

J_p: polar eylemsizlik momenti alanı ($=\pi r^4/2$).

$$\gamma = \frac{\alpha C}{l} \tag{6.9}$$

Burada;

α: burulma açısı (radyan),

C: makaslama birim deformasyonunun ölçüldüğü andaki örneğin yarıçapı (inç)

l: örneğin uzunluğu (inç).

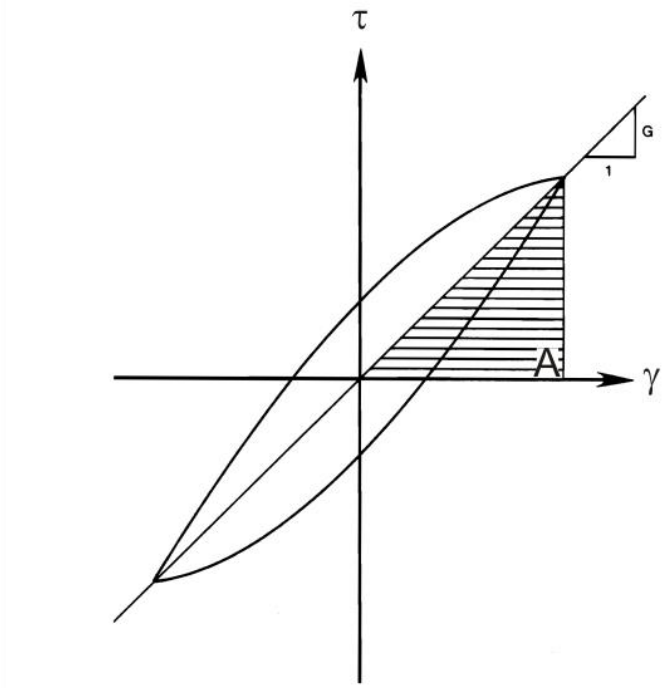
Torsiyonel makaslama deneyinden örneğe ilişkin dinamik özelliklerin belirlenebilmesi için yukarıda anlatıldığı gibi hesaplanan makaslama gerilmesi değerleri Y ekseninde, bu gerilmeler sonucunda oluşan makaslama birim deformasyonu değerleri ise X ekseninde olacak şekilde histeresis eğrisi oluşturulur (Şekil 6.14). Deney örneğinin makaslama modülü bu eğrinin ortalama eğimine ($G=\tau/\gamma$) eşittir. Örneğin histeretik sönümlenme oranı (λ) ise Eşitlik 6.10'dan hesaplanmaktadır [117].

$$\lambda = \frac{A_{çevrim}}{4\pi A_{üçgen}} \tag{6.10}$$

Burada;

$A_{çevrim}$: Histeresis çevriminin alanı (inç^2),

$A_{üçgen}$: Şekil 6.16'da verilen taralı alandır (inç^2).



Şekil 6.14. Tekrarlı torsiyonel makaslama deneyi sonucunda elde edilen histeresis eğrisi ([121]; [117]'den).

6.6.3. Dinamik Deney Sonuçları

Tez çalışması kapsamında AÇ-10 no.'lu araştırma çukuru ve SK5-UD3 no.'lu sondajdan alınmış iki adet turba örneği, yukarıda belirtildiği gibi, Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından sağlanan destekle Torino Politeknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Jeoteknik Laboratuvarı'na gönderilmiş olup, bu laboratuvarda söz konusu örneklerin her biri için birer adet olmak üzere rezonans kolonu ve tekrarlı torsiyonel makaslama deneyleri yapılmıştır. Deneyde kullanılan turba örnekleri ve deney düzeneğine ilişkin birer görüntü sırasıyla Şekil 6.15 ve 6.16'da verilmiştir.

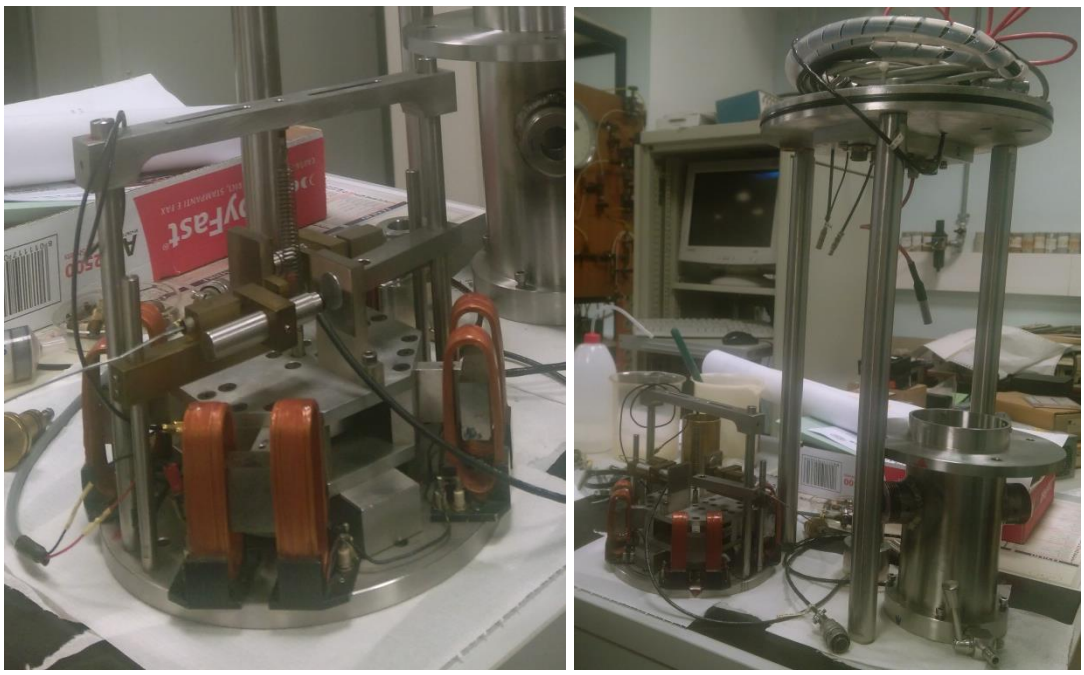
Örnekler izotropik basınç altında konsolide edildikten sonra rezonans kolonu deneyi drenajsız koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Farklı dalga genliklerindeki frekanslar için deney örneğinin tepki değerleri ölçülmüş olup, bunlar Şekil 6.17 ve 6.18'de gösterilmiştir.

(a)

(b)

Şekil 6.15. Dinamik deneyler için Torino Politeknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Jeoteknik Laboratuvarı'na gönderilen (a) AÇ-10 ve (b) SK5-UD3 no.'lu turba örnekleri.

(a) (b)

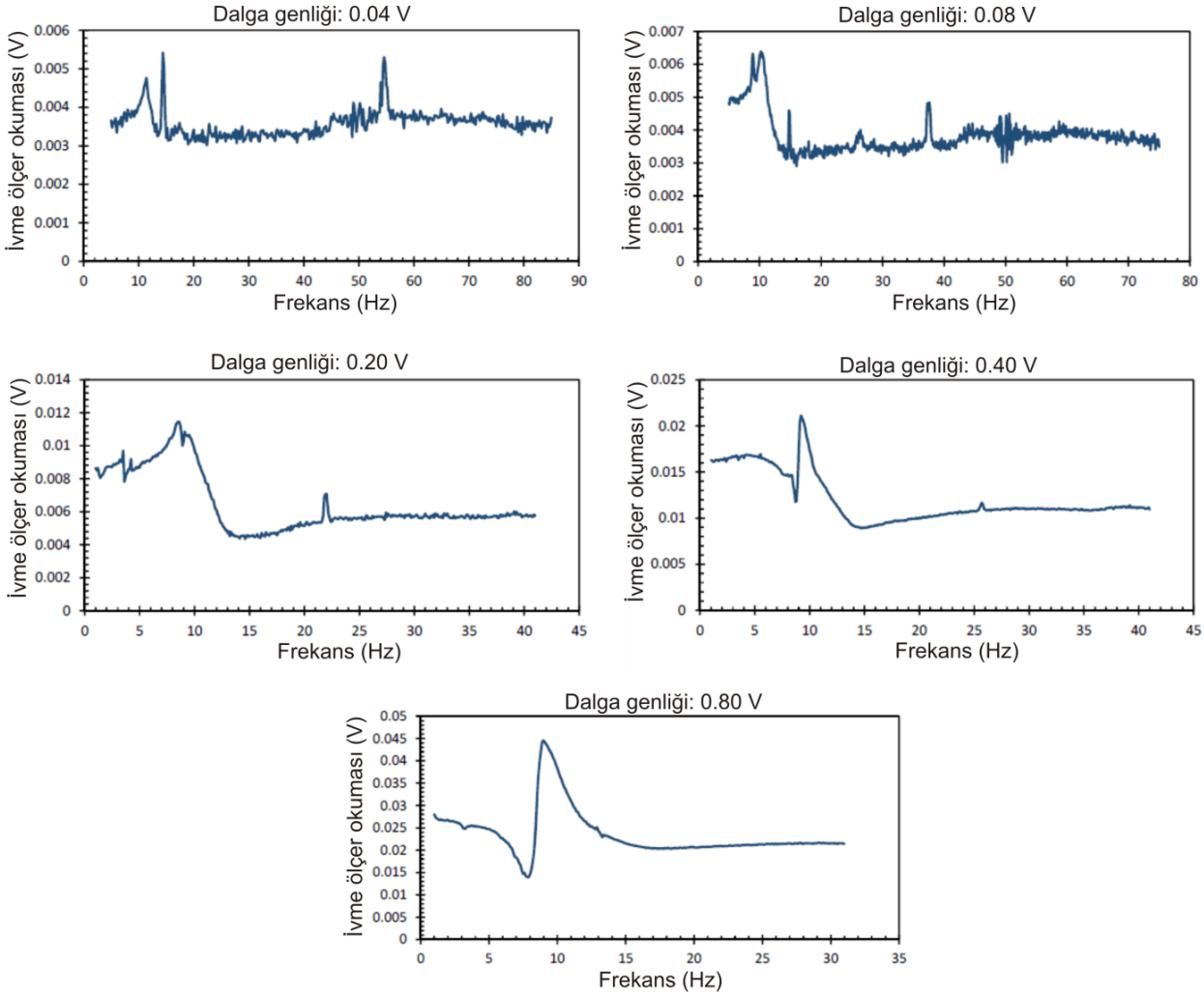


Şekil 6.16. Rezonans kolonu (a) yükleme başlığı ve (b) deney düzeneği (Torino Politeknik Üniversitesi Jeoteknik Laboratuvarı).

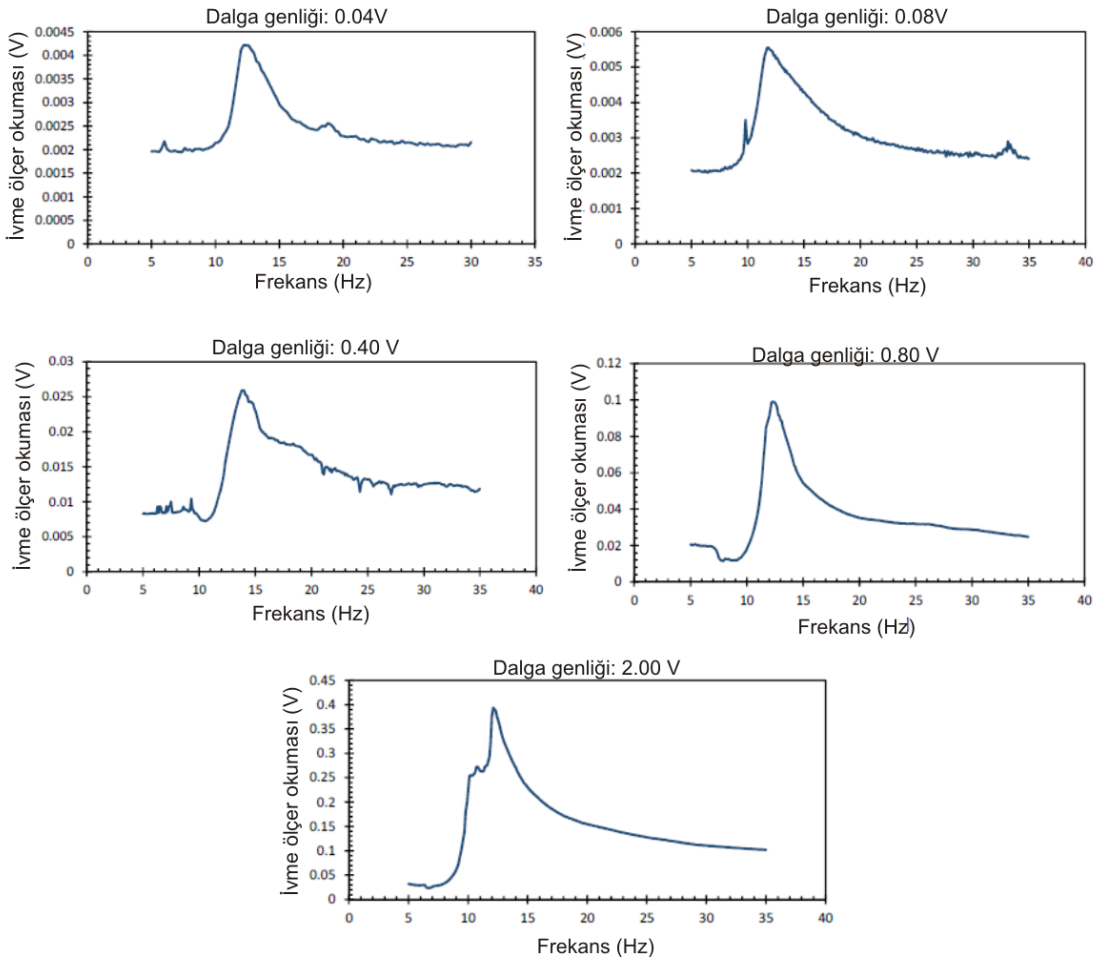
Deney tamamlandıktan sonra histeretik sönümlenmeyi ölçmek amacıyla tekrarlı torsiyonel makaslama deneyi yapılmıştır. Çevrim sayısı 25 olan bu deneyde 0.1 Hz frekanslı sinüzoidal dalga kullanılmıştır. Tekrarlı torsiyonel makaslama deneyi sonucunda turba örneklerinin tekrarlı yükler altında makaslama gerilmesi ve makaslama birim deformasyonu arasındaki ilişkiyi temsil eden histeretik eğriler çizilmiş olup, makaslama modülü ve sönümlenme oranının çevrim sayısına bağlı değişim grafikleriyle birlikte Şekil 6.19 ve 6.20'de verilmiştir.

Turba zeminlerin sismik yer tepkisinin değerlendirilmesinde kullanılacak olan modül azalım ilişkisi ve tekrarlı makaslama birim deformasyonuna bağlı sönümlenme oranları, rezonans kolonu ve tekrarlı torsiyonel makaslama deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışmada hesaplanan modül azalım (G/G_{max}) ilişkisi, farklı plastisite indekslerine (PI) sahip zeminler için Vucetic ve Dobry [85]'nin önerdiği ve Seed ve Idriss [82]'in Union Bay turbası için belirlediği modül azalım ilişkileri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.21). Buna göre, inceleme alanındaki turbaların PI=0 olan zeminlere kısmen benzer şekilde davrandığı görülmektedir. Sönümlenme

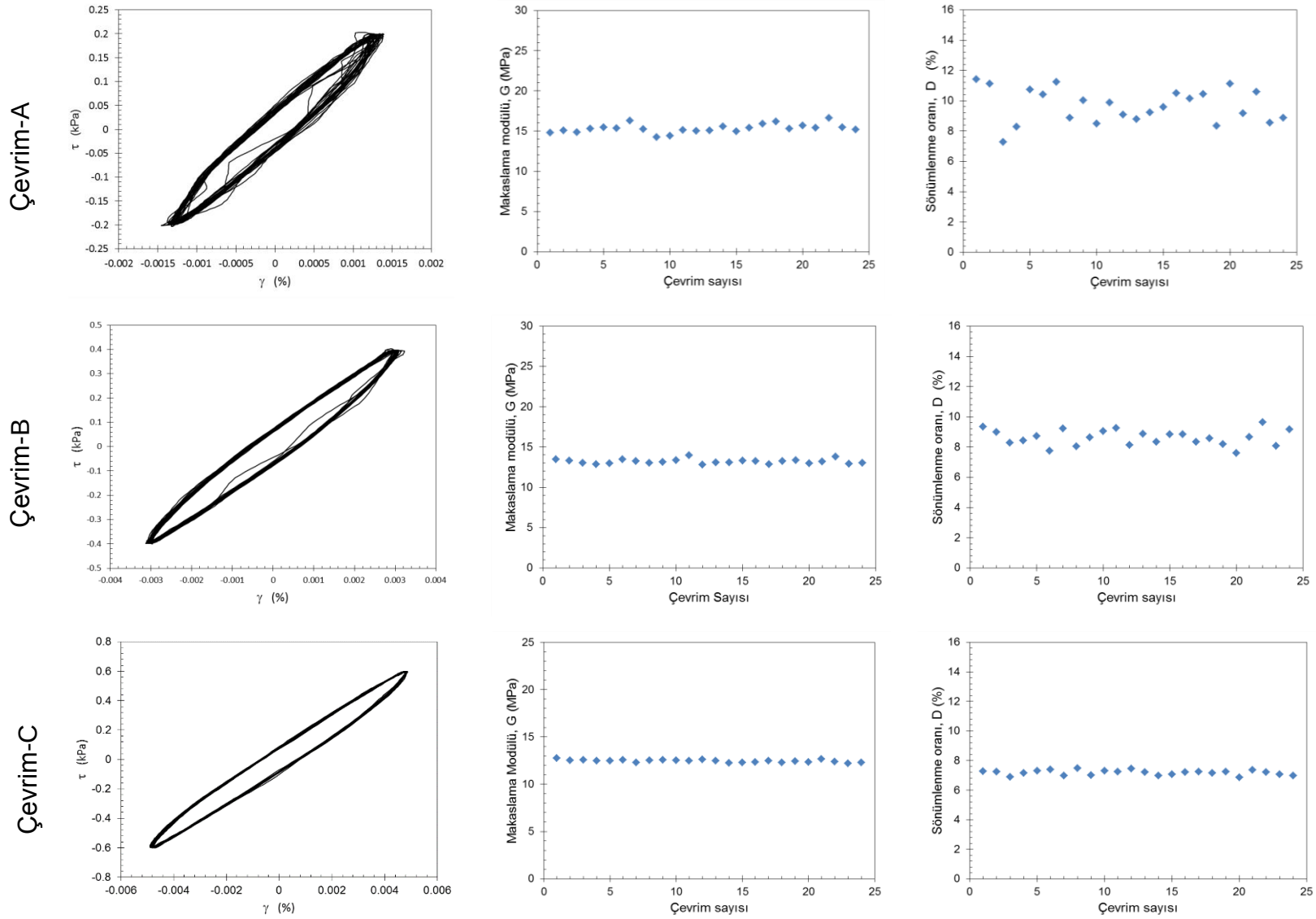
oranlarına bakıldığında ise inceleme alanındaki turba zeminler, düşük birim deformasyonlarda Union Bay turbalarına benzer sönümlenme oranlarına sahipken daha yüksek birim deformasyonlarda farklı bir davranış sergilemektedirler.



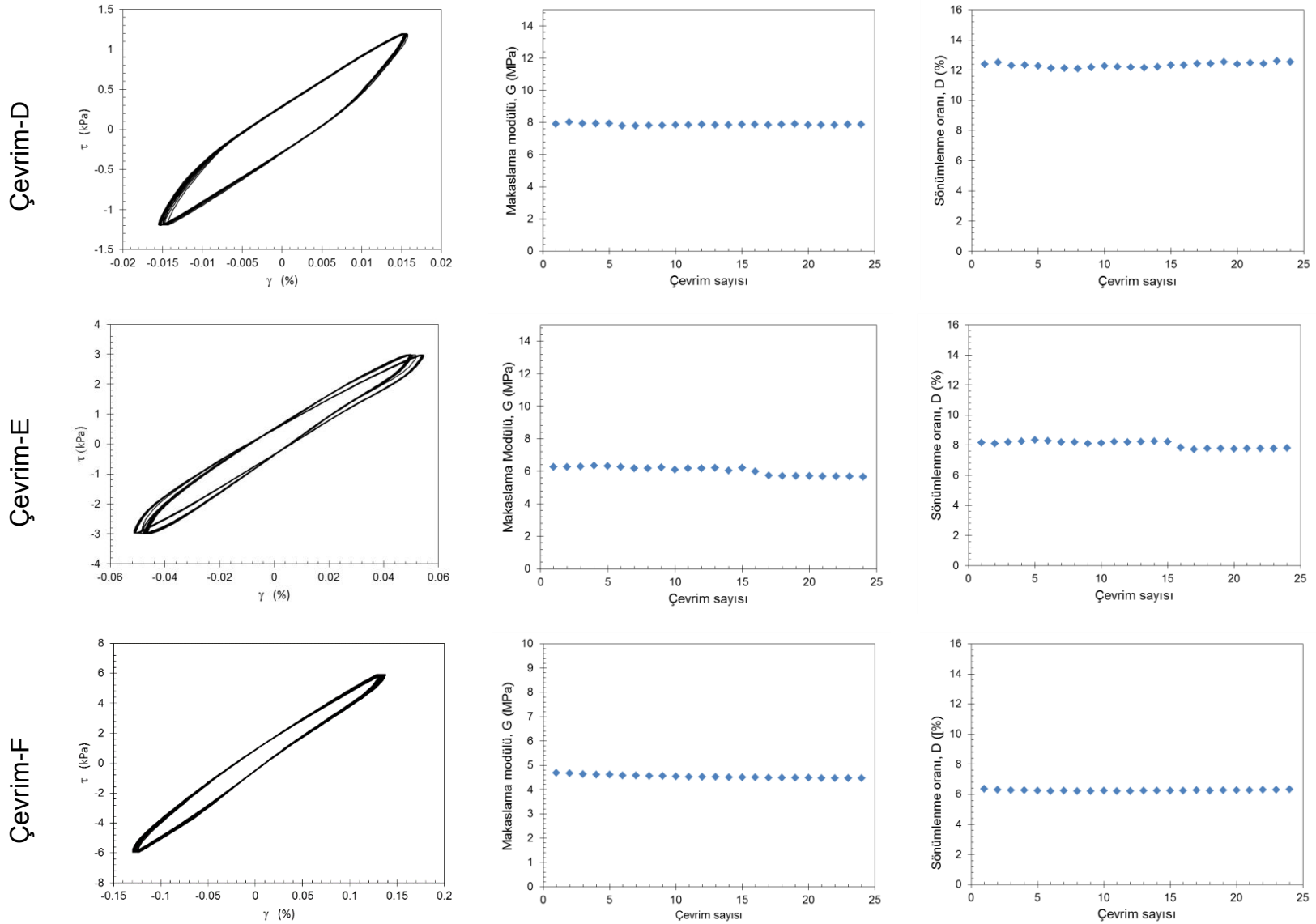
Şekil 6.17. SK5-UD3 no.'lu araştırma çukurundan alınmış turba örneğinin rezonans kolonu deneyinden elde edilen dinamik tepki eğrileri.



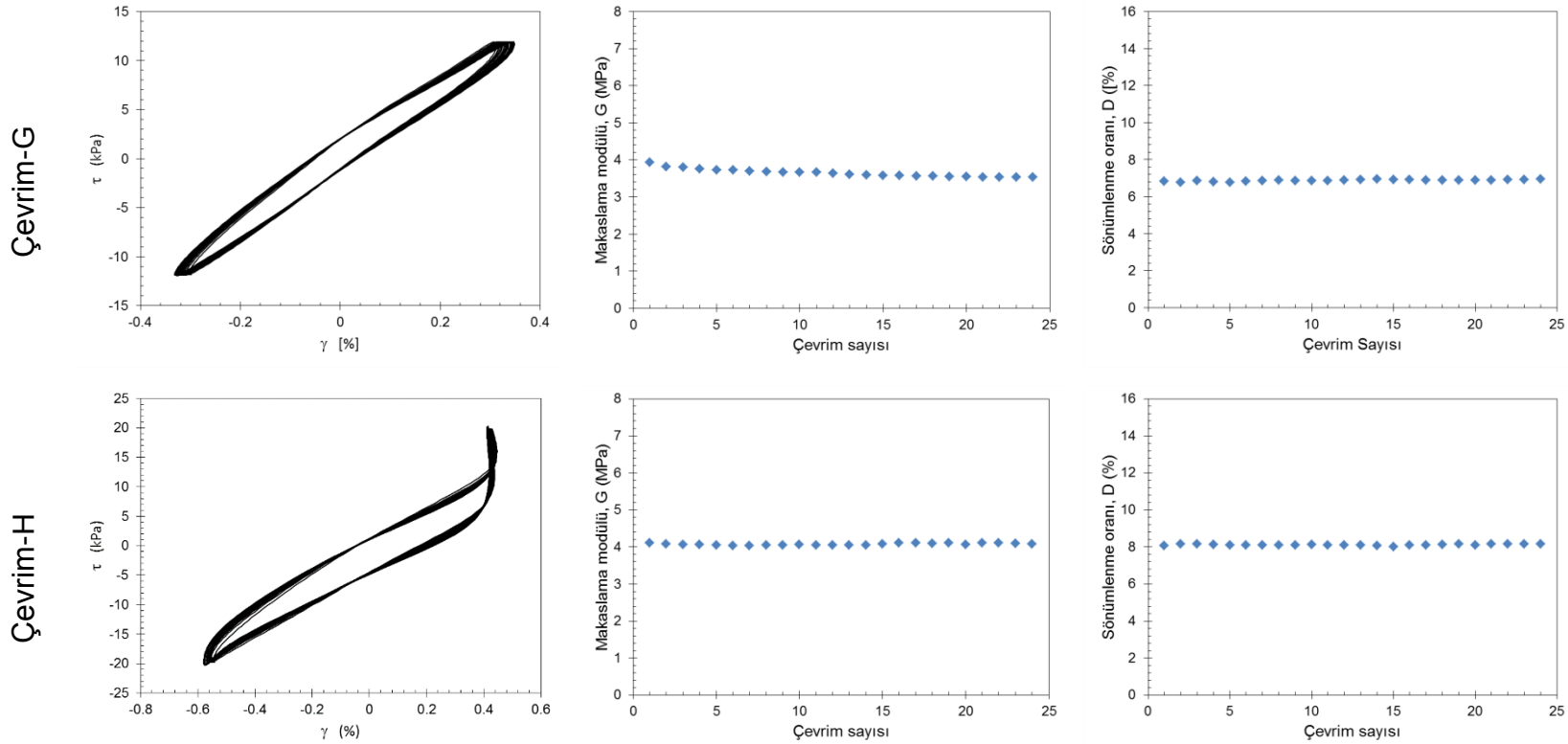
Şekil 6.18. AÇ-10 no.'lu araştırma çukurundan alınmış turba örneğinin rezonans kolonu deneyinden elde edilen dinamik tepki eğrileri.



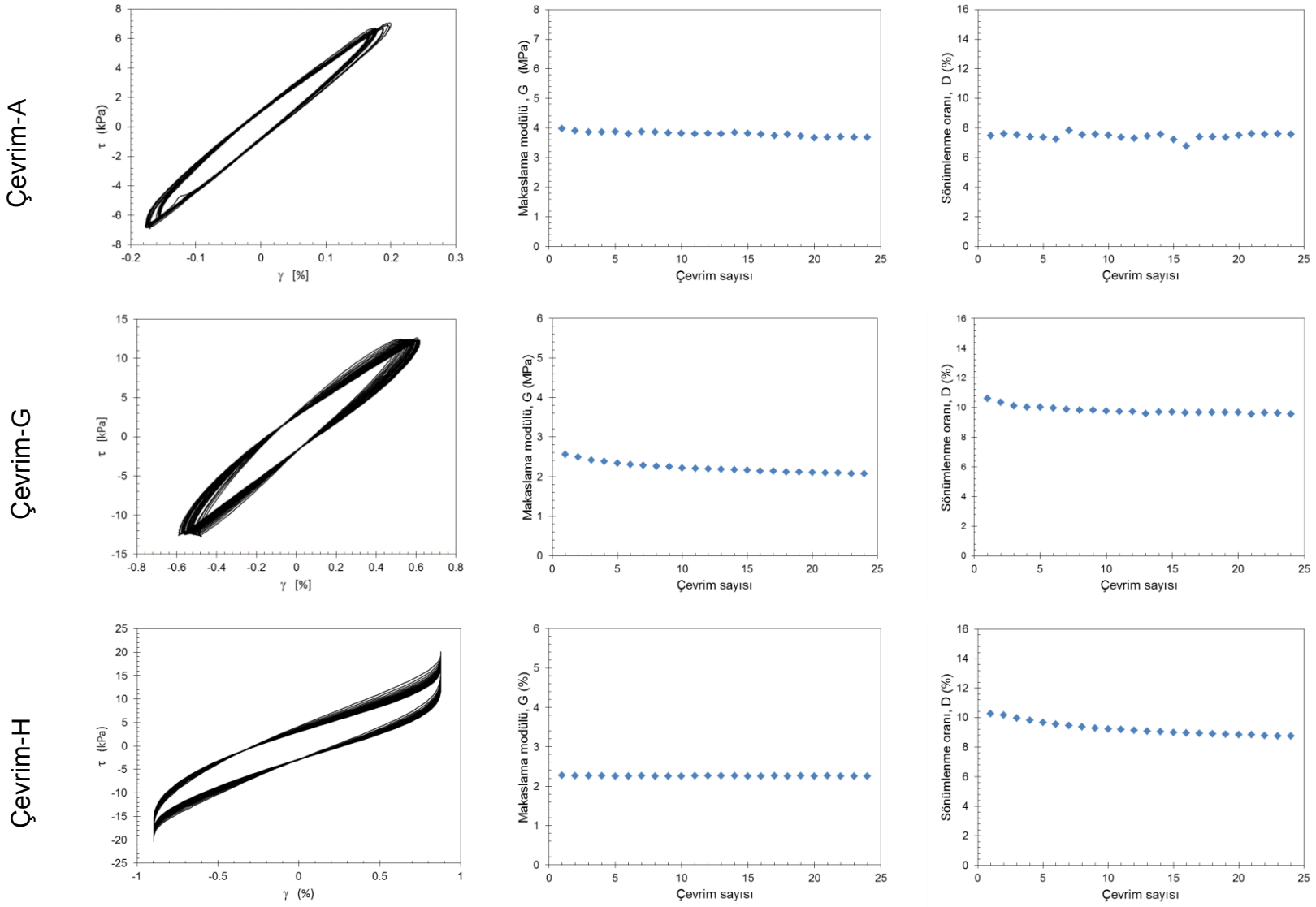
Şekil 6.19. Tekrarlı torsiyonel makaslama deneyi sonucunda AÇ-10 no.'lu araştırma çukurundan alınan turba örneği için elde edilen histeretik eğri, makaslama modülü ve sönümlenme grafikleri.



Şekil 6.19. (devam ediyor)

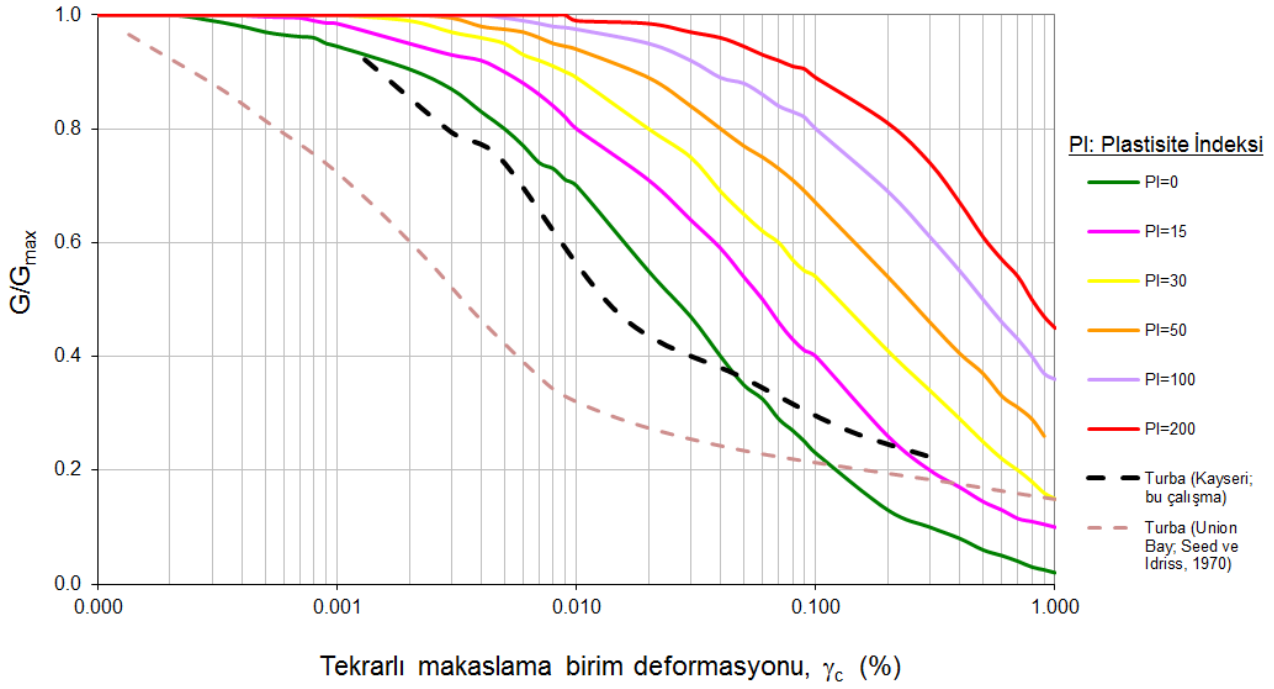


Şekil 6.19. (devam ediyor)

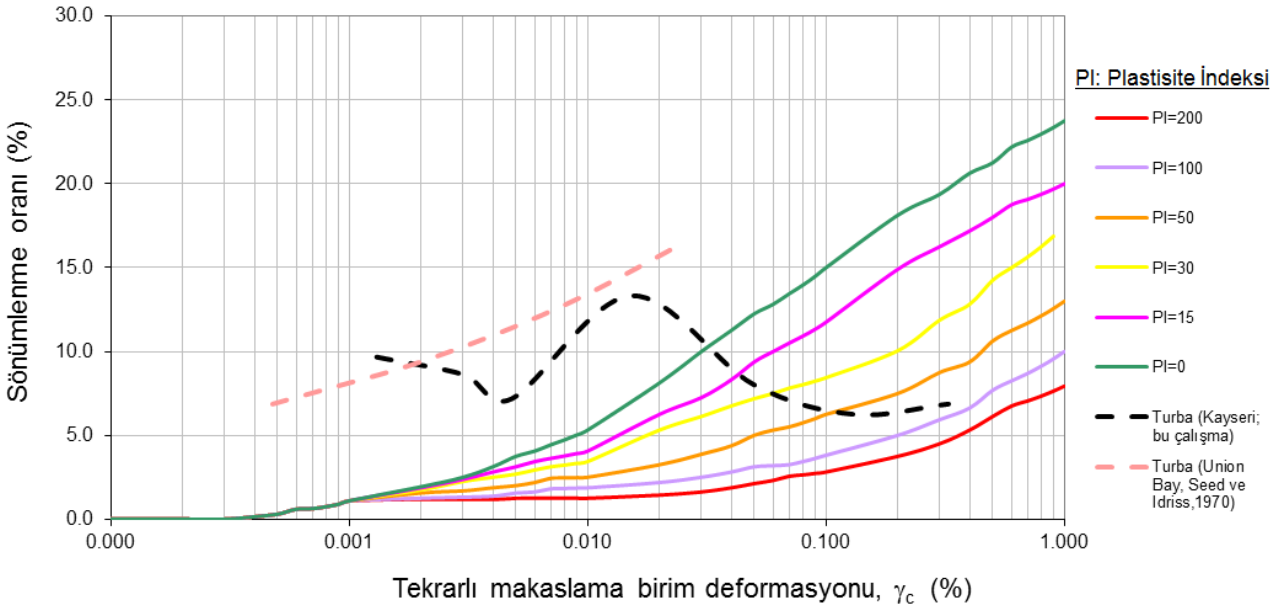


Şekil 6.20.Tekrarlı torsiyonel makaslama deneyi sonucunda SK5-UD3 no.'lu sondajdan alınan turba örneği için elde edilen histeretik eğri, makaslama modülü ve sönümlenme grafikleri.

(a)



(b)



Şekil 6.21. İnceleme alanındaki turba zeminler için dinamik deneyler sonucunda belirlenen (a) modül azalım ilişkisi ve (b) sönümlenme oranı grafikleri ile Union Bay [82]'e ait örneklerin sönümlenme oranı grafiklerinin karşılaştırılması.

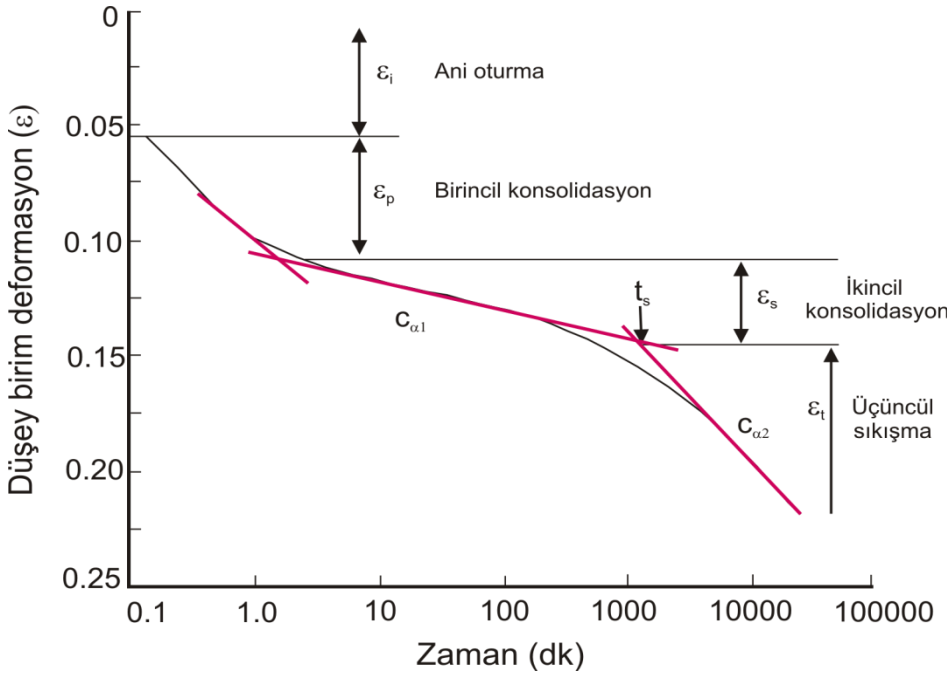
7. TURBA ZEMİNLERİN OTURMA DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

KAYSER ve civarında bulunan turba zeminler üzerinde inşa edilmiş yapılarda gözlenen oturma sorunu dikkate alınarak, bu bölgedeki turba zeminlerin sıkışma davranışının değerlendirilmesi ve bu zeminlerin zamana bağlı oturma miktarının tahmin edilmesi bu tez çalışmasının en önemli amaçlarından biridir. Bu amaçla, tez çalışması kapsamında klasik konsolidasyon deneyleri, uzun süreli konsolidasyon deneyleri ve üç eksenli deney hücresinde gözenek suyu basıncı ölçümleri yapılmış, arazide inşa edilen gözlem dolgusu altında turba zeminde oturma ölçümleri alınmış, deneylerden belirlenen parametreler düzenlenerek, arazide inşa edilen gözlem platformunda ölçülen oturma laboratuvar verisi kullanılarak geriye dönük analizlerle modellenmiştir.

Yukarıda sözü edilen deneysel çalışmalara 6. Bölüm'de ana hatlarıyla değinilmiş olup, tez çalışması kapsamında turba zeminlerin oturma davranışının değerlendirilmesine ilişkin olarak gerçekleştirilen diğer çalışmalar bu bölümde ayrıntılarıyla ele alınmıştır.

7.1. Uzun Süreli Konsolidasyon Deney Sonuçlarının ve Gözlem Platformunda Ölçülen Oturmanın Değerlendirilmesi

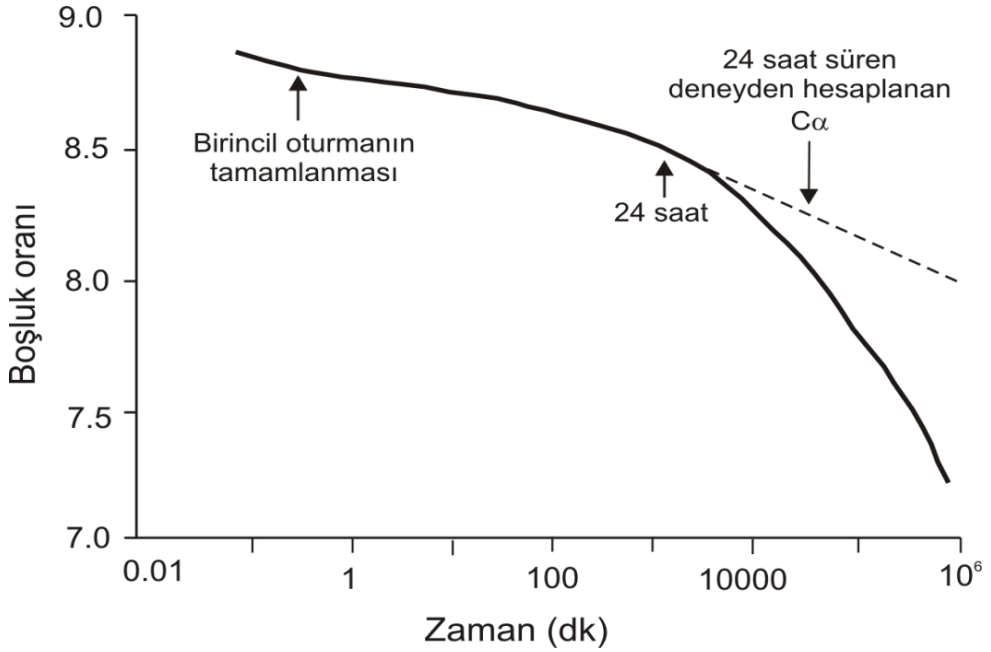
Edil ve Dhowian [114], Candler ve Chartres [122], Fox vd. [49] ve Sing vd. [123] gibi araştırmacılar; turba zeminlerin sıkışabilirliğinin birincil konsolidasyon, ikincil konsolidasyon ve üçüncül sıkışma olmak üzere üç aşamada olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 7.1). Turba zeminlerde birincil konsolidasyon aşaması çok hızlı bir şekilde tamamlanmakta olup; ikincil konsolidasyon aşamasında daha fazla miktarda sıkışma meydana gelmektedir [124]. İkincil sıkışmanın yalnızca zemin tanelerinin sıkışmasına değil, aynı zamanda katı malzemenin plastik yenilmesine de bağlı olduğu Samson ve La Rochelle [92] tarafından vurgulanmıştır.



Şekil 7.1. Turba zeminlerin sıkışma-zaman davranışı (114).

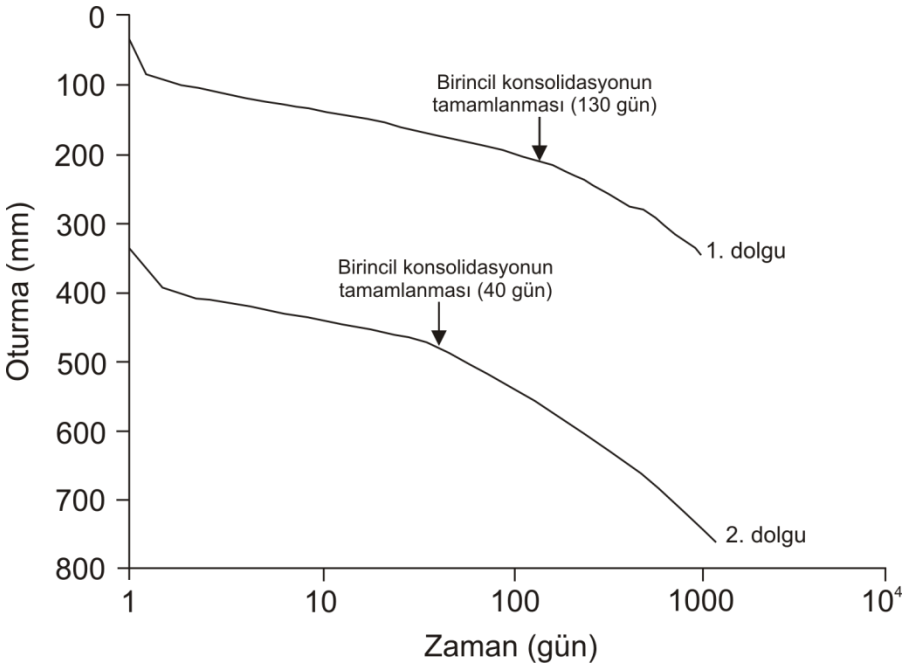
Fox ve Edil [62], Middleton (ABD) turbalarından almış oldukları bir örneğe klasik odometrede 1.5 yıl boyunca 44 kPa'lık bir normal gerilme uygulayarak; bu örneğin sıkışma davranışını değerlendirmişlerdir (Şekil 7.2). Bu araştırmacılar, gözenek suyu basıncı ölçümlerine göre birincil konsolidasyonun 1 dk'dan kısa sürede tamamlandığını (örnek boyu: 20 mm), ikincil sıkışma indisinin zamanla arttığını ve 24 saatlik konsolidasyon deneylerinden elde edilen ikincil sıkışma indisinin kullanılmasıyla tahmin edilen oturmaların gerçekte meydana gelebilecek oturma miktarından daha düşük olarak hesaplanacağını saptamışlardır.

Yukarıda sözü edilen araştırmacıların bulgularına benzer şekilde, bu tez çalışması kapsamında yapılmış olan uzun süreli konsolidasyon deneylerinde de inceleme alanındaki turba zeminlerin sıkışma sürecinin üç aşamada gerçekleştiği belirlenmiştir. Deneyler sırasında birincil konsolidasyon aşamasının normal gerilmenin uygulanmasından hemen sonraki birinci dakika içinde tamamlandığı ve ikincil konsolidasyon sürecinin başladığı Şekil 6.9a ve 6.10a'da görülmektedir. Yaklaşık olarak 1000-1200 dakikalar arasında ise, deney örneklerinin sıkışma hızının arttığı ve üçüncül sıkışma aşamasının başladığı saptanmıştır.



Şekil 7.2. Middleton (ABD) turbasına ait boşluk oranı-zaman grafiği (62).

