

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ADR YÖNTEMİNİN GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİ

CÜNEYT YILMAZ

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ADR YÖNTEMİNİN GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİ

CÜNEYT YILMAZ

Prof.Dr. Sami ARSOY	
Danışman,	Kocaeli Üniversitesi
	
Doç.Dr. Utkan MUTMAN	
Jüri Üyesi,	Kocaeli Üniversitesi
	
Doç.Dr. Ertan PEKŞEN	
Jüri Üyesi,	Kocaeli Üniversitesi
	
Dr.Öğr.Üyesi Erdinç KESKİN	
Jüri Üyesi,	Kırklareli Üniversitesi
	
Dr.Öğr.Üyesi Mehmet ÖZGÜR	
Jüri Üyesi,	Çanakkale Onsekiz Mart Üniv.
	

Tezin Savunulduğu Tarih: 04.09.2020

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İnşaat Mühendisliği uygulamalarında, zeminlerin su içeriğini ve kuru yoğunluğunu güvenilir, hızlı ve doğru bir şekilde saptamak büyük önem arz etmektedir. bu kapsamda, su içeriği ve kuru yoğunluğun belirlenmesi için bir çok yöntem mevcuttur. Fakat, bu yöntemlerin çoğunda sonuç elde etmek uzun sürmektedir. Bu nedenle alternatif olarak elektriksel tabanlı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, zeminlerin dielektrik katsayılarına bağlı olarak su içeriği ve kuru yoğunluğu tahmin etmeye çalışan yöntemlerdir. Bu çalışmada bu yöntemlerden biri olan ADR (Amplitude Domain Reflectometry) yöntemi üzerinde çalışılmıştır.

Sabırlı, hakkaniyetli ve insan odaklı yaklaşımıyla motivasyonumu arttıran, birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sami ARSOY'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde bulunan ve tez çalışmam süresince desteğini, bilgi ve tecrübesini esirgemeyen değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Utkan MUTMAN ile Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ertan PEKŞEN'e katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyerek çalışmamda çok büyük katkıları olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Erdinç KESKİN ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÖZGÜR'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Dr. Onur ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Sadece tez çalışmam süresince değil tüm yaşantım boyunca her daim yanımda olan annem Ayşe YILMAZ, babam Hayrettin YILMAZ'a tüm çaba ve emekleri için teşekkürü bir borç bilirim.

Ağustos – 2020

Cüneyt YILMAZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
TABLolar DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xvii
GİRİŞ	1
1. SU İÇERİĞİ VE KURU YOĞUNLUK ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	3
1.1. Gravimetrik Yöntem	3
1.2. Enerji – Potansiyel Yöntemi	4
1.3. Hacimsel Yöntem.....	6
1.4. Kuru Yoğunluk	6
1.5. Zemin Suyu Karakteristiği.....	7
1.6. Su İçeriği Ölçüm Yöntemleri.....	8
1.6.1. Laboratuvar etüv yöntemi (ASTM D2216)	8
1.6.2. Mikrodalga yöntemi (ASTM D4643).....	9
1.6.3. Doğrudan ısı yöntemi (ASTM D4959).....	10
1.6.4. Kalsiyum karpit gaz basıncı yöntemi (ASTM D4944).....	10
1.6.5. Nükleer yöntem (Sığ derinlik) (ASTM D3017)	12
1.7. Yoğunluğun Yerinde Tespiti Yöntemleri	12
1.7.1. Nükleer yöntem (ASTM D5195)	12
1.7.2. Kum konisi yöntemi (ASTM D1556).....	14
1.7.3. Balon yöntemi (Rubber balloon method) (ASTM D2167).....	15
1.7.4. Silindir yöntemi (Drive cylinder method) (ASTM D2937)	16
2. ZEMİNLERİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ.....	18
2.1. Dielektrik Özellikler	18
2.2. Dielektrik Katsayısı.....	21
2.3. Dielektrik Kayıp Faktörü.....	22
2.4. Frekansın Etkisi.....	23
2.5. Dielektrik Ölçümlere Sıcaklığın Etkisi	25
3. TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY) YÖNTEMİ.....	26
3.1. TDR Yönteminin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı	28
3.1.1. TDR yöntemi ile zeminlerin dielektrik katsayılarının bulunması.....	28
3.1.2. Dielektrik katsayısı su içeriği ilişkisi.....	30
3.1.3. TDR yöntemi ile zeminlerin elektriksel iletkenliklerinin bulunması.....	32
3.1.4. TDR ile su içeriği ve kuru yoğunluğun bulunması	34
4. ADR (AMPLITUDE DOMAIN REFLECTOMETRY) YÖNTEMİ.....	37
4.1. Theta Probun Özellikleri	37
4.2. Theta Probun Çalışma Prensibi.....	38
4.3. ADR Yönteminin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı.....	40

4.3.1.	ADR yöntemi ile zeminlerin dielektrik katsayılarının bulunması.....	40
4.3.2.	ADR ile su içeriğinin ve kuru yoğunluğunun bulunması	42
5.	MALZEME VE YÖNTEM	46
5.1.	Malzeme	46
5.2.	Deney Prosedürü	47
5.3.	Yöntem	49
5.4.	Su İçeriği ve Kuru Yoğunluğun ADR Yöntemi ile Belirlenmesi	50
5.4.1.	$\varepsilon^{0,5}$ ile $(\varepsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ arasındaki ilişkinin belirlenmesi	51
5.4.2.	Hacimsel su içeriğinin bulunması	52
5.4.3.	Kuru yoğunluğun bulunması.....	53
5.4.4.	Gravimetrik su içeriğinin bulunması	53
6.	KALİBRASYON VE TEST DENEY SONUÇLARI	54
6.1.	Aynı Enerji Seviyesinde Yapılan Çalışmalar	54
6.1.1.	Kum – kaolin karışımları	54
6.1.1.1.	%100 kum kalibrasyon numunesi.....	55
6.1.1.2.	%100 kum test numunesi	57
6.1.1.3.	%75 kum + %25 kaolin kalibrasyon numunesi	60
6.1.1.4.	%75 kum + %25 kaolin test numunesi.....	62
6.1.1.5.	%50 kum + %50 kaolin kalibrasyon numunesi	65
6.1.1.6.	%50 kum + %50 kaolin test numunesi.....	66
6.1.1.7.	%25 kum + %75 kaolin kalibrasyon numunesi	69
6.1.1.8.	%25 kum + %75 kaolin test numunesi.....	71
6.1.1.9.	%100 kaolin kalibrasyon numunesi	74
6.1.1.10.	%100 kaolin test numunesi.....	76
6.1.2.	Kum – kil karışımları.....	79
6.1.2.1.	%75 kum + %25 kil kalibrasyon numunesi	79
6.1.2.2.	%75 kum + %25 kil test numunesi	81
6.1.2.3.	%50 kum + %50 kil kalibrasyon numunesi	84
6.1.2.4.	%50 kum + %50 kil test numunesi	85
6.1.2.5.	%25 kum + %75 kil kalibrasyon numunesi	88
6.1.2.6.	%25 kum + %75 kil test numunesi	90
6.1.2.7.	%100 kil kalibrasyon numunesi	93
6.1.2.8.	%100 kil test numunesi	94
6.2.	Farklı Enerji Seviyelerinde Yapılan Çalışmalar	97
6.2.1.	İnce ve kum grubu zeminler üzerinde yapılan kalibrasyon çalışmaları.....	98
6.2.2.	CH zemini test numuneleri	100
6.2.3.	CI zemini test numuneleri.....	105
6.2.4.	CL zemini test numuneleri.....	110
6.2.5.	MH zemini test numuneleri.....	114
6.2.6.	MI zemini test numuneleri	119
6.2.7.	ML zemini test numuneleri	124
6.2.8.	SP zemini test numuneleri.....	129
6.2.9.	SW zemini test numuneleri	134
6.2.10.	SP-SM zemini test numuneleri.....	138
6.2.11.	SP-SC zemini test numuneleri.....	143
6.2.12.	SW-SM zemini test numuneleri	148
6.2.13.	SW-SC zemini test numuneleri	152

6.2.14. SM zemini test numuneleri	157
6.2.15. SC zemini test numuneleri	162
7. DENEY SONUÇLARI.....	167
7.1. Kum – Kaolin Karışımları	167
7.2. Kum – Kıl Karışımları.....	172
7.3. Kıl Grubu (CH, CI ve CL) Zeminler	177
7.4. Silt Grubu (MH, MI ve ML) Zeminler	180
7.5. SP ve SW Zeminleri.....	184
7.6. Çift Simgeli Zeminler.....	187
7.7. SM ve SC Zeminler.....	191
8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	195
KAYNAKLAR.....	198
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	204
ÖZGEÇMİŞ.....	206



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Tipik bir mikrodalga fırın	9
Şekil 1.2.	Rezistanslı elektrik ocağı	10
Şekil 1.3.	Kalsiyum karpit gaz basıncı deney aparatı	11
Şekil 1.4.	Nükleer test cihazı	13
Şekil 1.5.	Kum Konisi deney aparatı	14
Şekil 1.6.	Balon yöntemi deney seti.....	15
Şekil 1.7.	Silindir yöntemi deney aparatları	16
Şekil 2.1.	Elektriksel dipol	18
Şekil 2.2.	Elektronik polarizasyon	19
Şekil 2.3.	İyonik polarizasyon	19
Şekil 2.4.	Moleküler polarizasyon	20
Şekil 2.5.	Zeminin polarizasyonu a)mikroskobik polarizasyon b)makroskobik polarizasyon	20
Şekil 2.6.	Ölçüm frekansının dielektriğin gerçel ve sanal kısımları üzerindeki etkileri.....	24
Şekil 2.7.	Sıcaklığın dielektrik üzerindeki etkileri	25
Şekil 3.1.	TDR sistem konfigürasyonu	26
Şekil 3.2.	Örnek bir TDR kaydı.....	28
Şekil 3.3.	Tipik bir TDR ölçümü	29
Şekil 3.4.	Elektriksel iletkenlik için bazı voltaj adımları	32
Şekil 3.5.	TDR dalga formu ve kritik genlikler	36
Şekil 4.1.	Theta prob – ML2x kesiti	37
Şekil 4.2.	ML2x tipi prob için genlik farkı – dielektrik katsayısının karekökü arasındaki ilişki.....	41
Şekil 4.3.	Hacimsel su içeriklerinin karşılaştırılması.....	43
Şekil 4.4.	Doğal yoğunluğa bağlı belirlenen kuru yoğunlukları karşılaştırılması	45
Şekil 4.5.	Gravimetrik su içeriğine bağlı belirlenen kuru yoğunlukları karşılaştırılması.....	45
Şekil 5.1.	Theta prob ile ölçüm yapımı	48
Şekil 5.2.	Transfer fonksiyonu	52
Şekil 5.3.	Hacimsel su içeriği kalibrasyonu	52
Şekil 6.1.	%100 Kum için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi	55
Şekil 6.2.	%100 Kum için transfer fonksiyonu.....	56
Şekil 6.3.	%100 kum için hacimsel su içeriği değerleri	58
Şekil 6.4.	%100 kum için kuru yoğunluk değerleri	59
Şekil 6.5.	%100 kum için gravimetrik su içeriği değerleri.....	60
Şekil 6.6.	%75 kum + %25 kaolin için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi.....	61
Şekil 6.7.	%75 kum + %25 kaolin için transfer fonksiyonu.....	62
Şekil 6.8.	%75 kum + %25 kaolin için hacimsel su içeriği değerleri	63
Şekil 6.9.	%75 kum + %25 kaolin için kuru yoğunluk değerleri	64
Şekil 6.10.	%75 Kum + %25 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri	64

Şekil 6.11.	%50 Kum + %50 kaolin için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi	65
Şekil 6.12.	%50 kum + %50 kaolin için transfer fonksiyonu.....	66
Şekil 6.13.	%50 kum + %50 kaolin için hacimsel su içeriği değerleri	67
Şekil 6.14.	%50 kum + %50 kaolin için kuru yoğunluk değerleri	68
Şekil 6.15.	%50 kum + %50 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri.....	69
Şekil 6.16.	%25 kum + %75 kaolin için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi	70
Şekil 6.17.	%25 kum + %75 kaolin için transfer fonksiyonu.....	71
Şekil 6.18.	%25 kum + %75 kaolin için hacimsel su içeriği değerleri	72
Şekil 6.19.	%25 kum + %75 kaolin için kuru yoğunluk değerleri	73
Şekil 6.20.	%25 kum + %75 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri	74
Şekil 6.21.	%100 kaolin için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi	75
Şekil 6.22.	%100 kaolin için transfer fonksiyonu.....	76
Şekil 6.23.	%100 kaolin için hacimsel su içeriği değerleri	77
Şekil 6.24.	%100 kaolin için kuru yoğunluk değerleri	78
Şekil 6.25.	%100 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri	79
Şekil 6.26.	%75 kum + %25 kil için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi	80
Şekil 6.27.	%75 Kum + %25 kil için transfer fonksiyonu	81
Şekil 6.28.	%75 kum + %25 kil için hacimsel su içeriği değerleri.....	82
Şekil 6.29.	%75 kum + %25 kil için kuru yoğunluk değerleri	83
Şekil 6.30.	%75 kum + %25 kil için gravimetrik su içeriği değerleri	83
Şekil 6.31.	%50 kum + %50 kil için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi	84
Şekil 6.32.	%50 kum + %50 kil için transfer fonksiyonu	85
Şekil 6.33.	%50 kum + %50 kil için hacimsel su içeriği değerleri.....	86
Şekil 6.34.	%50 kum + %50 kil için kuru yoğunluk değerleri.....	87
Şekil 6.35.	%50 kum + %50 kil için gravimetrik su içeriği değerleri	88
Şekil 6.36.	%25 kum + %75 kil için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi	89
Şekil 6.37.	%25 kum + %75 kil için transfer fonksiyonu	90
Şekil 6.38.	%25 Kum + %75 Kil için Hacimsel Su İçeriği Değerleri	91
Şekil 6.39.	%25 kum + %75 kil için kuru yoğunluk değerleri	92
Şekil 6.40.	%50 kum + %50 kil için gravimetrik su içeriği değerleri	92
Şekil 6.41.	%100 kil için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi	93
Şekil 6.42.	%100 kil için transfer fonksiyonu	94
Şekil 6.43.	%100 kil için hacimsel su içeriği değerleri.....	95
Şekil 6.44.	%100 kil için kuru yoğunluk değerleri	96
Şekil 6.45.	%100 kil için gravimetrik su içeriği değerleri	97
Şekil 6.46.	İnce gruba zeminler için dielektrik – hacimsel su içeriği ilişkisi	98
Şekil 6.47.	Kum gruba zeminler için dielektrik – hacimsel su içeriği ilişkisi	99
Şekil 6.48.	İnce gruba için transfer fonksiyonları	99
Şekil 6.49.	Kum gruba için transfer fonksiyonları	100
Şekil 6.50.	CH için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)	101
Şekil 6.51.	CH için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	101
Şekil 6.52.	CH için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	102
Şekil 6.53.	CH için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	103
Şekil 6.54.	CH için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	104
Şekil 6.55.	CH için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)	105
Şekil 6.56.	CI için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	106
Şekil 6.57.	CI için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	107

Şekil 6.58.	CI için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	107
Şekil 6.59.	CI için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı).....	108
Şekil 6.60.	CI için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	109
Şekil 6.61.	CI için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)	109
Şekil 6.62.	CL için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	110
Şekil 6.63.	CL için kuru yoğunluk değerleri (gevşek).....	111
Şekil 6.64.	CL için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	112
Şekil 6.65.	CL için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı).....	113
Şekil 6.66.	CL için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	113
Şekil 6.67.	CL için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)	114
Şekil 6.68.	MH için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)	115
Şekil 6.69.	MH için kuru yoğunluk değerleri (gevşek).....	116
Şekil 6.70.	MH için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek).....	116
Şekil 6.71.	MH için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	117
Şekil 6.72.	MH için kuru yoğunluk değerleri (sıkı).....	118
Şekil 6.73.	MH için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)	118
Şekil 6.74.	MI için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	119
Şekil 6.75.	MI için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	120
Şekil 6.76.	MI için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	121
Şekil 6.77.	MI için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	122
Şekil 6.78.	MI için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	123
Şekil 6.79.	MI için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı).....	123
Şekil 6.80.	ML için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	124
Şekil 6.81.	ML için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	125
Şekil 6.82.	ML için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	126
Şekil 6.83.	ML için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı).....	127
Şekil 6.84.	ML için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	128
Şekil 6.85.	ML için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı).....	128
Şekil 6.86.	SP için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)	129
Şekil 6.87.	SP için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	130
Şekil 6.88.	SP için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek).....	131
Şekil 6.89.	SP için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	132
Şekil 6.90.	SP için kuru yoğunluk değerleri (sıkı).....	133
Şekil 6.91.	SP için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)	133
Şekil 6.92.	SW için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	134
Şekil 6.93.	SW için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	135
Şekil 6.94.	SW için gravimetrik değerleri (gevşek).....	136
Şekil 6.95.	SW için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı).....	137
Şekil 6.96.	SW için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	137
Şekil 6.97.	SW için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı).....	138
Şekil 6.98.	SP-SM için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)	139
Şekil 6.99.	SP-SM için kuru yoğunluk değerleri (gevşek).....	140
Şekil 6.100.	SP-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	141
Şekil 6.101.	SP-SM için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	141
Şekil 6.102.	SP-SM için kuru yoğunluk değerleri (sıkı).....	142
Şekil 6.103.	SP-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)	143
Şekil 6.104.	SP-SC için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)	144
Şekil 6.105.	SP-SC için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	144
Şekil 6.106.	SP-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek).....	145

Şekil 6.107.	SP-SC için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	146
Şekil 6.108.	SP-SC için kuru yoğunluk değerleri (sıkı).....	147
Şekil 6.109.	SP-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)	147
Şekil 6.110.	SW-SM için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	148
Şekil 6.111.	SW-SM için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	149
Şekil 6.112.	SW-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek).....	150
Şekil 6.113.	SW-SM için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	150
Şekil 6.114.	SW-SM için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	151
Şekil 6.115.	SW-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı).....	152
Şekil 6.116.	SW-SC için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	153
Şekil 6.117.	SW-SC için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	154
Şekil 6.118.	SW-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	154
Şekil 6.119.	SW-SC için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı).....	155
Şekil 6.120.	SW-SC için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	156
Şekil 6.121.	SW-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı).....	157
Şekil 6.122.	SM için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	158
Şekil 6.123.	SM için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	158
Şekil 6.124.	SM için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	159
Şekil 6.125.	SM için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	160
Şekil 6.126.	SM için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	161
Şekil 6.127.	SM için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı).....	161
Şekil 6.128.	SC için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	162
Şekil 6.129.	SC için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	163
Şekil 6.130.	SC için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	164
Şekil 6.131.	SC için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	165
Şekil 6.132.	SC için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	165
Şekil 6.133.	SC için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı).....	166
Şekil 7.1.	Kum – kaolin karışımları hacimsel su içeriği	169
Şekil 7.2.	Kum-kaolin hacimsel su içeriği hata miktarları.....	169
Şekil 7.3.	Kum – kaolin karışımları kuru yoğunluk.....	170
Şekil 7.4.	Kum-kaolin kuru yoğunluk hata miktarları	171
Şekil 7.5.	Kum – kaolin karışımları gravimetrik su içeriği	171
Şekil 7.6.	Kum-kaolin gravimetrik su içeriği hata miktarları.....	172
Şekil 7.7.	Kum – kil karışımları hacimsel su içeriği.....	174
Şekil 7.8.	Kum-kil hacimsel su içeriği hata miktarları	174
Şekil 7.9.	Kum – kil karışımları kuru yoğunluk	175
Şekil 7.10.	Kum-kil kuru yoğunluk hata miktarları.....	175
Şekil 7.11.	Kum – kil karışımları gravimetrik su içeriği	176
Şekil 7.12.	Kum-kil gravimetrik su içeriği hata miktarları	176
Şekil 7.13.	Kil grubu hacimsel su içeriği	177
Şekil 7.14.	Kil grubu hacimsel su içeriği hata miktarları.....	178
Şekil 7.15.	Kil grubu kuru yoğunluk	178
Şekil 7.16.	Kil grubu kuru yoğunluk hata miktarları	179
Şekil 7.17.	Kil grubu gravimetrik su içeriği.....	179
Şekil 7.18.	Kil grubu gravimetrik su içeriği hata miktarları	180
Şekil 7.19.	Silt grubu hacimsel su içeriği.....	181
Şekil 7.20.	Silt grubu hacimsel su içeriği hata miktarları	181
Şekil 7.21.	Silt grubu kuru yoğunluk	182
Şekil 7.22.	Silt grubu kuru yoğunluk hata miktarları.....	182

Şekil 7.23.	Silt grubu gravimetrik su içeriği	183
Şekil 7.24.	Silt grubu gravimetrik su içeriği hata miktarları	183
Şekil 7.25.	SP ve SW zeminler hacimsel su içeriği	184
Şekil 7.26.	SP ve SW zeminler hacimsel su içeriği hata miktarları	185
Şekil 7.27.	SP ve SW zeminler kuru yoğunluk	185
Şekil 7.28.	SP ve SW zeminler kuru yoğunluk hata miktarları	186
Şekil 7.29.	SP ve SW zeminler gravimetrik su içeriği	187
Şekil 7.30.	SP ve SW zeminler gravimetrik su içeriği hata miktarları	187
Şekil 7.31.	Çift simgeli zeminler hacimsel su içeriği	188
Şekil 7.32.	Çift simgeli zeminler hacimsel su içeriği hata miktarları	188
Şekil 7.33.	Çift simgeli zeminler kuru yoğunluk	189
Şekil 7.34.	Çift simgeli zeminler kuru yoğunluk hata miktarları	189
Şekil 7.35.	Çift simgeli zeminler gravimetrik su içeriği	190
Şekil 7.36.	Çift simgeli zeminler gravimetrik su içeriği hata miktarları	190
Şekil 7.37.	SM ve SC zeminler hacimsel su içeriği	191
Şekil 7.38.	SM ve SC zeminler hacimsel su içeriği hata miktarları	191
Şekil 7.39.	SM ve SC zeminler kuru yoğunluk	192
Şekil 7.40.	SM ve SC zeminler kuru yoğunluk hata miktarları	192
Şekil 7.41.	SM ve SC zeminler gravimetrik su içeriği	193
Şekil 7.42.	SM ve SC zeminler gravimetrik su içeriği hata miktarları	194

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 4.1.	Theta prob – ML2x teknik özellikleri	38
Tablo 5.1.	İnce daneli zeminlerin geoteknik özellikleri.....	47
Tablo 5.2.	İri daneli zeminlerin geoteknik özellikleri.....	47
Tablo 5.3.	Kaolinin geoteknik özellikleri.....	47
Tablo 6.1.	%100 Kum için hacimsel su içeriği.....	55
Tablo 6.2.	%100 kum için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri.....	56
Tablo 6.3.	%100 kum için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri.....	57
Tablo 6.4.	%100 kum için kuru yoğunluk ADR ölçümleri.....	58
Tablo 6.5.	%100 kum için gravimetrik su içeriği değerleri.....	59
Tablo 6.6.	%75 kum + %25 kaolin için hacimsel su içeriği.....	60
Tablo 6.7.	%75 kum + %25 kaolin için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri.....	61
Tablo 6.8.	%75 kum + %25 kaolin için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri.....	62
Tablo 6.9.	%75 Kum + %25 kaolin için kuru yoğunluk ADR ölçümleri	63
Tablo 6.10.	%75 kum + %25 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri.....	64
Tablo 6.11.	%50 kum + %50 kaolin için hacimsel su içeriği.....	65
Tablo 6.12.	%50 kum + %50 kaolin için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri.....	66
Tablo 6.13.	%50 kum + %50 kaolin için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri.....	67
Tablo 6.14.	%50 kum + %50 kaolin için kuru yoğunluk ADR ölçümleri	68
Tablo 6.15.	%50 kum + %50 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri.....	68
Tablo 6.16.	%25 kum + %75 kaolin için hacimsel su içeriği.....	69
Tablo 6.17.	%25 kum + %75 kaolin için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri.....	70
Tablo 6.18.	%25 kum + %75 kaolin için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri.....	71
Tablo 6.19.	%25 kum + %75 kaolin için kuru yoğunluk adr ölçümleri	72
Tablo 6.20.	%25 kum + %75 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri.....	73
Tablo 6.21.	%100 kaolin için hacimsel su içeriği.....	74
Tablo 6.22.	%100 kaolin için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri.....	75
Tablo 6.23.	%100 kaolin için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri.....	76
Tablo 6.24.	%100 kaolin için kuru yoğunluk ADR ölçümleri	77
Tablo 6.25.	%100 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri.....	78
Tablo 6.26.	%75 kum + %25 kil için hacimsel su içeriği	80
Tablo 6.27.	%75 kum + %25 kil için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri	80
Tablo 6.28.	%75 kum + %25 kil için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri	81
Tablo 6.29.	%75 kum + %25 kil için kuru yoğunluk ADR ölçümleri.....	82
Tablo 6.30.	%75 kum + %25 kil için gravimetrik su içeriği değerleri	83
Tablo 6.31.	%50 kum + %50 kil için hacimsel su içeriği	84
Tablo 6.32.	%50 kum + %50 kil için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri	85
Tablo 6.33.	%50 kum + %50 kil için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri	86
Tablo 6.34.	%50 kum + %50 kil için kuru yoğunluk ADR ölçümleri.....	87
Tablo 6.35.	%50 kum + %50 kil için gravimetrik su içeriği değerleri	87
Tablo 6.36.	%25 kum + %75 kil için hacimsel su içeriği	88
Tablo 6.37.	%25 kum + %75 kil için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri	89
Tablo 6.38.	%25 kum + %75 kil için hacimsel su içeriği adr ölçümleri.....	90

Tablo 6.39.	%25 kum + %75 kil için kuru yoğunluk ADR ölçümleri.....	91
Tablo 6.40.	%25 kum + %75 kil için gravimetrik su içeriği değerleri	92
Tablo 6.41.	%100 kil için hacimsel su içeriği	93
Tablo 6.42.	%100 kil için $(\varepsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri	94
Tablo 6.43.	%100 kil için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri	95
Tablo 6.44.	%100 kil için kuru yoğunluk ADR ölçümleri.....	95
Tablo 6.45.	%100 kil için gravimetrik su içeriği değerleri	96
Tablo 6.46.	CH için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri (gevşek)	100
Tablo 6.47.	CH için kuru yoğunluk ADR ölçümleri (gevşek)	101
Tablo 6.48.	CH için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	102
Tablo 6.49.	CH için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri (sıkı)	103
Tablo 6.50.	CH için kuru yoğunluk ADR ölçümleri (sıkı)	103
Tablo 6.51.	CH için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)	104
Tablo 6.52.	CI için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	105
Tablo 6.53.	CI için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	106
Tablo 6.54.	CI için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	107
Tablo 6.55.	CI için Hacimsel Su İçeriği Değerleri (Sıkı)	108
Tablo 6.56.	CI için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	108
Tablo 6.57.	CI için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)	109
Tablo 6.58.	CL için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	110
Tablo 6.59.	CL için kuru yoğunluk değerleri (gevşek).....	111
Tablo 6.60.	CL için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	111
Tablo 6.61.	CL için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı).....	112
Tablo 6.62.	CL için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	113
Tablo 6.63.	CL için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)	114
Tablo 6.64.	MH için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)	115
Tablo 6.65.	MH için kuru yoğunluk değerleri (gevşek).....	115
Tablo 6.66.	MH için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	116
Tablo 6.67.	MH için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	117
Tablo 6.68.	MH için kuru yoğunluk değerleri (sıkı).....	117
Tablo 6.69.	MH için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	118
Tablo 6.70.	MI için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	119
Tablo 6.71.	MI için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	120
Tablo 6.72.	MI için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	120
Tablo 6.73.	MI için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	121
Tablo 6.74.	MI için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	122
Tablo 6.75.	MI için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı).....	123
Tablo 6.76.	ML için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	124
Tablo 6.77.	ML için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	125
Tablo 6.78.	ML için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	125
Tablo 6.79.	ML için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı).....	126
Tablo 6.80.	ML için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	127
Tablo 6.81.	ML için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı).....	128
Tablo 6.82.	SP için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)	129
Tablo 6.83.	SP için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	130
Tablo 6.84.	SP için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek).....	131
Tablo 6.85.	SP için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	131
Tablo 6.86.	SP için kuru yoğunluk değerleri (sıkı).....	132
Tablo 6.87.	SP için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)	133

Tablo 6.88. SW için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	134
Tablo 6.89. SW için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	135
Tablo 6.90. SW için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	135
Tablo 6.91. SW için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	136
Tablo 6.92. SW için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	137
Tablo 6.93. SW için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı).....	138
Tablo 6.94. SP-SM için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)	139
Tablo 6.95. SP-SM için kuru yoğunluk değerleri (gevşek).....	139
Tablo 6.96. SP-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	140
Tablo 6.97. SP-SM için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	141
Tablo 6.98. SP-SM için kuru yoğunluk değerleri (sıkı).....	142
Tablo 6.99. SP-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)	142
Tablo 6.100. SP-SC için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)	143
Tablo 6.101. SP-SC için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	144
Tablo 6.102. SP-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek).....	145
Tablo 6.103. SP-SC için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	146
Tablo 6.104. SP-SC için kuru yoğunluk değerleri (sıkı).....	146
Tablo 6.105. SP-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)	147
Tablo 6.106. SW-SM için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	148
Tablo 6.107. SW-SM için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	149
Tablo 6.108. SW-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek).....	149
Tablo 6.109. SW-SM için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	150
Tablo 6.110. SW-SM için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	151
Tablo 6.111. SW-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı).....	151
Tablo 6.112. SW-SC için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	152
Tablo 6.113. SW-SC için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	153
Tablo 6.114. SW-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	154
Tablo 6.115. SW-SC için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı).....	155
Tablo 6.116. SW-SC için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	156
Tablo 6.117. SW-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı).....	156
Tablo 6.118. SM için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)	157
Tablo 6.119. SM için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	158
Tablo 6.120. SM için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek).....	159
Tablo 6.121. SM için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	160
Tablo 6.122. SM için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	160
Tablo 6.123. SM için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı).....	161
Tablo 6.124. SC için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek).....	162
Tablo 6.125. SC için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)	163
Tablo 6.126. SC için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)	163
Tablo 6.127. SC için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)	164
Tablo 6.128. SC için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)	165
Tablo 6.129. SC için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı).....	166
Tablo 7.1. Kum – kaolin karışımları	168
Tablo 7.2. Kum – kil karışımları.....	172

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Zeminde özgü kalibrasyon katsayısı
α	: Şekil faktörü
a_0	: Zeminde özgü kalibrasyon katsayısı
a_1	: Zeminde özgü kalibrasyon katsayısı
A_s	: Zemin danelerinin özgül yüzeyi
b	: Zeminde özgü kalibrasyon katsayısı
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CI	: Orta plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
c	: Işık hızı
c_1	: Zeminde özgü kalibrasyon katsayısı
d	: Zeminde özgü kalibrasyon katsayısı
d_1	: Zeminde özgü kalibrasyon katsayısı
δ	: Zeminin ortalama kalınlığı
E	: Elektromanyetik alan
ϵ	: Dielektrik katsayısı
ϵ_0	: Kuru zeminin dielektrik katsayısı
ϵ'	: Dielektrik katsayısının gerçel kısmı
ϵ''	: Dielektrik katsayısının sanal kısmı
ϵ_a	: Görünen dielektrik katsayısı
ϵ_{air}	: Havanın dielektrik katsayısı
ϵ_{bw}	: Zemin içerisindeki bağlı suyun dielektrik katsayısı
ϵ_{fw}	: Zemin içerisindeki serbest suyun dielektrik katsayısı
ϵ_m	: Malzemelerin dielektrik katsayısı
ϵ_r	: Bağlı geçirgenlik
ϵ_s	: Zeminlerin dielektrik katsayısı
ϵ_v	: Vakum geçirgenliği
ϵ_w	: Suyun dielektrik katsayısı
f	: Zeminde özgü kalibrasyon katsayısı
f_1	: Zeminde özgü kalibrasyon katsayısı
g	: Zeminde özgü kalibrasyon katsayısı
H	: Manyetik alan vektörü
η	: Bir sıvıya ilişkin viskozite
j	: Sanal katsayı
k	: Boltzmann sabiti
L	: Zeminde gömülü prob boyu
MH	: Yüksek plastisiteli silt
MI	: Orta plastisiteli silt
ML	: Düşük plastisiteli silt
m	: Zeminde özgü kalibrasyon katsayısı
μ	: Dipol momenti
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği

μ_m	: Ortamın manyetik geçirgenliği
v	: Elektromanyetik dalganın yayılma hızı
P	: Polarizasyon şiddeti
Ψ_g	: Yerçekimi potansiyeli
Ψ_m	: Matriks potansiyel
Ψ_p	: Basınç potansiyeli
Ψ_s	: Ozmotik potansiyel
Ψ_t	: Toplam potansiyel
Ψ_w	: Zemin su potansiyeli
q	: Elektriksel yük
r	: Elektriksel yükler arasındaki mesafe
r_m	: Moleküler yarıçap
ρ_k	: Kuru yoğunluk
ρ_n	: Zeminin doğal yoğunluğu
ρ_r	: Yansıma katsayısı
ρ_s	: Zemin danelerinin yoğunluğu
ρ_w	: Suyun yoğunluğu
SP	: Üiform (kötü derecelenmiş) kum
SW	: İyi derecelenmiş kum
SP-SM	: Üiform siltli kum
SP-SC	: Üiform killi kum
SW-SM	: İyi derecelenmiş siltli kum
SW-SC	: İyi derecelenmiş killi kum
SM	: Siltli kum
SC	: Killi kum
σ	: Elektriksel iletkenlik
σ_0	: Dielektrik malzemedeki elektriksel iletkenlik
σ_p	: Suyun elektriksel iletkenliği
T	: Sıcaklık
t	: Probun başlangıç ve bitiş noktaları arasında geçen süre
$\tan\delta$	: Dielektrik kayıp faktörü
τ	: Gevşeme süresi (bozulma süresi)
θ	: Hacimsel su içeriği
V	: Theta probu çıkış voltajı
V_a	: Zemin içerisindeki hava hacmi
V_{bw}	: Zemin içerisindeki bağlı suyun hacmi
V_f	: Final genliği
V_{fw}	: Zemin içerisindeki serbest suyun hacmi
V_j	: Prob kesitindeki pik voltaj
V_o	: Hacim
V_s	: Zemin içerisindeki katı partikül hacmi
V_{soil}	: Zeminin toplam hacmi
V_w	: Zemin içerisindeki suyun toplam hacmi
V_0	: TDR dalgasının başlangıç genliği
V_1	: Probun bitiş noktasındaki genliği
V_2	: Prob sonundaki zeminden yansıyan genlik
W	: Zemin örneğinin ağırlığı
w	: Gravimetrik su içeriği

w_f	: Açısal frekans
x	: Zeminde özgü kalibrasyon katsayısı
y	: Zeminde özgü kalibrasyon katsayısı
Z	: Elektromanyetik dalğanın asıl empedansı
Z_s	: Zeminde gömülü problemlerin empedansı
Z_{TDR}	: TDR cihazının çıkış empedansı
Z_0	: Koaksiyal kablonun empedansı

Kısaltmalar

A.C.	: Alternative Current (Alternatif Akım)
ADR	: Amplitude Domain Reflectometry (Genlik Boyutunda Yansıma)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu)
D.C.	: Direct Current (Doğru Akım)
TDR	: Time Domain Reflectometry (Zaman Boyutunda Yansıma)
TS	: Türk Standartları

ÖZET

Zeminlerin su içeriğinin ve kuru yoğunluğunun belirlenmesine yönelik yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan bir tanesi de elektromanyetik prensiplere göre ölçüm yöntemlerine dayalı, daha özelinde ise faklı sıklık ve su içeriğindeki zeminlerin dielektrik sabitini tahmin eden ADR yöntemidir. ADR yöntemi ile zemin dielektrik katsayısının ölçümü ve buna bağlı olarak su içeriğinin belirlenmesine yönelik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmada, ölçülen genlik farklarına bağlı olarak zeminlerin dielektrik sabitleri belirlenmiştir. Belirlenen dielektrik sabitleri ile geleneksel (kurutma esasına dayalı) elde edilen hacimsel su içerikleri arasında lineer ilişki kurulmuştur. Kuru yoğunluklar arasında ise ikinci dereceden bir ilişki belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında TS 1500' de belirtilen 14 adet zemin numunesi ve kaolin kullanılmıştır. Ölçümler zeminlerin doğrudan kendileri ve belirli oranda karışımları hazırlanarak elde edilen numuneler üzerinde yapılmıştır. ADR probu ile ölçümler alınarak zeminlere özgül kalibrasyon katsayıları belirlenmiştir. Daha sonra ise aynı zeminlerde hazırlanan farklı numuneler üzerinde geliştirilen kalibrasyon bağlantılarının işe yararlılığı kontrol edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: ADR Probu, Dilektrik Sabiti, Kuru Yoğunluk, Su İçeriği.

USABILITY OF ADR METHOD IN GEOTECHNICAL ENGINEERING

ABSTRACT

There are many studies to determine soil water content and dry density. One of them is the ADR (Amplitude Domain Reflectometry) method, based on the electromagnetic principles, and more specifically, the dielectric constant, which is determined by measuring the amplitude of the electromagnetic wave travelling through the soil with different density and water content. Soil dielectric constant measurement with ADR method and related water content determination studies are available in the literature. However, studies are needed to estimate the soil density. In this study, dielectric constant of soils was determined depending on the measured amplitude differences. A linear relationship was established between the determined dielectric constant and the volumetric water contents obtained conventionally (based on drying). A second order relation was determined between dry density and the square root of the dielectric constant of soils.

Within the scope of the study, 14 soil samples specified in TS 1500 and kaolin were used. The measurements were made directly on the soils themselves and on the samples obtained by preparing their mixtures in certain proportions. Soil-specific calibrations were obtained following the measurements with the ADR probe. Subsequently, the usefulness of the calibration process was evaluated.

Keywords: ADR Probe, Dielectric Constant, Dry Density, Water Content.

GİRİŞ

Geoteknik Mühendisliğinde, zeminlerin su içeriği ve kuru yoğunluğunun hızlı, kesin ve mümkün olduğunca zemini örselemeden ölçmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Kum konisi yöntemi (ASTM D1556 2007), balon yöntemi “rubber-balloon method” (ASTM D2167 2015) ve silindir yöntemi “drive-cylinder method” (ASTM D2937 2017) yoğunluğun yerinde tespit edildiği geleneksel yöntemlerden birkaçıdır. Bu yöntemlere genellikle su içeriğinin belirlenmesinde kullanılan etüvde kurutma yöntemi (ASTM D2216 2010) eşlik eder. Etüvde kurutma yöntemi için en büyük problem, ölçüm sonuçları için uzun bir süre (24 saat) beklemek zorunda kalınmasıdır.

Zeminin su içeriğinin belirlenmesinde etüv yöntemine ek olarak mikrodalga fırın yöntemi (ASTM D4643), doğrudan ısı yöntemi “direct heat method” (ASTM D4959) gibi alternatif yöntemler geliştirilmiştir. Her zemin tipi için uygunluk göstermeyen bu yöntemler, fikir edinmek açısından kullanılabilirlik gösterse de, kesin sonuç almak için her zaman uygun olmayabilirler.

Su içeriği ve yoğunluğun belirlenmesi için alternatif olarak geliştirilen yöntemlerden biri de Nükleer yöntem (ASTM D5195)’ dir. Her ne kadar güvenilir sonuçlar verse de kapsamlı bir kalibrasyona ihtiyaç duyulması olumsuz yanlarından biridir. Çalışma esnasında radyoaktif metaryal kullanılması, yöntemi potansiyel olarak tehlikeli kılmaktadır. Bu nedenle özel eğitim almış, sertifikalı kişiler tarafından bu yöntem uygulanmaktadır.

Gerek laboratuvar, gerekse arazide yapılan bu deneylerin sonuçlarını elde etmek zaman aldığı için tercih edilen bir durum değildir. Özellikle zamanın önem arz ettiği büyük ölçekli projelerde alternatif yöntemlerin üretilmesini kaçınılmaz kılmıştır. Bu alternatif yöntemlerden bir tanesi hem hızlı hem de kolay tekrarlanabilme kolaylığından dolayı elektriksel yöntemlerdir. Zeminin elektriksel iletkenliğine bağlı olarak karakteristik özelliklerinin bulunması bu yöntemlerin ana prensibidir.

Elektromanyetik ölçüm yöntemlerinden en sık kullanılan İngilizce “Time Domain Reflectometry” kelimelerinin baş harflerinden oluşan TDR yöntemidir. Zaman tanım alanında yansıma olarak ifade edilen bu yöntem zeminlerin dielektrik katsayısı ve elektriksel iletkenliğine bağlı olarak su içeriğini ve yoğunluğunu bulmamıza olanak tanımaktadır. Yöntem ASTM D6780-02 ve ASTM D6780-05 olarak standart haline getirilmiştir. TDR yöntemi nükleer yöntemdeki gibi sağlık açısından herhangi bir sorun teşkil etmemesine rağmen cihazın maliyeti ve taşınabilirliği olumsuz yanlarındandır.

Elektriksel ölçüm yöntemlerinden bir diğeri ise İngilizce “Amplitude Domain Reflectometry” kelimelerinin baş harflerinden oluşan ADR yöntemidir. Genlik boyutunda yansıma olarak ifade edilen bu yöntem TDR yöntemine benzerlik arz etmektedir. TDR ile kıyaslandığında hem maliyet hem de deney düzeneği açısından avantajlı görülmektedir.

ADR yöntemi ile zeminlerin dielektrik özelliklerine bağlı olarak su içeriğinin tespit edilmesine yönelik çalışmalar literatürde mevcuttur. Fakat zeminlerin yoğunluklarının belirlenmesine yönelik çalışmalar literatürde yok denecek kadar azdır.

Bu çalışması kapsamında ADR yöntemi ile ölçümler yapılarak, zeminlerin dielektrik katsayıları tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak zeminlere özgü kalibrasyon katsayıları üretilerek, zeminlerin su içeriklerinin ve kuru yoğunluklarının belirlenmesine yönelik ampirik bir bağıntı elde edilmiştir.

1. SU İÇERİĞİ VE KURU YOĞUNLUK ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Su içeriğini tayin etmek için yaygın olarak kullanılan üç adet ölçüm yöntemi bulunmaktadır. Bunlar, gravimetrik, potansiyel ve hacimsel ölçüm yapılan yöntemlerdir. Tercih edilen yöntem, gerekli bilgilerin nasıl kullanılacağına bağlıdır. Örneğin, bitki biyolojisi için potansiyel ölçümü tercih edilecektir. Çünkü bir bitki suya, zemin-bitki-hava sürekliliğinde tepki vermektedir. Gravimetrik ölçüm, bu yöntemler arasında basit ve anlaşılır olduğundan, su içeriğinin belirlenmesinde en yaygın kullanılan yöntemdir. Diğer yandan hacimsel ölçümler daha çok tarımsal sulamada kullanılır. En uygun ürün yetiştirmek için ihtiyaç duyulan su miktarı kolayca tayin edilir. Zemin su içeriğinin belirlenmesi için elektronik cihazların gelişmesiyle birlikte, hacimsel olarak su içeriğinin tespit edilmesi, günümüzde daha çok yararlanılan yöntem olmuştur.

Boşluklu bir ortam olan zemin, hava, zemin daneleri ve su olmak üzere üç bileşenli bir yapıdan oluşur. Üç bileşen arasındaki ilişki, zemindeki suyun hareket etme kabiliyetini belirler.

1.1. Gravimetrik Yöntem

Zeminlerin su içeriğini belirlemek için kullanılan en yaygın yöntem, söz konusu alandan fiziksel olarak bir numunenin uzaklaştırılması söz konusudur. Alınan numune tartılır ve 100°C ila 110°C arasında bir fırında 24 ila 48 saat süreyle kurutulur ve yeniden tartılır (Reynolds, 1970a; 1970b ve Gardner, 1986). Buradan gravimetrik su içeriği (w) belirlenir.

$$w = \frac{\text{Islak zemin kütlesi} - \text{Kuru zemin kütlesi}}{\text{Kuru zemin kütlesi}} \quad (1.1)$$

Bu yöntemin avantajı, numunelerin kolay elde edilmesi ve su içeriğinin kolay tayin edilmesidir. Bu yöntemde numune alma esnasında örselenme meydana geldiği için, arazide aynı noktadan tekrar numune alınması söz konusu değildir.

Kurutma yapılan etüvler çeşitlidir ve genelde 100°C ila 110°C' ye ayarlanır (Gardner, 1986). Sıcaklığın farklı olması malzemenin kuruma durumunu etkileyebilir. Gardner tarafından, Matriks içerisindeki suyun yapısal (mineral kafes bileşenlerinden türetilmiş) yada adsorbe (kafese tutturulmuş) olduğu düşünülmektedir. Nutting (1943), ıslak kütle, kuru kütle oranlarını kaydederek, kuruma sıcaklığının etkilerini tespit etmek için temsili bir termal kuruma eğrisi üzerinde çalışmıştır. Gardner (1986), kurutma için daha uygun sıcaklığın 165°C ila 170°C arasında olduğunu söylemiştir. Bu sıcaklık aralığı organik madde oksidasyon oranını etkilemektedir. Ayrıca iki gün sonundaki kuruma sürelerinin anlamsız olduğunu belirtmiştir. Siltli zeminler üzerinde yaptığı çalışmalarda, iki gün sonundaki ağırlık ile 10 gün sonundaki ağırlıklar arasında %0,3' lük su kaybı olduğunu tespit etmiştir. Reynolds (1970a) ve Star ve diğ. (1995), yaptıkları çalışmalarda özellikle kuruma süreleri ve ince dokulu zeminler için numune ağırlıklarının 50gr ila 100gr arasında olmasını, su içeriğinin tespit edilmesi için yeterli olduğunu söylemişlerdir.

Arazide yapılan çalışmalarda, numunelerin alınması ve uygun koşullarda saklanması sonuçların doğruluğu açısından önem arz etmektedir. Reynolds (1970a), 168 saatten daha fazla uygun koşullarda depolanan numunelerde, etüvde kurutma yapılmadan önce su içeriklerinde %1 oranında kayıp meydana geldiğini tespit etmiştir. Numune alınan bölgelerdeki su miktarındaki farklılığın sadece ölçüm yöntemlerine bağlı olmadığı aynı zamanda zemin bileşenleri ve jeolojisinin de etkileri olduğu belirtilmiştir. Yani bölgenin doğal olarak göstermiş olduğu değişkenliğin etkileri söz konusudur.

Gravimetrik ölçüm, arazide sensör kullanılarak belirlenmek istenen hacimsel su içeriği için yapılan kalibrasyon çalışmalarında da kullanılmaktadır. Gravimetrik ölçümle belirlenen su içeriği, standart bir teknik olarak kabul görmektedir.

1.2. Enerji – Potansiyel Yöntemi

Zeminde bulunan suyun enerji durumu farklı terimlerle ifade edilir. Zemindeki su içeriğinin miktarı, mutlaka bitki için ne kadar su gerektiğini veya suyun enerji durumunu göstermez. Su, su potansiyeli olarak adlandırılan enerji durumu ile yüksek enerjili alanlardan düşük enerjiye geçecektir (Kabat ve Beekma, 1994). Hanks (1992), zemin suyu potansiyelini “denge zemin suyu (veya bitki-su) sistemindeki birim

miktardaki suyun, aynı sıcaklıkta referans durumunda bir su havuzuna geçtiğinde yapabileceği iş miktarı” olarak tanımlar.

Doygun olmayan zeminlerde potansiyel negatif kabul edilir. Potansiyel birim kütle başına enerji (Jkg^{-1}), hacim (kPa veya MPa) veya ağırlık (m-su) olarak ifade edilir. Zemin su potansiyeli (ψ_w) şu şekilde belirlenir;

$$\psi_w = \psi_m + \psi_s + \psi_p \quad (1.2)$$

Burada;

ψ_m , matriks potansiyeldir. Zemin ile su arasındaki çekme (adezyon) ve bağlama (kohezyon) etkisinden dolayı oluşan potansiyeldir (Yeh ve Guzman-Guzman, 1995). Hanks (1992), bu potansiyeli zemin içerisindeki bir nokta ile o noktaya bağlı bir manometrenin su seviyesi arasındaki dikey mesafe olarak ifade eder.

ψ_s , çözünen (ozmotik) potansiyeldir ve zeminde çözünmüş maddelerin varlığı ile ilgilidir. Tuzlu su (Rawlins ve Campbell, 1986) ve yarı kurak durumlar (Carrow ve diğ., 1990) dışında su potansiyeli hesaplamalarında çoğunlukla ihmal edilir.

ψ_p , basınç potansiyelidir. Hanks (1992), söz konusu noktadan serbest su yüzeyine olan dikey mesafe olarak tanımlamıştır. Basınç potansiyeli, jeolojik yüklerin bir noktada oluşturduğu basıncın ölçütüdür. Basınç potansiyeli bir piezometre ile ölçülebilir ve doymun olmayan zeminlerde sıfırdır. Bu nedenle ihmal edilir (Yeh ve Guzman-Guzman, 1995).

Toplam potansiyeli belirlemek için yer çekiminin de etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Toplam potansiyel bu durumda şu şekilde belirlenir;

$$\psi_t = \psi_w + \psi_g \quad (1.3)$$

Burada ψ_t , toplam potansiyel ve ψ_g ise yerçekimi potansiyelidir. Yerçekimi potansiyeli ilgili noktanın, seçilen bir referans düzlemine olan dikey mesafesidir.

Potansiyel genellikle suyun zemindeki hareketini etkileyen birincil faktör olmasına rağmen, Rose (1968) ve Campbell (1988) tarafından termal ve elektrik gradyanları gibi diğer bileşenlerin de suyun hareketini etkilediği belirtilmiştir. Corey ve Klute (1985),

toplam zemin suyu potansiyeli kavramının gelişimi gözden geçirmişler ve su hareketi sürecini sorgulamışlardır. Difüzyon ve kimyasal etkinin ayrılması ihtiyacı, her ikisinde de bağımsız olarak ölçüm için sıfır akışa sahip olmalarını sağlar. Corey ve Klute (1985), toplam potansiyel kavramın su hareketi sürecini çözünen taşınım için doğal membran geçirgenliğine yönlendirme yeteneğini ilişkilendirerek bu konumu doğrulamaktadır.

Zemin suyu potansiyeli, hacimsel su içeriği ile ilişkilidir. Zemin suyu karakteristiği olarak adlandırılan bu ilişki, öncelikle zemin cinsi ve boyutlarıyla belirlenir. Zemin suyu ve potansiyeli arasındaki ilişkinin karmaşıklığı, özellikle yerinde ölçümlere bağlı olarak bir birimden diğerine dönüştürme yeteneğini zorlaştırır. Bu karmaşıklık, sulama yönetimi için potansiyel tabanlı araçların kullanımını azaltmaktadır.

1.3. Hacimsel Yöntem

Zeminin su durumu, hacimsel tabanlı ($\theta, m^3 m^{-3}$) belirlenebilir. Burada toplam zemin hacmi içindeki su hacmi olarak ifade edilir. Bu yöntem, arazide tekrarlı ölçüm yapabilme açısından su durumunu belirleyen en popüler yöntemdir. Eğer zeminin yoğunluğu biliniyorsa ya da tahmin ediliyorsa hacimsel su içeriği hesaplanabilir. Bu konu ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Yerinde ölçüm tekniklerinin çoğunda, zemin yoğunluğunun etkilerini ve hacimsel su içeriğini hesaplamak için arazi kalibrasyonu yapılır. Su içeriği ve yoğunluğun doğruluğu, hesaplanan hacimsel su içeriğinin de doğruluğunu etkileyecektir (Gardner, 1986).

1.4. Kuru Yoğunluk

Teknikler arasında bir karşılaştırma yapabilmek için, zemin suyu karakteristikleri ve kuru yoğunluk (ρ_k) arasında değerlendirme yapmaya gerek vardır. Zeminlerin kuru yoğunluğu, gravimetrik su içeriği ile hacimsel su içeriği arasındaki dönüşümlerde önemli bir rol oynamaktadır. Kuru yoğunluk, zemin danelerinin kütesinin, toplam zemin hacmine oranıdır ve birim hacimdeki kuru ağırlık olarak tarif edilir. Hesaplarda zeminin kuru kütle belirlenerek bulunur (Blake ve Hartge, 1986). Bazı zemin tiplerinde, özellikle montmorillonit ve illitin hakim olduğu reaktif killerde, numunenin

şışmesi ve büzülmesine bağlı olarak ıslak ve kuru kütle yoğunluğu arasında önemli bir değişiklik meydana gelebilir (Ross, 1985). Cullen ve Everett (1995), zemin su içeriğinin, kuru yoğunluk için önemli bir etmen olduğunu belirtmişlerdir.

Zeminin birçok fiziksel parametresine bağlı olarak, kuru yoğunluğun yerinde tespiti için birçok yöntem söz konusudur. Karot alma, kum konisi ve radyasyon kullanarak ölçüm yapmak bunlardan birkaçıdır. Karot alma yönteminin temel; silindir metal bir numune alıcının zemine batırılmasına dayanır. Çok çeşitli numune alıcı vardır fakat Starr ve diğ. (1995) tarafından ölçüm tekniklerindeki çeşitliliği azaltmak adına 30mm çaplı olanı önerilir. Alınan karot örneği tartılır ve 105°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletilerek kurutulur ve yeniden tartılır. Suyun kaybından, su içeriği belirlenir. Kuru yoğunluk ise;

$$\rho_k = \frac{\text{kuru zemin kütlesi}}{\text{numunenin hacmi}} \quad (1.4)$$

ifadesiyle belirlenir.

Kuru yoğunluğun belirlenmesi için yapılan karot yöntemleri kıyaslandığında, eğitimli bir operatörün testleri yapması durumunda tüm metotların güvenli olduğu tespit edilmiştir (Dickey ve diğ., 1993). Metotlar arasındaki farklılık numune alma süresi (5 ila 48dk. arası) ve maliyettir. Numune alımı esnasında, zeminde oluşacak sıkışmaların minimum düzeyde olmasına dikkat edilmelidir. Aşırı uç durumlarda, örneğin silindirin zemine yerleştirilmesi esnasında oluşabilecek viskoz akıma bağlı olarak numune almada hatalar meydana gelebilir. Ayrıca zeminin çok kuru olması durumunda, numunede kırılmalar meydana gelebilir ve bu durum numune alımındaki hataları arttırabilir. Numune alınması süresince yapılacak dikkatli gözlem, viskoz akım ve kırılmalardan oluşacak hataları minimize edecektir (Blake ve Hartge, 1986).

1.5. Zemin Suyu Karakteristiği

Childs (1940), zemin suyu potansiyeli ile zemin su içeriği arasındaki ilişkiyi geliştirmiştir. Bu ilişki öncelikle zemin türü, boyutu ve gözeneklilik gibi fiziksel koşullardan etkilenir.

Matriks potansiyel ve su içeriği arasındaki ilişki, sadece zemin dokusu ve yapısı ile değil, aynı zamanda numunenin ıslatma geçmişiyle de ilgilidir (Campbell, 1988). Bu ilişki aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\psi_m = -x\theta^{-y} \quad (1.5)$$

Burada x ve y, zemine özgü kalibrasyon katsayılarıdır. Denklem (1.5) özellikle kuru zeminlerde büyük hatalar vermektedir.

1.6. Su İçeriği Ölçüm Yöntemleri

Gerek laboratuvar gerekse arazi koşullarında zemin su içeriğini belirlemek için birçok yöntem kullanılmaktadır. Aşağıda bu yöntemler hakkında, avantaj ve sınırlamaları ile birlikte, özet bilgiler verilmiştir.

1.6.1. Laboratuvar etüv yöntemi (ASTM D2216)

Bu yöntem geoteknik uygulamalarında etüvde kurutma yöntemi (oven dry method) olarak bilinmektedir. Bu yöntemin arkasında yatan prensip, verilen zemin örneğindeki, zemin partikülleri ve suyun ağırlığını belirlemektir. Numune 110°C sıcaklığındaki konvansiyonel bir etüvde 24 saat süresince bekletilmektedir. Numunenin etüvde kurutulmadan önceki ve ıslak ve kuru ağırlıkları belirlenir. Bu yöntemde kullanılan aparatlar: bir adet etüv, terazi ve numuneyi koymak için kullanılan nem kaplarıdır. Etüvde kurutma yöntemi geoteknik uygulamalarında geleneksel olarak kullanılan standart bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Yöntemin en kısıtlayıcı yanı, test süresinin (24 saat) uzun olmasıdır.

Prosedürün adımları aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

1. Boş kapların ağırlıkları tartılıp not edilir.
2. Su içeriği belirlenecek zemin numunesinden temsili miktarda örnek alınır.
3. Ağırlığı önceden alınıp kaydedilmiş nem kaplarına örnek numune konularak, tekrar tartım yapılır ve kap ile birlikte ıslak örneğin ağırlığı not edilir.
4. Örnek numune 110°C sıcaklığındaki etüvde 24 saat süreyle bekletilir.
5. 24 saat sonunda numune etüvden çıkartılarak, kap ile birlikte kuru numunenin ağırlığı tartılarak not edilir.

6. Mevcut ölçümlerden zemin numunesinin su içeriği hesaplanır.

Bu yöntem yabancı madde içeren zeminler için, alçı taşı/jips içeren zeminler ve etüvde kurutma esnasında ayrışabilecek organik madde içeren zeminler için uygun değildir. Suda çözülebilen bu maddeler, zemin partiküllerinin ağırlığını olduğundan daha yüksek göstererek, su içeriğinin yanlış ölçülmesine neden olmaktadır.

1.6.2. Mikrodalga yöntemi (ASTM D4643)

Bu yöntemin prosedürü etüv yöntemine benzerdir. Sadece konvansiyonel bir etüv yerine mikrodalga fırın kullanılmaktadır. Şekil 1.1' de tipik bir mikrodalga fırın verilmiştir.



Şekil 1.1. Tipik bir mikrodalga fırın

Prosedürün adımları aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

1. Boş kapların ağırlıkları tartılıp not edilir.
2. Su içeriği belirlenecek zemin numunesinden temsili miktarda örnek alınır.
3. Ağırlığı önceden alınıp kaydedilmiş nem kaplarına örnek numune konularak, tekrar tartım yapılır ve kap ile birlikte ıslak örneğin ağırlığı not edilir.
4. Mikrodalga fırında numune yaklaşık olarak 3dk bekletilir.
5. Fırından çıkartılan numunenin ağırlığı içinde bulunduğu kap ile birlikte tartılır.
6. Küçük bir spatula yardımı ile numune dikkatli bir şekilde karıştırılır.
7. Numune tekrardan mikrodalga fırına konur ve 1dk süreyle kurutulmaya bırakılır.
8. 5, 6 ve 7 nolu adımlar, kap ile birlikte numunenin ağırlığı değişmez değere ulaşmaya kadar tekrar edilir.

9. En son ölçülen ağırlık kullanılarak zeminin su içeriği hesaplanır.

Yüksek miktarda organik madde içeren zeminler, yağ/petrol türevi ya da atık madde içeren zeminler için kurutma süresince yanma meydana gelebilir. Bu yöntem için en doğru sonuçlar No.4 (4,76mm) eleğin altında kalan zeminler için elde edilmektedir. Bu yöntem kesin doğruluk isteyen durumlarda tercih edilmemektedir.

1.6.3. Doğrudan ısı yöntemi (ASTM D4959)

Bu yöntemin arkasındaki fikir etüv ve mikrodalga yöntemlerindeki benzerdir. Farklı olarak numuneyi kurutmak için alev lambası, soba veya portatif bir ısıtıcı kullanılmaktadır. Etüv yöntemine oranla daha hızlı sonuç elde edilir fakat daha az güvenlidir. Şekil 1.2’ de rezistanslı bir elektrik ocağı görülmektedir.



Şekil 1.2. Rezistanslı elektrik ocağı

Bu yöntemde numune bir kaba konarak ağırlığı tartılır. Isı kaynağı ile numune kurutulur ve ağırlığı yeniden tartılır. Değişmez ağırlığa ulaşılan kadar prosedür devam eder. Kuru ağırlık belirlendikten sonra su içeriği hesaplanır.

Doğrudan ısı yöntemi hızlı sonuç elde etmek için uygun bir yöntemdir fakat sonuçların güvenilirliği etüv yöntemine kıyasla daha azdır.

1.6.4. Kalsiyum karpit gaz basıncı yöntemi (ASTM D4944)

Hızlı su içeriği tespiti (speedy moisture content) olarak ta bilinen bu yöntemde su içeriğini belirlemek için kalsiyum karpit kullanılır. Zemin boşluklarında bulunan

suyun karpit ile reaksiyona girerek açığa çıkan asetilen gazının basınç değerine bağlı olarak, zeminin su içeriği dolaylı olarak hesaplanır. Zemindeki suyun tamamının karpit ile reaksiyona girmesini sağlamak amacı ile iki adet çelik bilye kullanılır. Deneyde kullanılan aparatlar, kalsiyum karpit test cihazı, küçük bir kepçe/kaşık, iki adet çelik bilye, No.4 (4,76mm) elek ve yeterli miktarda kalsiyum karpit. Şekil 1.3' te deney aparatı gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Kalsiyum karpit gaz basıncı deney aparatı

Deney prosedürü aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

1. Kalsiyum karpit test cihazının haznesine çelik bilyeler ve yeteri miktarda kalsiyum karpit konur.
2. Kullanılan test aparatının tipine bağlı olarak üretici firma tarafından belirlenmiş ağırlıktaki test edilecek zemin numunesi cihazın haznesine konur.
3. Cihaz kuvvetli bir şekilde dairesel hareketler yapılarak çevrilir. Böylelikle çelik bilyeler yardımı ile hazneden bulunan karpit ve zemin içindeki suyun tamamının reaksiyona girmesi sağlanır.
4. Gaz basıncı göstergesindeki ibre durduğu zaman, cihaz yatay pozisyonda tutularak, göstergedeki değer okunur.
5. Uygun kalibrasyon eğrileri kullanılarak su içeriği değeri tespit edilir.

Bu yöntem yüksek plastisiteli killer ve sıcaklık ile birlikte suyunu kaybeden mineral içeren zeminler için uygun değildir. Test sadece No.4 elek altı zeminler için uygundur.

Yanıcı ve patlayıcı asetilen gazı içerdiğinden, deneyi yapan kişi için güvenlik ön planda tutulmalıdır.

1.6.5. Nükleer yöntem (Sığ derinlik) (ASTM D3017)

Bu yöntemde, zeminin yüzeyinden hızlı bir nötron kaynağı uygulanır. Yüzeysel bir yavaş nötron dedektörü kullanılarak, hızlı nötronun yavaşlama oranı ölçülür. Bu oran ve ilgili kalibrasyon dataları kullanılarak zeminin su içeriği hesaplanır. Suda mevcut olan hidrojen bu testteki ana faktördür. Hızlı nötron kaynağı ve dedektörü, dış okuma aparatı, muhafaza kutusu, referans bir standart ve yerinde hazırlık ekipmanı gibi parçalardan oluşmaktadır.

Deneyin prosedürü aşağıda özetlenmiştir.

1. Cihaz standart hale getirilir/ayarlanır.
2. Test alanı seçilir ve cihazla zemin arasında tam bir bağlantı sağlanacak şekilde zemin yüzeyi ayarlanır.
3. Cihaz, kaynağın pozisyonu ve alınacak okumaların durumuna bağlı olarak sıkıca yerleştirilir.
4. Mevcut okumalar ve standartlar yardımı ile su içeriğinin hesaplaması yapılır.

Bu aparat, yüzeyden itibaren 2 ila 3 inç derinlikte su içeren zeminlerde oldukça hassas sonuçlar vermektedir. Sudaki hidrojen dışında, ortamda başka bir materyalde de hidrojen bulunuyor ise gerçeğinden daha büyük okumalar elde edilebilir. Bor, klor ve çok az miktarda bile kadmiyum bulunması sonuçların olduğundan daha düşük çıkmasına neden olur.

1.7. Yoğunluğun Yerinde Tespiti Yöntemleri

Zeminlerin yoğunluğu yerinde tespit etmek için birçok yöntem kullanılır. Aşağıda bazı yöntemlerin test prosedürleri ve kısıtları anlatılmıştır.

1.7.1. Nükleer yöntem (ASTM D5195)

Bu yöntemde, bir radyasyon tüpü istenilen derinlikte zemin içerisine yerleştirilir. Tüp üzerine gama radyasyonu için kaynak ve dedektör bulunmaktadır. Hesaplarda, zemin boyunca etkisi azalan gama radyasyonunun ölçümü kullanılır. Yansıyan gama

radasyonunun oranı ve daha önce belirlenmiş kalibrasyon dataları karşılaştırılarak zeminin yoğunluğu tespit edilmektedir. Cihaz, yüksek enerjili gama ışınımı için muhafazalı bir kaynak, zaman cetveli, silindir bir prob, referans bir standart, bağlantı tüpü, el matkabı ve delme ekipmanlarından oluşmaktadır. Şekil 1.4’ de nükleer cihaz gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Nükleer test cihazı

Test prosedürü aşağıda özetlenmiştir.

1. Bağlantı tüpü için zemin delinir ve bağlantı tüpü kurulur.
2. Yeraltı su seviyesi kaydedilir, eğer doygun zemin koşulları söz konusu ise tüpün su ile muhafazasına dikkat edilir.
3. Bağlantı tüpünün düzgün bir şekilde yerleştiğini kontrol etmek için model bir prob indirilir.
4. Aparat sabitlenir.
5. Aparat bağlantı tüpüne düzgün bir şekilde oturtulur ve belirli sürelerde okumalar alınır. Kalibrasyon dataları kullanılarak yoğunluk yerinde tespit edilir.

Eğer kuru yoğunluk değeri de isteniyorsa, yerinde su içeriğinin de ölçülmesine ihtiyaç duyulur. Ölçümler gerçek değerinden daha yüksek ise, zemin içerisinde atom numarası 20’ den büyük bazı elementlerin bulunduğu anlaşılmaktadır. Bağlantı tüpü çevresinde oluşacak boşluklar sonuçları etkilemektedirler. Ekipman radyoaktif malzeme kullandığı için, eğitimli bir operatör tarafından kullanılmalıdır.

1.7.2. Kum konisi yöntemi (ASTM D1556)

Yöntem, zemin yüzeyden belirli bir miktar zemin kazılarak ağırlığının belirlenmesi şeklinde uygulanır. Kazdıktan sonra oluşan kuyunun hacmi standart bir kum yardımıyla belirlenir. Standart kum, kuru, temiz, üniform, daneli, uzun süre kullanılabilir ve kendiliğinden akıcı olmalıdır.

Standart kumun ağırlık ve yoğunluk bilgilerinden kuyunun hacmi, yani kazılarak çıkartılmış zeminin hacmi hesaplanır. Ağırlık ve hacim bilgilerinden kazılan zeminin yoğunluğu belirlenir. Kazılan zeminin su içeriği de bulunarak, kuru yoğunluk değeri elde edilir. Şekil 1.5’ de kum konisi deney aparatı gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Kum Konisi deney aparatı

Deney prosedürü aşağıda özetlenmiştir.

1. Deney bölgesi seçilerek, zemin yüzeyi düz bir hale getirilir deneye hazır hale getirilir.
2. Ortasında belirli çapta delik bulunan bir plaka, zemin yüzeyine yerleştirilir. Ortada bulunan delikten belirli bir yükseklikte (yaklaşık 10-15cm) zemin kazılarak alınır ve tartılıp ağırlığı belirlenir.
3. Ucu, plakadaki delik çapına eşit olan kum konisi aparatı ters çevrilerek, plakadaki delik üzerine yerleştirilir. Koninin dibinde bulunan vana açılarak, koni içindeki kumun kuyuya akması sağlanır.
4. Aparat içinde bulunan standart kumun ağırlığı deney öncesinde ve sonrasında tartılır. Koninin uç kısmında kalan kumun ağırlığı da kullanılarak, kazılan kuyuda kalan standart kumun ağırlığı hesaplanır. Yoğunluğu önceden belirlenen bu kumun yardımı ile deliğin hacmi, yani kazıp çıkartılan kumun hacmi belirlenmiş olur.

5. Kazılan zeminin ağırlık ve hacim bilgilerinden doğal yoğunluğu, su içeriği de belirlenerek kuru yoğunluğu hesaplanır.

Bu yöntem doygun, yumuşak, organik ve deformen olabilen zeminler için uygun değildir. Ayrıca önemli miktarda kaya ve iri malzeme (38mm' den fazla) içeren zeminler için de uygun değildir. Deney büyük ölçüde operatöre bağlı bir deneydir. En çok yapılan hata standart kumun yoğunluğu belirlenirken yapılır. Zeminde kuyu kazıldığı için tahribatlı bir yöntemdir.

1.7.3. Balon yöntemi (Rubber balloon method) (ASTM D2167)

Yöntem kum konisi prosedürüne benzerlik göstermektedir. Fakat bu yöntemde standart kum yerine su ve balon kullanılmaktadır. Zeminin hacmini belirlemek için ucunda esnek bir membran, ortasında hacim ölçer gösterge bulunan su kabı/tankı kullanılmaktadır. Şekil 1.6.' da deney seti gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Balon yöntemi deney seti

Deney prosedürü aşağıdaki gibidir.

1. Deney yapılacak bölge seçilerek, zemin yüzeyi düzlenir ve deneye hazır hale getirilir.
2. Kum konisine benzer ortası delikli plaka zemin yerleştirilip, belirli bir miktar zemin kazıp çıkartılır.

3. Plaka ve diğer aparatlar bir araya getirilerek birbirine montajı yapılır. Su kabının ortasında bulunan hacim göstergesinden başlangıç hacmi okunur.
4. Deney aparatı yerine yerleştirilir, su durağan hale gelince hacim göstergesinden final okuması yapılır.
5. Hacim okumalarından deliğin hacmi, yani kazılarak çıkartılan zeminin hacmi hesaplanır.
6. Gerekli ağırlık, hacim ve su içeriği bilgilerinden yararlanılarak, kazılan zeminin doğal ve kuru yoğunlukları hesaplanır.

Açılan kuyuda köşeli ve sivri danelerin bulunması, deney sonuçlarının hatalı bulunmasına neden olmaktadır.

1.7.4. Silindir yöntemi (Drive cylinder method) (ASTM D2937)

Yöntem et kalınlığı inceliğinde olan çelik bir silindirin, bir çekiç kullanılarak yüzeyi düzeltilmiş zemine çakılması şeklindedir. Silindir zemine tamamen girdikten sonra, silindirin çevresindeki zemin kazılarak, içi dolu silindir dışarı çıkartılır. Silindirin uç kısmında kalan zemin tamamen düzeltilir ve tartılarak ağırlığı ölçülür. Deney öncesindeki boş silindirin ağırlık ve hacmi yardımıyla zeminin doğal yoğunluğu belirlenir. Silindir içindeki zeminden örnek alınarak su içeriği belirlenir ve bu değer yardımıyla zeminin kuru yoğunluğu hesaplanır. Şekil 1.7' de deney aparatları görülmektedir.



