

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**ZEMİN PERMEABİLİTESİNİN
ELEKTRİKSEL ANALOJİ İLE BELİRLENMESİ**

ERDİNÇ KESKİN

KOCAELİ 2013

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ZEMİN PERMEABİLİTESİNİN
ELEKTRİKSEL ANALOJİ İLE BELİRLENMESİ

ERDİNÇ KESKİN

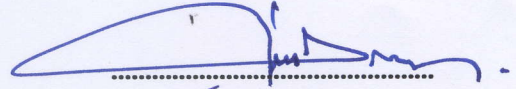


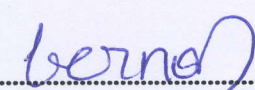
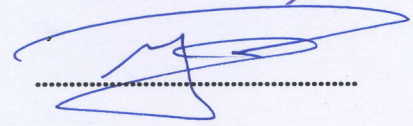
Prof. Dr. Sami ARSOY
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniv.

Prof. Dr. Semih KÜÇÜKARSLAN
Jüri Üyesi, İTÜ

Yrd. Doç. Dr. Berna UNUTMAZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Yrd. Doç. Dr. Mücahit OPAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.


.....

.....

.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 25.04.2013

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Zemin içerisinde bulunan su birçok İnşaat Mühendisliği probleminin oluşmasının ana sebeplerinden biridir. Mühendislik analizlerinde gereksinim duyulan parametrelerden biri olan permeabilite katsayısının arazide ve laboratuvarında bulunabilmesi zahmetli ve zaman alıcı olmaktadır. Bu katsayının bulunabilmesi amacıyla klasik yöntemlerin dışında zeminin elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak da permeabilite katsayısı bulunabilmektedir. Bu çalışma da Türkiye 'de ilk kez permeabilite katsayısının bulunabilmesi amacıyla elektriksel ölçüm yöntemlerinden biri olan Time Domain Reflectometry yöntemi kullanılmıştır.

Lisansüstü eğitimim süresince her konuda yardımlarını ve desteğini esirgemeyen, en genel konulardan en detay hususlara kadar teori ve uygulamada konu hakkındaki derin bilgi seviyesi ile beni yönlendiren, başarının detaylarda gizli olduğunu öğreten, yanında çalışmaktan onur duyduğum, kuşkusuz öğrenimimde ve motivasyonumda en büyük katkıyı sağlayan, bundan sonraki meslek hayatımda da desteğini göreceğimden emin olduğum çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sami ARSOY 'a,

Uzmanlık eğitimim boyunca ilminden faydalandığım, insani ve ahlaki değerleri ile de örnek edindiğim, tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli hocam Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM 'a,

Tüm akademik hayatım boyunca yanımda olan, molalarımız esnasında yaptığımız paylaşımlarla bana moral veren, bilgi ve yorumlarıyla çalışmalarına katkılarını esirgemeyen arkadaşlarım Cüneyt YILMAZ ve Mehmet ÖZGÜR 'e ve birlikte çalışmaktan zevk aldığım tüm araştırma görevlisi arkadaşlarıma,

Lund Üniversitesi 'nde bulunduğum süre boyunca bana laboratuvarında her türlü imkanı sağlayan, TDR konusunda kendimi geliştirmemi sağlayan Prof. Dr. Magnus PERSSON 'a,

Finansal olarak bu tezin tamamlanmasında desteği bulunan TÜBİTAK 'a,

İnançları, destekleri ve her türlü yardımları için anneme, babama ve tüm aileme,

Her koşulda yanımda olan ve desteğini hep hissettiğim sevgili eşim Sena 'ya,

Küçük yaşına rağmen gösterdiği sabır ve anlayıştan dolayı canım oğlum Kuzey 'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Nisan - 2013

Erdoğan KESKİN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLOLAR DİZİNİ	viii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	x
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
GİRİŞ	1
1. PERMEABİLİTE.....	4
1.1. Su Akışı	4
2. PERMEABİLİTE KATSAYISININ ÖLÇÜLMESİ.....	8
2.1. Sabit Seviyeli Permeabilite Deneyi.....	8
2.2. Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyi.....	9
2.3. Permeabilite Katsayısının Arazide Bulunması.....	12
3. TDR YÖNTEMİ VE KULLANIM ALANLARI	14
3.1. TDR Yöntemi	14
3.2. TDR Yönteminin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı.....	19
3.2.1. Dielektrik katsayısı.....	19
3.2.2. Zeminlerin dielektrik katsayılarının TDR yöntemiyle bulunması.....	22
3.2.3. Dielektrik katsayısı su içeriği ilişkisi	25
3.2.4. Zeminin elektriksel iletkenliğinin TDR yöntemi ile bulunması.....	27
3.2.5. Hacimsel su içeriği ve kuru birim hacim ağırlığının TDR yöntemi ile bulunması.....	31
3.3. TDR Cihazı ve TDR Ölçümlerini Etkileyen Faktörler	36
4. HİDROLİK VE ELEKTRİKSEL İLETKENLİK.....	45
4.1. Hidrolik İletkenlik	45
4.2. Elektriksel İletkenlik	49
4.3. Hidrolik İletkenlik ile Elektriksel İletkenlik Arasındaki İlişki.....	51
4.3.1. Kozeny-Carman denklemi ile elektriksel iletkenlik arasındaki ilişki	51
4.3.2. Chapuis denklemi ile elektriksel iletkenlik arasındaki ilişki.....	52
5. MALZEME VE YÖNTEM	58
5.1. Giriş.....	58
5.2. Malzeme	58
5.3. Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi Amacıyla Yapılan Deneyler.....	58
5.3.1. Elek analizi	59
5.3.2. Özgül kütle deneyi	59
5.3.3. Organik madde belirleme	60
5.3.4. Maksimum ve minimum boşluk oranlarının tayini	60

5.4. Dielektrik Katsayısı – Hacimsel Su İçeriği Arasındaki İlişkinin TDR ile Belirlenmesi	62
5.5. Permeabilite Deneyi ve TDR Ölçümü.....	64
5.5.1. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak permeabilite katsayısının hesaplanması.....	64
5.5.2. Chapuis eşitliği kullanılarak permeabilite katsayısının hesaplanması	65
6. ZEMİNLERİN FİZİKSEL VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ	67
6.1. Deney Örneği-1 İçin Yapılan Sınıflandırma Deneyleri	67
6.2. SP-3 Türü Kum Örneği için Hacimsel Su İçeriği-Dielektrik Katsayısı Arasındaki İlişkinin TDR ile Bulunması.....	68
6.2.1. Dielektrik katsayının teğet yöntemi ve türev yöntemi ile bulunması.....	69
6.2.2. Dielektrik katsayısı kullanılarak hacimsel su içeriğinin bulunması.....	71
6.2.3. Boşluk oranının bulunması.....	73
6.2.4. TDR dalga formu kullanılarak zeminin elektriksel iletkenliğinin hesaplanması.....	74
6.3. Deney Örneği-2 İçin Yapılan Sınıflandırma Deneyleri	76
6.4. SP-3 Türü Kum Örneği için Hacimsel Su İçeriği Arasındaki İlişkinin TDR ile Bulunması	77
6.4.1. Dielektrik katsayının teğet yöntemi ve türev yöntemi ile bulunması.....	78
6.4.2. Dielektrik katsayısı kullanılarak hacimsel su içeriğinin bulunması.....	80
6.4.3. Boşluk oranının bulunması.....	82
6.4.4. TDR dalga formu kullanılarak zeminin elektriksel iletkenliğinin hesaplanması.....	83
6.5. Deney Örneği-3 İçin Yapılan Sınıflandırma Deneyleri	85
6.6. SP-3 Türü Kum Örneği için Hacimsel Su İçeriği Arasındaki İlişkinin TDR ile Bulunması	86
6.6.1. Dielektrik katsayının teğet yöntemi ve türev yöntemi ile bulunması.....	87
6.6.2. Dielektrik katsayısı kullanılarak hacimsel su içeriğinin bulunması.....	89
6.6.3. Boşluk oranının bulunması.....	91
6.6.4. TDR dalga formu kullanılarak zeminin elektriksel iletkenliğinin hesaplanması.....	92
6.7. Deney Örneği-4 İçin Yapılan Sınıflandırma Deneyleri	94
6.8. Deney Örneği 4 için Hacimsel Su İçeriği- Dielektrik Katsayısı Arasındaki İlişkinin TDR ile Bulunması.....	95
6.8.1. Dielektrik katsayının teğet yöntemi ve türev yöntemi ile bulunması.....	96
6.8.2. Dielektrik katsayısı kullanılarak hacimsel su içeriğinin bulunması.....	98
6.8.3. Boşluk oranının bulunması.....	100
6.8.4. TDR dalga formu kullanılarak zeminin elektriksel iletkenliğinin hesaplanması.....	101

6.9. Genel Değerlendirme	103
7. PERMEABİLİTE KATSAYISININ BELİRLENMESİ.....	105
7.1. SP-1 Örneği İçin Yapılan Permeabilite Hesaplamaları.....	105
7.1.1. Klasik yöntemlerle permeabilite katsayılarının hesaplanması	105
7.1.2. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması	109
7.1.3. Chapuis eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması	111
7.2. SP-1 Örneği İçin Genel Değerlendirme	112
7.3. SP-2 Örneği İçin Yapılan Permeabilite Hesaplamaları.....	117
7.3.1. Klasik yöntemlerle permeabilite katsayılarının hesaplanması	118
7.3.2. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması	121
7.3.3. Chapuis eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması	123
7.4. SP-2 Örneği İçin Genel Değerlendirme	125
7.5. SP-3 Örneği İçin Yapılan Permeabilite Hesaplamaları.....	130
7.5.1. Klasik yöntemlerle permeabilite katsayılarının hesaplanması	130
7.5.2. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması	133
7.5.3. Chapuis eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması	136
7.6. SP-3 Örneği İçin Genel Değerlendirme	137
7.7. SP-4 Örneği İçin Yapılan Permeabilite Hesaplamaları.....	143
7.7.1. Klasik yöntemlerle permeabilite katsayılarının hesaplanması	143
7.7.2. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması	147
7.7.3. Chapuis eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması	149
7.8. SP-4 Örneği İçin Genel Değerlendirme	151
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	157
9. KAYNAKLAR	159
EKLER	165
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	223
ÖZGEÇMİŞ	225

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Basınç etkisinde oluşan gerilmeler.....	5
Şekil 1.2.	Laminer ve türbülanslı akışın şematik olarak gösterimi	5
Şekil 1.3.	Laminer ve Türbülanslı akış	6
Şekil 2.1.	Sabit seviyeli permeabilite deney düzeneği	8
Şekil 2.2.	Düşen seviyeli permeabilite deney düzeneği	10
Şekil 2.3.	Geçirimliliğin arazide dışarıya su çekilmesiyle ölçülmesi.....	13
Şekil 3.1.	TDR sistem konfigürasyonu	15
Şekil 3.2.	Örnek bir TDR kaydı	17
Şekil 3.3.	Yansıma katsayısı-zaman grafiği	18
Şekil 3.4.	Çoklu empedans	19
Şekil 3.5.	Çok fazlı zeminin rahatlatma frekansı a)Mikroskopik Kutuplanma b)Makroskopik kutuplanma	20
Şekil 3.6.	0.8 GHz ve 17 GHz frekanslarında alınan TDR ölçümleri	21
Şekil 3.7.	Tipik bir TDR ölçümü.....	22
Şekil 3.8.	Teğet yöntemi.....	24
Şekil 3.9.	Türev yöntemi	25
Şekil 3.10.	Elektriksel iletkenlik için kritik voltajların gösterilmesi.....	28
Şekil 3.11.	a ve b katsayıları için kalibrasyon sonuçları	32
Şekil 3.12.	Kritik genlikler	34
Şekil 3.13.	Kritik genlik değerleri ve yoğunluk değerleri ile dielektrik katsayısı arasındaki ilişki	35
Şekil 3.14.	Gravimetrik su içeriği ile dielektrik katsayısı ve yoğunluklar arasındaki ilişki	36
Şekil 3.15.	TDR cihazı, koaksiyel kablo ve su içeriği ölçümü için zemine yerleştirilen prob	37
Şekil 3.16.	Koaksiyel bir kablonun iç yapısı.....	37
Şekil 3.17.	Farklı yaklaşımlarla dielektrik katsayısı-su içeriği ilişkisi.....	41
Şekil 3.18.	Farklı prob konfigürasyonları ile oluşan elektriksel alanlar.....	42
Şekil 3.19.	İletken sayısı ve genişliklerinin TDR kaydına yansıması	43
Şekil 4.1.	Sızıntı doğrultusuna dik düzlemdeki kesit görünüşü	47
Şekil 5.1.	Ölçüm sistemi.....	62
Şekil 5.2.	Teğet yöntemi için örnek bir yansıma formu	63
Şekil 5.3.	Türev yöntemi için örnek bir yansıma formu	64
Şekil 6.1.	Deney Örneği-1 için yapılan elek analizi deney sonuçları.....	67
Şekil 6.2.	SP-1 örneği için teğet yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması	69
Şekil 6.3.	SP-1 örneği için türev yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması	70
Şekil 6.4.	SP-1 örneği için türev yöntemi ve teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayılarının karşılaştırılması	71
Şekil 6.5.	SP-1 örneği için Topp ve diğ. (1980) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri.....	72

Şekil 6.6.	SP-1 örneği için Ledieu ve diğ. (1986) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri.....	72
Şekil 6.7.	SP-1 örneği için klasik yöntem ve TDR yöntemi ile hesaplanan boşluk oranı değerleri.....	74
Şekil 6.8.	Elektriksel iletkenlik için kritik voltaj değerleri	75
Şekil 6.9.	Deney Örneği-2 için yapılan elek analizi deney sonuçları.....	76
Şekil 6.10.	SP-2 örneği için teğet yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması	78
Şekil 6.11.	SP-2 örneği için türev yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması	79
Şekil 6.12.	SP-2 örneği için türev yöntemi ve teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayılarının karşılaştırılması	80
Şekil 6.13.	SP-2 örneği için Topp ve diğ. (1980) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri.....	81
Şekil 6.14.	SP-2 örneği için Ledieu ve diğ. (1986) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri.....	81
Şekil 6.15.	SP-2 örneği için klasik yöntem ve TDR yöntemi ile hesaplanan boşluk oranı değerleri.....	83
Şekil 6.16.	Elektriksel iletkenlik için kritik voltaj değerleri	84
Şekil 6.17.	Deney Örneği-3 için yapılan elek analizi deney sonuçları.....	85
Şekil 6.19.	SP-3 örneği için teğet yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması	87
Şekil 6.18.	SP-3 örneği için türev yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması	88
Şekil 6.20.	Türev yöntemi ve teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayılarının karşılaştırılması	89
Şekil 6.21.	SP-3 örneği için topp ve diğ. (1980) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri.....	90
Şekil 6.22.	SP-3 örneği için Ledieu ve diğ. (1986) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri.....	90
Şekil 6.23.	SP-3 örneği için klasik yöntem ve TDR yöntemi ile hesaplanan boşluk oranı değerleri.....	92
Şekil 6.24.	Elektriksel iletkenlik için kritik voltaj değerleri	93
Şekil 6.25.	Deney Örneği-4 için yapılan elek analizi deney sonuçları.....	94
Şekil 6.26.	SP-4 örneği için teğet yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması	96
Şekil 6.27.	SP-4 örneği için türev yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması	97
Şekil 6.28.	SP-4 örneği için türev yöntemi ve teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayılarının karşılaştırılması	98
Şekil 6.29.	SP-4 örneği için Topp ve diğ. (1980) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri.....	99
Şekil 6.30.	SP-4 örneği için Ledieu ve diğ. (1986) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri.....	99
Şekil 6.31.	SP-4 örneği için Klasik yöntem ve TDR yöntemi ile hesaplanan boşluk oranı değerleri.....	101
Şekil 6.32.	Elektriksel iletkenlik için kritik voltaj değerleri	102

Şekil 7.1.	SP-1 türü kum örneği için klasik yöntemler ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayıları	114
Şekil 7.2.	SP-1 türü kum örneği için doyunluk ile Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayılarının karşılaştırılması	115
Şekil 7.3.	SP-1 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları	116
Şekil 7.4.	SP-1 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite değerleri	117
Şekil 7.5.	SP-2 türü kum örneği için klasik yöntemler ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayıları	126
Şekil 7.6.	SP-2 türü kum örneği için doyunluk ile Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayılarının karşılaştırılması	127
Şekil 7.7.	SP-2 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları	128
Şekil 7.8.	SP-2 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite değerleri	129
Şekil 7.9.	SP-3 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayıları	139
Şekil 7.10.	SP-3 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayıları	140
Şekil 7.11.	SP-3 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları	141
Şekil 7.12.	SP-3 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite değerleri	142
Şekil 7.13.	SP-4 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayıları	153
Şekil 7.14.	SP-4 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayıları	154
Şekil 7.15.	SP-4 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları	155
Şekil 7.16.	SP-4 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite değerleri	156

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Çeşitli malzemelerin dielektrik katsayıları.....	20
Tablo 3.2. Deney için hazırlanan prob konfigürasyonları.....	43
Tablo 6.1. SP-1 türü kum örneğine ait dane dağılımları.....	68
Tablo 6.2. SP-1 türü kum örneğine ait bazı geoteknik özellikler.....	68
Tablo 6.3. SP-1 türü kum örneğine ait regresyon katsayıları.....	73
Tablo 6.4. SP-1 türü kum örneğine ait elektriksel iletkenlik değerleri.....	75
Tablo 6.5. SP-2 türü kum örneğine ait dane dağılımları.....	77
Tablo 6.6. SP-2 türü kum örneğine ait bazı geoteknik özellikler.....	77
Tablo 6.7. SP-2 türü kum örneğine ait regresyon katsayıları.....	82
Tablo 6.8. SP-2 türü kum örneğine ait elektriksel iletkenlik değerleri.....	84
Tablo 6.9. SP-3 türü kum örneğine ait dane dağılımları.....	86
Tablo 6.10. SP-3 türü kum örneğine ait bazı geoteknik özellikler.....	86
Tablo 6.11. SP-3 türü kum örneğine ait regresyon katsayıları.....	91
Tablo 6.12. SP-3 türü kum örneğine ait elektriksel iletkenlik değerleri.....	93
Tablo 6.13. SP-4 türü kum örneğine ait dane dağılımları.....	95
Tablo 6.14. SP-4 türü kum örneğine ait bazı geoteknik özellikler.....	95
Tablo 6.15. SP-4 türü kum örneğine ait regresyon katsayıları.....	100
Tablo 6.16. SP-4 türü kum örneğine ait elektriksel iletkenlik değerleri.....	102
Tablo 6.17. Teğet yöntemi ile hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri ile etüv yardımıyla hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri arasındaki farklar.....	103
Tablo 6.18. Türev yöntemi ile hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri ile etüv yardımıyla hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri arasındaki farklar.....	104
Tablo 7.1. SP-1 türü kum örneği için permeabilite deney sonuçları.....	106
Tablo 7.2. SP-1 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda elde edilen permeabilite katsayısı değerleri.....	107
Tablo 7.3. SP-1 türü kum örneği için Chapuis (2004) eşitliği ile hesaplanan permeabilite katsayıları.....	108
Tablo 7.4. SP-1 türü kum örneği için özgül yüzey alanı hesabı.....	109
Tablo 7.5. SP-1 türü kum örneği için Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları.....	110
Tablo 7.6. %100 suya doymun SP-1 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları.....	111
Tablo 7.7. SP-1 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları.....	112
Tablo 7.8. SP-1 türü kum örneği için hesaplanan tüm permeabilite katsayıları.....	113
Tablo 7.9. SP-2 türü kum örneği için permeabilite deney sonuçları.....	118
Tablo 7.10. SP-2 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda elde edilen permeabilite katsayısı değerleri.....	119

Tablo 7.11. SP türü kum örneği için Chapuis (2004) denklemi ile hesaplanan permeabilite katsayıları	120
Tablo 7.12. SP-2 türü kum örneği için özgül yüzey alanı hesabı.....	121
Tablo 7.13. SP-2 türü kum örneği için Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları	122
Tablo 7.14. %100 suya doymun SP-2 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları	124
Tablo 7.15. SP-2 SP türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları	124
Tablo 7.16. SP-2 türü kum örneği için hesaplanan tüm permeabilite katsayıları	125
Tablo 7.17. SP-3 türü kum örneği için permeabilite deney sonuçları	131
Tablo 7.18. SP-3 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda elde edilen permeabilite katsayısı değerleri	131
Tablo 7.19. SP-3 türü kum örneği için Chapuis (2004) denklemi ile hesaplanan permeabilite katsayıları	133
Tablo 7.20. SP-3 türü kum örneği için özgül yüzey alanı hesabı.....	134
Tablo 7.21. SP-3 türü kum örneği için Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları	135
Tablo 7.22. %100 suya doymun SP-3 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları	136
Tablo 7.23. SP-3 tipi türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları	137
Tablo 7.24. SP-3 türü kum örneği için hesaplanan tüm permeabilite katsayıları	138
Tablo 7.25. SP-4 türü kum örneği için permeabilite deney sonuçları	144
Tablo 7.26. SP-4 türü kum örneği için boşluk oranı-sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda elde edile permeabilite katsayısı değerleri.....	145
Tablo 7.27. SP-4 türü kum örneği için Chapuis (2004) Denklemi ile hesaplanan permeabilite katsayıları	146
Tablo 7.28. SP-4 türü kum örneği için özgül yüzey alanı hesabı.....	147
Tablo 7.29. SP-4 türü kum örneği için Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları	148
Tablo 7.30. %100 suya doymun SP-4 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları	150
Tablo 7.31. SP-4 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları	150
Tablo 7.32. SP-4 türü kum örneği için hesaplanan tüm permeabilite katsayıları	152

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

a	: Cam borunun enine kesit alanı
A	: Enine kesit alanı
c	: Işık hızı
C	: Prob konfigürasyonuna bağlı katsayı
C_c	: Derecelenme katsayısı
C_s	: Şekil faktörü
C_u	: Üniformluk katsayısı
d	: Elek çapı
d_0	: Prob üzerinde bulunan metal çubuğun çapı
d_1	: İki metal çubuk arasındaki uzaklık
d_{10}	: Zeminin ağırlıkça %10'unun geçtiği elek çapı
d_{30}	: Zeminin ağırlıkça %30'unun geçtiği elek çapı
d_{60}	: Zeminin ağırlıkça %60'ının geçtiği elek çapı
e	: Boşluk oranı
E	: Elastisite modülü
e_{max}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
F	: Formasyon faktörü
f	: Frekans
f_t	: Sıcaklığa bağlı katsayı
G_s	: Özgül ağırlık
h	: Hidrolik yük
i_h	: Hidrolik eğim
K_0	: Boşluğun dielektrik iletkenliği
k_0	: Boşluk şekil faktörü
K_a	: Zeminin dielektrik katsayısı
$K_{a,w}$: Suyun dielektrik katsayısı
K_{abs}	: Absorbe suyun dielektrik katsayısı
K_c	: Ölçüm probuna bağlı bir katsayı
k_h	: Permeabilite katsayısı
K_r	: Malzemenin eşdeğer dielektrik iletkenliği
l	: Birim uzunluk
L	: Zemin örneğinin yüksekliği
L_a	: Probun görünen boyu
L_p	: Probun boyu
m_1	: Piknometre ağırlığı
m_2	: Piknometre ile kuru zemin örneğinin ağırlığı
m_3	: Piknometre ile zemin örneğinin ağırlığı
m_4	: Piknometre ile suyun ağırlığı
m_k	: Kap ağırlığı
M_s	: Zemin danelerinin ağırlığı

n	: Porozite
P	: Akım kanallarının çevresi
P_b	: Basınç
q	: Boşalım oranı
Q	: Debi
$q_{dış}$: Zemin örneğinin dışına akım
$q_{iç}$: Zemin örneğinin içine akım
R	: Akımın gerçekleştiği yöndeki tüpün yarıçapı
r	: Gözlem kuyusunun sondaj kuyusuna uzaklığı
R_H	: Karakteristik hidrolik akım yarıçapı
R_z	: Örneğin direnci
S	: Doygunluk
S_0	: Özgül yüzey alanı
S_s	: Zemin içinde bulunan kumun ağırlıkça yüzdesi
T	: Tortuosite katsayısı
t	: Zaman
T_a	: Sinyalin havadan yansıyıp geri dönme süresi
T_s	: Sinyalin fırında kurutulmuş zeminden yansıyıp geri dönme süresi
T_z	: Sinyalin zeminden yansıyıp geri dönme süresi
v	: Elektromanyetik dalganın görünen hızı
V	: Hacim
V_0	: Başlangıç voltajı
V_1	: Probun başlangıç noktasından yansıyan voltaj
V_2	: Probun bitiş noktasından yansıyan voltaj
V_a	: Havanın hacmi
V_b	: Boşlukların hacmi
V_f	: Final voltajı
V_g	: Belirli bir sürede boşalan suyun hacmi
V_i	: Başlangıç voltajının yarısı
v_i	: Suyun akış hızı
v_{ort}	: Borunun içinden geçen suyun akış hızı
V_r	: Yansıyan voltaj
V_s	: Katıların hacmi
V_t	: Toplam voltaj
V_w	: Suyun hacmi
W_1	: Likit limit
Z_c	: Karakteristik empedans
Z_p	: Koaksiyel iletim hattının hava ile dolu haldeki empedansı
Z_s	: Zeminin empedansı
Z_{sin}	: Sinyal üreticinin empedansı
μ	: Viskosite
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
α	: Azalım katsayısı
β	: Faz sabiti
γ	: Yayılım katsayısı
γ_p	: Boşluklarda bulunan akışkanın birim hacim ağırlığı
ϵ'	: Rölatif dielektrik iletkenliğin gerçek kısmı
ϵ''	: Rölatif dielektrik iletkenliğin sanal kısmı

θ	: Hacimsel su içeriği
ρ	: Yansıma katsayısı
ρ_a	: Zeminin direnci
ρ_k	: Kuru yoğunluk
ρ_{max}	: Zeminin maksimum yoğunluğu
ρ_{min}	: Zeminin minimum yoğunluğu
ρ_w	: Suyun yoğunluğu
ρ_{wsat}	: Doyuran sıvının direnci
σ_a	: Zeminin elektriksel iletkenliği
σ_{dc}	: Bulk elektriksel iletkenlik
σ_p	: Boşluklarda bulunan sıvının elektriksel iletkenliği
σ_t	: Doygun zeminin elektriksel iletkenliği
σ_w	: Suyun elektriksel iletkenliği
ω	: Açısal frekans

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzemeler Derneği)
TDR	: Time Domain Reflectometry (Zaman Tanım Alanında Yansıma)
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

ZEMİN PERMEABİLİTESİNİN ELEKTRİKSEL ANALOJİ İLE BELİRLENMESİ

ÖZET

Geoteknik problemlerin çözümü aşamasında zemine ait birçok parametrenin bilinmesi gerekmektedir. Permeabilite katsayısı zeminin en büyük aralıkta değişen ve belirlenmesi en zor parametrelerinden biridir. Permeabilite katsayısının hızlı ve doğru olarak hesaplanması Geoteknik Mühendisliği problemlerinin çözümü konusunda büyük katkı yapacağı açıktır. Tez çalışması kapsamında permeabilite katsayısının, zemine ait elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak hesaplanması amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk aşamada hidrolik iletkenlik ve elektriksel iletkenlik arasındaki matematiksel ilişki gösterilmiştir. İkinci aşamada ise bu ilişkinin doğruluğu deneysel çalışma yapılarak irdelenmiştir. Elektriksel akım karakteristiklerinin belirlenmesi için, Zaman Tanım Alanında Yansıma (Time Domain Reflectometry, TDR) yöntemi kullanılmıştır. TDR yöntemi, cihaz tarafından üretilen bir sinyalin bir iletim hattı boyunca ilerlemesi ve empedans eşleşmezliği oluşması durumunda geri yansıyan sinyalin ölçülmesi ilkesine dayanmaktadır. Deneysel çalışma kapsamında 4 farklı zemin örneği kullanılmıştır. İlk olarak zeminlerin belirli fiziksel ve geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Ardından zemin örnekleri 11 farklı su içeriğinde kompaksiyon kalıplarına sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan zemin örneklerinden TDR ölçümleri alınarak elektriksel akım karakteristikleri hacimsel su içeriği ve kuru yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Elektriksel akım karakteristikleri belirlenen her bir zemin örneği 5 farklı boşluk oranında permeabilite kalıplarına yerleştirilmiş ve sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Permeabilite deneyleri ile eş zamanlı olarak TDR ölçümleri alınmış ve bu ölçümler kullanılarak permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Elektriksel yöntemlerle hesaplanan permeabilite katsayıları, alışlagelmiş yöntemlerle hesaplanan permeabilite katsayıları ile karşılaştırılarak sonuçlar irdelenmiştir. Yapılan tüm çalışmaların sonucunda elektriksel yöntemlerin permeabilite katsayılarının tahmin edilmesi konusunda hızlı ve kullanılabilir bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kuru Yoğunluk, Permeabilite Katsayısı, Su İçeriği, TDR.

DETERMINATION of SOIL PERMEABILITY with ELECTRICAL ANALOGY

ABSTRACT

Coefficient of soil permeability varies over a wide range, and its determination in the field can be cumbersome and time consuming. It is clear that rapid and accurate determination of the coefficient of permeability will make a significant contribution to Geotechnical Engineering. In this thesis, it is aimed to determine the coefficient of permeability with the use of the soil electrical current flow characteristics of the soils. For this purpose, the mathematical relationship between the hydraulic and electrical conductivities of soils is presented in the first stage. In the next stage, the validity of the relationship is investigated through experimental studies using Time Domain Reflectometry (TDR). TDR is based on monitoring the propagation of an electromagnetic signal produced by the device, along a transmission line and measuring the reflected signal caused by the impedance mismatch. Four soil types were included in the experimental studies. Firstly, some physical and geotechnical properties were identified. Subsequently, soil specimens with 11 different water content values were compacted in the moulds. TDR measurements were performed on the compacted specimens and electrical properties, volumetric soil water content and bulk density values were obtained. Each of the specimens with known electrical characteristics at five different void ratios was placed in the permeability mould, and constant-head permeability tests were performed. TDR measurements were taken simultaneously with the permeability tests and coefficient of permeability was calculated. The coefficient of permeability obtained by the TDR was compared to that of the value calculated from the conventional methods. Based on the findings of the experimental program, the TDR approach of measuring the coefficient of permeability is concluded as rapid and usable.

Keywords: Bulk density, Coefficient of Permeability, Water Content, TDR.

GİRİŞ

Zemin içerisinde bulunan su, birçok geoteknik problemin ana nedenidir. Bu sebeple zemin su içeriği, yer altı su seviyesinin değişimi, akış miktarı gibi su ile ilgili birçok parametrenin bilinmesi oldukça önemlidir. Bu parametrelerden biri olan zemin permeabilite (geçirimsizlik) katsayısının doğru olarak belirlenmesi ayrı bir önem taşımaktadır.

Permeabilite katsayısı laboratuvarında geleneksel olarak düşük seviyeli ve sabit seviyeli permeabilite deneyleri ile elde edilmektedir. Alternatif olarak konsolidasyon deneyi ve üç eksenli kesme deneyinin konsolidasyon aşamasında da dolaylı olarak permeabilite katsayısı belirlenebilmektedir. Ayrıca arazi koşullarında kuyular açılarak, bu kuyulara sızan suların kuyu içinde belli bir zamanda ne kadar yükseldiği ölçülerek de permeabilite katsayısı bulunabilmektedir.

Laboratuvarında yapılan permeabilite deneyleri yapılması oldukça özen isteyen ve yapım aşamaları sırasında hata yapılmaya elverişli deneylerdir. Deneyi yapacak teknisyenin son derece eğitilmiş olması önemlidir. Bütün şartlar sağlanması durumunda bile arazideki durumu bire bir örneklemenin oldukça zor olmasından kaynaklanan hatalar deneyin doğruluğunu etkileyecektir. Arazi deneyleri laboratuvar deneylerine göre daha doğru sonuçlar vermekle birlikte hem fazla emek harcanması hem de fazla maliyet sebebiyle küçük bütçeli projelerde çok fazla tercih edilmemektedir.

Ayrıca gerek laboratuvar deneyleri gerekse arazi deneyleri oldukça uzun sürelerde sonuçlanan deneyler oldukları için tekrarlanmaları hem zaman hem maliyet açısından istenilen bir durum değildir. Bu sebeple zamanın önemli olduğu büyük ölçekli projelerde, deney süresinin uzunluğu ve tekrarlanmasının zorluğu alternatif yöntemlerin üretilmesini kaçınılmaz kılmıştır. Bu alternatif yöntemlerden bir tanesi de hem hızlı olması hem de tekrarlanabilme kolaylığından dolayı elektriksel yöntemlerdir. Bu yöntemlerin ana prensibi zeminlerin elektriksel iletkenliğine bağlı

olan karakteristik özelliklerinin bulunmasıdır. Elektriksel akım karakteristikleri, zeminlerin boşluk oranı, suya doygunluğu, mineralojisi gibi birçok özelliğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Elektriksel ölçüm yöntemleri arazi şartlarında hızlı bir şekilde sonuç vermesi sebebiyle öne çıkan yöntemlerden biridir. Sondaj boruları vasıtasıyla zeminin çeşitli kademelerinden sondaj çalışması yapıldığı sırada ölçüm alabilmek ve alınan bu ölçümler vasıtasıyla zeminin geçirgenliği hakkında sondaj sırasında bilgi almak mümkündür.

Bu tez çalışması kapsamında elektriksel ölçüm yöntemlerinden biri olarak kullanılan ve İngilizce “Time Domain Reflectometry” kelimelerinin baş harflerinden oluşan TDR yöntemi kullanılmıştır. TDR cihazı yardımıyla zeminden alınan yansıma formları elde edilmiş ve bu yansıma formları işlenerek permeabilite katsayısı belirlenmiştir.

Birinci bölümde zemin permeabilitesi ve permeabilite katsayısı hakkında genel bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde permeabilite katsayısının bulunabilmesi amacıyla alışlagelmiş olarak yapılan laboratuvar ve arazi deneyleri anlatılmıştır. Kaynaklar incelenerek permeabilite katsayısının tahmin edilebilmesi amacıyla yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde TDR yöntemi açıklanmıştır. Yöntemin hangi prensiplere göre çalıştığı ve kullanılabilirliği hakkında bilgi verilmiştir. Ardından geoteknik mühendisliğinde kullanım alanları, geoteknik mühendisliğinde sıklıkla karşılaşılan su içeriği, kuru yoğunluk gibi zemine ait bazı karakteristik parametrelerin nasıl bulunacağı ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde elektriksel iletkenlik ve hidrolik iletkenlik ile ilgili bilgiler verilmiştir. Elektriksel iletkenlik ve hidrolik iletkenlik arasında var olan matematiksel ilişki irdelenerek zemin permeabilite katsayısının elektriksel zemin karakteristikleri kullanılarak nasıl bulunabileceği irdelenmiştir. Geçmişte yapılan

alışmalar incelenmiştir. Bu alışmalar sonucunda bulunan eşitlikler ile elektriksel akım karakteristikleri arasındaki ilişki kurularak eşitlikler yeniden dzenlenmiştir.

Beşinci bölümde geçmişte yapılan çalışmaları ve tez kapsamında konulan hedefe bağlı olarak oluşturulan deney programı ve deneysel çalışmada bulunması hedeflenen parametrenin nasıl hesaplanacağı, nasıl bir deneysel yöntem uygulanacağı ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Altıncı bölümde tez çalışmasında kullanılan zemin örneklerinin belirli geoteknik özellikleri ve elektriksel akım karakteristiklerinin bulunması amacıyla yapılan deneyler anlatılmıştır. Elek analizi, özgül ağırlık tayini, kompaksiyon Deneyleri, organik madde tayini gibi geoteknik mühendisliğinde sıklıkla kullanılan deneylerden ve TDR cihazı kullanılarak zeminlere ait elektriksel akım karakteristiklerini bulmak amacıyla yapılan elektriksel deneylerden elde edilen veriler sunulmuştur.

Yedinci bölümde ise permeabilite katsayısının bulunması amacıyla yapılan deneysel çalışmalar ve bu çalışmalar sonucunda elde edilen permeabilite katsayısı değerleri irdelenmiştir. Permeabilite katsayısı hem klasik hem de elektriksel yöntemler kullanılarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

Tez alışması kapsamında ortaya koyulan veriler ışığında elde edilen sonuçlar sekizinci bölümde tartişılmıştır. Ayrıca bu bölümde yöntemin kullanılabilirliği ve gelecekte yapılabilircek çalışmalar da tartişılmıştır.

1. PERMEABİLİTE

Zeminde bulunan su, birçok zemin probleminin ana nedenidir. Geoteknik mühendisliğinde suyun varlığından dolayı oluşan problemler iki açıdan çok önemlidir. Bunlardan ilki suyun, zemin kütlesi içerisindeki boşluk veya gözeneklerdeki akışı ikincisi ise suyun gözeneklerde oluşturduğu basınç veya gerilme durumlarından kaynaklanan sorunlardır.

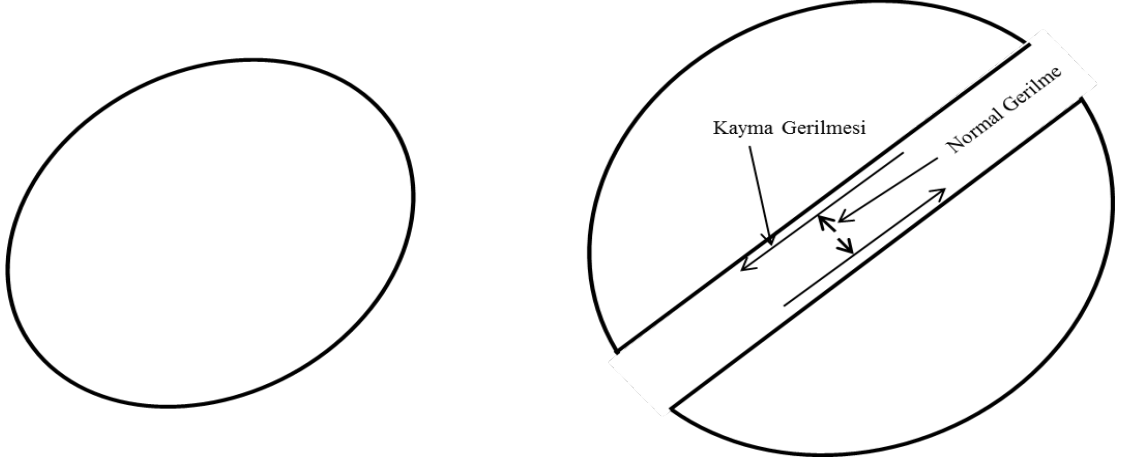
1.1. Su Akışı

Temel akışkanlar mekaniğinden de hatırlanacağı gibi suyun akışı birkaç yoldan tanımlanabilir. Akış şartlarının zaman içinde sabit veya değişken oluşuna göre dengeli veya dengesiz olmak üzere iki çeşittir. Ayrıca akış bir, iki veya üç boyutlu olarak da sınıflandırılabilir. Basınç, hız, ısı ve benzeri akışkan parametrelerin akış yönüne dik herhangi bir en kesit düzleminde sabit olduğu akışa bir boyutlu akış denilmektedir. Bir boyutlu akışta bir bölümden diğer bölüme geçerken bu parametrelerin değişmesi mümkündür. İki boyutlu akışta akışkan parametreleri birbirine paralel düzlemlerde aynıdır. Üç boyutlu akışta ise akışkan parametrelerinin üç koordinat yönünde de değişmesi mümkün olmaktadır. Geoteknik mühendisliğindeki analizlerde akış problemleri genellikle bir veya iki boyutlu olarak kabul edilir ve çoğu zaman amaç için yeterli olmaktadır.

Akışkanlar basınç altında elastik olarak sıkışabilmektedirler. Moleküller arasındaki en yüksek mesafe gazlardadır, sıvılarda bu mesafe daha az katılarda ise en azdır. Bu sebepten dolayı gazlarda sıkışabilme en yüksek iken sıvılarda daha az katılarda ise en az seviyede olmaktadır. Şekil 1.1'de rijit bir metalden yapılmış silindir ile pistonun arasında bulunan V hacminde bir akışkan olduğunu düşünürsek, akışkana etki eden basınç dP kadar arttırıldığında akışkanın hacmi de dV kadar azalacaktır. Buna göre elastisite modülü Denklem (1.1)'deki gibi tanımlanabilir;

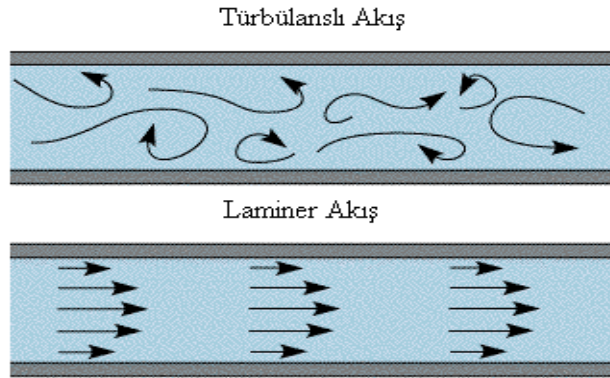
$$E = - \frac{dP}{dV/V} \quad (1.1)$$

Su için tipik bir değer olan $E=20000 \text{ kg.cm}^{-2}$ 'dir. Akışkan sıkışabildiğine göre yoğunluğu da sabit kalmayacaktır ve akışkan sıkışıkça yoğunluğu da artacaktır. Akışkan birçok mühendislik probleminde “sıkışmayan akışkan” olarak kabul edilmektedir. Düşük gerilme düzeylerinde yoğunluk değişimleri ihmal edilebileceğinden dolayı zemin içerisindeki su akışı da sıkışmaz olarak kabul edilmektedir.



Şekil 1.1. Basınç etkisinde oluşan gerilmeler

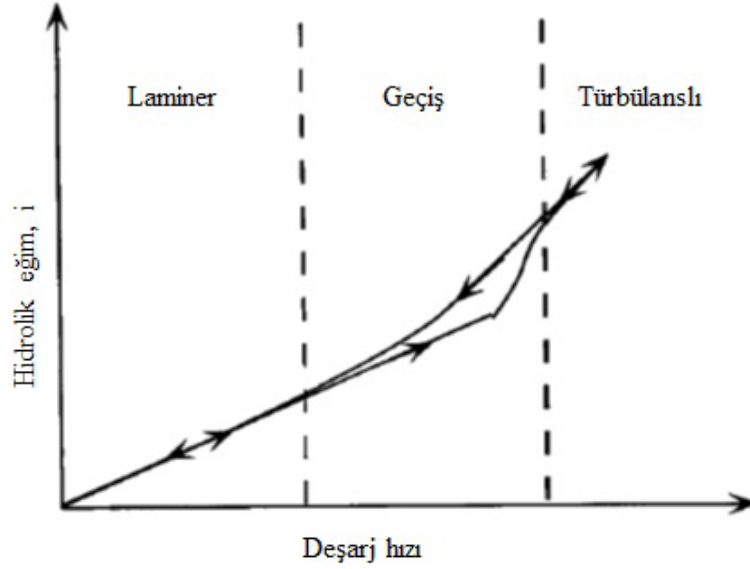
Su akışı Şekil 1.2’de görülebileceği gibi laminer veya türbülanslı akış olarak da tanımlanabilmektedir. Laminer akışta akım, birbirine paralel tabakalar halinde oluşmaktadır. Türbülanslı akışta ise gelişigüzel hız değişimleri sıvının karışmasına neden olur ve içsel bir enerji soğrulması söz konusu olmaktadır.



Şekil 1.2. Laminer ve türbülanslı akışın şematik olarak gösterimi

Laminer ve türbülanslı akım sırasında bir geçiş durumu oluşmaktadır. Şekil 1.3'te artan akım hızı ile beraber hidrolik eğimdeki değişim gösterilmiştir. Hidrolik eğim, birim uzunluk başına basınç kaybı olarak tanımlanmaktadır ve Denklem (1.2)'de verilmiştir.

$$i_h = \frac{h}{l} \quad (1.2)$$



Şekil 1.3. Laminer ve Türbülanslı akış (Taylor, 1948)

Akışın laminer olduğu durumlarda artan hıza bağlı olarak enerji veya basınç kaybı da artmaktadır. Geçiş bölgesi bir kere geçildikten sonra içsel eddy akımları veya karışmaya bağlı olarak enerji kaybı daha da yüksek oranlarda gerçekleşmektedir ve hız ile hidrolik eğim arasındaki ilişki de doğrusal olarak oluşmamaktadır. Şekil 1.3'te görüldüğü gibi türbülanslı akım bölgesinde hız azalsa bile akış laminer bölgeye geçinceye kadar türbülanslı olarak akmaya devam etmektedir.

Zemin problemlerinde akış hızı çok düşüktür bu sebepten akış laminer olarak kabul edilmektedir. Akışın laminer olarak kabul edilmesiyle birlikte Şekil 1.3'te de görüldüğü gibi akış hızı ile hidrolik eğim arasında doğru orantı oluşmaktadır. Darcy yasası olarak bilinen ve Denklem (1.3)'te verilen eşitlik ile zemin içindeki suyun akış hızı tanımlanmıştır.

$$v_h = k_h i_h \quad (1.3)$$

Bu eşitlikte k_h , zeminin permeabilite katsayısı, i_h ise hidrolik eğimdir. Ayrıca kütlenin korunumu kanununa göre sıkışmaz muntazam akış için süreklilik denklemi ise Denklem (1.4)'te verilmiştir.

$$q_h = v_1 A_1 = v_2 A_2 = \text{sabit} \quad (1.4)$$

Burada q_h , boşalım oranını, v_1 ve v_2 , zemin içerisindeki suyun hızını, A_1 ve A_2 , zeminin enine kesit alanını temsil etmektedir.

Darcy (1856) temiz kumlardaki akım hızının hidrolik ile doğru orantılı olduğunu deneysel olarak göstermiştir. Denklem (1.2), (1.3) ve (1.4)'te verilen eşitlikler bir arada kullanılarak ortaya çıkarılan eşitlik Denklem (1.5)'te verilmiştir. Bu eşitlik literatürde "Darcy Yasası" olarak ifade edilmektedir.

$$q_h = v_h A = k_h i_h A = k_h \frac{\Delta h}{L} A \quad (1.5)$$

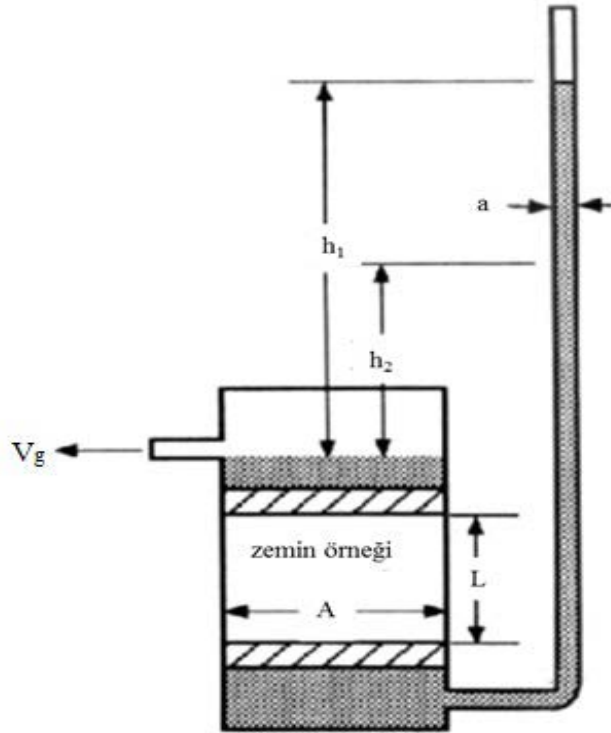
Burada q_h , enine kesit alanı A boyunca toplam akım oranı, k_h ise permeabilite katsayısıdır.

2. PERMEABİLİTE KATSAYISININ ÖLÇÜLMESİ

Permeabilite katsayısı laboratuvarında alışlagelmiş olarak sabit seviyeli permeabilite ve düşen seviyeli permeabilite deneyleri kullanılarak belirlenmektedir. Bu yöntemlerin dışında yine laboratuvarında dolaylı olarak konsolidasyon deneyi ve üç eksenli kesme deneylerinde konsolidasyon aşamasında da belirlenebilmektedir. Arazi şartlarında ise genel olarak kuyu yöntemleri kullanılmaktadır.

2.1. Sabit Seviyeli Permeabilite Deneyi

Permeabilitesi yüksek olan yani permeabilite katsayısı 10^{-4} cm.sn⁻¹'den büyük olan zeminler için sabit seviyeli permeabilite deneyi yapılmaktadır. Sabit seviyeli permeabilite deney düzeneği şematik olarak Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Sabit seviyeli permeabilite deney düzeneği

Sabit seviyeli permeabilite deneyindeki amaç zemin örneğinden belli bir süre içinde ölçülebilir hacimde suyun geçirilmesidir. Deney süresince su seviyesi sabit tutulan belirli bir h yüksekliğine sahip su yükü, doymun bir örnekten geçirilmektedir. Geçen suyun hacmi, V_g , ölçüm süresine oranlanarak debi, Q , bulunabilir.

$$Q = \frac{V_g}{t} \quad (2.1)$$

Permeabilite kalıbının içindeki zeminin kesit alanı (A) deney süresince değişmemektedir. Bu nedenle zemin içerisinde geçen suyun hızını Denklem (2.2)'de verildiği gibi tanımlayabiliriz.

$$v_h = \frac{Q}{A} \quad (2.2)$$

Denklem (1.3)'de Darcy yasasına göre zemin içindeki suyun hızı verilmiştir. Denklem (1.3) ve Denklem (2.2) beraber kullanıldığında Denklem (2.3)'de verilen eşitlik söylenebilir.

$$k_h = \frac{Q}{Ai_h} \quad (2.3)$$

Denklem (1.2)'de tanımlanan hidrolik eğim eşitliği ve Denklem (2.1)'de verilen debi eşitliği, Denklem (2.3)'de yerine konulduğunda;

$$k_h = \frac{V_g L}{hAt} \quad (2.4)$$

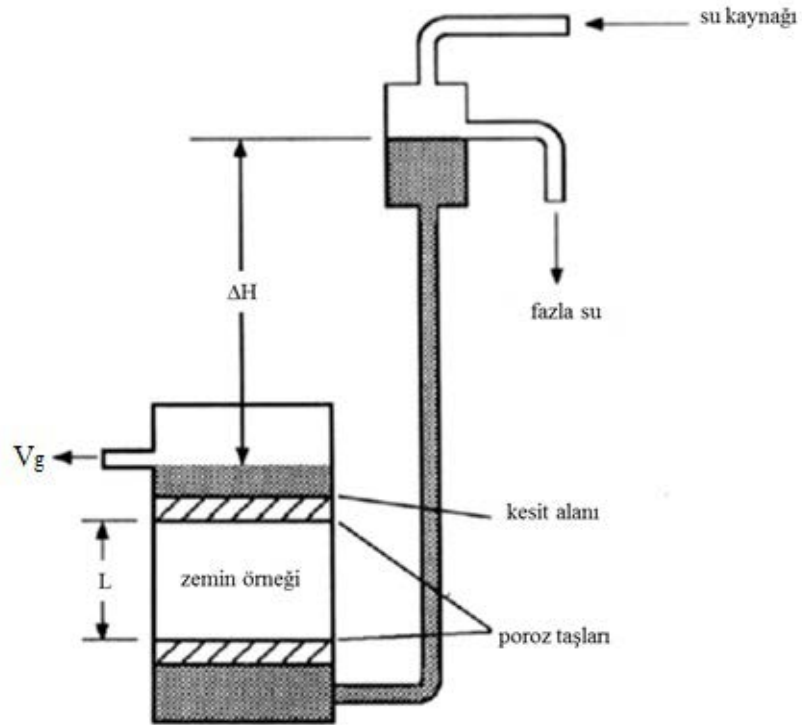
halini alır. Burada k , permeabilite katsayısını, V_g , t zamanında toplam boşanan suyun hacmini, A , zemin örneğinin enine kesit alanını, L , zemin örneğinin yüksekliğini, h , etkiyen hidrolik yükü göstermektedir.

2.2. Düşen Seviyeli Permeabilite Deneyi

Sabit seviyeli permeabilite deneyi kullanıldığında eğer zemin içinden su akışı ölçülebilir büyüklükte gerçekleştirilemiyorsa zeminin az geçirimli ($k < 10^{-4}$ cm.sn⁻¹)

olduđu anlařılmaktadır ve bu durumda dűřen seviyeli permeabilite deneyi yapılmaktadır.

Dűřen seviyeli permeabilite deney dűzeneđi Őekil 2.2’de Őematik olarak verilmiřtir. Zemin őrneđi, permeabilite kalıbına yerleřtirildikten sonra %100 suya doygun hale gelinceye kadar doyurulma iřlemi devam etmektedir. Zemin içerisinden geçirilecek su ince bir tűp vasıtasıyla permeabilite kalıbının alt kısmından zemine uygulanır. Zemin suya doygun hale getirildikten sonra cam tűpűn içindeki suyun belirli bir t sűresinde ne kadar indiđi izlenir ve kaydedilir. Bu deneyin avantajı eđer zemin az geçirimli ise cam tűpűn çapı deđiřtirilerek cam tűpte meydana gelen dűzey deđiřimlerinin daha ayrıntılı olarak gűrűlebilmesidir. Sűreklilik kuralına gűre cam tűpten bořalan su hacmi zemin őrneđi içinden geçerek kalıbın űst kısmında bulunan drenaj boruları yardımıyla çıkmalıdır. Bu olayın gerçekleřmemesi durumunda zemin őrneđinin doygunluđa henűz ulařmamıř olduđu anlařılmaktadır ve bu durumda ۆlűm sonuçları hatalı olacaktır. Bu yűzden zeminin tűműyle doygun hale getirilmesi ve su akıřının kararlı bir durumda olması deneyin dođruluđu açısından çok ۆnemlidir.



Őekil 2.2. Dűřen seviyeli permeabilite deney dűzeneđi

Düşen seviyeli permeabilite deneyinde, düşey halde bulunan cam borudaki suyun alçalma hızı,

$$v_h = -\frac{dh}{dt} \quad (2.5)$$

'dır. Zemin örneğinin içine akım,

$$q_{iç} = -a \left(\frac{dh}{dt} \right) \quad (2.6)$$

'dir. Darcy yasasından Denklem (1.5) yardımıyla dışarı akımı;

$$q_{dış} = k_h i_h A = k_h \left(\frac{h}{L} \right) A \quad (2.7)$$

olarak gösterilebilir. Bu durumda süreklilik yasasına göre $q_{iç} = q_{dış}$ olarak tanımlanabilir.

Değişkenleri ayırıp sınır değerlerine göre integralleri alınırsa;

$$-a \int_{h_2}^{h_1} \frac{dh}{h} = k_h \frac{A}{L} \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (2.8)$$

Denklem (2.8) aşağıdaki,

$$k_h = \frac{aL}{A\Delta t} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (2.9)$$

şekli alacaktır. Eşitlik \log_{10} tabanında yazıldığında ise Denklem (2.10)'de verildiği gibi gösterilebilir.

$$k_h = 2,3 \frac{aL}{A\Delta t} \log_{10} \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (2.10)$$

Burada a , düşey cam tüpün alanı, A , zemin örneğinin enine kesit alanı, L , zemin örneğinin yüksekliği, Δt , düşey cam tüpün içinde su seviyesinin h_1 'den h_2 'ye alçalması için geçen zamanı göstermektedir.

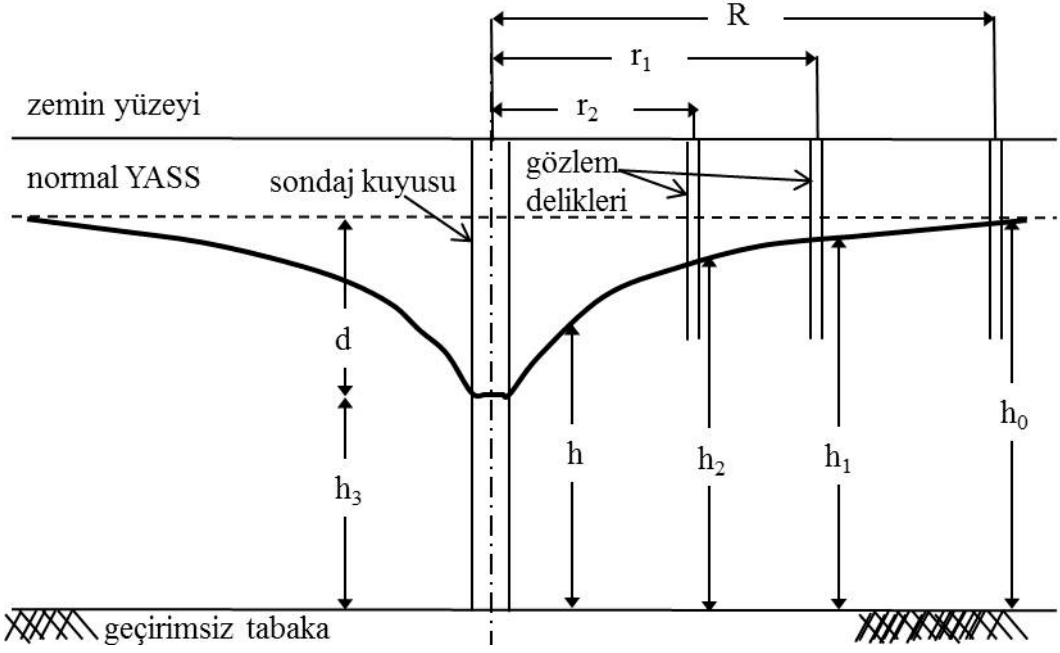
2.3. Permeabilite Katsayısının Arazide Bulunması

Gerek zemin örneğinin homojenliği gerekse örnek boyutlarından dolayı arazi koşullarının laboratuvarında tam anlamıyla oluşturulması oldukça zordur. Bu bilgiler ışığında, permeabilite katsayısının en doğru olarak arazi koşullarında bulunabileceği söylenebilir. Arazi ölçümlerinde yer altı su seviyesinin durumu, ortamın türü ve özelliği, ölçüm yapılacak bölgenin derinliği, zeminin geçirimsizliği ve ölçüm bölgesinin anizotropluğu gibi bazı etkenler önem kazanmaktadır. Bu özelliklere bağlı olarak arazi deneyleri planlanmaktadır. Su bulunmayan ortamlarda kuyu içine su yollayarak, geçirimsizliğin elverişli olmadığı durumlarda ise düşen seviyeli deneyler tercih edilmektedir. Genel olarak arazi koşullarında genellikle sabit seviyeli olarak yapılır. Şekil 2.3'de tipik bir örnek olarak suyun dışarı çekildiği ölçüm yöntemi gösterilmektedir. Bu deneyde akifer yatay, homojen ve değişmez kalınlıkta olduğu kabul edilmekte, ölçüm kuyusu geçirimsiz tabakaya indirilmekte ya da belirlenen penetrasyon derinliğinde bırakılabilmektedir. Ölçüm kuyusundan değişik radyal uzaklıklarda iki veya daha fazla gözlem kuyusu açılır. Ölçüm kuyusundan su çekme hızı burada düzeyin değişmediği duruma ayarlanır. Buna denge debisi denmektedir. Denge debisinde pompaj sürdürülürse gözlem kuyularında su düzeyinin belirli derinliğe çökerek sabit kaldığı görülecektir. Dupuit hipotezine göre bu durumda hidrolik eğim, yani çökmüş yer altı su seviyesinin eğimi (dh/dr) olacağından debi Darcy yasasından,

$$Q = ak_h i_h = 2\pi r h k_h \left(\frac{dh}{dr} \right) \quad (2.11)$$

olarak tanımlanmaktadır. Denklem düzenlenerek integrali alındığında geçirimsizlik katsayısı bu eşitlik yardımıyla kolayca bulunabilmektedir.

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \left(\frac{2\pi k_h}{Q} \right) \int_{h_1}^{h_2} h dh \quad (2.12)$$



Şekil 2.3. Geçirimsiz tabaka üzerindeki su çekilmesiyle ölçülen geçirimsizlik

$$k_h = \frac{Q \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{\pi(h_0^2 - h_2^2)} \quad (2.13)$$

Burada k_h , permeabilite katsayısı, Q , suyun debisi, r_1 ve r_2 , gözlem kuyularının sondaj kuyusuna uzaklığı, h_0 ve h_2 , gözlem kuyularındaki suyun yüksekliğini göstermektedir.

Geçirimsizliğin yerinde ölçümünü gerektiren bir önemli durumda atık suların ve zararlı maddeler içeren sıvıların zemine ne denli girecekleri, girdiklerinde nasıl hareket edecekleridir.

3. TDR YÖNTEMİ VE KULLANIM ALANLARI

Zeminlerin dielektrik özelliklerine bağlı olarak, su içeriğinin dolaylı olarak belirlendiği yöntemlerdir. Çeşitli türevleri de var olan dielektrik yöntemlerin temel yaklaşımı zeminin dielektrik katsayısının belirlenmesidir.

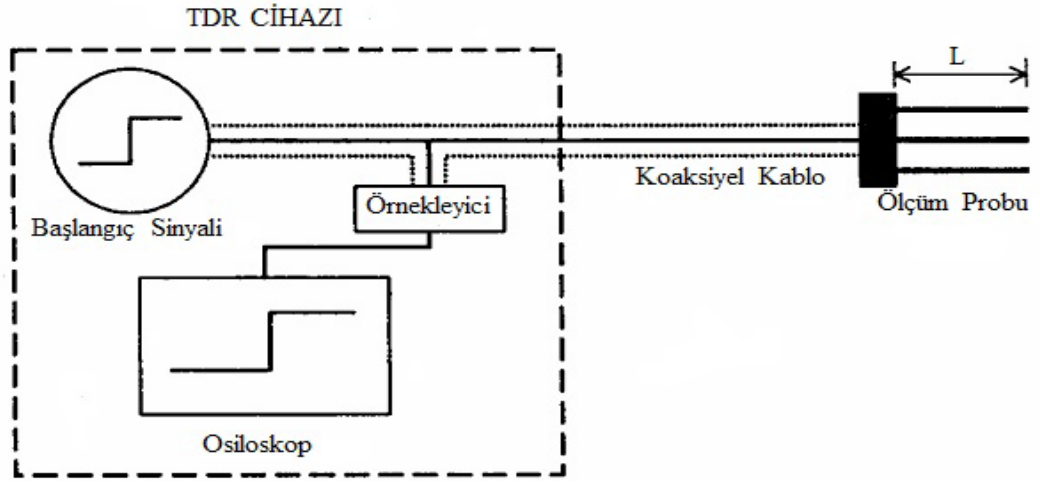
Zeminin içine gömülen metal çubuklar aracılığıyla elektromanyetik bir dalganın zemin üzerinden geçiş hızının belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Zemin ortamı boyunca ilerleyen elektromanyetik dalganın hızı zeminin dielektrik katsayısına bağlıdır. Dielektrik katsayısının artmasıyla iletim hızı yavaşlamaktadır. Zemin hava, mineraller, organik partiküller ve sudan oluşan kompozit bir yapıdadır. Zemin bileşenleri farklı dielektrik katsayılarına sahip olup hava 1 değerine, su 80 değerine ve daneler ise 2 ile 4 arasında bir değere sahip olur. Suyun dielektrik katsayısının diğerlerine göre oldukça yüksek oluşu aslında zemin-su-hava karışımı olan zemindeki ölçülen dielektrik katsayısının çok büyük ölçüde suyun miktarı ile ilgili olduğu anlamına gelmektedir. Dielektrik katsayısı belirlenen zeminin laboratuvar çalışmalarıyla kurulmuş olan ampirik bağıntılar yardımıyla zeminlerin su içerikleri belirlenebilir.

3.1. TDR Yöntemi

Mühendislik uygulamalarında TDR yöntemi oldukça uzun bir süredir kullanılmaktadır. İlk olarak kablo Deneylerinde 1930'lu yıllarda bilinen bir teknik haline gelmiştir. Fiziksel prensipleri oldukça basittir. Bilinen bir iletim hattı boyunca yollanan elektromanyetik sinyalde empedans değişikliği olmadığı takdirde her hangi bir yansıma da oluşmayacaktır. Eğer hat üzerinde bir empedans farklılığı varsa yani iletim hattında bir süreksizlik varsa sinyalin bir kısmı o noktadan geriye doğru yansıyacaktır. Yansıyan sinyal kullanılarak hasarın hangi noktada ve hangi büyüklükte olduğu bu teknik vasıtası ile bulunabilmektedir (Cerny, 2009). Yöntem günümüzde geoteknik, hidroloji, inşaat, tarım, malzeme Deneyleri ve havacılık gibi

alanlarda geniş ölçekli bir uygulama sahasında kullanılmaktadır(Hartebrodt ve Kabitzsch, 2004).

Örnek bir TDR sistem konfigürasyonu Şekil 3.1’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi TDR cihazı başlangıç sinyalini üretecek bir örnekleyiciye, iletim hattından yansiyacak dalga formunu görüntüleyecek bir osiloskoba, üretilen sinyalin iletimini sağlayacak bir koaksiyel kabloya ve ölçümde kullanılacak bir ölçüm probuna ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 3.1. TDR sistem konfigürasyonu (Lin ve diğ., 2000)

Elektromanyetik dalgaların yayılma davranışı “Maxwell Eşitliği” yardımıyla belirlenmektedir. TDR cihazında kullanılan iletim hattının koaksiyel kablo ile oluşturuluyor olması sebebiyle elektromanyetik dalganın yayılımı iki etkin parametre tarafından kontrol edilmektedir. Bunlar yayılım katsayısı (γ) ve karakteristik empedans (Z_c). Koaksiyel iletim hattı için yayılım katsayısı Denklem (3.1)’de verilmiştir.

$$\gamma = \frac{j2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_r^*} = \alpha + j\beta \quad (3.1)$$

Koaksiyel iletim hattı için karakteristik empedans ise Denklem (3.2)’de verilmiştir.

$$Z_c = \frac{\ln(b/a)}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{K_0}} \sqrt{\frac{1}{K_r^*}} = \frac{Z_p}{K_r^*} \quad (3.2)$$

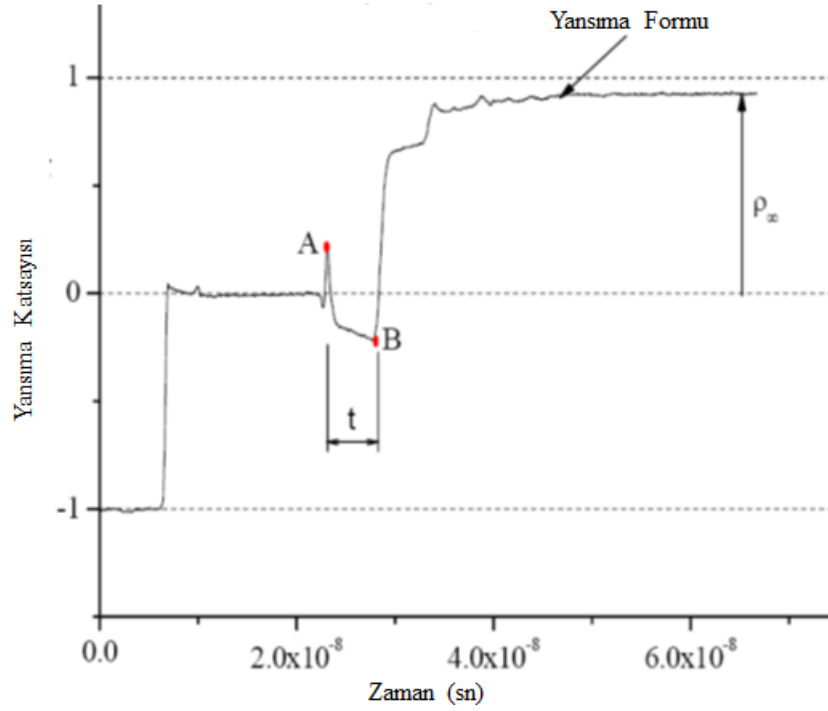
Yukarıdaki denklemlerde $j=\sqrt{-1}$, f , frekans, c , ışık hızı, a ve b sırasıyla iç ve dış iletkenlerin çapları, α , azalım katsayısı, β , faz sabiti, K_0 , boşluğun dielektrik iletkenliği (vakum dielektrik permitiviti = $8,854 \text{ E-12 Fm}^{-1}$) ve μ_0 , boşluğun manyetik geçirgenliği (vacuum magnetic permeability = $4 \pi \text{ E-7 Hm}^{-1}$) olarak verilmiştir. Koaksiyel iletim hattının hava ile doldurulmuş olması durumundaki empedansı Z_p , Denklem (3.2)'de görülebileceği üzere koaksiyel kablonun kesit özelliklerine bağlıdır. K_r^* ise incelenen malzemenin eşdeğer dielektrik iletkenliğidir ve Denklem (3.3)'te verilmiştir (Krauss, 1984).

$$K_r^* = \varepsilon'(\omega) - j(\varepsilon''(\omega) + \frac{\sigma_{dc}}{\varepsilon_0 \omega}) = \varepsilon'(\omega) + j\varepsilon''(\omega) \quad (3.3)$$

ε' ve ε'' malzemenin rölatif dielektrik iletkenliğinin sırasıyla gerçekte ve sanal kısımlarıdır. σ_{dc} , bulk elektriksel iletkenlik, ω ise $2\pi f$ değerine eşit olan açısal frekans olarak adlandırılmaktadır.

Uç uca bağlanmış farklı empedans değerlerine sahip iki koaksiyel kablodan oluşan iletim hattından alınan TDR kaydı Şekil 3.2'de görülmektedir.

Şekil 3.2'de verilen TDR kaydında empedans eşleşmezliklerinden kaynaklanan yansımalar görülmektedir. Başlangıç voltaj adımı, iletim hattında empedansın değişmemesi halinde sabit bir değerde ilerler (birinci kablo). A noktasından hemen önce empedansın değişmesiyle bir sıçrama gerçekleşir ve empedans eşleşmezliğinin başlangıcı kabul edilen A noktasına (ikinci kablonun başlangıcı) varılır. Ardından B noktasında (ikinci kablonun sonu), ilgili bağıntı ile hesaplanan yansıma katsayısı değerine varılır. Bu nokta ikinci kablonun sonu olduğundan hava ile temas gerçekleşir ve B noktasından bir sıçramayla birlikte iletim hattından alınan TDR kaydı sonlanmış olur.



Şekil 3.2. Örnek bir TDR kaydı (Chung, 2005)

Yansıma katsayısı, yansıyan voltaj ile başlangıç voltajı arasındaki oran ile elde edilmektedir. Denklem (3.4)'te bu eşitlik verilmiştir. Denklemde yansıyan voltaj V_r , başlangıç voltajı ise V_i ile gösterilmiştir.

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} \quad (3.4)$$

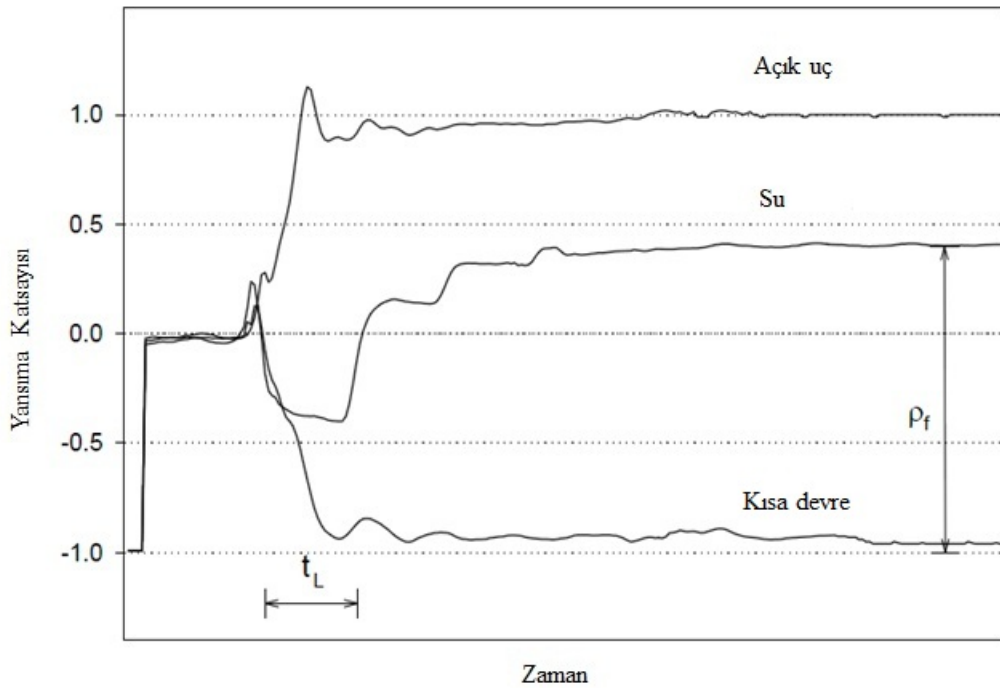
Toplam voltaj yansıyan ve başlangıç voltajının toplamına eşittir. O halde Denklem (3.4)'te bulunan yansıyan voltaj, toplam voltaj cinsinden yazılırsa Denklem (3.5)'te verildiği şekilde yazılabilmektedir.

$$\rho = \frac{V_t - V_i}{V_i} \quad (3.5)$$

Yansıma katsayısı birinci ve ikinci kablonun empedansları cinsinden de yazılabilmektedir. Birinci kablonun empedansına Z_1 , ikinci kablonun empedansına Z_2 dersek yansıma katsayısı aşağıdaki şekilde yazılabilir (Agent Technologies, 2006).

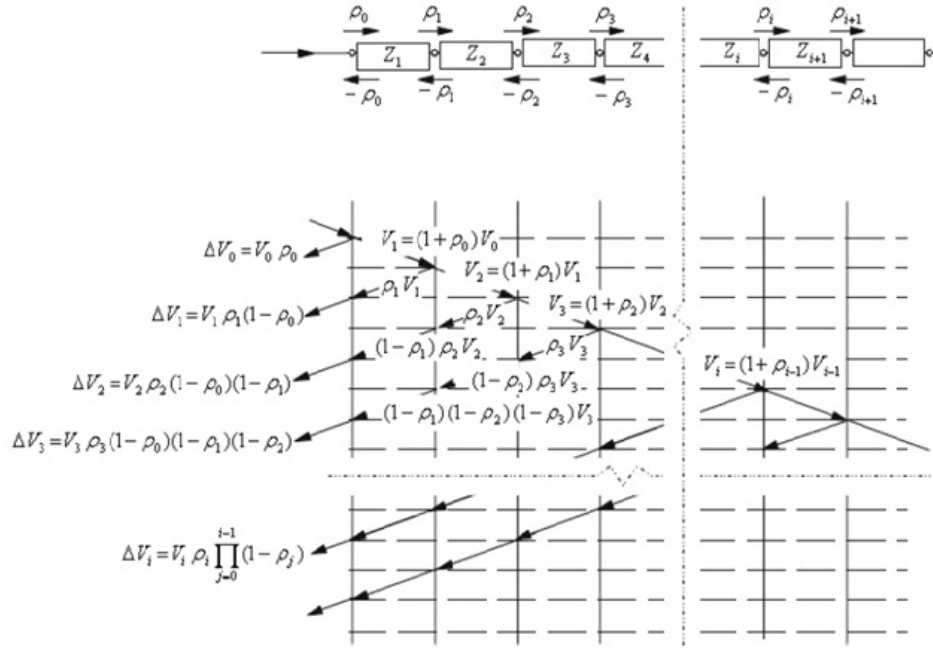
$$\rho = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.6)$$

Sistemin açık uçlu bir devre gibi düşünülmesi durumunda Z_2 empedansı sonsuz, sistemin kısa devre edildiği düşünüldüğünde ise Z_2 empedansı sıfır değerini almaktadır. Yani açık devre olması durumunda yansımaya katsayısı +1, kısa devre olması durumunda ise -1 değerine ulaşacaktır. Şekil 3.3'te bu durumları yansıtan dalga formları gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Yansımaya katsayısı-zaman grafiği (Moret-Fernandes ve diğ., 2009)

Arka arkaya farklı empedans değerlerine sahip ortamlar bulunması durumunda ise çoklu yansımaya durumu ortaya çıkmaktadır. Bu durumda ilk empedans farklılığından dolayı oluşan yansımadan sonra ikinci empedans farklılığından dolayı da yansımaya meydana gelecektir. Böyle bir durum olduğunda her yansımaya ayrı ayrı incelenmelidir. Şekil 3.4'de sistemde çoklu empedans olması durumunda yansımaya katsayılarının nasıl hesaplanacağı gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Çoklu empedans (Lin ve Thaduri, 2005)

3.2. TDR Yönteminin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı

Bu kısımda TDR yönteminin geoteknik mühendisliğindeki kullanımını açıklanmaktadır. Bu amaçla dielektrik katsayısı, dielektrik katsayısı-hacimsel su içeriği ilişkisi, zeminlerin elektriksel iletkenlikleri ve TDR yöntemi kullanılarak kuru yoğunluğun bulunması hakkında geçmişte yapılan çalışmalar anlatılacaktır.

3.2.1. Dielektrik katsayısı

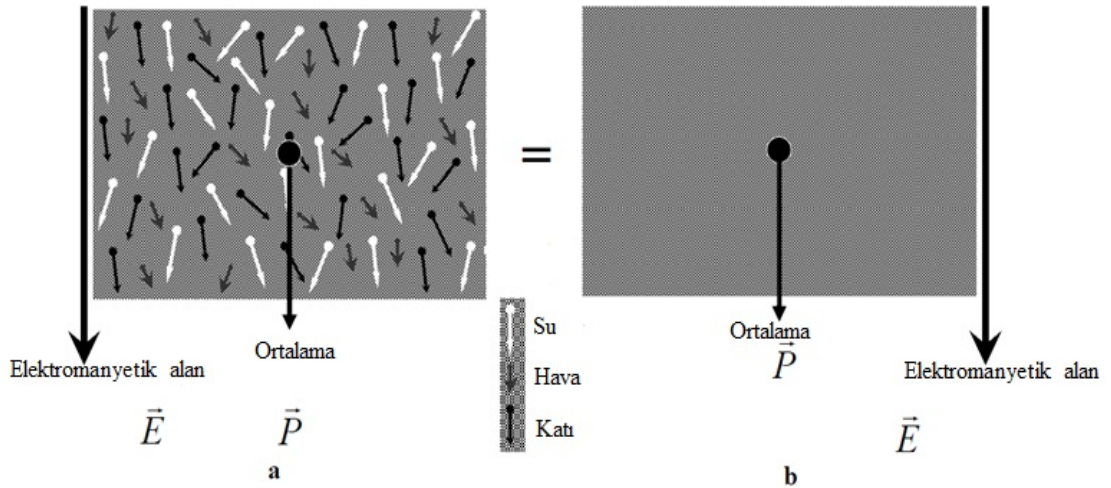
Doğal bir olgu olarak kabul edilen elektrik konusunda deneysel çalışmalar 18. yüzyıla kadar yapılmamıştır. İlk olarak 1745 yılında Caneus ve Musschenbroek bir izolasyon malzemesi ile ayrılmış iki iletken plakadan oluşan bir kondansatör imal etmişlerdir. Bu konu hakkında 1837 yılına kadar ufak çaplı çalışmalar yapılmıştır. Faraday 1837 yılında ilk sayısal çalışmaları yayınlamış ve kondansatör içinde kullanılan bu malzemeyi dielektrik malzeme olarak isimlendirmiştir. Maxwell elektrik ve manyetik yaklaşımları özetlemiş ve kendi adıyla anılan elektromanyetik teoriyi ortaya koymuştur. 19. yüzyılın sonu 20. yüzyılın başlarında birçok maddenin

dielektrik katsayısı bulunmuştur (Diefenderfer, 2002). Çeşitli malzemelere ait dielektrik katsayıları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Çeşitli malzemelerin dielektrik katsayıları (Kutilek ve Nielsen, 1994)

Zemin Bileşeni	Dielektrik Katsayısı
Boşluk	1
Hava (1atm)	1.00059
Polietilen	2.25
Buz	3.2
Zemin	4-8
Su	82

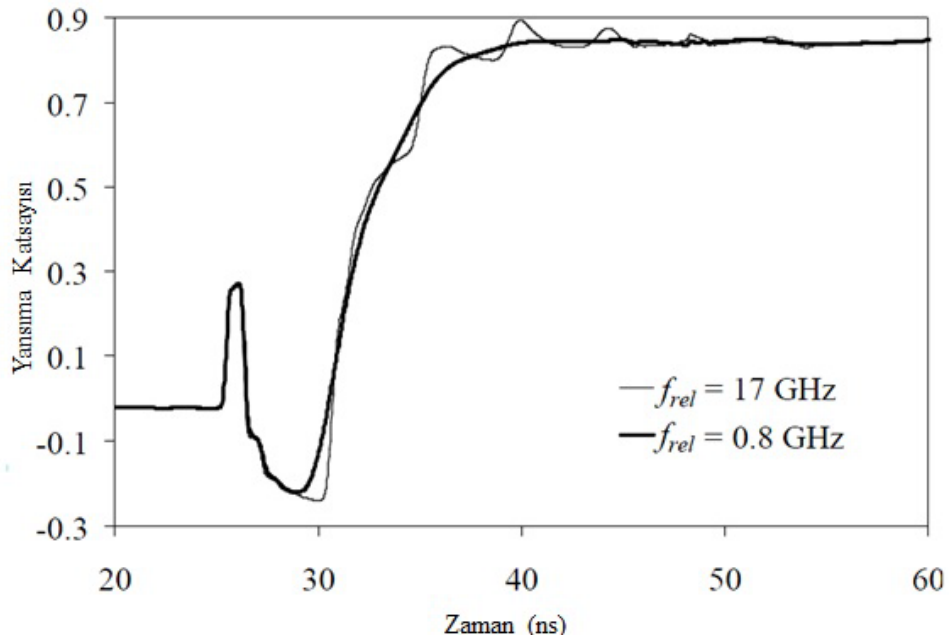
Geoteknik mühendisliğindeki en önemli malzeme hiç şüphesiz zemindir. Zemin içerisinde hava, su ve zemin daneleri olmak üzere 3 farklı bileşen bulunmaktadır. Havanın dielektrik katsayısı 1, zemin danelerinin 4-8, suyun dielektrik katsayısı ise 80 civarındadır. Buradan da görüleceği üzere suyun dielektrik katsayısı zemin bileşenleri arasında en yüksek ve en etkin değere sahiptir.