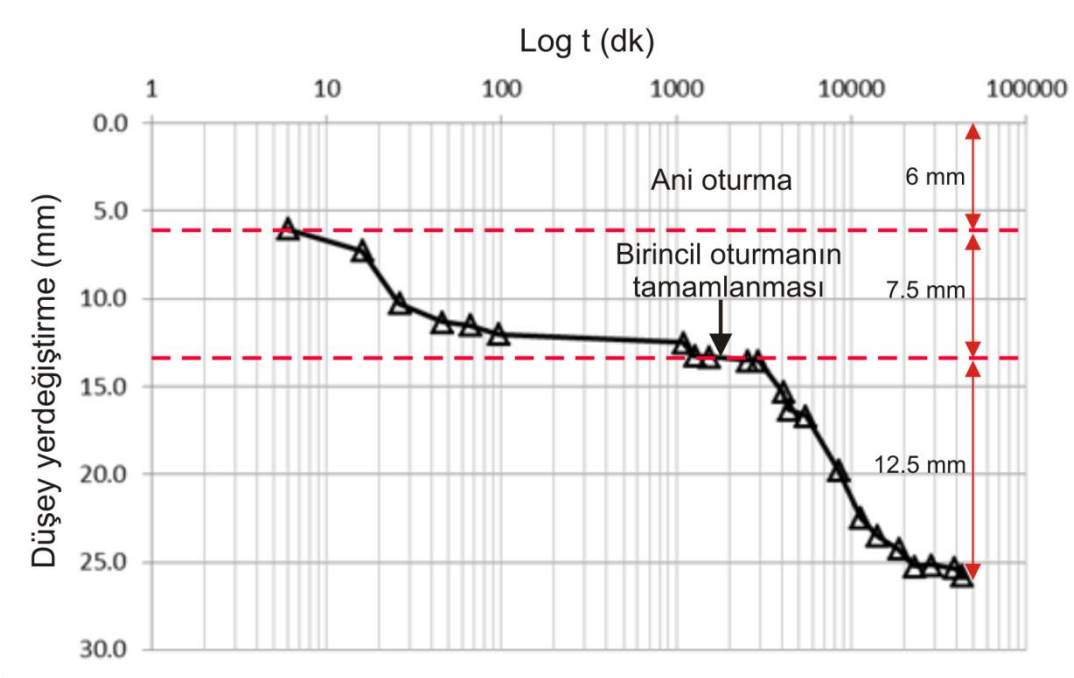
Fox ve Edil [62], turba zeminlerin ikincil sıkışma davranışlarını ve bu zeminlerin sıcaklıkla oturma miktarının nasıl değiştiğini değerlendirmek amacıyla arazide aynı boyutlarda iki adet gözlem dolgusu inşa etmişlerdir. Boyutları 13 m x 13 m olan bu dolguların zemine aktardığı yükün 24 kPa olduğunu belirten araştırmacılar, 2. dolgunun altındaki turba zemini belirli zamanlarda ısıtarak, 1. dolguyu ise doğal koşullarında olmak üzere turba zeminde meydana gelen oturmaları yaklaşık 3 yıl boyunca izlemişlerdir. Bu dolgularda zamana bağlı olarak ölçülen oturma Şekil 7.3'te sunulmuştur. Araştırmacılar, piyezometre okumalarına göre birincil konsolidasyon sürecinin 2.8 m kalınlığındaki turba zemin üzerinde inşa edilmiş 1. dolguda 130 günde, 2. dolguda ise 40 günde tamamlandığını saptamışlardır. Oturma miktarında sıcaklığın oldukça etkili olduğunu vurgulayan Fox ve Edil [62], ısıtılan turba seviyesindeki oturma miktarının ısıtılmayan seviyeye göre daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Bunların yanı sıra araştırmacılar, toplam oturma miktarının önemli bir kısmının ikincil sıkışma aşamasında gerçekleştiğini ve ikincil sıkışma indisinin laboratuvar deneylerinde olduğu gibi arazi ölçümlerinde de zamana bağlı olarak (sıkışma-log zaman grafiklerinden) doğrusal olmayan şekilde değiştiğini gözlemlemişlerdir.



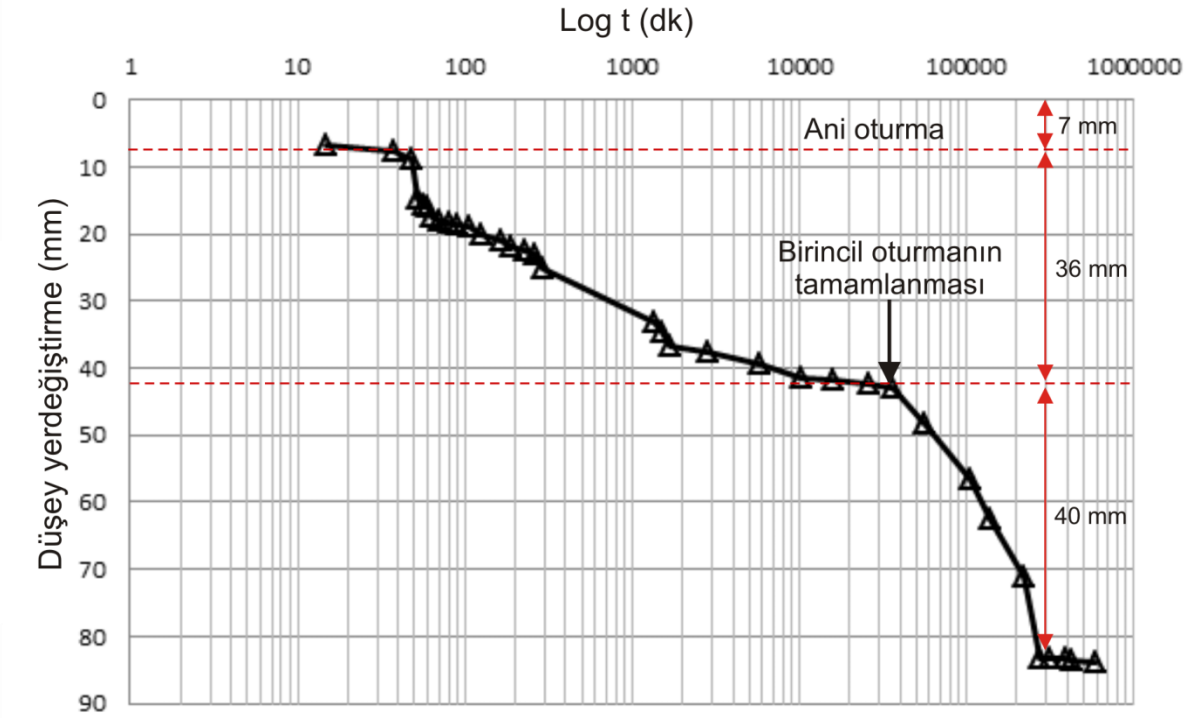
Şekil 7.3. Fox ve Edil [62] tarafından arazide inşa edilmiş iki gözlem dolgusuna ait oturma-zaman grafiği.

Tez çalışması kapsamında inceleme alanındaki turba zeminlerin oturma davranışının değerlendirilmesi amacıyla Fox ve Edil [62]'in çalışmasına benzer şekilde, ayrıntısına 5. Bölümde de değinilen bir gözlem platformu arazide inşa edilmiş ve bu platform kaya bloklarıyla yüklenerek, platformun altında yer alan yaklaşık 6.3 m kalınlığındaki turba zeminde meydana gelen oturmalar zamana bağlı olarak ölçülmüştür (bkz. Şekil 5.21 ve 5.22). Laboratuvarda alınan gözenek suyu basıncı verilerine göre, gözlem platformunun altındaki turba zeminde birincil konsolidasyonun platformun yükü altında (9.85 kPa) 1973 dakikada, platformun kaya bloklarıyla yüklenmesinden sonra ise 34854 dakikada tamamlandığı hesaplanmıştır. Birincil konsolidasyonun tamamlanma süresi dikkate alınarak yapılan değerlendirmelerde, yalnızca platformun yükü altında 28 günlük sürede gerçekleşen 26 mm'lik toplam oturmanın yaklaşık 6 mm'sinin ani oturmaya, 7.5 mm'sinin birincil oturmaya ve 12.5 mm'sinin ise ikincil oturmaya ait olduğu düşünülmektedir (Şekil 7.4a). Platformun kaya bloklarıyla yüklenmesinden (34.12 kPa) sonra gözlenen toplam 83 mm'lik oturmanın ise 7 mm'si ani oturma, 36 mm'si birincil oturma ve 40 mm'si ise ikincil oturma olarak tahmin edilmiştir (Şekil 7.4b). Şekil 7.4'te verilen oturma miktarları platformun 4 köşesinden alınan okumaların ortalamasıdır. Uzun süreli konsolidasyon deney sonuçlarına benzer

(a)



(b)



Şekil 7.4. Gözlem platformunun (a) inşa edilmesinden itibaren yükleme aşamasına kadar geçen 28 günde ve (b) platformun kaya bloklarıyla yüklenmesinden sonra turba zemine ait oturma – zaman (log) grafikleri.

şekilde, arazide inşa edilen gözlem platformunda birincil oturmalar tamamlandıktan sonra oturma hızı yavaşlamamış, aksine hızlanma eğilimi göstermiştir. Gözlem platformunda, uzun süreli konsolidasyon deneylerinden farklı olarak, üçüncül sıkışma davranışı gözlenmemiştir. Bunun nedeninin oturma ölçümlerinin alındığı zaman aralığının yeterli olmaması olduğu düşünülmektedir.

Tez çalışmasının 3. Bölümü'nde ayrıntısına değinilen inceleme alanında Sert ve Önalp [9] tarafından yapılan çalışmada, turba zemin üzerinde kurulu bir sanayi tesisinin boru dilme platformunun altında meydana gelen oturmalar platformun inşasının tamamlanmasından 16 gün sonra ölçülmeye başlanmış ve bu platformunun altındaki turba zeminde 55 günde ortalama 85 mm oturma gerçekleşmiş olup, platformun inşasının başlamasından oturma ölçümlerinin alınmasına kadar geçen sürede ise yaklaşık 500 mm'lik bir oturmanın olduğu araştırmacılar tarafından gözlenmiştir. Sert ve Önalp [9] da, bu tez çalışmasında elde edilen bulgulara benzer şekilde, platformda ölçülen oturmaların zamanla yavaşlaması beklenirken artış gösterdiğini belirlemişlerdir.

7.2. Gözlem Platformunda Ölçülen Oturmanın Laboratuvar Verisi Kullanılarak Kestirimi

Tez çalışması kapsamında turba zeminlerin oturma davranışının değerlendirilmesi amacıyla yapılan çalışmalardan biri de, inceleme alanından alınmış turba zeminlere ilişkin laboratuvar verileri kullanılarak arazide inşa edilen gözlem platformunda ölçülen oturma miktarının kestirimidir. Bu amaçla, laboratuvar deneylerinden belirlenen konsolidasyon parametreleri kullanılarak SETTLE 3D [125] programında geriye dönük oturma analizleri yapılmıştır. Laboratuvar deneylerinden elde edilen ortalama konsolidasyon parametreleri kullanılarak yapılan analizlerde, bu parametrelerin ortalama değerlerinin belirlendiği gerilme aralığının, gözlem platformunun zemine ilettiği gerilme aralığından daha büyük gerilme aralıklarında olması nedeniyle gözlem platformunda ölçülen oturma miktarından daha büyük oturmalar hesaplanmıştır. Gözlem platformunda ölçülen oturma miktarının doğru olarak kestirilebilmesi amacıyla literatürde bu konuyla ilgili yapılmış çalışmalar da değerlendirilmiş olup, bu bilgiler

ışığında konsolidasyon deneylerinden elde edilen bazı parametreler yeniden düzenlenmiştir. Geriye dönük oturma analizinde kullanılan konsolidasyon parametrelerinin (C_c, C_α, OCR) hesaplanma aşamaları, analizin yapılışı ve konuya ilişkin literatür çalışmaları aşağıda verilen paragraflarda ayrıntılarıyla tartışılmıştır.

İnceleme alanındaki turba zeminlerin konsolidasyon parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen sıkışma-zaman grafiklerine göre (bkz. Şekil 6.8) bu zeminler Leonards ve Girault [59] tarafından tanımlanan ve 3. Bölüm'de değinilen (bkz. Şekil 3.4) Tip III türündeki sıkışma-zaman davranışını sergilemektedir. Bu türde davranan zeminlerde, birincil konsolidasyon süreci hızlı bir şekilde tamamlanarak bu süreci doğrusal bir şekilde devam etmeyen ikincil sıkışma davranışı izlemektedir. Fox ve Edil [62], Mesri [54], Robinson [57], Gofar [55] ve Azari [58] gibi araştırmacılar; turba zeminlere ilişkin sıkışma zaman eğrilerinin kırılma noktasından daha önce birincil sıkışma sürecinin tamamlandığını belirtmişlerdir. Bu araştırmacıların bulguları dikkate alınarak, turba zeminler için klasik konsolidasyon deneylerinden belirlenen sıkışma-zaman eğrilerinden, Terzaghi'nin konsolidasyon teorisi kullanılarak hesaplanan konsolidasyon parametrelerinin bu zeminler için temsil edici olmadığı söylenebilir [55].

Tezin önceki bölümlerinde de belirtildiği gibi, Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'nda konsolidasyon deneyi sırasında gözenek suyu basıncını ölçebilecek bir düzenek bulunmaması nedeniyle tez çalışması kapsamında yapılmış olan konsolidasyon deneylerinde gözenek suyu basıncı ölçülememiştir. Dolayısıyla, Tip III türünde davranan bu zeminde e-log P eğrilerinden konsolidasyon parametrelerinin (C_c, C_α, t_{50}, t_{90} ve C_v vb. gibi) belirlenmesi hususunda sorun yaşanmıştır. Bu sorunun giderilmesi amacıyla, Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda üç eksenli deney hücresinde inceleme alanından alınan bir turba örneği için farklı efektif gerilmeler altında gözenek suyu basıncı ölçümleri yapılmıştır. Ayrıntısı 6. Bölüm'de tartışılan bu deneyden elde edilen veriler ışığında, tez çalışması kapsamında yapılmış

konsolidasyon deneylerinde uygulanan gerilme seviyeleri için gözenek suyu basıncının sönümlenme süreleri tahmin edilmiştir.

Gözenek suyu basıncı ölçümü deneyi sırasında 35 mm çapında ve 70 mm boyundaki turba örneğine uygulanan 40, 80, 100 ve 150 kPa'lık efektif gerilmeler altında gözenek suyu basınçlarının sırasıyla 6.25, 36, 49 ve 144 dakikada sönümlendiği ve bu gerilme düzeyleri ile gözenek suyu basıncı sönümlenme süreleri arasında eğrisel bir ilişki olduğu saptanmıştır (Şekil 7.5).

Bu deneye tabi tutulan örneğin boyunun 70 mm, konsolidasyon deneylerinde kullanılan örnek boylarının ise 20 mm olması nedeniyle deney sonucunda belirlenen gözenek suyu basıncı sönümlenme zamanları, konsolidasyon deney örneğinin drenaj boyuna göre Eşitlik 7.1. kullanılarak yeniden hesaplanmıştır. Buna göre, tez çalışması kapsamında yapılmış konsolidasyon deneyleri için belirlenen gerilme-gözenek suyu basıncı sönümlenme ilişkisi Şekil 7.6'da verilmiştir. Bu ilişki değerlendirildiğinde, 54 kPa'dan daha düşük gerilmeler altında gözenek suyu basıncının 1 dk'dan kısa bir sürede sönümlendiği anlaşılmaktadır.

$$C_v = (T_v \times H^2)/t \qquad (7.1)$$

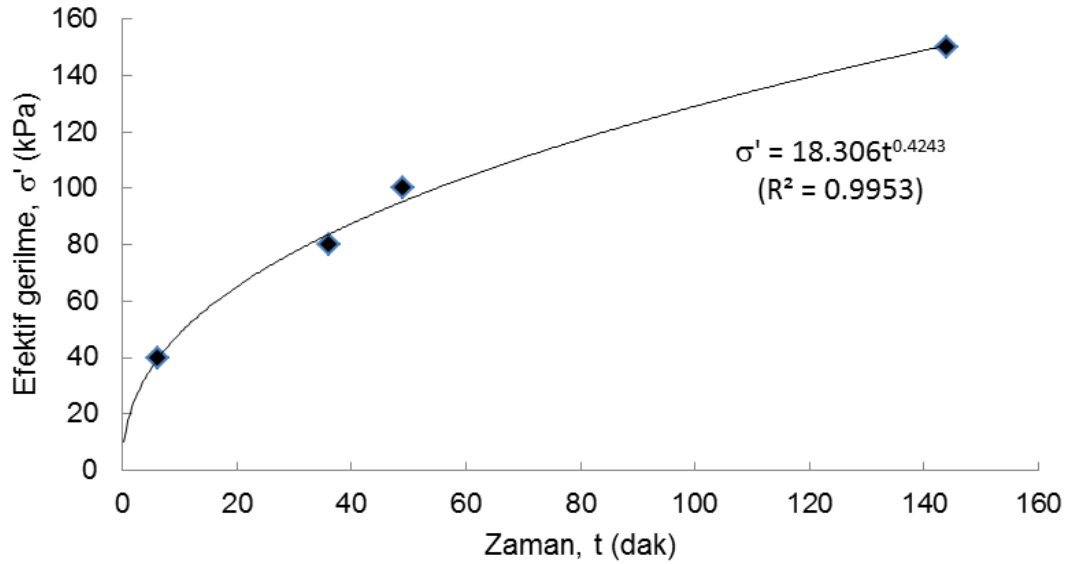
Burada,

T_v : Zaman faktörü, U (Konsolidasyon yüzdesi) = %99 $\rightarrow$ T_v=1.781

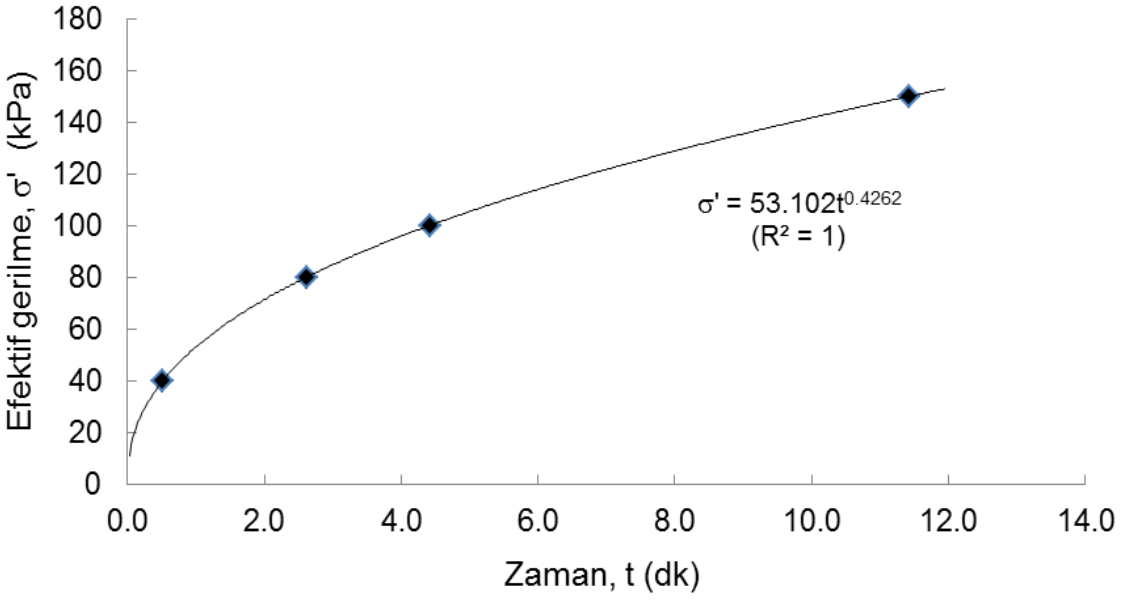
H : Drenaj boyu (mm)

t : Gözenek suyu basıncı sönümlenme zamanı (dk)

Samson ve La Rochelle [92], turba zeminlerde birincil oturmanın tamamlanma süresinin yaklaşık 15 s olduğunu belirtmişlerdir. Fox ve Edil [62], Middleton turbaları üzerinde yaptıkları konsolidasyon deneyinde (örnek kalınlığı: 20 mm) 44 kPa gerilme altında 1 dk'dan daha kısa bir sürede birincil oturmanın tamamlandığını gözlemlemişlerdir. Bu tez çalışmasında da Turba zeminler için farklı gerilme seviyelerine göre belirlenen birincil oturma süreleri literatür verileriyle benzeşmektedir.



Şekil 7.5. AÇ-10 no.'lu araştırma çukurundan alınmış turba örneği için üç eksenli deney hücresinde farklı efektif gerilmeler altında gözenek suyu basıncı sönümlenme süreleri.



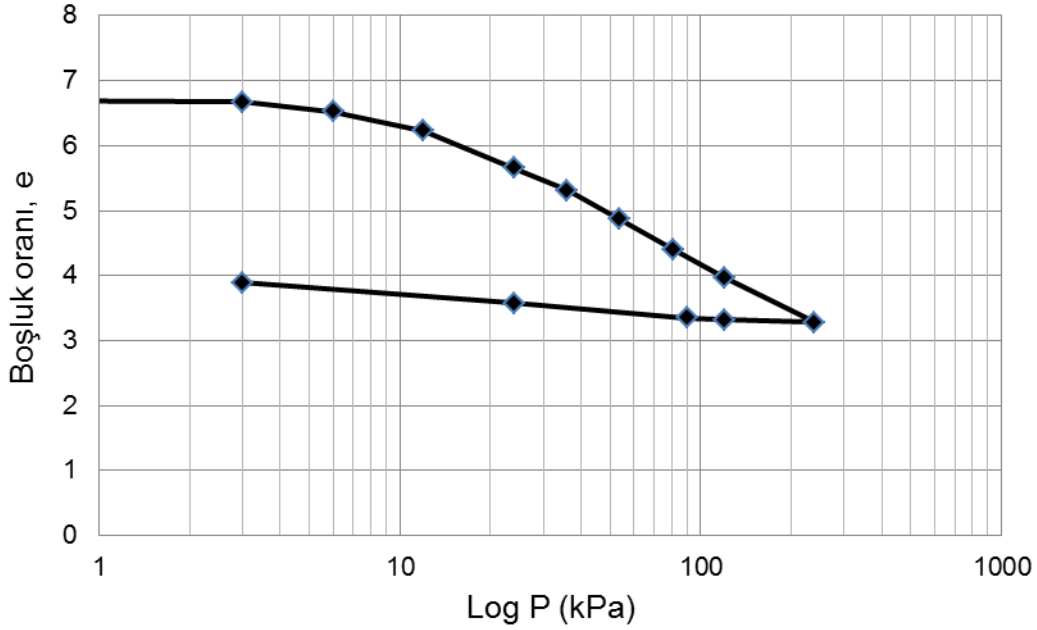
Şekil 7.6. Konsolidasyon deneyleri için belirlenen gerilme-gözenek suyu basıncı sönümlenme ilişkisi.

İlksel sıkışma indisi C_c, konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilen e-log P grafiklerinde bakir sıkışma eğrisinin eğiminden hesaplanmaktadır. Turba zeminlerin ilksel konsolidasyonunun çok kısa sürede tamamlanması nedeniyle bu zeminlere ilişkin e-log P eğrilerinden belirlenen C_c ikincil sıkışmanın da bir kısmını içermekte ve birincil oturma miktarlarının olduğundan fazla hesaplanmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, turba zeminler için elde edilen e-log P eğrilerinin, Robinson [60] tarafından da yapıldığı gibi (bkz. Bölüm 3.2), yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Ancak, bu tez çalışmasında yapılan konsolidasyon deneyleri sırasında gözenek suyu basıncının sürekli ölçümü sağlanamadığı için konsolidasyon yüzdesi belirlenememiş ve Robinson [60] tarafından önerilen yöntem kullanılamamıştır. Buna alternatif olarak, tez çalışmasında her gerilme seviyesi için gözenek suyu basıncı ölçümlerinden belirlenmiş olan birincil oturmanın tamamlandığı zamana kadar, o gerilme seviyesinde örnek boyunda meydana gelen değişimler dikkate alınarak boşluk oranları tekrar hesaplanmış ve e-Log P eğrisi yeniden düzenlenmiştir. Şekil 7.7'de SK5-UD3 no.'lu turba örneğine ilişkin laboratuvar deneylerinden elde edilmiş ve yeniden düzenlenmiş e-Log P eğrileri örnek olarak verilmiş ve bu eğrilerden hesaplanan bazı C_c değerleri ise Çizelge 7.1'de sunulmuştur.

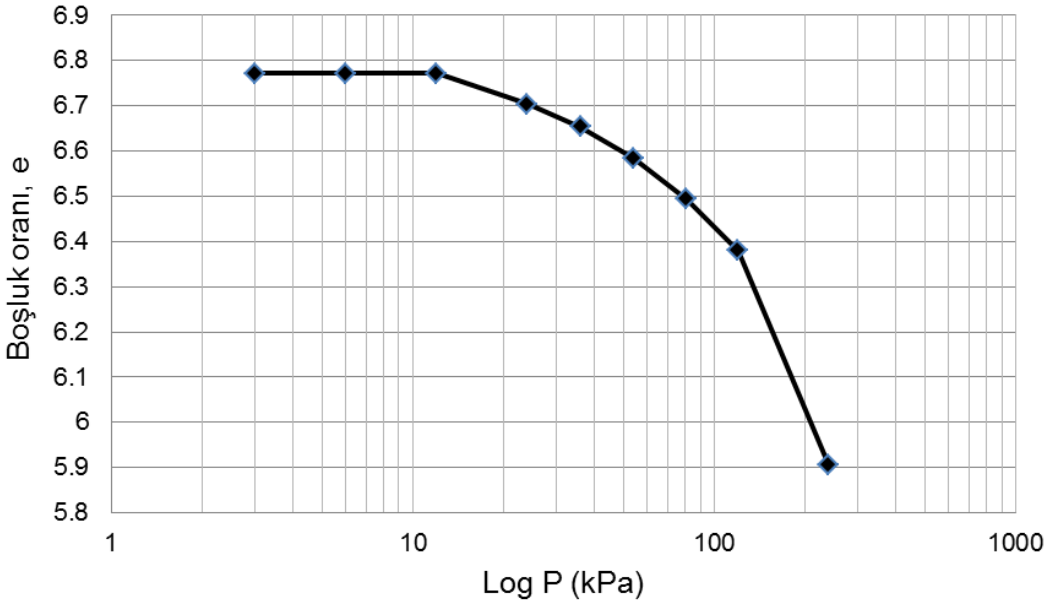
Çizelge 7.1. Bu çalışmada turba zeminler için yapılan bazı konsolidasyon deneylerinden elde edilen ortalama ve düzeltilmiş C_c değerleri.

Örnek No	C_c (Düzeltilmemiş)	C_c (Düzeltilmiş)
AÇ-4	0.595	0.528
AÇ-6	0.926	0.809
AÇ-10	1.764	1.207
SK3-UD1	0.455	0.379
SK3-UD2	7.008	2.812
SK3-UD3	3.05	1.923
SK4-UD1	3.846	3.124
SK4-UD2	1.517	0.933
SK4-UD3	0.977	0.688
SK5-UD1	2.328	2.005
SK5-UD2	0.59	0.541
SK5-UD3	2.6	1.048
SK6-UD3	1.168	0.928

(a)



(b)



Şekil 7.7. SK5-UD3 no.'lu turba örneğine ilişkin (a) laboratuvar deneylerinden elde edilmiş ve (b) yeniden düzenlenmiş e-Log P eğrileri.

Konsolidasyon deneylerinden belirlenen C_c değerleri, turba zeminlerin yüksek sıkışabilirlik özelliği nedeniyle diğer zeminlere oranla daha büyüktür. Deneyler sırasında normal gerilmenin artmasıyla sıkışma indisinde kayda değer düzeyde bir artış gözlenmektedir. Arazide inşa edilen gözlem platformunun zemine aktardığı en büyük gerilme (34 kPa) ortalama C_c 'nin belirlendiği aralıktan daha düşük gerilme değerine sahiptir. Bu husus dikkate alınarak analizlerde kullanılan C_c değeri platformun zemine ilettiği yük aralığındaki e-log P eğrisinin eğiminden hesaplanmıştır.

İkincil Sıkışma İndisi ($C\alpha$), birincil sıkışmanın tamamlanmasından sonraki boşluk oranı-zaman (log) ya da boy kısalması-zaman (log) eğrisinin eğiminden Eşitlik 7.2 ve 7.3 kullanılarak hesaplanmaktadır (Şekil 7.8). Ancak turba zeminler için yapılan konsolidasyon deneylerinde Tip III türünde sıkışma-zaman eğrileri elde edildiği için ikincil sıkışma indisi bu şekilde hesaplanamamaktadır. Tez çalışması kapsamında, turba zeminlerin ikincil sıkışma indisleri gözenek suyu basınçlarının ölçülmesiyle belirlenen birincil oturmanın tamamlanma süreleri dikkate alınarak boşluk oranı – zaman (log) grafiklerinden, bu süreden sonra devam eden eğrinin ortalama eğiminin hesaplanmasıyla belirlenmiştir.

$$C_\alpha = \frac{\Delta\varepsilon}{\log(t_2 - t_p)} \tag{7.2}$$

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log(t_2 - t_p)} \tag{7.3}$$

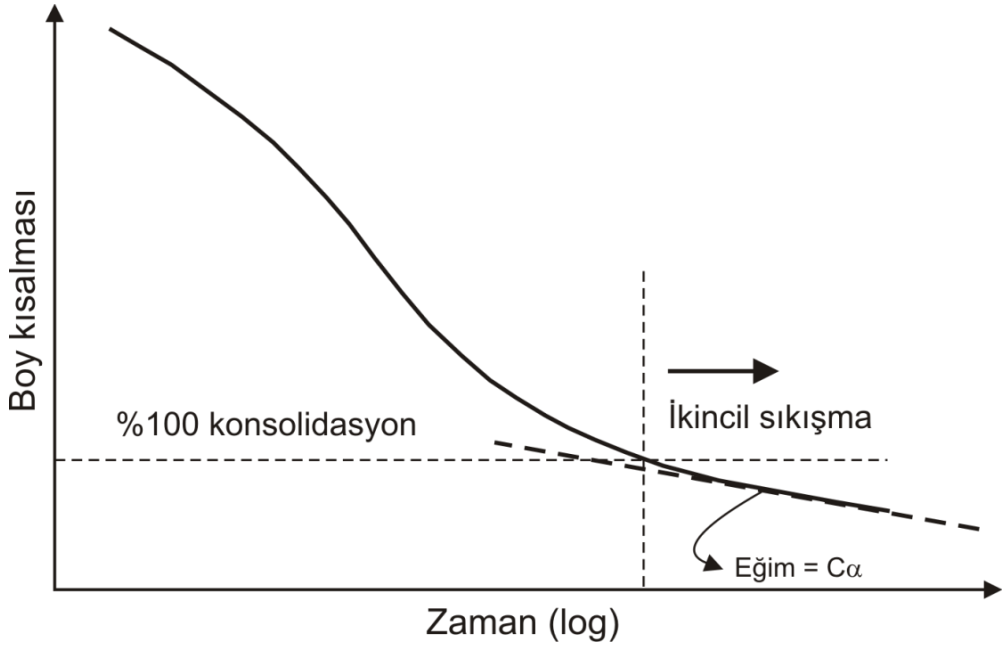
Burada;

$\Delta\varepsilon$: Boy kısalması (mm),

Δe : Boşluk oranındaki değişim,

t_2 : İkincil sıkışma için gerekli süre (dk),

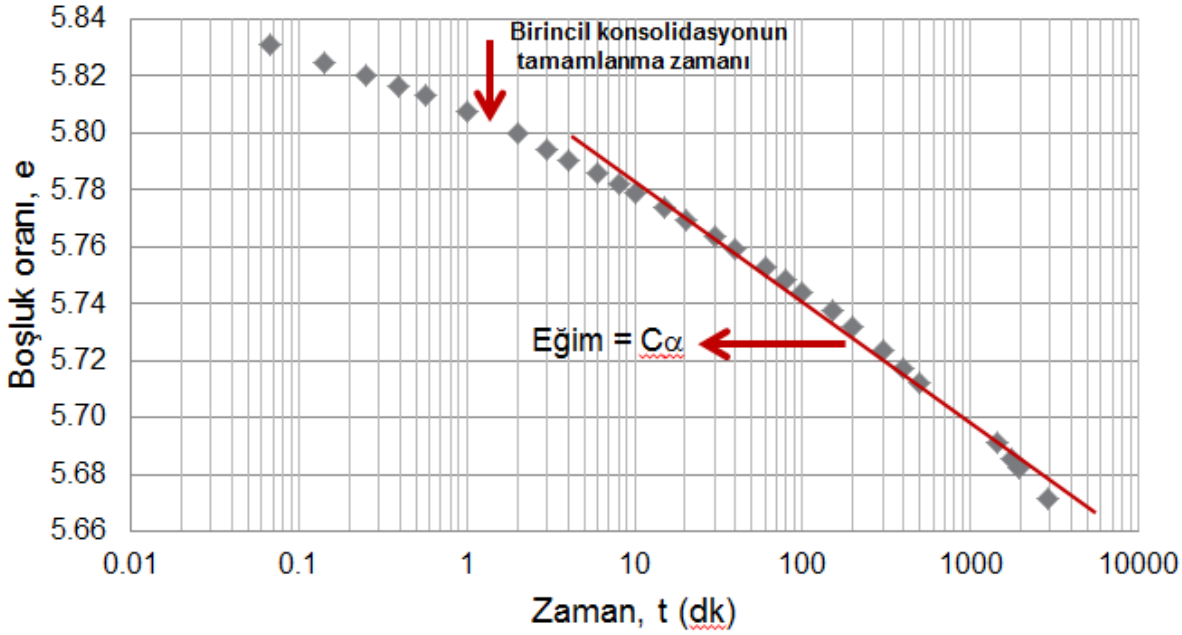
t_p : Birincil oturmanın tamamlanması için gerekli süre (dk)'dir.



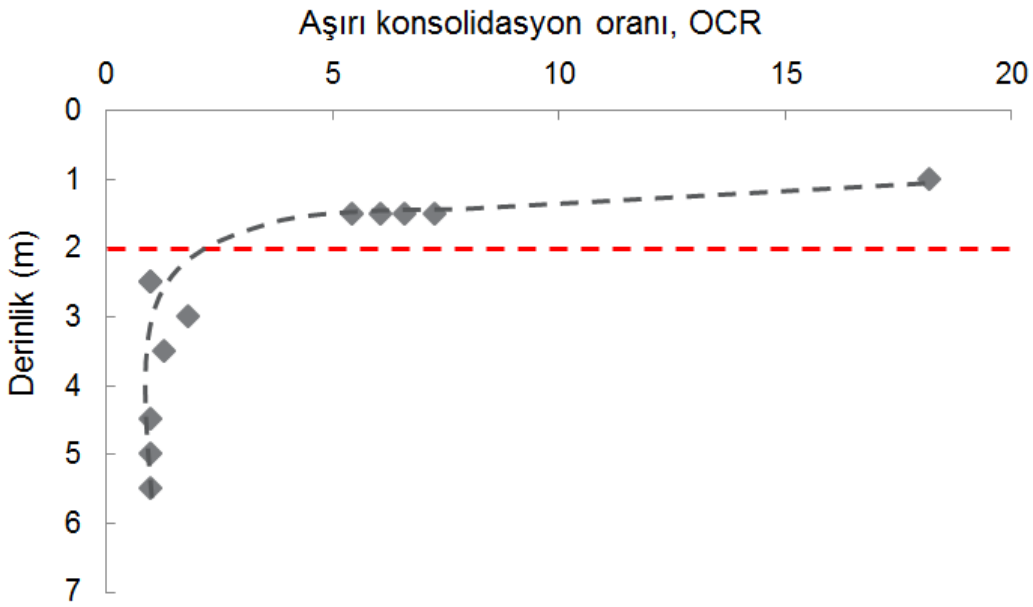
Şekil 7.8. İkincil sıkışma indisinin belirlenmesi ([126]'dan düzenlenmiştir).

İkincil sıkışma katsayısının hesaplanması aşağıda bir örnek üzerinde açıklanmıştır. Şekil 7.9'da, SK5-UD1 no.'lu turba örneğinin 66 kPa'lık gerilme altında konsolide edilmesi sonucu elde edilen sıkışma-zaman eğrisi görülmektedir. Bu gerilme seviyesinde gözenek suyu basıncının sönümlenme zamanı yaklaşık 1.5 dk olarak belirlenmiştir. Bu süreden sonra devam eden sıkışma-zaman eğrisinin ortalama eğimi 0.0391 ikincil sıkışma indisine eşittir.

Konsolidasyon deneyleri sonucunda her örnek için ayrı ayrı hesaplanan aşırı konsolidasyon oranları (OCR) incelendiğinde, araştırılan turba zeminlerin yaklaşık 2 m derinliğe kadar aşırı konsolide daha sonra derinliğin artmasıyla normal konsolide zemin oldukları Şekil 7.10'da görülmektedir. Üst seviyedeki aşırı konsolidasyonun ıslanma-kuruma süreçlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. OCR ve C_c gibi parametrelerin derinlikle değişmesi ve arazi gözlemleri de göz önünde bulundurularak analiz sırasında kullanılacak olan zemin profili turba 1, turba 2 ve siltli-killi birim olmak üzere 3 seviyeye ayrılmıştır (Şekil 7.11).



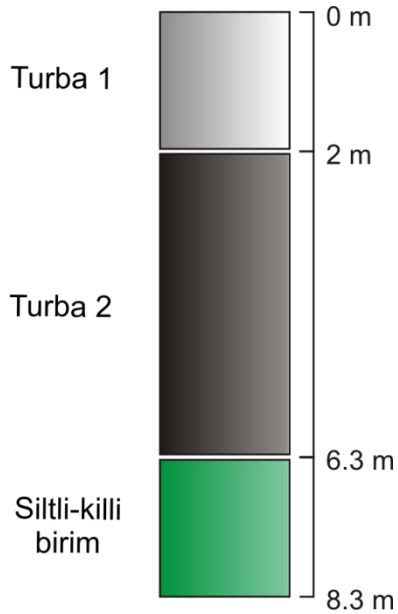
Şekil 7.9. SK5-UD1 no.lu turba örneğinin 66 kPa gerilme altındaki sıkışma-zaman eğrisi üzerinden ikincil sıkışma indisinin hesaplanması.



Şekil 7.10. İnceleme alanındaki turba zeminlerin aşırı konsolidasyon oranlarının derinlikle değişimi.

Belirlenen bu zemin profili ve laboratuvar deneylerinden elde edilip, yukarıda anlatıldığı gibi yeniden düzenlenen konsolidasyon parametreleri (e_0, C_c, C_α, OCR, k) kullanılarak SETTLE 3D programında [125] geriye dönük oturma analizi yapılmıştır. Modelde kullanılan girdi parametreleri Çizelge 7.2'de verilmiştir. Arazi gözlemleri ve

laboratuvar deneylerine göre turba zeminin hemen hemen her seviyesinin suya doygun olması nedeniyle analiz sırasında yeraltısuyu seviyesi yüzeyde kabul edilmiştir. Sadece Turba 1 seviyesinde ani oturma gerçekleşmesine izin verilmiştir. Geriye dönük analizde, yalnızca gözlem platformunun neden olduğu gerilme (9.85 kPa) altında ve platformun kaya bloklarıyla yüklenmesinden sonra (34.12 kPa) turba zeminde meydana gelebilecek oturmalar doğrusal olmayan zemin modeli ve standart ikincil sıkışma yöntemi seçilerek zamana bağlı olarak hesaplanmıştır (Şekil 7.12). Buna göre, yalnızca platformun neden olduğu gerilme altında turba zeminde kaya bloklarının yüklenmesine kadar geçen sürede (28 gün) toplam 28.4 mm, kaya blokları yüklendikten sonra ise platformun inşasından itibaren geçen 365 günde toplam 109.1 mm'lik oturmanın gerçekleşebileceği hesaplanmıştır. Bu oturma analizi sonucunda hesaplanan zamana bağlı oturma miktarları ile arazide inşa edilen gözlem platformunda ölçülen oturmalar Şekil 7.13'deki grafikte karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Geriye dönük analizden hesaplanan zamana bağlı oturmaların, gözlem platformunda ölçülen oturma miktarları ile oldukça benzediği Şekil 7.13'ten görülmektedir.



Şekil 7.11. İnceleme alanındaki turba zeminlerin oturma analizlerinde kullanılan zemin profili.

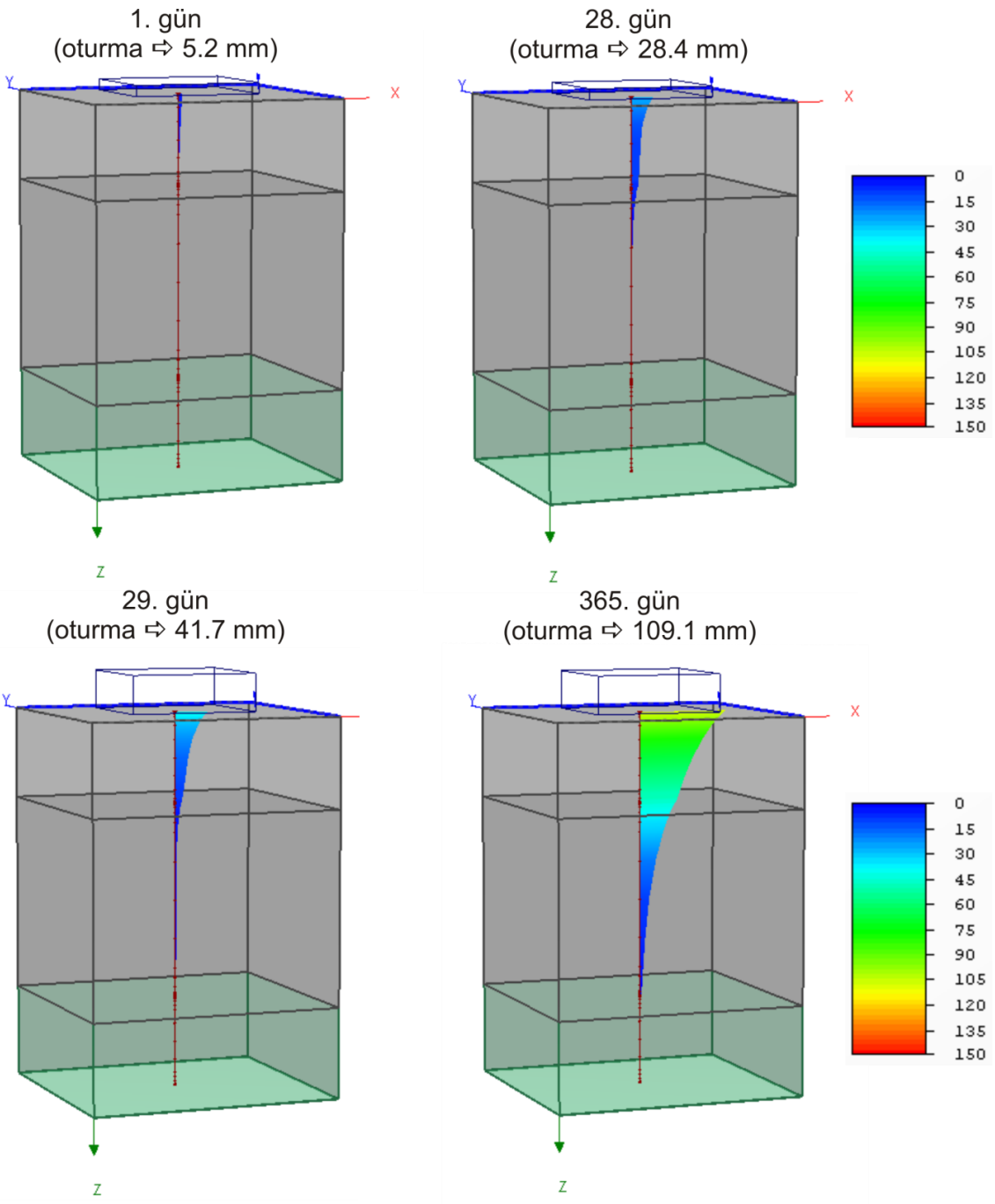
Çizelge 7.2. Geriye dönük oturma analizlerinde kullanılan girdi parametreleri.

Zemin seviyesi	E	γ_s	ν	C_c	C_s	C_α	e_0	OCR	k
Turba 1	2200	11.5	0.2	0.14	0.12	0.04	7	6	$1*10^{-7}$
Turba 2	-	11.5	-	0.23	0.20	0.08	4	1.5	$1*10^{-8}$

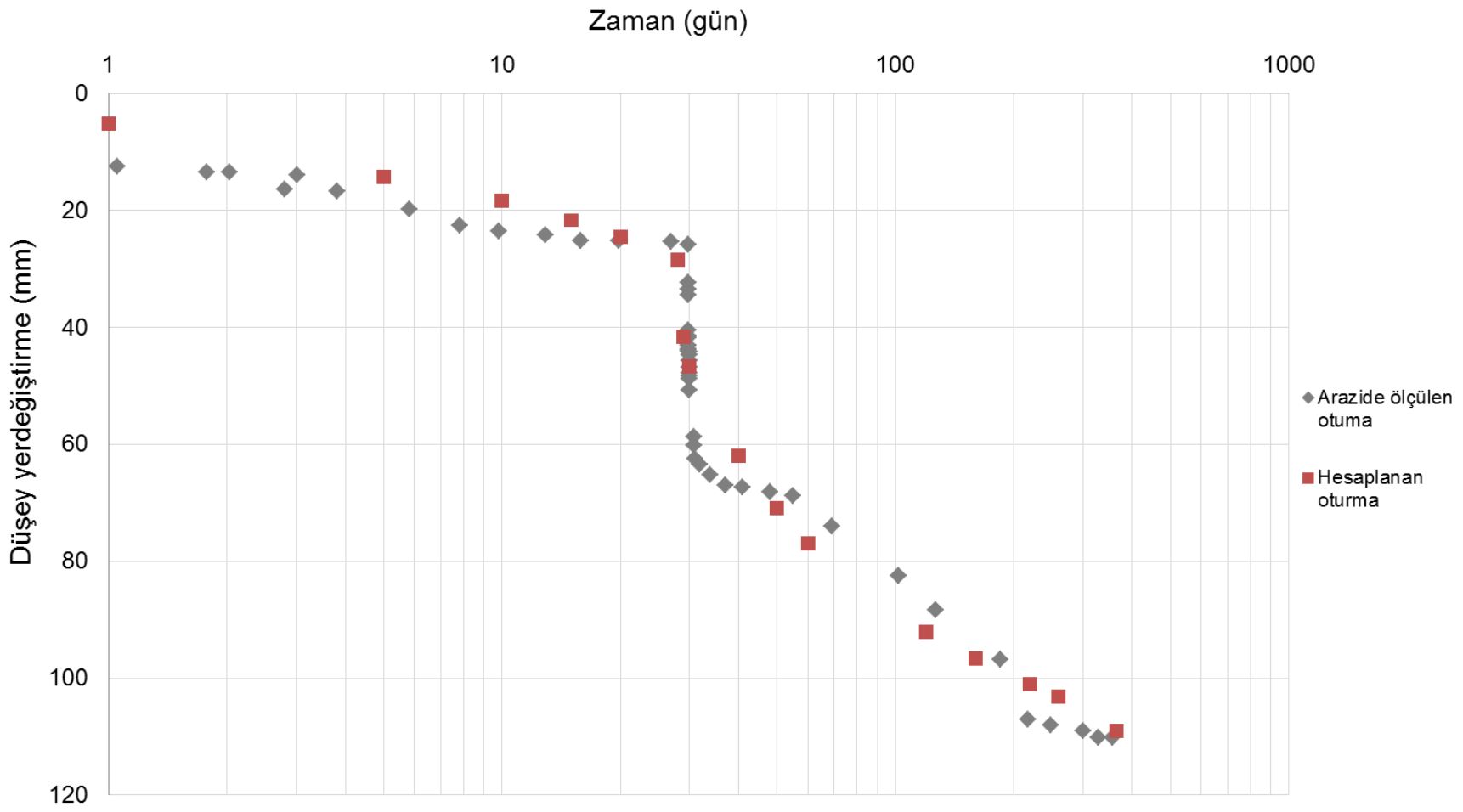
Turba zemine etki eden gerilmelerin platformun merkezinden itibaren derinlikle değişimi Şekil 7.14'te sunulmuştur. Buna göre yalnızca platformun neden olduğu 9.85 kPa'lık gerilme 2 m derinlikte 3.1 kPa'ya ve 6 m derinlikte 0.9 kPa'ya kadar azalmaktadır. Platformun kaya bloklarıyla yüklendikten sonra turba zemine etki eden 34.12 kPa'lık gerilme ise, 2 m derinlikte 10.7 kPa'ya ve 6 m derinlikte 3.1 kPa'ya kadar azalmaktadır.