Şekil 1.7. Silindir yöntemi deney aparatları

Bu yöntem organik zeminler, çok sert doğal zeminler, fazla sıkıştırılmış zeminler ve çok miktarda kum içeren zeminler için uygun değildir. Silindirin zemine giren uç kısmındaki keskinlik hiç bir zaman özelliğini yitirmemeli, silindirin üzerinde herhangi bir tahribat meydana gelmemelidir. Aksi takdirde sonuçlar yanlış bulunacaktır.



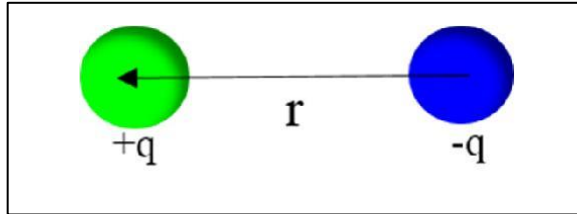
2. ZEMİNLERİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ

2.1. Dielektrik Özellikler

Dielektrik malzemeler, elektrik yüklü bir parçacığın, serbest hareket etmesine izin vermezler. Bu nedenle dielektrik malzemelerin yalıtkan malzemeler olduğu söylenebilir.

Dielektrik malzemeler elektriği iletmezler, ama uygulanan elektromanyetik alandan etkilenirler. Bu alandan dolayı, elektron ve atomlar yer değiştirir. Buna bağlı olarak, elektrik yük merkezleri kayarak, polarizasyon (elektriksel kutuplanma) oluşur. Polarizasyondan dolayı, dielektrik içindeki elektromanyetik alanı zayıflar (Harrop, 1972).

Şekil 2.1’ de şematik olarak gösterilen elektrikselsel dipoller, dielektrik malzeme yüzeyinde elektrikselsel yük birikimi sağlar.



Şekil 2.1. Elektrikselsel dipol (Lökçü, 2013)

Oluşan elektrikselsel dipoller bir dipol momente sahiptirler.

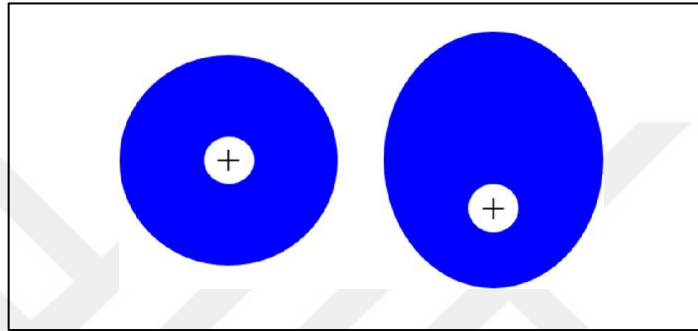
$$\mu = q\vec{r} \quad (2.1)$$

Burada μ , polarizasyon sonucunda q yüküne sahip dipol çiftleri arasındaki $\vec{r}$ mesafesiyle oluşan, dipol momenti simgeleri ve vektörel bir büyüklüktür. Malzemelerin polarizasyon şiddeti P , birim hacimdeki V_0 elektrikselsel dipol momentlerinin toplamı $\Sigma\mu$ olarak ifade edilir.

$$P = \frac{\Sigma\mu}{V_0} \quad (2.2)$$

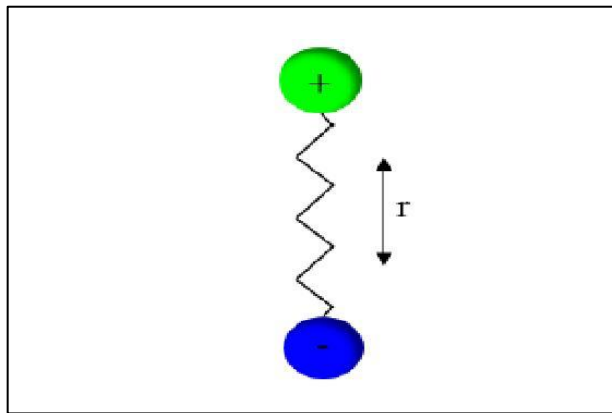
Polarizasyon, farklı şekillerde meydana gelir. Bunlar genel olarak elektronik, iyonik ve moleküler polarizasyon olarak adlandırılır (Harrop, 1972).

Elektronik polarizasyon; nötr atomda artı yükler çekirdekte, eksi yüklü elektronlar ise çekirdek çevresindedir. Elektromanyetik alan uygulandığında, elektronlar zıt yönde itilir. Elektronların ve çekirdeğin zıt yönde yer değiştirmesi ve iki yük merkezinin birbirini çekmesi sonucu dengeye ulaşıldığında ortaya çıkan moment elektronik polarizasyon olarak adlandırılır. Şekil 2.2’ de şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.2. Elektronik polarizasyon (Lökçü, 2013)

İyonik polarizasyon; iyonik bağlı malzemeler elektromanyetik alana maruz kaldıklarında, iyonlar arasındaki bağlar elastik deformasyona uğrar ve malzeme içindeki yükler anlık olarak yeniden düzene girer. Uygulanan alanın yönüne bağlı olarak, katyon ve anyonlar birbirine yaklaşır veya uzaklaşır. Buna bağlı olarak malzeme içerisinde geçici olarak uyarılan dipoller polarizasyona neden olur. Şekil 2.3’ de iyonik polarizasyon şematik olarak verilmiştir.



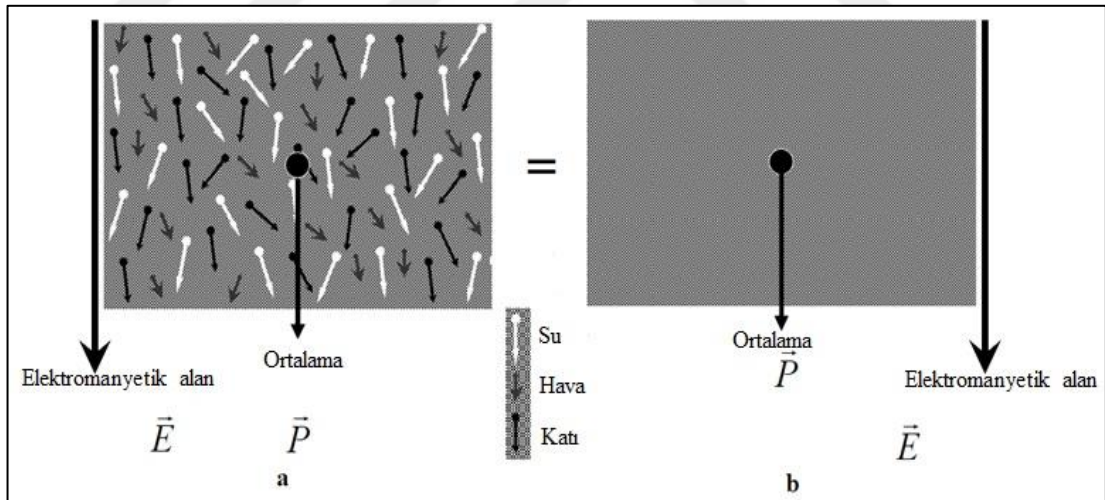
Şekil 2.3. İyonik polarizasyon (Lökçü, 2013)

Moleküler polarizasyon; bazı malzemeler yapılarında kalıcı dipoller içerirler ve malzemeye elektromanyetik alan uygulandığında Şekil 2.4’ deki gibi uygulanan alan doğrultusunda yönlenirler. Uygulanan elektrik alan kaldırıldığında dipoller yönlenmiş şekilde kalarak polarizasyona neden olurlar.



Şekil 2.4. Moleküler polarizasyon (Lökçü, 2013)

Zemin, geoteknik mühendisliğindeki en önemli malzemedir. İçerisinde hava, su ve zemin daneleri olmak üzere 3 farklı bileşen bulunur. Havanın dielektrik katsayısı 1, zemin danelerinin 4-8 ve suyun dielektrik katsayısı ise 80 civarındadır. Buradan da anlaşılacağı gibi, suyun dielektrik katsayısı zemin bileşenleri arasındaki en büyük ve en etkin değere sahiptir (Keskin, 2014).



Şekil 2.5. Zeminin polarizasyonu a) mikroskobik polarizasyon b) makroskobik polarizasyon (Hilhorst ve diğ., 2000)

Şekil 2.5’ de çok fazlı bir malzeme olan zeminin polarizasyonu verilmiştir. Zemin, polarize olan ve olmayan malzemelerden oluşmaktadır. Zeminin polarize olan kısmı su, polarize olmayan kısmı ise hava ve katı kısmıdır. Zemin içerisindeki su, elektronik, iyonik ve moleküler polarizasyon göstermektedir. Uygulanan elektromanyetik alanın frekansının artmasıyla birlikte zemin içerisindeki bileşenlerin düzenli dizilimleri

bozulur. Bu düzenli dizilimin bozulmasına dielektrik gevşeme denir (Zambrano, 2006).

Zemin içerisinde su, boşluk suyu ve adsorbe su olarak iki farklı durumda bulunmaktadır. Boşluk suyunun Dielektrik gevşeme frekansı 17GHz, adsorbe suyun ise 0,8 – 1GHz civarındadır. Adsorbe suyun dielektrik katsayısı 1GHz mertebesinde, zemin danelerinin dielektrik katsayısı ile aynı düzeye düşmektedir. Bu durumda, 1GHz' e yakın değerlerde yapılan elektromanyetik ölçümlerde en etkili parametre boşluk suyu olacaktır (Zambrano, 2006).

2.2. Dielektrik Katsayısı

Bir malzemeye dışardan bir elektromanyetik alan uygulandığında enerji depolama yeteneğine sahipse bu etki malzemenin dielektrik özellikleri ile açıklanır. Malzemenin polarizasyon derecesi, dielektrik özellikleri etkileyen en önemli parametredir. Bir malzemenin polarizasyon derecesi veya üzerinde yük depolayabilme kapasitesi dielektrik katsayısı (ϵ) ile ifade edilir (Harrop, 1972). Dielektrik katsayısı, gerçekte malzemenin bağıl geçirgenliği (ϵ_r) ve vakum geçirgenliği (ϵ_v) olmak üzere iki bileşenden oluşur.

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_v \quad (2.3)$$

Vakum geçirgenliği (ϵ_v) sabit bir değer olduğundan ($\epsilon_v = 8,85 \text{pFm}^{-1}$) (von Hippel, 1967) malzemelerin Dielektrik özellikleri kullanım kolaylığı açısından bağıl geçirgenlikleri ile (ϵ_r) ifade edilmektedir.

Dielektrik malzemelerin polarizasyonu doğru akım (D.C.) veya alternatif akım (A.C.) altında gerçekleşebilir. Eğer malzemenin polarizasyonu alternatif akım altında gerçekleşiyor ise dielektrik katsayısı ϵ_r , genelde gerçel ve sanal kısımdan oluşan bir karmaşık sayı ile ifade edilir (Akhtaruzzaman, 1989). Bağıl geçirgenlik ayrıca, elektromanyetik alanın açısal frekansına (ω_f) ve Dielektrik malzemenin elektriksel olarak kutuplanabilirliğine bağlıdır (White ve Zegelin, 1995).

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.4)$$

Burada ϵ' dielektrik katsayısının gerçel kısmını, ϵ'' sanal kısmını ve j ise sanal katsayıyı ($\sqrt{-1}$) ifade etmektedir. Gerçel kısım, Dielektrik maddenin polarizasyon miktarının bir ölçüsüdür ve elektrik enerjisini depolayabilme özelliği yani kapasitesini simgeler. Sanal kısım ise elektromanyetik enerjinin soğrulması ve dağılım yolu ile ısı enerjisine çevrilmesi olarak ifade edilir.

Denklem (2.4), zemin gibi hava, su, zemin danelerinden oluşmuş malzemelerin Dielektrik katsayılarını belirlerken de kullanılmaktadır ve literatür de kalsik karışım modeli olarak adlandırılmaktadır. Dobson ve diğ. (1985), zeminler için dört fazlı yarı ampirik modeli sağlamak için Denklem (2.5)' de verilen ifadeyi önermişlerdir.

$$\epsilon_m^\alpha = \sum_i V_i \epsilon_i^\alpha = V_s \epsilon_s^\alpha + V_{air} \epsilon_{air}^\alpha + V_{fw} \epsilon_{fw}^\alpha + V_{bw} \epsilon_{bw}^\alpha \quad (2.5)$$

Burada V_i , hacim bileşenlerini ifade etmektedir. Alt indisler olarak belirtilen s, air, f_w ve b_w ise sırasıyla zeminlerin katı partikül, hava, serbest su ve bağlı suyun hacimlerini ifade etmektedir. ϵ_i ise benzer şekilde Dielektrik katsayılarını ifade etmektedir. α ise şekil faktörü olarak adlandırılır ve 0,5 olarak alınır (Chung, 2005).

Heimovaara ve diğ. (1994) ve Lin (2003), Denklem (2.5)'i yeniden modellemişlerdir ve Denklem (2.6)' daki gibi önermişlerdir.

$$\epsilon_m^\alpha = \left(\frac{\rho_k}{\rho_s}\right) \epsilon_s^\alpha + \left(1 - \frac{\rho_k}{\rho_s} - \theta\right) \epsilon_{air}^\alpha + (\theta - \delta \rho_k A_s) \epsilon_{fw}^\alpha + (\delta \rho_k A_s) \epsilon_{bw}^\alpha \quad (2.6)$$

Burada ρ_k , zeminin kuru yoğunluğunu, ρ_s , zemin danelerinin yoğunluğunu ve $\delta \rho_k A_s$ değeri ise hacimsel olarak bağlı suyu ifade eder. δ , zeminin ortalama kalınlığını, A_s ise zemin danelerinin özgül yüzeyini temsil eder. Denklem (2.5) ve (2.6) ise literatür de geliştirilmiş karışım modeli olarak ifade edilmektedir (Chung, 2005).

2.3. Dielektrik Kayıp Faktörü

Dielektrik malzemelerin özellikleri yaygın olarak dielektrik katsayısı (ϵ_r) ve dielektrik kayıp faktörü ($\tan\delta$) gibi terimlerle ifade edilir. Dielektrik kayıp faktörü, dielektrik katsayısının sanal kısmının gerçel kısmına oranı, uygulanan elektromanyetik alan ve dielektriğin bu alana tepkisi arasındaki faz gecikmesi olarak ifade edilir.

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon'' + \frac{\sigma_0}{\omega_f \varepsilon_v}}{\varepsilon'} \quad (2.7)$$

Burada σ_0 dielektrik malzemedeki serbest yükler nedeniyle oluşan elektriksel iletkenlik Sm^{-1} ve ω_f ise uygulanan elektromanyetik alanın açısal frekansı (radS^{-1}) olarak tanımlanır.

Dielektrik kayıp faktörü malzemedeki elektriksel iletkenlik, dielektrik durulma, dielektrik rezonans gibi lineer olmayan fiziksel mekanizmalar yüzünden elektrik enerjisinde meydana gelen kayıpları ifade etmektedir (Burtfoot, 1967). Dielektrik katsayısını yeniden ifade etmek gerekirse;

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\left(\varepsilon'' + \frac{\sigma_0}{\omega_f \varepsilon_v}\right) \quad (2.8)$$

şeklinde yazılabilir.

Zeminlerin çoğu için, dielektrik katsayısının sanal kısmı, gerçel kısmından çok çok küçüktür (Davis ve Annan, 1977). Fakat yoğun olarak sıkıştırılmış killeri, iletken minerallerin olduğu zeminler veya çok tuzlu zeminler için bu durum aynı değildir (White ve diğ., 1994, Suwansawat, 1997). Serbest yüklü olmayan zeminler kayıpsız sayılabilir ve zeminlerin dielektrik katsayılarının sanal bileşeni ihmal edilebilir. Bu durumda denklem (2.8) daha basitleşmiş hale gelir ve görünen dielektrik katsayısı (ε_a) olarak isimlendirilir. Dielektrik katsayısına (ε_r), yaklaşık olarak eşit olur.

$$\varepsilon_a \approx \varepsilon_r \quad (2.9)$$

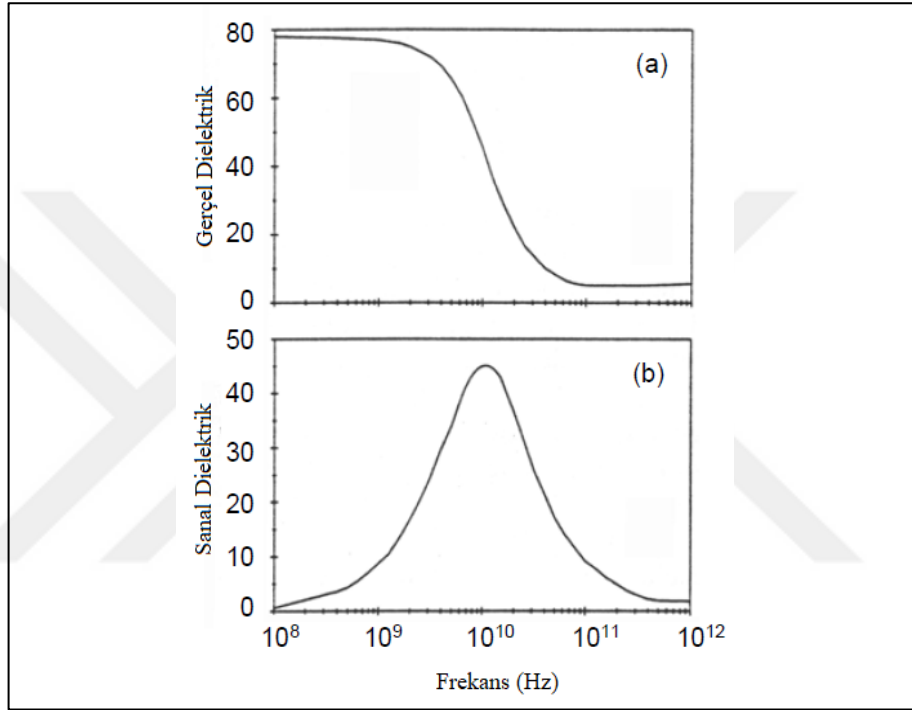
Bu ilişki denklem (2.7) ile ifade edilen kayıpların 1' den çok çok küçük olduğu durumlar için geçerlidir ($\tan\delta \ll 1$).

2.4. Frekansın Etkisi

Uygulanan elektromanyetik dalganın frekansı, ölçülen dielektrik üzerinde etki yapabilir. Gevşeme süresi (malzeme içindeki bileşenlerin düzenli dizilimlerinin bozulma süreci) Stokes yasası ile belirlenir.

$$\tau = \frac{4\pi\eta r_m^3}{kT} \quad (2.10)$$

Burada η bir sıvıyla ilişkili viskozite, T sıcaklık ($^{\circ}\text{K}$), k Boltzmann katsayısı ($\cong 1,38062 \cdot 10^{-23}$) ve r_m ise moleküler yarıçap olarak ifade edilmektedir (White ve Zegelin, 1995). Su için gevşeme frekansı ($1/\tau$) yaklaşık olarak 10GHz civarındadır. 10GHz' in altındaki frekanslarda dielektrik katsayısı (ϵ_r), açısal frekanstan bağımsızdır ve su için dielektriğin sanal kısmı, gerçel kısmından Şekil 2.6'da da gösterildiği gibi çok çok küçüktür ($\epsilon'' \ll \epsilon'$).



Şekil 2.6. Ölçüm frekansının dielektriğin gerçel ve sanal kısımları üzerindeki etkileri (White ve Zegelin, 1995)

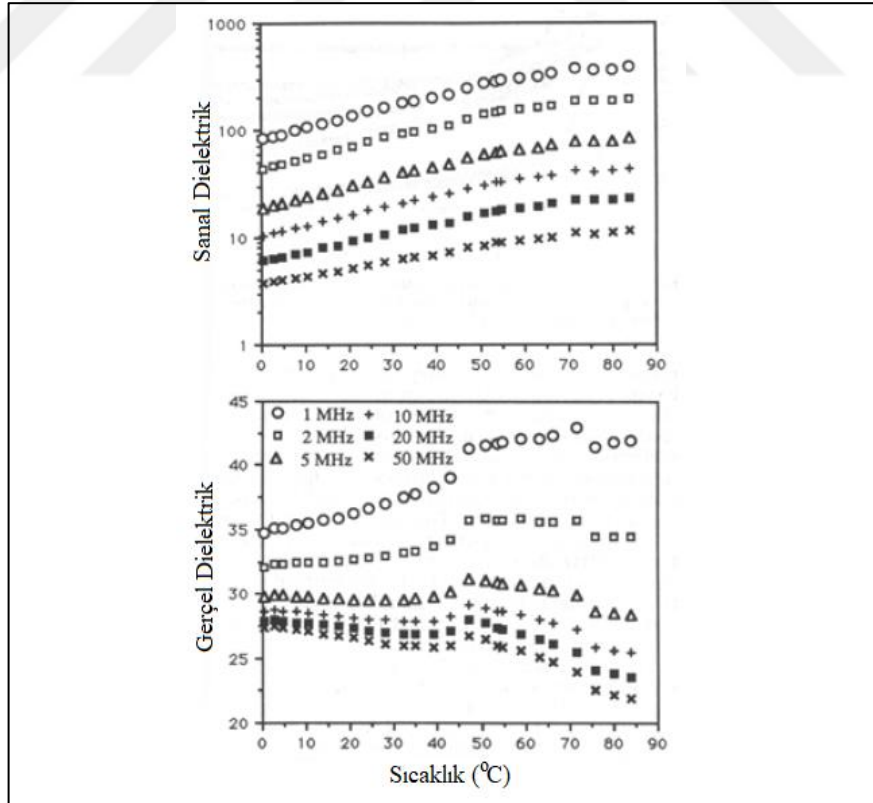
Şekil 2.6' dan da görüleceği üzere 100MHz ve 1GHz arasındaki frekanslarda, ϵ' değeri yaklaşık 80 olarak maksimum değerindedir. Bu durumda dielektriğin sanal kısmının 5'ten küçük olduğu durumlara karşılık gelmektedir. Sanal kısmın dikkate alınması gereken birçok çalışmada ölçüm frekansı olarak 100MHz' den büyük frekanslar seçilmiştir (Topp ve diğ, 1980; Dean ve diğ, 1987; Tomer ve Anderson, 1995; Gaskin ve Miller, 1996). Yine Şekil 2.6' dan görüldüğü üzere çok büyük frekanslarda sanal kısmın etkisi, elektriksel iletkenliğin etkisi kadar azalmaktadır. Bununla birlikte bazı araştırmacılar, bunu gösteren deneysel verilerin nadir olmasına rağmen, daha düşük frekansların (yaklaşık 20MHz) kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir (Hilhorst ve Dirksen, 1994).

2.5. Dielektrik Ölçümlere Sıcaklığın Etkisi

Boşluk suyunun dielektrik katsayısı ϵ_w sıcaklığa bağlıdır ve denklem (2.11)' deki gibi ifade edilir.

$$\epsilon_w = 78,54 [1 - 4,579 \cdot 10^{-3}(T-25) + 1,19 \cdot 10^{-5}(T-25)^2 - 2,8 \cdot 10^{-8}(T-25)^3] \quad (2.11)$$

Burada T sıcaklık değeridir ($^{\circ}K$) (Zegelin ve diğ., 1992). Topp ve diğ (1980) yaptıkları çalışmalarda $5^{\circ}C$ ($278^{\circ}K$) ila $40^{\circ}C$ ($313^{\circ}K$) arasındaki sıcaklıkların önemli olmadıklarını belirlemişlerdir. Bununla birlikte sıcaklıkların $50^{\circ}C$ 'yi aşacağı koşullarda, suyun dielektrik katsayısında düzeltme yapılması önerilmektedir (Zegelin ve diğ., 1992). Campbell (1990) siltli bir zemin üzerinde farklı frekanslarda yaptığı çalışmalarda sıcaklığın etkisini belirlemiştir. Çalışma Şekil 2.7' de grafik olarak sunulmuştur. Aşırı sıcak zeminlerde (örneğin, $>40^{\circ}C$) sıcaklık düzeltmesine gerek duyulmamaktadır. Fakat yapılan çalışmanın önem derecesine bağlı olarak, bu etki göz önüne alınabilir.

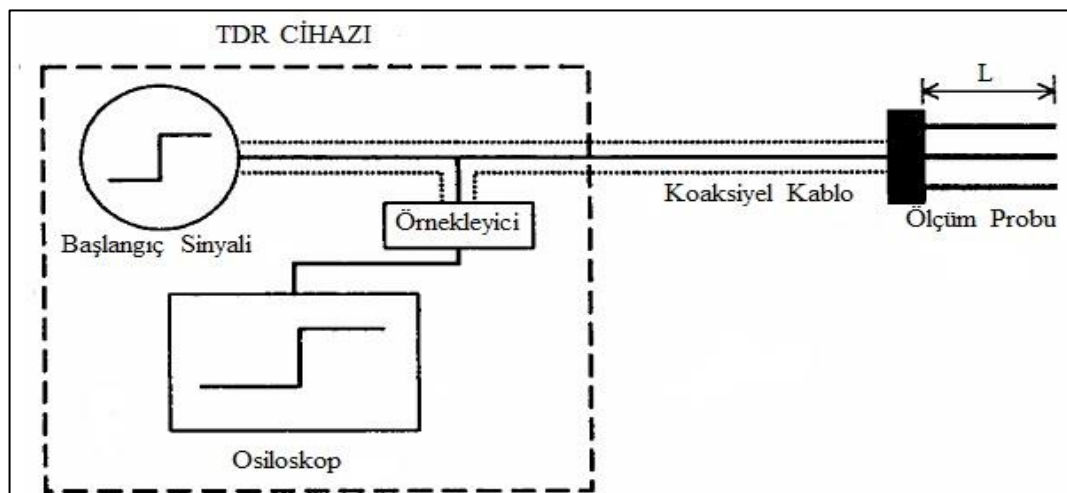


Şekil 2.7. Sıcaklığın dielektrik üzerindeki etkileri (Campbell, 1990)

3. TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY) YÖNTEMİ

TDR (Time Domain Reflectometry) yöntemi, mühendislik uygulamalarında uzun süredir kullanılmaktadır. İlk olarak 1930' larda kablo deneylerinde bilinen bir teknik haline geldi. Fiziksel prensipler oldukça basittir. Bilinen bir iletim hattı boyunca gönderilen elektromanyetik sinyalde empedans değişikliği yoksa yansıma meydana gelmez. Hat üzerinde bir empedans farkı varsa, yani iletim hattında bir süreksizlik varsa, sinyalin bir kısmı o noktadan geriye doğru yansiyacaktır. Yansıyan sinyali kullanarak hasarın kapsamını ve hangi noktada olduğunu belirlemek mümkündür (Cerny, 2009). Yöntem günümüzde geoteknik, hidroloji, inşaat, ziraat, malzeme deneyleri ve havacılık gibi büyük ölçekli uygulama alanlarında kullanılmaktadır (Hartebrodt ve Kabitzsch, 2004).

Örnek bir TDR sistem yapılandırması Şekil 3.1’ de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, TDR cihazı ilk sinyali üretmek için bir örnekleyiciye, iletim hattından yansıyacak dalga biçimini göstermek için bir osiloskopa, üretilen sinyali iletmek için koaksiyel kabloya ve ölçümde kullanılacak bir ölçüm probuna ihtiyaç duyar.



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

Üretilen elektromanyetik dalga, koaksiyel kablo vasıtası ile zemine gömülü problemlara iletilir, empedansta meydana gelen değişiklik yüzünden dalganın bir kısmı geri yansır. Yansıma dalganın enerjisini azaltır ve dalga formunun bitiş noktasını belirlenmesini

engelleyebilir (White ve Zegelin, 1995). Yansımanın yorumlanması, elektromanyetik dalganın gücü ve yayılım hızının empedans değişiminin etkilerinin anlaşılması esasına dayanır. Üretilen dalganın asıl empedansı (Z), elektrik ve manyetik alan vektörlerine bağlı olarak;

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_m}{\epsilon}} \quad (3.1)$$

olarak verilmiştir (von Hippel, 1967).

Burada E elektrik alan vektörü, H manyetik alan vektörü, μ_m ortamın manyetik geçirgenliği ve ϵ ise dielektrik katsayısını vermektedir. Aynı ilişki Kraus (1984), tarafından elektriksel iletkenliğe (σ) bağlı olarak Denklem (3.2)' deki gibi verilmiştir.

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (3.2)$$

İfadeyi basitleştirmeye çalışırsak, yayılan dalganın yansıyan kısmı belirlenebilir.

$$Z_s = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_a}} \quad (3.3)$$

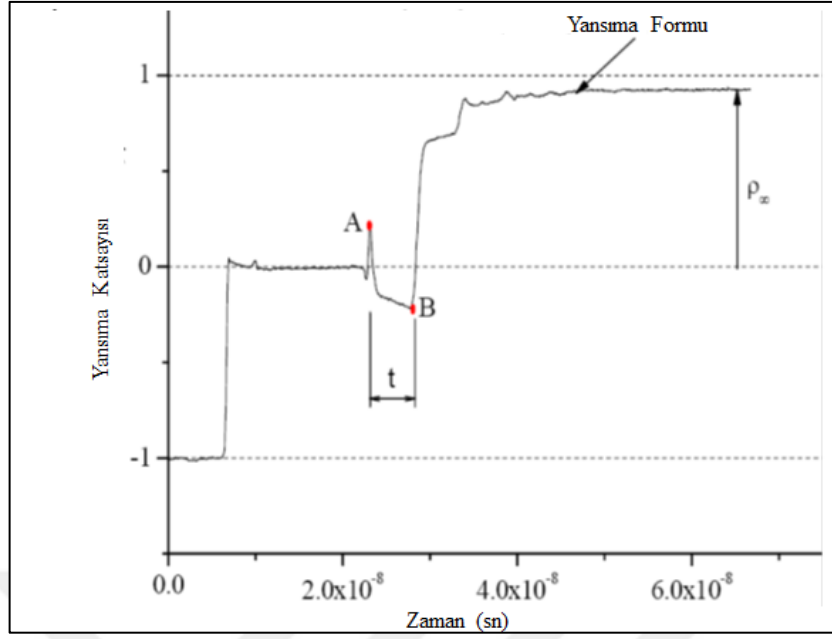
Burada Z_s zemine gömülü problemlerin empedansı, Z_0 koaksiyel kablonun empedansıdır (Yanuka ve diğ., 1988). Koaksiyel kablonun empedansı Denklem (3.4)' te verildiği gibi hesaplanabilir.

$$Z_0 = Z_{TDR} \sqrt{\epsilon_a} \left(\frac{1 + \rho_r}{1 - \rho_r} \right) \quad (3.4)$$

Burada Z_{TDR} TDR cihazının çıkış empedansı ve ρ_r ise yansıma katsayısıdır (White ve Zegelin, 1995). Z_0 ve Z_s arasındaki empedans farkı üretilen elektromanyetik dalganın yansımaya neden olur ve yansıma katsayısı;

$$\rho_r = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \quad (3.5)$$

ifadesiyle elde edilir (Kraus, 1984, White ve Zegelin, 1995). TDR yöntemi ile elde edilmiş tipik bir dalga formu Şekil 3.2' de verilmiştir.



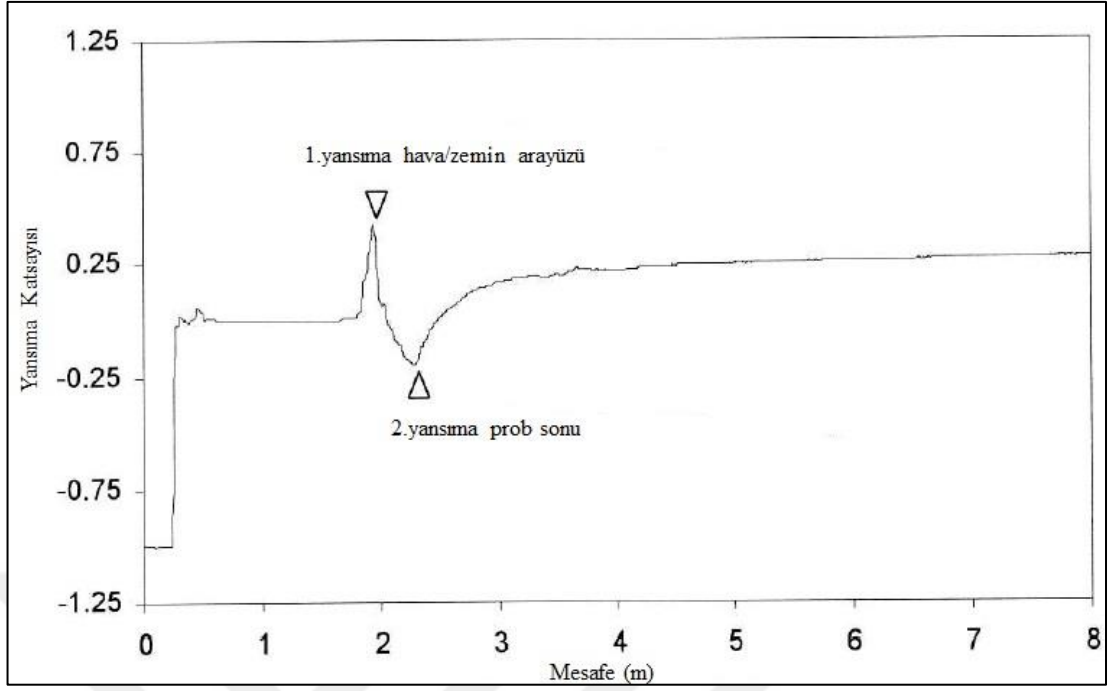
Şekil 3. 2. Örnek bir TDR kaydı (Chung, 2005)

3.1. TDR Yönteminin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı

Bu kısımda, TDR yönteminin geoteknik mühendisliğinde kullanımı açıklanmaktadır. Zeminlerin dielektrik katsayılarının bulunması, dielektrik katsayısı – hacimsel su içeriği ilişkisi, zeminlerin elektriksel iletkenlikleri ve kuru yoğunluklarının TDR ile bulunması hakkında yapılmış çalışmalara değinilmektedir.

3.1.1. TDR yöntemi ile zeminlerin dielektrik katsayılarının bulunması

Malzemelerin dielektrik katsayılarını bulmak için iki farklı yaklaşım söz konusudur. İlk yaklaşım, dielektriği ölçülecek malzemeyi iki plaka arasına yerleştirerek bulunmasıdır. İkinci yaklaşım ise, malzemenin içine koaksiyel bir hat yerleştirilmesi ve hat üzerindeki empedansın ölçülerek dielektrik katsayısının bulunmasıdır. Bir malzemeyi tam olarak tanımlayabilmek için farklı frekanslarda ölçümler gerekir. Bununla birlikte, aynı bilgi koaksiyel hatta zaman alanında elektromanyetik sinyal gönderilerek de elde edilebilmektedir (Fellner-Feldegg, 1969). Fellner-Feldegg yaklaşımından sonra, TDR yöntemi zeminlerin dielektrik katsayılarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmıştır (Giese ve Tiemann, 1975). TDR ile elde edilen tipik bir dalga formu Şekil 3.3’ te verilmiştir.



Şekil 3.3. Tipik bir TDR ölçümü (Yu ve Drnevich, 2004)

Şekilden de görüldüğü gibi ölçümlerde belirgin olarak iki adet yansıma oluşmaktadır. İlk yansıma hava zemin ara yüzeyinde, ikincisi ile probun sonunda meydana gelmektedir (Yu ve Drnevich, 2004).

Elektromanyetik dalganın yayılma hızı v , yansıma noktaları (prob başlangıç ve uç noktalarında) arasındaki seyahat süresi ile ilişkilidir. Bu ilişki Denklem (3.6)' da verilmiştir.

$$v = \frac{2L}{t} \quad (3.6)$$

Burada t (sn) yansıyan sinyalin zemin içerisindeki probun başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki süreyi, L (m) ise probun zemin içerisindeki boyunu ifade etmektedir. Dalganın boşlukta yayılma hızı (c , ışık hızı) ise boşluğun dielektrik katsayısına ve manyetik geçirgenliğine bağlıdır (Cheng, 1989).

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_v \mu_0}} \quad (3.7)$$

Burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğidir ve değeri $4\pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$ kadardır. Elektromanyetik dalganın zemin gibi bir dielektrik malzeme içerisindeki hızı ise,

dielektrik malzemenin manyetik geçirgenliğine (μ) ve dielektrik katsayısına (ϵ) bağlıdır.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon_r}} \quad (3.8)$$

Denklem (3.6), (3.7) ve (3.8) düzenlenirse ifade Denklem (3.9)'daki haline dönüşür.

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{\mu}{\mu_0} \frac{\epsilon}{\epsilon_0}}} = \frac{2L}{tc} \quad (3.9)$$

Denklem (3.9) da geçen μ/μ_0 ifade bağıl manyetik geçirgenlik (μ_r) olarak ifade edilir ve çoğu malzeme için yaklaşık olarak 1'e eşittir (Cheng, 1989). Bölüm 2' de ise ϵ/ϵ_0 değerinin bağıl dielektrik katsayısı olduğunu ve yaklaşık olarak görünen dielektrik katsayısına eşit olduğuna değinilmişti. Bu durumda zemin gibi bir materyalin görünen dielektrik katsayısı;

$$\epsilon_a (\approx \epsilon_r) = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (3.10)$$

halini alır.

3.1.2. Dielektrik katsayısı su içeriği ilişkisi

Dielektrik katsayısının ölçümü ve bu ölçülen değer kullanılarak su içeriğinin hesaplanması son yıllarda sıkça kullanılmasına rağmen, bu konudaki ilk çalışmalar 1939' da başlamıştır (Patterson ve Smith, 1980). Dielektrik katsayısı kullanılarak su içeriğini belirlemek için 1960' lı ve 1970' li yıllara kadar pek çok adım atılmış ancak sonuç elde edilememiştir (Davis ve Annan, 1977). Normalde kablo hasarlarının tespiti için tasarlanan TDR cihazının frekans aralığı, Dielektrik katsayısının da frekansa bağlı olmasından dolayı önemlidir. Bu nedenle Topp ve diğ. (1980) düşük frekans aralığında (1 – 1000 MHz) yaptıkları çalışmalar sonucunda, dielektrik katsayısının doğru olarak bulunabileceğini göstermişlerdir.

Bir önceki bölümde dielektrik katsayısının gerçel ve sanal bölümlerden oluşuğuna değinilmişti. İmajiner kısmın iletim hattı boyunca meydana gelen kayıpları belirttiği söylenir (Davis ve Annan, 1977). Bölüm 2.4' de dielektrik kaybının yani imajiner kısmın, birçok zemin için gerçel kısma oranla ihmal edilebilir düzeyde olduğundan

bahsedilmişti. Yani bir başka deyişle su içeriği ölçümlerinde ihmal edilebilir ölçülerde olmaktadır.

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

$$\theta = 4,3 \cdot 10^{-6} \epsilon_a^3 - 5,5 \cdot 10^{-4} \epsilon_a^2 + 2,92 \cdot 10^{-2} \epsilon_a - 5,3 \cdot 10^{-2} \quad (3.11)$$

Burada θ hacimsel su içeriğini göstermektedir. Dasberg ve Dalton (1985), Roth ve diğ. (1992), Zegelin ve diğ. (1992) ve Heimovaara (1994) tarafından yapılan çalışmalarla bu ilişkinin doğruluğu desteklenmiştir. Hacimsel su içeriği zemin içerisinde bulunan suyun hacminin (V_w), zeminin tüm hacmine (V_{soil}) oranı şeklinde ifade edilir. Bu ifade Denklem (3.12)' de verilmiştir.

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

Denklem (3.11)' de verilen eşitlik, geniş bir aralıkta güvenilir sonuçlar vermektedir. Yalnız organik zeminlerde ve bünyesinde yüksek oranda ince malzeme içeren killi zeminlerde hatalı sonuçlar verebileceği de ortaya konulmuştur (Dobson ve diğ. 1985, Roth ve diğ. 1992 ve Dirksen ve Dasberg, 1993).

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

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

Burada a ve b genel kalibrasyon katsayılarıdır ve bu katsayılar Ledieu ve diğ (1986) için sırasıyla 1,545 ve 8,787 ve Alharti ve Lange (1987) içinse 1,59 ve 7,83 olarak belirlenmiştir.

Ledieu ve diğ. (1986), Denklem (3.13)' de verilen ifadeyi daha da geliştirmişlerdir. dielektrik katsayısının bulunmasında su içeriğinin dışında, zeminlerin kuru yoğunluklarının da etkisi olduklarını söylemişlerdir ve bu etkiyi Denklem (3.14)' deki gibi sunmuşlardır.

$$\sqrt{\epsilon_a} = a\rho_k + b\theta + m \quad (3.14)$$

Burada a, b ve m genel kalibrasyon katsayıları ve ρ_k ise zeminin kuru yoğunluğudur. Genel kalibrasyon katsayıları sırasıyla 0,297, 8,79 ve 1,344 olarak belirlenmiştir.

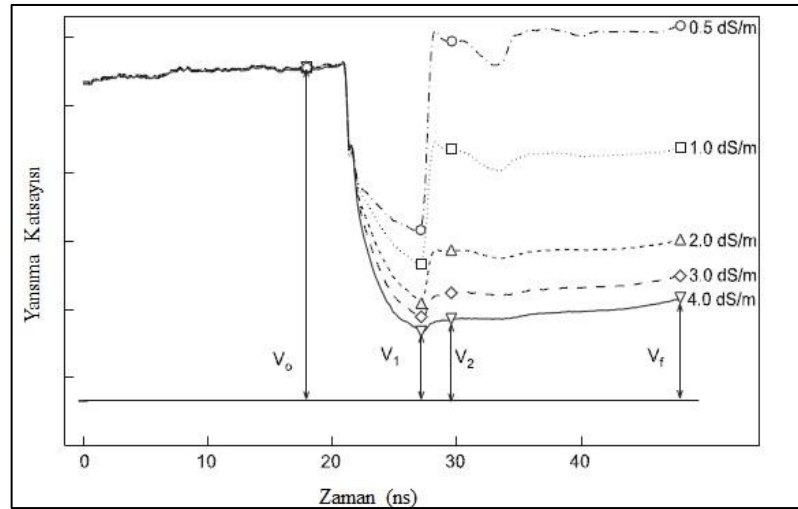
Malicki ve diğ. (1996) yaptıkları çalışmalarda dielektrik katsayısı, hacimsel su içeriği ilişkisinde zeminlerin kuru yoğunluk değerinin de olması gerektiğini, bu durumda daha uygun sonuçlar elde edildiğini belirtmişlerdir ve Denklem (3.15)' te verilen ifadeyi önermişlerdir.

$$\theta = \frac{\sqrt{\epsilon_a} - 0,819 - 0,618\rho_k + 0,159\rho_k}{7,17 + 1,18\rho_k} \quad (3.15)$$

Arsoy ve diğ. (2013), 17 farklı kum numunesi üzerinde yöntemin kullanılabilirliğini test etmişlerdir. Yaptıkları çalışma da, genel kalibrasyon katsayıları yerine, zeminlere özgü kalibrasyon katsayıları kullanıldığında sonuçların daha uygun olduklarını göstermişlerdir.

3.1.3. TDR yöntemi ile zeminlerin elektriksel iletkenliklerinin bulunması

Bir TDR yansıma dalgası bize zeminlerin elektriksel iletkenlikleri (σ_a) hakkında bilgiler vermektedir. Bu dalga formundaki bazı voltaj değerleri elektriksel iletkenliğin bulunması için önemlidir. Şekil 3.4' te bir TDR dalga formu ve bazı voltaj adımları gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Elektriksel iletkenlik için bazı voltaj adımları (Munoz-Carpena ve diğ.,2005)

Şekil 3.4'te gösterilen V_0 TDR dalgasının başlangıçtaki genliğini, V_1 probun bitiş noktasındaki genliği, V_2 probun bitimindeki zeminden yansıyan noktalardaki genliği ve V_f ise final genliğini göstermektedir.

Giese ve Tiemann (1975) yaptıkları çalışmalarda elektriksel iletkenliğin Denklem (3.16)'da verilen ifade ile bulunabileceğini söylemişlerdir. Denklem (3.16)'da belirtildiği üzere, dalga formunun sadece başlangıç ve bitiş voltaj adımlarını kullanmışlardır.

$$\sigma_a = \frac{\sqrt{\epsilon_a}}{120\pi L} \left(\frac{2V_0}{V_f} - 1 \right) \quad (3.16)$$

Dalton ve diğ. (1984) ise yaptıkları çalışmada Şekil 3.4' te gösterilen V_1 ve V_2 genliklerini kullanmışlardır. Elektriksel iletkenliği ise Denklem (3.17)' deki gibi ifade etmişlerdir.

$$\sigma_a = \frac{\sqrt{\epsilon_a}}{120\pi L} \left(\frac{V_1}{V_2 - V_1} \right) \quad (3.17)$$

Zegelin ve diğ. (1989) yaptıkları çalışmada V_2 dışında tanımlanan tüm genlikleri kullanarak, Denklem (3.16) ve (3.17)' yi geliştirerek yeni bir eşitlik önermişlerdir. Önerdikleri bu eşitlik Denklem (3.18)' de verilmiştir.

$$\sigma_a = \frac{\sqrt{\epsilon_a}}{120\pi L} \frac{V_1}{V_f} \left(\frac{2V_0 - V_f}{2V_0 - V_1} \right) \quad (3.18)$$

Yu ve Drnevich (2004) yaptıkları çalışmalar sonucunda geçmişte elektriksel 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 (3.19)'da bu eşitlik verilmiştir.

$$\sigma_a = \frac{1}{C} \left(\frac{V_0}{V_f} - 1 \right) \quad (3.19)$$

Burada V_0 , başlangıç voltajı, V_f , sonuç voltajı, C ise prob konfigürasyonuna bağlı bir sabiti göstermektedir ve Denklem (3.20)'de verilmiştir.

$$C = \frac{2\pi L_p Z_{sin}}{\ln\left(\frac{d_0}{d_1}\right)} \quad (3.20)$$

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 elektriksel iletkenliği bulunabilir. Hilhorst (2000), suyun elektriksel iletkenliği ile zeminlerin elektriksel iletkenliği ve dielektrik katsayılarına bağlı olarak teorik esaslı lineer bir ilişkinin olduğunu göstermiştir. Bu ilişki Denklem (3.21)'de verilmiştir.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_p}{\epsilon_p} (\epsilon_a - \epsilon_0) \quad (3.21)$$

Burada σ_p zemin boşluklarında bulunan suyun elektriksel iletkenliğini, ϵ_0 ise tamamen kuru halde olan zeminin dielektrik katsayısını ifade etmektedir.

3.1.4. TDR ile su içeriği ve kuru yoğunluğun bulunması

TDR yöntemi ile zeminlerin hacimsel su içeriğini bulmak için kullanılan en popüler kalibrasyon türü, Denklem (3.13)'te verilen zeminlerin dielektrik sayılarının karekökü ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişkidir.

Geoteknik uygulamalarının hemen hemen tamamına yakın bir bölümünde hacimsel değil, gravimetrik su içeriği kullanılmaktadır. Denklem (3.22)'de hacimsel su içeriği ile gravimetrik su içeriği arasındaki ilişki gösterilmiştir.

$$\theta = w \frac{\rho_k}{\rho_w} \quad (3.22)$$

Burada w zeminlerin gravimetrik su içeriği, ρ_w ise suyun yoğunluğunu göstermektedir.

Siddiqui (1995 ve 2000) tarafından yapılan çalışmalarda Denklem (3.13) ve (3.22) ilişkilendirilerek, zeminlerin kuru yoğunlukları ile gravimetrik su içerikleri kullanılmıştır. Bu ilişki Denklem (3.23)'de gösterilmiştir.

$$\sqrt{\epsilon_a} \frac{\rho_w}{\rho_k} = a + bw \quad (3.23)$$

Burada a ve b zemine özgü kalibrasyon katsayılarıdır.

Denklem (3.23)' e benzer bir ilişki Feng ve Lin (1999) tarafından zeminlerin elektriksel iletkenliği ve gravimetrik su içeriği için kullanılmıştır. Bu ilişki Denklem (3.24)' de verilmiştir.

$$\sqrt{\sigma_a} \frac{\rho_w}{\rho_k} = m + dw \quad (3.24)$$

Burada m ve d zemine özgü kalibrasyon katsayılarıdır. Denklem (3.23) ve (3.24) birleştirildiği zaman, zeminlerin dielektrik katsayıları ve elektriksel iletkenlikleri arasında Denklem (3.25)' te verilen ilişki elde edilmiştir.

$$\sqrt{\sigma_a} = \frac{bm - ad}{b} \frac{\rho_k}{\rho_w} + \frac{d}{b} \sqrt{\epsilon_a} \quad (3.25)$$

Denklem (3.24) basitleştirildiğinde Denklem (3.26) elde edilmiştir.

$$\sqrt{\sigma_a} = f + g\sqrt{\epsilon_a} \quad (3.26)$$

Burada f ve g değerleri zeminlerin tipine ve boşluk suyunun iletkenliğine bağlı sabitlerdir.

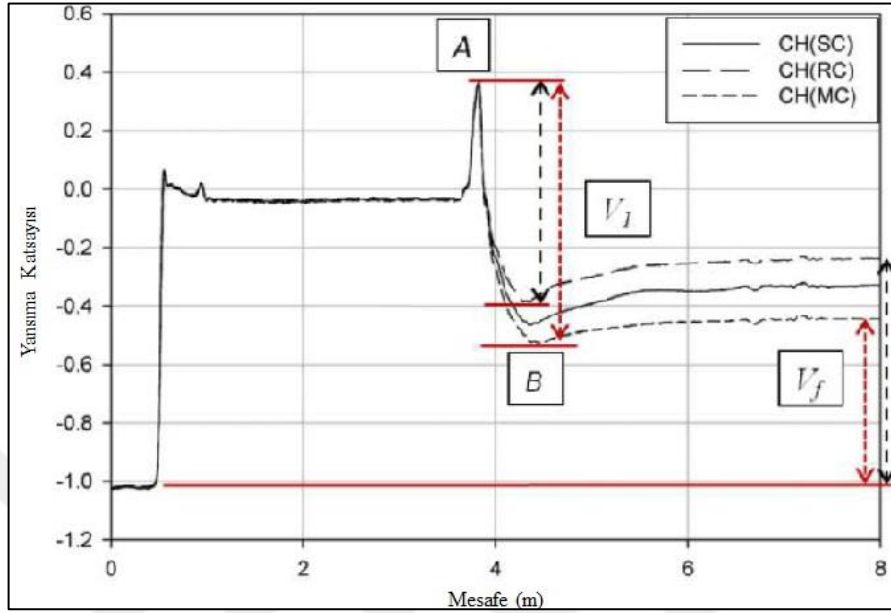
Zeminlerin gravimetrik su içeriği ve kuru yoğunlukları, zeminlerin dielektrik katsayısı ve elektriksel iletkenliklerine bağlı olarak Denklem (3.25)' ten yararlanarak elde edilmiştir. Gravimetrik su içeriği ifadesi Denklem (3.27), kuru yoğunluk ifadesi ise Denklem (3.28)' de gösterilmiştir.

$$w = \frac{m\sqrt{\epsilon_a} - a\sqrt{\sigma_a}}{b\sqrt{\sigma_a} - d\sqrt{\epsilon_a}} \quad (3.27)$$

$$\rho_k = \frac{d\sqrt{\epsilon_a} - b\sqrt{\sigma_a}}{ad - mb} \quad (3.28)$$

Denklem (3.27) ve (3.28) ile gösterilen bu ifadeler basitleştirilmiş ve Tek Adımlı TDR Yöntemi (One-Step TDR) için temel oluşturmuşlardır ve ASTM D6780-05 olarak standart haline getirilmiştir.

Jung ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmalarda tek adımlı TDR yöntemini bir adım öteye taşımışlardır. Sadece yansıma formunu kullanarak zeminlerin kuru yoğunluklarını ve gravimetrik su içeriğini elde ettikleri yeni bir yöntem geliştirmişlerdir.



Şekil 3.5. TDR dalga formu ve kritik genlikler (Jung ve diğ., 2012)

TDR dalga formundan elde ettikleri bazı voltaj adımları kullanılarak elde ettikleri kuru yoğunluk ifadesi Denklem (3.29)' da verilmiştir.

$$\rho_k = \frac{\frac{V_1}{V_f}}{c_1 + d_1(\epsilon_a - 1) - c_1 \exp[-f_1(\epsilon_a - 1)]} \rho_w \quad (3.29)$$

Buradaki c_1 , d_1 ve f_1 değerleri zemine özgü kalibrasyon katsayılarıdır. V_1 ve V_f ise TDR dalga formundan elde edilen ilk voltaj düşümü ve final voltaj değerleridir. Şekil 3.5' te bu değerlerin nasıl bulunacağı gösterilmiştir.

Zeminlerin gravimetrik su içeriğini belirlemek için Denklem (3.30)' daki ifade kullanılmıştır.

$$w = \frac{1}{b} \left(\sqrt{\epsilon_a \frac{\rho_k}{\rho_w}} - a \right) \quad (3.30)$$

Burada a ve b zemine özgü kalibrasyon katsayılarıdır.

4. ADR (AMPLITUDE DOMAIN REFLECTOMETRY) YÖNTEMİ

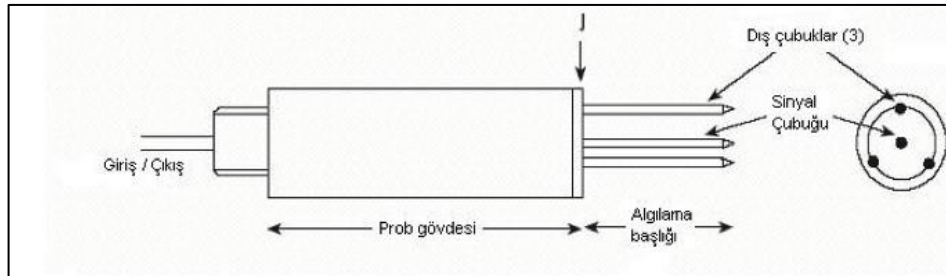
TDR dışında zeminlerin su içeriğini dolaylı olarak belirleyen yöntemlerden biri de ADR (Amplitude Domain Reflectometry) yöntemidir. Yöntemin ana prensibi zemin içine özel olarak yerleştirilmiş iletken metallere gönderilen elektromanyetik dalganın, bir diğer metal iletkenle geriye dönen dalganın karşılaştırılması esasına dayanmaktadır.

Dalga bir iletkenle diğerine zemin üzerinden geçtiğinde zemin özelliklerinden olan su içeriğinden en çok etkilenir. ADR tekniği ve cihazı ile zeminin dielektrik katsayısı belirlenir ve buna bağlı olarak, önceden yapılmış ampirik çalışmalardan elde edilen bağıntılar yardımıyla zeminin su içeriği belirlenir.

Bu tez kapsamında kullanılan ölçüm sensörü, Delta T firması tarafından üretilmiş ML2x tipi Theta Probdur.

4.1. Theta Probu Özellikleri

ADR Probu (Theta prob – ML2x), bir giriş/çıkış kablosu, su yalıtım muhafazası (prob gövdesi) ve bir algılama başlığında oluşur. Muhafaza bir osilatör ve ölçüm döngüsü içerir. Algılama başlığı ise zeminin içine batırılan 4 adet çelik çubuktan oluşmaktadır. Şekil 4.1.'de probun kesiti verilmiştir.



Şekil 4.1. Theta prob – ML2x kesiti

Prob gövdesi 112mm uzunluğundadır. Algılama başlığı ise 60mm uzunluğunda ve 26,5mm çapındaki bir radyal aralık ile 3mm çapında çelik çubuklardan ibarettir.

Dıştaki üç çubuk, merkez çubuğun etrafında elektriksel bir kalkan görevi görür (Arsoy, 2014). Tablo 4.1.' de Theta probun teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Theta prob – ML2x teknik özellikleri

Probun Teknik Özellikleri	
Prob tipi	ML2x
Ölçüm parametresi	Hacimsel su içeriği, θ (m^3m^{-3} veya %)
Ölçüm aralığı	0,05-0,6 m^3m^{-3} aralığında yüksek doğrulukta Toplam ölçüm aralığı: 0-1 m^3m^{-3}
Doğruluk	$\pm 0,01 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, 0 - 40°C Zeminlere özgü
*Tuzluluk söz konusu olursa, hatalarda artış olabilir.	$\pm 0,02 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, 40 – 70°C kalibrasyon yapıldığında $\pm 0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, 0-70°C Cihaz için tanımlanan katsayılar kullanıldığında
Tuzluluk kaynaklı hata miktarları	0-250 mSm^{-1} , 0,0001 m^3m^{-3} ' den daha az azalma 250-2000 mSm^{-1} , değişiklik söz konusu değil
Etkili zemin hacmi	4cm çap, 6cm uzunluğunda (yaklaşık 75 cm^3) merkezi çubuğu çevreleyen silindir içinde %95' ten fazla etkili
Ortam/Çevre etkisi	Arıza yapmadan ve korozyona uğramadan uzun süre boyunca farklı zemin tiplerinde veya sularda gömülmeye dayanıklı
Açılış süresi	1 – 5 sn
Tepki süresi	0,5 sn' den daha az
Çalışma döngüsü	%100 (sürekli çalıştırmak mümkün)
Dış malzeme	PVC
Çubuklar	Paslanmaz çelik
Kablo uzunluğu	Standart: 5m , Max:100m
Ağırlık	Yaklaşık 350gr (5m' lik kablo için)

4.2. Theta Probun Çalışma Prensibi

Bir dielektrik malzemenin davranışı, üzerine uygulanan elektromanyetik dalganın frekansına göre değişir. Yaklaşık 1GHz' ın altındaki frekanslardaki ıslak zeminler için Denklem (2.6) geçerlidir (Krauss, 1984 ve Whalley, 1993). Bir çok zemin türü için, dielektrik katsayısının sanal kısmının, gerçel kısmından çok çok küçük olduğunu Bölüm 2' de bahsetmiştik. Sanal kısmın etkisini en aza indirmek için ölçümler genellikle 30MHz (Wobschall, 1978) ile 1GHz arasındaki frekanslarda yapılır.

Theta probun çalışma frekansı sanal kısmın etkilerini yok etmek için 100MHz olarak ayarlanmıştır. Üretilen 100MHz' lik sinüzoidal bir sinyal, prob içindeki iletim hattından algılama başlığındaki metal çubuklara ve onlar aracılığı ile zemine iletir.

Üretilen sinyal, iletim hattı boyunca zemin içindeki problemlara yayılır. Eğer probun empedansı, iletim hattının empedansından farklı ise sinyalin bir kısmı iletim hattı boyunca geri yansıyacaktır. Yansıma katsayısı olarak ifade edilen bu durum, prob ile iletim hattının empedansına bağlı olarak ifade edildiğine Bölüm 3’ te de değinilmişti. Yansıma katsayısı (ρ_r) ifade olarak Denklem (3.5)’ te verilmişti.

Yansıyan sinyal ile başlangıç sinyalinin birleşmesinden dolayı iletim hattı boyunca voltaj genliğinde değişim gözlemlenir. Bu etkiye duran dalga oranı etkisi de denebilir. Başlangıç ve yansıyan bileşenler sinüs dalgası şeklinde olduğundan, duran dalga da sinüs dalgası şeklindedir (Gaskin ve Miller, 1995).

Pratikte çoklu sinyal yansımaları, duran dalganın etkilendiği zemin probunun ucunda meydana gelir. Prob sinyallerindeki azalma zeminin dielektrik katsayısının bir fonksiyonu olduğu için, bu tarz prob yansımalarının modellenmesi karmaşıktır. Basitleştirmek için, iletim hattı ve probun kesişim noktasındaki tekli yansıma etkisi göz önüne alınır (Gaskin ve Miller, 1995).

İletim hattının başlangıcında üretilen sinyalin voltajı (V_0);

$$V_0 = a \sin 2\pi f t \quad (4.1)$$

olarak ifade edilir. Burada a genlik, f üretilen dalganın frekansı ve t ise zamandır. Belirli bir süre sonra aynı noktada yansıyan bileşen Denklem (4.2)’ de ifade edildiği gibi olacaktır.

$$V_0 = a \sin 2\pi f t + a \rho_r \sin 2\pi f \left(t - \frac{2l}{V_p} \right) \quad (4.2)$$

Burada l iletim hattının uzunluğu, V_p ise hat boyunca yansıyan sinyalin hızıdır. İletim hattının uzunluğu $V_p/4f$ olarak seçilirse Denklem (4.2) de verilen ifade Denklem (4.3)’ e dönüşür.

$$V_0 = a \sin 2\pi f t - a \rho_r \sin 2\pi f t \quad (4.3)$$

Denklem (4.3) tekrar düzenlenirse;

$$V_0 = a(1 - \rho_r) \sin 2\pi f t \quad (4.4)$$

halini alır. Üretilen dalga sinüs dalgası olduğu için Denklem (4.4)' ün alacağı pik değer Denklem (4.5)' teki gibi olur.

$$V_0 = a(1 - \rho_r) \quad (4.5)$$

Osilatörün her döngüsünde Denklem (4.5)' te verilen değere ulaşılır. Benzer şekilde iletim hattı, prob kesitinde pik voltaj (V_j) değeri Denklem (4.6)' daki gibi olacaktır.

$$V_j = a(1 + \rho_r) \quad (4.6)$$

Bu iki nokta arasındaki genlik farkı Denklem (4.7)' de verildiği hali alacaktır.

$$V_j - V_0 = 2a\rho_r \quad (4.7)$$

Bu genlik farklarının ölçümlerinde, zemine batırılan çelik çubukların rölatif empedansları değerlendirilir. Modellerdeki zorluklardan dolayı, cihazın kalibrasyonuna yönelik ampirik bir yaklaşımda bulunulur.

Çubukların empedansı tamamen su içinde olduğu durumda en düşük değerini alır. Proben en sonunda ölçüm almak için deneme gerçekleştirildiğinde çubuk uzunluklarının 83mm olması gerektiği bulunmuştur. Eğer çubuklar bu değerden uzun olursa, giden ve dönen sinyaller girişim yaparlar ve sinyal bozulur. Bu durumda empedansı olduğundan küçük gösterir. İri partikül içeren zeminlerde 83mm kırılğan olabileceği için, çubuk uzunlukları 60mm seçilmiştir (Gaskin ve Miller, 1995).

4.3. ADR Yönteminin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı

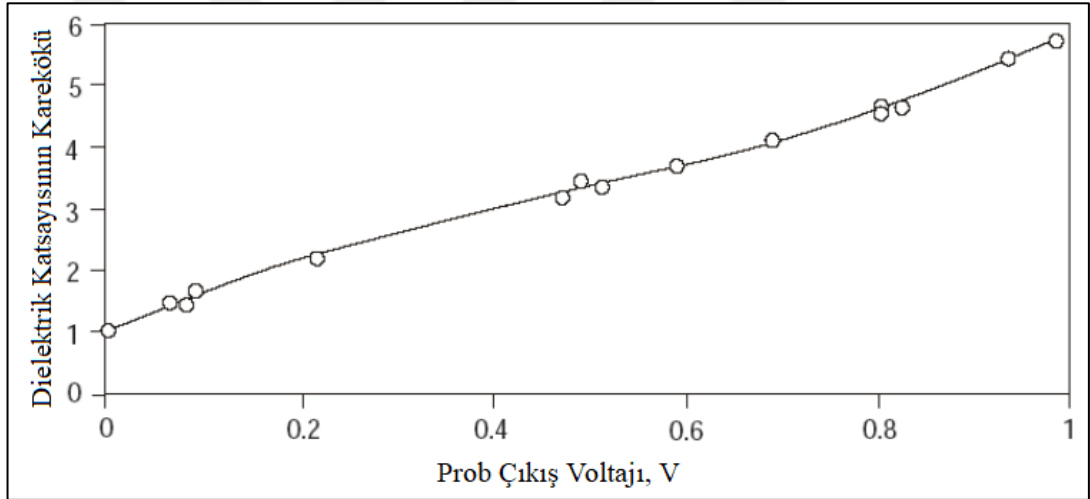
Bu kısımda, ADR yönteminin geoteknik mühendisliğinde kullanımı açıklanmaktadır. Zeminlerin dielektrik katsayılarının bulunması, dielektrik katsayısı – hacimsel su içeriği ilişkisi, zeminlerin kuru yoğunluklarının ADR ile bulunması hakkında yapılmış çalışmalara değinilmektedir.

4.3.1. ADR yöntemi ile zeminlerin dielektrik katsayılarının bulunması

Bir önceki bölümde (Bölüm 3.1.1) TDR ile zeminlerin dielektrik katsayılarının bulunmasına değinilmişti. İlgili bölümde, zeminler için bağıl dielektrik katsayısının (ϵ_r), zeminlerin görünen dielektrik katsayılarına (ϵ_a) yaklaşık olarak eşit olmasından

ve nedenlerinden bahsedilmiştir. TDR yönteminde zeminlerin görünen Dielektrik katsayıları Denklem (3.10)' da verildiği gibi, dalganın boşlukta yayılma hızına (ışık hızı), yansıyan sinyalin zemin içindeki probun başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki süreye ve prob uzunluğuna bağlıdır.

ADR yönteminde ise prob kesitindeki pik voltaj (V_j) ile, başlangıç voltajı (V_0) arasındaki fark ölçülmektedir. Denklem (4.7) ile ifade edilen ve ölçüm sonucunda elde edilen bu fark genlik farkı (V) olarak adlandırılmıştır. Whalley, Knight, Zegelin ve Topp (1994) tarafından yapılan çeşitli çalışmalarda, ölçülen genlik farkları ile görünen dielektrik katsayılarının karekökleri arasında bir ilişki kurulmuştur. Farklı tip Theta Problar için, farklı ilişkiler söz konusudur. Bu çalışma kapsamında kullanılan Theta prob ML2x türü için belirlenen ilişki Şekil 4.2' de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. ML2x tipi prob için genlik farkı – dielektrik katsayısının karekökü arasındaki ilişki

ADR probu ile ölçülen genlik farkı ile, zeminlerin görünen dielektrik katsayılarının karekökleri arasında Şekil 4.2' deki gibi gösterilen bu ilişki Denklem (4.8)' deki gibi ifade edilmektedir.

$$\sqrt{\epsilon_a} = 4,70V^3 - 6,40V^2 + 6,40V + 1,07 \quad (4.8)$$

Denklem (4.8) de verilen bu ifade, yaklaşık olarak doğrusal şekilde ifade edilmiş ve Denklem (4.9)' daki gibi verilmiştir.

$$\sqrt{\epsilon_a} = 4,44V + 1,10 \quad (4.9)$$

4.3.2. ADR ile su içeriğinin ve kuru yoğunluğunun bulunması

Bir önceki bölümde dielektrik katsayısı ile zeminlerin hacimsel su içerikleri arasındaki ilişkiden bahsedilmişti. Ledieu ve diğ. (1986) ve Alharti ve Lange (1987) yaptıkları çalışmalarda bu iki değer arasında lineer bir ilişki kurmuşlardı. Kurulan bu ilişki Denklem (3.13)' te gösterilmişti.

Whalley (1993) ve White, Knight, Zeggelin ve Topp (1994) yıllarında ADR probu ile yaptıkları çalışmalarda Denklem (3.13) ile verilen ilişkiden yararlanmışlardır. Denklem de verilen a ve b kalibrasyon katsayılarını, a_0 ve a_1 olarak ifade etmişler ve Denklem (4.10)' daki şekilde yazmışlardır.

$$\sqrt{\epsilon_a} = a_1 \theta + a_0 \quad (4.10)$$

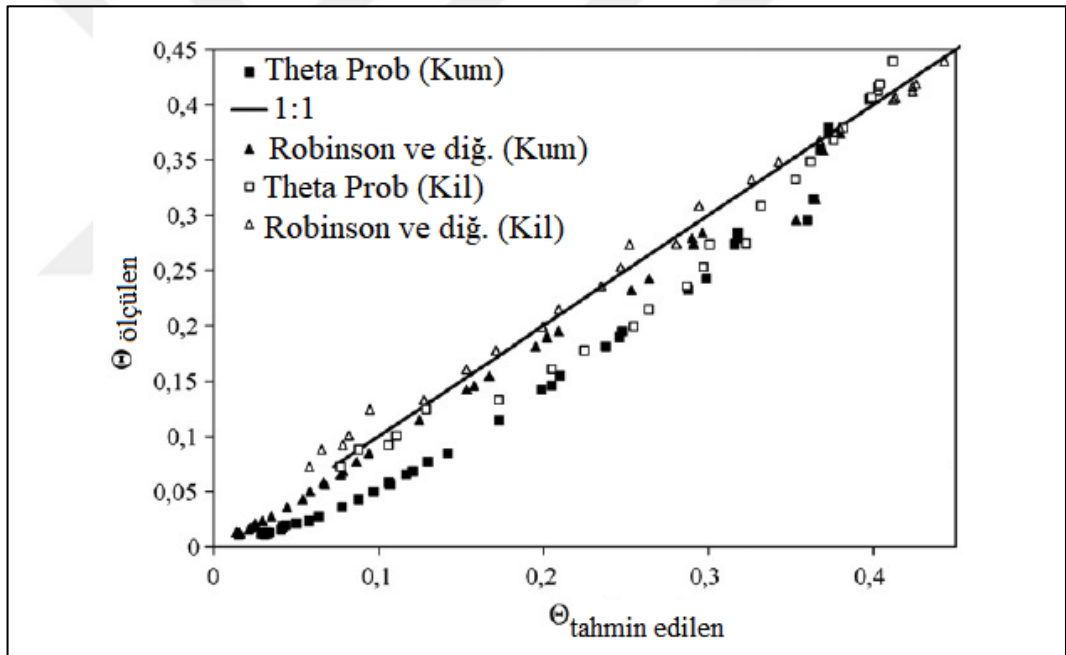
Zeminlere özgü kalibrasyona ihtiyaç duyulmadığı durumlarda, çok sayıda mineral ve organik zemin üzerinde yapılan çalışmadan elde edilmiş genel kalibrasyon katsayıları kullanılabilir. Cihaz için tanımlanan kalibrasyon katsayıları, mineral zeminler için $a_0=1,6$ ve $a_1=8,4$ olarak, organik zeminler içinse $a_0=1,3$ ve $a_1=7,7$ olarak alınmaktadır. Bu genel kalibrasyon katsayıları üreticiye göre $\pm 0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ hassasiyet vermektedir (Arsoy, 2014).