Şekil 3.5. Çok fazlı zeminin rahatlama frekansında a) Mikroskopik Kutuplanma b) Makroskopik kutuplanma (Hilhorst ve diğ., 2000)

Şekil 3.5.'de verilen ve çok fazlı bir malzeme olarak tanımlanan zemin, kutupsal ve kutupsal olmayan malzemelerden oluşmaktadır. Zeminin kutupsal olan kısmı su, kutupsal olmayan kısmı ise hava ve katı olarak tanımlanmaktadır. Su kısmı elektronik, iyonik ve oryantasyonlu kutuplanma gösterirken, katı ve hava kısmı ise elektronik ve iyonik kutupsallaşma göstermektedir. Ölçüm frekansının artmasıyla birlikte zemin içerisindeki bileşenlerin düzenli dizilimi bozulmaktadır. Bu düzenli dizilimin bozulması dielektrik gevşeme olarak adlandırılmaktadır (Zambrano, 2006).

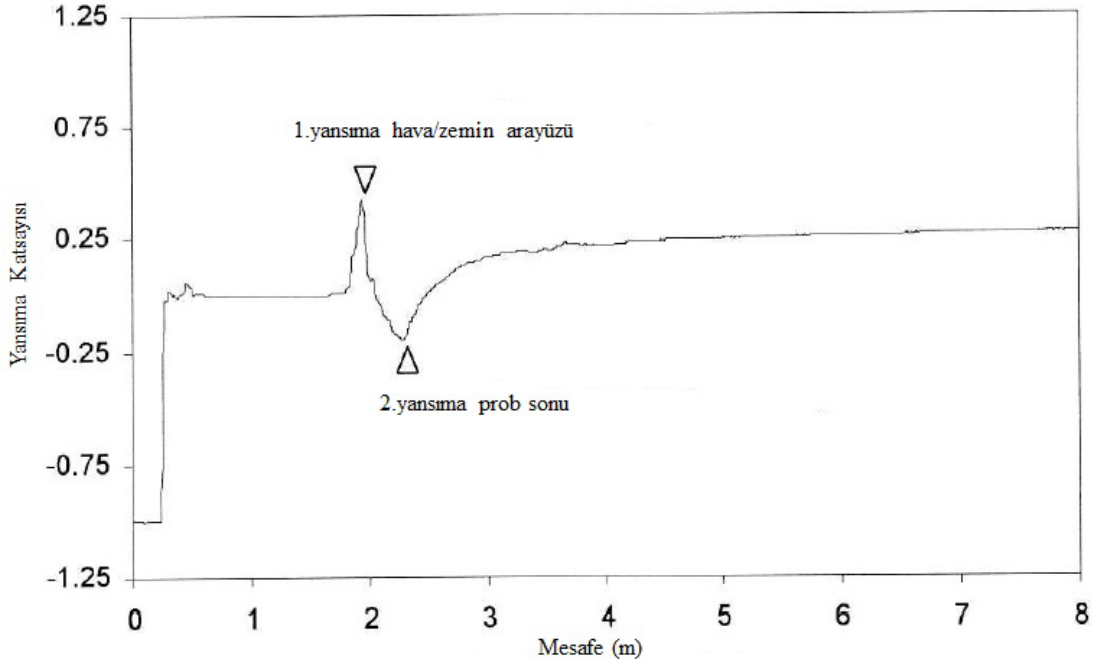
Zemin içinde boşluk suyu ve adsorbe su olarak bilinen iki farklı su bulunmaktadır. Boşluk suyunun dielektrik gevşeme frekansı 17 GHz, adsorbe suyun 0.8-1 GHz civarında olduğu bilinmektedir. Adsorbe suyun dielektrik sabiti 1GHz mertebesinde zemin danelerinin dielektrik katsayısı ile aynı düzeye düşmektedir. O halde 1GHz'e yakın değerlerde yapılan elektromanyetik ölçümler sonucunda elde edilen ölçümlerde en etkili parametre boşluk suyu olacaktır. Farklı frekanslarda alınan TDR ölçümleri Şekil 3.6'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi boşluk suyunun gevşeme frekansı olan 17 GHz frekansında alınan ölçüm daha kararsız bir durum göstermektedir (Zambrano, 2006).



Şekil 3.6. 0.8 GHz ve 17 GHz frekanslarında alınan TDR ölçümleri (Zambrano, 2006)

3.2.2. Zeminlerin dielektrik katsayılarının TDR yöntemiyle bulunması

Malzemelerin dielektrik katsayısını bulmak üzere iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Birinci yaklaşım, malzemenin iki plaka arasına yerleştirilmesiyle dielektrik katsayısının bulunmasıdır. İkinci yaklaşım ise malzemenin içine koaksiyel bir hat yerleştirilmesi ve bu hat üzerindeki karmaşık empedansın ölçülmesi ile dielektrik katsayısının bulunmasıdır. İkinci yaklaşım TDR yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Bir malzemenin tam olarak tanımlanabilmesi için farklı frekanslarda ölçümler gerekmektedir. Ancak aynı bilgiler koaksiyel bir hatta zaman alanında elektronik sinyal gönderilerek de elde edilebilmektedir (Fellner-Feldegg, 1969). Fellner-Feldegg yaklaşımından sonra TDR yöntemi zeminlerin dielektrik katsayılarının bulunması amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır (Giese ve Tiemann, 1975). TDR yöntemi ile elde edilen tipik bir TDR dalga formu Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Tipik bir TDR ölçümü (Yu ve Drnevich, 2004)

TDR yansıma formlarında iki belirgin yansıma meydana gelmektedir. Birinci yansıma hava zemin ara yüzünde, ikinci yansıma TDR probunun sonunda meydana gelmektedir (Yu ve Drnevich, 2004).

Topp ve diğ. (1980) görünen dielektrik katsayısının, bir elektromanyetik dalganın iletim hattı boyunca olan hızı ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Elektromanyetik dalganın görünen hızı ile dielektrik katsayısı arasındaki ilişki Denklem (3.7)'de verilmiştir.

$$v = \left(\frac{c}{\sqrt{K_a}} \right) \quad (3.7)$$

Burada v görünen yayılma hızı, c ışık hızını ifade etmektedir. Görünen yayılma hızı yansıma noktaları arasındaki seyahat süresi ile ilişkilidir. Bu ilişki Denklem (3.8)'de verilmiştir.

$$v = \left(\frac{2L_p}{t} \right) \quad (3.8)$$

Burada t , yansıyan sinyalin zemin içerisindeki probun başlangıç ve bitiş noktaları arasında geçen zamanı, L_p , probun zemin içerisindeki boyunu ifade etmektedir. Denklem (3.7) ve Denklem (3.8) eşitlikleri birleştirildiğinde dielektrik katsayısı Denklem (3.9)'da verildiği gibi yazılabilmektedir.

$$K_a = \left(\frac{ct}{2L_p} \right)^2 \quad (3.9)$$

Bu denklemdeki $\left(\frac{ct}{2} \right)$ ifadesi görünen uzunluk (L_a) olarak tanımlanmıştır (Baker ve

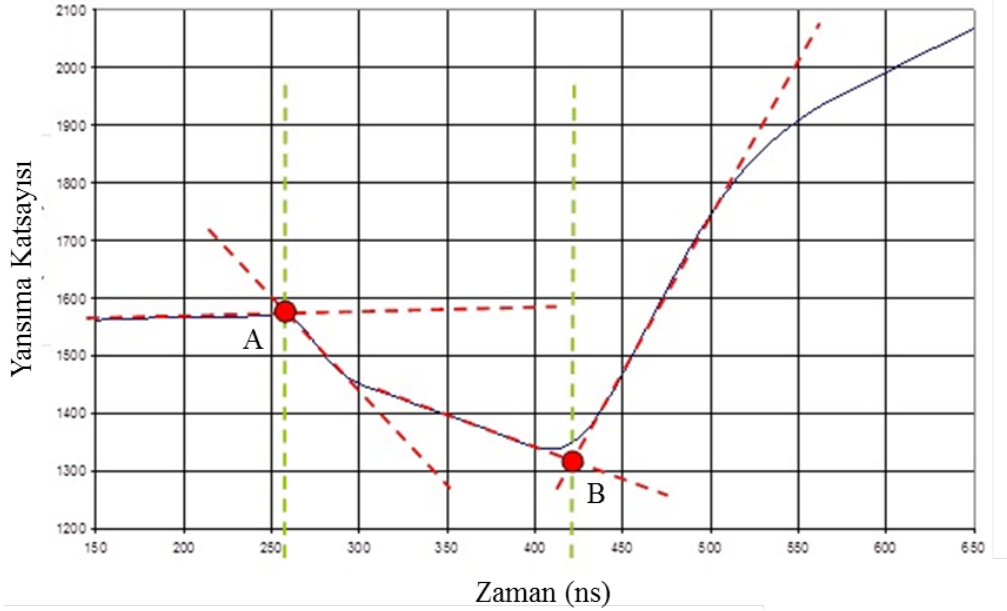
Allmaras, 1990). O halde Denklem (3.9)'u düzenlersek,

$$K_a = \left(\frac{L_a}{L_p} \right)^2 \quad (3.10)$$

dielektrik katsayısı probun görünen ve gerçek boyuna oranı olarak tanımlanmaktadır. Burada L_a , probun görünen boyu, L_p ise probun gerçek boyunu göstermektedir. TDR yansıma formunda belirtilen iki yansıma noktası kullanılarak bulunabilmektedir. Bu iki noktanın bulunabilmesi amacıyla iki farklı yöntem önerilmektedir. Bu

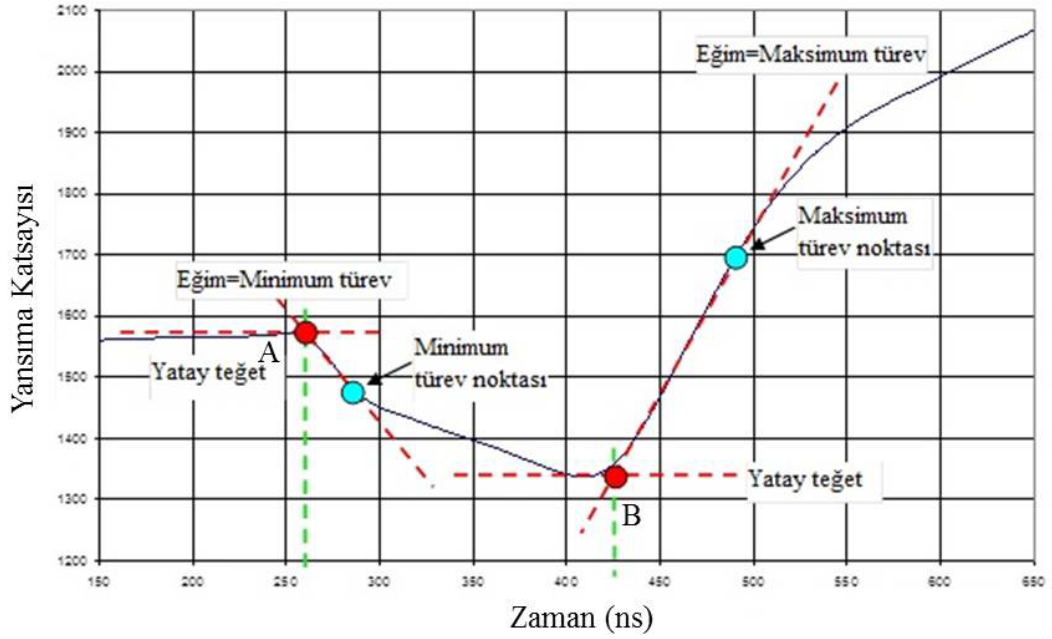
yöntemlerden ilki Topp ve diğ. (1982) tarafından bulunan teğet yöntemi, diğeri ise Baker ve Allmaras (1990) tarafından bulunan türev yöntemidir.

A ve B noktalarının yani probun başlangıcı ve bitişi olarak kabul edilen noktaların konumlarının belirlenebilmesi için Topp. ve diğ. (1982) tarafından önerilen “teğet” yöntemine göre A noktasından önce ve sonra yer alan yatay ve düşey kollara çizilen teğetlerin kesiştiği nokta A noktasını ve B noktasından önce ve sonra yer alan yatay ve düşey kollara çizilen teğetlerin kesiştiği nokta ise B noktasını göstermektedir. Bu noktalar probun zemine temas ettiği ve prob sonu noktaları olmaktadır. Bu iki nokta arasında geçen süre ise t süresi olarak kabul edilmektedir. Söz konusu yöntemin nasıl uygulandığına dair bir örnek Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Teğet yöntemi (Arsoy ve diğ., 2009)

Bir diğ. yöntem ise Baker ve Allmaras (1990) tarafından geliştirilmiş olan ve “türev yöntemi” olarak adlandırılan yöntemdir. Bu yöntemde TDR kaydının zamana göre türevi alındıktan sonra, TDR kaydının üzerinde türevin maksimum ve minimum değerlerine denk gelen iki noktadan, eğimi türevin o noktalardaki değerleri olmak üzere iki teğet çizilir. Daha sonra TDR kaydının maksimum ve minimum değerlerinden geçen yatay teğetler daha önce çizilen iki teğetle kesiştirilir. Böylelikle A ve B noktaları bulunmuş olur. Şekil 3.9’da türev yöntemine bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Türev yöntemi (Arsoy ve diğ., 2009)

3.2.3. Dielektrik katsayısı su içeriği ilişkisi

Dielektrik katsayısının ölçülmesi ve ölçülen bu değer kullanılarak su içeriğinin hesaplanması her ne kadar son yıllarda sıklıkla kullanılsa da bu konuyla ilgili ilk çalışmalar 1939 yılında başlamıştır (Patterson ve Smith, 1980). Su içeriğinin dielektrik katsayısı kullanılarak bulunması amacıyla 1960'lı, 1970'li yıllara kadar birçok adım atılmış, fakat sonuca ulaşamamıştır (Davis ve Annan, 1977). Orijinalinde kablo Deneyi için tasarlanan TDR cihazının frekans aralığı dielektrik katsayısının frekansa bağlı olmasından dolayı önem kazanmaktadır. Bu nedenle Topp ve diğ. (1980) düşük frekans aralığında (1-1000 MHz) yaptıkları çalışmalar sonucunda, dielektrik katsayısının düşük frekans aralığında doğru olarak bulunabileceğini göstermişlerdir.

Dielektrik katsayısı gerçek ve imajiner kısım olarak iki kısımdan meydana gelmektedir. İmajiner kısım iletim hattı boyunca meydana gelen dielektrik kaybı olarak tanımlanmaktadır (Davis ve Annan, 1977). Topp ve diğ. (1980) dielektrik kaybının yani dielektrik katsayısının imajiner kısmının, su içeriği ölçümlerinde ihmal edilebilir ölçüde olduğunu göstermektedir.

Topp ve diğ. (1980) hacimsel su içeriği ile dielektrik katsayısı arasında 3.dereceden bir ilişki olduğunu belirlemiştir. Denklem (3.11)'de bu ilişki verilmiştir.

$$\theta = 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.3 \times 10^{-2} \quad (3.11)$$

Burada θ , hacimsel su içeriğini, K_a dielektrik katsayısını göstermektedir. Sonraki yıllarda Topp ve diğ. (1980)'nin bulduğu bu ilişkinin doğruluğu Dasberg ve Dalton (1985), Heimovaara (1994), Roth ve diğ. (1992), Zegelin ve diğ. (1992) tarafından yapılan çalışmalarla da desteklenmektedir.

Hacimsel su içeriği zemin içerisinde bulunan suyun hacminin, zeminin tüm hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır ve Denklem (3.12)'de bu eşitlik verilmektedir.

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (3.12)$$

Topp ve diğ. (1980) tarafından geliştirilen eşitlik, oldukça geniş bir aralıkta başarılı sonuçlar vermektedir. Bu konu hakkında yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde bu denklemlerin organik zeminlerde ve bünyesinde yüksek oranda ince malzeme içeren killi zeminlerde hatalı sonuçlar verebileceği ortaya konulmaktadır (Dobson ve diğ. 1985, Roth ve diğ. 1992, Dirksen ve Dasberg, 1993).

Ledieu ve diğ. (1986) ve Alharti ve Lange (1987) yaptıkları çalışmalarda hacimsel su içeriği ile dielektrik katsayısının karekökü arasında lineer bir ilişki olduğunu göstermişlerdir. Bu ilişki Denklem (3.13)'de verilmiştir.

$$\theta = a + b\sqrt{K_a} \quad (3.13)$$

Burada a ve b kalibrasyon katsayılarıdır, bu katsayıları Ledieu ve diğ. (1986) $a=1.545$, $b=8.787$, Alharti ve Lange (1987) ise $a=1.59$, $b=7.83$ olarak belirlemişlerdir.

Ledieu ve diğ. (1986) daha önce geliştirdikleri eşitliğin dışında yeni bir eşitlik daha önermişlerdir. Bu eşitlikte zeminin kuru yoğunluğunun da su muhtevasına etkisi olduğunu göstermişler ve Denklem (3.14)'te verilen eşitliği önermişlerdir.

$$\sqrt{K_a} = a\rho_k + b\theta + c \quad (3.14)$$

Burada a , b ve c kalibrasyon katsayıları ρ_k ise zeminin kuru yoğunluğudur. Kalibrasyon katsayısının değerleri $a=0.297$, $b=8.79$, $c=1.344$ olarak verilmiştir.

Ferre ve diğ. (1996), Malicki ve diğ. (1996), Yu ve diğ. (1997) yaptıkları çalışmalarda Denklem (3.13)'e benzer şekilde lineer bir denklem ortaya koymuşlardır. Bu eşitlik Denklem (3.15)' de verilmiştir.

$$\theta = b'\sqrt{K_a} + a' \quad (3.15)$$

Burada a' ve b' regresyon analizi sonucunda bulunan kalibrasyon katsayılarıdır.

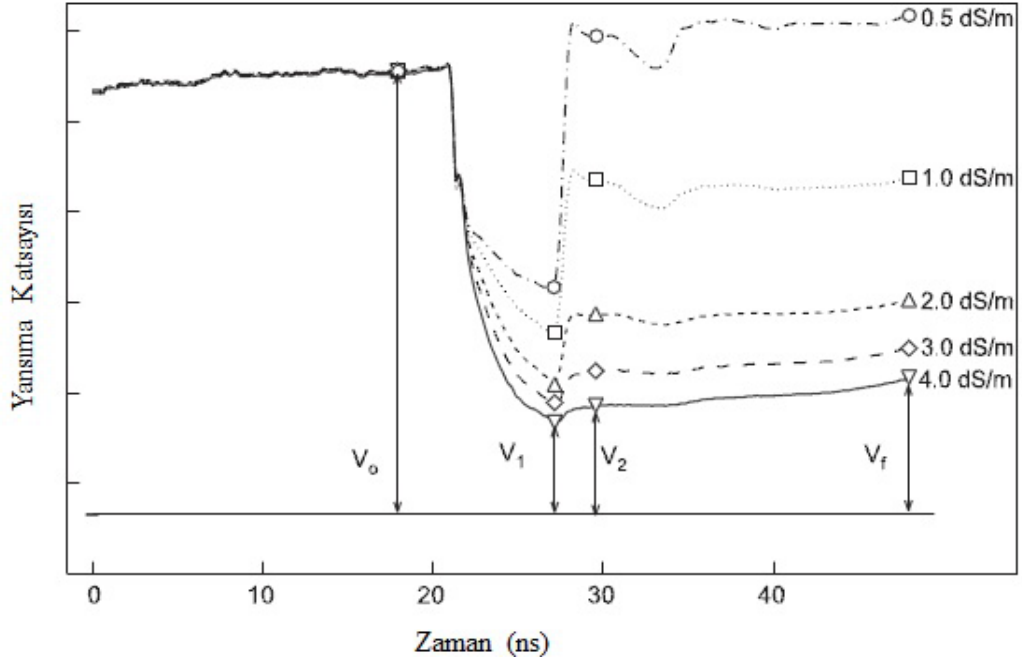
Malicki ve diğ. (1996) çalışmalarında su içeriğinin sadece dielektrik katsayısına bağlı olarak bulunması yerine dielektrik katsayısı ve zeminin kuru yoğunluğunun birlikte kullanılması durumunda daha iyi sonuç elde edileceğini savunmuş ve Denklem (3.16)'da verilen eşitliği önermiştir.

$$\theta = \frac{K_a^{0.5} - 0.819 - 0.618\rho_k + 0.159\rho_k}{7.17 + 1.18\rho_k} \quad (3.16)$$

Arsoy ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada 17 farklı kum örneğini kullanarak bu yöntemlerin kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Zemine özgü kalibrasyon yapıldığı takdirde modellerin performanslarının oldukça yüksek olduğunu çalışmalarında göstermişlerdir.

3.2.4. Zeminin elektriksel iletkenliğinin TDR yöntemi ile bulunması

Yansıma dalga formu bize zeminin elektriksel iletkenliği ile ilgili bilgi vermektedir. Yansıma dalga formunda bulunan bazı özel voltajlar Şekil 3.10'da verilmiştir. Burada V_0 , TDR dalgasının başlangıçtaki genliğini, V_1 ve V_2 sırasıyla probun bitiş noktasından ve probun bitimindeki zeminden yansıyan noktalarındaki genliğini, V_f ise final genliği olarak tanımlanmıştır. Elektriksel iletkenliğin bulunması amacıyla farklı hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir.



Şekil 3.10. Elektriksel iletkenlik için kritik voltajların gösterilmesi (Munoz-Carpena ve diğ., 2005)

Elektriksel iletkenlikle ilgili Giese ve Tiemann (1975) yaptıkları çalışma sonucunda elektriksel iletkenliğin Denklem (3.17)'de verilen eşitlik ile bulunabileceğini göstermiştir.

$$\sigma_a = \frac{\sqrt{K_a}}{120\pi L} \left(\frac{2V_0}{V_f} - 1 \right) \quad (3.17)$$

Dalton ve diğ. (1984) Denklem (3.17)'de verilen eşitliğin ikinci kısmını yani yansıma formundan elde edilen genlikleri farklı şekilde kullanmıştır. Giese ve Tiemann (1975) ilk genlik ve final genliğini kullanırken Dalton ve diğ. (1984) probun bitiş noktasından ve probun bitimindeki zeminden yansıyan genlikleri kullanmışlardır. Bunun sonucunda Dalton ve diğ. (1984) tarafından önerilen eşitlik Denklem (3.18)'de verilmiştir.

$$\sigma_a = \frac{\sqrt{K_a}}{120\pi L} \left(\frac{V_1}{V_2 - V_1} \right) \quad (3.18)$$

Topp ve diğ. (1988) tarafından ortaya konulan eşitlik ise Denklem (3.19)'da verilmiştir. Bu eşitlik incelendiğinde yine Dalton ve diğ. (1984) modeline ek olarak birde başlangıç genliğinin kullanıldığı görülmektedir.

$$\sigma_a = \frac{\sqrt{K_a}}{120\pi L} \ln \left(\frac{V_1(2V_0 - V_1)}{V_0(V_2 - V_1)} \right) \quad (3.19)$$

Yanuka ve diğ. (1988) Denklem (3.19)'da verilen Topp ve diğ. (1988) eşitliğini geliştirmişlerdir. Eşitliğin ilk kısmı diğer modellerle yine aynıdır. Bu eşitlikte görüldüğü gibi Şekil 3.9'da tanımlanan tüm karakteristik genlikler kullanılmıştır.

$$\sigma_a = \frac{\sqrt{K_a}}{120\pi L} \ln \left(\frac{V_1 V_f - V_0(V_1 + V_f)}{V_0(V_1 - V_f)} \right) \quad (3.20)$$

Zegelin ve diğ. (1989) yaptıkları çalışmada Yanuka ve diğ. (1988) gibi Şekil 3.9'da tanımlanan tüm karakteristik genlikleri kullanarak yeni bir eşitlik önermişlerdir. Önerilen bu eşitlik Denklem (3.21)'de verilmiştir.

$$\sigma_a = \frac{\sqrt{K_a}}{120\pi L} \frac{V_1}{V_f} \left(\frac{2V_0 - V_f}{2V_0 - V_1} \right) \quad (3.21)$$

Şimdiye kadar elektiksel iletkenliğin bulunabilmesi için önerilen 5 eşitlik birbirine benzer genlikleri kullanarak elektiksel iletkenliğin bulunması prensibine dayanmaktadır. Nadler ve diğ. (1991) ise Denklem (3.17) ile Denklem (3.21) arasında verilen bu 5 eşitlikten çok farklı bir eşitlik yardımıyla elektiksel iletkenliğin hesaplanabileceğini göstermişlerdir. Bu eşitlik Denklem (3.22)'de verilmiştir.

$$\sigma_a = \frac{K_c}{Z_s} f_t \quad (3.22)$$

Burada K_c ölçümlerde kullanılan proba ait bir katsayıyı, Z_s zeminin empedansını, f_t ise sıcaklığa bağlı bir katsayıyı temsil etmektedir.

Yu ve Drnevich (2004) yaptıkları çalışmalar sonucunda geçmişte elektiksel iletkenliğin bulunması amacıyla ortaya koyulan eşitliklerin iki önemli eksiği

olduğunu belirtmişlerdir. Bunlardan ilki elektriksel iletkenliğin dielektrik katsayısı ile ilişkili olmasından dolayı oluşabilecek bir hata, ikincisi ise V_1 ve V_2 genliklerinin ölçümünün oldukça zor olmasından kaynaklanan bir hata oluşabileceğini belirtmişlerdir. Bu sebeplerden dolayı elektriksel iletkenliğin bulunması için başlangıç ve sonuç voltajına bağlı bir eşitliğin kullanılmasını önermişlerdir. Denklem (3.23)'de bu eşitlik verilmiştir.

$$\sigma_a = \frac{1}{C} \left(\frac{V_s}{V_f} - 1 \right) \quad (3.23)$$

Burada V_s , başlangıç voltajı, V_f , sonuç voltajı, C ise prob konfigürasyonuna bağlı bir sabiti göstermektedir ve Denklem (3.24)'de verilmiştir.

$$C = \frac{2\pi L_p Z_{sin}}{\ln \left(\frac{d_0}{d_1} \right)} \quad (3.24)$$

Burada L_p , prob uzunluğunu, Z_{sin} sinyal üreticinin empedansını, d_0 prob üzerinde bulunan metal çubuğun çapını ve d_1 , iki çubuk arasındaki uzaklığı tanımlamaktadır.

Zeminin elektriksel iletkenliği bulunduğu gibi zemin içerisinde bulunan boşluklardaki suyun da elektriksel iletkenliği bulunabilir. Zemin içerisindeki su ile zeminin elektriksel iletkenliği arasında kurulan ilişkilerden biri Malicki ve Walczak (1999) tarafından önerilmiştir. Zeminin dielektrik katsayısının 6'dan büyük olduğu durumlarda geçerli olan bu eşitlik Denklem 3.25'de verilmiştir.

$$\sigma_p = \frac{\sigma_a - 0.08}{(K_a - 6.2)(0.0057 + 0.000071S_s)} \quad (3.25)$$

Burada σ_p , boşluklarda bulunan suyun elektriksel iletkenliğini, σ_a , zeminin elektriksel iletkenliğini, S_s , zemin içerisinde bulunan kumun ağırlıkça yüzdesini göstermektedir. Malicki ve Waczk (1999) tarafından yapılan bu çalışmanın ardından, Hilhorst (2000) suyun elektriksel iletkenliği ile zeminin elektriksel iletkenliği ve dielektrik katsayılarına bağlı olarak teorik esaslı lineer ilişkinin olduğunu göstermiştir. Bu ilişki Denklem (3.26)'da verilmiştir.

$$\sigma_p = \frac{\sigma_a K_p}{(K_a - K_0)} \quad (3.26)$$

Vogeler ve diğ. (1996) tarafından zeminin elektriksel iletkenliği, suyun elektriksel iletkenliği ve hacimsel su içeriğini de kullanılarak ampirik bir eşitlik önerilmiştir. Önerilen bu eşitlik Denklem (3.27)'de görülmektedir.

$$\sigma_a = (c\theta - d)\sigma_p + (a\theta - b) \quad (3.27)$$

Burada σ_p , boşluklarda bulunan suyun elektriksel iletkenliğini, σ_a , zeminin elektriksel iletkenliğini, θ , hacimsel su içeriğini, a , b , c ve d zemine özgü kalibrasyon katsayılarıdır.

3.2.5. Hacimsel su içeriği ve kuru birim hacim ağırlığının TDR yöntemi ile bulunması

Hacimsel su içeriği ve kuru birim hacim ağırlığın bulunması konusunda Purdue Üniversitesi 2004 ve 2012 yıllarında yaptıkları çalışmalar sonucunda iki yöntemi öne çıkarmaktadır.

Bu yöntemlerden ilki bir seri zemine özgü bir dizi kalibrasyon katsayısı (a , b , c , d , f , g) kullanarak yapılmaktadır. Bu kalibrasyon katsayıları şu şekilde tanımlanmaktadır. Siddiqui ve Drnevich (1995) dielektrik katsayısı, kuru yoğunluk ve hacimsel su içeriği arasındaki ilişkiyi Denklem (3.28)'de verildiği şekilde gösterilmektedir.

$$\sqrt{K_a} = \left(a \frac{\rho_k}{\rho_w} + b\theta \right) \quad (3.28)$$

Bu eşitliğe göre zemin tamamen kuru durumda ise hacimsel su içeriğinin sıfır olması gerekmektedir. Bu durumda a , katsayısı Denklem (3.29)'da verildiği gibi tanımlanabilir.

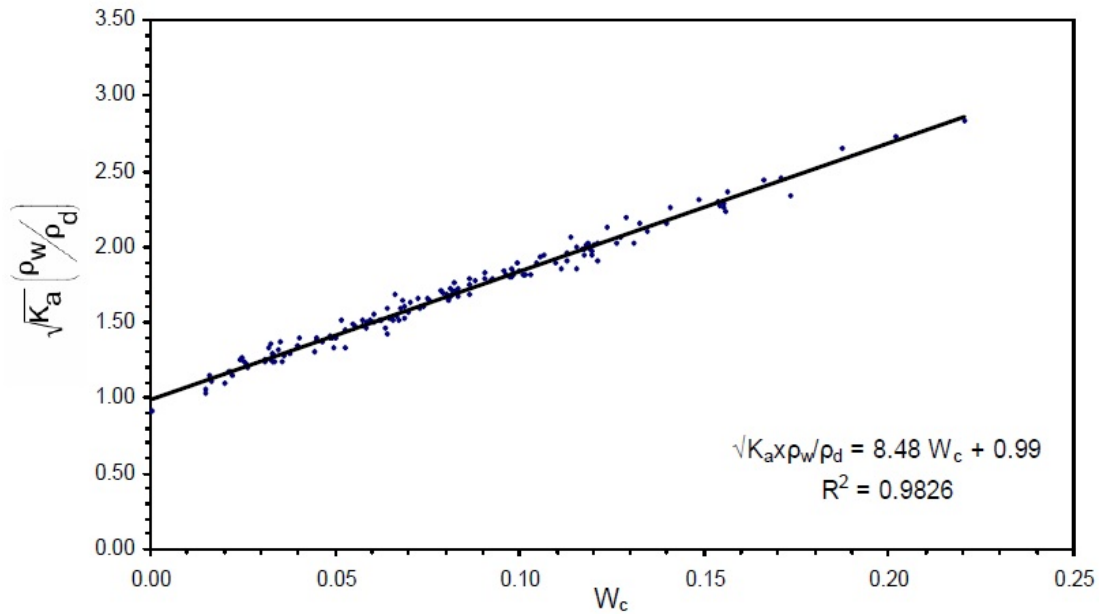
$$a = \sqrt{K_a} \frac{\rho_w}{\rho_k} \quad (3.29)$$

Denklem (3.29)'da verilen a katsayısı zemin tipine göre 0,7 ile 1,85 arasında değişmektedir (Yu ve Drnevich, 2004).

Denklem (3.28)'de görülen bir diğer bilinmeyen b katsayısı ise suyun dielektrik katsayısı ile ilişkilidir ve Denklem (3.30)'da verildiği şekilde gösterilmektedir.

$$b = \sqrt{K_{a,w}} \quad (3.30)$$

Normal koşullarda 20°C sıcaklıkta TDR ölçümü sonucunda tipik $K_{a,w}$ değeri 81'dir Bu da bize b katsayısının değerinin yaklaşık olarak 9 civarında olması gerektiğini göstermektedir (Yu ve Drnevich, 2004).



Şekil 3.11. a ve b katsayıları için kalibrasyon sonuçları (Sallam ve diğ., 2004)

Şekil 3.11'de Sallam ve diğ. (2004) tarafından yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen a ve b katsayıları verilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere bu değerler sırasıyla 0.99 ve 8.48 olarak bulunmuştur. Aynı çalışma da su içeriğinin ve kuru yoğunluğun doğru bir şekilde ölçülmesinin önemi anlatılmaktadır. Ölçümlerde hata yapılması durumunda a ve b katsayısının ve bu katsayılarla bağlı olarak su içeriği ve kuru yoğunluk değerlerinin de doğru olarak bulunamayacağı belirtilmiştir.

Denklem (3.25)'de verilen eşitliğin bir benzeri, zeminin elektriksel iletkenliği kullanarak düzenlenebilir. Eşitliğin tekrar düzenlenmesi sonucunda elde edilen eşitlik Denklem (3.31)'de verilmiştir.

$$\sqrt{\sigma_a} = \left(c \frac{\rho_k}{\rho_w} + d\theta \right) \quad (3.31)$$

Bu eşitliğe göre zemin tamamen kuru durumda ise hacimsel su içeriğinin sıfır olması gerekmektedir. Bu durumda c , katsayısı Denklem (3.32)'de verildiği gibi tanımlanabilir.

$$c = \sqrt{\sigma_a} \frac{\rho_w}{\rho_k} \quad (3.32)$$

Eşitlikte görülen c katsayısı zemin danelerinin elektriksel iletkenliğine göre değişmektedir (Yu ve Drnevich, 2004). Sallman ve diğ. (2004) Florida kumları ile yaptığı çalışmalar sonucunda c katsayısını 0,0036 ile 0,0593 aralığında bulmuştur.

Denklem (3.31) eşitliğinde bulunan d katsayısı ise hacimsel su içeriğinin %100 olduğu haldeki elektriksel iletkenliğin karekökü olarak tanımlanmıştır ve Denklem (3.33)'de verilmiştir (Yu ve Drnevich, 2004).

$$d = \sqrt{\sigma_a} \quad (3.33)$$

Yu ve Drnevich (2004) son olarak çalışmalarında Denklem (3.34)'de verilen eşitliği önermişler ve zemine özgü olarak f ve g katsayılarının bulunması gerektiğini belirtmişlerdir.

$$\sqrt{\sigma_a} = \left(f \frac{\rho_k}{\rho_w} + g\sqrt{K_a} \right) \quad (3.34)$$

Bu eşitlikte görülen g ve f katsayıları, a , b , c ve d katsayıları cinsinden tanımlamıştır. Tanımlanan bu eşitlik Denklem (3.35)'de verilmiştir.

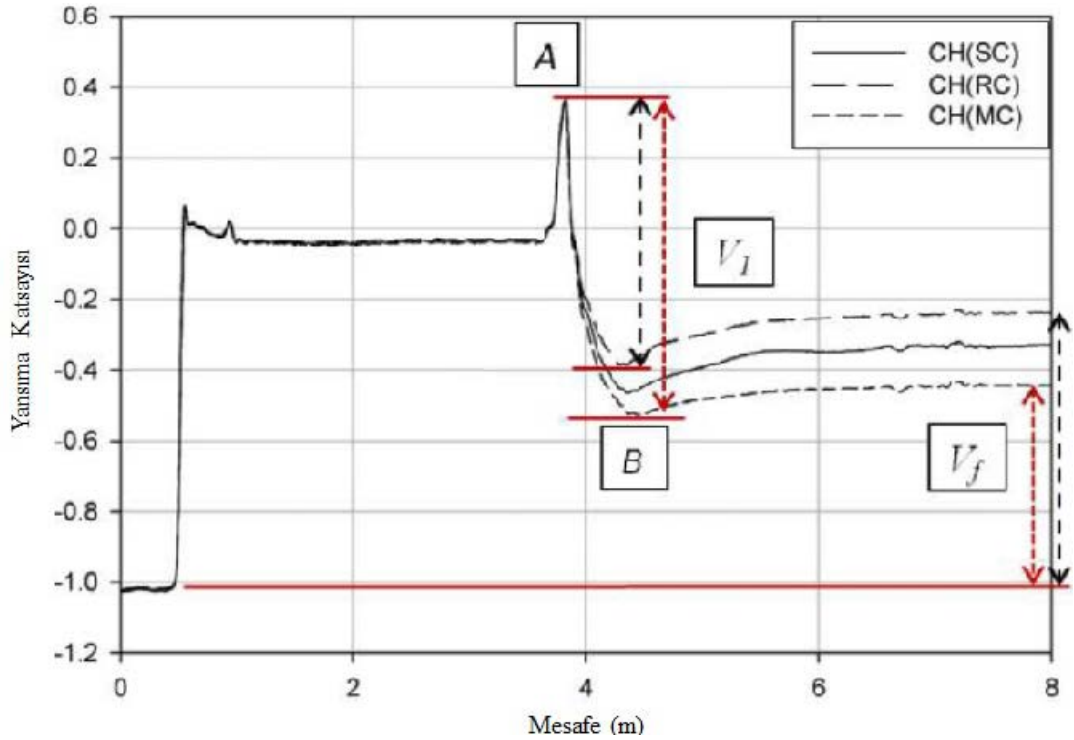
$$\sqrt{\sigma_a} = \left(\frac{b.c - a.d}{b} \frac{\rho_k}{\rho_w} + \frac{d}{b} \sqrt{K_a} \right) \quad (3.35)$$

Jung ve diğ. (2012) yılında yaptıkları çalışmada Denklem (3.28), Denklem (3.31) ve Denklem (3.34)'de verilen eşitlikleri bir adım daha öteye taşımışlardır. Bunun sonucunda sadece yansıma formunu kullanarak kuru yoğunluğu ve su içeriğini tahmin edebilen yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu eşitlik Denklem (3.36)'da sunulmuştur.

$$\frac{V_1}{V_f} \frac{\rho_w}{\rho_k} = c_1 + d_1(K_a - 1) - c_1 \cdot \exp[-f_1(K_a - 1)] \quad (3.36)$$

Burada c_1 , d_1 ve f_1 zemine özgü kalibrasyon katsayılarıdır. Bu eşitlik düzenlenerek kuru yoğunluğun bulunabilmesi için Denklem (3.37)' verilen eşitlik önerilmektedir.

$$\rho_k = \frac{\frac{V_1}{V_f}}{c_1 + d_1(K_a - 1) - c_1 \cdot \exp[-f_1(K_a - 1)]} \rho_w \quad (3.37)$$

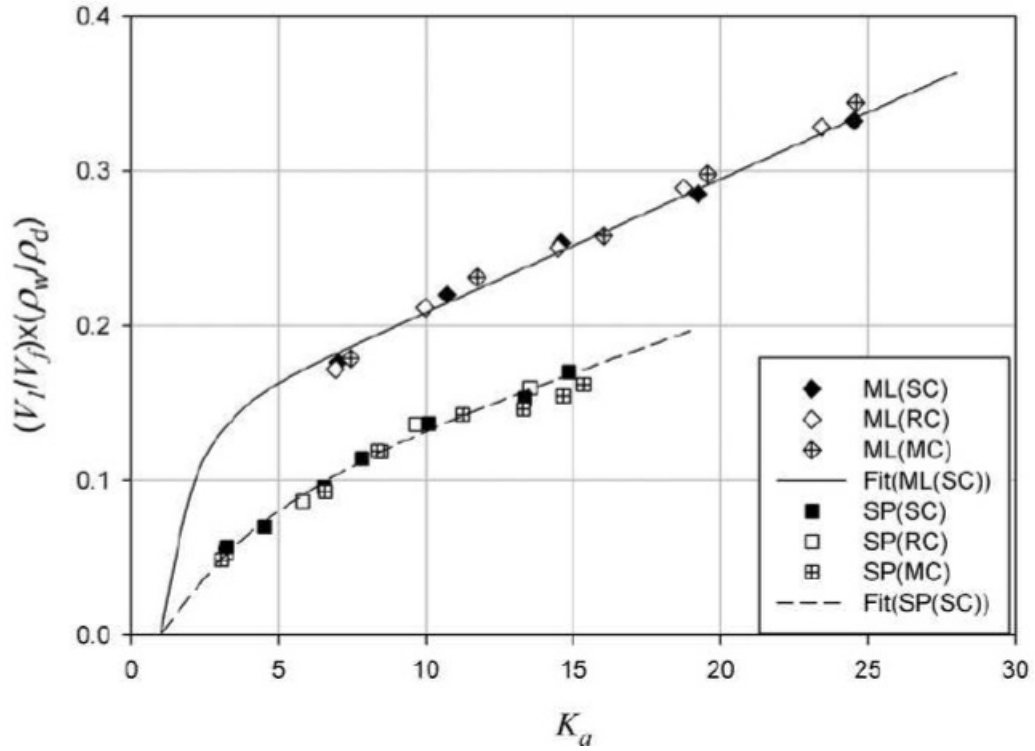


Şekil 3.12. Kritik genlikler (Jung ve diğ., 2012)

Şekil 3.12'de Denklem (3.36) ile Denklem (3.39) arasındaki eşitliklerde kullanılan kritik genliklerin TDR yansıma formundan nasıl bulunacağını gösterilmiştir.

Denklem (3.35) yardımıyla bulunan kuru yoğunluk, TDR yansıma formu yardımıyla hesaplanan K_a ve zemine özgü kalibrasyon katsayılar a ve b kullanılarak gravimetrik su içeriği Denklem (3.38)'de verildiği gibi tanımlanmıştır (Jung ve diğ., 2012).

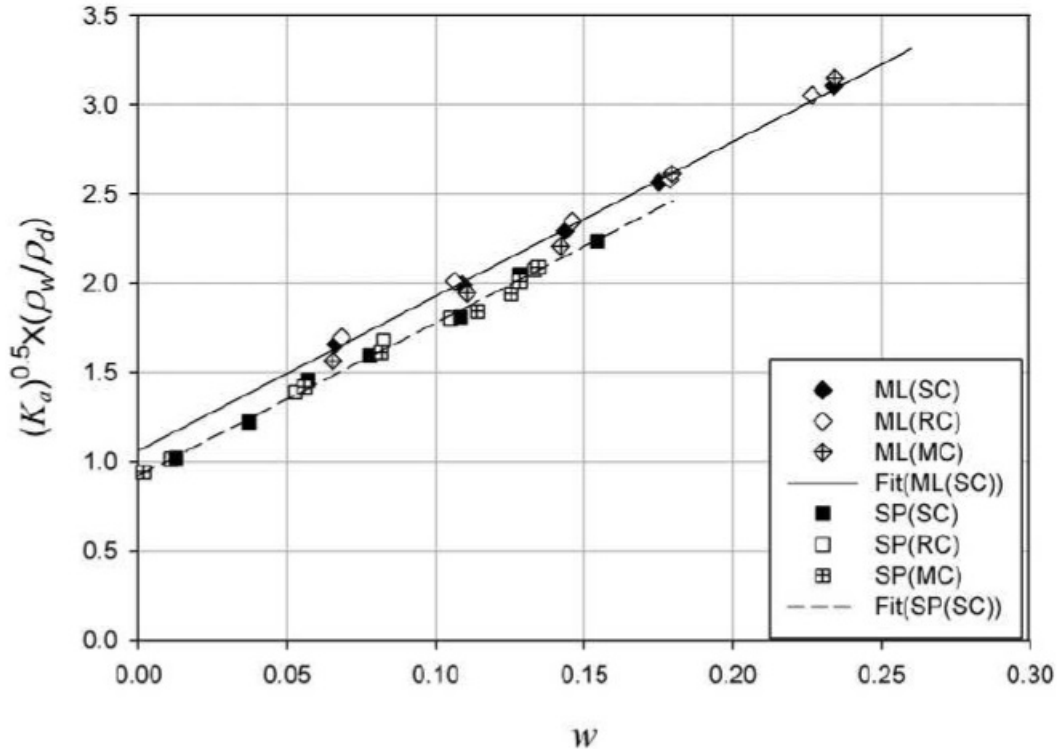
$$w = \frac{1}{b} \left(\sqrt{K_a} \frac{\rho_k}{\rho_w} - a \right) \quad (3.38)$$



Şekil 3.13. Kritik genlik değerleri ve yoğunluk değerleri ile dielektrik katsayısı arasındaki ilişki (Jung ve diğ., 2012)

Şekil 3.13'de üç farklı sıkılıkta sıkıştırılmış düşük plastisiteli kil ve kötü derecelenmiş kum örnekleri için dielektrik katsayısı ve karakteristik genlik değerleri ile yoğunluk değerleri arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Aynı zemin örnekleri için gravimetrik su içeriği ile dielektrik katsayısı ve yoğunluklar arasındaki ilişki ise Şekil 3.14'de gösterilmiştir.

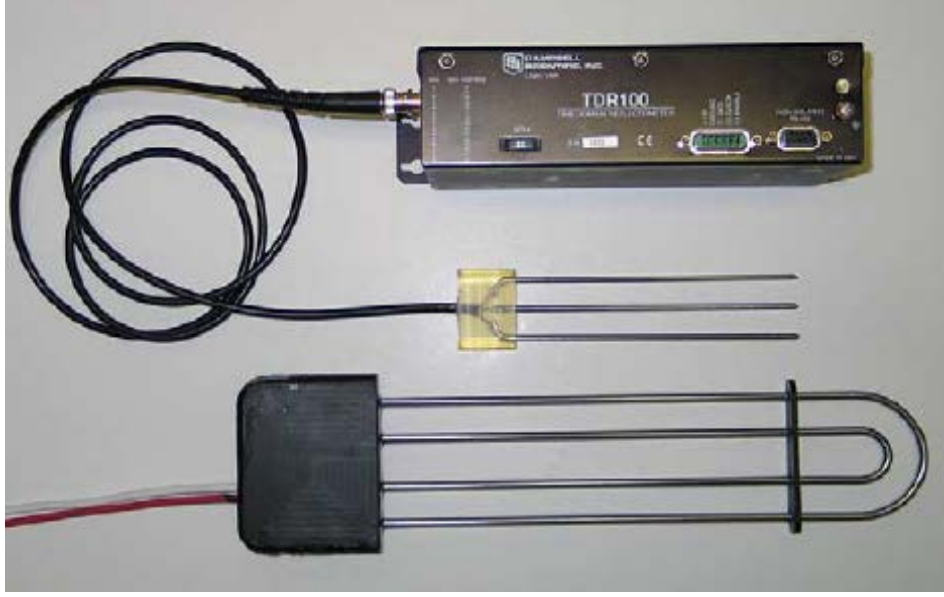


Şekil 3.14. Gravimetrik su içeriği ile dielektrik katsayısı ve yoğunluklar arasındaki ilişki (Jung ve diğ., 2012)

3.3. TDR Cihazı ve TDR Ölçümlerini Etkileyen Faktörler

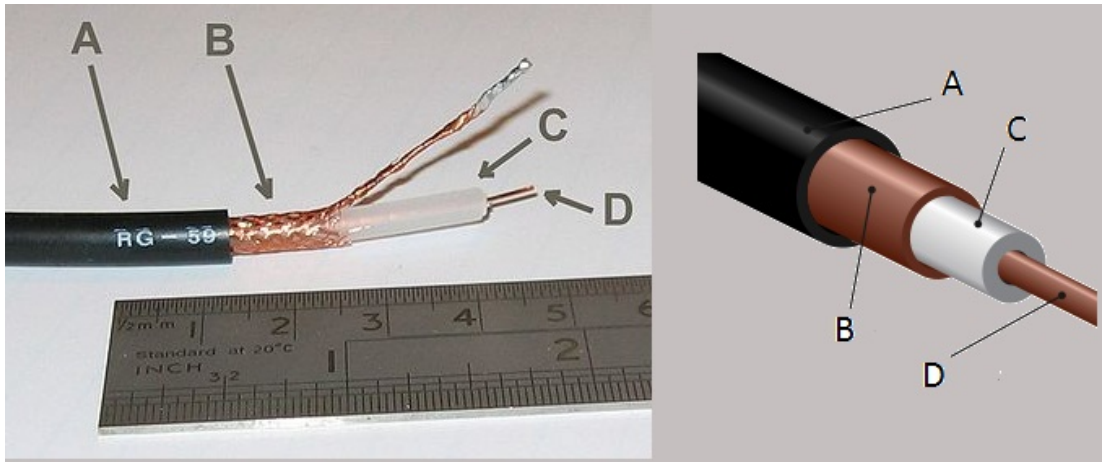
Zeminin dielektrik katsayısının belirlenebilmesi için TDR cihazı, koaksiyel kablo ve zemine yerleştirilen prob üçlüsünden oluşan bir düzeneğe ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 3.15’de örnek bir düzenek görülmektedir. Bu düzenek Campbell Scientific firması tarafından üretilen TDR 100 cihazıdır ve tez kapsamında kullanılan cihazdır.

Bir iletim hattı boyunca ilerleyen elektromanyetik dalganın hızı geçtiği ortamın dielektrik katsayısına bağlıdır. Dielektrik katsayısının artmasıyla iletim hızı yavaşlayacaktır. Zeminin hava, mineraller, organik partiküller ve sudan oluşan kompozit bir yapısı olduğu bilinmektedir. Bu bileşenlerin farklı dielektrik katsayılarına sahip olmaları da açıktır.



Şekil 3.15. TDR cihazı, koaksiyel kablo ve su içeriği ölçümü için zemine yerleştirilen prob (Blonquist ve diğ., 2005)

Koaksiyel kablunun iç yapısı Şekil 3.16’da verilmiştir. Şekilde A, en dışta bulunan ceket, B, dış iletkeni, C iki iletken arasında bulunan yalıtkanı, D ise iç iletkeni tanımlamaktadır. Zeminin içine gömülen problemlerin iletken metallere olduğu düşünülürse, söz konusu problemlerin arasına dolacak zeminin iç yalıtkan gibi davranacağı ortaya çıkmaktadır. İletim hattı teorisinde anlatıldığı gibi, voltaj adımının hızı iç yalıtkanın malzemesine göre değiştiğinden, problemlerin üzerinden ilerleyen voltaj adımının hızının doğrudan zeminin dielektrik katsayısına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.16. Koaksiyel bir kablunun iç yapısı

Suyun dielektrik katsayısının zemin içerisinde bulunan diğer bileşenlere oranla oldukça yüksek olması, zemine gömülmüş bir iletim hattında (prob) ilerleyen voltaj adımının ilerleme hızının su içeriğine bağlı olmasına neden olmaktadır.

TDR cihazı ve ona bağlı koaksiyel kablonun empedansı genellikle aynı 50 ohm değerinde olmaktadır. Dolayısıyla koaksiyel kablo üzerinde bir hasar yoksa herhangi bir yansımada gerçekleşmeyecektir. Koaksiyel kablo ile probun birleştiği noktada zeminin empedansı ile kablo empedansının farklılık göstermesiyle ilk yansıma oluşacaktır. İkinci yansıma ise iletim hattının sona erdiği yani probun bitiş noktasında tüm sinyallerin geri yansınması ile gerçekleşmektedir.

Topp ve diğ. tarafından geliştirilen Denklem (3.11) eşitliğinin bazı zemin türleri için geçerli olmayacağı düşünülmektedir. Bu düşüncenin ana nedeni zeminin içeriğine bağlı olarak TDR sinyallerini etkileyebilecek bazı faktörlerin olabileceğidir. Bu sebeple TDR ölçümünü etkileyecek faktörlerin belirlenebilmesi amacıyla bu alanda yapılan çalışmalar genişletilmiştir.

Zemin tipi, sıcaklık ve boşluklarda bulunan suyun iletkenliği gibi bazı parametreler TDR yöntemi ile hacimsel su içeriğinin bulunmasındaki duyarlılığı etkilemektedir. Bu uygulama göz ardı edilebilmekle birlikte bazı durumlarda büyük yanlışların oluşmasına da sebep olabilmektedir. Oluşabilecek bu hatalar zemine özgü kalibrasyon yapıldığı takdirde ihmal edilebilir seviyelere gelmektedir (Campbell, 1990. Campbell ve Anderson, 1998, Seyfried ve Murdock, 2001, Kim ve Benson, 2002, Czarnomski ve diğ., 2005).

Büyük spesifik yüzey alanına sahip olan malzemelerin su emme kapasiteleri de yüksektir. Bu sebeple, %40'tan fazla kil içeren zeminlerde, genişlebilen mineral içerikli killerde ve %10'dan fazla organik madde içeren organik killerde bu tip faktörler göz önüne alınması gerektiği belirtilmiştir (Quinones ve diğ., 2003).

TDR ölçümlerinin doğruluğunu etkileyen bir başka parametre ise partikül boyutudur. Zemin partiküllerin yüzeyinde oluşan elektriksel yük yoğunluğu partikül boyutundan etkilenmektedir ve bu sebeple elektriksel iletkenlik üzerinde etkilidir. Zeminlerin iletkenliği kil içeriğinin (<0,002 mm) artmasıyla yükselmektedir. Partikül boyutunun

artmasıyla (>0,002 mm) elektriksel iletkenlik değeri düşer (Mc Kenzie ve diğ, 1997). Daha büyük çaptaki danelerin iletken olması mutlak değildir ve içeriklerine bağlıdır. Tamamen kuru kil yalıtkan bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Kuru bir kile su eklendiğinde sıralı iletkenler özelliği kazanır. Kil, çapı 0,002 danelerden oluşur ve negatif yüklüdür. Negatif yük katyonlara doğru hareketlenir ve elektriksel iletkenlik değerine katkıda bulunur (McNeill, 1980). Smektit mineralojisi içeren zeminler illit ve kaolin mineralojisine sahip zeminlere oranla daha fazla katyon değişim kapasitesine sahiptir. Bu yüzden smektit, illit ve kaoline oranla daha büyük elektriksel iletkenlik değerine sahiptir.

Bulk yoğunluğu 1 gr.cm^{-3} değerinden küçük olan zeminlerde su içeriğinin TDR yöntemiyle olduğundan küçük hesaplandığı, aynı değer $1,7 \text{ gr.cm}^{-3}$ değerinden büyük olması durumunda ise olması gerekenden büyük hesaplandığı bilinmektedir. Dolayısıyla zeminlerin dielektrik katsayısının zeminin bulk yoğunluğuna da bağlı olduğu söylenebilir (Quinones ve diğ., 2003).

TDR yöntemiyle, tuz içeren zeminlerde su içeriğinin olduğundan yüksek bulunduğu birçok çalışmada sunulmuştur. Bunun nedeni tuzlu zeminlerin elektriksel iletkenliğinin, tuz oranının artmasıyla gelişmesi ve dolayısıyla iki prob arasında iç yalıtkan gibi çalışması beklenen zeminin bu özelliğinden uzaklaşmasıdır. Bu yüzden zeminin elektrik iletkenliği ile dielektrik katsayısı arasında bir korelasyon geliştirilmesi önerilmektedir (Mojid ve diğ., 2003). Rhoades (1990) elektriksel iletkenlik değerini “standart koşullarda tuz çözeltisi tarafından taşınan akımın çözeltinin yoğunluğu ile birlikte artması” esasına dayandırarak ifade etmiştir Corwin ve diğ. (2006). Elektriksel iletkenlik değerinin tuzluluk ve sodyum absorbe etme oranına yüksek ölçüde bağlı olduğunu göstermişlerdir. Zemin elektiriksel iletkenlik değeri zemin su karışımında bulunan elektrolit konsantrasyonundan etkilenmektedir (Samouelian ve diğ., 2005). Tuz ve tuz çözeltileri yüksek oranda elektriksel iletkenliğe sahiptir. Bu sebeple tuz içeren zeminlerde elektriksel iletkenlik değeri ölçülürken okumalar doğal olarak yüksek gerçekleşecektir (Rhoades ve Schilfgaarde, 1976).

Zemin içinde bulunan serbest suyun gevşeme frekansı dielektrik kaybının en yüksek olduğu frekans değeridir ve yaklaşık 17 GHz olmaktadır. Bu değer TDR bant genişliğinin üzerindedir. Bu yüzden sıcaklığın azalmasıyla serbest suyun dielektrik katsayısı artar. Fakat absorbe suyun gevşeme frekansı 1 GHz olduğundan genellikle bant genişliğinin altında kalabilir. Bu durumda dielektrik katsayısı sıcaklıkla birlikte artacaktır. O halde zeminin dielektrik katsayısı ile absorbe su oranının bağımsız düşünülmemesi gerekmektedir (Logsdon, 2000). Aynı zamanda absorbe suyun TDR cihazının çalışma frekansında (genellikle 1 GHz) dielektrik katsayısının zeminin dielektrik katsayısına yaklaşması ile TDR serbest suya hassasiyet gösterebilir (Liu, 2007).

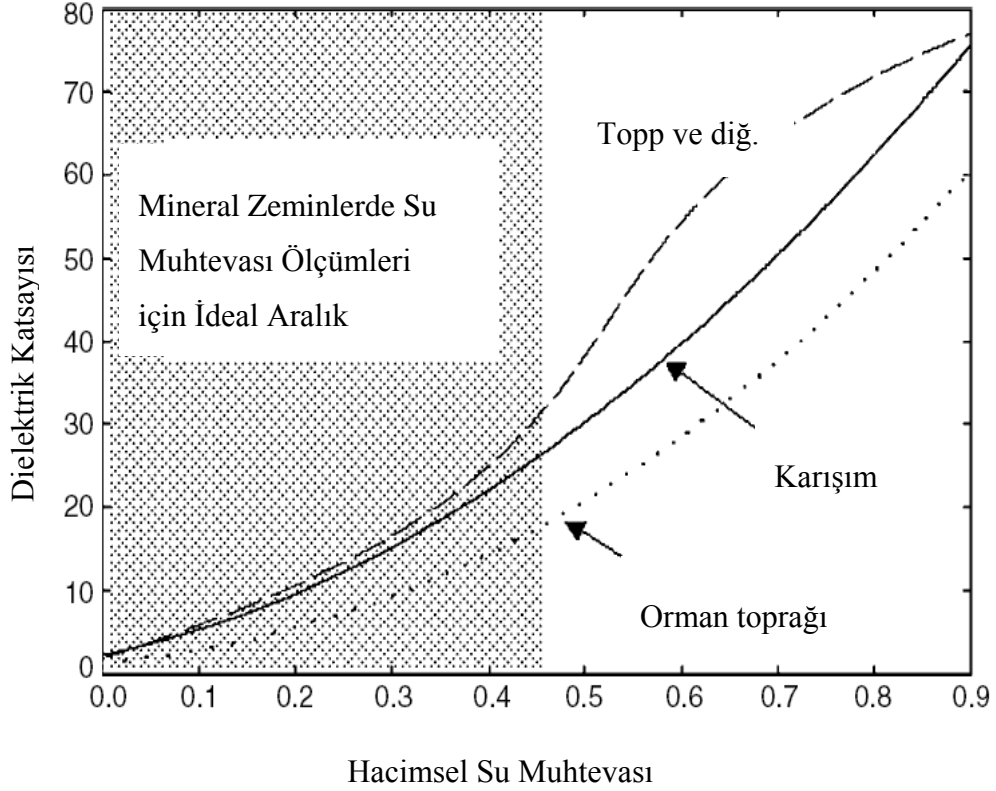
Curtis (2001) yaptığı çalışmasında zeminin kuru birim hacim ağırlığı ile dielektrik katsayısı arasında bir bağıntının kurulamadığını, sabit bir su içeriği değerinde, artan yoğunluk ile zeminin dielektrik özelliğinin negatif veya pozitif yönde değişeceğinin akla yatkın geldiğini fakat sonuçların bu kanıyı desteklemediğini belirtmiştir. Ardından Yu ve Drnevich (2004) ve Jung ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda kuru yoğunluğun, zeminin elektriksel iletkenliği ve dielektrik katsayısına bağlı olarak bulunabileceğini göstermiştir.

Şekil 3.17’de Topp ve diğ. (1980) tarafından geliştirilen korelasyon ile sağlanan dielektrik katsayısı-su içeriği değerleri ve Birchak tarafından 1974 yılında sunulan “karışım modeli” ile bulunan dielektrik katsayısı-su içeriği değerleri bir arada görülmektedir. Şekil aynı zamanda dielektrik katsayısı-su içeriği bağıntılarının kurulabileceği ideal aralık ile organik zeminlerde su içeriğine bağlı dielektrik katsayısı değişimini içermektedir.

Karışım modelinin kullanılabilmesi için porozitenin (n) bilinmesi ön şarttır. Bu model, suyun üç fazının dielektrik katsayılarının kullanıldığı ve zemine yerleştirilen problemlerin doğrultusunu göz önüne alan bir modeldir. Su içeriği, az önce sayılan etmenlere ve TDR ile bulunan dielektrik katsayısına bağlı olarak Denklem (3.39)’da verilen eşitlik hesaplanabilmektedir

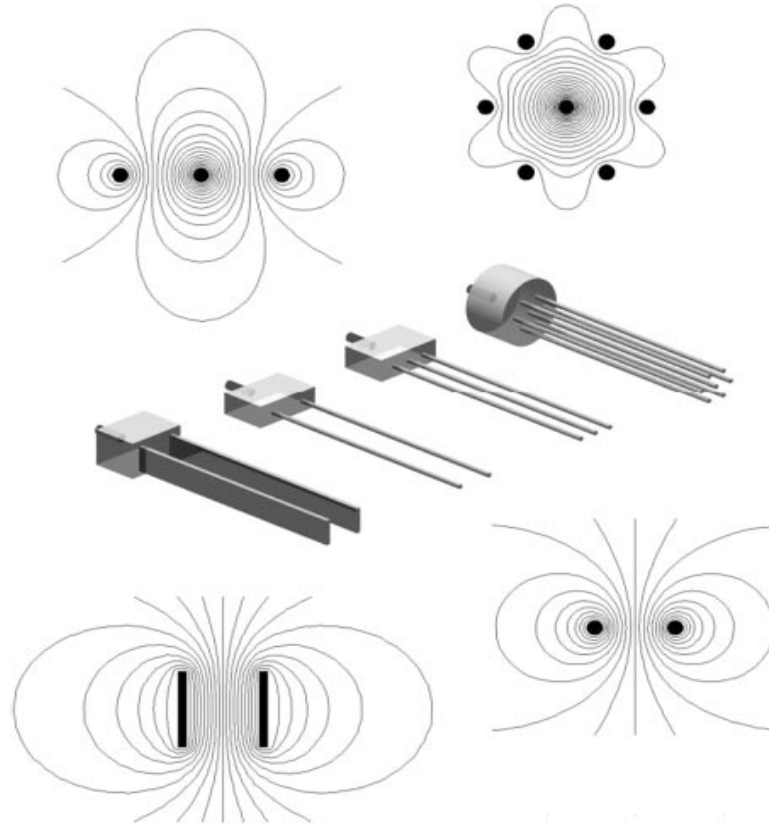
$$\theta = \frac{K_r^\beta - (1-n)K_s^\beta - nK_a^\beta}{K_w^\beta - K_a^\beta} \quad (3.39)$$

Burada K_s , K_a ve K_w sırasıyla katı, gaz ve sıvı hallerin dielektrik katsayılarıdır. β , probun zemine nasıl yerleştirildiği ile ilgili bir katsayıdır ve -1 ile +1 arasında bir değer alır. Proburn üzerinden geçen voltaj akımının yarattığı elektrik alanının, zemin tabakalanmasına paralel olması durumunda $\beta=1$, dik olması durumunda $\beta= -1$, ve çapraz olması durumunda $\beta= 0.5$ kabul edilir.



Şekil 3.17. Farklı yaklaşımlarla dielektrik katsayısı-su içeriği ilişkisi (Jones ve diğ, 2002)

Prob konfigürasyonu TDR ölçümlerini etkileyecek önemli bir kriterdir. Şekil 3.18'de farklı konfigürasyonlar ile elde edilen elektriksel alanın ne ölçüde düzgün yayılabildiği görülebilir. İki prob kullanılması halinde en az zemin bozulması sağlanırken, elektriksel alanın düzgün yayılmaktan çok uzak olduğu fark edilmiştir. Bu durum dengesiz bir sinyal oluştururken, böylelikle sinyal kaybı ve istenmeyen gürültü meydana gelmektedir. Bu problemin giderilmesi için prob başlığına bir dengeleme transformatörü yerleştirmek gerekir.








Şekil 3.18. Farklı prob konfigürasyonları ile oluşan elektriksel alanlar (Jones ve diğ., 2002)

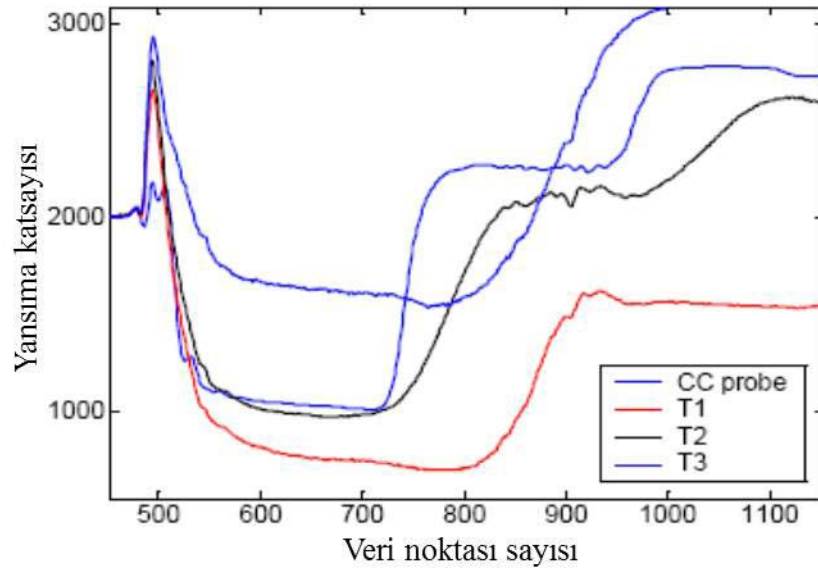
Problarda ikiden fazla iletkenin kullanılmasıyla elektriksel alanın daha düzgün bir yapıya sahip olması hedeflenmekle beraber, zeminin yapısının daha fazla bozulması kaçınılmaz olmaktadır. Bu yüzden çok iletkenli problemlerin zemine daha hassas yerleştirilmesi ve tekrar yerleştirilmek üzere çıkartılırken bu işlemin daha yavaş gerçekleştirilmesinde fayda vardır. Ayrıca çok iletkenli problemlerin orta iletkeninin etrafında yüksek düzeyde yoğunlaşan elektriksel alan sebebiyle bu bölgenin su içeriği değerinin sonuçlarda daha baskın olarak ortaya çıkması kaçınılmazdır.

Prob konfigürasyonu ile ilgili değerli çalışmalardan biri Lin ve diğ. (2004) farklı iletken genişlikleriyle ve farklı iletkenler arası mesafe ile gerçekleştirdikleri su içeriği deneyleridir. Aşağıdaki tabloda kullanılan prob konfigürasyonu görülmektedir.

Tablo 3.2. Deney için hazırlanan prob konfigürasyonları (Lin ve diğ., 2004)

Tip No	İletken genişliği	İletken uzunluğu	İletken sayısı	Prob geometrisi
T1	20	200	4	
T2	30	146	3	
T3	20	200	2	
T4	10	200	2	
T5	3	200	2	

Problarda iletken olarak kullanılan bakır elemanların sayısı, dolayısıyla birbirlerine olan uzaklıkları ve ebatları, bakır iletkenlerin genişlikleri deney parametreleridir. Karşılaştırma amacıyla bir adet koaksiyel prob (grafiklerde CC olarak görünmekte) ile su içeriği ölçümleri yapılmıştır. Şekil 18'de görüldüğü üzere, bakır iletkenlerin sayısı ve genişlikleri arttıkça, probun empedansı artmış ve doğal olarak ilk yansıma noktasından sonra daha düşük değerlere varılmıştır (T1).



Şekil 3.19. İletken sayısı ve genişliklerinin TDR kaydına yansıması (Lin ve diğ., 2004)

1996 yılında Hook ve Livingston, TDR ölçümleriyle hacimsel su içeriğinin hesaplanmasında, dielektrik katsayısını devre dışı bırakıp, eşitliklerinde voltaj adımının zeminden yansıyıp dönme süresini (T), fırında kurutulmuş zeminde yansıma süresini (T_s) ve aynı iletim hattının havada olması durumunda geçecek süreyi (T_a) ve suyun dielektrik katsayısını (K_a) (80.32) kullanarak başarmışlardır.

$$\theta = [T/T_a - T_s/T_a] / \sqrt{K_a} - 1 \quad (3.40)$$

TDR ölçümleriyle, su içeriği ve yerinde yoğunluk değerlerinin tespiti, ASTM'nin standart deney yöntemlerinden biri haline gelmiştir (ASTM D6780-05). Yöntemde zeminin dielektrik katsayısı, zemin türü, boşluk suyu iletkenliği ve su içeriğine bağlı 2 katsayıyla elektrik iletkenliğine bağlanmıştır.

4. HİDROLİK VE ELEKTRİKSEL İLETKENLİK

Permeabilite katsayısının elektriksel akım karakteristikleri yardımıyla bulunması amacıyla yapılacak laboratuvar çalışmalarına geçilmeden önce elektriksel akım karakteristikleri ile hidrolik akım karakteristikleri arasındaki matematiksel ilişki irdelenmiştir.

4.1. Hidrolik İletkenlik

Zeminin içerisindeki hidrolik akım Darcy Yasası ile tanımlanmıştır. Denklem (4.1)'de akım hızı, Denklem (4.2)'de ise A kesit alanına sahip bir zemin içinden geçen akım miktarının bağıntıları verilmiştir.

$$v_h = k_h i_h \quad (4.1)$$

$$q_h = k_h i_h A \quad (4.2)$$

Burada akım hızı v_h , hidrolik eğim i_h , permeabilite katsayısı k_h , zeminin kesit alanı A , zemin içinden geçen akım miktarı q_h olarak tanımlanmıştır.

Zemin içindeki sıvı akımının laminer olduğu kabul edilir. Zemin içindeki akım zemin özelliklerine ve zeminin içinden geçen sıvının özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Genel olarak zemin içindeki akım ile ilgili bağıntıların başlangıç noktası olarak Poiseuille Yasasından faydalanılmaktadır. Poiseuille Yasasına göre bir borunun içerisinde geçen suyun akım hızı v_{ort} Denklem (4.3)'de gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$v_{ort} = \frac{\gamma_p R^2}{8\mu} i_h \quad (4.3)$$

Burada μ , viskoziteyi, R , akımın gerçekleştiği yöndeki tüpün yarıçapını, γ_p , akışkanın birim hacim ağırlığını tanımlamaktadır. Zemin içerisindeki akım kanalları çeşitli boyutlarda olabilir. Bu sebepten karakteristik akım yarıçapı tanımlanması gerekmektedir. Karakteristik hidrolik akım yarıçapı R_H ;

$$R_H = \frac{\text{A kesit alanındaki akım kanallarının alanı}}{\text{Kesit alanındaki akım kanallarının çevresi}} \quad (4.4)$$

Dairesel kesitli bir tüpte meydana gelen akımın hidrolik akım yarıçapı aşağıda verilmiştir.

$$R_H = \frac{\pi R^2}{2\pi R} = \frac{R}{2} \Rightarrow R = 2R_H \quad (4.5)$$

Dairesel kesitli bir tüpte meydana gelecek akım miktarını hesaplamak için Denklem (4.5)'te gösterilen hidrolik akım yarıçapı Poiseuille denkleminde yerine konulduğunda eşitlik;

$$q_{dairesel} = \frac{1}{2} \frac{\gamma_p}{\mu} R_h^2 i_h a \quad (4.6)$$

halini alacaktır. Burada dairese kesitli tüpün alanı a ile gösterilmiştir. Farklı kesit türleri içinde bu eşitlik uygulanabilir. Fakat değişik kesitler olması durumunda bir şekil faktörünün kullanılması gerekmektedir. Denklem (4.6)'da verilen eşitlikte, şekil faktörü (C_s) tanımlandığında yeni eşitlik Denklem (4.7)'de verilen şekle dönüşmektedir;

$$q = C_s \frac{\gamma_p R_h^2}{\mu} i_h a \quad (4.7)$$

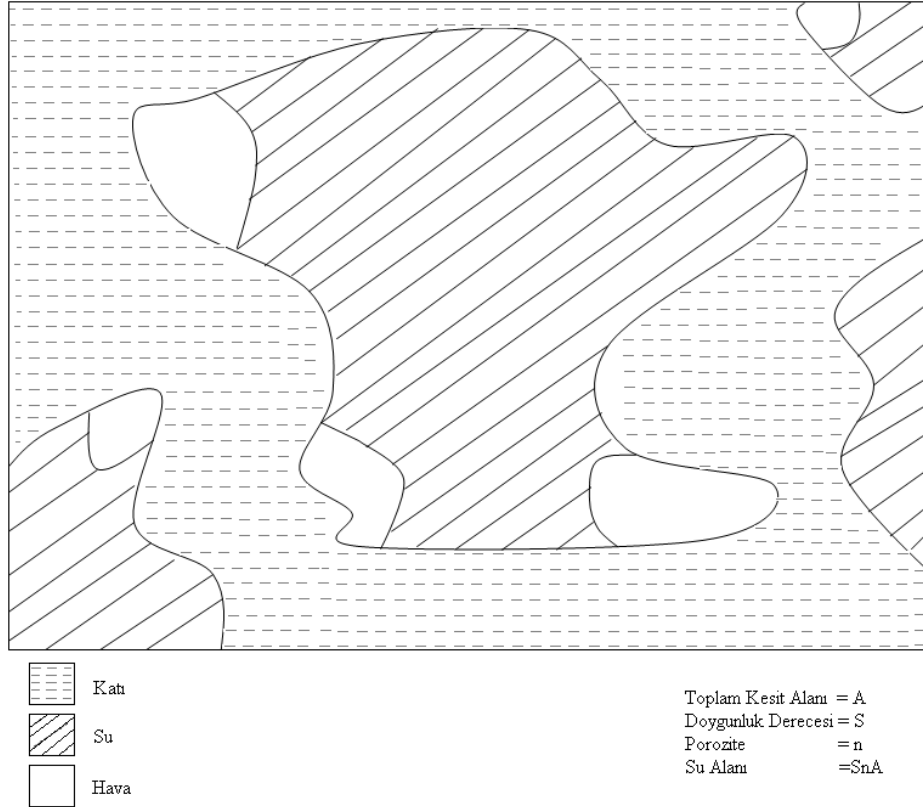
Bu eşitlik sabit kesitli paralel tüp demetleri olması durumunda geçerlidir. Düzensiz kesitler için zemin içerisindeki suyun alanının tanımlanması gerekmektedir. Bu alan Şekil 4.1'de gösterilmiş ve aşağıdaki Denklem (4.8)'de tanımlanmıştır.

$$A_f = Sna \quad (4.8)$$

Burada S doygunluk derecesini, n poroziteyi temsil etmektedir. Bu durum için hidrolik akım yarıçapı Denklem (4.9)'da gösterilmiştir.

$$R_H = \frac{A_f}{P} = \frac{A_f L}{PL} = \frac{V_w}{V_s S_0} \quad (4.9)$$

Bu ifadede akım kanallarının çevresi P , akım kanalının akım yönündeki uzunluğu L , katların hacmi V_s , suyun hacmi V_w , danelerin birim hacimdeki ıslak yüzeyi S_0 olarak tanımlanmıştır. Islak zemin yüzeyi zeminin dane boyutu ve dokusuna bağlı olarak değişmektedir. Tüm dane yüzeyleri boyunca akışın çok bitişik olmadığı durumlarda zeminlerin toplam spesifik yüzey alanlarından daha azdır.



Şekil 4.1. Sızıntı doğrultusuna dik düzlemdeki kesit görünüşü

Boşluk oranı e , ve katların hacmi V_s olarak tanımlanırsa suyun hacmi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$V_w = eV_s S \quad (4.10)$$

Denklem (4.7)'yi ele alırsak;

$$q = C_s \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) R_H^2 S n i_h A = C_s \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) R_H^2 S \left(\frac{e}{1+e} \right) i_h A \quad (4.11)$$

halini alır. Burada R_H değerini yerine koyarsak;

$$q = C_s \left(\frac{1}{S_0^2} \right) \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) S^3 \left(\frac{e^3}{1+e} \right) i_h A \quad (4.12)$$

Darcy Kanunu ile benzeşim yapılırsa;

$$k_h = C_s \left(\frac{1}{S_0^2} \right) \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) \left(\frac{e^3}{1+e} \right) S^3 \quad (4.13)$$

olarak tanımlanır. Zeminin tamamen suya doygun olması durumunda $S=1$ olarak alınır. Şekil faktörü C_s , $1/(k_0 T^2)$ olarak ifade edilirse, (k_0 , boşluk şekil faktörü, T , tortuosite katsayısı) Denklem 4.14'te verildiği şekilde yazılabilir,

$$k_h = \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) \left(\frac{1}{k_0 T^2 S_0^2} \right) \left(\frac{e^3}{1+e} \right) \quad (4.14)$$

zeminin tamamen suya doygun olmadığı durumda ise Denklem (4.15)'te verildiği gibi gösterilmektedir.

$$k_h = \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) \left(\frac{S^3}{k_0 T^2 S_0^2} \right) \left(\frac{e^3}{1+e} \right) \quad (4.15)$$

Bu denklem kaynaklarda Kozeny-Carman denklemi olarak bilinmektedir. Bu denklemde bilinmesi gereken boşluk şekil faktörünün 2.5 olarak alınması önerilmiştir. Özgül yüzey alanı ise bulunması en zor katsayılarından biridir. Özgül yüzey alanının bulunması amacıyla Chapuis ve Legare (1992) granüler malzemeler ve ince daneli malzemeler için bazı eşitlikler önermişlerdir. Eğer zemin granüler bir zemin ise Denklem (4.16)'da verilen eşitlik, eğer ince daneli bir zemin ise Denklem (4.17)'de verilen eşitliğin kullanılması önerilmiştir.

$$S_0 = \left(\frac{6}{Gs} \right) \sum \left[\frac{P_{NoD} - P_{Nod}}{d} \right] \quad (4.16)$$

Burada ($P_{NoD} - P_{Nod}$) iki elek açıklığı arasında kalan örneğin ağırlıkça yüzdesini, d , elek çapını ifade etmektedir.

$$\frac{1}{S_0} = 6.152 \left(\frac{1}{W_l} \right) - 0.052 \quad (4.17)$$

Burada W_l , likit limit değerini göstermektedir.

Chapuis (2004) yılında yaptığı çalışmasında permeabilite katsayısının tahmininde kullanılan Hazen ve Kozeny-Carman eşitliğini bir arada kullanarak biraz daha basite indirgemiş ve Denklem (4.18)'de görülen şekilde hesaplanabileceğini belirtmiştir.

$$k = 2.4622 \left[\frac{e^3}{1+e} d_{10}^2 \right]^{0.7825} \quad (4.18)$$

Burada e , boşluk oranını, d_{10} ise elek analizi sonucunda zeminin ağırlıkça %10'nun geçtiği elek göstermektedir.

4.2. Elektriksel İletkenlik

Ohm Yasasına göre σ_e elektrik iletkenliktir ve bu kuram toprak-su sistemlerinde de geçerlidir. Elektriksel iletkenlik direncin çarpmaya göre tersi veya Denklem (4.19)'da verilen;

$$\sigma_e = \frac{1}{R_z} \frac{L}{A} \quad (4.19)$$

şeklinde tanımlanabilmektedir.

Burada σ_e elektrik iletkenliği, R_z örneğin direncini, L örnek uzunluğunu, A kesit alanı göstermektedir. Doygun toprağın elektrik iletkenliği genel olarak 0,01-1,0 (S.m⁻¹) arasında değişmektedir. Bu değer zeminin porozitesi, doygunluk derecesi, boşluk

suyunun bileşimi gibi özelliklerine bağlıdır. Mineroloji ise parçacık büyüklüğü, şekli, yüzey geçirgenliği, toprak özellikleri, sıcaklık gibi belirli parametreler getirir.

Archie 1942 yılında temiz doygun kum ve kum taşları üzerinde yaptığı deneyler, sulu toprak ortamının iletkenliğinin boşluk suyuna doğrudan bağlı olduğunu göstermiştir. Bu oran poroziteye ve zeminin dokusuna bağlıdır. Archie (1946)'nin tanımladığı formasyon faktörü (F), doygun zeminin direncinin (ρ_a), doyuran sıvının direncine (ρ_{wsat}) oranıdır.

$$F = \frac{\rho_t}{\rho_{wsat}} = \frac{\sigma_w}{\sigma_t} \quad (4.20)$$

Burada σ_w , boşluk suyunun elektrik iletkenliği, σ_t , doygun zeminin elektrik iletkenliğidir. Formasyon faktörüyle, temiz kum ve kum taşlarının porozitesi arasında ampirik bir formül geliştirilmiştir;

$$F = n^{-m} \quad (4.21)$$

Burada n , porozite, m , zemine özgü bir katsayıdır. (gevşek kumlar için 1,3 değerine , çimentolaşmış kumtaşları için 2,0 değerine sahiptir.)

Formasyon faktörü için % 100 suya doygun durumda ve % 100'den az suya doygun durum için formasyon faktörü ile doygunluk arasında ampirik bir formül saptanmıştır.

$$F_{Sat=1} = (S)^p \frac{\sigma_w}{\sigma_t} \quad (4.22)$$

Archie p sabiti için 2 değerini önermiştir. Yayınlanan diğer p değerleri 1,4 ile 4,6 arasında değişmektedir.

L uzunluğunda A kesit alanına sahip doygun bir zemin örneği düşünüldüğünde boşlukların tümü birbirine bağlı ve bir demet tüp olarak temsil edilirse, tümünün yarıçapları, uzunlukları (L_e) ve alanları (A_e) aynı olduğu varsayılabilir. Burada $A_e = na$ akış yolunun uzunluğu, L_e , tortuosite $T = L_e / L$ dir. Bu durumda

formasyon faktörünün eşitliği porozite ve tortusiteye bağlı olarak Denklem (4.23)'de verilmiştir.

$$F = \frac{T^2}{n} \quad (4.23)$$

Doygunluk oranının 1'den küçük olduğu durumlarda, elektrik akımının geçtiği alan nSA ise, bu durumda $F = (T^2 / nS)$ olacaktır. Bir zeminini porozitesi biliniyorsa F değeri ölçülerek tortusite hesaplanabilir.

$$T = \sqrt{nS \frac{\sigma_w}{\sigma_t}} \quad (4.24)$$

Burada tortusite T , porozite n , doyumluk S , boşluk suyunun elektriksel iletkenliği σ_w , zeminin elektriksel iletkenliği σ_t olarak ifade edilmiştir.