Gözlem platformunun ve kaya bloklarının neden olduğu gerilme altında turba zeminde gelişen aşırı gözenek suyu basınçlarının zaman bağlı değişimi Şekil 7.15'te verilmiştir. Buna göre, gözlem platformunun neden olduğu gerilme altında gelişen en büyük aşırı gözenek suyu basıncı 9.8 kPa iken, yüklemeden itibaren 28. günde aşırı gözenek suyu basınçlarının büyük bir kısmının sönümlendiği ve en büyük aşırı gözenek suyu basıncının 2.8 kPa'ya düştüğü hesaplanmıştır. Platformun kaya bloklarıyla yüklenmesi sonucunda turba zeminde gelişen en büyük aşırı gözenek suyu basıncı 24.3 kPa olarak belirlenmiş olup, aşırı gözenek suyu basınçları platformun inşasından itibaren geçen 365 günde 1.6 kPa'ya kadar sönümlendiği anlaşılmıştır.

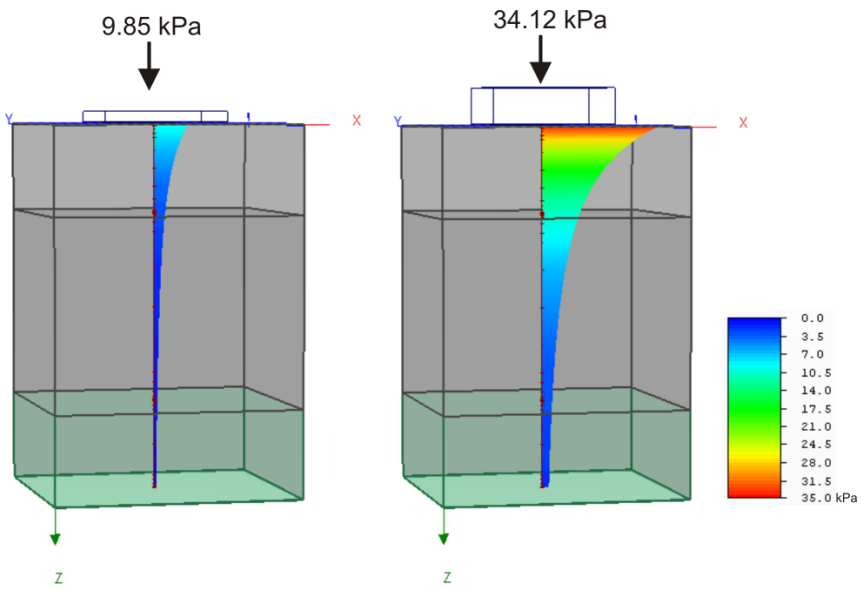
Sonuç olarak, çalışma kapsamında laboratuvar deneylerinden elde edilen konsolidasyon parametrelerinin yukarıda anlatıldığı gibi düzeltilmesiyle belirlenen yeni parametreler kullanılarak yapılan analizle, inceleme alanındaki turba zeminlerde arazide gerçekleşebilecek oturma miktarlarının yaklaşık olarak tahmin edilmesinin mümkün olduğu söylenebilir.



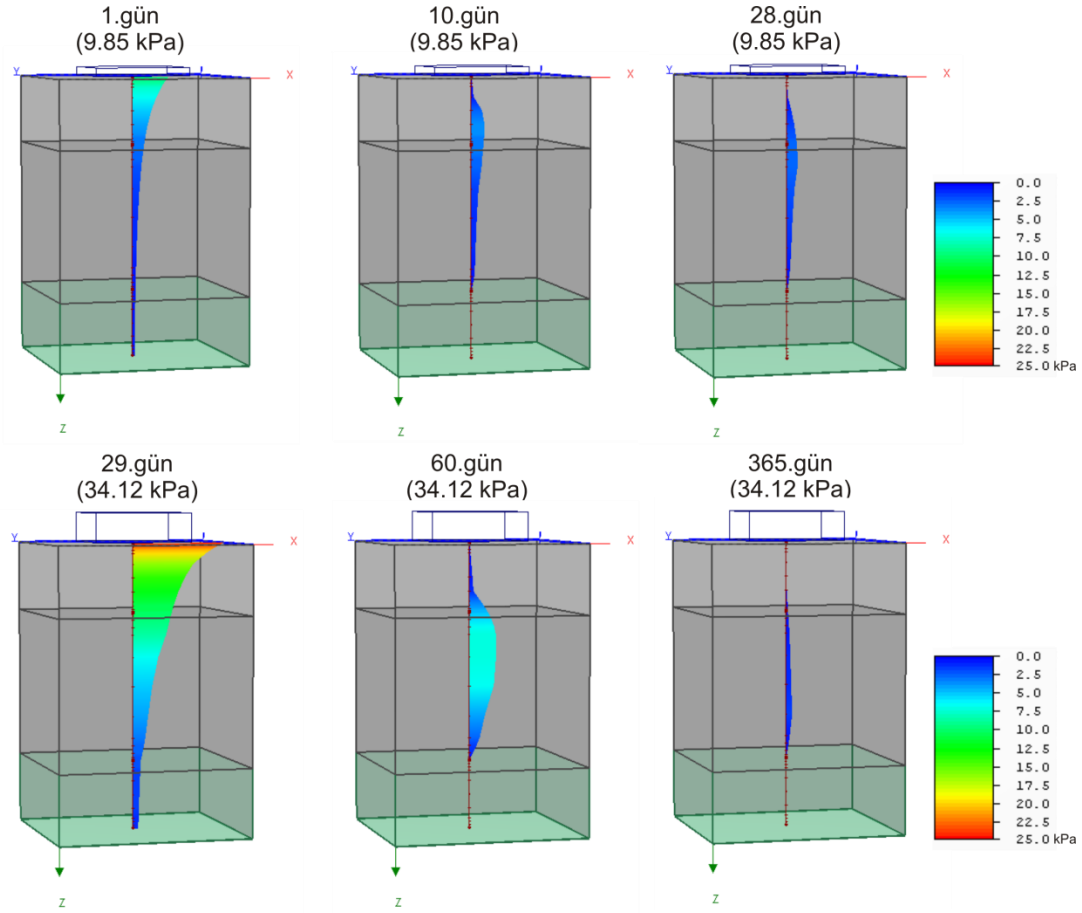
Şekil 7.12. Gözlem platformunun neden olduğu gerilmeler altında SETTLE 3D [125] programıyla hesaplanan turba zeminde meydana gelen oturmalar.



Şekil 7.13. Arazide gözlem platformunda ölçülen oturmalar ile geriye dönük analizden hesaplanan oturmaların karşılaştırılması.



Şekil 7.14. Gözlem platfomunun turba zeminde neden olduğu gerilmelerin derinliğe bağlı değişimi.

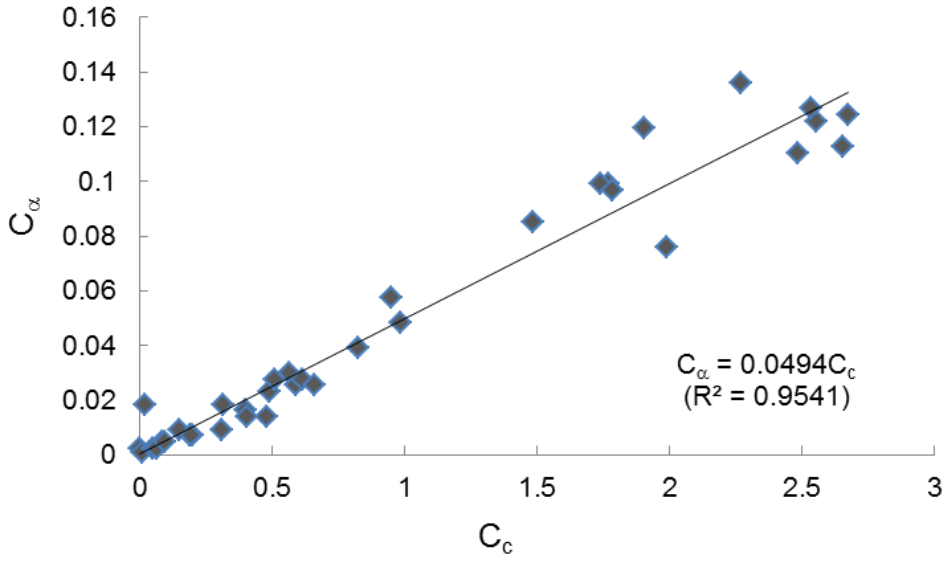


Şekil 7.15. Gözlem platformunun ve kaya bloklarının neden olduğu gerilmeler altında turba zeminde gelişen aşırı gözenek suyu basınçları.

7.3. Turba zeminlerin konsolidasyon parametrelerinin ve bazı fiziksel özelliklerinin birbirleriyle ilişkilerinin araştırılması

Mesri ve Godlewski [63], turba zeminlerin birincil ve ikincil sıkışma katsayıları arasında (C_α/C_c) doğrusal bir ilişki olduğunu belirlemişler ve araştırmacılar, turba zeminlerin ikincil sıkışma miktarının tahmin edilmesinde bu ilişkiden yararlanmışlardır. Mesri vd. [54] tarafından Middleton (ABD) turbaları üzerinde yapılan çalışmada, bu zeminlere ait C_α/C_c oranının 0.052 olduğu belirlenmiştir (bkz. Şekil 3.5). Mesri [127]; Samson ve La Rochelle [92]'in turba zeminlerin ikincil sıkışma davranışlarını değerlendirmek amacıyla yapmış oldukları çalışmanın verilerini yeniden değerlendirerek turba zeminlere ait C_α/C_c oranını hesaplamış ve bu oranın 0.052-0.072 arasında değiştiğini belirtmiştir [6].

Tez çalışması kapsamında inceleme alanından alınmış turba örnekleri için yapılan konsolidasyon deneylerinden saptanan birincil ve ikincil sıkışma katsayıları arasındaki ilişki Şekil 7.16'da sunulmuştur. Buna göre, C_α/C_c oranı 0.0494 olarak hesaplanmış olup, diğer araştırmacılar tarafından turbalar için belirlenen değerlerle benzerlik (alt sınırına yakın) göstermektedir.

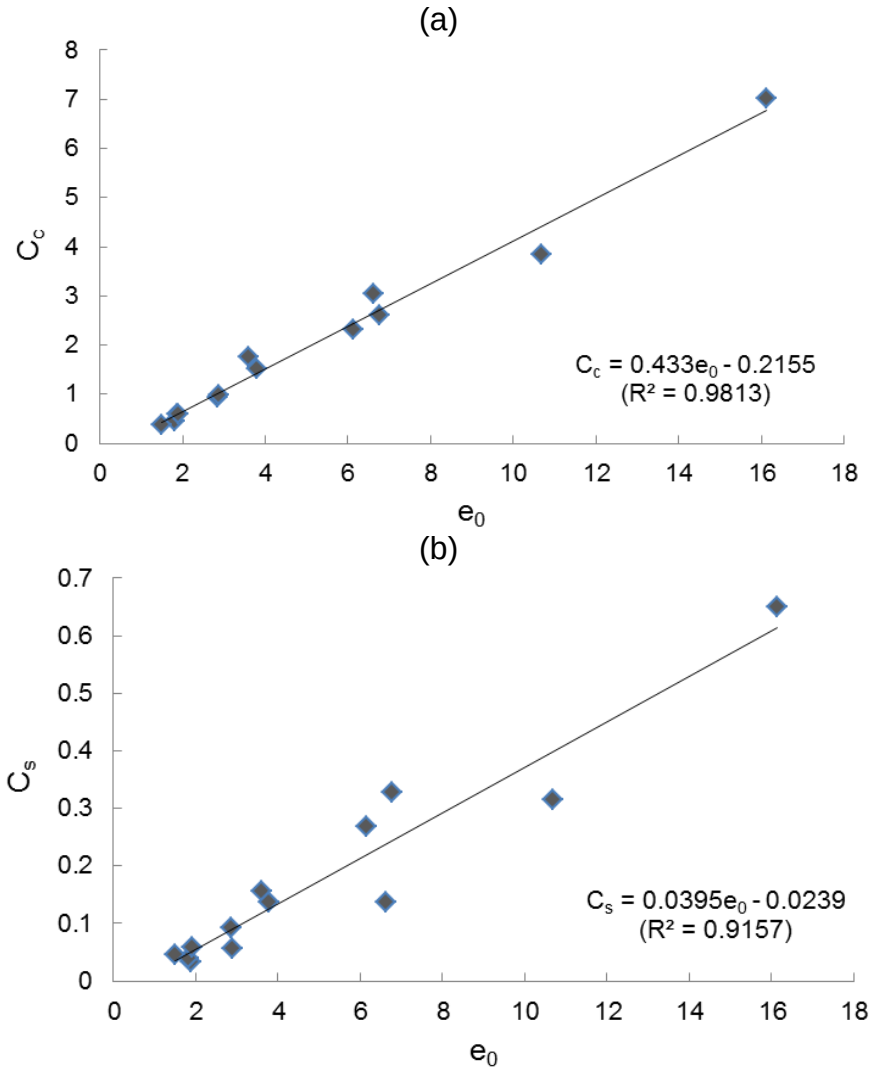


Şekil 7.16. İnceleme alanındaki turba örneklerinin konsolidasyon deneylerinden belirlenmiş birincil ve ikincil sıkışma katsayıları arasındaki ilişki.

Macfarline [50], turba zeminlerin birincil sıkışma indisi (C_c) ve boşluk oranı (e_0) arasında Eşitlik 7.4'te verilen bir ilişkinin olduğunu belirlemiştir.

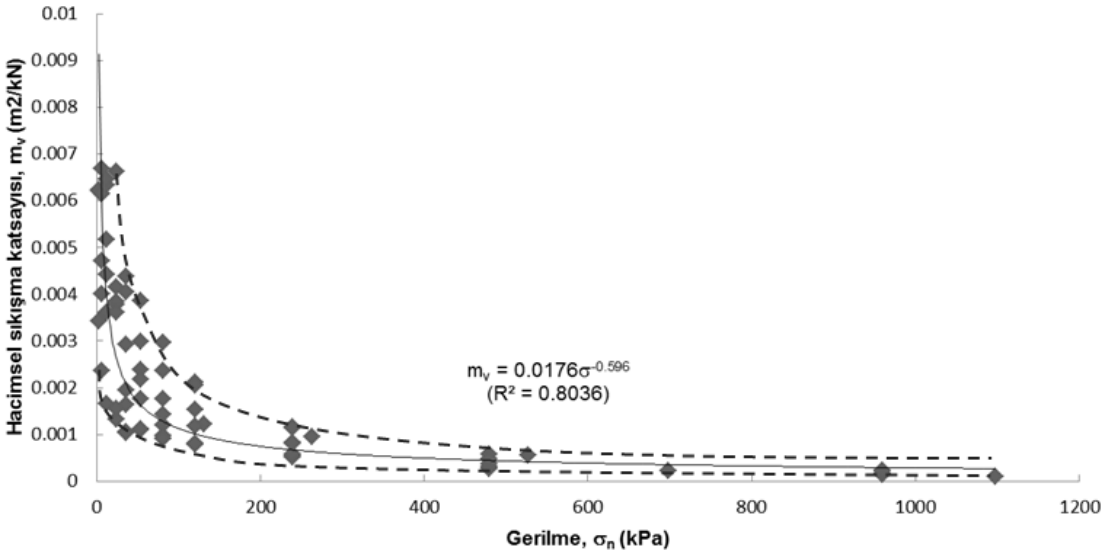
$$C_c=(0.45\text{-}0.75)\ e_0 \qquad (7.4)$$

Macfarline [50]'nin çalışmasına benzer şekilde, bu tez çalışmasında da inceleme alanındaki turba zeminlerin birincil sıkışma ve şişme indisleri ile boşluk oranları arasında anlamlı bir ilişki olduğu saptanmıştır. Buna göre, konsolidasyon deneyinin yapılamadığı durumlarda inceleme alanındaki ilksel boşluk oranı bilinen turba zeminlerin birincil sıkışma ve şişme indisleri, Şekil 7.17'de verilen eşitlikler kullanılarak tahmin edilebilir.



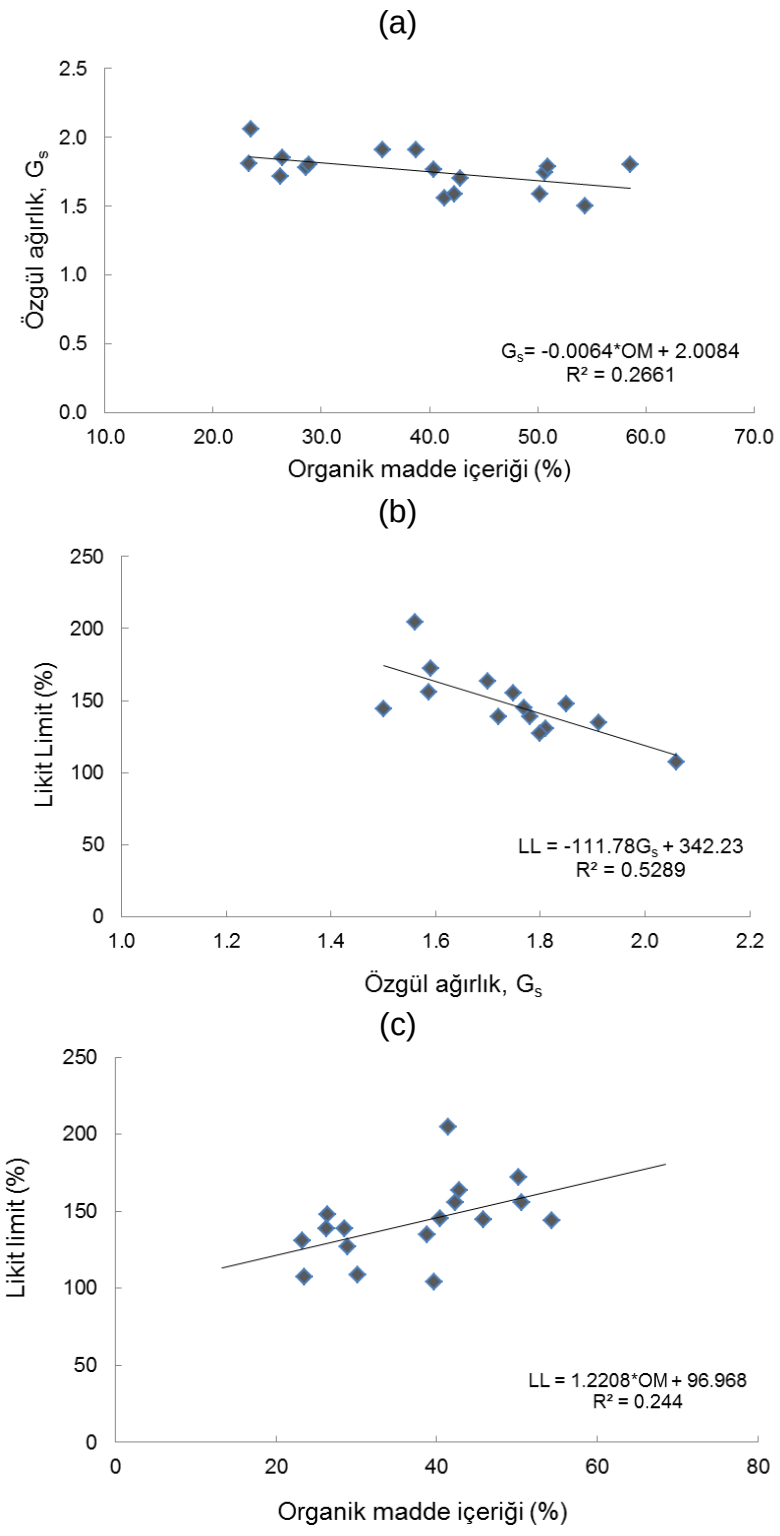
Şekil 7.17. İnceleme alanındaki turba örneklerinin (a) birincil sıkışma indisi-boşluk oranı ve (b) şişme indisi-boşluk oranı arasındaki ilişki.

İnceleme alanındaki turba zeminlerin belirli yükler altında oturma miktarının tahmin edilebilmesi amacıyla konsolidasyon deney sonuçlarından farklı yükler için hacimsel sıkışma katsayıları hesaplanmış ve bu katsayının gerilme artışıyla belirli bir oranda azaldığı belirlenmiştir (Şekil 7.18). Düşük gerilme düzeylerinde (< 150 kPa) m_v değerleri farklılık gösterirken, gerilme arttıkça bu değerler birbiriyle daha uyumlu olmaktadır. Şekil 7.18'de verilen eşitlik kullanılarak tahmin edilen ortalama m_v değerlerinden hesaplanan oturma miktarları, arazide ölçülen oturmalardan çok daha yüksek olarak belirlenmiştir. Ancak, m_v-σ_n ilikşisinin kesikli çizgiyle gösterilen alt sınırından belirlenen m_v değerleri kullanılarak hesaplanan oturma miktarı (~194 mm) arazide ölçülen oturmalara daha benzer olsa da, hacimsel sıkışma katsayısı kullanılarak oturma hesabının yapılmaması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.18. İnceleme alanındaki turba zeminlerin farklı normal gerilme seviyelerindeki sıkışma katsayıları.

İnceleme alanından alınan turba örneklerine ait bazı fiziksel ve indeks özelliklerin birbirleriyle ilişkileri değerlendirilmiştir. Turbaların özgül ağırlık-likit limit değerleri ile organik madde içeriği-likit limit değerlerinin birbirleriyle anlamlı bir şekilde ilişkili olmadıkları, ancak özgül ağırlık değeri arttıkça organik madde içeriğinin azaldığı Şekil 7.19'da görülmektedir.



Şekil 7.19. İnceleme alanından alınan turba örneklerine ait (a) özgül ağırlık ve organik madde içeriği, (b) özgül ağırlık ve likit limit, (c) likit limit ve organik madde içeriği arasındaki ilişkiler.

8. TURBA ZEMİNİN DİNAMİK DAVRANIŞI

Bugüne değin her ne kadar büyüklüğü 6-7 arasında değişen tahrip edici depremlere maruz kalmamışsa da, Kayseri kenti ve yakın çevresinde aktif fayların varlığı ve kaydedilen depremler dikkate alındığında, özellikle turba zemininin bulunduğu sahalar depremsellik açısından öneme sahip alanlardır. Turba vb. organik zeminlerin yüksek oranda su içermeleri ve yumuşak zeminler olmalarından dolayı, bu tür zeminlerin deprem kaynaklı dinamik tekrarlı yüklemeler sırasında deprem dalgalarıyla ilgili büyütmelere neden olmaları beklenmektedir. Tezin 3. Bölümü'nde de değinildiği gibi, turba zeminlerin dinamik açıdan ele alındığı sınırlı sayıda çalışma ve veri mevcuttur. Bu durum, söz konusu zeminlerin dinamik karakteristiklerinin ve neden olabilecekleri mühendislik sorunlarının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunabilecek veriye ve çalışmalara gereksinim duyulduğuna işaret etmektedir. Gerek bu husus, gerekse Kayseri yerleşimi açısından taşıdığı önem dikkate alınarak, tez çalışması kapsamında inceleme alanındaki turba zeminlerin sismik yer tepkisinin değerlendirilmesi amaçlanmış ve bu amaçla gerçekleştirilen analizler ve değerlendirmeler aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur.

8.1. Sismik Yer Tepki Analizlerinde Kullanılan Girdi Parametrelerinin Belirlenmesi

Sismik yer tepki analizleri; kuvvetli yer sarsıntılarının farklı özelliklere sahip yerel zeminler üzerindeki etkilerinin araştırılması, bu zeminler üzerinde inşa edilmesi planlanan mühendislik yapıları için tasarım tepki spektrumlarının geliştirilmesi ve sıvılaşma tehlikesinin değerlendirilmesi amacıyla yapılmaktadır. Yer tepki analizlerinde dalga yayılımı kuramı esas alınarak bir sismik kaynaktan çıkan makaslama dalgalarının yer içinde yayılarak yeryüzüne ulaşması modellenmektedir. Bu analizleri gerçekleştirebilmek için zemin profilinin belirlenmesi, bu profildeki zemin seviyelerinin dinamik özelliklerinin (makaslama dalgası hızı, makaslama modülü, sönümlenme oranı vb.) saptanması ve tasarım yer hareketinin seçilmesi gerekmektedir.

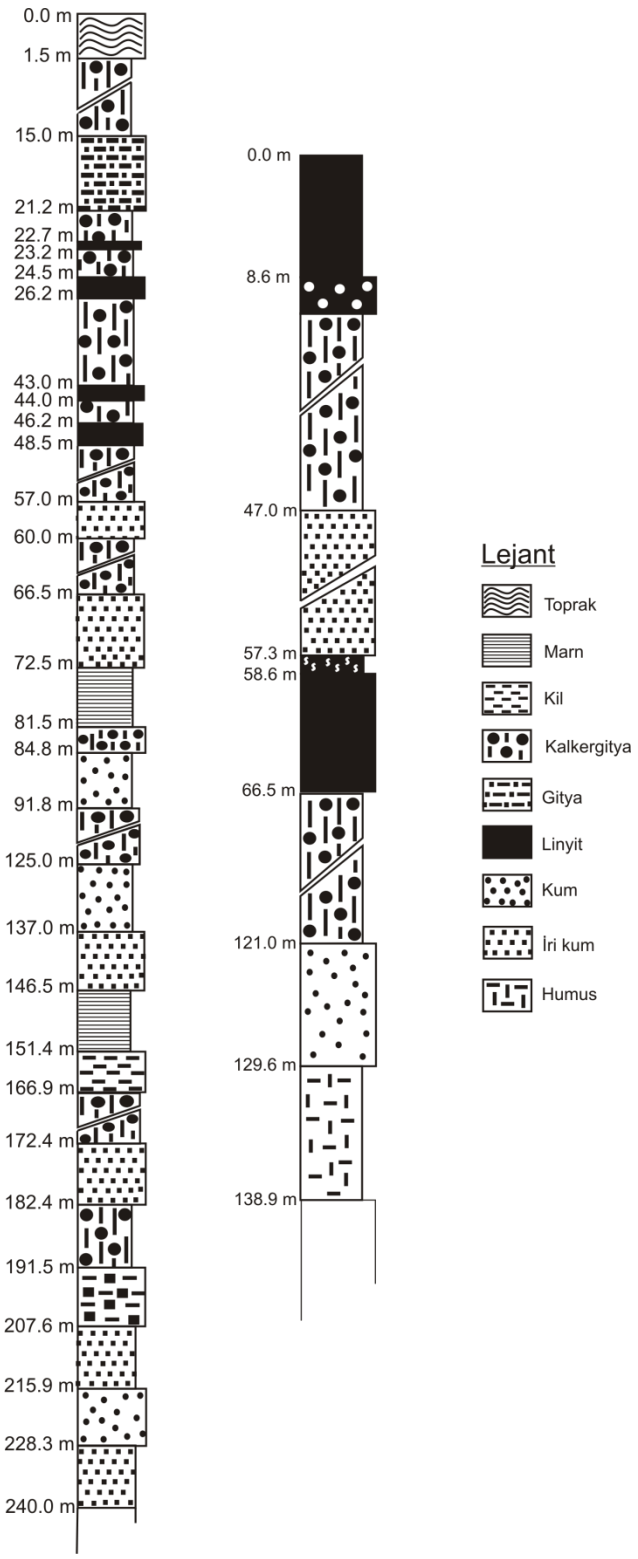
Bu alt bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan 1-boyutlu sismik yer tepki analizlerinde kullanılan girdi parametrelerinin belirlenmesi aşamaları genel hatlarıyla ele alınmıştır.

8.1.1. Dinamik analizlerde kullanılacak zemin profilinin oluşturulması ve bu profildeki zemin seviyelerinin makaslama dalgası hızlarının belirlenmesi

İnceleme alanında en fazla 7.7 m derinliğe kadar yapılmış olan sondajlarda ilk 5.5 -7 m arasında turba zemin seviyesinin yer aldığı ve hemen ardından yeşilimsi gri siltli-killi bir seviyenin devam ettiği gözlenmiştir (bkz. Şekil 5.7). Jeofizik çalışmalardan elde edilen profillerde ise, sondajlardakine benzer şekilde, yüzeyden yaklaşık 7 m derinliğe kadar turba seviyesinin ve bu seviyeden sonra yaklaşık 15 m derinliğe kadar siltli-killi birimin devam ettiği izlenmektedir (bkz. Şekil 5.18).

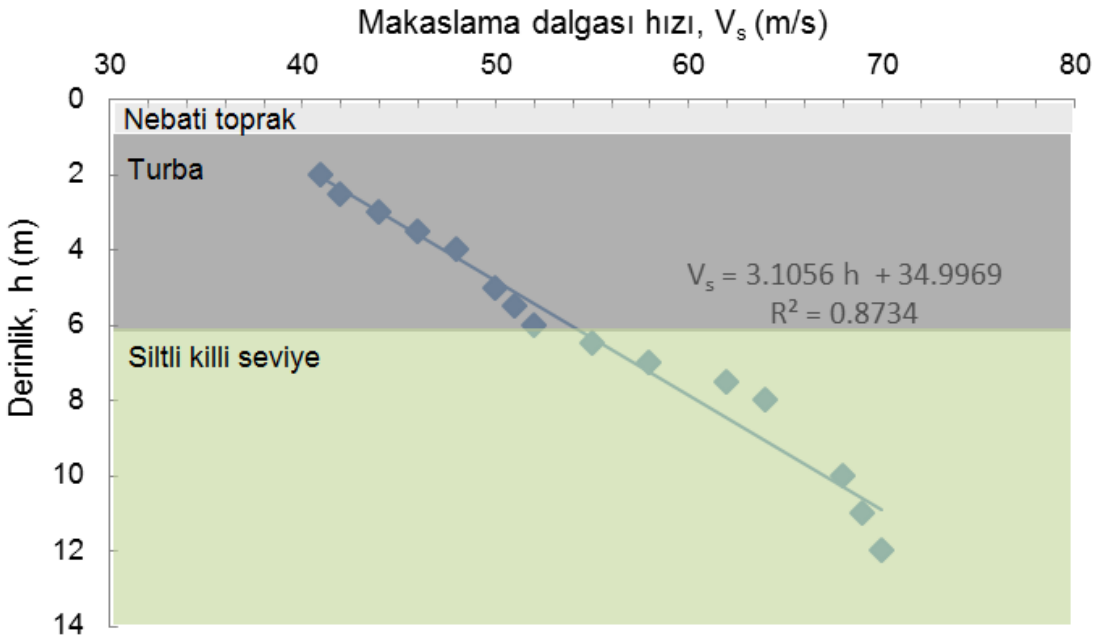
5. Bölümde değinildiği gibi, inceleme alanı yakınında turba aramak amacıyla MTA ve Otto Gold firması tarafından yapılmış [8] olup, 240 ve 138.9 m derinliğindeki sondajlarda belirlenen zemin profilleri Şekil 8.1'de sunulmuştur. Bu zemin profilleri değerlendirildiğinde, seçilen deprem kayıtlarının uygulanacağı sağlam kaya özelliğinde bir sismik taban seviyesinin (seismic base layer) inceleme alanında bulunmadığı anlaşılmaktadır. Bu sondajlar turba arama amacıyla yapılmış olup, profillerde gözlenen zeminler için SPT-darbe sayısı, birim hacim ağırlık, makaslama dalgası hızı vb. gibi jeomekanik özellikler tayin edilmemiştir. Bu nedenle, söz konusu zemin profilinin olduğu gibi alınarak tüm zemin parametrelerinin tahmin yoluyla belirlenip dinamik analizlerde kullanılmasının uygun olmayacağı düşünülmüştür.

Japon Karayolları Birliği [128], makaslama dalgası hızı 300-350 m/s'nin üzerinde olan zeminlerin de sismik taban seviyesi olarak kabul edilebileceğini belirtmektedir. Tezin 5. Bölümü'nde ayrıntılı olarak açıklanan jeofizik çalışmalar kapsamında inceleme alanındaki zemin profilinin yüzeyden itibaren ilk 15 m'sinin makaslama



Şekil 8.1. MTA ve Otto Gold firması tarafından inceleme alanında yapılan 240 ve 138.9 m derinliğindeki iki sondajda izlenen zemin profilleri ([8]'den düzenlenmiştir).

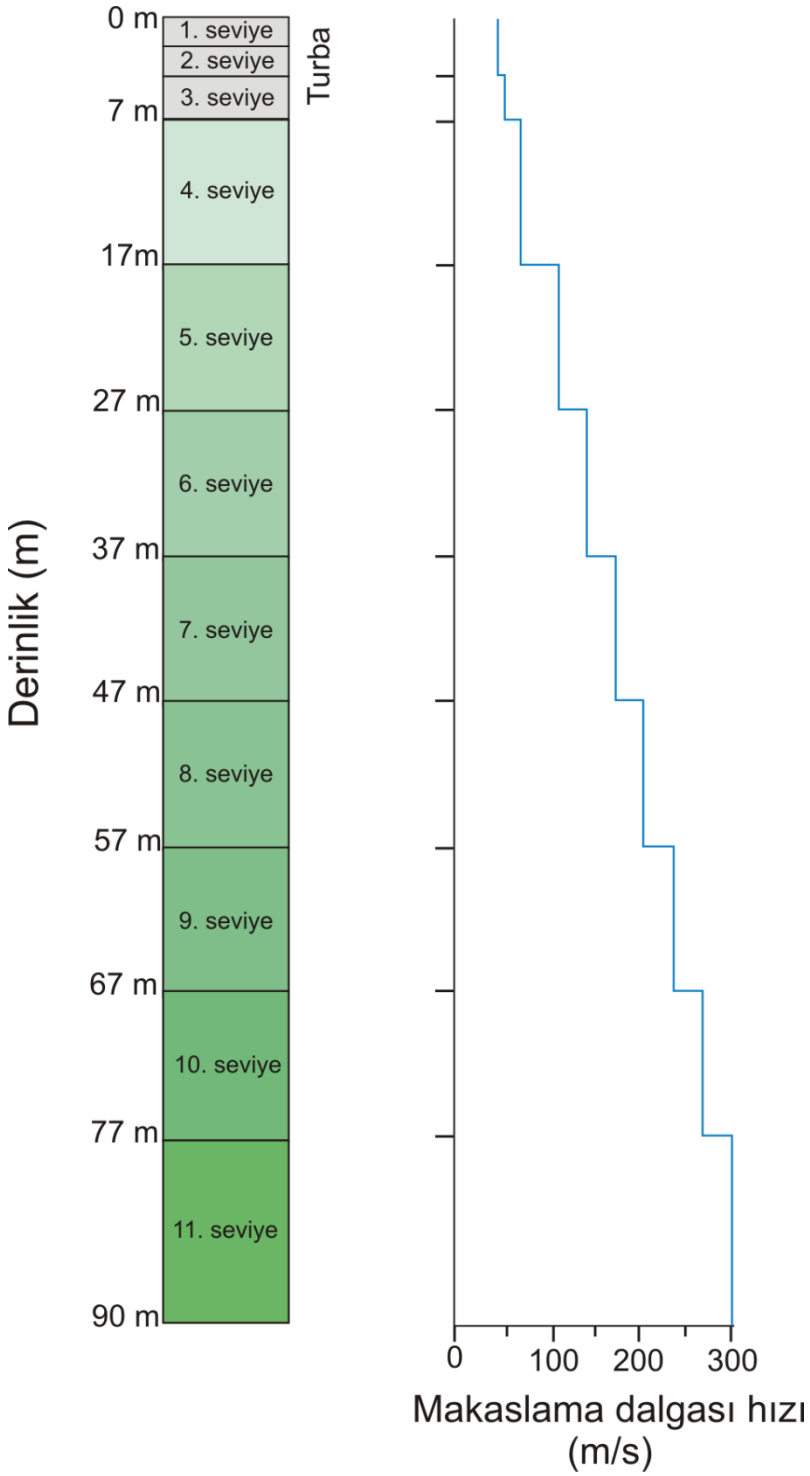
dalgası hızı ölçülmüştür. İlk 15 m derinliğe kadar olan bu seviyede makaslama dalgası hızının derinlikle değişimi Şekil 8.2'de sunulmuştur. Makaslama dalgası hızı ve derinlik arasında doğrusal bir ilişki olduğu kabul edilerek ve Şekil 8.2'deki eşitlik kullanılarak diğer seviyelerin makaslama dalgası hızları tahmin edilmiştir. Buna göre, inceleme alanındaki zeminin makaslama dalgası hızının (V_s) yaklaşık 90 m derinde 300 m/s olduğu tahmin edilmektedir. Bu bilgiler ışığında, tez çalışması kapsamında yapılan sondajlardan elde edilen ortalama turba zemin kalınlığı ve turba zeminden sonra gelen seviyenin de derinliğe bağlı makaslama dalgası hızı değişimi dikkate alınarak, dinamik analizlerde kullanılmak üzere, inceleme alanının zemin profili Şekil 8.3'teki gibi düzenlenmiştir.



Şekil 8.2. İnceleme alanındaki turba zeminlerde makaslama dalgası hızının derinlikle değişimi.

8.1.2. Makaslama modül azalım (G/G_{max}) ilişkisi ve sönümlenme oranlarının (D) belirlenmesi

İnceleme alanındaki turba zeminlerin modül azalım ilişkisi (G/G_{max}), sönümlenme oranı (D), tez çalışmasının 6. Bölümü'nde anlatıldığı gibi, rezonans kolonu ve tekrarlı torsiyonel makaslama deneylerinden belirlenmiştir.



Şekil 8.3. Dinamik analizlerde kullanılan inceleme alanına ait zemin profili ve zemin seviyelerinin makaslama dalgası hızları.

Turba zeminin altında kalan siltli-killi zemin seviyesinin G/G_{max} ve D parametreleri bu zeminin laboratuvarda belirlenen plastisite indeksine göre Darendeli [129] tarafından farklı plastisite indeksine sahip zeminler için önerilen eşitlikler esas alınarak hesaplanmıştır. Zemin profilinde bu zemin seviyesinin altında yer alan tüm zeminler için de bu yöntem kullanılarak G/G_{max} ve D parametreleri belirlenmiştir.

Darendeli [129]'nin modelinde, makaslama modülü azalım (G/G_{max}) eğrisi Eşitlik 8.1 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1+\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} \tag{8.1}$$

Burada,

a : 0.919

γ : makaslama birim deformasyonu ve

γ_r : referans makaslama birim deformasyonudur.

$$\gamma_r = \left(\frac{\sigma_0'}{P_a}\right)^{0.3483} (0.0352 + 0.0010\, PI\, OCR^{0.3246}) \tag{8.2}$$

Burada,

σ'_0 : ortalama efektif gerilme (kPa),

P_a : atmosferik basınç (kPa),

PI : plastisite indisi ve

OCR : aşırı konsolidasyon oranıdır.

En küçük sönümlenme oranı (D_{min}), Darendeli [129]'nin modelinde aşağıda verilen Eşitlik 8.3 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$D_{min}\,(\%) = (\sigma'_0)^{-0.2889}(0.8005 + 0.0129\, PI\, OCR^{-0.1069})(1 + 0.2919 \ln f) \tag{8.3}$$

Burada, f eksitasyon frekansıdır.

Sönümlenme oranının makaslama birim deformasyonuyla değişimi ise, Eşitlik 8.4, 8.5, 8.6, 8.7 ve 8.8'den hesaplanmaktadır.

$$D_{Masing}(\%) = c_1 D_{Masing,a=1} + c_2 D^2{}_{Masing,a=1} + c_3 D^3{}_{Masing,a=1} \quad (8.4)$$

$$D_{Masing,a=1}(\%) = \frac{100}{\pi}\left\{4\left[\frac{\gamma-\gamma_r\, ln\left(\frac{\gamma+\gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma+\gamma_r}}\right]-2\right\} \quad (8.5)$$

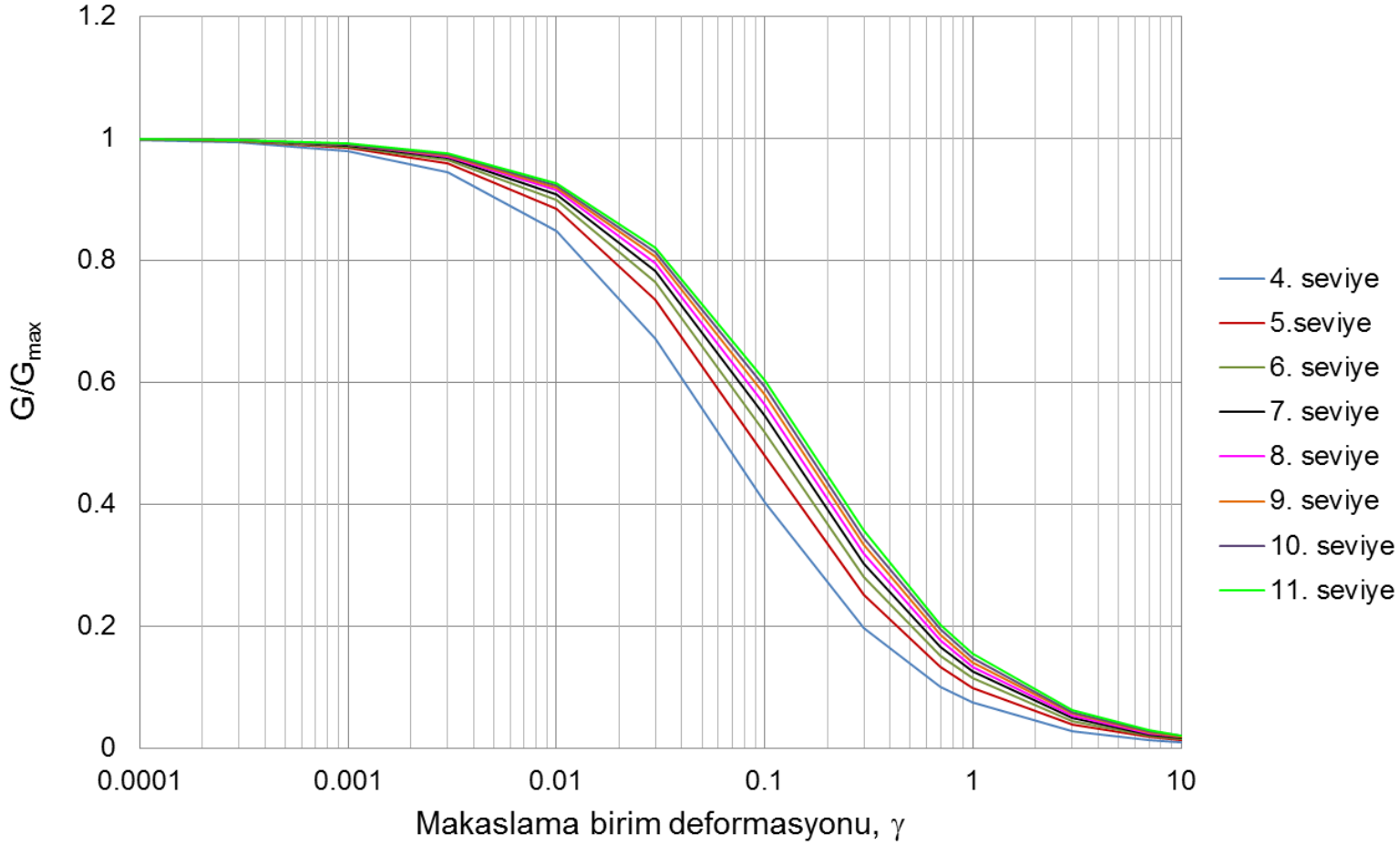
$$\begin{aligned} c_1 &= -1.1143a^2 + 1.8618a + 0.2533 \\ c_2 &= 0.0805a^2 - 0.0710a + 0.0095 \\ c_3 &= -0.0005a^2 + 0.0002a + 0.0003 \end{aligned} \quad (8.6)$$

$$D = b\left(\frac{G}{G_{max}}\right)^{0.1} D_{Masing} + D_{min} \quad (8.7)$$

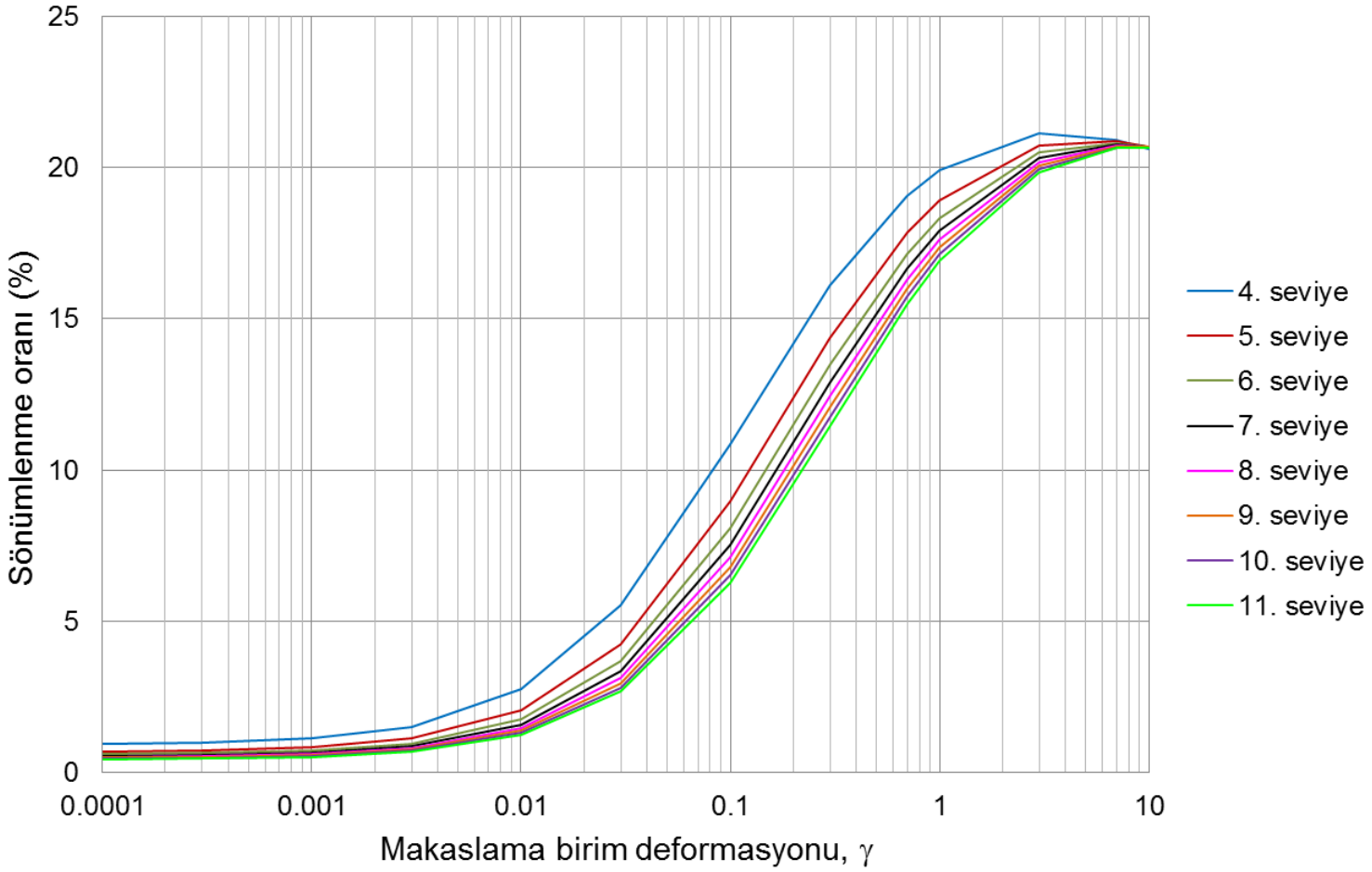
$$b = 0.6329 - 0.0057\, lnN \quad (8.8)$$

Burada, N yükleme çevrim sayısıdır.

Yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak turba seviyesinin altında yer alan zemin seviyeleri için belirlenen modül azalımı, sönümlenme oranı ve makaslama birim deformasyonu ilişkileri Şekil 8.4 ve 8.5'te sunulmuştur.



Şekil 8.4. İnceleme alanındaki turba zeminin altında yer alan zemin seviyeleri için Darendeli [129]'nin modeli kullanılarak belirlenmiş modül azalım eğrileri.

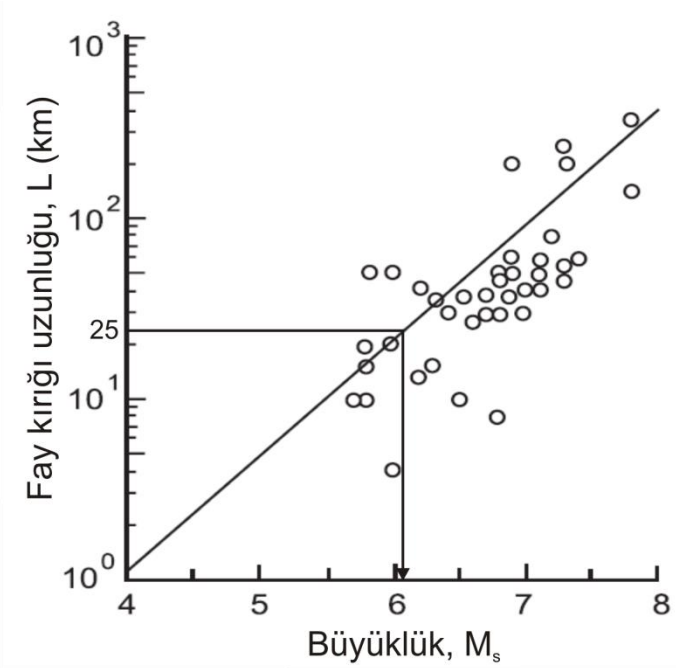


Şekil 8.5. İnceleme alanındaki turba zeminin altında yer alan zemin seviyeleri için Darendeli [129]'nin modeli kullanılarak belirlenmiş sönümlenme oranı – makaslama birim deformasyonu ilişkisi.

8.1.3. En Büyük Yatay Yer İvmesinin Belirlenmesi ve Tasarım Yer Hareketi Kaydının Seçimi

Sismik yer tepkisi analizlerinde girdi parametresi olan tasarım yer hareketi kaydının seçilmesinde kullanılmak üzere inceleme alanında deprem olması durumunda gözlenebilecek en büyük yatay yer ivmesi (PGA), Türkiye deprem verisini esas almaları nedeniyle Ulusay vd. [14] ve Özbey vd. [130] tarafından önerilen ivme azalım ilişkileri dikkate alınarak aşağıda belirtildiği gibi hesaplanmıştır.

İnceleme alanına en yakın diri fay, Erkilet Fay Zonu'nun Oymaağaç segmentidir (bkz. Şekil 4.6). 25 km uzunluğunda, normal bileşeni olan sol yönlü doğrultu atımlı bu segment inceleme alanına 2.5 km uzaklıktadır. İnceleme alanına yaklaşık 12 km uzaklıkta bulunan diğer bir diri fay ise, Erkilet Fay Zonu'nun 23 km uzunluğundaki Güneşli segmentidir (bkz. Şekil 4.6). Türkiye'de meydana gelmiş depremlere ait veri esas alınarak Aydan vd. [131] tarafından önerilmiş olan "deprem büyüklüğü (M_s) – fay kırığı uzunluğu (L)" ilişkisinden (Şekil 8.6) Oymaağaç ve Güneşli segmentlerinin üretebileceği en büyük deprem büyüklükleri (M_s) sırasıyla 6.07 ve 6.02 olarak belirlenmiştir.



Şekil 8.6. Türkiye deprem verisine göre fay kırığı uzunluğu ve deprem büyüklüğü (M_s) arasındaki ilişki [131].

Daha sonra ivme azalım ilişkilerinde bir girdi parametresi olan depremin moment büyüklüğü (M_w), Ulusay vd. [14]'nin önerdiği ve Eşitlik 8.9'da verilen yüzey büyüklüğü (M_s)-moment büyüklüğü (M_w) arasındaki ilişkiden yararlanılarak sırasıyla 6.16 ve 6.22 olarak hesaplanmıştır.

$$M_w=0.6798M_s+2.0402 \quad (8.9)$$

Yukarıda belirtilen bu parametreler Eşitlik 8.10'da verilen Ulusay vd. [14] tarafından önerilmiş ivme azalım ilişkisinde yerine konarak Oymaağaç ve Güneşli segmentlerinden kaynaklanan herhangi bir deprem olması durumunda inceleme alanı için en büyük yatay yer ivmesi (PGA) değerleri sırasıyla 0.28 g ve 0.23 g olarak belirlenmiştir (Çizelge 8.1).

$$PGA= 2.18e^{0.0218(33.3M_w-R_e+7.8427S_A+18.9282S_B} \quad (8.10)$$

Burada;

M_w : Moment büyüklüğü,

R_e : Merkez üssünden uzaklık (km),

S_A ,S_B : Saha koşulu (Kaya zeminler için, S_A=S_B=0, toprak zeminler için S_A=1 S_B=0, yumuşak toprak zemin S_A=0 S_B=1).

Ulusay vd. [14] tarafından önerilen ivme azalım ilişkisinde saha koşulu sabitleri olan S_A ve S_B, inceleme alanının yumuşak toprak zemin olması nedeniyle sırasıyla 0 ve 1 olarak alınmıştır.

Özbey vd. [130] tarafından önerilen ve Eşitlik 8.11'de verilen azalım ilişkisine göre yapılan hesaplamadan, Oymaağaç ve Güneşli segmentlerinde herhangi bir deprem olması durumunda inceleme alanı için en büyük yatay yer ivmesi (PGA) değerleri sırasıyla 0.26 g ve 0.16 g olarak belirlenmiştir (Çizelge 8.1).

$$\log(Y_{ij}) = a + b(M_i - 6) + c(M_i - 6)^2 + d\log\sqrt{{R_{ij}}^2 + h^2} + eG_1 + fG_2 \quad (8.11)$$

Burada;

a : Azalım ilişkisi sabiti (PGA için değeri 3.287),

b : Azalım ilişkisi sabiti (PGA için değeri 0.503),

c : Azalım ilişkisi sabiti (PGA için değeri -0.079),

d : Azalım ilişkisi sabiti (PGA için değeri -1.1177),

e : Azalım ilişkisi sabiti (PGA için değeri 0.141),

h : Azalım ilişkisi sabiti (PGA için değeri 14.82),

f : Azalım ilişkisi sabiti (PGA için değeri 0.331),

M_i : Moment büyüklüğü,

R_{ij} : Yüzey kırığından uzaklık (km),

G_1, G_2 : Saha koşulu (A ve B sınıfı zeminler için, $G_1=G_2=0$, C sınıfı zeminler için $G_1=1$ $G_2=0$, D sınıfı zeminler için $G_1=0$ $G_2=1$).

Buna göre; Oymaağaç segmenti için hesaplanan ivme değerlerinin Güneşli segmenti için hesaplanan ivme değerlerinden daha yüksek olması nedeniyle, analizler Oymaağaç segmentinin özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır.

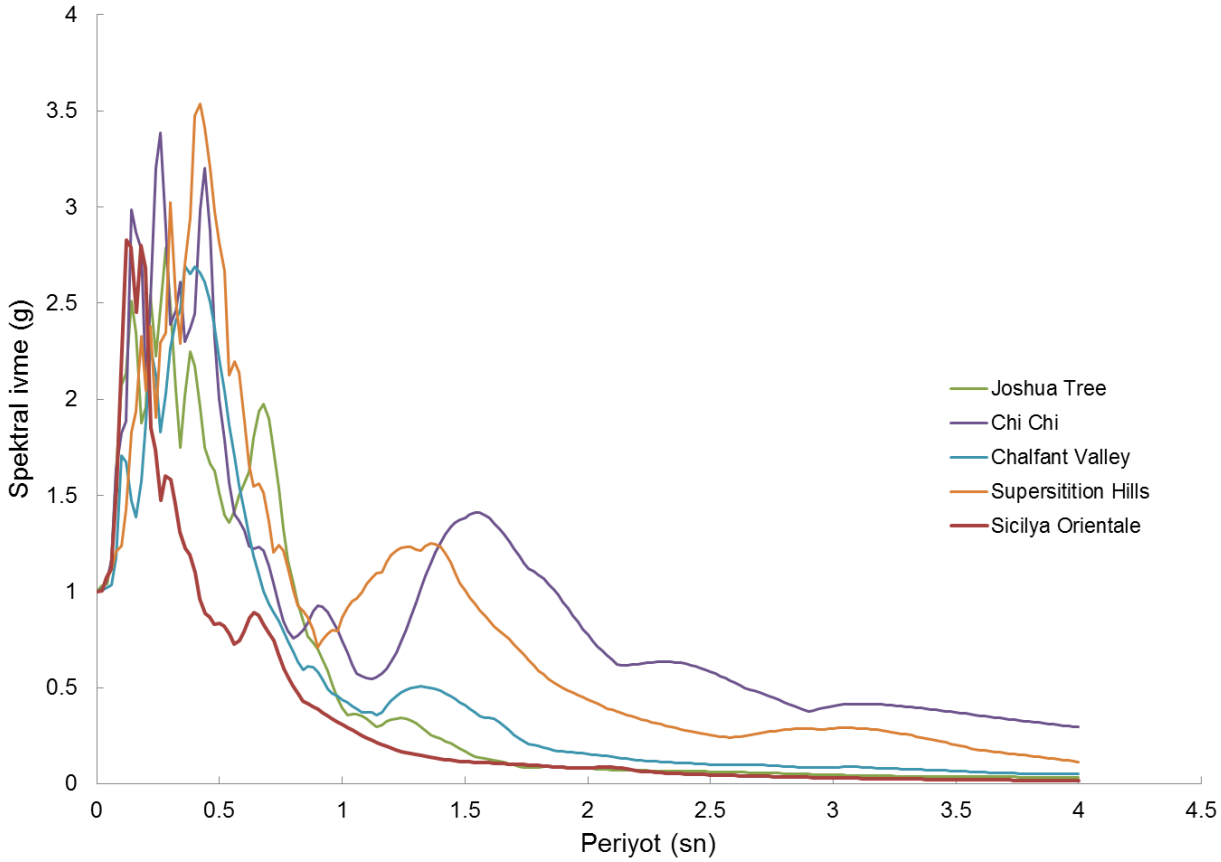
Çizelge 8.1. İvme azalım ilişkileri kullanılarak inceleme alanı için hesaplanan en büyük yatay yer ivmeleri.

Azalım İlişkisi	Oymaağaç Segmenti PGA (g)	Güneşli Segmenti PGA (g)
Ulusay vd. [14]	0.280	0.230
Özbey vd. [130]	0.26	0.16

Olası bir deprem anında inceleme alanında beklenebilecek en büyük yatay yer ivmesinin büyüklüğü, Oymaağaç segmentinin karakteristik özellikleri ve deprem kaydının alındığı zeminin makaslama dalgası hızı (yaklaşık 300 m/s olması) dikkate alınarak dinamik analizlerde kullanılmak üzere, PEER (Pasific Earthquake Research Center)'ın veri tabanından [132] 5 adet tasarım yer hareketi kaydı seçilmiştir. Seçilen bu kayıtlarının genel özellikleri Çizelge 8.2'de verilmiş, tasarım yer hareketlerinin spektral ivme-periyot ve ivme-zaman grafikleri ise Şekil 8.7 ve 8.8'de sunulmuştur.

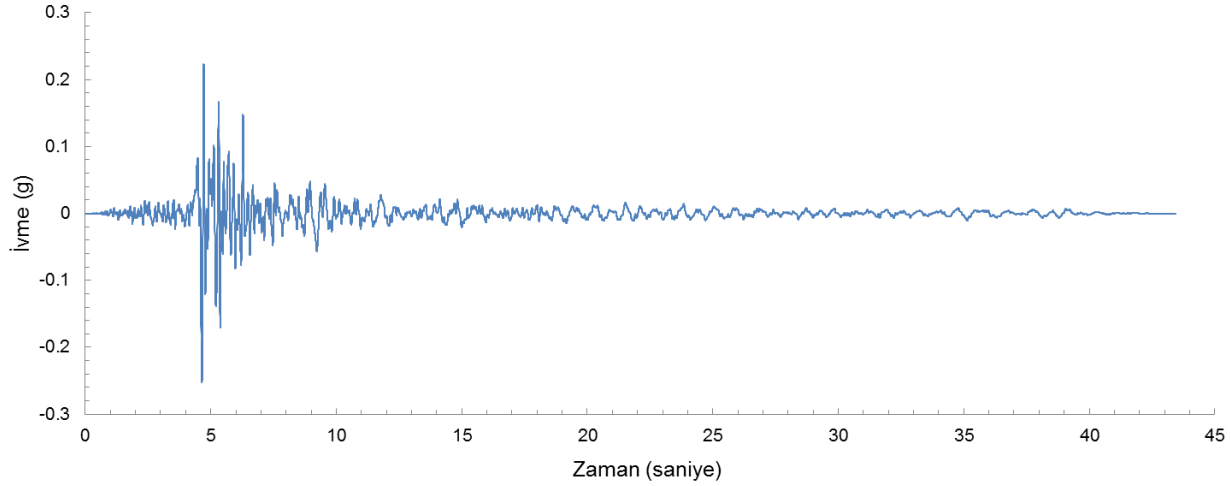
Çizelge 8.2. Dinamik analizlerde girdi parametresi olarak kullanılan deprem kayıtlarının genel özellikleri (PEER'ın veri tabanından düzenlenmiştir).

Kayıt No.	Deprem adı	Yer	Yılı	Deprem büyüklüğü	Fay mekanizması	Yüzey kırığı uzunluğu (km)	V_{s30} (m/s)
1	Sicilia Orientale	Catania, (İtalya)	1990	5.6	Doğrultu atımlı	22.83	261
2	Joshua Tree	Kaliforniya (ABD)	1992	6.1	Doğrultu atımlı	25.53	292
3	Chi Chi	Chi Chi (Tayvan)	1999	6.2	Doğrultu atımlı	21.67	259
4	Chalfant Valley	Kaliforniya (ABD)	1986	5.77	Doğrultu atımlı	23.47	303
5	Superstition Hills	Kaliforniya (ABD)	1987	6.54	Doğrultu atımlı	22.25	317

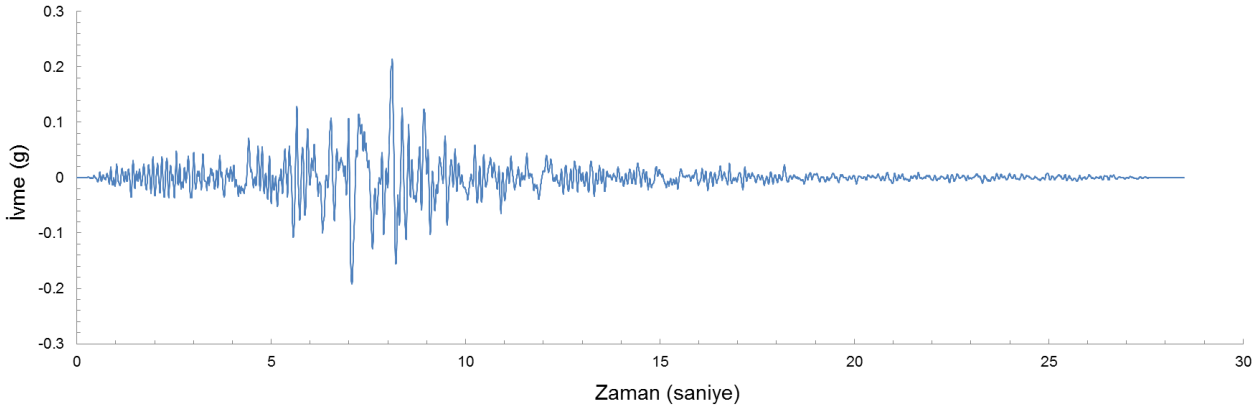


Şekil 8.7. Seçilen tasarım yer hareketlerinin normalize edilmiş spektrumları.

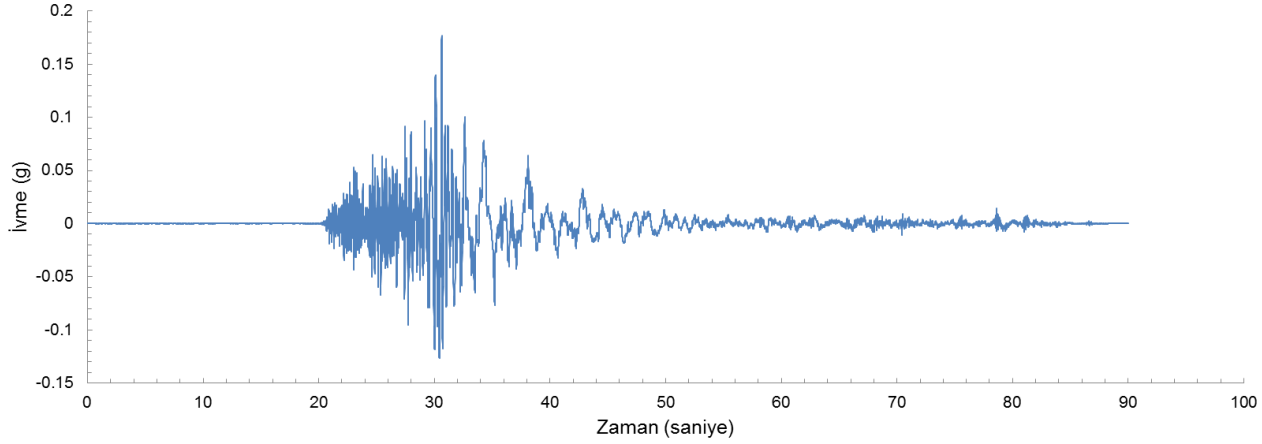
(a)



(b)

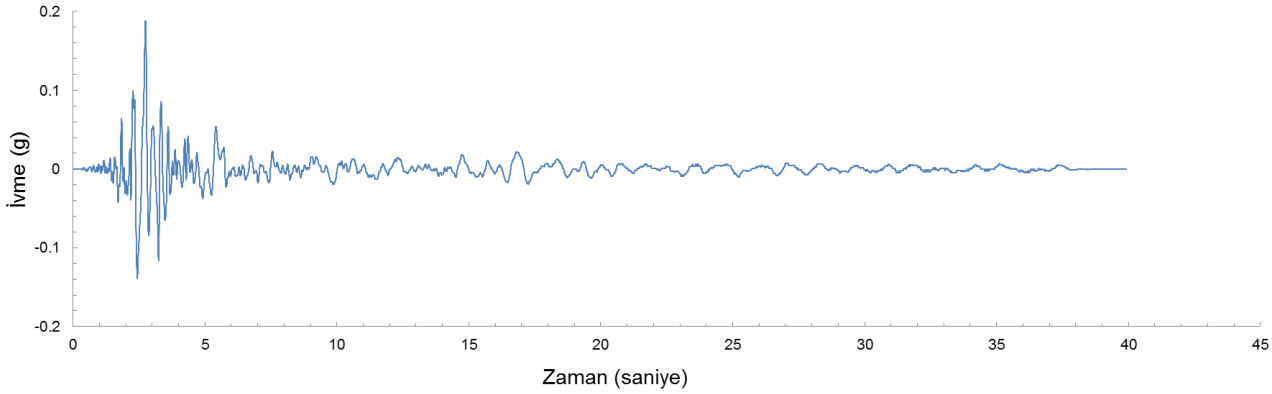


(c)

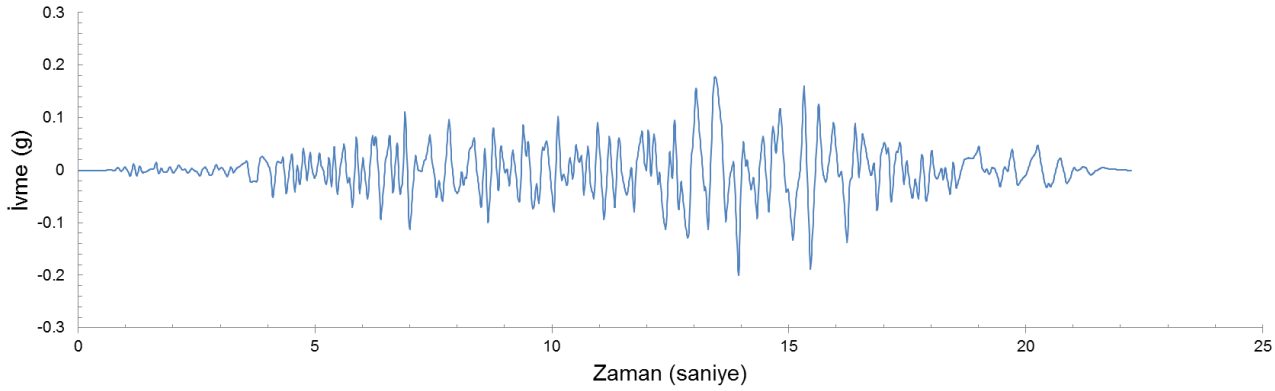


Şekil 8.8. (a) Sicilia Orientale, (b) Joshua Tree, (c) Chi Chi, (d) Chalfant Valley ve € Superstition Hills depremlerinin ivme-zaman grafikleri.

(d)



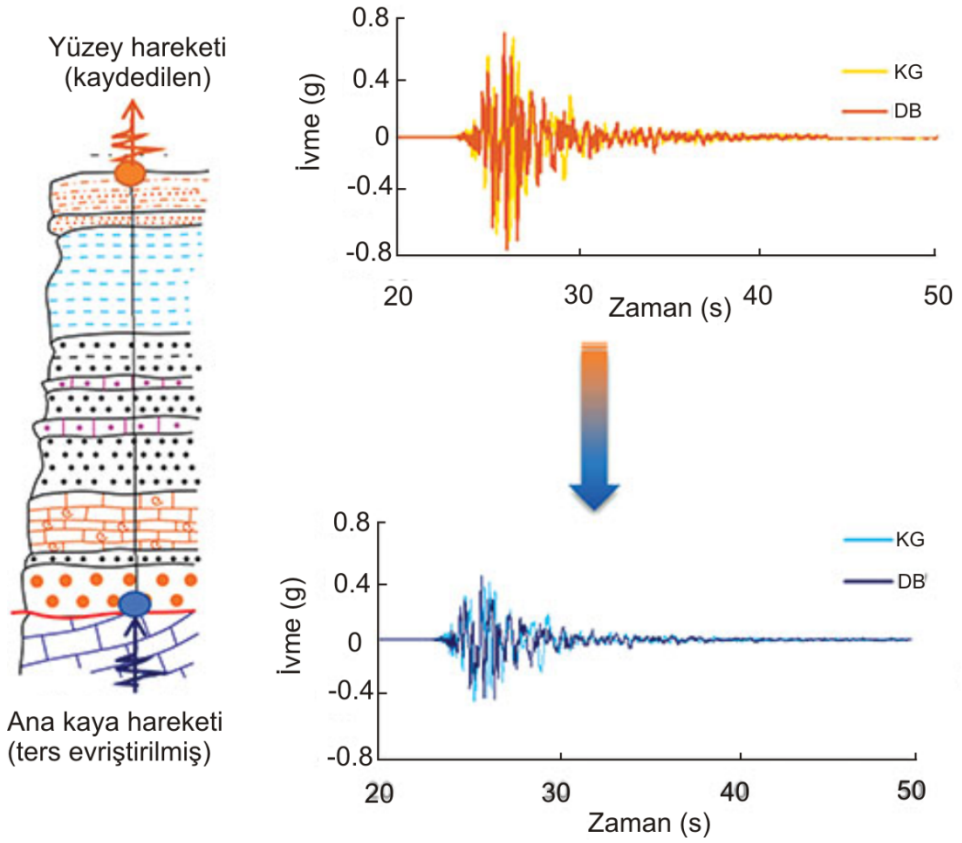
(e)



Şekil 8.8. (devam ediyor)

8.3. Sismik Yer Tepkisi Analizleri

Sismik yer tepkisi analizleri, Deepsoil V6.0 [133] programında frekans alanında eşdeğer doğrusal analiz yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Şeçilen tasarım yer hareketi kayıtları inceleme alanı için belirlenen sismik taban seviyesinden uygulanmış olup, profilin en üst kısmında yer alan turba seviyesinin sismik yer tepkisi belirlenmiştir. Bu tasarım, yer hareketleri sismik taban seviyesinden uygulanırken, yüzeyde kaydedilmiş olmaları nedeniyle Deepsoil V6.0 [133] programının içinde yer alan doğrusal elastik ters evrişim (deconvolution) yöntemi ile yeniden düzenlenmiştir. Bu yöntem, yüzeyde kaydedilmiş yer hareketini transfer fonksiyonları kullanarak ana kayada ölçülmüş yer hareketine dönüştürme esasına dayanmaktadır (Şekil 8.9).

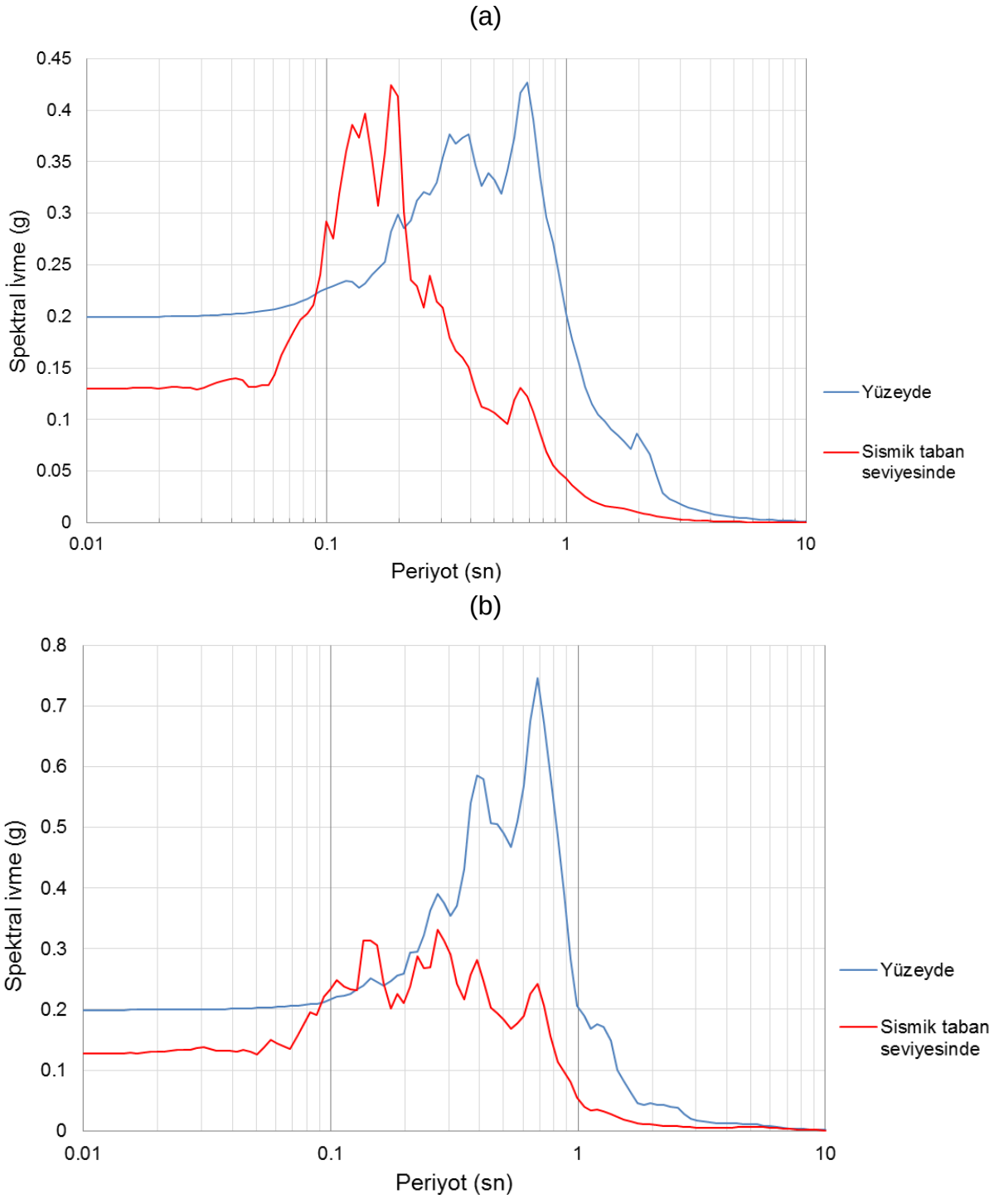


Şekil 8.9. Yüzeyde kaydedilmiş yer hareketini ana kayada ölçülmüş yer hareketine dönüştürme (ters evrişim) ([134]'ten düzenlenmiştir).

Her deprem kaydı için ayrı ayrı olmak üzere, analiz sonucunda elde edilen zemin tepki spektrumları Şekil 8.10'da sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, turba zeminlerin düşük periyotlardaki deprem dalgalarını sönümlediği, ancak 0.3-0.5 sn'den daha büyük periyotlardaki deprem dalgalarını büyüttüğü "Spektral ivme-Periyot" grafiklerinden de görülmektedir. Bölgedeki yapı periyotlarının da hesaplanıp, bu çalışmada incelenen turba zeminler için belirlenen periyotlarla karşılaştırılarak bunun zemin büyütmesi açısından bir tehlike yaratıp yaratmayacağı değerlendirilmelidir.

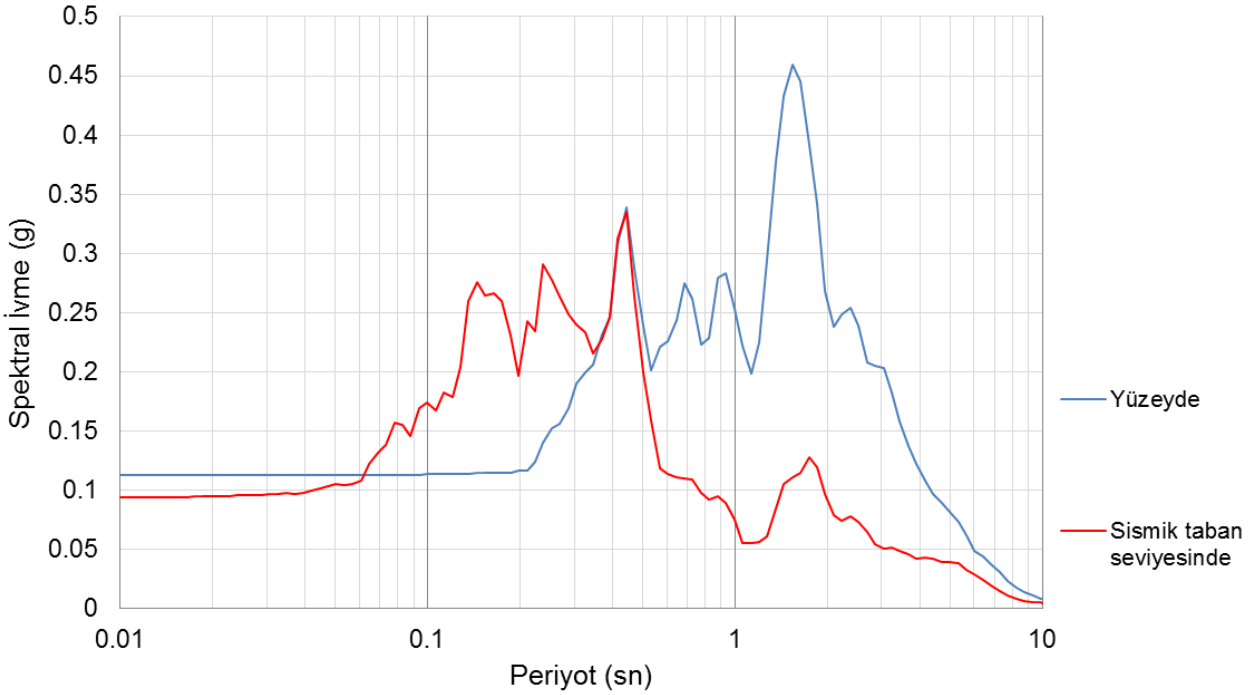
Dinamik analizler sonucunda, inceleme alanındaki turba zeminler için normalize edilmiş sismik tepki spektrumları da oluşturulmuştur (Şekil 8.11). Belirlenen spektrumların, deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında 2007 yılında resmi gazetede yayımlanan Türkiye Deprem Yönetmeliği'ne [135] göre inceleme alanındaki zemin türüne (Z4) göre önerilen tasarım spektrumu ile uyumlu olmadığı görülmektedir. Diğer bir ifadeyle turba için belirlenen zemin büyütmesi değerleri yönetmelikteki değerlerden büyüktür.

Avrupa Yapısal Tasarım Standartları Yönetmeliği [136]'ne göre inceleme alanındaki zemin S2 olarak sınıflandırılmış olup, bu zemin türü için yönetmelikte bir tasarım spektrumu önerilmemiş ve yerel zemin koşullarının değerlendirilerek bölgeye özel bir tasarım spektrumunun oluşturulması belirtilmiştir. Avrupa Yapısal Tasarım Standartları Yönetmeliği'nde inceleme alanında bulunan profile benzer olan D sınıfı zeminler için önerilmiş tasarım spektrumu, tez çalışması kapsamında belirlenen spektrumlarla karşılaştırıldığında; düşük periyotlarda Türkiye Deprem Yönetmeliği tarafından önerilen tasarım spektrumundan daha uyumlu olduğu, ancak 1 saniyeden büyük periyotlarda uyumlu olmadığı görülmektedir (Şekil 8.11).

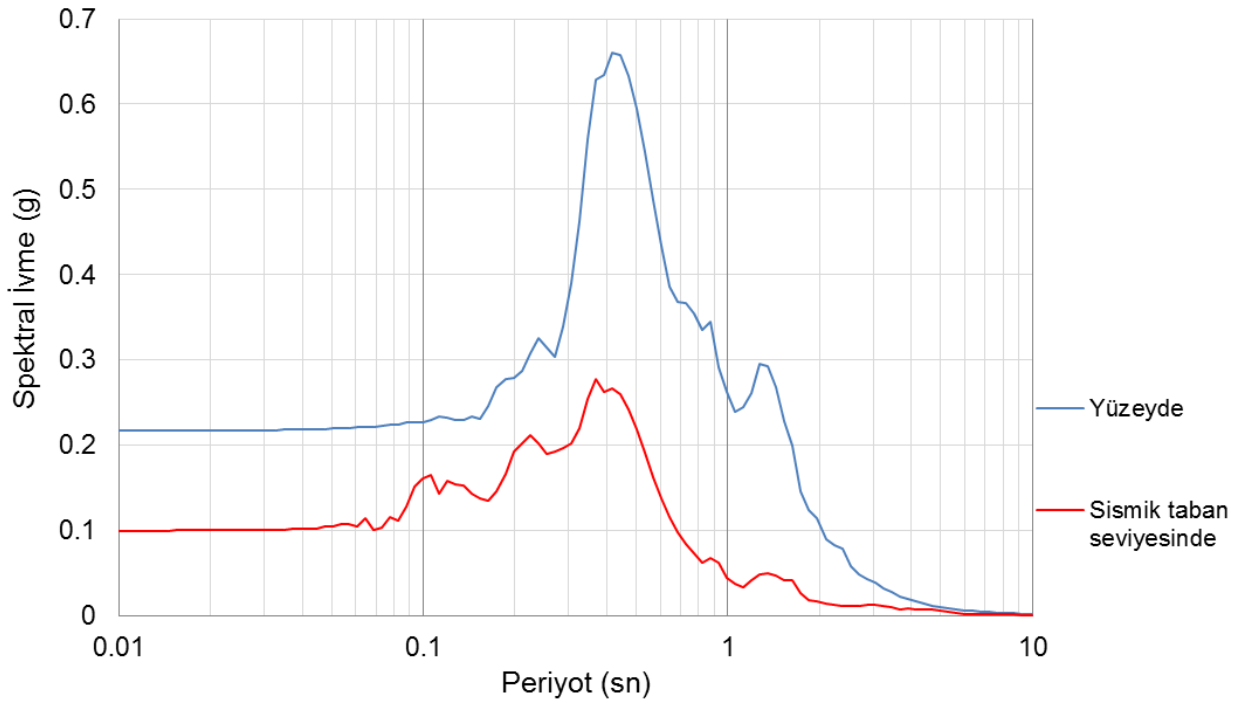


Şekil 8.10. Dinamik analizler sonucunda (a) Sicilia Orientale, (b) Joshua Tree, (c) Chi Chi, (d) Chalfant Valley ve (e) Superstition Hills yer hareketlerinin kayıtları için elde edilen spektral ivme-periyot grafikleri.

(c)

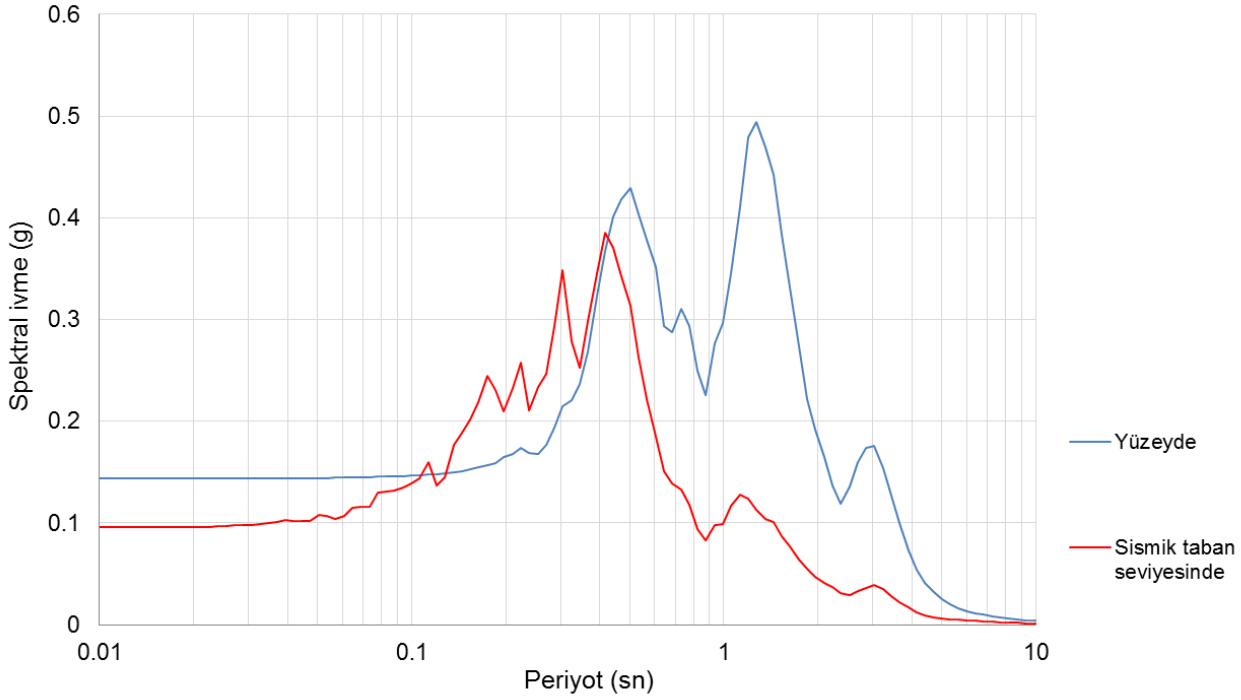


(d)

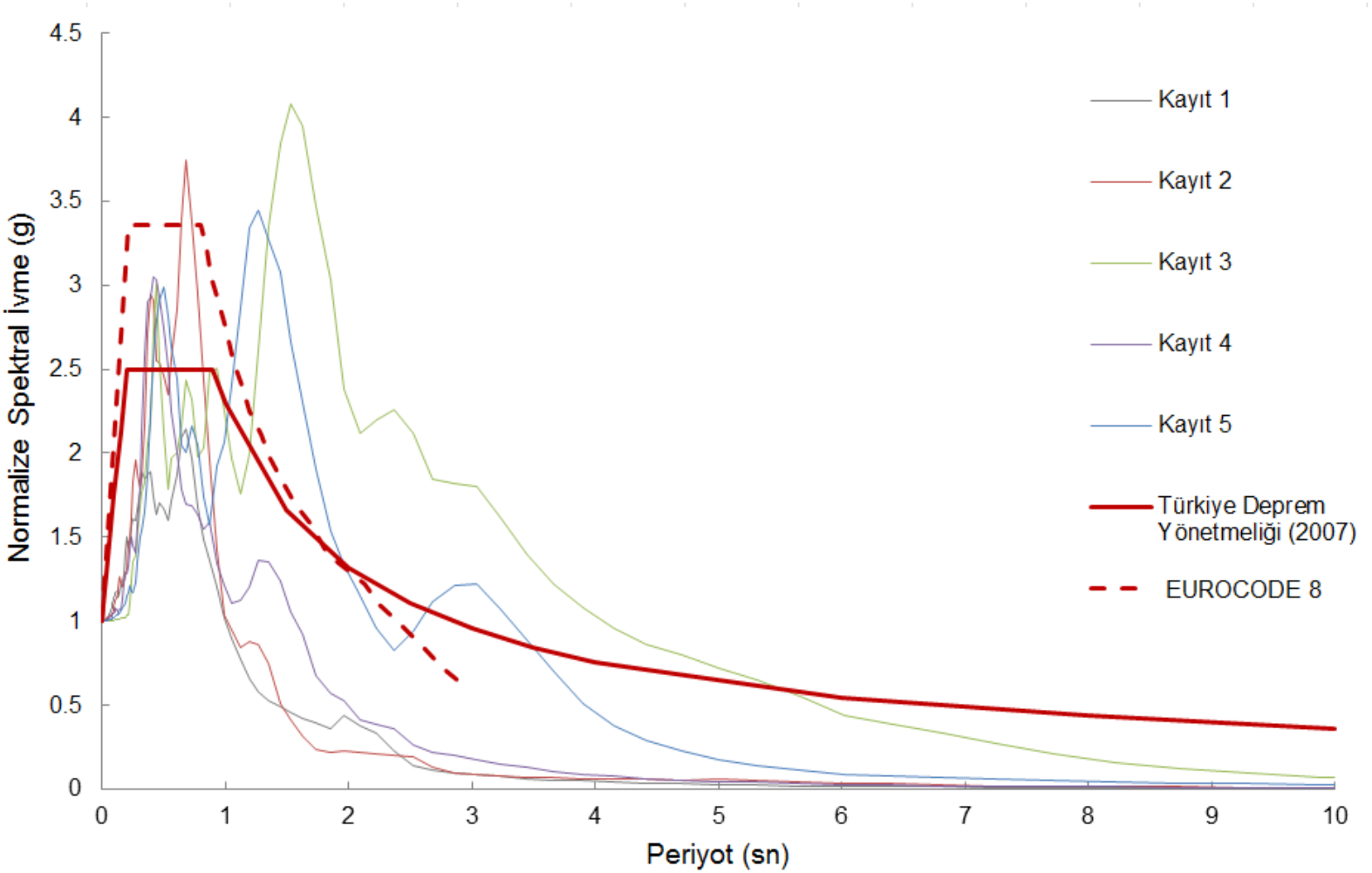


Şekil 8.10. (devam ediyor)

(e)



Şekil 8.10. (devam ediyor)



Şekil 8.11. Dinamik analizler sonucunda inceleme alanı için elde edilen normalize edilmiş spektrumların Türkiye Deprem Yönetmeliği [135] ve EUROCODE 8 [136]'de önerilen spektrumlarla karşılaştırılması.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kayseri'de üzerinde çok sayıda sanayi tesisinin inşa edildiği Serbest Bölge alanında bulunan turba zeminlerin jeo-mühendislik özelliklerinin belirlenmesi, konsolidasyon ve oturma karakteristiklerinin araştırılması, dinamik davranışının analiz edilmesi ve sismik yer tepkisinin değerlendirilmesinin amaçlandığı bu tez çalışmasından elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

i. İnceleme alanında turba zeminin kalınlığı 8 m'ye kadar ulaşmakta olup, bu alanda düzensiz bir şekilde dağılım gösteren iri lifli, ince lifli, bol miktarda canlı kavkıları ile yaprak ve odunsu parçalar içeren kahverengimsi kötü kokulu ve amorf olmak üzere 5 farklı turba türü ayırtlanmıştır. Yüzeye yakın seviyelerde lifli heterojen bir yapı gösteren turbaların derinlik arttıkça hümifikasyon derecesi de artmakta, daha homojen ve amorf bir yapıya sahip olmaktadırlar. İncelenen turbalar Raya ve Jarret [32] tarafından önerilen sınıflamaya göre "organik zemin", Wüst [31] sınıflamasına göre "yüksek kül içerikli turba-organik maddece zengin sediman", Jarret [36] sınıflamasına göre "turbalı çamur-siltli killi çamur", Kanada Zemin Sınıflama Sistemi [28]'ne göre ise "organik zemin-mineralli zemin" olarak sınıflandırılmışlardır. Von Post ve Granlund [27] sınıflaması dikkate alınarak yapılan değerlendirmelerde ise, yüzeye yakın kesimlerde H3-H4, daha derinlere doğru H7'ye kadar değişen sınıflarda yer alan turbaların varlığı saptanmıştır.

ii. İncelenen turba zeminler taramalı elektron mikroskobu görüntülerine göre; silisyumca zengin, volkanik katkılı bir bağlayıcı malzeme içerisinde yoğun miktarda diatome fosili, alg parçaları ve yer yer dokusu bozulmamış lif parçalarını içermektedirler. Diatome kavkılarının ve lif parçalarının gözenekliliğinin çok fazla olması, bu turba zeminlerin boşluk oranını arttırmakta ve sıkışabilirliğini etkilemektedir.

iii. Rezistivite ölçümlerinde yüzeyden yaklaşık 5-6 m derinliğe kadar olan turba seviyesi için 0.2-0.8 Ωm arasında değişen özdirenç değerleri elde edilmiştir. Bu değerler; diğer zemin türleri için belirtilen değerlerden çok düşük olup, inceleme alanındaki yüksek boşluk oranına sahip turba seviyesinin suya doygun halde bulunduğuna işaret etmektedir.

iv. İnceleme alanında yapılan sismik ölçümlerde, 0-15 m derinlikler arasındaki turba seviyesi ve hemen altında yer alan siltli killi zemin seviyesinin makaslama dalgası hızlarının oldukça düşük olduğu ve turba seviyesinde 35-60 m/s arasında, siltli killi zemin seviyesinde ise 60-110 m/s arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir.

v. İnceleme alanındaki turba zeminlerin tayin edilen fiziksel, indeks ve mekanik özellikleri turbalar için literatürde verilen bu özelliklere ilişkin değişim aralıklarıyla genel olarak uyumlu olmakla birlikte, söz konusu aralıkların alt sınırlarına daha yakındır.

vi. Yüzeye yakın derinliklerde bulunan ve daha kalın lifler içeren turbalar, liflerin makaslama dayanımına yaptığı arttırıcı etki nedeniyle yüksek makaslama dayanımı parametrelerine sahipken, daha derindeki ince lifli ve amorf turbaların dayanımlarının ise daha düşük olduğu saptanmıştır.

vii. Konsolidasyon deneylerinden elde edilen sıkışma-zaman grafiklerine göre turba zeminler Tip III türünde [59] sıkışma-zaman davranışı sergilemektedir. Uzun süreli konsolidasyon deneylerinde turba zeminlerin sıkışma süreci birincil konsolidasyon, ikincil konsolidasyon ve üçüncül sıkışma olmak üzere üç aşamada gerçekleşmektedir. Arazide inşa edilen gözlem platformunda alınan oturma ölçümlerinde ise üçüncül oturma izlenmemiştir.

viii. Gözenek suyu basıncı ölçümlerine göre, incelenen turba zeminler 54 kPa'a kadar olan normal gerilmeler altında 1 dakikadan daha kısa sürede birincil

konsolidasyon sürecini tamamlamakta olup, ikincil sıkışma indisleri zamanla doğrusal olmayan şekilde artmaktadır. Bu nedenle, 24 saatlik konsolidasyon deneylerinden elde edilen ortalama ikincil sıkışma indisinin kullanılmasıyla tahmin edilen oturmalar gerçekte meydana gelebilecek oturma miktarından daha düşük olarak hesaplanmaktadır.

ix. İnceleme alanında inşa edilen gözlem platformunda yalnızca platformun yükü altında 28 günde 26 mm oturma ve platformun kaya bloklarıyla yüklenmesinden sonra geçen 417 günde 83 mm olmak üzere toplam 109 mm'lik oturma ölçülmüştür. Laboratuvar deneylerinden belirlenen ortalama konsolidasyon parametreleri kullanılarak yapılan geriye dönük analizlerde, bu parametrelerin ortalama değerlerinin belirlendiği gerilme aralığının, gözlem platformunun zemine ilettiği gerilmeden daha büyük olması nedeniyle gözlem platformunda ölçülen oturma olduğundan daha büyük olarak hesaplanmıştır. Gözlem dolgusundaki oturma miktarını kestirebilmek için bazı konsolidasyon parametrelerinin, literatür çalışmalarından da yararlanılarak yeniden düzenlenlenip kullanılmasıyla yapılan geriye dönük analizlerden hesaplanan zamana bağlı oturma miktarları ile arazide ölçülen oturma miktarlarının uyumlu olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, bu tür zeminlerde yapılacak oturma analizlerinde, konsolidasyon parametrelerinin bu çalışmada önerildiği şekilde düzenlenip kullanılmasıyla arazide gerçekleşebilecek oturma miktarlarını daha sağlıklı tahmin etmek mümkün olacaktır.

x. Turba zeminlerin ikincil sıkışma miktarının tahmin edilmesinde kullanılan C_α/C_c oranı incelenen turbalar için 0.0494 olarak hesaplanmış olup, bu oran diğer araştırmacılar tarafından turba zeminler için belirlenen değerlerin alt sınırlarına yakındır.

xi. İncelenen turba zeminlerin birincil sıkışma indisi (C_c) ve boşluk oranı (e_0) ile şişme indisi (C_s) ve boşluk oranı (e_0) arasında belirleme katsayıları sırasıyla R^2=0.9813, R^2=0.9157 olan doğrusal ilişkiler elde edilmiştir. Buna göre, ilksel

boşluk oranı bilinen turba zeminin C_c ve C_s değerleri bu ilişkiler kullanılarak hesaplanabilir.

xii. İnceleme alanındaki turba örneklerinin bazı fiziksel ve indeks özelliklerinin birbirleriyle ilişkileri değerlendirilmiş olup, özgül ağırlık-likit limit değerleri ile organik madde içeriği-likit limit değerlerinin istatistiksel olarak birbiriyle anlamlı bir şekilde ilişkili olmadığı anlaşılmıştır. Ancak, organik madde içeriği arttıkça turbanın özgül ağırlığının azalma eğilimi gösterdiği saptanmıştır.

xiii. Rezonans kolonu ve tekrarlı torsiyonel makaslama deney sonuçlarından inceleme alanındaki turba zeminler için hesaplanan modül azalım ilişkisi (G/G_{max}), farklı plastisite indeksine (PI) sahip zeminler için Vucetic Dobry [85]'nin önerdiği azalım ilişkileri ile karşılaştırıldığında, inceleme alanındaki turba zeminlerin PI=0 olan zeminlere kısmen benzer şekilde davrandığı belirlenmiştir.

xiv. Turba zeminler için yapılan sismik yer tepki analizleri sonucunda elde edilen tepki spektrumlarına göre, bu zeminlerin düşük periyotlarda deprem dalgalarını sönümlediği, ancak 0.3-0.5 sn'den daha büyük periyotlarda deprem dalgalarını büyüteceği belirlenmiştir. Turba zeminler için oluşturulan normalize edilmiş sismik tepki spektrumlarının Türkiye Deprem Yönetmeliği [135]'ğindeki tasarım spektrumlarıyla uyumlu olmayıp onları aştığı, diğer bir ifadeyle bu zeminler için belirlenen zemin büyütmesi değerlerinin yönetmelikteki değerlerden büyük olduğu bu analizler sonucunda anlaşılmıştır. Bu spektrumlar, Avrupa Yapısal Tasarım Standartları Yönetmeliği [136] tarafından önerilmiş tasarım spektrumlarıyla karşılaştırıldığında ise biraz daha uyumlu olmakla birlikte, 1 saniyeden büyük periyotlarda uyum söz konusu olmamaktadır.