Arsoy (2014), ADR probu (Theta prob) ile su içeriğinin belirlenmesine yönelik yaptığı çalışmada, hem cihaz için tanımlanan genel kalibrasyon katsayılarını kullanmış, hem de zemine özgü deneysel olarak belirlenen kalibrasyon katsayılarını kullanmıştır. Elde ettiği su içeriği değerlerini gerçek değerler ile kıyasladığında, cihaza tanımlanan genel kalibrasyon katsayılarını kullanarak bulduğu değerler, gerçek değerlerden sapma gösterirken, zemine özgü kalibrasyon katsayılarını kullanarak bulduğu değerlerin gerçeğe daha yakın olduğunu belirlemiştir.

Arsoy ve diğ. (2013), Kalsiyum karpit gaz basıncı yöntemi ile zeminlerin su içeriklerini belirlemek amacıyla yaptığı çalışmalarda, sonuçları hem etüv sonuçları ile hem de ADR probu sonucunda elde edilen su içeriği değerleri ile kıyaslamışlardır. Yüksek plastisiteli kil, düşük plastisiteli silt ve iyi derecelenmiş kum üzerinde yaptıkları ölçümlerde, hem cihazın kalibrasyon katsayılarını kullanarak sonuç elde etmişler, hem de zeminlere özgü kalibrasyon katsayıları belirlenerek su içeriği

değerlerini belirlemişlerdir. Killi ve siltli zemin için zemine özgü kalibrasyon yaparak elde ettikleri su içeriği değerleri etüv sonuçlarından elde edilen su içeriği değerlerine yaklaşıırken, kumlu zemin için hem cihazın kalibrasyon dataları hem de zemine özgü kalibrasyon datalarından elde ettikleri sonuçların etüv sonuçlarına çok yakın olduğu görülmektedir.

Kargas ve Kerkides (2009), kumlu ve killi zeminler üzerinde zeminlerin hacimsel su içeriklerini belirlemeye yönelik çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada zeminlerin dielektrik katsayılarını hem Robinson ve diğ. (2005) tarafından önerilen yöntem ile hem de Denklem (4.8)'de verilen ADR probu ile belirlemişlerdir. Dielektrik katsayılarında elde ettikleri hacimsel su içerikleri gösteren karşılaştırmalı grafik, Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Hacimsel su içeriklerinin karşılaştırılması (Kargas ve Kerkides, 2009)

Zemine özgü katsayıları belirlemek için iki nokta kalibrasyonu kullanılmaktadır. Yöntem biri kuru, diğeri ıslak zeminden olmak üzere iki adet ölçüm sonucundan elde edilen verilerin kullanılması ilkesine dayanmaktadır. Bu yöntemde; belirli su içeriğine sahip zemin örneği alınır. Bu zemin örneği ağırlığı (W) ve hacmi (L) bilinen bir kalıp içerisinde arazideki yoğunluğuna yakın olacak şekilde sıkıştırılır. Sıkıştırılan bu zemin içine ADR probu tamamen batırılır ve ölçüm alınarak genlik farkı değeri okunur. Denklem (4.8) yardımıyla, ıslak zeminin dielektrik katsayısının karekökü belirlenir.

Daha sonra kuru zemin numunesi de aynı şartlarda kalıp içerisinde sıkıştırılır. Prob zemine batırılarak okumalar yapılır ve yine Denklem (4.8) yardımıyla kuru zeminin dielektrik katsayısının karekökü ($\varepsilon_0^{0.5}$) hesaplanır. Zemin tamamen kuru olduğu için su içeriği sıfır ($\theta=0$) olacaktır. Bu durumda Denklem (4.10), Denklem (4.11)' deki hale dönecektir ve zeminin a_0 kalibrasyon katsayısı bulunmuş olacaktır.

$$a_0 = \sqrt{\varepsilon_0} \quad (4.11)$$

Islak zemin ağırlığı (W), kuru zemin ağırlığı (W_0) ve zeminin hacmine (L) bağlı olarak, hacimsel su içeriği Denklem (4.12)' deki gibi yazılabilir.

$$\theta = \frac{W-W_0}{V_o} \quad (4.12)$$

Denklem (4.10), (4.11) ve (4.12) birleştirilerek, diğer kalibrasyon katsayısı, Denklem (4.13)' deki gibi bulunabilir.

$$a_1 = \frac{\sqrt{\varepsilon} - \sqrt{\varepsilon_0}}{\theta} \quad (4.13)$$

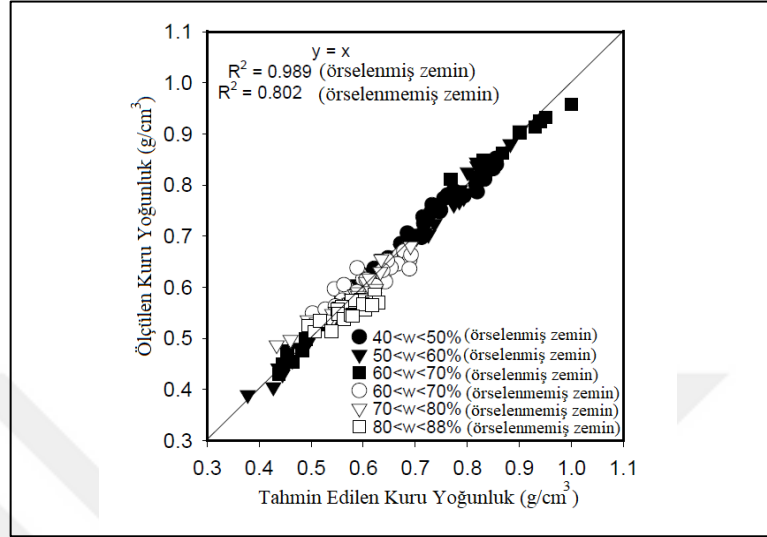
Zeminlere özgü belirlenen a_0 ve a_1 katsayıları yardımıyla, zeminlerin su içerikleri belirlenir. Gravimetrik su içeriklerini belirlemek için Denklem (3.20)' deki bağıntı kullanılır.

Theta prob ile zeminlerin kuru yoğunluklarının belirlenmesine yönelik çalışma Wijaya ve diğ. (2002), tarafından yapılan çalışmalardır. Çalışma arazide belir bir gölgede kuru yoğunluk değerlerinin ölçülerek haritalandırılması üzerinedir. Çalışmada prob ile hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmış ve Denklem (3.22) ve (4.14) yardımıyla zeminlerin kuru yoğunlukları tahmin etmişlerdir.

$$\rho_k = \rho_n - \theta_{ADR} \rho_w \quad (4.14)$$

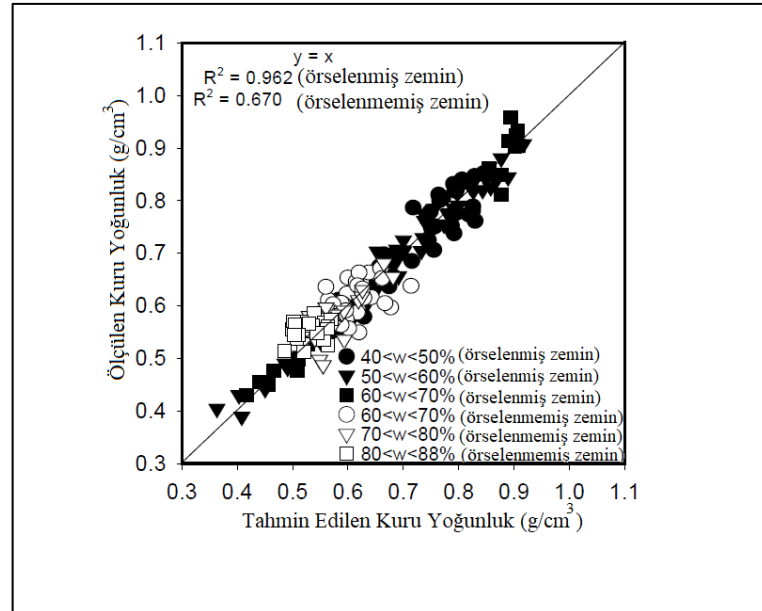
Burada ρ_n ve ρ_w , sırasıyla zeminin doğal yoğunluğu ve suyun yoğunluğunu ifade etmektedir. Denklem (4.14)'de verilen doğal yoğunluğun tahmini için toprak örnekleri 100cm^3 çelik halka kullanılarak alınarak ve tartılarak belirlenmiştir. Denklem (3.22)'de verilen gravimetrik su içeriği de laboratuvarda etüvde kurutarak belirlemişlerdir. Denklemler yardımı ile tahmin ettikleri kuru yoğunluk değerlerini,

laboratuvar da etüv de kurutarak elde ettikleri kuru yoğunluk değeri ile kıyaslamışlardır. Denklem (4.14)'ü kullanarak belirledikleri kuru yoğunluk karşılaştırmaları Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Doğal yoğunluğa bağlı belirlenen kuru yoğunlukları karşılaştırılması (Wijaya, 2002)

Denklem (3.22)'i kullanarak belirledikleri kuru yoğunluk karşılaştırmaları ise Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Gravimetrik su içeriğine bağlı belirlenen kuru yoğunlukları karşılaştırılması (Wijaya, 2002)

5. MALZEME VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında daha önceki bölümde anlatılan ADR yöntemi kullanılarak farklı zeminlere ait dielektrik katsayılarının karekök değerleri bulunarak, zeminlerin hacimsel su içerikleri, kuru yoğunlukları ve gravimetrik su içerikleri tahmin edilmiştir. Öncelikle deneyde kullanılan zeminlerin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada ise dielektrik katsayısı ile hacimsel su içeriği, kuru yoğunluk ve gravimetrik su içeriği arasındaki ilişkileri belirlemek için kompaksiyon kalıplarına sıkıştırılan zemin örneklerinden ADR ölçümleri alınmıştır. Son olarak ADR ölçümlerinden elde edilen değerleri, gerçek değerleri ile kıyaslamak amacı ile ölçüm yapılan zeminlerden örnekler alınarak etüvde kurutma ilkelerine bağlı olarak gerçek değerleri belirlenmiştir.

5.1. Malzeme

Çalışmalar TS1500’ de belirtilen 14 adet zemin sınıfı ve kaolin numunesi olmak üzere 15 farklı zemin üzerinde yapılmıştır. Bu numuneler; kil grubu CH (yüksek plastisiteli kil), CI (orta plastisiteli kil) ve CL (düşük plastisiteli kil), silt grubu MH (yüksek plastisiteli silt), MI (orta plastisiteli silt) ve ML (düşük plastisiteli silt) olacak şekilde ince daneli zeminler ve kum grubu SW (iyi derecelenmiş kum), SP (üniform kum), SM (Siltli kum), SC (Killi kum), SW-SM (iyi derecelenmiş siltli kum), SW-SC (iyi derecelenmiş killi kum), SP-SM (kötü derecelenmiş siltli kum) ve SP-SC (kötü derecelenmiş killi kum) olacak şekilde iri daneli zeminler üzerinde yapılmıştır. Çalışmada çakıl grubu zeminler, Theta probun çelik uçlarının boyutları uygun olmadığı için kullanılmamıştır.

Çalışma kapsamında geoteknik özelliklerini belirlemek için elek analizi deneyleri, kıvam limiti deneyleri, özgül kütle tayini ve organik madde miktarının tayini için deneyler yapılmıştır. İnce daneli zeminlerin geoteknik özellikleri Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

İri daneli zeminlerin geoteknik özellikleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.1. İnce daneli zeminlerin geoteknik özellikleri

Sınıf (TS 1500)	CL	CI	CH	ML	MI	MH
Özgül Ağırlık	2,63	2,60	2,56	2,55	2,60	2,58
Kil+Silt Oranı (%)	85	90	80	90	95	90
Likit Limit	33,8	39,0	53,0	30,0	40,0	65,0
Plastisite İndisi	13,8	15,0	33,0	8,0	12,0	30,0
Organik Madde Miktarı (%)	1,29	2,11	1,43	1,87	1,98	2,14

Tablo 5.2. İri daneli zeminlerin geoteknik özellikleri

Sınıf (TS 1500)	SP	SP/SM	SP/SC	SW	SW/SM	SW/SC	SM	SC
Özgül Ağırlık	2,44	2,59	2,62	2,64	2,62	2,67	2,6	2,62
Kil+Silt Oranı (%)	2,30	5,70	7,00	0,10	10,00	7,00	15,0	15,00
Likit Limit	-	30,00	33,80	-	30,00	33,08	30,0	33,80
Plastisite İndisi	-	8,00	13,80	-	8,00	13,80	8,0	13,80
Üniformluk Katsayısı, Cu	3,06	5,33	3,82	6,50	6,25	6,13	-	-
Derecelenme Katsayısı, Cc	1,10	1,02	0,81	1,04	2,25	1,72	-	-

Deneyde kullanılan kaolin Eczacıbaşı firmasından temin edilmiştir. Kaolinin geoteknik özellikleri de Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Kaolinin geoteknik özellikleri

Doğal Su İçeriği (%)	7
Özgül Ağırlık	2,6
Likit Limit	37,5
Plastik Limit	30,0
Plastisite İndisi	7,5

5.2. Deney Prosedürü

Çalışma iki farklı aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada bir kum numunesi (SP), bir kil numunesi (CL) ve kaolin kullanılmıştır. Bu numuneler ağırlıkça belirli yüzdelerde karıştırılmıştır. Bu karışımlar %100 kum, %75 kum + %25 kaolin, %50 kum + %50 kaolin, %25 kum + %75 kaolin, %100 kaolin ve %100 kum, %75

kum + %25 kil, %50 kum + %50 kil, %25 kum + %75 kil, %100 kil olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayarlanan bu numuneler farklı su içeriklerinde hazırlanarak, hacmi bilinen standart proktor kalıplarında standart bir enerji uygulayarak sıkıştırılmışlardır. Daha sonra Theta probu ile ölçümler yapılarak hazırlanan numunelere özgü kalibrasyon katsayıları belirlenmiştir. Şekil 5.1’ de temsili bir ölçüm görülmektedir.



Şekil 5.1. Theta prob ile ölçüm yapımı

Kalibrasyon katsayıları belirlendikten sonra aynı karışım zeminlere yine farklı miktarlarda su katılmış ve tıpkı kalibrasyon aşamasındaki şartlarda ve enerji seviyesinde hacmi bilinen kalıplarda sıkıştırma işlemi yapılarak Theta prob ile ölçümler yapılmıştır. Bu numuneler ise test numuneleri olarak adlandırılmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise TS 1500’ de belirtilen 14 zemin numunesi kullanılmıştır. Bölüm 5.2’ de bahsedilen bu 14 numune farklı su içeriklerinde hazırlanmış ve 3 farklı enerji seviyesinde sıkıştırılmıştır. Daha az enerji uygulanan numuneler “gevşek”, biraz daha fazla enerji uygulanarak sıkıştırılan numuneler “orta sıkı” ve en fazla enerji uygulanarak sıkıştırılan numuneler ise “sıkı” olarak adlandırılmıştır. Orta sıkılıkta hazırlanan numuneler kalibrasyon numuneleri, gevşek ve sıkı olarak hazırlanan numuneler ise test numuneleri olarak kullanılmıştır.

5.3. Yöntem

Üçüncü bölümde TDR kaydı boyunca oluşan yansımaların, empedans değişikliklerinden meydana geldiğine değinmişti. Üretilen dalga önce kablo boyunca ilerleyip, sonra zemin ortamına geçtiğinden bahsetmişti. Kablo – zemin değişimindeki empedans oranı yansıma katsayısı (ρ) olarak tarif edilmişti.

Von Hippel (1967), üretilen bir dalganın empedansını elektrik ve manyetik alan vektörlerine bağlı olarak Denklem (5.1)' deki gibi tanımlamıştır.

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (5.1)$$

Burada μ , ortamın manyetik geçirgenliğini, ϵ ise dielektrik katsayısını vermektedir. Aynı ilişki Kraus (1994), tarafından elektriksel iletkenliğe bağlı olarak Denklem (5.2)' deki gibi ifade edilmiştir.

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (5.2)$$

İlişki daha basite indirgenirse,

$$Z_s = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon}} \quad (5.3)$$

Burada Z_s , zemin gibi bir ortama gömülü problemlerin empedansını, Z_0 ise üretilen dalganın empedansını vermektedir.

Bir önceki bölümde Denklem (3.5)' de üretim hattının empedansı ve zemin ortamının empedansı ile yansıma katsayısı (ρ_r) arasındaki ilişkiden bahsedilmişti. Bu durumda Denklem (5.3)' de dikkate alındığında, yansıma katsayısı ile zeminlerin dielektrik katsayıları (ϵ) arasında ilişki olduğu görülmektedir. Bu durumda mevcut olan bir TDR dalgaformunda, belirli noktalardaki dalgaların voltajlarına bağlı olarak yansıma katsayıları, yansıma katsayılarına bağlı olarak ta dielektrik katsayısı bulunabilir.

Zeminlerin dielektrik katsayıları ile hacimsel su içeriği arasındaki ilişkiye de önceki bölümlerden değinmiştik. Denklem (3.13), (3.14) ve (4.10)' da bu ilişkiye değinilmişti.

TDR dalga formundaki son voltaj (V_f), başlangıç voltajı (V_0) ve zeminin elektriksel iletkenliği arasındaki ilişki Denklem (3.19)' da verilmişti. V_f/V_0 oranı, yansımaya katsayısı ile, yansımaya katsayısı da dielektrik katsayısı ile, dielektrik katsayısının da zeminlerin hacimsel su içeriği ile ilgili olduğuna göre, zeminlerin elektriksel iletkenlikleri ile hacimsel su içerikleri arasında ilişki söz konusudur. Bir önceki bölümde bu ilişkiye (Tek-adım TDR yöntemi) değinilmişti. Bu yöntem ile zeminlerin elektriksel iletkenliklerine ve dielektrik katsayılarına bağlı olarak, hacimsel ve gravimetrik su içeriği ile kuru yoğunluklarının nasıl bulunduğuna yine bir önceki bölümde değinilmişti.

TDR yöntemine benzer olarak, ADR yönteminde de iletim hattı, prob kesitindeki genlik farkının ($V_j - V_0$), yansımaya katsayısı ile ilişkili olduğuna değinilmişti ((Denklem 4.7)). ADR yönteminde ölçülen genlik farkı ile yansımaya katsayısı ilişkili olduğuna göre, zeminlerin elektriksel iletkenlikleri de ilişkili olacaktır. Benzer şekilde zeminlerin dielektrik katsayıları ile ADR yöntemi ile ölçülen genlik farkı arasında ilişki Denklem (4.8)' da verilmişti. Bu durumda ADR yöntemi ile de zeminlerin hacimsel ve gravimetrik su içeriği değerleri ile yoğunlukları tespit edilmesi mümkündür.

5.4. Su İçeriği ve Kuru Yoğunluğun ADR Yöntemi ile Belirlenmesi

ADR yönteminde Theta prob ile zeminlerin hacimsel su içeriğini belirlemek için kullanılan en popüler ifade Denklem (4.10)' da verilmişti. Bu ifade de dielektrik katsayılarının karekök ($\epsilon^{0.5}$) değeri ile, hacimsel su içeriği (θ) arasındaki ilişki görülmektedir. Bilindiği gibi hacimsel su içeriği ile, gravimetrik su içeriği arasında Denklem (3.21)' deki gibi zeminlerin kuru yoğunluğu ve suyun yoğunluğuna bağlı bir ilişki vardır. Bu durumda $\epsilon^{0.5}$ ile ρ_w/ρ_k şeklinde bir ilişki söz konusu olur. Buradan zeminlerin dielektrik katsayısı ϵ ile de $(\rho_w/\rho_k)^2$ arasında ilişki söz konusu olacaktır.

Bir önceki bölümde zeminlerin elektriksel iletkenliği ile dielektrik katsayıları arasındaki ilişkiden bahsetmiştik. Suyun elektriksel iletkenliği (σ_p) suyun Dielektrik katsayısı ϵ_p , zeminin dielektrik katsayısı (ϵ) ve kuru zeminin dielektrik katsayısı ($\epsilon^{0.5}$) arasındaki ilişki Denklem (3.21)' de verilmişti. Denklem (3.21), denklem (4.11) ile ilişkilendirip tekrar yazılırsa aşağıdaki Denklem (5.4) elde edilir.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_p}{\varepsilon_p} (\varepsilon - a_0^2) \quad (5.4)$$

Bu ifade de su için (σ_p/ε_p) oranı sabit olacağı için, zemin türüne bağlı olarak $(\varepsilon - a_0^2)$ ifadesi değişken olacaktır. Eğer hacimsel olarak değil, gravimetrik yani ağırlıkça duruma bakılırsa Denklem (5.4)' te verilen ifade $(\rho_w/\rho_k)^2$ ile ilişkilendirilecektir. Bu durumda ADR yönteminde yoğunluğun ilişkisi ile elektriksel iletkenliğe bağlı olarak ağırlıkça ifade edilen, $(\varepsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değeri kontrol edilmelidir. Bu durumda zeminlerin Dielektrik katsayısı (ε) ile $(\varepsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ arasında bir ilişki söz konusu olacaktır.

5.4.1. $\varepsilon^{0.5}$ ile $(\varepsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ arasındaki ilişkinin belirlenmesi

Bu ilişkinin belirlenmesi için, sabit bir enerji altında sıkıştırılarak, farklı su muhtevalarında hazırlanmış aynı tür zemin örneklerinden yararlanılabilir. Böylelikle zeminlere özgü kalibrasyon katsayıları geliştirilebilir.

Theta probu ile ıslak zemin üzerinde ölçüm yapılarak milivolt cinsinden voltaj (genlik farkı) ölçümleri alınır. Denklem (4.8)' de verilen üçüncü dereceden polinom ifadesi ile Dielektrik katsayılarının karekök $(\varepsilon^{0.5})$ değerleri hesaplanır. Farklı su içeriğindeki zeminler için farklı $(\varepsilon^{0.5})$ değerleri bulunur. Aynı işlem kuru zemin için hesaplanır ve $\varepsilon_0^{0.5}$ değeri de bulunur. Bu değer zemine özgü kalibrasyon katsayısı olan a_0 değerine de karşılık gelmektedir.

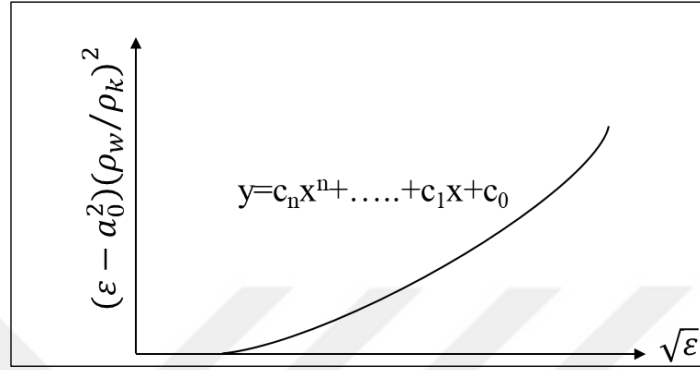
Sabit bir enerji altında, farklı su içeriğinde hazırlanmış zeminlerin, kuru yoğunluk değerleri, klasik yöntem olarak adlandırdığımız etüv de kurutma yöntemi yardımı ile bulunur. Hesaplanan ε değerleri ve klasik yöntem ile bulunan kuru yoğunluk değerleri kullanılarak $(\varepsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri hesaplanır.

Ölçülen voltaja (genlik farkı) bağlı olarak bulunan $\varepsilon^{0.5}$ değerleri ile hesaplanan $(\varepsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri grafik edilerek, bu iki değer arasında zemin türlerine bağlı olarak derecesi değişkenlik gösterebilecek bir polinom bulunur. X ekseninde $\varepsilon^{0.5}$, Y ekseninde $(\varepsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri olduğuna göre elde edilecek polinom,

$$y = c_n x^n + c_{n-1} x^{n-1} + \dots + c_1 x + c_0 \quad (5.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada c değerleri, zemine özgü kalibrasyon katsayılarıdır. Denklem (5.5)' te verilen bu ifade kısaca $y=f(x)$ transfer fonksiyonu olarak adlandırılabilir.

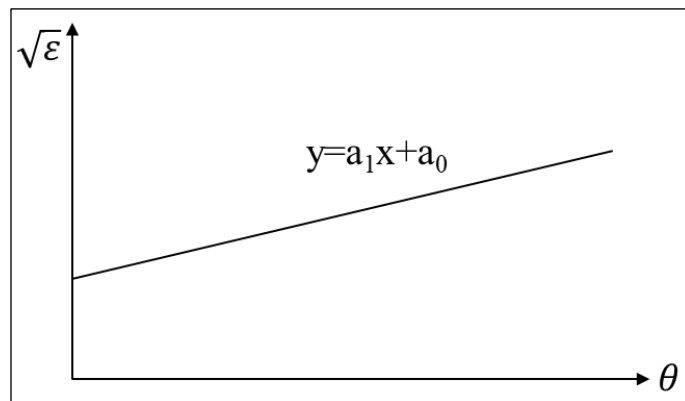
Transfer fonksiyonu Şekil 5.2' de temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Transfer fonksiyonu

5.4.2. Hacimsel su içeriğinin bulunması

Theta prob ile ölçülen voltaj değerlerinden Denklem (4.8) ile $(\varepsilon^{0,5})$ değerleri hesaplanır. Geleneksel yöntemler ile bulunan gravimetrik su içeriği ve kuru yoğunluk değerlerine bağlı olarak Denklem (3.22) yardımı ile hacimsel su içeriği (θ) değerleri hesaplanır. Hesaplanan $\varepsilon^{0,5}$ değerleri ve θ değerleri grafik edilerek, aralarında Denklem (4.10)' da olduğu gibi lineer bir ifade elde edilir. Bu ifade ve grafiklerin yardımı ile Denklem (4.10)' daki zemine özgü kalibrasyon katsayıları a_1 ve a_0 değeri bulunur. Şekil 5.3' de temsili olarak kalibrasyon katsayılarının elde edildiği grafikler verilmiştir.



Şekil 5.3. Hacimsel su içeriği kalibrasyonu

5.4.3. Kuru yoğunluğun bulunması

Tıpkı hacimsel su içeriğinin belirlendiği gibi, Theta prob ile ölçülen voltaj değerlerinden Denklem (4.8) ile $\varepsilon^{0.5}$ değerleri hesaplanır. Geleneksel yöntemler ile bulunan gravimetrik su içeriği ve kuru yoğunluk değerlerine bağlı olarak $(\varepsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri de bulunur. Bulunan değerler grafik edilerek, Denklem (5.5)' de belirtilen transfer fonksiyonu ($y=f(x)$) elde edilir. Zemin öze c , kalibrasyon katsayıları belirlenerek, Denklem (5.6) yardımı ile zeminlerin kuru yoğunlukları belirlenir.

$$\rho_k = \rho_w \sqrt{\frac{\varepsilon - a_0^2}{c_n x^n + c_{n-1} x^{n-1} + \dots + c_1 x + c_0}} \quad (5.6)$$

5.4.4. Gravimetrik su içeriğinin bulunması

Hacimsel su içeriği ve gravimetrik su içeriği arasındaki ilişki Denklem (3.22)' de verilmişti. Bu ifadeden gravimetrik su içeriği değerini çekersek Denklem (5.7) elde edilir.

$$w = \theta \frac{\rho_w}{\rho_k} \quad (5.7)$$

Kısım 4.2.3 ve 4.2.4 te anlatıldığı şekilde zeminlerin hacimsel su içeriği ve kuru yoğunluk değerleri Denklem (5.7)' de yerine koyulduğu zaman zeminlerin gravimetrik su içeriği değerleri elde edilecektir.

6. KALİBRASYON VE TEST DENEY SONUÇLARI

Bir önceki bölümde de belirtildiği üzere, çalışmalar iki farklı aşamada yapılmıştır. Birinci aşama da hem kalibrasyon için, hem de test için hazırlanan numuneler aynı enerji seviyesinde sıkıştırılmıştır.

İkinci aşama da ise numuneler üç farklı enerji seviyesinde sıkıştırılmış, bunlardan bir tanesi kalibrasyon için kullanılırken, diğer iki enerji seviyesinde sıkıştırılan numuneler test için kullanılmıştır.

6.1. Aynı Enerji Seviyesinde Yapılan Çalışmalar

Çalışmada üç farklı numune kullanılmıştır. Bunlar kum (SP), kil (CL) ve kaolindir. Ağırlıkça belirli yüzdelerde karışımlar oluşturulmuştur. Bunlar ağırlıkça %100 kum, %75 kum + %25 kaolin, %50 kum + %50 kaolin, %25 kum + %75 kaolin ve %100 kaolindir. Diğer numuneler ise yine aynı karışım yüzdelerine sahip kum ve kil numuneleridir.

Numuneler farklı su içeriklerinde hazırlanmışlar ve hacmi bilinen standart bir kalıpta, standart proktor enerjisinde sıkıştırılarak, ölçümler alınmış ve zeminlere özgü kalibrasyon katsayıları belirlenmiştir. Daha sonra aynı karışımlar yine farklı su içeriklerinde hazırlanmışlar ve yine standart proktor enerjisinde sıkıştırılmışlardır. Test numuneleri olarak adlandırılan bu zeminlerde de theta prob ölçümleri alınmış ve kalibrasyon katsayıları da kullanılarak hacimsel ve gravimetrik su içerikleri ve kuru yoğunlukları belirlenmeye çalışılmıştır.

6.1.1. Kum – kaolin karışımları

Yukarıda da belirtildiği gibi belirli oranlarda karıştırılan numuneler üzerinde öncelikle kalibrasyon çalışmaları yapılmıştır. Hem hacimsel su içeriği hem de kuru yoğunluğun belirlenmesi için o zeminlere özgü kalibrasyon katsayıları bulunmuştur. İkinci aşama da ise test numuneleri üzerinde ölçümler alınarak, kalibrasyon katsayıları yardımı ile gerçek değerler tahmin edilmeye çalışılmıştır.

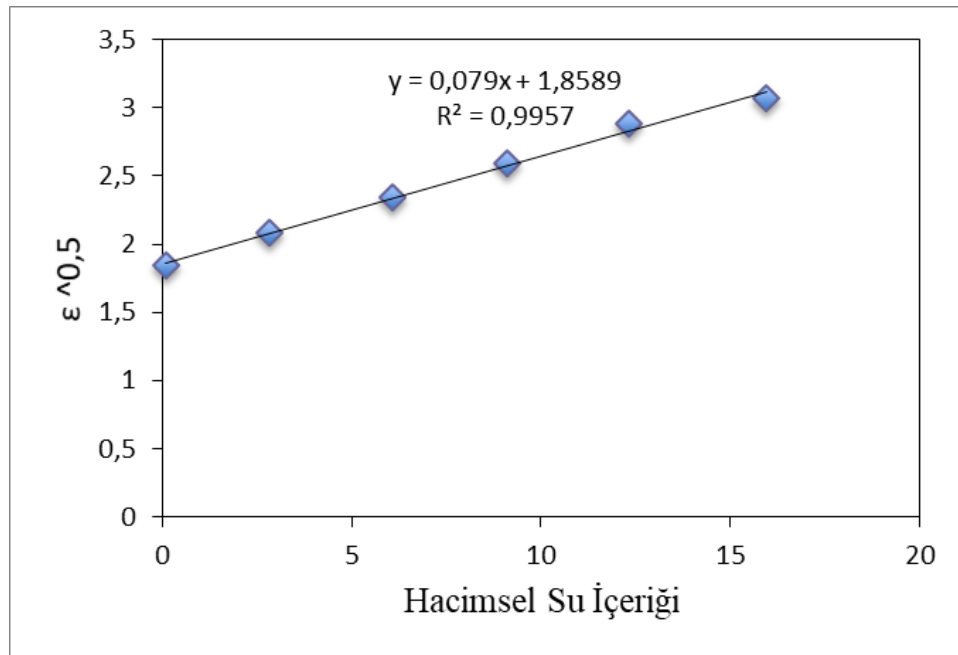
6.1.1.1. %100 kum kalibrasyon numunesi

Dielektrik katsayısı, hacimsel su içeriği arasındaki ilişkiyi belirlemek için yapılan ölçümler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 6.1. %100 Kum için hacimsel su içeriği

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (grcm^{-3})	mV	$\epsilon^{0,5}$	θ (%)
0,05	1,599	0,139	1,8486	0,08
1,76	1,575	0,189	2,0827	2,82
3,82	1,565	0,249	2,3394	6,09
5,80	1,541	0,313	2,5903	9,11
7,73	1,565	0,393	2,8820	12,33
9,83	1,592	0,448	3,0753	15,96

Geleneksel yöntemler ile elde edilen gravimetrik su içeriği ve kuru yoğunluk değerlerine bağlı olarak, Denklem (3.21) yardımıyla tablonun en sağ sütunun da verilmiş olan hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır. Theta prob ile milivolt ölçümleri alınarak Denklem (4.8) ile zeminlerin dielektrik katsayılarının karekök değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra hacimsel su içeriği ve dielektrik katsayısının karekök değerleri Şekil 6.1' deki gibi grafik edilmiştir.



Şekil 6.1. %100 Kum için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi

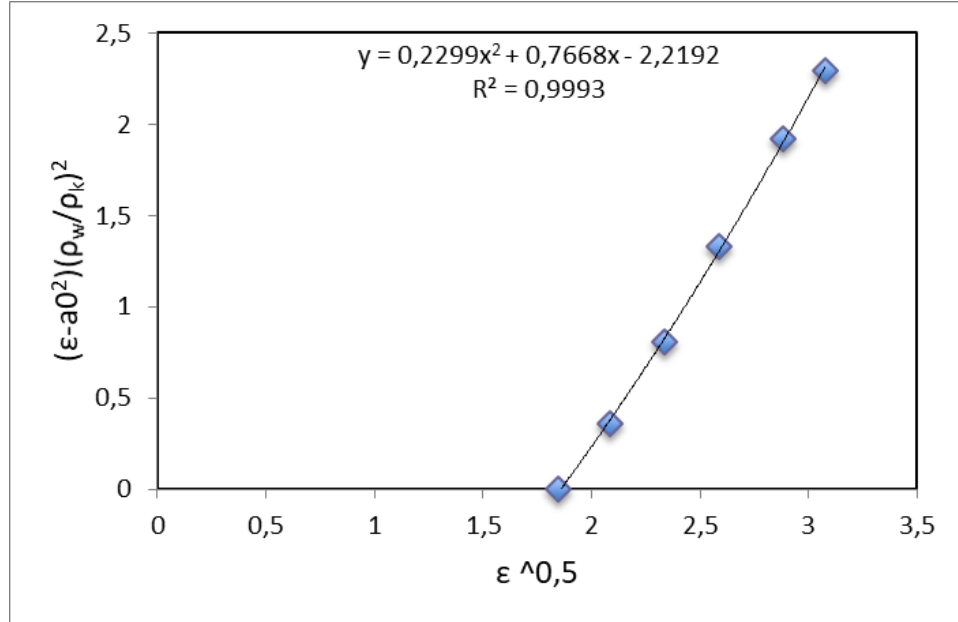
Elde edilen noktalardan şekilde gösterildiği gibi lineer bir doğru geçirilmiş ve doğru denklemi ile zemine özgü kalibrasyon katsayıları belirlenmiştir. %100 kum için hacimsel su içeriği kalibrasyon katsayıları $a_0=1,8589$ ve $a_1=0,079$ olarak bulunmuştur.

Kuru yoğunluğun belirlenmesi için, $(\epsilon-a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ ifadesi ile dielektrik katsayısı arasında ilişki kurularak zeminin kendine özgü kalibrasyon katsayıları bulunmuştur. Değerler Tablo 6.2' de verilmiştir.

Tablo 6.2. %100 kum için $(\epsilon-a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	$(\epsilon-a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$
0,05	1,599	0,139	1,8486	0,00
1,76	1,575	0,189	2,0827	0,36
3,82	1,565	0,249	2,3394	0,81
5,80	1,541	0,313	2,5903	1,33
7,73	1,565	0,393	2,8820	1,92
9,83	1,592	0,448	3,0753	2,29

Tabloda verilen $(\epsilon-a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri ile dielektrik katsayısının karekökü değerleri grafik edilerek, bir önceki bölümde bahsedilen transfer fonksiyonu çizilmiştir.



Şekil 6.2. %100 Kum için transfer fonksiyonu

Çizilen ikinci dereceden transfer fonksiyonunun ifadesinden kuru yoğunluk için zemine özgü kalibrasyon katsayıları $c_0=-2,2192$, $c_1=0,7668$ ve $c_2=0,2299$ olarak bulunmuşlardır.

6.1.1.2. %100 kum test numunesi

Zemine özgü kalibrasyon katsayıları belirlendikten sonra, farklı su içeriklerinde ve aynı enerji seviyesinde sıkıştırma yapılarak test numuneleri hazırlanmıştır. Prob ile ölçümler alınarak zeminlerin hacimsel su içeriği, kuru yoğunlukları ve gravimetrik su içeriği değerleri tahmin edilmiştir.

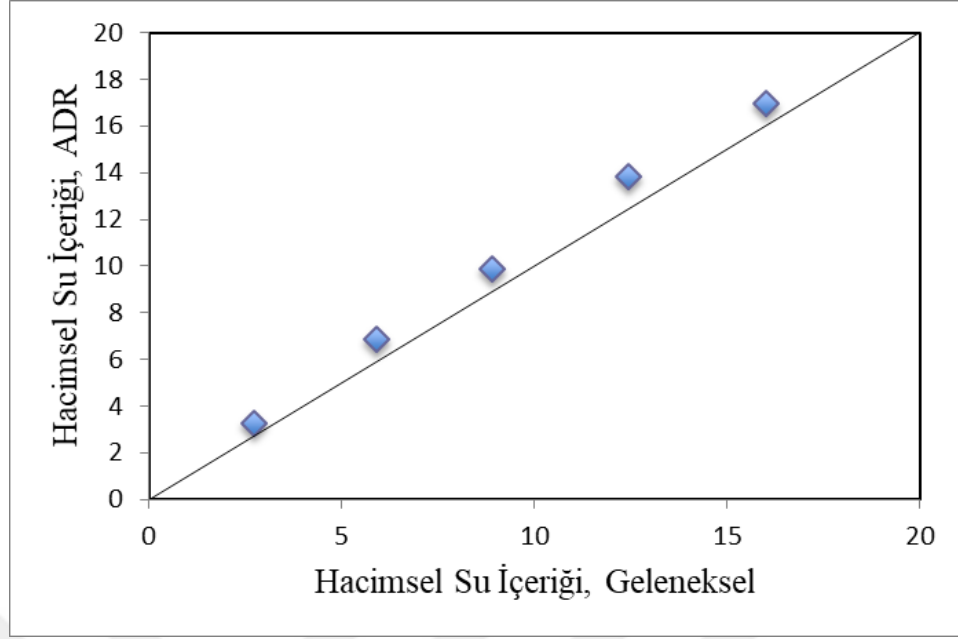
Aşağıda verilen Tablo 6.3'te test numuneleri üzerinde yapılan ölçümler ve kalibrasyon katsayıları ile hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri ile, kıyaslamak amacı ile geleneksel olarak hesaplanan değerler verilmiştir.

Tablo 6.3. %100 kum için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm^{-3})	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
1,70	1,568	2,72	0,196	2,1139	1,8589	0,079	3,23
3,71	1,561	5,90	0,264	2,4000	1,8589	0,079	6,85
5,68	1,537	8,90	0,326	2,6391	1,8589	0,079	9,88
7,82	1,559	12,43	0,413	2,9526	1,8589	0,079	13,84
9,92	1,584	16,02	0,484	3,2012	1,8589	0,079	16,99

Tabloda da gösterildiği gibi hem geleneksel yöntemler ile hem de ADR ölçümleri ile hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır. ADR ölçümlerinden hacimsel su içeriği değerleri Denklem (4.10) yardımıyla hesaplanmıştır.

Hacimsel su içeriği değerlerini kıyaslandığı grafik Şekil 6.3' de sunulmuştur. Grafiğin yatay ekseninde geleneksel olarak hesaplanan hacimsel su içeriği, düşey ekseninde de ADR ölçümleri yapılarak, kalibrasyon katsayıları yardımıyla hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri gösterilmiştir. Ayrıca sonuçları daha iyi kıyaslayabilmek için 1:1 bandı olarak adlandıracağımız $y=x$ doğrusu da çizilmiştir. Grafiğe bakınca değerlerin 1:1 bandına yakın olduğu görülmektedir.



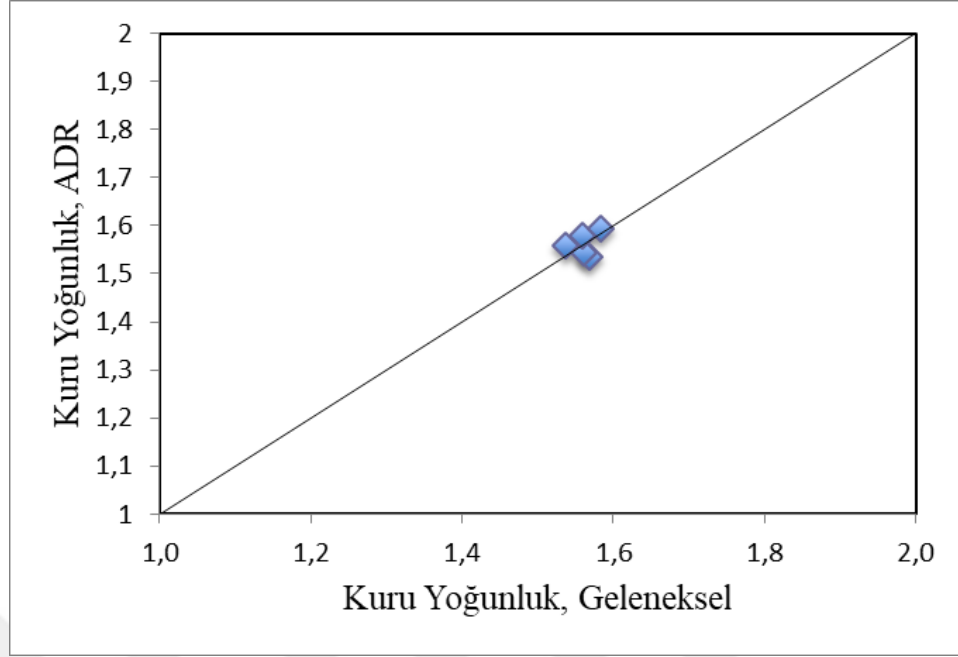
Şekil 6.3. %100 kum için hacimsel su içeriği değerleri

Hacimsel su içeriği değerleri belirlendikten sonra, kuru yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Tablo 6.4’ de alınan ADR ölçümleri, belirlenen kalibrasyon katsayıları, kalibrasyon katsayıları ile belirlenen transfer fonksiyonunun sayısal değerleri ve Denklem (5.6) yardımıyla hesaplanan kuru yoğunluk değerleri verilmiştir. Ayrıca kıyaslamak için geleneksel yöntemlerle hesaplanan kuru yoğunluk değerleri de tablo da sunulmuştur.

Tablo 6.4. %100 kum için kuru yoğunluk ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,568	0,196	2,1139	0,2299	0,7668	-2,2192	0,429	1,536
1,561	0,264	2,4000	0,2299	0,7668	-2,2192	0,945	1,544
1,537	0,326	2,6391	0,2299	0,7668	-2,2192	1,406	1,558
1,559	0,413	2,9526	0,2299	0,7668	-2,2192	2,049	1,578
1,584	0,484	3,2012	0,2299	0,7668	-2,2192	2,592	1,593

Yine hacimsel su içeriğinde olduğu gibi, kuru yoğunluk değerleri de grafik halinde sunulmuştur. Sonuçları daha iyi kıyaslayabilmek için 1:1 bandı da yine grafikte verilmiştir. Grafiğe bakıldığında değerlerin 1:1 bandı çevresinde toplandığı görülmektedir.



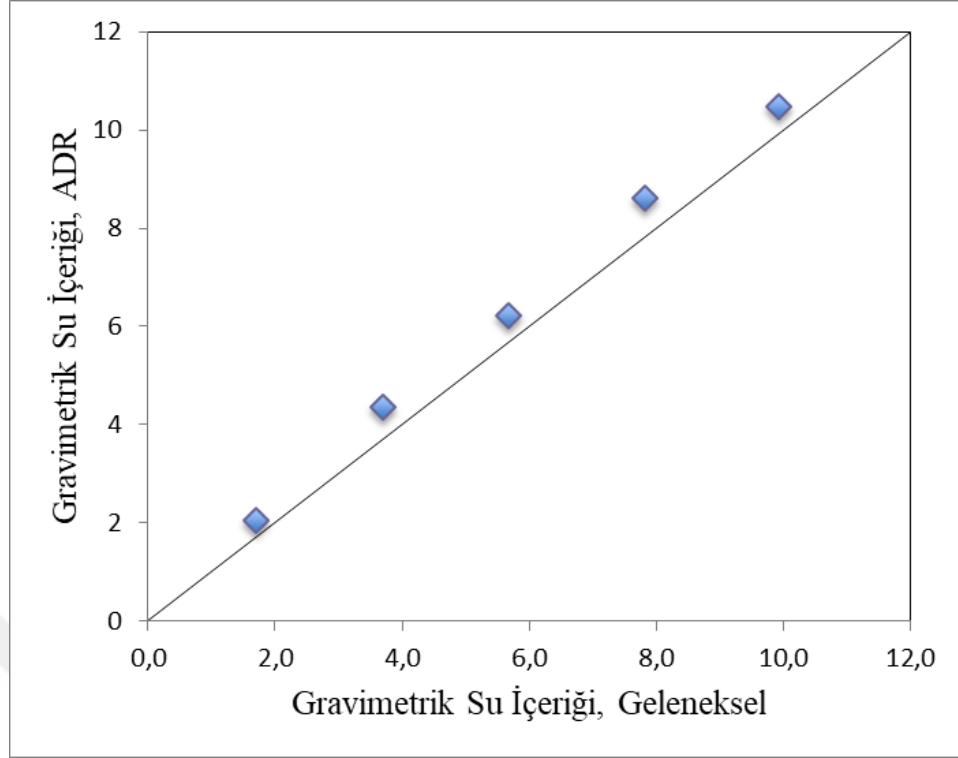
Şekil 6.4. %100 kum için kuru yoğunluk değerleri

Son olarak gravimetrik su içeriği değerleri bulunmuştur. ADR ölçümlerinden tahmin edilen hacimsel su içeriği ve kuru yoğunluk değerleri kullanılarak Denklem (3.21) ile ölçümlere bağlı gravimetrik su içeriği değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar yine geleneksel yöntemler ile belirlenen gravimetrik su içeriği değerleri ile kıyaslanmıştır. Kıyaslanan bu değerler Tablo 6.5' deki gibidir.

Tablo 6.5. %100 kum için gravimetrik su içeriği değerleri

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
1,70	2,06
3,71	4,35
5,68	6,22
7,82	8,61
9,92	10,47

Tıpkı hacimsel su içeriği ve kuru yoğunlukta olduğu gibi, gravimetrik su içeriği değerleri de grafik olarak sunulmuştur. Sonuçları daha iyi kıyaslayabilmek için 1:1 bandı da yine grafik üzerinde gösterilmiştir. Şekil 6.5' de gravimetrik su içeriklerinin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 6.5. %100 kum için gravimetrik su içeriği değerleri

Değerler kontrol edildiğinde 1:1 e bandına yakın olduğu görülmektedir.

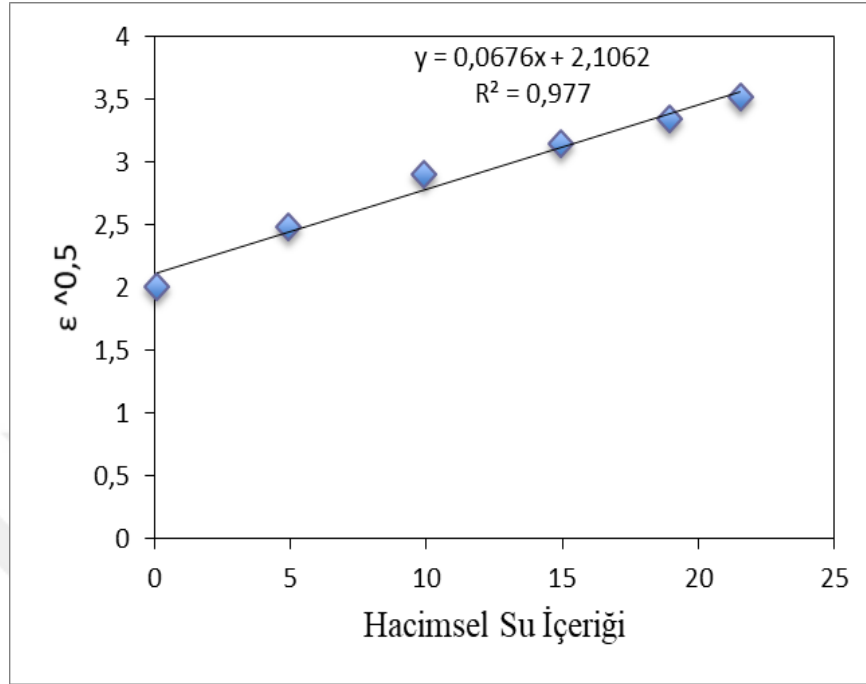
6.1.1.3. %75 kum + %25 kaolin kalibrasyon numunesi

Tıpkı %100 kum numunesinde olduğu gibi, ağırlıkça %75 kum, %25 kaolinden oluşan numunede de kalibrasyon katsayılarını belirlemek için benzer çalışmalar yapılmıştır. Tablo 6.6’ da kalibrasyon katsayılarını belirlemek için geleneksel olarak hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri verilmiştir.

Tablo 6.6. %75 kum + %25 kaolin için hacimsel su içeriği

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	mV	$\epsilon^{0.5}$	θ (%)
0,05	1,720	0,171	2,0008	0,09
2,72	1,772	0,286	2,4869	4,92
5,26	1,851	0,4	2,9068	9,92
7,70	1,907	0,469	3,1487	14,97
9,89	1,882	0,524	3,3425	18,97
11,93	1,773	0,571	3,5127	21,55

Hacimsel su içeriği, zemin dielektrik katsayısı arasındaki ilişki de Şekil 6.6’ da verilmiş ve kalibrasyon katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil 6.6. %75 kum + %25 kaolin için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi

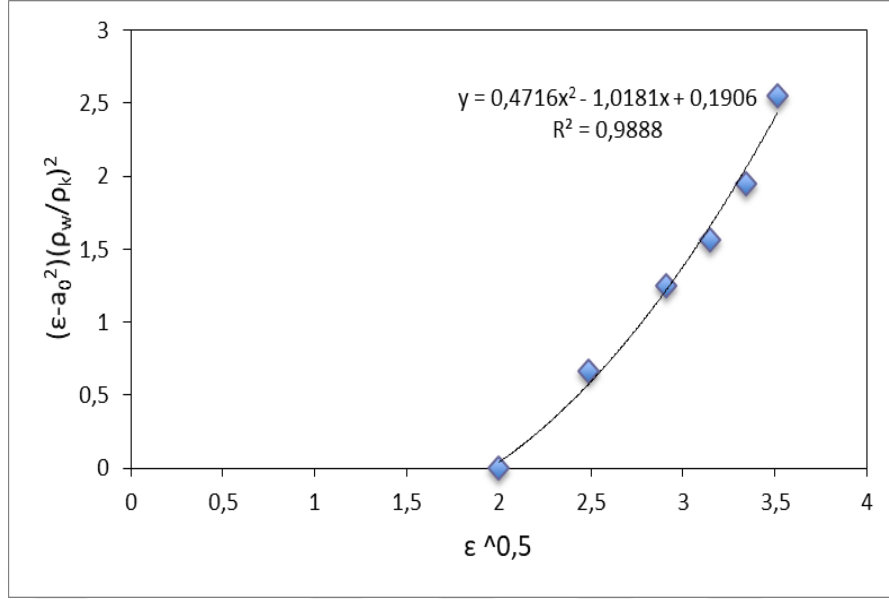
Karışım için kalibrasyon katsayıları $a_0=2,1062$ ve $a_1=0,0676$ olarak bulunmuştur.

Kuru yoğunluğu belirlemek için yapılan kalibrasyon çalışmalarında elde edilen ölçümler de Tablo 6.7’ de verilmiştir.

Tablo 6.7. %75 kum + %25 kaolin için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	$(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$
0,05	1,720	0,171	2,0008	0,00
2,72	1,772	0,286	2,4869	0,67
5,26	1,851	0,4	2,9068	1,25
7,70	1,907	0,469	3,1487	1,56
9,89	1,882	0,524	3,3425	1,95
11,93	1,773	0,571	3,5127	2,55

Şekil 6.7’ de ise transfer fonksiyonu çizilerek kuru yoğunluk değerleri için kalibrasyon katsayıları belirlenmiştir.



Şekil 6.7. %75 kum + %25 kaolin için transfer fonksiyonu

Çizilen ikinci dereceden transfer fonksiyonunun ifadesinden kuru yoğunluk için zemine özgü kalibrasyon katsayıları $c_0=0,1906$, $c_1=-1,0181$ ve $c_2=0,4716$ olarak bulunmuşlardır.

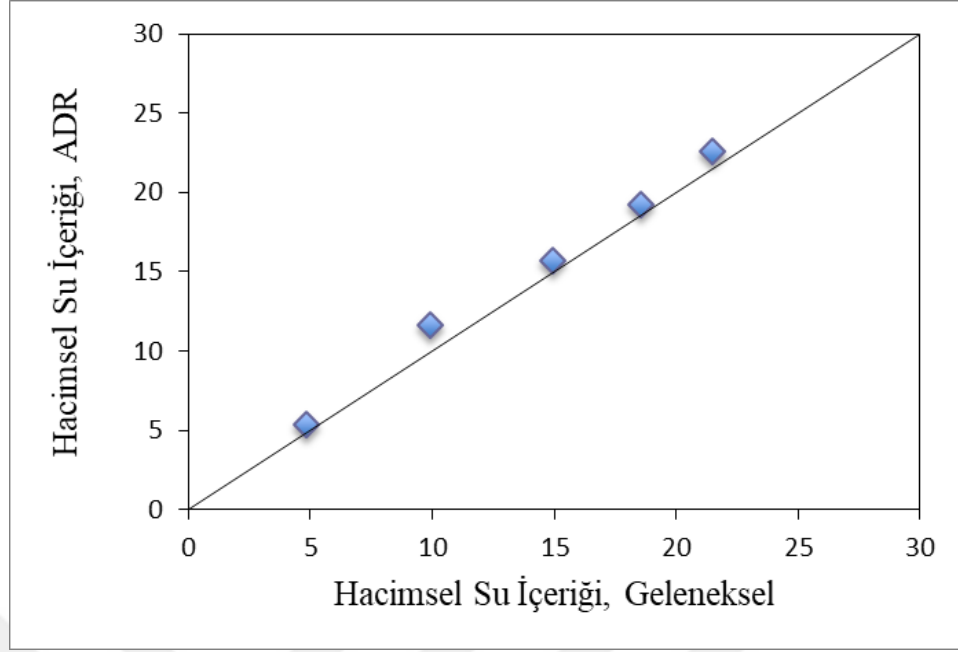
6.1.1.4. %75 kum + %25 kaolin test numunesi

Kalibrasyon numuneleri üzerinde gerekli çalışmalar yapıp kalibrasyon katsayıları bulunduğundan sonra test numuneleri hazırlanmış ve gerekli ölçümler yapılmıştır. Hacimsel su içeriği için elde edilen değerler Tablo 6.8’ de verilmiştir.

Tablo 6.8. %75 kum + %25 kaolin için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\epsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
2,64	1,786	4,81	0,282	2,4712	2,1062	0,0676	5,40
5,24	1,862	9,94	0,396	2,8926	2,1062	0,0676	11,63
7,73	1,896	14,94	0,475	3,1697	2,1062	0,0676	15,73
9,73	1,871	18,55	0,542	3,4070	2,1062	0,0676	19,24
12,01	1,756	21,50	0,603	3,6326	2,1062	0,0676	22,58

Şekil 6.8’ de ise hacimsel su içeriği değerleri grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 6.8. %75 kum + %25 kaolin için hacimsel su içeriği değerleri

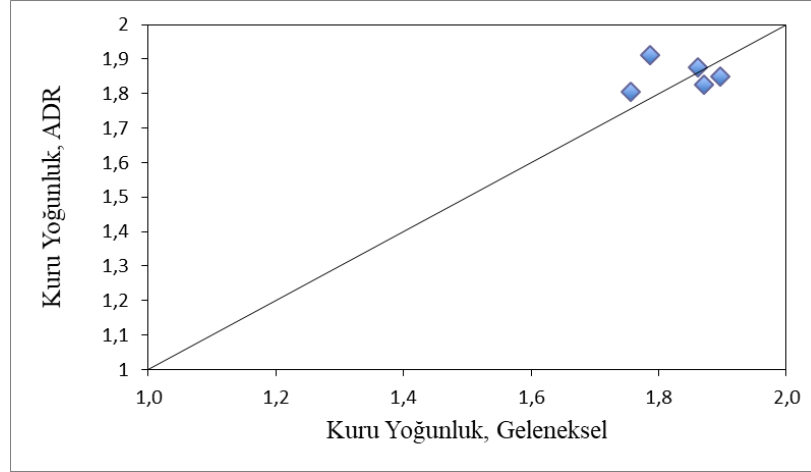
Değerler kontrol edildiğinde 1:1 bandının etrafında toplandığı görülmektedir.

Elde edilen kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.9’ da gösterilmiştir. Tabloda yine hem kalibrasyon katsayıları hem de ADR yöntemi ile tahmin edilen kuru yoğunluk değerleri verilmiştir. Kıyaslamak için geleneksel yöntemle bulunan kuru yoğunluk değerleri de tablo da mevcuttur.

Tablo 6.9. %75 Kum + %25 kaolin için kuru yoğunluk ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm^{-3})	mV	$\epsilon^{0.5}$	c_2	c_1	c_0	$y=f(x)$	ρ_k (grcm^{-3})
1,786	0,282	2,4712	0,4716	-1,0181	0,1906	0,555	1,911
1,862	0,396	2,8926	0,4716	-1,0181	0,1906	1,192	1,877
1,896	0,475	3,1697	0,4716	-1,0181	0,1906	1,702	1,849
1,871	0,542	3,4070	0,4716	-1,0181	0,1906	2,196	1,825
1,756	0,603	3,6326	0,4716	-1,0181	0,1906	2,715	1,805

Şekil 6.9’ da ise kuru yoğunluk değerleri grafik halinde sunulmuştur. Değerleri kıyaslamak için yine 1:1 bandı da şekil üzerinde verilmiştir. Kuruya yakın numuneler için kuru yoğunluk değerleri farklılık gösterirken, artan su içeriği değerlerinde kuru yoğunluk değerlerinin daha yakın olduğu görülmüştür.

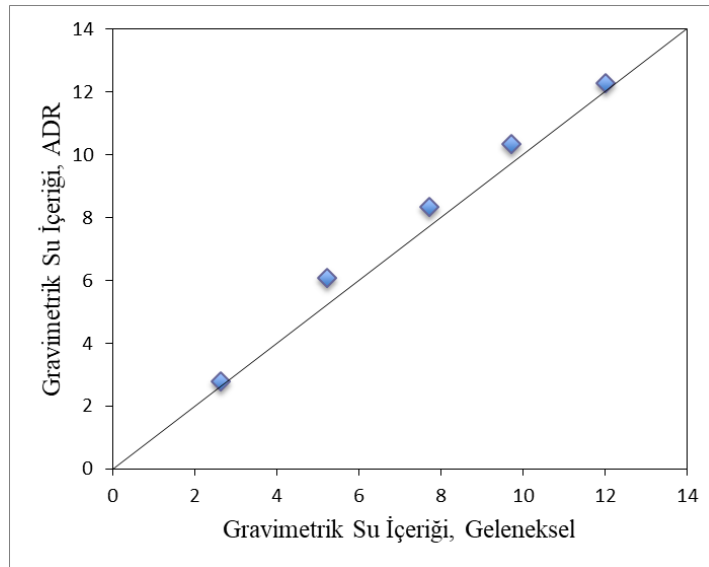


Şekil 6.9. %75 kum + %25 kaolin için kuru yoğunluk değerleri

Gravimetrik su içeriğine yönelik yapılan çalışmalar için elde edilen değerler yine tablo ve grafik halinde sunulmuştur. Tablo 6.10' da gravimetrik su içeriği değerleri gösterilmektedir. Şekil 6.10' da ise gravimetrik su içeriği değerleri grafik olarak verilmiştir.

Tablo 6.10. %75 kum + %25 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,64	2,77
5,24	6,08
7,73	8,35
9,73	10,34
12,01	12,27



Şekil 6.10. %75 Kum + %25 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri

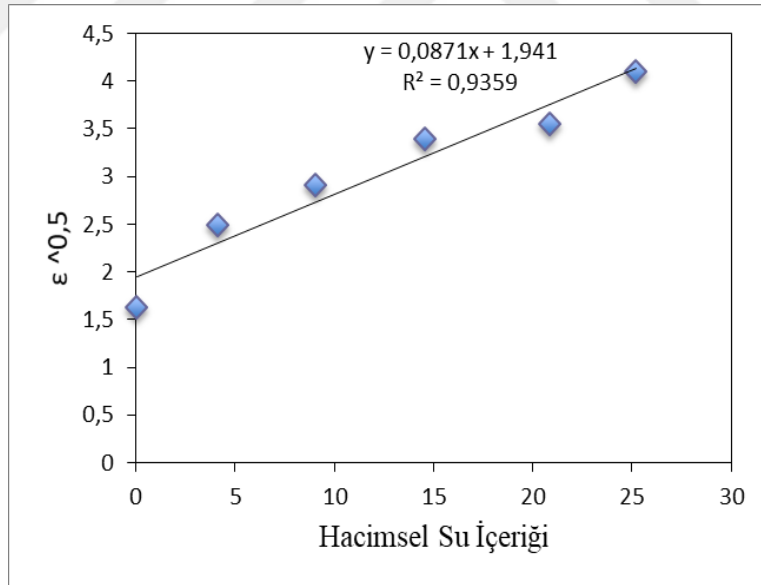
6.1.1.5. %50 kum + %50 kaolin kalibrasyon numunesi

Hacimsel su içeriğini belirlemeye yönelik yapılan kalibrasyon çalışmaları için elde edilen değerler Tablo 6.11’ deki gibidir.

Tablo 6.11. %50 kum + %50 kaolin için hacimsel su içeriği

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	θ (%)
0,03	1,187	0,095	1,6243	0,03
2,48	1,619	0,288	2,4946	4,10
5,37	1,650	0,4	2,9068	9,04
8,34	1,716	0,537	3,3891	14,59
11,76	1,738	0,582	3,5535	20,84
15,18	1,629	0,718	4,1055	25,21

Hacimsel su içeriği dielektrik katsayısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik ise Şekil 6.11’ de verilmiştir.



Şekil 6.11. %50 Kum + %50 kaolin için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi

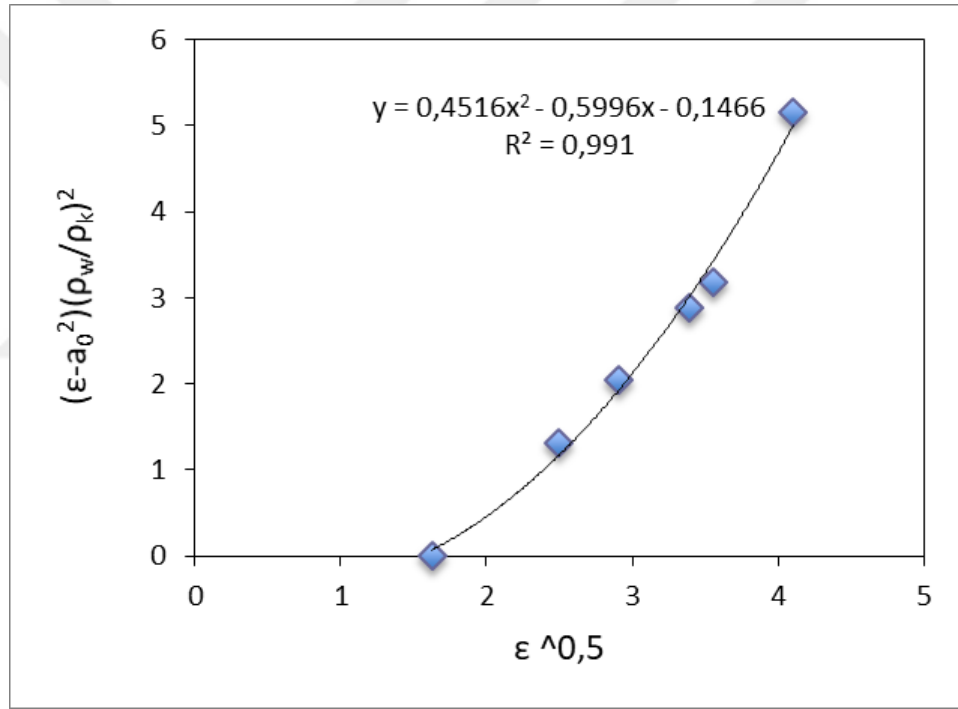
Şekle bakıldığında kalibrasyon katsayıları $a_0=1,941$ ve $a_1=0,0871$ olarak bulunmuştur.

Kuru yoğunluk kalibrasyon katsayıları için alınan ölçüm değerleri Tablo 6.12’ de verilmiştir.

Tablo 6.12. %50 kum + %50 kaolin için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	$(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$
0,03	1,187	0,095	1,6243	0,00
2,48	1,619	0,288	2,4946	1,32
5,37	1,650	0,4	2,9068	2,05
8,34	1,716	0,537	3,3891	2,89
11,76	1,738	0,582	3,5535	3,18
15,18	1,629	0,718	4,1055	5,16

Kuru yoğunluk için kalibrasyon katsayılarını belirlemek için çizilen transfer fonksiyonu Şekil 6.12’ de görülmektedir.



Şekil 6.12. %50 kum + %50 kaolin için transfer fonksiyonu

Zemin için kalibrasyon katsayıları $c_0 = -0,1466$, $c_1 = -0,5996$ ve $c_2 = 0,4516$ olarak bulunmuştur.

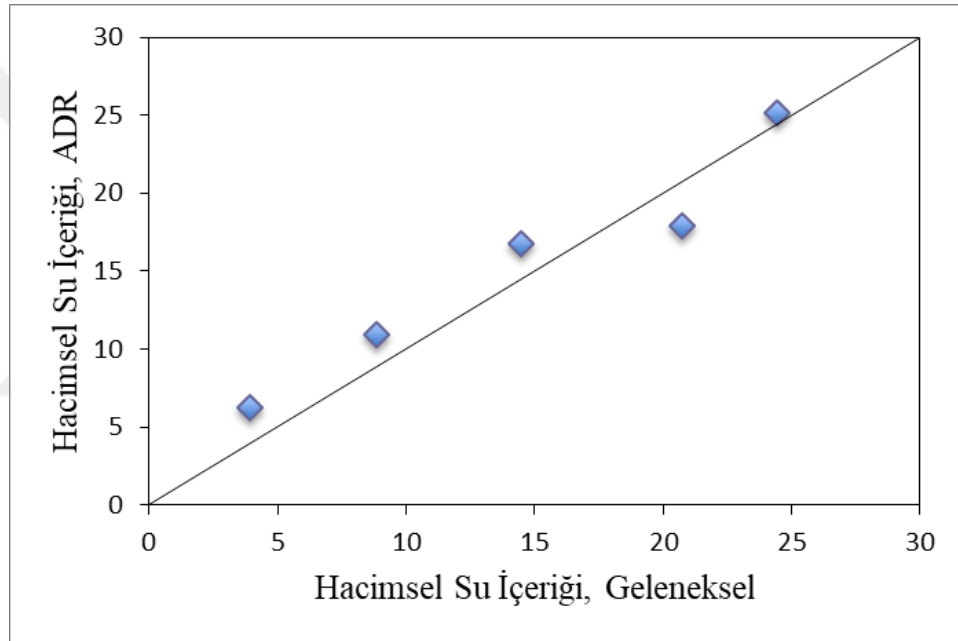
6.1.1.6. %50 kum + %50 kaolin test numunesi

Kalibrasyon katsayıları belirlendikten sonra hacimsel su içeriği için test numunelerinden alınan ölçümler ve hacimsel su içeriği değerleri Tablo 6.13’ te verilmiştir.

Tablo 6.13. %50 kum + %50 kaolin için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0.5}$	a ₀	a ₁	θ (%)
2,38	1,61	3,91	0,286	2,4869	1,941	0,0871	6,27
5,29	1,641	8,85	0,395	2,8891	1,941	0,0871	10,89
8,37	1,698	14,49	0,541	3,4034	1,941	0,0871	16,79
11,72	1,737	20,75	0,567	3,4980	1,941	0,0871	17,88
14,81	1,619	24,43	0,723	4,1280	1,941	0,0871	25,11

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik şekil 6.13’ deki gibidir. Yine sonuçların daha iyi görülmesi için 1:1 bandı da çizilmiştir.



Şekil 6.13. %50 kum + %50 kaolin için hacimsel su içeriği değerleri

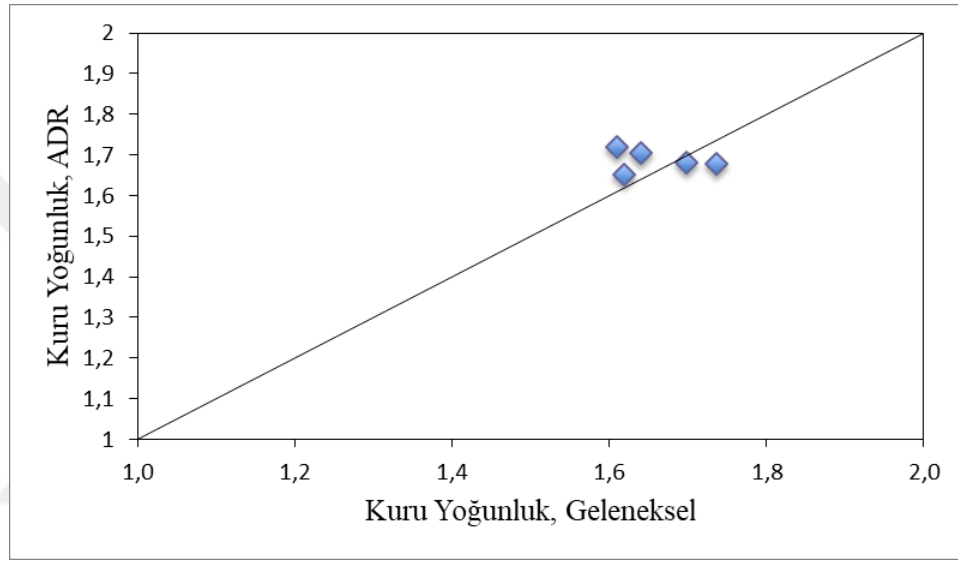
Şekle bakacak olursak, kaolin miktarı arttıkça, değerlerin 1:1 bandından uzaklaştığı, yani gerçek değerlerden uzaklaştığı görülmektedir.