4.3. Hidrolik İletkenlik ile Elektriksel İletkenlik Arasındaki İlişki

Bölüm 4.1'de permeabilite katsayısının bulunabilmesi amacıyla Kozeny-Carman ve Chapuis tarafından permeabilite katsayısının bulunabilmesi için önerilen eşitlikler sırasıyla Denklem (4.15) ve Denklem (4.18)'de verilmiştir. Bölüm 4.2'de ise zeminin elektriksel akım karakteristikleri ile ilgili tanımlamalar yapılmıştır. Bu bölümde ise hidrolik iletkenlik ve elektriksel iletkenlik arasındaki ilişki irdelenmiştir.

4.3.1. Kozeny-Carman denklemi ile elektriksel iletkenlik arasındaki ilişki

Kozeny-Carman tarafından geliştirilen ve bölüm 4.1'de ayrıntılı olarak anlatılan Kozeny-Carman eşitliği Denklem (4.25)'de verilmiştir.

$$k_h = \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) \left(\frac{S^3}{k_0 T^2 S_0^2} \right) \left(\frac{e^3}{1+e} \right) \quad (4.25)$$

Burada γ_p , zemin içerisinde bulunan sıvının birim hacim ağırlığını, μ , akışkanın viskozitesini temsil etmektedir. Zemin mekaniği problemlerinde genel olarak bu sıvı su olduğundan dolayı suyun birim hacim ağırlığı ve viskozitesi kullanılacaktır. Yine

eşitlik incelediğinde S , doygunluk ve e , boşluk oranını ifade etmektedir. Elde yeterli bilgi olduğunda bu değerlerde zemin prizması yardımıyla kolayca hesaplanabilmektedir. Denklemden kullanılması gereken bir başka değer ise S_0 , özgül yüzey alanı değeridir. Bu değer deneysel olarak hesaplanması oldukça zordur fakat Chapuis ve Legare (1992) tarafından geliştirilen ve elek analizi sonucunda elde edilen değerler kullanılarak kolayca hesaplanabilmektedir. Bu denklemden hesaplanması en zor katsayı ise tortusite katsayısıdır.

Bu bağlamda tortusite katsayısının bulunması büyük önem taşımaktadır. Tortusite katsayısı elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak bulunabilmektedir. Bölüm 4.2’de tortusite katsayısının bulunması ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Denklem (4.26)’da tortusite katsayısının elektriksel akım karakteristikleri ile ilişkisi verilmiştir.

$$T = \sqrt{nS \frac{\sigma_w}{\sigma_t}} \quad (4.26)$$

Burada tortusite T , porozite n , doygunluk S , boşluk suyunun elektriksel iletkenliği σ_w , zeminin elektriksel iletkenliği σ_t , olarak ifade edilmiştir. Tortusite katsayısını Denklem (4.25)’de yerine konulursa eşitlik Denklem (4.27)’de verilen şekli alacaktır.

$$k_h = \left(\frac{\gamma_p}{\mu} \right) \left(\frac{S^2}{k_0 n \frac{\sigma_w}{\sigma_t} S_0^2} \right) \left(\frac{e^3}{1+e} \right) \quad (4.27)$$

Denklem (4.27)’de permeabilite katsayısını elektriksel akım karakteristikleri ve zemine ait bazı geoteknik özellikler kullanılarak bulunabileceği gösterilmiştir.

4.3.2. Chapuis denklemi ile elektriksel iletkenlik arasındaki ilişki

Zeminin permeabilitesini etkileyen en önemli faktörün zemin içerisinde bulunan boşluklar olduğunu daha önce de anlatılmıştır. Chapuis bu ilişkiyi kullanarak permeabilite katsayısının boşluk oranına bağlı olarak Denklem (4.28)’de verilen eşitlik yardımıyla bulunabileceğini göstermiştir.

$$k = 2.4622 \left[\frac{e^3}{1+e} d_{10}^2 \right]^{0.7825} \quad (4.28)$$

Bu eşitlikten de görüleceği üzere dolaylı zeminin boşluk oranı permeabilite katsayısının bulunması konusunda büyük önem taşımaktadır. Boşluk oranı zemin içerisinde bulunan boşlukların hacminin, katıların hacmine oranıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$e = \frac{V_w + V_a}{V_s} \quad (4.29)$$

Burada V_a , V_w , V_s ise sırasıyla havanın, suyun ve zemin danelerinin hacmini temsil etmektedir.

Porozite ise boşlukların hacminin tüm hacme oranı olarak tariflenmiştir ve Denklem (4.30)'da verilmiştir.

$$n = \frac{V_w + V_a}{V} \quad (4.30)$$

Denklem (4.29) ve Denklem (4.30) ifadelerini kullanarak, boşluk oranı ve porozite değerlerini birbirleri cinsinden yazmak olanaklıdır. Sırasıyla Denklem (4.31) ve (4.32)'de boşluk oranı ve porozitenin birbirleri cinsinden denklemleri verilmiştir.

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (4.31)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (4.32)$$

Zeminin içerisindeki tüm boşlukların su ile dolu olması yani zeminin %100 suya doymun olması durumunda boşluk oranı Denklem (4.33)'de verildiği gibi tanımlanır;

$$e = \frac{V_w}{V_s} \quad (4.33)$$

Aynı şekilde poroziteyi ise Denklem (4.34)'de verildiği gibi ifade edebiliriz.

$$n = \frac{V_w}{V} \quad (4.34)$$

Hacimsel su içeriği zemin içerisindeki su hacminin, zeminin tüm hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır. Porozite ise zemin içerisindeki boşlukların, zeminin tüm hacmine oranı olduğuna göre, zeminin %100 suya doymuş olması, zemin içerisindeki tüm boşlukların suyla dolu olması anlamına gelmektedir. Bu da zeminin suya doymuş haldeki porozitesi ile yine aynı zeminin doymuş haldeki hacimsel su içeriklerinin birbirine eşit olduğunu göstermektedir. Denklem (3.12) ve Denklem (4.34) incelendiğinde bu açık olarak görülmektedir. O halde zeminin suya doymuş olması durumunda aşağıdaki ifadeyi söylemek doğru olacaktır.

$$\theta = n \quad (4.35)$$

veya

$$\theta = \frac{e}{1+e} \quad (4.36)$$

Bu ifade de boşluk oranını hacimsel su içeriği cinsinden yazmak istersek,

$$e = \frac{\theta}{1-\theta} \quad (4.37)$$

boşluk oranını hacimsel su içeriği cinsinden gösterebiliriz. Denklem (4.28)'de verilen eşitlik de boşluk oranı yerine Denklem (4.37)'de tanımlanan boşluk oranını konulursa yeni denklem;

$$k = 2.4622 \left[\frac{\left(\frac{\theta}{1-\theta} \right)^3}{\frac{1}{1-\theta}} d_{10}^2 \right]^{0.7825} \quad (4.38)$$

halini alacaktır. Denklem (4.38)'de görülen hacimsel su içeriği değeri ile dielektrik katsayısı arasındaki ilişki Bölüm 3'te tanımlanmıştır. Topp ve diğ. (1980) tarafından ortaya konulan bu ilişki Denklem (4.39)'da gösterilmiştir.

$$\theta = aK_a^3 - bK_a^2 + cK_a - d \quad (4.39)$$

Denklem (4.39)'da verilen hacimsel su içeriği değeri Denklem (4.38)'de yerine koyulduğunda Denklem (4.40)'da verilen hali alacaktır.

$$k = 2.4622 \left[\frac{\left(\frac{aK_a^3 - bK_a^2 + cK_a - d}{1 - (aK_a^3 - bK_a^2 + cK_a - d)} \right)^3}{\frac{1}{1 - (aK_a^3 - bK_a^2 + cK_a - d)}} d_{10}^2 \right]^{0.7825} \quad (4.40)$$

Bu denklemde de görüldüğü üzere dielektrik katsayısının doğru olarak bulunması halinde Denklem (4.33) kullanılarak permeabilite katsayısının kolayca hesaplanabileceği açık olarak görülmektedir.

Bu denklemin kısıtı ise permeabilite katsayısının doğru olarak tahmin edilebilmesi için zeminin tamamen suya doymun halde olması gerekmektedir. Zeminin suya doymun olmadığı durumlarda denklem geçerliliğini kaybetmektedir.

Zeminin suya doymunluğundan bağımsız olarak bir permeabilite denklemi elde etmek için bazı parametreleri baştan tanımlanırsa, boşluk oranı Denklem (4.41)'de verildiği şekilde tanımlanabilmektedir.

$$e = \frac{V_b}{V_s} \quad (4.41)$$

Yine zemin prizması kullanılarak zeminin kuru yoğunluğu Denklem (4.42)'de verilmiştir.

$$\rho_k = \frac{M_s}{V} \quad (4.42)$$

Zemin danelerinin yoğunluğu ise Denklem (4.43)'de verilmiştir.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (4.43)$$

Denklem (4.41), (4.42) ve (4.43) düzenlenerek boşluk oranı Denklem (4.44)'de verilen şekilde ifade edilmiştir.

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_k} - 1 \quad (4.44)$$

Suyun yoğunluğunu 1 gr.cm^{-3} olarak kabul edilirse Denklem (4.44), Denklem (4.45)'de verilen şekli alacaktır.

$$e = \frac{GS}{\rho_k} - 1 \quad (4.45)$$

Denklem (4.18) ve Denklem (4.45)'i düzenlenirse, permeabilite katsayısını Denklem (4.46)'da verildiği şekilde ifade edilebilir.

$$k = 2.4622 \left[\left(\frac{GS}{\rho_k} - 1 \right)^3 \frac{\rho_k}{GS} d_{10}^2 \right]^{0.7825} \quad (4.46)$$

Bölüm 3'de kuru yoğunluk elektriksel akım karakteristikleri yardımıyla tanımlanmıştı, suyun yoğunluğunu da 1 gr.cm^{-3} kabul edersek kuru yoğunluğu Denklem (4.47)'de verildiği şekilde tanımlanabilir.

$$\rho_k = \frac{V_1}{V_f (c_1 + d_1 (K_a - 1) - c_1 \cdot \exp[-f_1 (K_a - 1)])} \quad (4.47)$$

Denklem (4.48)'i biraz daha sadeleştirmek amacıyla bir E katsayısı tanımlanmıştır. Bu katsayı Denklem (4.48)'de verilmiştir.

$$E = c_1 + d_1 (K_a - 1) - c_1 \cdot \exp[-f_1 (K_a - 1)] \quad (4.48)$$

O halde Denklem (4.46), (4.47) ve (4.48)'i düzenlersek permeabilite katsayısını Denklem (4.49)'da verildiği gibi tanımlanabilir.

$$k = 2.4622 \left[\left(\frac{EV_f GS}{V_1} - 1 \right)^3 \frac{V_1}{EV_f GS} d_{10}^2 \right]^{0.7825} \quad (4.49)$$

Denklem (4.49) zeminin suya doygunluğundan bağımsız bir şekilde permeabilite katsayısının tahminine izin vermektedir. Bu denklemin kullanılabilmesi için TDR cihazı yardımıyla bulunan yansıma formu, zeminin %10'nun geçtiği dane boyutu ve özgül ağırlığın bilinmesi gerekmektedir.

5. MALZEME VE YÖNTEM

5.1. Giriş

Tez çalışması kapsamında daha önceki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılan TDR yöntemi kullanılarak 4 farklı zemine ait dielektrik katsayısı ve elektriksel iletkenlik değerleri bulunarak bu değerlerle permeabilite katsayısı arasındaki ilişki incelenmiştir. İlk aşamada zemin örneklerinin maksimum ve minimum boşluk oranları belirlenmiş ve bazı geoteknik özelliklerinin bulunması amacıyla elek analizi, özgül ağırlık, organik madde belirleme deneyleri yapılmıştır. İkinci aşamada dielektrik katsayısı ile su içeriği arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla kompaksiyon kalıplarına sıkıştırılan zemin örneklerinden TDR ölçümleri alınmıştır. Son aşamada ise permeabilite kalıplarına sıkıştırılan zemin örnekleri üzerinde düşen seviyeli permeabilite deneyi ve eş zamanlı olarak TDR ölçümleri alınarak permeabilite katsayısı belirlenmiştir.

5.2. Malzeme

Deneylerde Marmara Bölgesinde bulunan 4 farklı taşocağından Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarına getirilmiş zemin örnekleri kullanılmıştır. Zeminlerin deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen geoteknik özellikleri Bölüm 6'da verilmiştir.

5.3. Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi Amacıyla Yapılan Deneyler

Tez kapsamında deneysel çalışmalarda kullanılan zeminlerin bazı fiziksel özelliklerinin ve zemin sınıflarının belirlenebilmesi amacıyla laboratuvarında bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

5.3.1. Elek analizi

Zeminlerin dane dağılımlarını ve zemin sınıflarını belirlemek için yıkamalı elek analizi deneyi yapılmıştır. Deney TS1900-1 “İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini” standartında belirtildiği şekilde yapılmıştır.

Elek analizi deneyleri 4 farklı zemin türü için 3'er kez yapılmıştır. Kuru zemin örneklerinden yaklaşık 300'er gram örnek alınmıştır. Alınan örnekler ilk olarak su altında No 200 elekten yıkanarak elenmiştir. Elenen bu örnekler bir kaba konulduktan sonra 24 saat boyunca 105°C sıcaklıktaki etüvde bekletilerek kurutulmaları sağlanmıştır. Etüvde kurutulan örnekler tartıldıktan sonra en büyük açıklıklı elek en üste, en küçük açıklıklı elek en alta gelecek şekilde sıralanan elekler yardımıyla elek sarsma makinası kullanılarak elenmiştir. Her elekte kalan örnekler tartılarak yapılan hesaplamalar sonucunda dane dağılım grafikleri elde edilmiştir.

5.3.2. Özgül kütle deneyi

Zemin örneklerinin özgül ağırlık değerlerinin bulunması amacıyla 4 farklı zemin örneğinden 5'er adet deney örneği alınmıştır. TS1900-1 standardı kullanılarak zeminlerin özgül ağırlık değerleri Denklem (5.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$G_s = \frac{\rho_L (m_2 - m_1)}{\rho_w (m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \quad (5.1)$$

Burada m_1 , m_2 , m_3 , m_4 sırasıyla piknometrenin, piknometre ile kuru zemin örneğinin, piknometre zemin ve piknometrenin içindeki suyun, piknometrenin sadece su ile dolu haldeki ağırlığını ifade etmektedir. Deneyde kullanılan sıvının deney sıcaklığındaki yoğunluğu ρ_L ile, damıtık suyun deney sıcaklığındaki yoğunluğu ise ρ_w ile gösterilmiştir. Yapılan özgül ağırlık deneylerinin tamamında damıtık su kullanılmıştır bu sebeple ρ_L ve ρ_w birbirine eşittir.

5.3.3. Organik madde belirleme

Zemin içerisinde bulunan organik madde miktarının çok olması durumunda TDR yansıma formu yardımıyla elde edilen verilerdeki hata oranları artmaktadır. Bu nedenle deneysel çalışma kapsamında kullanılan örnekler üzerinde organik madde belirleme yapılmıştır. Deney kapsamında BS 1377 standardı kullanılmıştır.

Deney prosedürü hakkında özet bir bilgi verilirse, ilk olarak deney yapılacak örnekten 300gr. alınır ve bu örnek 12 saat boyunca 50°C etüvde bekletilir, süre sonunda ağırlığı tartılır. Tartılan örnek No10 elekten elenir. Elek altında kalan örnekten 10-15 gr. ağırlığında örnekler alınır. Bu örnekler No40 elekten geçebilecek şekilde ufalanır. No 40 elekten geçirilen bu örneklerden yaklaşık olarak 5-7,5 gr.'lık 2 parçaya bölünür ve 4 saat boyunca 50°C etüvde, ardından 12 saat boyunca 440°C'lik etüvde bekletilir. Bu süre sonunda desikatörde soğutulduktan sonra tartılır. Elde edilen veriler Denklem (5.2)' de yerine koyularak malzeme içindeki organik madde miktarı belirlenir.

$$O_M = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_k} 100 \quad (5.2)$$

Burada OM organik madde miktarını, m_2 , etüve koyulan zemin örneğinin miktarını, m_1 , yüksek sıcaklıklı etüvden sonra ölçülen zemin miktarını, m_k ise deney örneğinin etüve koyulduğu kabın ağırlığını temsil etmektedir.

5.3.4. Maksimum ve minimum boşluk oranlarının tayini

Deneyselerde kullanılan zemin örneklerinin maksimum ve minimum boşluk oranı değerleri ASTM D4253 ve ASTM D4254 standartlarına uygun olarak hesaplanmıştır.

Maksimum boşluk oranı ASTM D4253 standartında belirtildiği gibi bulunmuştur. Hacmi bilinen bir kalıba zemin örneği serbest bir şekilde yerleştirilmiş ve ardından kalıbın üst kısmının tıraşlanarak kalıptaki örnek ağırlığı belirlenmiştir. Denklem (5.3) eşitliğinde bulduğumuz zemin ağırlığını ve kalıbın hacmini kullanarak zemin örneğinin minimum yoğunluğunu bulunmuştur.

$$\rho_{min} = \frac{M}{V} \quad (5.3)$$

Burada ρ_{min} zemin örneğinin minimum yoğunluğunu, M kalıp içindeki zemin örneğinin ağırlığını, V ise kalıbın hacmini temsil etmektedir. Minimum yoğunluğunu ve özgül ağırlığı bilinen bir zemin örneğinin maksimum boşluk oranını Denklem (5.4) yardımıyla hesaplanabilir.

$$e_{max} = \frac{G_s \rho_w}{\rho_{min}} - 1 \quad (5.4)$$

Burada e_{max} maksimum boşluk oranını, G_s özgül ağırlığı, ρ_{min} ve ρ_w sırasıyla zeminin minimum yoğunluğunu ve suyun yoğunluğunu ifade etmektedir.

Minimum boşluk oranı tayini ASTM D4254 standardına uygun olarak zemin örneğinin kalıba serbest bir şekilde yerleştirilmiştir. Ardından üzerine 1 cm kalınlığındaki plaka ve 15 kg sürşarj yükü yerleştirilerek sarsma tablasında 4 dk titreşim etkisine tutulmuştur. Sarsma işleminden sonra sıkışma miktarı kumpas yardımı ile belirlenmiş ve sıkışan hacim hesaplanmıştır. Denklem (5.5) yardımıyla deney örneğine ait maksimum yoğunluk değeri hesaplanmıştır.

$$\rho_{max} = \frac{M}{V} \quad (5.5)$$

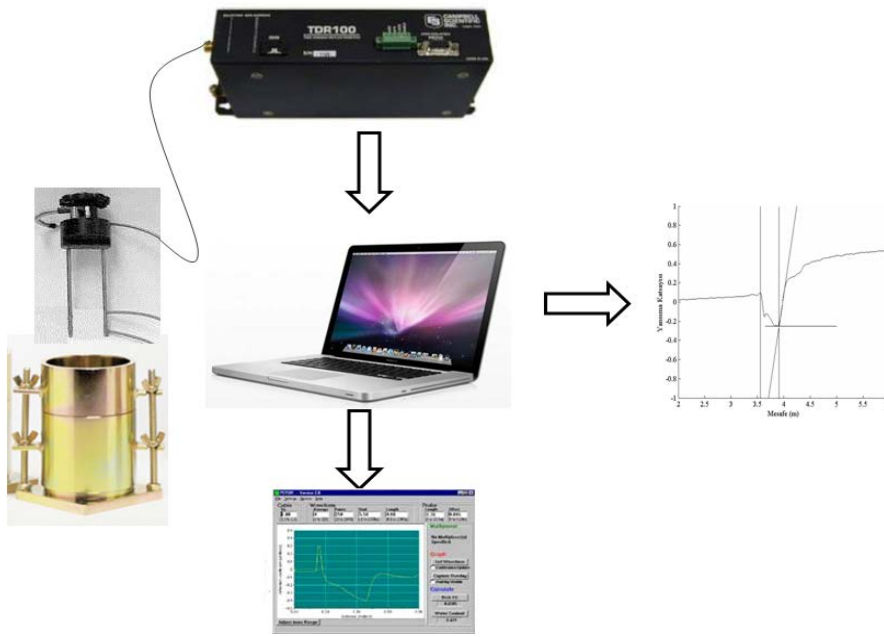
Denklemden ρ_{max} zemin örneğinin maksimum yoğunluğunu, M kalıp içindeki zemin örneğinin ağırlığını, V ise zeminin sıkışma işleminden sonraki hacmini temsil etmektedir. Maksimum yoğunluğunu ve özgül ağırlığı bilinen bir zemin örneğinin minimum boşluk oranını Denklem (5.6) yardımıyla hesaplanabilir.

$$e_{min} = \frac{G_s \rho_w}{\rho_{max}} - 1 \quad (5.6)$$

Burada e_{min} , minimum boşluk oranını, G_s , özgül ağırlığı, ρ_{max} ve ρ_w sırasıyla zeminin maksimum yoğunluğunu ve suyun yoğunluğunu göstermektedir.

5.4. Dielektrik Katsayısı – Hacimsel Su İçeriği Arasındaki İlişkinin TDR ile Belirlenmesi

Zemin örneklerinin dielektrik katsayıları ile hacimsel su içerikleri arasındaki ilişkiler TDR yansıma formu kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla tüm zemin örneklerine belirli oranlarda su katılarak homojen olarak karıştırılmıştır. Homojen olarak karıştırılan zemin örnekleri standart kompaksiyon kalıplarına, standart kompaksiyon enerjisi uygulanarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan örneklerin su içeriklerinin bulunabilmesi için kalıp içine sıkıştırılan örnekler içinden ikişer adet deney örneği alınarak etüv yardımıyla su içerikleri hesaplanmıştır. Ayrıca kalıp içerisine sıkıştırılan zemin örneğinin ağırlığının bulunabilmesi amacıyla kompaksiyon kalıbı zemin örneği içerisine sıkıştırılmadan önce ve sonra tartılmıştır.

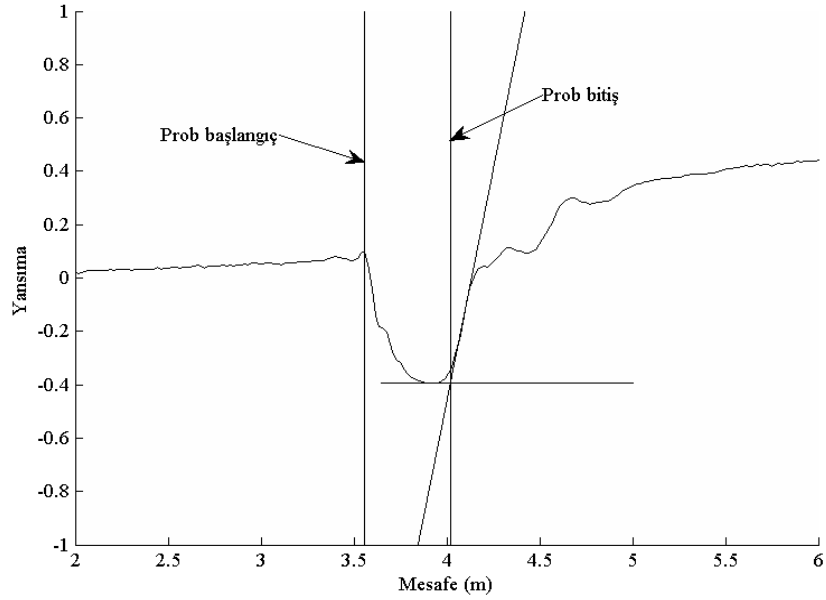


Şekil 5.1. Ölçüm sistemi

Kompaksiyon kalıplarına yerleştirilen zemin örneklerinin yansıma-mesafe grafikleri zemin içerisine yerleştirilen prob, probun bağlı olduğu TDR 100 cihazı ve bilgisayarda bulunan PCTDR programı yardımıyla elde edilmiştir. Ölçüm sistemi şematik olarak Şekil 5.1’de verilmiştir. Ölçümlerde Campbell Scientific firması tarafından üretilen TDR100 cihazı kullanılmıştır. TDR100 cihazı tarafından gönderilen sinyalin zemin içerisinden yansımasından sonra RS232 kablosu

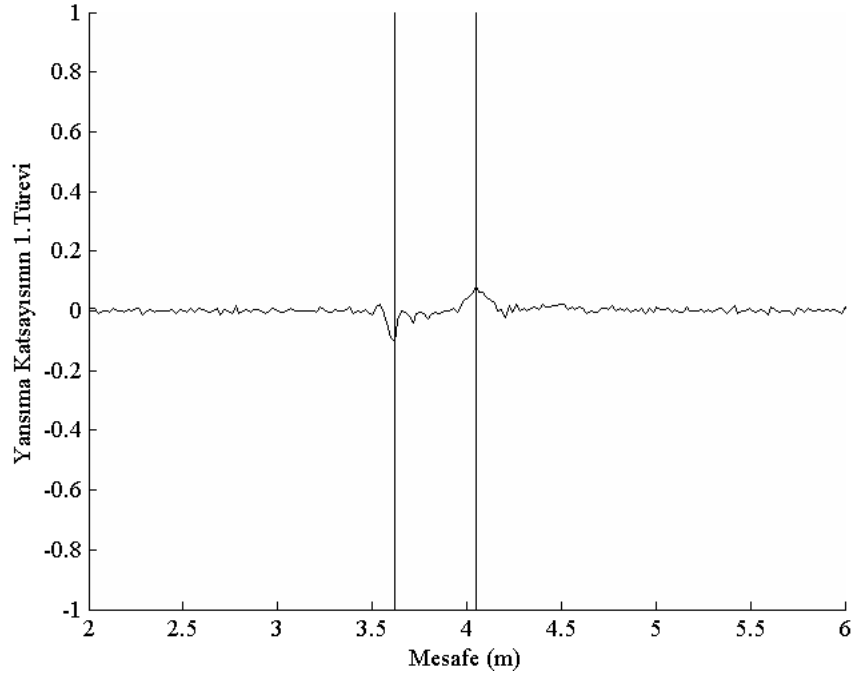
vasıtasıyla bilgisayara aktarılıp PCTDR yazılımı ile yansıma formu görüntülenmiştir. PCTDR programında görüntülenen yansıma formu sayısal veri olarak alınmış ve tez kapsamında geliştirilen bir Matlab kodu kullanılarak işlenmiştir.

Şekil 5.2’de tez kapsamında yapılan program vasıtasıyla çizilen yansıma formu verilmiştir. Zemin içerisine yerleştirilen probun başlangıç ve bitiş noktaları teğet yöntemi ile bulunmuştur. Probun başlangıç ve bitiş noktaları kullanılarak elde edilen prob boyunun, probun gerçek boyuna oranından faydalanarak zeminin dielektrik katsayısı Denklem (3.10)’a göre hesaplanabilmektedir.



Şekil 5.2. Teğet yöntemi için örnek bir yansıma formu

Şekil 5.3’te türev yöntemi kullanılarak probun başlangıç ve bitiş noktaları bulunmuştur. Yansıma formunun türevi alınarak türevin en düşük ve en yüksek olduğu noktaların tespit edilmesi ve ardından bu noktaların eğimleri ve yansıma formunun maksimum ve minimum noktalarından çizilen teğetlerin kesişim noktaları bulunarak, bulunan bu iki nokta arasındaki aralığın ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Probun başlangıç ve bitiş noktası arasındakı aralık bulunduktan sonra teğet yöntemi ile aynı şekilde Denklem (3.10)’a göre dielektrik katsayısı hesaplanmıştır.



Şekil 5.3. Türev yöntemi için örnek bir yansıma formu

Her iki yöntemle de dielektrik katsayıları hesaplanmış ve dielektrik katsayıları ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişki Topp ve diğ. (1980) ve Leideu ve diğ. (1986) modelleri kullanılarak modellerin performansları incelenmiştir.

5.5. Permeabilite Deneyi ve TDR Ölçümü

Tez kapsamında hidrolik iletkenlik ve elektriksel iletkenlik ile ilgili denklemler incelendiğinde, Kozeny-Carman ve Chapuis tarafından geliştirilen denklemler, zeminin elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak tekrar düzenlenmiştir. Düzenlemeler sonucunda permeabilite katsayısının bulunması amacıyla gerekli olan elektriksel akım karakteristikleri TDR yansıma formu kullanılarak bulunmuştur.

5.5.1. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak permeabilite katsayısının hesaplanması

Kozeny-Carman eşitliğinin elektriksel akım karakteristikleri kullanarak düzenlenmiş hali daha önce Denklem (4.27)'de verilmiştir.

Bu eşitlikte zeminin doygunluk derecesi denklem içerisinde bulunduğu için zeminin suya doygun hale getirilmesine gerek kalmamaktadır. Permeabilite katsayısının

hesaplanması için ilk aşamada zeminin boşluk oranı, porozitesi ve doygunluk derecesi gibi geoteknik özellikleri ve ayrıca elek analizi deneyi yapılarak zeminin özgül yüzey alanı hesaplanmıştır.

İkinci aşamada ise TDR okumaları yapılarak yansıma formları elde edilmiştir. TDR okumaları hem zeminler suya doymun hale getirilerek yani düşen seviyeli permeabilite deneyi prosedürleri uygulanarak, hem de kompaksiyon kalıbına değişik su içeriklerinde sıkıştırılan örnekler kullanılarak yapılmıştır. Ardından TDR okumalarından elde edilen yansıma formları ve Denklem (4.27) kullanılarak hem doymun halde hem de doymun olmayan hallerde permeabilite katsayıları hesaplanmıştır.

Kozeny-Carman denklemi yardımıyla hesaplanan permeabilite katsayıları, hem düşen seviyeli permeabilite deneyi sonucunda hem de boşluk oranı kullanılarak elde edilen permeabilite katsayıları ile karşılaştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

5.5.2. Chapuis eşitliği kullanılarak permeabilite katsayısının hesaplanması

Chapuis (2004) eşitliği Denklem (4.28)'de verilmiştir. Bu denklem de hatırlanacağı gibi boşluk oranı ve zeminin %10'nun geçtiği elek çapı kullanılarak permeabilite katsayısı kolayca hesaplanabilmektedir.

Bu denklem Bölüm 4'te ayrıntılı olarak anlatıldığı şekilde elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak Denklem (4.40) ve Denklem (4.49)'da verilen hale getirilmiştir.

Denklem (4.40)'da verilen eşitlik sadece zeminin suya doymun halde olduğu durumlarda geçerlidir. Yani zemin suya doymun halde değil ise bu eşitlik yardımıyla hesaplanan permeabilite katsayısı değerlerinin bir geçerliliği yoktur. Bu amaçla zemin örnekleri sabit seviyeli permeabilite deney yöntemleri uygulanarak suya doymun hale getirilmiştir. Suyu doymun hale getirilen zemin örneklerinden alınan TDR yansıma formları kullanılarak permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Aynı zamanda zeminlerin boşluk oranları hesaplanmış ve Denklem (4.28) kullanılarak permeabilite katsayıları belirlenmiştir. Aynı örnek üzerinde yapılan sabit seviyeli

permeabilite deney sonuçları kullanılarak da permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler birbirleriyle karşılaştırılarak sonuçlar irdelenmiştir.

Bölüm 4'te ayrıntılı olarak anlatılan ve Denklem (4.49)'da verilen eşitlik ise zeminin suya doygunluğundan bağımsız olarak permeabilite katsayısı belirlenebilmektedir.

Zeminin permeabilite katsayısının Denklem (4.49) kullanılarak hesaplanabilmesi için özgül ağırlık değerinin de bilinmesi gerekmektedir. Deneysel olarak kullanılan örneklerin özgül ağırlık değerleri özgül kütle deneyi yapılarak bulunmuştur. Özgül ağırlık ve zeminin %10'nun geçtiği dane çapını bilindiğinde bunların dışında bilinmesi gereken parametreler sadece elektriksel akım karakteristikleridir. Elektriksel akım karakteristikleri TDR okumaları sonucunda elde edilmiştir.

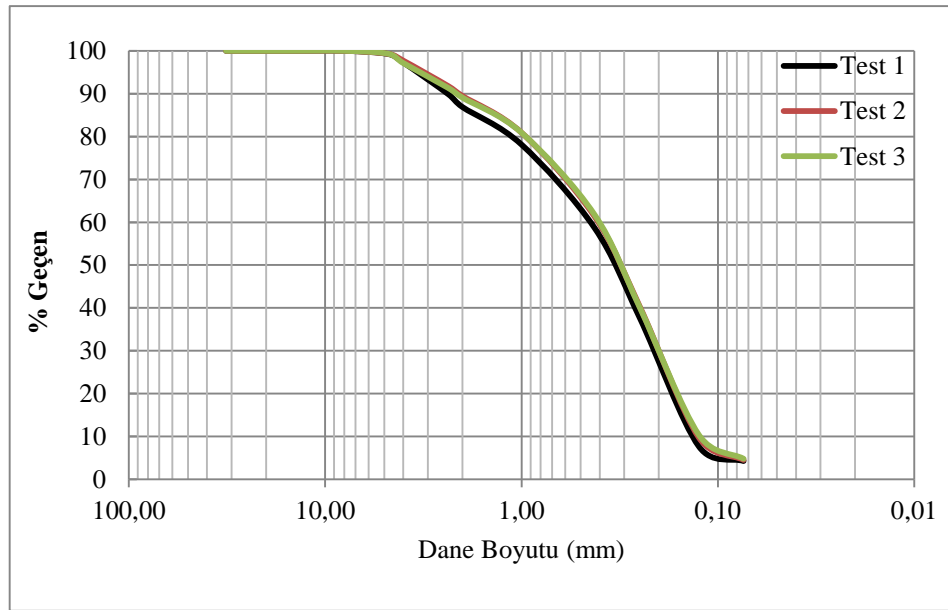
Permeabilite katsayısı hesapları Denklem (4.49) kullanılarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda diğer yöntemlerle de hesaplanan permeabilite katsayıları ile karşılaştırılarak tahmin edilen permeabilite katsayılarının doğrulukları irdelenmiştir.

6. ZEMİNLERİN FİZİKSEL VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan zemin örneklerinin bazı fiziksel ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneylerin sonuçları verilecektir. Tez kapsamında 4 farklı zemin örneği kullanılmıştır. Her bir zemin örneği için yapılan tüm deneyler ayrı ayrı ve sırayla sunulmuştur.

6.1. Deney Örneği-1 İçin Yapılan Sınıflandırma Deneyleri

İlk olarak örneğin dane dağılımının ve zemin sınıfının belirlenmesi amacıyla elek analizi deneyi yapılmıştır. Elek analizi deneyi aynı örnek için 3 kez yinelenmiştir. Elek analizi sonucunda elde edilen dane dağılımı eğrisi Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Deney Örneği-1 için yapılan elek analizi deney sonuçları

Yapılan deney sonucunda Deney Örneği-1’in TS1500 Zemin Sınıflandırma Sistemine göre SP (kötü derecelenmiş kum) olduğu belirlenmiştir. Tablo 6.1’de dane dağılımı sonuçlarına göre çakıl, kum ve ince dane oranları verilmiştir. Tez kapsamında bu noktadan sonra bu örnek SP-1 olarak isimlendirilmiştir.

Tablo 6.1. SP-1 türü kum örneğine ait dane dağılımları

Örnek Adı	Çakıl Yüzdesi (%)	Kum Yüzdesi (%)	İnceler (%)
Deney 1	10	86	4
Deney 2	8	87	5
Deney 3	9	86	5
Ortalama	9	86	5

Zemin örneğinin özgül ağırlık değerini bulmak için özgül ağırlık deneyi 5 kez yinelenmiş ve yapılan deney sonuçlarına göre SP-1 türü kum örneğinin özgül ağırlık değeri 2,69 olarak bulunmuştur. Özgül ağırlık deney sonuçları Ek-B’de verilmiştir.

Ayrıca bu örnek için yapılan organik madde belirleme deney sonuçlarına göre örnek içerisinde %0,08 oranında organik madde olduğu saptanmıştır. Maksimum ve minimum boşluk oranı değerleri sırasıyla 0,77 ve 0,51 olarak bulunmuştur. Tablo 6.2’de SP-1 türü kum örneğine ait bazı geoteknik özellikler tablo halinde verilmiştir.

Tablo 6.2. SP-1 türü kum örneğine ait bazı geoteknik özellikler

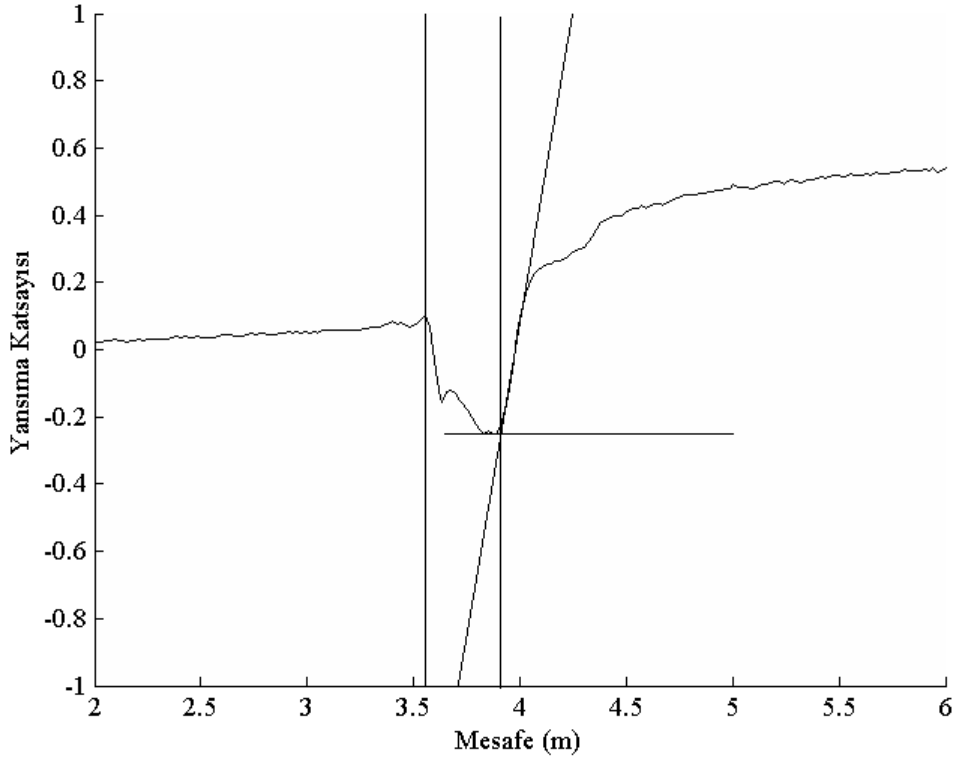
Zemin Sınıfı	d_{10}	d_{30}	d_{60}	C_u	C_c	GS	e_{min}	e_{max}	S_0
SP-1	0,13	0,22	0,45	3,462	0,827	2,69	0,51	0,77	17,35

6.2. SP-3 Türü Kum Örneği için Hacimsel Su İçeriği-Dielektrik Katsayısı Arasındaki İlişkinin TDR ile Bulunması

Bu bölümde SP-1 türü kum örneği için 11 farklı su içeriğinde hazırlanmış zemin örnekleri kompaksiyon kalıbına sıkıştırılmış ve örneklerden alınan TDR ölçümleri sonucunda elde edilen grafikler analiz edilmiştir. Bu analizlerin birinci aşaması teğet yöntemi ve türev yöntemi kullanılarak dielektrik katsayılarının bulunmasıdır. İkinci aşamada ise dielektrik katsayıları ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişkiler Topp ve diğ. (1980) ve Ledieu ve diğ. (1986) modelleriyle kurulmuştur.

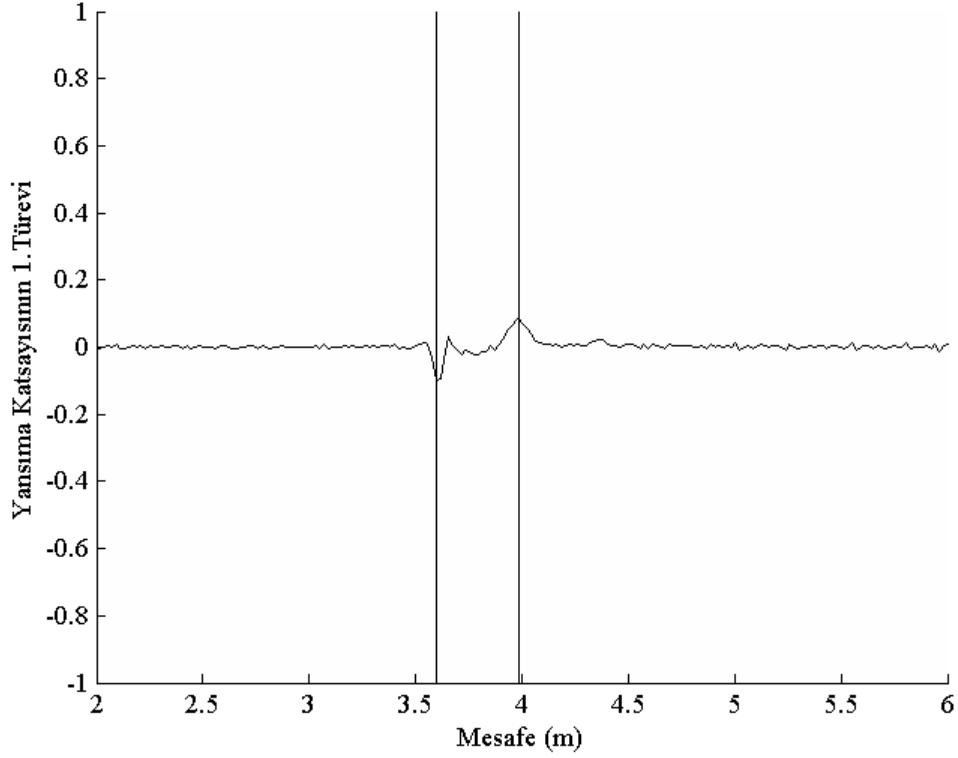
6.2.1. Dielektrik katsayının teğet yöntemi ve türev yöntemi ile bulunması

Farklı su içeriği değerlerinde sıkıştırılmış 11 örnek için alınan TDR ölçümleri kullanılarak teğet yöntemi ve türev yöntemine göre dielektrik katsayıları bulunmuştur. Ek-C'de elde edilen tüm yansıma formu grafikleri verilmiştir. Bu bölümde ise örnek olarak her iki yöntemle hesaplanan 1'er adet yansıma formu grafiği Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.2. SP-1 örneği için teğet yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması

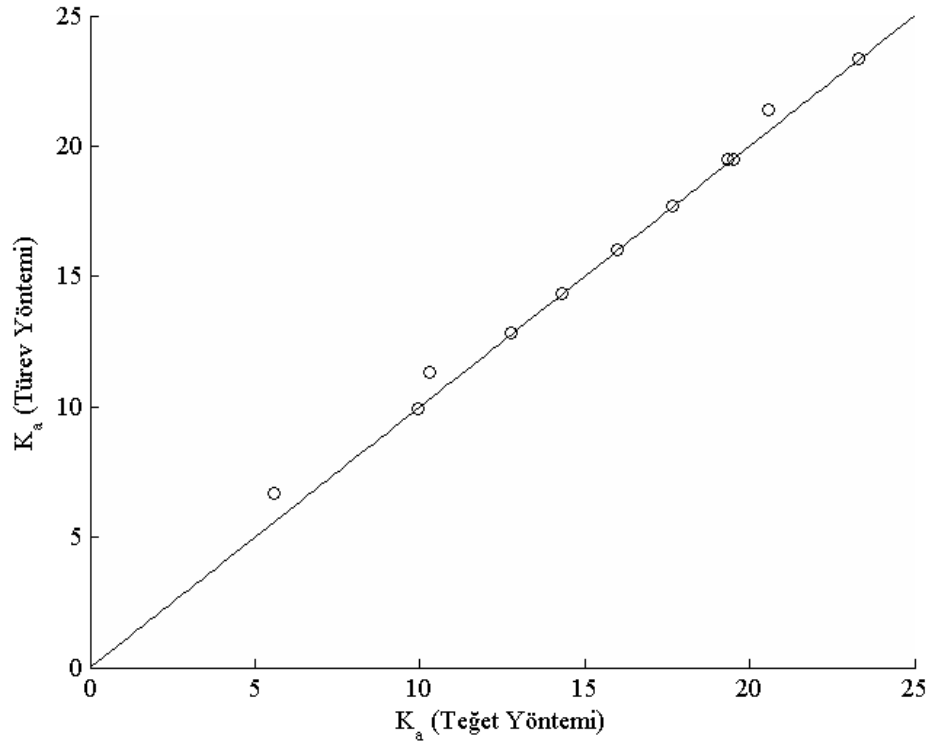
Şekil 6.2'de hacimsel su içeriği %7,4 olan zemin örneği için alınan TDR yansıma formu grafiği verilmiştir. Probun başlangıç ve bitiş noktaları teğet yöntemi ile bulunmuştur. Başlangıç ve bitiş noktası arasındaki uzaklık görünen prob uzunluğunu (L_a) vermektedir. Görünen prob uzunluğu bu deney için 0,391 m. olarak bulunmuştur. Gerçek prob uzunluğu ise 0,093 m.'dir. Buna göre dielektrik katsayısı Denklem (3.10)'da verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmış ve 17,7 değeri elde edilmiştir.



Şekil 6.3. SP-1 örneği için türev yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması

Şekil 6.3’de yine hacimsel su içeriği %7,4 olan zemin örneği için alınan TDR yansıma formu grafiğinin 1.türevi alınarak elde edilen grafik verilmiştir. Probu başlangıç ve bitiş noktaları türev yöntemi ile bulunmuştur. Başlangıç ve bitiş noktası arasındaki uzaklık görünen prob uzunluğunu (L_a) vermektedir. Görünen prob uzunluğu bu yöntem ile de 0,391 m. olarak bulunmuştur. Gerçek prob uzunluğu ise 0,093 m.’dir. Buna göre dielektrik katsayısı Denklem (3.10)’da verilen eşitlik yardımıyla hesapladığında teğet yönteminde olduğu gibi 17,7 değeri elde edilmiştir.

Bu işlemler 11 farklı su içeriğinde kompaksiyon kalıplarına sıkıştırılan zemin örnekleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Teğet yöntemi ve türev yöntemi kullanılarak hesaplanan dielektrik katsayıları Şekil 6.4’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi her iki yöntemle ayrı ayrı hesaplanan dielektrik katsayıları birbirine oldukça yakın değerler almıştır. Hesaplanan bu dielektrik katsayıları kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan regresyon analizi sonucunda regresyon katsayısı 0,997 olarak bulunmuştur.

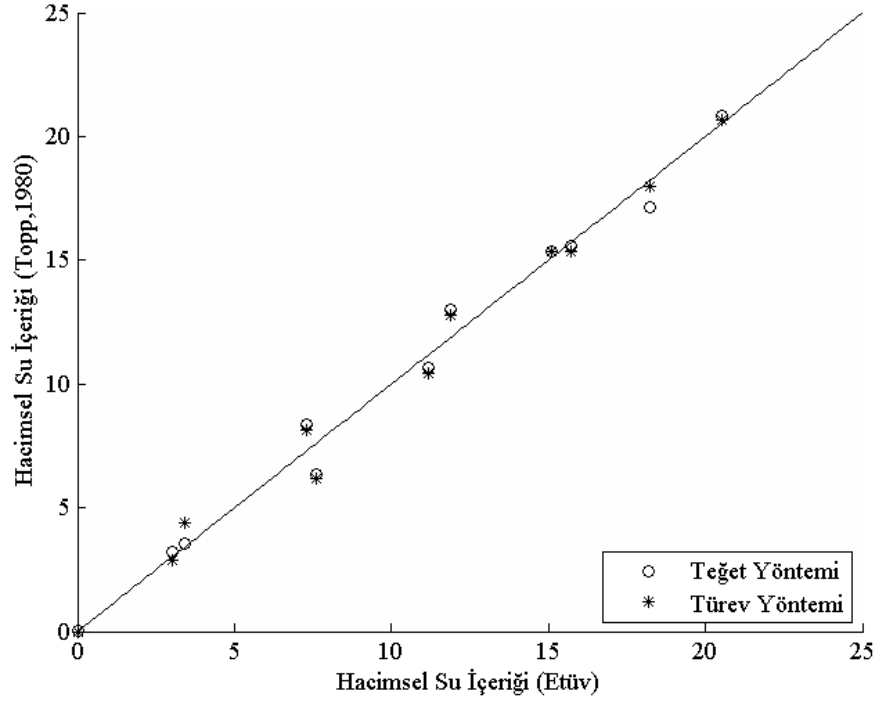


Şekil 6.4. SP-1 örneği için türev yöntemi ve teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayılarının karşılaştırılması

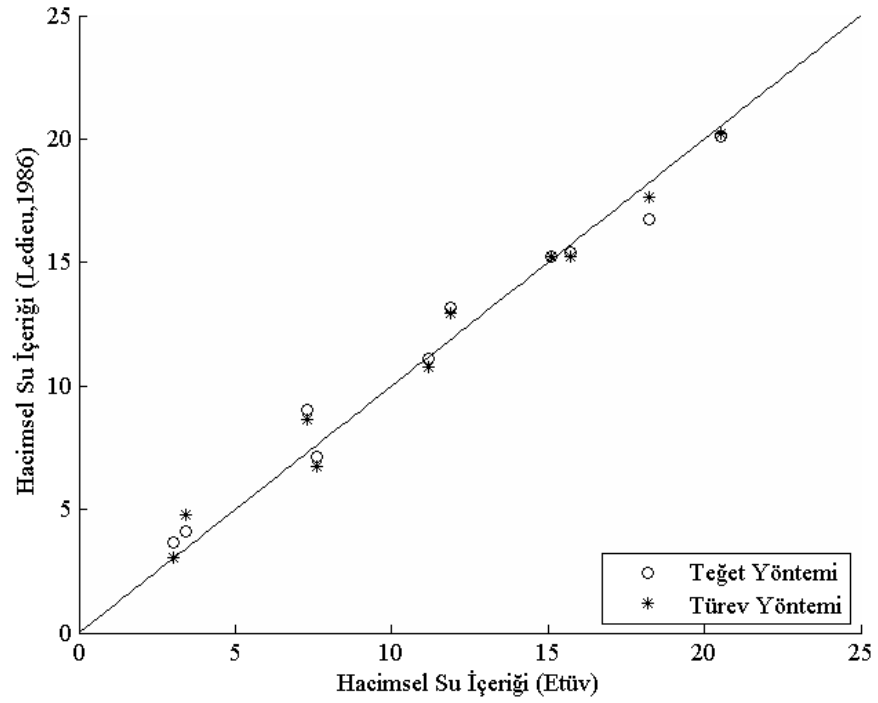
6.2.2. Dielektrik katsayısı kullanılarak hacimsel su içeriğinin bulunması

Teğet yöntemi ve türev yöntemi kullanılarak bulunan dielektrik katsayıları ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişkiyi Topp ve diğ. (1980) ve Ledieu ve diğ. (1986) sırasıyla Denklem (3.11) ve Denklem (3.13)'de verilen eşitliklerde göstermişlerdir. Bu eşitlikler, genelleştirilmiş zemin kalibrasyon katsayıları ile kullanılabilir. Fakat zemine özgü kalibrasyon yapılması durumunda daha doğru sonuçlar elde edilmektedir. Zemine özgü kalibrasyon yapıldıktan sonra SP-1 türü kum örneği için elde edilen değerler Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da grafik olarak gösterilmiştir.

Şekil 6.5'de Topp ve diğ. (1980) tarafından önerilen eşitlik, hem teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayıları hem de türev yöntemi yardımıyla bulunan dielektrik katsayıları ile ayrı ayrı kullanılarak hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır. Grafikte x eksenini türev yöntemiyle bulunan hacimsel su içeriğini, y eksenini ise Topp ve diğ. (1980) modeliyle bulunan su içeriği değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 6.5. SP-1 örneği için Topp ve diğ. (1980) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri



Şekil 6.6. SP-1 örneği için Ledieu ve diğ. (1986) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri

Şekil 6.6’da Ledieu ve diğ. (1986) tarafından önerilen eşitlik, hem teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayıları hem de türev yöntemi yardımıyla bulunan dielektrik katsayıları ile ayrı ayrı kullanılarak hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır. Grafikte x eksenini, etüv yardımıyla bulunan hacimsel su içeriğini, y eksenini ise Ledieu ve diğ. (1986) modeliyle bulunan su içeriği değerlerini temsil etmektedir.

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’ da sunulan değerler için regresyon analizi yapılmıştır ve bu analiz sonucunda elde edilen regresyon katsayıları Tablo 6.3’de verilmiştir.

Tablo 6.3. SP-1 türü kum örneğine ait regresyon katsayıları

	Topp ve diğ. (1980)		Ledieu ve diğ. (1986)	
	Teğet yöntemi	Türev yöntemi	Teğet yöntemi	Türev yöntemi
R ²	0,995	0,994	0,982	0,986

SP-1 türü kum örneği için hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri incelendiğinde, Topp ve diğ. (1980) modeli ile hesaplanan hacimsel su içeriği değerlerinin, Ledieu ve diğ. (1986) modeli ile hesaplanan hacimsel su içeriği değerlerine göre daha doğru sonuçlar verdiği görülmektedir.

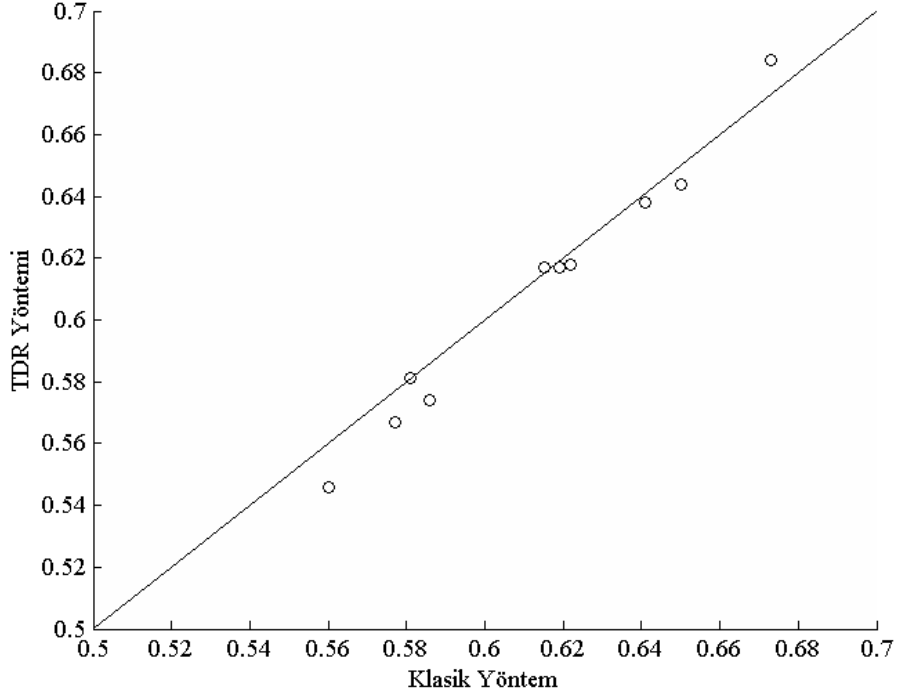
Teğet yöntemi ve türev yöntemi yardımıyla hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri için yapılan regresyon analizi sonuçları incelendiğinde gerek Topp ve diğ. (1980) gerekse Ledieu ve diğ. (1986) modelleri için hesaplanan regresyon katsayıları birbirine çok yakın değerler aldığı görülmektedir.

6.2.3. Boşluk oranının bulunması

Zeminin boşluk oranının bulunması permeabilite katsayısının bulunabilmesi bakımından son derece önemlidir. Eğer bir zeminin özgül ağırlık değeri biliniyorsa hacmi bilinen bir kalıba sıkıştırıldığında alınan TDR ölçümü kullanılarak kalıba sıkıştırılan zeminin boşluk oranı bulunabilir.

Bu bölümde zeminin boşluk oranı hem klasik yöntemle yani etüvden alınan su içeriğini kullanarak hem de TDR dalga formu yardımıyla elde ettiğimiz hacimsel su içeriği değerini kullanarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda gerek

klasik yöntem gerekse TDR yöntemi yardımıyla bulunan boşluk oranı değerleri birbirine oldukça yakın değerler vermektedir. Şekil 6.7’de her iki yöntemle bulunan değerler karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



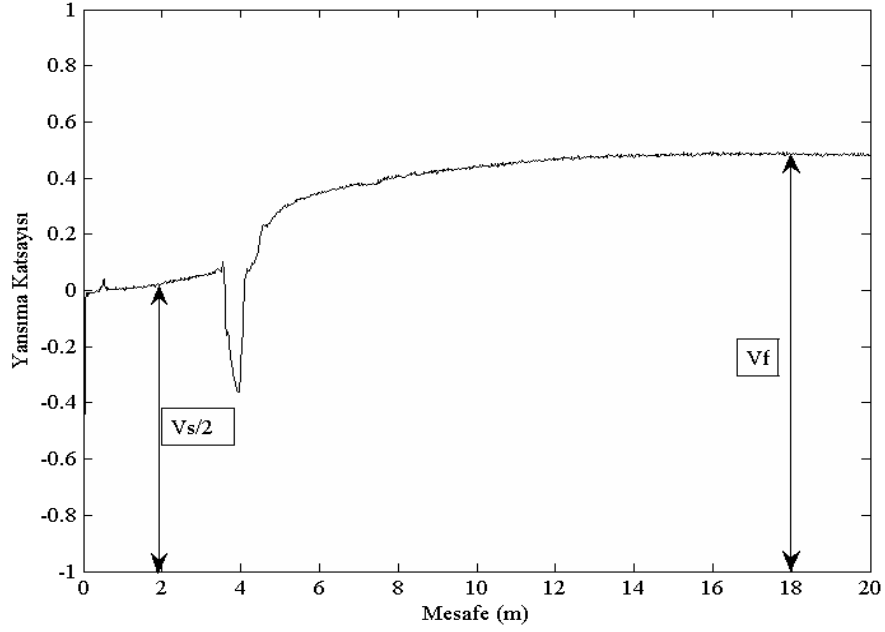
Şekil 6.7. SP-1 örneği için klasik yöntem ve TDR yöntemi ile hesaplanan boşluk oranı değerleri

Burada x eksenini, klasik yöntemle bulunan boşluk oranı değerlerini, y eksenini ise TDR yöntemi yardımıyla bulunan boşluk oranı değerlerini temsil etmektedir. Boşluk oranı değerleri 0,546 ile 0,684 aralığında değişmektedir. Boşluk oranları arasındaki en büyük mutlak fark 0,0140 en küçük fark ise 0 olarak bulunmuştur.

6.2.4. TDR dalga formu kullanılarak zeminin elektriksel iletkenliğinin hesaplanması

Zeminin elektriksel iletkenliğinin ölçülmesi amacıyla TDR yansıma formu incelenmiştir. Elektriksel iletkenlik Yu ve Drnevich (2004) tarafından önerilen ve Denklem (3.23) ve (3.24)’de verilen eşitlikler yardımıyla bulunmuştur. İlk olarak Denklem (3.24)’de verilen eşitlik kullanılarak C katsayısı hesaplanmıştır. Buna göre C katsayısı 13,78 olarak bulunmuştur. Elektriksel iletkenliğin hesaplanabilmesi için

Denklem (3.23)'de verilen eşitlik kullanılmıştır. Bu eşitlikte kullanılacak kritik voltajlar Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Elektriksel iletkenlik için kritik voltaj değerleri

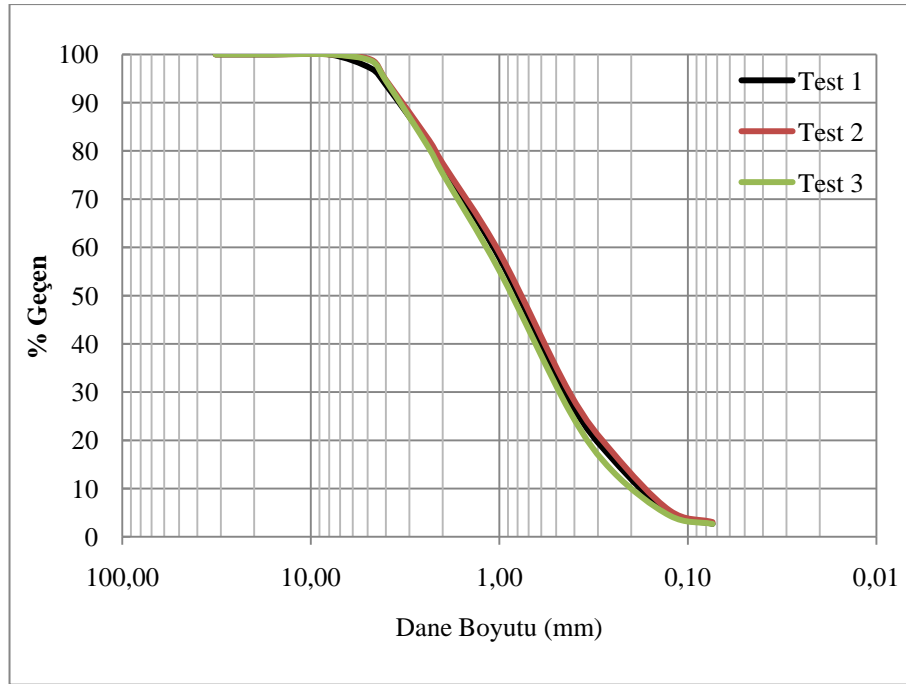
Tablo 6.4. SP-1 türü kum örneğine ait elektriksel iletkenlik değerleri

	θ	EC (S.m ⁻¹)
Deney no:1	0,80	0,0019
Deney no:2	3,61	0,0048
Deney no:3	8,12	0,0144
Deney no:4	12,81	0,0202
Deney no:5	15,97	0,0252
Deney no:6	20,76	0,0335
Deney no:7	2,18	0,0053
Deney no:8	6,59	0,0108
Deney no:9	11,23	0,0152
Deney no:10	14,39	0,0199
Deney no:11	17,56	0,0273

Şekil 6.8’de hacimsel su içeriği değeri %17,6 olan kum örneği için kritik voltaj değerleri verilmiştir. Tüm örnekler için hazırlanmış grafikler ekler kısmında bulunmaktadır. Bu örnek için hesaplanan elektriksel iletkenlik değeri $0,0273 \text{ S.m}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Tablo 6.4’te SP-1 kum örneğine ait elektriksel iletkenlik değerleri verilmiştir. Tablo incelendiğinde hacimsel su içeriğinin artmasıyla orantılı olarak zeminin elektriksel iletkenliğinin de beklendiği gibi arttığı görülmektedir.

6.3. Deney Örneği-2 İçin Yapılan Sınıflandırma Deneyleri

İlk olarak örneğin dane dağılımının ve zemin sınıfının belirlenmesi amacıyla elek analizi deneyi yapılmıştır. Elek analizi deneyi aynı örnek için 3 kez yinelenmiştir. Elek analizi sonucunda elde edilen dane dağılımı eğrisi Şekil 6.9’da verilmiştir.



Şekil 6.9. Deney Örneği-2 için yapılan elek analizi deney sonuçları

Yapılan deney sonucunda Deney Örneği-2’nin TS1500 Zemin Sınıflandırma Sistemine göre SP (kötü derecelenmiş kum) olduğu belirlenmiştir. Tablo 6.5’de dane dağılımı sonuçlarına göre çakıl, kum ve ince dane oranları verilmiştir. Tez kapsamında bu noktadan sonra bu örnek SP-2 olarak isimlendirilmiştir.

Zemin örneğinin özgül ağırlık değerini bulmak için özgül ağırlık deneyi 5 kez yinelenmiş ve yapılan deney sonuçlarına göre SP-2 türü kum örneğinin özgül ağırlık değeri 2.69 olarak bulunmuştur. Özgül ağırlık deney sonuçları Ek-B’de verilmiştir.

Tablo 6.5. SP-2 türü kum örneğine ait dane dağılımları

Örnek Adı	Çakıl Yüzdesi (%)	Kum Yüzdesi (%)	İnceler (%)
Deney 1	19	78	3
Deney 2	18	79	3
Deney 3	19	78	3
Ortalama	19	78	3

Ayrıca bu örnek için yapılan organik madde belirleme deney sonuçlarına göre örnek içerisinde %0,08 oranında organik madde olduğu saptanmıştır. Maksimum ve minimum boşluk oranı değerleri sırasıyla 0,77 ve 0,55 olarak bulunmuştur. Tablo 6.6’da SP-2 türü kum örneğine ait bazı geoteknik özellikler tablo halinde verilmiştir.

Tablo 6.6. SP-2 türü kum örneğine ait bazı geoteknik özellikler

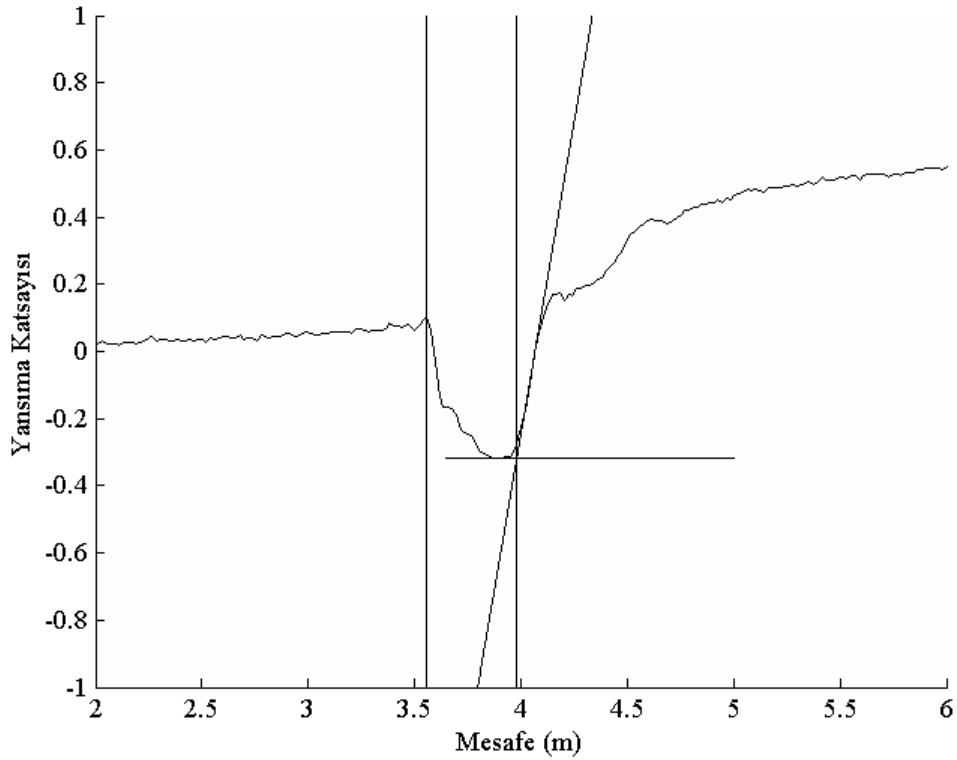
Zemin Sınıfı	d_{10}	d_{30}	d_{60}	C_u	C_c	GS	e_{min}	e_{max}	S_0
SP-2	0,19	0,45	1,1	5,7895	0,9689	2,69	0,55	0,77	10,82

6.4. SP-3 Türü Kum Örneği için Hacimsel Su İçeriği Arasındaki İlişkinin TDR ile Bulunması

Bu bölümde SP-2 türü kum örneği için 11 farklı su içeriğinde hazırlanmış zemin örnekleri kompaksiyon kalıbına sıkıştırılmış ve örneklerden alınan TDR ölçümleri sonucunda elde edilen grafikler analiz edilmiştir. Bu analizlerin birinci aşaması teğet yöntemi ve türev yöntemi kullanılarak dielektrik katsayılarının bulunmasıdır. İkinci aşamada ise dielektrik katsayıları ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişkiler Topp ve diğ. (1980) ve Ledieu ve diğ. (1986) modelleriyle kurulmuştur.

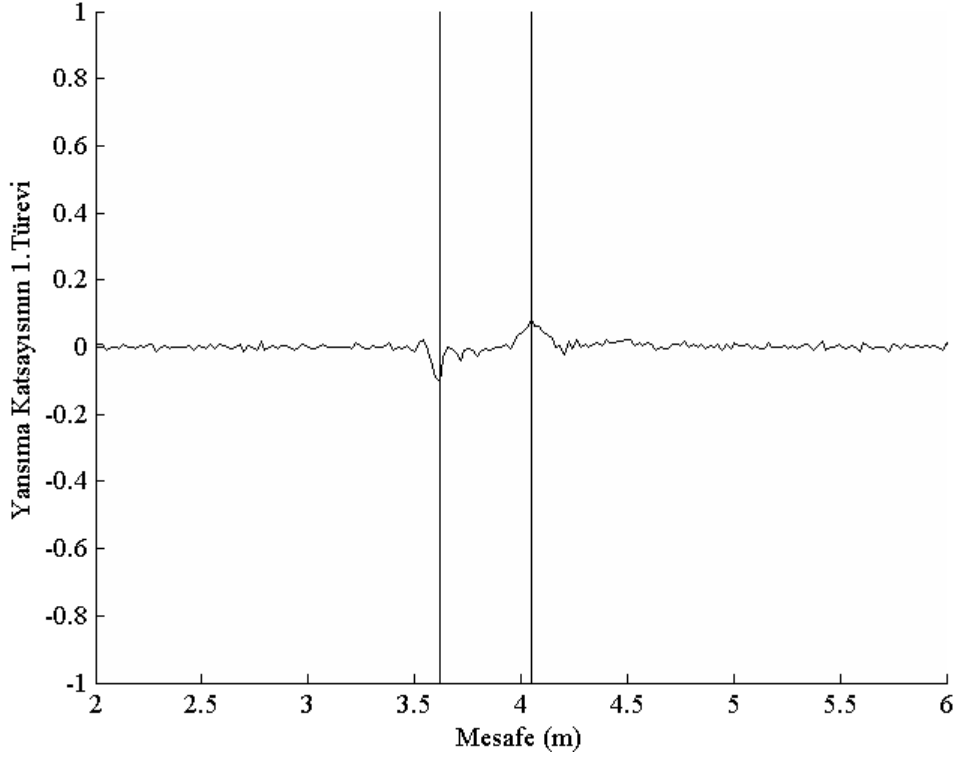
6.4.1. Dielektrik katsayının teğet yöntemi ve türev yöntemi ile bulunması

Farklı su içeriği değerlerinde sıkıştırılmış 11 örnek için alınan TDR ölçümleri kullanılarak teğet yöntemi ve türev yöntemine göre dielektrik katsayıları bulunmuştur. Ek-C’de elde edilen tüm yansıma formu grafikleri verilmiştir. Bu bölümde ise örnek olarak her iki yöntemle hesaplanan 1’er adet yansıma formu grafiği Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.10. SP-2 örneği için teğet yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması

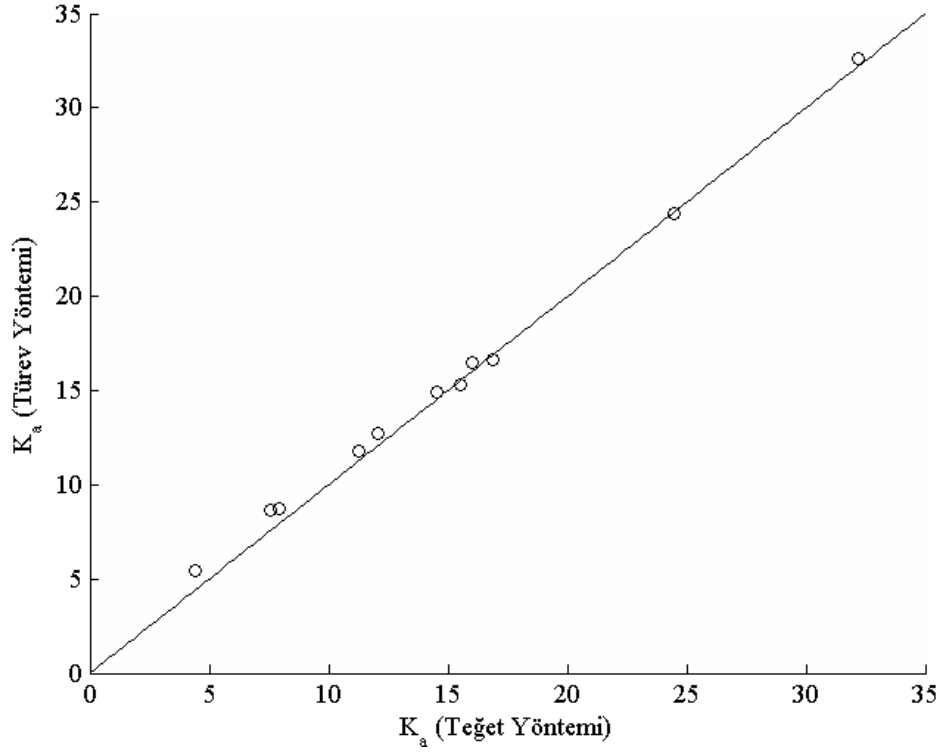
Şekil 6.10’da hacimsel su içeriği %20,7 olan zemin örneği için alınan TDR yansıma formu grafiği verilmiştir. Probun başlangıç ve bitiş noktaları teğet yöntemi ile bulunmuştur. Başlangıç ve bitiş noktası arasındaki uzaklık görünen prob uzunluğunu (L_a) vermektedir. Görünen prob uzunluğu bu deney için 0,459 m. olarak bulunmuştur. Gerçek prob uzunluğu ise 0,093 m.’dir. Buna göre dielektrik katsayısı Denklem (3.10)’da verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmış ve 24,5 değeri elde edilmiştir.



Şekil 6.11. SP-2 örneği için türev yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması

Şekil 6.11'de yine hacimsel su içeriği %20,7 olan zemin örneği için alınan TDR yansıma formu grafiğinin 1.türevi alınarak elde edilen grafik verilmiştir. Probun başlangıç ve bitiş noktaları türev yöntemi ile bulunmuştur. Başlangıç ve bitiş noktası arasındaki uzaklık görünen prob uzunluğunu (L_a) vermektedir. Görünen prob uzunluğu bu yöntem ile de 0,459 m. olarak bulunmuştur. Gerçek prob uzunluğu ise 0,093 m.'dir. Buna göre dielektrik katsayısı Denklem (3.10)'da verilen eşitlik yardımıyla hesapladığında teğet yönteminde olduğu gibi 24,5 değeri elde edilmiştir.

Bu işlemler 11 farklı su içeriğinde kompaksiyon kalıplarına sıkıştırılan zemin örnekleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Teğet yöntemi ve türev yöntemi kullanılarak hesaplanan dielektrik katsayıları Şekil 6.12'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi her iki yöntemle ayrı ayrı hesaplanan dielektrik katsayıları birbirine oldukça yakın değerler almıştır. Hesaplanan bu dielektrik katsayıları kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan regresyon analizi sonucunda regresyon katsayısı 0,999 olarak bulunmuştur.

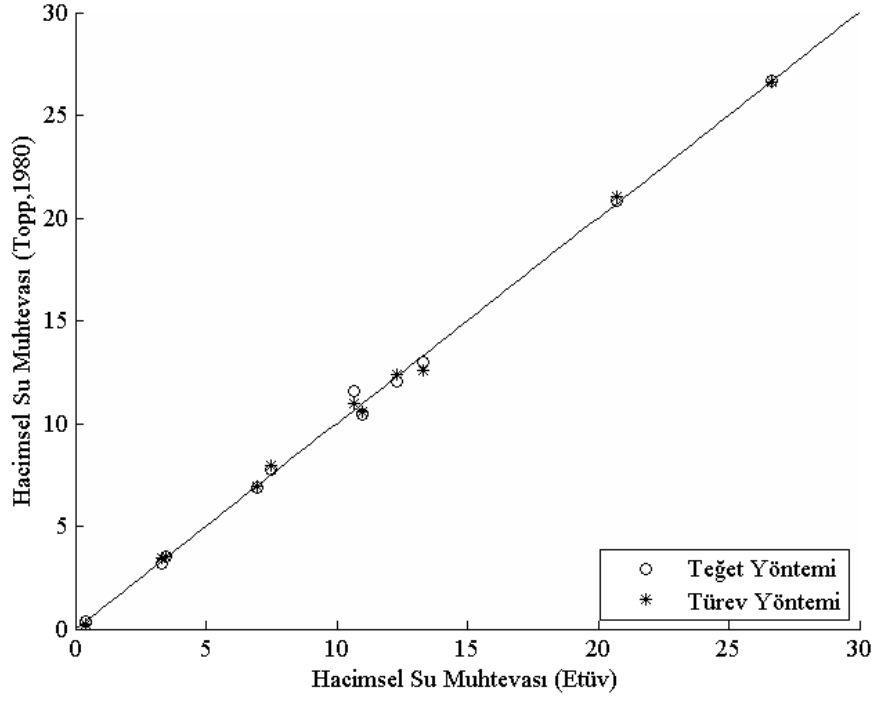


Şekil 6.12. SP-2 örneği için türev yöntemi ve teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayılarının karşılaştırılması

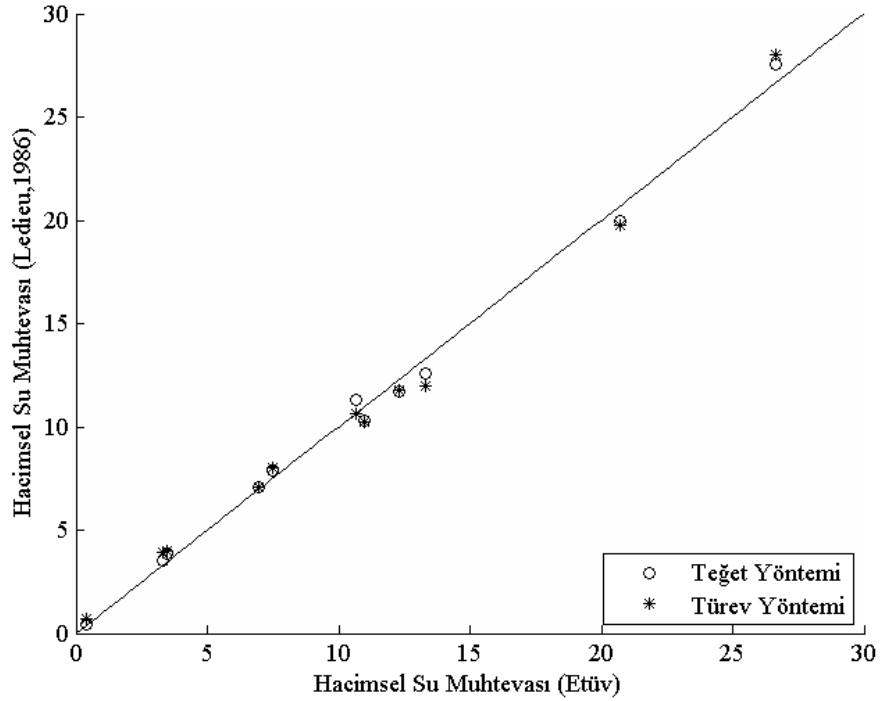
6.4.2. Dielektrik katsayısı kullanılarak hacimsel su içeriğinin bulunması

Teğet yöntemi ve türev yöntemi kullanılarak bulunan dielektrik katsayıları ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişkiyi Topp ve diğ. (1980) ve Ledieu ve diğ. (1986) sırasıyla Denklem (3.11) ve Denklem (3.13)'de verilen eşitliklerde göstermişlerdir. Bu eşitlikler, genelleştirilmiş zemin kalibrasyon katsayıları ile kullanılabilir. Fakat zemine özgü kalibrasyon yapılması durumunda daha doğru sonuçlar elde edilmektedir. Zemine özgü kalibrasyon yapıldıktan sonra SP-2 türü kum örneği için elde edilen değerler Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'de grafik olarak gösterilmiştir.

Şekil 6.13'de Topp ve diğ. (1980) tarafından önerilen eşitlik, hem teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayıları hem de türev yöntemi yardımıyla bulunan dielektrik katsayıları ile ayrı ayrı kullanılarak hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır. Grafikte x eksenini türev yardımıyla bulunan hacimsel su içeriğini, y eksenini ise Topp ve diğ. (1980) modeliyle bulunan su içeriği değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 6.13. SP-2 örneği için Topp ve diğ. (1980) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri



Şekil 6.14. SP-2 örneği için Ledieu ve diğ. (1986) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri

Şekil 6.14’de Ledieu ve diğ. (1986) tarafından önerilen eşitlik, hem teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayıları hem de türev yöntemi yardımıyla bulunan dielektrik katsayıları ile ayrı ayrı kullanılarak hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır. Grafikte x eksenini, etüv yardımıyla bulunan hacimsel su içeriğini, y eksenini ise Ledieu ve diğ. (1986) modeliyle bulunan su içeriği değerlerini temsil etmektedir.

Şekil 6.13 ve Şekil 6.14’ de sunulan değerler için regresyon analizi yapılmıştır ve bu analiz sonucunda elde edilen regresyon katsayıları Tablo 6.7’de verilmiştir.

Tablo 6.7. SP-2 türü kum örneğine ait regresyon katsayıları

	Topp ve diğ. (1980)		Ledieu ve diğ. (1986)	
	Teğet yöntemi	Türev yöntemi	Teğet yöntemi	Türev yöntemi
R ²	0,987	0,991	0,979	0,980

SP-2 türü kum örneği için hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri incelendiğinde, Topp ve diğ. (1980) modeli ile hesaplanan hacimsel su içeriği değerlerinin, Ledieu ve diğ. (1986) modeli ile hesaplanan hacimsel su içeriği değerlerine göre daha doğru sonuçlar verdiği görülmektedir.

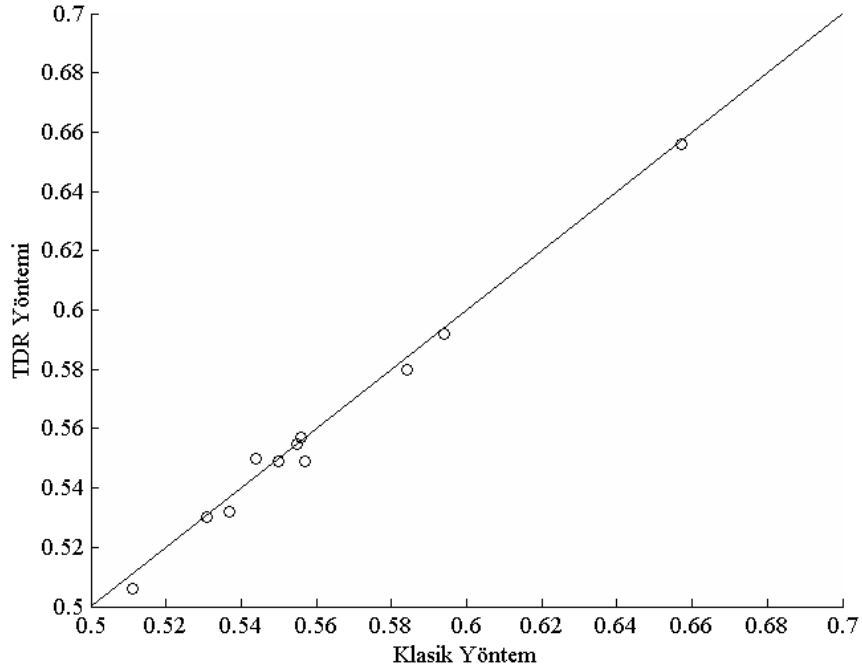
Teğet yöntemi ve türev yöntemi yardımıyla hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri için yapılan regresyon analizi sonuçları incelendiğinde gerek Topp ve diğ. (1980) gerekse Ledieu ve diğ. (1986) modelleri için hesaplanan regresyon katsayıları birbirine çok yakın değerler aldığı görülmektedir.