Yukarıda belirtilen sonuçların incelenen turba zeminler ve bunlara çok benzer özelliklere sahip olan turbalar için geçerli olacağı dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmada elde edilen başlıca sonuçlar dikkate alınarak, turba zeminlerde gelecekte yapılacak çalışmalar için yararlı olabileceği düşünülen öneriler aşağıda sunulmuştur.

a. Meydana gelebilecek depremler sırasında yapıların maruz kalabilecekleri hasarların azaltılmasını sağlamak amacıyla, turba zeminler üzerine inşa edilecek yapılar için turba zeminin bulunduğu bölgenin depremselliği dikkate alınarak ve yerel zemin koşulları değerlendirilerek bu bölgeye özel bir tasarım spektrumunun oluşturulmasının gerekliliği göz ardı edilmemelidir.

b. Bu tez çalışması kapsamında, sağlanan maddi desteğin sınırlı olması nedeniyle turba zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemeye yönelik sınırlı sayıda deney gerçekleştirilebilmiştir. Farklı plastisite indeksine sahip inorganik zeminler için Vucetic ve Dobry [85] tarafından önerilen modül azalım ve sönümlenme oranı ilişkilerine benzer şekilde bu tür organik zeminlere ait ilişkilerin de tahmin edilebilmesi amacıyla zeminlerin dinamik özelliklerine etki eden boşluk oranı, plastisite indeksi, aşırı konsolidasyon oranı vb. gibi bazı parametrelerin turba zeminlerin dinamik özellikleri üzerindeki etkilerinin ayrıntılı olarak araştırılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir.

c. Turba zeminlerin ikincil sıkışma indislerinin zamana bağlı olarak değişim göstermesi nedeniyle, bu zeminlerde meydana gelebilecek oturma miktarlarının daha doğru tahmin edilebilmesi için konsolidasyon deneyleri sırasında her gerilme aşamasında örneklerin en az 48 süreyle konsolidasyona maruz bırakılması önerilir.

d. Turba zeminlerde yapılan standart penetrasyon deneylerinde darbe sayılarının (SPT-N) çok düşük olması, bu zeminlerde taşıma gücü problemi gerçekleşebileceğini düşündürse de, doğrudan makaslama dayanımı deneylerinden belirlenen makaslama dayanımı parametrelerinin oldukça yüksek olması nedeniyle incelenen turba zeminde böyle bir mühendislik

sorunun gerçekleşmeyeceğini göstermektedir. Benzer makaslama dayanımı parametrelerine sahip zeminlerde SPT-N değerleri çok daha yüksektir. Bu gerekçeyle, turba zeminlerin sıkılığının ve dayanımının yerinde belirlenebilmesi amacıyla SPT'nin kullanımı yerine, Boylan vd. [90] tarafından önerilen küresel penetrometrenin kullanılabilirliğinin daha ayrıntılı olarak incelenmesinin veya alternatif bir yöntemin geliştirilmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.

e. İncelenen turba zeminlerin lif içeriği nedeniyle Atterberg limitlerinin belirlenmesinde güçlüklerle karşılaşılması ve mevcut yöntemlerle belirlenen Atterberg limitlerinin temsil edici olmaması dikkate alınarak turba zeminlerin Atterberg limitlerinin daha sağlıklı belirlenebilmesi amacıyla mevcut yöntemlerin gözden geçirilip turbalara yönelik yöntemlerin geliştirilmesi yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

[1] Huat, B.B.K., Organic and peat soils engineering*, Universiti Putra Malaysia*, 5-55, **2004**.

[2] Munro, R., *Dealing with bearing capacity problems on low volume roads constructed on peat*, EU Project, Roadex II Northern Periphery Manual, Scotland, **2004**.

[3] Huat, B.B.K., Kazemian, S., Prasad, A., Barghchi, M., State of an art review of peat: General perspective, *International Journal of the Physical Sciences*, 6(8), 1988-1996, 18 April, **2011**.

[4] DPT, Sekizinci 5 yıllık kalkınma Planı, *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu*, Enerji hammaddeler alt komisyonu kömür çalışma grubu, DPT:2605, ÖİK:616, **2001**.

[5] TÜSİAD, 21. Yüzyıla girerken Türkiye'nin enerji stratejisinin değerlendirilmesi: Türkiye'nin fosil yakıt rezervleri, üretim ve geliştirme olanakları*,* www.tusiad.org/turkish/rapor/enerji/html/sec6.html, **2009**.

[6] Ajlouni, M.A., *Geotechnical properties of peat and related engineering problems*, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana-Champaign, USA, **2000**.

[7] Kramer, S.L., Dynamic response of peats, *Final Res. Rep.* WA-RD 412.1, Washington State Transp. Ctr., Univ. of Washington, Seattle, Wash., **1996**.

[8] Demirok, Y., *Kayseri Ambar köyü civarı turba (gitya-linyit) yatağına ait ön değerlendirme*, MTA Genel Müdürlüğü, Derleme Rapor No 7214, Ankara, **1982**.

[9] Sert, S., Önalp, A., Turba üzerinde yapılmış rijit platformun oturmaları ve kontrolü, *Teori ve Uygulamada Yapı-Zemin Etkileşimi Sempozyumu*, İstanbul, 181-185, **2007**.

[10] Ulusay, R, Tuncay, E., Hasançebi, N., *Kayseri Civarindaki Turba Zeminlerin Jeo-Mühendislik Özelliklerine ve Davranışına İlişkin Ön Değerlendirmeler*, Araştırma raporu, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü Beytepe, Ankara, yayımlanmamış, **2009**.

[11] Ulusay, R, Tuncay, E., Hasançebi, N., Geo-engineering properties and settlement of peaty soils at an industrial site (Turkey), *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, 69, 397-410, **2010**.

[12] Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsar, H., Tuncay, E., *Site Investigation and Engineering Evaluation of the Düzce-Bolu Earthquake of November 12, 1999,* Türkiye Deprem Vakfı Deprem Raporu, TDV/DR 09-51, İstanbul, **2000**.

[13] Aydan, Ö., Ulusay, R., Hasgür, Z., Taşkın, B., *A Site Investigation of the Düzce-Bolu Earthquake of Kocaeli Earthquake of August 12, 1999*, Türkiye Deprem Vakfı Deprem Raporu, TDV/DR 08-49, İstanbul, **2000**.

[14] Ulusay, R., Tuncay, E., Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey, *Engineering Geology*, 74, 265-291, **2004**.

[15] Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minaeva, T. & Silvius, M. (eds), *Assessment on peatlands, biodiversity and climate change*, Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International Wageningen, 179 p, **2008**.

[16] Taylor, J. A., *The peatlands of Great Britain and Ireland. Ecosystems of the World Volume 4A*, Mires: Swamp, Bog, Fen & Moor, Elsevier, Oxford, **1983**.

[17] Soper, E.K., Osbon, C.C., The occurrence and uses of peat in the United States, *USGS Bulletin*, 728, 1-207, **1922**.

[18] Gorham, E., The development of peatlands, *Quarterly Review of Biology*, 32, 145–166, **1957**.

[19] Wong, L.S., Hashim, R., Ali, F.H., A Review on Hydroulic Conductivity and Compressibility of Peat, *Journal of Applied Sciences*, 9 (18), 3207-3218, **2009**.

[20] www.telegraph.co.uk, 2015.

[21] Cameron, C.C., Esterle, J.S., Plamer, C.A., The geology, botany and chemistry of selected peat-forming environments from temperate and tropical latitudes, *International Journal of Coal Geology*, 12, 105-156, **1989**.

[22] Selvam, U.N.P., *Shear strenght characteristics of fibrous peat,* PhD Thesis, University of Civil Engineering Universiti Teknologi Malaysia, **2006**.

[23] Ayan, S., Turba Karakteristikleri ve Islah Çalışmaları, *Doğu Akdeniz Orm. Araş. Müd., DOA Dergisi*, Orman Bakanlığı Yayın No. 076, DOA Yayın No. 7, Sayı. 4, 131-150, ISSN 1300 – 8544, Tarsus, **1998**.

[24] Huat, B. B. K., Kazemian, S., Prasad, A., Barghchi, M., State of an art review of peat: General perspective, *International Journal of the Physical Sciences,* Vol. 6(8), pp. 1988-1996, **2011**.

[25] Radforth, N.W., *Muskeg as an engineering problem*, Muskeg Engineering Handbook, Ottawa, Canada, **1969**.

[26] Padem, H., Ocal, A., Alan, R., Effect of humic acid added foliar fertilizer on seedling quality and nutrient content of eggplant and pepper: *ISHS Symposium on Greenhouse Management for Better Yields and Quality in Mild Winter Climates*, 3-5 November 1997, Acta Horticulturae, 491, 241-246, **1997**.

[27] Von Post, L., Granlund, E., Peat resources in southern Sweden: *I. Sveriges Geologiska Undersökning*, Stockholm, Yearbook 19.2 Series C, No. 335, 1-127, **1926**.

[28] CSSC, *The Canadian System of Soil Classification*, Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey, Ottawa, Canada, **1987**.

[29] Soil Survey Staff, US Soil Taxonomy, Keys to soil taxonomy, Soil Management Support Services Technical Monograph, No 19, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, **1990**.

[30] Paramananthan, S., Malaysian Soil Taxonomy (Second Approximation): A Proposal for the Classification of Malaysian Soils, *Malaysian Society of Soil Science, Param Agricultural and Soil Surveys (M) Sdn. Bhd*., Kuala Lumpur, Malaysia, **1998**.

[31] Wüst, R.A.J., Bustin, R.M., Lavkulich, L.M., New classification systems for tropical organic-rich deposits based on studies of the Tasek Bera Basin, Malaysia, *Catena*, 53, 133-163, **2003**.

[32] Raya, J.K., Jarret P.M., *Geoguide 6: Site investigation for organic soils and peats*, JKR Document 20709-0341-95, Institute Kerja Raya Malaysia, **1995**.

[33] Moris, N., *Composition of organic materials of peat soils in Peninsular Malaysia*. In: Zauyah, S., Wong, C.B., Paramanathan, S. (Eds.), Recent Developments in Soil Genesis and Classification, Kuala Lumpur, Malaysia. Malaysian Society of Soil Science, Kuala Lumpur, MY, 81– 87, **1989**.

[34] Andrejko, M.J., Fiene, F., Cohen, A.D., *Comparison of ashing techniques for determination of the inorganic content of peats*. In: Jarrett, P.M. (Ed.), Testing of Peats and Organic Soils. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 5– 20, **1983**.

[35] Landva, A.O., Korpijaakko, E.O., Pheeney, P.E., *Geotechnical classification of peats and organic soils*, In: Jarrett, P.M. (Ed.), Testing of Peats and Organic Soils, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 37– 51, **1983**.

[36] Jarrett, P.M., *Summary of testing of peats and organic soils*, In: Jarrett, P.M. (Ed.), Testing of Peats and Organic Soils, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 233– 237, **1983**.

[37] Mankinen, G.W., Gelfer, B., Comprehensive use of peat in the U.S.S.R. DOE: *5th Technical Conference on Peat,* U.S. Department of Energy, Bethesda, MD, 44-54, **1982**.

[38] ASTM, *Annual Book of American Society for Testing and Materials (ASTM) Standards. Part 19. Test D-2974 (ash)*, Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA, **1982**.

[39] Kearns, F.L., Autin, W.J., Gerdes, R.G., *Occurrence and stratigraphy of organic deposits, St. Mary Parish, Louisiana*, GSA Abstracts With Programs, N.E. and S.E. Sections. Louisiana Geological Survey (LGS), GSA annual Meeting, Washington DC, USA, 30, **1982**.

[40] Kivinen, E., Proposal for a general classification of virgin peat: In: Grubich, D.M., Farnham, R.S., Itkonen, B. (Eds.), *Proceedings of the 6th International Peat Congress*, Duluth, Minnesota, USA, International Peat Society, Duluth, USA, p. 47, **1980**.

[41] Davis, J.H., The peat deposits of Florida: their occurrence, development and uses, *Florida Geological Survey Bulletin 30. Tallahassee*, FL, **1946**.

[42] Arman, A., A definition of organic soils-an engineering definition, *Engineering Research Bulletin*, Vol 101, Division of Engineering Research, Louisiana State University, Baton Rouge, **1923**.

[43] Chynoweth, D.P., A novel process for biogasification of peat: In: *Proceedings of the International Symposium on Peat Utilization*, Bemidji, Minnesota, 159-171, **1983**.

[44] Schelkoph, G.M., Hassett, D.J., Weber, B.J., A comparative study of preparation and analytical methods for peat, *Testing of Peat and Organic Soils*, ASTM STP 820, 99-110, **1983**.

[45] Waksman, S.A., The peats of New Jersey and their utilization, *New Jersey Department of Conservation and Development, Geological Series Bulletin*, 55, p. 87, **1942**.

[46] Davis, J.H., The peat deposits of Florida their occurrence, development and uses, *Florida Geological Survey, Geological Bulletin*, No 3, **1997**.

[47] Colley, B.E., Construction of highways over peat and muck areas, *American Highway*, 29(1), 3-7, **1950**.

[48] Hobbs, N.B., Mire morphology and the properties and behavior of some British and foreign peats. *Quarterly Journal of Engineeering Geology*, 19 (1), 7-80, **1986**.

[49] Fox, P.J., Edil, T.B., Lan, L. T., Ca/Cc concept applied to compression of peat, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 118 (8), 1256-1263, **1992**.

[50] MacFarlane, I.C., *Engineering characteristics of peat*, Muskeg Engineering Handbook, Ottawa, Canada, 3-30, **1969**.

[51] Casagrande, L., Construction of embankments across paety soils, *Journal of Boston Society for Civil Engineers*, 53 (3), 272-317, **1966**.

[52] Lewis, W.A., The settlement of the approcah embankments to a new road bridge at Lockford, West Suffolk, *Geotechniques*, 6 (3), 106-114, **1956**.

[53] Olson, R. E., Mesri, G., Mechanisms controlling compressibility of clays, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 96, 1863-1878, **1970**.

[54] Mesri, G., Stark, T.D., Ajlouni, M.A., Chen, C.S., Secondary compression of peat with or without surcharging, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 411-421, **1997**.

[55] Gofar, N., *Determination of coefficient of rate of horizontal consolidation of peat soil*, Master Dissertation, Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia, 36-172, **2006**.

[56] Lefebre, G., Langlois, P., Lupien, C., Lavallée, J.G., Laboratory testing and in-situ behavior of peat as embankment foundation, *Canadian Geotechnical Journal*, 21(2), 101-108, **1984**.

[57] Robinson, R. G., Determination of Radial Coefficient of Consolidation by the Inflection Point Method, *Geotechnique*, 47(5), 1079-1081, **1997**

[58] Azari, B., Fatahi, B., Khabbaz, H., Application of Creep Ratio Concept for Estimating Post-Constriction Settlement of Deep Soft Clay Deposits, *International Conference on Advances in Geotechnical Engineering*, Perth, Australia, Nov.7-9, **2011**.

[59] Leonards, G.A., Girault, P., A Study of The One-dimensional Consolidation Test: *In Proceedings of 9th ICSMFE*, Paris, 1, 116-130, **1961**.

[60] Robinson, R.G., A Study on the Beginning of Secondary Compression of Soils, *Journal of Testing and Evaluation*, 31(5), 1-10, **2003**.

[61] Forrest, J.B., MacFarlane, I.C., Field studies of response of peat to plate loading, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 95 (SM4), paper 6652, 949-967, **1969**.

[62] Fox, J.P., Edil, T.B., Effects of stress and temperature on secondary compression of peat*, Canadian Geotechnical Journal*, 33, 405-415, **1996**.

[63] Mesri, G., Godlewski, P.M., Time- and Stress-Compressibility Interrelationship, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 103, 417-430, **1977**.

[64] Mesri, G., Castro, A., The Cα/Cc concept and Ko during secondary compression*, Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 112(3), 230–247, **1987**.

[65] Price, J. S., Cagampan, J., Kellner, E., Assessment of peat compressibility: is there an easy way?, *Hydrologycal Process*, 19, 3469-3475, **2005**.

[66] Masawi, A.W., Effects of organic content on consolidation parameters of peat soils, **2004,**

[67] Duraisamy, Y., Bujang, B.K., Aziz A.A., Engineering propertis and compressibility behavior of tropical peat soils, *American Journal of Applied Sciences*, 4(10), 768-763, **2007**.

[68] Petrone, R.M., Devito, K.J., Silins, U., Mendoza, C., Brown, S.C., Kaufman, S.C., Price, J.S., Transient peat properties in two pond-peatland complexes in the sub-humid Western Boreal Plain, Canada. *Mires and Peat*, Vol. 3. Article 05., 1-13, **2008**.

[69] Price, J.S., The role and character of seasonal peat soil deformation on the hydrology of undisturbed and cutover peatlands*, Water Resource Research*, 39(9), 1241, **2003**.

[70] Roulet, N. T., Water table and peat surface level fluctuations in a subarctic fen. *Arctic and Alpine Research,* 23, 303-310, **1991**.

[71] MacCulloch, F., *Guidelines for the risk management of peat slips on the construction of low volume/low cost roads over peat*, EU Project, Roadex II Northern Periphery Manual, Scotland, **2006**.

[72] Hanzawa, H., Kishidfa, T., Fukasawa, T., A case study of the application of direct shear and cone penetration tests to soil investigation, design and quality control for peaty soils*, Soils and Foundation Engineering*, 34 (4), 13-22, **1994**.

[73] Cola, S., Cortelazzo, G., The shear strength behavior of two peaty soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, 23, 679-695, **2005**.

[74] Hausmann, M.R., Strength of reinforced soil: *In Proceedings of Australian Road Research Board*, Vol. 8, 1-8, **1976**.

[75] Hausman, M.R., Lee, K.L., Strength characteristics of reinforced soil: *In Proceedings of International Symposium: New Horizons in Construction Materials,* Lehigh University, **1976**.

[76] Long, M., Review of peat strength, peat characterization and constitutive modeling of peat with reference to landslides, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 27(3-4), 67-90, **2005**.

[77] Brinkgreve, R.J., Vermeer, P.A., Vos, E., *Constitutive aspects of an embankment widening project, International workshop on advances in understanding and modeling the mechanical behaviour of peat*, Delft, June 1993, Den Haan et al. (eds.), Balkema, Rotterdam, **1994**.

[78] Topolnicki, M., Niemunis A., *Numerical simulation of stress-strain behaviour of peat for biaxial deformations of peat*, Int. workshop on advances in understanding and modelling the mechanical behaviour of peat, Delft, Den Haan et al. (eds.), Balkema, Rotterdam, **1994**.

[79] Sellmeijer, J.B., *Anisotropic peat model, International workshop on advances in understanding and modelling the mechanical behaviour of peat*, Delft, June 1993, Den Haan et al. (eds.), Balkema, Rotterdam, **1994**.

[80] Singh, H., Bahia, H., Huat, B.B.K., Varying perspective on peat, it's occurence in Sarawak and some geotechnical properties, In: *Proceedings of Conference on Recent Advances in Soft Soil Engineering and Tech*nology, 2-4 July, 2003, Sibu, Sarawak, Malaysia, **2003**.

[81] Boylan, N., Long, M., *Characterization of peat using full flow penetrometers*, Soft Soil Engineering, Chan and Law (eds.), Taylor and Francis Group, London, 403-414, **2007**.

[82] Seed, H.B., Idriss, I.M., Analyses of ground motions at Union Bay, Seattle, during earthquakes and distant nuclear blasts, *Bull. Seismological Soc. of Arnerica,* 60(1), 125-136, **1970**.

[83] Kramer, S.L., *Seismic response: Foundations in soft soils*, Final Res. Rep. WA-RD 254.1, Washington State Transp. Ctr., Univ. of Washington, Seattle, Washington, **1993**.

[84] Stokoe II, K.H., Wright, G.W., James, A.B., Jose, M.R., *Characterization of geotechnical sites by SASW method, in Geophysical characterization of sites*, ISSMFE Technical Committee #10, edited by R. D. Woods, Oxford Publishers, New Delhi, **1994**.

[85] Vucetic, M, Dobry, R., Effect of soil plasticity on cyclic response, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 117 (1), 89-107, **1991**.

[86] Boulanger, R.W., Arulnathan, R., Harder, L.F., Torres, R.A., Driller, M., Dynamic Properties Of Sherman Island Peat*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(1), January, **1998**.

[87] Arulnathan, R., Boulanger, R.W., Seed, M.I., Site response of organic soils. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Recent Advances in geotechnical Engineering and Soil Dynamics*, San Diego, California, USA, Paper No. 1.07, **2001**.

[88] Schnabel, P.B., Lysmer, J., Seed, H.B., *SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally-layered sites,* Report No. EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, Berkeley, CA, **1972**.

[89] Moreno, C.A., Rodriguez, E.E., Dynamic Behaviour of Bogota's Subsoil Peat and It's Effect in Seismic Wave Propagation: *In Proceedings of 13th World Conference on Eartquake Engineering*, Vancouver, B. C., Canada, August 1-6, **2004**.

[90] Anggraini, V., *Shear Strength Improvement Of Peat Soil Due To Consolidation*, PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia, **2006**.

[91] Boylan, N., Jennings, P., Long, M., Peat slope failure in Ireland, *Quartely Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 41, 93-108, **2008**.

[92] Samson, L., La Rochelle, P., Design and performace of an expressway constructed over peat by preloading*, Canadian Geotechnical Journal*, 9, 447-466, **1972**.

[93] www.kayser.com.tr, **2015**.

[94] www.google.com, **2015**.

[95] www.kayserikulturturizm.gov.tr, **2015**.

[96] Dönmez, M., Akçay, A.E., Kara, H., Türkecan, A., Yergök, A.F., Esentürk, K., *Orta Anadolu'da Aksaray ve civarını kapsayan jeoloji raporu*, MTA Raporu, No:52, Ankara, **2005**.

[97] Doğan, A., Bulut, İ., Karaçam, A., *Kayseri ili yakın çevresinin diri fayları ve deprem tehlike değerlendirmes*i, İller Bankası Genel Müdürlüğü Raporu, Ankara, **2008.**

[98] Göncüoğlu, M.C., Dirik, K., Yalnız, K., *Orta Anadolu Masifinin Sivas baseni ile ilişkisi, Orta Anadolu Masifinin doğu bölümünün jeolojisi*, ODTÜ, Ağustos, **1994.**

[99] Güner, Y., Emre, Ö., Baş, H., *Erciyes Yanardağı'nın Jeolojisi ve Jeomorfolojisi,* Temel Araştırmalar Dairesi, MTA, Ankara, **1984**.

[100] Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, S., Şaroğlu, F., Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara, **2013**.

[101] Şaroğlu, F., Emre, Ö., Boray, A., *Türkiye'nin diri fayları*, MTA Genel Müdürlüğü Raporu, Ankara, **1987**.

[102] T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, *Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası Hakkında Açıklamalar*, Ankara, **1996**.

[103] Pınar, N., Lahn, E., *Türkiye Depremleri İzahlı Kataloğu,* T.C. Bayındırlık Bakanlığı Yapı ve İmar İşleri Reisliği Yayınları Seri: 6, Sayı:36, Ankara, **1952**.

[104] Soysal, H., Sipahioğlu, S., Kolçak, D., Altınok, Y., Türkiye ve çevresinin tarihsel deprem kataloğu, *İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü*, İstanbul, **1981**.

[105] Ergin, K., Güçlü, Ü., Uz, Z., Türkiye ve civarının deprem kataloğu (M.S.11 1964), *İTÜ Arz Fiziği Enst. Yay., 28, 74 s.*, **1962**.

[106] Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Kataloğu,http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-verileri/deprem-katalogu/,(Aralık, **2015**).

[107] Yada Jeolojik-Jeoteknik Limited Şirketi, *Kayseri Serbset Bölge Alanına Ait Jeolojik-Jeoteknik Zemin Etüdü ve Zemin Islahı Etüd Raporu*, Ankara, 1998.

[108] Nokta Aktaş Mühendislik-Mimarlık Ltd. Şti., *Kayseri 1. Organize Sanayi Bölgesi genişleme alanına ait 7228 parsele esas jeoteknik zemin etüt raporu*, Kayseri, **2004**.

[109] Nokta Aktaş Mühendislik-Mimarlık Ltd. Şti., *Kayseri 1. Organize Sanayi Bölgesi genişleme alanına ait 7046 parsele esas jeoteknik zemin etüt raporu,* Kayseri, **2004**.

[110] Nokta Mühendislik-Mimarlık Ltd. Şti., *Kayseri 1. Organize Sanayi Bölgesi OBS 7549 parsele esas jeoteknik zemin etüt raporu,* Kayseri, **2007**.

[111] Başokur, A.T., Ulusay, R., Dikmen, Ü., Akça, T., Gündoğdu, Y., *Çoklu jeofizik veri kümeleri ile yeraltı su içeriğinin saptanması ve jeoteknik uygulamaları*, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Sonuç Raporu, Proje No 1186055001, **2014**.

[112] ASTM, *Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation*, D6431, **2010**.

[113] ASTM, *Annual Book of ASTM Standards-Soil and Rock, Building Stones, Section-4, Construction, V. 04.08*, ASTM Publication, Philadelphia, USA, **2000**.

[114] Edil, T.B., Dhowian, A.W., At-rest lateral pressure of peat soils: *In Proc. Conf. Sediment. Consolidation Model*, ASCE, San Fransisco, 411-424, **1981**.

[115] Landva, A.O., La Rochelle, P., Compressibility and shear characteristics of Radford peat, *Testing of Peat and Organic Soils*, ASTM, STP, 820,157-191, **1983**.

[116] Ishimoto, M., Lida, K., Determination of elastic constants of soils by means of vibration methods. Part 2. Modulus of rigidity and Poisson's ratio. Bulletin Earthquake Research Institute, Tokyo, 15:67-85, **1937**.

[117] Scheer, P., K., Implementation of resonant column/torsional shear testing apparatus, MSc Thesis, Dept. Of Civil Eng., North Carolina State Univ., USA, **1992**.

[118] LoPresti, D.C.F., Pallara, O., Lancellotta, R., Armandi, M., Maniscalco, R., Monotonic and cyclic loading behavior of two sands at small strains, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 16(4), 409-424, **1993**.

[119] Ülker, M.B.C., *Siltli ve Killi Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altında Davranışı, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, **2004**.

[120] Stokoe, K. H. II, Bay, J. A., Rosenblad, B. L., Hwang, S.-K., Twede M.R., In situ seismic and dynamic laboratory measurements of geotechnical materials at Queensboro Bridge and Roosevelt Island, *Geotech. Engrg. Rep. GR94-.5, Cir. Engrg. Dept., Univ. of Texas at Austin*, **1996**.

[121] Isenhower, W. M., Torsional simple shear/resonant column properties of San Francisco Bay Mud, MSc Thesis, The Univ. Of Texas at Austin, USA, 307 pp., **1979**.

[122] Candler, C.J., Chartres, F.R.D., Settlement and Analysis of Three Trial Embankments on Soft Peaty Ground, *Proc. 2nd Baltic Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tallinn, USSR, 1:268-272, **1988**.

[123] Sing, W.L., Hashim, R., Ali, F.H., Compression rates of untreated and stabilized peat soils, *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 13.Bundle F: 13, **2008**.

[124] Gofar, N., Sutejo, Y., Long term compression behavior of fibrous peat. Malaysian Journal of Civil Engineering 19(2), 104-116, **2007**.

[125] Rocscience, Phase2 v7.0-Finite element analysis for excavation, *Rockscience Inc.*, Toronto, Canada, **2010**.

[126] Cernica, J. N., *Geotechnical Engineering: Foundation Design*, New York: John Wiley & Sons,Inc., **1995**

[127] Mesri, G., Stark, T. D., Ajlouni, M. A., Chen, C. S., Secondary compression of peat with or without surcharging, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 411-421, **1997**.

[128] Japan Road Association, *Specifications For Highway Bridges Part V: Seismic Design*, Maruzen, 317 pp, **2002.**

[129] Darendeli, M. B., *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*, PhD Thesis, University of Texas at Austin, **2001**.

[130] Özbey, C., Sarı, A., Manuel, L., Erdik, M., Fahjan, Y., An empirical attenuation relationship for Northwestern Turkey ground motion using a random effects approach, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 115–125, **2004**.

[131] Aydan, Ö., Kumsar, H., and Ulusay, R., How to infer the possible mechanism and characteristics of earthquakes from the striations and ground surface traces of existing faults, *Journal of the Japan Society for Civil Engineers*, 19 (2), 199-208, **2002**.

[132] The Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), Ground Motion Database, http://ngawest2.berkeley.edu/, (**Aralık, 2015**).

[133] Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Park, D., Tsai, C.C., Phillips, C.A., Groholski, D.R., *DEEPSOIL 6.0, 1-D Wave Propagation Analysis Program for Geotechnical Site Response Analysis of Deep Soil Deposites*, **2015**.

[134] Nikolaou, S., Gilsanz, R., Iliadelis, D., Pehlivan, M., Mahvashmohammedi, A., Saadat, S., Moretti, M., Sextos, A., Tsopelas, P., Learning from structural success rather than failure, *Structural Magazine*, **2015**.

[135] T. C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*, http://www.deprem.gov.tr, **2007**.

[136] Bisch, P., Carvalho, E., Degee, H., Fajfar, P., Fardis, M., Franchin, P., Kreslin, M. Pecker, A., Pinto, P., Plumier, A.,Somja, H., Tsionis, G., Worked examples presented at the Workshop “EC 8: Seismic Design of Buildings”, Lisbon, 10-11 Feb, **2011**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Nazlı TUNAR ÖZCAN
Doğum Yeri: Ankara
Medeni Hali: Evli
E-posta: ntunar@hacettepe.edu.tr
Adresi: Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Müh. Bölümü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı, 06800, Beytepe, Ankara

Eğitim

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü (2000 – 2006)
Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü (2006 – 2009)
Doktora: Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü (2009-2015)

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce (İyi)

İş Deneyimi

Aralık 2006 - : H. Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi

Deneyim Alanları

Mühendislik jeolojisi, kaya ve zemin mekaniği

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen 013 D12 602 001-425 numaralı “Kayseri Civarındaki Turba Zeminlerin Oturma Karakteristiklerinin İncelenmesi” başlıklı proje.
Proje bütçesi: 23900 TL

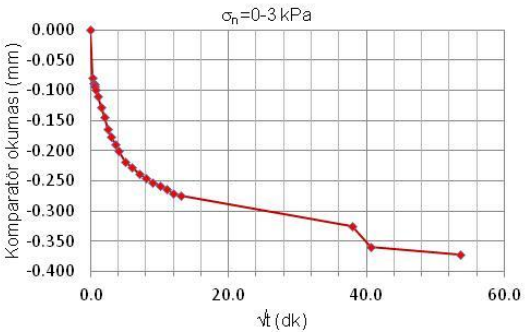
Tezden Üretilmiş Yayınlar

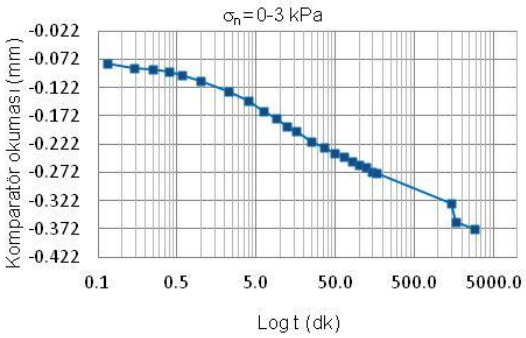
Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu İle Katıldığı Toplantılar

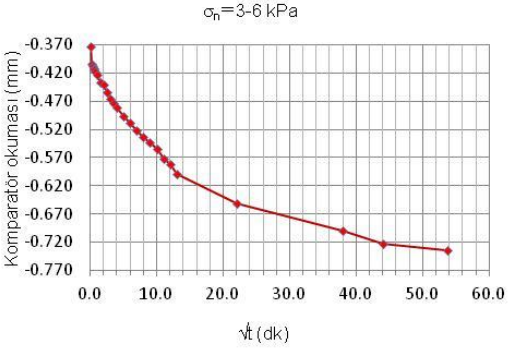
EK

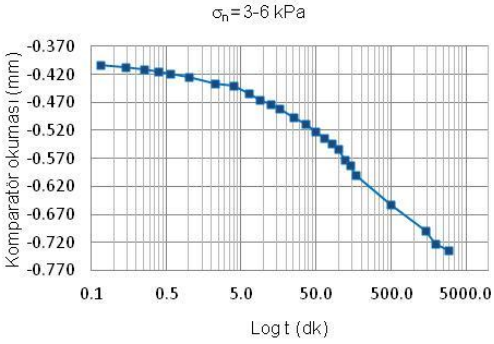
KONSOLİDASYON DENEYLERİNDEN ELDE EDİLEN "DEFORMASYON-KAREKÖK ZAMAN" VE "DEFORMASYON-LOGARİTMA ZAMAN" GRAFİKLERİ

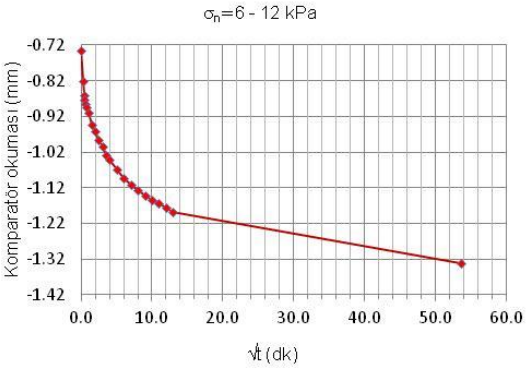
EK 1.1. SK3-UD1 no.'lu örnek için farklı gerilmeler altında "deformasyon-karekök zaman" ve "deformasyon-logaritma zaman" grafikleri.

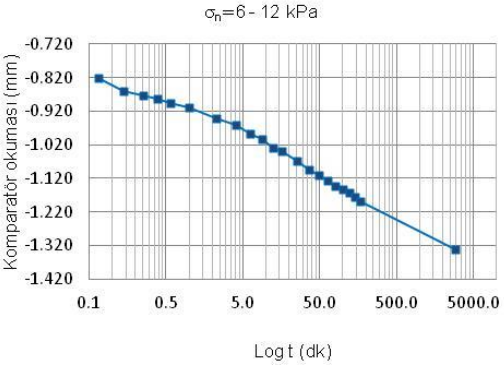


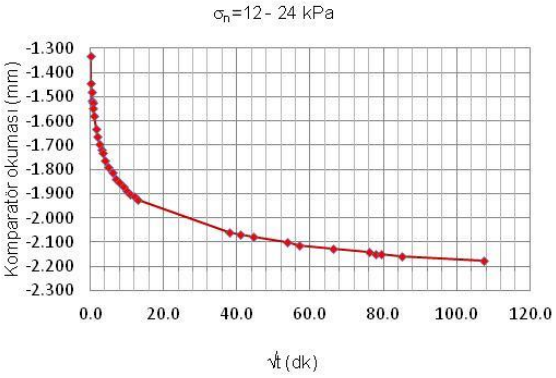


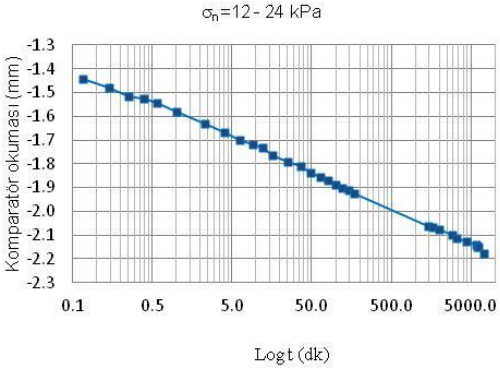




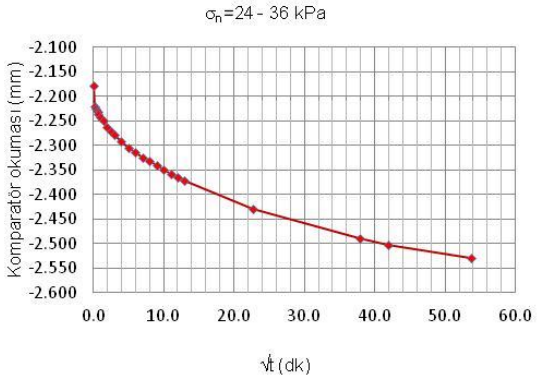


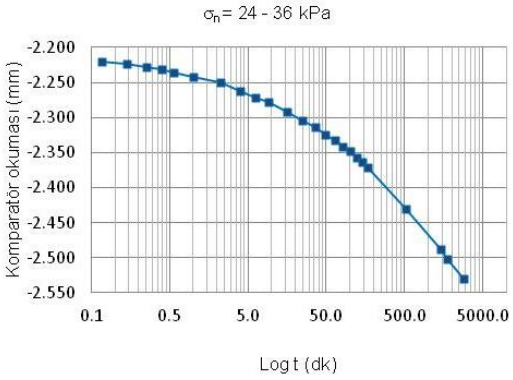


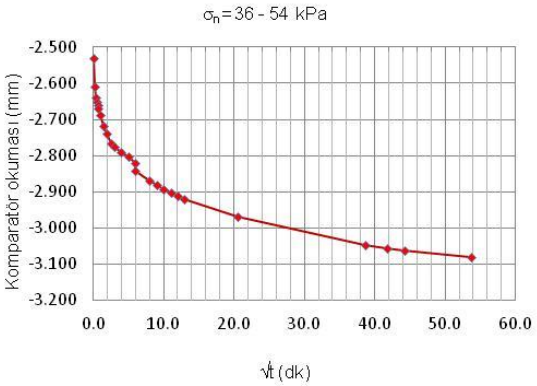


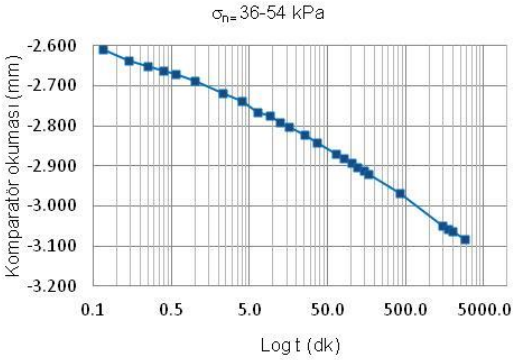


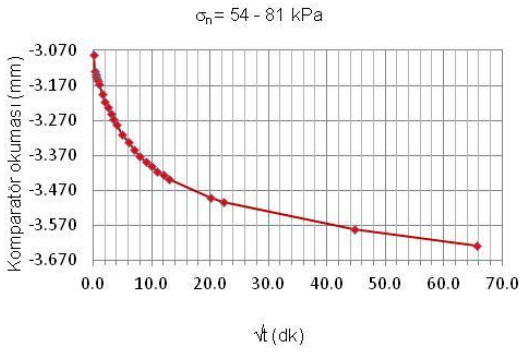
EK 1.1. (devam ediyor)

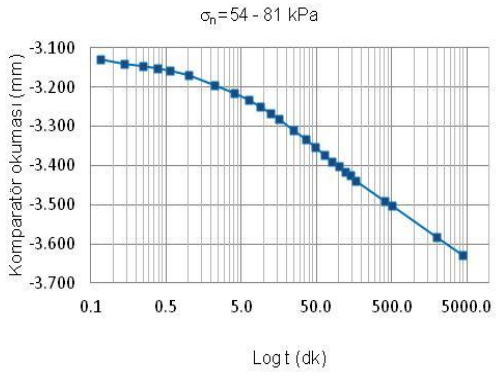


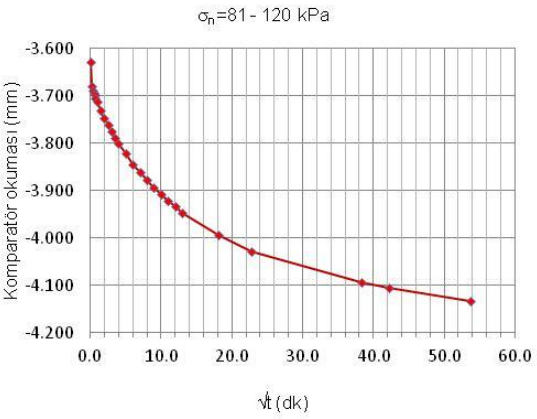


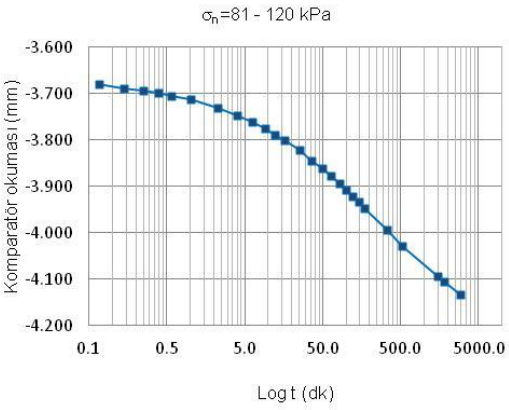




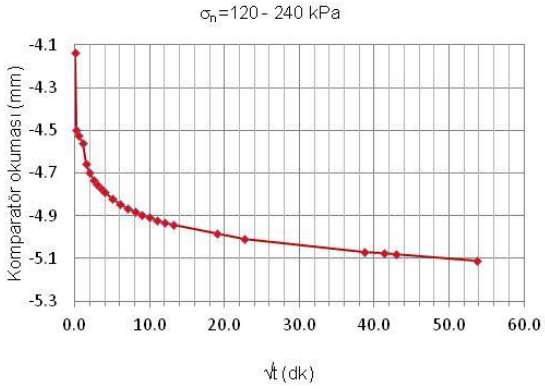


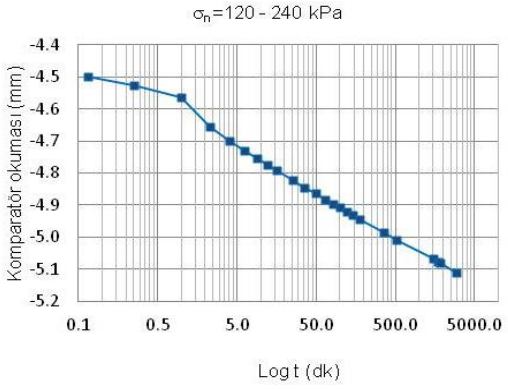


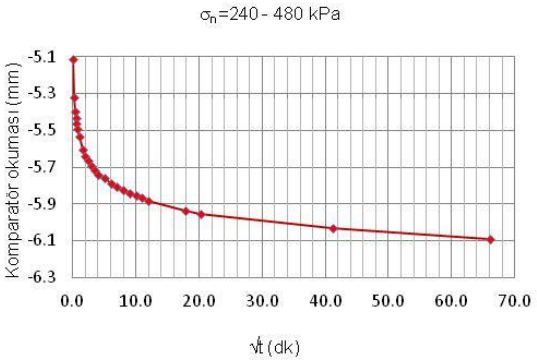


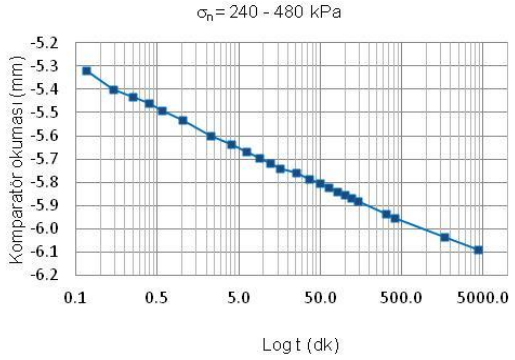


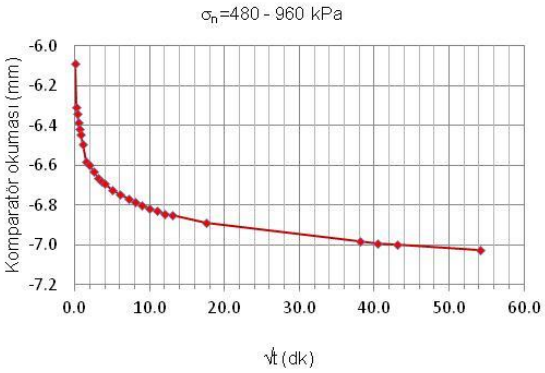
EK 1.1. (devam ediyor)

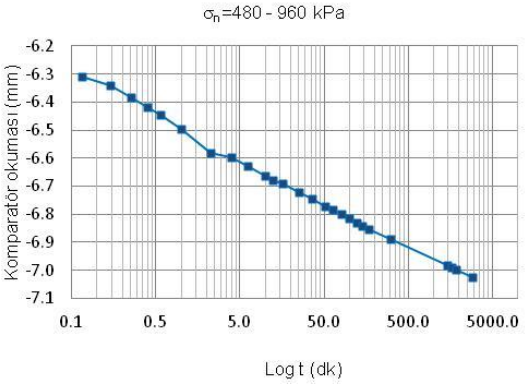


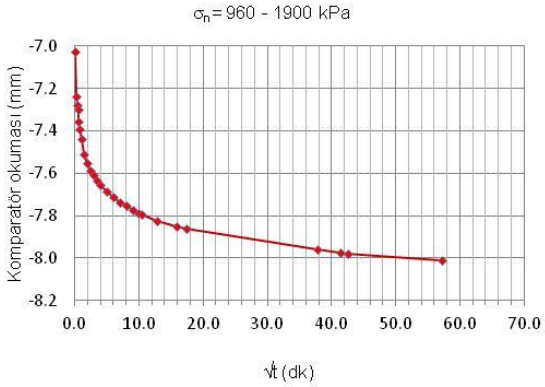


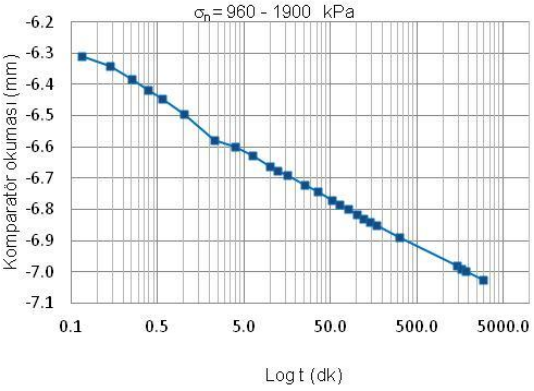




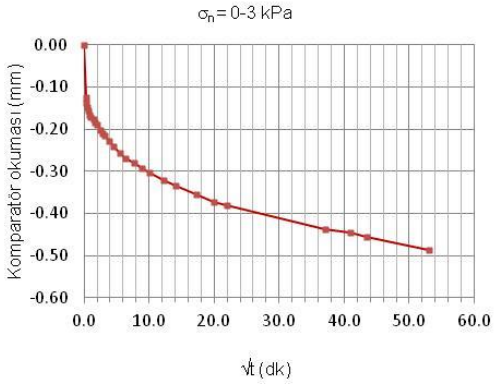


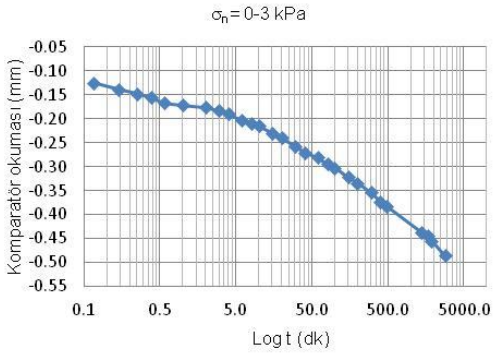


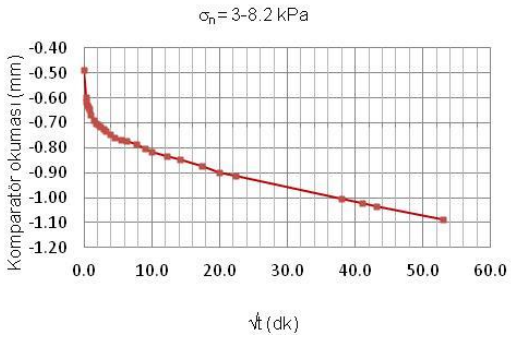


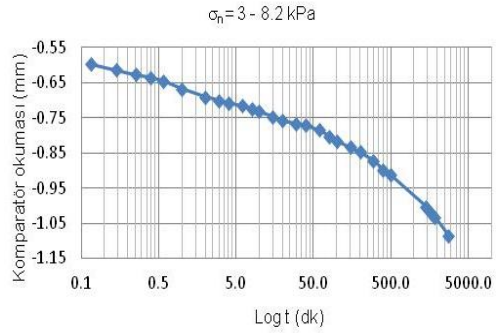


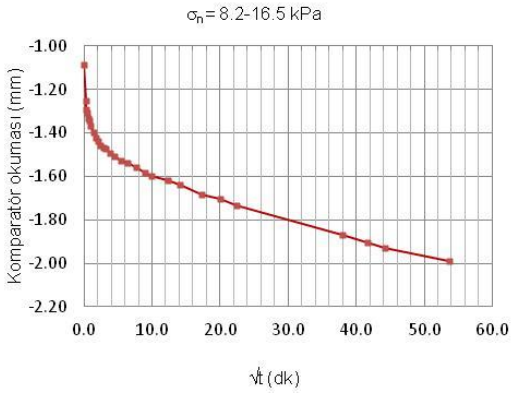
EK 1.2. SK3-UD2 no.'lu örnek için farklı gerilmeler altında "deformasyon-karekök zaman" ve "deformasyon-logaritma zaman" grafikleri.