Tablo 6.14’ de hem kalibrasyon katsayıları hem de ADR ile belirlenen ve geleneksel olarak sunulan kuru yoğunluk değerleri görülmektedir.

Kuru yoğunluk değerlerini daha iyi kıyaslayabilmek için Şekil 6.14 çizilmiştir, şekle bakıldığında hacimsel su içeriğindeki benzer olarak değerlerin 1:1 bandından uzaklaştığı görülmektedir.

Tablo 6.14. %50 kum + %50 kaolin için kuru yoğunluk ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0.5}$	c_2	c_1	c_0	$y=f(x)$	ρ_k (grcm ⁻³)
1,61	0,286	2,4869	0,4516	-0,5996	-0,1466	1,155	1,719
1,641	0,395	2,8891	0,4516	-0,5996	-0,1466	1,891	1,705
1,698	0,541	3,4034	0,4516	-0,5996	-0,1466	3,044	1,682
1,737	0,567	3,4980	0,4516	-0,5996	-0,1466	3,282	1,678
1,619	0,723	4,1280	0,4516	-0,5996	-0,1466	5,074	1,653



Şekil 6.14. %50 kum + %50 kaolin için kuru yoğunluk değerleri

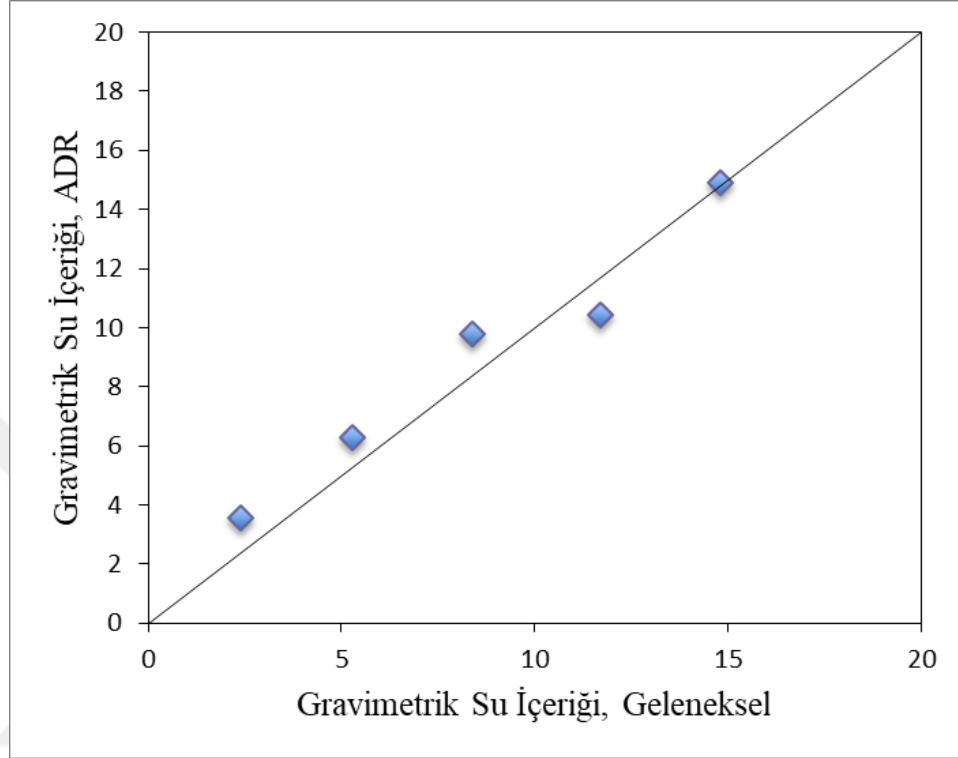
İnce daneli bir zemin olan kaolin miktarı zemin içerisinde arttıkça, kuru yoğunluk değerleri de gerçek değerlerinden bir miktar uzaklaşmıştır.

Hem ölçüm sonuçlarına göre, hem de geleneksel olarak bulunan gravimetrik su içeriği değerleri Tablo 6.15’ deki gibidir.

Tablo 6.15. %50 kum + %50 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,38	3,58
5,29	6,26
8,37	9,79
11,72	10,45
14,81	14,90

Gravimetrik su içeriği değerleri de yine grafik olarak Şekil 6.15’ deki gibi verilmiştir. Yönelim olarak tıpkı hacimsel su içeriğine benzerlik göstermektedir. Değerler gerçek değerlerinden bir miktar farklılık göstermiştir.



Şekil 6.15. %50 kum + %50 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri

Şekle bakıldığında, değerlerin 1:1 bandından uzaklaştığı görülmektedir.

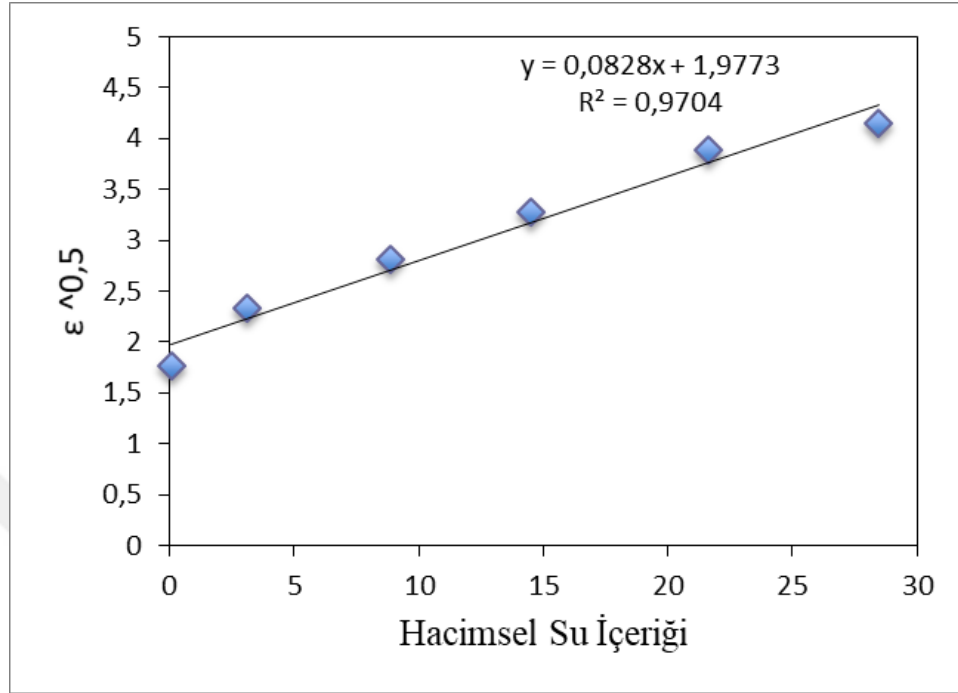
6.1.1.7. %25 kum + %75 kaolin kalibrasyon numunesi

Hacimsel su içeriğine yönelik yapılan ölçüm sonuçları Tablo 6.16’ da verilmiştir.

Tablo 6.16. %25 kum + %75 kaolin için hacimsel su içeriği

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (gcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	θ (%)
0,05	1,191	0,121	1,7590	0,06
2,38	1,289	0,246	2,3271	3,13
5,96	1,461	0,372	2,8071	8,88
9,46	1,501	0,504	3,2716	14,48
13,28	1,596	0,668	3,8903	21,61
17,89	1,560	0,728	4,1507	28,45

Kalibrasyon katsayılarını elde etmeye yönelik çizilen hacimsel su içeriği, dielektrik katsayısı değerlerinin bulunduğu grafik Şekil 6.16’ da görülmektedir.



Şekil 6.16. %25 kum + %75 kaolin için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi

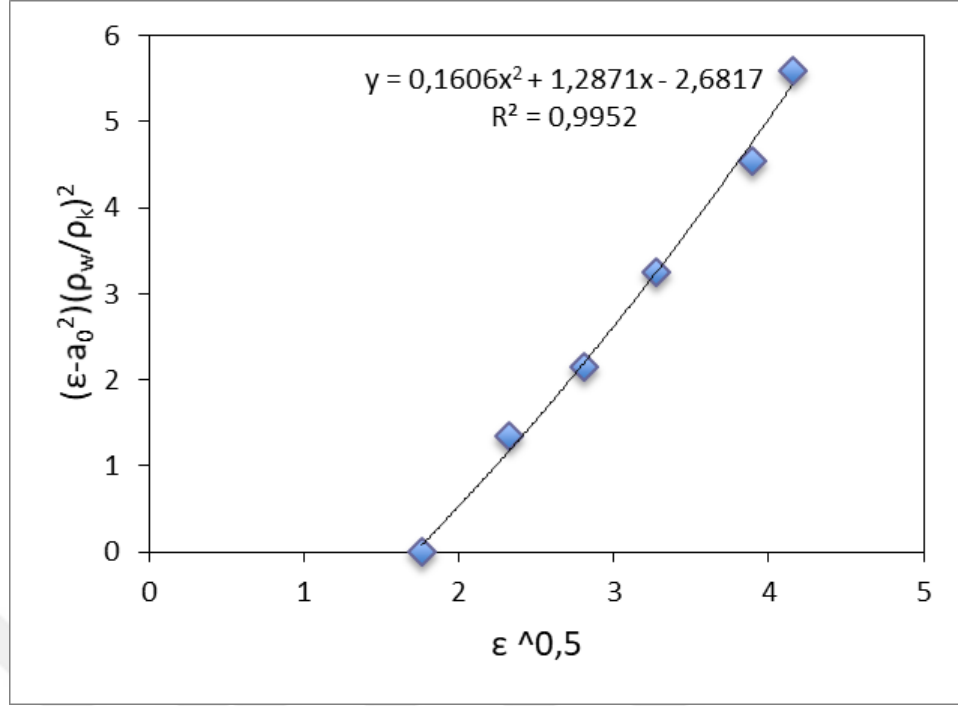
Karışım için kalibrasyon katsayıları şekilden $a_0=1,9773$ ve $a_1=0,0828$ olarak bulunmuştur.

Kuru yoğunluk kalibrasyon katsayıları bulmak için elde edilen veriler aşağıdaki gibi Tablo 6.17’ de verilmektedir.

Tablo 6.17. %25 kum + %75 kaolin için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (gcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	$(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$
0,05	1,191	0,121	1,7590	0,00
2,38	1,289	0,246	2,3271	1,34
5,96	1,461	0,372	2,8071	2,16
9,46	1,501	0,504	3,2716	3,25
13,28	1,596	0,668	3,8903	4,55
17,89	1,560	0,728	4,1507	5,59

Kuru yoğunlukların belirlenmesi için gerekli olan transfer fonksiyonu değerlerini bulmak için yapılan kalibrasyon çalışmaları Şekil 6.17’ de grafik edilmiştir.



Şekil 6.17. %25 kum + %75 kaolin için transfer fonksiyonu

Kuru yoğunluk için kalibrasyon katsayıları şekilden, $c_0 = -2,6817$, $c_1 = 1,2871$ ve $c_2 = 0,1606$ olarak bulunmuştur.

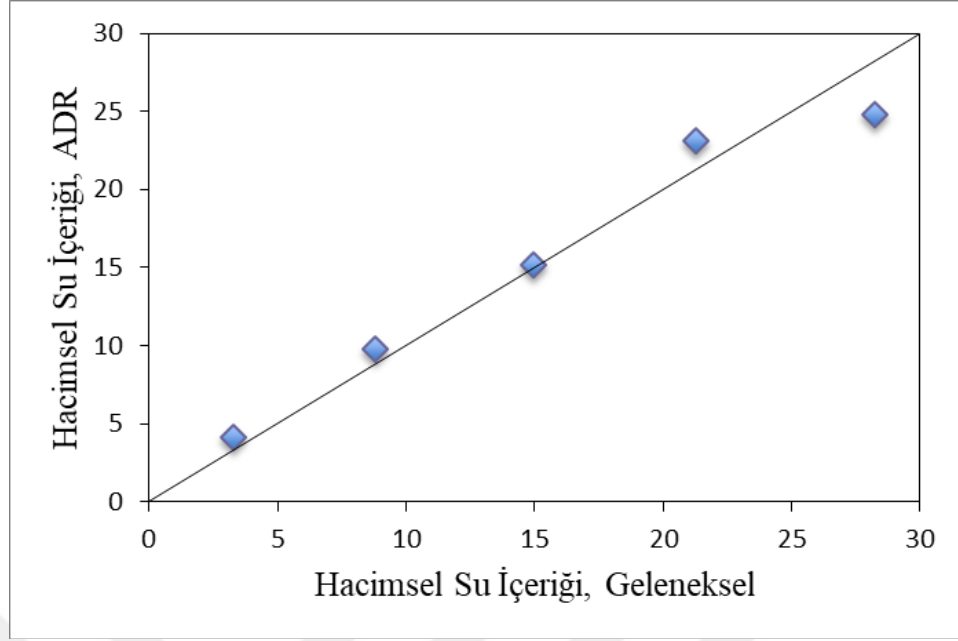
6.1.1.8. %25 kum + %75 kaolin test numunesi

Kalibrasyon katsayıları elde edildikten sonra, test numunelerinde ölçümler alınmış ve hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 6.18’ de gösterilmiştir.

Tablo 6.18. %25 kum + %75 kaolin için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm^{-3})	θ (%)	mV	$\epsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
2,43	1,329	3,29	0,244	2,3188	1,9773	0,0828	4,12
5,85	1,478	8,81	0,366	2,7855	1,9773	0,0828	9,76
9,67	1,517	14,96	0,494	3,2364	1,9773	0,0828	15,21
13,00	1,605	21,28	0,669	3,8945	1,9773	0,0828	23,15
17,83	1,554	28,24	0,701	4,0305	1,9773	0,0828	24,80

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik Şekil 6.18’ de görülmektedir.



Şekil 6.18. %25 kum + %75 kaolin için hacimsel su içeriği değerleri

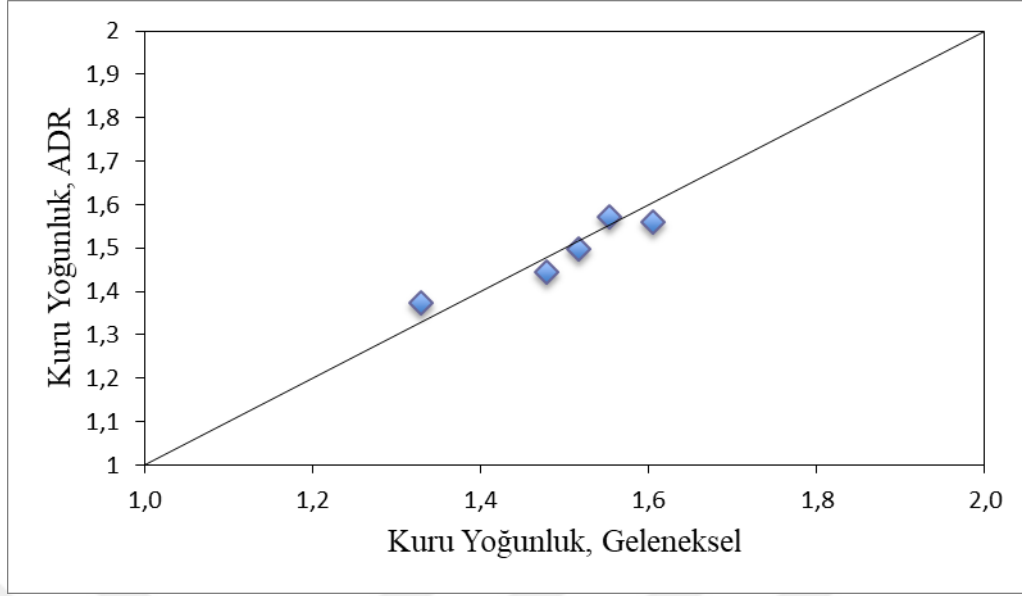
Kuru numunelerde değerler 1:1 bandına yakın seyrederken, su içeriği arttıkça değerlerin, gerçek değerlerden uzaklaştığı görülmektedir.

Belirlenen kalibrasyon katsayıları kullanılarak transfer fonksiyonunun değerleri hesaplanmış ve kuru yoğunluklar bulunmuştur. Geleneksel yöntemle de ayrıca bulunan bu değerler Tablo 6.19’ da sunulmuştur.

Tablo 6.19. %25 kum + %75 kaolin için kuru yoğunluk adr ölçümleri

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm^{-3})	mV	$\varepsilon^{0.5}$	c_2	c_1	c_0	$y=f(x)$	ρ_k (grcm^{-3})
1,329	0,244	2,3188	0,1606	1,2871	-2,6817	1,166	1,372
1,478	0,366	2,7855	0,1606	1,2871	-2,6817	2,150	1,445
1,517	0,494	3,2364	0,1606	1,2871	-2,6817	3,166	1,498
1,605	0,669	3,8945	0,1606	1,2871	-2,6817	4,767	1,561
1,554	0,701	4,0305	0,1606	1,2871	-2,6817	5,115	1,573

Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı grafik Şekil 6.19’ da verilmiştir. Tıpkı hacimsel su içeriğindeki benzer olarak kuruya yakın numunelerde değerler gerçek değerlere yakın iken, su içeriği arttıkça değerlerin 1:1 bandından uzaklaştığı görülmektedir.



Şekil 6.19. %25 kum + %75 kaolin için kuru yoğunluk değerleri

ADR ölçümlerinden elde edilen kuru yoğunluk ve hacimsel su içeriği değerleri ile gravimetrik su içeriği değerleri hesaplanmıştır.

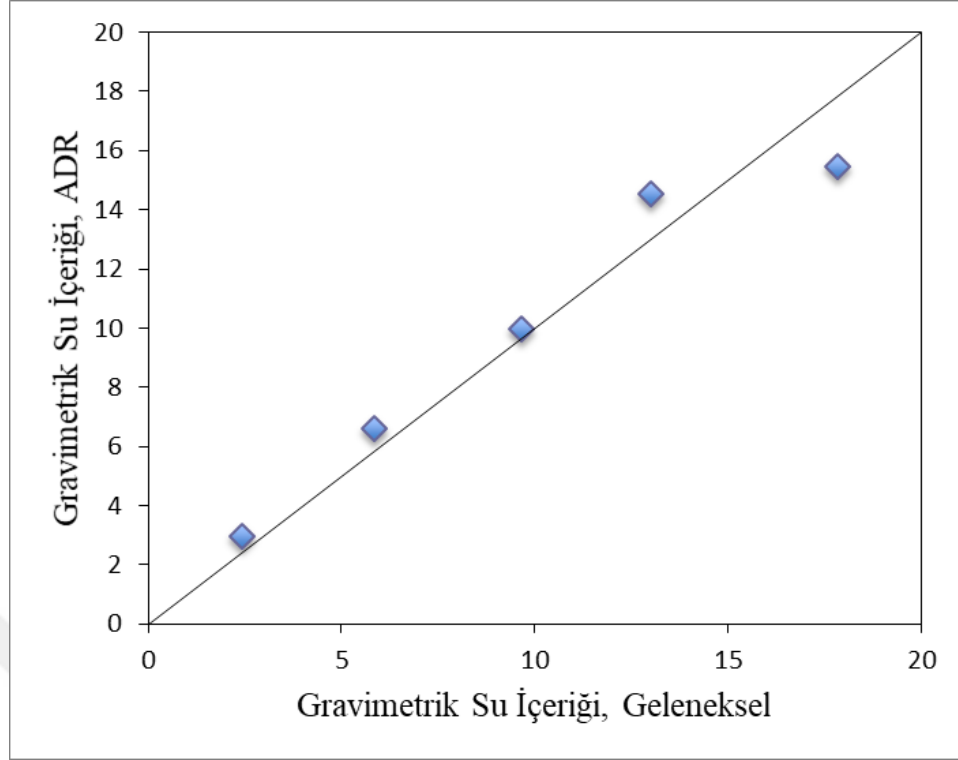
Sonuçlar Tablo 6.20' deki gibi verilmiştir. Kıyaslamak adına geleneksel yöntemlerle bulunan gravimetrik su içeriği değerleri de yine aynı tabloda mevcuttur.

Tablo 6.20. %25 kum + %75 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,43	2,95
5,85	6,63
9,67	9,96
13,00	14,55
17,83	15,46

Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.20' de verilmiştir. Burada da yine hacimsel su içeriğine benzer eğilim görülmektedir. Düşük su içeriğinde değerler birbirine yakın iken, artan su içeriği değerlerinde sonuçlar birbirinden uzaklaşmıştır.

Şekle bakıldığında en yüksek su içeriği değerinde, yaklaşık %2' lik bir fark görülmektedir.



Şekil 6.20. %25 kum + %75 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri

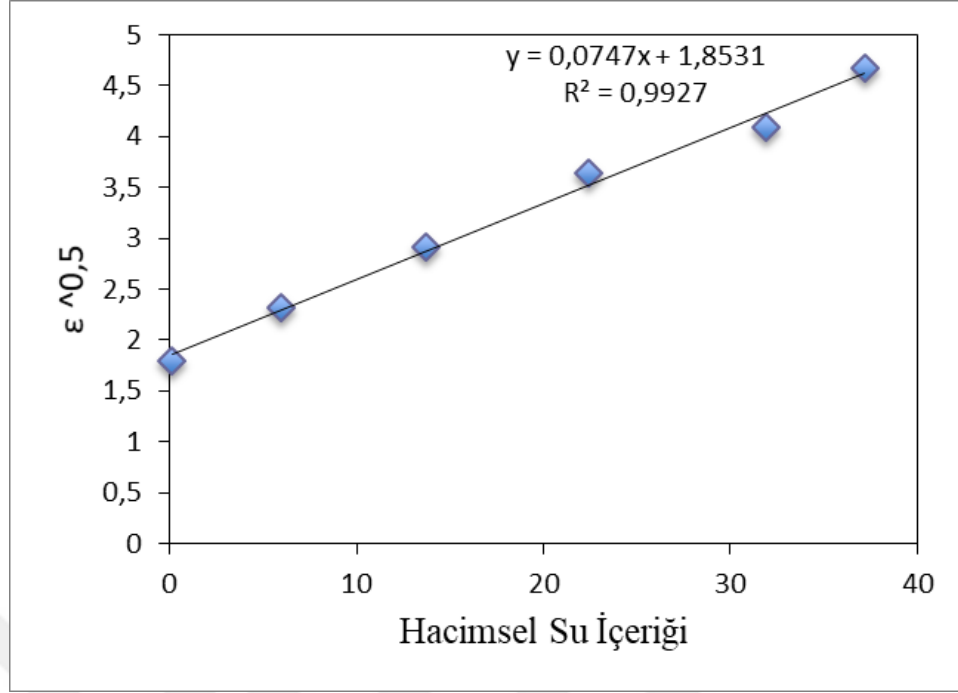
6.1.1.9. %100 kaolin kalibrasyon numunesi

%100 kaolin numunesi için hacimsel su içeriğini belirlemek adına yapılan kalibrasyon ölçümleri Tablo 6.21’ de verilmiştir.

Tablo 6.21. %100 kaolin için hacimsel su içeriği

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (gcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	θ (%)
0,10	1,19	0,128	1,7942	0,12
4,18	1,397	0,245	2,3230	5,96
9,10	1,483	0,401	2,9103	13,75
14,05	1,565	0,607	3,6479	22,41
19,41	1,614	0,715	4,0921	31,93
24,12	1,512	0,831	4,6659	37,17

Tablo 6.21’ de elde edilen hacimsel su içeriği ve dielektrik katsayısı değerleri, Şekil 6.21’ deki gibi grafik edilerek kalibrasyon katsayıları bulunmuştur.



Şekil 6.21. %100 kaolin için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi

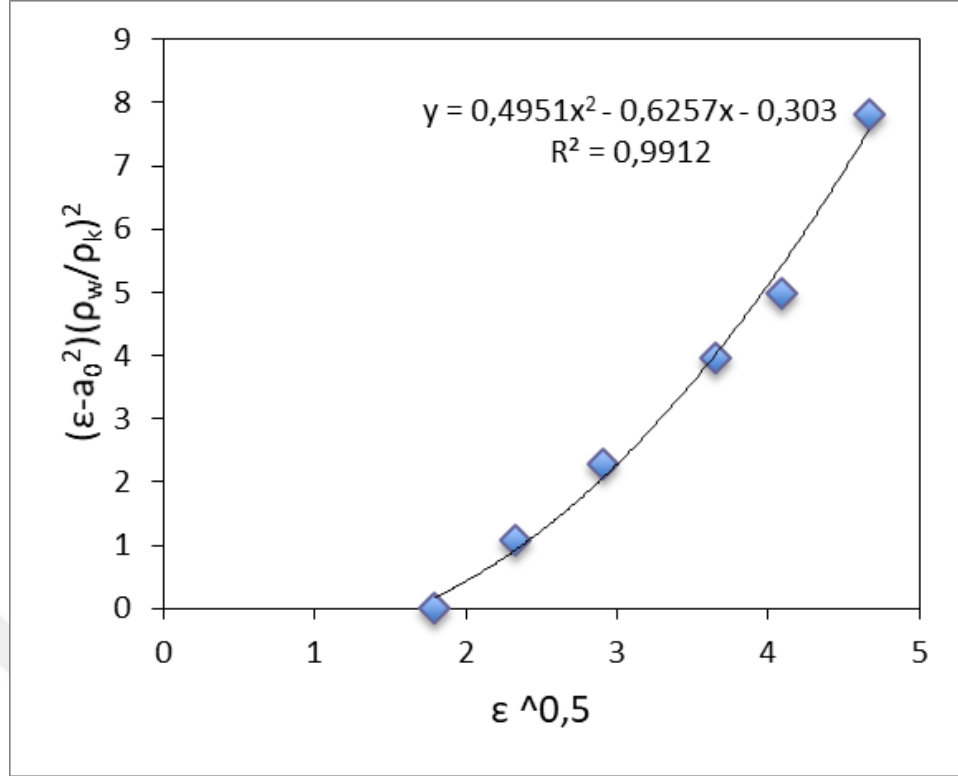
Zemine özgü kalibrasyon katsayıları şekilden $a_0=1,8531$ ve $a_1=0,0747$ olarak okunmaktadır.

Kuru yoğunluk için, kalibrasyon katsayısını belirlemek amacı ile yapılan ölçüm sonuçları Tablo 6.22’ de görülmektedir.

Tablo 6.22. %100 kaolin için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	$(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$
0,10	1,19	0,128	1,7942	0,00
4,18	1,397	0,245	2,3230	1,07
9,10	1,483	0,401	2,9103	2,30
14,05	1,565	0,607	3,6479	3,96
19,41	1,614	0,715	4,0921	5,00
24,12	1,512	0,831	4,6659	7,81

Tablodaki verilere bağlı olarak, değerler grafik edilmiş ve transfer fonksiyonu çizilmiştir. Çizilen bu grafik aşağıda Şekil 6.22’ de görülmektedir.



Şekil 6.22. %100 kaolin için transfer fonksiyonu

Transfer fonksiyonuna bağlı olarak zemine özgü bulunan kalibrasyon katsayıları $c_0 = -0,303$, $c_1 = -0,6257$ ve $c_2 = 0,4951$ olarak elde edilmiştir.

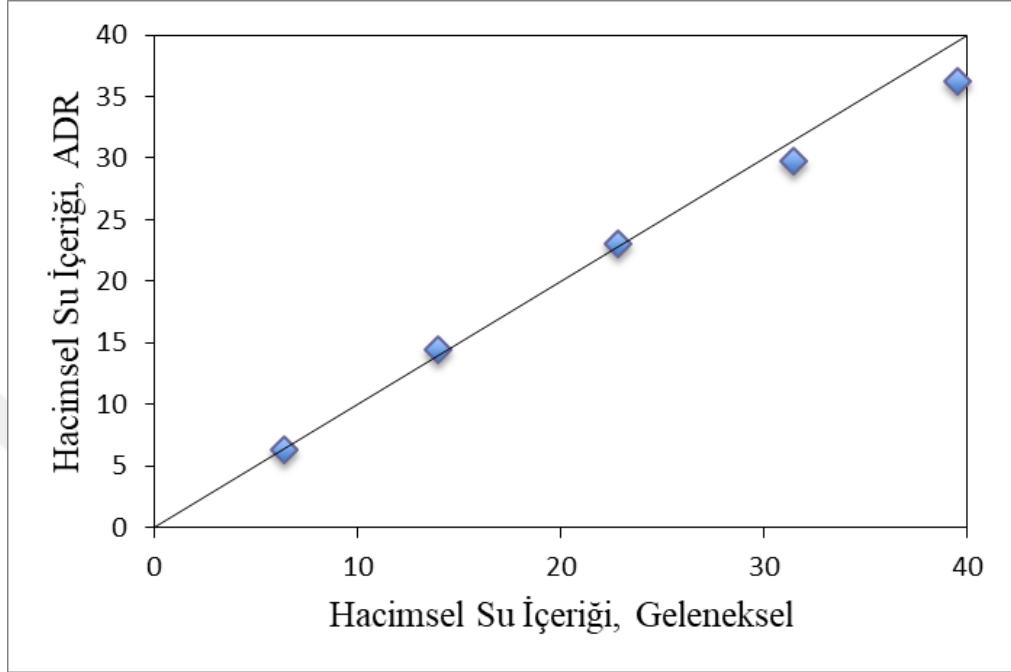
6.1.1.10. %100 kaolin test numunesi

Farklı su içeriklerinde hazırlanan test numuneleri üzerinde ADR ölçümleri yapılmış ve kalibrasyon katsayıları da kullanılarak hacimsel su içerikleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Tablo 6.23' de verilmiştir.

Tablo 6.23. %100 kaolin için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\epsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
4,45	1,404	6,37	0,246	2,3271	1,8531	0,0747	6,34
9,38	1,458	13,94	0,407	2,9315	1,8531	0,0747	14,44
14,09	1,587	22,80	0,588	3,5759	1,8531	0,0747	23,06
19,34	1,594	31,42	0,711	4,0744	1,8531	0,0747	29,74
24,32	1,593	39,49	0,812	4,5633	1,8531	0,0747	36,28

Tablo 6.23’ de verilen hacimsel su içeriği değerlerini kıyaslamak üzere Şekil 6.23 çizilmiştir. Genel de değerlerin 1:1 bandı üzerinde toplandığı görülmektedir.



Şekil 6.23. %100 kaolin için hacimsel su içeriği değerleri

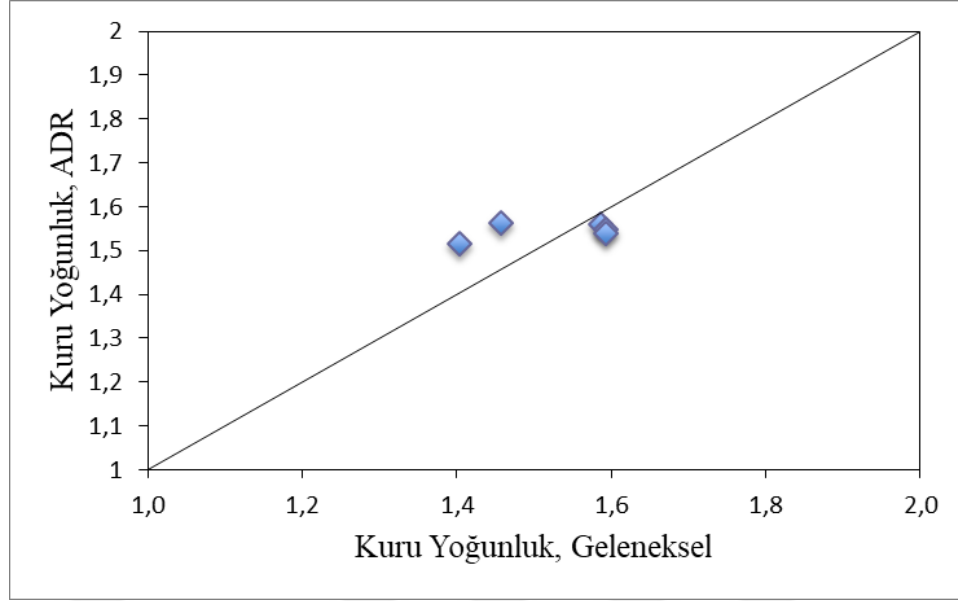
Şekle bakıldığında sadece en yüksek su içeriği değerlerinde, gerçek değerlerden uzaklaştığı tespit edilmektedir.

Kalibrasyon çalışmalarından sonra, test numuneleri üzerinde ölçümler alınarak kuru yoğunluk değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.24’ de verilmiştir.

Tablo 6.24. %100 kaolin için kuru yoğunluk ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (g/cm ³)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (g/cm ³)
1,404	0,246	2,3271	0,4951	-0,6257	-0,303	0,922	1,514
1,458	0,407	2,9315	0,4951	-0,6257	-0,303	2,118	1,563
1,587	0,588	3,5759	0,4951	-0,6257	-0,303	3,791	1,559
1,594	0,711	4,0744	0,4951	-0,6257	-0,303	5,367	1,549
1,593	0,812	4,5633	0,4951	-0,6257	-0,303	7,152	1,539

Kuru yoğunluk değerleri ayrıca grafik olarak Şekil 6.24’ te de verilmiştir. Sonuçları kıyaslamak adına aynı şekil üzerinde 1:1 bandı da çizilmiştir.



Şekil 6.24. %100 kaolin için kuru yoğunluk değerleri

Şekil 6.24 kontrol edildiğinde yoğunluk değerlerinin bir bölümünün gerçek değerlerden uzaklaştığı görülmektedir.

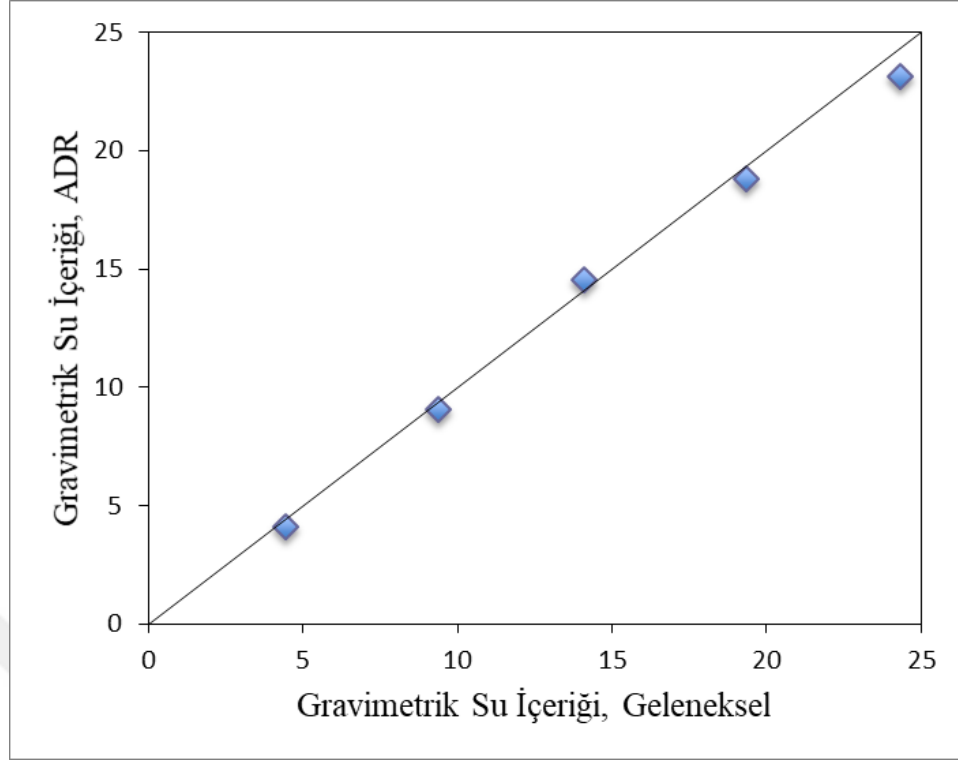
Gravimetrik su içeriği değerleri de belirlenerek Tablo 6.25' te verilmiştir.

Tablo 6.25. %100 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
4,45	4,11
9,38	9,06
14,09	14,52
19,34	18,83
24,32	23,12

Ayrıca yine bu değerler şekil olarak sunulmuştur. Gravimetrik su içeriklerinin sunulduğu şekil Şekil 6.25' deki gibidir.

Tıpkı hacimsel su içeriğindeki gibi bir eğilim göstermektedir. Artan su içeriği değerlerinde, gravimetrik su içeriklerinin gerçek değerden uzaklaştığı görülmektedir.



Şekil 6.25. %100 kaolin için gravimetrik su içeriği değerleri

6.1.2. Kum – kil karışımları

Çalışmada kaolin numunesi dışında ayrıca kil numunesi üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Aynı kaolin numunesinde olduğu gibi benzer oranlarda karışımlar hazırlanarak hem kalibrasyon numuneleri hazırlanmış, hem de test numuneleri hazırlanmış ve ölçümler alınarak, hacimsel su içeriği, kuru yoğunluk ve gravimetrik su içeriği değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışmada kullanılan kum numunesi, kaolin karışımlarında kullanılan kum ile aynı olduğundan %100 kum için sonuçlar tekrardan verilmemiştir.

6.1.2.1. %75 kum + %25 kil kalibrasyon numunesi

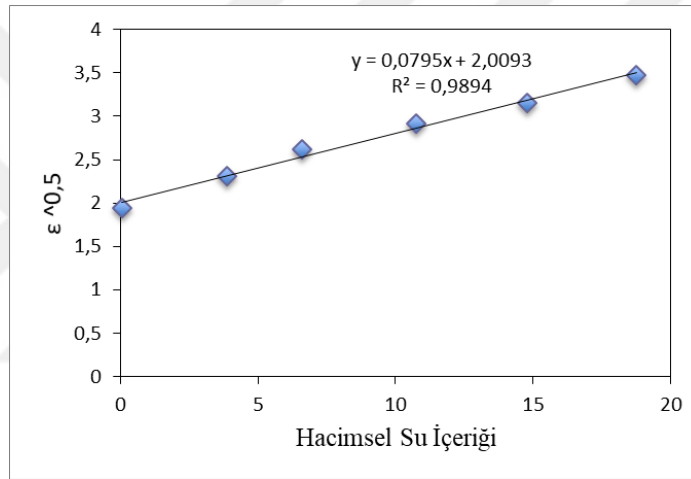
Kum kaolin karışımlarına benzer olarak, kum kil karışımları hazırlanmış ve karışımlara özgü kalibrasyon katsayıları yine benzer şekilde elde edilmiştir.

%75 kum + %25 kil kalibrasyon numunelerinden elde edilen ölçümler hacimsel su içeriği için Tablo 6.26’ da verilmiştir.

Tablo 6.26. %75 kum + %25 kil için hacimsel su içeriği

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	θ (%)
0,03	1,772	0,159	1,9447	0,05
2,20	1,722	0,243	2,3147	3,85
3,71	1,746	0,321	2,6204	6,60
5,99	1,763	0,402	2,9139	10,76
8,23	1,762	0,469	3,1487	14,78
10,77	1,709	0,56	3,4724	18,77

Tabloda verilen değerler, kalibrasyon katsayılarını elde etmeye yönelik olarak grafik halinde Şekil 6.26’da ki gibi gösterilmiştir.



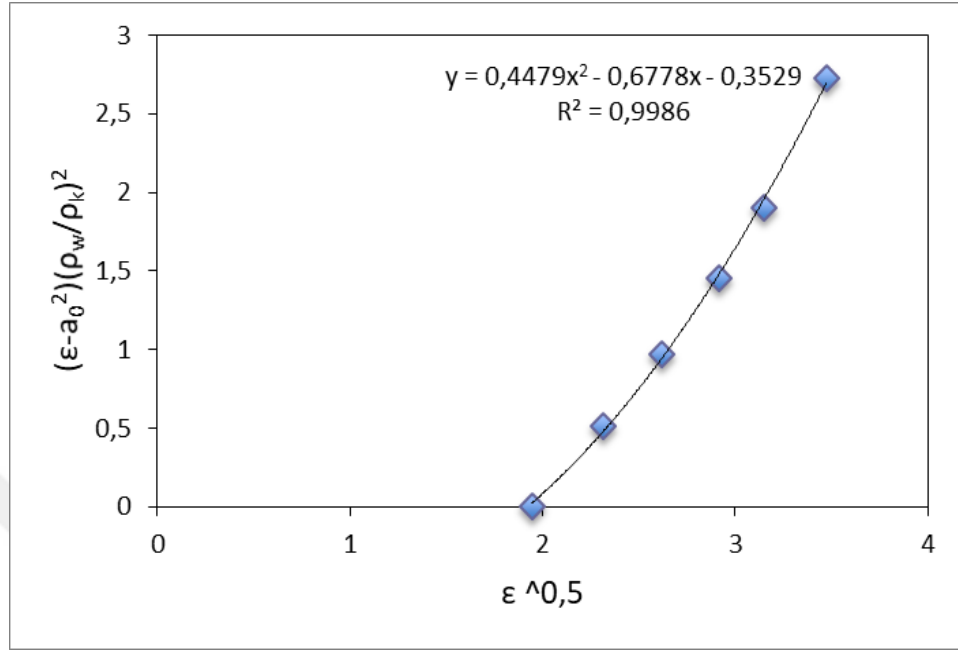
Şekil 6.26. %75 kum + %25 kil için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi

Şekle bakıldığında zemin için kalibrasyon katsayıları $a_0=2,0093$ ve $a_1=0,0795$ olarak bulunmuştur. Benzer şekilde kuru yoğunluk için kalibrasyon çalışmaları yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 6.27’ de verilmiştir.

Tablo 6.27. %75 kum + %25 kil için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	$(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$
0,025	1,772	0,159	1,9447	0,00
2,196	1,722	0,243	2,3147	0,51
3,707	1,746	0,321	2,6204	0,97
5,990	1,763	0,402	2,9139	1,46
8,227	1,762	0,469	3,1487	1,90
10,773	1,709	0,56	3,4724	2,73

Tablodaki veriler kullanılarak transfer fonksiyonu çizilmiştir. Çizilen bu fonksiyon grafik olarak Şekil 6.27’ de görülmektedir.



Şekil 6.27. %75 Kum + %25 kil için transfer fonksiyonu

Transfer fonksiyonu kullanılarak zemine özgü kalibrasyon katsayıları, $c_0=-0,3529$, $c_1=-0,6778$ ve $c_2=0,4479$ olarak bulunmuştur.

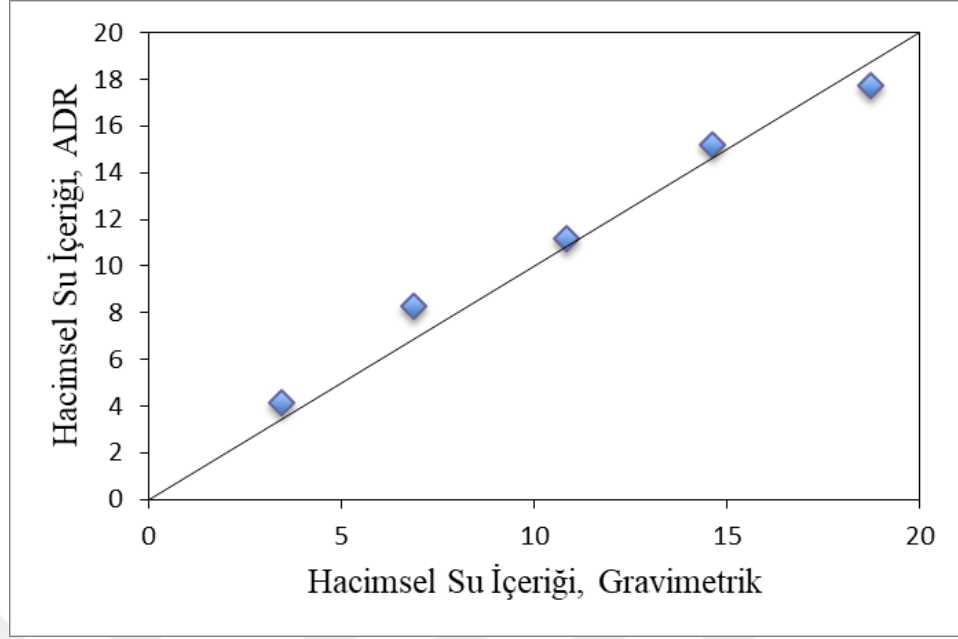
6.1.2.2. %75 kum + %25 kil test numunesi

Zemin için kalibrasyon katsayıları belirlendikten sonra test numuneleri hazırlanmış ve test numuneleri üzerinde ölçümler yapılmıştır. Hacimsel su içeriğini belirlemeye yönelik yapılan çalışmalardan elde edilen değerler Tablo 6.28’ de verilmiştir.

Tablo 6.28. %75 kum + %25 kil için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\epsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
1,94	1,738	3,43	0,249	2,3394	2,0093	0,0795	4,15
3,84	1,75	6,86	0,334	2,6688	2,0093	0,0795	8,30
6,04	1,756	10,82	0,398	2,8997	2,0093	0,0795	11,20
8,09	1,773	14,61	0,488	3,2153	2,0093	0,0795	15,17
10,62	1,728	18,71	0,545	3,4179	2,0093	0,0795	17,72

Hacimsel su içeriği değerleri belirlendikten sonra, bu değerleri kıyaslamak için Şekil 6.28’ de gösterilen grafik çizilmiştir.



Şekil 6.28. %75 kum + %25 kil için hacimsel su içeriği değerleri

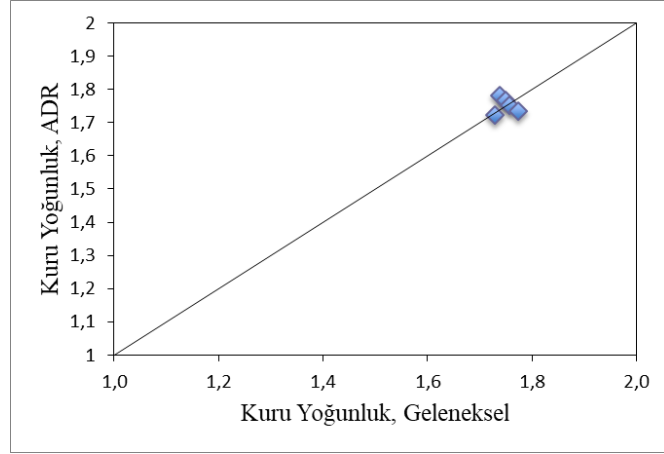
Grafik kontrol edildiğinde genel de değerlerin 1:1 bandının etrafında toplandığı görülmektedir.

Hacimsel su içeriğinden sonra test numunelerinden alınan ölçümlerden kuru yoğunluk değerleri de hesaplanmıştır. Geleneksel olarak da bulunan kuru yoğunluk değerlerinin gösterildiği tablo aşağıdaki gibi verilmiştir.

Tablo 6.29. %75 kum + %25 kil için kuru yoğunluk ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,738	0,249	2,3394	0,4479	-0,6778	-0,3529	0,513	1,782
1,75	0,334	2,6688	0,4479	-0,6778	-0,3529	1,028	1,768
1,756	0,398	2,8997	0,4479	-0,6778	-0,3529	1,448	1,754
1,773	0,488	3,2153	0,4479	-0,6778	-0,3529	2,098	1,734
1,728	0,545	3,4179	0,4479	-0,6778	-0,3529	2,563	1,722

Kuru yoğunluk değerlerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 6.29' da verilmiştir. Grafiğe bakınca değerlerin 1:1 bandının etrafında toparlandığı görülmektedir.



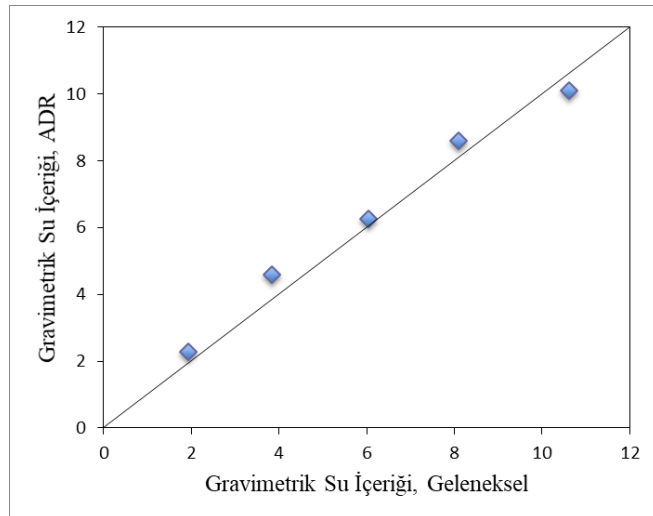
Şekil 6.29. %75 kum + %25 kil için kuru yoğunluk değerleri

Gravimetrik su içeriği değerleri de hem geleneksel yöntemi hem de ADR ile belirlenen yöntem ile Tablo 6.30’ da sunulmuştur.

Tablo 6.30. %75 kum + %25 kil için gravimetrik su içeriği değerleri

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
1,94	2,29
3,84	4,60
6,04	6,27
8,09	8,58
10,62	10,09

Yine değerlerin kıyaslandığı grafik Şekil 6.30’ da verilmiştir. Grafik incelendiğinde değerlerin 1:1 bandı civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 6. 30. %75 kum + %25 kil için gravimetrik su içeriği değerleri

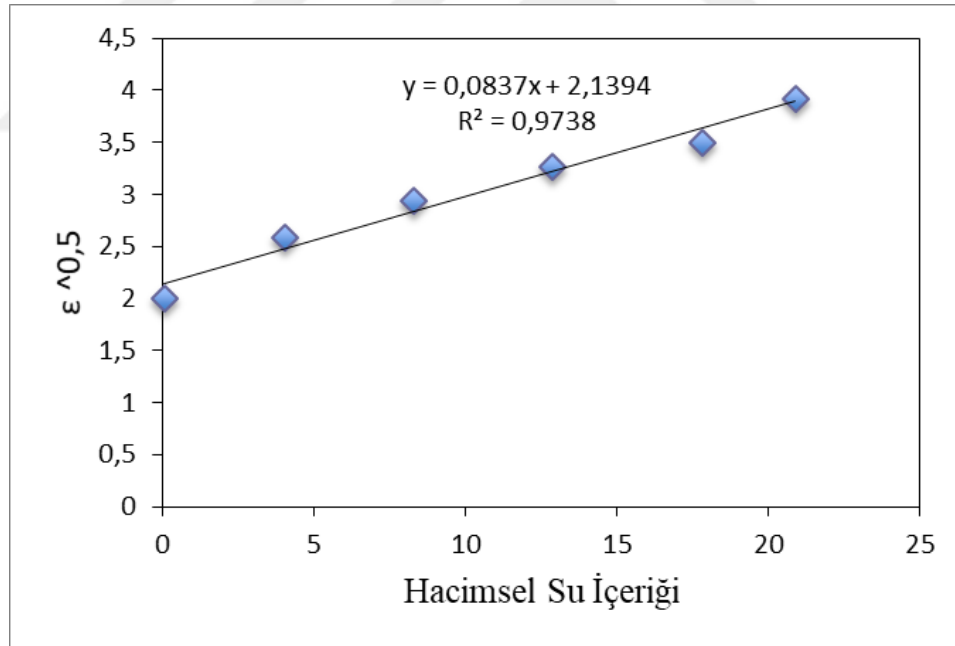
6.1.2.3. %50 kum + %50 kil kalibrasyon numunesi

Karışım için hacimsel su içeriğini belirlemek amacıyla hazırlanan numunelerden elde edilen ölçüm sonuçları aşağıda Tablo 6.31’ de verilmiştir.

Tablo 6.31. %50 kum + %50 kil için hacimsel su içeriği

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (grcm^{-3})	mV	$\epsilon^{0,5}$	θ (%)
0,03	1,762	0,171	2,0008	0,04
2,28	1,745	0,311	2,5828	4,05
4,66	1,749	0,408	2,9350	8,31
7,06	1,788	0,501	3,2610	12,87
9,58	1,827	0,568	3,5017	17,83
11,73	1,749	0,674	3,9153	20,91

Kalibrasyon katsayılarını elde etmek için tablodaki değerler grafik haline getirilerek Şekil 6.31’ deki gibi sunulmuştur.



Şekil 6.31. %50 kum + %50 kil için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi

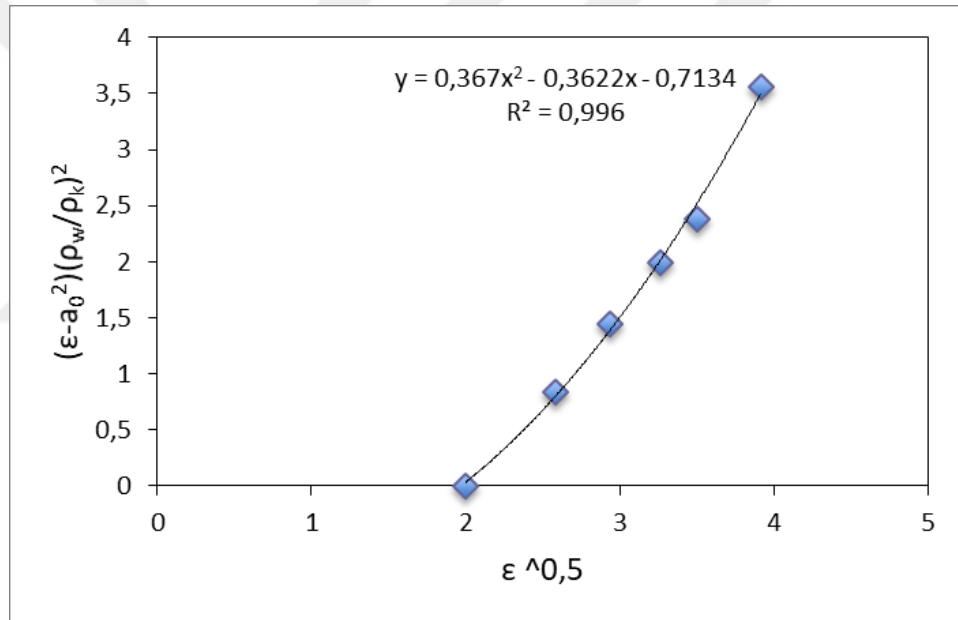
Şekle bakıldığında zemin için kalibrasyon katsayıları $a_0=2,1394$ ve $a_1=0,0837$ olarak bulunmuştur.

Kuru yoğunluk değerlerinin bulunmasına yönelik yapılan ölçüm değerleri ise Tablo 6.32’ de gösterilmiştir.

Tablo 6.32. %50 kum + %50 kil için $(\varepsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	$(\varepsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$
0,025	1,762	0,171	2,0008	0,00
2,275	1,745	0,311	2,5828	0,84
4,660	1,749	0,408	2,9350	1,45
7,063	1,788	0,501	3,2610	2,00
9,576	1,827	0,568	3,5017	2,38
11,729	1,749	0,674	3,9153	3,56

Transfer fonksiyonunu hesaplamak için tablodaki değerler grafik olarak Şekil 6.32’ de olduğu gibi çizilmiştir.



Şekil 6.32. %50 kum + %50 kil için transfer fonksiyonu

Grafikten kalibrasyon katsayıları ise $c_0 = -0,7134$, $c_1 = -0,3622$ ve $c_2 = 0,367$ olarak elde edilmiştir.

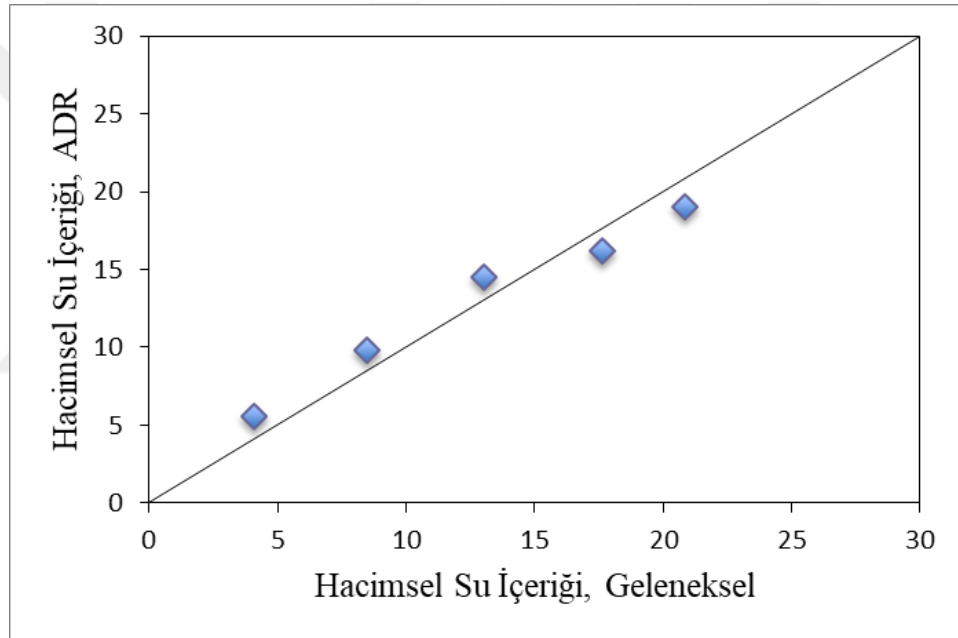
6.1.2.4. %50 kum + %50 kil test numunesi

Kalibrasyon katsayıları belirlendikten sonra hacimsel su içeriğini bulmak için yine test numuneleri hazırlanmış ve ADR ölçümleri alınmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen değerler Tablo 6.33’ te verilmiştir.

Tablo 6.33. %50 kum + %50 kil için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm ⁻³)	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
2,28	1,754	4,07	0,317	2,6054	2,1394	0,0837	5,57
4,74	1,756	8,48	0,416	2,9632	2,1394	0,0837	9,84
7,10	1,801	13,03	0,528	3,3568	2,1394	0,0837	14,54
9,50	1,823	17,65	0,566	3,4943	2,1394	0,0837	16,19
11,65	1,758	20,87	0,629	3,7331	2,1394	0,0837	19,04

Kıyaslamayı daha iyi görebilmek için, tablodaki değerler grafik halinde aşağıdaki sunulmuştur.



Şekil 6.33. %50 kum + %50 kil için hacimsel su içeriği değerleri

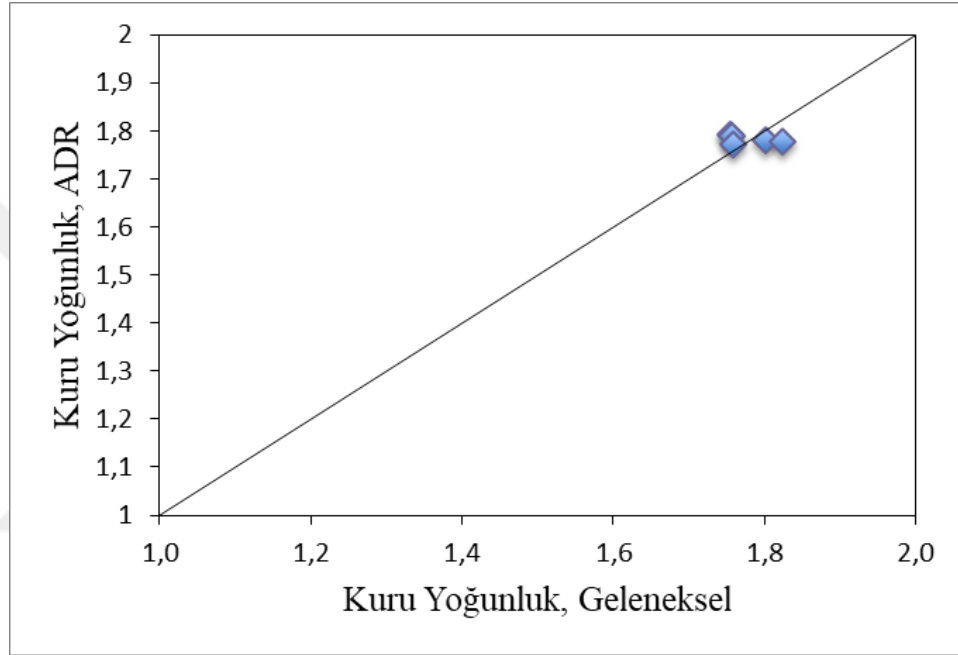
Şekil 6.33 kontrol edildiğinde düşük su içeriğindeki numuneler için hacimsel su içeriği değerleri 1:1 bandına yakın iken, su içeriği arttıkça, değerler de birbirinden uzaklaşmıştır.

Transfer fonksiyonu çizilip zemine özgü kalibrasyon katsayıları hesaplandıktan sonra, kuru yoğunluk değerlerini bulmak için test numuneleri hazırlanmış ve ADR ölçümleri alınmıştır. Ölçüm sonunda hesaplanan değerler Tablo 6.34’ te gösterilmiştir.

Kuru yoğunluk değerlerini daha rahat kıyaslamak için Şekil 6.34’ te görüln grafik çizilmiştir.

Tablo 6.34. %50 kum + %50 kil için kuru yoğunluk ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (gcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (gcm ⁻³)
1,754	0,317	2,6054	0,367	-0,3622	-0,7134	0,834	1,793
1,756	0,416	2,9632	0,367	-0,3622	-0,7134	1,436	1,789
1,801	0,528	3,3568	0,367	-0,3622	-0,7134	2,206	1,780
1,823	0,566	3,4943	0,367	-0,3622	-0,7134	2,502	1,777
1,758	0,629	3,7331	0,367	-0,3622	-0,7134	3,049	1,771



Şekil 6.34. %50 kum + %50 kil için kuru yoğunluk değerleri

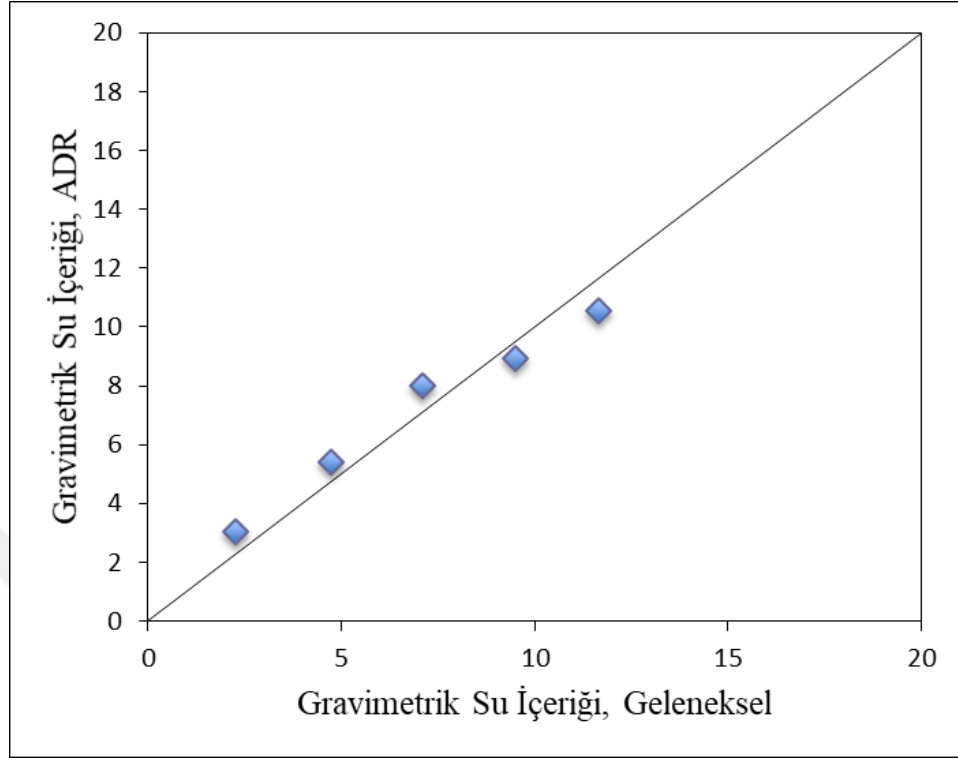
Grafikteki değerler kontrol edildiğinde, sonuçların 1:1 bandı etrafında kümелendiği görülmüştür.

Kuru yoğunluk ve hacimsel su içeriği değerleri bulunduğundan sonra, bu değerler kullanılarak gravimetrik su içeriği değerleri de hesaplanmış ve sonuçlar geleneksel yöntemlerle elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Değerler Tablo 6.35’te verilmiştir.

Tablo 6.35. %50 kum + %50 kil için gravimetrik su içeriği değerleri

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,28	3,05
4,74	5,40
7,10	8,02
9,50	8,94
11,65	10,55

Değerlerin karşılaştırıldığı grafik ise Şekil 6.35’ te karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 6.35. %50 kum + %50 kil için gravimetrik su içeriği değerleri

Şekil kontrol edildiğinde hacimsel su içeriğine benzer dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır.

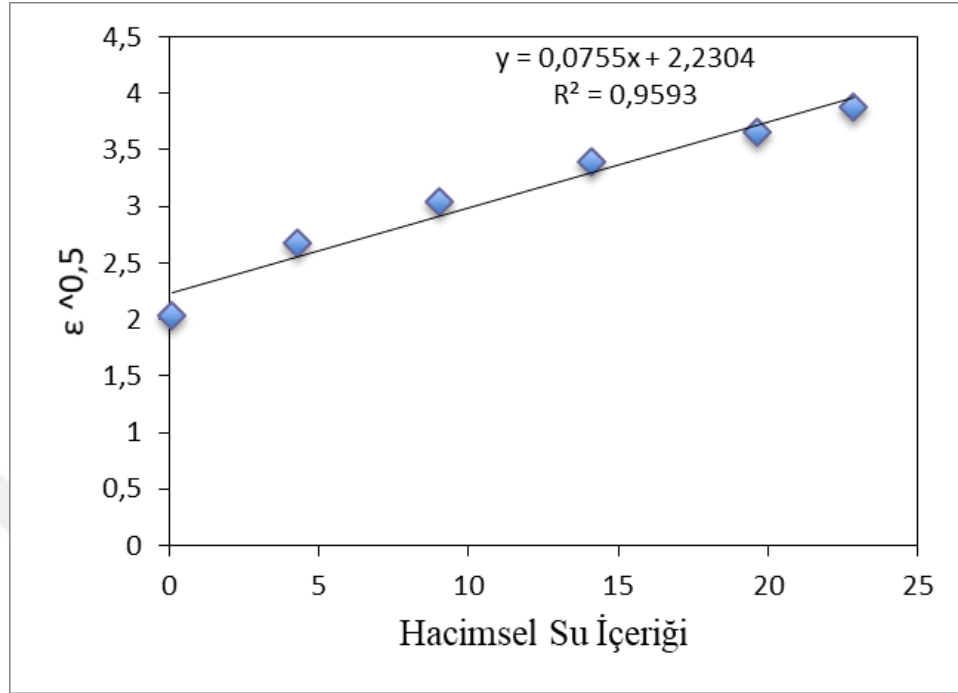
6.1.2.5. %25 kum + %75 kil kalibrasyon numunesi

Tıpkı diğer karışımlarda olduğu gibi bu numunede de hacimsel su içeriğini belirlemek için kalibrasyon ölçümleri alınmıştır. Hacimsel su içeriğini bulmak için alınan ölçümler Tablo 6.36’ da verilmiştir.

Tablo 6.36. %25 kum + %75 kil için hacimsel su içeriği

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	mV	$\epsilon^{0.5}$	θ (%)
0,05	1,708	0,177	2,0284	0,09
2,43	1,717	0,336	2,6762	4,26
5,13	1,723	0,438	3,0403	9,00
7,75	1,784	0,537	3,3891	14,10
10,72	1,796	0,61	3,6594	19,63
13,17	1,704	0,664	3,8738	22,88

Kalibrasyon katsayılarını belirlemek için tablodaki değerler aşağıdaki gibi grafik haline getirilmiştir.



Şekil 6.36. %25 kum + %75 kil için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi

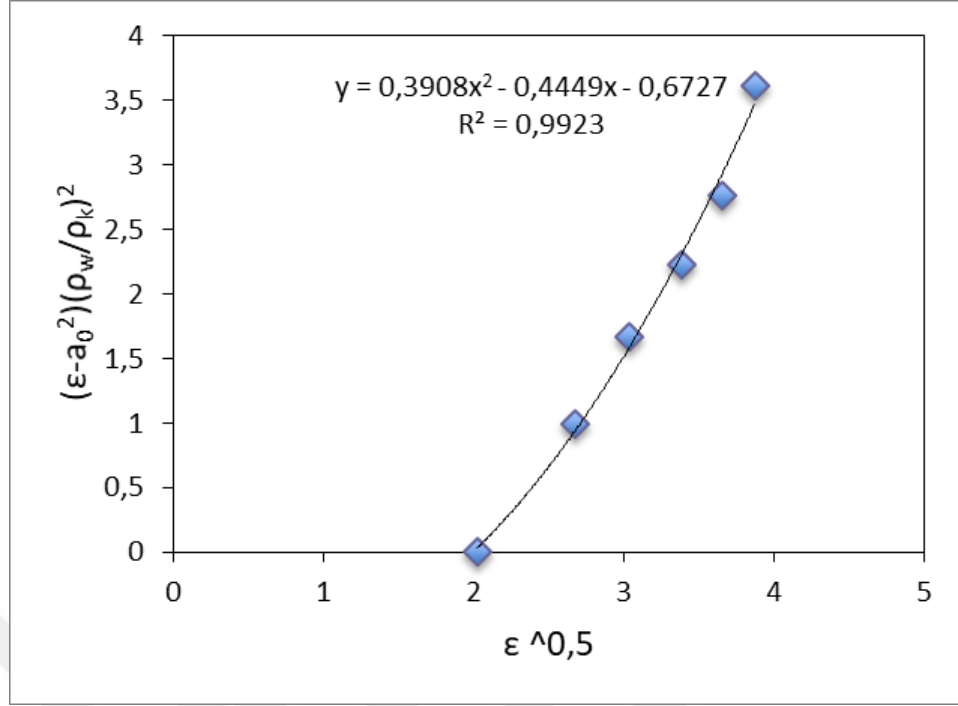
Şekil 6.36 kontrol edildiğinde mevcut karışım için kalibrasyon katsayıları $a_0=2,2304$ ve $a_1=0,0755$ olarak bulunmuştur.

Kuru yoğunlukları elde etmek için yapılan kalibrasyon çalışmalarının grafikleri ise Tablo 6.37’ de verilmiştir.

Tablo 6.37. %25 kum + %75 kil için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (gcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	$(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$
0,050	1,708	0,177	2,0284	0,00
2,434	1,717	0,336	2,6762	0,99
5,126	1,723	0,438	3,0403	1,66
7,754	1,784	0,537	3,3891	2,23
10,723	1,796	0,61	3,6594	2,77
13,171	1,704	0,664	3,8738	3,61

Değerler şekil 6.37’ de gösterildiği gibi grafik haline getirilmiş ve transfer fonksiyonu çizilmiştir.



Şekil 6. 37. %25 kum + %75 kil için transfer fonksiyonu

Çizilen transfer fonksiyonu sonucunda zeminin kalibrasyon katsayıları $c_0 = -0,6727$, $c_1 = -0,4449$ ve $c_2 = 0,3908$ olarak bulunmuştur.