6.4.3. Boşluk oranının bulunması

Zeminin boşluk oranının bulunması permeabilite değerinin bulunabilmesi bakımından son derece önemlidir. Eğer bir zeminin özgül ağırlık değeri biliniyorsa hacmi bilinen bir kalıba sıkıştırıldığında alınan TDR ölçümünü kullanarak sıkıştırılan zeminin boşluk oranını bulunabilir.

Bu bölümde zeminin boşluk oranı hem klasik yöntemle yani etüvden alınan su içeriğini kullanarak hem de TDR dalga formu yardımıyla elde ettiğimiz hacimsel su içeriği değerini kullanarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda gerek

klasik yöntem gerekse TDR yöntemi yardımıyla bulunan boşluk oranı değerleri birbirine oldukça yakın değerler vermektedir. Şekil 6.15’de her iki yöntemle bulunan değerler karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



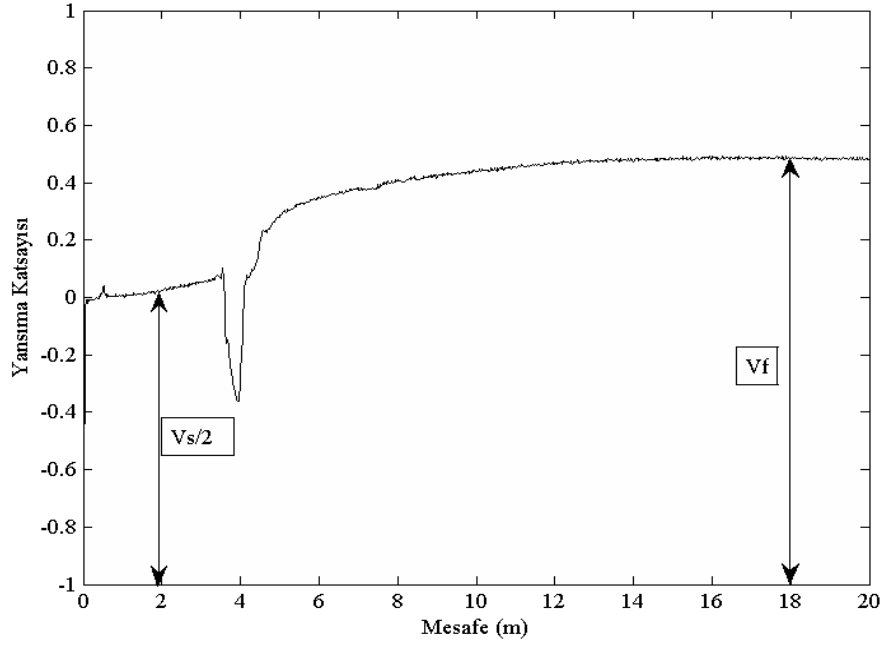
Şekil 6.15. SP-2 örneği için klasik yöntem ve TDR yöntemi ile hesaplanan boşluk oranı değerleri

Burada x eksenini, klasik yöntemle bulunan boşluk oranı değerlerini, y eksenini ise TDR yöntemi yardımıyla bulunan boşluk oranı değerlerini temsil etmektedir. Boşluk oranı değerleri 0,506 ile 0,657 aralığında değişmektedir. Boşluk oranları arasındaki en büyük mutlak fark 0,007 en küçük fark ise 0 olarak bulunmuştur.

6.4.4. TDR dalga formu kullanılarak zeminin elektriksel iletkenliğinin hesaplanması

Zeminin elektriksel iletkenliğinin ölçülmesi amacıyla TDR yansıma formu incelenmiştir. Elektriksel iletkenlik Yu ve Drnevich (2004) tarafından önerilen ve Denklem (3.23) ve (3.24)'de verilen eşitlikler yardımıyla bulunmuştur. İlk olarak Denklem (3.24)'de verilen eşitlik kullanılarak C katsayısı hesaplanmıştır. Buna göre C katsayısı 13,78 olarak bulunmuştur. Elektriksel iletkenliğin hesaplanabilmesi için

Denklem (3.23)'de verilen eşitlik kullanılmıştır. Bu eşitlikte kullanılacak kritik voltajlar Şekil 6.16'da gösterilmiştir.



Şekil 6.16. Elektriksel iletkenlik için kritik voltaj değerleri

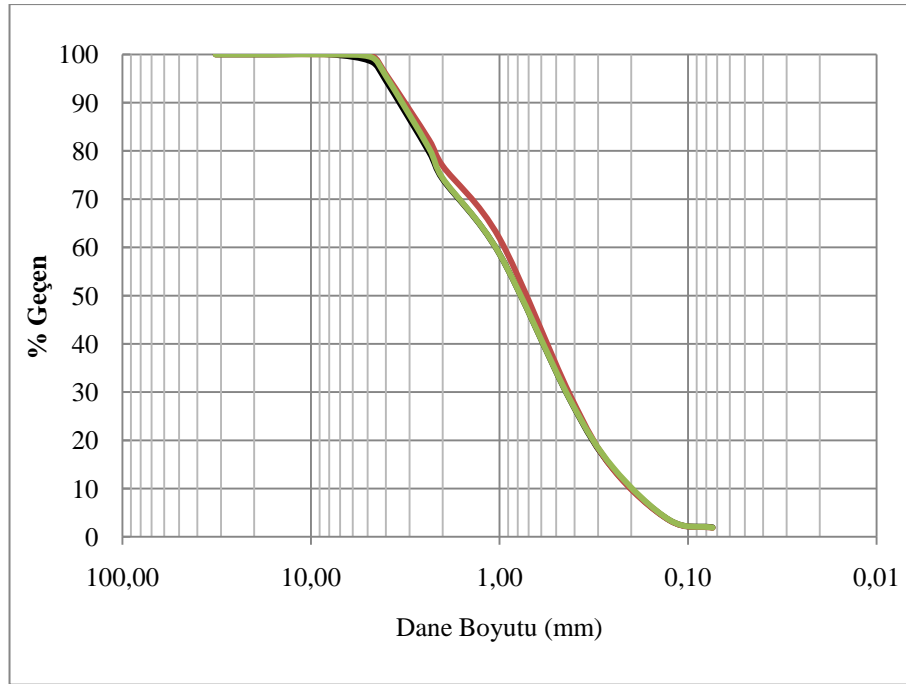
Tablo 6.8. SP-2 türü kum örneğine ait elektriksel iletkenlik değerleri

	θ	EC ($S.m^{-1}$)
Deney no:1	0,25	0,0020
Deney no:2	3,43	0,0038
Deney no:3	6,91	0,0060
Deney no:4	10,57	0,0072
Deney no:5	12,38	0,0119
Deney no:6	26,60	0,0199
Deney no:7	3,50	0,0037
Deney no:8	7,97	0,0053
Deney no:9	11,00	0,0081
Deney no:10	12,60	0,0103
Deney no:11	21,01	0,0145

Şekil 6.8’de hacimsel su içeriği değeri %12,6 olan kum örneği için kritik voltaj değerleri verilmiştir. Tüm örnekler için hazırlanmış grafikler ekler kısmında bulunmaktadır. Bu örnek için hesaplanan elektriksel iletkenlik değeri $0,0103 \text{ S.m}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Tablo 6.8’de SP-2 kum örneğine ait elektriksel iletkenlik değerleri verilmiştir. Tablo incelendiğinde hacimsel su içeriğinin artmasıyla orantılı olarak zeminin elektriksel iletkenliğinin de beklendiği gibi arttığı görülmektedir.

6.5. Deney Örneği-3 İçin Yapılan Sınıflandırma Deneyleri

İlk olarak örneğin dane dağılımının ve zemin sınıfının belirlenmesi amacıyla elek analizi deneyi yapılmıştır. Elek analizi deneyi aynı örnek için 3 kez yinelenmiştir. Elek analizi sonucunda elde edilen dane dağılımı eğrisi Şekil 6.17’de verilmiştir.



Şekil 6.17. Deney Örneği-3 için yapılan elek analizi deney sonuçları

Yapılan deney sonucunda Deney Örneği-3’ün TS1500 Zemin Sınıflandırma Sistemine göre SP (kötü derecelenmiş kum) olduğu belirlenmiştir. Tablo 6.9’da dane dağılımı sonuçlarına göre çakıl, kum ve ince dane oranları verilmiştir. Tez kapsamında bu noktadan sonra bu örnek SP-3 olarak isimlendirilmiştir.

Zemin örneğinin özgül ağırlık değerini bulmak için özgül ağırlık deneyi 5 kez yinelenmiş ve yapılan deney sonuçlarına göre SP-3 türü kum örneğinin özgül ağırlık değeri 2,69 olarak bulunmuştur. Özgül ağırlık deney sonuçları Ek-B’de verilmiştir.

Tablo 6.9. SP-3 türü kum örneğine ait dane dağılımları

Örnek Adı	Çakıl Yüzdesi (%)	Kum Yüzdesi (%)	İnceler (%)
Deney 1	2	96	2
Deney 2	1	97	2
Deney 3	1	97	2
Ortalama	1	97	2

Ayrıca bu örnek için yapılan organik madde belirleme deney sonuçlarına göre örnek içerisinde %0,01 oranında organik madde olduğu saptanmıştır. Maksimum ve minimum boşluk oranı değerleri sırasıyla 0,635 ve 0,398 olarak bulunmuştur. Tablo 6.10’da SP-3 türü kum örneğine ait bazı geoteknik özellikler tablo halinde verilmiştir

Tablo 6.10. SP-3 türü kum örneğine ait bazı geoteknik özellikler

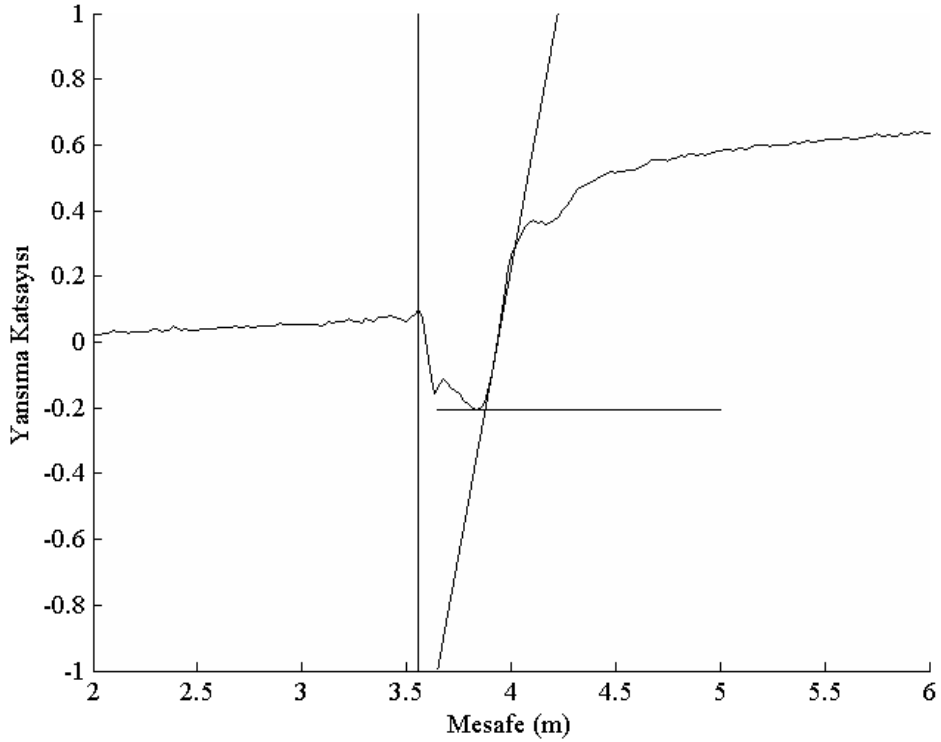
Zemin Sınıfı	d_{10}	d_{30}	d_{60}	C_u	C_c	GS	e_{min}	e_{max}	S_0
SP-3	0,2	0,45	1,1	5,5	0,9205	2,65	0,398	0,635	8,88

6.6. SP-3 Türü Kum Örneği için Hacimsel Su İçeriği Arasındaki İlişkinin TDR ile Bulunması

Bu bölümde SP-3 türü kum örneği için 11 farklı su içeriğinde hazırlanmış zemin örnekleri kompaksiyon kalıbına sıkıştırılmış ve örneklerden alınan TDR ölçümleri sonucunda elde edilen grafikler analiz edilmiştir. Bu analizlerin birinci aşaması teğet yöntemi ve türev yöntemi kullanılarak dielektrik katsayılarının bulunmasıdır. İkinci aşamada ise dielektrik katsayıları ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişkiler Topp ve diğ. (1980) ve Ledieu ve diğ. (1986) modelleriyle kurulmuştur.

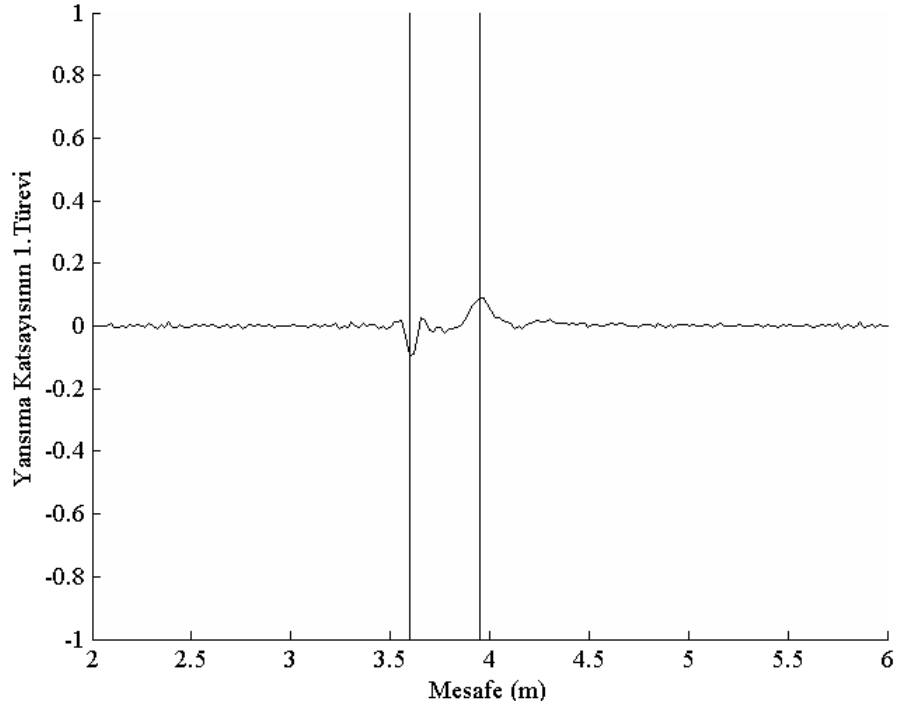
6.6.1. Dielektrik katsayının teğet yöntemi ve türev yöntemi ile bulunması

Farklı su içeriği değerlerinde sıkıştırılmış 11 örnek için alınan TDR ölçümleri kullanılarak teğet yöntemi ve türev yöntemine göre dielektrik katsayıları bulunmuştur. Ek-C’de elde edilen tüm yansıma formu grafikleri verilmiştir. Bu bölümde ise örnek olarak her iki yöntemle hesaplanan 1’er adet yansıma formu grafiği Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’da verilmiştir.



Şekil 6.19. SP-3 örneği için teğet yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması

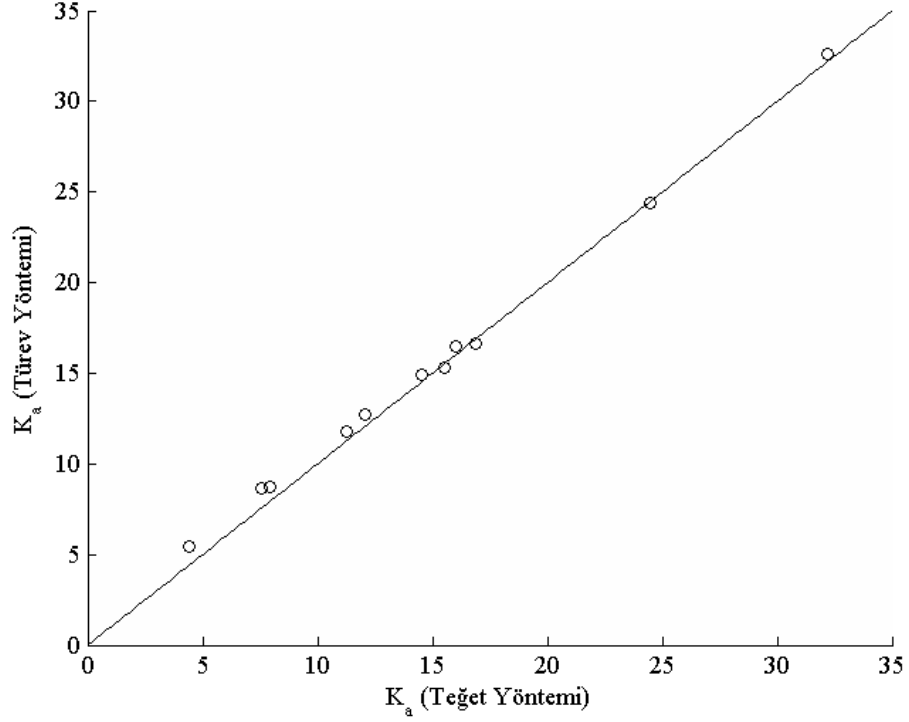
Şekil 6.18’de hacimsel su içeriği %12,8 olan zemin örneği için alınan TDR yansıma formu grafiği verilmiştir. Probu başlangıç ve bitiş noktaları teğet yöntemi ile bulunmuştur. Başlangıç ve bitiş noktası arasındaki uzaklık görünen prob uzunluğunu (L_a) vermektedir. Görünen prob uzunluğu bu deney için 0,372 m. olarak bulunmuştur. Gerçek prob uzunluğu ise 0,093 m.’dir. Buna göre dielektrik katsayısı Denklem (3.10)’da verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmış ve 16 değeri elde edilmiştir.



Şekil 6.18. SP-3 örneği için türev yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması

Şekil 6.19'da yine hacimsel su içeriği %12,8 olan zemin örneği için alınan TDR yansıma formu grafiğinin 1.türevi alınarak elde edilen grafik verilmiştir. Probun başlangıç ve bitiş noktaları türev yöntemi ile bulunmuştur. Başlangıç ve bitiş noktası arasındaki uzaklık görünen prob uzunluğunu (L_a) vermektedir. Görünen prob uzunluğu bu yöntem ile de 0,371 m. olarak bulunmuştur. Gerçek prob uzunluğu ise 0,093 m.'dir. Buna göre dielektrik katsayısı Denklem (3.10)'da verilen eşitlik yardımıyla hesapladığımızda 15,9 değeri elde edilmiştir. Teğet yöntemi kullanıldığında 16 değerinin elde edildiği düşünüldüğünde elde edilen iki değer arasındaki farkın ihmal edilebilir düzeyde olduğu açık olarak görülmektedir.

Bu işlemler 11 farklı su içeriğinde kompaksiyon kalıplarına sıkıştırılan zemin örnekleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Teğet yöntemi ve türev yöntemi kullanılarak hesaplanan dielektrik katsayıları Şekil 6.20'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi her iki yöntemle ayrı ayrı hesaplanan dielektrik katsayıları birbirine oldukça yakın değerler almıştır. Hesaplanan bu dielektrik katsayıları kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan regresyon analizi sonucunda regresyon katsayısı 0,998 olarak bulunmuştur.

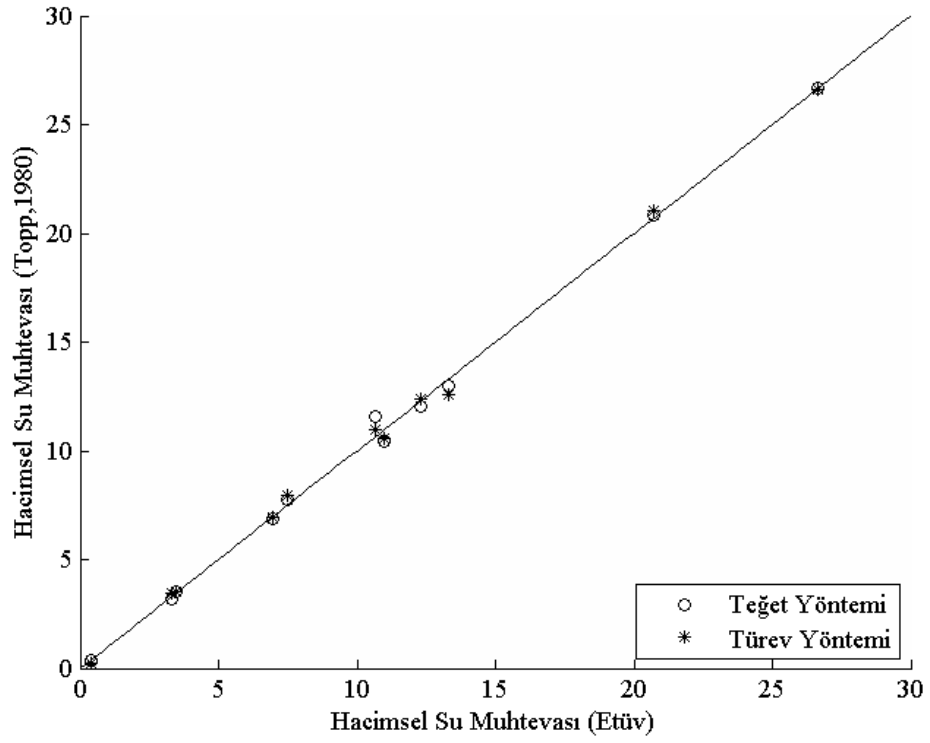


Şekil 6.20. Türev yöntemi ve teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayılarının karşılaştırılması

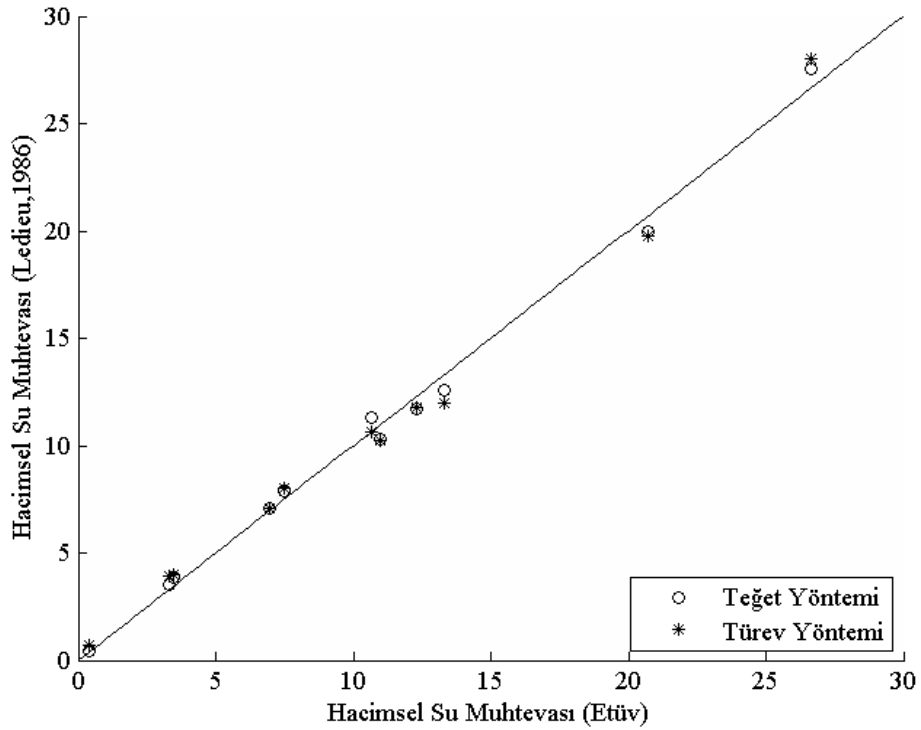
6.6.2. Dielektrik katsayısı kullanılarak hacimsel su içeriğinin bulunması

Teğet yöntemi ve türev yöntemini kullanarak bulduğumuz dielektrik katsayıları ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişkiyi Topp ve diğ. (1980) ve Ledieu ve diğ. (1986) sırasıyla Denklem (3.11) ve Denklem (3.13)'de verilen eşitliklerle göstermişlerdir. Bu eşitliklerin kullanımında zemine özgü kalibrasyon yapılması gerekmektedir, zemine özgü kalibrasyon yapıldıktan sonra SP-3 türü kum örneği için elde edilen değerler Şekil 6.21 ve Şekil 6.22'de grafik olarak gösterilmiştir.

Şekil 6.21'de Topp ve diğ. (1980) tarafından önerilen eşitlik, hem teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayıları hem de türev yöntemi yardımıyla bulunan dielektrik katsayıları ile ayrı ayrı kullanılarak hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır. Grafikte x eksenini türev yöntemiyle bulunan hacimsel su içeriğini, y eksenini ise Topp ve diğ. (1980) modeliyle bulunan su içeriği değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 6.21. SP-3 örneği için topp ve diğ. (1980) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri



Şekil 6.22. SP-3 örneği için Ledieu ve diğ. (1986) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri

Şekil 6.22’de Ledieu ve diğ. (1986) tarafından önerilen eşitlik, hem teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayıları hem de türev yöntemi yardımıyla bulunan dielektrik katsayıları ile ayrı ayrı kullanılarak hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır. Grafikte x eksenini, etüv yardımıyla bulunan hacimsel su içeriğini, y eksenini ise Ledieu ve diğ. (1986) modeliyle bulunan su içeriği değerlerini temsil etmektedir.

Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’ de sunulan değerler için regresyon analizi yapılmıştır ve bu analiz sonucunda elde edilen regresyon katsayıları Tablo 6.11’de verilmiştir.

Tablo 6.11. SP-3 türü kum örneğine ait regresyon katsayıları

	Topp ve diğ. (1980)		Ledieu ve diğ. (1986)	
	Teğet yöntemi	Türev yöntemi	Teğet yöntemi	Türev yöntemi
R ²	0,999	0,999	0,997	0,995

SP-3 türü kum örneği için hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri incelendiğinde, Topp ve diğ. (1980) modeli ile hesaplanan hacimsel su içeriği değerlerinin, Ledieu ve diğ. (1986) modeli ile hesaplanan hacimsel su içeriği değerlerine göre daha doğru sonuçlar verdiği görülmektedir.

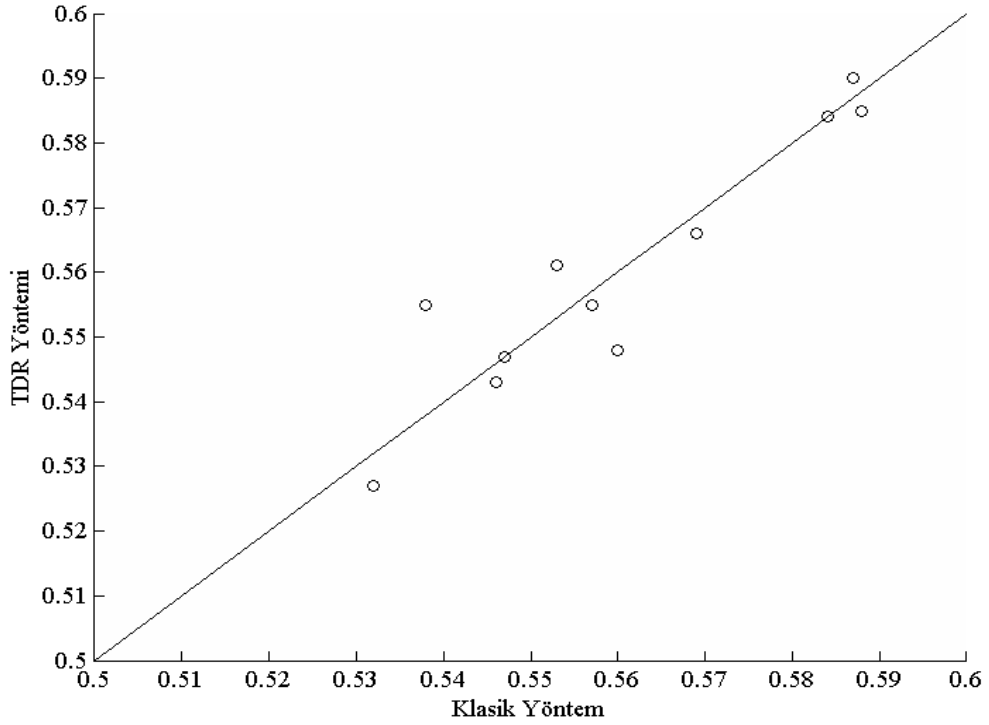
Teğet yöntemi ve türev yöntemi yardımıyla hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri için yapılan regresyon analizi sonuçları incelendiğinde gerek Topp ve diğ. (1980) gerekse Ledieu ve diğ. (1986) modelleri için hesaplanan regresyon katsayıları hemen hemen aynı değerleri almıştır.

6.6.3. Boşluk oranının bulunması

Zeminin boşluk oranının bulunması permeabilite değerinin bulunabilmesi bakımından son derece önemlidir. Eğer bir zeminin özgül ağırlık değeri biliniyorsa hacmi bilinen bir kalıba sıkıştırıldığında alınan TDR ölçümünü kullanarak sıkıştırılan zeminin boşluk oranını bulunabilir.

Bu bölümde zeminin boşluk oranı hem klasik yöntemle yani etüvden alınan su içeriğini kullanarak hem de TDR dalga formu yardımıyla elde ettiğimiz hacimsel su içeriği değerini kullanarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda gerek

klasik yöntem gerekse TDR yöntemi yardımıyla bulunan boşluk oranı değerleri birbirine oldukça yakın değerler vermektedir. Şekil 6.23’de her iki yöntemle bulunan değerler karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



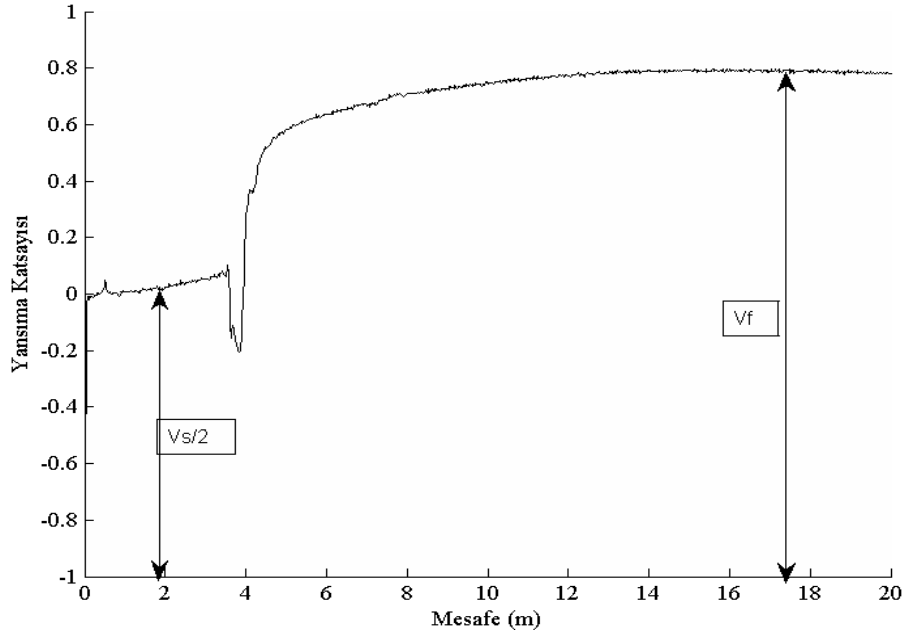
Şekil 6.23. SP-3 örneği için klasik yöntem ve TDR yöntemi ile hesaplanan boşluk oranı değerleri

Burada x eksenini, klasik yöntemle bulunan boşluk oranı değerlerini, y eksenini ise TDR yöntemi yardımıyla bulunan boşluk oranı değerlerini temsil etmektedir. Boşluk oranı değerleri 0,527 ile 0,590 aralığında değişmektedir. Boşluk oranları arasındaki en büyük mutlak fark 0,012 en küçük fark ise 0 olarak bulunmuştur.

6.6.4. TDR dalga formu kullanılarak zeminin elektriksel iletkenliğinin hesaplanması

Zeminin elektriksel iletkenliğinin ölçülmesi amacıyla TDR yansıma formu incelenmiştir. Elektriksel iletkenlik Yu ve Drnevich (2004) tarafından önerilen ve Denklem (3.23) ve (3.24)’de verilen eşitlikler yardımıyla bulunmuştur. İlk olarak Denklem (3.24)’de verilen eşitlik kullanılarak C katsayısı hesaplanmıştır. Buna göre C katsayısı 13,78 olarak bulunmuştur. Elektriksel iletkenliğin hesaplanabilmesi için

Denklem (3.23)'de verilen eşitlik kullanılmıştır. Bu eşitlikte kullanılacak kritik voltajlar Şekil 6.24'te gösterilmiştir.



Şekil 6.24. Elektriksel iletkenlik için kritik voltaj değerleri

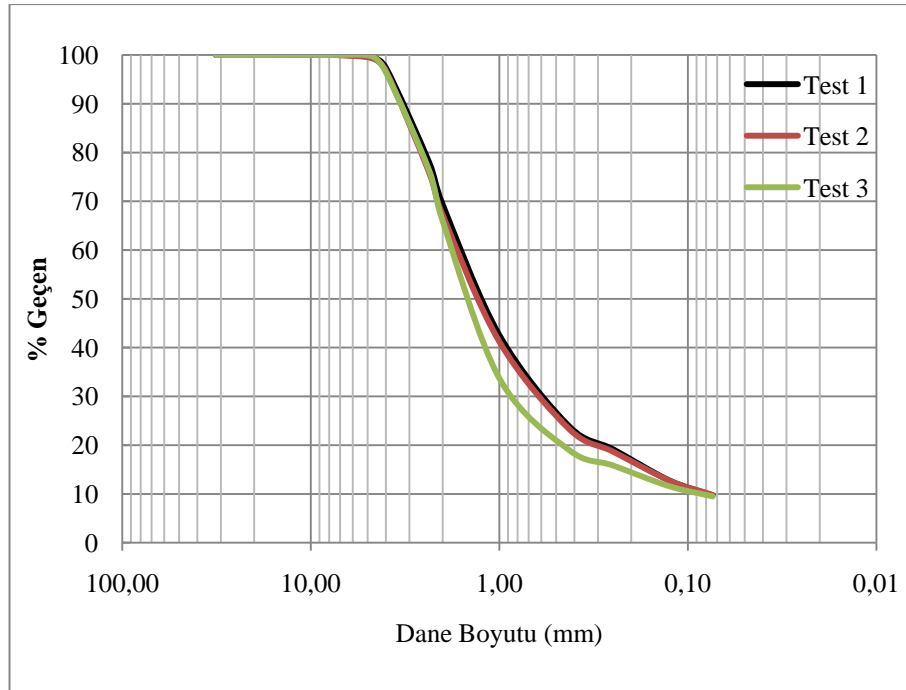
Tablo 6.12. SP-3 türü kum örneğine ait elektriksel iletkenlik değerleri

	θ	EC ($S.m^{-1}$)
Deney no:1	0,25	0,0023
Deney no:2	3,47	0,0063
Deney no:3	6,65	0,0104
Deney no:4	9,23	0,0131
Deney no:5	12,76	0,0171
Deney no:6	18,53	0,0234
Deney no:7	2,95	0,0053
Deney no:8	5,26	0,0072
Deney no:9	8,70	0,0111
Deney no:10	10,35	0,0075
Deney no:11	12,85	0,0126

Şekil 6.24'te hacimsel su içeriği değeri %12,8 olan kum örneği için kritik voltaj değerleri verilmiştir. Tüm örnekler için hazırlanmış grafikler ekler kısmında bulunmaktadır. Bu örnek için hesaplanan elektriksel iletkenlik değeri $0,0171 \text{ S.m}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Tablo 6.12'de SP-3 kum örneğine ait elektriksel iletkenlik değerleri verilmiştir. Tablo incelendiğinde hacimsel su içeriğinin artmasıyla orantılı olarak zeminin elektriksel iletkenliğinin de beklendiği gibi arttığı görülmektedir.

6.7. Deney Örneği-4 İçin Yapılan Sınıflandırma Deneyleri

İlk olarak örneğin dane dağılımının ve zemin sınıfının belirlenmesi amacıyla elek analizi deneyi yapılmıştır. Elek analizi deneyi aynı örnek için 3 kez yinelenmiştir. Elek analizi sonucunda elde edilen dane dağılımı eğrisi Şekil 6.25'te verilmiştir.



Şekil 6.25. Deney Örneği-4 için yapılan elek analizi deney sonuçları

Yapılan deney sonucunda Deney Örneği-4'ün TS1500 Zemin Sınıflandırma Sistemine göre SP (kötü derecelenmiş kum) olduğu belirlenmiştir. Tablo 6.13'de dane dağılımı sonuçlarına göre çakıl, kum ve ince dane oranları verilmiştir. Tez kapsamında bu noktadan sonra bu örnek SP-4 olarak isimlendirilmiştir.

Zemin örneğinin özgül ağırlık değerini bulmak için özgül ağırlık deneyi 5 kez yinelenmiş ve yapılan deney sonuçlarına göre SP-4 türü kum örneğinin özgül ağırlık değeri 2,68 olarak bulunmuştur. Özgül ağırlık deney sonuçları Ek-B’de verilmiştir.

Tablo 6.13. SP-4 türü kum örneğine ait dane dağılımları

Örnek Adı	Çakıl Yüzdesi (%)	Kum Yüzdesi (%)	İnceler (%)
Deney 1	1	90	9
Deney 2	1	90	9
Deney 3	1	90	9
Ortalama	1	90	9

Ayrıca bu örnek için yapılan organik madde belirleme deney sonuçlarına göre örnek içerisinde %0,09 oranında organik madde olduğu saptanmıştır. Maksimum ve minimum boşluk oranı değerleri sırasıyla 0,640 ve 0,419 olarak bulunmuştur. Tablo 6.14’de SP-4 türü kum örneğine ait bazı geoteknik özellikler tablo halinde verilmiştir

Tablo 6.14. SP-4 türü kum örneğine ait bazı geoteknik özellikler

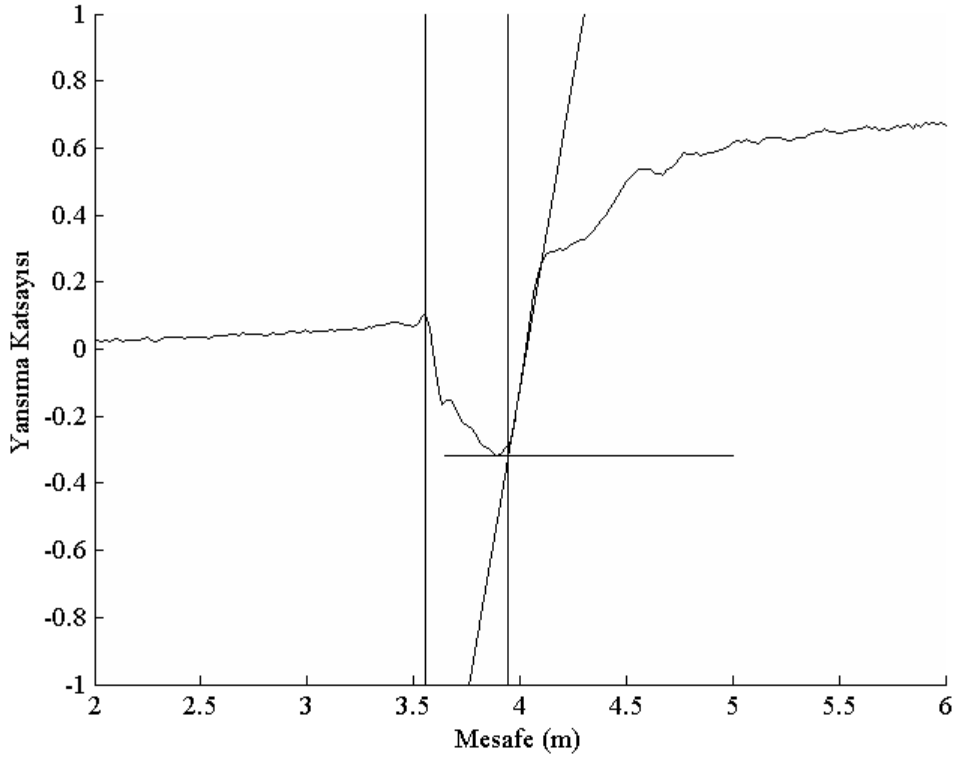
Zemin Sınıfı	d_{10}	d_{30}	d_{60}	C_u	C_c	GS	e_{min}	e_{max}	S_0
SP-4	0,08	0,6	1,7	21,25	2,647	2,68	0,419	0,640	19,08

6.8. Deney Örneği 4 için Hacimsel Su İçeriği- Dielektrik Katsayısı Arasındaki İlişkinin TDR ile Bulunması

Bu bölümde SP-4 türü kum örneği için 11 farklı su içeriğinde hazırlanmış zemin örnekleri kompaksiyon kalıbına sıkıştırılmış ve örneklerden alınan TDR ölçümleri sonucunda elde edilen grafikler analiz edilmiştir. Bu analizlerin birinci aşaması teğet yöntemi ve türev yöntemi kullanılarak dielektrik katsayılarının bulunmasıdır. İkinci aşamada ise dielektrik katsayıları ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişkiler Topp ve diğ. (1980) ve Ledieu ve diğ. (1986) modelleriyle kurulmuştur.

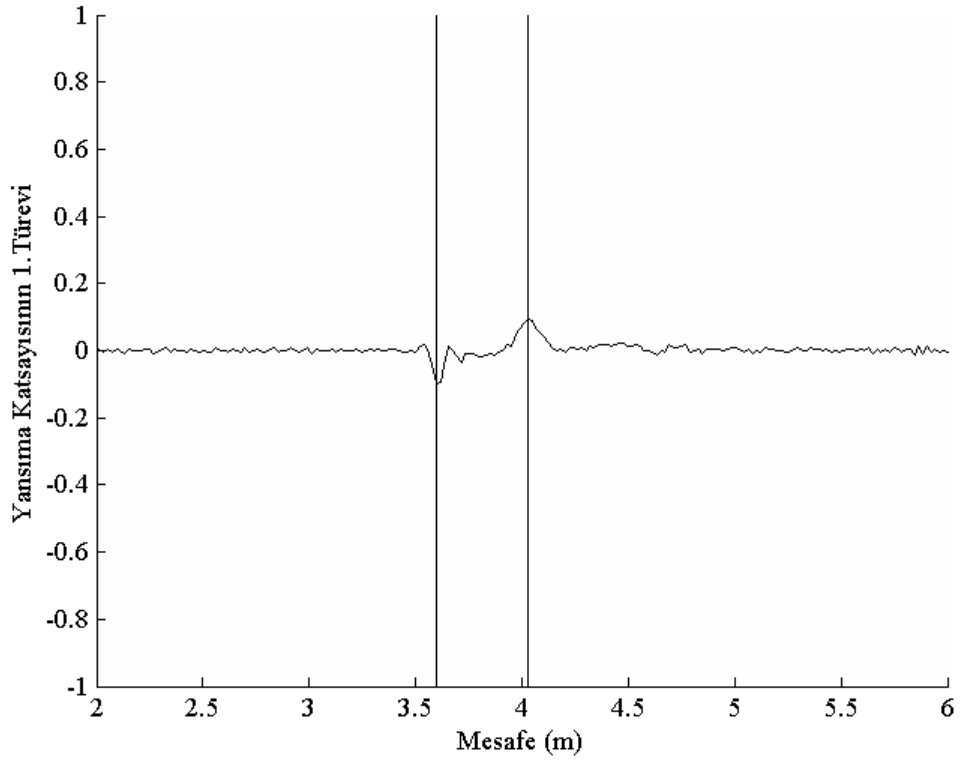
6.8.1. Dielektrik katsayının teğet yöntemi ve türev yöntemi ile bulunması

Farklı su içeriği değerlerinde sıkıştırılmış 11 örnek için alınan TDR ölçümleri kullanılarak teğet yöntemi ve türev yöntemine göre dielektrik katsayıları bulunmuştur. Ek-C'de elde edilen tüm yansımaya formu grafikleri verilmiştir. Bu bölümde ise örnek olarak her iki yöntemle hesaplanan 1'er adet yansımaya formu grafiği Şekil 6.26 ve Şekil 6.27'de verilmiştir.



Şekil 6.26. SP-4 örneği için teğet yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması

Şekil 6.26'da hacimsel su içeriği %16,5 olan zemin örneği için alınan TDR yansımaya formu grafiği verilmiştir. Probu başlangıç ve bitiş noktaları teğet yöntemi ile bulunmuştur. Başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki uzaklık görünen prob uzunluğunu (L_a) vermektedir. Görünen prob uzunluğu bu deney için 0,388 m. olarak bulunmuştur. Gerçek prob uzunluğu ise 0,093 m.'dir. Buna göre dielektrik katsayısı Denklem (3.10)'da verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmış ve 18,5 değeri elde edilmiştir.

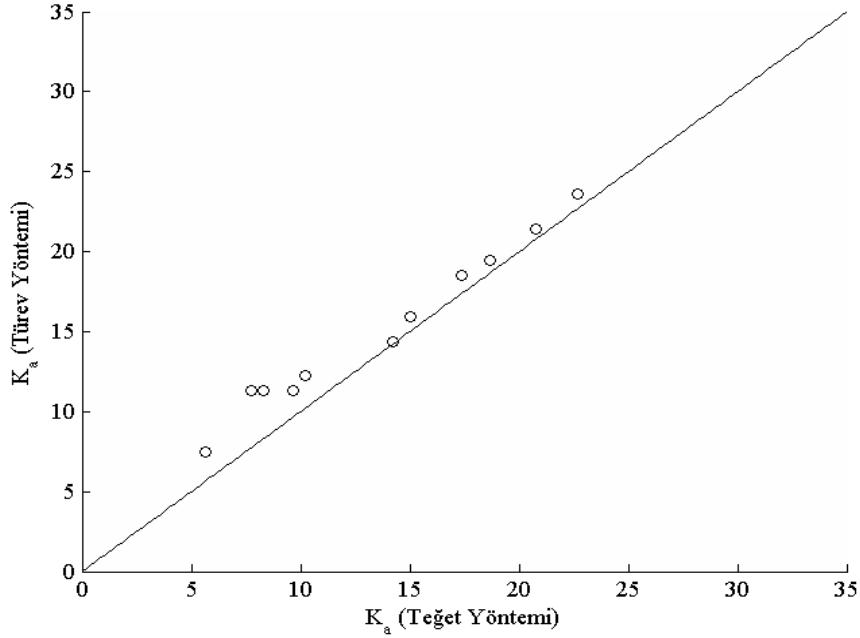


Şekil 6.27. SP-4 örneği için türev yöntemi ile probun başlangıç ve bitiş noktasının bulunması

Şekil 6.27’de yine hacimsel su içeriği %16,5 olan zemin örneği için alınan TDR yansıma formu grafiğinin 1.türevi alınarak elde edilen grafik verilmiştir. Probu başlangıç ve bitiş noktaları türev yöntemi ile bulunmuştur. Başlangıç ve bitiş noktası arasındaki uzaklık görünen prob uzunluğunu (L_a) vermektedir. Görünen prob uzunluğu bu yöntem ile de 0,400 m. olarak bulunmuştur. Gerçek prob uzunluğu ise 0,093 m.’dir. Buna göre dielektrik katsayısı Denklem (3.10)’da verilen eşitlik yardımıyla hesapladığında 17,4 değeri elde edilmiştir. Teğet yöntemi kullanıldığında 18,5 değerinin elde edildiği düşünüldüğünde elde edilen iki değer arasındaki farkın % 1,1 düzeyinde olduğu görülmektedir. Etüv yardımıyla bulunan su içeriği değeri 16,5 olduğuna göre bu noktada yapılan hesaplamalarda türev yöntemi ile bulunan su içeriği değerinin gerçeğe daha yakın sonuç verdiği söylenebilir.

Bu işlemler 11 farklı su içeriğinde kompaksiyon kalıplarına sıkıştırılan zemin örnekleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Teğet yöntemi ve türev yöntemi kullanılarak hesaplanan dielektrik katsayıları Şekil 6.28’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi her iki yöntemle ayrı ayrı hesaplanan dielektrik

katsayıları birbirine oldukça yakın değerler almıştır. Hesaplanan bu dielektrik katsayıları kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan regresyon analizi sonucunda regresyon katsayısı 0,989 olarak bulunmuştur.

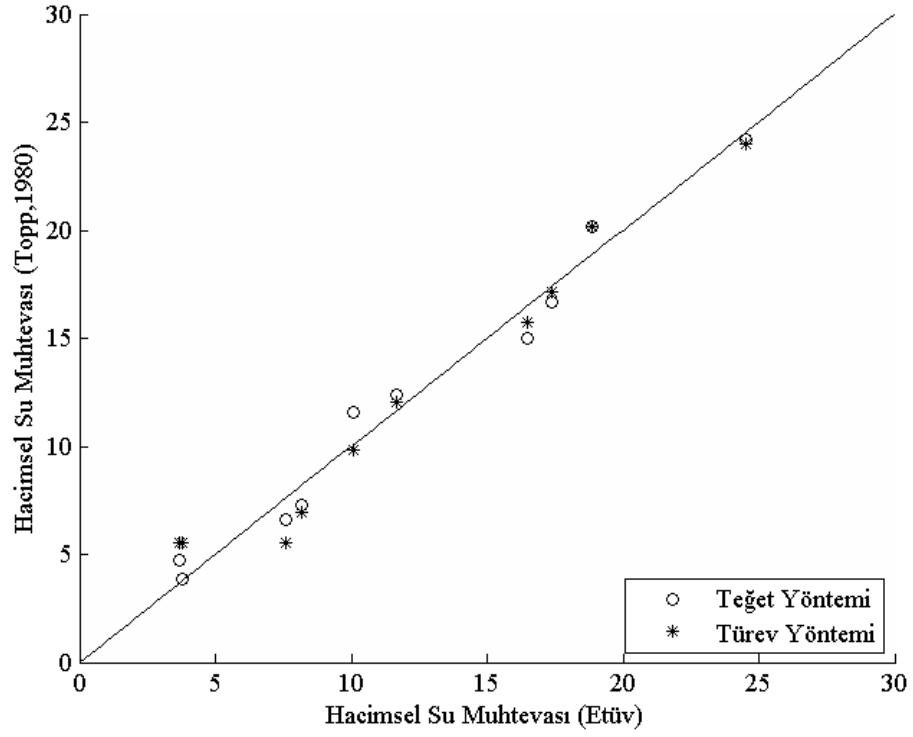


Şekil 6.28. SP-4 örneği için türev yöntemi ve teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayılarının karşılaştırılması

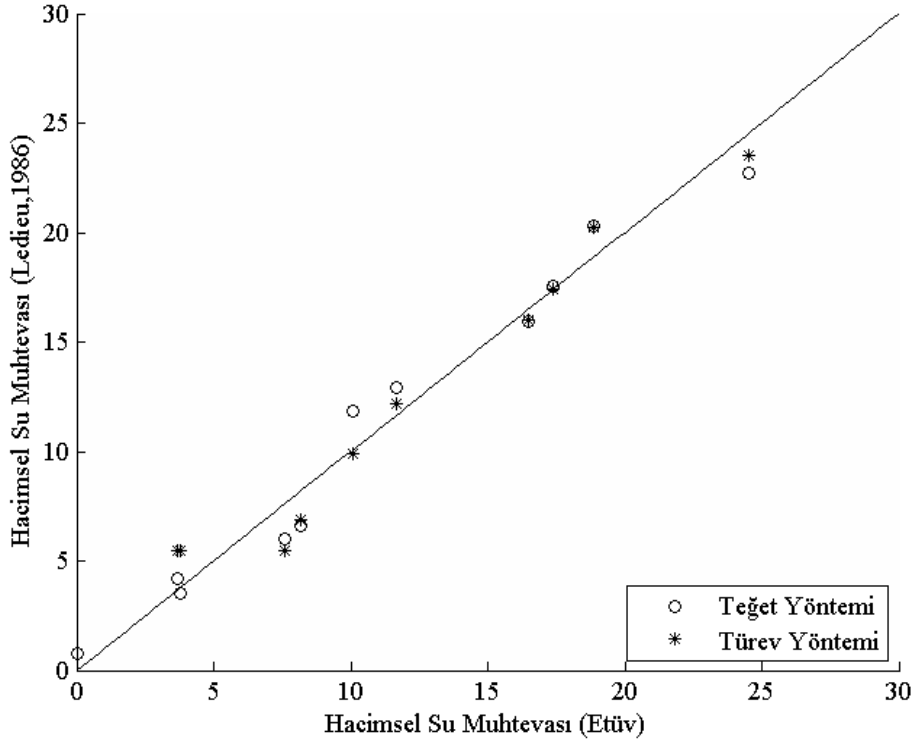
6.8.2. Dielektrik katsayısı kullanılarak hacimsel su içeriğinin bulunması

Teğet yöntemi ve türev yöntemi kullanılarak bulunan dielektrik katsayıları ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişkiyi Topp ve diğ. (1980) ve Ledieu ve diğ. (1986) sırasıyla Denklem (3.11) ve Denklem (3.13)'de verilen eşitliklerde göstermişlerdir. Bu eşitlikler, genelleştirilmiş zemin kalibrasyon katsayıları ile kullanılabilir. Fakat zemine özgü kalibrasyon yapılması durumunda daha doğru sonuçlar elde edilmektedir. Zemine özgü kalibrasyon yapıldıktan sonra SP-4 türü kum örneği için elde edilen değerler Şekil 6.29 ve Şekil 6.30'da grafik olarak gösterilmiştir.

Şekil 6.29'da Topp ve diğ. (1980) tarafından önerilen eşitlik, hem teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayıları hem de türev yöntemi yardımıyla bulunan dielektrik katsayıları ile ayrı ayrı kullanılarak hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır. Grafikte x eksenine türev yöntemiyle bulunan hacimsel su içeriğini, y eksenine ise Topp ve diğ. (1980) modeliyle bulunan su içeriği değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 6.29. SP-4 örneği için Topp ve diğ. (1980) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri



Şekil 6.30. SP-4 örneği için Ledieu ve diğ. (1986) modeli ile hesaplanan hacimsel su içerikleri

Şekil 6.30'da Ledieu ve diğ. (1986) tarafından önerilen eşitlik, hem teğet yöntemi ile bulunan dielektrik katsayıları hem de türev yöntemi yardımıyla bulunan dielektrik katsayıları ile ayrı ayrı kullanılarak hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır. Grafikte x eksenini, etüv yardımıyla bulunan hacimsel su içeriğini, y eksenini ise Ledieu ve diğ. (1986) modeliyle bulunan su içeriği değerlerini temsil etmektedir.

Şekil 6.29 ve Şekil 6.30'da sunulan değerler için regresyon analizi yapılmıştır ve bu analiz sonucunda elde edilen regresyon katsayıları Tablo 6.15'de verilmiştir.

Tablo 6.15. SP-4 türü kum örneğine ait regresyon katsayıları

	Topp ve diğ. (1980)		Ledieu ve diğ. (1986)	
	Teğet yöntemi	Türev yöntemi	Teğet yöntemi	Türev yöntemi
R^2	0,991	0,986	0,985	0,986

SP-4 türü kum örneği için hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri incelendiğinde, Topp ve diğ. (1980) modeli ile hesaplanan hacimsel su içeriği değerlerinin, Ledieu ve diğ. (1986) modeli ile hesaplanan hacimsel su içeriği değerlerine göre daha doğru sonuçlar verdiği görülmektedir.

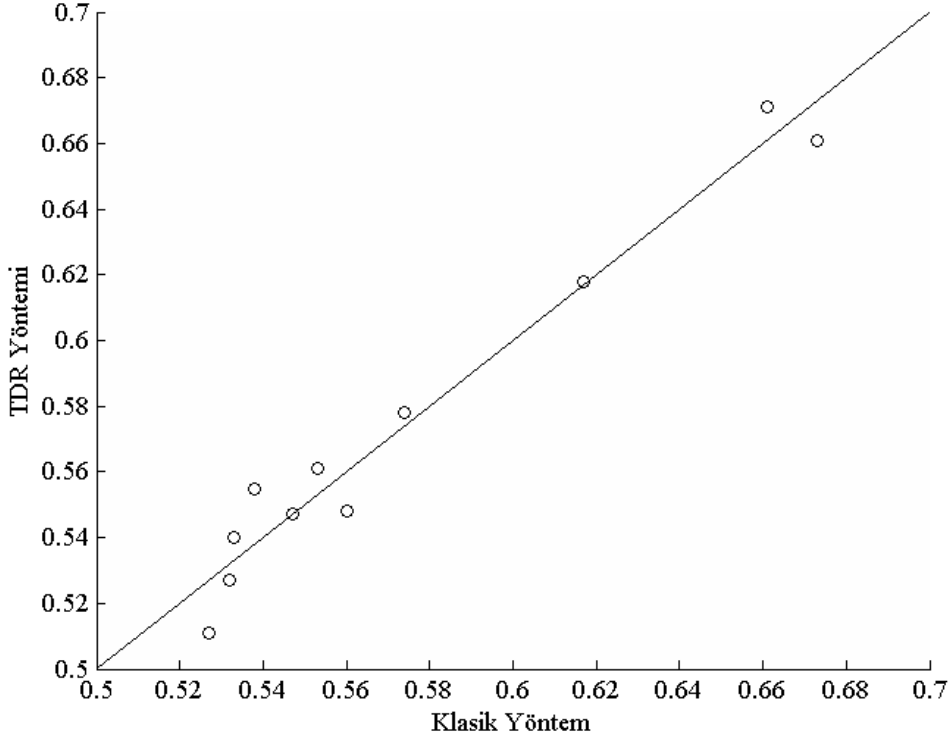
Teğet yöntemi ve türev yöntemi yardımıyla hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri için yapılan regresyon analizi sonuçları incelendiğinde gerek Topp ve diğ. (1980) gerekse Ledieu ve diğ. (1986) modelleri için hesaplanan regresyon katsayıları birbirine çok yakın değerler almıştır.

6.8.3. Boşluk oranının bulunması

Zeminin boşluk oranının bulunması permeabilite değerinin bulunabilmesi bakımından son derece önemlidir. Eğer bir zeminin özgül ağırlık değeri biliniyorsa hacmi bilinen bir kalıba sıkıştırıldığında alınan TDR ölçümünü kullanarak sıkıştırılan zeminin boşluk oranını bulunabilir.

Bu bölümde zeminin boşluk oranı hem klasik yöntemle yani etüvden alınan su içeriğini kullanarak hem de TDR dalga formu yardımıyla elde ettiğimiz hacimsel su içeriği değerini kullanarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda gerek

klasik yöntem gerekse TDR yöntemi yardımıyla bulunan boşluk oranı değerleri birbirine oldukça yakın değerler vermektedir. Şekil 6.31’de her iki yöntemle bulunan değerler karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



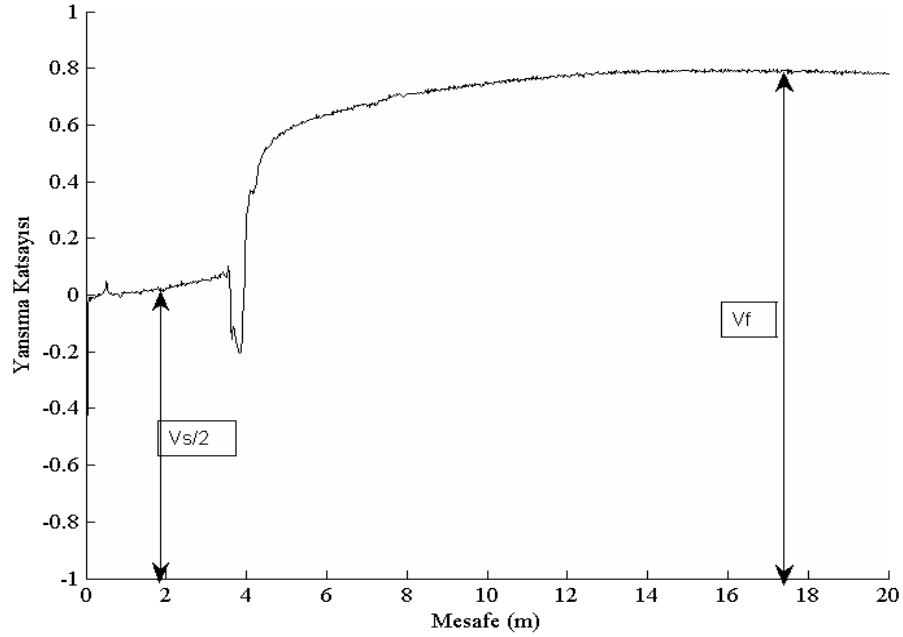
Şekil 6.31. SP-4 örneği için Klasik yöntem ve TDR yöntemi ile hesaplanan boşluk oranı değerleri

Burada x eksenini, klasik yöntemle bulunan boşluk oranı değerlerini, y eksenini ise TDR yöntemi yardımıyla bulunan boşluk oranı değerlerini temsil etmektedir. Boşluk oranı değerleri 0,527 ile 0,671 aralığında değişmektedir. Boşluk oranları arasındaki en büyük mutlak fark 0,017 en küçük fark ise 0 olarak bulunmuştur.

6.8.4. TDR dalga formu kullanılarak zeminin elektriksel iletkenliğinin hesaplanması

Zeminin elektriksel iletkenliğinin ölçülmesi amacıyla TDR yansıma formu incelenmiştir. Elektriksel iletkenlik Yu ve Drnevich (2004) tarafından önerilen ve Denklem (3.23) ve (3.24)’de verilen eşitlikler yardımıyla bulunmuştur. İlk olarak Denklem (3.24)’de verilen eşitlik kullanılarak C katsayısı hesaplanmıştır. Buna göre C katsayısı 13,78 olarak bulunmuştur. Elektriksel iletkenliğin hesaplanabilmesi için

Denklem (3.23)'de verilen eşitlik kullanılmıştır. Bu eşitlikte kullanılacak kritik voltajlar Şekil 6.32'de gösterilmiştir.



Şekil 6.32. Elektriksel iletkenlik için kritik voltaj değerleri

Tablo 6.16. SP-4 türü kum örneğine ait elektriksel iletkenlik değerleri

	θ	EC ($S.m^{-1}$)
Deney no:1	0	0,0024
Deney no:2	3,66	0,0037
Deney no:3	7,61	0,0037
Deney no:4	11,69	0,0074
Deney no:5	16,49	0,0091
Deney no:6	18,86	0,0144
Deney no:7	3,78	0,0039
Deney no:8	8,20	0,0042
Deney no:9	10,09	0,0085
Deney no:10	17,37	0,0102
Deney no:11	24,52	0,0143

Şekil 6.32’de elektriksel iletkenliğin hesaplanması için gerekli kritik voltaj adımlarının değerleri gösterilmiştir. Şekilde hacimsel su içeriği değeri %8,2 olan kum örneği için kritik voltaj değerleri verilmiştir. Tüm örnekler için hazırlanmış grafikler ekler kısmında bulunmaktadır. Bu örnek için hesaplanan elektriksel iletkenlik değeri $0,0042 \text{ S.m}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Tablo 6.16’da SP-4 kum örneğine ait elektriksel iletkenlik değerleri verilmiştir

6.9. Genel Değerlendirme

TDR dalga formunu kullanarak dielektrik katsayısının bulunabileceği bu bölümde deneysel olarak gösterilmiştir. Daha önceki çalışmalarda dielektrik katsayısının bulunabilmesi için teğet yöntemi ve türev yöntemi önerilmiştir. Bu çalışma sonucunda her iki yönteminde izin verilebilir hata sınırlarında kaldığı görülmüştür.

Hacimsel su içeriği ile dielektrik katsayısı arasındaki ilişki kullanılarak hacimsel su içeriğinin bulunabileceği bu bölümde açık olarak görülmüştür. Hacimsel su içeriğinin bulunabilmesi amacıyla Topp ve diğ. (1980) ve Ledieu ve diğ. (1986) eşitlikleri kullanılmıştır. Eşitliklerin her ikisi de hacimsel su içeriğinin belirlenmesi konusunda kabul edilebilir hata sınırları içerisinde kalmıştır. Tablo 17 ve Tablo 18’de karşılaştırmalı olarak hacimsel su içerikleri arasındaki farklar verilmiştir.

Tablo 6.17. Teğet yöntemi ile hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri ile etüv yardımıyla hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri arasındaki farklar

		En Küçük Fark	En Büyük Fark	Ortalama Fark
SP-1	Topp ve diğ. (1980)	0	1,2	0,5
	Ledieu ve diğ. (1986)	0,1	1,7	0,8
SP-2	Topp ve diğ. (1980)	0	1,9	0,6
	Ledieu ve diğ. (1986)	0,2	2,2	0,8
SP-3	Topp ve diğ. (1980)	0,1	1,5	0,8
	Ledieu ve diğ. (1986)	0,2	1,8	1,1
SP-4	Topp ve diğ. (1980)	0	1,4	0,5
	Ledieu ve diğ. (1986)	0,2	1,9	0,7

Tablo 6.17 ve Tablo 6.18 incelendiğinde TDR yardımıyla bulunan hacimsel su içeriği değerlerinin etüv yardımıyla bulunan hacimsel su içeriklerine oranla ortalama olarak en fazla %1 hata aralığında kaldığı görülmüştür. Bu hata aralığı kabul edilebilir sınırlarda kalmaktadır.

Yine tablolar incelendiğinde Topp ve diğ. (1980) eşitliğinin, Ledieu ve diğ. (1986) eşitliğine nazaran çok büyük bir farklılık olmasa da daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 6.18. Türev yöntemi ile hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri ile etüv yardımıyla hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri arasındaki farklar

		En Küçük Fark	En Büyük Fark	Ortalama Fark
SP-1	Topp ve diğ. (1980)	0	1,4	0,5
	Ledieu ve diğ. (1986)	0	1,4	0,7
SP-2	Topp ve diğ. (1980)	0	1,6	0,5
	Ledieu ve diğ. (1986)	0,2	1,8	0,9
SP-3	Topp ve diğ. (1980)	0,2	2,1	1,0
	Ledieu ve diğ. (1986)	0	2,2	1,0
SP-4	Topp ve diğ. (1980)	0,1	1,7	0,5
	Ledieu ve diğ. (1986)	0,2	2,1	0,6

7. PERMEABİLİTE KATSAYISININ BELİRLENMESİ

Tez çalışması kapsamında 4 farklı zemin türü için permeabilite katsayıları hem klasik yöntemlerle hem de elektriksel yöntemlerle hesaplanmıştır. Klasik yöntem olarak adlandırdığımız yöntemlerden birincisi doymuş zemin örnekleri için sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda elde edilen permeabilite katsayılarıdır. İkincisi ise boşluk oranına bağlı olarak Chapuis (2004) denklemi yardımıyla hesaplanan permeabilite katsayılarıdır. Elektriksel yöntemler ise Kozeny-Carman ve Chapuis eşitliklerinin elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak tekrar düzenlenmesi sonucunda elde edilen eşitlikler ve TDR okumaları kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayılarıdır.

7.1. SP-1 Örneği İçin Yapılan Permeabilite Hesaplamaları

Bu kısımda SP-1 örneği için yapılan permeabilite deneylerinin sonuçları verilmiştir. Elde edilen deney sonuçları kullanılarak permeabilite katsayıları hem klasik hem de elektriksel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir.

7.1.1. Klasik yöntemlerle permeabilite katsayılarının hesaplanması

Klasik yöntemlerle permeabilite hesaplanmasında iki yöntem kullanılmıştır. Bunlardan ilki düşen seviyeli permeabilite deneyidir. Permeabilite değerinin hesaplanması amacıyla 5 farklı su içeriğinde sıkıştırılan SP-1 türü kum örnekleri üzerinde sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Örnekler permeabilite kalıplarına sıkıştırıldıktan sonra doymuş hale gelinceye kadar sabit bir hidrolik yük altında bekletilmiştir. Doymuşluk derecesinin %100 olduğundan emin olunduktan sonra ölçüm setinden 8 adet permeabilite ölçümü alınmıştır. Alınan bu değerler ve hesaplanan permeabilite değerleri Tablo 7.1'de verilmiştir.

Tablo incelendiğinde en düşük ortalama permeabilite katsayısının $0,0485 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-1'de, en yüksek permeabilite katsayısının ise $0,0720 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-5'de elde edildiği görülmektedir. Tablo dikkatle incelendiğinde

permeabilite katsayısının tekralanan 8 ölçümde de farklılıklar gösterdiği görülmektedir.

Tablo 7.1. SP-1 türü kum örneği için permeabilite deney sonuçları

Deney-1			Deney-2			Deney-3		
t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)	t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)	t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)
121	539	0,0510	65	355	0,0625	63	393	0,0688
150	610	0,0466	75	418	0,0638	73	461	0,0696
116	540	0,0533	93	512	0,0630	85	539	0,0699
70	295	0,0482	106	575	0,0621	96	599	0,0687
77	340	0,0506	121	648	0,0613	101	625	0,0682
132	550	0,0477	131	686	0,0600	118	698	0,0652
148	598	0,0463	142	726	0,0585	122	733	0,0662
148	579	0,0448	152	768	0,0578	134	780	0,0642
Ort.	0,0485		Ort.	0,0611		Ort.	0,0676	
Deney-4			Deney-5					
t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)	t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)			
65	336	0,0592	50	310	0,0738			
71	371	0,0598	61	368	0,0718			
83	428	0,0590	66	403	0,0727			
93	486	0,0598	82	488	0,0709			
126	653	0,0593	98	572	0,0694			
108	570	0,0604	72	430	0,0711			
111	579	0,0597	78	457	0,0698			
64	331	0,0592	111	715	0,0767			
Ort.	0,0596		Ort.	0,0720				

En küçük fark $0,0014 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-4 örneğinde, en büyük fark ise $0,0085 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-1 örneğinde oluşmuştur. Permeabilite değerlerin farklı olmasının en büyük nedeni örneklerin farklı sıklıklarda yerleştirilmiş olması, yani boşluk oranlarının farklı olması ve zeminin homojen olmamasından kaynaklanan yerleşim farklarının olmasıdır.

Klasik yöntemle permeabilite katsayısı hesaplanan zemin örneklerinin boşluk oranları da hesaplanmıştır. Bu amaçla zemin örneği hacmi bilinen permeabilite kalıbına bilinen bir su içeriği değerinde sıkıştırıldıktan sonra permeabilite deneyine başlanmadan önce ağırlığı ölçülmüştür. Ölçülen bu veriler ve özgül ağırlık değeri kullanılarak boşluk oranı değerleri hesaplanmıştır. Ardından hesaplanan boşluk oranları ile bu boşluk oranlarına sahip zemin örnekleri kullanılarak yapılan sabit seviyeli permeabilite deneyleri sonucunda elde edilen permeabilite değerleri Tablo 7.2’de verilmiştir. Beklendiği gibi boşluk oranının artması ile permeabilite katsayılarının da genel olarak arttığı gözlenmiştir.

Tablo 7.2. SP-1 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda elde edilen permeabilite katsayısı değerleri

	Boşluk Oranı	Permeabilite Katsayısı ($cm.sn^{-1}$)
Deney-1	0,608	0,0485
Deney-2	0,647	0,0611
Deney-3	0,611	0,0676
Deney-4	0,622	0,0596
Deney-5	0,712	0,0720

Klasik yöntemlerden ikincisi ise Chapuis tarafından geliştirilen ve Denklem (4.28)’de verilen eşitlik yardımıyla permeabilite katsayılarının hesaplanmasıdır. Bu eşitliğe göre zeminin boşluk oranı bilinirse permeabilite katsayısı kolayca bulunabilir.

Bu amaçla daha önce kompaksiyon kalıplarına yerleştirilmiş ve Bölüm 6’da ayrıntılı olarak sonuçları verilen 11 kompaksiyon deney örneği ve 5 farklı su içeriğinde hazırlanmış permeabilite örneklerinin boşluk oranları ve bu boşluk oranlarına karşılık gelen permeabilite değerleri Denklem (4.28) kullanılarak hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen boşluk oranı ve permeabilite değerleri Tablo 7.3’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde en küçük boşluk oranı 0,581 değerini, en yüksek boşluk oranı ise 0,712 değerini, en küçük permeabilite katsayısı 0,0197

cm.sn⁻¹ değerini en yüksek permeabilite katsayısı ise 0,0299 cm.sn⁻¹ değerini almıştır.

Tablo 7.3. SP-1 türü kum örneği için Chapuis (2004) eşitliği ile hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doygunluk (%)	Permeabilite Kat. (cm.sn ⁻¹)
Permeabilite Deney-1	0,608	100	0,0217
Permeabilite Deney-2	0,647	100	0,0246
Permeabilite Deney-3	0,611	100	0,0219
Permeabilite Deney-4	0,622	100	0,0227
Permeabilite Deney-5	0,712	100	0,0299
Kompaksiyon Deney-1	0,581	1	0,0197
Kompaksiyon Deney-2	0,615	8	0,0222
Kompaksiyon Deney-3	0,598	20	0,0209
Kompaksiyon Deney-4	0,650	28	0,0248
Kompaksiyon Deney-5	0,619	41	0,0225
Kompaksiyon Deney-6	0,599	55	0,0210
Kompaksiyon Deney-7	0,586	9	0,0201
Kompaksiyon Deney-8	0,639	19	0,0240
Kompaksiyon Deney-9	0,622	31	0,0227
Kompaksiyon Deney-10	0,577	41	0,0195
Kompaksiyon Deney-11	0,560	51	0,0183

Denklem (4.28)'e göre permeabilite katsayısı hesaplandığında zeminin suya doymuş olması veya olmamasının permeabilite katsayısını etkilemediği belirtilmiştir. Tablo 7.3'den de görüldüğü üzere permeabilite katsayısı suya doymuşluktan bağımsız olarak boşluk oranına göre hesaplanmıştır. Boşluk oranının artmasıyla beklendiği gibi geçirgenlikte artmıştır.

7.1.2. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması

Klasik yöntemlerle permeabilite katsayısı için ölçümler alınırken eş zamanlı olarak elektriksel akım karakteristikleri de belirlenmiş ve bu ölçüm sonuçları kullanılarak da permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Kozeny-Carman (1992) tarafından geliştirilen eşitlik elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak tekrar düzenlenmiş ve bu eşitlik daha önce Denklem (4.27)'de verilmiştir. TDR ölçümleri sonucunda elde edilen yansıma formları analiz edilerek zeminin elektriksel akım karakteristikleri belirlenmiştir. Bu eşitliğe göre permeabilite katsayısının hesaplanabilmesi için elektriksel akım karakteristiklerinin yanında zeminin özgül yüzey alanının da bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla daha önce yapılan elek analizi sonuçları kullanılarak zemin örneğine ait özgül yüzey alanı değeri hesaplanmıştır. Özgül yüzey alanı için yapılan hesaplamalar Tablo 7.4'te verilmiştir.

Tablo 7.4. SP-1 türü kum örneği için özgül yüzey alanı hesabı

Elek Açıklığı (mm)	Geçen (%)	Fark (X)	$S=6/(d*\rho_s)$ (m ² /kg)	S_0 (X*S)
4,760	99,30	0,0070	0,47	0,00
4,000	97,14	0,0216	0,56	0,01
2,360	91,33	0,0581	0,95	0,05
2,000	89,08	0,0224	1,12	0,03
1,000	80,89	0,0820	2,23	0,18
0,425	61,77	0,1911	5,25	1,00
0,250	40,12	0,2165	8,92	1,93
0,125	10,37	0,2975	17,84	5,31
0,074	4,81	0,0556	30,14	1,68
0,015	0,00	0,0481	148,70	7,15
			ΣS	17,35

Permeabilite katsayısı Denklem (4.27)'de verilen Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Bu eşitliğe göre gerekli olan zeminin elektriksel iletkenliği ve zemin içinde bulunan suyun elektriksel iletkenliği TDR yansıma formu kullanılarak bulunmuştur. Bu bilgiler ışığında hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri Tablo 7.5'de verilmiştir.

Tablo 7.5. SP-1 türü kum örneği için Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doymuluk (%)	Perm. Kat. ($cm.sn^{-1}$)
Permeabilite Deney-1	0,608	100	0,0294
Permeabilite Deney-2	0,647	100	0,0295
Permeabilite Deney-3	0,611	100	0,0297
Permeabilite Deney-4	0,622	100	0,0325
Permeabilite Deney-5	0,712	100	0,0376
Kompaksiyon Deney-1	0,581	1	0,0001
Kompaksiyon Deney-2	0,615	8	0,0001
Kompaksiyon Deney-3	0,598	20	0,0014
Kompaksiyon Deney-4	0,650	28	0,0045
Kompaksiyon Deney-5	0,619	41	0,0110
Kompaksiyon Deney-6	0,599	55	0,0247
Kompaksiyon Deney-7	0,586	9	0,0001
Kompaksiyon Deney-8	0,639	19	0,0011
Kompaksiyon Deney-9	0,622	31	0,0038
Kompaksiyon Deney-10	0,577	41	0,0076
Kompaksiyon Deney-11	0,560	51	0,0151

Kozeny-Carman eşitliği yardımıyla hesaplanan ve Tablo 7.5'de verilen permeabilite katsayısı değerleri incelendiğinde zeminin suya doymuluğunun değişmesiyle permeabilite katsayısında büyük değişimler meydana geldiği açık olarak

görülmektedir. Kozeny-Carman'ın eşitliğine göre zeminin doygunluğu arttığı zaman klasik yöntemlerle elde edilen permeabilite katsayısı değerlerine daha çok yaklaştığı görülmektedir. Tüm permeabilite değerleri birbirleriyle karşılaştırılarak daha ayrıntılı olarak bu bölümün ilerleyen sayfalarında incelenecektir.

7.1.3. Chapuis eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması

Chapuis (2004) eşitliği elektriksel akım karakteristikleri ile düzenlenerek iki farklı eşitlik türetilmiş ve Bölüm 4'te bu işlem ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bu eşitliklerden ilki sadece suya doygun zemin örneklerinden alınan TDR ölçümlerinde geçerli olduğu, ikinci eşitliğin ise zeminin suya doygunluğundan bağımsız olarak kullanılabilmesi hatırlanmalıdır. Bu eşitlikler sırasıyla Denklem (4.40) ve Denklem (4.49)'da verilmiştir.

Tez kapsamında yapılan deneylerde sadece permeabilite deneyi yapılacak örnekler suya doygun hale getirilmiştir. Bu nedenle Denklem (4.40)'da verilen eşitlik SP-1 örneği için yapılan 5 permeabilite deneyi için geçerliliğini korumaktadır. TDR yansıma formu sabit seviyeli permeabilite deneyi tamamlandıktan sonra suya doygun zemin örneğinden alınan TDR ölçümleri sonucunda elde edilmiştir. Bu dalga formu işlenerek zeminlere ait dielektrik katsayıları ve dielektrik katsayılarına bağlı olarak da permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri Tablo 7.6'da verilmiştir.

Tablo 7.6. %100 suya doygun SP-1 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doygunluk (%)	Permeabilite Katsayısı ($cm.sn^{-1}$)
Deney-1	0,608	100	0,0211
Deney-2	0,647	100	0,0258
Deney-3	0,611	100	0,0220
Deney-4	0,622	100	0,0229
Deney-5	0,712	100	0,0293

Farklı su içeriklerinde hazırlanan 11 adet SP-1 türü kum örneği kompaksiyon kalıplarına sıkıştırılmış ve sıkıştırılma işlemi sonrasında TDR okumaları alınmıştır. TDR okumaları sonrasında elde edilen yansıma formları kullanılarak kritik voltaj adımları bulunmuş ve Denklem (4.49) kullanılarak permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan permeabilite katsayıları Tablo 7.7’de verilmiştir.

Tablo 7.7. SP-1 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doygunluk (%)	Perm. Kat. ($cm.sn^{-1}$)
Kompaksiyon Deney-1	0,581	1	0,0002
Kompaksiyon Deney-2	0,615	8	0,0263
Kompaksiyon Deney-3	0,598	20	0,0177
Kompaksiyon Deney-4	0,650	28	0,0226
Kompaksiyon Deney-5	0,619	41	0,0234
Kompaksiyon Deney-6	0,599	55	0,0192
Kompaksiyon Deney-7	0,586	9	0,0190
Kompaksiyon Deney-8	0,639	19	0,0247
Kompaksiyon Deney-9	0,622	31	0,0209
Kompaksiyon Deney-10	0,577	41	0,0223
Kompaksiyon Deney-11	0,560	51	0,0207

Tablo 7.7’de verilen değerler incelendiğinde %1 suya doygunluğu bulunan, Kompaksiyon Deney-1 örneği katılmadan permeabilite katsayısının $0,0177 cm.sn^{-1}$ ile $0,0263 cm.sn^{-1}$ aralığında değiştiği söylenebilir.