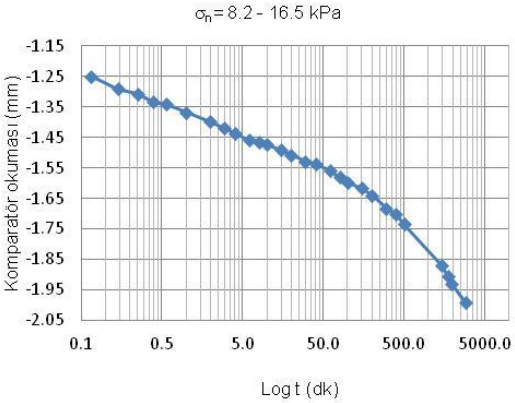


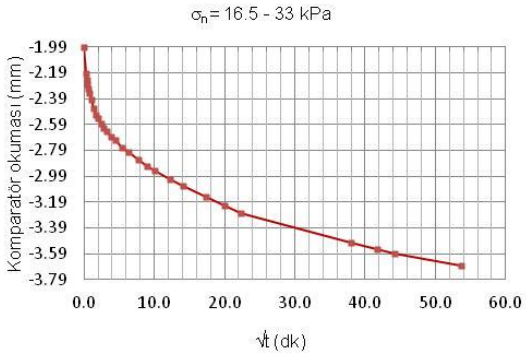


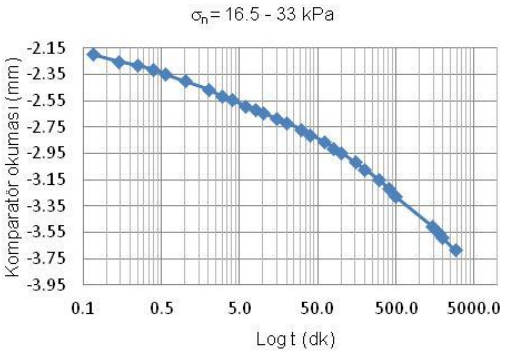




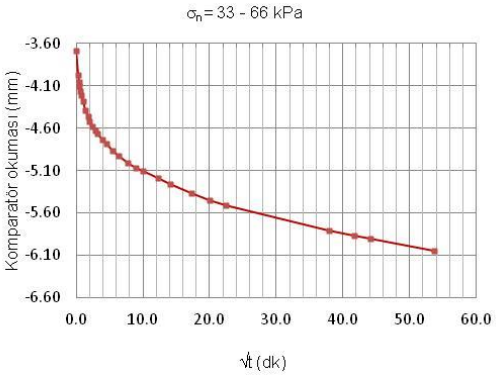


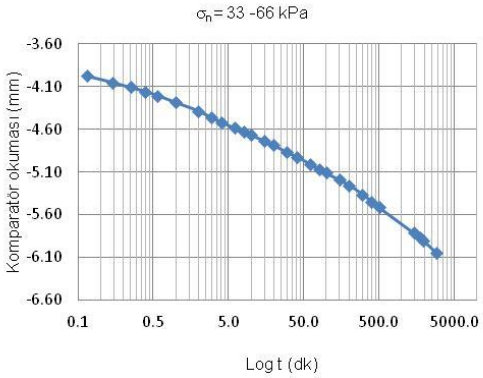


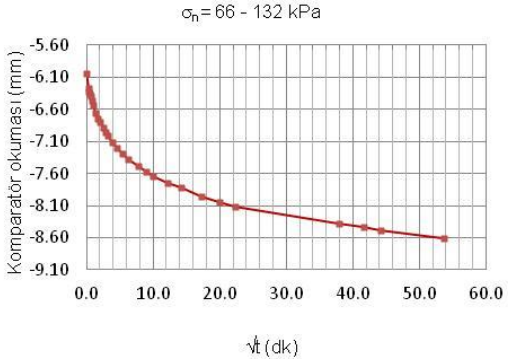


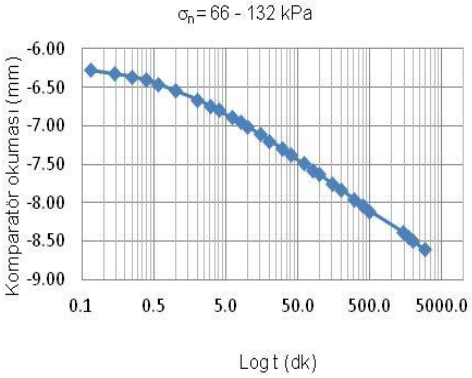


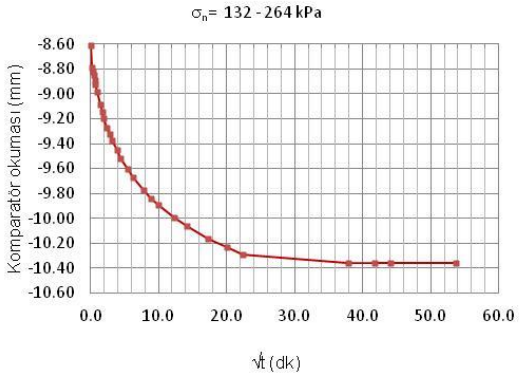
EK 1.2. (devam ediyor)

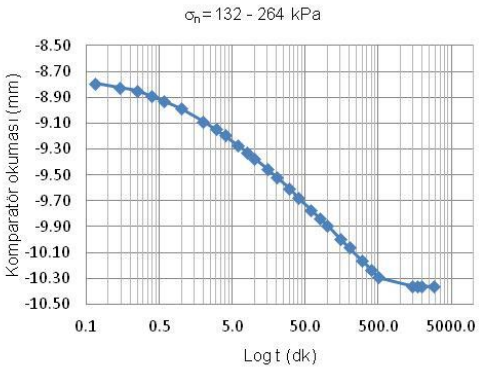




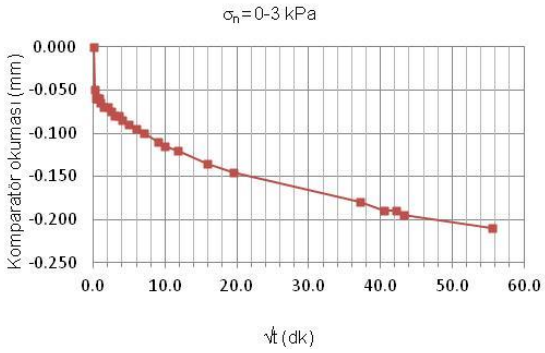


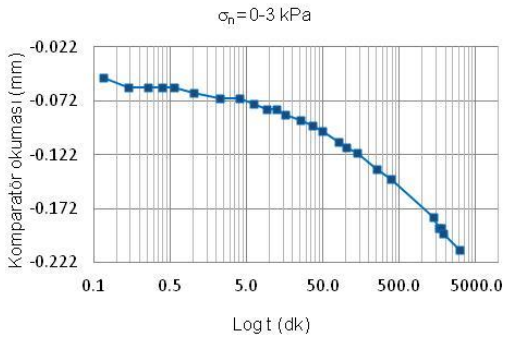


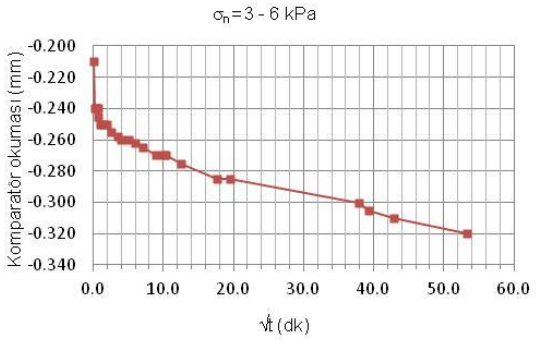


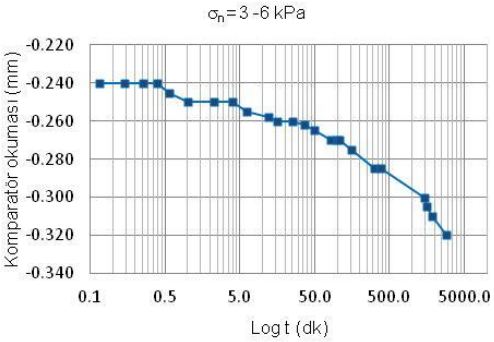


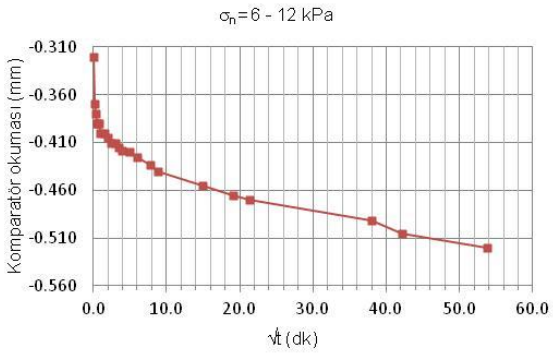
EK 1.3. SK3-UD3 no.'lu örnek için farklı gerilmeler altında "deformasyon-karekök zaman" ve "deformasyon-logaritma zaman" grafikleri.

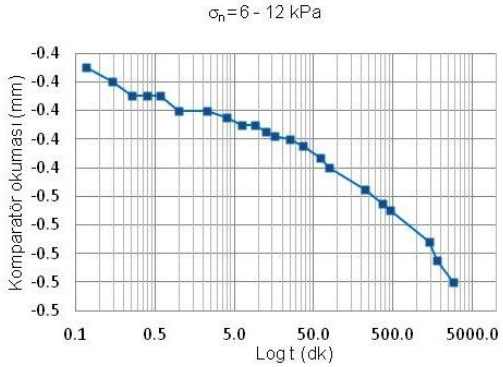


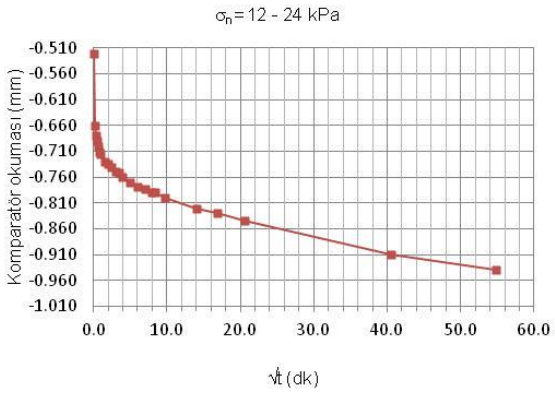


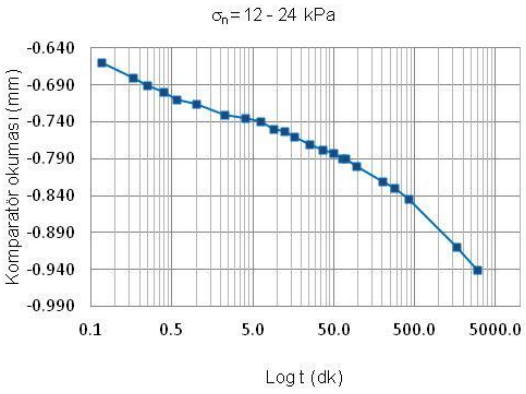




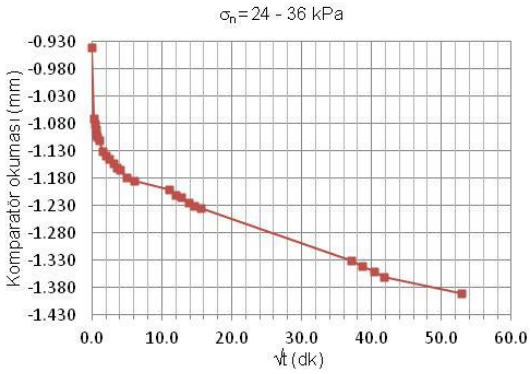


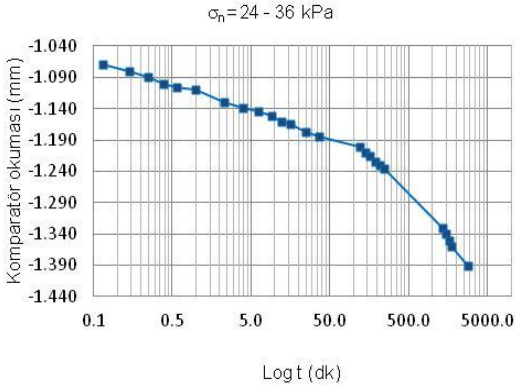


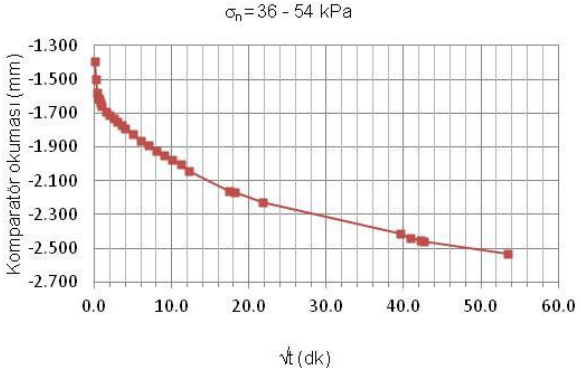


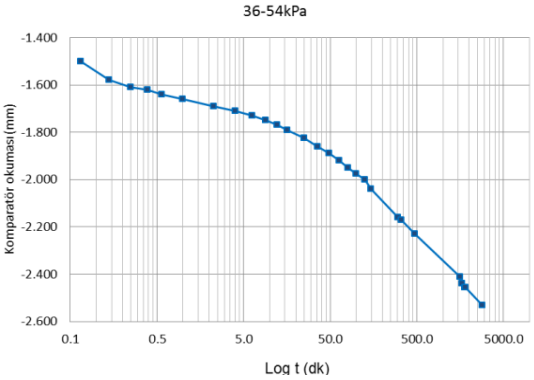


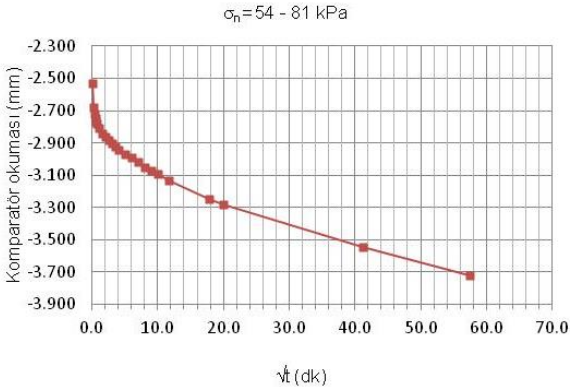
EK 1.3. (devam ediyor)

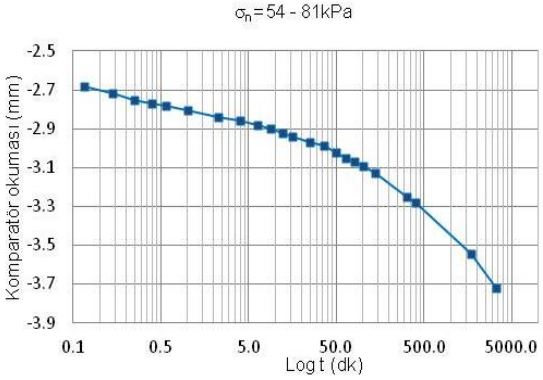


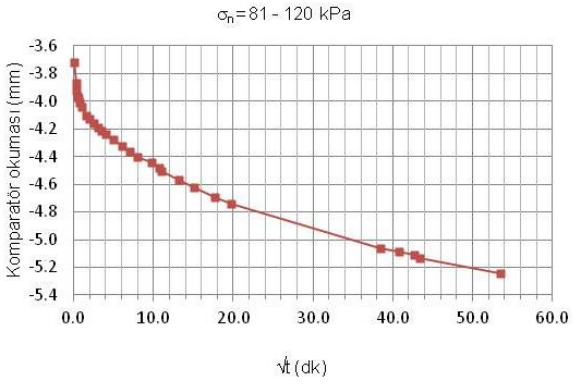


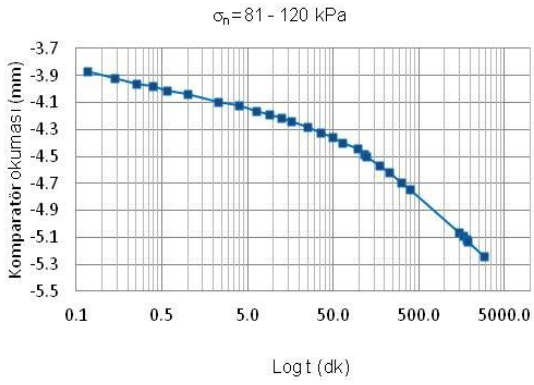




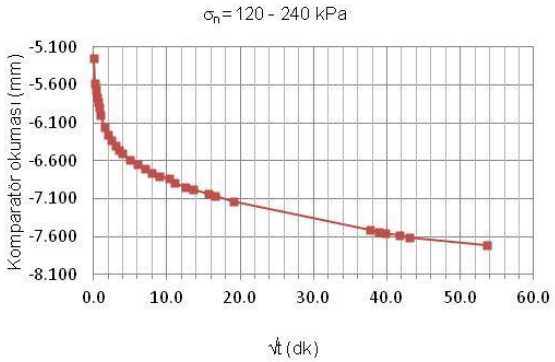


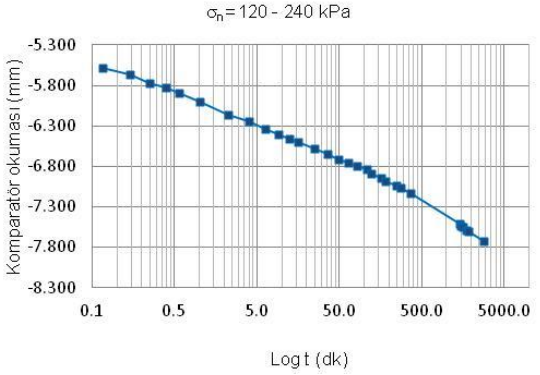


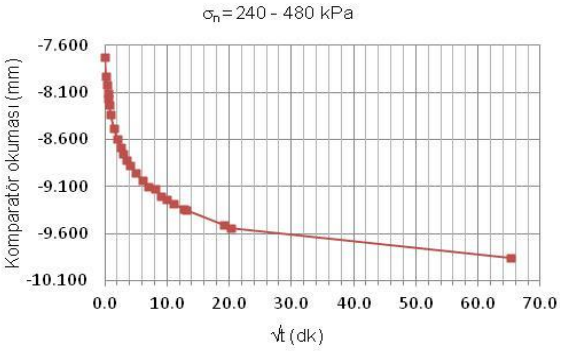


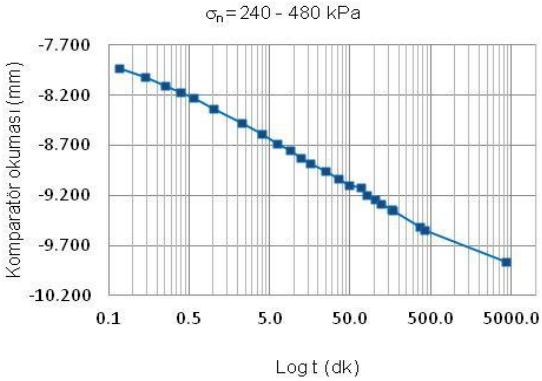


EK 1.3. (devam ediyor)

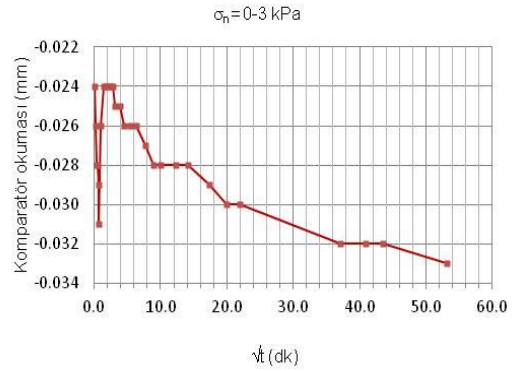


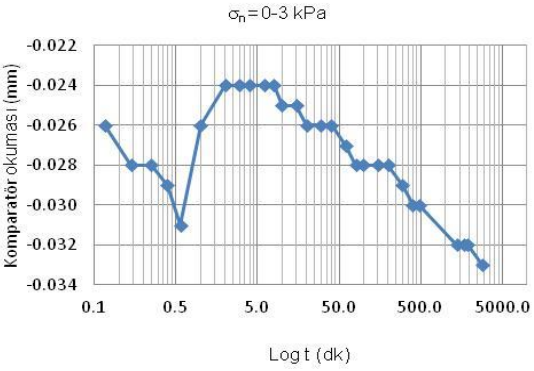


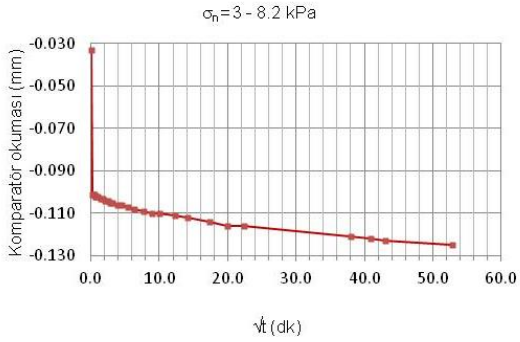


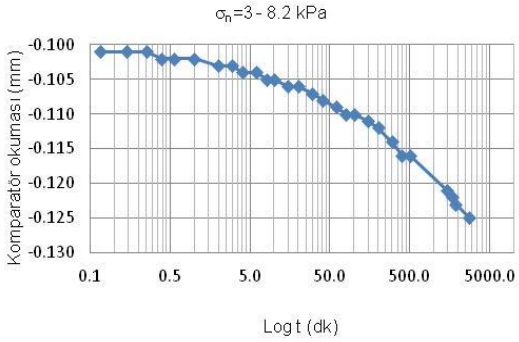


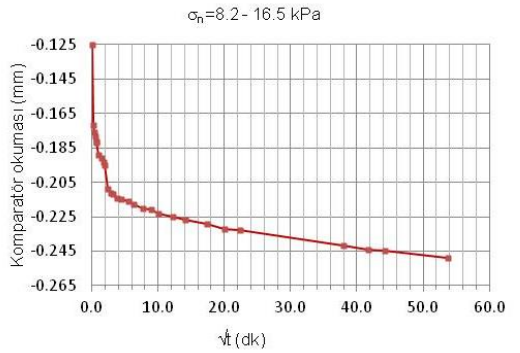
EK 1.4. SK3-UD4 no.'lu örnek için farklı gerilmeler altında "deformasyon-karekök zaman" ve "deformasyon-logaritma zaman" grafikleri.

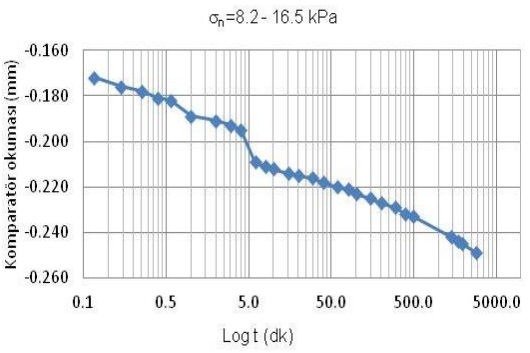


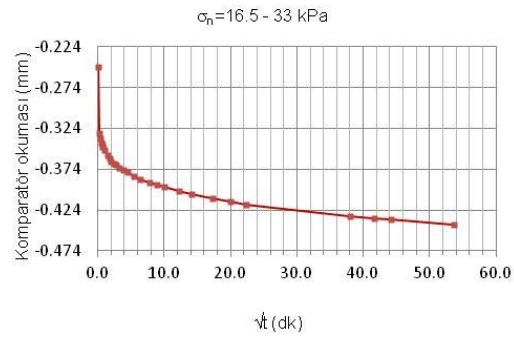


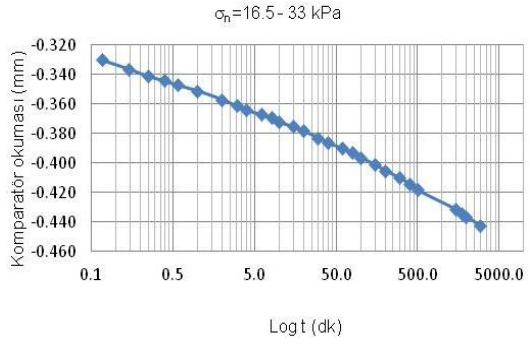




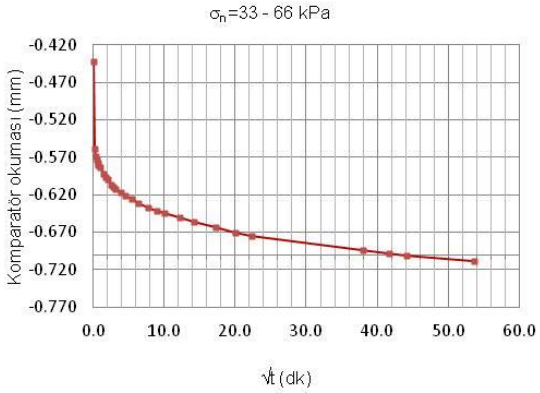


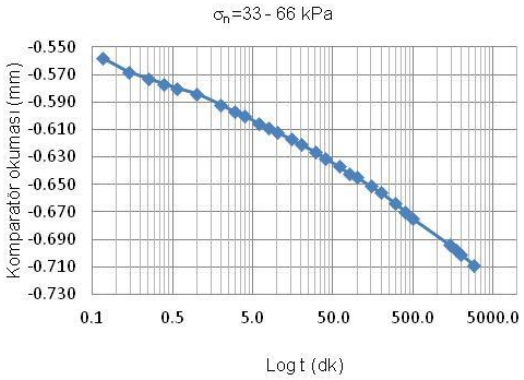


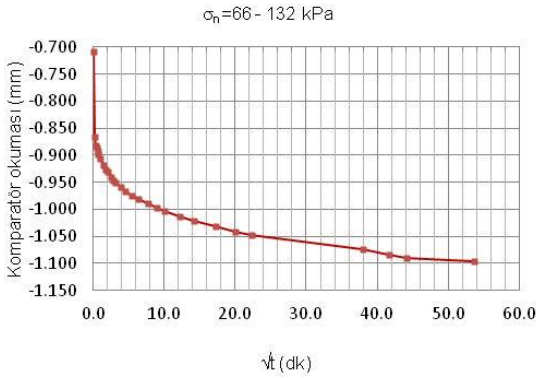


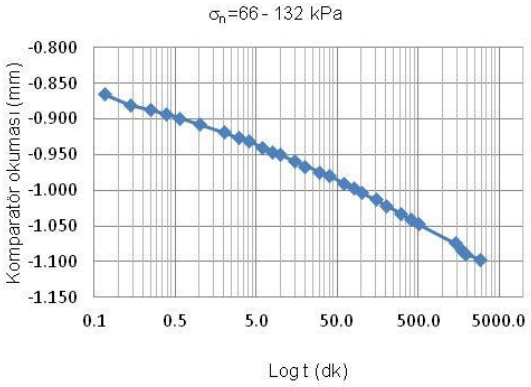


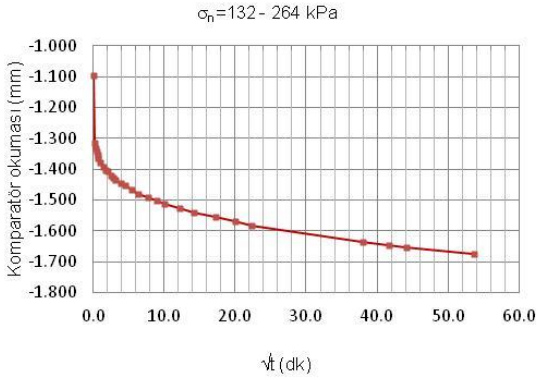
EK 1.4. (devam ediyor)

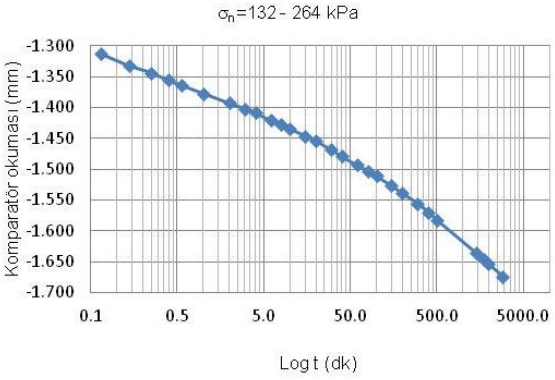


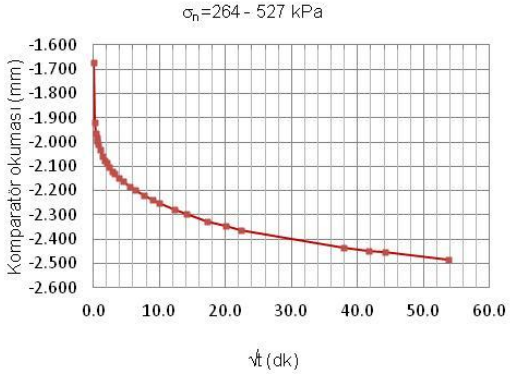


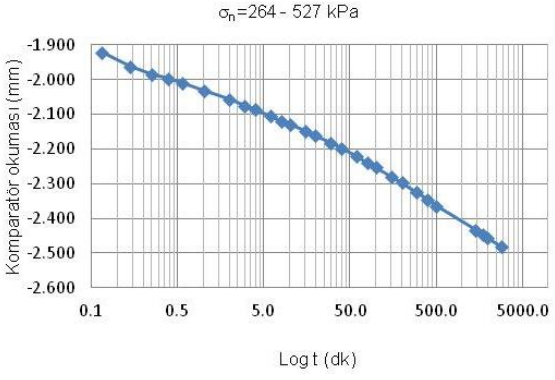




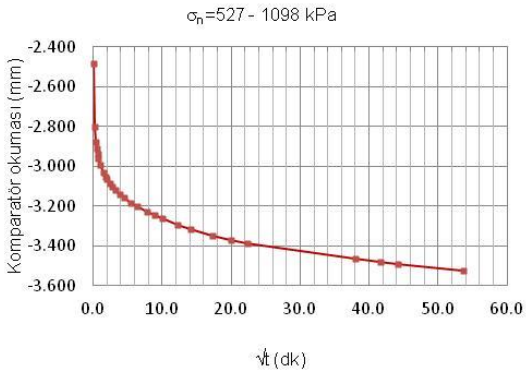


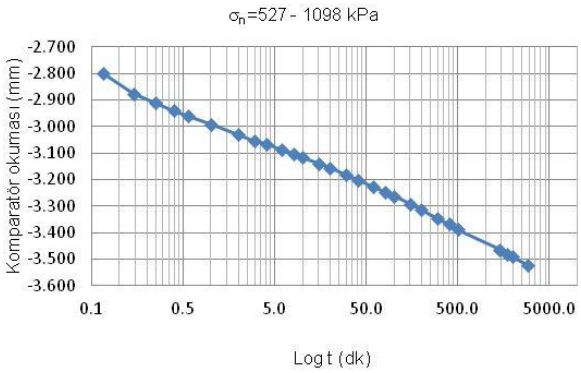




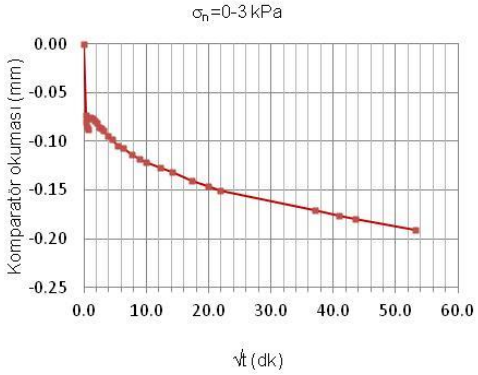


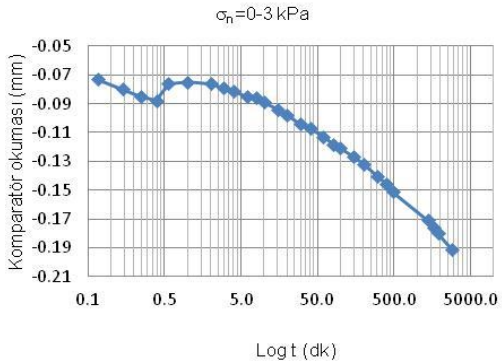
EK 1.4. (devam ediyor)

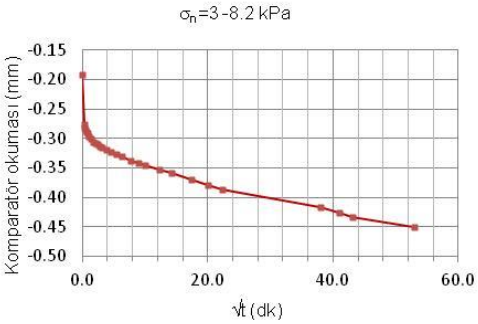


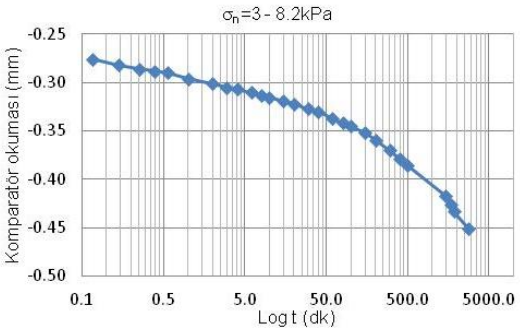


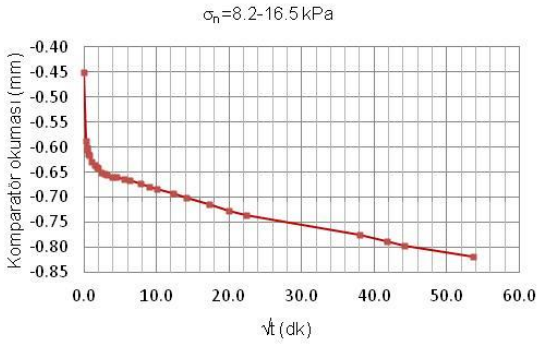
EK 1.5. SK4-UD1 no.'lu örnek için farklı gerilmeler altında "deformasyon-karekök zaman" ve "deformasyon-logaritma zaman" grafikleri.

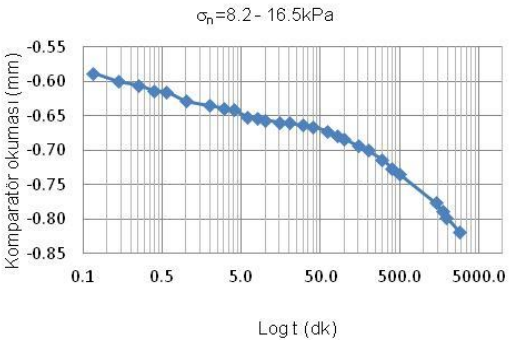


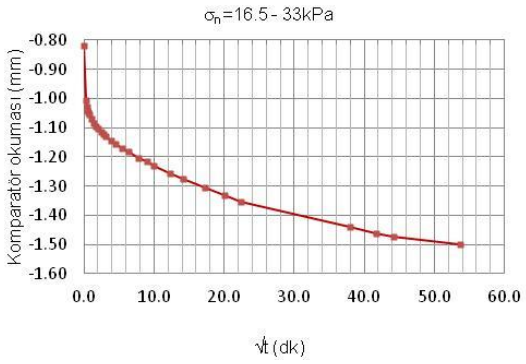


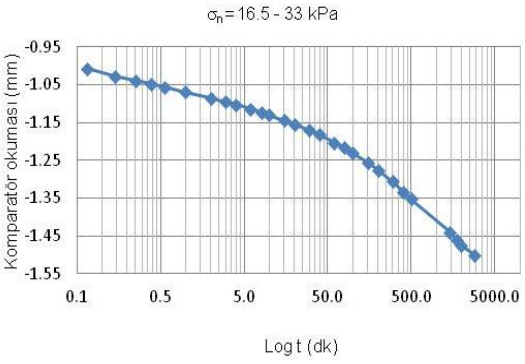




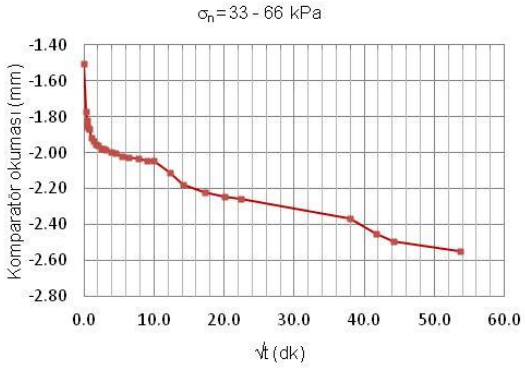


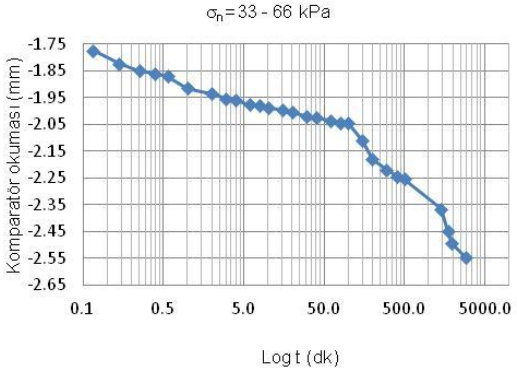


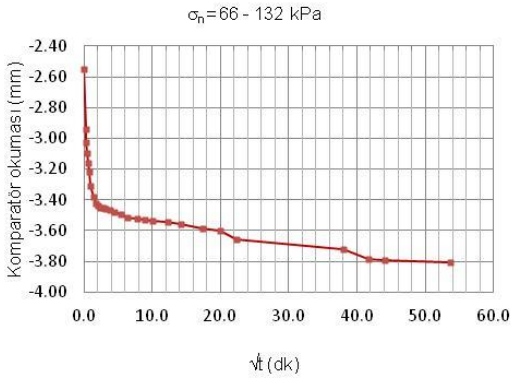


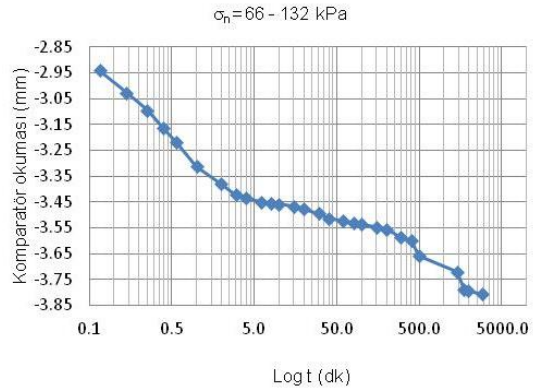


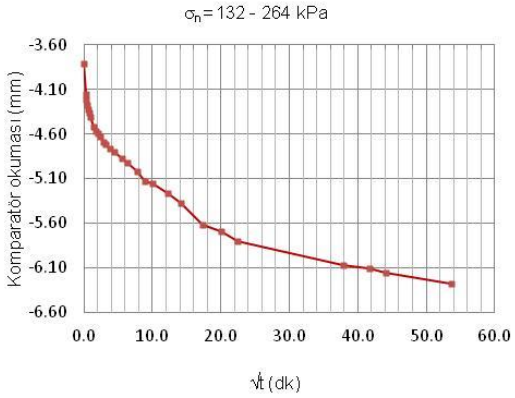
EK 1.5. (devam ediyor)

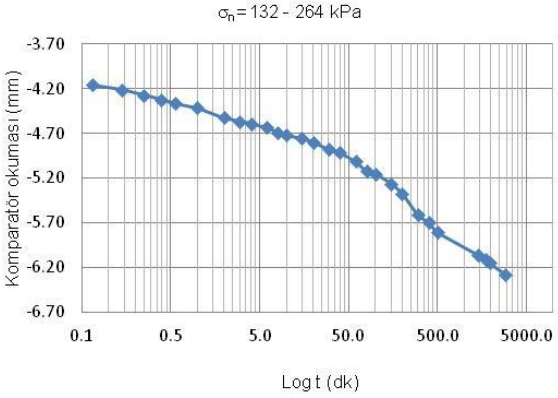


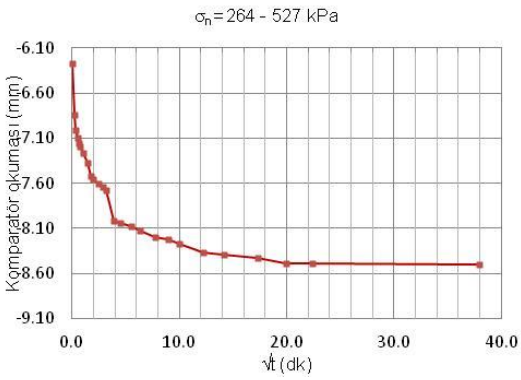


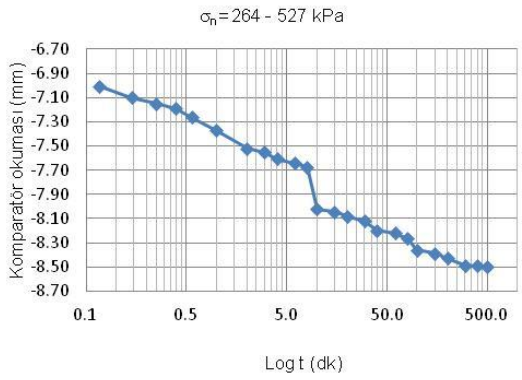




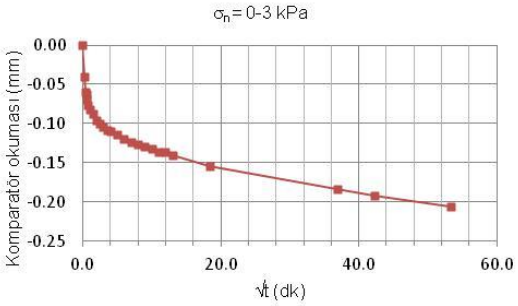


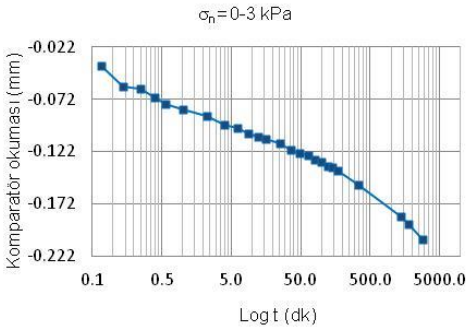


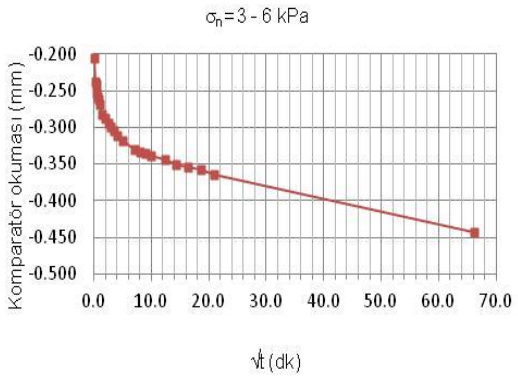


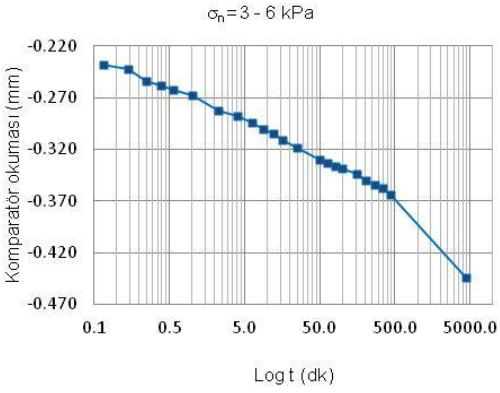


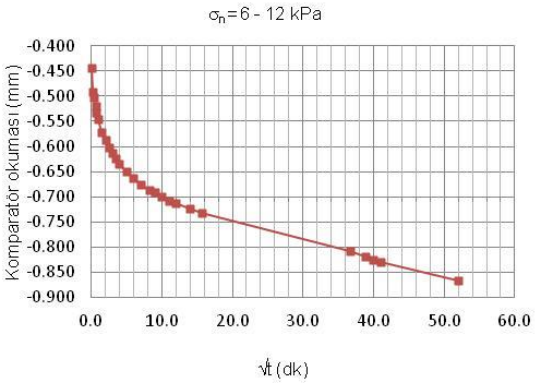
EK 1.6. SK4-UD2 no.'lu örnek için farklı gerilmeler altında "deformasyon-karekök zaman" ve "deformasyon-logaritma zaman" grafikleri.