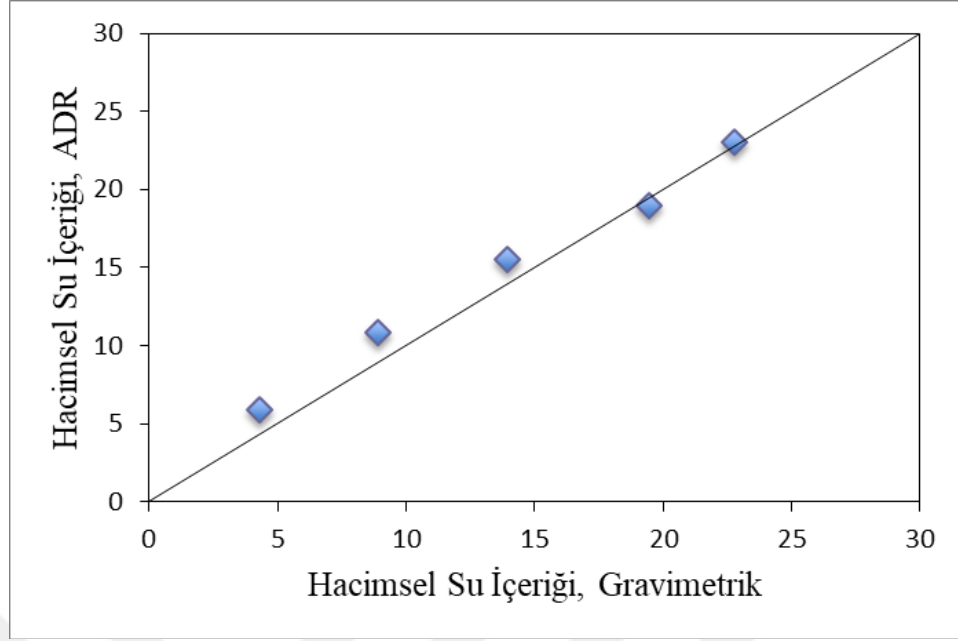
6.1.2.6. %25 kum + %75 kil test numunesi

Kalibrasyon katsayıları belirlenen karışımın ile farklı su içeriklerinde test numuneleri hazırlanmıştır. Alınan ölçümler sonucunda hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri Tablo 6.38’ de gösterilmiştir.

Tablo 6.38. %25 kum + %75 kil için hacimsel su içeriği adr ölçümleri

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\epsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
2,46	1,727	4,32	0,336	2,6762	2,2304	0,0755	5,90
5,04	1,736	8,92	0,44	3,0473	2,2304	0,0755	10,82
7,72	1,774	13,96	0,541	3,4034	2,2304	0,0755	15,54
10,64	1,792	19,44	0,61	3,6594	2,2304	0,0755	18,93
13,17	1,696	22,77	0,686	3,9659	2,2304	0,0755	22,99

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.38’ deki gibidir.



Şekil 6.38. %25 Kum + %75 Kil için Hacimsel Su İçeriği Değerleri

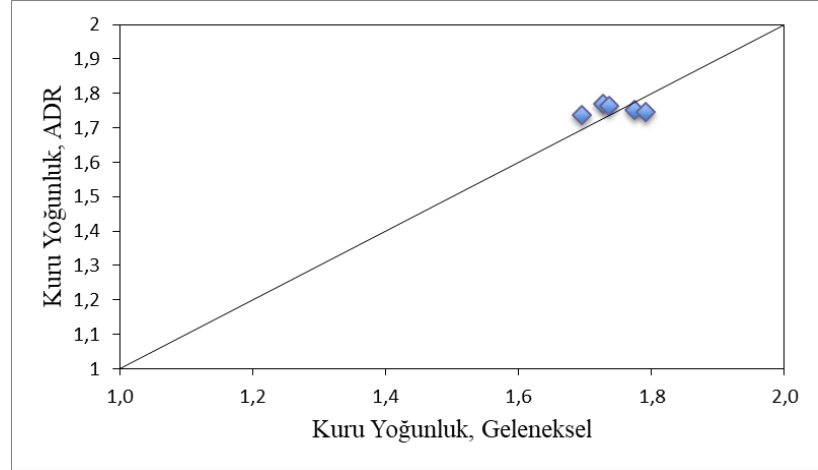
Şekil kontrol edildiğinde kuruya yakın su içeriğindeki numuneler için değerlerin 1:1 bandından uzaklaştığı, artan su içeriği değerlerinde ise 1:1 bandına yaklaştığı görülmektedir.

Test numunelerinden elde edilen kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı tablo ise aşağıda verilmiştir.

Tablo 6.39. %25 kum + %75 kil için kuru yoğunluk ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm^{-3})	mV	$\epsilon^{0.5}$	c_2	c_1	c_0	$y=f(x)$	ρ_k (grcm^{-3})
1,727	0,336	2,6762	0,3908	-0,4449	-0,6727	0,936	1,771
1,736	0,44	3,0473	0,3908	-0,4449	-0,6727	1,601	1,763
1,774	0,541	3,4034	0,3908	-0,4449	-0,6727	2,340	1,753
1,792	0,61	3,6594	0,3908	-0,4449	-0,6727	2,932	1,745
1,696	0,686	3,9659	0,3908	-0,4449	-0,6727	3,709	1,736

Tablodaki değerler Şekil 6.39' da olduğu gibi grafik olarak sunulmuştur.

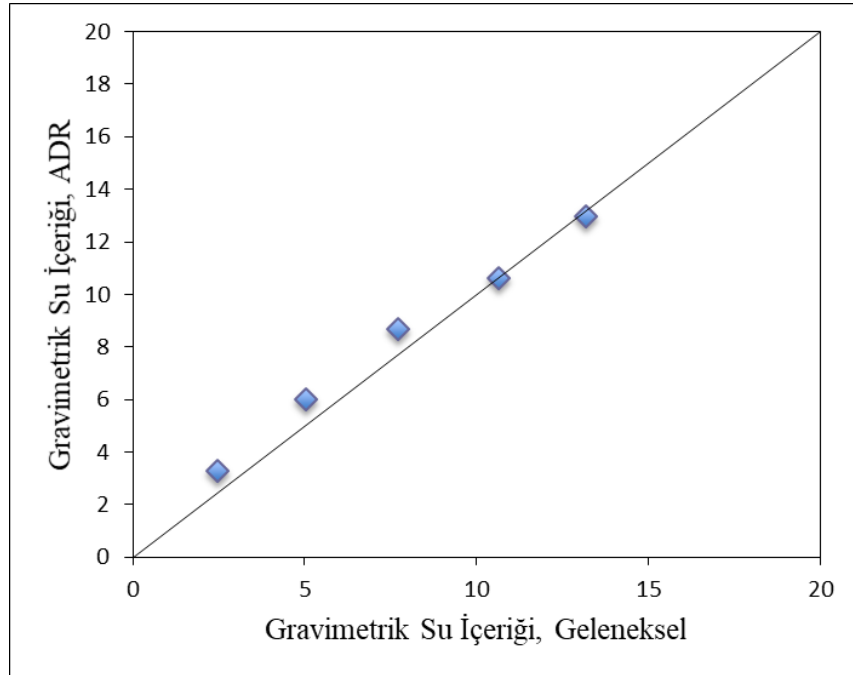


Şekil 6.39. %25 kum + %75 kil için kuru yoğunluk değerleri

Grafik kontrol edildiğinde değerlerin 1:1 bandı etrafında kümелendiği görülmektedir. Gravimetrik su içeriği için elde edilen sonuçlar ise Tablo 6.40' ta görülmektedir. Değerlerin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.40' ta verilmiştir.

Tablo 6. 40. %25 kum + %75 kil için gravimetrik su içeriği değerleri

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,46	3,27
5,04	6,02
7,72	8,70
10,64	10,64
13,17	12,99



Şekil 6.40. %50 kum + %50 kil için gravimetrik su içeriği değerleri

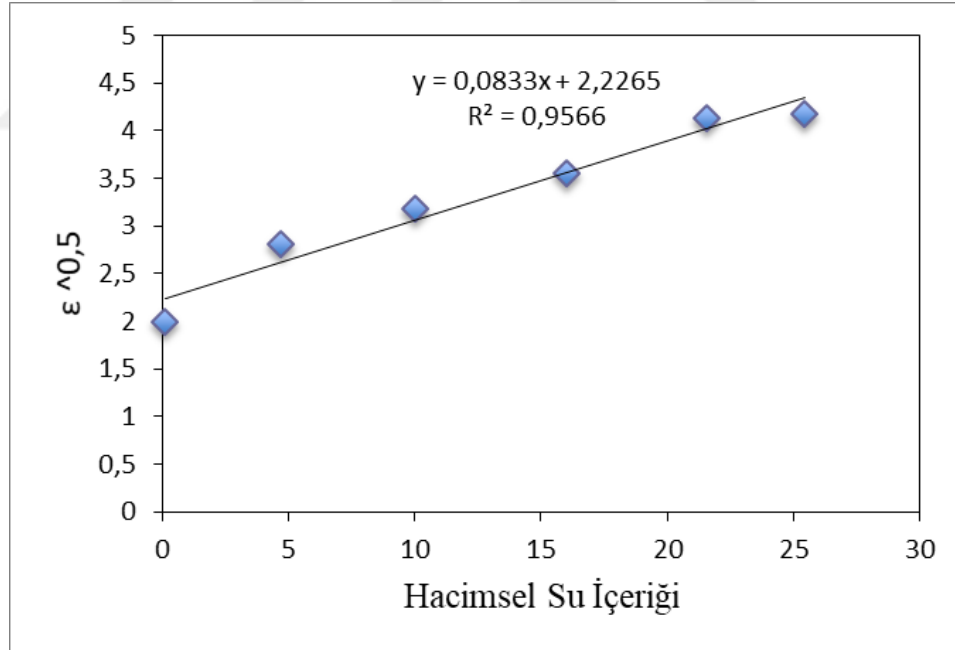
Şekle bakıldığında tıpkı hacimsel su içeriğindeki benzer bir dağılımın olduğu görülmektedir.

6.1.2.7. %100 kil kalibrasyon numunesi

Hacimsel su içeriği kalibrasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar Tablo 6.41’ de verilmiştir.

Tablo 6.41. %100 kil için hacimsel su içeriği

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (gcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	θ (%)
0,05	1,647	0,169	1,9915	0,08
2,80	1,639	0,372	2,8071	4,68
5,85	1,675	0,476	3,1732	9,98
8,94	1,759	0,582	3,5535	16,02
12,21	1,732	0,725	4,1371	21,55
15,42	1,620	0,733	4,1736	25,46



Şekil 6.41. %100 kil için hacimsel su içeriği – dielektrik ilişkisi

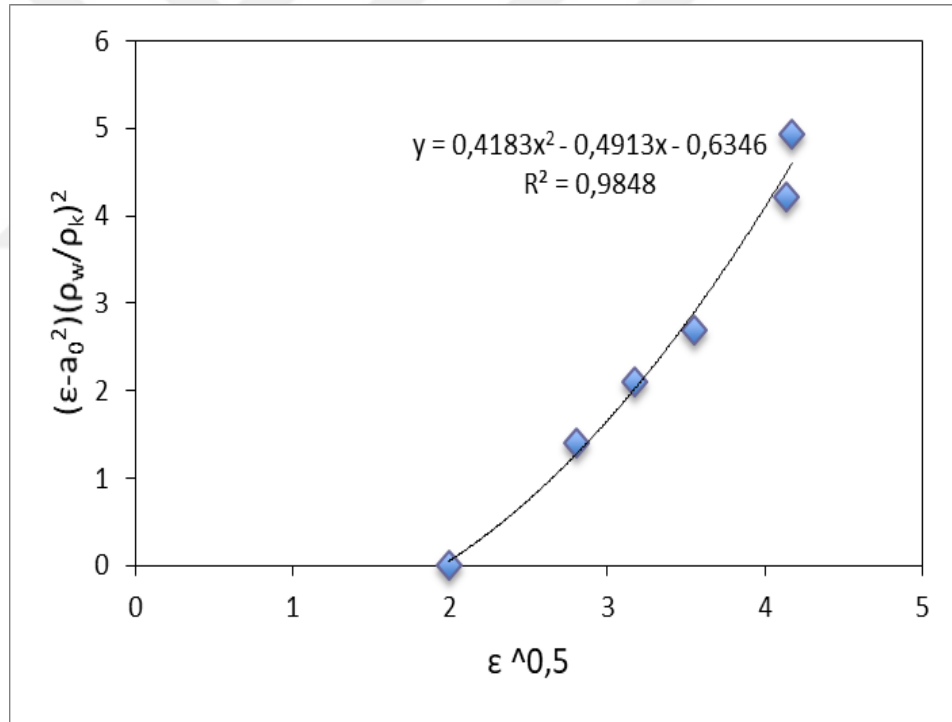
Şekil 6.41’e bakıldığında kalibrasyon katsayıları $a_0=2,2265$ ve $a_1=0,0833$ olarak bulunmuştur.

Kuru yoğunluk için yapılan kalibrasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar ise Tablo 6.42’deki gibidir.

Tablo 6.42. %100 kil için $(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$ değerleri

Geleneksel Yöntem		ADR Ölçümleri		
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	$(\epsilon - a_0^2)(\rho_w/\rho_k)^2$
0,050	1,647	0,169	1,9915	0,00
2,799	1,639	0,372	2,8071	1,40
5,847	1,675	0,476	3,1732	2,09
8,935	1,759	0,582	3,5535	2,69
12,205	1,732	0,725	4,1371	4,22
15,416	1,620	0,733	4,1736	4,93

Tabloda elde edilen değerler grafik edilmiş ve transfer fonksiyonu çizilmiştir. Çizilen transfer fonksiyonu Şekil 6.42’ de görülmektedir. Kalibrasyon katsayıları ise $c_0=-0,6346$, $c_1=-0,4913$ ve $c_2=0,4183$ olarak bulunmuştur.



Şekil 6.42. %100 kil için transfer fonksiyonu

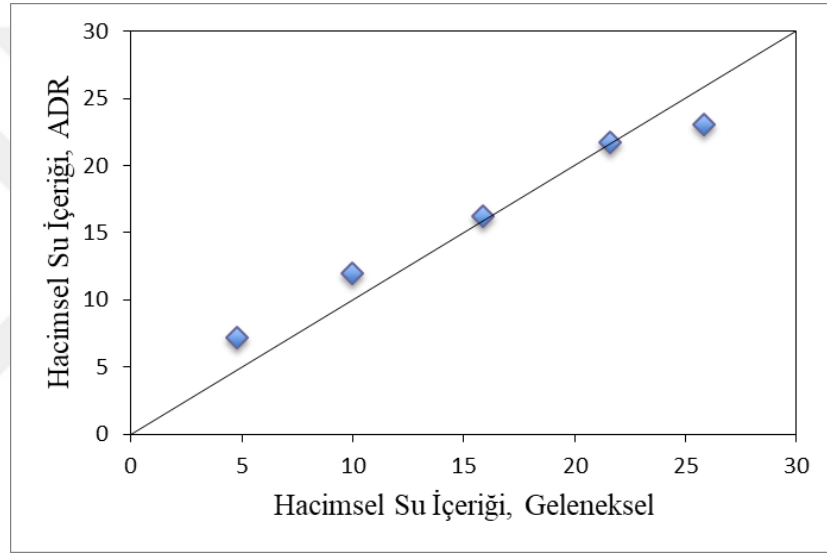
6.1.2.8. %100 kil test numunesi

Hacimsel su içeriğini tespit etmek için test hazırlanan test numunelerinden ölçümler alınmış ve kalibrasyon katsayıları da kullanılarak elde edilen sonuçta Tablo 6.43’te verilmiştir.

Tablo 6.43. %100 kil için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
2,88	1,633	4,79	0,377	2,8250	2,2265	0,0833	7,19
5,81	1,688	10,00	0,49	3,2223	2,2265	0,0833	11,95
8,91	1,75	15,89	0,589	3,5797	2,2265	0,0833	16,24
12,32	1,72	21,60	0,703	4,0392	2,2265	0,0833	21,76
15,61	1,624	25,84	0,727	4,1461	2,2265	0,0833	23,04

Tabloda verilen hacimsel su içeriği değerlerini kıyaslamak için Şekil 6.43'te verilen grafik çizilmiştir. Grafikte yine 1:1 bandı da çizilmiştir.



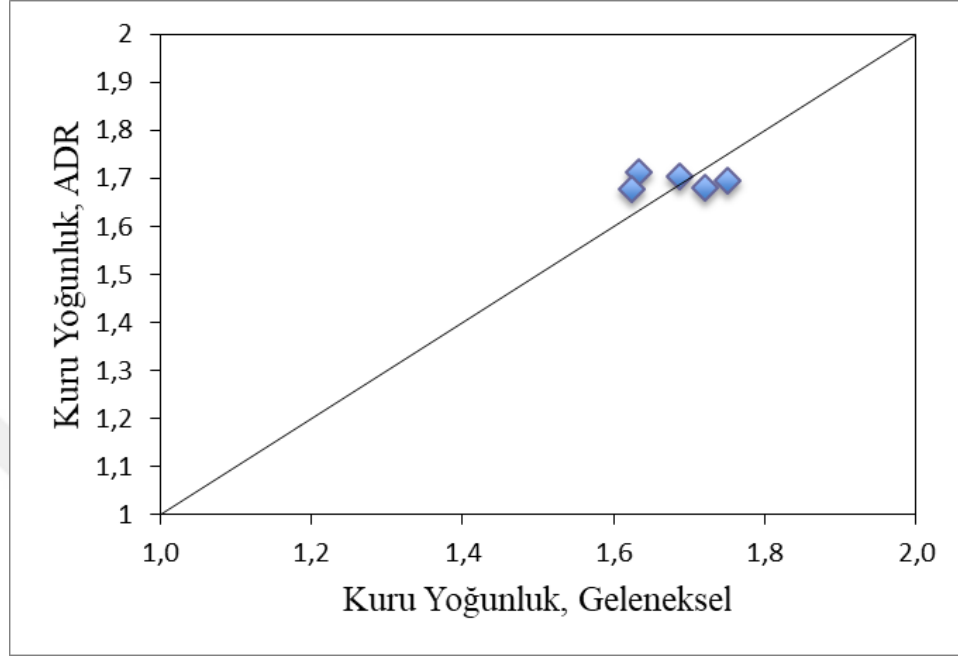
Şekil 6.43. %100 kil için hacimsel su içeriği değerleri

Değerler kontrol edildiğinde düşük ve yüksek su içeriklerinde elde edilen değerlerin 1:1 bandından uzaklaştığı, diğer su içeriklerinde ise 1:1 bandı civarında olduğu görülmektedir. Test numunelerinden alınan ölçümlerden kuru yoğunluk değerleri de hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.44' te verilmiştir.

Tablo 6.44. %100 kil için kuru yoğunluk ADR ölçümleri

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (g/cm ³)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (g/cm ³)
1,633	0,377	2,8250	0,4183	-0,4913	-0,6346	1,316	1,714
1,688	0,49	3,2223	0,4183	-0,4913	-0,6346	2,126	1,705
1,75	0,589	3,5797	0,4183	-0,4913	-0,6346	2,967	1,694
1,72	0,703	4,0392	0,4183	-0,4913	-0,6346	4,206	1,681
1,624	0,727	4,1461	0,4183	-0,4913	-0,6346	4,519	1,678

Yine değerlerin kıyaslandığı grafik çizilmiş ve Şekil 6.44’ teki gibi verilmiştir. Şekil kontrol edildiğinde değerlerin 1:1 bandı üzerinde olmadığı, fakat bant çevresinde kümелendiğı görölmektedir.



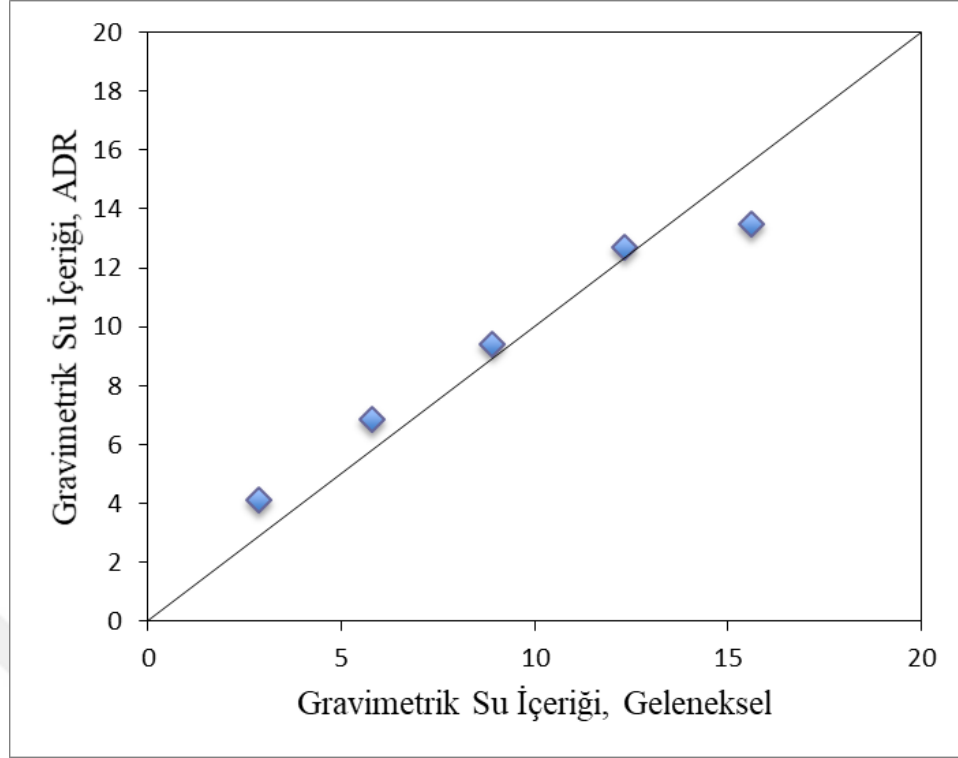
Şekil 6.44. %100 kil için kuru yoğunluk değerleri

Yine gravimetrik su içeriğı değerleri de karşılaştırılmış ve değerler Tablo 6.54’ te verilmiştir.

Tablo 6.45. %100 kil için gravimetrik su içeriğı değerleri

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,88	4,11
5,81	6,88
8,91	9,41
12,32	12,70
15,61	13,47

Yine sonuçları kıyaslamak adına değerler karşılıklı olarak grafik edilmiştir. Bu grafik Şekil 6.45’ te verilmiştir. Yine hacimsel su içeriğı ile paralellik arz etmektedir. Düşük ve en yüksek su içeriğinde değerler 1:1 bandından uzaklaşırken, diğer su içeriğı değerlerinde 1:1 bandı civarında yer aldığı görölmektedir.



Şekil 6. 45. %100 kil için gravimetrik su içeriği değerleri

Numunenin %100 kil olduğu düşünüldüğünde 1:1 bandından uzaklaşmasının normal olduğu düşünülmektedir.

6.2. Farklı Enerji Seviyelerinde Yapılan Çalışmalar

Çalışmada on dört farklı numune kullanılmıştır. Bunlar CH, CI, CL, MH, MI, ML, SP, SW, SP-SM, SP-SC, SW-SM, SW-SC, SM ve SC numuneleridir. C (kil) ve M (silt) grubu zeminler kohezyonlu zeminleridir, çalışmada bu grup zeminlerden bahsederken inceler olarak bahsedilmiştir. S (kum) grubu zeminlere ise çalışmada kum grubu olarak bahsedilmiştir.

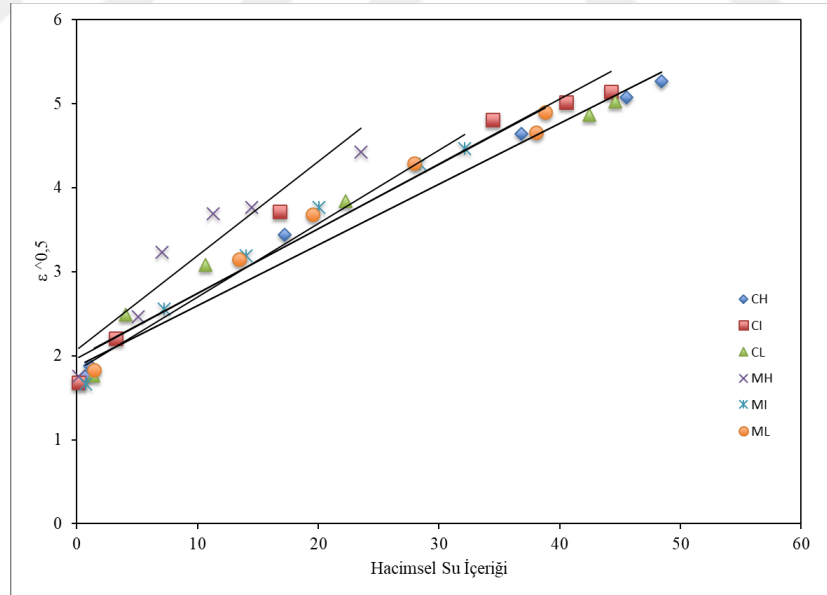
Numuneler farklı su içeriklerinde hazırlanmışlar ve hacmi bilinen standart bir kalıpta, üç farklı enerji seviyesinde sıkıştırılmıştır. En az enerji uygulanan zeminlere gevşek zeminler, orta seviyede enerji uygulanan zeminlere orta sıkı zeminler ve en çok enerji uygulanan zeminlere ise sıkı zeminler denmiştir. Kalibrasyon numuneleri orta sıkılıkta hazırlanan numuneler olarak seçilmiştir. Gevşek ve sıkı olarak hazırlanan numuneler ise test numuneleri olarak belirlenmiştir. Bunun amacı eğer elimizde bir zemin için kalibrasyon katsayısı varsa, başka sıkılıktaki zeminlerde alınan ölçüm sonuçlarının gerçeği ne kadar yansıttığını görmek içindir.

Bu bölümde kalibrasyon dataları, Bölüm 6.1’ deki aynı enerjili zeminlerdeki gibi ayrı ayrı verilmemiş, özet halinde kil ve silt grubu zeminler için ince daneli zemin grubu bir grafik, kumlu zeminler içinse bir grafik olarak verilmişti verilmiştir. Kalibrasyon katsayıları test numunelerinden elde edilen sonuçların sunulduğu tablolarda zaten mevcuttur. Ekstradan verilmemiştir.

6.2.1. İnce ve kum grubu zeminler üzerinde yapılan kalibrasyon çalışmaları

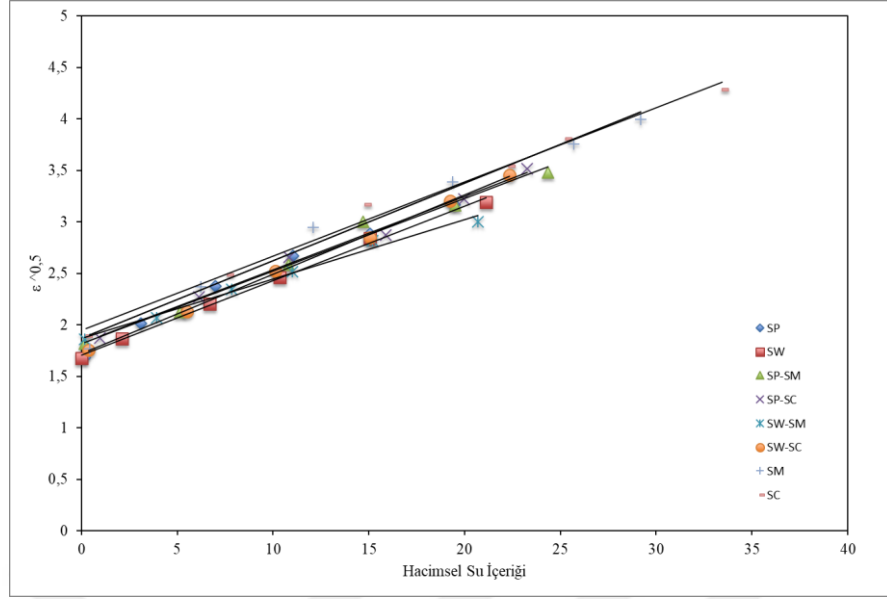
Hem ince daneli zeminler, hem de kum grubu zeminlerin kalibrasyon katsayılarını belirlemek için farklı su içeriklerinde hazırlanan numuneler, standart proktor kalıbında orta seviyede enerji uygulanarak sıkıştırılmışlardır. Sıkıştırılan zeminler üzerinde ADR probu ile ölçümler alınarak dielektrik katsayıları belirlenmiştir. Geleneksel yöntemler ile elde edilen değerler gravimetrik su içeriği, kuru yoğunluk değerlerine bağlı olarak hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır.

Dielektrik katsayısı hacimsel su içeriği arasındaki ilişkinin grafiği ince daneli zemin grubu için Şekil 6.46’ da verilmiştir.



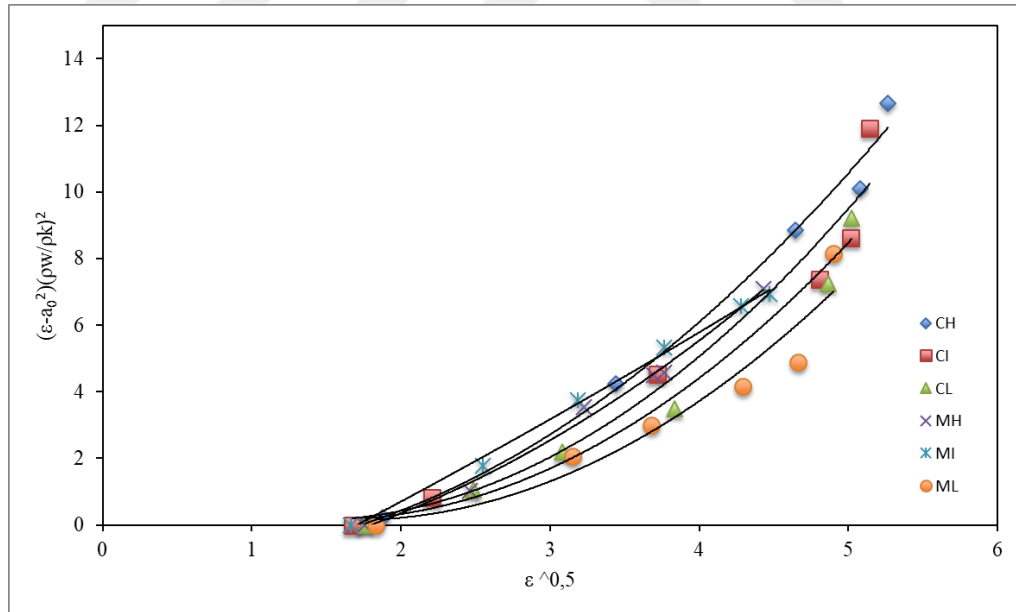
Şekil 6.46. İnce grubu zeminler için dielektrik – hacimsel su içeriği ilişkisi

Şekil 6.47’ de ise kum grubu zeminler için dielektrik, hacimsel su içeriği ilişkisi verilmiştir.



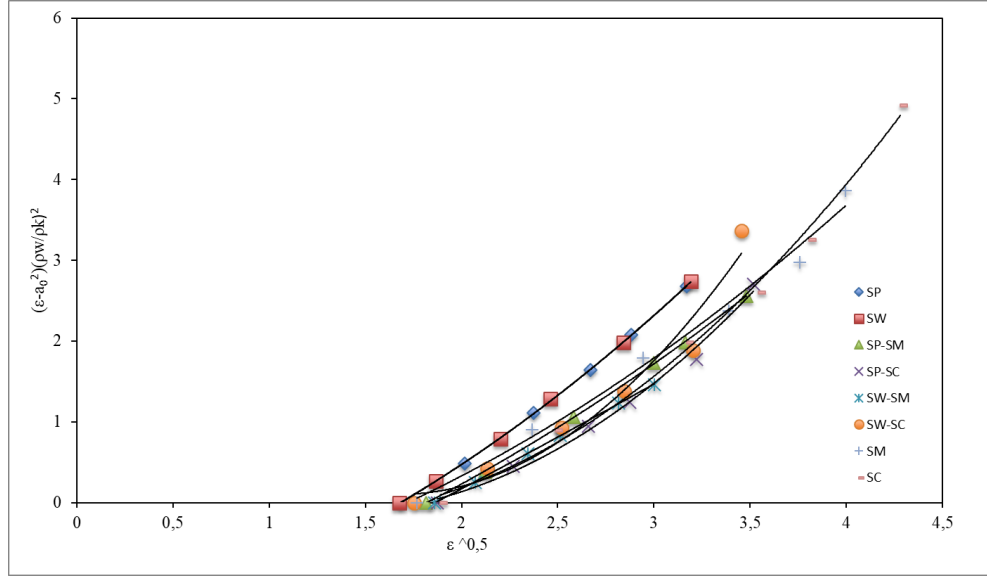
Şekil 6. 47. Kum grubu zeminler için dielektrik – hacimsel su içeriği ilişkisi

Kuru yoğunlukları tespit etmek amacı ile çizilen transfer fonksiyonlarının gösterildiği grafikler ise yine ince daneli zemin grubu için Şekil 6.48’ de verilmiştir.



Şekil 6.48. İnce grubu için transfer fonksiyonları

Kum grubu zeminler içinse transfer fonksiyonları Şekil 6.49’ da verilmiştir.



Şekil 6.49. Kum grubu için transfer fonksiyonları

Her bir numune için ayrı ayrı a_0 , a_1 , c_0 , c_1 ve c_2 kalibrasyon katsayıları ekstradan gösterilmemiştir. İlerleyen bölümde her zemin için test dataları tablo halinde sunulurken bu kalibrasyon dataları da o tablolarda yer almaktadır.

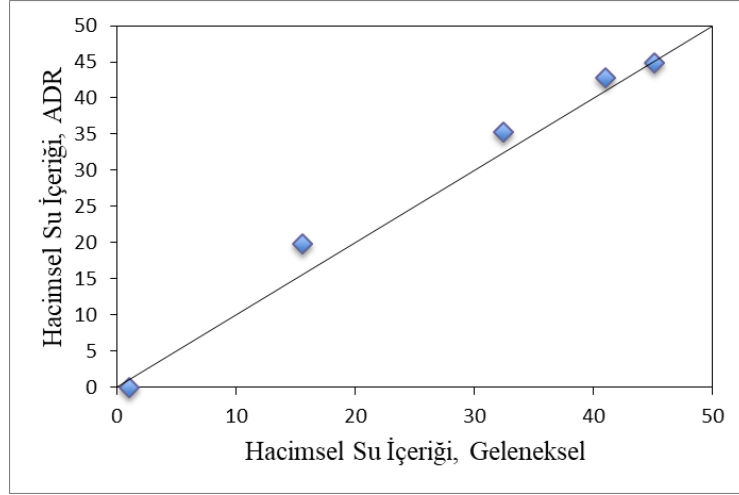
6.2.2. CH zemini test numuneleri

Orta sıkılıkta hazırlanan zeminlerin kalibrasyon numunesi olarak kullanıldığına önceki bölümlerde değinilmişti. Test numunesi olarak gevşek ve sıkı zeminler kullanılmıştır. Test numunelerinden elde edilen değerler gevşek ve sıkı olarak ayrı ayrı tablo ve grafik halinde sunulmuştur. Tablo 6.46' da gevşek olarak hazırlanmış CH numunesine ait sonuçlar verilmiştir.

Tablo 6.46. CH için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
0,74	1,343	1,01	0,14	1,8535	1,8706	0,0724	0,001
11,98	1,274	15,56	0,514	3,3070	1,8706	0,0724	19,84
25,48	1,247	32,39	0,786	4,4288	1,8706	0,0724	35,33
30,36	1,325	41,01	0,883	4,9670	1,8706	0,0724	42,77
34,69	1,275	45,09	0,907	5,1167	1,8706	0,0724	44,84

Sonuçlar ayrıca Şekil 6.50' deki gibi grafik halinde sunulmuştur. Ayrıca yine 1:1 bandı da grafikte gösterilmiştir.

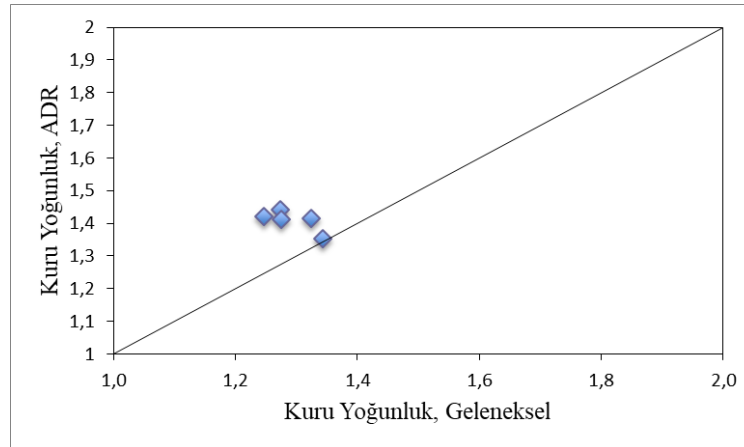


Şekil 6.50. CH için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Grafik kontrol edildiğinde 1:1 bandı üzerinde olmasa da, yine de farklı enerji seviyelerinin olduğu düşünüldüğünde sonuçlar tatmin edici düzeydedir. Gevşek olarak hazırlanmış numuneler için kuru yoğunluğun hesaplanmış olduğu değerler ise Tablo 6.47’ de verilmiştir. Gevşek numuneler için belirlenen kuru yoğunluk değerleri ayrıca grafik olarak Şekil 6.51’ de verilmiştir.

Tablo 6.47. CH için kuru yoğunluk ADR ölçümleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,343	0,14	1,8535	0,5463	-0,447	-0,8592	0,189	1,352
1,274	0,514	3,3070	0,5463	-0,447	-0,8592	3,637	1,442
1,247	0,786	4,4288	0,5463	-0,447	-0,8592	7,876	1,421
1,325	0,883	4,9670	0,5463	-0,447	-0,8592	10,398	1,414
1,275	0,907	5,1167	0,5463	-0,447	-0,8592	11,156	1,412



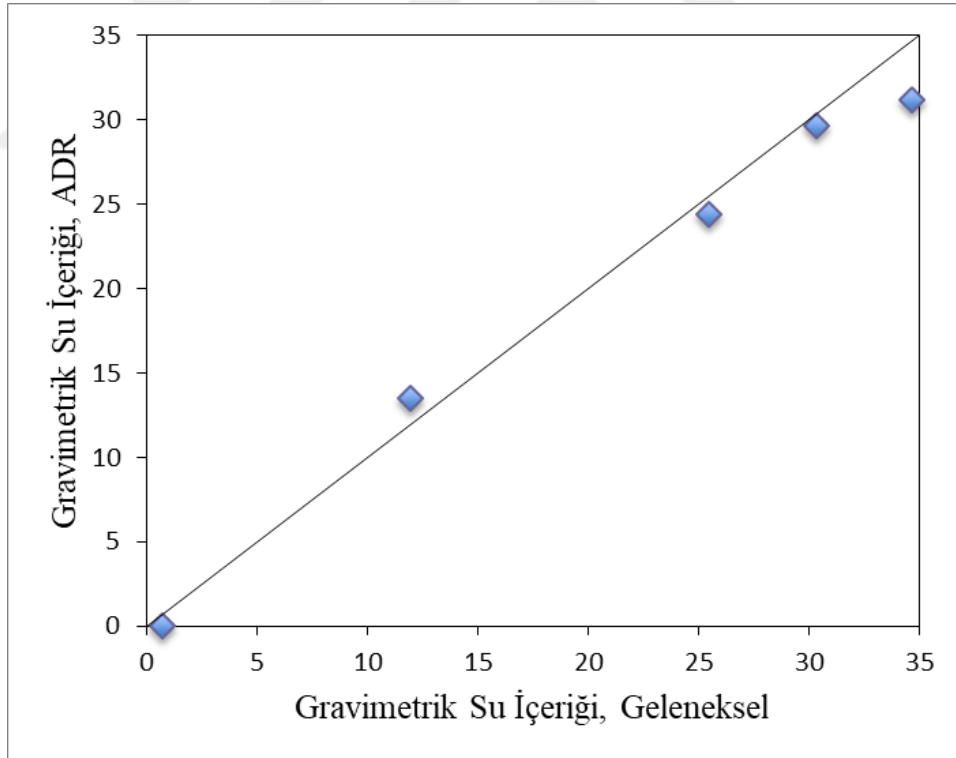
Şekil 6.51. CH için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Şekle bakıldığında kuru yoğunluk değerlerinin 1:1 bandından uzaklaştığı görülmektedir. Bunun nedeni numunenin hem kil olması hem de farklı enerji seviyesinde sıkıştırılmış olmasıdır. Gravimetrik su içerikleri de Tablo 6.48’ de verilmiştir.

Tablo 6.48. CH için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
0,74	0,001
11,98	13,50
25,48	24,38
30,36	29,68
34,69	31,16

Değerlerin karşılaştırıldığı grafik ise Şekil 6.52’ de gösterilmektedir. Her ne kadar kuru yoğunluk değerleri 1:1 bandından uzaklaşmış olsa da gravimetrik su içeriği değerleri en yüksek su içeriği dışında 1:1 bandına yakın kalmışlardır.



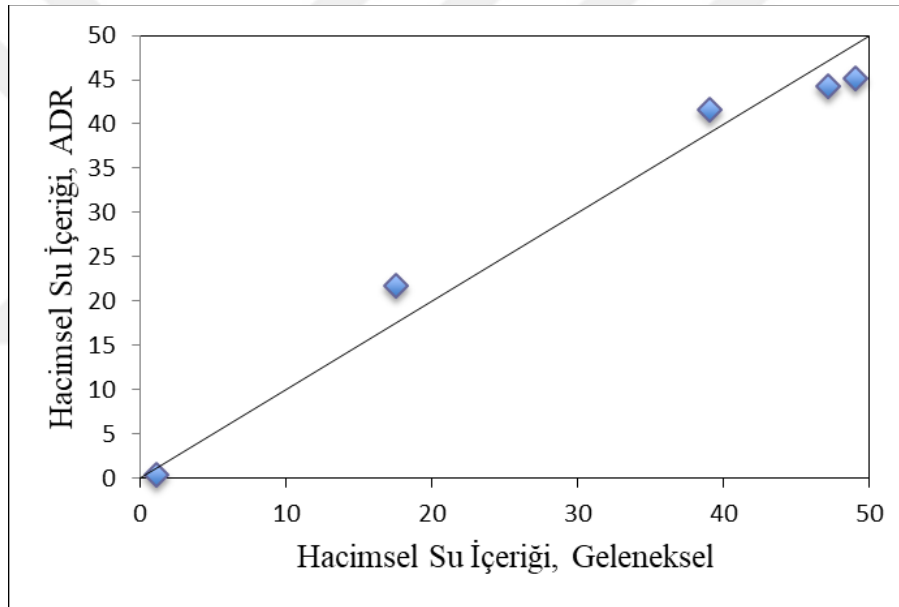
Şekil 6.52. CH için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Sıkı olarak hazırlana numuneler üzerinde yapılan ölçünlerde elde edilen hacimsel su içeriklerinin bulunduğu değerler Tablo 6.49’ da verilmiştir.

Tablo 6.49. CH için hacimsel su içeriği ADR ölçümleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm ⁻³)	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a ₀	a ₁	θ (%)
0,74	1,473	1,11	0,149	1,8971	1,8706	0,0724	0,37
11,98	1,436	17,54	0,552	3,4432	1,8706	0,0724	21,72
25,48	1,502	39,01	0,87	4,8888	1,8706	0,0724	41,69
30,36	1,522	47,11	0,9	5,0723	1,8706	0,0724	44,22
34,69	1,385	48,98	0,91	5,1359	1,8706	0,0724	45,10

Sıkı numuneler üzerinde elde edilen hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslaması Şekil 6.53’ de gösterilmiştir. Tıpkı gevşek numunedekine benzer olarak, değerler 1:1 bandı üzerinde yer almamış, uzaklaşmışlardır.



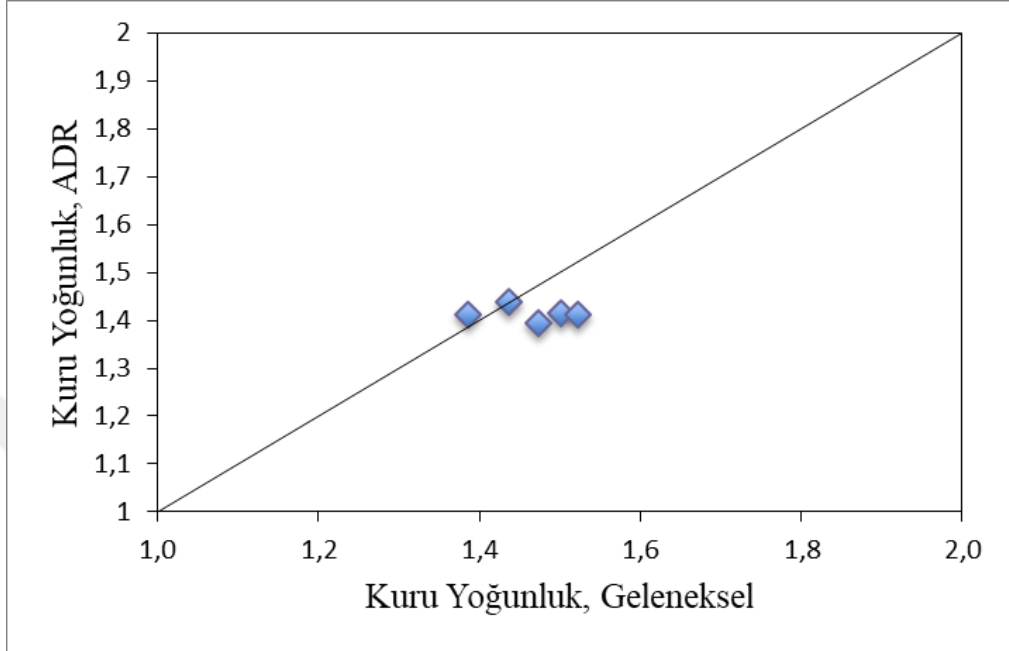
Şekil 6.53. CH için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Sıkı olarak hazırlanan numunelerin hesaplanan kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.50’ de verilmiştir.

Tablo 6.50. CH için kuru yoğunluk ADR ölçümleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,473	0,149	1,8971	0,5463	-0,447	-0,8592	0,259	1,394
1,436	0,552	3,4432	0,5463	-0,447	-0,8592	4,078	1,439
1,502	0,87	4,8888	0,5463	-0,447	-0,8592	10,012	1,415
1,522	0,9	5,0723	0,5463	-0,447	-0,8592	10,929	1,412
1,385	0,91	5,1359	0,5463	-0,447	-0,8592	11,255	1,412

Sıkı numuneler için kuru yoğunluk değerlerinin grafik edilmiş hali Şekil 6.54’ deki gibidir. Tıpkı gevşek numunelerdeki kuru yoğunluktaki gibi, sıkı numunelerde de değerler 1:1 bandından saçılmışlardır.



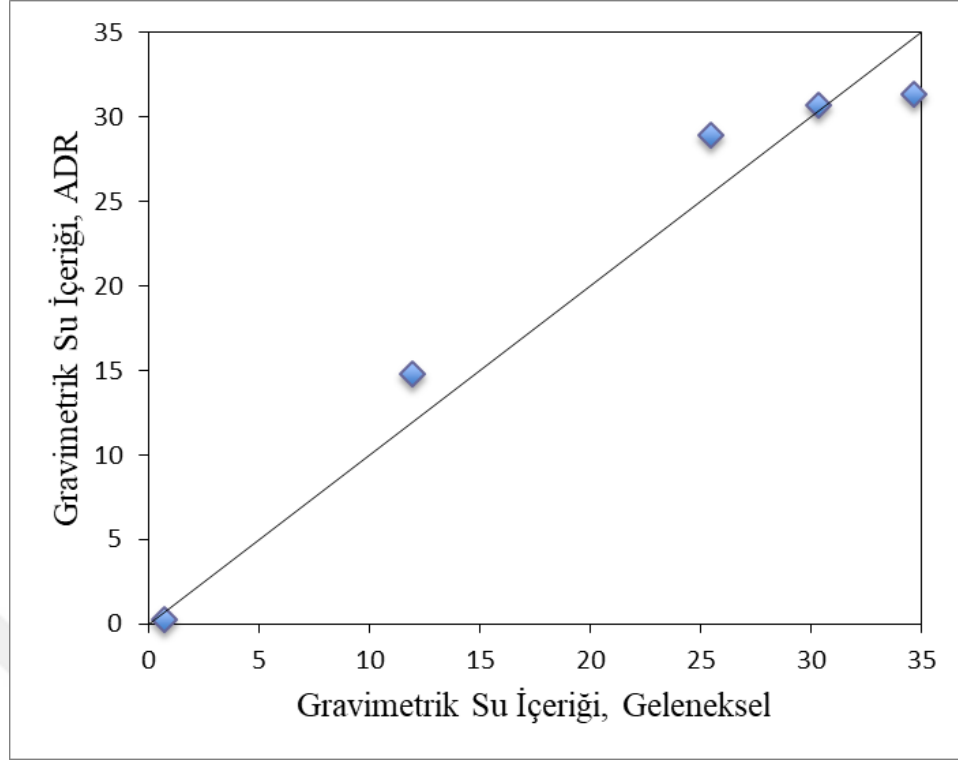
Şekil 6.54. CH için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Sıkı numuneler için gravimetrik su içeriklerinin karşılaştırıldığı değerler Tablo 6.51’ de gösterilmiştir.

Tablo 6.51. CH için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
0,74	0,26
11,98	14,80
25,48	28,91
30,36	30,72
34,69	31,35

Gravimetrik su içeriklerinin kıyaslandığı grafik ise aşağıdaki gibi Şekil 6.55’de görülmektedir. Değerler gevşek numunede olduğu gibi 1:1 bandı etrafında toplanmamışlardır. Sadece 2 farklı su içeriğinde hazırlanan numunelerde 1:1 bandına yakınlık söz konusu olmuştur.



Şekil 6.55. CH için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Tablo 6.51 kontrol edildiğinde değerler arasındaki farkın %3 mertebelerinde olduğu görülmektedir.

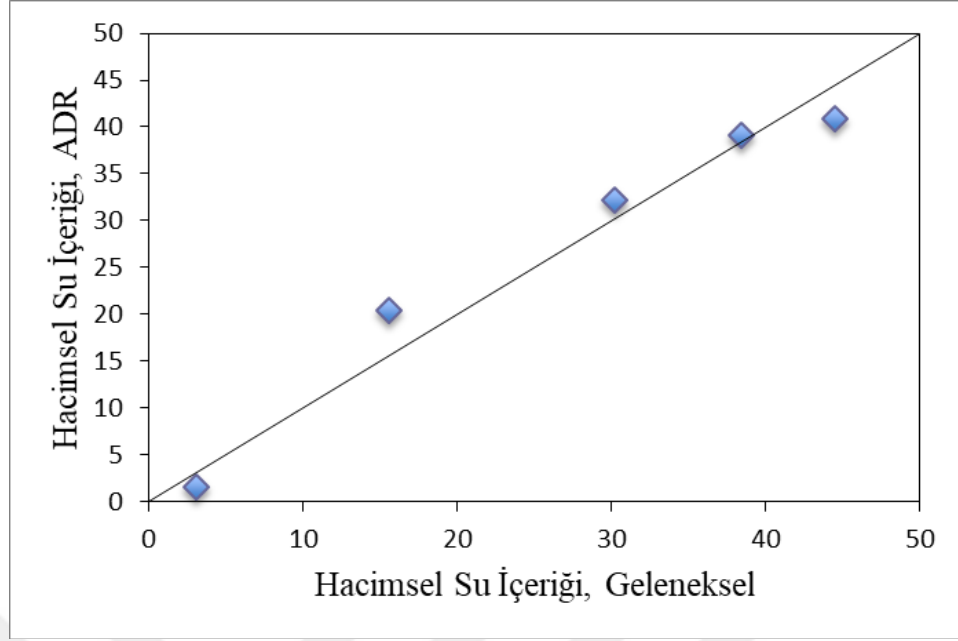
6.2.3. CI zemini test numuneleri

Gevşek olarak hazırlanmış test numuneleri üzerinde ölçümler yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 6.52’ de verilmiştir.

Tablo 6.52. CI için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\epsilon^{0.5}$	a_0	a_1	θ (%)
2,04	1,475	3,07	0,191	2,0917	1,9687	0,0771	1,59
10,77	1,421	15,60	0,578	3,5386	1,9687	0,0771	20,36
20,79	1,426	30,22	0,791	4,4541	1,9687	0,0771	32,24
25,16	1,497	38,39	0,885	4,9792	1,9687	0,0771	39,05
31,41	1,389	44,47	0,908	5,1231	1,9687	0,0771	40,91

Değerlerin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.56’ da gösterilmiştir.



Şekil 6.56. CI için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

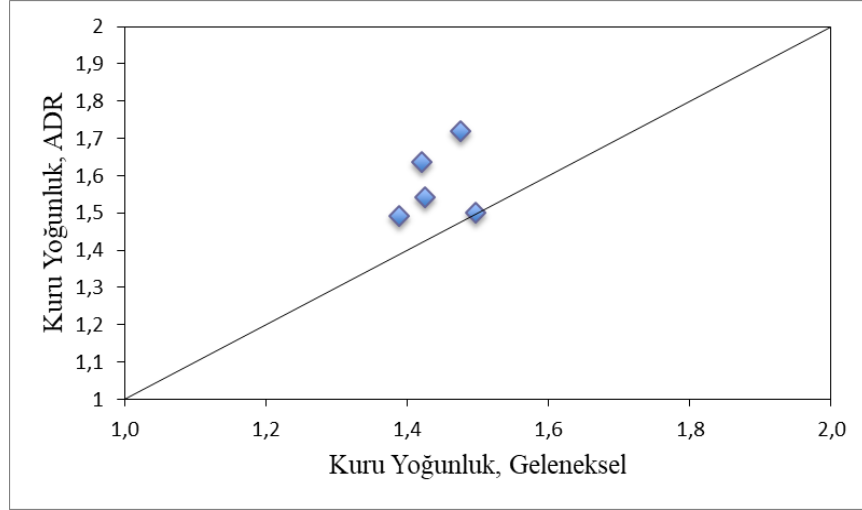
Değerler tıpkı CH numunesinde olduğu gibi 1:1 bandından uzaklaşmışlardır. Kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.53’ te verilmiştir.

Tablo 6.53. CI için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,475	0,191	2,0917	0,705	-1,9121	1,4238	0,509	1,720
1,421	0,578	3,5386	0,705	-1,9121	1,4238	3,486	1,637
1,426	0,791	4,4541	0,705	-1,9121	1,4238	6,894	1,542
1,497	0,885	4,9792	0,705	-1,9121	1,4238	9,382	1,502
1,389	0,908	5,1231	0,705	-1,9121	1,4238	10,132	1,492

Kuru yoğunluğun karşılaştırıldığı grafikler ise Şekil 6.57’ de verilmiştir. Değerlerden sadece 1 tanesi 1:1 bandı üzerinde yer almıştır. Onun dışında ölçülen tüm değerler 1:1 bandından daha yukarıda yer almıştır.

Gravimetrik su içerikleri ise Tablo 6.54 te yer almaktadır.

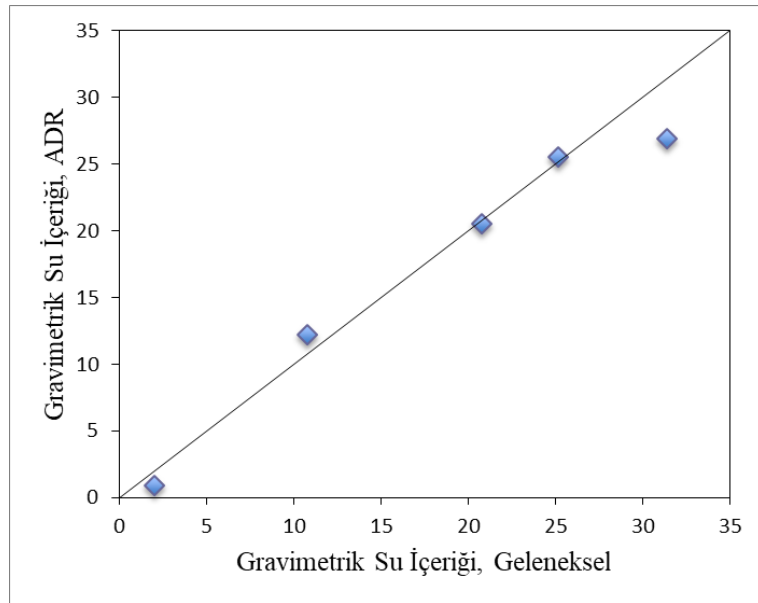


Şekil 6.57. CI için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Tablo 6.54. CI için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,04	0,91
10,77	12,20
20,79	20,51
25,16	25,51
31,41	26,90

Gevşek numuneler için elde edilen gravimetrik su içeriği değerleri ise Şekil 6.58’ de yer almaktadır. Şekil kontrol edildiğinde değerlerin birçoğunun 1:1 bandına yakın olduğu görülmüştür. En uzak değer ise %4 mertebelerindedir.



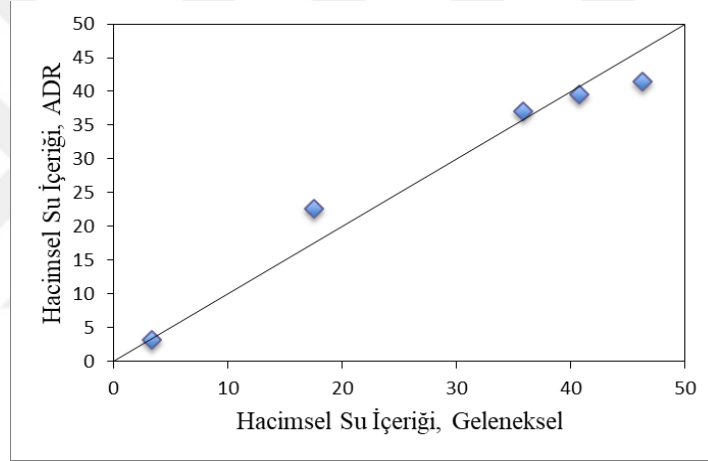
Şekil 6.58. CI için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Sıkı numune için hacimsel su içeriği değerleri Tablo 6.55’ te gösterilmiştir.

Tablo 6.55. CI için Hacimsel Su İçeriği Değerleri (Sıkı)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm ⁻³)	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a ₀	a ₁	θ (%)
2,04	1,612	3,36	0,219	2,2140	1,9687	0,0771	3,18
10,77	1,596	17,52	0,625	3,7175	1,9687	0,0771	22,68
20,79	1,691	35,83	0,86	4,8300	1,9687	0,0771	37,11
25,16	1,589	40,75	0,892	5,0223	1,9687	0,0771	39,61
31,41	1,444	46,23	0,915	5,1682	1,9687	0,0771	41,50

Şekil 6.59’ da ise hacimsel su içeriği değerleri grafik olarak gösterilmiştir. Sonuçların bir kısmı 1:1 bandına yakın iken, bazılarında ise banttan uzaklaşma görülmektedir.

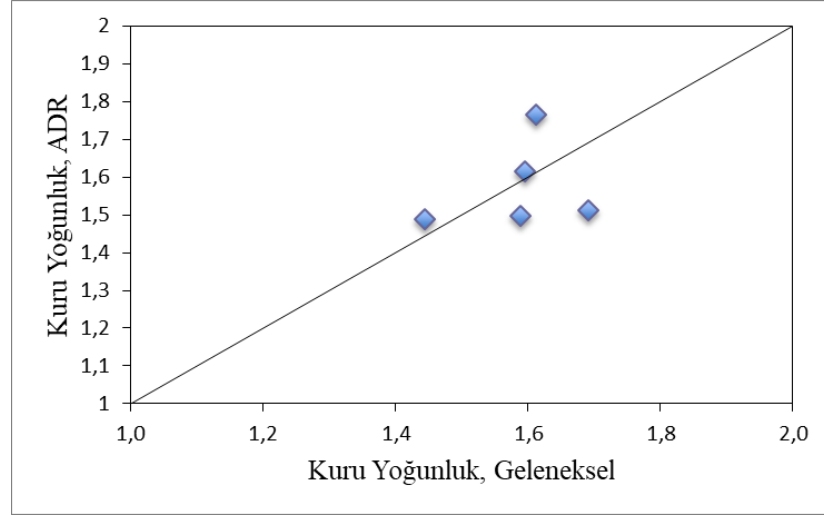


Şekil 6.59. CI için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Sıkı numuneler için bulunan kuru yoğunluk değerleri ise aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Sıkı CI numunesi için elde edilen kuru yoğunluk değerlerinin gösterildiği grafik ise Şekil 6.60’ da verilmiştir. Değerler kontrol edildiğinde 1:1 bandından saçılma olduğu görülmüştür.

Tablo 6.56. CI için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,612	0,219	2,2140	0,705	-1,9121	1,4238	0,646	1,764
1,596	0,625	3,7175	0,705	-1,9121	1,4238	4,058	1,616
1,691	0,86	4,8300	0,705	-1,9121	1,4238	8,635	1,512
1,589	0,892	5,0223	0,705	-1,9121	1,4238	9,603	1,499
1,444	0,915	5,1682	0,705	-1,9121	1,4238	10,373	1,489



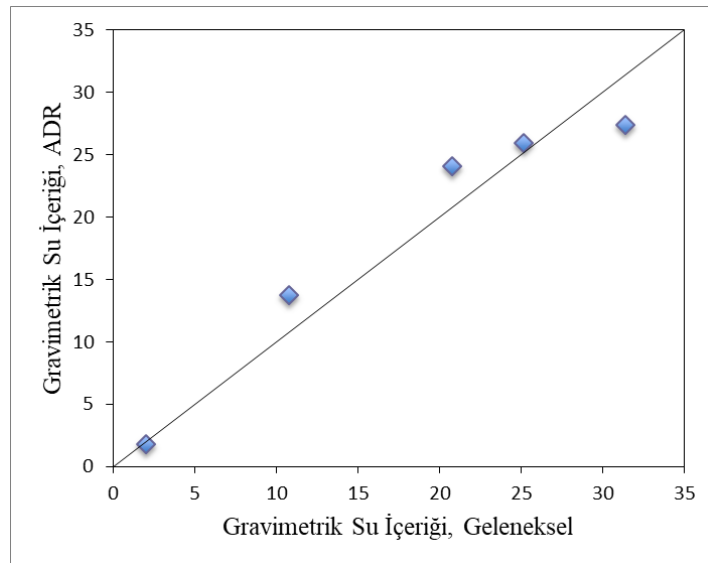
Şekil 6.60. CI için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Sıkı CI için gravimetrik su içeriği değerleri ise aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 6.57. CI için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,04	1,77
10,77	13,77
20,79	24,08
25,16	25,93
31,41	27,34

Şekil 6.61' de ise gravimetrik su içeriği değerleri grafik olarak verilmiştir. Sonuçlar hacimsel su içeriğine benzer olarak 1:1 bandından uzaklaşma eğilimindedir.



Şekil 6.61. CI için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

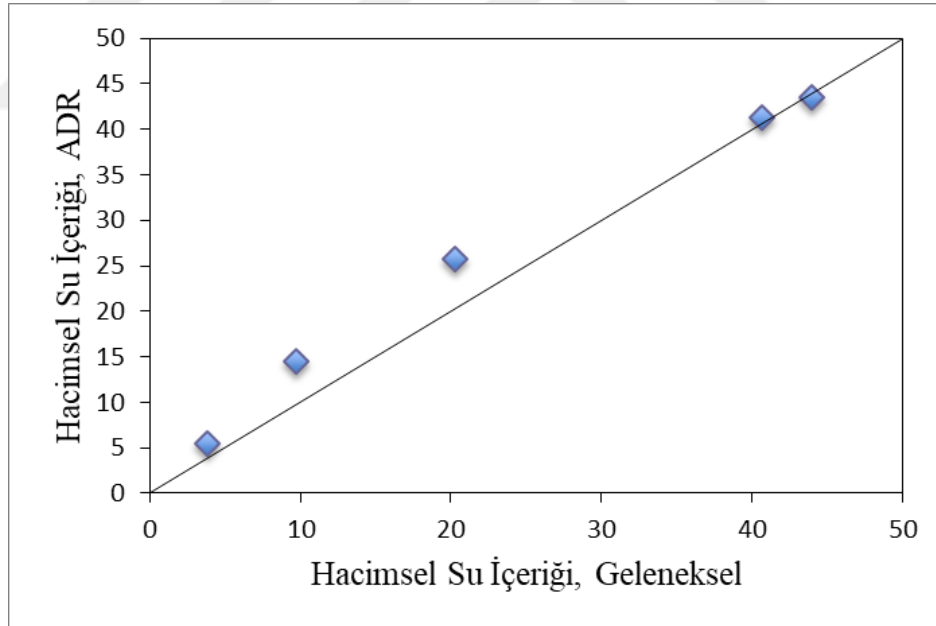
6.2.4. CL zemini test numuneleri

Hacimsel su içeriğini belirlemeye yönelik gevşek sıkılıkta hazırlanan CL numuneleri üzerinde yapılan ADR ölçüm sonuçları Tablo 6.58’ de verilmiştir.

Tablo 6.58. CL için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm^{-3})	θ (%)	mV	$\epsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
2,36	1,575	3,78	0,282	2,4712	2,1023	0,0674	5,47
6,23	1,535	9,75	0,45	3,0823	2,1023	0,0674	14,54
12,21	1,631	20,30	0,655	3,8370	2,1023	0,0674	25,74
25,20	1,585	40,71	0,869	4,8829	2,1023	0,0674	41,25
28,80	1,5	44,04	0,894	5,0347	2,1023	0,0674	43,51

Hacimsel su içeriği değerlerinin karşılaştırıldığı bu değerler, grafik olarak da aşağıda mevcuttur.



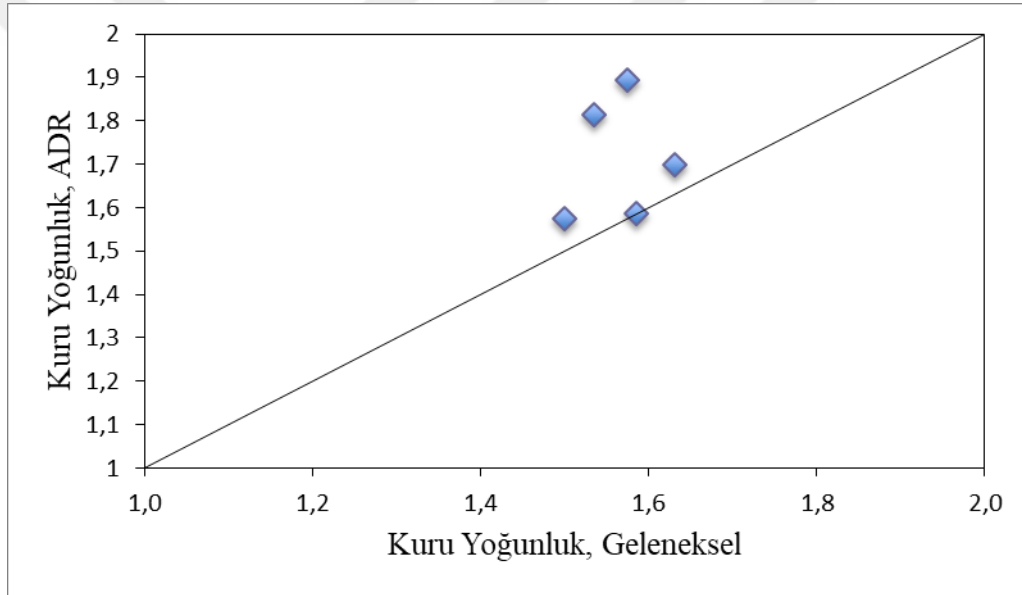
Şekil 6.62. CL için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Şekle bakıldığında gevşek sıkılıkta hazırlanan numuneler için hacimsel su içeriği değerleri, su içeriği yüksek zeminler için 1:1 bandı üzerinde yer alırken, azalan su içeri değerlerinde 1:1 bandından uzaklaşmıştır. Gevşek sıkılıkta hazırlanmış CL numunesi için hesaplanan kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.59’ da verilmiştir.

Tablo 6.59. CL için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,575	0,282	2,4712	0,6735	-1,9977	1,6266	0,803	1,895
1,535	0,45	3,0823	0,6735	-1,9977	1,6266	1,868	1,814
1,631	0,655	3,8370	0,6735	-1,9977	1,6266	3,877	1,698
1,585	0,869	4,8829	0,6735	-1,9977	1,6266	7,930	1,586
1,5	0,894	5,0347	0,6735	-1,9977	1,6266	8,641	1,574

Ayrıca yine bu değerler grafik halinde Şekil 6.63’ de sunulmuştur. Sadece tek bir değer 1:1 bandı üzerinde yer alırken, diğer değerler 1:1 bandından uzaklaşma eğiliminde olmuşlardır.



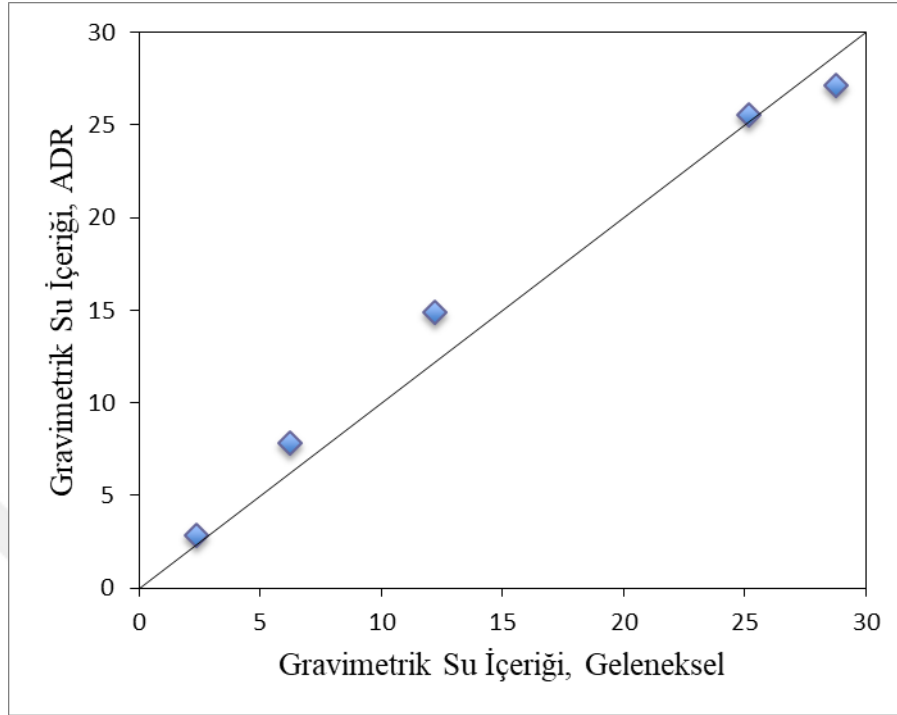
Şekil 6.63. CL için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Gevşek olarak hazırlanmış CL için, elde edilen gravimetrik su içeriği değerlerinin karşılaştırıldığı tablo ise aşağıdaki gibidir.