7.2. SP-1 Örneği İçin Genel Değerlendirme

Referans olarak kabul ettiğimiz ve klasik olarak adlandırdığımız yöntemler kullanılarak elde edilen permeabilite katsayıları ile elektriksel akım karakteristikleri yardımıyla hesaplanan permeabilite katsayıları birbirleriyle karşılaştırılarak bu bölümde incelenmiştir. Ayrıca boşluk oranı ve doygunluk derecesinin, permeabilite

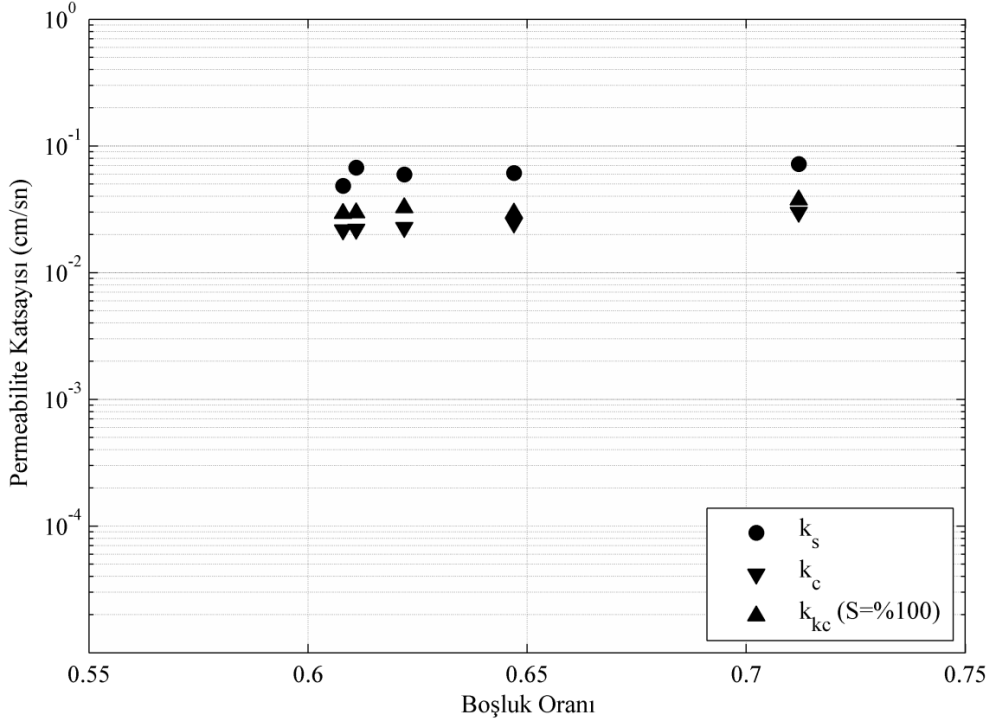
katsayısının hesaplanmasındaki etkisine bakılarak hangi denklemin hangi koşullarda daha iyi uyum gösterdiği irdelenmiştir.

Tablo 7.8. SP-1 türü kum örneği için hesaplanan tüm permeabilite katsayıları

	Klasik Yöntem		Elektriksel Yöntem	
	$k_s(cm.sn^{-1})$	$k_c(cm.sn^{-1})$	$k_{kc}(cm.sn^{-1})$	$k_{c1dr}(cm.sn^{-1})$
Permeabilite Deney-1	0,0485	0,0217	0,0294	0,0211
Permeabilite Deney-2	0,0611	0,0246	0,0295	0,0258
Permeabilite Deney-3	0,0676	0,0219	0,0297	0,0220
Permeabilite Deney-4	0,0596	0,0227	0,0325	0,0229
Permeabilite Deney-5	0,0720	0,0299	0,0376	0,0293
Kompaksiyon Deney-1		0,0197	0,0001	0,0002
Kompaksiyon Deney-2		0,0222	0,0001	0,0263
Kompaksiyon Deney-3		0,0209	0,0014	0,0177
Kompaksiyon Deney-4		0,0248	0,0045	0,0226
Kompaksiyon Deney-5		0,0225	0,0110	0,0234
Kompaksiyon Deney-6		0,0210	0,0247	0,0192
Kompaksiyon Deney-7		0,0201	0,0001	0,0190
Kompaksiyon Deney-8		0,0240	0,0011	0,0247
Kompaksiyon Deney-9		0,0227	0,0038	0,0209
Kompaksiyon Deney-10		0,0195	0,0076	0,0223
Kompaksiyon Deney-11		0,0183	0,0151	0,0207

Tablo 7.8’de SP-1 örneği için hesaplanan tüm permeabilite katsayısı değerleri bir arada verilmiştir. Tabloda ilk sütun deney numarasını, ikinci ve üçüncü sütun klasik yöntemle bulunan permeabilite katsayısı değerlerini, üç, dört ve beşinci sütunlar ise elektriksel yöntemler yardımıyla hesaplanan permeabilite katsayısı değerlerini ifade etmektedir. Bu tabloda k_s , sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda elde edilen permeabilite katsayısını, k_c , boşluk oranı ve Chapuis (2004) denklemi kullanılarak

hesaplanan permeabilite katsayısını, k_{kc} , elektriksel akım karakteristikleri ve Kozeny-Carman denklemi kullanılarak bulunan permeabilite katsayısını, k_{ctdr} , %100 suya doygun zemin örnekleri için dielektrik katsayısı ve Chapuis (2004) denklemi kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısını, k_{c1tdr} , kritik voltaj adımları ve Chapuis (2004) denklemi kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısı değerlerini göstermektedir.



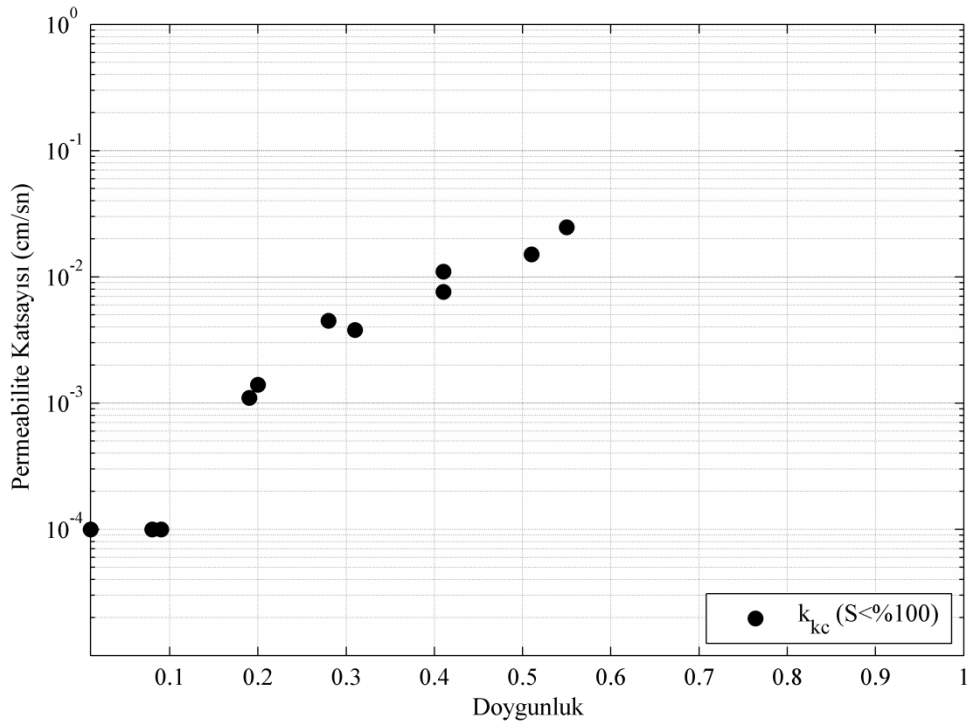
Şekil 7.1. SP-1 türü kum örneği için klasik yöntemler ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayıları

Şekil 7.1'de SP-1 türü kum örneği için klasik yöntemler ile bulunan permeabilite katsayısı değerleri ile Kozeny-Carman eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak bulunan permeabilite katsayısı değerleri verilmiştir. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları şekilden de görüldüğü üzere %100 suya doygun halde yani sabit seviyeli permeabilite deneyi yapılan örneklerden eş zamanlı olarak alınan TDR ölçümleri yardımıyla bulunan değerleri temsil etmektedir.

Tablo 7.8 ve Şekil 7.1 beraber incelendiğinde doygun halde bulunan örnekler için Kozeny-Carman eşitliği yardımıyla bulunan permeabilite katsayısı değerleri ile sabit

seviyeli permeabilite deneyi yardımıyla bulunan permeabilite katsayısı değerlerinin, permeabilite katsayısının büyük aralıklarda değişen bir katsayı olmasından dolayı, birbirlerine yakın değerler aldığı söylenebilir. Bu örnekler arasındaki fark $0,0007 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,0299 \text{ cm.sn}^{-1}$ arasında oluşmaktadır.

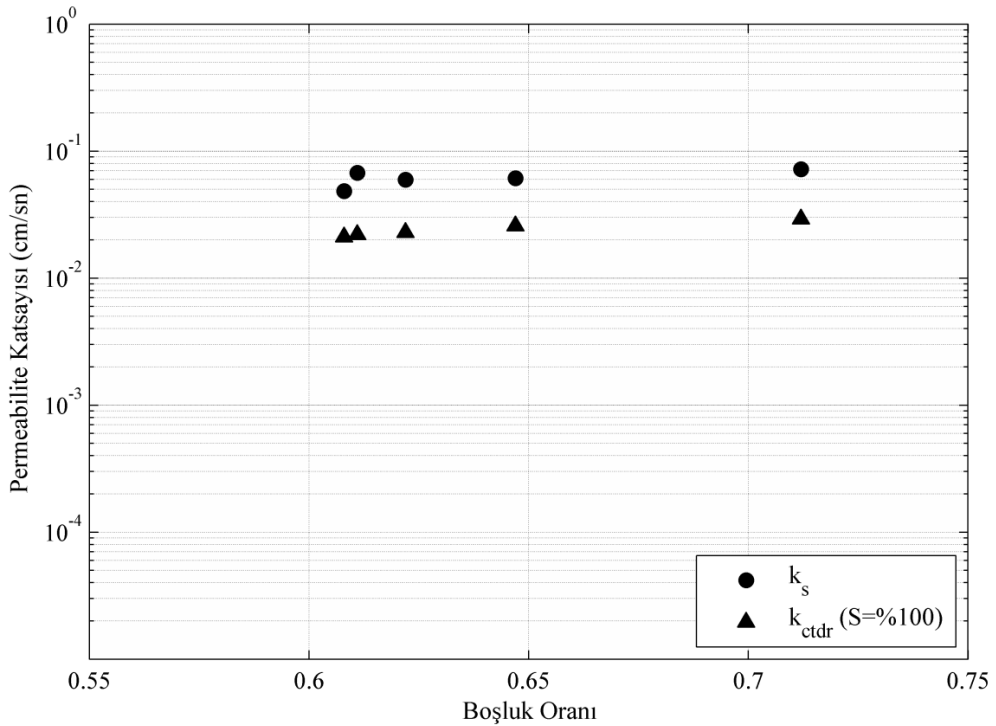
Kozeny-Carman eşitliği yardımıyla bulunan permeabilite katsayısı değerleri ile Chapuis eşitliği ile bulunan permeabilite katsayısı değerleri karşılaştırıldığında yine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu örnekler arasındaki fark ise $0,005 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,010 \text{ cm.sn}^{-1}$ arasında oluşmaktadır.



Şekil 7.2. SP-1 türü kum örneği için doygunluk ile Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayılarının karşılaştırılması

Şekil 7.2’de SP-1 türü kum örneği için doygunluk ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayısı değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları doygunluğun %100’den küçük olduğu durumda yani kompaksiyon örneklerinden alınan TDR ölçümleri vasıtasıyla bulunan değerleri temsil etmektedir.

Suya doymun olmayan örnekler incelendiğinde ise doymunluğun artmasıyla beklenildiği gibi doymun durumda hesaplanan permeabilite katsayısına yakın değerler tahmin edildiği görülmektedir. Kozeny-Carman eşitliği TDR yansıma formu ile beraber kullanıldığında özellikle doymunluğun %50'den fazla olduğu durumlarda, doymun durumdaki permeabilite katsayısına daha yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Doymun durumdaki permeabilite katsayısına en uzak değerler ise doymunluğun %10'dan daha küçük olduğu durumlarda meydana gelmektedir.

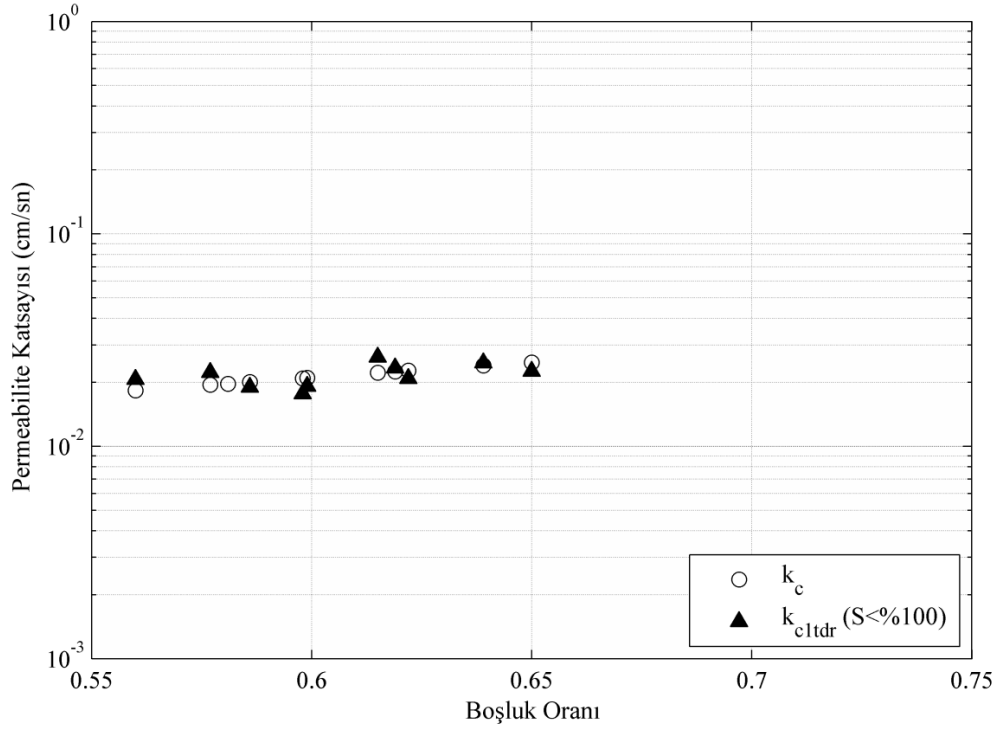


Şekil 7.3. SP-1 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

Suya doymun örnekler için Chapuis eşitliği ve elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri ile sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda bulunan permeabilite katsayısı değerleri Şekil 7.3'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri incelendiğinde permeabilite katsayısı değerlerindeki farkların $0,0274 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,0456 \text{ cm.sn}^{-1}$ aralığında değiştiği görülmektedir.

Suya doymun olmayan zemin örnekleri içinde permeabilite katsayısı değerleri Chapuis eşitliği kullanılarak hem klasik hem de elektriksel yöntemlerle hesaplanmış

ve Şekil 7.4'de verilmiştir. Chapuis eşitliği yardımıyla bulunan permeabilite katsayıları boşluk oranının doymun ve doymun olmayan durumlarda değişmemesinden dolayı doymun durumdaki permeabilite katsayısını temsil etmektedir.



Şekil 7.4. SP-1 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite değerleri

Şekilden de görüleceği gibi Chapuis eşitliği kullanılarak gerek klasik yöntemle gerekse elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak bulunan permeabilite katsayısı değerlerinin birbirine oldukça yakın değerler aldığı görülmektedir. Klasik ve elektriksel yöntemler kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri arasında oluşan fark $0,0049 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,0098 \text{ cm.sn}^{-1}$ aralığında oluşmuştur.

7.3. SP-2 Örneği İçin Yapılan Permeabilite Hesaplamaları

Bu kısımda SP-2 örneği için yapılan permeabilite deneylerinin sonuçları verilmiştir. Elde edilen deney sonuçları kullanılarak permeabilite katsayıları hem klasik hem de elektriksel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir.

7.3.1. Klasik yöntemlerle permeabilite katsayılarının hesaplanması

Klasik yöntemlerle permeabilite hesaplanmasında iki yöntem kullanılmıştır. Bunlardan ilki düşen seviyeli permeabilite deneyidir. Permeabilite değerinin hesaplanması amacıyla 5 farklı su içeriğinde sıkıştırılan SP-2 türü kum örnekleri üzerinde sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Örnekler permeabilite kalıplarına sıkıştırıldıktan sonra doymun hale gelinceye kadar sabit bir hidrolik yük altında bekletilmiştir. Doymunluk derecesinin %100 olduğundan emin olunduktan sonra ölçüm setinden 8 adet permeabilite ölçümü alınmıştır. Alınan bu değerler ve hesaplanan permeabilite değerleri Tablo 7.9'da verilmiştir.

Tablo 7.9. SP-2 türü kum örneği için permeabilite deney sonuçları

Deney-1			Deney-2			Deney-3		
t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)	t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)	t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)
152	215	0,0162	338	220	0,0075	106	585	0,0632
180	240	0,0153	369	119	0,0037	77	410	0,0610
177	226	0,0146	116	309	0,0305	90	453	0,0576
172	220	0,0146	121	321	0,0304	101	497	0,0563
196	240	0,0140	113	302	0,0306	57	275	0,0552
114	140	0,0141	76	206	0,0310	78	358	0,0525
167	195	0,0134	89	243	0,0313	64	290	0,0519
199	230	0,0132	123	312	0,0290	70	310	0,0507
	Ort.	0,0144		Ort.	0,0242		Ort.	0,0561
Deney-4			Deney-5					
t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)	t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)			
94	280	0,0341	98	370	0,0432			
88	302	0,0393	80	290	0,0415			
85	258	0,0347	103	355	0,0395			
104	290	0,0319	102	276	0,0310			
123	320	0,0298	122	361	0,0339			
131	322	0,0281	100	291	0,0333			
135	340	0,0288	131	349	0,0305			
145	330	0,0261	141	321	0,0261			
	Ort.	0,0316		Ort.	0,0349			

Tablo incelendiğinde en düşük ortalama permeabilite katsayısının $0,0144 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-1’de, en yüksek permeabilite katsayısının ise $0,0561 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-3’de elde edildiği görülmektedir. Tablo dikkatle incelendiğinde permeabilite katsayısının tekrarlanan 8 ölçümde de farklılıklar gösterdiği görülmektedir. En küçük fark $0,0030 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-1 örneğinde, en büyük fark ise $0,0238 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-2 örneğinde oluşmuştur. Permeabilite değerlerin farklı olmasının en büyük nedeni örneklerin farklı sıklıklarda yerleştirilmiş olması yani boşluk oranlarının farklı olması ve zeminin homojen olmamasından kaynaklanan yerleşim farklarının olmasıdır.

Klasik yöntemle permeabilite katsayısı hesaplanan zemin örneklerinin boşluk oranları da hesaplanmıştır. Bu amaçla zemin örneği hacmi bilinen permeabilite kalıbına bilinen bir su içeriği değerinde sıkıştırıldıktan sonra permeabilite deneyine başlanmadan önce ağırlığı ölçülmüştür. Ölçülen bu veriler ve özgül ağırlık değeri kullanılarak boşluk oranı değerleri hesaplanmıştır. Ardından hesaplanan boşluk oranları ile bu boşluk oranlarına sahip zemin örnekleri kullanılarak yapılan sabit seviyeli permeabilite deneyleri sonucunda elde edilen permeabilite değerleri Tablo 7.10’da verilmiştir. Beklendiği gibi boşluk oranının artması ile permeabilite katsayılarının da genel olarak arttığı gözlenmiştir.

Tablo 7.10. SP-2 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda elde edilen permeabilite katsayısı değerleri

	Boşluk Oranı	Permeabilite Katsayısı (cm.sn^{-1})
Deney-1	0,550	0,0144
Deney-2	0,543	0,0242
Deney-3	0,577	0,0561
Deney-4	0,502	0,0316
Deney-5	0,536	0,0349

Klasik yöntemlerden ikincisi ise Chapuis tarafından geliştirilen ve Denklem (4.28)’de verilen eşitlik yardımıyla permeabilite katsayılarının hesaplanmasıdır. Bu eşitliğe göre zeminin boşluk oranı bilirse permeabilite katsayısı kolayca

bulunabilir. Bu amaçla daha önce kompaksiyon kalıplarına yerleştirilmiş ve bölüm 6'da ayrıntılı olarak sonuçları verilen 11 kompaksiyon deney örneği ve 5 farklı su içeriğinde hazırlanmış permeabilite örneklerinin boşluk oranları ve bu boşluk oranlarına karşılık gelen permeabilite değerleri Denklem (4.28) kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 7.11. SP-2 türü kum örneği için Chapuis (2004) denklemi ile hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doygunluk (%)	Permeabilite Kat. ($cm.sn^{-1}$)
Permeabilite Deney-1	0,550	100	0,0319
Permeabilite Deney-2	0,543	100	0,0312
Permeabilite Deney-3	0,577	100	0,0353
Permeabilite Deney-4	0,502	100	0,0264
Permeabilite Deney-5	0,536	100	0,0301
Kompaksiyon Deney-1	0,531	1	0,0297
Kompaksiyon Deney-2	0,550	9	0,0319
Kompaksiyon Deney-3	0,594	18	0,0374
Kompaksiyon Deney-4	0,557	30	0,0328
Kompaksiyon Deney-5	0,511	36	0,0274
Kompaksiyon Deney-6	0,622	69	0,0411
Kompaksiyon Deney-7	0,555	10	0,0325
Kompaksiyon Deney-8	0,556	21	0,0327
Kompaksiyon Deney-9	0,544	30	0,0312
Kompaksiyon Deney-10	0,537	38	0,0304
Kompaksiyon Deney-11	0,584	56	0,0361

Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen boşluk oranı ve permeabilite değerleri Tablo 7.11'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde en küçük boşluk oranı 0,502, en yüksek boşluk oranı değeri ise 0,622, en küçük permeabilite katsayısı değeri 0,0264

cm.sn⁻¹ en yüksek permeabilite katsayısı değeri ise 0,0411 cm.sn⁻¹ olarak bulunmuştur. Denklem (4.28)'e göre permeabilite katsayısı suya doymuluktan bağımsız olarak boşluk oranına göre hesaplanmıştır.

7.3.2. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması

Klasik yöntemlerle permeabilite katsayısı için ölçümler alınırken eş zamanlı olarak elektriksel akım karakteristikleri de belirlenmiş ve bu ölçüm sonuçları kullanılarak da permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Kozeny-Carman (1992) tarafından geliştirilen eşitlik elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak tekrar düzenlenmiş ve bu eşitlik daha önce Denklem (4.27)'de verilmiştir.

Tablo 7.12. SP-2 türü kum örneği için özgül yüzey alanı hesabı

Elek Açıklığı (mm)	Geçen (%)	Fark (X)	$S=6/(d*\rho_s)$ (m ² /kg)	S_0 (X*S)
4,760	98,85	0,0115	0,48	0,01
4,000	94,69	0,0416	0,57	0,02
2,360	82,18	0,1251	0,96	0,12
2,000	77,43	0,0475	1,13	0,05
1,000	58,92	0,1851	2,26	0,42
0,425	29,94	0,2898	5,33	1,54
0,250	17,43	0,1251	9,06	1,13
0,125	5,47	0,1196	18,11	2,17
0,074	3,06	0,0241	30,60	0,74
0,015	0,00	0,0306	150,94	4,62
			ΣS	10,82

TDR ölçümleri sonucunda elde edilen yansıma formları analiz edilerek zeminin elektriksel akım karakteristikleri belirlenmiştir. Bu eşitliğe göre permeabilite katsayısının hesaplanabilmesi için elektriksel akım karakteristiklerinin yanında

zeminin özgül yüzey alanının da bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla daha önce yapılan elek analizi sonuçları kullanılarak zemin örneğine ait özgül yüzey alanı değeri hesaplanmıştır. Özgül yüzey alanı için yapılan hesaplamalar Tablo 7.12’de verilmiştir.

Tablo 7.13. SP-2 türü kum örneği için Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doygunluk (%)	Permeabilite Kat. ($cm.sn^{-1}$)
Permeabilite Deney-1	0,550	100	0,0443
Permeabilite Deney-2	0,543	100	0,0399
Permeabilite Deney-3	0,577	100	0,0492
Permeabilite Deney-4	0,502	100	0,0364
Permeabilite Deney-5	0,536	100	0,0356
Kompaksiyon Deney-1	0,531	1	0,0001
Kompaksiyon Deney-2	0,550	9	0,0003
Kompaksiyon Deney-3	0,594	18	0,0019
Kompaksiyon Deney-4	0,557	30	0,0049
Kompaksiyon Deney-5	0,511	36	0,0093
Kompaksiyon Deney-6	0,622	69	0,0783
Kompaksiyon Deney-7	0,555	10	0,0004
Kompaksiyon Deney-8	0,556	21	0,0021
Kompaksiyon Deney-9	0,544	30	0,0050
Kompaksiyon Deney-10	0,537	38	0,0099
Kompaksiyon Deney-11	0,584	56	0,0356

Permeabilite katsayısı Denklem (4.27)’de verilen Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Bu eşitliğe göre gerekli olan zeminin elektriksel iletkenliği ve zemin içinde bulunan suyun elektriksel iletkenliği TDR yansıma formu

kullanılarak bulunmuştur. Bu bilgiler ışığında hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri Tablo 7.13’de verilmiştir.

Kozeny-Carman eşitliği yardımıyla hesaplanan ve Tablo 7.13’de verilen permeabilite katsayısı değerleri incelendiğinde zeminin suya doygunluğunun değişmesiyle permeabilite katsayısında büyük değişmeler meydana geldiği açık olarak görülmektedir. Kozeny-Carman’ın eşitliğine göre zeminin doygunluğu arttığı zaman klasik yöntemlerle elde edilen permeabilite katsayısı değerlerine daha çok yaklaştığı görülmektedir. Tüm permeabilite değerleri birbirleriyle karşılaştırılarak daha ayrıntılı olarak bu bölümün ilerleyen sayfalarında incelenecektir.

7.3.3. Chapuis eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması

Chapuis (2004) eşitliği elektriksel akım karakteristikleri ile düzenlenerek iki farklı eşitlik türetilmiş ve Bölüm 4’te bu işlem ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bu eşitliklerden ilki sadece suya doygun zemin örneklerinden alınan TDR ölçümlerinde geçerli olduğu, ikinci eşitliğin ise zeminin suya doygunluğundan bağımsız olarak kullanılabilmesi hatırlanmalıdır. Bu eşitlikler sırasıyla Denklem (4.40) ve Denklem (4.49)’da verilmiştir. Tez kapsamında yapılan deneylerde sadece permeabilite deneyi yapılacak örnekler suya doygun hale getirilmiştir. Bu nedenle Denklem (4.40)’da verilen eşitlik SP-2 örneği için yapılan 5 permeabilite deneyi için geçerliliğini korumaktadır.

TDR yansıma formu sabit seviyeli permeabilite deneyi tamamlandıktan sonra suya doygun zemin örneğinden alınan TDR ölçümleri sonucunda elde edilmiştir. Bu dalga formu işlenerek zeminlere ait dielektrik katsayıları ve dielektrik katsayılarına bağlı olarak da permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri Tablo 7.14’de verilmiştir.

Farklı su içeriklerinde hazırlanan 11 adet SP-2 türü kum örneği kompaksiyon kalıplarına sıkıştırılmış ve sıkıştırılma işlemi sonrasında TDR okumaları alınmıştır. TDR okumaları sonrasında elde edilen yansıma formları kullanılarak kritik voltaj adımları bulunmuş ve Denklem (4.49) kullanılarak permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan permeabilite katsayıları Tablo 7.15’de verilmiştir.

Tablo 7.14. %100 suya doymun SP-2 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doygunluk (%)	Permeabilite Katsayısı ($cm.sn^{-1}$)
Deney-1	0,550	100	0,0325
Deney-2	0,543	100	0,0313
Deney-3	0,577	100	0,0366
Deney-4	0,502	100	0,0268
Deney-5	0,536	100	0,0331

Tablo 7.15'de verilen değerler incelendiğinde en küçük permeabilite katsayısı değerinin Kompaksiyon Deney-5, en büyük permeabilite katsayısı değerinin ise Kompaksiyon Deney-8 örneğinde olduğu görülmektedir ve bu değerler sırasıyla $0,0200 cm.sn^{-1}$ ve $0,0504 cm.sn^{-1}$ olarak bulunmuştur.

Tablo 7.15. SP-2 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doygunluk (%)	Permeabilite Kat. ($cm.sn^{-1}$)
Kompaksiyon Deney-1	0,531	1	0,0342
Kompaksiyon Deney-2	0,550	9	0,0234
Kompaksiyon Deney-3	0,594	18	0,0295
Kompaksiyon Deney-4	0,557	30	0,0306
Kompaksiyon Deney-5	0,511	36	0,0200
Kompaksiyon Deney-6	0,622	69	0,0360
Kompaksiyon Deney-7	0,555	10	0,0352
Kompaksiyon Deney-8	0,556	21	0,0504
Kompaksiyon Deney-9	0,544	30	0,0305
Kompaksiyon Deney-10	0,537	38	0,0474
Kompaksiyon Deney-11	0,584	56	0,0359

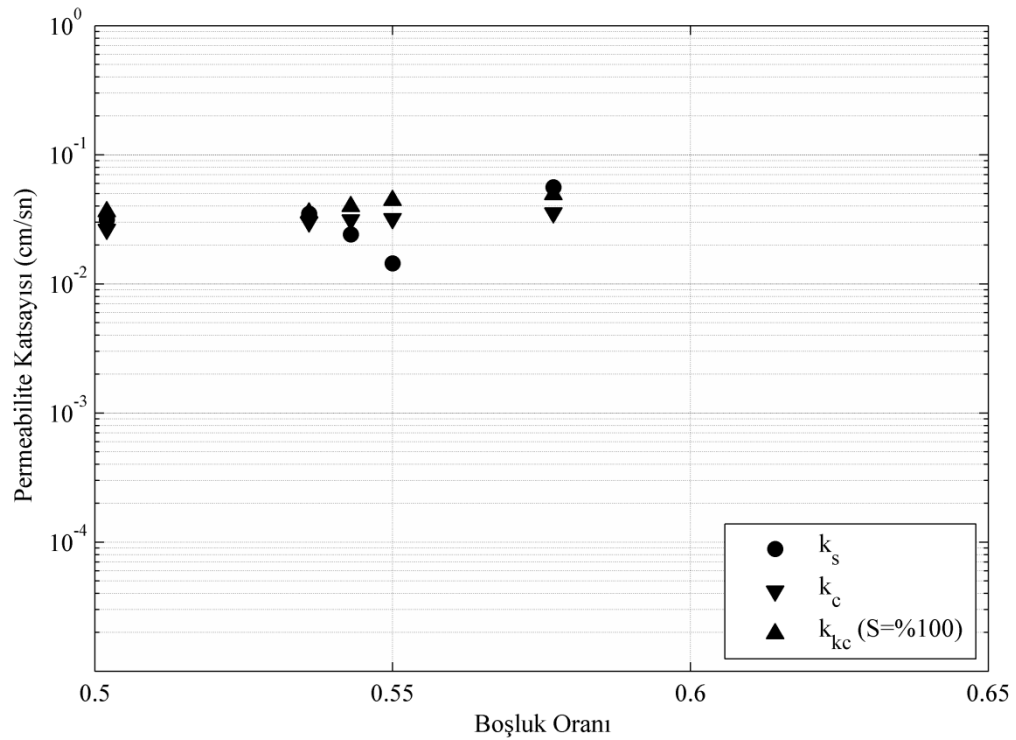
7.4. SP-2 Örneği İçin Genel Değerlendirme

Referans olarak kabul ettiğimiz ve klasik olarak adlandırdığımız yöntemler kullanılarak elde edilen permeabilite katsayıları ile elektriksel akım karakteristikleri yardımıyla hesaplanan permeabilite katsayıları birbirleriyle karşılaştırılarak bu bölümde incelenmiştir. Ayrıca boşluk oranı ve doygunluk derecesinin, permeabilite katsayısının hesaplanmasındaki etkisine bakılarak hangi denklemin hangi koşullarda daha iyi uyum gösterdiği irdelenmiştir.

Tablo 7.16. SP-2 türü kum örneği için hesaplanan tüm permeabilite katsayıları

	Klasik Yöntem		Elektriksel Yöntem	
	$k_s (cm.sn^{-1})$	$k_c (cm.sn^{-1})$	$k_{kc} (cm.sn^{-1})$	$k_{cldr} (cm.sn^{-1})$
Permeabilite Deney-1	0,0144	0,0319	0,0443	0,0325
Permeabilite Deney-2	0,0242	0,0312	0,0399	0,0313
Permeabilite Deney-3	0,0561	0,0353	0,0492	0,0366
Permeabilite Deney-4	0,0316	0,0264	0,0364	0,0268
Permeabilite Deney-5	0,0349	0,0301	0,0356	0,0331
Kompaksiyon Deney-1		0,0297	0,0001	0,0342
Kompaksiyon Deney-2		0,0319	0,0003	0,0234
Kompaksiyon Deney-3		0,0374	0,0019	0,0295
Kompaksiyon Deney-4		0,0328	0,0049	0,0306
Kompaksiyon Deney-5		0,0274	0,0093	0,0200
Kompaksiyon Deney-6		0,0411	0,0783	0,0360
Kompaksiyon Deney-7		0,0325	0,0004	0,0352
Kompaksiyon Deney-8		0,0327	0,0021	0,0504
Kompaksiyon Deney-9		0,0312	0,0050	0,0305
Kompaksiyon Deney-10		0,0304	0,0099	0,0474
Kompaksiyon Deney-11		0,0361	0,0356	0,0359

Tablo 7.16’da SP-2 örneği için hesaplanan tüm permeabilite katsayısı değerleri bir arada verilmiştir. Tabloda ilk sütun deney numarasını, ikinci ve üçüncü sütun klasik yöntemle bulunan permeabilite katsayısı değerlerini, üç, dört ve beşinci sütunlar ise elektriksel yöntemler yardımıyla hesaplanan permeabilite katsayısı değerlerini ifade etmektedir. Bu tabloda k_s , sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda elde edilen permeabilite katsayısını, k_c , boşluk oranı ve Chapuis (2004) denklemi kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısını, k_{kc} , elektriksel akım karakteristikleri ve Kozeny-Carman denklemi kullanılarak bulunan permeabilite katsayısını, k_{ctdr} , %100 suya doygun zemin örnekleri için dielektrik katsayısı ve Chapuis (2004) denklemi kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısını, k_{c1dr} , kritik voltaj adımları ve Chapuis (2004) denklemi kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısı değerlerini göstermektedir.



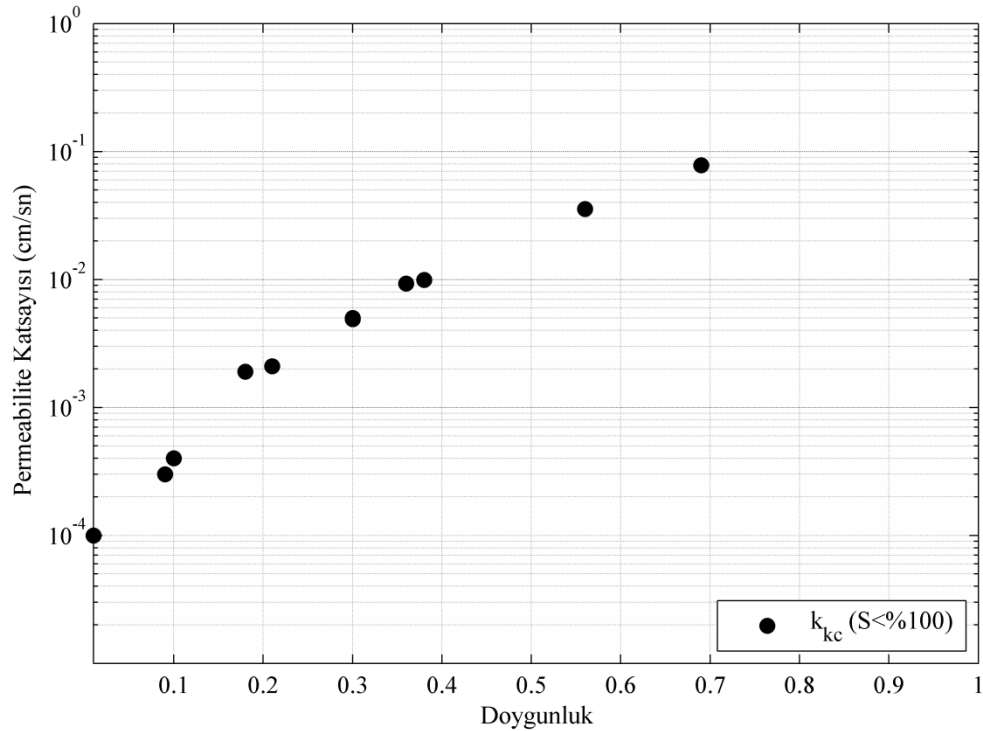
Şekil 7.5. SP-2 türü kum örneği için klasik yöntemler ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayıları

Şekil 7.5’de SP türü kum örneği için klasik yöntemler ile bulunan permeabilite katsayısı değerleri ile Kozeny-Carman eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak bulunan permeabilite katsayısı değerleri verilmiştir. Kozeny-Carman eşitliği

kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları şekilden de görüldüğü üzere %100 suya doymun halde yani sabit seviyeli permeabilite deneyi yapılan örneklerden eş zamanlı olarak alınan TDR ölçümleri yardımıyla bulunan değerleri temsil etmektedir.

Tablo 7.16 ve Şekil 7.5 beraber incelendiğinde doymun halde bulunan örnekler için Kozeny-Carman eşitliği yardımıyla bulunan permeabilite katsayısı değerleri ile sabit seviyeli permeabilite deneyi yardımıyla bulunan permeabilite katsayısı değerlerinin, permeabilite katsayısının büyük aralıklarda değişen bir katsayı olmasından dolayı, birbirlerine yakın değerler aldığı söylenebilir. Bu örnekler arasındaki fark $0,0007 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,0299 \text{ cm.sn}^{-1}$ arasında oluşmaktadır.

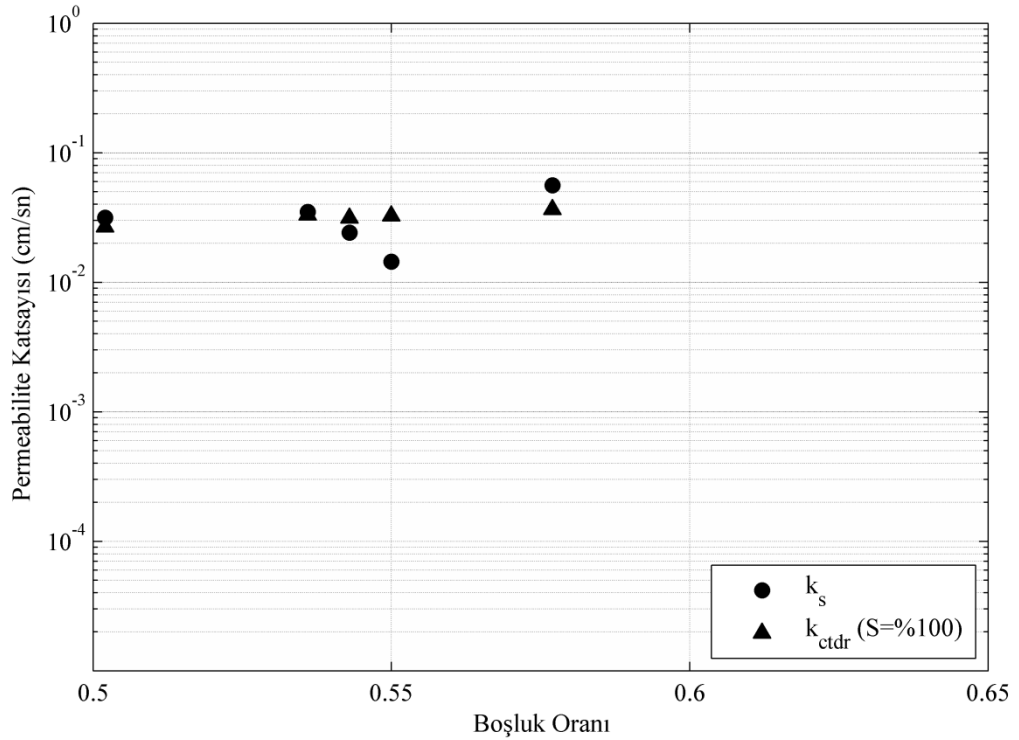
Kozeny-Carman eşitliği yardımıyla bulunan permeabilite katsayısı değerleri ile Chapuis eşitliği ile bulunan permeabilite katsayısı değerleri karşılaştırıldığında yine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu örnekler arasındaki fark ise $0,0087 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,0139 \text{ cm.sn}^{-1}$ arasında oluşmaktadır



Şekil 7.6. SP-2 türü kum örneği için doymunluk ile Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayılarının karşılaştırılması

Şekil 7.6'da SP-2 türü kum örneği için doygunluk ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayısı değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları doygunluğun %100'den küçük olduğu durumda yani kompaksiyon örneklerinden alınan TDR ölçümleri vasıtasıyla bulunan değerleri temsil etmektedir.

Suya doygun olmayan örnekler incelendiğinde ise doygunluğun artmasıyla beklenildiği gibi doygun durumda hesaplanan permeabilite katsayısına yakın değerler tahmin edildiği görülmektedir. Kozeny-Carman eşitliği TDR yansıma formu ile beraber kullanıldığında özellikle doygunluğun %50'den fazla olduğu durumlarda, doygun durumdaki permeabilite katsayısına daha yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Doygun durumdaki permeabilite katsayısına en uzak değerler ise doygunluğun %30'dan daha küçük olduğu durumlarda meydana gelmektedir.

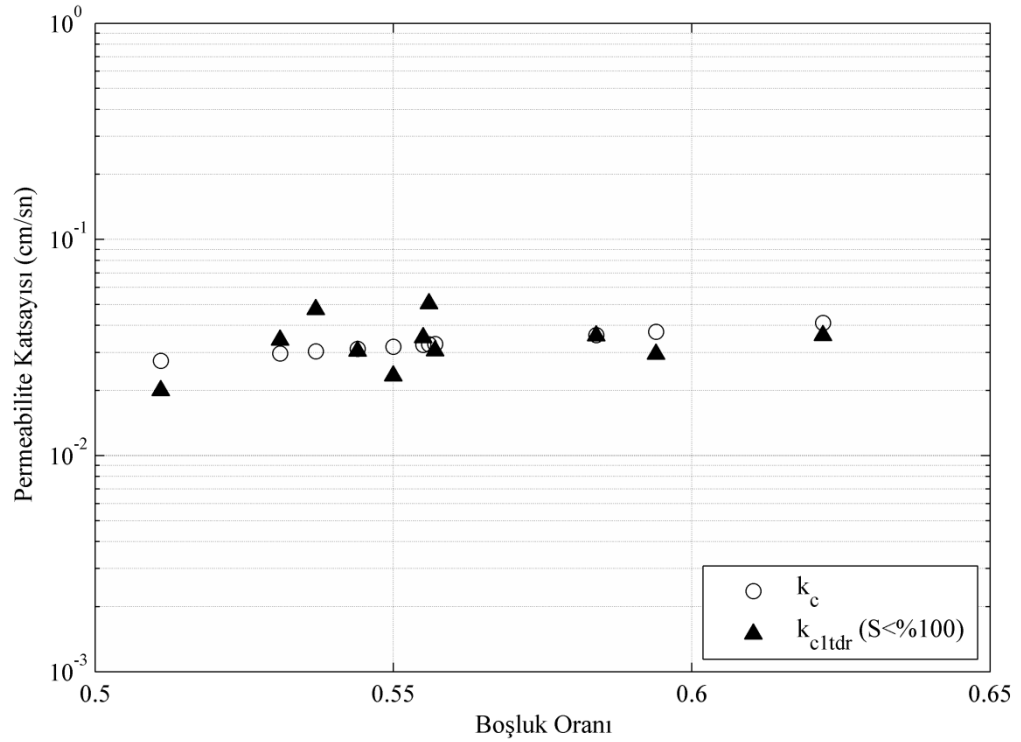


Şekil 7.7. SP-2 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

Suya doygun örnekler için Chapuis eşitliği ve elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri ile sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda bulunan permeabilite katsayısı değerleri Şekil 7.7'de

karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri incelendiğinde permeabilite katsayısı değerlerindeki farkların $0,0018 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,0195 \text{ cm.sn}^{-1}$ aralığında değiştiği görülmektedir.

Suya doymun olmayan zemin örnekleri içinde permeabilite katsayısı değerleri Chapuis eşitliği kullanılarak hem klasik hem de elektriksel yöntemlerle hesaplanmış ve Şekil 7.8'de verilmiştir. Chapuis eşitliği yardımıyla bulunan permeabilite katsayıları boşluk oranının doymun ve doymun olmayan durumlarda değişmemesinden dolayı doymun durumdaki permeabilite katsayısını temsil etmektedir.



Şekil 7.8. SP-2 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite değerleri

Şekilden de görüleceği gibi Chapuis eşitliği kullanılarak gerek klasik yöntemle gerekse elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak bulunan permeabilite katsayısı değerlerinin birbirine oldukça yakın değerler aldığı görülmektedir. Klasik ve elektriksel yöntemler kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri arasında oluşan fark $0,0003 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,0178 \text{ cm.sn}^{-1}$ aralığında oluşmuştur. Bu farktan da görüldüğü gibi elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak türetilen

eşitlik, permeabilite katsayısının bulunması açısından oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

7.5. SP-3 Örneği İçin Yapılan Permeabilite Hesaplamaları

Bu kısımda SP-3 örneği için yapılan permeabilite deneylerinin sonuçları verilmiştir. Elde edilen deney sonuçları kullanılarak permeabilite katsayıları hem klasik hem de elektriksel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir.

7.5.1. Klasik yöntemlerle permeabilite katsayılarının hesaplanması

Klasik yöntemlerle permeabilite hesaplanmasında iki yöntem kullanılmıştır. Bunlardan ilki düşen seviyeli permeabilite deneyidir. Permeabilite değerinin hesaplanması amacıyla 5 farklı su içeriğinde sıkıştırılan SP-3 türü kum örnekleri üzerinde sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Örnekler permeabilite kalıplarına sıkıştırıldıktan sonra doymuş hale gelinceye kadar sabit bir hidrolik yük altında bekletilmiştir. Doymuşluk derecesinin %100 olduğundan emin olunduktan sonra ölçüm setinden 8 adet permeabilite ölçümü alınmıştır. Alınan bu değerler ve hesaplanan permeabilite değerleri Tablo 7.17’de verilmiştir.

Tablo incelendiğinde en düşük ortalama permeabilite katsayısının $0,0105 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-1’de, en yüksek permeabilite katsayısının ise $0,0547 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-2’de elde edildiği görülmektedir. Tablo dikkatle incelendiğinde permeabilite katsayısının tekrarlanan 8 ölçümde de farklılıklar gösterdiği görülmektedir. En küçük fark $0,0014 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-1 örneğinde, en büyük fark ise $0,0116 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-5 örneğinde oluşmuştur. Permeabilite değerlerin farklı olmasının en büyük nedeni örneklerin farklı sıklıklarda yerleştirilmiş olması yani boşluk oranlarının farklı olması ve zeminin homojen olmamasından kaynaklanan yerleşim farklarının olmasıdır.

Klasik yöntemle permeabilite katsayısı hesaplanan zemin örneklerinin boşluk oranları da hesaplanmıştır. Bu amaçla zemin örneği hacmi bilinen permeabilite kalıbına bilinen bir su içeriği değerinde sıkıştırıldıktan sonra permeabilite deneyine başlanmadan önce ağırlığı ölçülmüştür. Ölçülen bu veriler ve özgül ağırlık değeri kullanılarak boşluk oranı değerleri hesaplanmıştır. Ardından hesaplanan boşluk

oranları ile bu boşluk oranlarına sahip zemin örnekleri kullanılarak yapılan sabit seviyeli permeabilite deneyleri sonucunda elde edilen permeabilite değerleri Tablo 7.18'de verilmiştir. Beklendiği gibi boşluk oranının artması ile permeabilite katsayılarının da genel olarak arttığı gözlenmiştir.

Tablo 7.17. SP-3 türü kum örneği için permeabilite deney sonuçları

Deney-1			Deney-2			Deney-3		
t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)	t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)	t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)
112	116	0,0119	97	478	0,0564	63	122	0,0222
152	150	0,0113	63	312	0,0567	110	290	0,0302
134	132	0,0113	103	500	0,0556	77	198	0,0294
124	115	0,0106	88	427	0,0556	86	214	0,0285
148	130	0,0101	112	540	0,0552	113	275	0,0279
166	146	0,0101	122	580	0,0544	126	351	0,0319
184	154	0,0096	132	610	0,0529	152	355	0,0267
201	168	0,0096	141	630	0,0512	185	420	0,0260
	Ort.	0,0105		Ort.	0,0547		Ort.	0,0278
Deney-4			Deney-5					
t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)	t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)			
63	250	0,0454	153	560	0,0419			
82	312	0,0436	62	290	0,0535			
119	435	0,0418	94	428	0,0521			
128	455	0,0407	122	552	0,0518			
143	495	0,0396	161	720	0,0512			
164	540	0,0377	117	518	0,0507			
182	580	0,0365	141	610	0,0495			
204	625	0,0351	186	800	0,0492			
	Ort.	0,0401		Ort.	0,0500			

Klasik yöntemlerden ikincisi ise Chapuis tarafından geliştirilen ve Denklem (4.28)'de verilen eşitlik yardımıyla permeabilite katsayılarının hesaplanmasıdır. Bu eşitliğe göre zeminin boşluk oranı bilinirse permeabilite katsayısı kolayca bulunabilir.

Tablo 7.18. SP-3 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda elde edilen permeabilite katsayısı değerleri

	Boşluk Oranı	Permeabilite Katsayısı ($cm.sn^{-1}$)
Deney-1	0,506	0,0105
Deney-2	0,536	0,0547
Deney-3	0,512	0,0278
Deney-4	0,569	0,0401
Deney-5	0,492	0,0500

Bu amaçla daha önce kompaksiyon kalıplarına yerleştirilmiş ve Bölüm 6'da ayrıntılı olarak sonuçları verilen 11 kompaksiyon deney örneği ve 5 farklı su içeriğinde hazırlanmış permeabilite örneklerinin boşluk oranları ve bu boşluk oranlarına karşılık gelen permeabilite değerleri Denklem (4.28) kullanılarak hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen boşluk oranı ve permeabilite değerleri Tablo 7.19'da verilmiştir. Tablo incelendiğinde en küçük boşluk oranı 0,492, en yüksek boşluk oranı değeri ise 0,578, en küçük permeabilite katsayısı değeri 0,0274 $cm.sn^{-1}$ en yüksek permeabilite katsayısı değeri ise 0,0397 $cm.sn^{-1}$ olarak bulunmuştur. Denklem (4.28)'e göre permeabilite katsayısı hesaplandığında zeminin suya doymun olması veya olmamasının permeabilite katsayısını etkilemediği belirtilmiştir. Tablo 7.19'dan da görüldüğü üzere permeabilite katsayısı suya doymunluktan bağımsız olarak boşluk oranına göre hesaplanmıştır. Boşluk oranının artmasıyla beklendiği gibi geçirgenlikte artmıştır.

Tablo 7.19. SP-3 türü kum örneği için Chapuis (2004) denklemi ile hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doygunluk (%)	Permeabilite Kat. ($cm.sn^{-1}$)
Permeabilite Deney-1	0,506	100	0,0291
Permeabilite Deney-2	0,536	100	0,0327
Permeabilite Deney-3	0,512	100	0,0298
Permeabilite Deney-4	0,569	100	0,0371
Permeabilite Deney-5	0,492	100	0,0274
Kompaksiyon Deney-1	0,549	1	0,0345
Kompaksiyon Deney-2	0,576	10	0,0381
Kompaksiyon Deney-3	0,578	18	0,0383
Kompaksiyon Deney-4	0,560	26	0,0359
Kompaksiyon Deney-5	0,538	36	0,0330
Kompaksiyon Deney-6	0,588	52	0,0397
Kompaksiyon Deney-7	0,553	8	0,0350
Kompaksiyon Deney-8	0,547	15	0,0342
Kompaksiyon Deney-9	0,560	24	0,0359
Kompaksiyon Deney-10	0,538	30	0,0330
Kompaksiyon Deney-11	0,532	37	0,0323

7.5.2. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması

Klasik yöntemlerle permeabilite katsayısı için ölçümler alınırken eş zamanlı olarak elektriksel akım karakteristikleri de belirlenmiş ve bu ölçüm sonuçları kullanılarak da permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Kozeny-Carman (1992) tarafından geliştirilen eşitlik elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak tekrar düzenlenmiş ve bu eşitlik daha önce Denklem (4.27)'de verilmiştir. TDR ölçümleri sonucunda elde edilen yansıma formları analiz edilerek zeminin elektriksel akım

karakteristikleri belirlenmiştir. Bu eşitliğe göre permeabilite katsayısının hesaplanabilmesi için elektriksel akım karakteristiklerinin yanında zeminin özgül yüzey alanının da bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla daha önce yapılan elek analizi sonuçları kullanılarak zemin örneğine ait özgül yüzey alanı değeri hesaplanmıştır. Özgül yüzey alanı için yapılan hesaplamalar Tablo 7.20’de verilmiştir.

Tablo 7.20. SP-3 türü kum örneği için özgül yüzey alanı hesabı

Elek Açıklığı (mm)	Geçen (%)	Fark (X)	$S=6/(d*\rho_s)$ (m ² /kg)	S_0 (X*S)
4,760	99,67	0,0033	0,48	0,00
4,000	95,88	0,0379	0,57	0,02
2,360	82,25	0,1363	0,96	0,13
2,000	76,88	0,0537	1,13	0,06
1,000	61,89	0,1499	2,26	0,34
0,425	29,62	0,3227	5,33	1,72
0,250	14,04	0,1559	9,06	1,41
0,125	3,38	0,1066	18,11	1,93
0,074	1,85	0,0152	30,60	0,47
0,015	0,00	0,0185	150,94	2,80
			ΣS	8,88

Permeabilite katsayısı Denklem (4.27)’de verilen Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Bu eşitliğe göre gerekli olan zeminin elektriksel iletkenliği ve zemin içinde bulunan suyun elektriksel iletkenliği TDR yansımaya formu kullanılarak bulunmuştur. Bu bilgiler ışığında hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri Tablo 7.21’de verilmiştir.

Tablo 7.21. SP-3 türü kum örneği için Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doymunluk (%)	Permeabilite Kat. ($cm.sn^{-1}$)
Permeabilite Deney-1	0,506	100	0,0564
Permeabilite Deney-2	0,536	100	0,0610
Permeabilite Deney-3	0,512	100	0,0552
Permeabilite Deney-4	0,569	100	0,0614
Permeabilite Deney-5	0,492	100	0,0501
Kompaksiyon Deney-1	0,549	1	0,0001
Kompaksiyon Deney-2	0,576	10	0,0009
Kompaksiyon Deney-3	0,578	18	0,0039
Kompaksiyon Deney-4	0,560	26	0,0095
Kompaksiyon Deney-5	0,538	36	0,0220
Kompaksiyon Deney-6	0,588	52	0,0651
Kompaksiyon Deney-7	0,553	8	0,0004
Kompaksiyon Deney-8	0,547	15	0,0018
Kompaksiyon Deney-9	0,560	24	0,0067
Kompaksiyon Deney-10	0,538	30	0,0079
Kompaksiyon Deney-11	0,532	37	0,0161

Kozeny-Carman eşitliği yardımıyla hesaplanan ve Tablo 7.21’de verilen permeabilite katsayısı değerleri incelendiğinde zeminin suya doymunluğunun değişmesiyle permeabilite katsayısında büyük değişmeler meydana geldiği açık olarak görülmektedir. Kozeny-Carman’ın eşitliğine göre zeminin doymunluğu arttığı zaman klasik yöntemlerle elde edilen permeabilite katsayısı değerlerine daha çok yaklaştığı görülmektedir. Tüm permeabilite değerleri birbirleriyle karşılaştırılarak daha ayrıntılı olarak bu bölümün ilerleyen sayfalarında incelenecektir.

7.5.3. Chapuis eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması

Chapuis (2004) eşitliği elektriksel akım karakteristikleri ile düzenlenerek iki farklı eşitlik türetilmiş ve Bölüm 4'te bu işlem ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bu eşitliklerden ilki sadece suya doymun zemin örneklerinden alınan TDR ölçümlerinde geçerli olduğu, ikinci eşitliğin ise zeminin suya doymunluğundan bağımsız olarak kullanılabilceği hatırlanmalıdır. Bu eşitlikler sırasıyla Denklem (4.40) ve Denklem (4.49)'da verilmiştir. Tez kapsamında yapılan deneylerde sadece permeabilite deneyi yapılacak örnekler suya doymun hale getirilmiştir. Bu nedenle Denklem (4.40)'da verilen eşitlik SP-3 örneği için yapılan 5 permeabilite deneyi için geçerliliğini korumaktadır.

TDR yansıma formu sabit seviyeli permeabilite deneyi tamamlandıktan sonra suya doymun zemin örneğinden alınan TDR ölçümleri sonucunda elde edilmiştir. Bu dalga formu işlenerek zeminlere ait dielektrik katsayıları ve dielektrik katsayılarına bağılı olarak da permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri Tablo 7.22'de verilmiştir.

Tablo 7.22. %100 suya doymun SP-3 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doygunluk (%)	Permeabilite Katsayısı ($cm.sn^{-1}$)
Deney-1	0,506	100	0,0293
Deney-2	0,536	100	0,0323
Deney-3	0,512	100	0,0303
Deney-4	0,569	100	0,0346
Deney-5	0,492	100	0,0274

Farklı su içeriklerinde hazırlanan 11 adet SP-3 türü kum örneği kompaksiyon kalıplarına sıkıştırılmış ve sıkıştırılma işlemi sonrasında TDR okumaları alınmıştır. TDR okumaları sonrasında elde edilen yansıma formları kullanılarak kritik voltaj adımları bulunmuş ve Denklem (4.49) kullanılarak permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan permeabilite katsayıları Tablo 7.23'de verilmiştir.

Tablo 7.23. SP-3 tipi türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doymunluk (%)	Permeabilite Kat. ($cm.sn^{-1}$)
Kompaksiyon Deney-1	0,549	1	0,0236
Kompaksiyon Deney-2	0,576	10	0,0406
Kompaksiyon Deney-3	0,578	18	0,0391
Kompaksiyon Deney-4	0,560	26	0,0342
Kompaksiyon Deney-5	0,538	36	0,0243
Kompaksiyon Deney-6	0,588	52	0,0293
Kompaksiyon Deney-7	0,553	8	0,0337
Kompaksiyon Deney-8	0,547	15	0,0818
Kompaksiyon Deney-9	0,560	24	0,0338
Kompaksiyon Deney-10	0,538	30	0,0390
Kompaksiyon Deney-11	0,532	37	0,0338

Tablo 7.23’de verilen değerler incelendiğinde en küçük permeabilite katsayısı değerinin Kompaksiyon Deney-1, en büyük permeabilite katsayısı değerinin ise Kompaksiyon Deney-8 örneğinde olduğu görülmektedir ve bu değerler sırasıyla $0,0236 cm.sn^{-1}$ ve $0,0818 cm.sn^{-1}$ olarak bulunmuştur.

7.6. SP-3 Örneği İçin Genel Değerlendirme

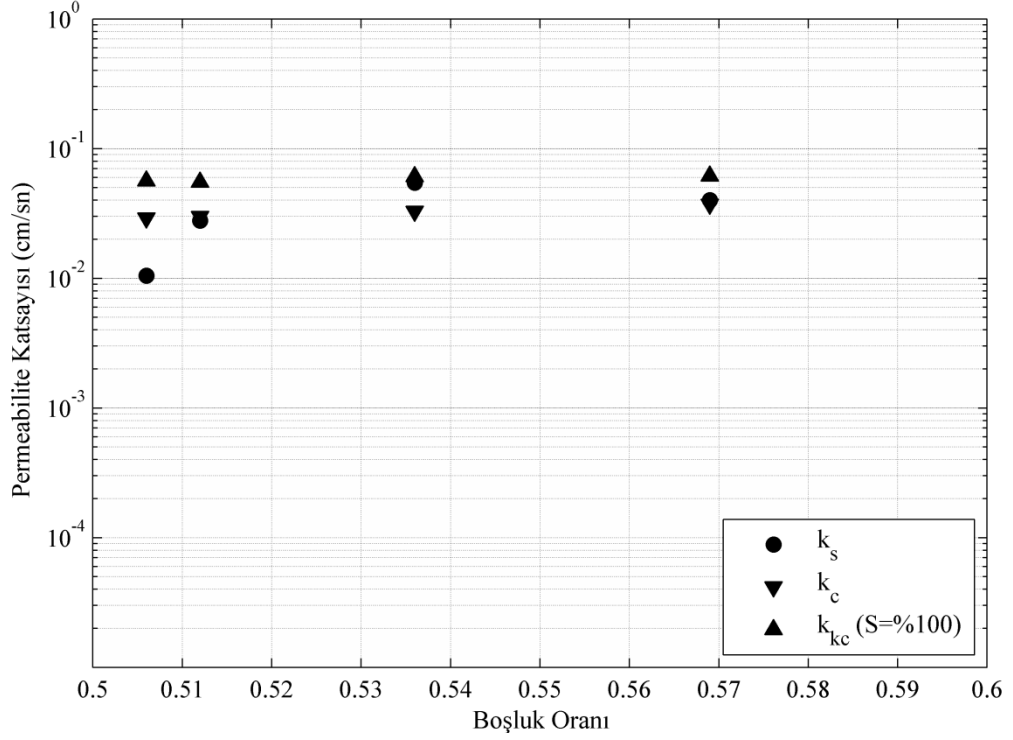
Referans olarak kabul ettiğimiz ve klasik olarak adlandırdığımız yöntemler kullanılarak elde edilen permeabilite katsayıları ile elektriksel akım karakteristikleri yardımıyla hesaplanan permeabilite katsayıları birbirleriyle karşılaştırılarak bu bölümde incelenmiştir. Ayrıca boşluk oranı ve doymunluk derecesinin, permeabilite katsayısının hesaplanmasındaki etkisine bakılarak hangi denklemin hangi koşullarda daha iyi uyum gösterdiği irdelenmiştir.

Tablo 7.24. SP-3 türü kum örneği için hesaplanan tüm permeabilite katsayıları

	Klasik Yöntem		Elektriksel Yöntem		
	$k_s (cm.sn^{-1})$	$k_c (cm.sn^{-1})$	$k_{kc} (cm.sn^{-1})$	$k_{ctdr} (cm.sn^{-1})$	$k_{c1tdr} (cm.sn^{-1})$
Permeabilite Deney-1	0,0105	0,0291	0,0564	0,0293	
Permeabilite Deney-2	0,0547	0,0327	0,0610	0,0323	
Permeabilite Deney-3	0,0278	0,0298	0,0552	0,0303	
Permeabilite Deney-4	0,0401	0,0371	0,0614	0,0346	
Permeabilite Deney-5	0,0500	0,0274	0,0501	0,0274	
Kompaksiyon Deney-1		0,0345	0,0001		0,0236
Kompaksiyon Deney-2		0,0381	0,0009		0,0406
Kompaksiyon Deney-3		0,0383	0,0039		0,0391
Kompaksiyon Deney-4		0,0359	0,0095		0,0342
Kompaksiyon Deney-5		0,0330	0,0220		0,0243
Kompaksiyon Deney-6		0,0397	0,0651		0,0293
Kompaksiyon Deney-7		0,0350	0,0004		0,0337
Kompaksiyon Deney-8		0,0342	0,0018		0,0818
Kompaksiyon Deney-9		0,0359	0,0067		0,0338
Kompaksiyon Deney-10		0,0330	0,0079		0,0390
Kompaksiyon Deney-11		0,0323	0,0161		0,0338

Tablo 7.24’de SP-3 örneği için hesaplanan tüm permeabilite katsayısı değerleri bir arada verilmiştir. Tabloda ilk sütun deney numarasını, ikinci ve üçüncü sütun klasik yöntemle bulunan permeabilite katsayısı değerlerini, üç, dört ve beşinci sütunlar ise elektriksel yöntemler yardımıyla hesaplanan permeabilite katsayısı değerlerini ifade etmektedir. Bu tabloda k_s , sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda elde edilen permeabilite katsayısını, k_c , boşluk oranı ve Chapuis (2004) denklemi kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısını, k_{kc} , elektriksel akım karakteristikleri ve Kozeny-Carman denklemi kullanılarak bulunan permeabilite katsayısını, k_{ctdr} , %100 suya

doğun zemin örnekleri için dielektrik katsayısı ve Chapuis (2004) denklemi kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısını, k_{c1dr} , kritik voltaj adımları ve Chapuis (2004) denklemi kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısı değerlerini göstermektedir.



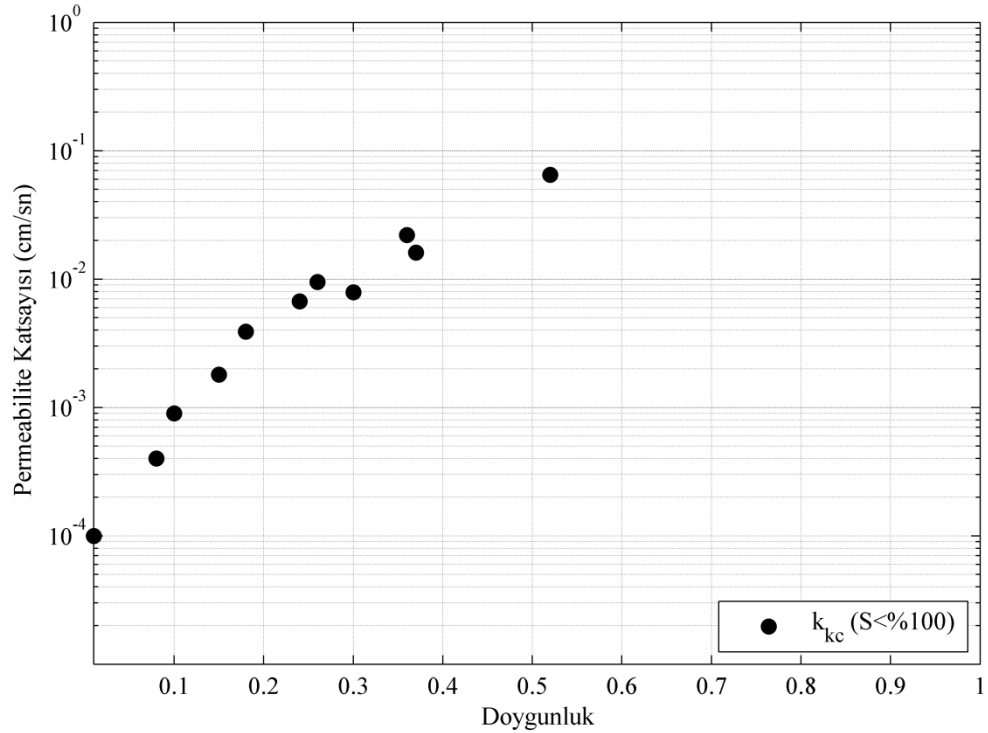
Şekil 7.9. SP-3 türü kum örneği için klasik yöntemler ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayıları

Şekil 7.9'da SP-3 türü kum örneği için klasik yöntemler ile bulunan permeabilite katsayısı değerleri ile Kozeny-Carman eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak bulunan permeabilite katsayısı değerleri verilmiştir. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları şekilden de görüldüğü üzere %100 suya doymun halde yani sabit seviyeli permeabilite deneyi yapılan örneklerden eş zamanlı olarak alınan TDR ölçümleri yardımıyla bulunan değerleri temsil etmektedir.

Tablo 7.24 ve Şekil 7.9 beraber incelendiğinde doymun halde bulunan örnekler için Kozeny-Carman eşitliği yardımıyla bulunan permeabilite katsayısı değerleri ile sabit seviyeli permeabilite deneyi yardımıyla bulunan permeabilite katsayısı değerlerinin, permeabilite katsayısının büyük aralıklarda değişen bir katsayı olmasından dolayı,

birbirlerine yakın değerler aldığı söylenebilir. Bu rnekler arasındaki fark $0,0063 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,0459 \text{ cm.sn}^{-1}$ arasında oluşmaktadır.

Kozeny-Carman eşitliği yardımıyla bulunan permeabilite katsayısı değerleri ile Chapuis eşitliği ile bulunan permeabilite katsayısı değerleri karşılaştırıldığında yine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu rnekler arasındaki fark ise $0,005 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,010 \text{ cm.sn}^{-1}$ arasında oluşmaktadır.

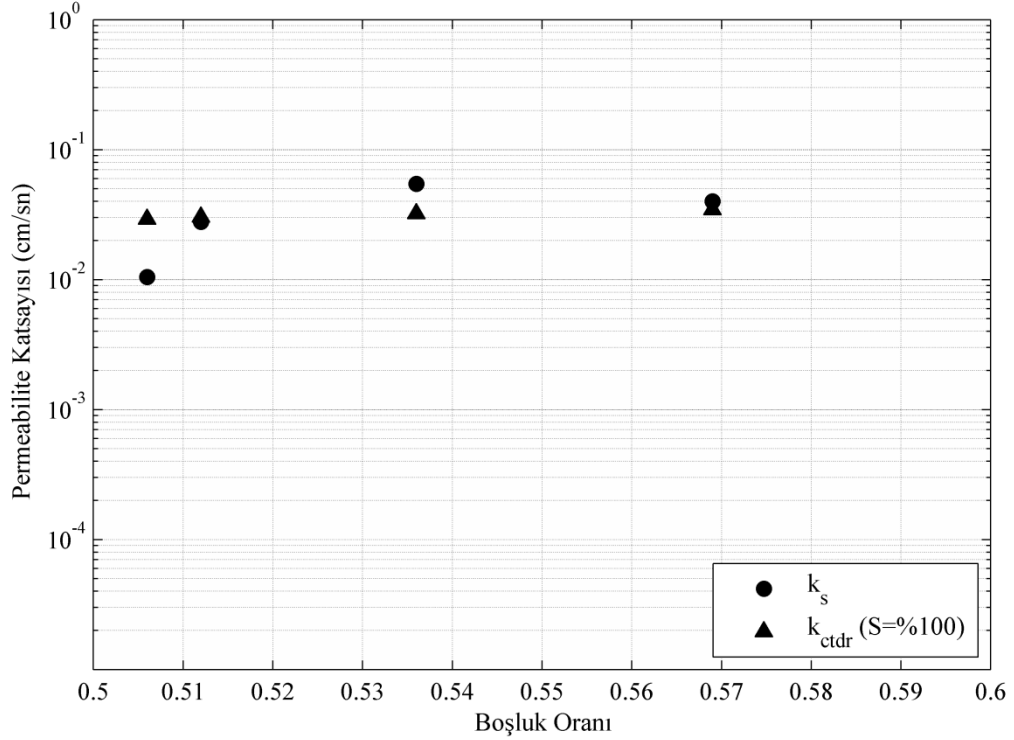


şekil 7.10. SP-3 türü kum rneği için Chapuis eşitliği ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayıları

şekil 7.10'da SP-3 türü kum rneği için doygunluk ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayısı değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları doygunluğun %100'den küçük olduğu durumda yani kompaksiyon örneklerinden alınan TDR lmleri vasıtasıyla bulunan değerleri temsil etmektedir.

Suya doygun olmayan örnekler incelendiğinde ise doygunluğun artmasıyla beklenildiği gibi doygun durumda hesaplanan permeabilite katsayısına yakın değerler tahmin edildiği görülmektedir. Kozeny-Carman eşitliği TDR yansıma formu

ile beraber kullanıldığında özellikle doygunluğun %50'den fazla olduğu durumlarda, doygun durumdaki permeabilite katsayısına daha yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Doygun durumdaki permeabilite katsayısına en uzak değerler ise doygunluğun %30'dan daha küçük olduğu durumlarda meydana gelmektedir.



Şekil 7.11. SP-3 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi ve TDR yansımaya formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

Suya doygun örnekler için Chapuis eşitliği ve elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri ile sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda bulunan permeabilite katsayısı değerleri Şekil 7.11'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri incelendiğinde permeabilite katsayısı değerlerindeki farkların $0,0001 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,0025 \text{ cm.sn}^{-1}$ aralığında değiştiği görülmektedir.

Suya doygun olmayan zemin örnekleri içinde permeabilite katsayısı değerleri Chapuis eşitliği kullanılarak hem klasik hem de elektriksel yöntemlerle hesaplanmış ve Şekil 7.12'de verilmiştir. Chapuis eşitliği yardımıyla bulunan permeabilite katsayıları boşluk oranının doygun ve doygun olmayan durumlarda

0,0283 cm.sn⁻¹ arasında oluşmaktadır. Suya doymun olmayan örnekler incelendiğinde ise doymunluğun artmasıyla gerçeğe yakın permeabilite katsayılarının tahmin edildiği görülmektedir. Doymunluğun %50'den daha düşük olması durumunda Kozeny-Carman eşitliği ile bulunan permeabilite katsayısı değerlerinin daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Suya doymun örnekler için Chapuis eşitliği ve elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri ile sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda bulunan permeabilite katsayısı değerleri Şekil 7.11'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri incelendiğinde permeabilite katsayısı değerlerindeki farklar 0,0001 cm.sn⁻¹ ile 0,0025 cm.sn⁻¹ aralığında değişmektedir.

Suya doymun olmayan zemin örnekleri için permeabilite katsayısı değerleri Chapuis eşitliği kullanılarak hem klasik hem de elektriksel yöntemlerle hesaplanmış ve Şekil 7.12'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere Chapuis eşitliği kullanılarak gerek klasik yöntemle gerekse elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak bulunan permeabilite katsayısı değerlerinin birbirine oldukça yakın değerler aldığı görülmektedir. Klasik ve elektriksel yöntemler kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri arasında oluşan fark 0,0008 cm.sn⁻¹ ile 0,0476 cm.sn⁻¹ aralığında oluşmuştur. Bu farktan da görüldüğü üzere elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak elde edilen eşitliğin permeabilite katsayısının bulunması açısından oldukça iyi sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.

7.7. SP-4 Örneği İçin Yapılan Permeabilite Hesaplamaları

Bu kısımda SP-4 örneği için yapılan permeabilite deneylerinin sonuçları verilmiştir. Elde edilen deney sonuçları kullanılarak permeabilite katsayıları hem klasik hem de elektriksel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir.

7.7.1. Klasik yöntemlerle permeabilite katsayılarının hesaplanması

Klasik yöntemlerle permeabilite hesaplanmasında iki yöntem kullanılmıştır. Bunlardan ilki düşen seviyeli permeabilite deneyidir. Permeabilite değerinin hesaplanması amacıyla 5 farklı su içeriğinde sıkıştırılan SP-4 türü kum örnekleri

üzerinde sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Örnekler permeabilite kalıplarına sıkıştırıldıktan sonra doymun hale gelinceye kadar sabit bir hidrolik yük altında bekletilmiştir. Doymunluk derecesinin %100 olduğundan emin olunduktan sonra ölçüm setinden 8 adet permeabilite ölçümü alınmıştır. Alınan bu değerler ve hesaplanan permeabilite değerleri Tablo 7.25’de verilmiştir.

Tablo 7.25. SP-4 türü kum örneği için permeabilite deney sonuçları

Deney-1			Deney-2			Deney-3		
t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)	t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)	t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)
63	255	0,0463	131	380	0,0332	96	202	0,0240
86	338	0,0449	123	478	0,0444	114	231	0,0231
103	400	0,0444	69	280	0,0464	153	300	0,0224
113	430	0,0435	112	320	0,0327	166	328	0,0226
151	560	0,0424	109	321	0,0337	91	250	0,0314
165	600	0,0416	137	398	0,0332	181	480	0,0303
183	672	0,0420	131	378	0,0330	173	430	0,0284
192	692	0,0412	151	420	0,0318	188	468	0,0284
	Ort.	0,0433		Ort.	0,0328		Ort.	0,0264
Deney-4			Deney-5					
t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)	t (sn.)	V (cm^3)	k ($cm.sn^{-1}$)			
81	441	0,0623	81	158	0,0223			
72	392	0,0623	101	188	0,0213			
61	319	0,0598	91	170	0,0213			
86	430	0,0572	215	380	0,0202			
74	368	0,0569	83	150	0,0206			
93	600	0,0738	115	200	0,0199			
109	698	0,0733	127	218	0,0196			
123	782	0,0727	134	225	0,0192			
	Ort.	0,0648		Ort.	0,0213			

Tablo incelendiğinde en düşük ortalama permeabilite katsayısının $0,0213 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-5’de, en yüksek permeabilite katsayısının ise $0,0648 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-4’de elde edildiği görülmektedir. Tablo dikkatle incelendiğinde permeabilite katsayısının tekrarlanan 8 ölçümde de farklılıklar gösterdiği

görülmektedir. En küçük fark $0.0051 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-1 örneğinde, en büyük fark ise $0.0166 \text{ cm.sn}^{-1}$ değeri ile Deney-4 örneğinde oluşmuştur.

Permeabilite değerlerin farklı olmasının en büyük nedeni örneklerin farklı sıklıklarda yerleştirilmiş olması yani boşluk oranlarının farklı olması ve zeminin homojen olmamasından kaynaklanan yerleşim farklarının olmasıdır.

Klasik yöntemle permeabilite katsayısı hesaplanan zemin örneklerinin boşluk oranları da hesaplanmıştır. Bu amaçla zemin örneği hacmi bilinen permeabilite kalıbına bilinen bir su içeriği değerinde sıkıştırıldıktan sonra permeabilite deneyine başlanmadan önce ağırlığı ölçülmüştür. Ölçülen bu veriler ve özgül ağırlık değeri kullanılarak boşluk oranı değerleri hesaplanmıştır. Ardından hesaplanan boşluk oranları ile bu boşluk oranlarına sahip zemin örnekleri kullanılarak yapılan sabit seviyeli permeabilite deneyleri sonucunda elde edilen permeabilite değerleri Tablo 7.26'da verilmiştir. Beklendiği gibi boşluk oranının artması ile permeabilite katsayılarının da genel olarak arttığı gözlenmiştir.

Tablo 7.26. SP-4 türü kum örneği için boşluk oranı-sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda elde edile permeabilite katsayısı değerleri

	Boşluk Oranı	Permeabilite Katsayısı (cm.sn^{-1})
Deney-1	0,450	0,0433
Deney-2	0,384	0,0328
Deney-3	0,435	0,0264
Deney-4	0,408	0,0648
Deney-5	0,379	0,0213

Klasik yöntemlerden ikincisi ise Chapuis tarafından geliştirilen ve Denklem (4.28)'de verilen eşitlik yardımıyla permeabilite katsayılarının hesaplanmasıdır. Bu eşitliğe göre zeminin boşluk oranı bilinirse permeabilite katsayısı kolayca bulunabilir.

Bu amaçla daha önce kompaksiyon kalıplarına yerleştirilmiş ve bölüm 6’da ayrıntılı olarak sonuçları verilen 11 kompaksiyon deney örneği ve 5 farklı su içeriğinde hazırlanmış permeabilite örneklerinin boşluk oranları ve bu boşluk oranlarına karşılık gelen permeabilite değerleri Denklem (4.28) kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen boşluk oranı ve permeabilite değerleri Tablo 7.27’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde en küçük boşluk oranı 0,379, en yüksek boşluk oranı değeri ise 0,673, en küçük permeabilite katsayısı değeri 0,0213 $cm.sn^{-1}$ en yüksek permeabilite katsayısı değeri ise 0,0648 $cm.sn^{-1}$ olarak bulunmuştur.

Tablo 7.27. SP-4 türü kum örneği için Chapuis (2004) Denklemi ile hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doygunluk (%)	Permeabilite Kat. ($cm.sn^{-1}$)
Permeabilite Deney-1	0,450	100	0,0054
Permeabilite Deney-2	0,384	100	0,0039
Permeabilite Deney-3	0,435	100	0,0051
Permeabilite Deney-4	0,408	100	0,0044
Permeabilite Deney-5	0,379	100	0,0038
Kompaksiyon Deney-1	0,617	1	0,0104
Kompaksiyon Deney-2	0,661	9	0,0120
Kompaksiyon Deney-3	0,673	19	0,0125
Kompaksiyon Deney-4	0,574	31	0,0090
Kompaksiyon Deney-5	0,562	47	0,0086
Kompaksiyon Deney-6	0,533	53	0,0077
Kompaksiyon Deney-7	0,562	11	0,0086
Kompaksiyon Deney-8	0,550	24	0,0082
Kompaksiyon Deney-9	0,490	31	0,0065
Kompaksiyon Deney-10	0,450	57	0,0054
Kompaksiyon Deney-11	0,507	75	0,0070

Denklem (4.28)'e göre permeabilite katsayısı hesaplandığında zeminin suya doymun olması veya olmamasının permeabilite katsayısını etkilemediği belirtilmiştir. Tablo 7.27'den de görüldüğü üzere permeabilite katsayısı suya doymunluktan bağımsız olarak boşluk oranına göre hesaplanmıştır. Boşluk oranının artmasıyla beklendiği gibi geçirgenlikte artmıştır.

7.7.2. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması

Klasik yöntemlerle permeabilite katsayısı için ölçümler alınırken eş zamanlı olarak elektriksel akım karakteristikleri de belirlenmiş ve bu ölçüm sonuçları kullanılarak da permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Kozeny-Carman (1992) tarafından geliştirilen eşitlik elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak tekrar düzenlenmiş ve bu eşitlik daha önce Denklem (4.27)'de verilmiştir..

Tablo 7.28. SP-4 türü kum örneği için özgül yüzey alanı hesabı

Elek Açıklığı (mm)	Geçen (%)	Fark (X)	$S=6/(d*\rho_s)$ (m ² /kg)	S_o (X*S)
4,760	99,57	0,0043	0,48	0,00
4,000	97,36	0,0222	0,57	0,01
2,360	77,98	0,1938	0,96	0,19
2,000	69,34	0,0864	1,13	0,10
1,000	42,52	0,2681	2,26	0,61
0,425	23,81	0,1872	5,33	1,00
0,250	19,18	0,0463	9,06	0,42
0,125	12,74	0,0644	18,11	1,17
0,074	9,72	0,0302	30,60	0,92
0,015	0,00	0,0972	150,94	14,66
			ΣS	19,08

TDR ölçümleri sonucunda elde edilen yansıma formları analiz edilerek zeminin elektriksel akım karakteristikleri belirlenmiştir. Bu eşitliğe göre permeabilite katsayısının hesaplanabilmesi için elektriksel akım karakteristiklerinin yanında zeminin özgül yüzey alanının da bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla daha önce yapılan elek analizi sonuçları kullanılarak zemin örneğine ait özgül yüzey alanı değeri hesaplanmıştır. Özgül yüzey alanı için yapılan hesaplamalar Tablo 7.28'de verilmiştir

Tablo 7.29. SP-4 türü kum örneği için Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doygunluk (%)	Permeabilite Kat. ($cm.sn^{-1}$)
Permeabilite Deney-1	0,450	100	0,0099
Permeabilite Deney-2	0,384	100	0,0073
Permeabilite Deney-3	0,435	100	0,0121
Permeabilite Deney-4	0,408	100	0,0115
Permeabilite Deney-5	0,379	100	0,0099
Kompaksiyon Deney-1	0,617	1	0,0001
Kompaksiyon Deney-2	0,661	9	0,0001
Kompaksiyon Deney-3	0,673	19	0,0006
Kompaksiyon Deney-4	0,574	31	0,0019
Kompaksiyon Deney-5	0,562	47	0,0049
Kompaksiyon Deney-6	0,533	53	0,0080
Kompaksiyon Deney-7	0,562	11	0,0001
Kompaksiyon Deney-8	0,550	24	0,0008
Kompaksiyon Deney-9	0,490	31	0,0014
Kompaksiyon Deney-10	0,450	57	0,0048
Kompaksiyon Deney-11	0,507	75	0,0150

Permeabilite katsayısı Denklem (4.27)'de verilen Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Bu eşitliğe göre gerekli olan zeminin elektriksel iletkenliği ve zemin içinde bulunan suyun elektriksel iletkenliği TDR yansıma formu kullanılarak bulunmuştur. Bu bilgiler ışığında hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri Tablo 7.29'da verilmiştir.