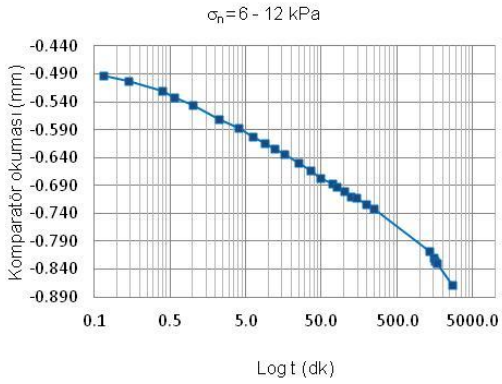


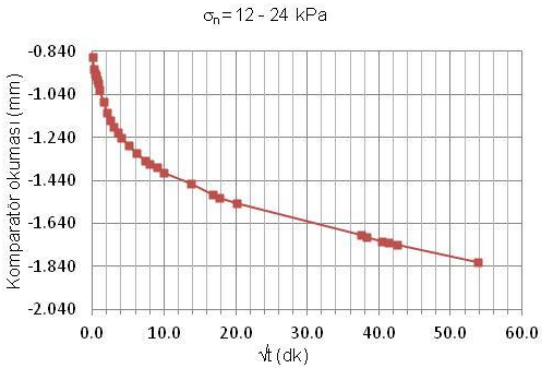


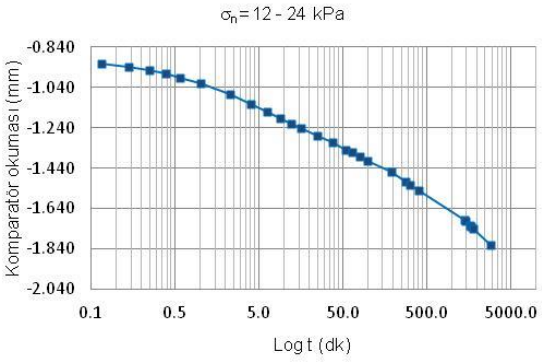




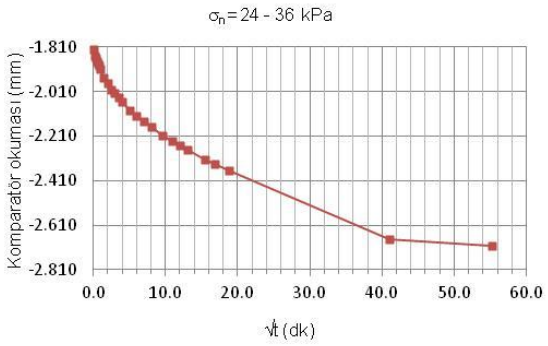


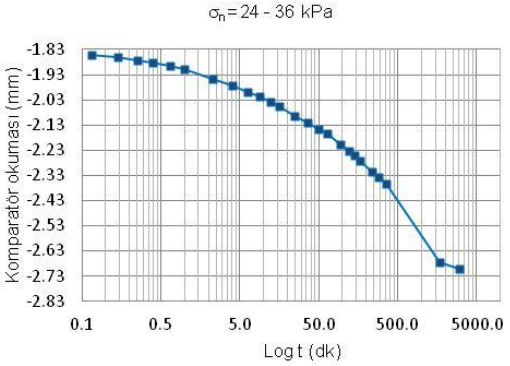


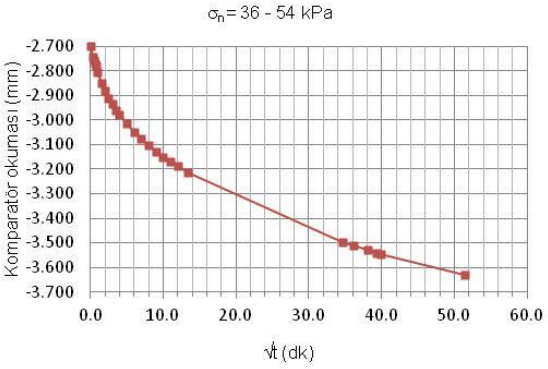


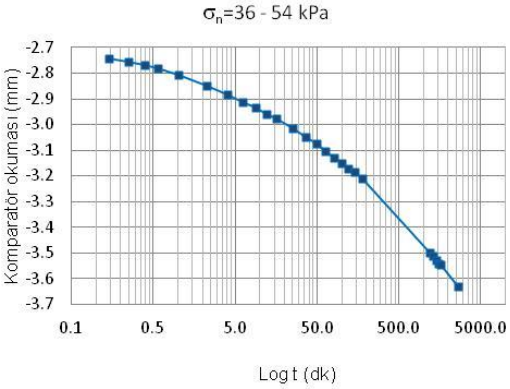


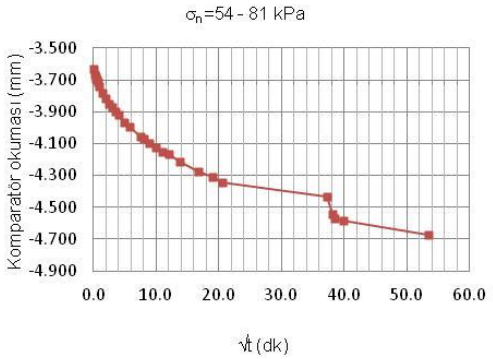
EK 1.6. (devam ediyor)

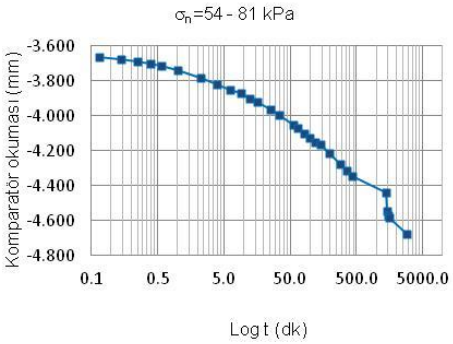


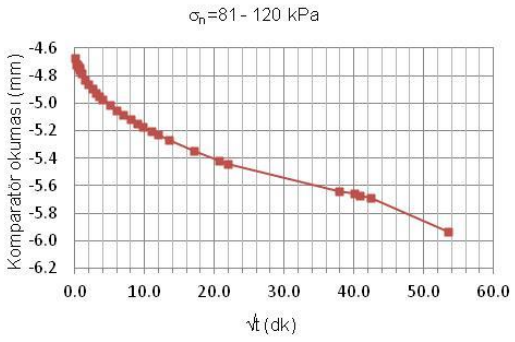


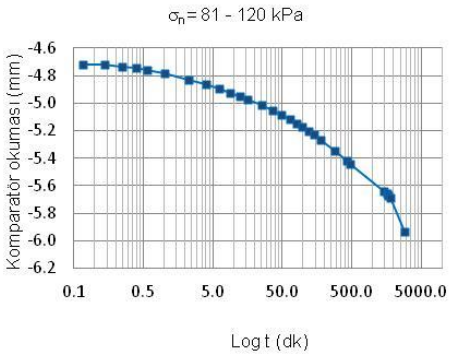




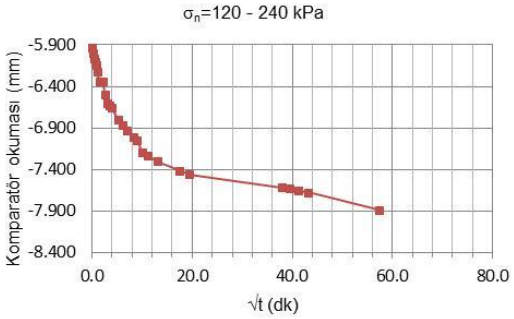


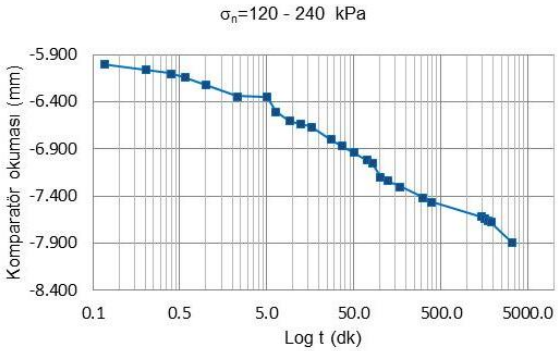


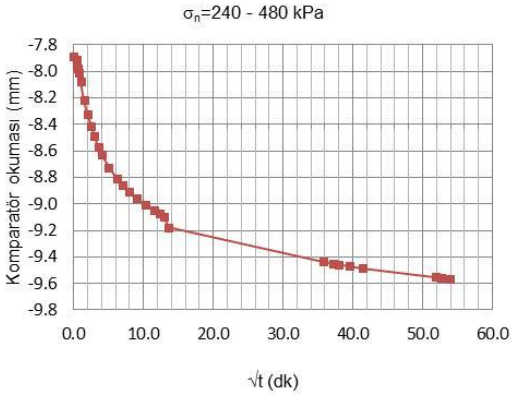


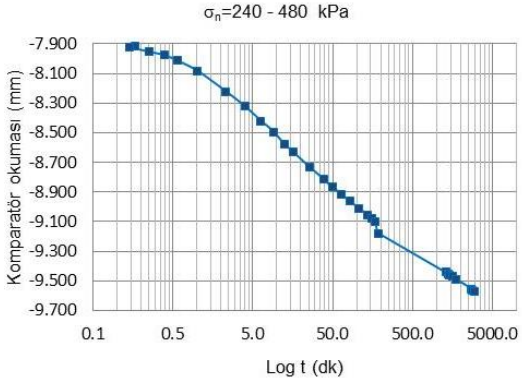


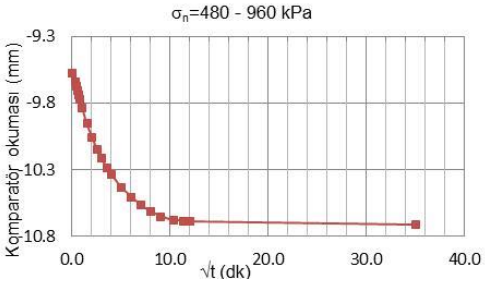
EK 1.6. (devam ediyor)

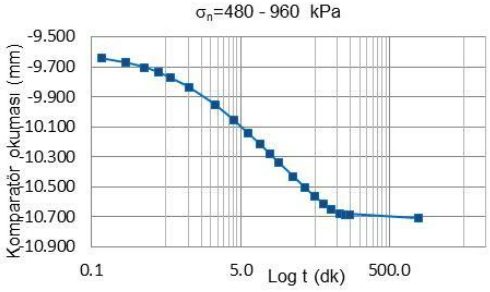




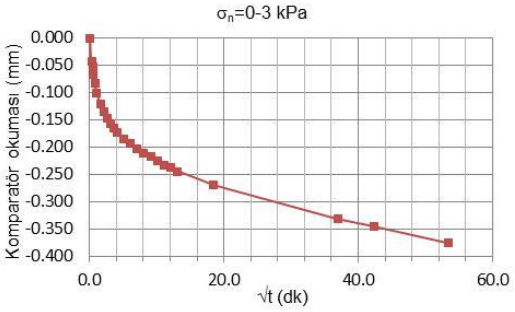


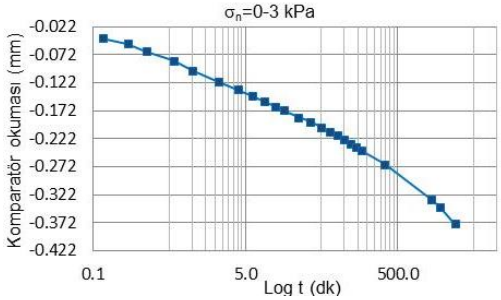


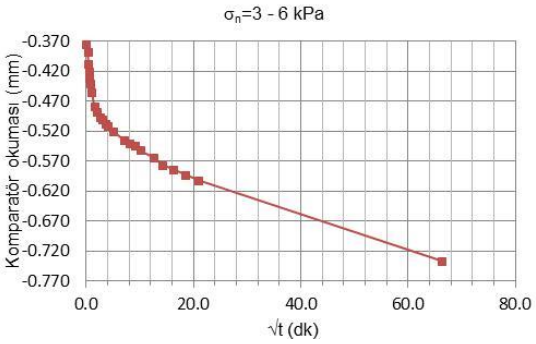


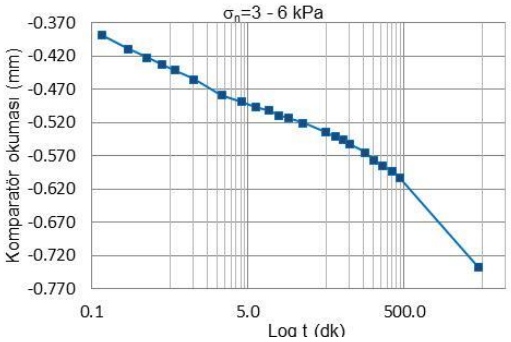


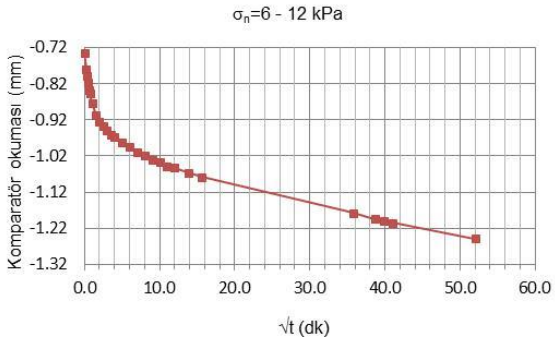
EK 1.7. SK4-UD3 no.'lu örnek için farklı gerilmeler altında "deformasyon-karekök zaman" ve "deformasyon-logaritma zaman" grafikleri.

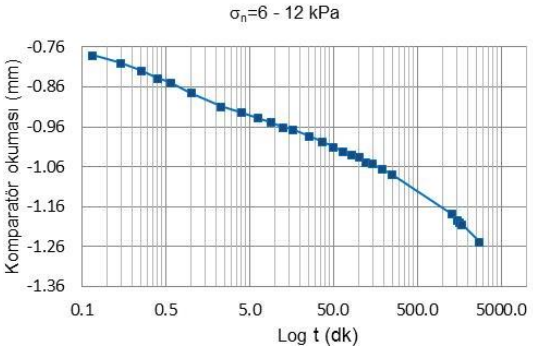


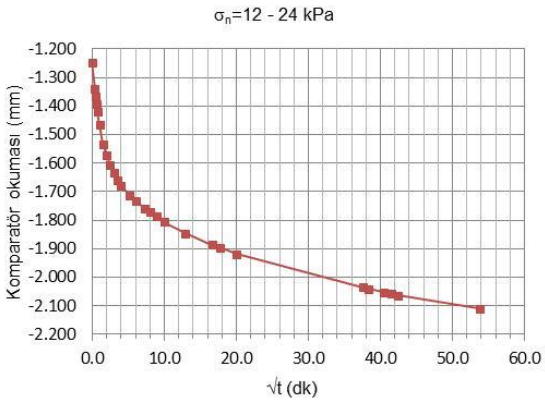


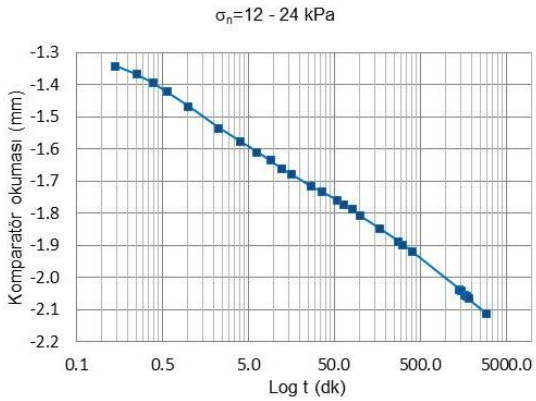




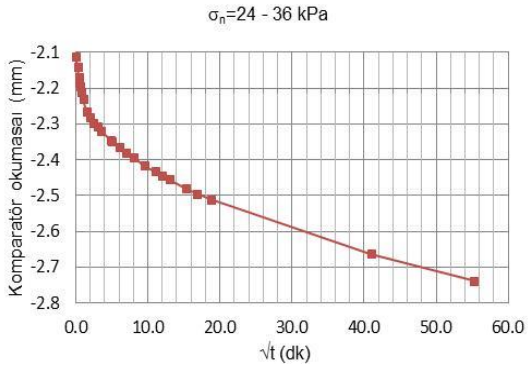


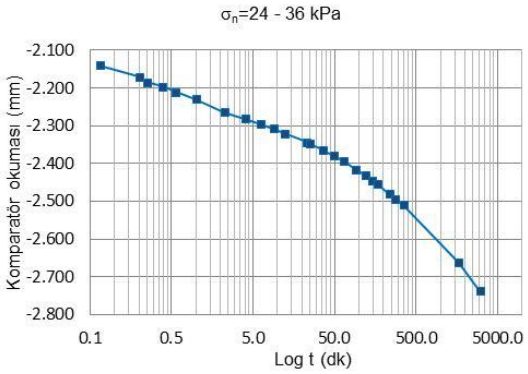


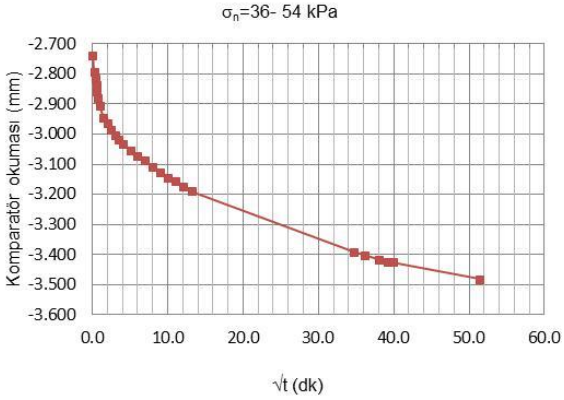


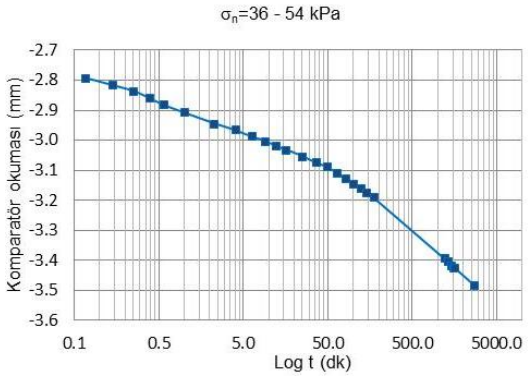


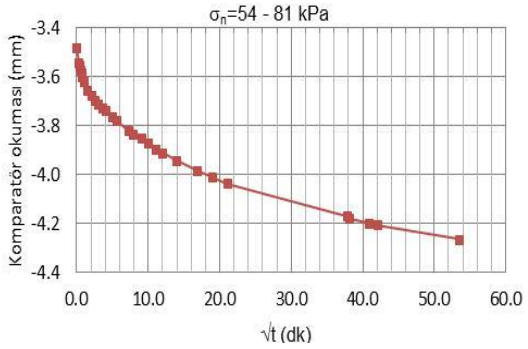
EK 1.7. (devam ediyor)

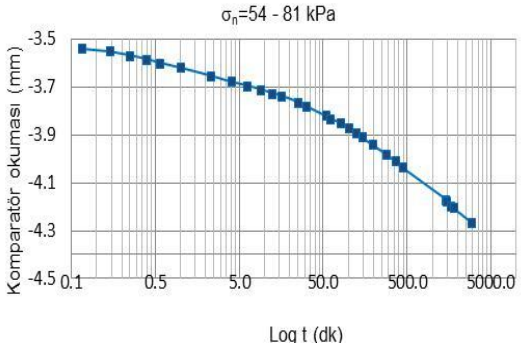


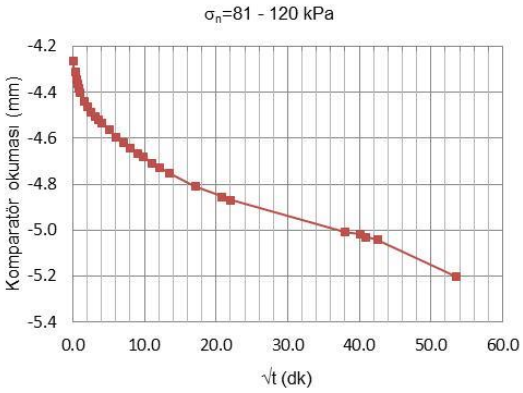


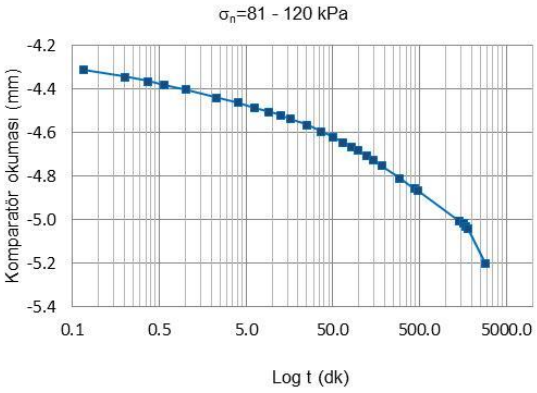




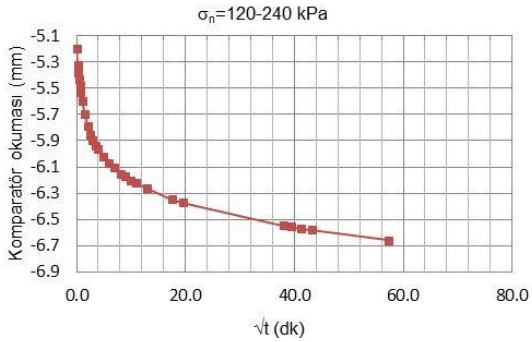


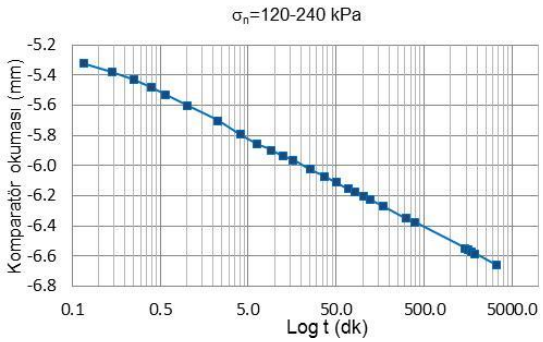


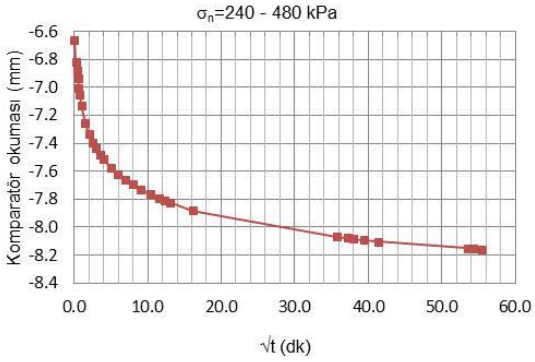


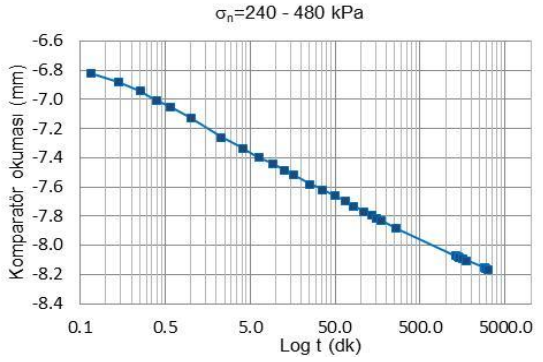


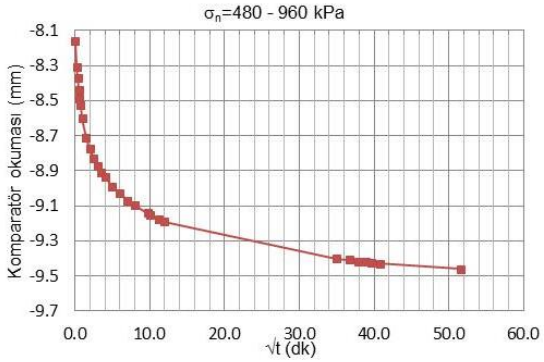
Şekil 1.7. (devam ediyor)

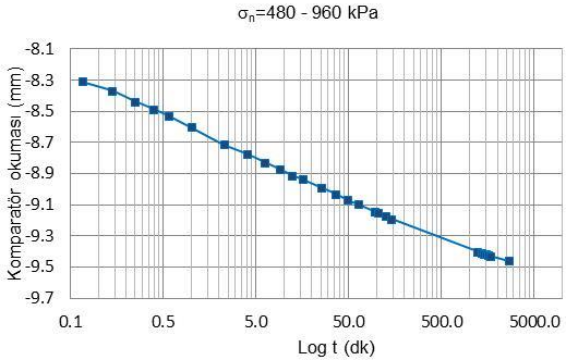




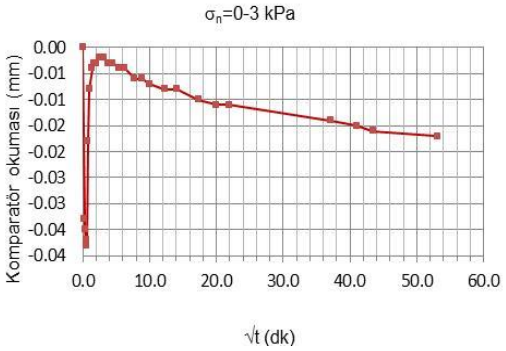


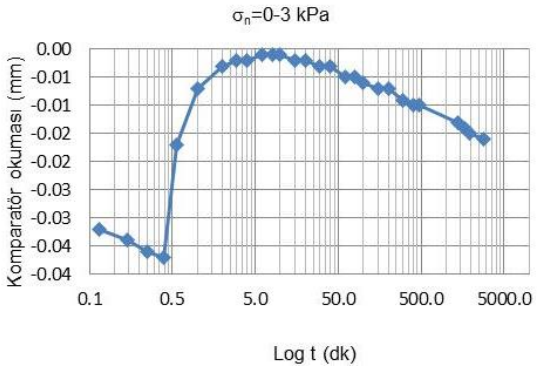


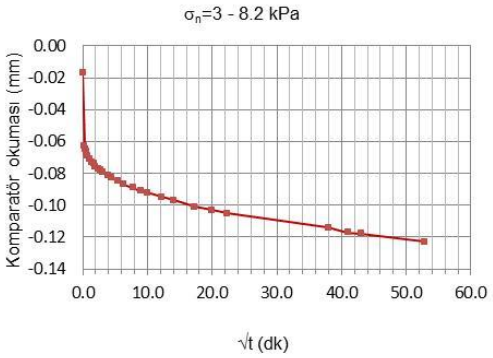


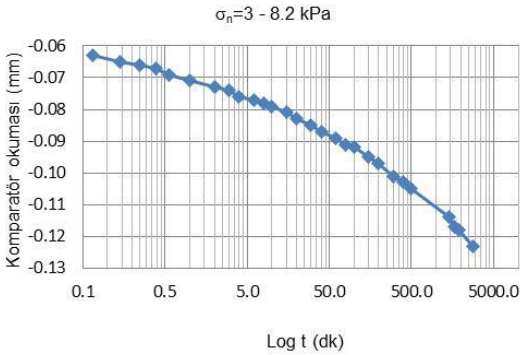


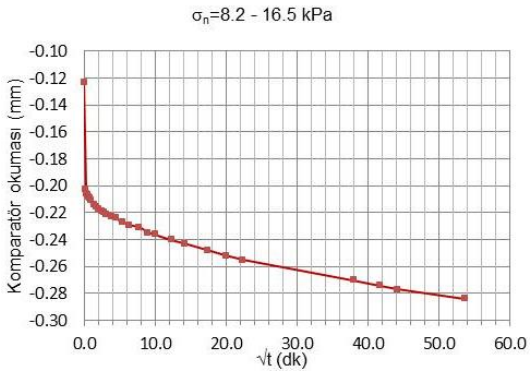
EK 1.8. SK5-UD1 no.'lu örnek için farklı gerilmeler altında "deformasyon-karekök zaman" ve "deformasyon-logaritma zaman" grafikleri.

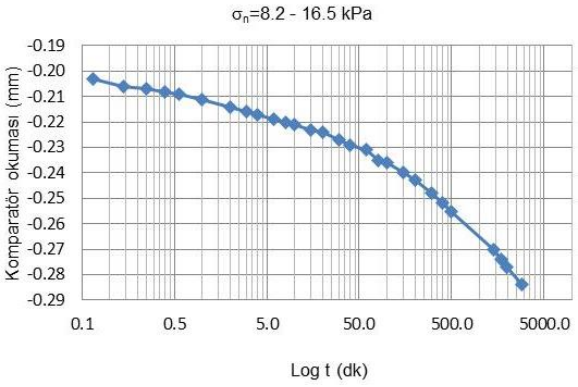


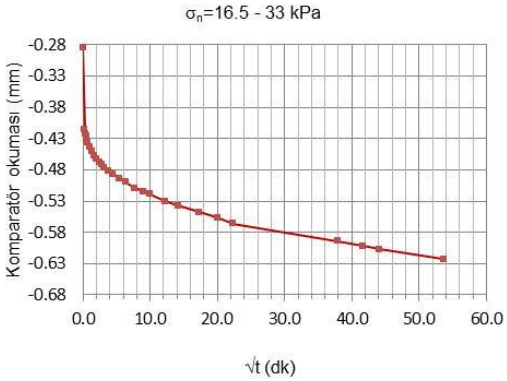


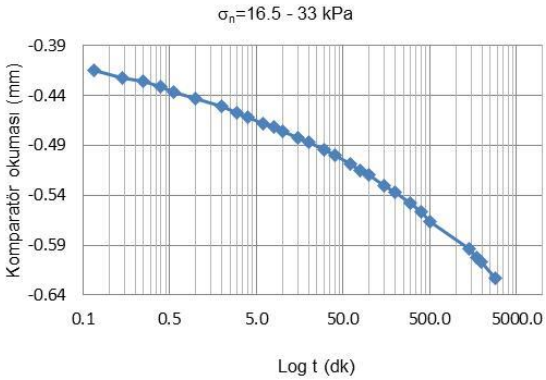




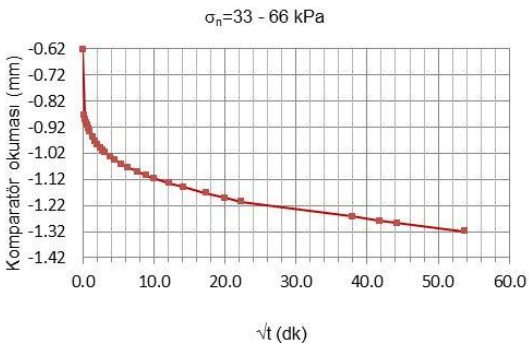


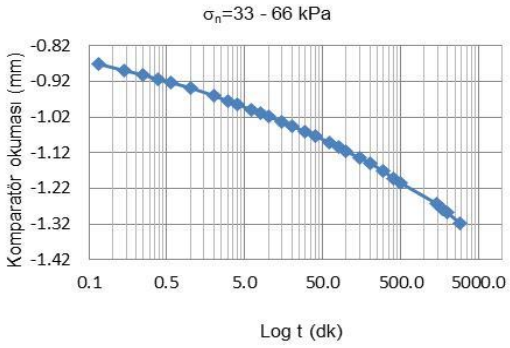


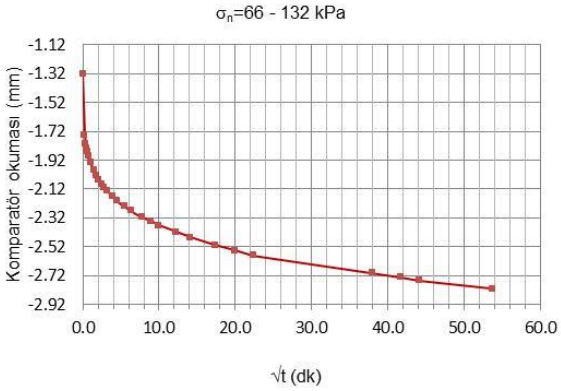


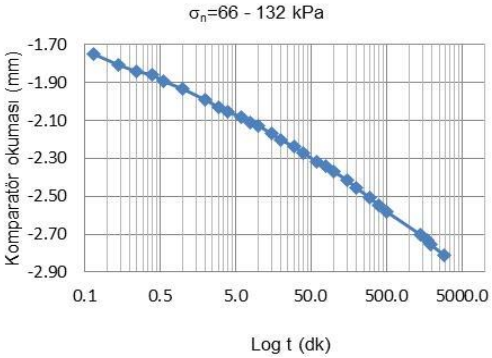


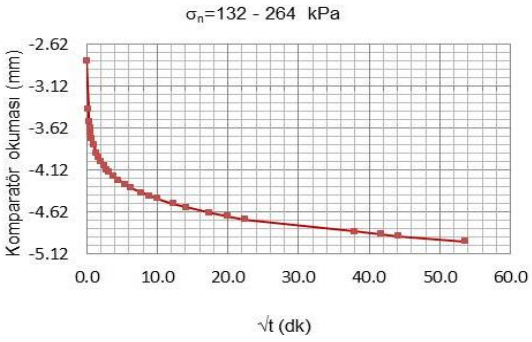
EK 1.8. (devam ediyor)

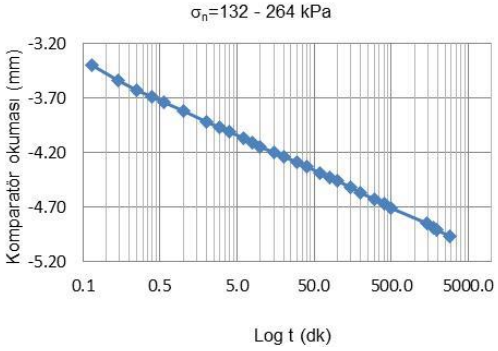


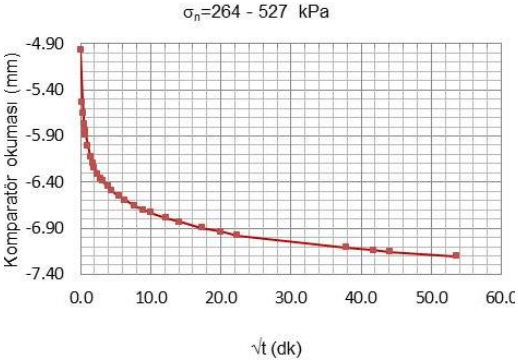


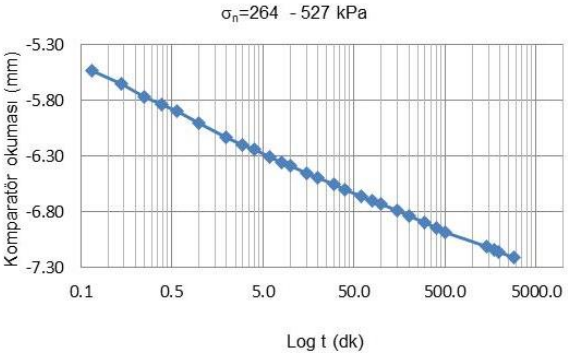




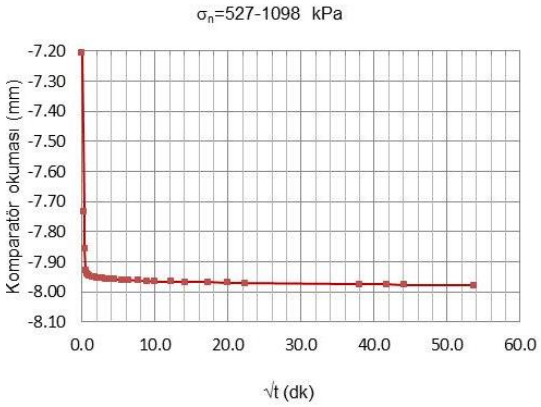


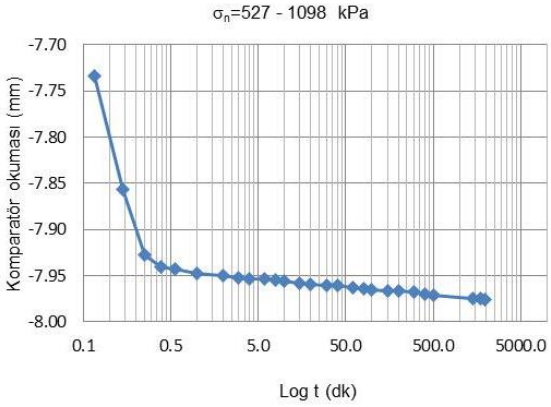




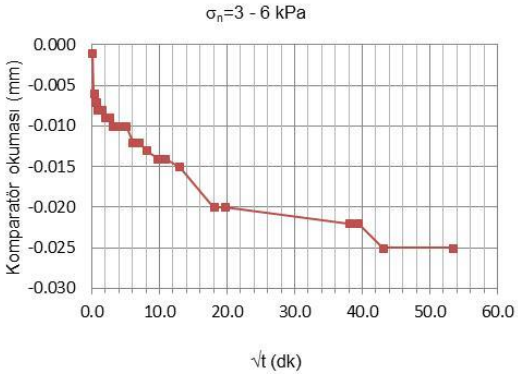


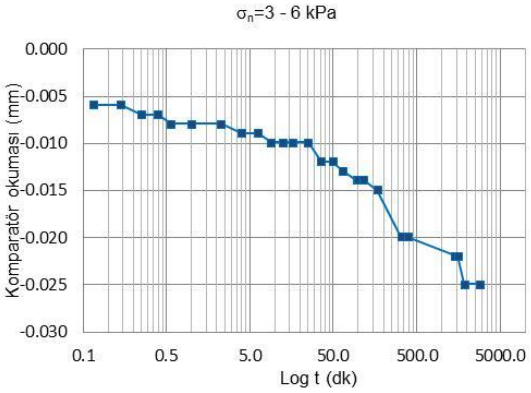
EK 1.8. (devam ediyor)

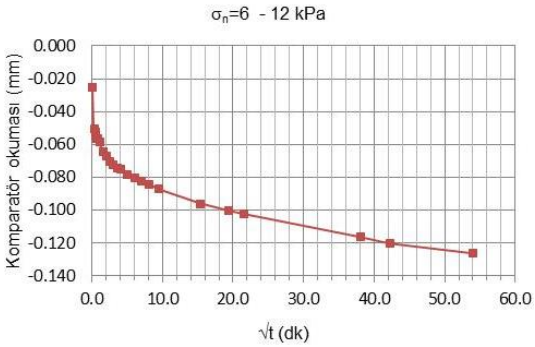


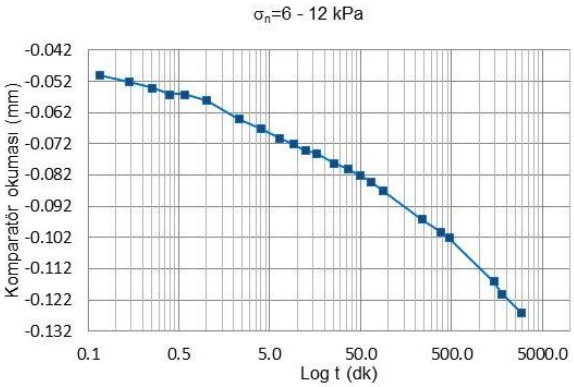


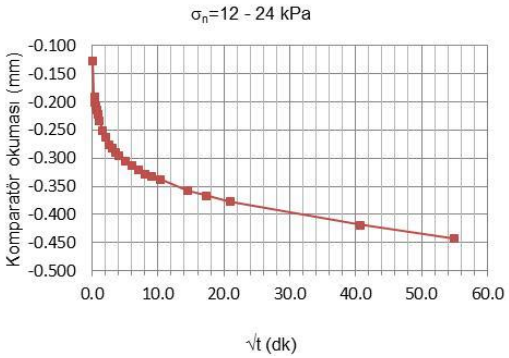
EK 1.9. SK5-UD2 no.'lu örnek için farklı gerilmeler altında "deformasyon-karekök zaman" ve "deformasyon-logaritma zaman" grafikleri.