Tablo 6.60. CL için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,36	2,83
6,23	7,86
12,21	14,87
25,20	25,52
28,80	27,12

Şekil 6.64’ de ise bu karşılaştırma grafik olarak sunulmuştur. Şekil kontrol edildiğinde hacimsel su içeriğine benzer bir dağılım söz konusu olduğu görülmektedir.



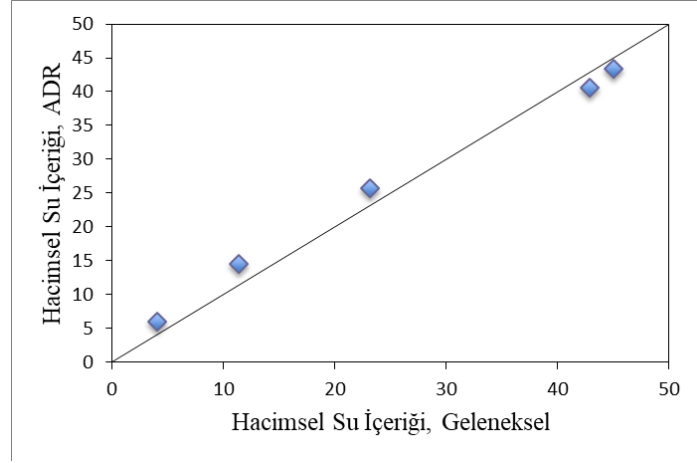
Şekil 6.64. CL için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Sıkı olarak hazırlanmış CL test numuneleri üzerinde alınan ölçüm sonuçlarından hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri Tablo 6.61’ de verilmiştir.

Tablo 6.61. CL için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\epsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
2,36	1,702	4,09	0,29	2,5024	2,1023	0,0674	5,94
6,23	1,784	11,33	0,45	3,0823	2,1023	0,0674	14,54
12,21	1,862	23,17	0,655	3,8370	2,1023	0,0674	25,74
25,20	1,667	42,82	0,862	4,8417	2,1023	0,0674	40,64
28,80	1,534	45,04	0,893	5,0285	2,1023	0,0674	43,42

Hacimsel su içeriği değerlerinin karşılaştırıldığı grafik ise Şekil 6.65’ de görülmektedir. Yine karşılaştırma amaçlı 1:1 bandı da şekil üzerinde mevcuttur.

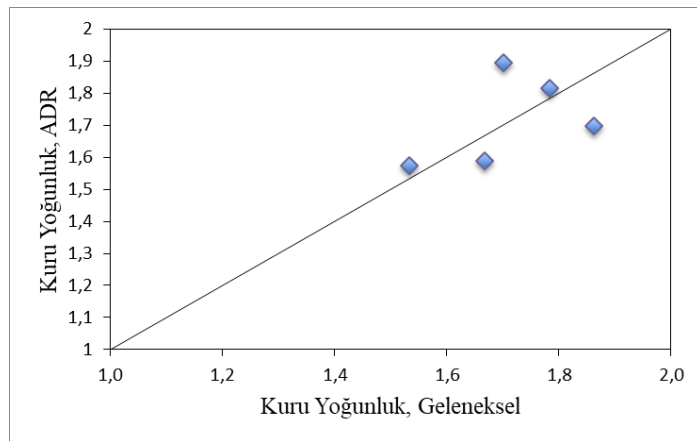


Şekil 6.65. CL için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Şekil kontrol edildiğinde değerlerin 1:1 bandı etrafında kümелendiği görülmektedir. Değerler kıyaslandığında aradaki farkın çok büyük olmadığı görülmektedir. Kuru yoğunluk çalışmalarının sonuçları da aşağıdaki gibi Tablo 6.62’ de mevcuttur. Kuru yoğunluk değerlerinin karşılaştırıldığı grafik ise Şekil 6.66’ da gösterilmiştir. Değerlere bakıldığında 1:1 bandı üzerinde kümelenmemiş, saçılma eğilimde olduğu görülmektedir.

Tablo 6.62. CL için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,702	0,29	2,5024	0,6735	-1,9977	1,6266	0,845	1,894
1,784	0,45	3,0823	0,6735	-1,9977	1,6266	1,868	1,814
1,862	0,655	3,8370	0,6735	-1,9977	1,6266	3,877	1,698
1,667	0,862	4,8417	0,6735	-1,9977	1,6266	7,743	1,590
1,534	0,893	5,0285	0,6735	-1,9977	1,6266	8,611	1,574



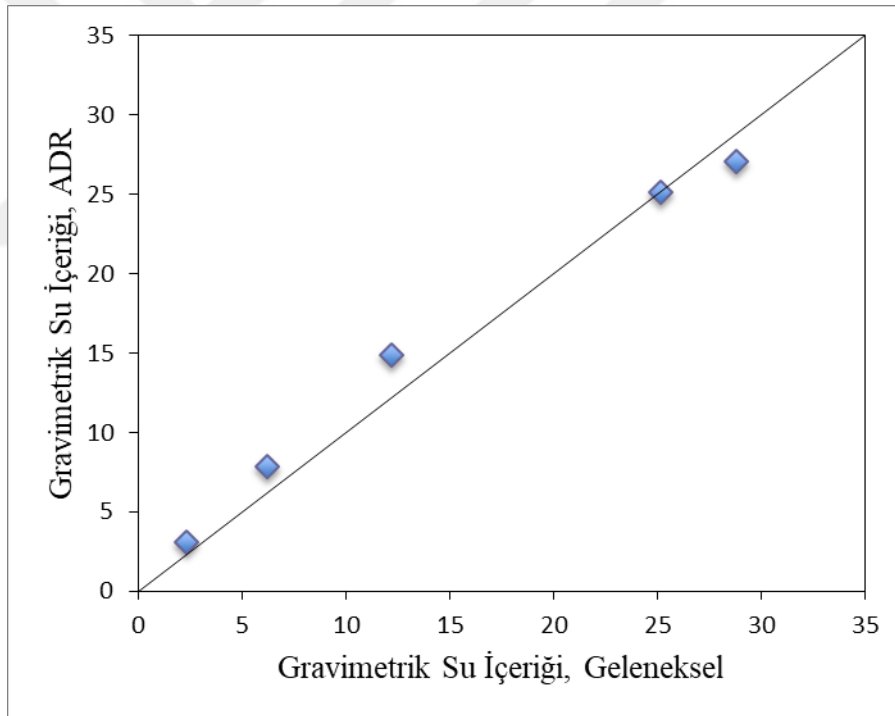
Şekil 6.66. CL için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Sıkı olarak hazırlanmış CL için gravimetrik su içeriği değerleri de Tablo 6.63’ de verilmiştir.

Tablo 6.63. CL için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,36	3,07
6,23	7,86
12,21	14,87
25,20	25,08
28,80	27,06

Yine hacimsel su içeriğine benzer bir dağılım göstermiştir. Değerler her ne kadar 1:1 bandı üzerinde yer almasalar da çok büyük farklılık da göstermemektedir. Değerler arasındaki fark en fazla %2 mertebelerindedir.



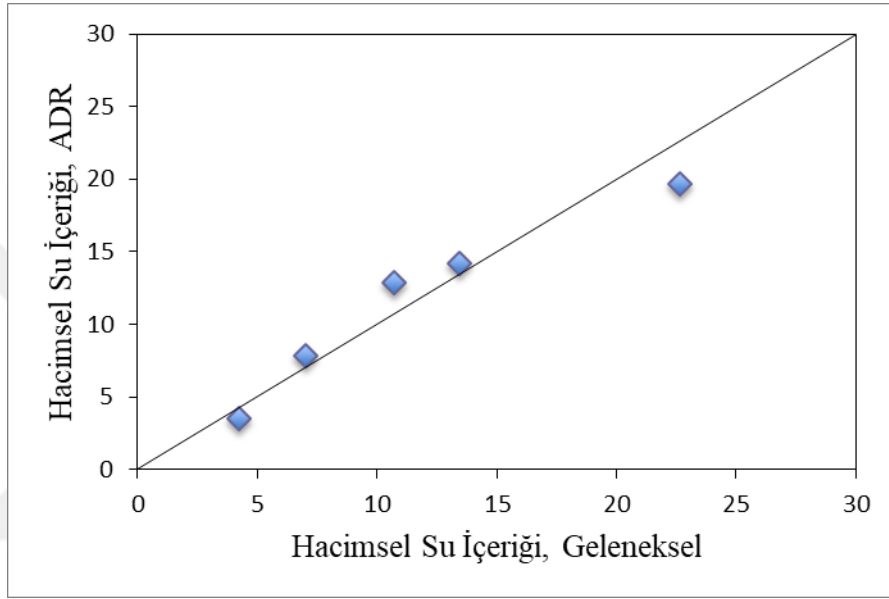
Şekil 6.67. CL için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

6.2.5. MH zemini test numuneleri

Yüksek plastisiteli silt olarak adlandırılan MH numunesi için gevşek sıkılıkta yapılan ADR ölçüm sonuçlarından elde edilen hacimsel su içeriği değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Tablodaki değerleri kıyaslayabilmek adına, hacimsel su içeriği değerleri grafik olarak Şekil 6.68’ deki gibi sunulmuştur.

Tablo 6.64. MH için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm ⁻³)	θ (%)	mV	$\epsilon^{0.5}$	a ₀	a ₁	θ (%)
2,96	1,401	4,23	0,279	2,4595	2,0708	0,1123	3,46
4,89	1,405	7,00	0,411	2,9456	2,0708	0,1123	7,79
7,36	1,43	10,73	0,572	3,5164	2,0708	0,1123	12,87
9,29	1,418	13,43	0,611	3,6632	2,0708	0,1123	14,18
15,42	1,442	22,67	0,756	4,2814	2,0708	0,1123	19,68



Şekil 6. 68. MH için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

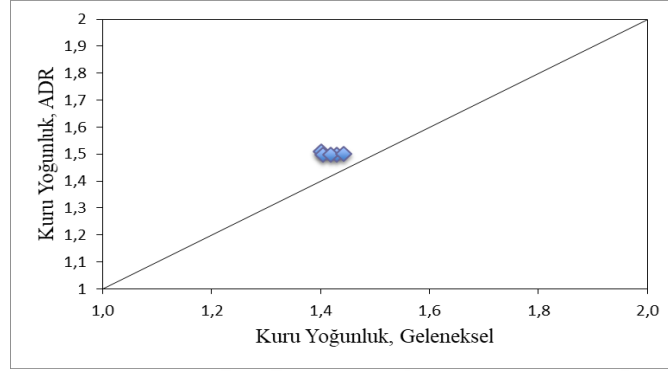
Grafiğe baktığımız zaman kuru su içeriği değerleri birbirine yakınlık arz ederken, en fazla su içeriğine sahip numune de değerlerin birbirinden %3 mertebelerinde uzaklaştığı görülmüştür.

Gevşek sıkılıkta hazırlanan MH numunesi üzerinde alınan ölçümlerden kuru yoğunluk değerleri de hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 6.65’ te görülmektedir.

Tablo 6.65. MH için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0.5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,401	0,279	2,4595	0,3986	0,2036	-1,654	1,258	1,508
1,405	0,411	2,9456	0,3986	0,2036	-1,654	2,404	1,497
1,43	0,572	3,5164	0,3986	0,2036	-1,654	3,991	1,497
1,418	0,611	3,6632	0,3986	0,2036	-1,654	4,441	1,497
1,442	0,756	4,2814	0,3986	0,2036	-1,654	6,524	1,500

Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı tablodaki bu değerler, Şekil 6.69' daki gibi grafik haline getirilmiştir. Değerler kontrol edildiğinde gerçek değerlerin üzerinde kaldığı görülmüştür. Gravimetrik su içeriği değerleri ise Tablo 6.66' da verilmiştir.

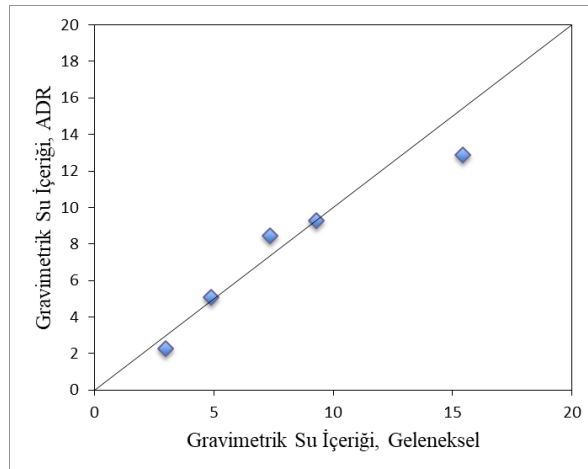


Şekil 6.69. MH için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Tablo 6.66. MH için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,96	2,25
4,89	5,10
7,36	8,44
9,29	9,29
15,42	12,87

Şekil 6.70' de ise gravimetrik su içeriği değerlerinin karşılaştırılması söz konusudur. Belirli su içeriği değerlerinde sonuçlar yakınlık gösterirken, artan su içeriği değerlerinde ise sonuçlar farklılık göstermişlerdir. Bu farklılık yaklaşık %3 mertebelerindedir.



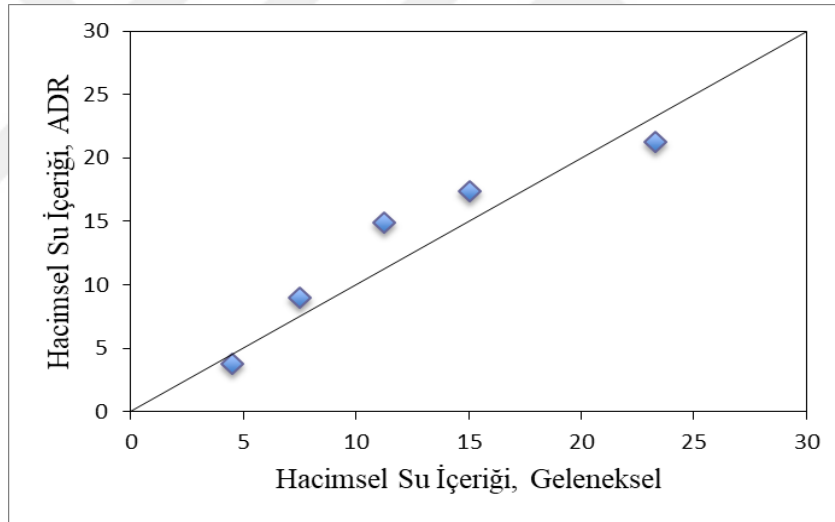
Şekil 6.70. MH için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Sıkı halde hazırlanan MH zemininden alınan ölçümler sonucunda hacimsel su içeriği değerleri Tablo 6.67’ de verildiği gibi bulunmuştur.

Tablo 6.67. MH için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm ⁻³)	θ (%)	mV	$\epsilon^{0.5}$	a ₀	a ₁	θ (%)
2,96	1,483	4,48	0,287	2,4907	2,0708	0,1123	3,74
4,89	1,505	7,50	0,45	3,0823	2,0708	0,1123	9,01
7,36	1,498	11,24	0,632	3,7449	2,0708	0,1123	14,91
9,29	1,588	15,04	0,699	4,0218	2,0708	0,1123	17,37
15,42	1,482	23,30	0,791	4,4541	2,0708	0,1123	21,22

Sonuçların karşılaştırılmasının yapıldığı grafik ise Şekil 6.71’ de görülmektedir. Grafiğe bakıldığında su içeriği değerleri arttıkça sonuçlarında 1:1 çizgisinden uzaklaştıkları görülmektedir.

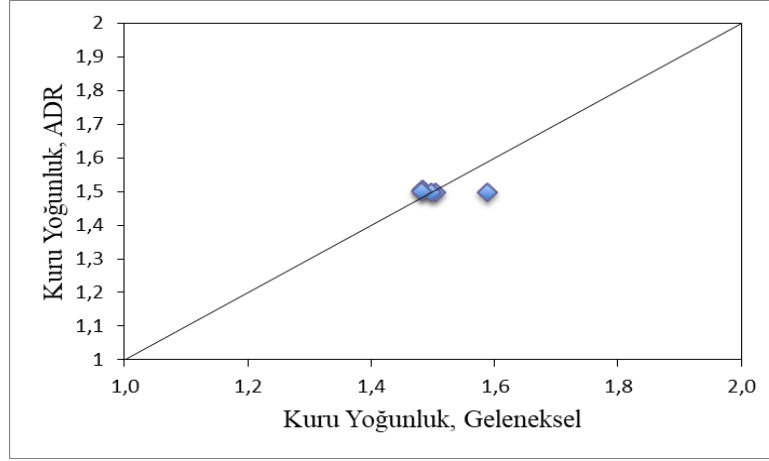


Şekil 6.71. MH için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Sıkı MH için kuru yoğunlukların verildiği değerler ise Tablo 6.68’ de görülmektedir.

Tablo 6.68. MH için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0.5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,483	0,287	2,4907	0,3986	0,2036	-1,654	1,326	1,507
1,505	0,45	3,0823	0,3986	0,2036	-1,654	2,760	1,497
1,498	0,632	3,7449	0,3986	0,2036	-1,654	4,699	1,497
1,588	0,699	4,0218	0,3986	0,2036	-1,654	5,612	1,499
1,482	0,791	4,4541	0,3986	0,2036	-1,654	7,161	1,501

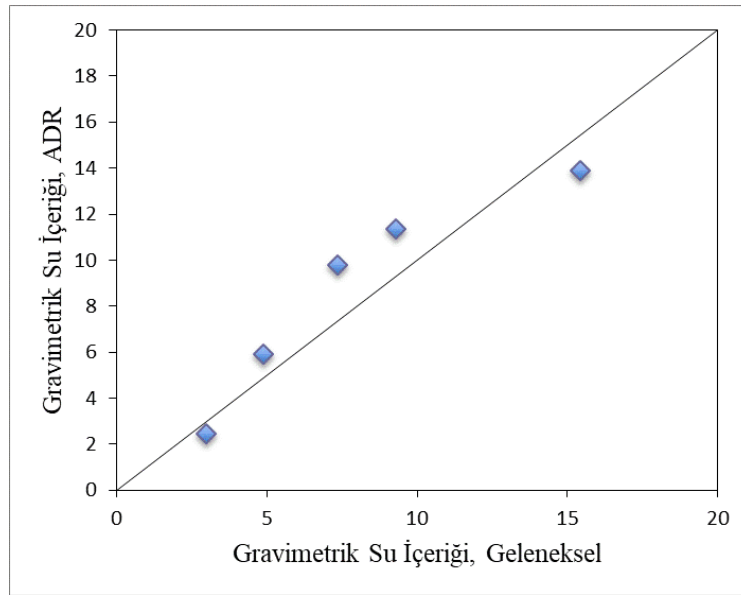


Şekil 6. 72. MH için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Şekil 6.72’ de ise sıkı MH için bulunan kuru yoğunluk değerleri kıyaslanmıştır. Kuru yoğunluk değerlerinin çoğu 1:1 çizgisine yakın seyir göstermişlerdir. Tablo 6.69’ da ise gravimetrik su içeriği değerleri verilmiştir. Şekil 6.73’ te gravimetrik su içeriği değerleri karşılaştırılarak grafik olarak gösterilmiştir.

Tablo 6.69. MH için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,96	2,43
4,89	5,90
7,36	9,77
9,29	11,37
15,42	13,87



Şekil 6.73. MH için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Artan su içeriklerine bağlı olarak değerlerde değişimler olduğu ve 1:1 çizgisinden uzaklaştıkları görülmüştür.

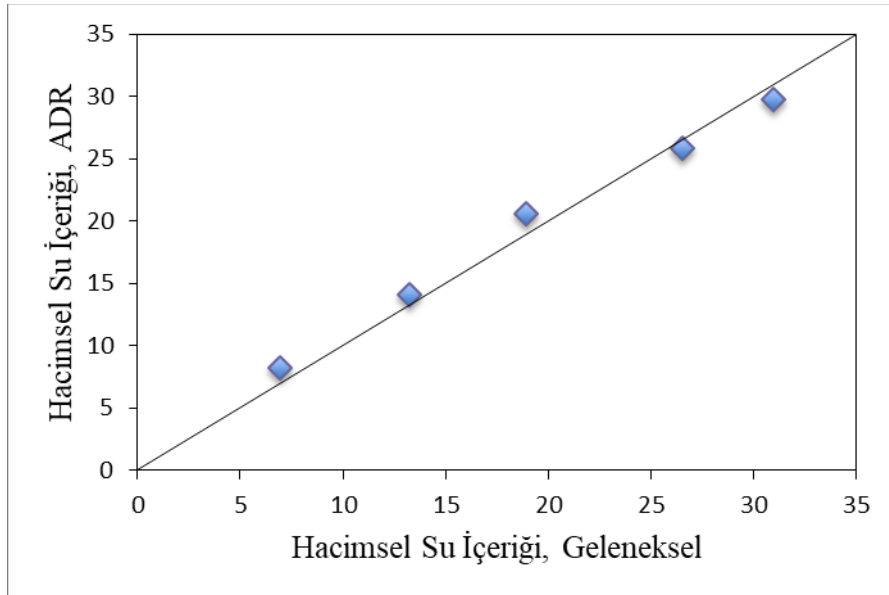
6.2.6. MI zemini test numuneleri

Gevşek sıkılıkta hazırlanmış orta plastisteli silt olarak isimlendirilen MI numunesi üzerinde yapılan ADR ölçümleri sonucunda hacimsel su içeriği değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 6.70. MI için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0.5}$	a_0	a_1	θ (%)
4,98	1,365	6,93	0,3	2,5409	1,8248	0,0875	8,18
10,00	1,3	13,25	0,443	3,0578	1,8248	0,0875	14,09
13,70	1,354	18,91	0,6	3,6212	1,8248	0,0875	20,53
18,45	1,41	26,52	0,713	4,0832	1,8248	0,0875	25,81
20,42	1,487	30,95	0,786	4,4288	1,8248	0,0875	29,76

Hacimsel su içeriğinin kıyaslandığı değerler ise grafik halinde Şekil 6.74' te gösterilmiştir.



Şekil 6.74. MI için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

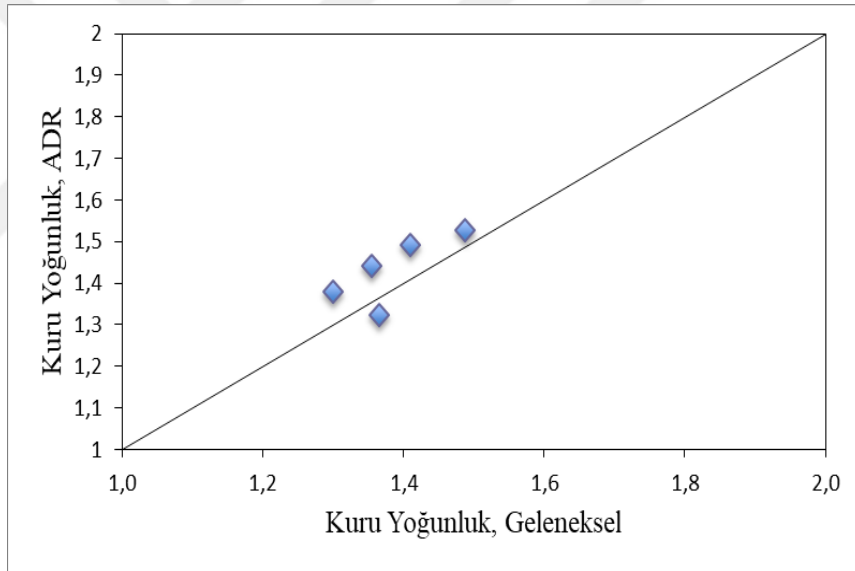
Şekil 6.74 kontrol edildiğinde hacimsel su içeriği değerlerinin birbirine yakınlık arz ettiği görülmektedir.

Kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.71’ de verilmiştir.

Tablo 6.71. MI için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0.5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,365	0,3	2,5409	0,07	2,1212	-3,8212	2,020	1,324
1,3	0,443	3,0578	0,07	2,1212	-3,8212	3,320	1,380
1,354	0,6	3,6212	0,07	2,1212	-3,8212	4,778	1,443
1,41	0,713	4,0832	0,07	2,1212	-3,8212	6,007	1,492
1,487	0,786	4,4288	0,07	2,1212	-3,8212	6,946	1,527

Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.75’ de gösterilmiştir. Değerler kontrol edildiğinde çoğunun 1:1 çizgisinin üst tarafında yer aldığı görülmektedir.



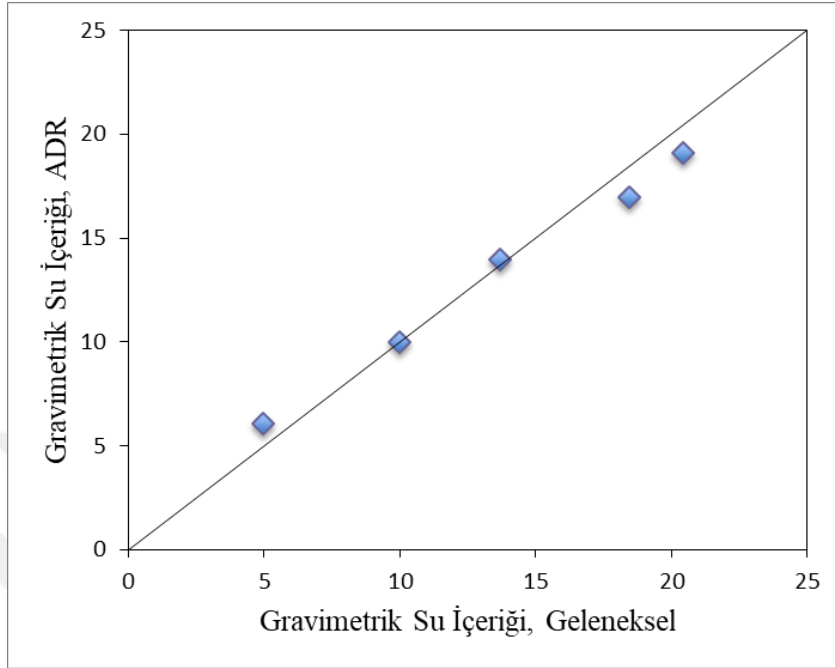
Şekil 6.75. MI için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Gravimetrik su içeriklerinin kıyaslandığı değerler ise Tablo 6.72’ de gösterilmiştir.

Tablo 6.72. MI için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
4,98	6,06
10,00	10,01
13,70	13,96
18,45	16,97
20,42	19,11

Gevşek sıklıkta hazırlanan MI için belirlenen gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik Şekil 6.76’ da verilmiştir.



Şekil 6.76. MI için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

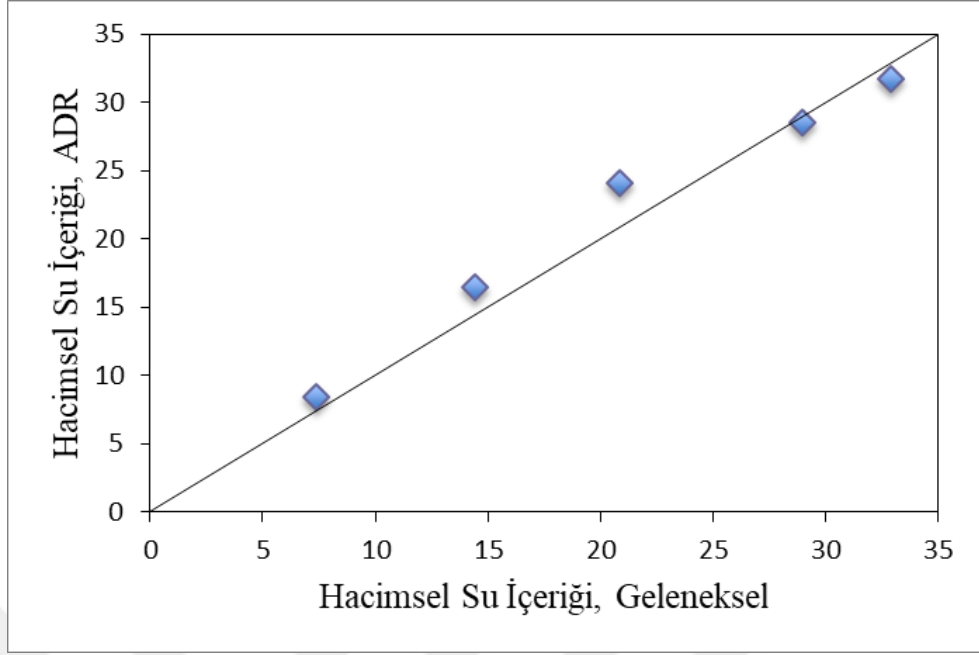
Şekil kontrol edildiğinde, daha düşük su içeriği değerlerinde gravimetrik su içeriği değerleri birbirine yakın iken, artan su içeriği değerlerinde 1:1 bandından uzaklaştığı görülmektedir.

Sıkı olarak hazırlanan MI numunelerinden alınan ölçümlerden elde edilen hacimsel su içeriği değerleri Tablo 6.73’ te görülmektedir.

Tablo 6.73. MI için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\epsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
4,98	1,455	7,39	0,306	2,5638	1,8248	0,0875	8,45
10,00	1,415	14,42	0,502	3,2646	1,8248	0,0875	16,45
13,70	1,493	20,85	0,679	3,9363	1,8248	0,0875	24,13
18,45	1,54	28,96	0,764	4,3199	1,8248	0,0875	28,52
20,42	1,582	32,93	0,818	4,5953	1,8248	0,0875	31,66

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.77’ de verilmiştir.



Şekil 6.77. MI için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Şekle bakıldığında artan su içeriği değerlerinde hacimsel su içeriklerinin 1:1 bandına yaklaştığı görülmektedir.

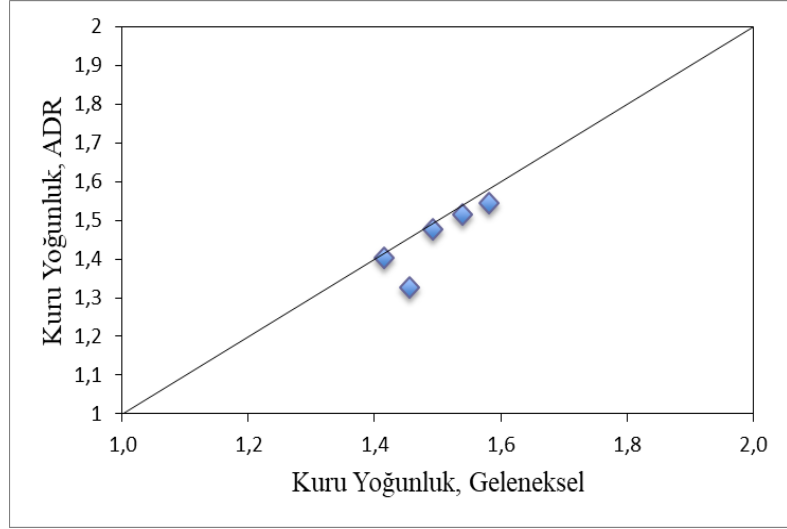
Sıkı MI için belirlenen kuru yoğunluk değerleri de tablo olarak aşağıda verilmiştir.

Tablo 6.74. MI için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm^{-3})	mV	$\epsilon^{0.5}$	c_2	c_1	c_0	$y=f(x)$	ρ_k (grcm^{-3})
1,455	0,306	2,5638	0,07	2,1212	-3,8212	2,077	1,326
1,415	0,502	3,2646	0,07	2,1212	-3,8212	3,850	1,404
1,493	0,679	3,9363	0,07	2,1212	-3,8212	5,613	1,477
1,54	0,764	4,3199	0,07	2,1212	-3,8212	6,648	1,516
1,582	0,818	4,5953	0,07	2,1212	-3,8212	7,405	1,544

Kuru yoğunluk değerlerinin karşılaştırıldığı grafik ise Şekil 6.78’ de gösterilmiştir. Şekle bakıldığında tek bir su içeriği değerinde kuru yoğunluklar farklılık göstermiş, geri kalan tüm adımlar için kuru yoğunluk değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Gravimetrik su içeriklerinin kıyaslandığı değerler ise Tablo 6.75’ teki gibidir.

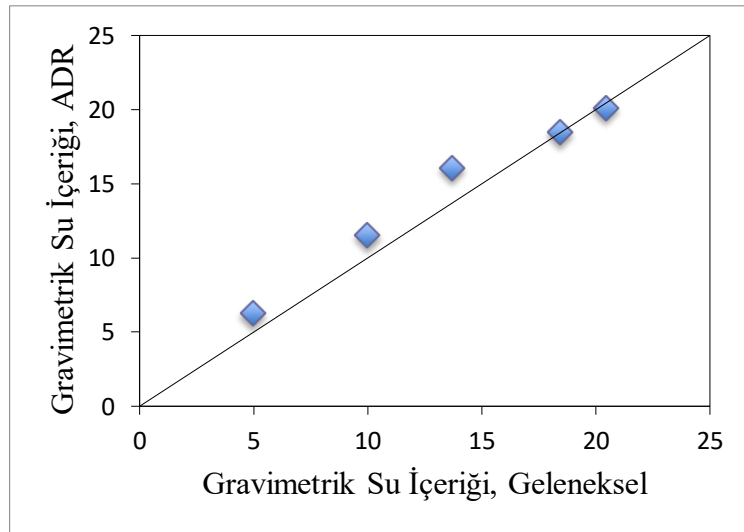


Şekil 6.78. MI için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Tablo 6.75. MI için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
4,98	6,25
10,00	11,50
13,70	16,03
18,45	18,45
20,42	20,12

Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.79’ da gösterilmiştir. Hacimsel su içeriğine benzer olarak düşük su içeriği değerlerinde değerler birbirlerinden uzaklaşırken, artan su içeriği değerlerinde 1:1 çizgisi üzerinde yer almıştır.



Şekil 6.79. MI için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

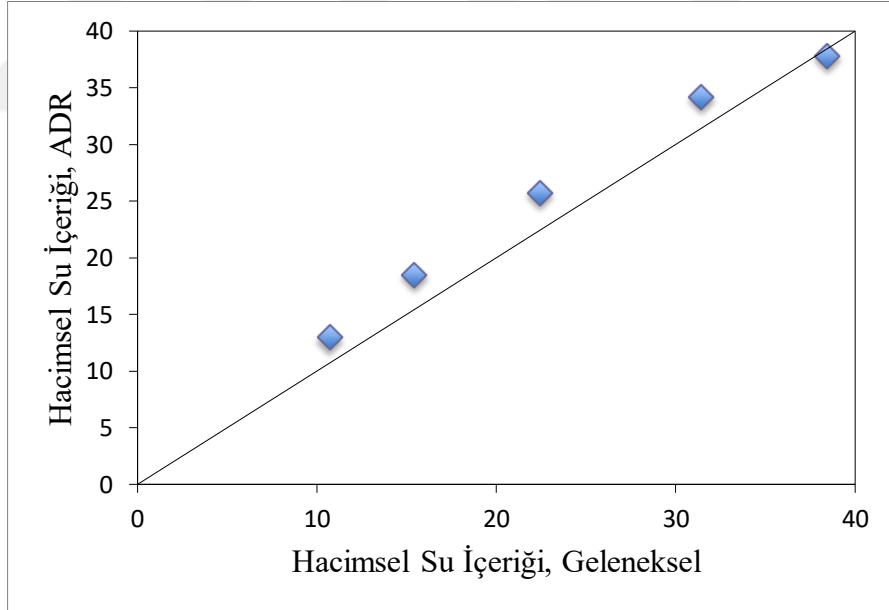
6.2.7. ML zemini test numuneleri

Gevşek sıkılıkta hazırlanmış düşük plastisiteli silt olarak adlandırılan MH numunesi üzerinde alınan ölçüm sonuçlarından hesaplanmış hacimsel su içeriği değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 6.76. ML için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	P_k (grcm^{-3})	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
7,54	1,395	10,72	0,417	2,9667	1,9752	0,0766	12,94
10,62	1,428	15,46	0,537	3,3891	1,9752	0,0766	18,46
14,68	1,499	22,43	0,681	3,9447	1,9752	0,0766	25,71
19,62	1,572	31,44	0,818	4,5953	1,9752	0,0766	34,21
24,38	1,548	38,47	0,867	4,8710	1,9752	0,0766	37,80

Hacimsel su içeriği değerlerini kıyaslamak amacı ile aşağıda Şekil 6.80’ de verilen grafik çizilmiştir.



Şekil 6.80. ML için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

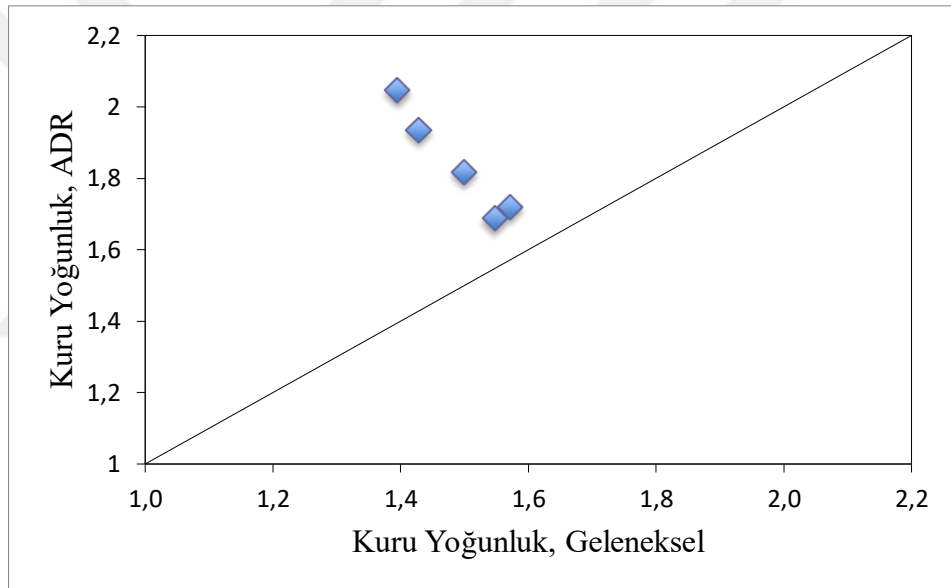
Grafik ve tablodaki değerler kontrol edildiğinde hacimsel su içeriği değerlerinin birbirinden yaklaşık %3 mertebelerinde uzaklaştığı görülmektedir.

Gevşek numuneler için belirlenen kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.77’ deki gibi verilmiştir.

Tablo 6.77. ML için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,395	0,417	2,9667	0,6575	-2,1926	1,969	1,251	2,045
1,428	0,537	3,3891	0,6575	-2,1926	1,969	2,090	1,934
1,499	0,681	3,9447	0,6575	-2,1926	1,969	3,551	1,818
1,572	0,818	4,5953	0,6575	-2,1926	1,969	5,778	1,720
1,548	0,867	4,8710	0,6575	-2,1926	1,969	6,889	1,687

Tablodaki değerlerin kıyaslandığı kuru yoğunluk değerleri Şekil 6.81’ de grafik olarak sunulmuştur. ML zemini için kuru yoğunluk değerlerinin 1:1 çizgisinden uzaklaştığı, yani gerçek değerlerinden farklılık gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.81. ML için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

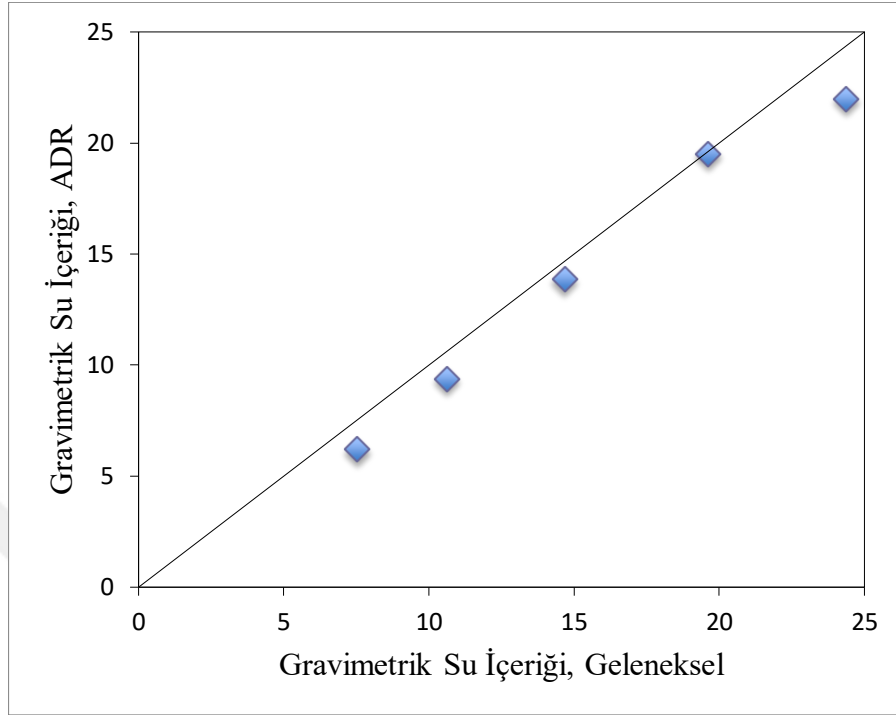
Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslandığı değerler ise Tablo 6.78’ de verilmiştir.

Tablo 6.78. ML için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
7,54	6,21
10,62	9,36
14,68	13,87
19,62	19,51
24,38	21,99

Her ne kadar kuru yoğunluk değerleri farklılık gösterse de gravimetrik su içeriği değerleri ise birbirine daha yakın sonuçlar vermiştir. Şekil 6.82’ de de görüldüğü gibi

en yüksek su içeriği dışındaki değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Sadece en yüksek su içeriğinde değerler 1:1 çizgisinden uzaklaşmışlardır.



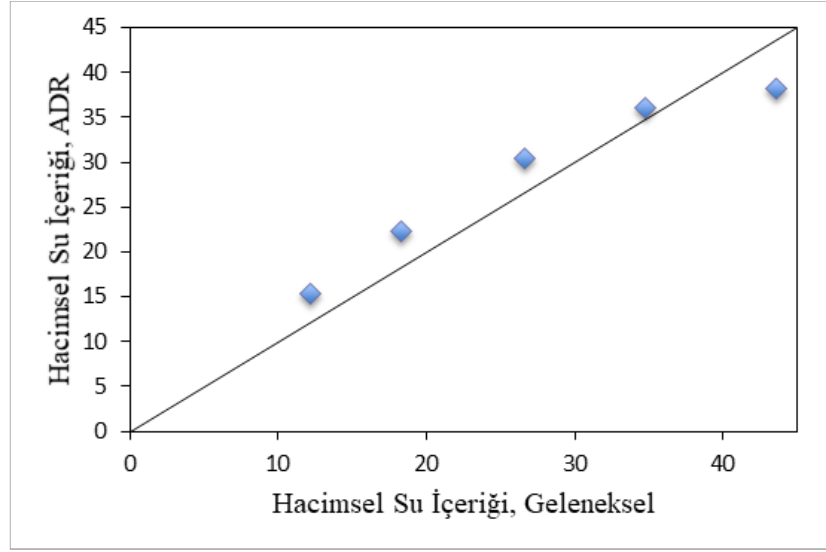
Şekil 6.82. ML için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Sıkı halde hazırlanmış ML numuneleri üzerinde ADR ölçümleri yapılmış ve hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Tablo 6.79’ da gösterilmiştir.

Tablo 6.79. ML için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\epsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
7,54	1,587	12,19	0,47	3,1522	1,9752	0,0766	15,37
10,62	1,689	18,28	0,615	3,6786	1,9752	0,0766	22,24
14,68	1,779	26,62	0,762	4,3102	1,9752	0,0766	30,48
19,62	1,736	34,71	0,843	4,7327	1,9752	0,0766	36,00
24,38	1,753	43,56	0,873	4,9067	1,9752	0,0766	38,27

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik ise aşağıda Şekil 6.83’ te gösterildiği gibidir.



Şekil 6. 83. ML için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Şekil kontrol edildiğinde hacimsel su içeriği değerlerinin farklılık gösterdikleri görülmektedir. Aradaki fark en fazla yaklaşık %5 mertebelerindedir.

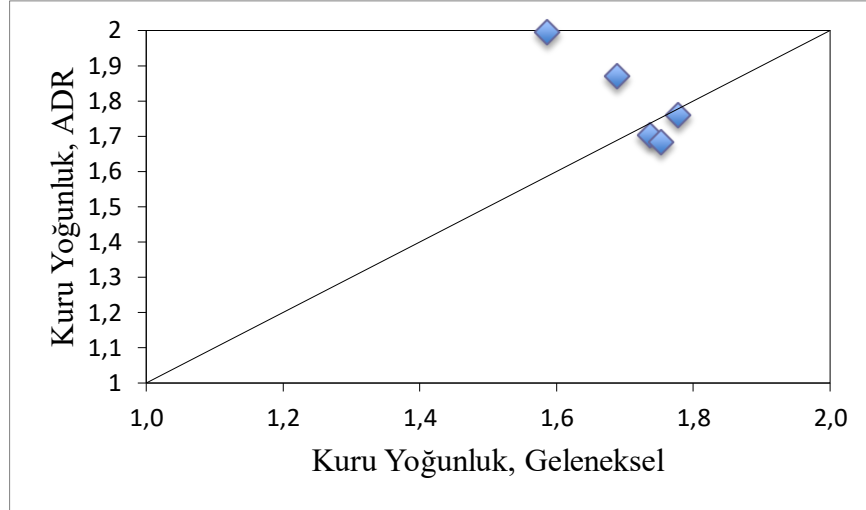
Sıkı ML numunelerinden alınan ölçümlerle hesaplanan kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.80’ de görülmektedir.

Tablo 6.80. ML için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (g/cm ³)	mV	$\epsilon^{0.5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (g/cm ³)
1,587	0,47	3,1522	0,6575	-2,1926	1,969	1,591	1,994
1,689	0,615	3,6786	0,6575	-2,1926	1,969	2,801	1,869
1,779	0,762	4,3102	0,6575	-2,1926	1,969	4,733	1,759
1,736	0,843	4,7327	0,6575	-2,1926	1,969	6,319	1,703
1,753	0,873	4,9067	0,6575	-2,1926	1,969	7,040	1,683

Tablodaki kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı değerler ise Şekil 6.84’ te verilmiştir. Şekle bakınca belirli su içeriği değerlerinde kuru yoğunlukların farklılık gösterdiği ve 1:1 çizgisinden uzaklaştığı görülmektedir.

Gravimetrik su içeriği için elde edilen değerler ise Tablo 6.81’ de görülmektedir.

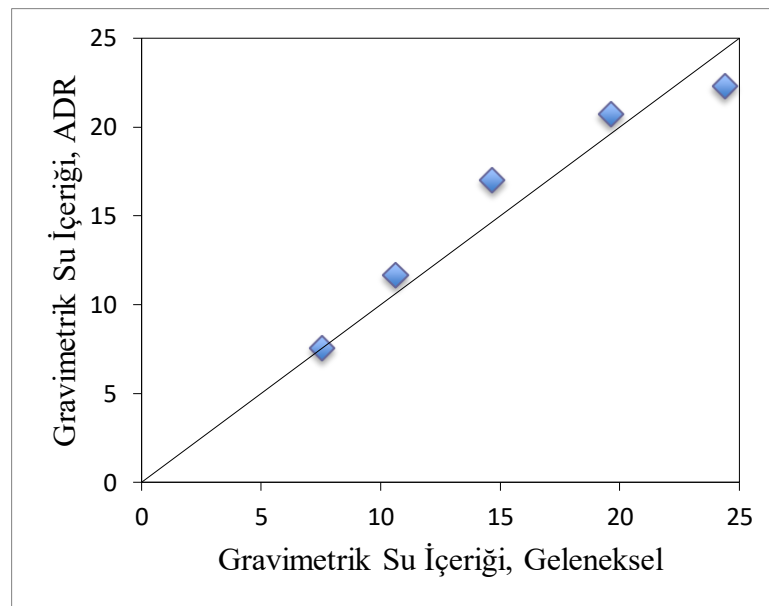


Şekil 6.84. ML için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Tablo 6.81. ML için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
7,54	7,56
10,62	11,67
14,68	17,00
19,62	20,74
24,38	22,31

Hacimsel su içeriğindeki gibi yüksek mertebeler de olmasa da gravimetrik su içeriği değerleri de farklılık arz etmektedir. Kuruya yakın numuneler için değerler birbirine yakın iken, diğer su içeriklerinde %2 civarlarında farklılıklar görülmektedir.



Şekil 6.85. ML için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

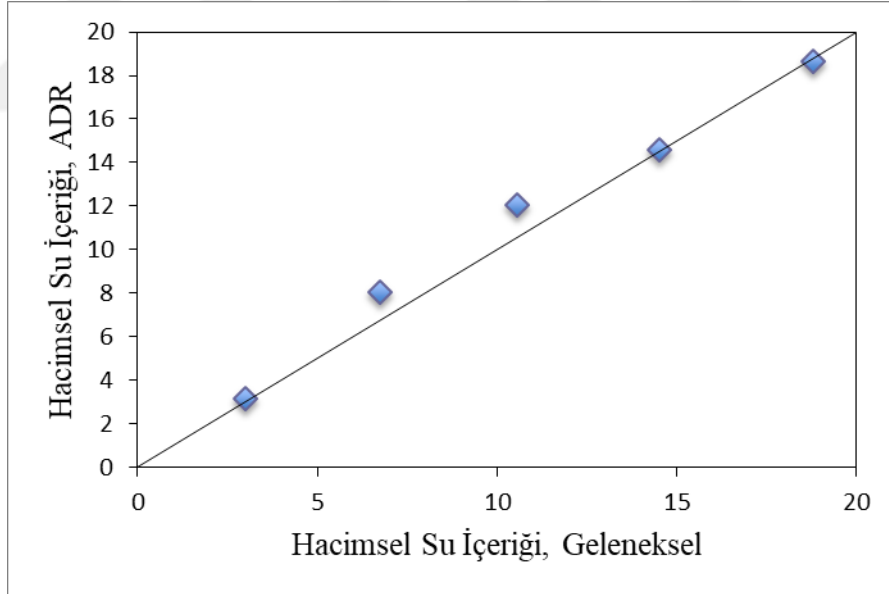
6.2.8. SP zemini test numuneleri

Üniform kum yada kötü derecelenmiş kum olarak isimlendirilen SP için gevşek sıklıkta numuneler hazırlanmış ve Theta prob ile ölçümler alınarak hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır. Tablo 6.82’ de hesaplanmış değerler verilmiştir.

Tablo 6.82. SP için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm^{-3})	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
1,94	1,511	2,99	0,172	2,0054	1,7658	0,0752	3,19
4,38	1,509	6,74	0,257	2,3719	1,7658	0,0752	8,06
6,84	1,517	10,57	0,335	2,6725	1,7658	0,0752	12,06
9,29	1,535	14,54	0,388	2,8643	1,7658	0,0752	14,61
11,86	1,556	18,81	0,474	3,1662	1,7658	0,0752	18,62

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı değerler Şekil 6.86’ daki gibi grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 6.86. SP için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

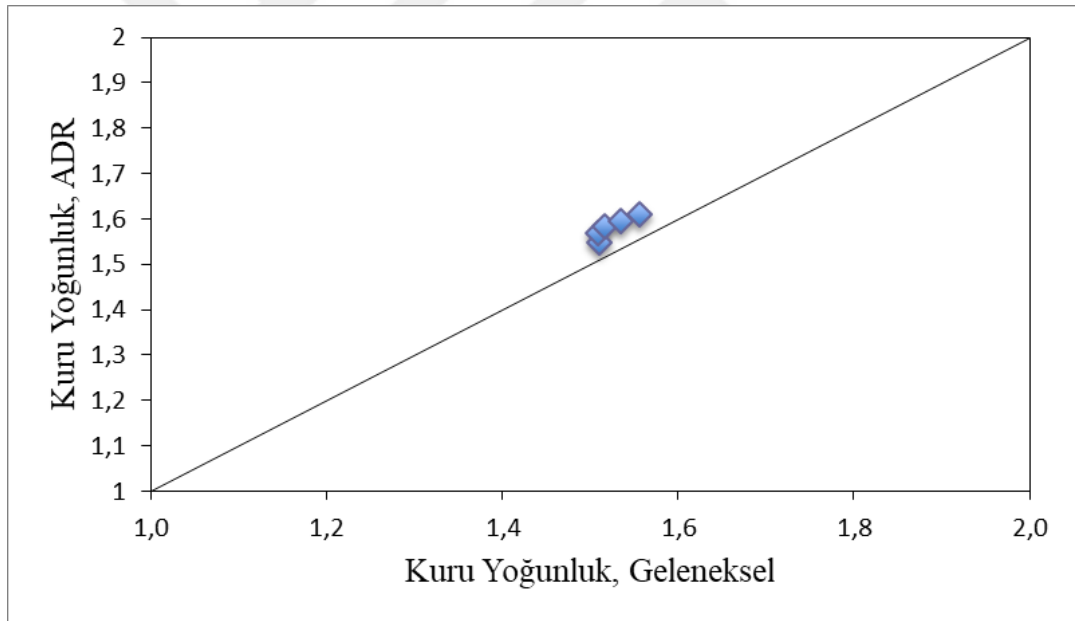
Hem değerlere, hem de grafiğe bakıldığında, hacimsel su içeriği değerlerinin birbirine yakınlık gösterdiği, yani 1:1 çizgisinin üzerinde yer aldığı görülmektedir.

Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı ölçüm sonuçları ise tablo halinde aşağıdaki gibidir.

Tablo 6.83. SP için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0.5}$	c_2	c_1	c_0	$y=f(x)$	ρ_k (grcm ⁻³)
1,511	0,172	2,0054	0,265	0,5201	-1,6295	0,479	1,547
1,509	0,257	2,3719	0,265	0,5201	-1,6295	1,095	1,568
1,517	0,335	2,6725	0,265	0,5201	-1,6295	1,653	1,584
1,535	0,388	2,8643	0,265	0,5201	-1,6295	2,034	1,595
1,556	0,474	3,1662	0,265	0,5201	-1,6295	2,674	1,609

Değerlerin karşılaştırmalı grafiği ise Şekil 6.87’ de görülmektedir. Şekle bakıldığında değerlerin hemen hemen hepsinin 1:1 çizgisinin üst bölgesinde yer aldığı görülmektedir. Bu da ölçülen kuru yoğunluk değerlerinin gerçek değerlerden daha büyük olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 6.87. SP için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

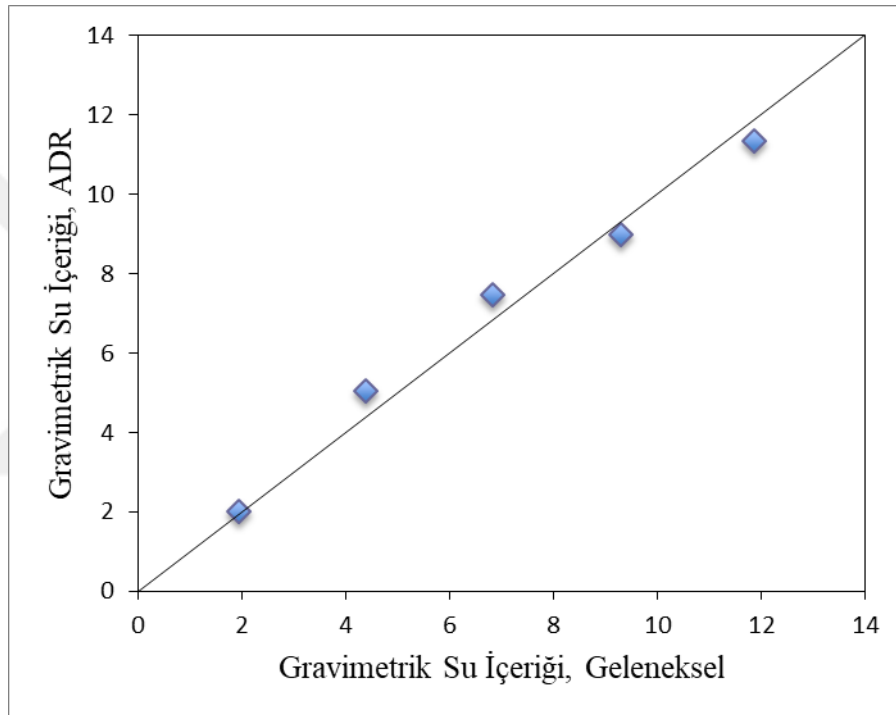
Tablo ve şekildeki değerler kıyaslanınca aradaki farkın 1grcm⁻³ bile olmadığı görülmektedir.

Gevşek sıklıkta hazırlanan SP için geleneksel yöntemler ile bulunan gravimetrik su içerikleri ile, yöntem ile tahmin edilen gravimetrik su içeriklerinin değerleri aşağıdaki Tablo 6.84’ te gösterilmiştir.

Tablo 6.84. SP için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
1,94	2,02
4,38	5,04
6,84	7,46
9,29	8,99
11,86	11,35

Gravimetrik su içeriklerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.88’ deki gibidir. Şekle bakıldığında değerlerin neredeyse birbirleriyle örtüştüğü görülmektedir.



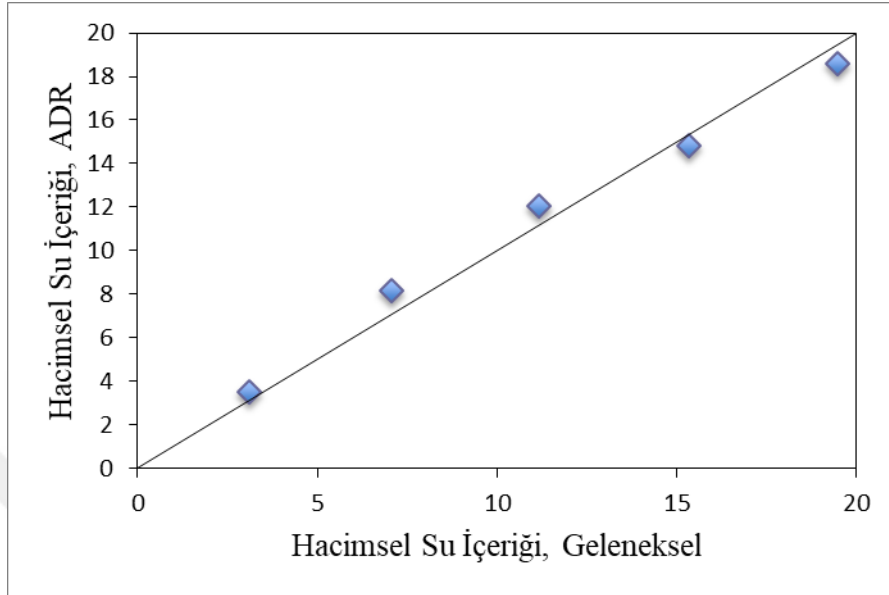
Şekil 6.88. SP için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Sıkı şekilde hazırlanan SP numunelerinden alınan ölçümler sonunda, hacimsel su içeriği değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 6.85. SP için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\epsilon^{0,5}$	a ₀	a ₁	θ (%)
1,94	1,578	3,12	0,177	2,0284	1,7658	0,0752	3,49
4,38	1,581	7,07	0,259	2,3799	1,7658	0,0752	8,17
6,84	1,602	11,17	0,335	2,6725	1,7658	0,0752	12,06
9,29	1,621	15,35	0,392	2,8785	1,7658	0,0752	14,80
11,86	1,611	19,47	0,473	3,1627	1,7658	0,0752	18,58

Hacimsel su içeriği değerlerinin grafik olarak kıyaslanması ise Şekil 6.89' da görülmektedir. Şekle bakıldığında gerçek değerler ile ölçülen değerlerin örtüştüğü görülmektedir. Aradaki farkın en fazla %1 mertebelerinde seyrettiği görülmektedir.



Şekil 6.89. SP için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

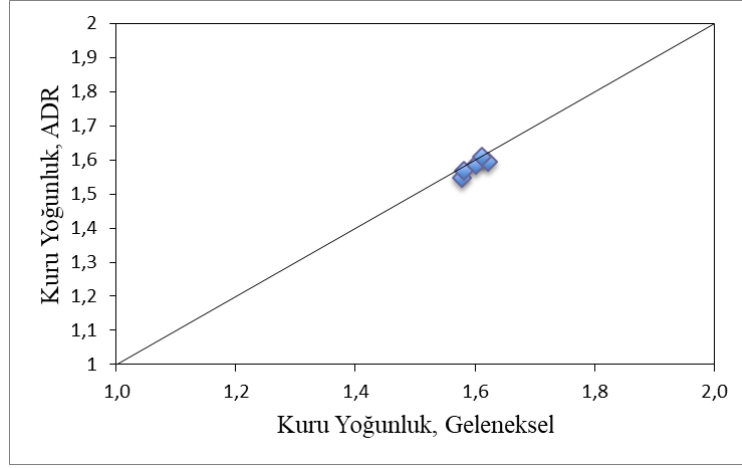
Sıkı SP numuneleri için elde edilen kuru yoğunluk değeri ise Tablo 6.86' da gösterilmiştir.

Tablo 6.86. SP için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0.5}$	c_2	c_1	c_0	$y=f(x)$	ρ_k (grcm ⁻³)
1,578	0,177	2,0284	0,265	0,5201	-1,6295	0,516	1,548
1,581	0,259	2,3799	0,265	0,5201	-1,6295	1,109	1,568
1,602	0,335	2,6725	0,265	0,5201	-1,6295	1,653	1,584
1,621	0,392	2,8785	0,265	0,5201	-1,6295	2,063	1,595
1,611	0,473	3,1627	0,265	0,5201	-1,6295	2,666	1,609

Kuru yoğunluk değerlerinin karşılaştırmasının yapıldığı grafik ise şekil 6.90' daki gibidir. Şekle bakıldığında tüm değerlerin 1:1 çizgisi üzerinde kümелendiği görülmektedir. Bu da değerlerin neredeyse aynı çıktığı anlamına gelmektedir.

Gravimetrik su içeriklerinin kıyaslandığı değerler ise Tablo 6.87' de görülmektedir.

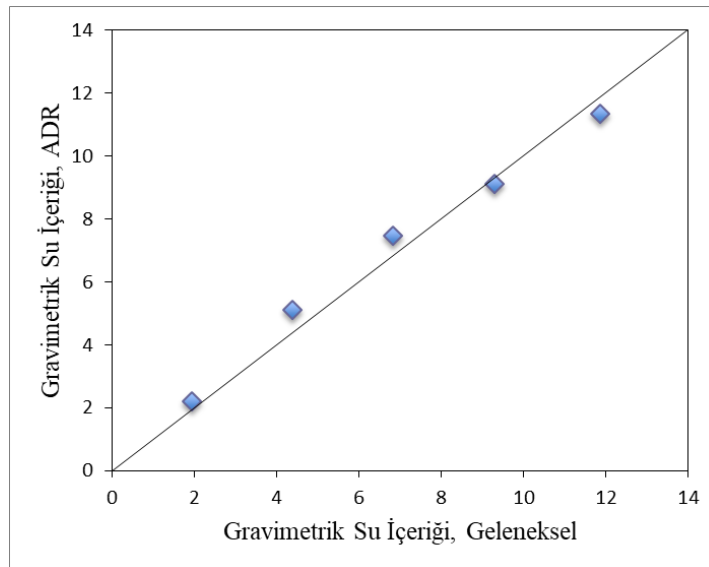


Şekil 6.90. SP için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Tablo 6.87. SP için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
1,94	2,21
4,38	5,11
6,84	7,46
9,29	9,10
11,86	11,32

Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslanması ise Şekil 6.91’ de görülmektedir. Her ne kadar düşük su içeriği değerlerinde 1:1 çizgisinden uzaklaşmış gibi görümseler de, aradaki farkların %1 mertebelerinde bile olmadığı tablodaki verilerden görülmektedir. Artan su içeriği değerlerinde ise sonuçlar birbirleriyle örtüşme göstermişlerdir.



Şekil 6.91. SP için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

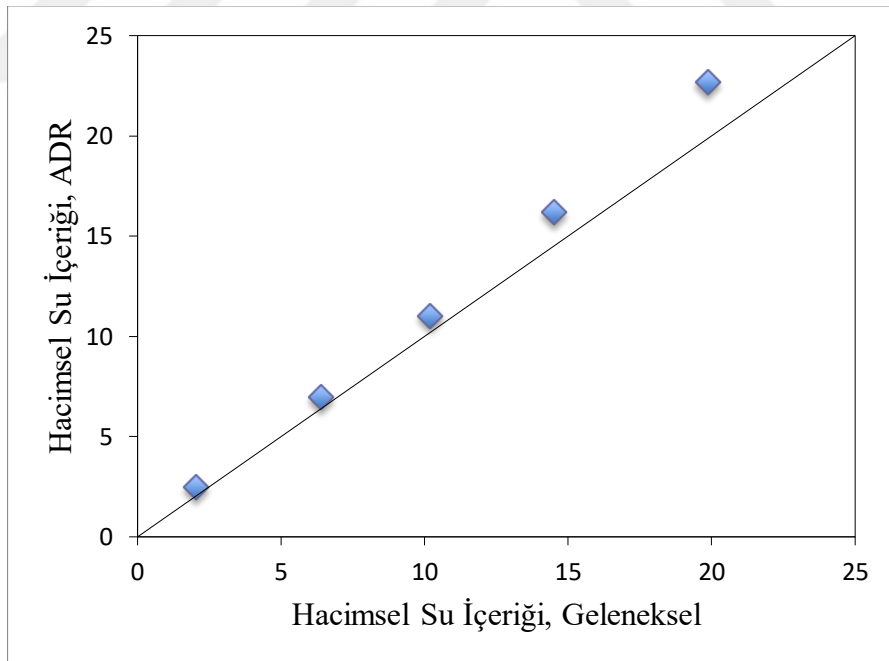
6.2.9. SW zemini test numuneleri

Gevşek sıkılıkta hazırlanan SW numuneleri üzerinde ölçümler yapılmış ve hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Tablo 6.88’ de gösterilmiştir.

Tablo 6.88. SW için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm^{-3})	θ (%)	mV	$\epsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
1,32	1,517	2,04	0,147	1,8874	1,7081	0,0722	2,48
4,17	1,507	6,40	0,218	2,2097	1,7081	0,0722	6,95
6,50	1,542	10,21	0,29	2,5024	1,7081	0,0722	11,00
9,24	1,541	14,52	0,391	2,8749	1,7081	0,0722	16,16
12,87	1,515	19,87	0,524	3,3425	1,7081	0,0722	22,64

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslanmasının yapıldığı grafik ise Şekil 6.92’ de verilmiştir.



Şekil 6.92. SW için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

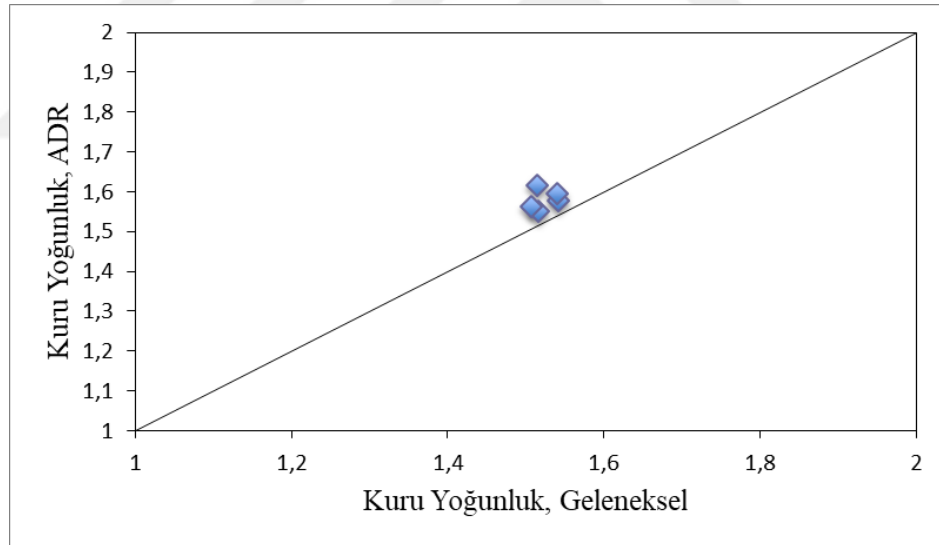
Şekle bakıldığında kuruya yakın su içeriği değerlerinde, ölçülen değerler ile gerçek değerlerin yakınlık gösterdiği, su içeriği arttıkça ise değerlerin gerçeklerinden uzaklaştığı görülmektedir.

SW için hesaplanan kuru yoğunluk değerleri Tablo 6.89’ da gösterilmiştir.

Tablo 6.89. SW için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,517	0,147	1,8874	0,2715	0,4891	-1,5903	0,300	1,551
1,507	0,218	2,2097	0,2715	0,4891	-1,5903	0,816	1,563
1,542	0,29	2,5024	0,2715	0,4891	-1,5903	1,334	1,578
1,541	0,391	2,8749	0,2715	0,4891	-1,5903	2,060	1,596
1,515	0,524	3,3425	0,2715	0,4891	-1,5903	3,078	1,617

Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.93’ de görülmektedir. Hem grafik hem de tablodaki değerler kıyaslandığında ölçülen kuru yoğunluk değerlerinin gerçek değerlerden büyük olduğu görülmektedir. Bu nedenle değerler 1:1 çizgisinin üst tarafında yer almıştır. Her ne kadar ölçülen değerler büyük çıkmış olsa da gerçek değerler ile arasındaki fark 0,1grcm⁻³ mertebelerindedir.



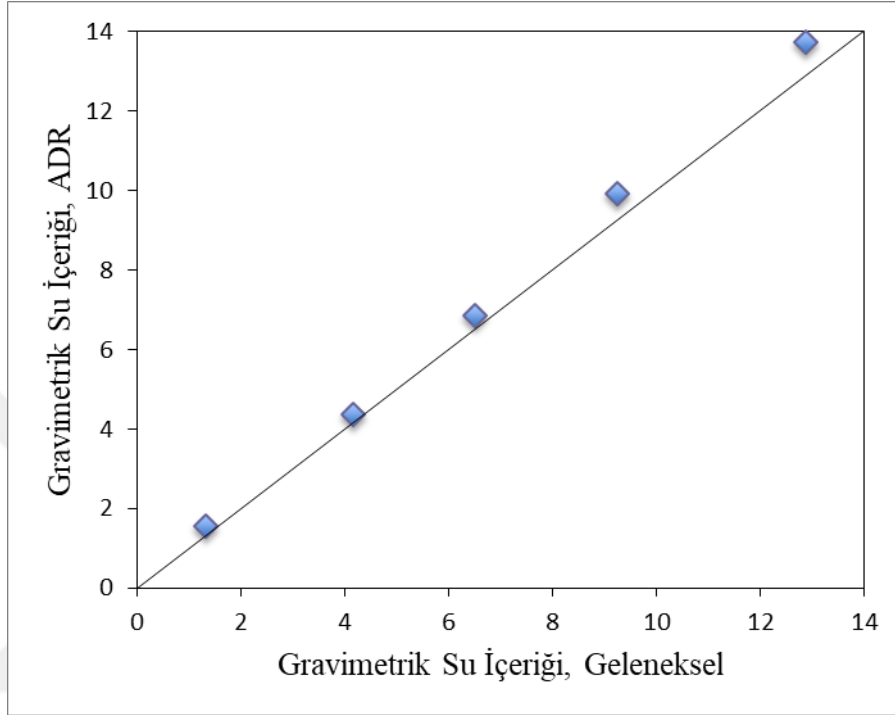
Şekil 6.93. SW için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Gravimetrik su içeriği değerleri ise Tablo 6.90’ da verilmiştir.