Kozeny-Carman eşitliği yardımıyla hesaplanan ve Tablo 7.29'da verilen permeabilite katsayısı değerleri incelendiğinde zeminin suya doygunluğunun değişmesiyle permeabilite katsayısında büyük değişimler meydana geldiği açık olarak görülmektedir. Kozeny-Carman'ın eşitliğine göre zeminin doygunluğu arttığı zaman klasik yöntemlerle elde edilen permeabilite katsayısı değerlerine daha çok yaklaştığı görülmektedir. Tüm permeabilite değerleri birbirleriyle karşılaştırılarak daha ayrıntılı olarak bu bölümün ilerleyen sayfalarında incelenecektir.

7.7.3. Chapuis eşitliği kullanılarak permeabilite katsayılarının hesaplanması

Chapuis (2004) eşitliği elektriksel akım karakteristikleri ile düzenlenerek iki farklı eşitlik türetilmiş ve Bölüm 4'te bu işlem ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bu eşitliklerden ilki sadece suya doygun zemin örneklerinden alınan TDR ölçümlerinde geçerli olduğu, ikinci eşitliğin ise zeminin suya doygunluğundan bağımsız olarak kullanılabilmesi hatırlanmalıdır. Bu eşitlikler sırasıyla Denklem (4.40) ve Denklem (4.49)'da verilmiştir. Tez kapsamında yapılan deneylerde sadece permeabilite deneyi yapılacak örnekler suya doygun hale getirilmiştir. Bu nedenle Denklem (4.40)'da verilen eşitlik SP-4 örneği için yapılan 5 permeabilite deneyi için geçerliliğini korumaktadır.

TDR yansıma formu sabit seviyeli permeabilite deneyi tamamlandıktan sonra suya doygun zemin örneğinden alınan TDR ölçümleri sonucunda elde edilmiştir. Bu dalga formu işlenerek zeminlere ait dielektrik katsayıları ve dielektrik katsayılarına bağlı olarak da permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri Tablo 7.29'da verilmiştir

Tablo 7.30. %100 suya doymun SP-4 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doymunluk (%)	Permeabilite Katsayısı ($cm.sn^{-1}$)
Deney-1	0,450	100	0,0055
Deney-2	0,384	100	0,0039
Deney-3	0,435	100	0,0051
Deney-4	0,408	100	0,0045
Deney-5	0,379	100	0,0038

Farklı su içeriklerinde hazırlanan 11 adet SP-4 türü kum örneği kompaksiyon kalıplarına sıkıştırılmış ve sıkıştırılma işlemi sonrasında TDR okumaları alınmıştır.

Tablo 7.31. SP-4 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

	Boşluk Oranı	Doymunluk (%)	Permeabilite Kat. ($cm.sn^{-1}$)
Kompaksiyon Deney-1	0,617	1	0,0136
Kompaksiyon Deney-2	0,661	9	0,0086
Kompaksiyon Deney-3	0,673	19	0,0119
Kompaksiyon Deney-4	0,574	31	0,0084
Kompaksiyon Deney-5	0,562	47	0,0064
Kompaksiyon Deney-6	0,533	53	0,0058
Kompaksiyon Deney-7	0,562	11	0,0075
Kompaksiyon Deney-8	0,550	24	0,0112
Kompaksiyon Deney-9	0,490	31	0,0057
Kompaksiyon Deney-10	0,450	57	0,0065
Kompaksiyon Deney-11	0,507	75	0,0109

TDR okumaları sonrasında elde edilen yansıma formları kullanılarak kritik voltaj adımları bulunmuş ve Denklem (4.49) kullanılarak permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan permeabilite katsayıları Tablo 7.31’de verilmiştir.

Tablo 7.31’de verilen değerler incelendiğinde en küçük permeabilite katsayısı değerinin Kompaksiyon Deney-9, en büyük permeabilite katsayısı değerinin ise Kompaksiyon Deney-3 örneğinde olduğu görülmektedir ve bu değerler sırasıyla $0,0057 \text{ cm.sn}^{-1}$ ve $0,0119 \text{ cm.sn}^{-1}$ olarak bulunmuştur.

7.8. SP-4 Örneği İçin Genel Değerlendirme

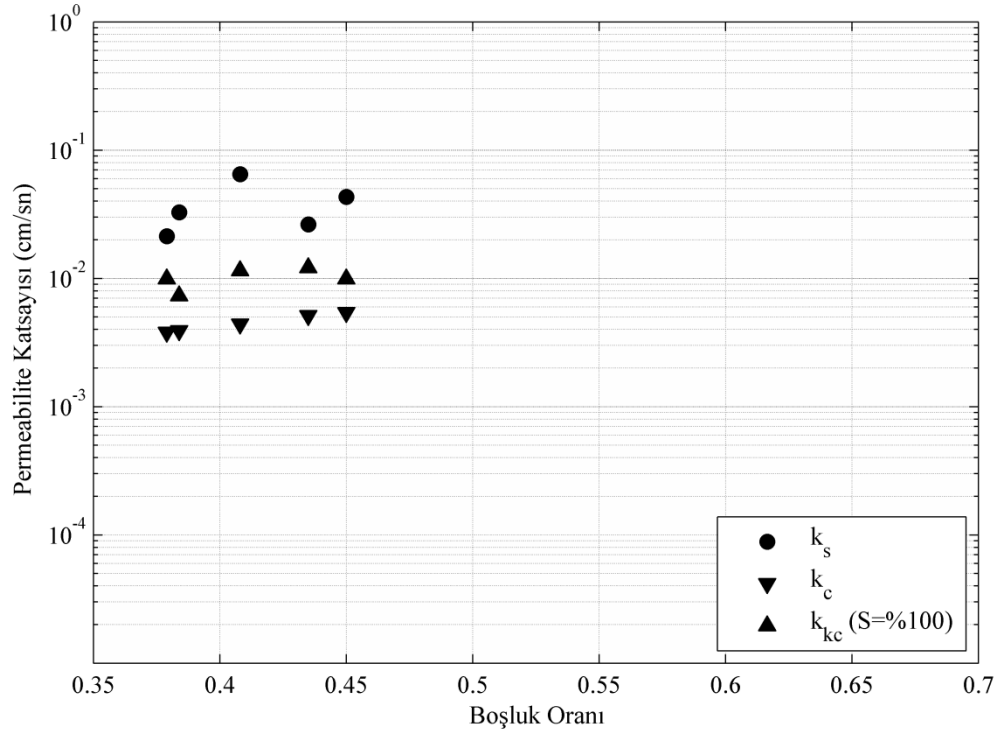
Referans olarak kabul ettiğimiz ve klasik olarak adlandırdığımız yöntemler kullanılarak elde edilen permeabilite katsayıları ile elektriksel akım karakteristikleri yardımıyla hesaplanan permeabilite katsayıları birbirleriyle karşılaştırılarak bu bölümde incelenmiştir. Ayrıca boşluk oranı ve doygunluk derecesinin, permeabilite katsayısının hesaplanmasındaki etkisine bakılarak hangi denklemin hangi koşullarda daha iyi uyum gösterdiği irdelenmiştir.

Tablo 7.32’de SP-4 örneği için hesaplanan tüm permeabilite katsayısı değerleri bir arada verilmiştir. Tabloda ilk sütun deney numarasını, ikinci ve üçüncü sütun klasik yöntemle bulunan permeabilite katsayısı değerlerini, üç, dört ve beşinci sütunlar ise elektriksel yöntemler yardımıyla hesaplanan permeabilite katsayısı değerlerini ifade etmektedir. Bu tabloda k_s , sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda elde edilen permeabilite katsayısını, k_c , boşluk oranı ve Chapuis (2004) denklemi kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısını, k_{kc} , elektriksel akım karakteristikleri ve Kozeny-Carman denklemi kullanılarak bulunan permeabilite katsayısını, k_{ctr} , %100 suya doygun zemin örnekleri için dielektrik katsayısı ve Chapuis (2004) denklemi kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısını, k_{ctr} , kritik voltaj adımları ve Chapuis (2004) denklemi kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısı değerlerini göstermektedir.

Tablo 7.32. SP-4 türü kum örneği için hesaplanan tüm permeabilite katsayıları

	Klasik Yöntem		Elektriksel Yöntem		
	$k_s (cm.sn^{-1})$	$k_c (cm.sn^{-1})$	$k_{kc} (cm.sn^{-1})$	$k_{ctdr} (cm.sn^{-1})$	$k_{c1tdr} (cm.sn^{-1})$
Permeabilite Deney-1	0,0433	0,0054	0,0099	0,0055	
Permeabilite Deney-2	0,0328	0,0039	0,0073	0,0039	
Permeabilite Deney-3	0,0264	0,0051	0,0121	0,0051	
Permeabilite Deney-4	0,0648	0,0044	0,0115	0,0045	
Permeabilite Deney-5	0,0213	0,0038	0,0099	0,0038	
Kompaksiyon Deney-1		0,0104	0,0001		0,0136
Kompaksiyon Deney-2		0,0120	0,0001		0,0086
Kompaksiyon Deney-3		0,0125	0,0006		0,0119
Kompaksiyon Deney-4		0,0090	0,0019		0,0084
Kompaksiyon Deney-5		0,0086	0,0049		0,0064
Kompaksiyon Deney-6		0,0077	0,0080		0,0058
Kompaksiyon Deney-7		0,0086	0,0001		0,0075
Kompaksiyon Deney-8		0,0082	0,0008		0,0112
Kompaksiyon Deney-9		0,0065	0,0014		0,0057
Kompaksiyon Deney-10		0,0054	0,0048		0,0065
Kompaksiyon Deney-11		0,0070	0,0150		0,0109

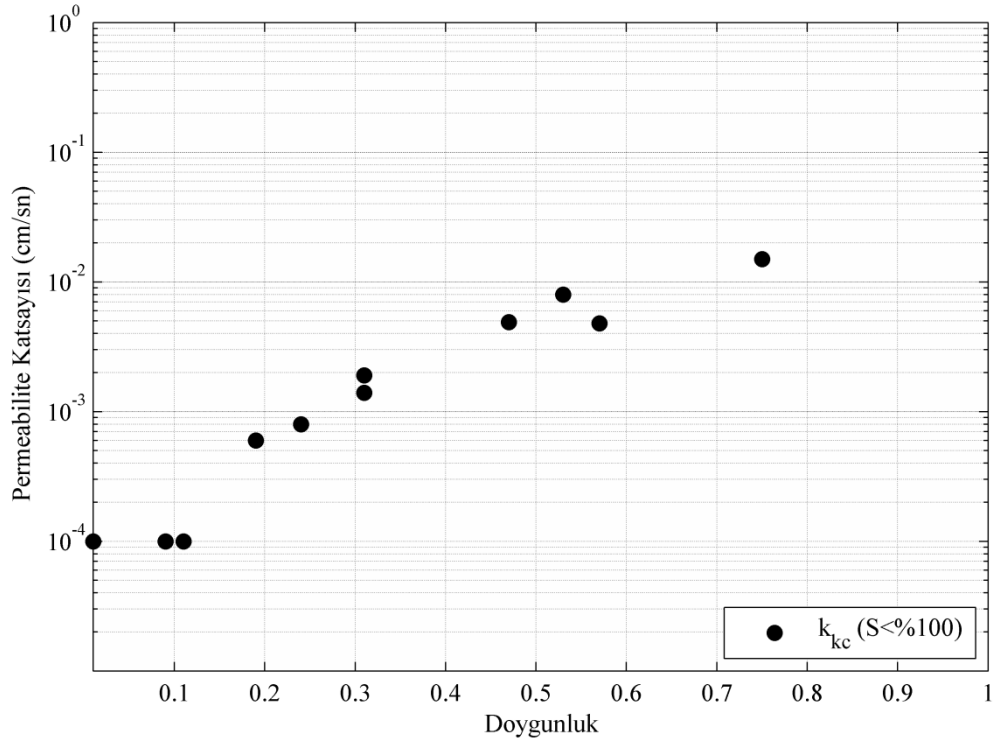
Şekil 7.13’da SP-4 türü kum örneği için klasik yöntemler ile bulunan permeabilite katsayısı değerleri ile Kozeny-Carman eşitliği ve TDR yansıma formu kullanılarak bulunan permeabilite katsayısı değerleri verilmiştir. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları şekilden de görüldüğü üzere %100 suya doymun halde yani sabit seviyeli permeabilite deneyi yapılan örneklerden eş zamanlı olarak alınan TDR ölçümleri yardımıyla bulunan değerleri temsil etmektedir.



Şekil 7.13. SP-4 türü kum örneği için klasik yöntemler ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayıları

Tablo 7.32 ve Şekil 7.13 beraber incelendiğinde doymun halde bulunan örnekler için Kozeny-Carman eşitliği yardımıyla bulunan permeabilite katsayısı değerleri ile sabit seviyeli permeabilite deneyi yardımıyla bulunan permeabilite katsayısı değerlerinin, permeabilite katsayısının büyük aralıklarda değişen bir katsayı olmasından dolayı, birbirlerine yakın değerler aldığı söylenebilir. Bu örnekler arasındaki fark $0,0114 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,0533 \text{ cm.sn}^{-1}$ arasında oluşmaktadır.

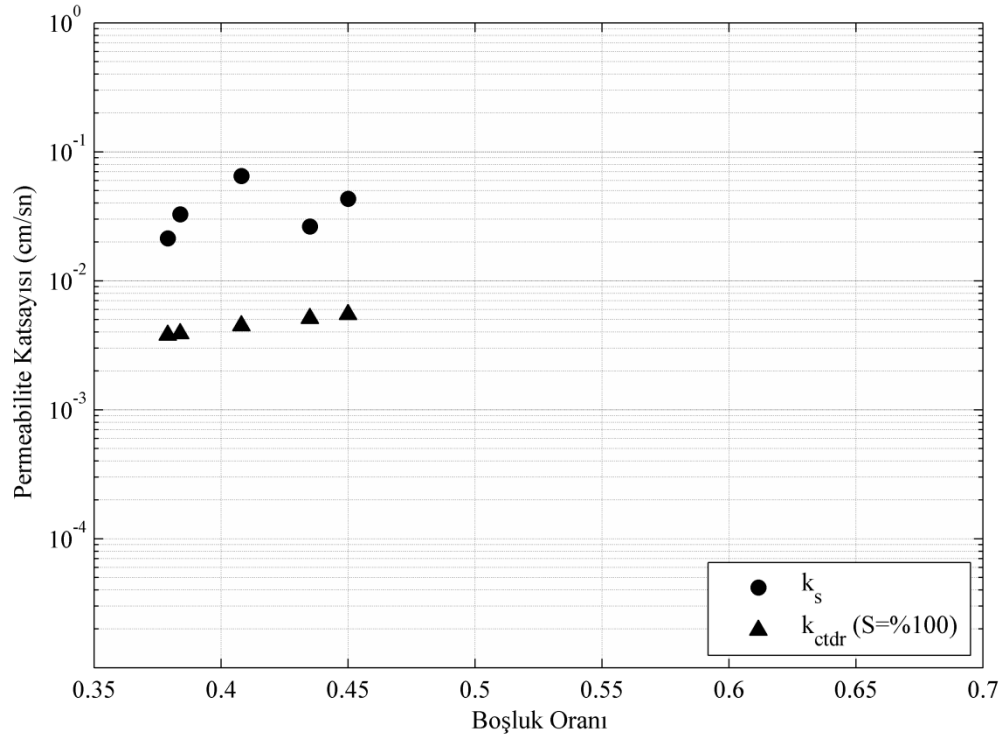
Kozeny-Carman eşitliği yardımıyla bulunan permeabilite katsayısı değerleri ile Chapuis eşitliği ile bulunan permeabilite katsayısı değerleri karşılaştırıldığında yine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu örnekler arasındaki fark ise $0,0175 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,0603 \text{ cm.sn}^{-1}$ arasında oluşmaktadır.



Şekil 7.14. SP-4 türü kum örneği için doyunluk ile Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayılarının karşılaştırılması

Şekil 7.14’de SP-4 türü kum örneği için doyunluk ve Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak bulunan permeabilite katsayısı değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kozeny-Carman eşitliği kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları doyunluğun %100’den küçük olduğu durumda yani kompaksiyon örneklerinden alınan TDR ölçümleri vasıtasıyla bulunan değerleri temsil etmektedir.

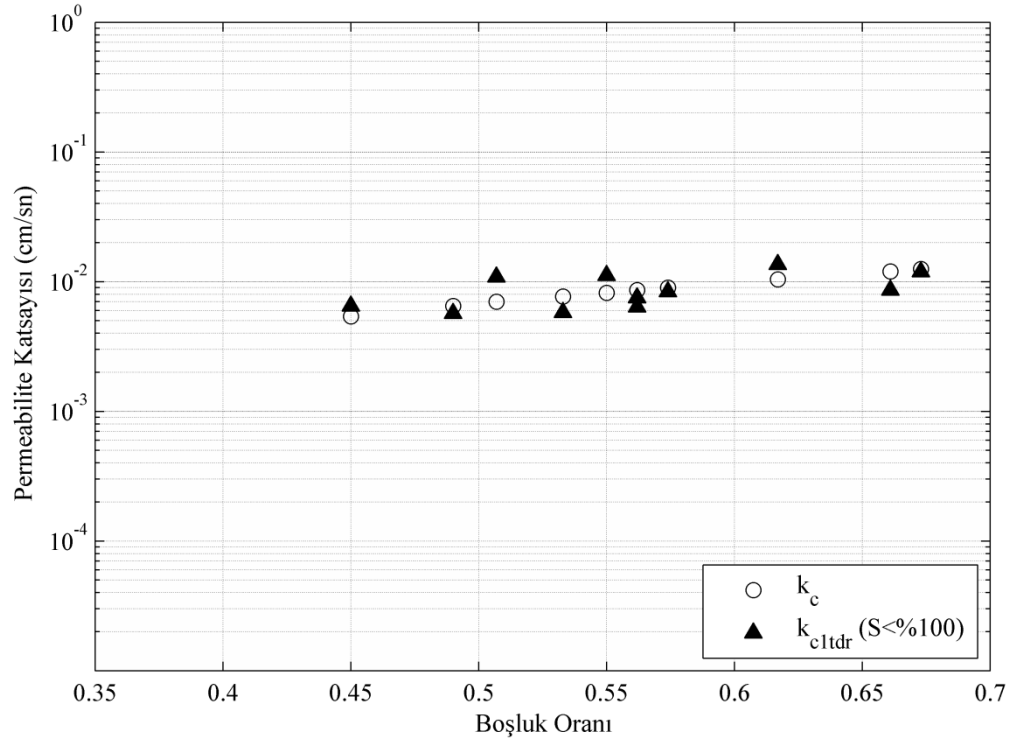
Suya doygun olmayan örnekler incelendiğinde ise doyunluğun artmasıyla beklenildiği gibi doygun durumda hesaplanan permeabilite katsayısına yakın değerler tahmin edildiği görülmektedir. Kozeny-Carman eşitliği TDR yansıma formu ile beraber kullanıldığında özellikle doyunluğun %50’den fazla olduğu durumlarda, doygun durumdaki permeabilite katsayısına daha yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Doygun durumdaki permeabilite katsayısına en uzak değerler ise doyunluğun %30’dan daha küçük olduğu durumlarda meydana gelmektedir.



Şekil 7.15. SP-4 türü kum örneği için sabit seviyeli permeabilite deneyi ve TDR yansıma formu kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayıları

Suya doymuş örnekler için Chapuis eşitliği ve elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri ile sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucunda bulunan permeabilite katsayısı değerleri Şekil 7.15’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri incelendiğinde permeabilite katsayısı değerlerindeki farkların $0,0034 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,0071 \text{ cm.sn}^{-1}$ aralığında değiştiği görülmektedir.

Suya doymuş olmayan zemin örnekleri içinde permeabilite katsayısı değerleri Chapuis eşitliği kullanılarak hem klasik hem de elektriksel yöntemlerle hesaplanmış ve Şekil 7.16’da verilmiştir. Chapuis eşitliği yardımıyla bulunan permeabilite katsayıları boşluk oranının doymuş ve doymuş olmayan durumlarda değişmemesinden dolayı doymuş durumdaki permeabilite katsayısını temsil etmektedir.



Şekil 7.16. SP-4 türü kum örneği için Chapuis eşitliği ve TDR yansımaya formu kullanılarak hesaplanan permeabilite değerleri

Şekilden de görüleceği gibi Chapuis eşitliği kullanılarak gerek klasik yöntemle gerekse elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak bulunan permeabilite katsayısı değerlerinin birbirine oldukça yakın değerler aldığı görülmektedir. Klasik ve elektriksel yöntemler kullanılarak hesaplanan permeabilite katsayısı değerleri arasında oluşan fark $0,0006 \text{ cm.sn}^{-1}$ ile $0,0039 \text{ cm.sn}^{-1}$ aralığında oluşmuştur. Bu farktan da görüldüğü gibi elektriksel akım karakteristikleri kullanılarak türetilen eşitlik, permeabilite katsayısının bulunması açısından oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Permeabilite katsayısının belirlenebilmesi amacıyla TDR yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla laboratuvarında hazırlanan zemin örnekleri üzerinde sabit seviyeli permeabilite deneyleri ve eş zamanlı olarak TDR ölçümleri alınmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda TDR yöntemi ile permeabilite katsayısının hızlı bir şekilde bulunabileceği görülmüştür. Yöntemin en önemli avantajlarından biri hızlı ve tekrarlanabilirliğinin kolay olmasıdır.

TDR yönteminin bir diğer avantajı ise permeabilite katsayısının arazi koşullarında belirlenmesinde alışlagelmiş kuyu deneyleri yerine kullanılacak olmasıdır. Bilindiği gibi kuyu deneyleri uygulanması oldukça zor ve maliyet gerektiren deneylerdir. TDR yöntemi ise kuyu deneylerine oranla daha kolay ve daha az maliyet gerektirmektedir.

Sondaj çalışmaları sırasında geliştirilebilecek bir aparat (TDR probu) yardımıyla sondaj çalışması süresince istenilen tabakalarda ölçümler alınarak permeabilite katsayısının arazide belirlenmesi mümkün olacaktır. Özellikle kum oranı yüksek zeminlerde sondaj örneği almanın zorluğu düşünüldüğünde yöntemin bu amaçla kullanılması faydalı olabilecektir.

TDR yöntemi permeabilite katsayısının bulunmasının yanında su içeriği ve kuru yoğunluğun bulunması konusunda da kullanılabilmesi tez kapsamında deneysel olarak gösterilmiştir. Zamanın paraya eşit olduğu günümüz şartlarında hızlı ve doğru sonuç veren yöntemler öne çıkmaktadır. Dolgu kontrolü işlemlerinde, su içeriği ve kuru yoğunluğun hızlı bir şekilde belirlenmesi yapılan projenin hızlı bir şekilde sonlandırılması anlamına gelecektir. Bu amaçla uzun yıllardır nükleer yöntemler öne çıkmaktadır. Nükleer yöntemler kalibrasyonları doğru yapıldığı takdirde oldukça iyi sonuçlar vermesine rağmen insan sağlığı açısından bazı dezavantajları vardır. Son yıllarda TDR yöntemi ülkemizde olmasa bile yurtdışında su içeriği ve kuru yoğunluğun bulunması amacıyla sıklıkla kullanılmaya başlamıştır. Nükleer yöntem

göre en büyük avantajı ise daha güvenilir bir yöntem olmasıdır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneyler sonucundan TDR yönteminin hızlı ve doğru sonuç vermesi açısından dolgu kontrollerinde nükleer yöntem alternatif olarak kullanılması önerilmektedir.

Tez kapsamında sadece kum türü zemin örnekleri kullanılmıştır. TDR yöntemi kullanılarak permeabilite katsayısının belirlenmesi oldukça karmaşık ve klasik zemin mekaniğine uzaktır. Bu çalışmanın ileride konuyla ilgili yapılacak çalışmalara ışık tutması ve kaynak olması beklenmektedir.

Bilindiği gibi doğada sadece kum içeren zeminler bulunmamaktadır. Özellikle içeriğinde kil bulunan zeminlerin permeabilite katsayısının belirlenmesi kum içeren zeminlerin permeabilite katsayısının belirlenmesine oranla daha uzun zaman almaktadır. TDR yöntemi zemin içerisindeki kil miktarından önemli ölçüde etkilenmektedir. İlerleyen yıllarda bu konunun üzerine gidilmesi kuvvetle önerilmektedir.

TDR yönteminin hızlı ve tekrarlanabilir olması, yöntemin en büyük avantajıdır. Bu avantaj istenilen bölgelerde yapılacak bir dizi ölçümler ve bu ölçümleri destekleyecek yapay sinir ağları kullanılarak bölgesel geçirgenlik haritalarının çıkarılması için kullanılabilir.

Zeminin belirlenmesi en zor parametrelerinden bir başkası da özgül yüzey alanıdır. TDR yöntemi ve özgül ağırlık deneyleri yapılarak TDR dalga formuyla özgül ağırlık arasında bir ilişki kurulabilecektir. Geçmişte yapılan çalışmalar incelendiğinde bu konuda yapılmış bazı çalışmalar olsa da tam olarak sonuçlandırılmamıştır. Bu konuda çalışmalar yapılarak bu ilişkinin geliştirilmesi potansiyel çalışma olarak önerilmektedir.

TDR yöntemini kullanarak permeabilite katsayısının belirlenebilmesi için TDR dalga formundan elde edilecek parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin belirlenebilmesi amacıyla bir paket programın geliştirilmesi ve son kullanıcının kullanabileceği basitliğe indirgenmesi permeabilite katsayısının belirlenmesi aşamasında önemli bir katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

9. KAYNAKLAR

Agilent Technologies, Time domain reflectometry theory, Application Note 1304-2, *Agilent Technologies*, 5301 Stevens Creek Blvd Santa Clara, CA 95051, USA, 2006.

Alharthi A., Lange J., Soil water saturation : dielectric determination, *Water Resources Research*, 1987, **23**(4), 591-595.

Archie G. E., The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Petroleum Transactions of AIME*, 1942, **146**, 54-62.

Arsoy S., Keskin E., Özgür M., Yılmaz C., TDR yöntemiyle zemin su içeriği belirleme yaklaşımlarının irdelenmesi, *3.Geoteknik Sempozyumu*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Adana, 3-4 Aralık 2009.

Arsoy S., Özgür M., Keskin E., Yılmaz C., Enhacing TDR based water content measurements by ANN in sandy soils, *Geoderma*, 2013, **195-196**, 133-144.

ASTM D 4253, Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 2006.

ASTM D 4254, Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 2006.

ASTM D 6780-05, Standard test method for water content and density of soil in place by time domain reflectometry (TDR), *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 2005.

Baker J. M., Allmaras R. R., System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time domain reflectometry, *Soil Science Society of America Journal*, 1990, **54**, 1-6.

Birchak J. R., Gardner D. G., Hipp J. E., Victor J. M., High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture, *Proceedings of the IEEE*, 1974, **62**, 93-98.

Blonquist J., Jones S., Robinson D., Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors: part 2 evaluation of seven sensing systems, *Vadose Zone Journal*, 2005, **4**, 1059-1069.

BS 1377-3, Methods of test for soils for çivil engineerin purposes chemical and electro cemical tests, *British Standard*, England, 1990.

- Campbell J., Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz, *Soil Science Society of America Journal*, 1990, **54**, 332-341.
- Campbell G., Anderson R., Evaluation of simple transmission line oscillators for soil moisture measurement, *Computer Electronic Agriculture*, 1988, **20**, 26-32.
- Cerny R., Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: a review, *Measurement*, 2009, **42**, 329-336.
- Chapuis R. P., Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio, *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, **41**, 787-795.
- Chapuis R. P., Legare P. P., A simple method for determining the surface area of fine aggregates and fillers in bituminous mixtures in effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance, *American Society for Testing Material*, 1992, **1147**, 177-186.
- Chung C. C., Improved dielectric characterization of soil using time domain reflectometry, Research Proposal, National Chiao Tung University, Taiwan, 2005.
- Corwin D. L., Lesch S. M., Oster J. D., Kaffka S. R., Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity, *Geoderma*, 2006, **131**, 369-387.
- Curtis J. O., Moisture effects on the dielectric properties of soil, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2001, **39**, 125-128.
- Czarnomski N., Moore G., Pypker T., Licata J., Bond B., Precision and accuracy of three alternative instruments for measuring soil water content in two forest soils of the Pacific Northwest, *Canadian Journal of Forestry Research*, 2005, **35**, 1867-1876.
- Dalton F. N., Herkelrath W. N., Rawlins D. S., Rhoades J. D., Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe, *Science*, 1984, **224**, 989-990
- Dasberg S., Dalton F. N., Field measurement of soil water content and bulk electrical conductivity with time domain reflectometry, *Soil Science Society America Journal*, 1985, **49**, 293-297.
- Davis J. L., Annan A. P., Electromagnetic detection of soil moisture: progress report I, *Canadian Journal Remote Sens.*, 1977, **3**, 76-86.
- Dirksen C., Dasberg S., Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements, *Soil Science Society America Journal*, 1993, **57**, 660-667.
- Dobson M. C., Ulaby F. T., Hallikainen M. T., El-Rayes M. A., Microwave dielectric behavior of wet soil—part II: dielectric mixing models. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, **23**(1), 35–46.

- Diefenderfer B. K., Moisture content determination and temperature profile modeling of flexible pavement structures, PhD. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2002.
- Fellner-Feldegg H., The measurement of dielectrics in the time domain, *J. Phys. Chem.*, 1969, **73**, 616-623.
- Ferre P. A., Rudolph D. L., Kachanoski R. G., Spatial averaging of water content by time domain reflectometry; implications for twin rod probes with and without dielectric coatings, *Water Resources Research*, 1996, **32**, 271-279.
- Giese K., Tiemann R., Determination of the complex permittivity from thin-sample time domain reflectometry improved analysis of the step response waveform, *Advances Molecular Relaxation Processes*, 1975, **7**, 45-59.
- Hartebrodt M., Kabitzsch K., Fault detection in fieldbuses with time domain reflectometry, *7th AFRICON Conference in Africa*, Botswana, 15-17 September 2004.
- Heimovaara T. J., Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms: 1. measurement of the complex dielectric permittivity of soils, *Water Resources Research*, 1994, **30**(2), 189-199.
- Hilhorst M. A., A pore water conductivity sensor, *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**, 1922-1925.
- Hilhorst M. A., Dirksen F. W., Kampers F. W., Feddes R. A., New dielectric mixture equation for porous materials based on depolarization factors. *Soil Science Society America Journal*, 2000, **64**, 1581-1587.
- Hook W. R., Livingston N. J., Sun Z. J., Hook P. B., Remote diode shorting improves measurement of soil water by time domain reflectometry, *Soil Science Society America Journal*, 1992, **56**, 1384-1391.
- Jones S. B., Wraith J. M., Or D., Time domain reflectometry measurement principles and applications, *Hydrological Processes*, 2002, **16**, 141-153.
- Jung S., Drnevich V. P., Abou Najm M. R., New methodology for density and water content by time domain reflectometry, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, **139**(5), 659-670.
- Kim K., Benson C., Water content calibrations for final cover soils, Geo Engineering Report 02-12, Geo Engineering Program, University of Wisconsin-Madison, 2002
- Krauss J. D., *Electromagnetics*, McGraw-Hill, New York, 1984.
- Kutilek M., Nielsen D. R., Soil hydrology, Catena Verlag Cremlingen Destedt, Germany, 1994.

- Ledieu J. P., Ridder De., Dautrebande A., A method for measuring soil moisture content by time domain reflectometry, *Journal of Hydrology*, 1986, **88**, 319-328.
- Lin C., Siddiqui S. I., Feng W., Drnevich V. P., Deschamp R., Quality control of earth fills using time domain reflectometry (TDR), *Constructing and Controlling Compaction of Earth Fills, ASTM 1384*, West Conshohocken, 2000.
- Lin M. W., Thaduri J., Structural damage detection using an embedded etdr distributed strain sensor, *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 2005, **6**, 315-336.
- Liu N., Soil and site characterization using electromagnetic waves, PhD. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2007.
- Logsdon S. D., Effect of cable length on time domain reflectometry calibration for high surface area soils, *Soil Science Society America Journal*, 2000, **64**, 54-61.
- Malicki M. A., Plagge R., Roth C. H., Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil, *European Journal of Soil Sciences*, 1996, **47**, 357-366.
- Malicki M. A., Walczak R. T., Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity, *European Journal of Soil Science*, 1999, **50**, 505-514
- McKenzie N. J., Jacquier D. W., Improving the field estimation of saturated hydraulic conductivity in soil survey, *Australian Journal of Soil Research*, 1997, **35**, 803-825.
- Munoz-Carpena R., Regalado C. M., Ritter A., Alvaez-Benedi J., Socorro A. R., Tdr estimation of electrical conductivity and saline solute concentration in a volcanic soil, *Geoderma*, 2005, **124**(3-4), 399-413.
- Mojid M. A., Wyseure G. C. L., Rose D. A., Electrical conductivity problems associated with time domain reflectometry (TDR) measurement in geotechnical engineering, *Geotechnical and Geological Engineering*, 2003, **21**, 243-258.
- Moret-Fernandes D., Lera F., Arrue J. L., Lopez M. V., Measurement of soil bulk electrical conductivity using partially coated tdr probes, *Vadose Zone Journal*, 2009, **8**, 594-600.
- Nadler A., Dasberg S., Lapid I., Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns, *Soil Science Society America Journal*, 1991, **55**, 938-943.
- Patterson D. E., Smith, M. W., The use of time domain reflectometry for the measurement of unfrozen water content in frozen soils, *Cold Regions Science and Technology*, 1980, **3**, 205-210.
- Quinones H., Ruelle P., Nemeth I., Comparison of three calibration procedures for the tdr soil moisture sensors, *Irrigation and Drainage*, 2003, **52**, 203-217.

Rhoades J. D., Schilfgaard J., An electrical conductivity probe for determining soil salinity, *Soil Science Society of America Journal*, 1976, **40**, 647-651.

Rhoades J. D., Determining soil salinity from measurement of electrical conductivity, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1990, **21**, 861-901.

Roth C. H., Malicki M. A., Plagge R., Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR, *Journal of Soil Science*, 1992, **43**, 1-13.

Sallam A. M., White N. K., Ashmawy A. K., Evaluation of the purdue tdr method for soil water content and density measurement, *Final Report to the Florida Department of Transportation*, BC-353-30. 2004.

Seyfried M., Murdock M., Response of a new soil water sensor to variable soil water content and temperature, *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**, 28-34.

Siddiqui S. I., Drnevich V. P., Use of time domain reflectometry for determination of water content and density of soil, *Purdue University*, FHWA/IN.JHRP-95-9, 63-93, 1995.

Taylor D. W., *Fundamentals of soil mechanics*, Wiley, New York, 1948.

TS 1500, İnşaat mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2000.

TS 1900-1, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri bölüm:1 fiziksel özelliklerin tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2006.

Topp G. C., Davis J. L., Annan A. P., Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, *Water Resource Research*, 1980, **16**, 574-582.

Topp G. C., Davis J. L., Annan A. P., Electromagnetic determination of soil water content using TDR: II. evaluation of installation and configuration of paralel transmission lines, *Soil Science Society of America Journal*, 1982, **3**, 107-127.

Topp G. C., Yanuka M., Zebchuk W. D., Zegelin S., Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry : soil and water experiments in coaxial lines, *Water Resources Research*, 1988, **24**(7), 945-952.

Vogeler I., Clothier B. E., Green S. R., Scotter D. R., Tillman R. W., Characterizing water and solute movement by time domain reflectometry and disk permeametry, *Soil Science Society of America Journal*, 1996, **60**, 5-12.

Yanuka M., Topp G. C., Zegelin S., Zebchuk W. D., Multiple reflection and attenuation of time domain reflectometry pulses: theoretical considerations for applications to soil and water, *Water Resources Research*, 1988, **24**, 939-944.

Yu X., Drnevich V. P., Soil water content and dry density by time domain reflectometry, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**, 922-934.

Yu C., Warrick A., Conklin M., Young M., Zreda M., Two and three parameter calibrations of time domain reflectometry for soil moisture measurement, *Water Resources Research*, 1997, **33**(10), 2417-2421.

Zambrano C. E., Soil type identification using time domain reflectometry, Master of science, Purdue University, 2006.

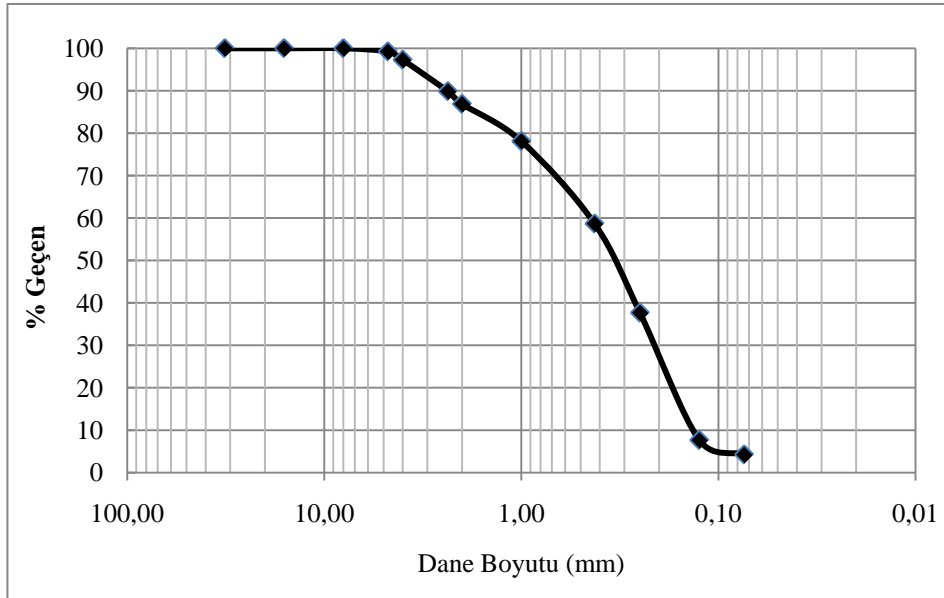
Zegelin S. J., White I., Jenkins D. R., Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurements using time domain reflectometry, *Water Resources Research*, 1989, **25**(11), 2367-2376.

EKLER

EK-A**SP-1 türü kum örneğine ait elek analizi deney verileri-1
ELEK ANALİZİ**

Örnek Adı	SP-1	Toplam Ağırlık,gr	282,29
Standart	TS1900-1	Pan'da Kalan,gr	270,21
Örneğin Tanımı	Kum	İnceler, %	4,28
Eleme Yöntemi	Yıkamalı		

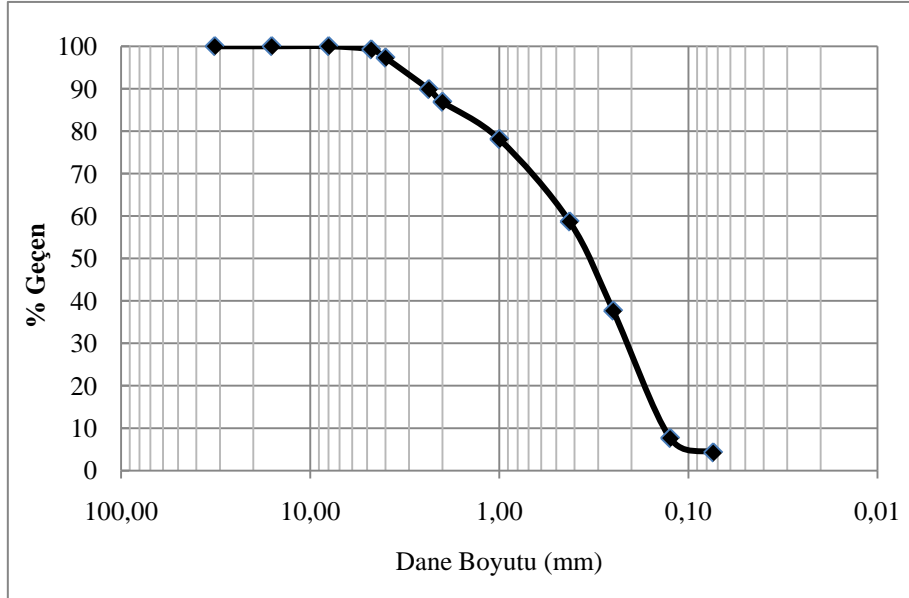
Elek No	Elek Açıklığı	Kalan Ağırlık	% Kalan	% Geçen
1 1/4"	32,000	0,00	0,00	100,00
5/8 "	16,000	0,00	0,00	100,00
5/16 "	8,000	0,00	0,00	100,00
NO 4	4,760	2,15	0,76	99,24
NO 5	4,000	5,52	1,96	97,28
NO 8	2,360	20,92	7,41	89,87
NO 10	2,000	8,44	2,99	86,88
NO 18	1,000	24,74	8,76	78,12
NO 40	0,425	54,85	19,43	58,69
NO 60	0,250	59,29	21,00	37,68
NO 120	0,125	84,71	30,01	7,68
NO 200	0,074	9,59	3,40	4,28
PAN		12,08	4,28	0,00
		282,29		



SP-1 türü kum örneğine ait elek analizi deney verileri-2
ELEK ANALİZİ

Örnek Adı	SP-1	Toplam Ağırlık,gr	294,78
Standart	TS1900-1	Pan'da Kalan,gr	281,4
Örneğin Tanımı	Kum	İnceler, %	4,54
Eleme Yöntemi	Yıkamalı		

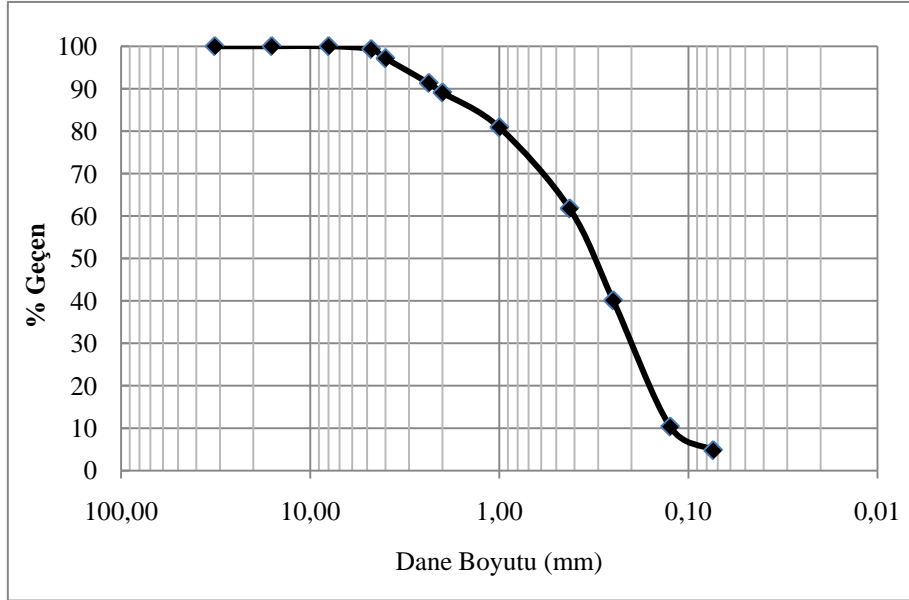
Elek No	Elek Açıklığı	Kalan Ağırlık	% Kalan	% Geçen
1 1/4"	32,000	0,00	0,00	100,00
5/8 "	16,000	0,00	0,00	100,00
5/16 "	8,000	0,00	0,00	100,00
NO 4	4,760	2,09	0,71	99,29
NO 5	4,000	4,68	1,59	97,70
NO 8	2,360	17,52	5,94	91,76
NO 10	2,000	6,79	2,30	89,46
NO 18	1,000	25,21	8,55	80,90
NO 40	0,425	57,62	19,55	61,36
NO 60	0,250	62,01	21,04	40,32
NO 120	0,125	90,12	30,57	9,75
NO 200	0,074	15,36	5,21	4,54
PAN		13,38	4,54	0,00
		294,78		



SP-1 türü kum örneğine ait elek analizi deney verileri-3
ELEK ANALİZİ

Örnek Adı	SP-1	Toplam Ağırlık,gr	341,36
Standart	TS1900-1	Pan'da Kalan,gr	324,95
Örneğin Tanımı	Kum	İnceler, %	4,81
Eleme Yöntemi	Yıkamalı		

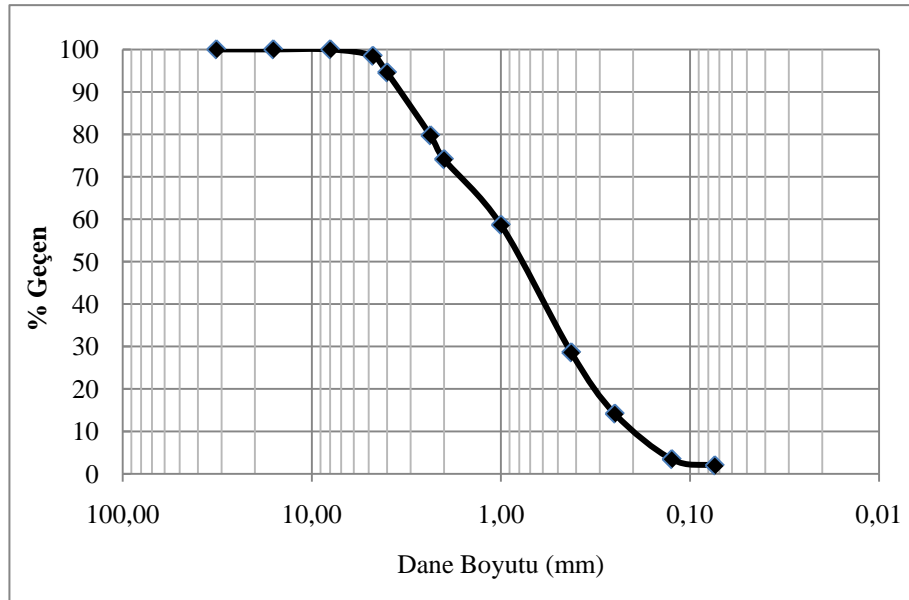
Elek No	Elek Açıklığı	Kalan Ağırlık	% Kalan	% Geçen
1 1/4"	32,000	0,00	0,00	100,00
5/8 "	16,000	0,00	0,00	100,00
5/16 "	8,000	0,00	0,00	100,00
NO 4	4,760	2,38	0,70	99,30
NO 5	4,000	7,38	2,16	97,14
NO 8	2,360	19,85	5,81	91,33
NO 10	2,000	7,66	2,24	89,08
NO 18	1,000	27,98	8,20	80,89
NO 40	0,425	65,25	19,11	61,77
NO 60	0,250	73,91	21,65	40,12
NO 120	0,125	101,55	29,75	10,37
NO 200	0,074	18,99	5,56	4,81
PAN		16,41	4,81	0,00
		341,36		



SP-2 türü kum örneğine ait elek analizi deney verileri-1
ELEK ANALİZİ

Örnek Adı	SP-2	Toplam Ağırlık,gr	331,11
Standart	TS1900-1	Pan'da Kalan,gr	324,66
Örneğin Tanımı	Kum	İnceler, %	1,95
Eleme Yöntemi	Yıkamalı		

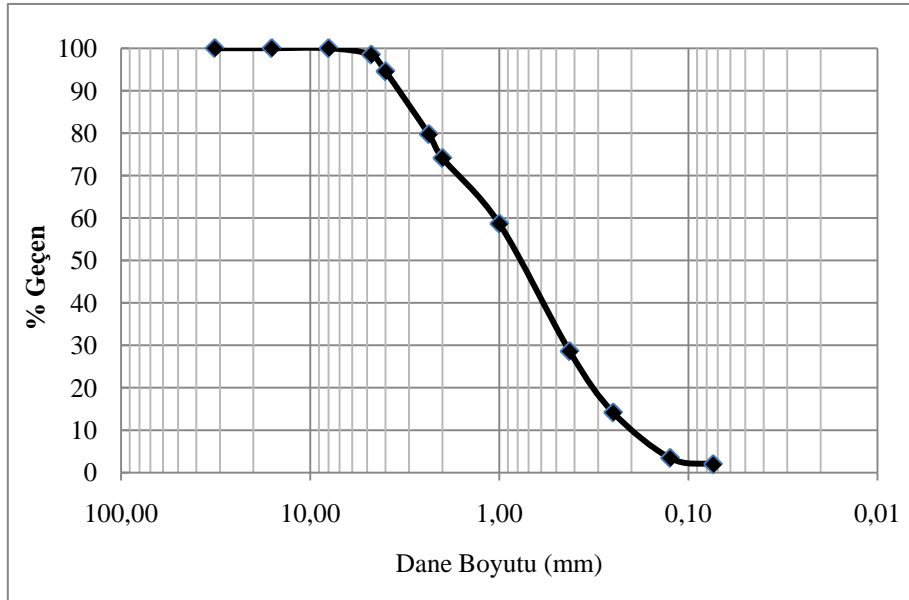
Elek No	Elek Açıklığı	Kalan Ağırlık	% Kalan	% Geçen
1 1/4"	32,000	0,00	0,00	100,00
5/8 "	16,000	0,00	0,00	100,00
5/16 "	8,000	0,00	0,00	100,00
NO 4	4,760	5,07	1,53	98,47
NO 5	4,000	12,96	3,91	94,55
NO 8	2,360	49,06	14,82	79,74
NO 10	2,000	18,61	5,62	74,12
NO 18	1,000	51,20	15,46	58,65
NO 40	0,425	99,55	30,07	28,59
NO 60	0,250	47,82	14,44	14,15
NO 120	0,125	35,51	10,72	3,42
NO 200	0,074	4,88	1,47	1,95
PAN		6,45	1,95	0,00
		331,11		



SP-2 türü kum örneğine ait elek analizi deney verileri-2
ELEK ANALİZİ

Örnek Adı	SP-2	Toplam Ağırlık,gr	343,33
Standart	TS1900-1	Pan'da Kalan,gr	336,97
Örneğin Tanımı	Kum	İnceler, %	1,85
Eleme Yöntemi	Yıkamalı		

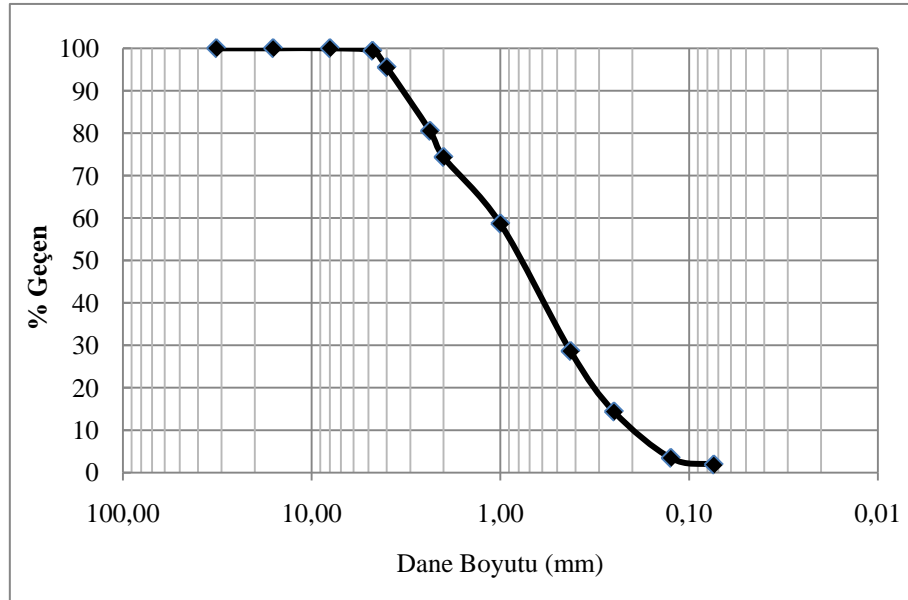
Elek No	Elek Açıklığı	Kalan Ağırlık	% Kalan	% Geçen
1 1/4"	32,000	0,00	0,00	100,00
5/8 "	16,000	0,00	0,00	100,00
5/16 "	8,000	0,00	0,00	100,00
NO 4	4,760	1,12	0,33	99,67
NO 5	4,000	13,02	3,79	95,88
NO 8	2,360	46,80	13,63	82,25
NO 10	2,000	18,43	5,37	76,88
NO 18	1,000	51,47	14,99	61,89
NO 40	0,425	110,78	32,27	29,62
NO 60	0,250	53,52	15,59	14,04
NO 120	0,125	36,60	10,66	3,38
NO 200	0,074	5,23	1,52	1,85
PAN		6,36	1,85	0,00
		343,33		



SP-2 türü kum örneğine ait elek analizi deney verileri-3
ELEK ANALİZİ

Örnek Adı	SP-2	Toplam Ağırlık,gr	286,60
Standart	TS1900-1	Pan'da Kalan,gr	281,18
Örneğin Tanımı	Kum	İnceler, %	1,89
Eleme Yöntemi	Yıkamalı		

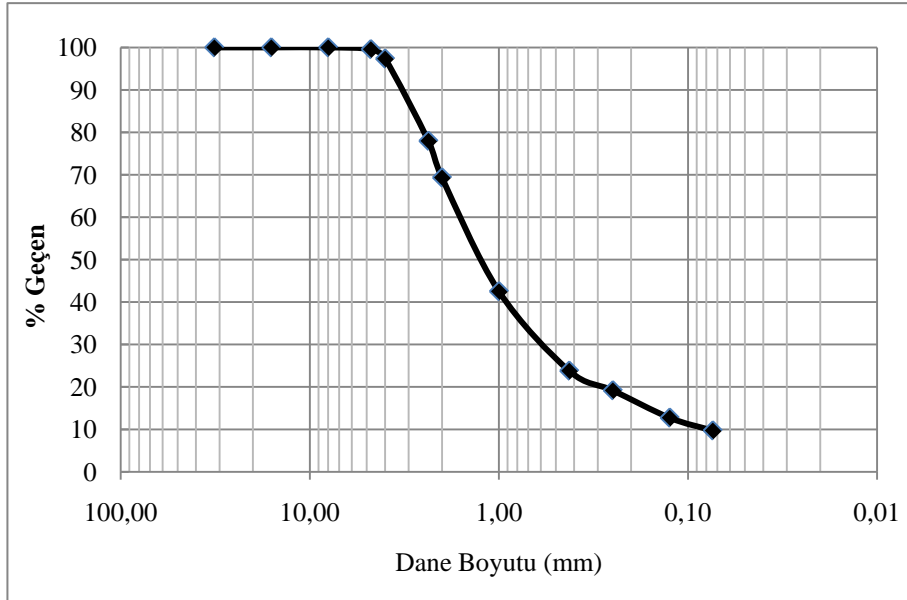
Elek No	Elek Açıklığı	Kalan Ağırlık	% Kalan	% Geçen
1 1/4"	32,000	0,00	0,00	100,00
5/8 "	16,000	0,00	0,00	100,00
5/16 "	8,000	0,00	0,00	100,00
NO 4	4,760	1,76	0,61	99,39
NO 5	4,000	11,11	3,88	95,51
NO 8	2,360	42,96	14,99	80,52
NO 10	2,000	17,68	6,17	74,35
NO 18	1,000	44,92	15,67	58,68
NO 40	0,425	86,08	30,03	28,64
NO 60	0,250	40,86	14,26	14,39
NO 120	0,125	31,32	10,93	3,46
NO 200	0,074	4,49	1,57	1,89
PAN		5,42	1,89	0,00
		286,60		



SP-3 türü kum örneğine ait elek analizi deney verileri-1
ELEK ANALİZİ

Örnek Adı	SP-3	Toplam Ağırlık,gr	300.04
Standart	TS1900-1	Pan'da Kalan,gr	270.89
Örneğin Tanımı	Kum	İnceler, %	9,72
Eleme Yöntemi	Yıkamalı		

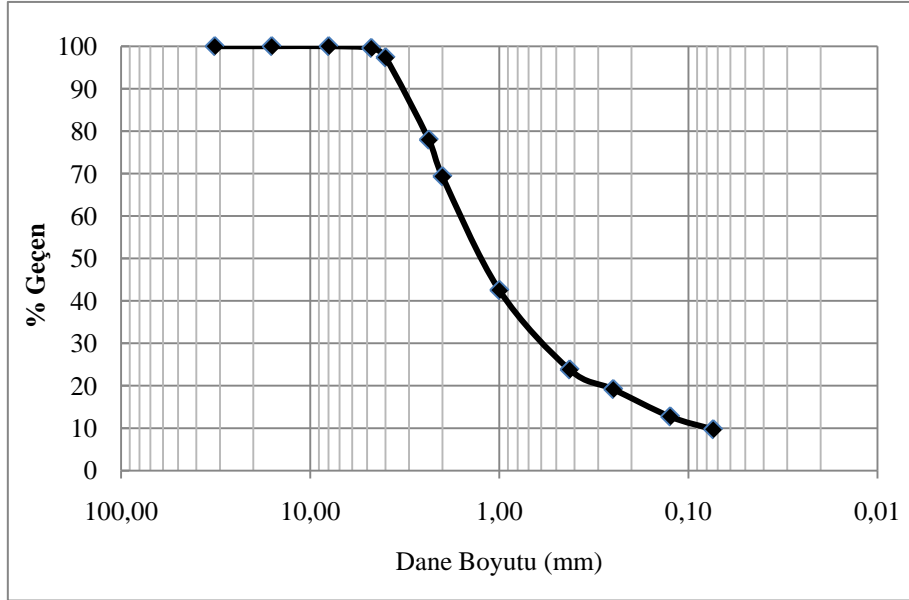
Elek No	Elek Açıklığı	Kalan Ağırlık	% Kalan	% Geçen
1 1/4"	32,000	0.00	0.00	100.00
5/8 "	16,000	0.00	0.00	100.00
5/16 "	8,000	0.00	0.00	100.00
NO 4	4,760	1,28	0.43	99,57
NO 5	4,000	6,65	2,22	97,36
NO 8	2,360	58,15	19,38	77,98
NO 10	2,000	25,92	8,64	69,34
NO 18	1,000	80,45	26,81	42,52
NO 40	0,425	56,16	18,72	23,81
NO 60	0,250	13,88	4,63	19,18
NO 120	0,125	19,33	6,44	12,74
NO 200	0,074	9,07	3,02	9,72
PAN		29,15	9,72	0.00
		300.04		



SP-3 türü kum örneğine ait elek analizi deney verileri-2
ELEK ANALİZİ

Örnek Adı	SP-3	Toplam Ağırlık,gr	345,86
Standart	TS1900-1	Pan'da Kalan,gr	311,92
Örneğin Tanımı	Kum	İnceler, %	9,81
Eleme Yöntemi	Yıkamalı		

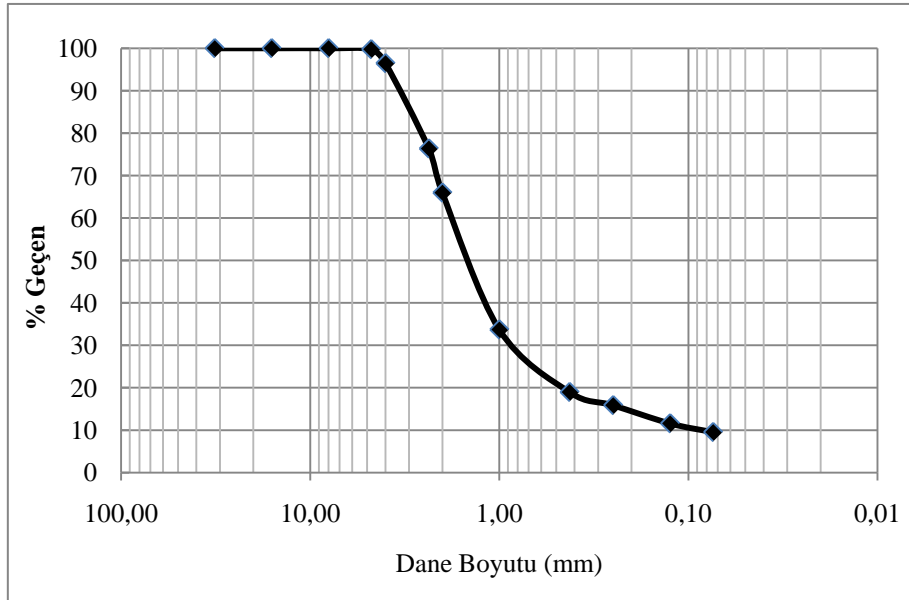
Elek No	Elek Açıklığı	Kalan Ağırlık	% Kalan	% Geçen
1 1/4"	32,000	0,00	0,00	100,00
5/8 "	16,000	0,00	0,00	100,00
5/16 "	8,000	0,00	0,00	100,00
NO 4	4,760	2,28	0,66	99,34
NO 5	4,000	9,01	2,61	96,74
NO 8	2,360	72,08	20,84	75,89
NO 10	2,000	30,04	8,69	67,21
NO 18	1,000	89,99	26,02	41,19
NO 40	0,425	62,08	17,95	23,24
NO 60	0,250	15,73	4,55	18,69
NO 120	0,125	20,62	5,96	12,73
NO 200	0,074	10,09	2,92	9,81
PAN		33,94	9,81	0,00
		345,86		



SP-3 türü kum örneğine ait elek analizi deney verileri-3
ELEK ANALİZİ

Örnek Adı	SP-3	Toplam Ağırlık,gr	279,02
Standart	TS1900-1	Pan'da Kalan,gr	252,44
Örneğin Tanımı	Kum	İnceler, %	9,53
Eleme Yöntemi	Yıkamalı		

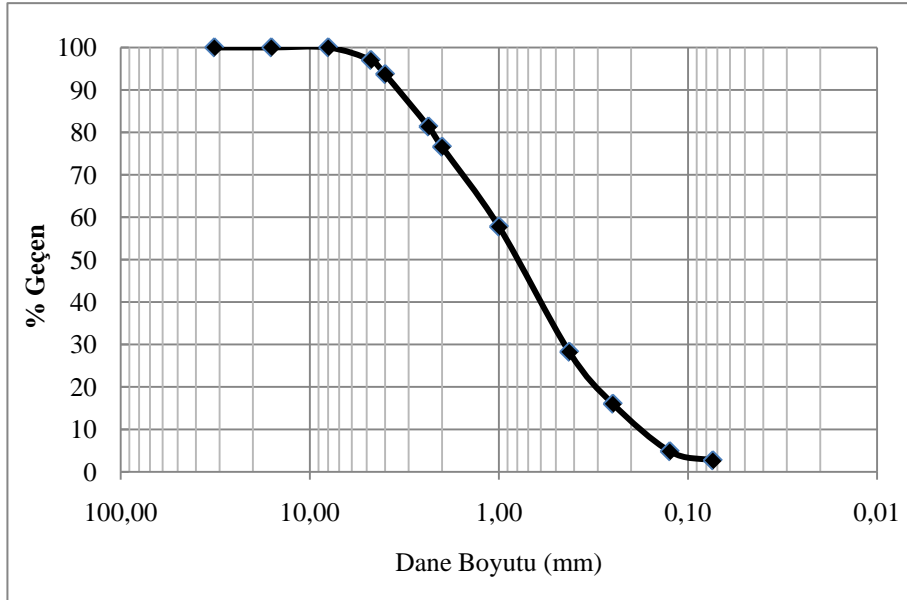
Elek No	Elek Açıklığı	Kalan Ağırlık	% Kalan	% Geçen
1 1/4"	32,000	0.00	0.00	100.00
5/8 "	16,000	0.00	0.00	100.00
5/16 "	8,000	0.00	0.00	100.00
NO 4	4,760	0.67	0.24	99,76
NO 5	4,000	9,21	3,30	96,46
NO 8	2,360	56,08	20,10	76,36
NO 10	2,000	29,01	10,40	65,96
NO 18	1,000	90,02	32,26	33,70
NO 40	0,425	41,12	14,74	18,96
NO 60	0,250	8,65	3,10	15,86
NO 120	0,125	11,95	4,28	11,58
NO 200	0,074	5,73	2,05	9,53
PAN		26,58	9,53	0,00
		279,02		



SP-4 türü kum örneğine ait elek analizi deney verileri-1
ELEK ANALİZİ

Örnek Adı	SP-4	Toplam Ağırlık,gr	346,26
Standart	TS1900-1	Pan'da Kalan,gr	336,98
Örneğin Tanımı	Kum	İnceler, %	2,68
Eleme Yöntemi	Yıkamalı		

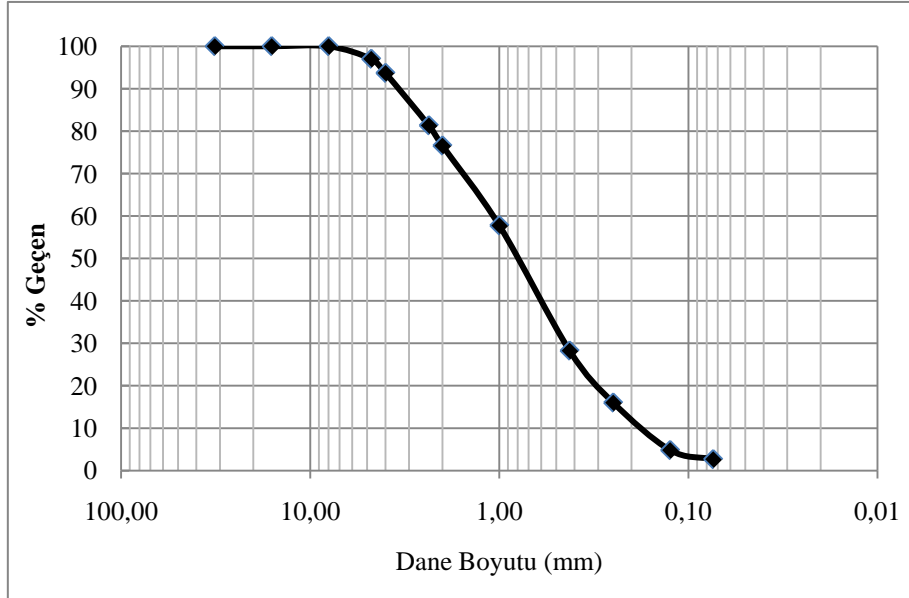
Elek No	Elek Açıklığı	Kalan Ağırlık	% Kalan	% Geçen
1 1/4"	32,000	0,00	0,00	100,00
5/8 "	16,000	0,00	0,00	100,00
5/16 "	8,000	0,00	0,00	100,00
NO 4	4,760	10,31	2,98	97,02
NO 5	4,000	11,54	3,33	93,69
NO 8	2,360	42,73	12,34	81,35
NO 10	2,000	16,51	4,77	76,58
NO 18	1,000	65,14	18,81	57,77
NO 40	0,425	102,16	29,50	28,26
NO 60	0,250	42,41	12,25	16,02
NO 120	0,125	38,75	11,19	4,83
NO 200	0,074	7,43	2,15	2,68
PAN		9,28	2,68	0,00
		346,26		



SP-4 türü kum örneğine ait elek analizi deney verileri-2
ELEK ANALİZİ

Örnek Adı	SP-4	Toplam Ağırlık,gr	307,85
Standart	TS1900-1	Pan'da Kalan,gr	298,43
Örneğin Tanımı	Kum	İnceler, %	3,06
Eleme Yöntemi	Yıkamalı		

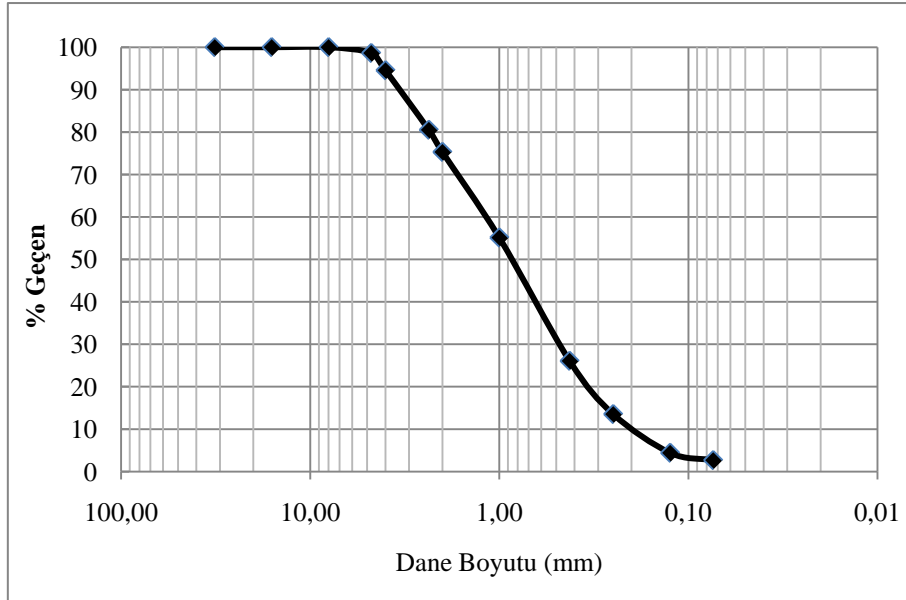
Elek No	Elek Açıklığı	Kalan Ağırlık	% Kalan	% Geçen
1 1/4"	32,000	0,00	0,00	100,00
5/8 "	16,000	0,00	0,00	100,00
5/16 "	8,000	0,00	0,00	100,00
NO 4	4,760	3,53	1,15	98,85
NO 5	4,000	12,82	4,16	94,69
NO 8	2,360	38,51	12,51	82,18
NO 10	2,000	14,62	4,75	77,43
NO 18	1,000	56,98	18,51	58,92
NO 40	0,425	89,23	28,98	29,94
NO 60	0,250	38,50	12,51	17,43
NO 120	0,125	36,82	11,96	5,47
NO 200	0,074	7,42	2,41	3,06
PAN		9,42	3,06	0,00
		307,85		



SP-4 türü kum örneğine ait elek analizi deney verileri-3
ELEK ANALİZİ

Örnek Adı	SP-4	Toplam Ağırlık,gr	356,70
Standart	TS1900-1	Pan'da Kalan,gr	347,16
Örneğin Tanımı	Kum	İnceler, %	2,67
Eleme Yöntemi	Yıkamalı		

Elek No	Elek Açıklığı	Kalan Ağırlık	% Kalan	% Geçen
1 1/4"	32,000	0,00	0,00	100,00
5/8 "	16,000	0,00	0,00	100,00
5/16 "	8,000	0,00	0,00	100,00
NO 4	4,760	4,94	1,38	98,62
NO 5	4,000	14,49	4,06	94,55
NO 8	2,360	50,07	14,04	80,52
NO 10	2,000	18,60	5,21	75,30
NO 18	1,000	71,96	20,17	55,13
NO 40	0,425	103,64	29,06	26,07
NO 60	0,250	44,75	12,55	13,53
NO 120	0,125	32,54	9,12	4,40
NO 200	0,074	6,17	1,73	2,67
PAN		9,54	2,67	0,00
		356,70		

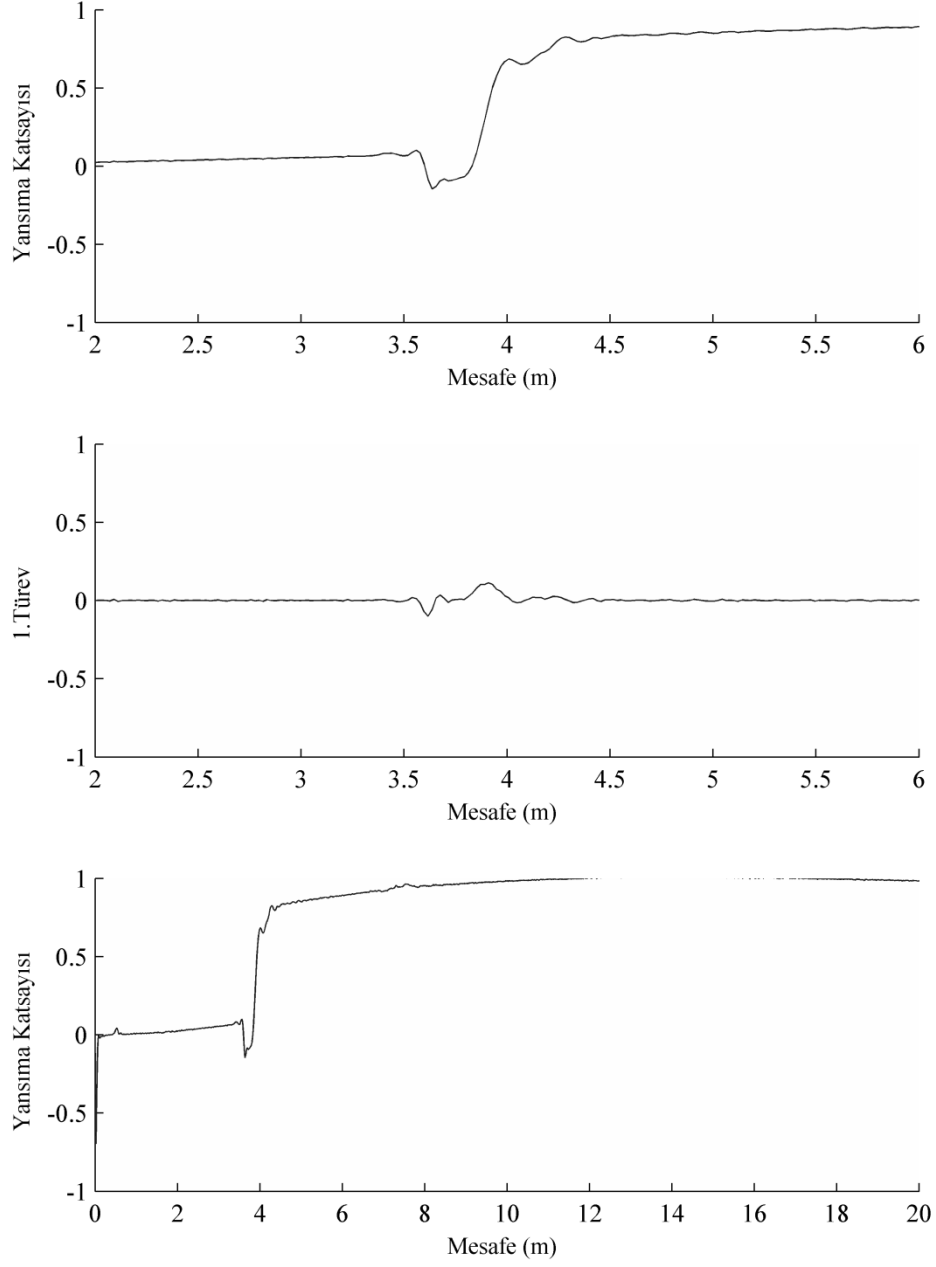


EK-B

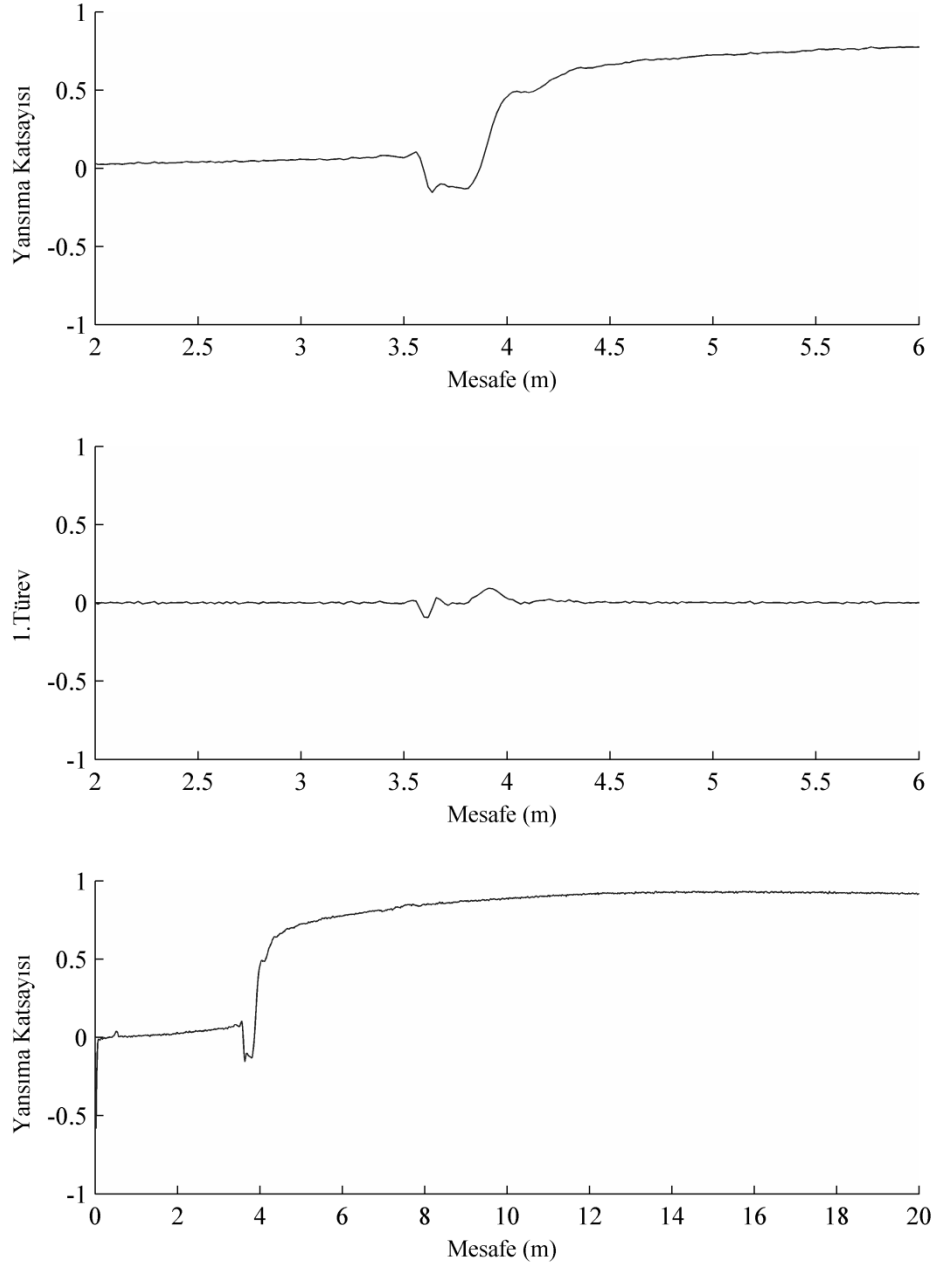
Tablo B.1. Özgül ağırlık deney sonuçları

Örnek Adı		Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4	Deney 5
SP-1	m ₁	92,01	92,01	92,01	92,01	92,01
	m ₂	119,55	109,11	114,16	113,58	117,49
	m ₃	358,12	351,54	354,73	354,38	356,82
	m ₄	340.80	340.80	340.80	340.80	340.80
	G _s	2,69	2,69	2,69	2,70	2,69
SP-2	m ₁	92,01	92,01	92,01	92,01	92,01
	m ₂	119,55	109,11	114,16	113,58	117,49
	m ₃	358,12	351,54	354,73	354,38	356,82
	m ₄	340.80	340.80	340.80	340.80	340.80
	G _s	2,69	2,69	2,69	2,70	2,69
SP-3	m ₁	92,01	92,01	92,01	92,01	92,01
	m ₂	103,02	105,01	107,99	106,67	111,29
	m ₃	347,70	348,96	350.84	349,99	352,85
	m ₄	340.80	340.80	340.80	340.80	340.80
	G _s	2,68	2,68	2,69	2,68	2,67
SP-4	m ₁	92,01	92,01	92,01	92,01	92,01
	m ₂	103,02	105,01	107,99	106,67	111,29
	m ₃	347,70	348,96	350.84	349,99	352,85
	m ₄	340.80	340.80	340.80	340.80	340.80
	G _s	2,68	2,68	2,69	2,68	2,67