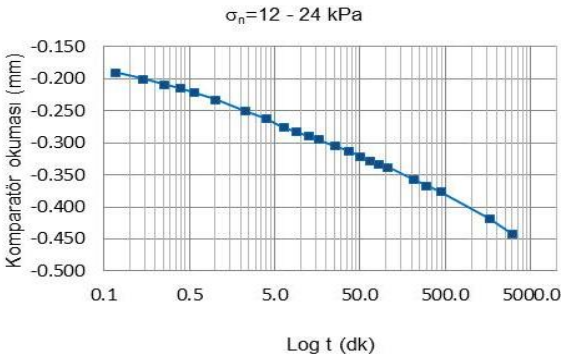


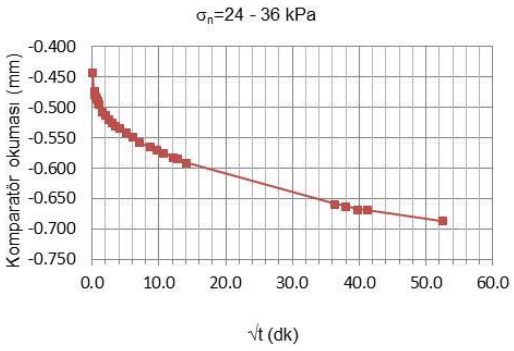


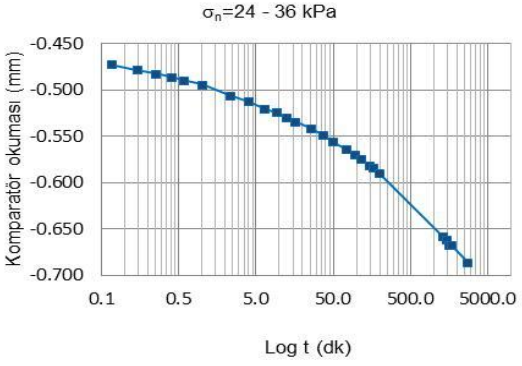




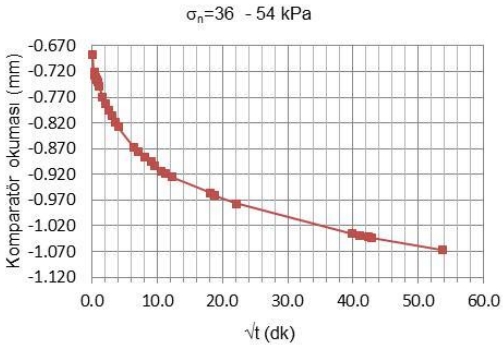


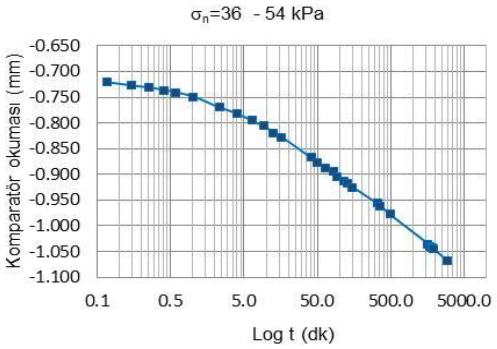


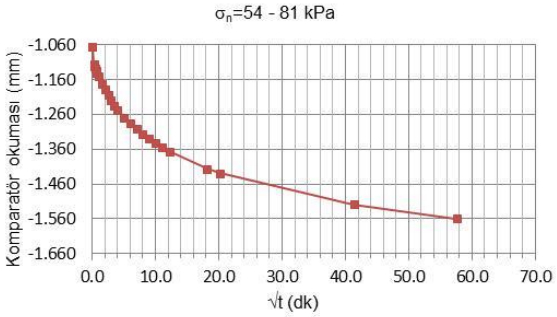


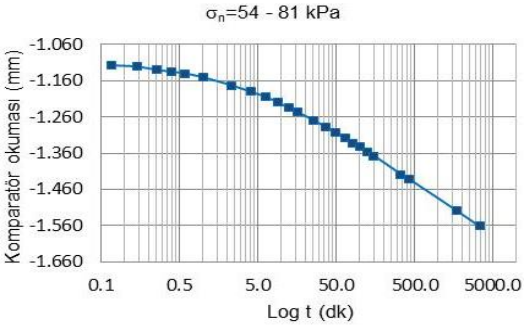


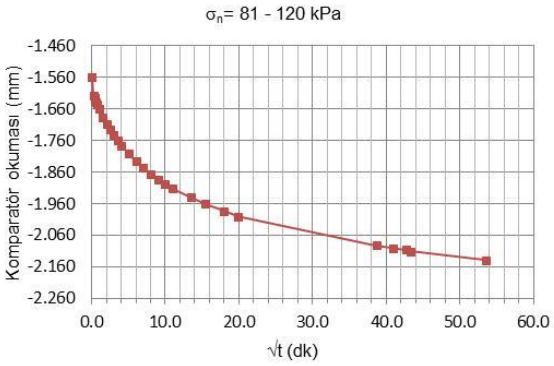
EK 1.9. (devam ediyor)

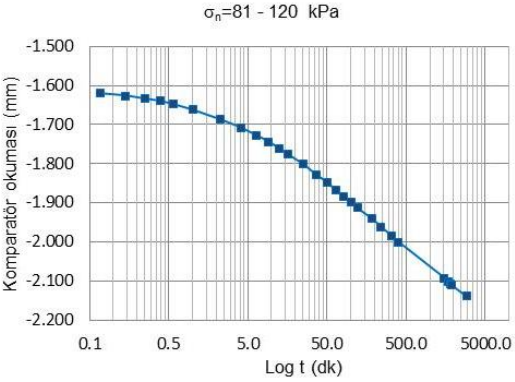


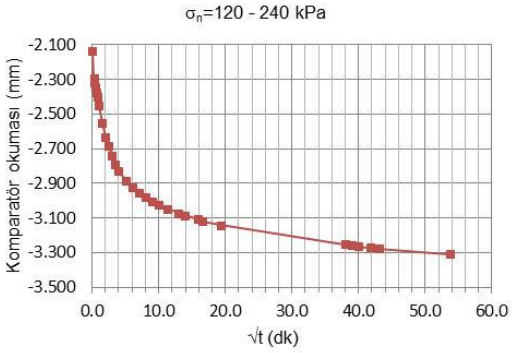


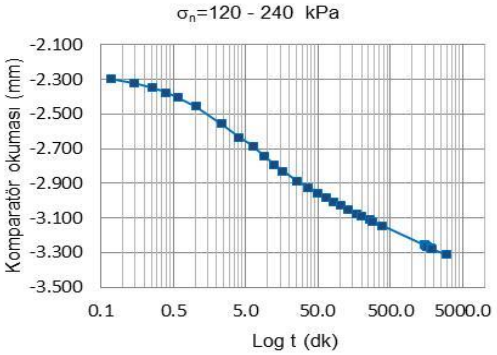




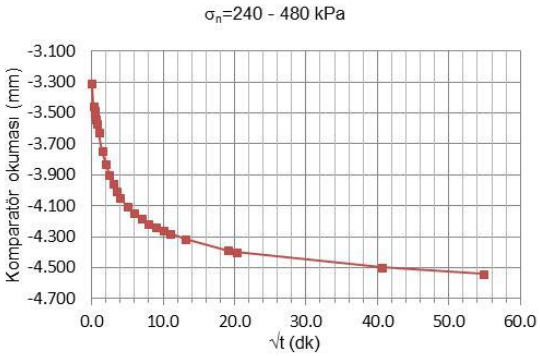


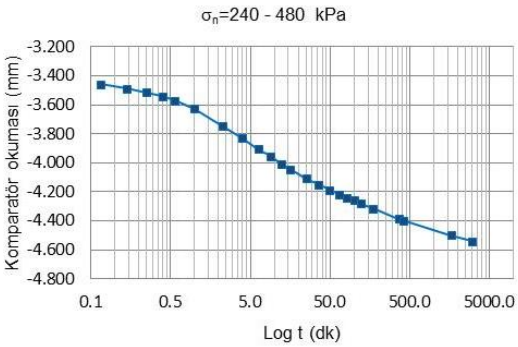


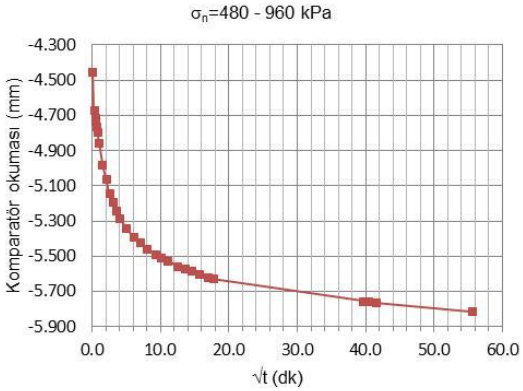


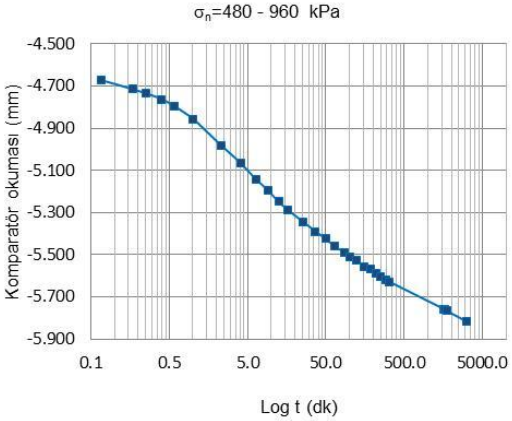


EK 1.9. (devam ediyor)

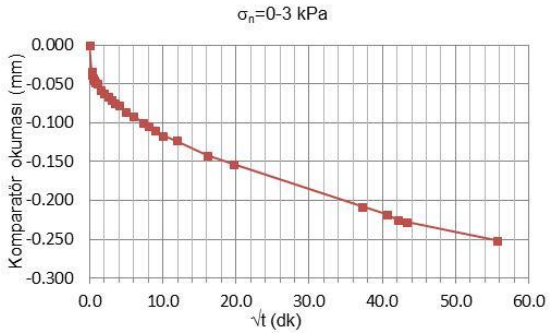


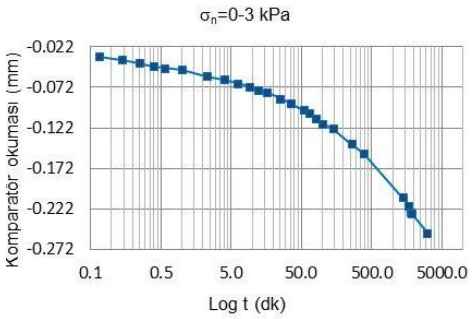


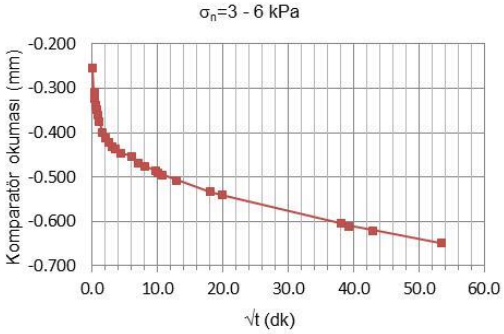


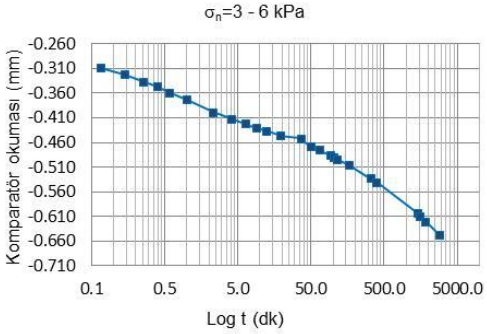


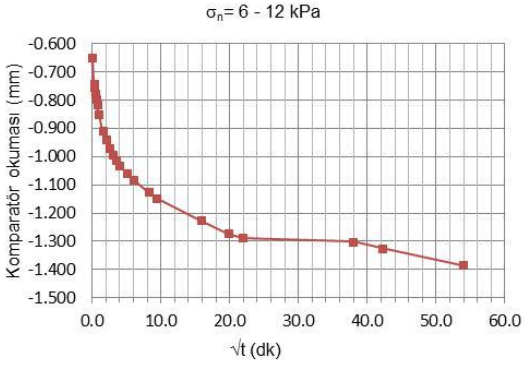
EK 1. 10. SK5-UD3 no.'lu örnek için farklı gerilmeler altında "deformasyon-karekök zaman" ve "deformasyon-logaritma zaman" grafikleri.

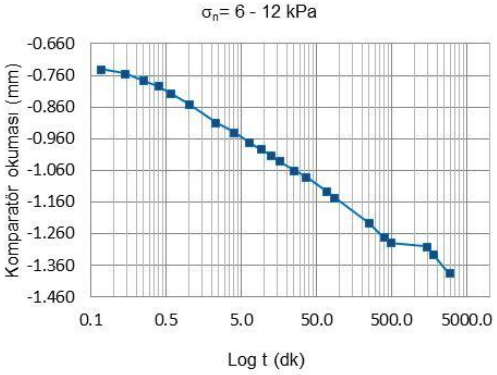


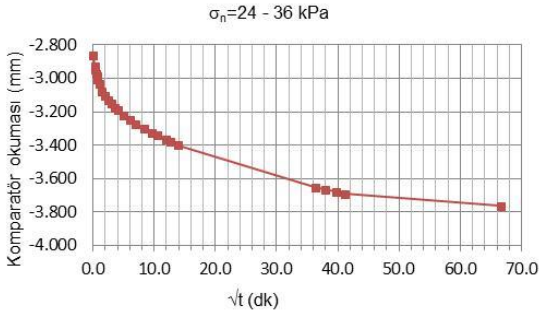


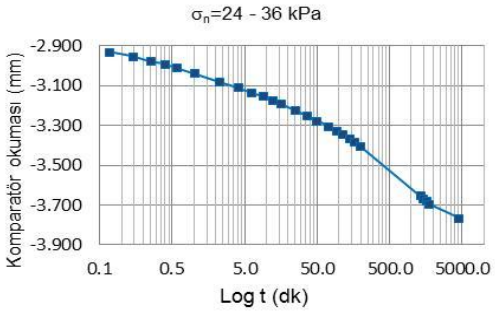




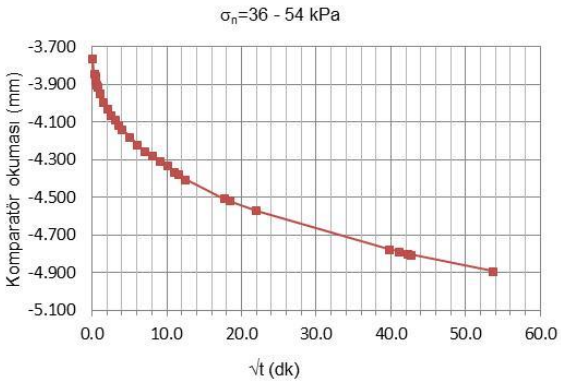


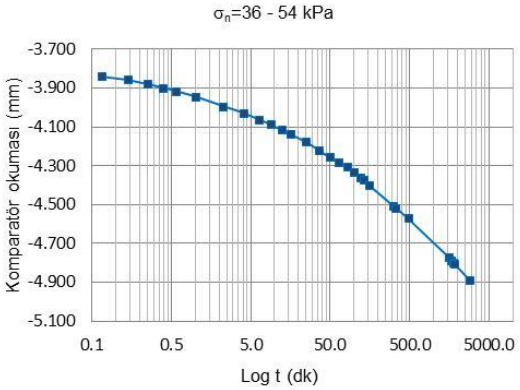


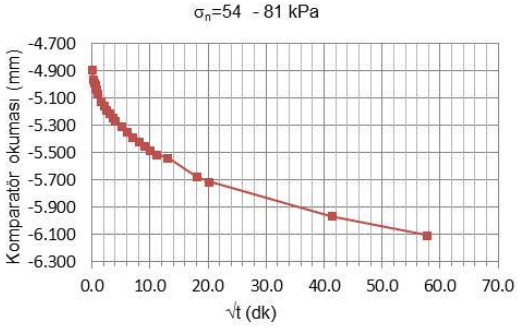


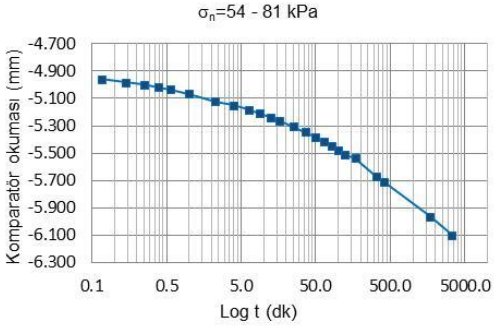


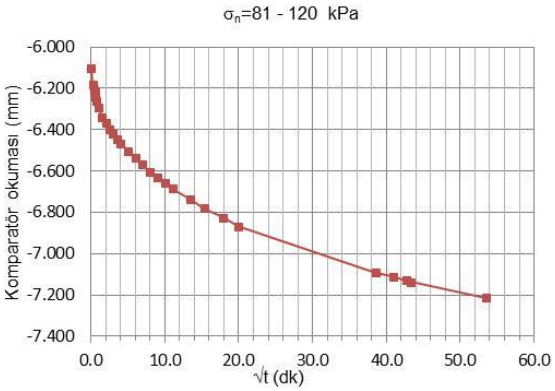
EK 1.10. (devam ediyor)

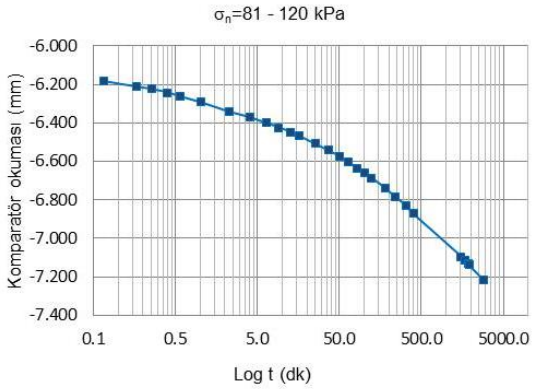


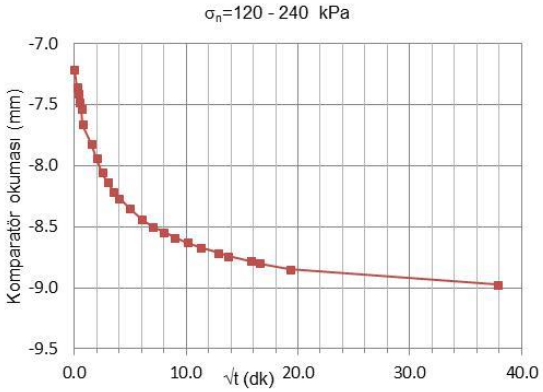


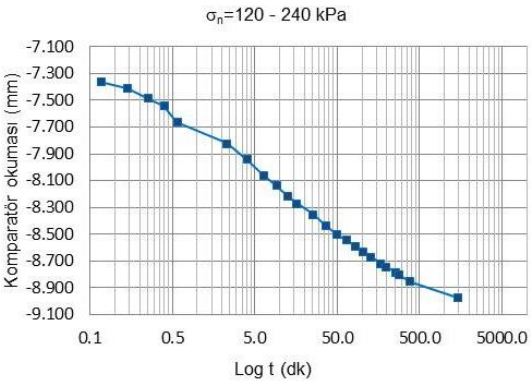




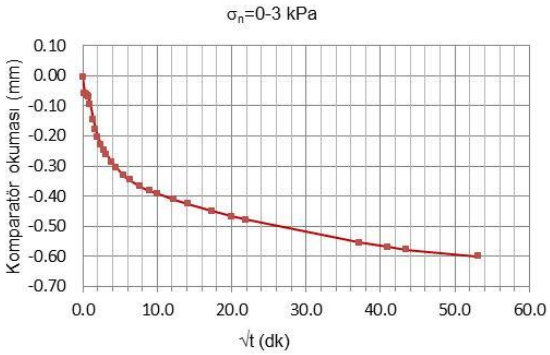


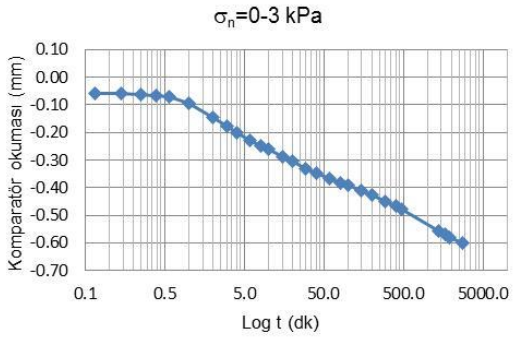


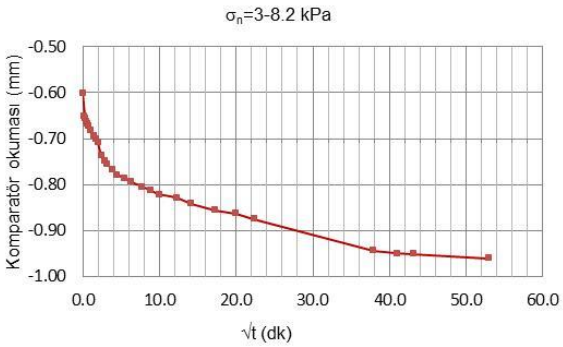


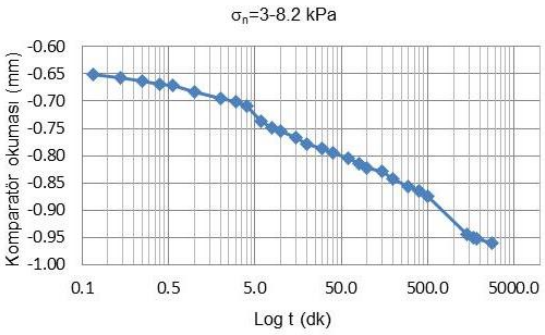


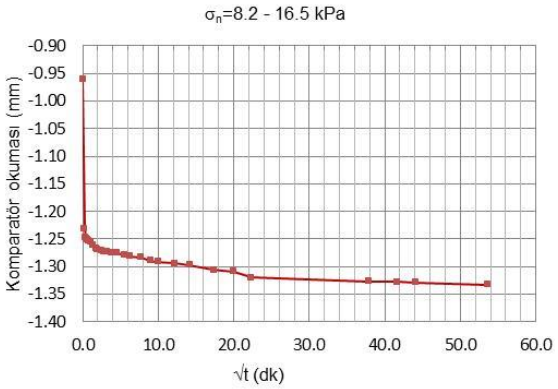
EK 1.11. SK6-UD1 no.'lu örnek için farklı gerilmeler altında "deformasyon-karekök zaman" ve "deformasyon-logaritma zaman" grafikleri.

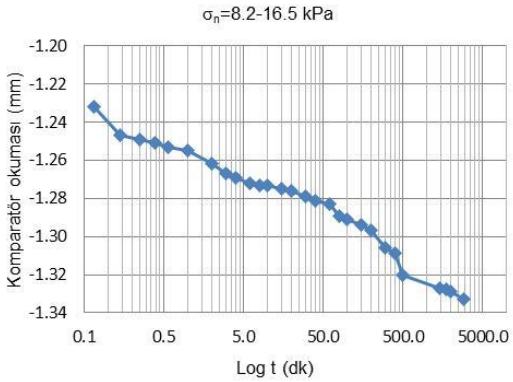


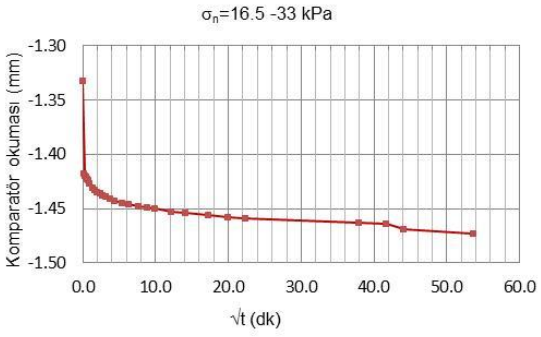


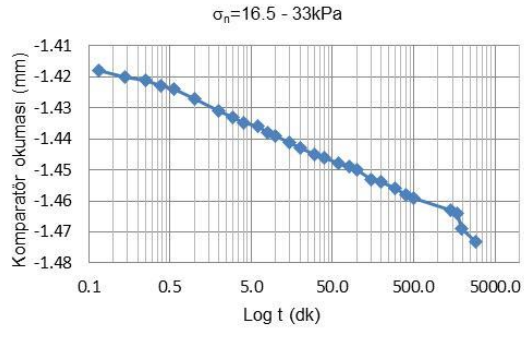




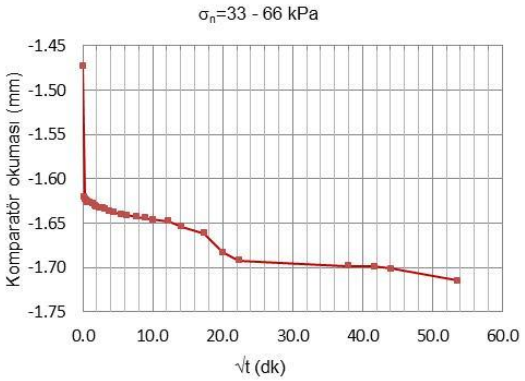


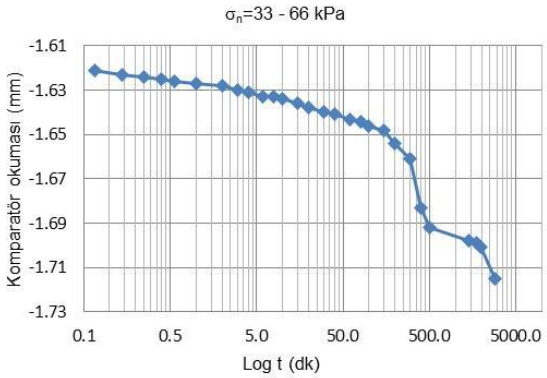


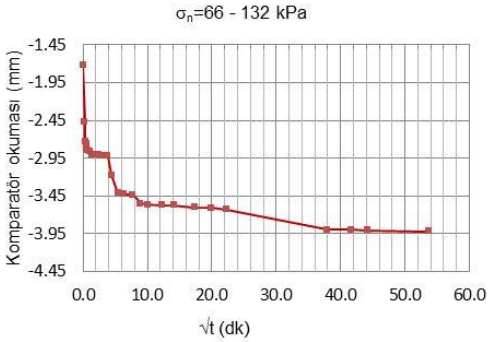


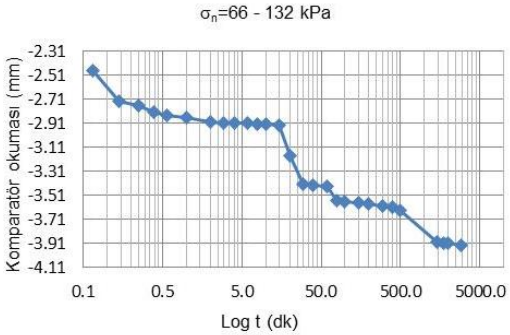


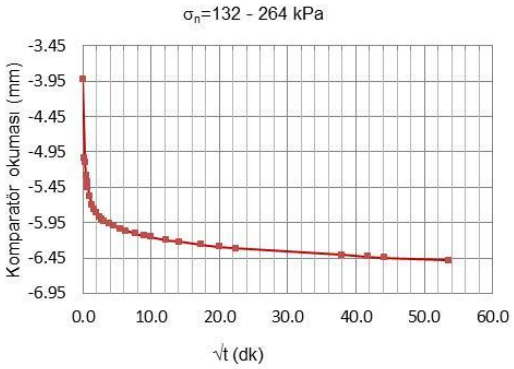
EK 1.11. (devam ediyor)

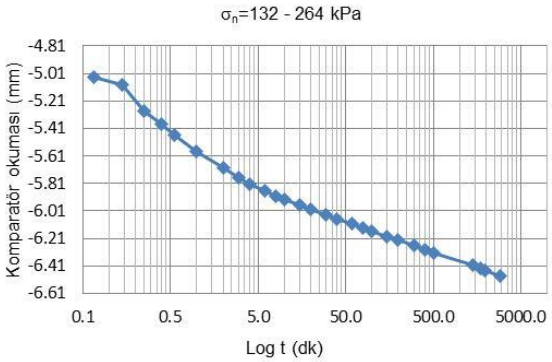


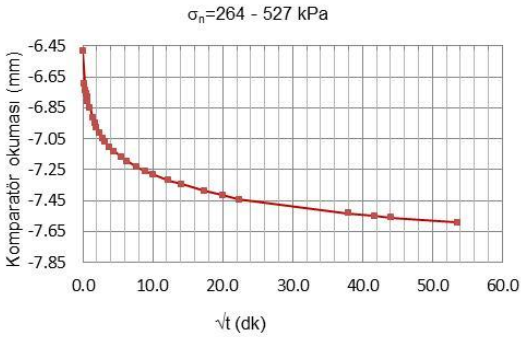


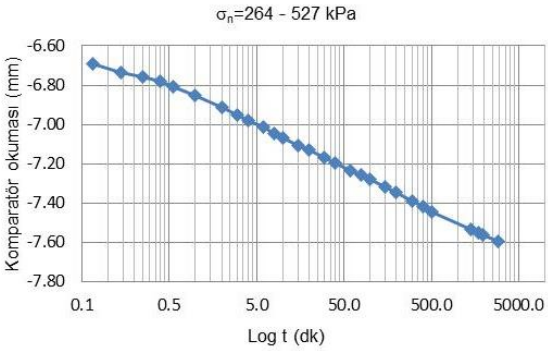




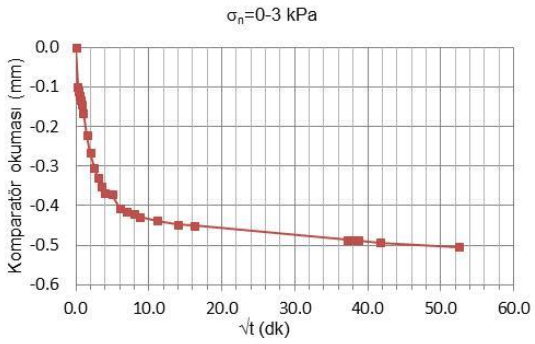


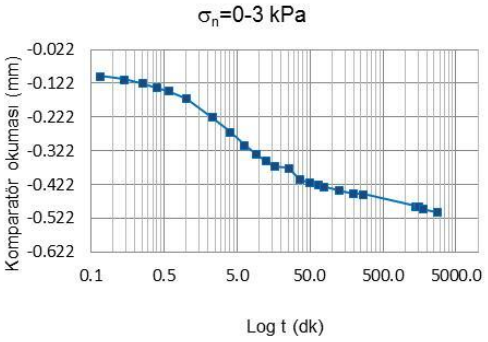


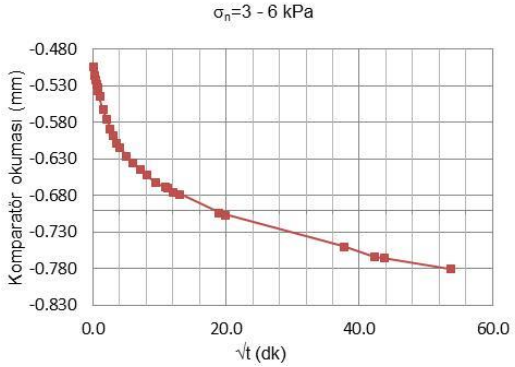


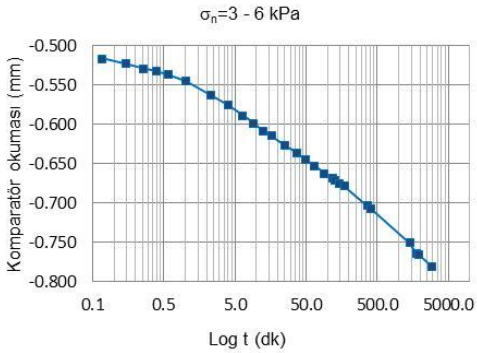


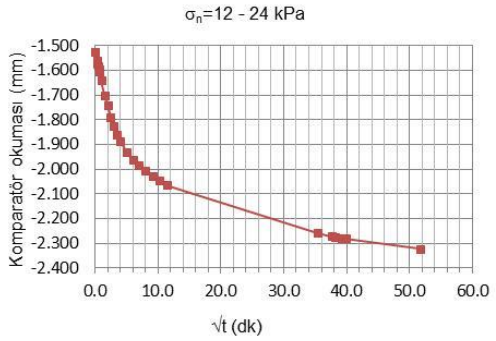
EK 1.12. SK6-UD3-Turba no.'lu örnek için farklı gerilmeler altında "deformasyon-karekök zaman" ve "deformasyon-logaritma zaman" grafikleri.

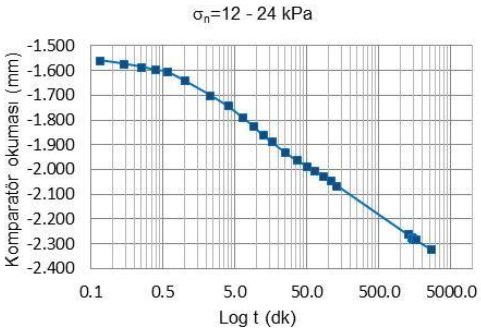


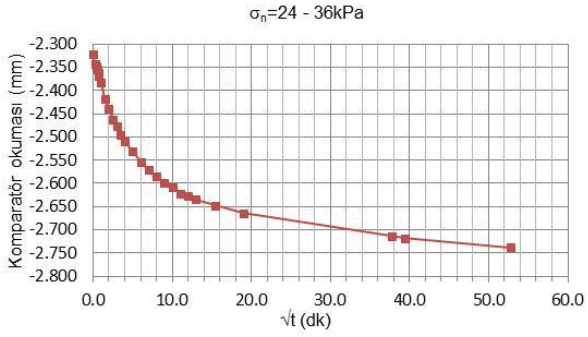


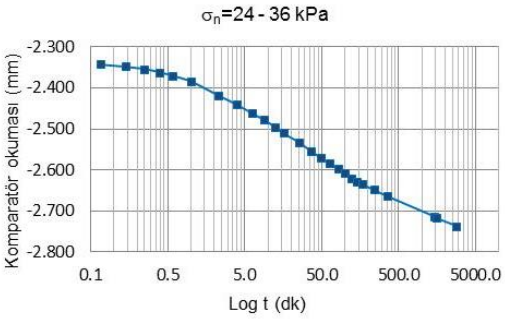




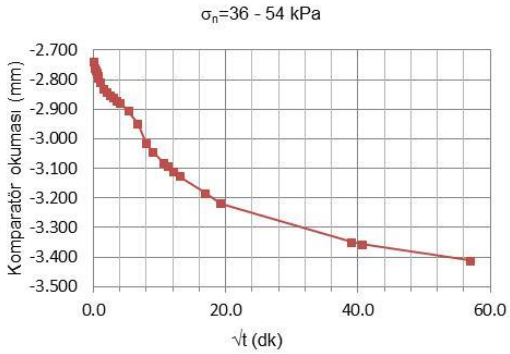


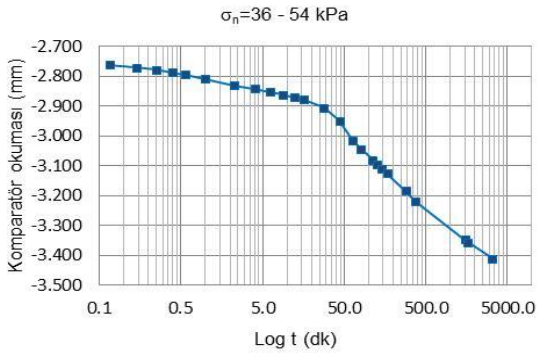


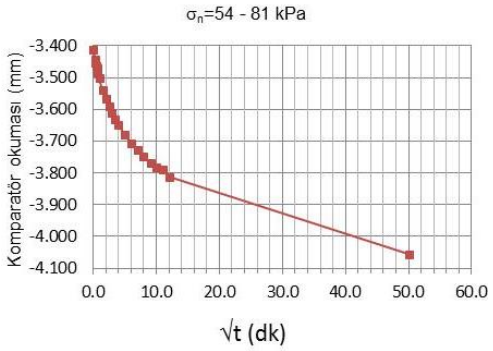


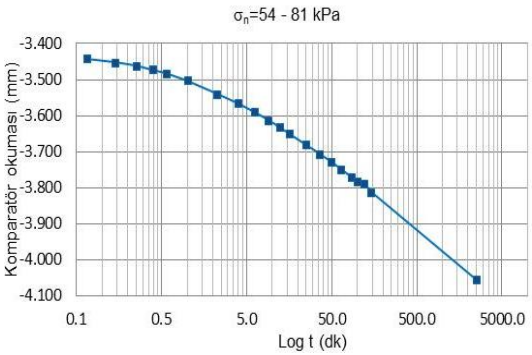


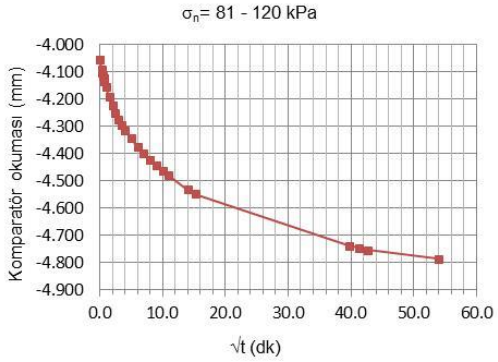
EK 1.12. (devam ediyor).

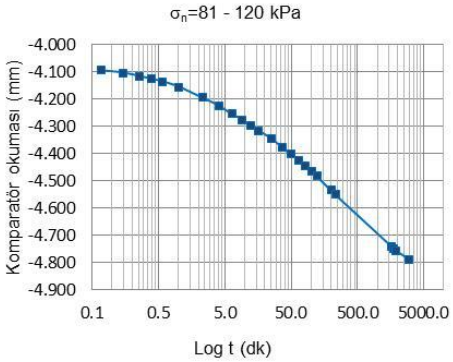


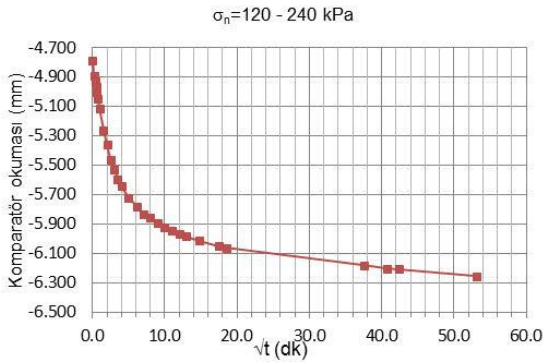


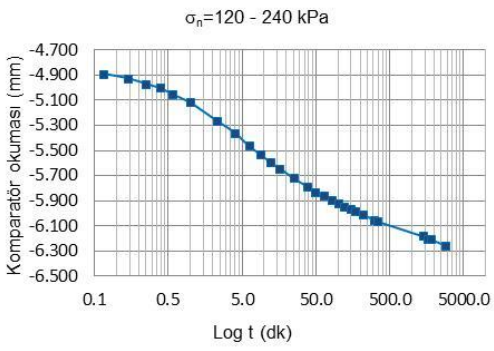




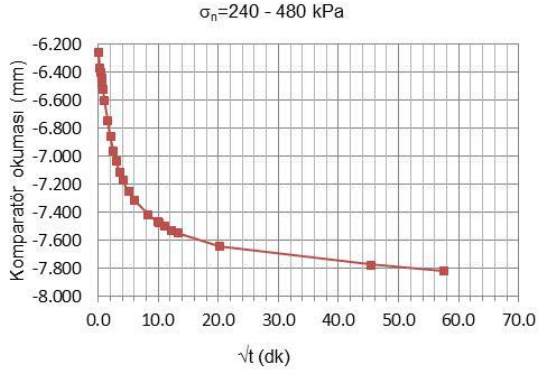


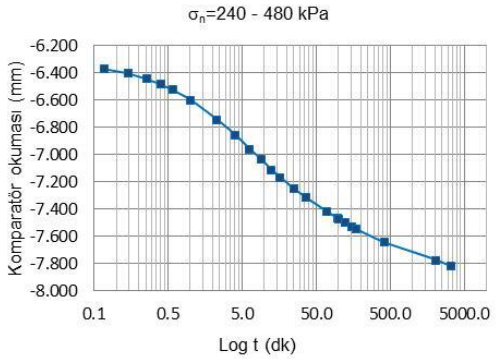


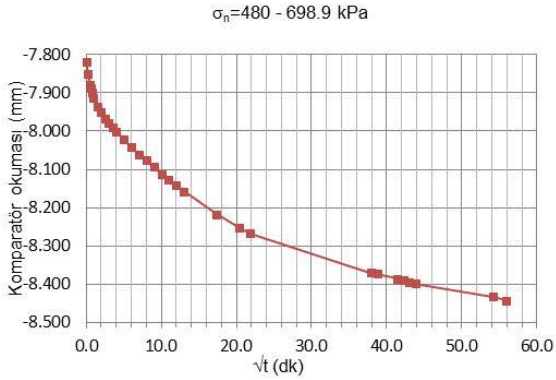


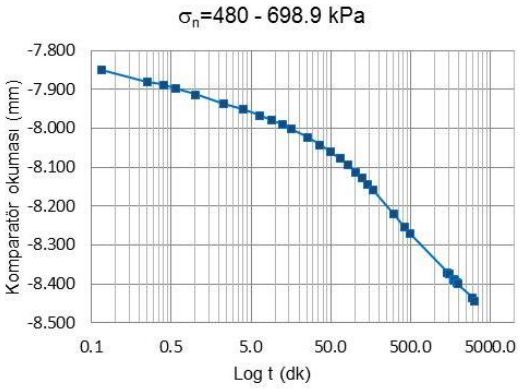


EK 1.12. (devam ediyor).

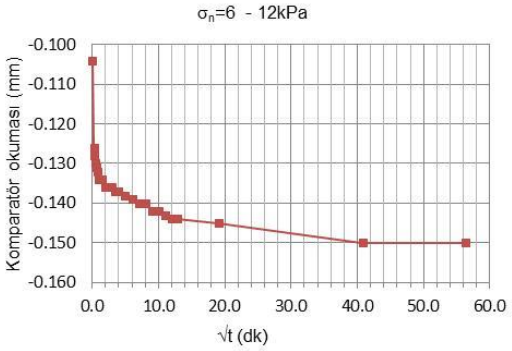


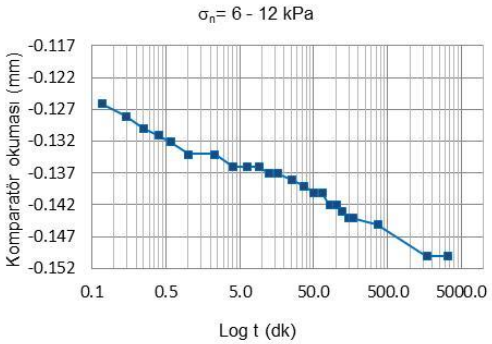


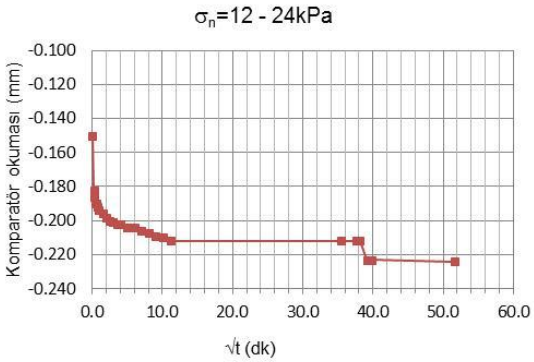


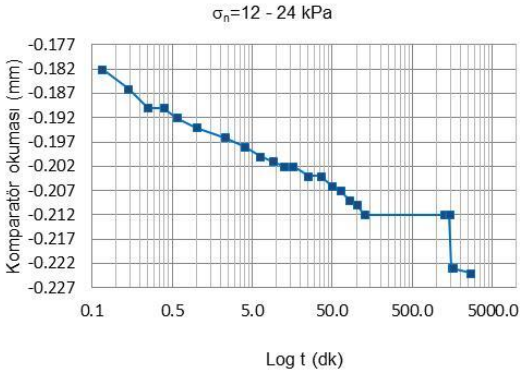


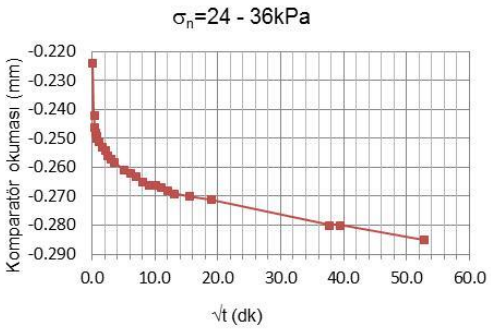
EK 1.13. SK6-UD3-Killi no.'lu örnek için farklı gerilmeler altında "deformasyon-karekök zaman" ve "deformasyon-logaritma zaman" grafikleri.

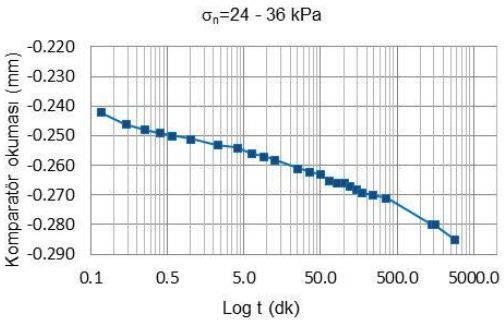


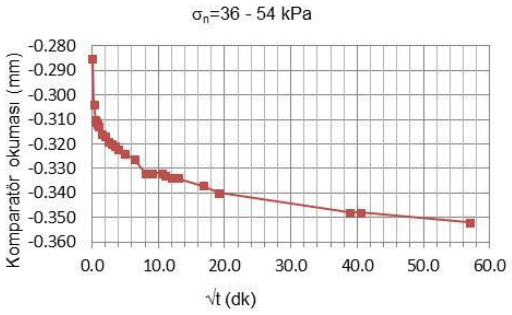


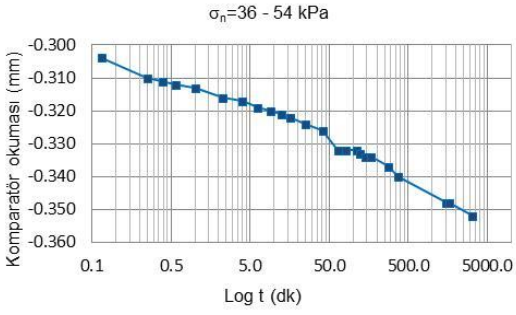




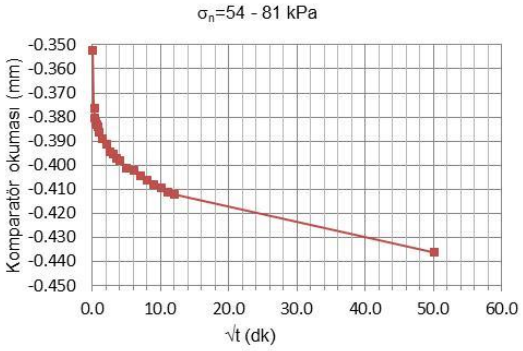


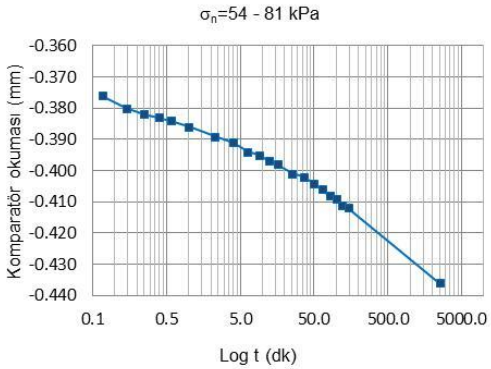


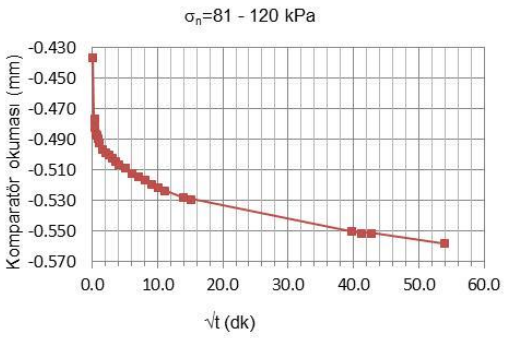


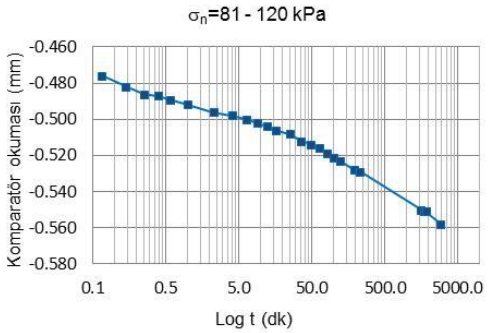


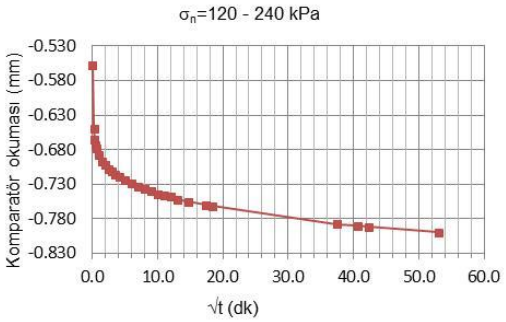
EK 1.13. (devam ediyor)

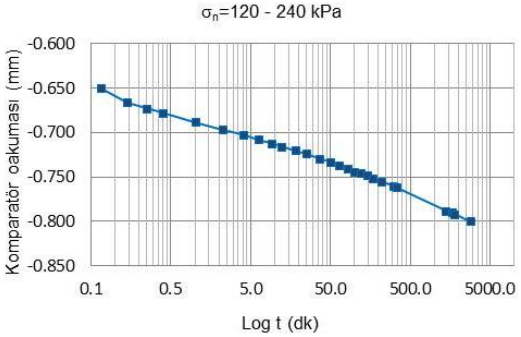


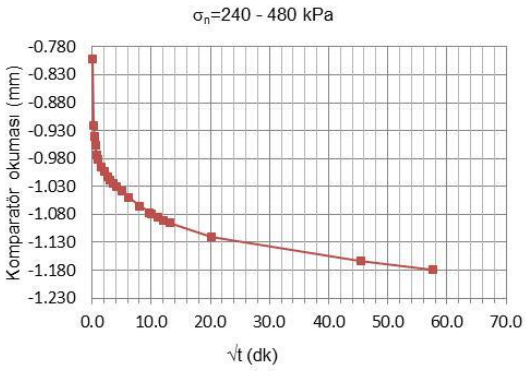


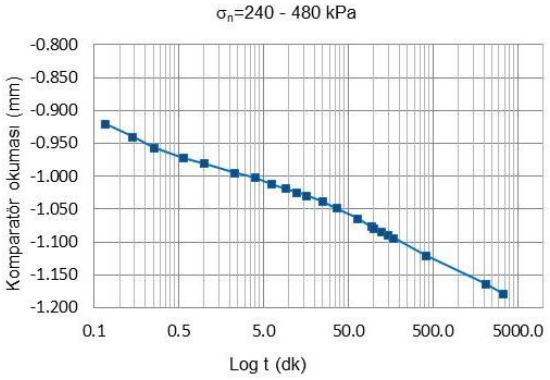












EK 1.13. (devam ediyor)