Tablo 6.90. SW için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
1,32	1,57
4,17	4,36
6,50	6,84
9,24	9,93
12,87	13,74

Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslanması ise Şekil 6.94’ te görülmektedir. Kuru zeminler için değerler birbirleri ile örtüşüp 1:1 çizgisi üzerinde yer alırken, su içeriği değerlerinde ölçülen ve gerçek değerler bir miktar farklılık göstermişleridir. Fakat bu farklılık yaklaşık olarak %1 mertebelerindedir.



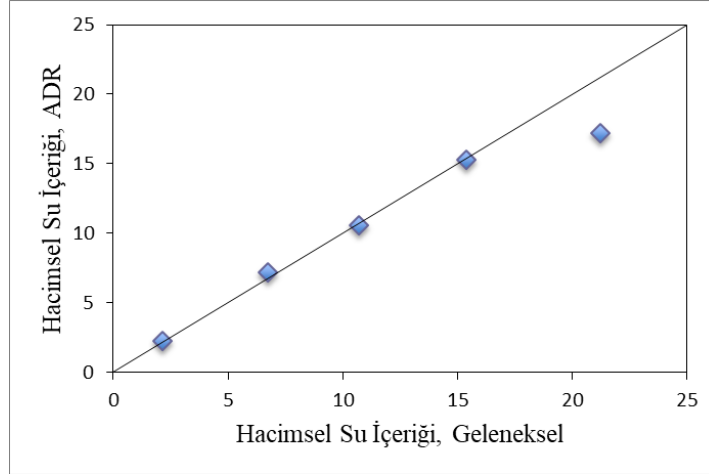
Şekil 6.94. SW için gravimetrik değerleri (gevşek)

Sıkı olarak hazırlanmış SW numunelerinden alınan ölçümlerden hacimsel su içeriği değerleri hesaplanmış ve değerler Tablo 6.91’ de gösterilmiştir.

Tablo 6.91. SW için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm^{-3})	θ (%)	mV	$\epsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
1,32	1,595	2,14	0,144	1,8729	1,7081	0,0722	2,28
4,17	1,585	6,73	0,222	2,2268	1,7081	0,0722	7,18
6,50	1,618	10,71	0,282	2,4712	1,7081	0,0722	10,57
9,24	1,633	15,38	0,374	2,8143	1,7081	0,0722	15,32
12,87	1,618	21,22	0,412	2,9491	1,7081	0,0722	17,19

Sıkı numuneler için hacimsel su içeriği değerlerinin karşılaştırıldığı grafik ise Şekil 6.95’ te gösterilmiştir.

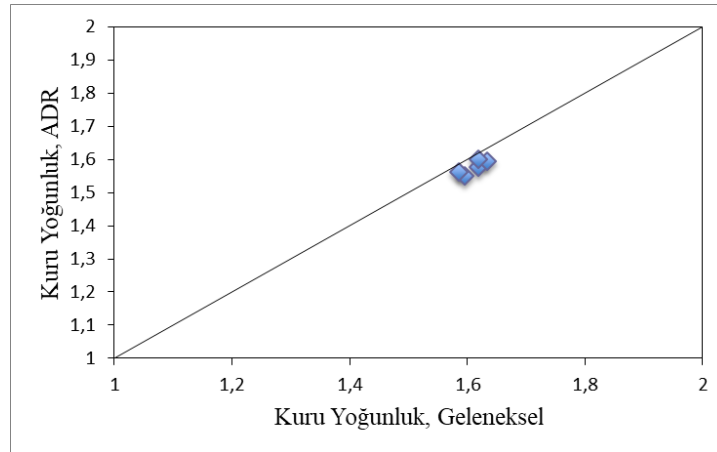


Şekil 6.95. SW için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Şekil kontrol edildiğinde hemen hemen tüm değerlerin örtüştüğü, sadece en yüksek su içeriğine sahip numunede farklılık gösterdiği görülmektedir. Bu farklılık ise yaklaşık %4 civarındadır. SW numuneleri için hesaplanmış kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.92’ de verilmiştir. Kuru yoğunluk değerlerinin grafik olarak yapıldığı kıyaslama Şekil 6.96’ da gösterilmiştir.

Tablo 6.92. SW için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0.5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,595	0,144	1,8729	0,2715	0,4891	-1,5903	0,278	1,552
1,585	0,222	2,2268	0,2715	0,4891	-1,5903	0,845	1,564
1,618	0,282	2,4712	0,2715	0,4891	-1,5903	1,276	1,576
1,633	0,374	2,8143	0,2715	0,4891	-1,5903	1,936	1,593
1,618	0,412	2,9491	0,2715	0,4891	-1,5903	2,213	1,600



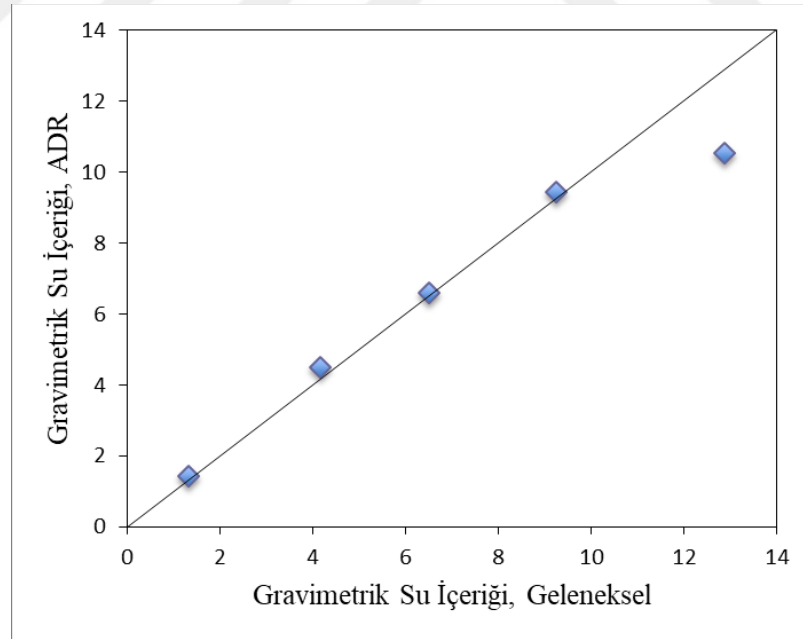
Şekil 6.96. SW için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Kuru yoğunluk değerleri kontrol edildiğinde ölçülen değerlerin gerçek değerlerden daha küçük çıktığı görülmektedir. Bu nedenle tüm değerler 1:1 çizgisinin altında yer almıştır. Her ne kadar değerler küçük olsa da, bu fark en fazla $0,1\text{grcm}^{-3}$ civarındadır. Sıkı numuneler üzerinde elde edilen gravimetrik su içeriği değerleri ise Tablo 6.93’ te görülmektedir.

Tablo 6.93. SW için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
1,32	1,44
4,17	4,51
6,50	6,58
9,24	9,43
12,87	10,54

Gravimetrik su içeriğinin karşılaştırıldığı grafik ise Şekil 6.97’ de gösterilmiştir. Grafik kontrol edildiğinde tıpkı hacimsel su içeriğindeki numunedekine benzer olarak bir dağılım göstermiştir. Tüm su içeriği değerleri 1:1 çizgisi üzerinde yer alırken, sadece en yüksek su içeriği değerinde farklılık söz konusu olmuştur.



Şekil 6.97. SW için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

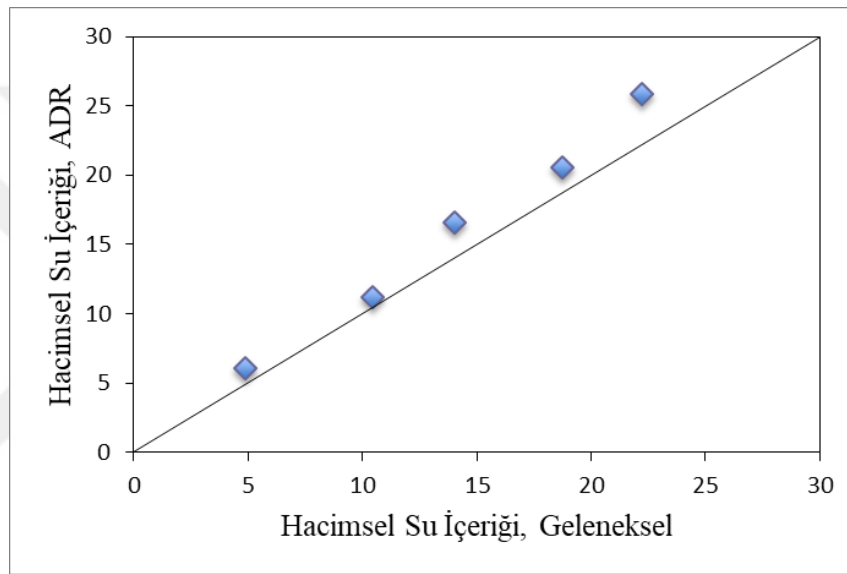
6.2.10. SP-SM zemini test numuneleri

Çift simgeli üniform siltli kum numunesi üzerinde gevşek sıkılıkta yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen hacimsel su içeriği değerleri tablo olarak aşağıda verilmiştir.

Tablo 6.94. SP-SM için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm ⁻³)	θ (%)	mV	$\epsilon^{0.5}$	a ₀	a ₁	θ (%)
2,88	1,668	4,90	0,226	2,2438	1,8132	0,0707	6,09
6,05	1,696	10,45	0,317	2,6054	1,8132	0,0707	11,20
8,11	1,697	14,03	0,423	2,9878	1,8132	0,0707	16,61
10,61	1,734	18,75	0,502	3,2646	1,8132	0,0707	20,53
13,12	1,661	22,22	0,606	3,6441	1,8132	0,0707	25,90

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.98’ verilmektedir.



Şekil 6.98. SP-SM için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

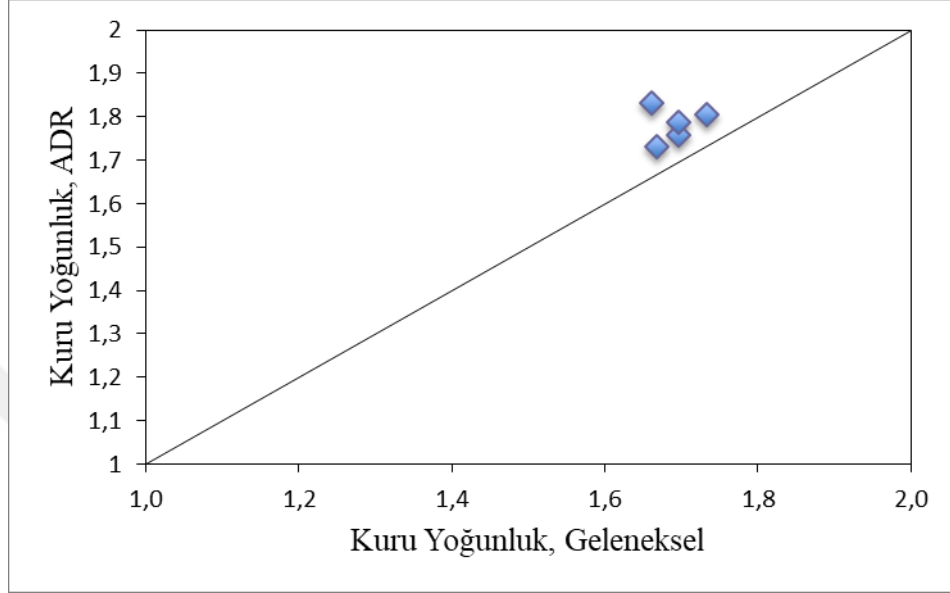
Grafik kontrol edildiğinde düşük su içeriğindeki zeminler için sonuçlar birbirlerine yakınlık gösterirken artan su içeriği değerlerinde farklılık göstermişlerdir.

Gevşek sıkılıkta hazırlanan numuneler üzerinde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.95’ te görülmektedir.

Tablo 6.95. SP-SM için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları		Transfer Fonks.		ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0.5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,668	0,226	2,2438	0,1772	0,603	-1,6846	0,561	1,730
1,696	0,317	2,6054	0,1772	0,603	-1,6846	1,089	1,758
1,697	0,423	2,9878	0,1772	0,603	-1,6846	1,699	1,787
1,734	0,502	3,2646	0,1772	0,603	-1,6846	2,172	1,806
1,661	0,606	3,6441	0,1772	0,603	-1,6846	2,866	1,831

Kuru yoğunluk değerlerinin karşılaştırıldığı grafik ise Şekil 6.99’ da verilmiştir. Şekildeki grafiğe bakıldığında ölçülen değerlerin gerçek değerlerden daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak zemin içerisinde bulunan siltin olduğu söylenmektedir.



Şekil 6.99. SP-SM için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

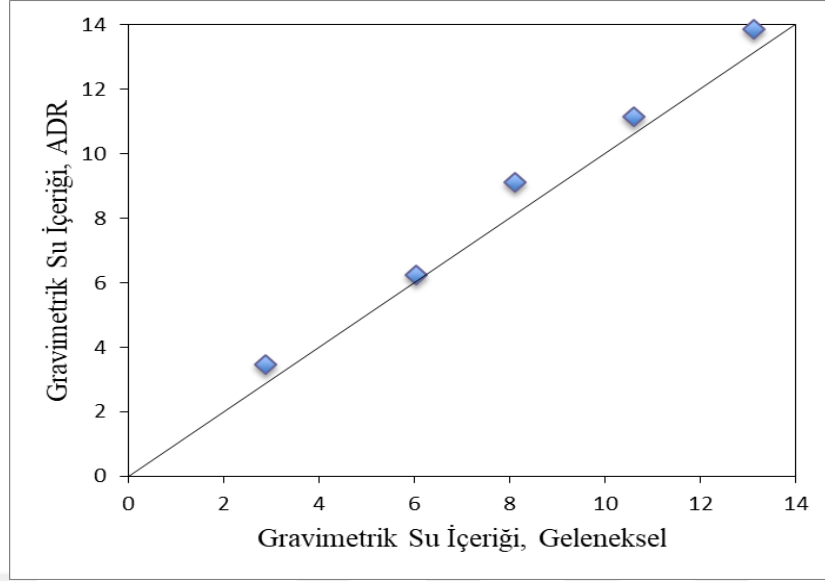
Gevşek numuneler üzerinde yapılan ölçümlerde elde edilen gravimetrik su içeriği değerleri Tablo 6.96’ da görülmektedir.

Tablo 6.96. SP-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,88	3,45
6,05	6,25
8,11	9,12
10,61	11,15
13,12	13,87

Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.100’ de gösterilmiştir. Kuru zeminlerde değerler 1:1 çizgisi üzerinde yer alırken, artan su içeriği değerlerinde ise gravimetrik su içeriği değerleri farklılık göstermiştir. Fakat aralarındaki fark yine de en fazla %1 mertebelerindedir.

Sıkı halde hazırlanmış SP-SM numuneleri üzerinde alınan ölçümlerden elde edilen hacimsel su içeriği değerleri Tablo 6.97’ de verilmiştir.

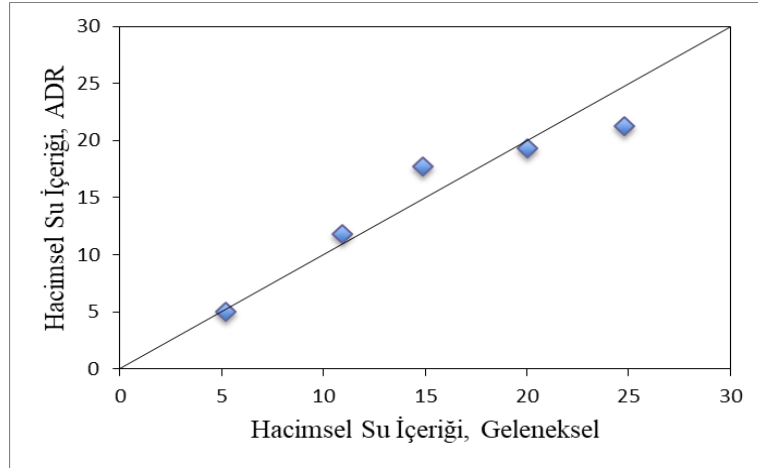


Şekil 6.100. SP-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Tablo 6.97. SP-SM için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm^{-3})	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
2,88	1,763	5,18	0,208	2,1666	1,8132	0,0707	5,00
6,05	1,771	10,91	0,329	2,6502	1,8132	0,0707	11,84
8,11	1,804	14,91	0,446	3,0683	1,8132	0,0707	17,75
10,61	1,85	20,00	0,477	3,1767	1,8132	0,0707	19,29
13,12	1,855	24,81	0,516	3,3141	1,8132	0,0707	21,23

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik Şekil 6.101’ de verilmiştir. Bazı numuneler de değerler 1:1 çizgisi üzerinde yer alırken, bazı numunelerde ise 1:1 çizgisinden uzaklaştığı görülmektedir.



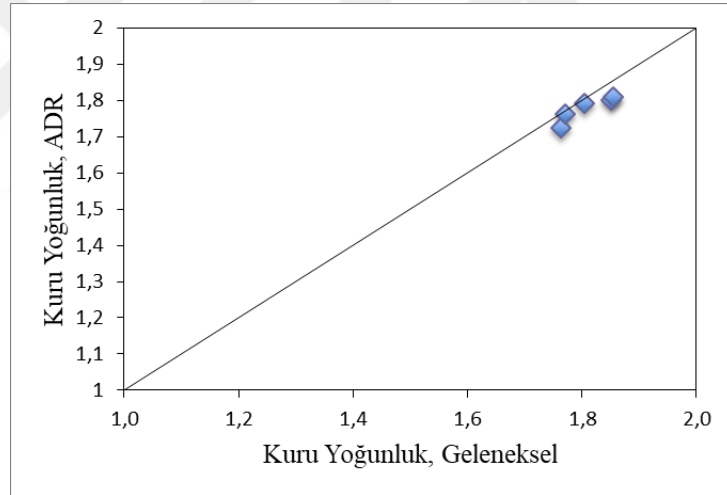
Şekil 6. 101. SP-SM için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Sıkı numuneler üzerinde yapılan çalışmalardan elde edilen kuru yoğunluk değerleri Tablo 6.98’ de verilmiştir.

Tablo 6.98. SP-SM için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,763	0,208	2,1666	0,1772	0,603	-1,6846	0,454	1,725
1,771	0,329	2,6502	0,1772	0,603	-1,6846	1,158	1,761
1,804	0,446	3,0683	0,1772	0,603	-1,6846	1,834	1,793
1,85	0,477	3,1767	0,1772	0,603	-1,6846	2,019	1,800
1,855	0,516	3,3141	0,1772	0,603	-1,6846	2,260	1,810

Kuru yoğunluk değerlerinin karşılaştırıldığı grafik ise Şekil 6.102’ de görülmektedir. Şekle bakıldığında ölçülen değerlerin gerçek değerlerden daha küçük olduğu görülmektedir. Bu nedenle tüm değerler 1:1 çizgisinin altında yer almıştır.

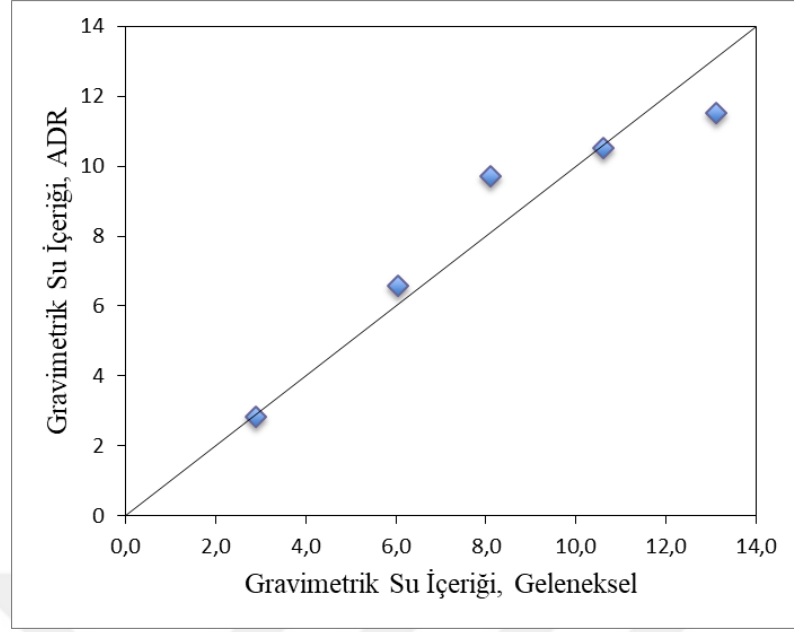


Şekil 6.102. SP-SM için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Sıkı SP-SM için elde edilen gravimetrik su içeriği değerleri ise Tablo 6.99’ da gösterilmiştir.

Tablo 6.99 SP-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,88	2,84
6,05	6,59
8,11	9,71
10,61	10,51
13,12	11,51



Şekil 6.103. SP-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Şekil 6.103’ te ise gravimetrik su içeriği değerleri grafik olarak karşılaştırılmıştır. Değerler genelde 1:1 bandı üzerinde yer alırken, bazı değerler farklılık göstermişlerdir.

6.2.11. SP-SC zemini test numuneleri

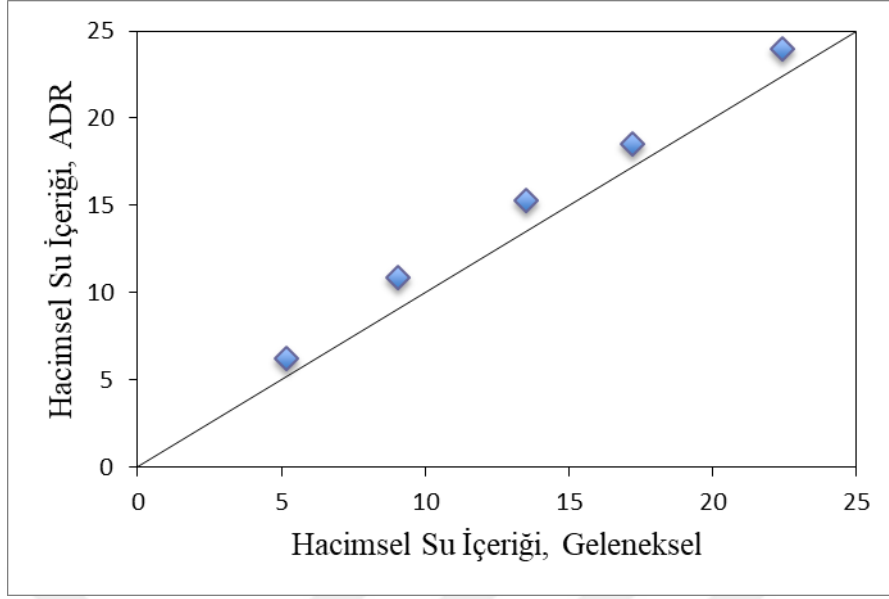
Gevşek sıkılıkta hazırlanan SP-SC numuneleri üzerinde yapılan ölçüm sonuçları sonucunda hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri Tablo 6.100’ de verilmiştir.

Tablo 6.100. SP-SC için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm^{-3})	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
3,20	1,59	5,18	0,231	2,2648	1,8198	0,0713	6,24
5,60	1,586	9,05	0,314	2,5941	1,8198	0,0713	10,86
8,11	1,635	13,51	0,401	2,9103	1,8198	0,0713	15,30
10,13	1,668	17,23	0,467	3,1417	1,8198	0,0713	18,54
12,87	1,711	22,44	0,576	3,5312	1,8198	0,0713	24,00

Hacimsel su içeriği değerleri ise grafik olarak Şekil 6.104’ deki gibi karşılaştırılmıştır. ADR yöntemi ile hesaplanan tüm değerlerin 1:1 çizgisinin üst tarafında yer almıştır.

Gevşek sıkılıkta hazırlanan numuneler üzerinde yapılan ölçüm sonuçları sonrasında hesaplanan kuru yoğunluk değerleri Tablo 6.101’ de verilmiştir.

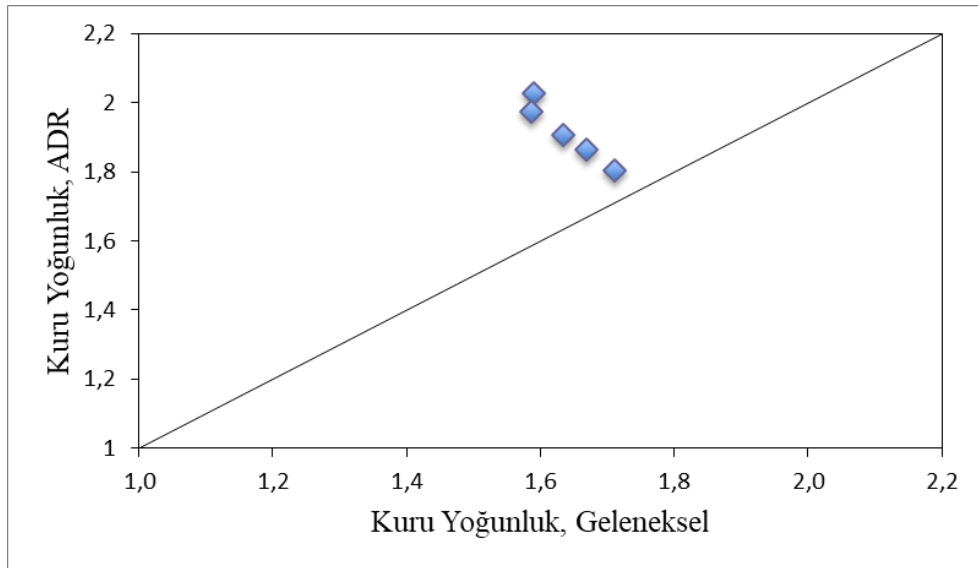


Şekil 6.104. SP-SC için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Tablo 6.101. SP-SC için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,59	0,231	2,2648	0,5643	-1,477	0,8307	0,380	2,026
1,586	0,314	2,5941	0,5643	-1,477	0,8307	0,797	1,973
1,635	0,401	2,9103	0,5643	-1,477	0,8307	1,312	1,908
1,668	0,467	3,1417	0,5643	-1,477	0,8307	1,760	1,865
1,711	0,576	3,5312	0,5643	-1,477	0,8307	2,652	1,803

Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.105’ te gösterilmiştir.



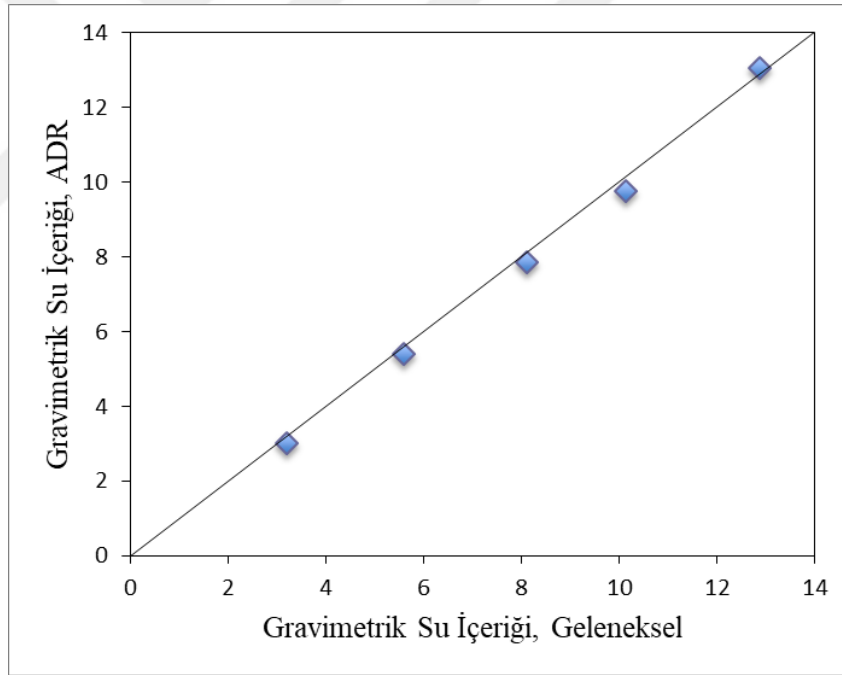
Şekil 6.105. SP-SC için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Grafik kontrol edildiğinde tüm değerlerin gerçek değerlerden büyük çıktığı görülmüştür. Bu nedenle değerler 1:1 çizgisinin üst tarafında yer almışlardır. Bunun nedeninin zeminlerin hem gevşek sıkılıkta olması, hem de içerisin de kil olması söylenebilir. Gevşek sıkılıktaki SP-SC için bulunan Gravimetrik su içeriği değerleri ise Tablo 6.102’ de gösterilmiştir.

Tablo 6.102. SP-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
3,20	3,02
5,60	5,40
8,11	7,86
10,13	9,75
12,87	13,06

Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslanması ise Şekil 6.106’ da gösterilmiştir.



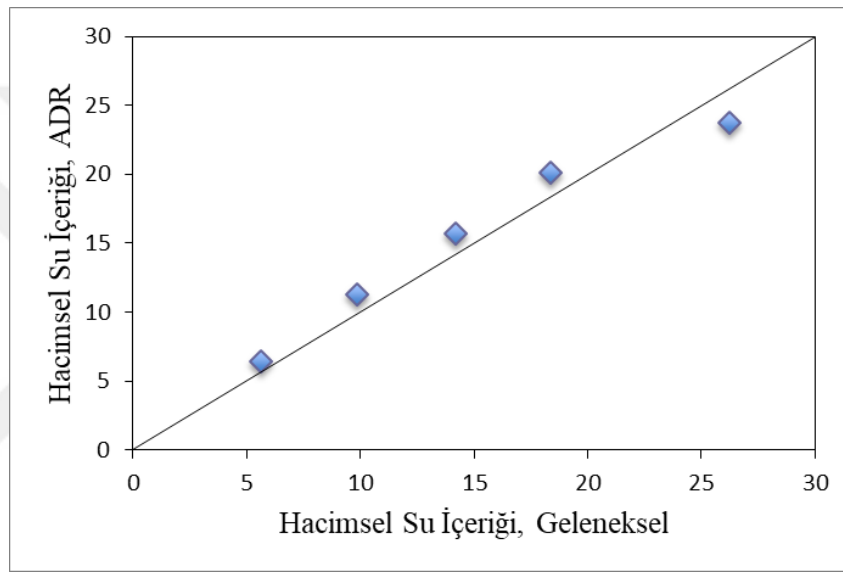
Şekil 6.106. SP-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Her ne kadar kuru yoğunluk değerleri farklılık göstermişse de gravimetrik su içeriği değerleri birbirine yakın çıkmışlardır ve 1:1 çizgisi üzerinde yer almışlardır. Aralarındaki farkın %1 mertebesine bile ulaşmadığı görülmektedir. Sıkı yoğunlukta hazırlanan SP-SC numuneleri için hacimsel su içeriği değerleri ise Tablo 6.103’ te verilmiştir.

Tablo 6.103. SP-SC için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm ⁻³)	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a ₀	a ₁	θ (%)
3,20	1,726	5,63	0,234	2,2774	1,8198	0,0713	6,42
5,60	1,723	9,83	0,322	2,6241	1,8198	0,0713	11,28
8,11	1,718	14,20	0,409	2,9386	1,8198	0,0713	15,69
10,13	1,78	18,39	0,499	3,2540	1,8198	0,0713	20,11
12,87	2,002	26,26	0,57	3,5090	1,8198	0,0713	23,69

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik ise aşağıdaki şekilde verilmiştir.



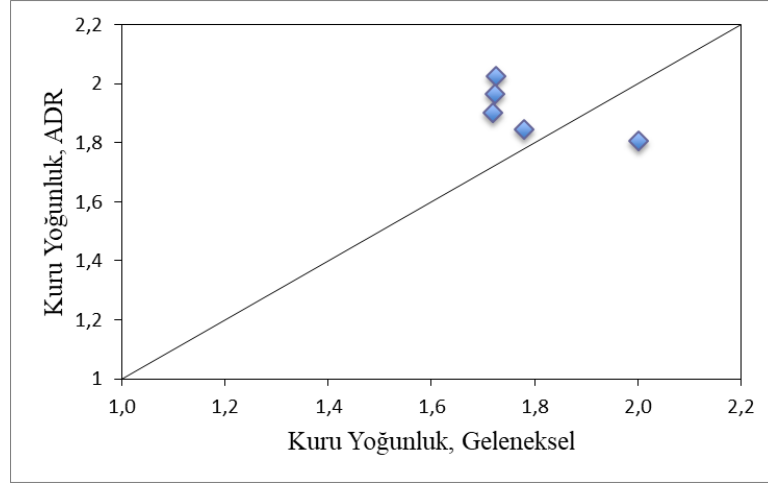
Şekil 6.107. SP-SC için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Şekil 6.107’ de görüldüğü gibi su içeriği değerleri arttıkça hacimsel su içeriği değerlerinde de farklılık görülmüştür. Kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.104’ te verilmiştir.

Tablo 6.104. SP-SC için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,726	0,234	2,2774	0,5643	-1,477	0,8307	0,394	2,026
1,723	0,322	2,6241	0,5643	-1,477	0,8307	0,841	1,967
1,718	0,409	2,9386	0,5643	-1,477	0,8307	1,363	1,902
1,78	0,499	3,2540	0,5643	-1,477	0,8307	2,000	1,846
2,002	0,57	3,5090	0,5643	-1,477	0,8307	2,596	1,807

Kuru yoğunlukların kıyaslandığı grafik ise aşağıdaki gibidir.

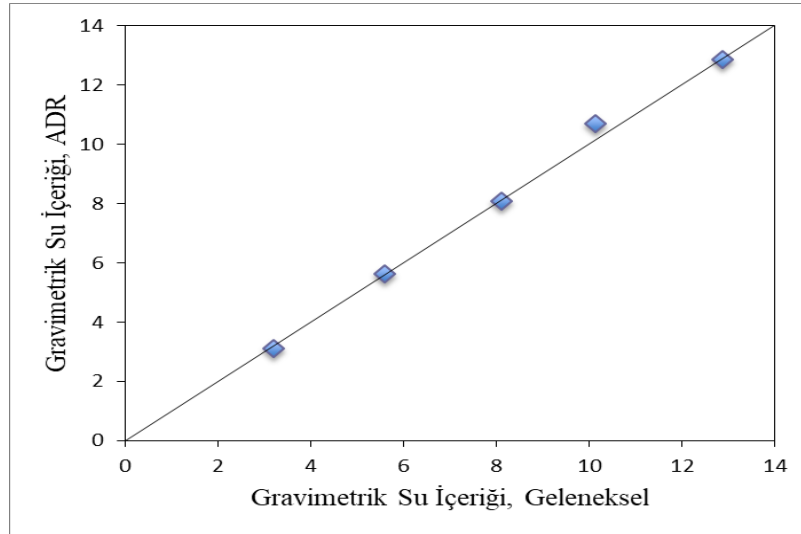


Şekil 6.108. SP-SC için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Grafik kontrol edildiğinde kuru yoğunluk değerlerinin 1:1 çizgisinde uzaklaştığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak zemin içindeki kil olması gösterilebilir. Fakat yine de aradaki farkın 1 grcm^{-3} bile olmadığı daha düşük olduğu görülmektedir. Gravimetrik su içeriği değerleri ise Tablo 6.105’ te gösterilmiştir. Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik ise aşağıda Şekil 6.109’ da gösterilmiştir.

Tablo 6.105. SP-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
3,20	3,11
5,60	5,63
8,11	8,09
10,13	10,69
12,87	12,86



Şekil 6.109. SP-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Şekil kontrol edildiğinde neredeyse tüm değerlerin 1:1 çizgisi üzerinde yer aldığı görülmektedir.

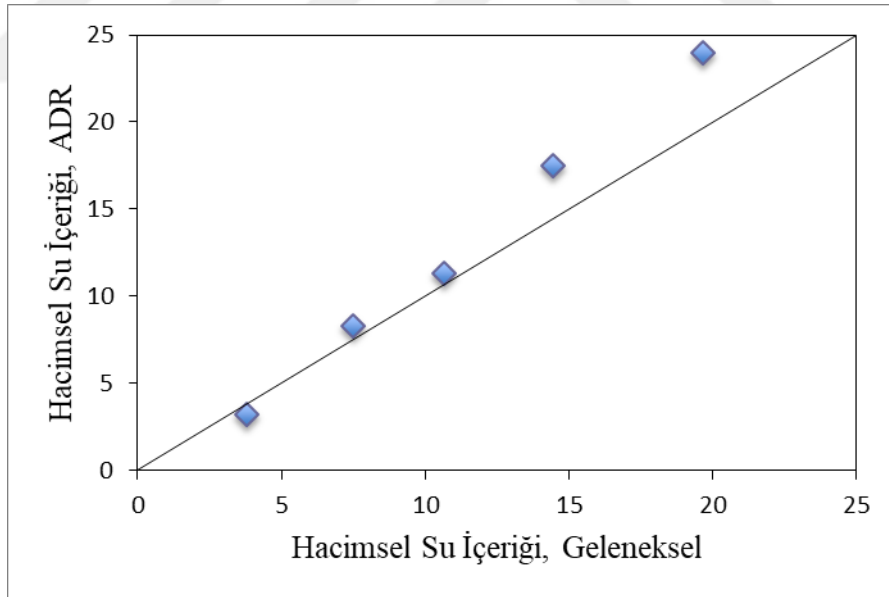
6.2.12. SW-SM zemini test numuneleri

Gevşek sıklıkta hazırlanan numuneler üzerinde yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen hacimsel su içeriği değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 6.106. SW-SM için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm^{-3})	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
2,15	1,74	3,80	0,182	2,0511	1,8664	0,0578	3,20
4,28	1,716	7,48	0,251	2,3475	1,8664	0,0578	8,32
5,93	1,763	10,66	0,295	2,5217	1,8664	0,0578	11,34
7,99	1,776	14,47	0,392	2,8785	1,8664	0,0578	17,51
10,62	1,818	19,68	0,498	3,2505	1,8664	0,0578	23,95

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.110' da verilmiştir.



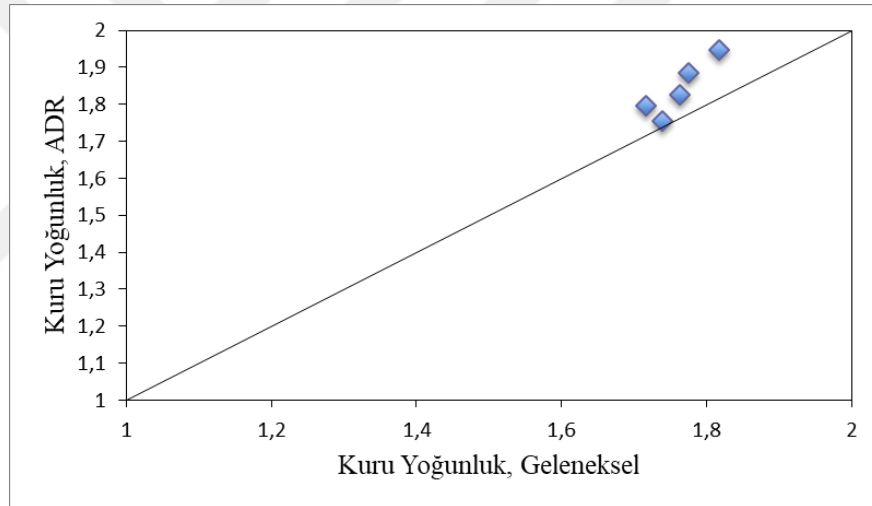
Şekil 6.110. SW-SM için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Şekil kontrol edildiğinde kuru ve kuruya yakın numuneler için değerler 1:1 çizgisi üzerinde yer alırken, artan su içeriği değerlerinde hacimsel su içeriği değerleri de farklılık göstermiştir. Gevşek sıklıktaki SW-SM numunelerinden elde edilen kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.107' de gösterilmiştir.

Tablo 6.107. SW-SM için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,74	0,182	2,0511	0,0338	1,1289	-2,2224	0,235	1,756
1,716	0,251	2,3475	0,0338	1,1289	-2,2224	0,614	1,796
1,763	0,295	2,5217	0,0338	1,1289	-2,2224	0,839	1,825
1,776	0,392	2,8785	0,0338	1,1289	-2,2224	1,307	1,886
1,818	0,498	3,2505	0,0338	1,1289	-2,2224	1,804	1,948

Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslanması ise Şekil 6.111’ de verilmiştir. Şekil kontrol edildiğinde tüm değerlerin 1:1 çizgisinin yukarısında yer aldığı görülmüştür. Bu da ölçülen değerlerin gerçek değerlerden büyük olduğu anlamına gelmektedir. Bunun sebebi olarak numunelerin gevşek sıkılıkta olması ve silt içeriyor olması gösterilebilir.

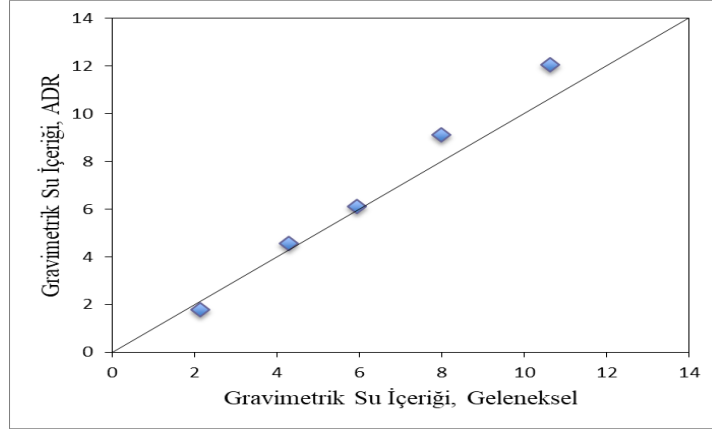


Şekil 6.111. SW-SM için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Gevşek sıkılıkta hazırlanan SW-SM numuneleri için belirlenen gravimetrik su içeriği değerleri Tablo 6.108’ de gösterilmiştir.

Tablo 6. 108. SW-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,15	1,79
4,28	4,55
5,93	6,09
7,99	9,11
10,62	12,06

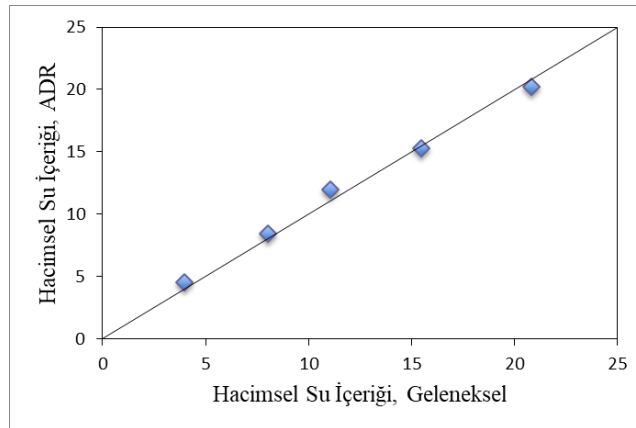


Şekil 6.112. SW-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Şekil 6.112’ de ise gravimetrik su içeriği değerleri grafik olarak gösterilmiştir. Değerlerin dağılım ise tıpkı hacimsel su içeriğindeki benzerlik göstermiştir. Sıkı yoğunlukta hazırlanan numuneler için hesaplanan hacimsel su içeriği değerleri ise Tablo 6.109’da verilmiştir. Hacimsel su içeriği değerleri ise Şekil 6.113’ deki gibi kıyaslanmıştır.

Tablo 6.109. SW-SM için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm^{-3})	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
2,15	1,824	3,99	0,199	2,1272	1,8664	0,0578	4,51
4,28	1,839	8,02	0,253	2,3557	1,8664	0,0578	8,46
5,93	1,83	11,07	0,305	2,5600	1,8664	0,0578	12,00
7,99	1,901	15,49	0,356	2,7493	1,8664	0,0578	15,28
10,62	1,923	20,82	0,437	3,0368	1,8664	0,0578	20,25



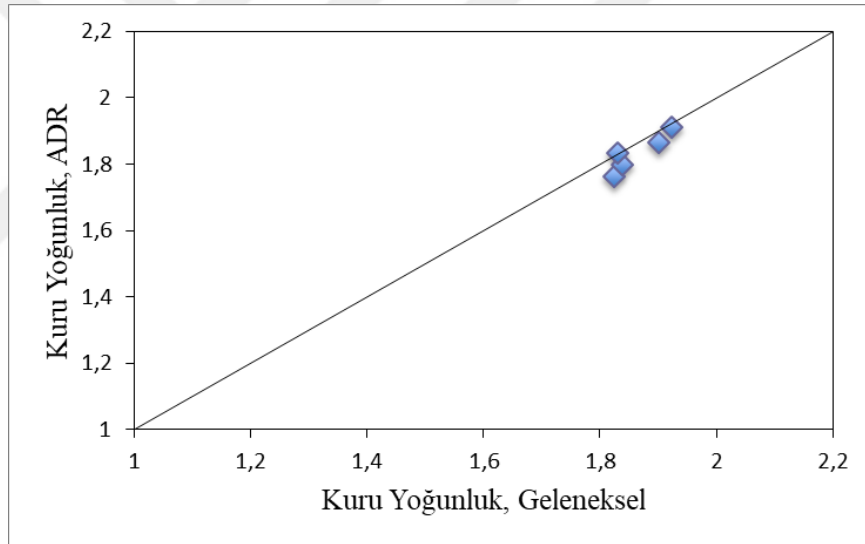
Şekil 6.113. SW-SM için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Şekle bakıldığında hemen hemen tüm değerlerin 1:1 çizgisinde yer aldığı görülmektedir. Sıkı numuneler için hesaplanan kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.110’ da gösterilmiştir.

Tablo 6.110. SW-SM için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,824	0,199	2,1272	0,0338	1,1289	-2,2224	0,332	1,763
1,839	0,253	2,3557	0,0338	1,1289	-2,2224	0,624	1,797
1,83	0,305	2,5600	0,0338	1,1289	-2,2224	0,889	1,832
1,901	0,356	2,7493	0,0338	1,1289	-2,2224	1,137	1,864
1,923	0,437	3,0368	0,0338	1,1289	-2,2224	1,518	1,913

Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslanması ise Şekil 6.114’ te gösterilmiştir.



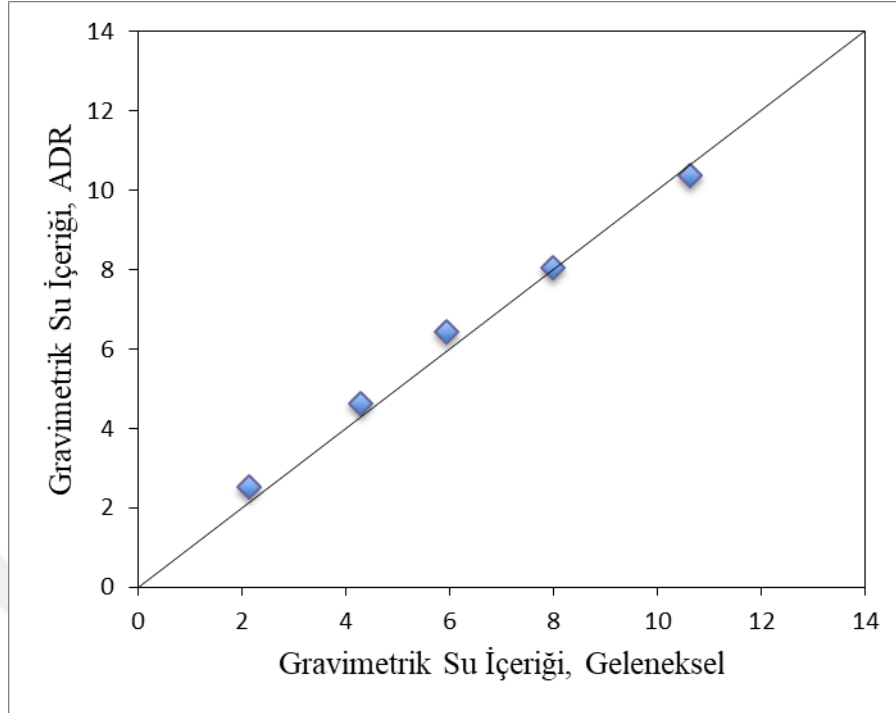
Şekil 6. 114. SW-SM için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Grafik kontrol edildiğinde değerlerin 1:1 çizgisinde yer aldığı, sapmanın ise en fazla 0,1grcm⁻³ değerine bile ulaşmadığı görülmektedir. Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslanması ise Tablo 6.111’ de gösterilmiştir.

Tablo 6.111. SW-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,15	2,51
4,28	4,62
5,93	6,43
7,99	8,04
10,62	10,39

Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslanması ise Şekil 6.115’ te gösterilmiştir.



Şekil 6.115. SW-SM için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Şekil kontrol edildiğinde tüm değerlerin neredeyse birbiri ile örtüştüğü ve 1:1 çizgisinde yer aldığı görülmektedir.

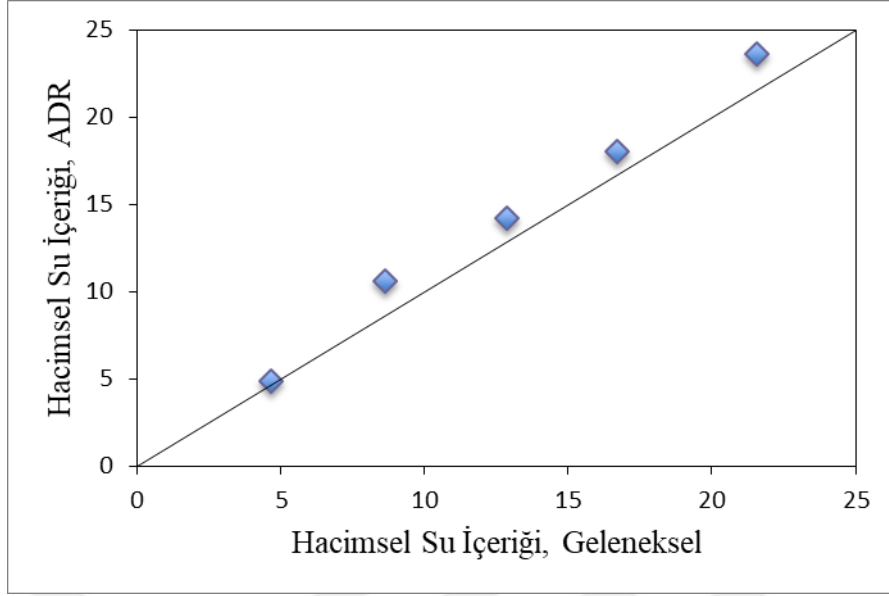
6.2.13. SW-SC zemini test numuneleri

Gevşek sıkılıkta hazırlanan SW-SC numuneleri için elde edilen hacimsel su içeriği değerleri Tablo 6.112’ de gösterilmiştir.

Tablo 6. 112. SW-SC için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\epsilon^{0,5}$	a ₀	a ₁	θ (%)
2,96	1,539	4,65	0,191	2,0917	1,7174	0,0772	4,85
5,37	1,579	8,65	0,298	2,5332	1,7174	0,0772	10,57
7,88	1,602	12,87	0,374	2,8143	1,7174	0,0772	14,21
9,84	1,663	16,68	0,457	3,1068	1,7174	0,0772	18,00
13,77	1,537	21,57	0,579	3,5423	1,7174	0,0772	23,64

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik ise aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 6.116. SW-SC için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

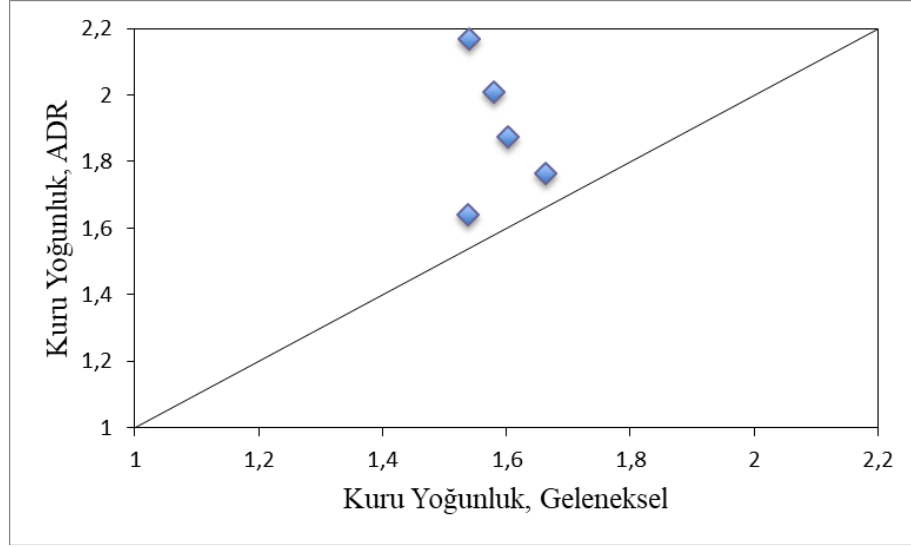
Grafik kontrol edildiğinde sadece kuruya yakın numune için hacimsel su içeriği değerleri 1:1 çizgisinin üzerinde yer almış, diğer numuneler için 1:1 bandının yukarısında yer almıştır. Değerler kontrol edildiğinde aradaki farkın en fazla %2 mertebelerinde olduğu görülmektedir.

Gevşek sıklıkta hazırlanan numuneler için ölçülen kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.113’ te verilmiştir.

Tablo 6.113. SW-SC için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0.5}$	c_2	c_1	c_0	$y=f(x)$	ρ_k (grcm ⁻³)
1,539	0,191	2,0917	0,9405	-3,1461	2,732	0,266	2,167
1,579	0,298	2,5332	0,9405	-3,1461	2,732	0,798	2,008
1,602	0,374	2,8143	0,9405	-3,1461	2,732	1,327	1,874
1,663	0,457	3,1068	0,9405	-3,1461	2,732	2,035	1,763
1,537	0,579	3,5423	0,9405	-3,1461	2,732	3,389	1,640

Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslanmasının yapıldığı grafik ise 6.117’ de verilmiştir. Şekle bakıldığında tüm değerlerin 1:1 çizgisinin üst tarafında yer aldığı görülmektedir. Yani ölçülen değerlerin, gerçek değerlerden büyük olduğu görülmektedir.

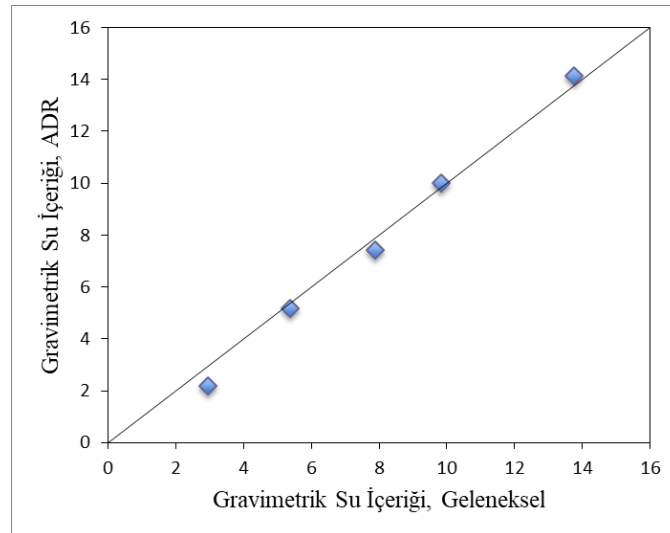


Şekil 6.117. SW-SC için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Gevşek SW-SC numuneleri için ölçülen gravimetrik su içeriği değerleri ise Tablo 6.114’ de verilmiştir.

Tablo 6.114. SW-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,96	2,19
5,37	5,16
7,88	7,44
9,84	10,01
13,77	14,14



Şekil 6.118. SW-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

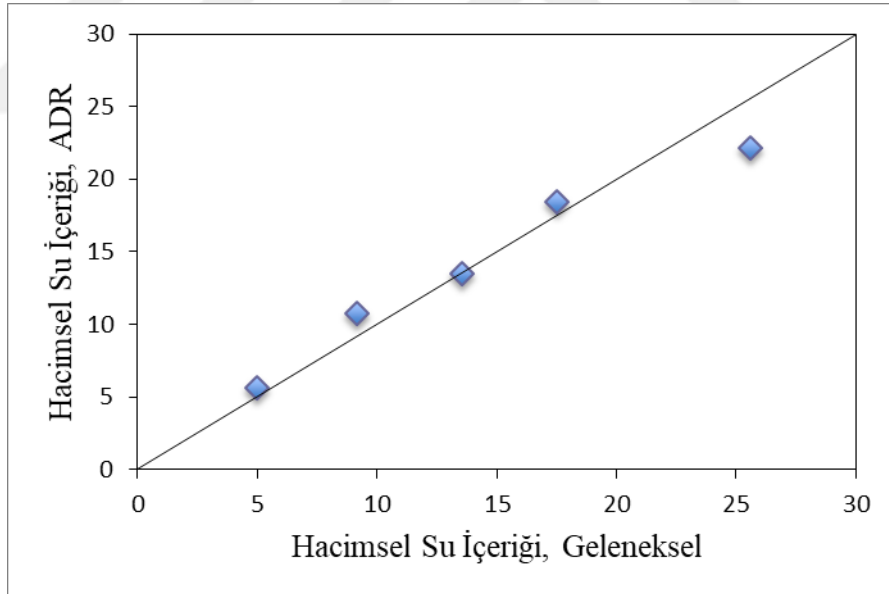
Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslanması ise Şekil 6.118’ de yapılmıştır. Şekil kontrol edildiğinde kuru numune haricindeki tüm numuneler için değerler 1:1 çizgisinde yer almışlardır.

Sıkı yoğunlukta hazırlanan SW-SC numunelerinden elde edilen hacimsel su içeriği değerleri ise Tablo 6.115’teki gibidir.

Tablo 6.115. SW-SC için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm^{-3})	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
2,96	1,65	4,98	0,205	2,1535	1,7174	0,0772	5,65
5,37	1,67	9,14	0,301	2,5447	1,7174	0,0772	10,72
7,88	1,685	13,54	0,358	2,7566	1,7174	0,0772	13,46
9,84	1,743	17,49	0,467	3,1417	1,7174	0,0772	18,45
13,77	1,824	25,60	0,548	3,4287	1,7174	0,0772	22,17

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslanması ise Şekil 6.119’ da gösterilmiştir.



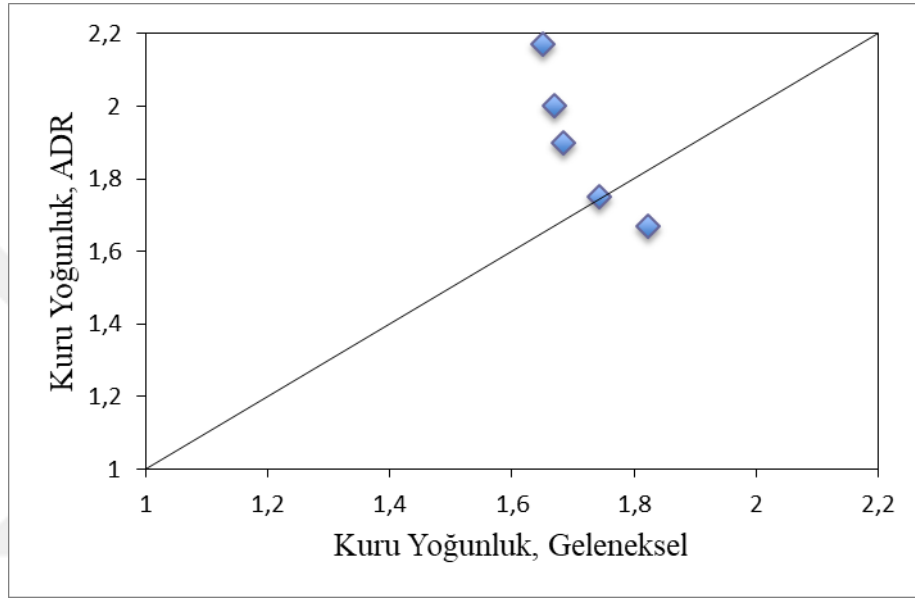
Şekil 6.119. SW-SC için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Şekil kontrol edildiğinde en yüksek su içeriğindeki numune için değerlerin farklılık gösterdiği, onun dışındaki numunelerde ise değerlerin 1:1 çizgisinde yer aldığı görülmektedir. Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı tablo ise aşağıda verilmiştir.

Şekil 6.120’de ise kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslanması grafik olarak gösterilmiştir.

Tablo 6.116. SW-SC için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,65	0,205	2,1535	0,9405	-3,1461	2,732	0,319	2,172
1,67	0,301	2,5447	0,9405	-3,1461	2,732	0,816	2,002
1,685	0,358	2,7566	0,9405	-3,1461	2,732	1,206	1,900
1,743	0,467	3,1417	0,9405	-3,1461	2,732	2,131	1,752
1,824	0,548	3,4287	0,9405	-3,1461	2,732	3,002	1,668



Şekil 6.120. SW-SC için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

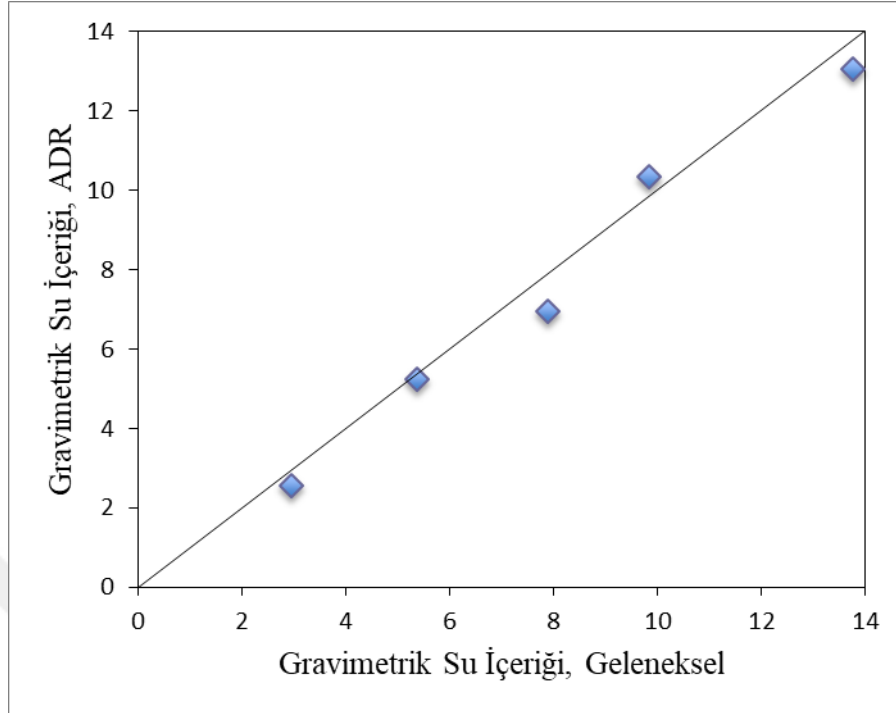
Grafiğe bakıldığında sadece tek bir numune için değerlerin örtüştüğü, onun dışındaki değerlerin farklılık gösterdiği görülmektedir. Bunun nedeni olarak yine farklı sıklık ve numunenin içindeki kil gösterilebilir.

Sıkı yoğunlukta hazırlanan SW-SC numunesi için alınan ölçümlerden hesaplanan gravimetrik su içeriği değerlerinin, geleneksel yöntemlerle bulunan değerlerle kıyaslanmasının yapıldığı tablo aşağıda verilmiştir.

Tablo 6.117. SW-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
2,96	2,55
5,37	5,25
7,88	6,95
9,84	10,33
13,77	13,04

Gravimetrik su içeriği değerleri Şekil 6.121’ de gösterildiği gibi grafik edilmiştir.



Şekil 6.121. SW-SC için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Şekil kontrol edildiğinde genel de değerlerin 1:1 çizgisinde yada çok yakınında yer aldığı görülmektedir.

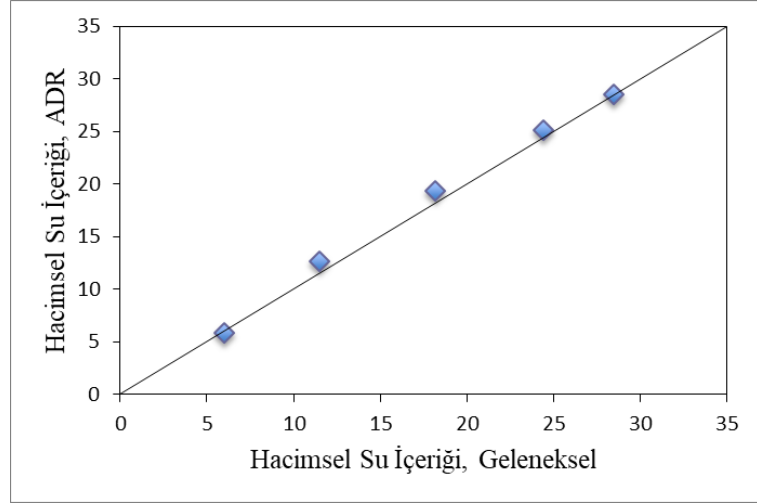
6.2.14. SM zemini test numuneleri

Gevşek sıkılıkta hazırlanan numuneler üzerinde yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen hacimsel su içeriği değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 6.118. SM için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm ⁻³)	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a ₀	a ₁	θ (%)
3,76	1,564	6,00	0,241	2,3065	1,8705	0,0752	5,80
6,88	1,638	11,48	0,376	2,8214	1,8705	0,0752	12,65
10,34	1,723	18,15	0,519	3,3247	1,8705	0,0752	19,34
13,37	1,793	24,44	0,636	3,7607	1,8705	0,0752	25,14
16,01	1,747	28,51	0,698	4,0174	1,8705	0,0752	28,55

Hacimsel su içeriği değerlerinin grafik olarak kıyaslanması da Şekil 6.122’ de verilmiştir.

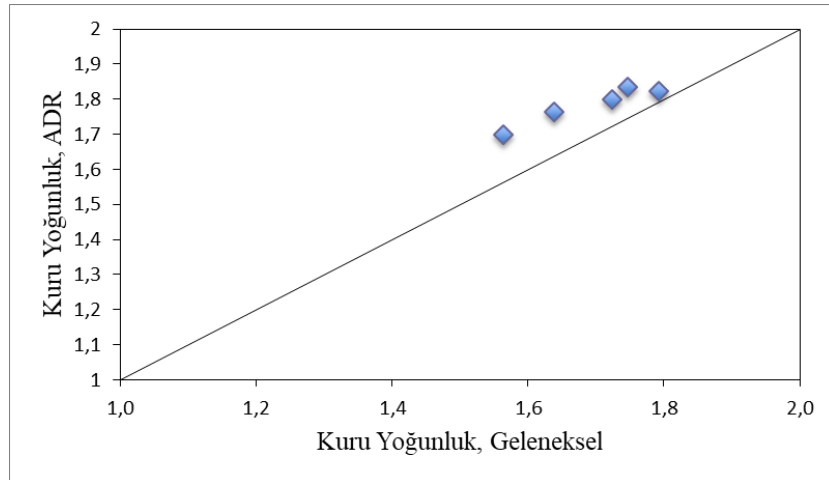


Şekil 6.122. SM için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Grafik kontrol edildiğinde değerlerin neredeyse 1:1 çizgisinde yer aldığı görülmektedir. Gevşek SM numuneleri için belirlenen kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.119’ da verilmiştir. Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.123’ te mevcuttur.

Tablo 6.119. SM için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (g/cm ³)	mV	$\epsilon^{0.5}$	c_2	c_1	c_0	$y=f(x)$	ρ_k (g/cm ³)
1,564	0,241	2,3065	0,217	0,3727	-1,2844	0,730	1,700
1,638	0,376	2,8214	0,217	0,3727	-1,2844	1,495	1,764
1,723	0,519	3,3247	0,217	0,3727	-1,2844	2,353	1,800
1,793	0,636	3,7607	0,217	0,3727	-1,2844	3,186	1,824
1,747	0,698	4,0174	0,217	0,3727	-1,2844	3,715	1,836



Şekil 6.123. SM için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

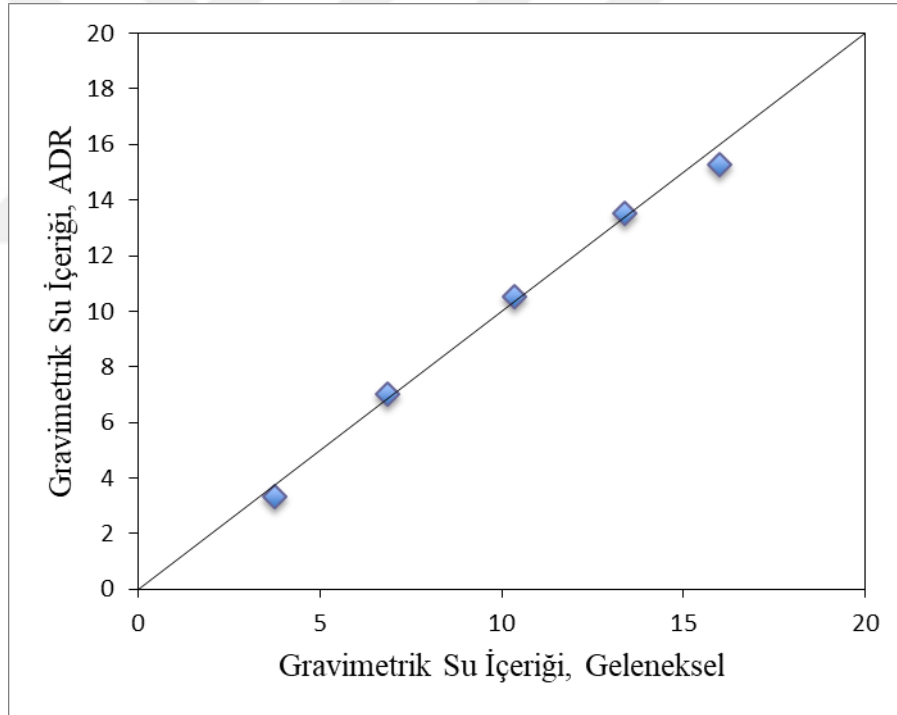
Grafik kontrol edildiğinde değerlerin 1:1 çizgisinin yukarısında yer aldığı, yani gerçek değerlerinden daha büyük olduğu görülmüştür.