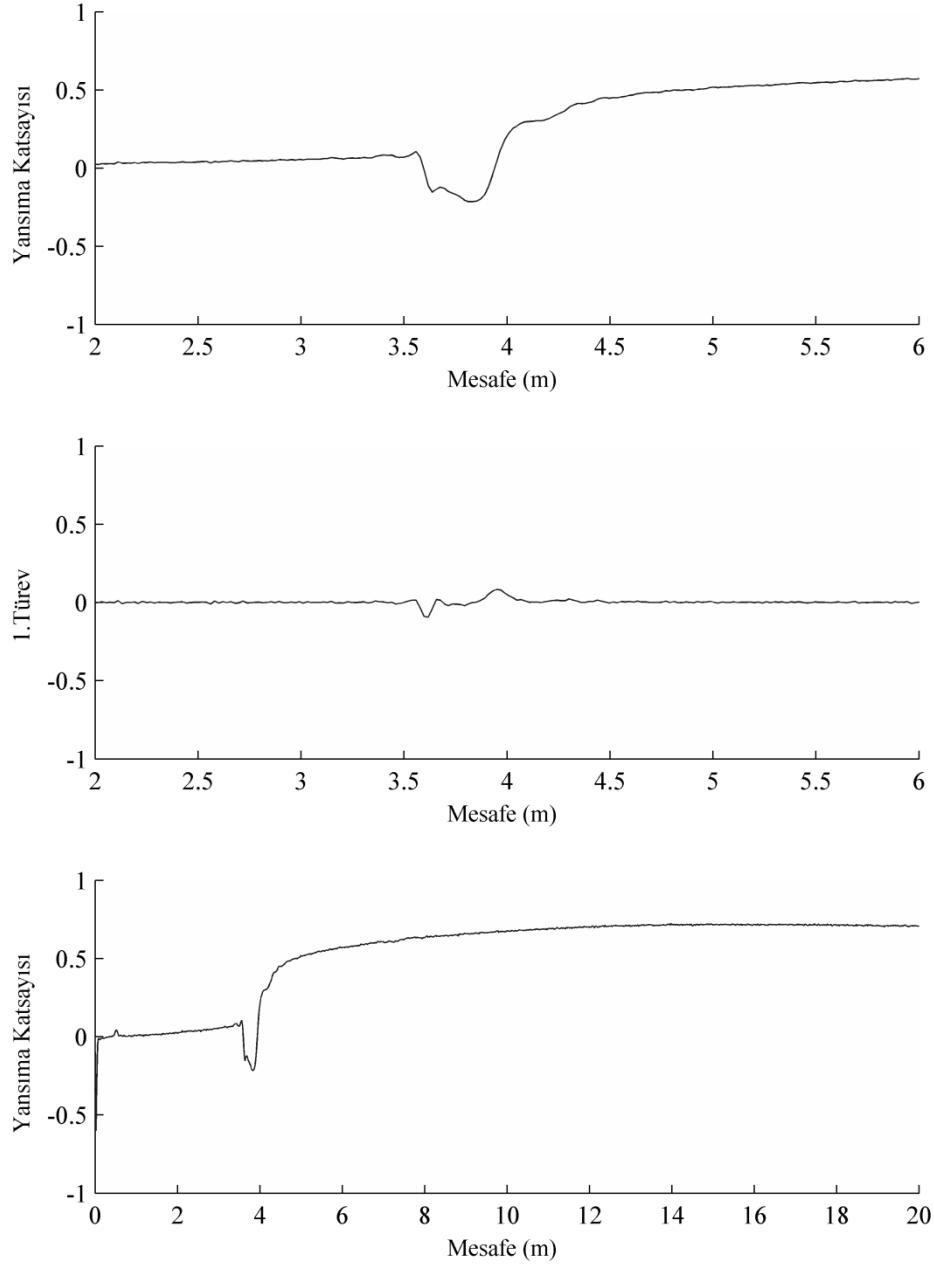
EK-C



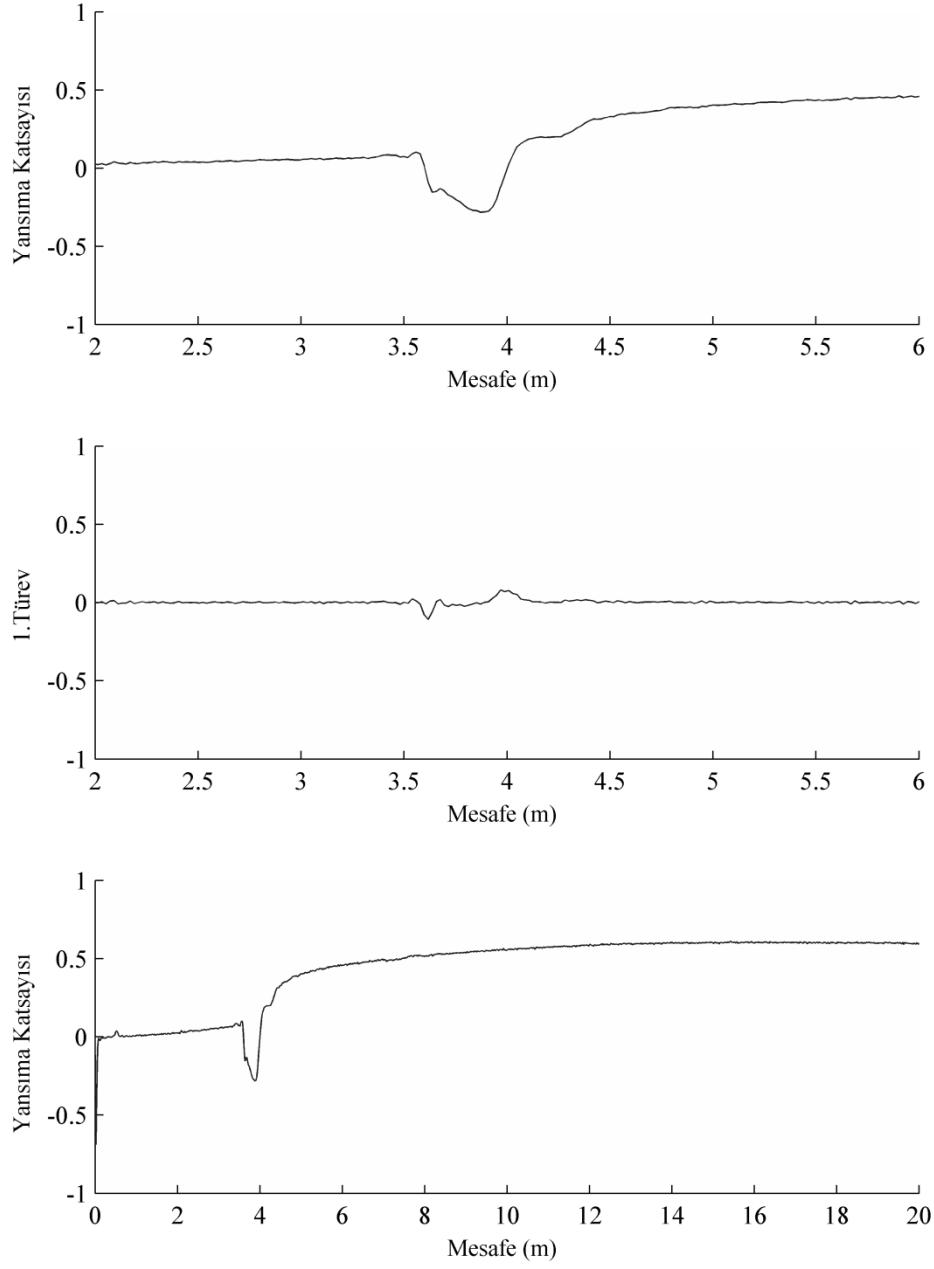
Şekil C.1. SP-1 türü zemin için kompaksiyon deney no:1 TDR ölçümleri



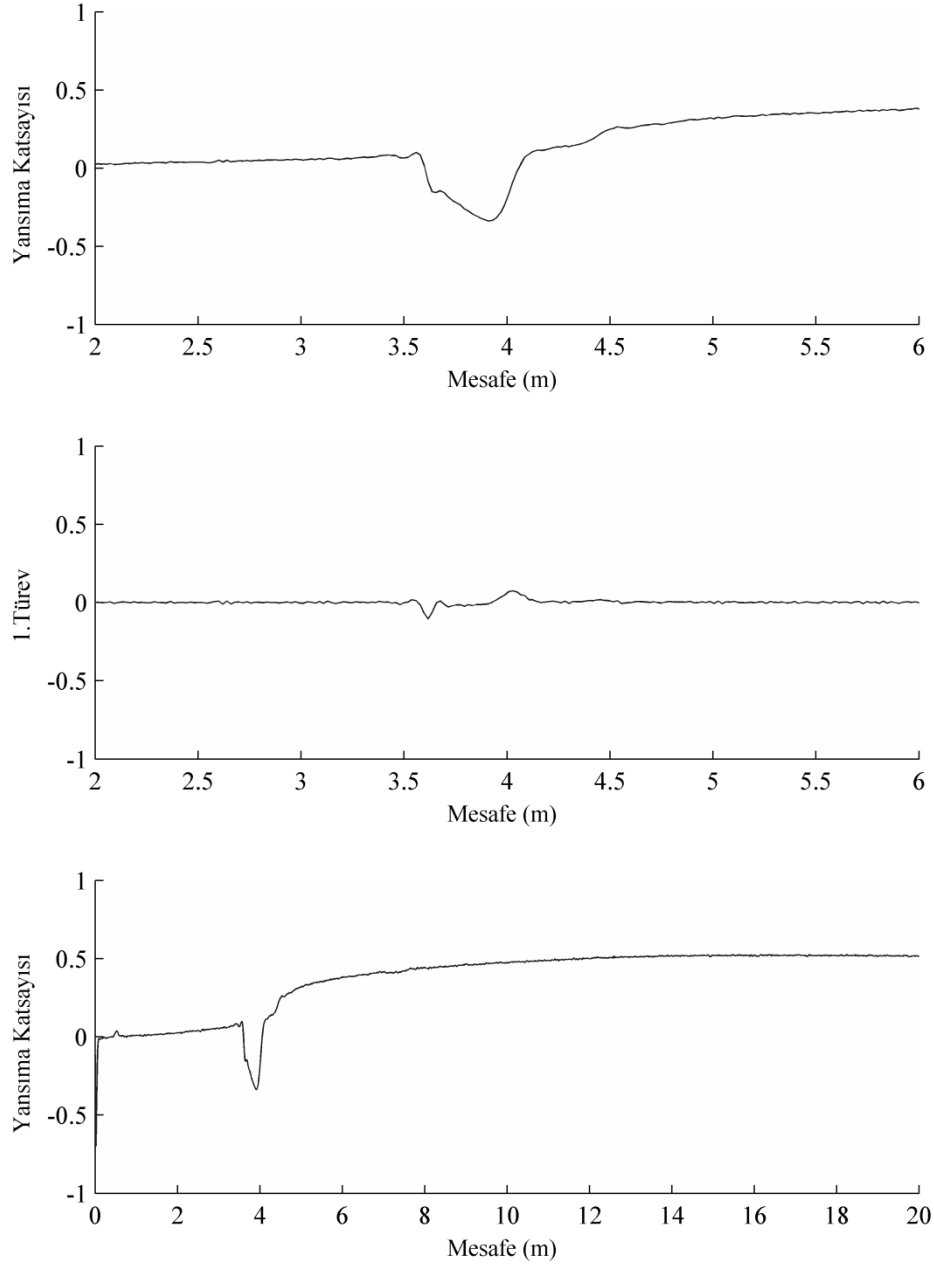
Şekil C.2. SP-1 türü zemin için kompaksiyon deney no:2 TDR ölçümleri



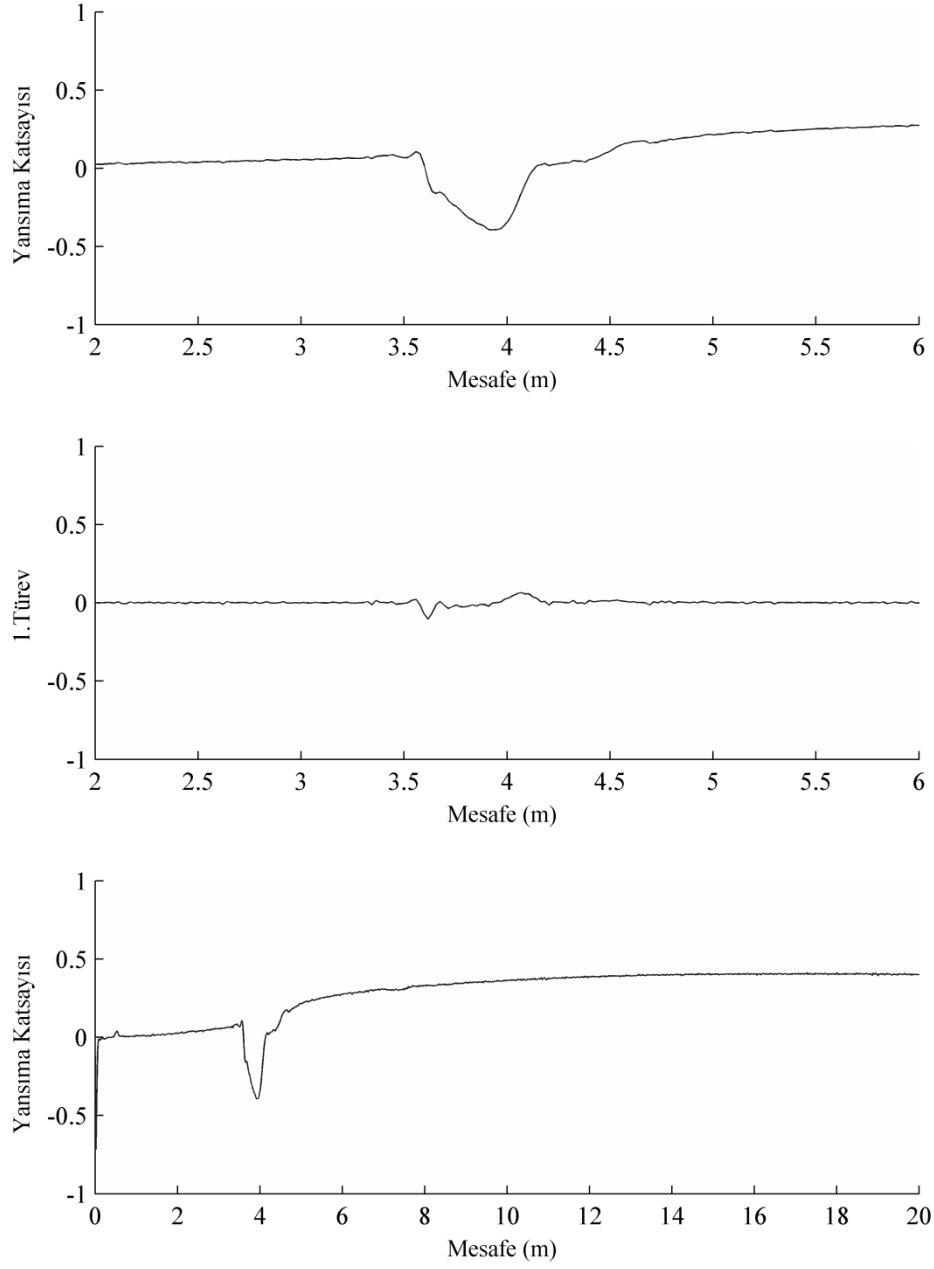
Şekil C.3. SP-1 türü zemin için kompaksiyon deney no:3 TDR ölçümleri



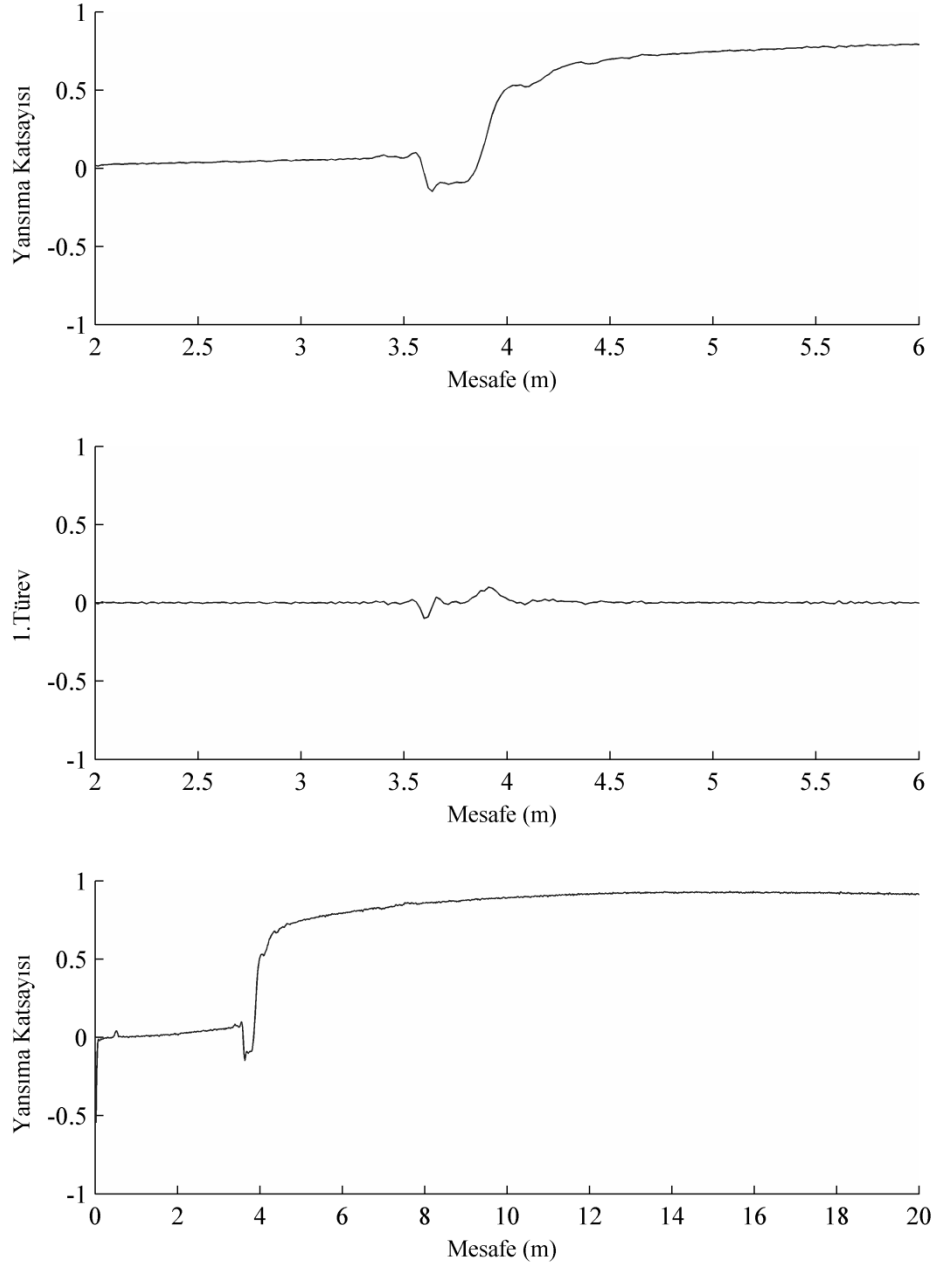
Şekil C.4. SP-1 türü zemin için kompaksiyon deney no:4 TDR ölçümleri



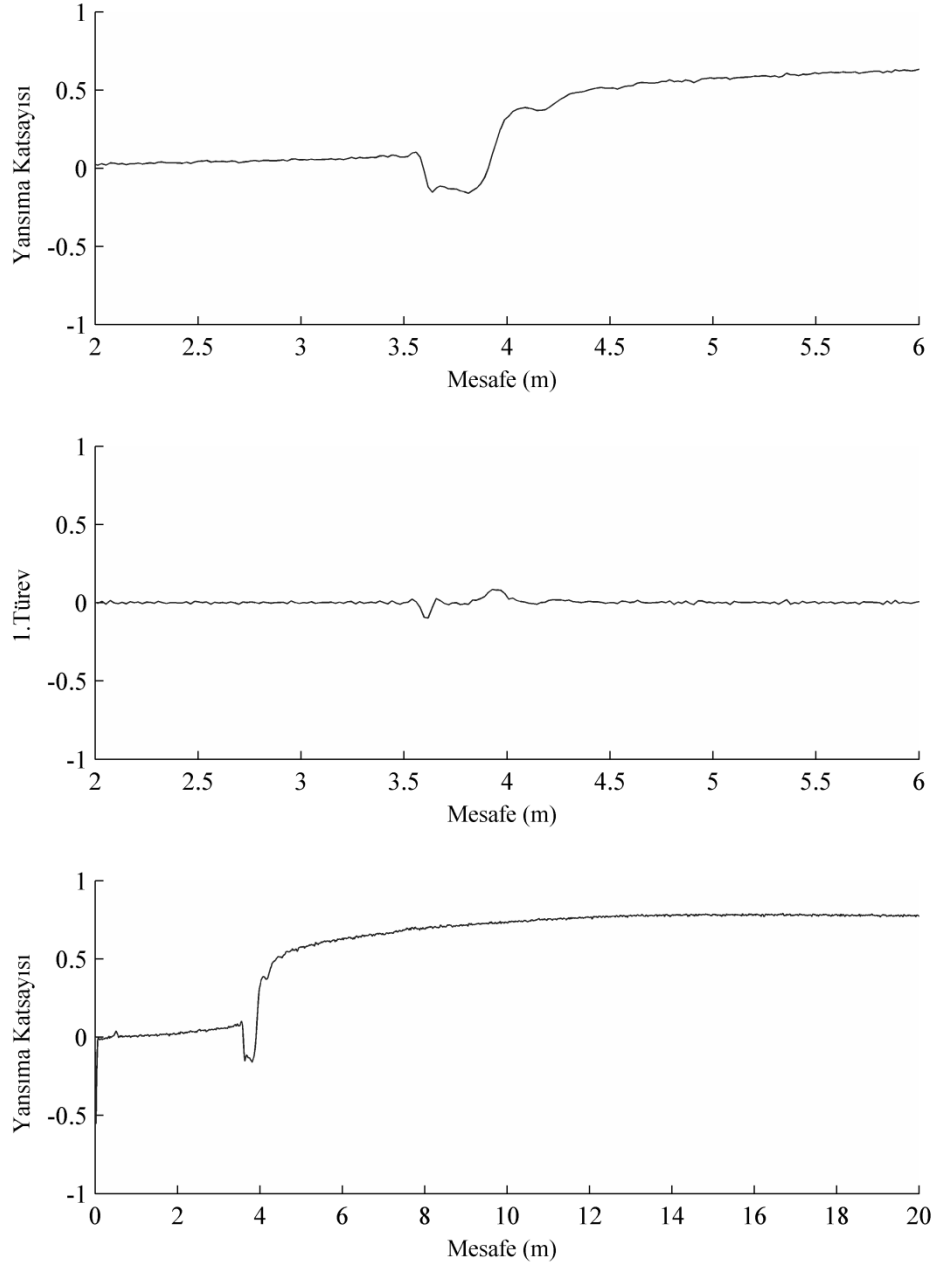
Şekil C.5. SP-1 türü zemin için kompaksiyon deney no:5 TDR ölçümleri



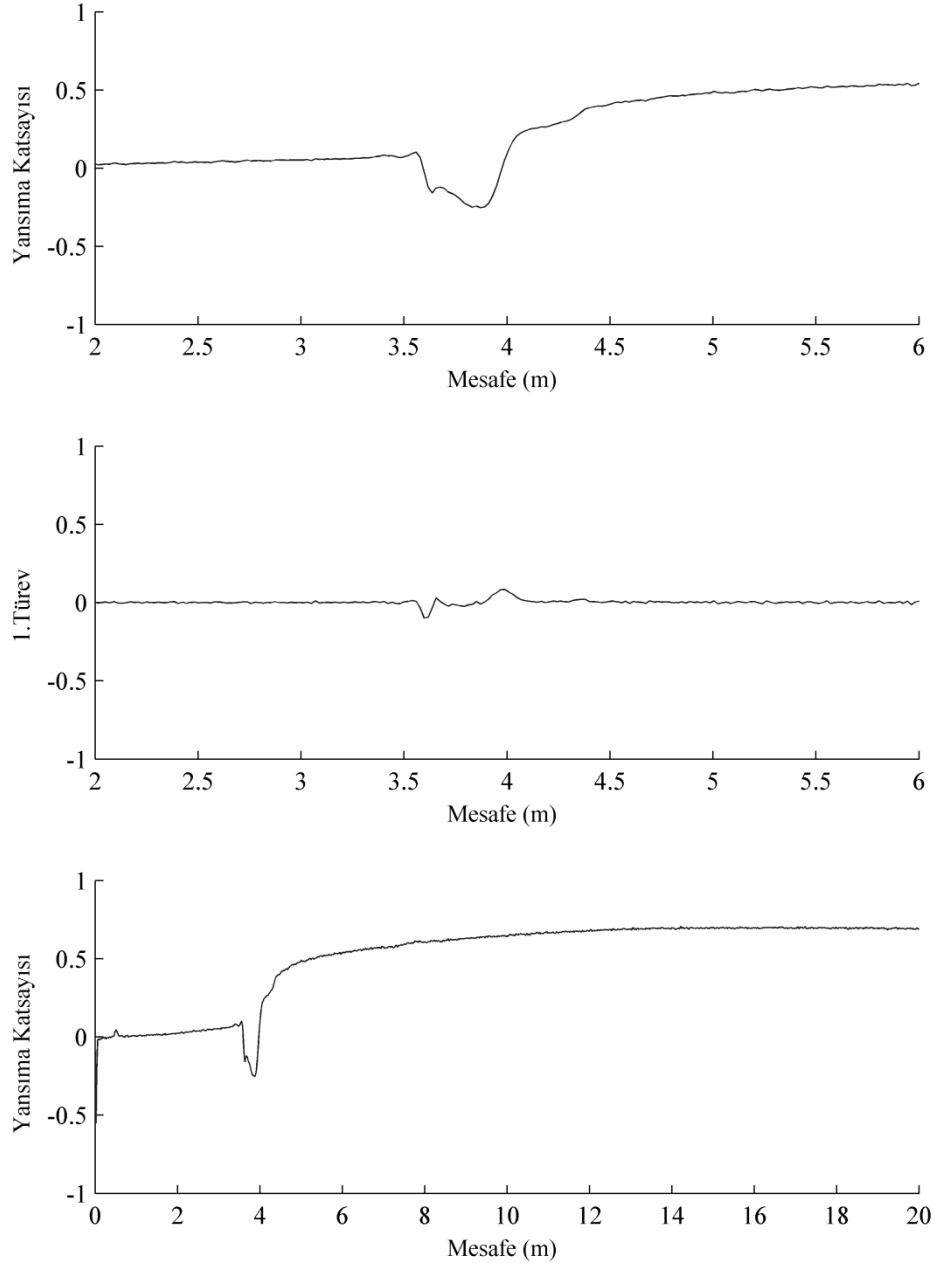
Şekil C.6. SP-1 türü zemin için kompaksiyon deney no:6 TDR ölçümleri



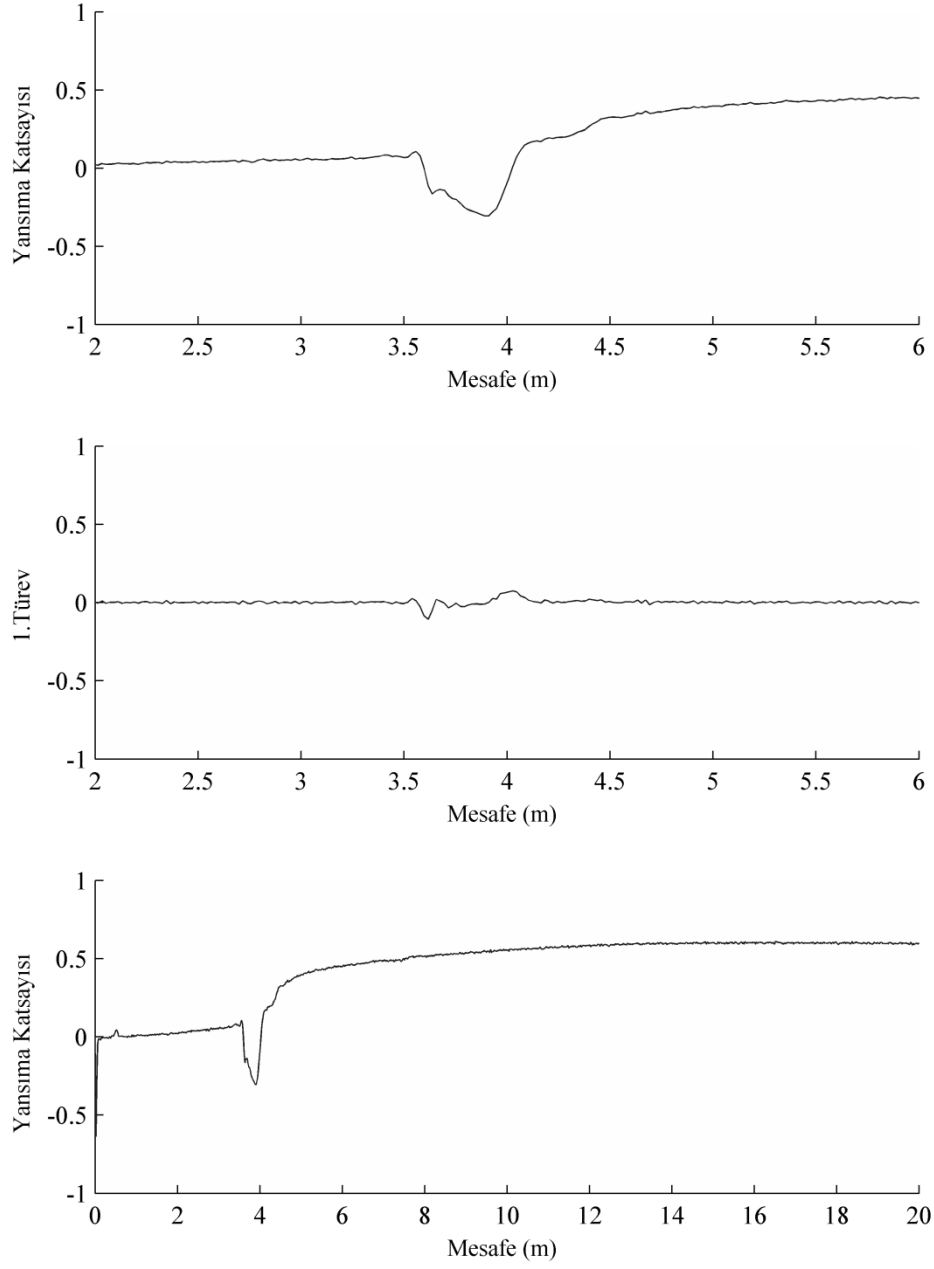
Şekil C.7. SP-1 türü zemin için kompaksiyon deney no:7 TDR ölçümleri



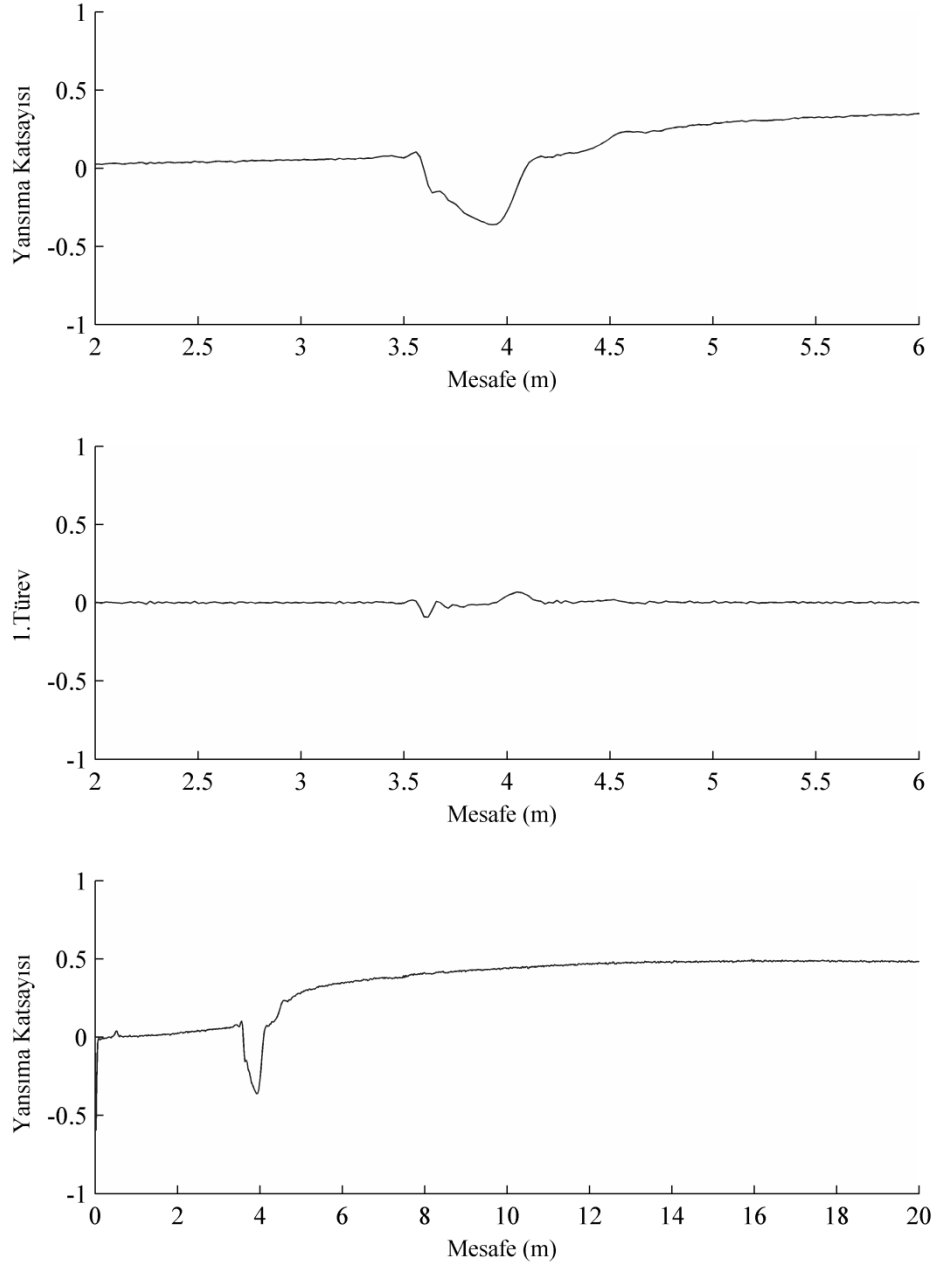
Şekil C.8. SP-1 türü zemin için kompaksiyon deney no:8 TDR ölçümleri



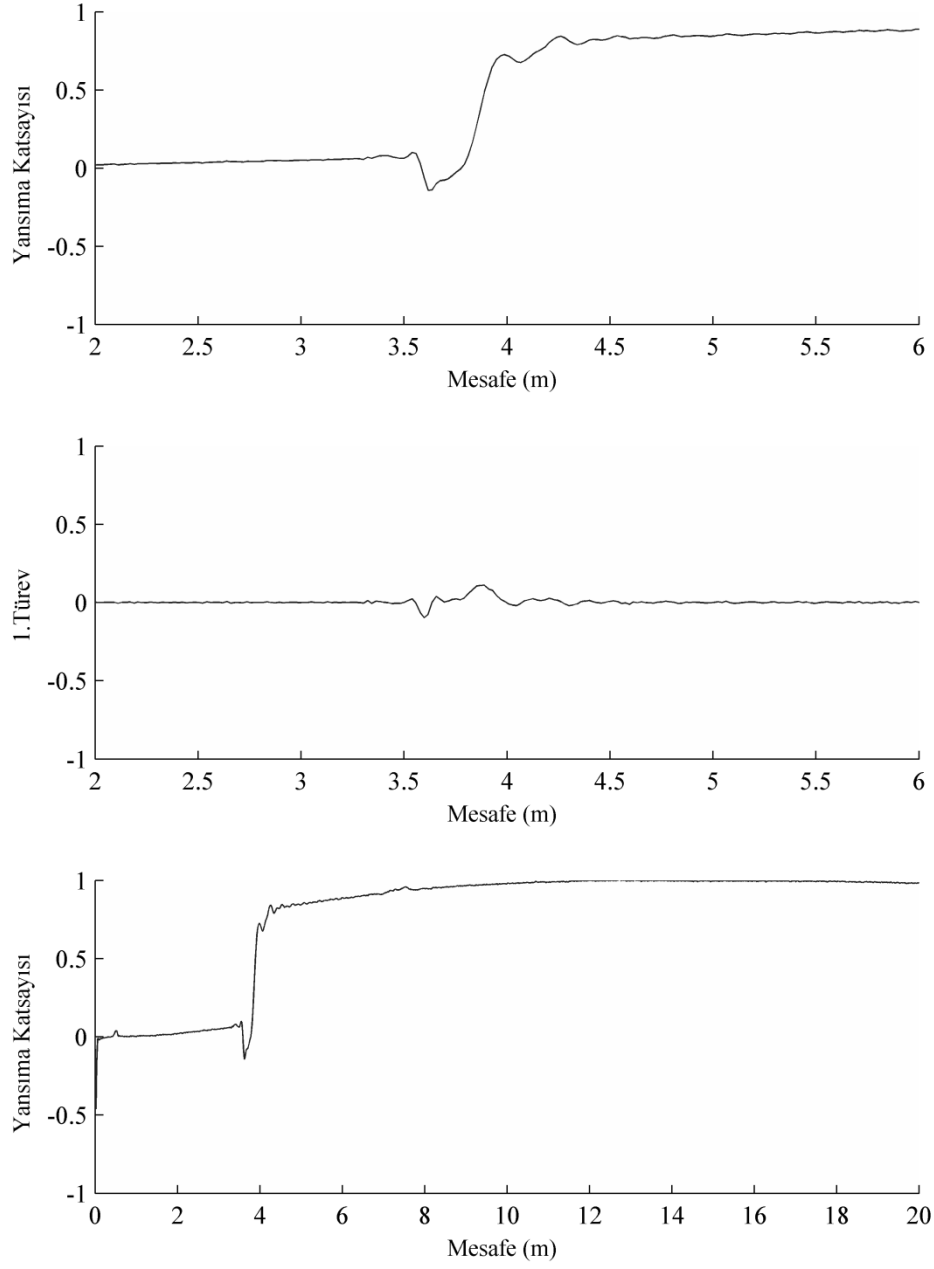
Şekil C.9. SP-1 türü zemin için kompaksiyon deney no:9 TDR ölçümleri



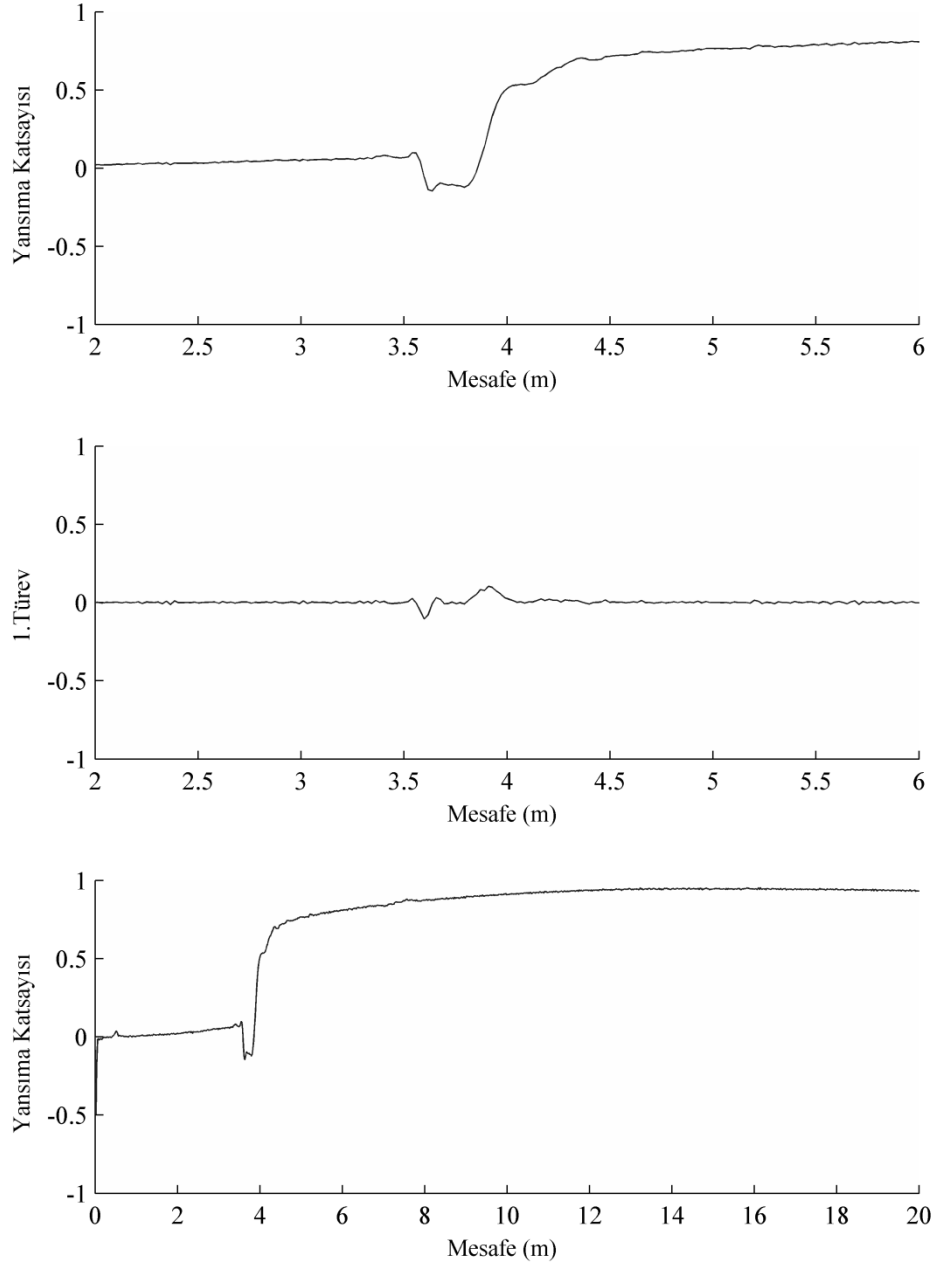
Şekil C.10. SP-1 türü zemin için kompaksiyon deney no:10 TDR ölçümleri



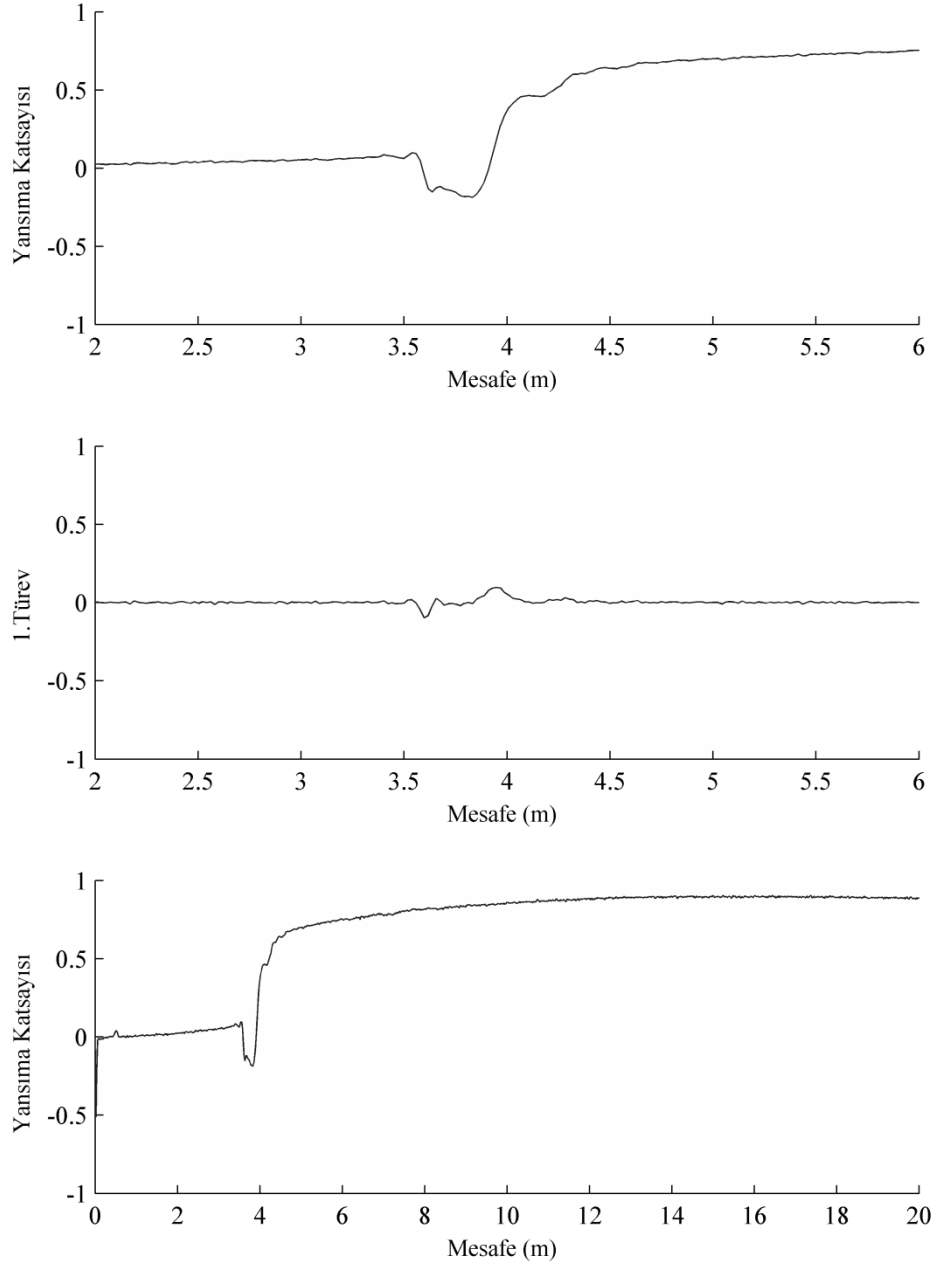
Şekil C.11. SP-1 türü zemin için kompaksiyon deney no:11 TDR ölçümleri



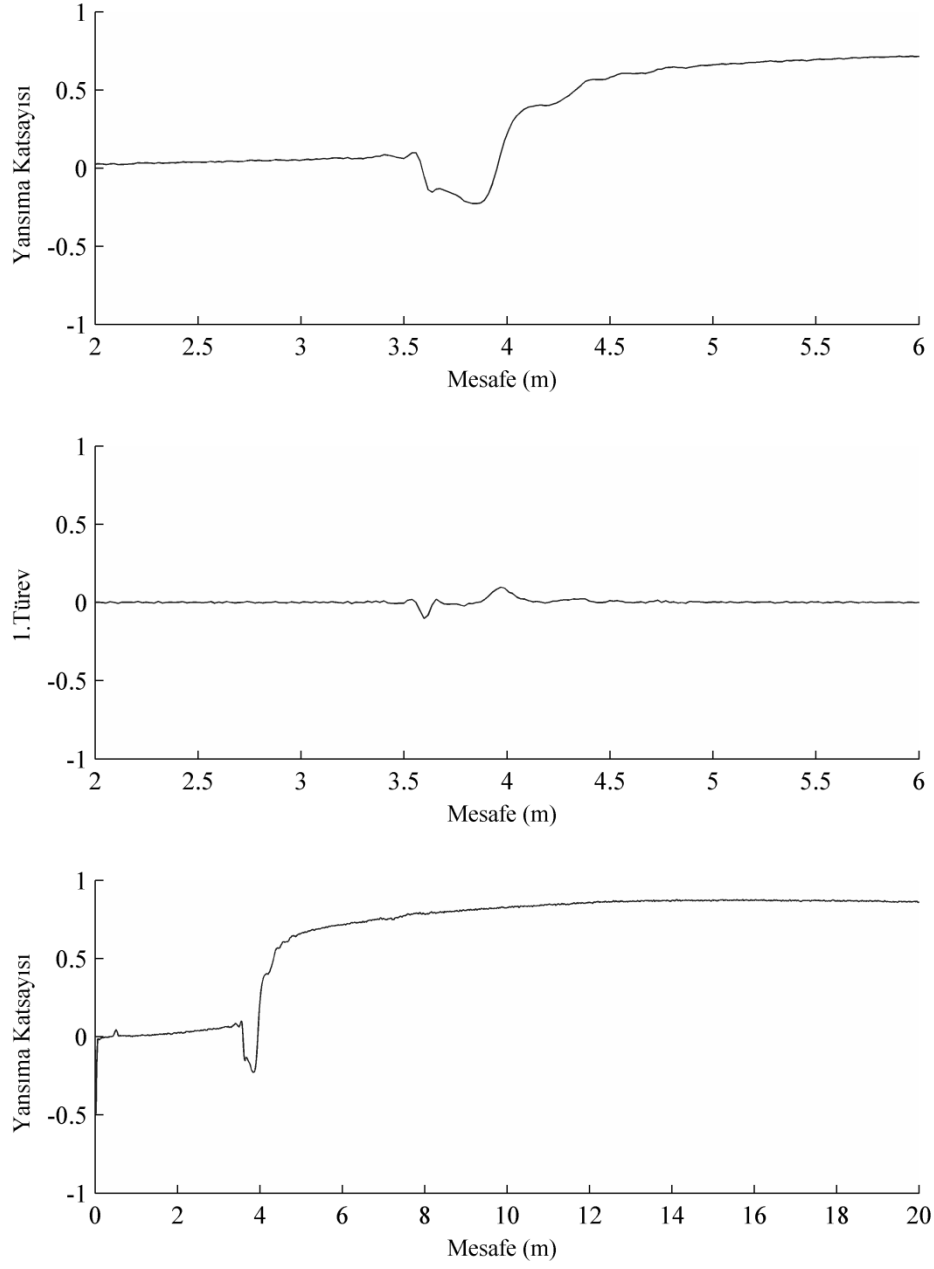
Şekil C.12. SP-2 türü zemin için kompaksiyon deney no:1 TDR ölçümleri



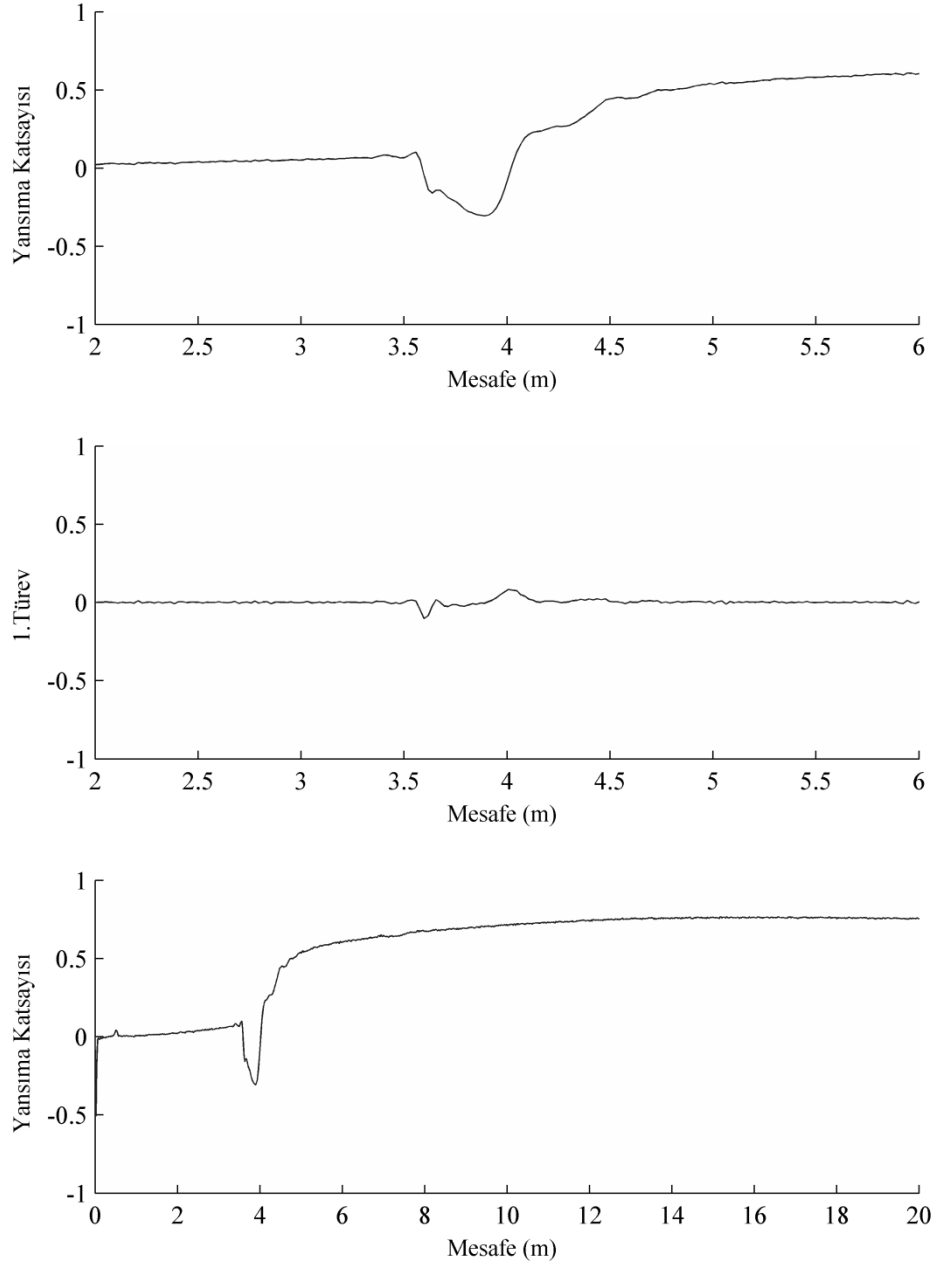
Şekil C.13. SP-2 türü zemin için kompaksiyon deney no:2 TDR ölçümleri



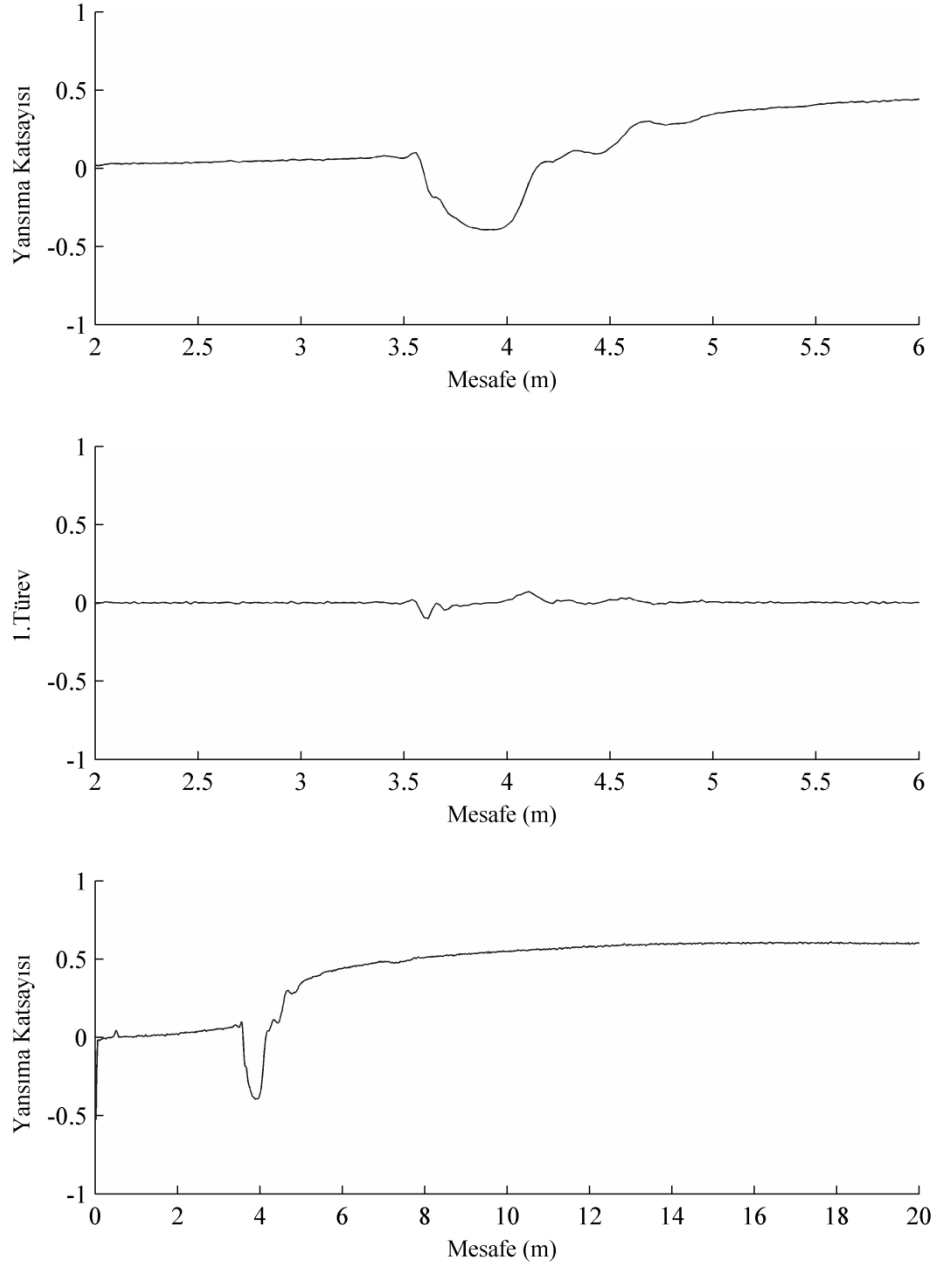
Şekil C.14. SP-2 türü zemin için kompaksiyon deney no:3 TDR ölçümleri



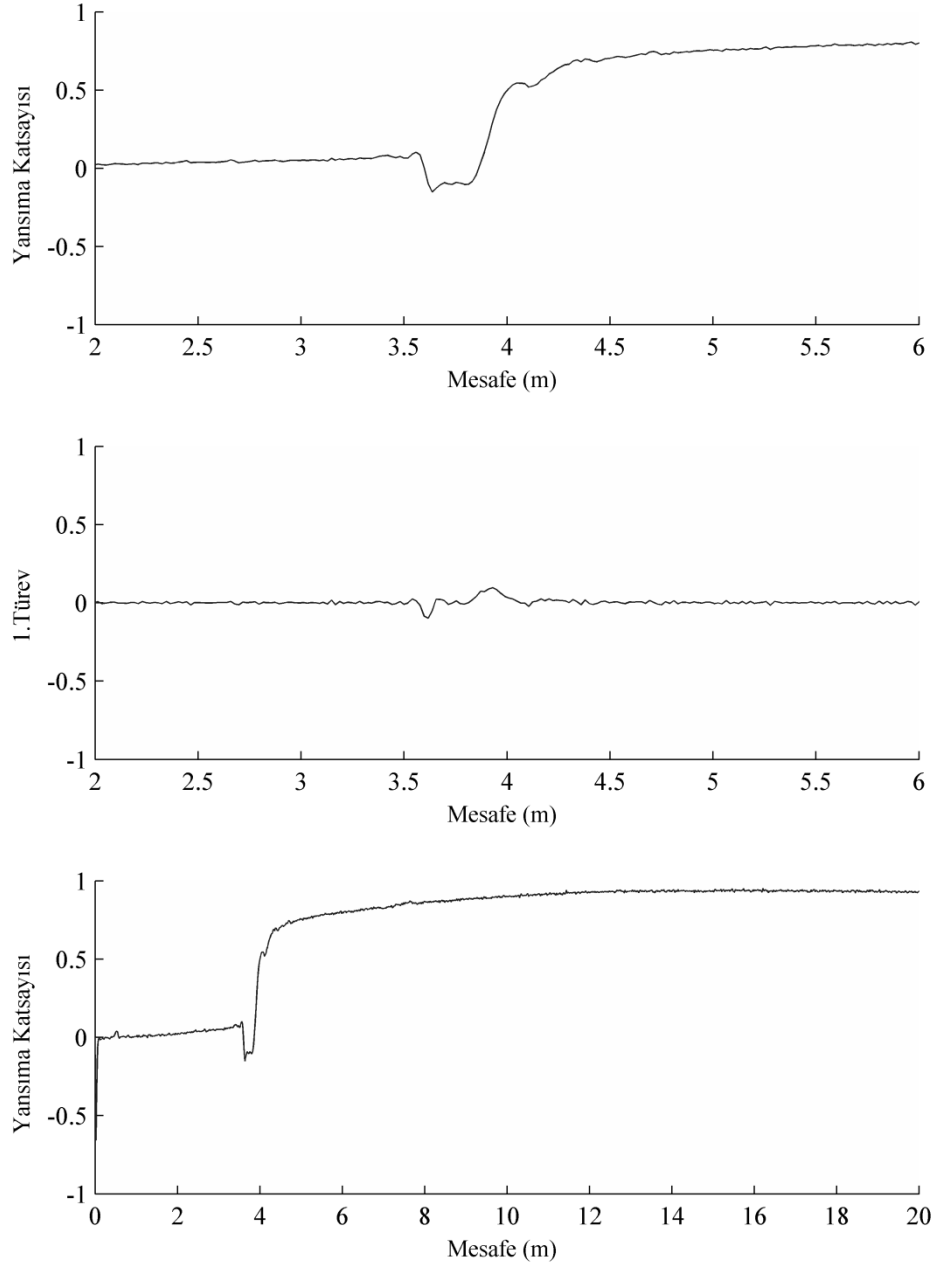
Şekil C.15. SP-2 türü zemin için kompaksiyon deney no:4 TDR ölçümleri



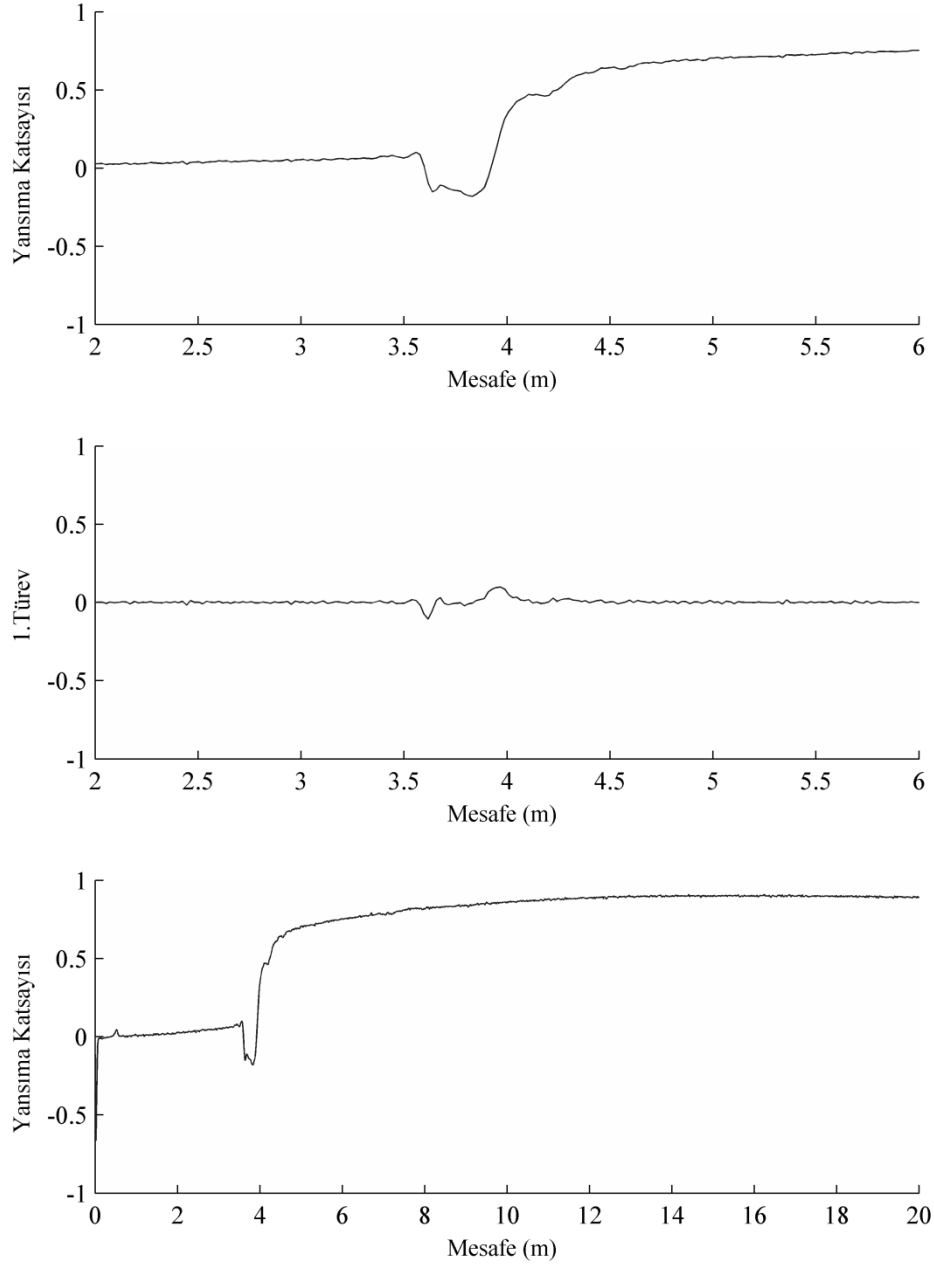
Şekil C.16. SP-2 türü zemin için kompaksiyon deney no:5 TDR ölçümleri



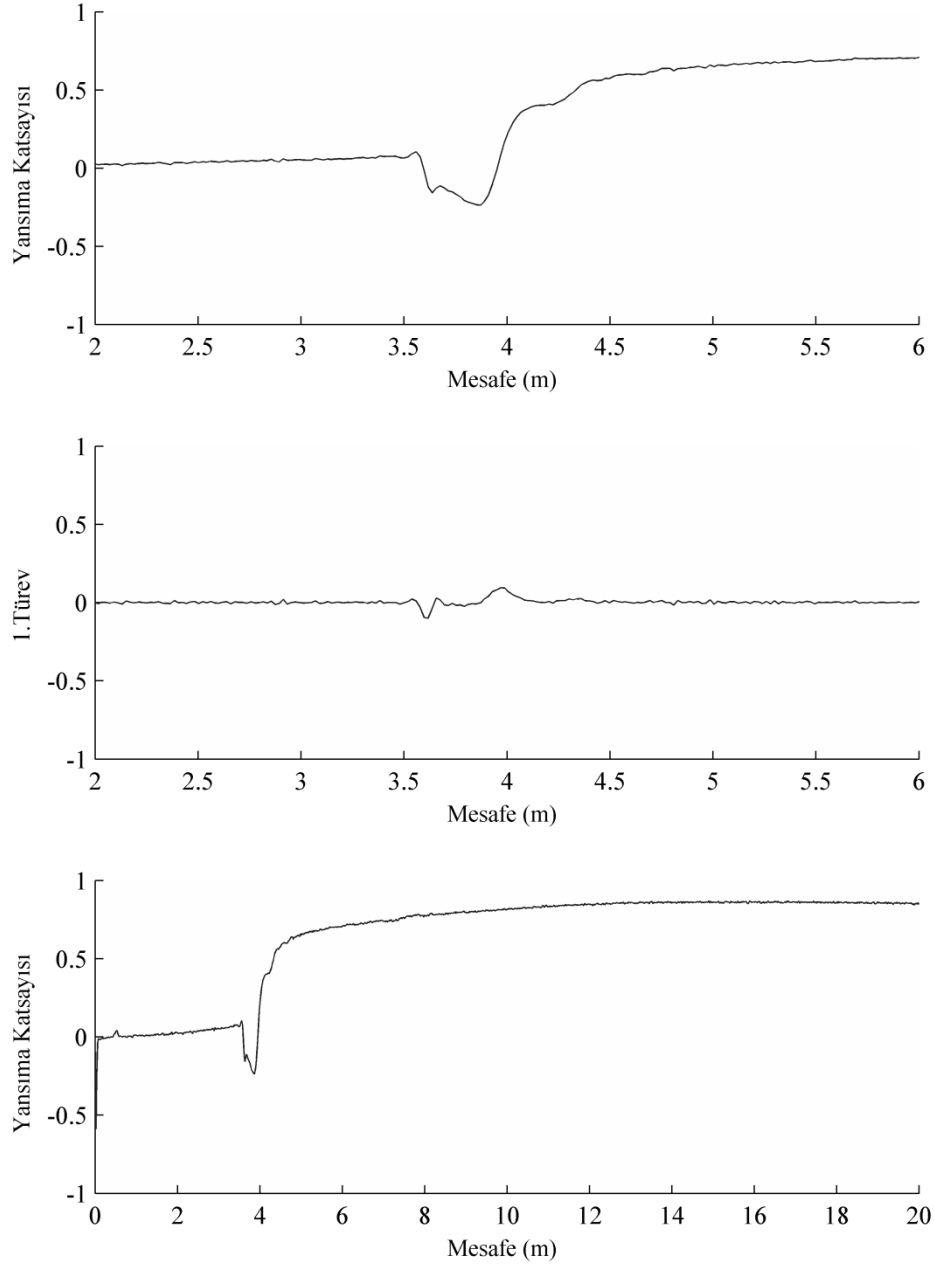
Şekil C.17. SP-2 türü zemin için kompaksiyon deney no:6 TDR ölçümleri



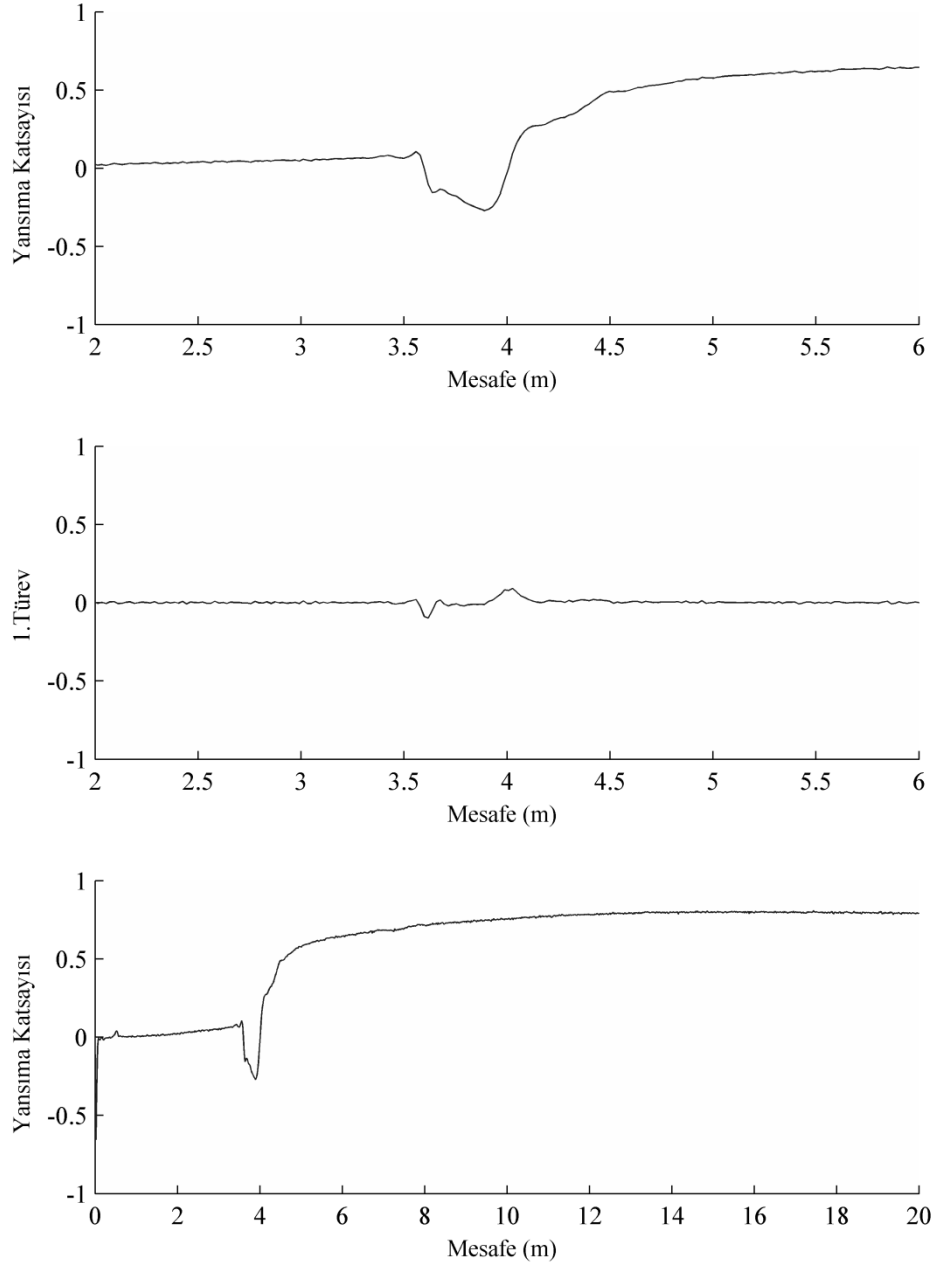
Şekil C.18. SP-2 türü zemin için kompaksiyon deney no:7 TDR ölçümleri



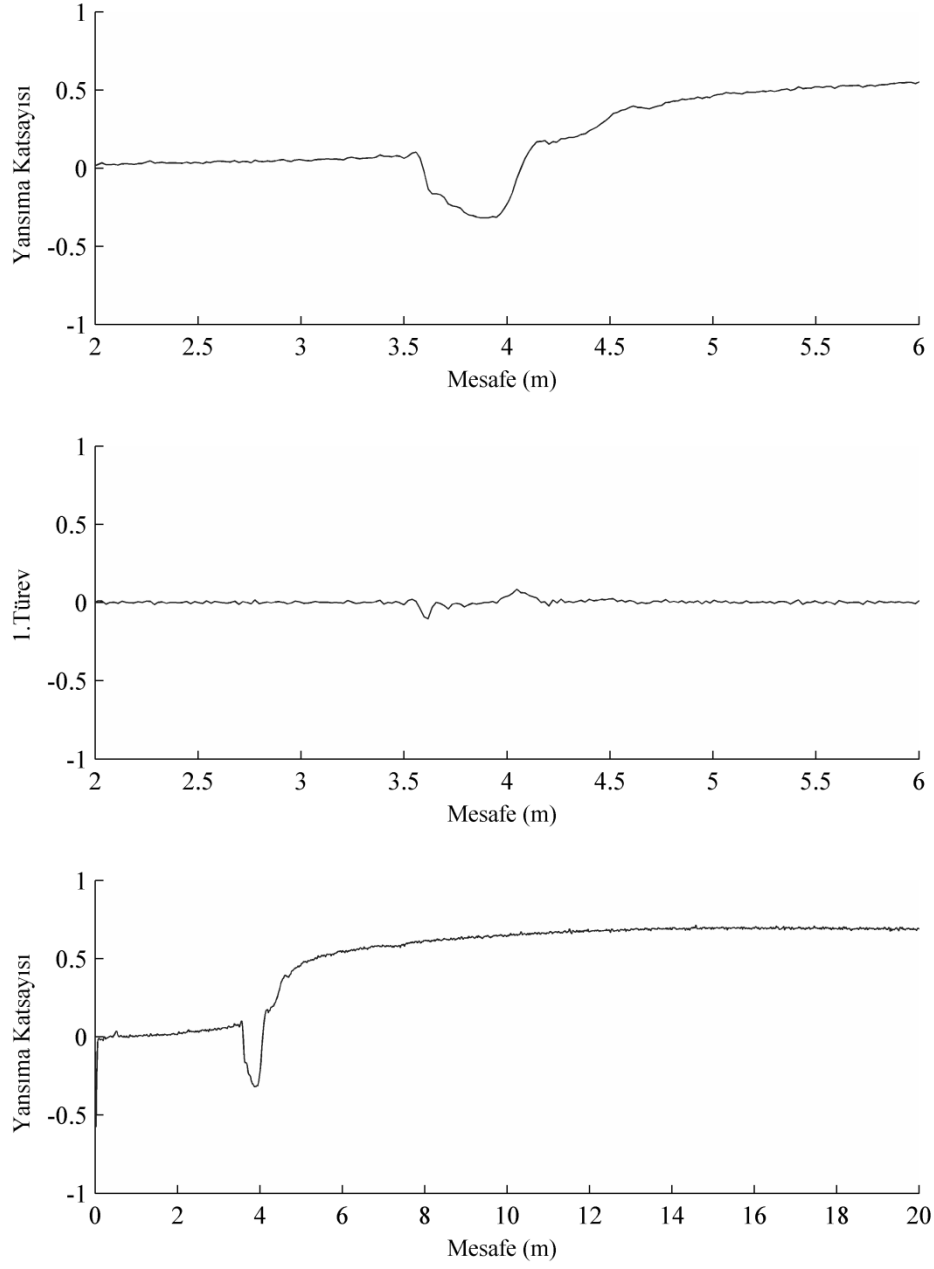
Şekil C.19. SP-2 türü zemin için kompaksiyon deney no:8 TDR ölçümleri



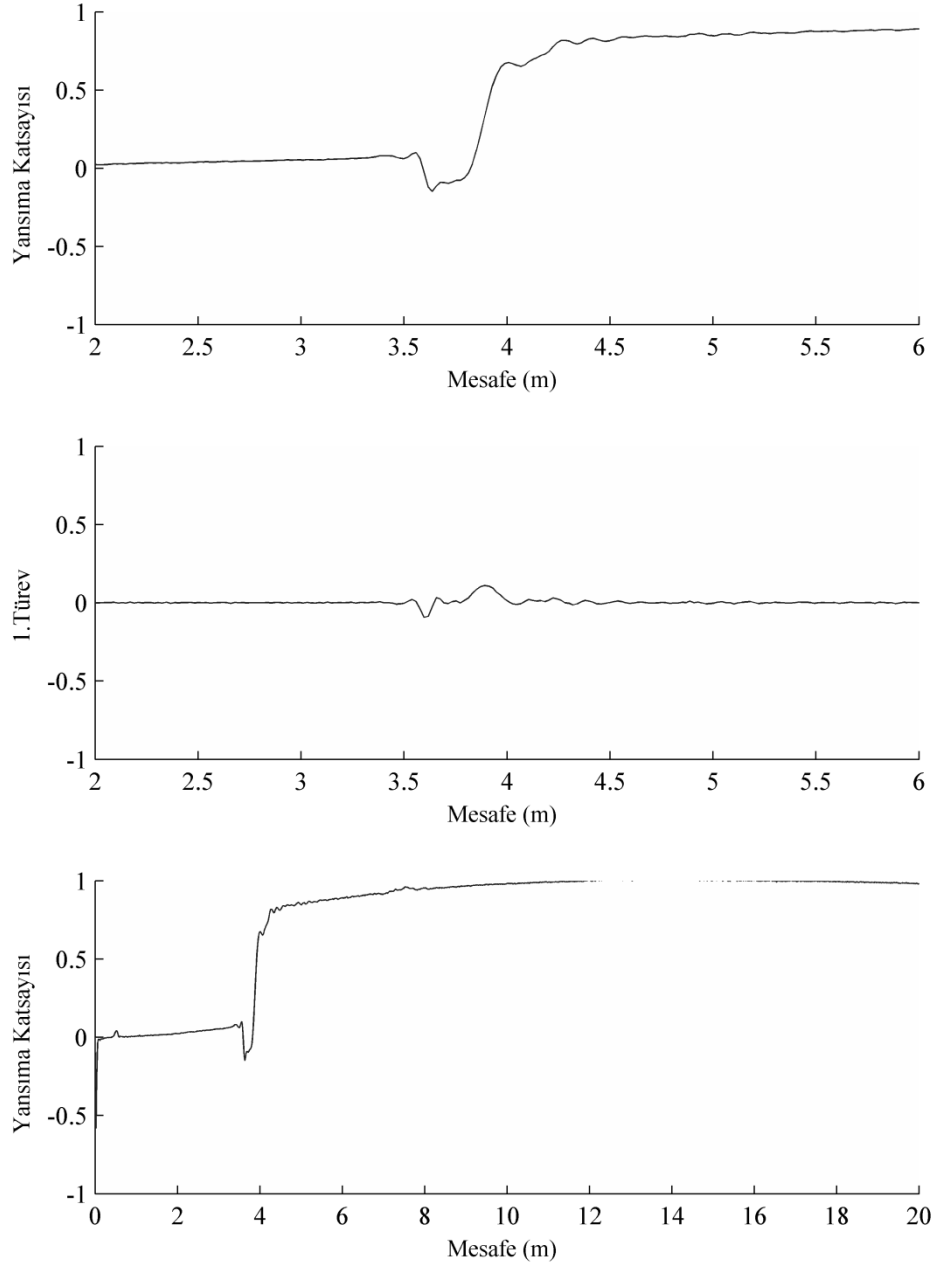
Şekil C.20. SP-2 türü zemin için kompaksiyon deney no:9 TDR ölçümleri



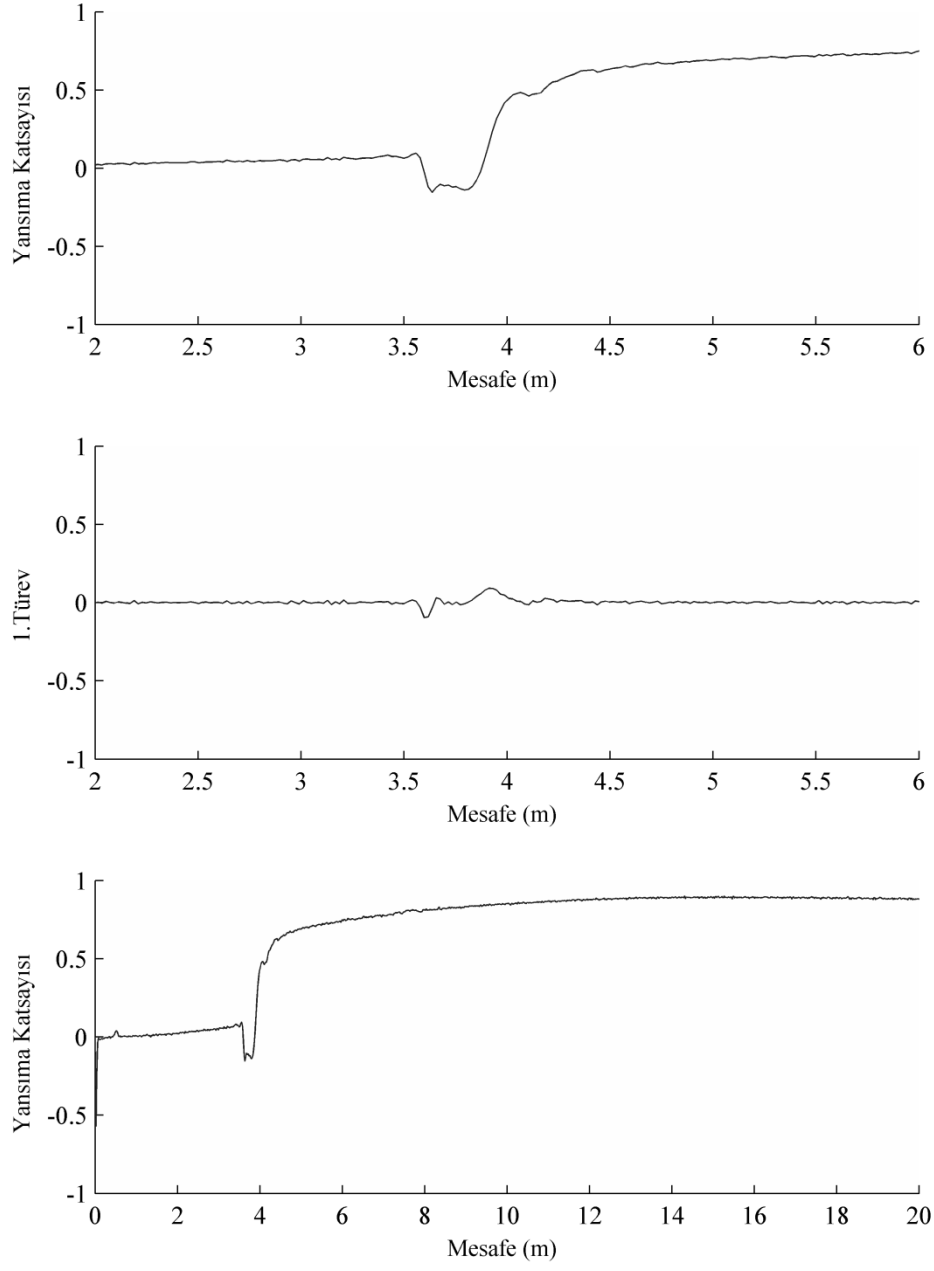
Şekil C.21. SP-2 türü zemin için kompaksiyon deney no:10 TDR ölçümleri



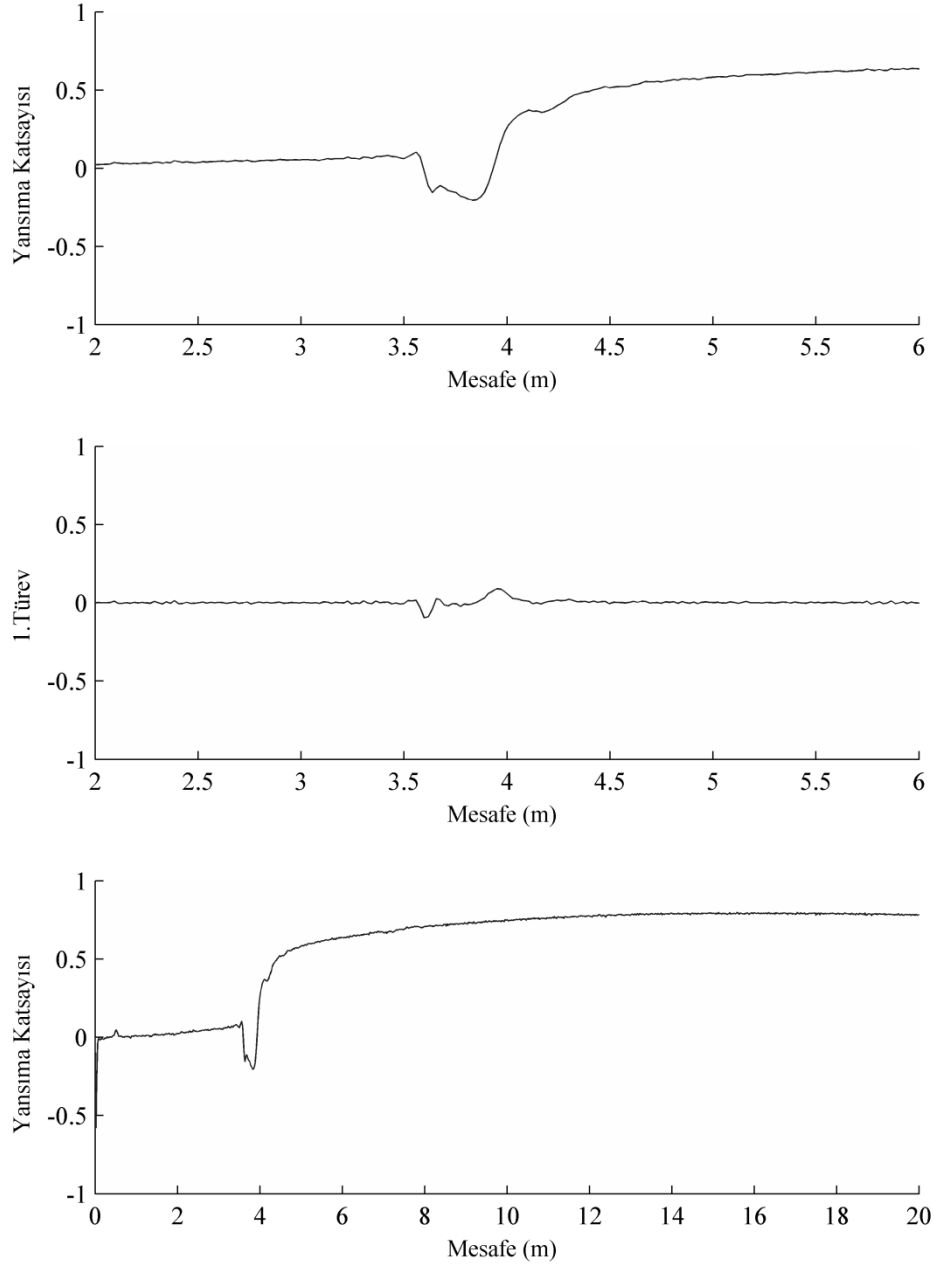
Şekil C.22. SP-2 türü zemin için kompaksiyon deney no:11 TDR ölçümleri



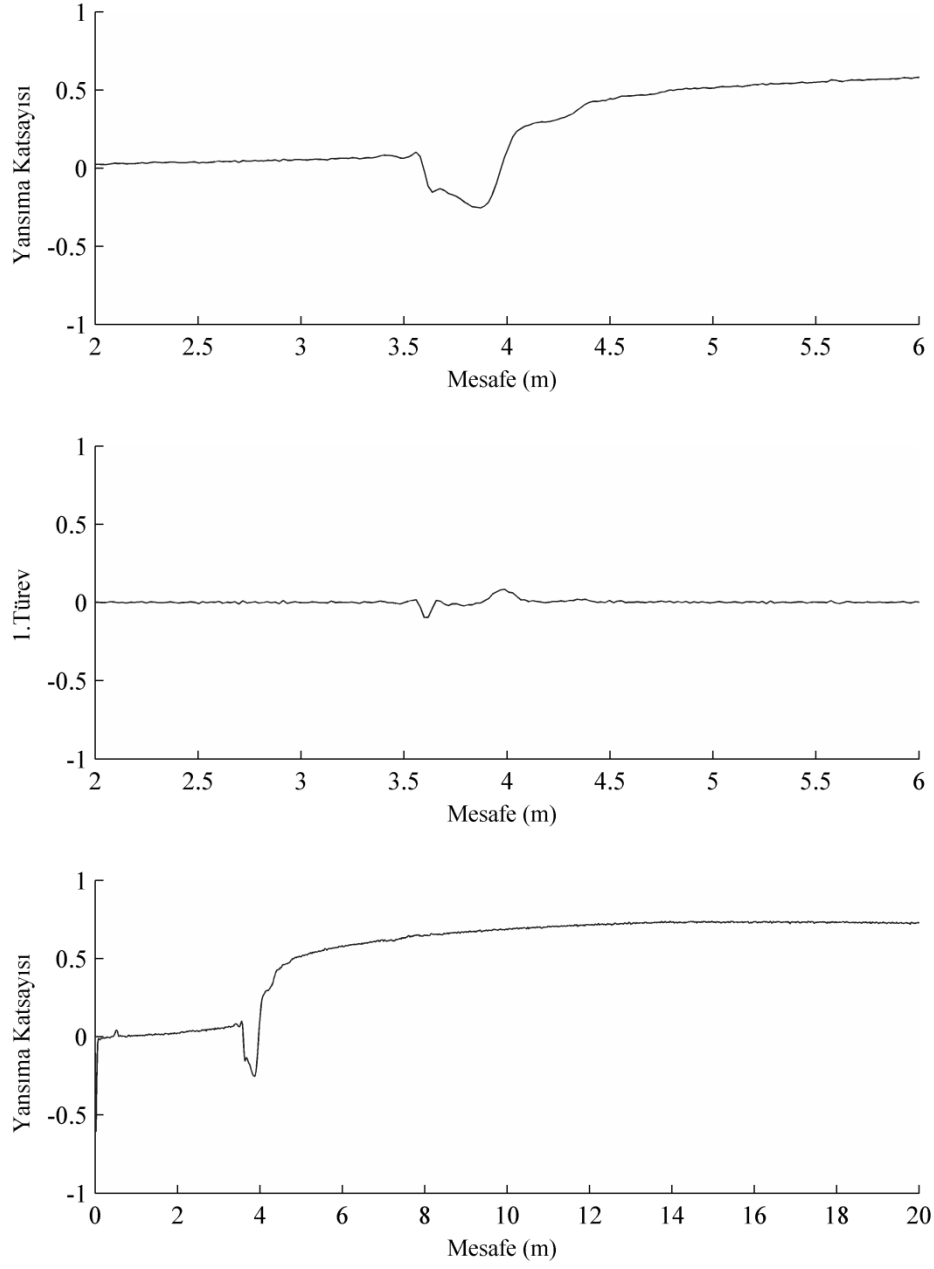
Şekil C.23. SP-3 türü zemin için kompaksiyon deney no:1 TDR ölçümleri



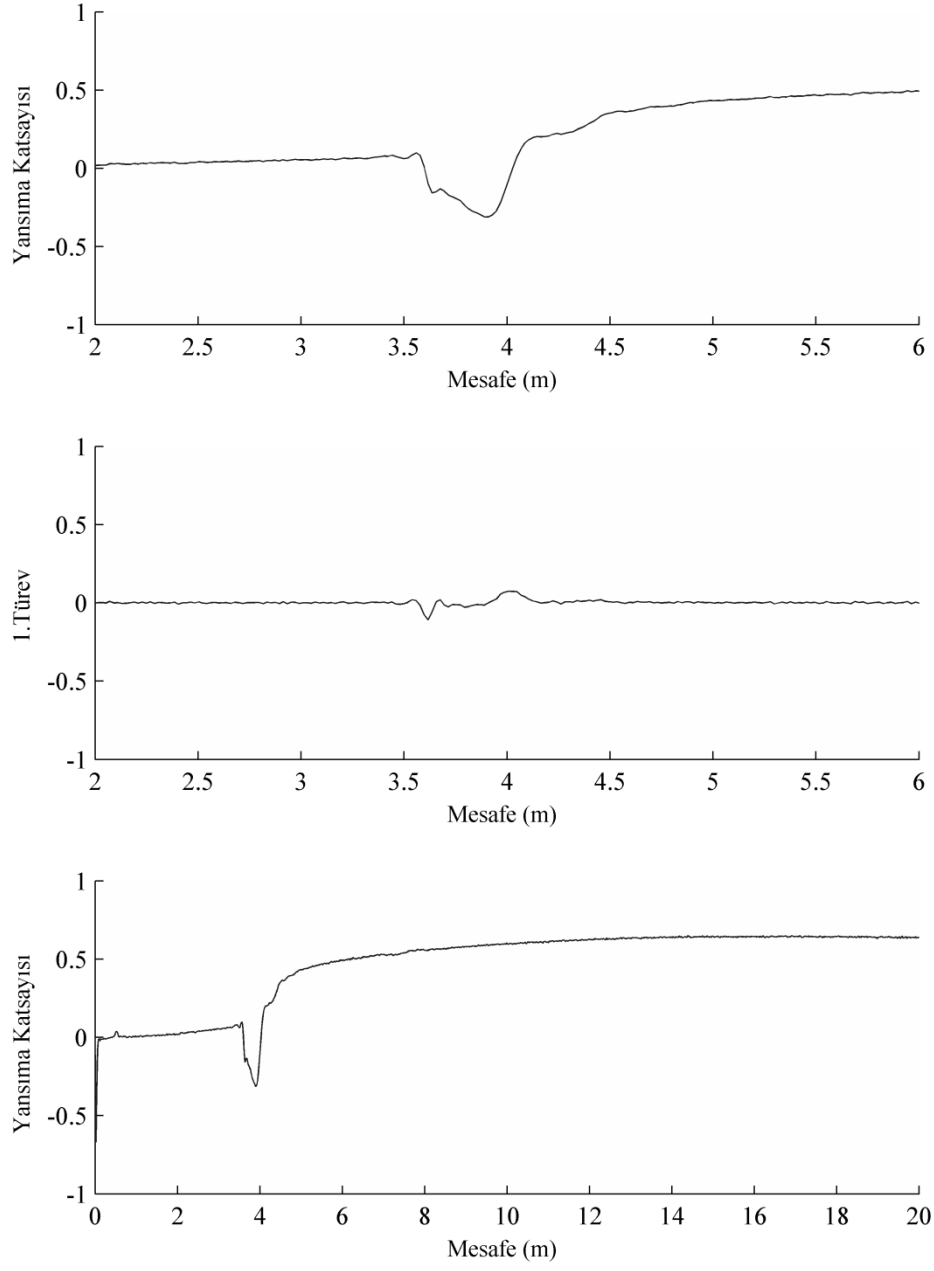
Şekil C.24. SP-3 türü zemin için kompaksiyon deney no:2 TDR ölçümleri



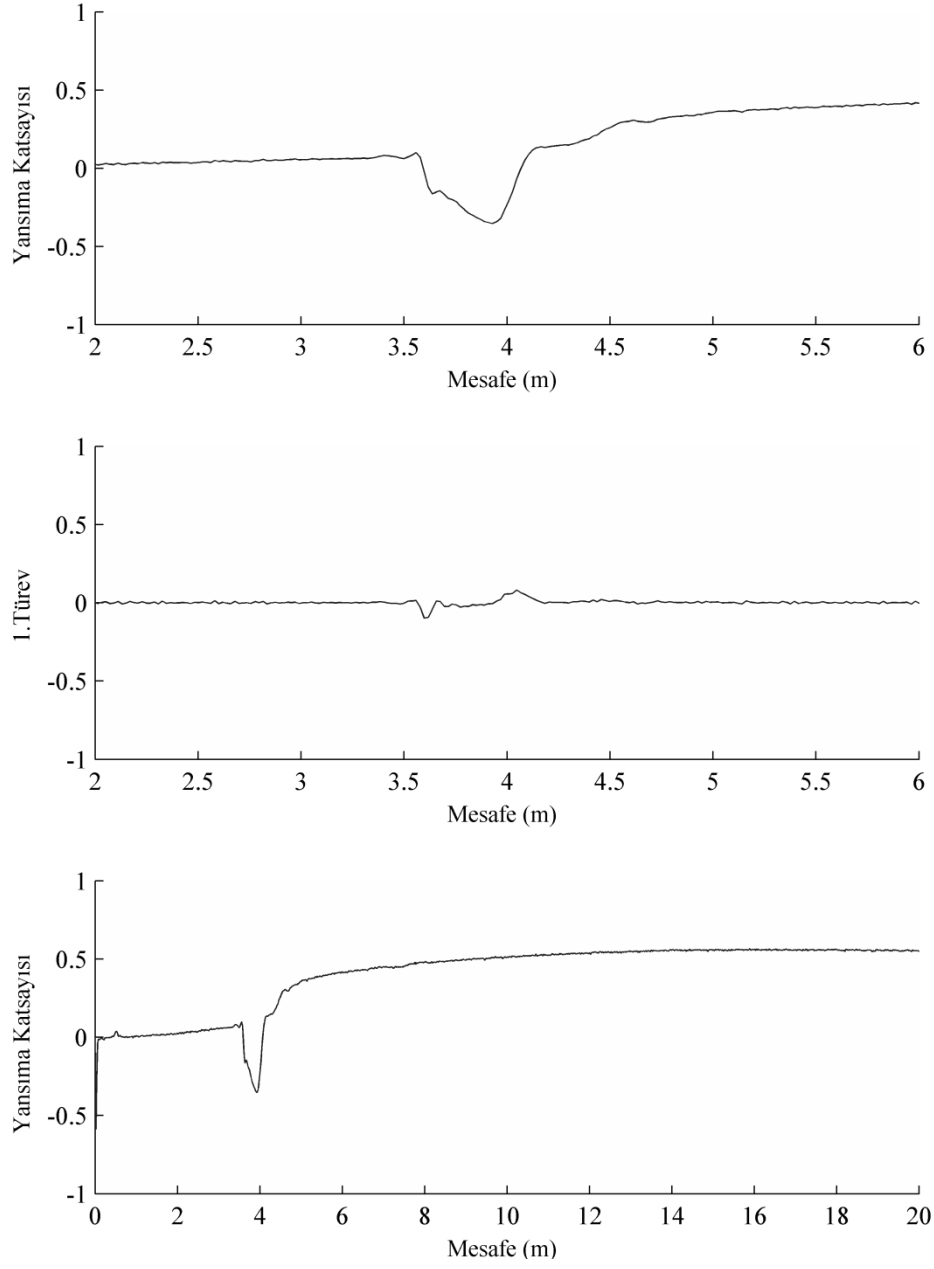
Şekil C.25. SP-3 türü zemin için kompaksiyon deney no:3 TDR ölçümleri



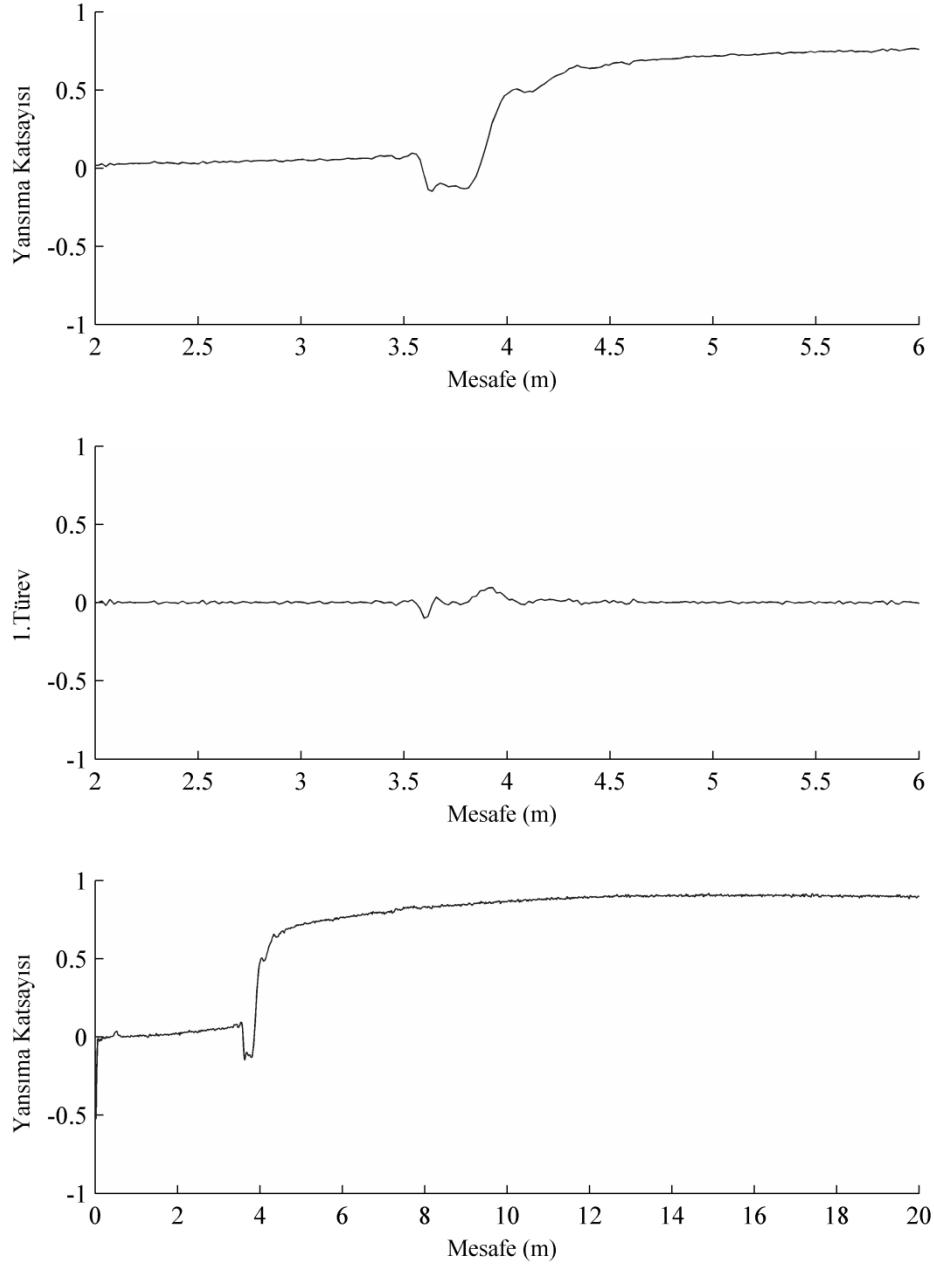
Şekil C.26. SP-3 türü zemin için kompaksiyon deney no:4 TDR ölçümleri



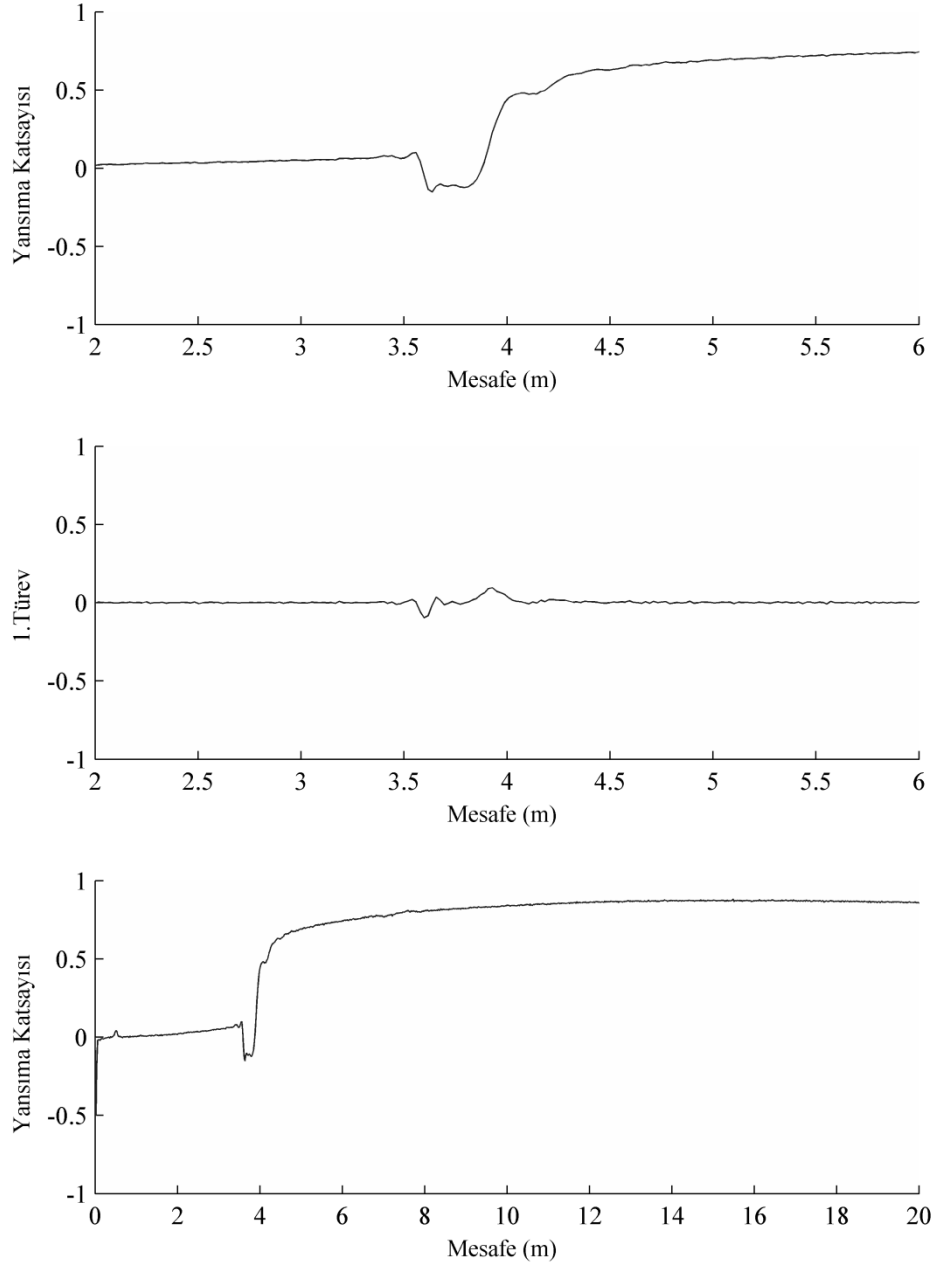
Şekil C.27. SP-3 türü zemin için kompaksiyon deney no:5 TDR ölçümleri



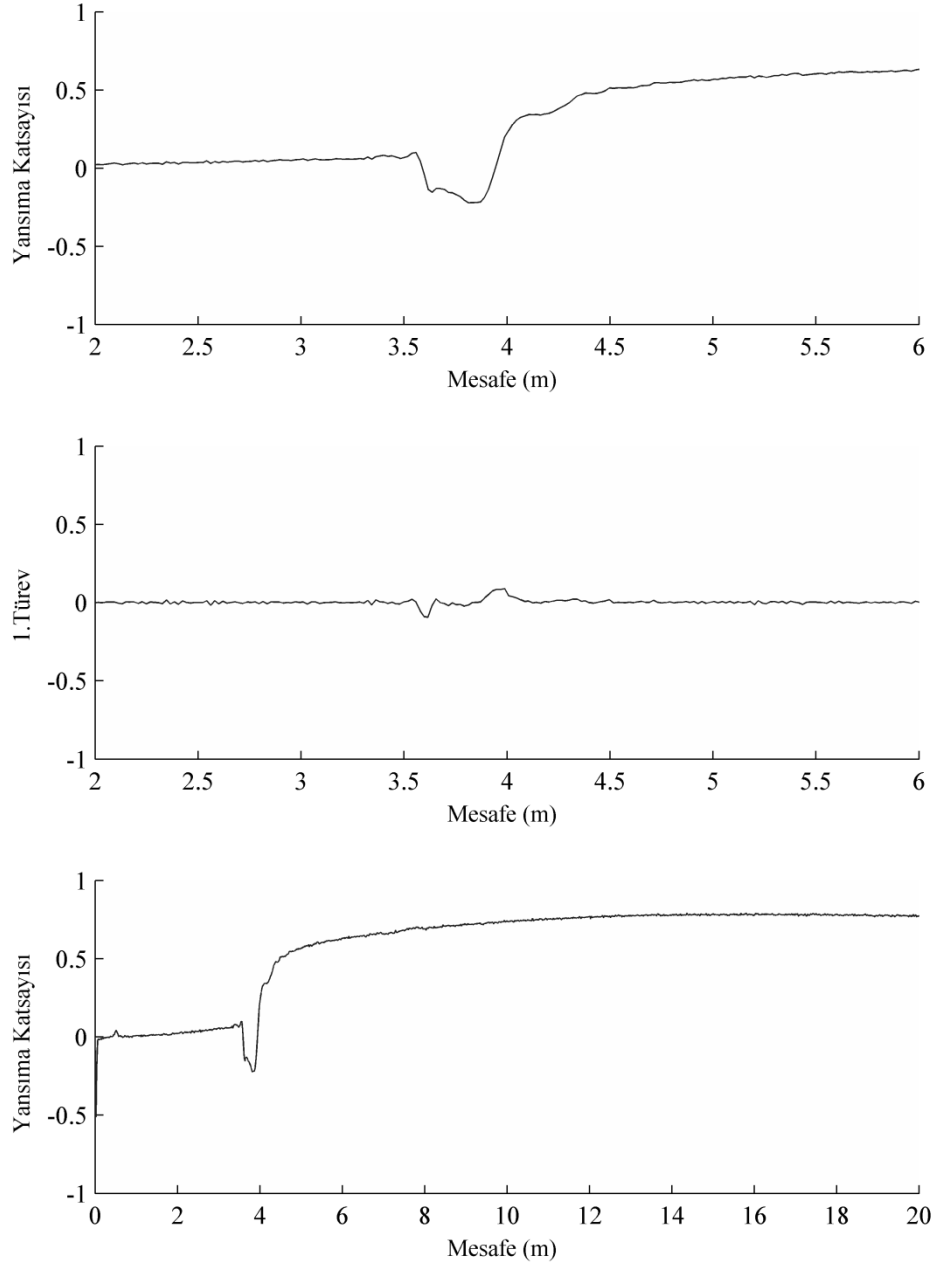
Şekil C.28. SP-3 türü zemin için kompaksiyon deney no:6 TDR ölçümleri



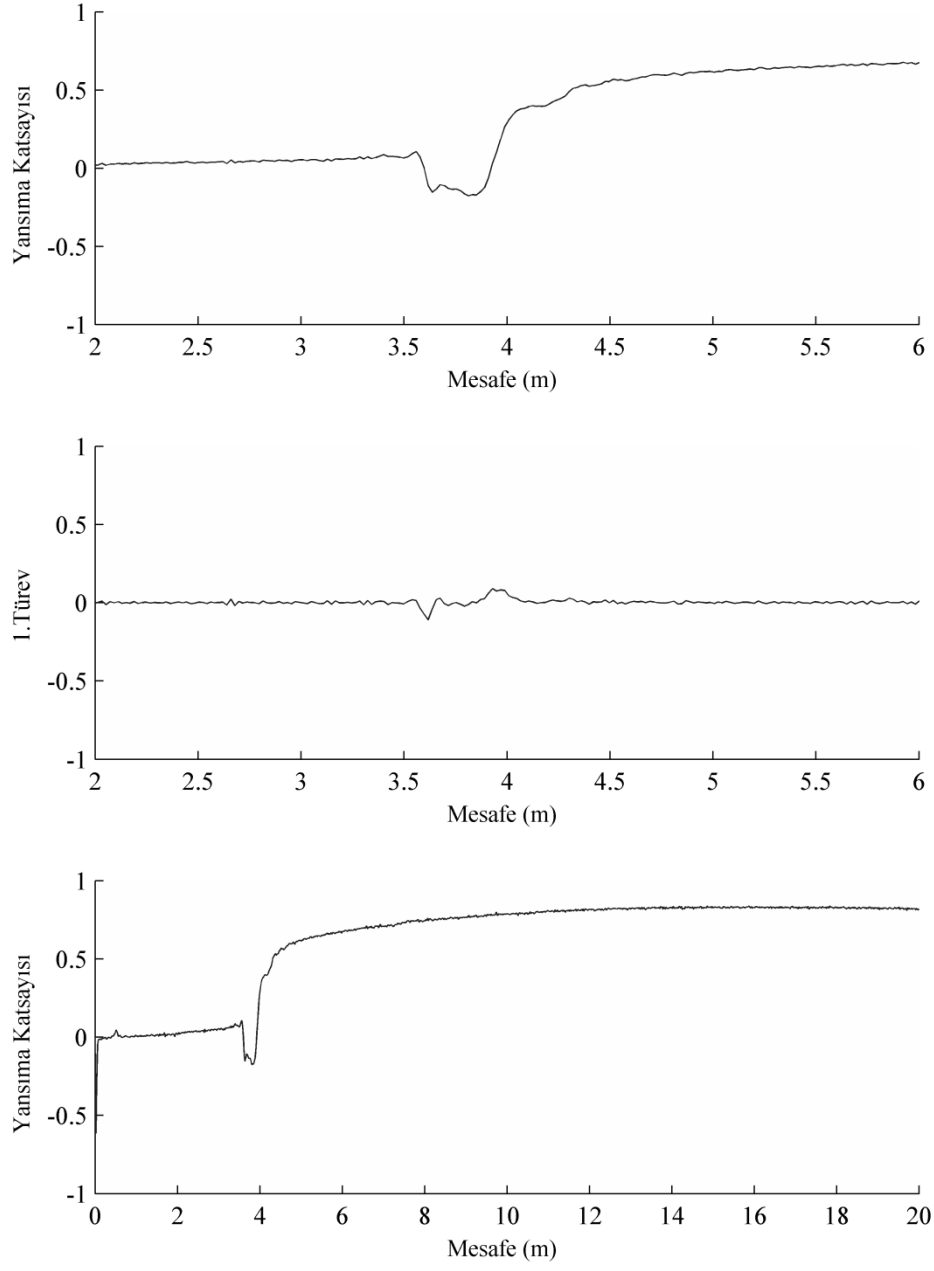
Şekil C.29. SP-3 türü zemin için kompaksiyon deney no:7 TDR ölçümleri



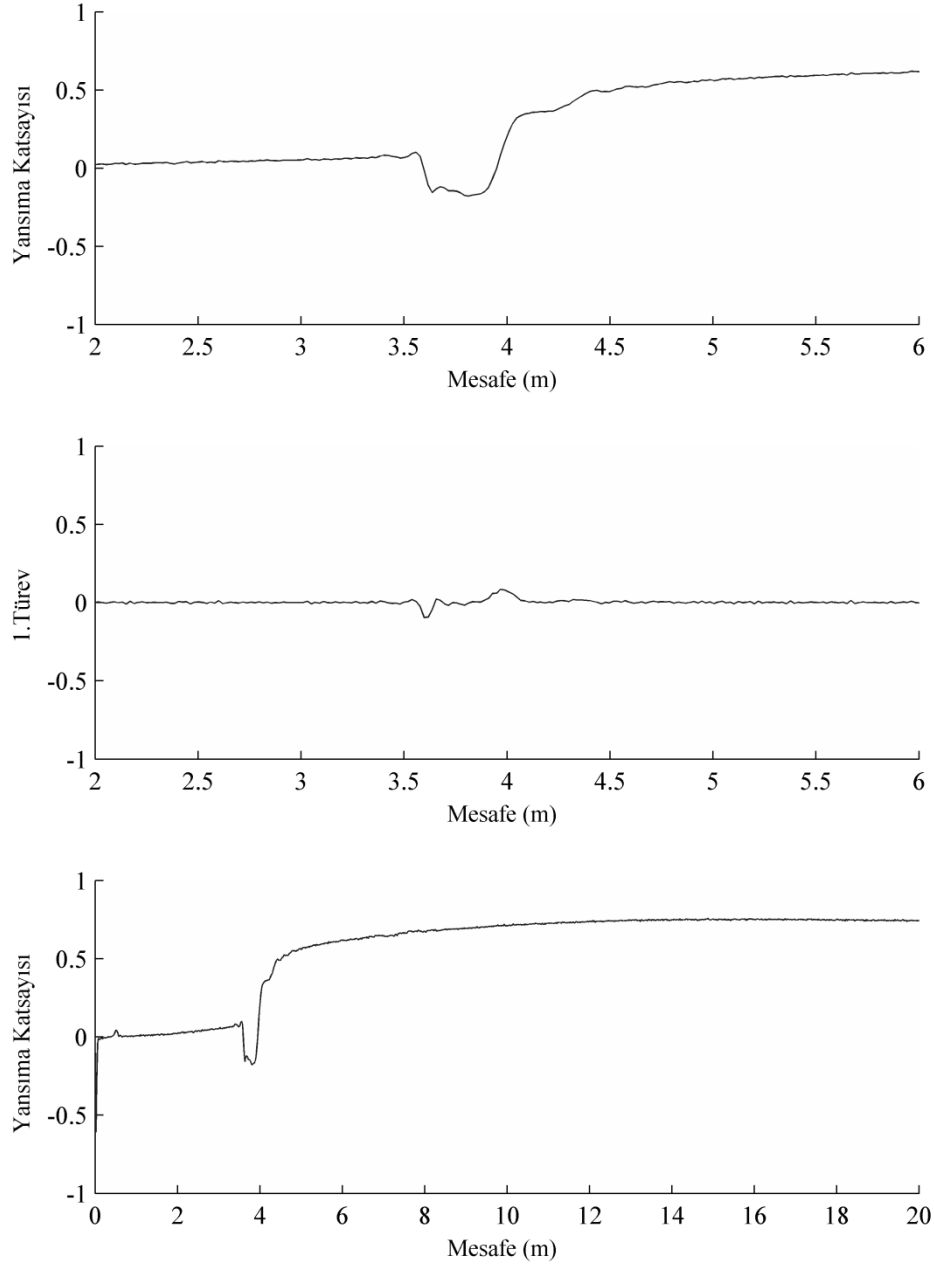
Şekil C.30. SP-3 türü zemin için kompaksiyon deney no:8 TDR ölçümleri



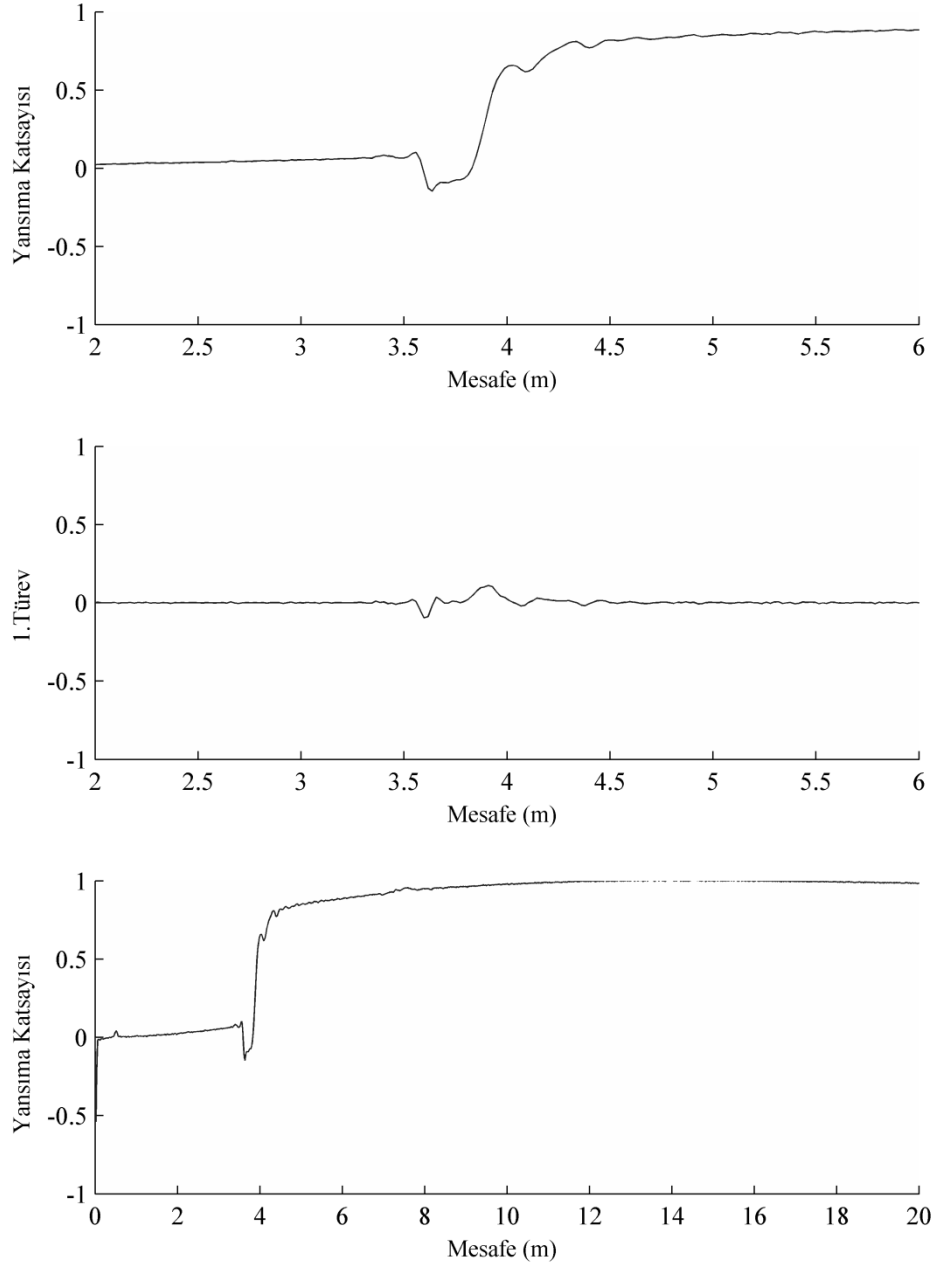
Şekil C.31. SP-3 türü zemin için kompaksiyon deney no:9 TDR ölçümleri



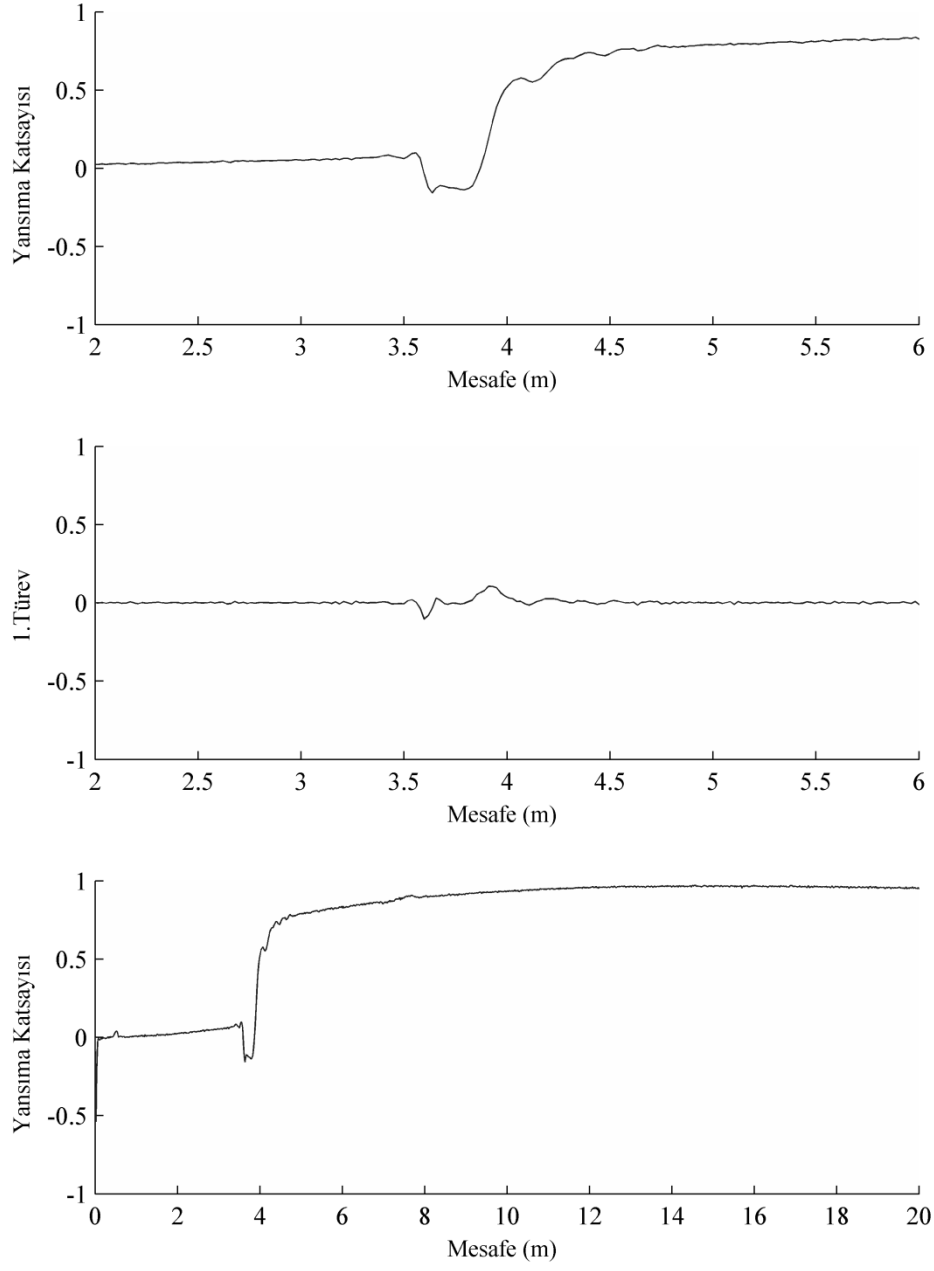
Şekil C.32. SP-3 türü zemin için kompaksiyon deney no:10 TDR ölçümleri



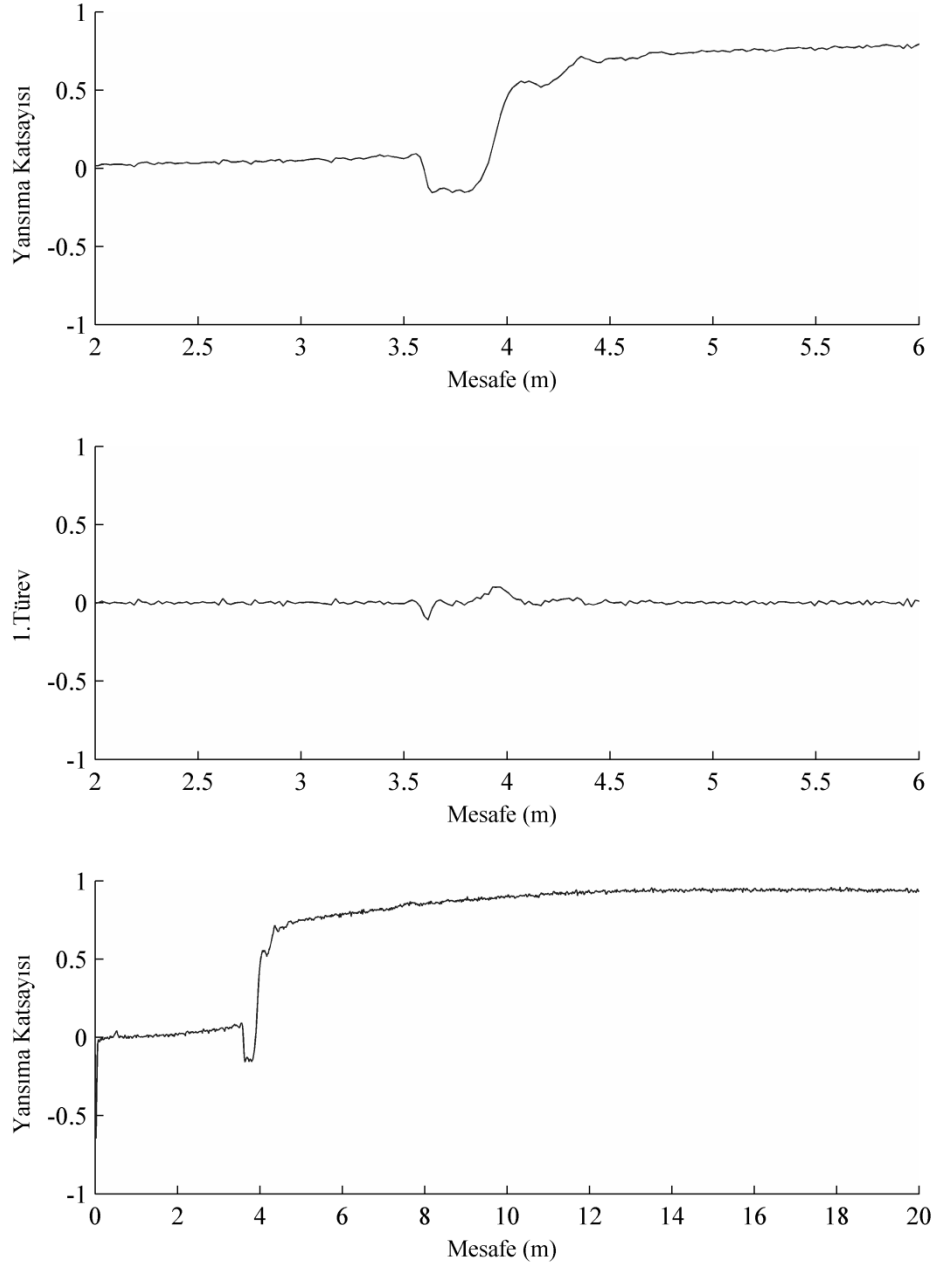
Şekil C.33. SP-3 türü zemin için kompaksiyon deney no:11 TDR ölçümleri



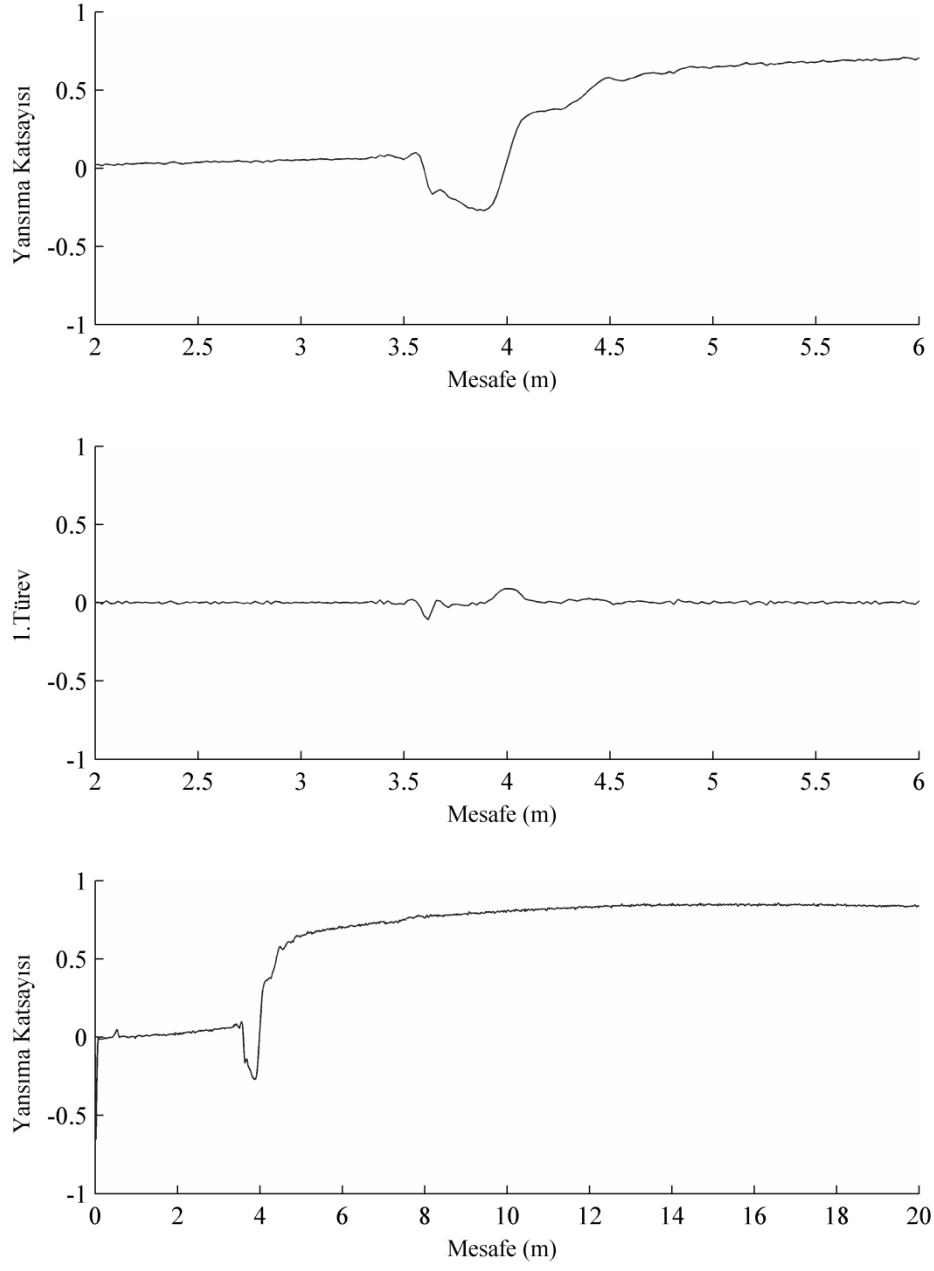
Şekil C.34. SP-4 türü zemin için kompaksiyon deney no:1 TDR ölçümleri



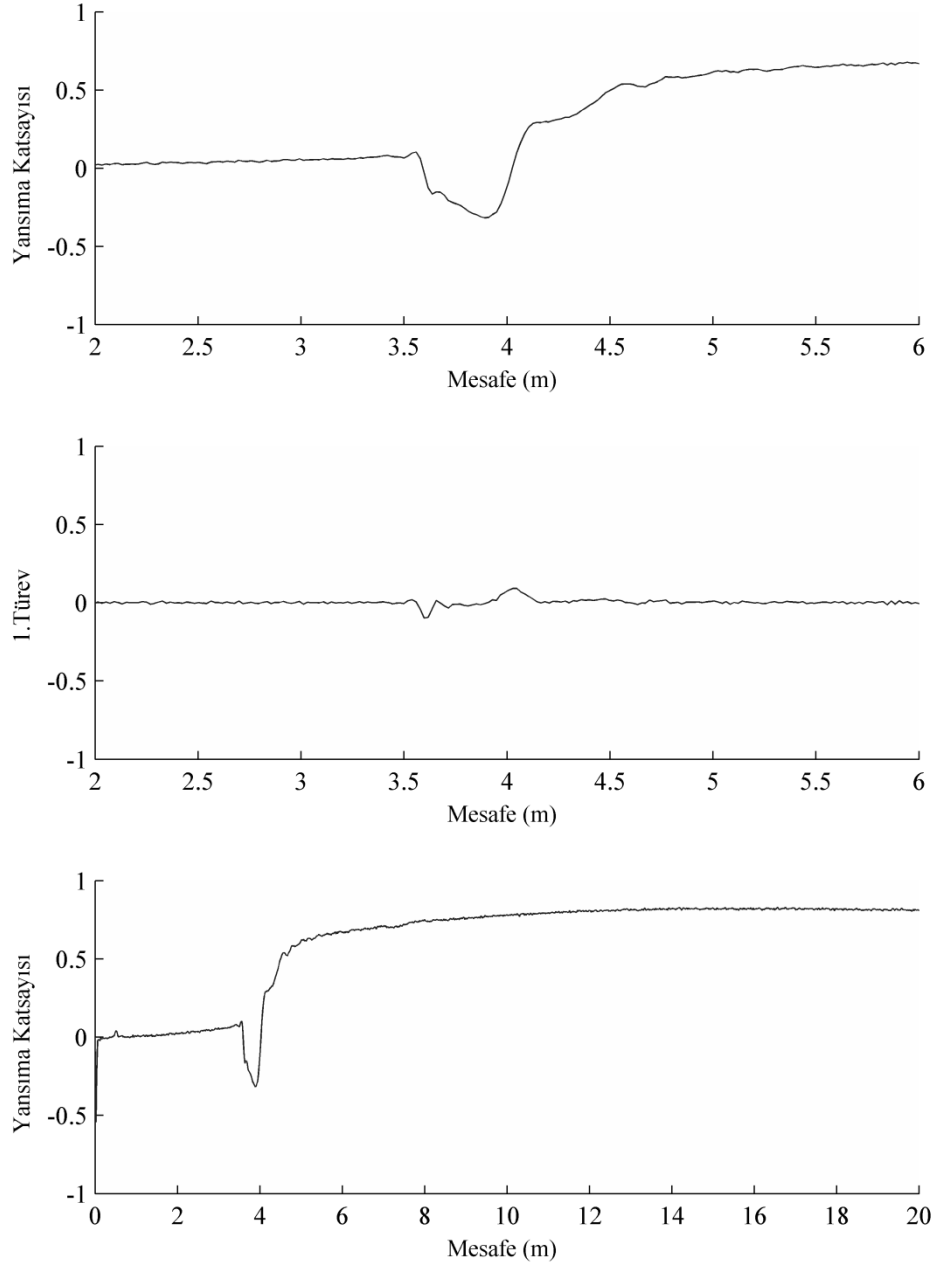
Şekil C.35. SP-4 türü zemin için kompaksiyon deney no:2 TDR ölçümleri



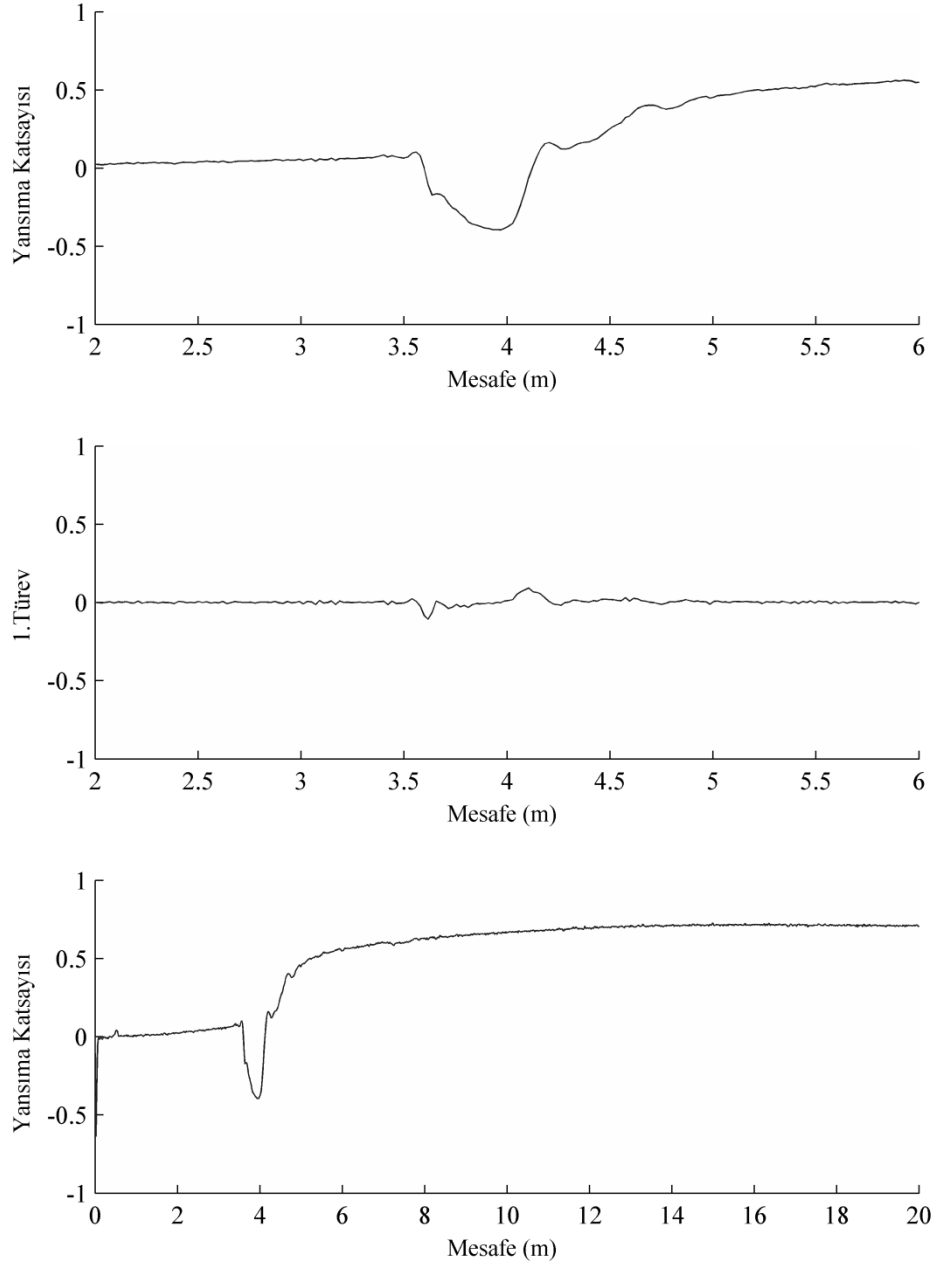
Şekil C.36. SP-4 türü zemin için kompaksiyon deney no:3 TDR ölçümleri



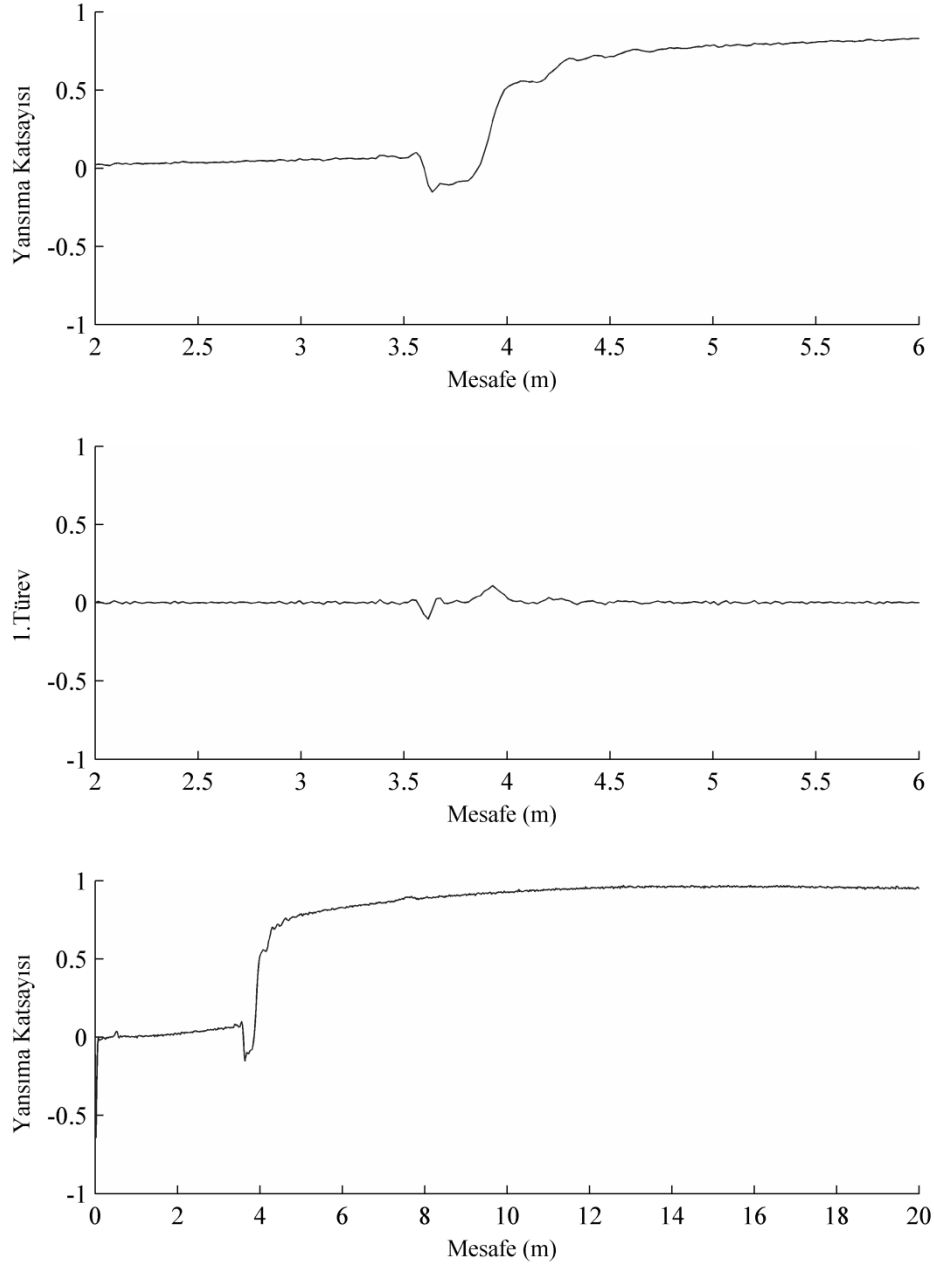
Şekil C.37. SP-4 türü zemin için kompaksiyon deney no:4 TDR ölçümleri



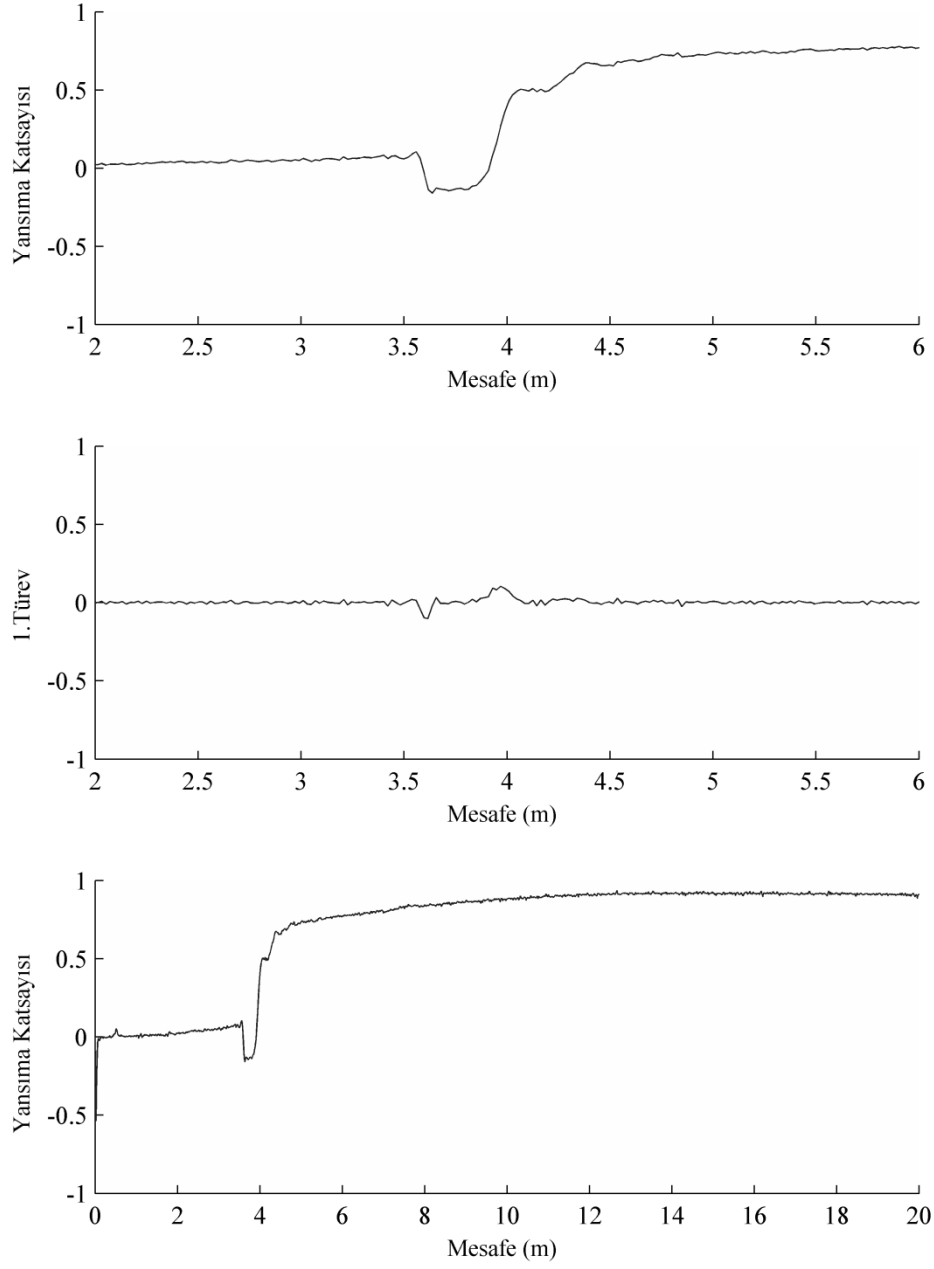
Şekil C.38. SP-4 türü zemin için kompaksiyon deney no:5 TDR ölçümleri



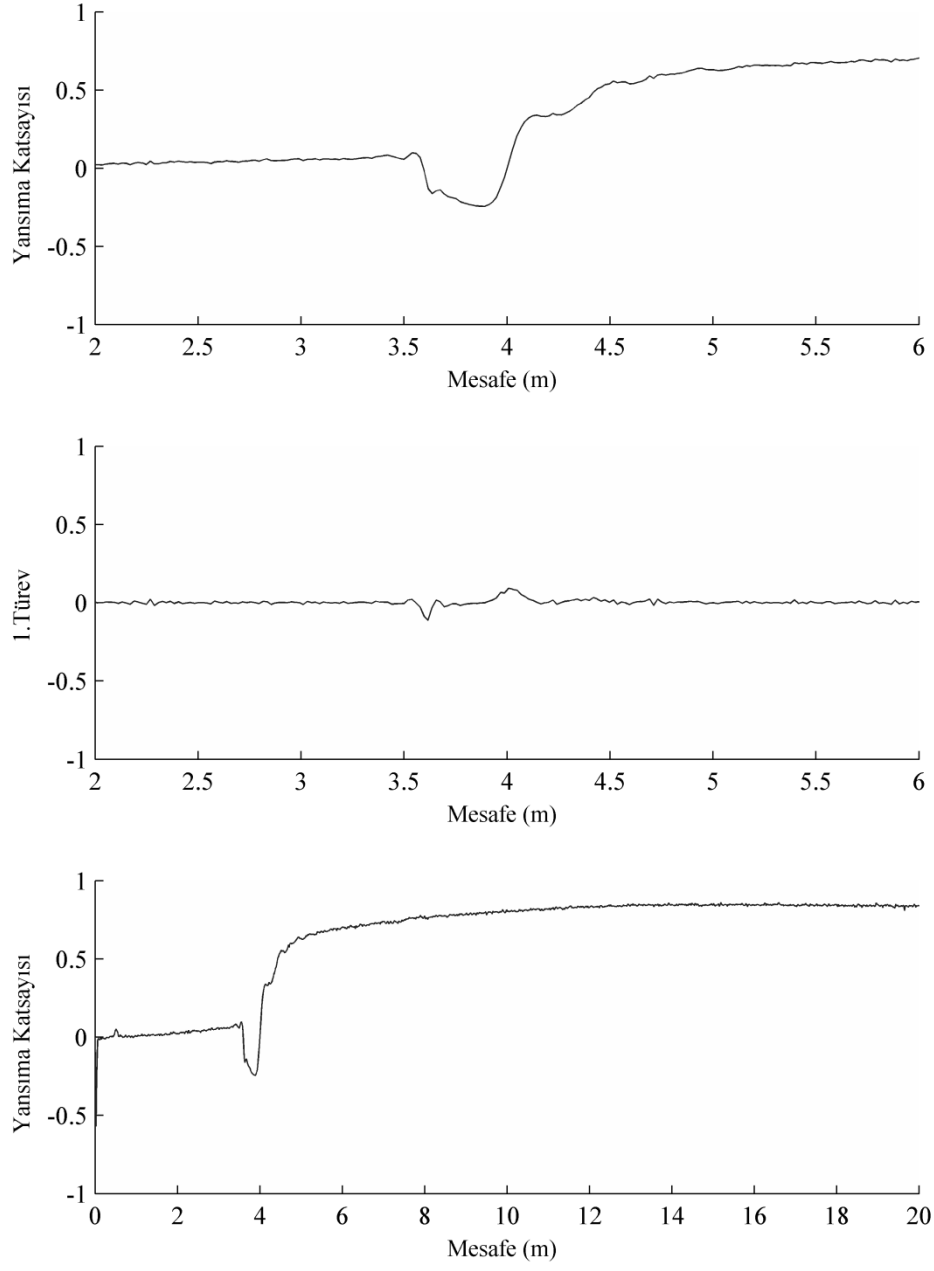
Şekil C.39. SP-4 türü zemin için kompaksiyon deney no:6 TDR ölçümleri



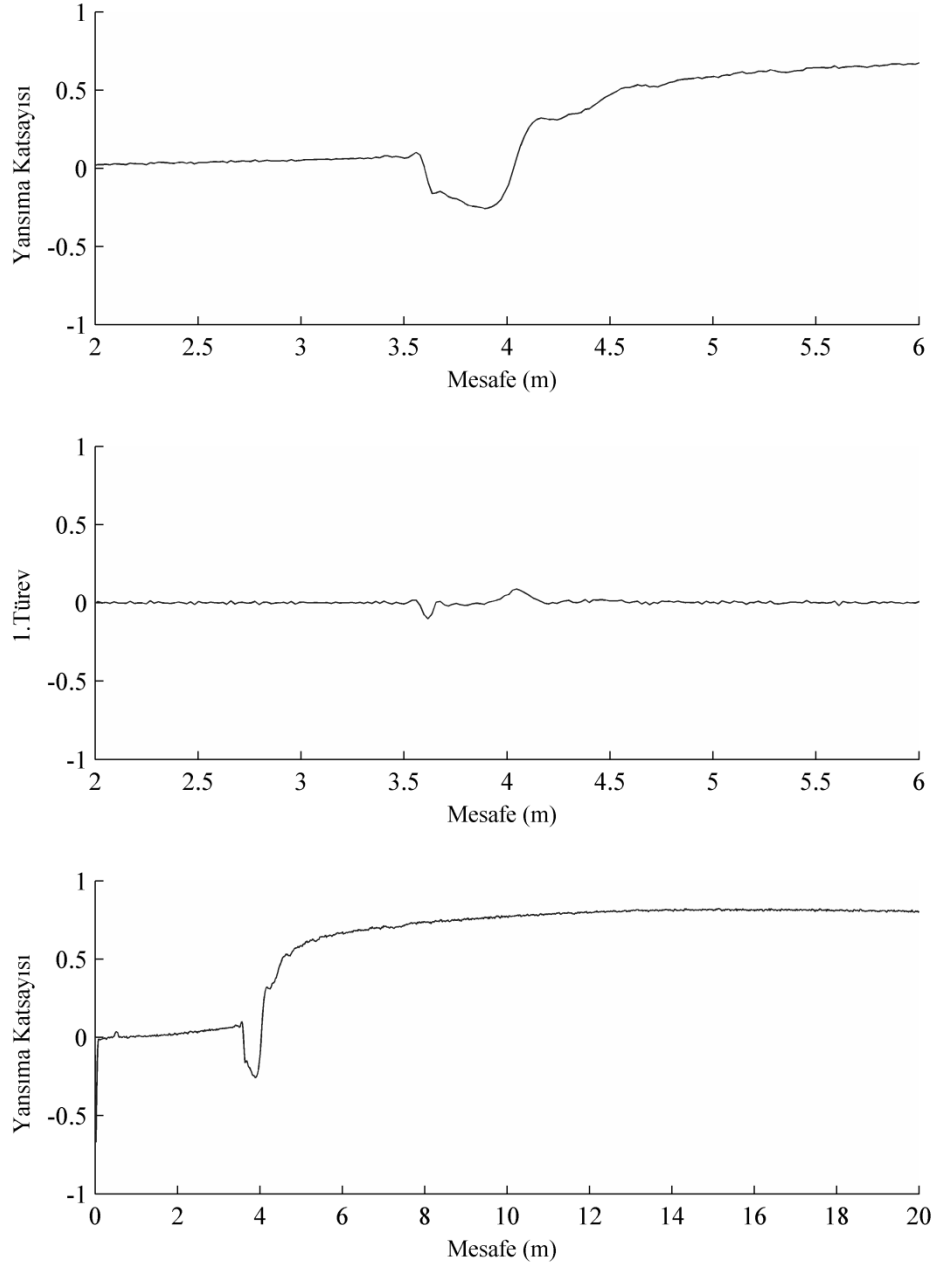
Şekil C.40. SP-4 türü zemin için kompaksiyon deney no:7 TDR ölçümleri



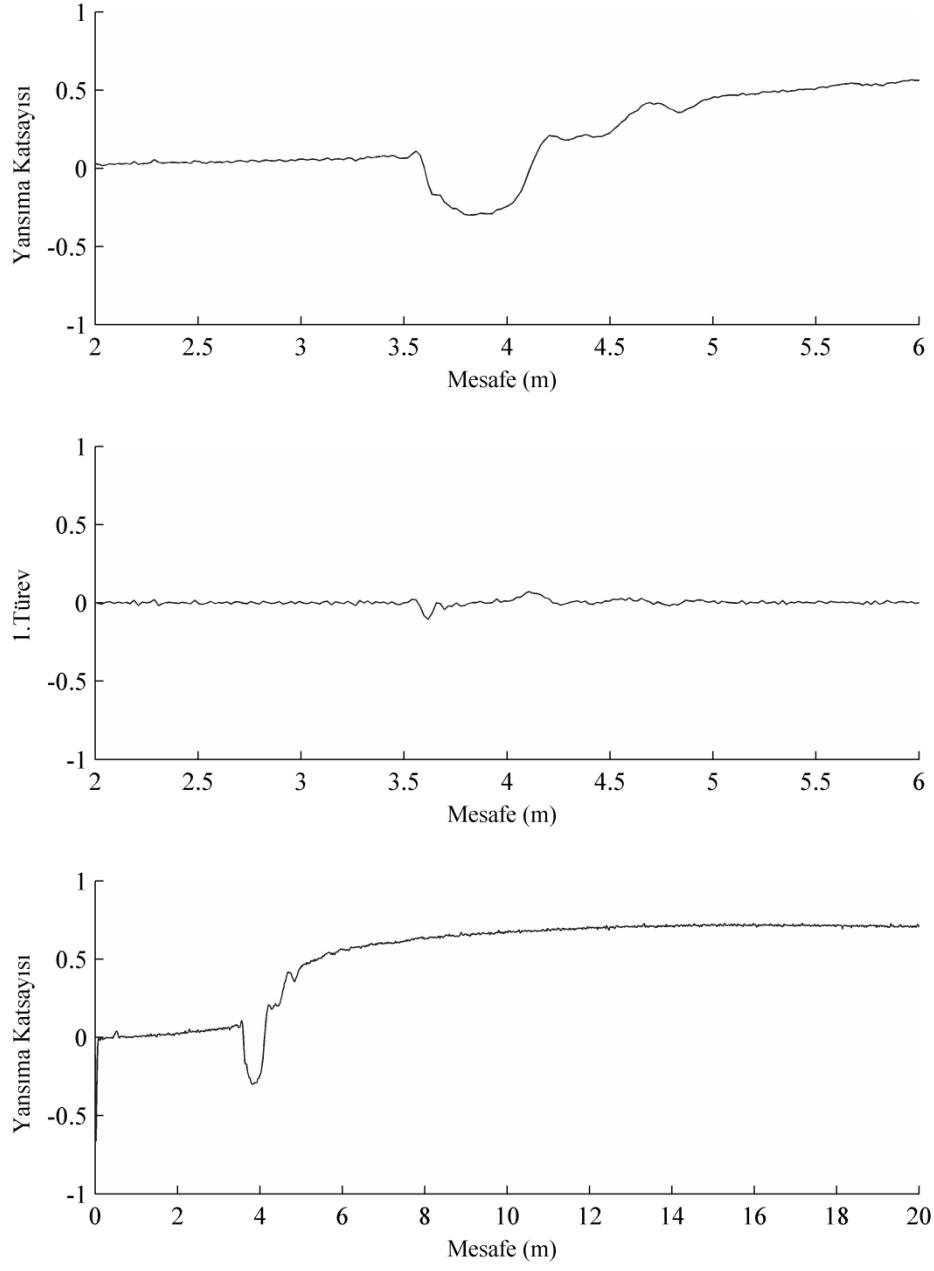
Şekil C.41. SP-4 türü zemin için kompaksiyon deney no:8 TDR ölçümleri



Şekil C.42. SP-4 türü zemin için kompaksiyon deney no:9 TDR ölçümleri



Şekil C.43. SP-4 türü zemin için kompaksiyon deney no:10 TDR ölçümleri



Şekil C.44. SP-4 türü zemin için kompaksiyon deney no:11 TDR ölçümleri

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] Arsoy S., Özgür M., **Keskin E.**, Yılmaz C., Enhacing TDR based water content measurements by ANN in sandy soils., *Geoderma*, 2013, **195-196**, 133-144.
- [2] Polat O., **Keskin E.**, Yılmaz C., Özgür M., Arsoy S., Effect of elevated temperature on behavior of cohesive soils, *7th International Symposium on Civil and Environmental Engineering*, European University of Lefke, Lefke, 29-30 November 2012.
- [3] Arsoy S., **Keskin E.**, Yılmaz C., Özgür M., Kurutmaya dayalı zemin su içeriği ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi*, İKÜ, İstanbul, 30 Eylül-1 Ekim 2010.
- [4] Arsoy S., Özgür M., **Keskin E.**, Yılmaz C., Accuracy of soil moisture content with ADR probes in saline soils, *10. International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances Conference*, The International Society for Electromagnetic Aquametry, Finland, 1-5 Haziran 2009.
- [5] **Keskin E.**, Turan B., Arsoy S., Isıl iyileştirme ve kireçle İyileştirmenin serbest basınç mukavemetine etkisi, *3.Geoteknik Sempozyumu*, TMMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Adana, 3-4 Aralık 2009.
- [6] Arsoy S., **Keskin E.**, Özgür M., Yılmaz C., TDR yöntemiyle zemin su içeriği belirleme yaklaşımlarının irdelenmesi, *3.Geoteknik Sempozyumu*, TMMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Adana, 3-4 Aralık 2009.
- [7] Arsoy S., Yılmaz C., **Keskin E.**, Özgür M., İnfrared lambası kullanılarak zeminlerin su içeriğinin tespit edilmesi, *3.Geoteknik Sempozyumu*, TMMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Adana, 3-4 Aralık 2009.
- [8] Arsoy S., Yılmaz C., **Keskin E.**, Özgür M., Zemin su içeriğinin elektromanyetik yöntemlerle belirlenmesi", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12.Ulusal Kongresi*, Selçuk Üniversitesi, Konya, 16-17 Ekim 2008.
- [9] Arsoy S., Özgür M., Yılmaz C., **Keskin E.**, ADR yöntemiyle belirlenen su içeriğine tuzluluğun etkisi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12.Ulusal Kongresi*, Selçuk Üniversitesi, Konya, 16-17 Ekim 2008.
- [10] Arsoy S., Engin S., **Keskin E.**, Killi zeminde oturan derzsiz bir köprüdeki sıcaklık değişiminin parametrik incelenmesi", *Köprü ve Viyadükler Sempozyumu*, İnşaat Mühendisleri Odası, Antalya, 29-30 Kasım 2007.

- [11]Arsoy S., Yılmaz C., **Keskin E.**, Zeminlerin dielektrik özelliklerine bağlı olarak su içeriklerinin belirlenmesi, *2.Geoteknik Sempozyumu*, TMMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Adana, 1-2 Aralık 2007.
- [12]Arsoy S., **Keskin E.**, Yılmaz C., Permeabilite ve konsolidasyon deneyleri ile elde edilen permeabilite katsayılarının karşılaştırılması", *2.Geoteknik Sempozyumu*, TMMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Adana, 1-2 Aralık 2007.
- [13]Arsoy S., **Keskin E.**, Yılmaz C., Çevresel tarımsal ve peyzaj sulamalarında sensör kullanımıyla su kaynaklarının tasarrufu", *Uluslararası Küresel İklim Değişikliği ve Çevresel Etkileri Sempozyumu*, Konya, 18-20 Ekim 2007.
- [14]**Keskin E.**, Arsoy S., Yılmaz C., Investigation effect of permeation grouting on shear strength of soil via direct shear device, *International Earthquake Symposium*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 22-24 October 2007.
- [15]Arsoy S., Yılmaz C., **Keskin E.**, Arazi kullanımında taşıma gücü ve oturma kriterlerinin kullanılması - bir vak'a analizi", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 15-16 Eylül 2006.
- [16]Arsoy S., **Keskin E.**, Yılmaz C., Granüler zeminde gerilme-şekil değiştirme eğrileri için önerilen normalleştirilmiş universal bağıntılar, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 15-16 Eylül 2006.
- [17]Kavak A., **Keskin E.**, Akyarlı A., Lime stabilization for road constructions: recent applications in Turkey, *2. International Symposium Treatment Recycling of Materials for Transport Infrastructure*, French Lime Association, France, 24-26 October 2005.
- [18]Kavak A., **Keskin E.**, Yılmaz C., Mutman U., Lime stabilization and its effects on road cross-section, *Proceedings of International Conference on Problematic Soils*, Eastern Mediterranean University, North Cyprus, 25-27 May 2005.
- [19]Kavak A., Mutman U., **Keskin E.**, Granüler zeminlerde çimento enjeksiyonu, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 12-14 Mart 2005.
- [20]Kavak A., **Keskin E.**, Kocaeli 1999 depremi öncesi zemin koşullarına bağlı bina hasarlarının incelenmesi, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 12-14 Mart 2003.
- [21]Kavak A., **Keskin E.**, Yüksek su içeriğinde killi bir zeminin kireç stabilizasyonu ile iyileştirilmesi ve yol kesimine etkileri, *XI.Kil Sempozyumu*, Ege Üniversitesi, İzmir, 3-6 Eylül 2003.
- [22]Kavak A., Yılmaz C., **Keskin E.**, Mutman U., Otoyol alt temeli dolgularında kullanılacak yuvarlak ve köşeli dolgu malzemelerinin karşılaştırılması, *3.Kentsel Altyapı Ulusal Sempozyumu*, Eskişehir, 11-12 Ekim 2001.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Kocaeli’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli’de tamamladı. 1997 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2001 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2001-2004 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Eğitimini tamamladı. 2003 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.