Gravimetrik su içeriklerinin kıyaslandığı tablo ise aşağıda verilmiştir.

Tablo 6.120. SM için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
3,76	3,35
6,88	7,03
10,34	10,54
13,37	13,52
16,01	15,26

Şekil 6.124’de ise gevşek SM için gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslanması yapılmaktadır.



Şekil 6.124. SM için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

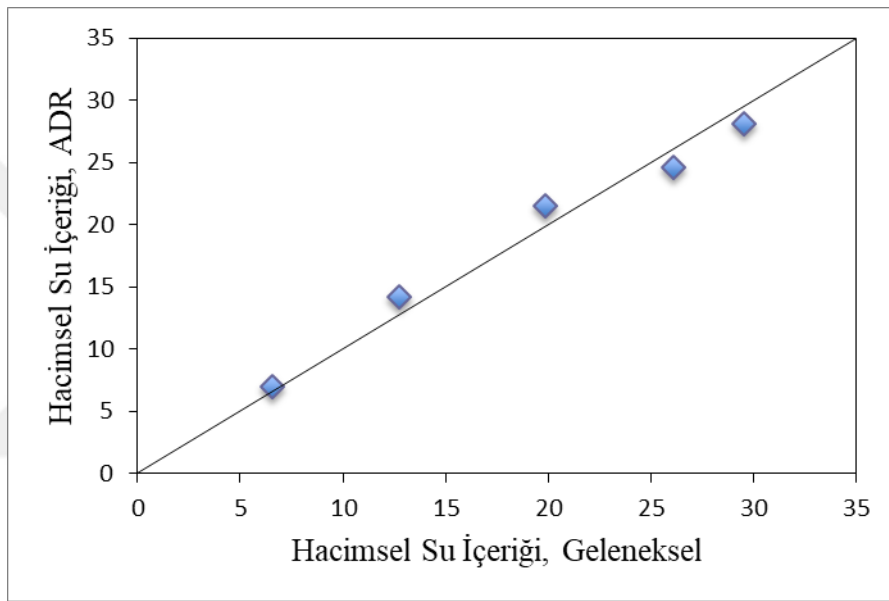
Grafik kontrol edildiğinde hemen hemen tüm numuneler için değerlerin 1:1 çizgisinde yer aldığı görülmektedir.

Sıkı yoğunlukta hazırlanan SM numuneleri üzerinde yapılan ölçümler sonucu elde edilen hacimsel su içeriği değerleri Tablo 6.121’ deki gibidir.

Tablo 6.121. SM için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem				ADR Ölçümleri			
w (%)	ρ_k (grcm ⁻³)	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a ₀	a ₁	θ (%)
3,76	1,705	6,54	0,262	2,3920	1,8705	0,0752	6,93
6,88	1,816	12,73	0,408	2,9350	1,8705	0,0752	14,16
10,34	1,888	19,89	0,564	3,4870	1,8705	0,0752	21,50
13,37	1,916	26,11	0,625	3,7175	1,8705	0,0752	24,56
16,01	1,809	29,52	0,691	3,9872	1,8705	0,0752	28,15

Hacimsel su içeriğinin grafik halinde kıyaslanması ise Şekil 6.125’ te yapılmıştır.



Şekil 6.125. SM için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

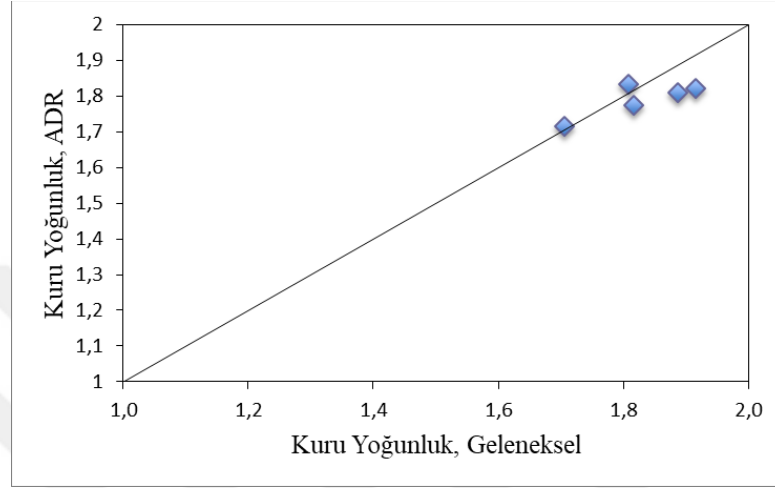
Şekil kontrol edildiğinde değerlerin 1:1 çizgisine yakın seyrettiği görülmektedir.

Sıkı yoğunluktaki SM numunelerinde elde edilen kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.122’ de verilmiştir.

Tablo 6.122. SM için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonks.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,705	0,262	2,3920	0,217	0,3727	-1,2844	0,849	1,714
1,816	0,408	2,9350	0,217	0,3727	-1,2844	1,679	1,773
1,888	0,564	3,4870	0,217	0,3727	-1,2844	2,654	1,810
1,916	0,625	3,7175	0,217	0,3727	-1,2844	3,100	1,822
1,809	0,691	3,9872	0,217	0,3727	-1,2844	3,652	1,834

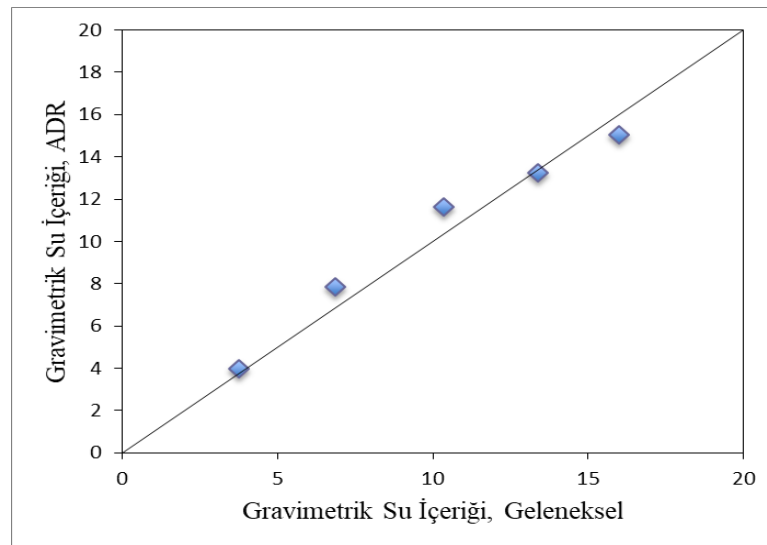
Kuru yoğunluk değerlerinin grafik halinde kıyaslanması ise Şekil 6.126’da gösterilmiştir. Grafik kontrol edildiğinde birkaç numune için değerlerin 1:1 çizgisinde yer aldığı, diğerlerin de ise 1:1 çizgisinin altında yer aldığı görülmektedir. Bu da zemin içindeki siltten kaynaklandığı düşünülmektedir. Gravimetrik su içeriği değerleri ise Tablo 6.123’ te verilmiştir.



Şekil 6.126. SM için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Tablo 6. 123. SM için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
3,76	3,97
6,88	7,83
10,34	11,65
13,37	13,23
16,01	15,05



Şekil 6.127. SM için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Şekil 6.127’ de ise gravimetrik su içeriği değerleri grafik olarak gösterilmiştir. Değerler neredeyse 1:1 çizgisine yakın seyretmiştir.

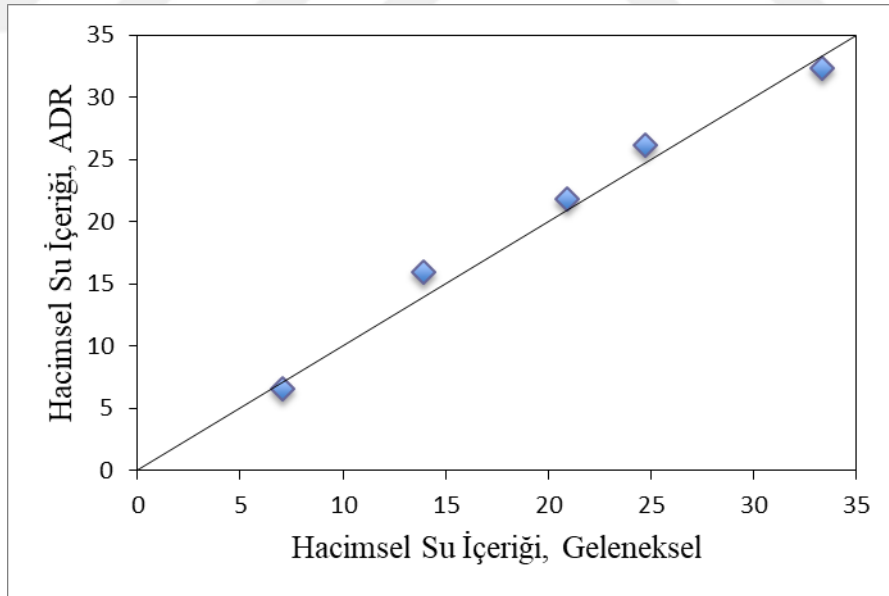
6.2.15. SC zemini test numuneleri

Gevşek sıklıkta hazırlanan SC numuneleri üzerinde yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen hacimsel su içeriği değerleri Tablo 6.124’ te verilmiştir.

Tablo 6.124. SC için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (grcm^{-3})	θ (%)	mV	$\epsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
4,45	1,558	7,07	0,269	2,4200	1,95	0,0721	6,52
8,18	1,671	13,93	0,455	3,0998	1,95	0,0721	15,95
12,00	1,709	20,91	0,574	3,5238	1,95	0,0721	21,83
13,81	1,758	24,75	0,655	3,8370	1,95	0,0721	26,17
19,30	1,695	33,34	0,756	4,2814	1,95	0,0721	32,33

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.128’ de gösterilmiştir.



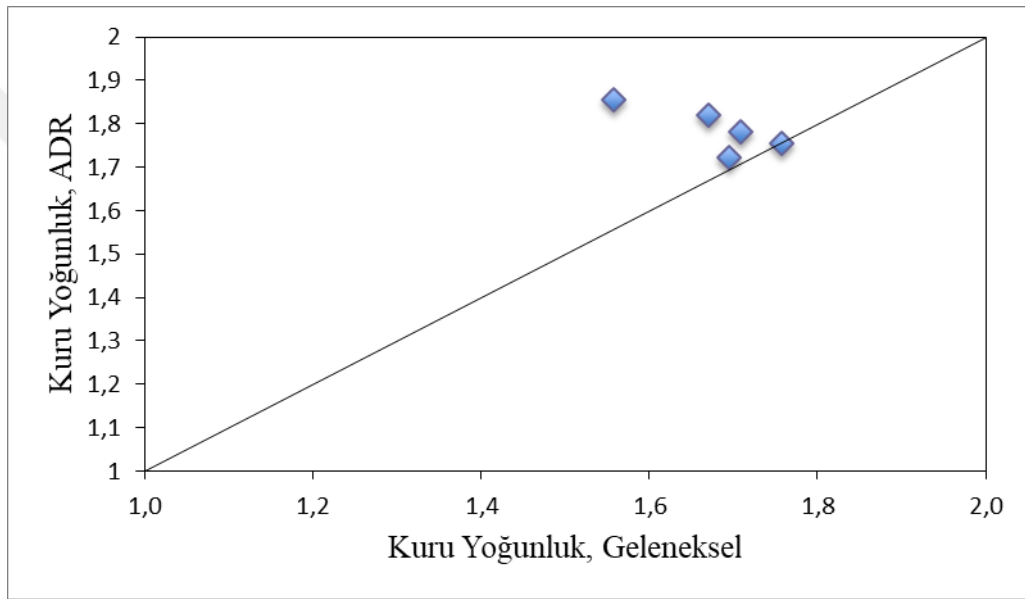
Şekil 6. 128. SC için hacimsel su içeriği değerleri (gevşek)

Şekil kontrol edildiğinde tüm değerlerin neredeyse 1:1 çizgisi üzerinde ya da yakınında yer aldığı görülmektedir. Kuru yoğunluk değerleri ise Tablo 6.125’ te verilmiştir.

Tablo 6.125. SC için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonk.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,558	0,269	2,4200	0,5005	-1,1225	0,427	0,642	1,855
1,671	0,455	3,0998	0,5005	-1,1225	0,427	1,757	1,820
1,709	0,574	3,5238	0,5005	-1,1225	0,427	2,686	1,781
1,758	0,655	3,8370	0,5005	-1,1225	0,427	3,489	1,755
1,695	0,756	4,2814	0,5005	-1,1225	0,427	4,795	1,722

Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı grafik Şekil 6.129’ da gösterilmektedir.



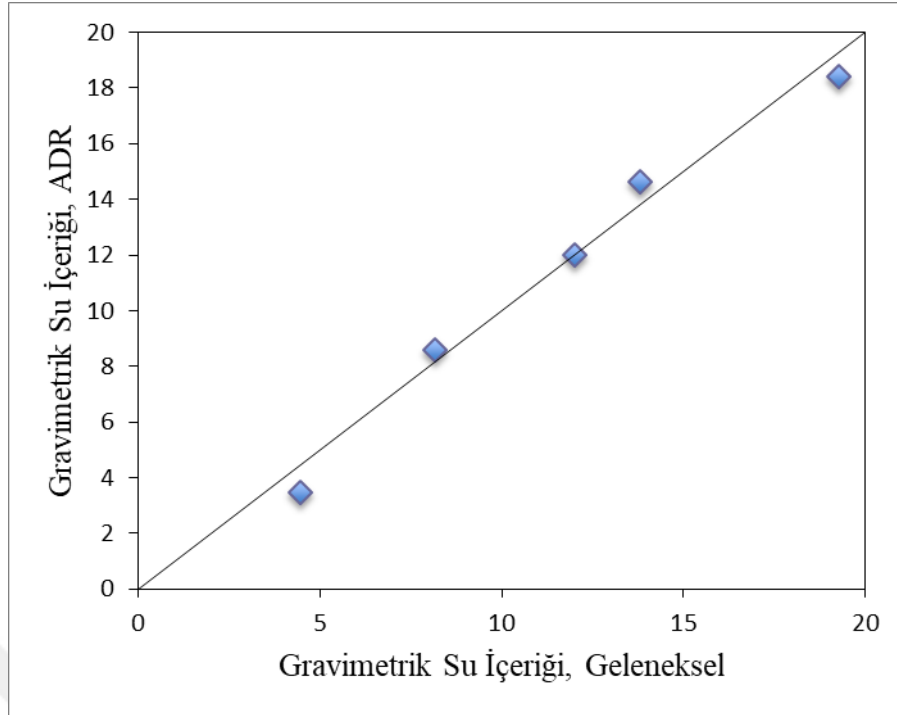
Şekil 6.129. SC için kuru yoğunluk değerleri (gevşek)

Şekil kontrol edildiğinde ise değerlerin 1:1 bandının üzerinde kalmasına rağmen değerler en fazla 0,3grcm⁻³ mertebesinde olduğu görülmüştür. Gevşek sıklıkta hazırlanan SC numuneleri için bulunan gravimetrik su içeriği değerleri ise Tablo 6.126’ da gösterilmiştir.

Tablo 6.126. SC için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
4,45	3,45
8,18	8,60
12,00	12,02
13,81	14,63
19,30	18,43

Değerlerin kıyaslandığı grafik ise Şekil 6.130’ da verilmiştir.



Şekil 6.130. SC için gravimetrik su içeriği değerleri (gevşek)

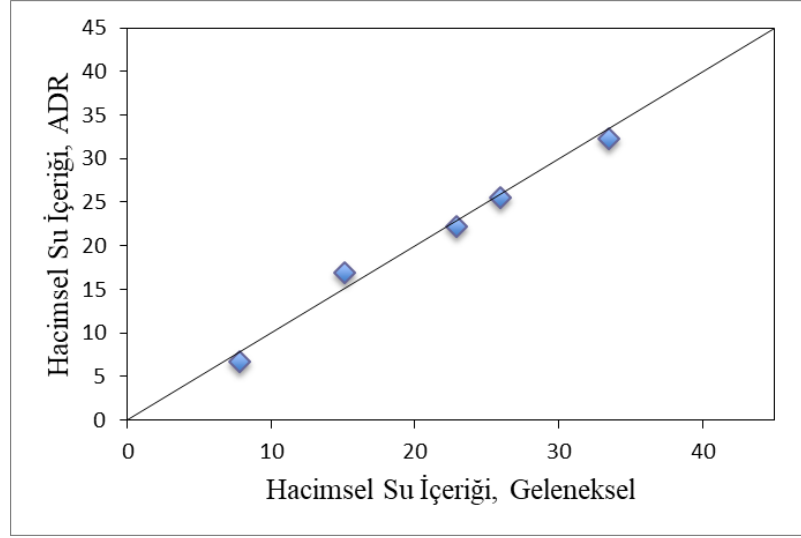
Şekil kontrol edildiğinde değerlerin 1:1 çizgisi üzerinde ve civarında toparlandığı görülmektedir.

Sıkı yoğunlukta hazırlanan SC için hacimsel su içeriği değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 6.127. SC için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem			ADR Ölçümleri				
w (%)	ρ_k (g/cm ³)	θ (%)	mV	$\varepsilon^{0,5}$	a_0	a_1	θ (%)
4,45	1,718	7,79	0,272	2,4319	1,95	0,0721	6,68
8,18	1,811	15,10	0,476	3,1732	1,95	0,0721	16,97
12,00	1,874	22,92	0,582	3,5535	1,95	0,0721	22,24
13,81	1,84	25,90	0,644	3,7926	1,95	0,0721	25,56
19,30	1,704	33,52	0,756	4,2814	1,95	0,0721	32,33

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir. Şekil kontrol edildiğinde tüm değerlerin 1:1 çizgisinde yer aldığı görülmektedir.



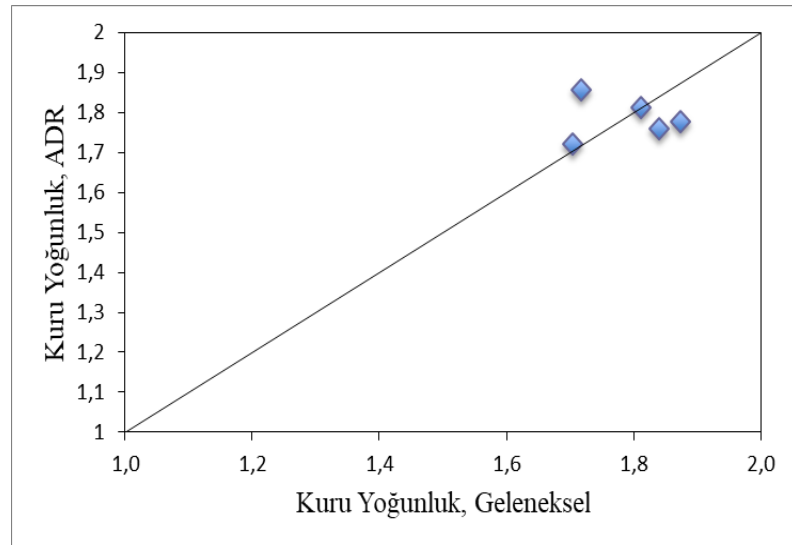
Şekil 6.131. SC için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Kuru yoğunluk değerlerini ise Tablo 6.128’ de gösterilmiştir.

Tablo 6.128. SC için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Geleneksel Yöntem	ADR Ölçümleri		Kalibrasyon Katsayıları			Transfer Fonk.	ADR
ρ_k (grcm ⁻³)	mV	$\epsilon^{0,5}$	c ₂	c ₁	c ₀	y=f(x)	ρ_k (grcm ⁻³)
1,718	0,272	2,4319	0,5005	-1,1225	0,427	0,657	1,856
1,811	0,476	3,1732	0,5005	-1,1225	0,427	1,905	1,813
1,874	0,582	3,5535	0,5005	-1,1225	0,427	2,758	1,778
1,84	0,644	3,7926	0,5005	-1,1225	0,427	3,369	1,758
1,704	0,756	4,2814	0,5005	-1,1225	0,427	4,795	1,722

Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı grafik ise aşağıda verilmiştir.



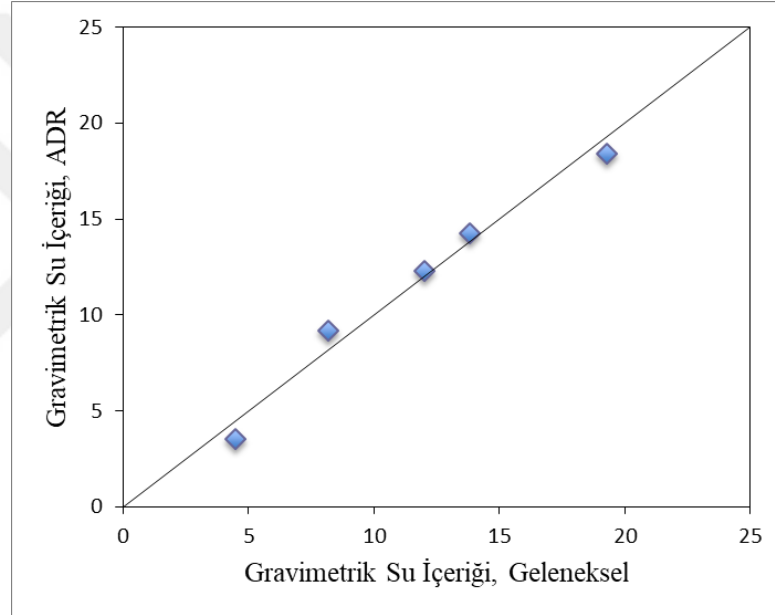
Şekil 6.132. SC için kuru yoğunluk değerleri (sıkı)

Şekil kontrol edildiğinde değerlerin 1:1 çizgisinden uzaklaşma eğiliminde olduğu görülmektedir. Fakat buna rağmen aradaki fark $0,1 \text{ grcm}^{-3}$ civarındadır.

Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslandığı tablo ise aşağıdaki gibidir.

Tablo 6.129. SC için gravimetrik su içeriği değerleri (sıkı)

Geleneksel w (%)	ADR w (%)
4,45	3,53
8,18	9,18
12,00	12,27
13,81	14,26
19,30	18,43



Şekil 6.133. SC için hacimsel su içeriği değerleri (sıkı)

Şekil 6.133' te ise gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslandığı görülmektedir. Değerler kontrol edildiğinde 1:1 bandı üzerinde ve çevresinde yer aldığı görülmüştür.

7. DENEY SONUÇLARI

Bölüm 6’ da tek tek üzerinde durulan numuneler için bu bölümde toplu halde irdelenme yapılmış, deney sonuçları ona göre derlenmiştir. Kum – Kaolin karışımları kendi içinde, Kum – Kil karışımları kendi içinde düzenlenmiştir. Farklı enerji seviyelerinde sıkıştırılan numunelerde ise kil grubu (CH, CI ve CL) kendi içinde, silt grubu (MH, MI ve ML) kendi içinde, içinde inceler içermeyen kum grubu (SP ve SM) kendi içinde çift simgeli zeminler (SP-SM, SP-SC, SW-SM ve SW-SC) kendi içinde ve inceler içerek kumlar (SM ve SC) ise kendi içinde düzenlenmiştir.

Bu bölümde hacimsel su içerikleri, kuru yoğunluklar ve gravimetrik su içerikleri yukarıda belirtilen gruplar için tablo ve grafik şeklinde sunulmuştur. Ayrıca sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için geleneksel yöntemlerle belirlenen aynı değerlerden, ADR ölçümleri ile belirlenen değerler arasındaki farklar kontrol edilerek, gerçeğe ne kadar yakın oldukları tespit edilmiştir.

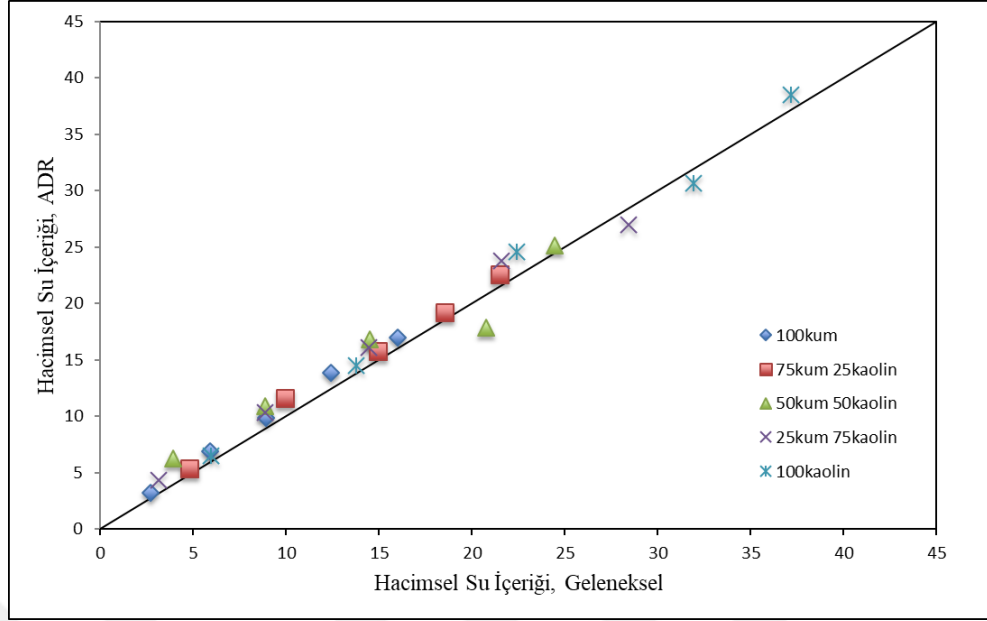
7.1. Kum – Kaolin Karışımları

Ağırlıkça farklı oranlarda karıştırılan kum – kaolin karışımları için kalibrasyon katsayıları belirlendikten sonra, test numunelerinden ölçümler alınmış ve hacimsel su içeriği, kuru yoğunluk ve gravimetrik su içeriği değerleri tahmin edilmiştir. Değerleri gerçek değerler ile kıyaslamak için geleneksel yöntemlerle de hacimsel su içeriği, kuru yoğunluk ve gravimetrik su içerikleri bulunmuştur. Aşağıda gösterilen Tablo 7.1’ de hem geleneksel yöntemlerle, ADR ölçümleriyle bulunan değerler toplu olarak verilmiştir. Ayrıca yine aynı tabloda değerlerin birbirlerinden ne kadar uzaklaştığını görmek amacıyla geleneksel yöntemlerle bulunan değerlerden, ADR yöntemi ile belirlenen değerler çıkartılmıştır. Aradaki bu fark çalışmada “Hata” olarak adlandırılmıştır.

Geleneksel yöntemlerle bulunan hacimsel su içeriği değerleri ile ADR ölçümleri ile bulunan hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik Şekil 7.1’ de verilmiştir.

Tablo 7.1. Kum – kaolin karışımları

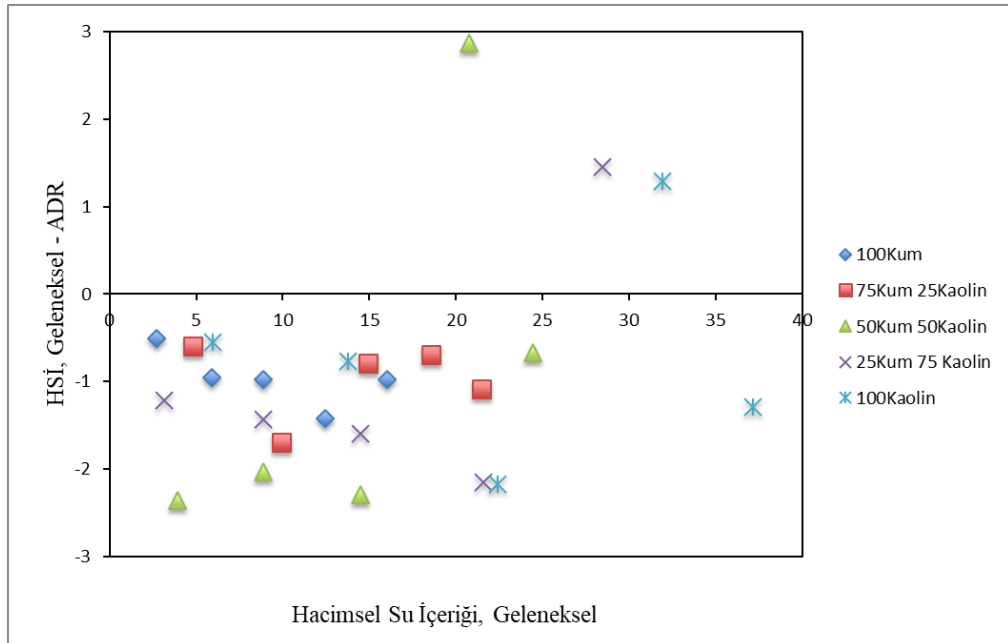
%100 KUM								
Hacimsel Su İçeriği, %			Kuru Yoğunluk, grcm ⁻³			Gravimetrik Su İçeriği, %		
Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)
2,72	3,23	-0,51	1,57	1,54	0,03	1,70	2,06	-0,36
5,90	6,85	-0,95	1,56	1,54	0,02	3,71	4,35	-0,64
8,90	9,88	-0,98	1,54	1,56	-0,02	5,68	6,22	-0,54
12,43	13,85	-1,42	1,56	1,58	-0,02	7,82	8,61	-0,79
16,02	16,99	-0,97	1,58	1,59	-0,01	9,92	10,47	-0,55
%75 KUM + %25 KAOLİN								
Hacimsel Su İçeriği, %			Kuru Yoğunluk, grcm ⁻³			Gravimetrik Su İçeriği, %		
Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)
4,81	5,40	-0,59	1,79	1,91	-0,12	2,64	2,77	-0,13
9,94	11,63	-1,70	1,86	1,88	-0,01	5,24	6,08	-0,84
14,94	15,73	-0,79	1,90	1,85	0,05	7,73	8,35	-0,62
18,55	19,24	-0,69	1,87	1,83	0,05	9,73	10,34	-0,61
21,50	22,58	-1,08	1,76	1,81	-0,05	12,01	12,27	-0,26
%50 KUM + %50 KAOLİN								
Hacimsel Su İçeriği, %			Kuru Yoğunluk, grcm ⁻³			Gravimetrik Su İçeriği, %		
Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)
3,91	6,27	-2,36	1,61	1,72	-0,11	2,38	3,58	-1,20
8,85	10,89	-2,03	1,64	1,71	-0,06	5,29	6,26	-0,97
14,49	16,79	-2,30	1,70	1,68	0,02	8,37	9,79	-1,42
20,75	17,88	2,87	1,74	1,68	0,06	11,72	10,45	1,27
24,43	25,11	-0,68	1,62	1,65	-0,03	14,81	14,90	-0,10
%25 KUM + %75 KAOLİN								
Hacimsel Su İçeriği, %			Kuru Yoğunluk, grcm ⁻³			Gravimetrik Su İçeriği, %		
Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)
3,13	4,34	-1,21	1,29	1,40	-0,11	2,38	3,04	-0,66
8,88	10,31	-1,43	1,46	1,47	-0,01	5,96	6,88	-0,92
14,48	16,08	-1,60	1,50	1,52	-0,02	9,46	10,40	-0,94
21,61	23,76	-2,15	1,60	1,57	0,03	13,28	14,84	-1,56
28,45	27,00	1,46	1,56	1,59	-0,03	17,89	16,65	1,24
%100 KAOLİN								
Hacimsel Su İçeriği, %			Kuru Yoğunluk, grcm ⁻³			Gravimetrik Su İçeriği, %		
Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)
5,96	6,50	-0,55	1,40	1,52	-0,12	4,18	4,20	-0,02
13,75	14,52	-0,76	1,48	1,56	-0,08	9,10	9,12	-0,03
22,41	24,58	-2,17	1,57	1,55	0,02	14,05	15,58	-1,54
31,93	30,64	1,29	1,61	1,54	0,08	19,41	19,58	-0,18
37,17	38,47	-1,30	1,51	1,52	-0,01	24,12	24,84	-0,72



Şekil 7.1. Kum – kaolin karışımları hacimsel su içeriği

Şekil kontrol edildiğinde her ne kadar değerlerin çoğu 1:1 bandı üzerindeymiş gibi dursa da; kum miktarı fazla olan zeminler için belirlenen değerler 1:1 bandı üzerinde toplanmışken, kaolin miktarı arttıkça değerler 1:1 bandından uzaklaşma eğiliminde olmuşlardır.

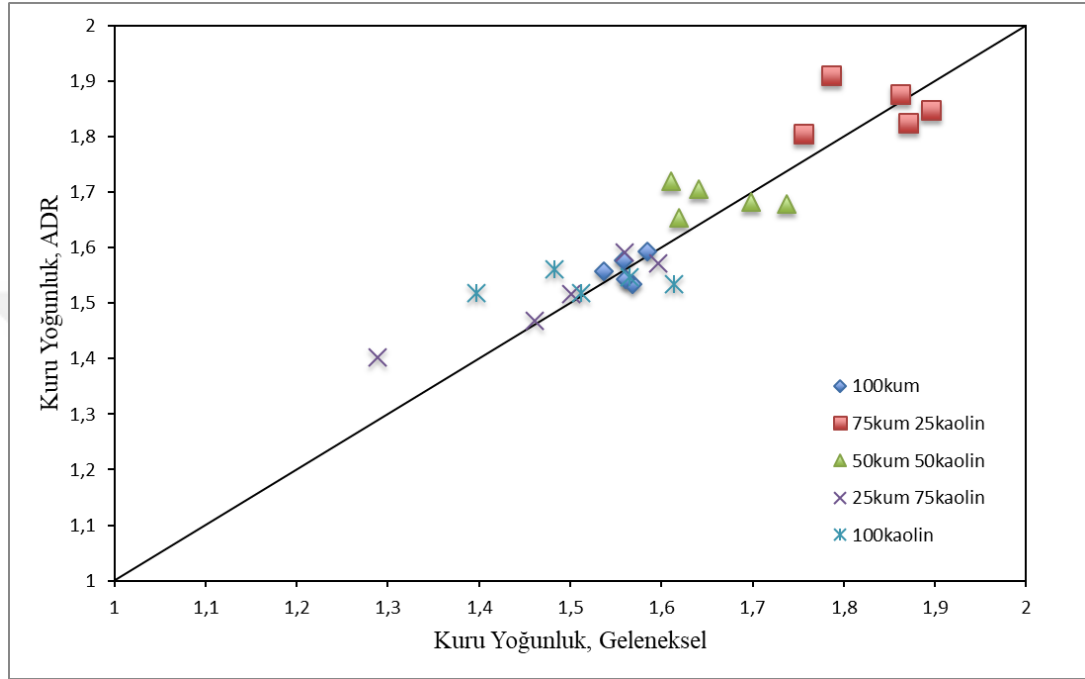
Aradaki farkları görmek için Şekil 7.2’ deki grafik çizilmiştir.



Şekil 7.2. Kum-kaolin hacimsel su içeriği hata miktarları

Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki farklar kontrol edildiğinde, ağırlıklı olarak değerlerin $\pm 1,5$ civarlarında olduğu görülmektedir. Kaolin miktarları arttıkça bu değerlerde artmış ve en büyük farkın $\pm 3,0$ olduğu tespit edilmiştir.

Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 7.3’ deki gibidir.

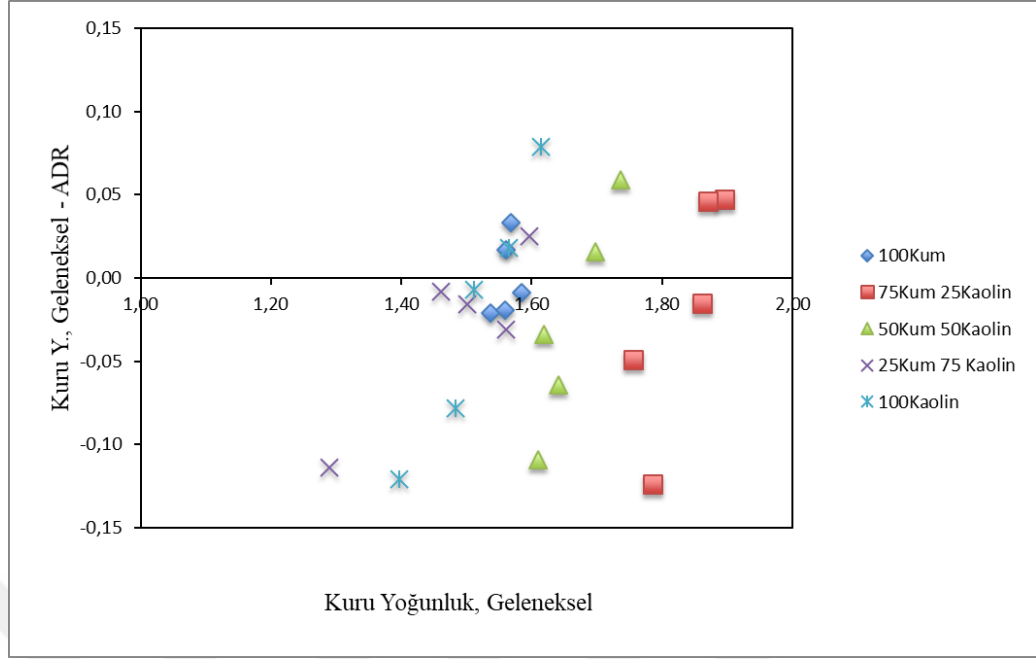


Şekil 7.3. Kum – kaolin karışımları kuru yoğunluk

Kuru yoğunluk değerlerinde de eğilim hacimsel su içeriğindeki benzerlik göstermektedir. Kum miktarları fazla iken kuru yoğunluk değerleri 1:1 bandı çevresinde toplanmışken, kaolin miktarı arttıkça değerler de 1:1 bandından uzaklaşma eğiliminde olmuşlardır. Fakat yine de çoğunlukla değerler birbirine yakınlık göstermişleridir.

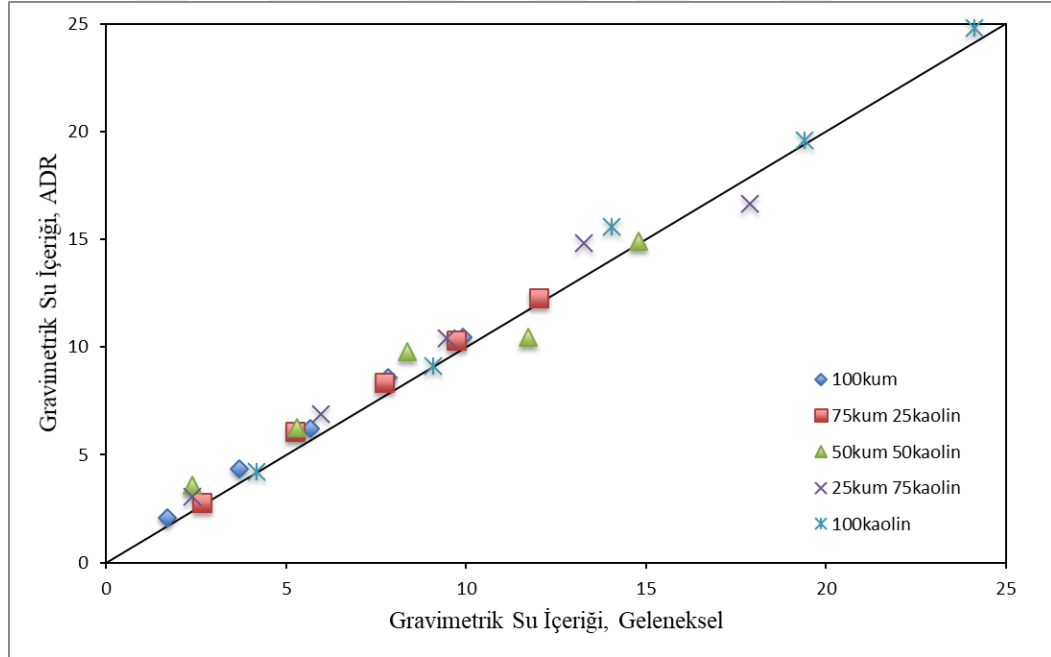
Kuru yoğunluk değerleri arasındaki farkların gösterildiği grafik ise aşağıda Şekil 7.4’ de verilmiştir.

Değerlerin birçoğu için aradaki farklar $\pm 0,05 \text{ grcm}^{-3}$ mertebelerindedir. Kaolin miktarının arttığı karışımlarda hata miktarları da artma eğiliminde olmuşlardır. En büyük hata miktarı ise $\pm 0,15 \text{ grcm}^{-3}$ civarında olmuştur.



Şekil 7.4. Kum-kaolin kuru yoğunluk hata miktarları

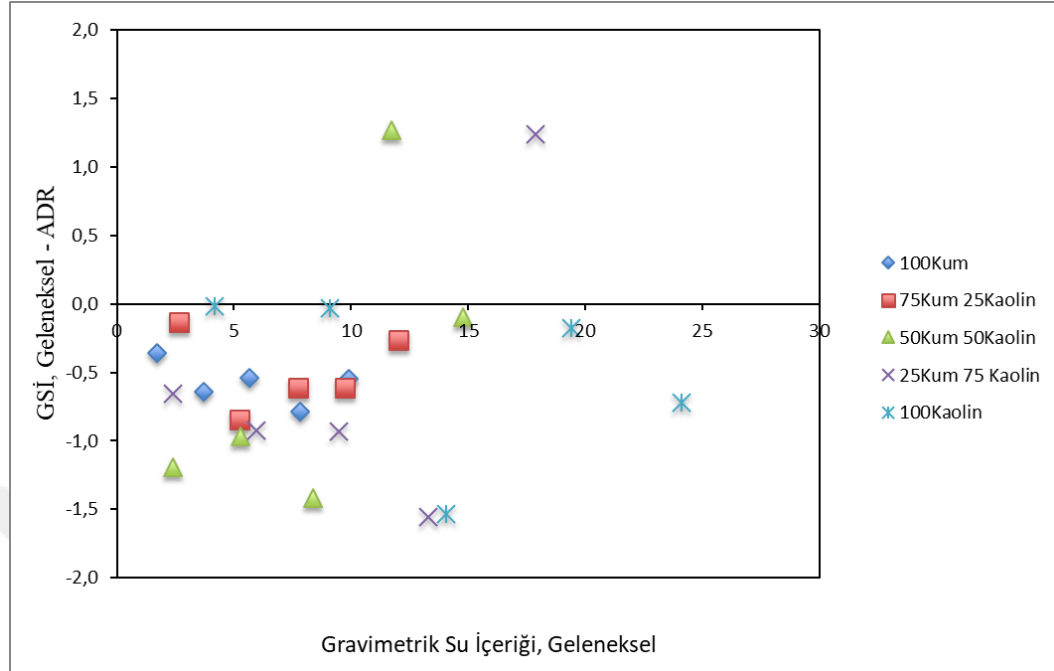
Gravimetrik su içeriğinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 7.5’ de verilmiştir.



Şekil 7.5. Kum – kaolin karışımları gravimetrik su içeriği

Gravimetrik su içeriği değerleri kontrol edildiğinde, değerlerin birçoğunun 1:1 bandı çevresinde kümелendiği görülmektedir. Artan su içeriği değerlerinde bu kümelenme bir miktar açılmış olsa da genel seyri çok uzaklaşma eğiliminde olmamıştır.

Şekil 7.6’ da ise gravimetrik su içeriklerinin farklarının verildiği grafik görülmektedir.



Şekil 7.6. Kum-kaolin gravimetrik su içeriği hata miktarları

Karışım için aradaki farklar incelendiğinde değerlerin birçoğu için $\pm\%1,0$ bandında kaldığı görülmektedir. Sadece birkaç numune de bu değer aşılmış ve en fazla $\pm\%1,5$ mertebelerine ulaşmıştır.

7.2. Kum – Kil Karışımları

Kum – Kaolin karışımlarına benzer olarak Kum – Kil karışımları için de aynı çalışmalar yapılmıştır. Öncelikle hem geleneksel yöntemlerle bulunan, hem de ADR yöntemi ile bulunan değerler Tablo 7.2’ de özetlenmiştir. Yine aynı tabloda bu iki değer arasındaki farklar verilmiştir.

Tablo 7.2. Kum – kil karışımları

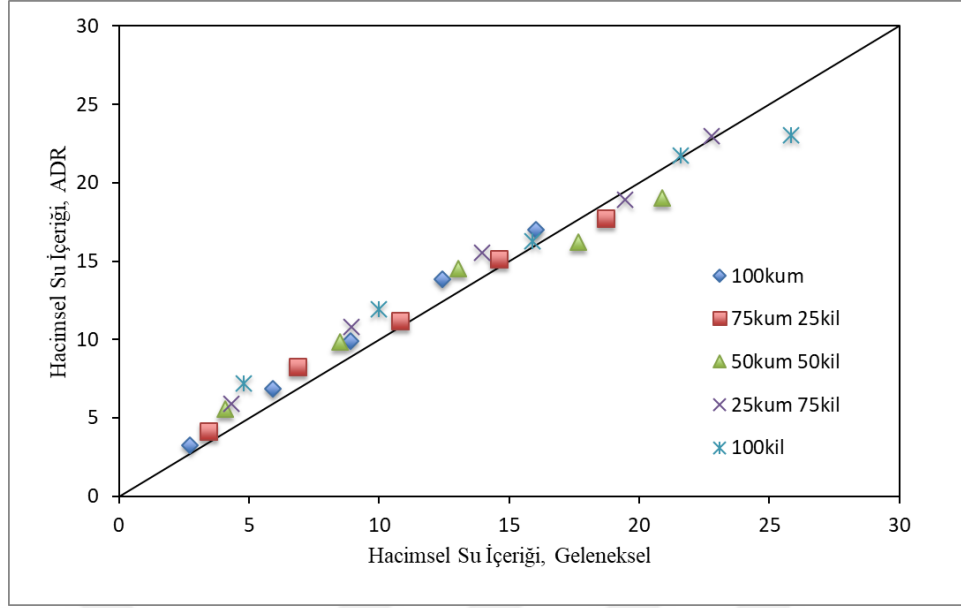
%100 KUM								
Hacimsel Su İçeriği, %			Kuru Yoğunluk, gcm ⁻³			Gravimetrik Su İçeriği, %		
Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)
2,72	3,23	-0,51	1,57	1,54	0,03	1,70	2,06	-0,36
5,90	6,85	-0,95	1,56	1,54	0,02	3,71	4,35	-0,64
8,90	9,88	-0,98	1,54	1,56	-0,02	5,68	6,22	-0,54
12,43	13,85	-1,42	1,56	1,58	-0,02	7,82	8,61	-0,79
16,02	16,99	-0,97	1,58	1,59	-0,01	9,92	10,47	-0,55

Tablo 7.2. (Devam) Kum – kil karışımları

%75 KUM + %25 KİL								
Hacimsel Su İçeriği, %			Kuru Yoğunluk, grcm ⁻³			Gravimetrik Su İçeriği, %		
Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)
3,43	4,15	-0,72	1,74	1,78	-0,04	1,94	2,29	-0,35
6,86	8,30	-1,44	1,75	1,77	-0,02	3,84	4,60	-0,76
10,82	11,20	-0,38	1,76	1,75	0,00	6,04	6,27	-0,22
14,61	15,17	-0,56	1,77	1,73	0,04	8,09	8,58	-0,50
18,71	17,72	0,99	1,73	1,72	0,01	10,62	10,09	0,53
%50 KUM + %50 KİL								
Hacimsel Su İçeriği, %			Kuru Yoğunluk, grcm ⁻³			Gravimetrik Su İçeriği, %		
Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)
4,07	5,57	-1,50	1,75	1,79	-0,04	2,28	3,05	-0,77
8,48	9,84	-1,36	1,76	1,79	-0,03	4,74	5,40	-0,66
13,03	14,55	-1,52	1,80	1,78	0,02	7,10	8,02	-0,92
17,65	16,19	1,46	1,82	1,78	0,05	9,50	8,94	0,56
20,87	19,04	1,83	1,76	1,77	-0,01	11,65	10,55	1,10
%25 KUM + %75 KİL								
Hacimsel Su İçeriği, %			Kuru Yoğunluk, grcm ⁻³			Gravimetrik Su İçeriği, %		
Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)
4,32	5,90	-1,58	1,73	1,77	-0,04	2,46	3,27	-0,82
8,92	10,82	-1,90	1,74	1,76	-0,03	5,04	6,02	-0,98
13,96	15,54	-1,58	1,77	1,75	0,02	7,72	8,70	-0,98
19,44	18,93	0,52	1,79	1,75	0,05	10,64	10,64	0,00
22,77	22,99	-0,22	1,70	1,74	-0,04	13,17	12,99	0,18
%100 KİL								
Hacimsel Su İçeriği, %			Kuru Yoğunluk, grcm ⁻³			Gravimetrik Su İçeriği, %		
Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)	Geleneksel	ADR	Hata (G - A)
4,79	7,19	-2,40	1,63	1,71	-0,08	2,88	4,11	-1,23
10,00	11,96	-1,96	1,69	1,71	-0,02	5,81	6,87	-1,06
15,89	16,25	-0,35	1,75	1,69	0,06	8,91	9,39	-0,48
21,60	21,76	-0,16	1,72	1,68	0,04	12,32	12,67	-0,35
25,84	23,05	2,80	1,62	1,68	-0,05	15,61	13,44	2,17

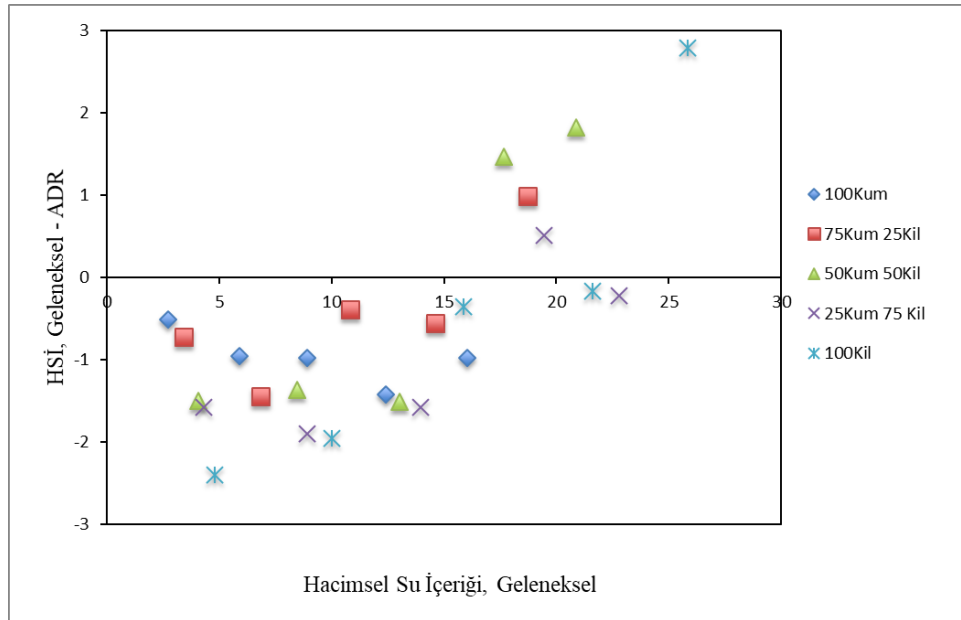
Kum – Kil karışımları için hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik Şekil 7.7’ de verilmiştir.

Kum – Kil karışımları için hacimsel su içeriği değerleri kontrol edildiğinde, su içeriği arttıkça değerlerinde birbirinden uzaklaştığı görülmektedir. Yine benzer şekilde kil miktarı arttıkça değerler yine 1:1 bandından uzaklaşma eğiliminde olmuşlardır.



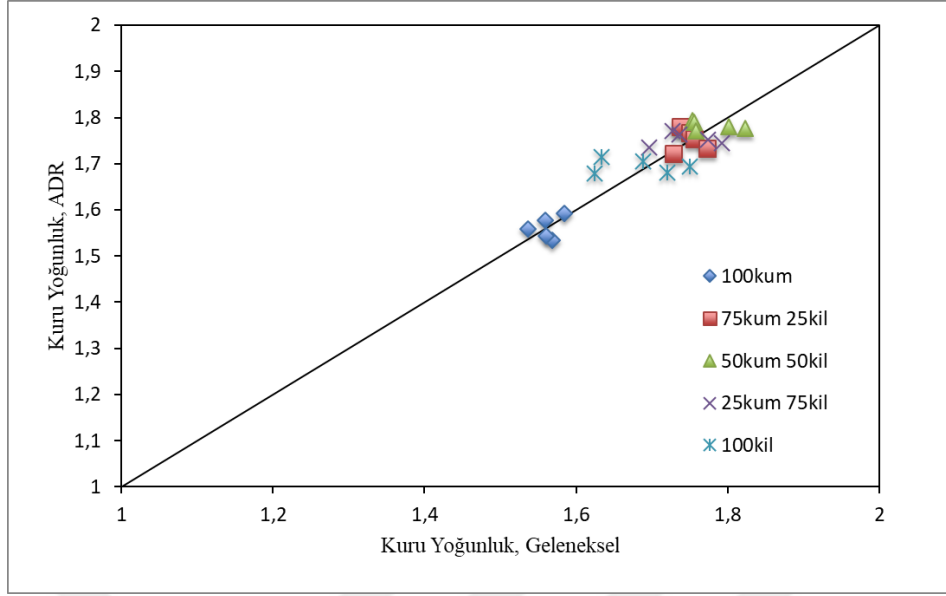
Şekil 7.7. Kum – kil karışımları hacimsel su içeriği

Hata miktarları arasındaki farkların gösterildiği grafik ise Şekil 7.8’ deki gibidir. Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki farklar ağırlıklı olarak $\pm 1,5$ civarlarında olsa da, özellikle %100 kil numunesi için bu miktar $\pm 3,0$ seviyelerine kadar çıkmıştır. Yine aynı şekilden görülmektedir ki, kil miktarları arttıkça hata miktarları da artmıştır.



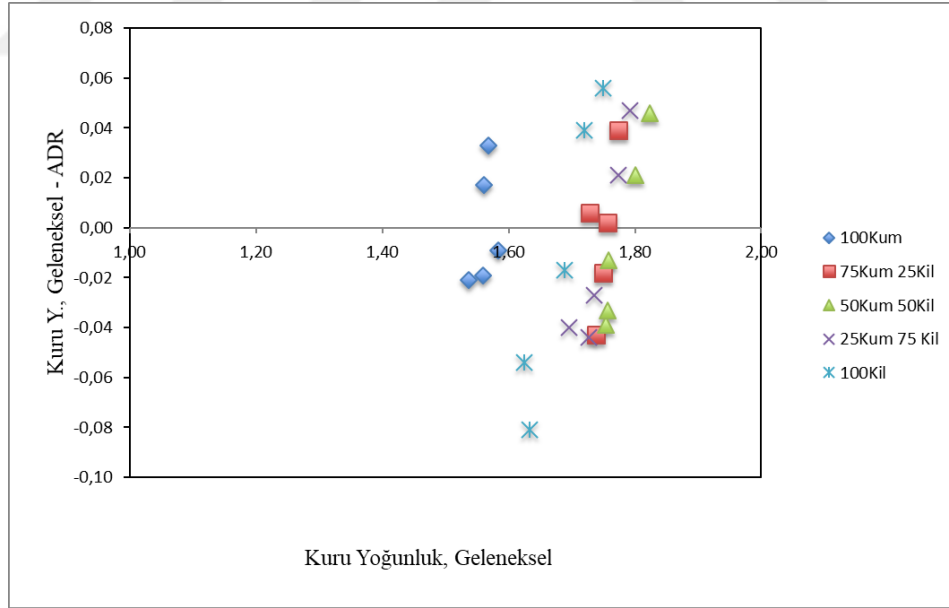
Şekil 7.8. Kum-kil hacimsel su içeriği hata miktarları

Kum – Kil karışımları için kuru yoğunlukların kıyaslandığı grafik ise Şekil 7.9’ da verilmiştir.



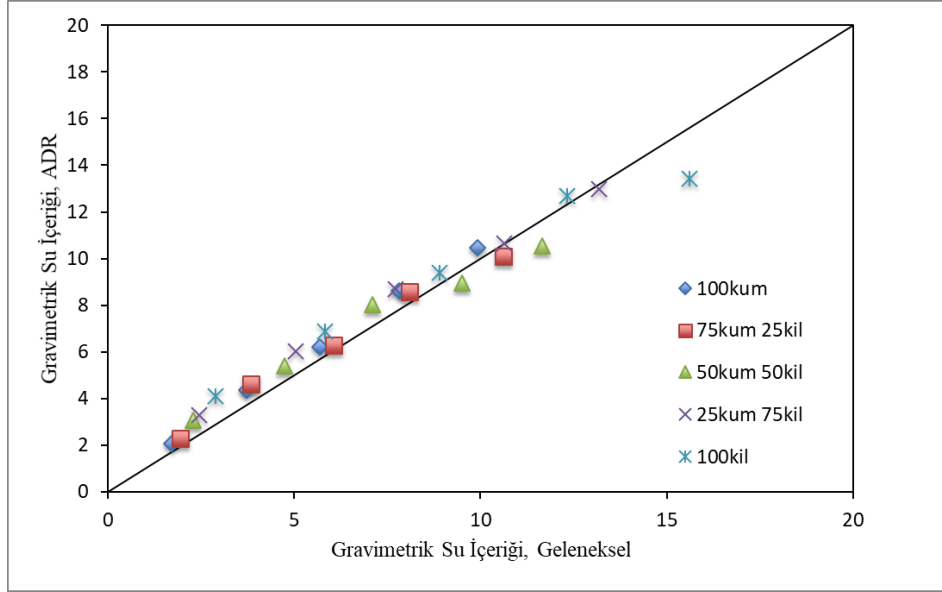
Şekil 7.9. Kum – kil karışımları kuru yoğunluk

Kum – Kil karışımları için her ne kadar değerler 1:1 bandı çevresindeymiş gibi görölse de, kil miktarı arttıkça değerlerin de birbirlerinden uzaklaştığı görülmektedir. Hata miktarlarının gösterildiği grafik ise Şekil 7.10’ daki gibidir.



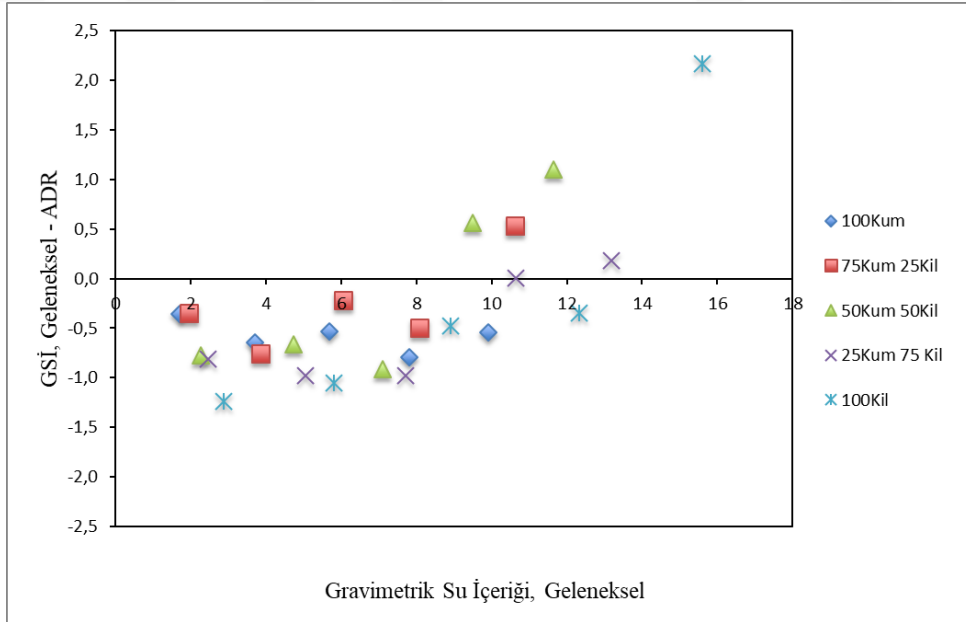
Şekil 7.10. Kum-kil kuru yoğunluk hata miktarları

Kuru yoğunlukların farklarının gösterildiği şekle bakıldığında numuneler için hata miktarlarının $\pm 0,05 \text{ grcm}^{-3}$ bandında kaldığı görülmektedir. Yalnızca %100 kil için bu değer $\pm 0,08 \text{ grcm}^{-3}$ civarına kadar yükselmiştir. Gravimetrik su içeriklerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 7.11’ de verilmiştir.



Şekil 7.11. Kum – kil karışımları gravimetrik su içeriği

Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik kontrol edildiğinde, değerlerin ağırlıklı olarak 1:1 bandı civarında toplandığı görülmektedir. Sadece artan su içeriğinde ve %100 kil için değerler farklılık arz etmektedir. Hata miktarlarının gösterildiği grafik ise Şekil 7.12’ de verilmiştir.



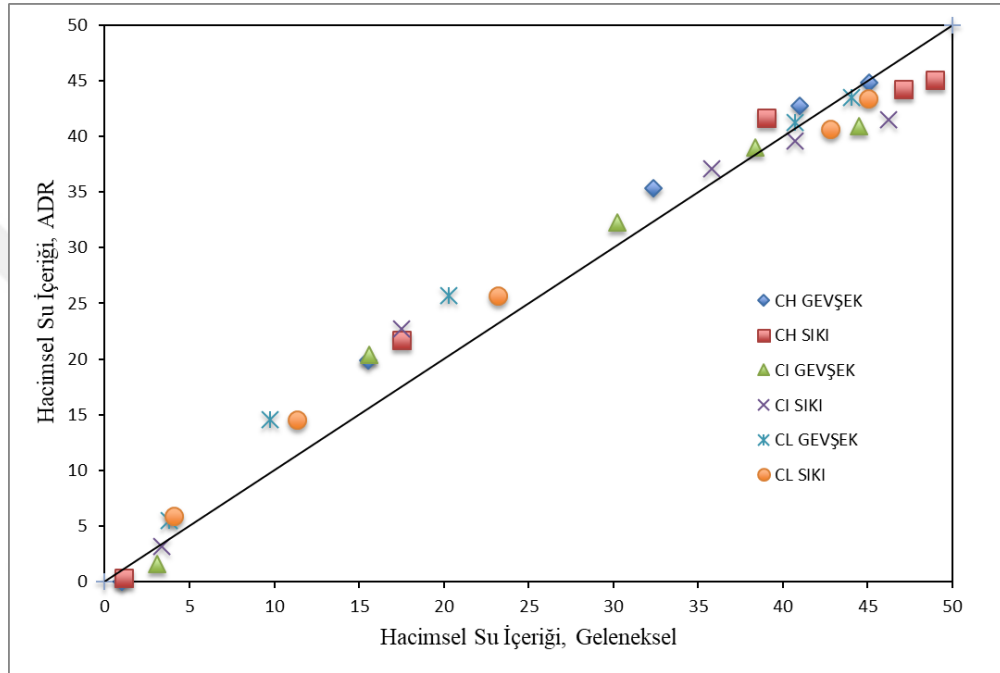
Şekil 7.12. Kum-kil gravimetrik su içeriği hata miktarları

Gravimetrik su içeriği arasındaki farklar kıyaslandığında değerlerin birçoğunun $\pm\%1,0$ bandında kaldığı görülmektedir. Yine %100 kil numunesi için bu değer en fazla $\pm\%2,5$ mertebelerine yaklaşmıştır.

7.3. Kil Grubu (CH, CI ve CL) Zeminler

Bu grup zeminler için test numuneleri gevşek ve sıkı olacak şekilde iki farklı enerji seviyesinde ayarlanmıştı. Fakat bu bölümde sunulan grafiklerde hepsi bir arada toparlanarak gösterilmiştir.

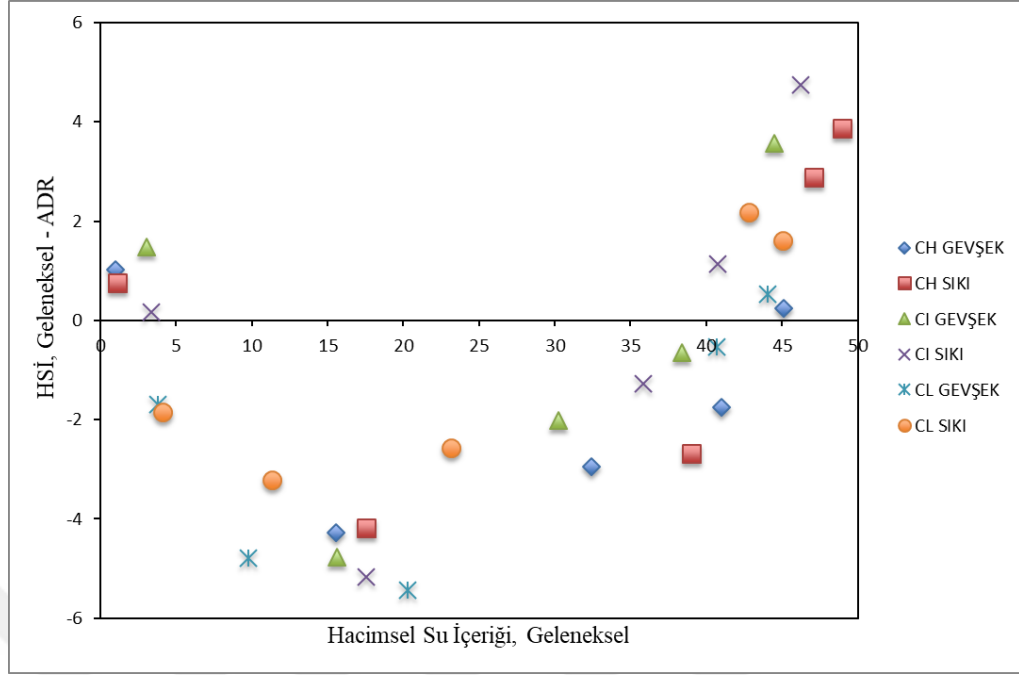
Şekil 7.13’ de hacimsel su içeriği değerlerinin gösterildiği grafik verilmiştir.



Şekil 7.13. Kil grubu hacimsel su içeriği

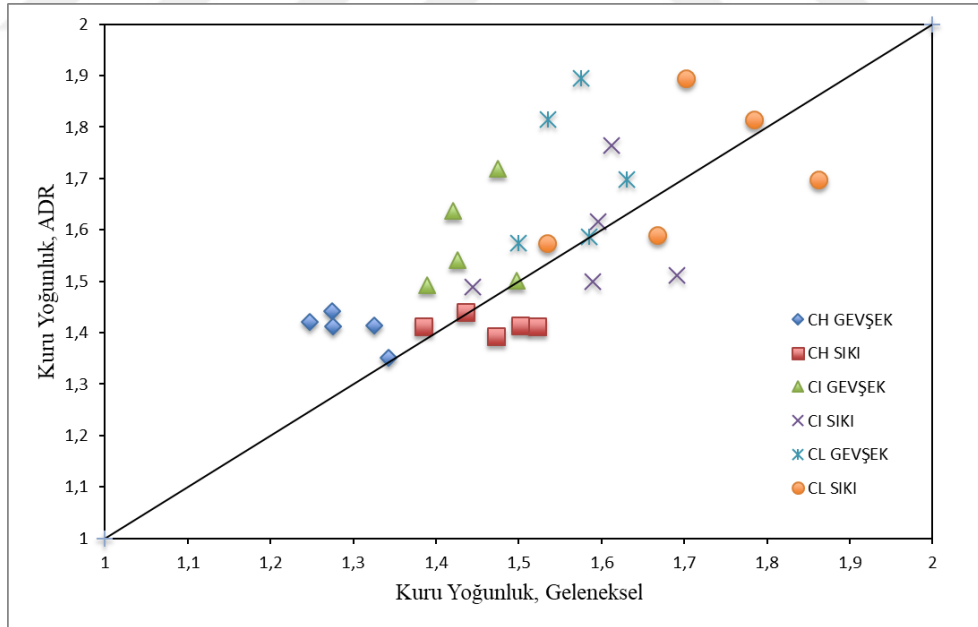
Grafik incelendiğinde değerlerin çoğunlukla 1:1 çizgisinin çevresinde kümелendiği görölse de, bazı yerlerde banttan uzaklaşma da söz konusu olmuştur. Değerlerin 1:1 çizgisinden ne kadar uzaklaştıklarını belirlemek amacı ile geleneksel olarak elde edilen değerlerden, ADR probu ile elde edilen değerlerin farkı alınmıştır. Elde edilen fark değerleri ile geleneksel olarak bulunan değerler yine grafik olarak aşağıdaki gibi Şekil 7.14’ de sunulmuştur.

Grafik kontrol edildiğinde iki değer arasındaki farkın en fazla gevşek CL ve sıkı CI numuneleri için $\pm 5,5$ civarında olduğu görölmektedir. Değerlerin çoğuna bakıldığında ise aradaki farkın ortalama olarak $\pm 3,0$ mertebelerinde olduğu söylenebilir.



Şekil 7. 14. Kıl grubu hacimsel su içeriği hata miktarları

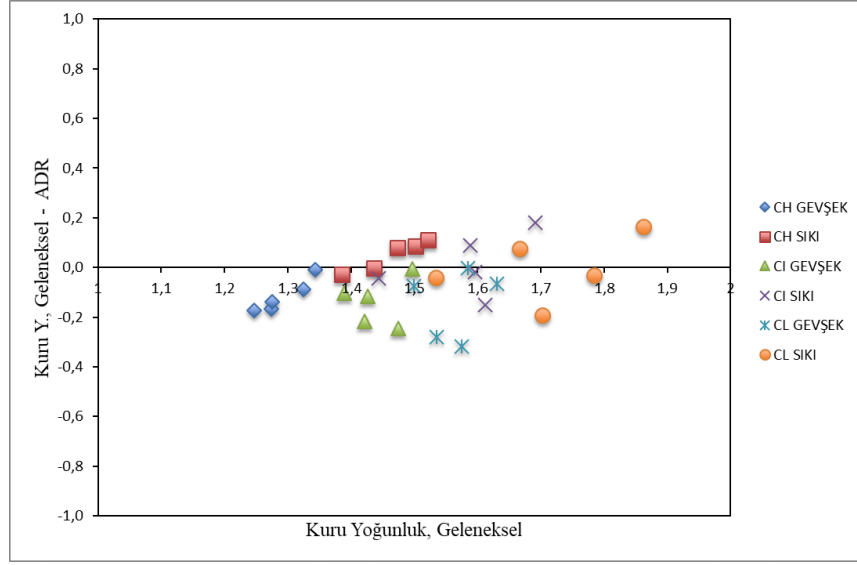
Kıl grubu zeminler için kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı grafik aşağıda Şekil 7.15’ te verilmiştir.



Şekil 7.15. Kıl grubu kuru yoğunluk

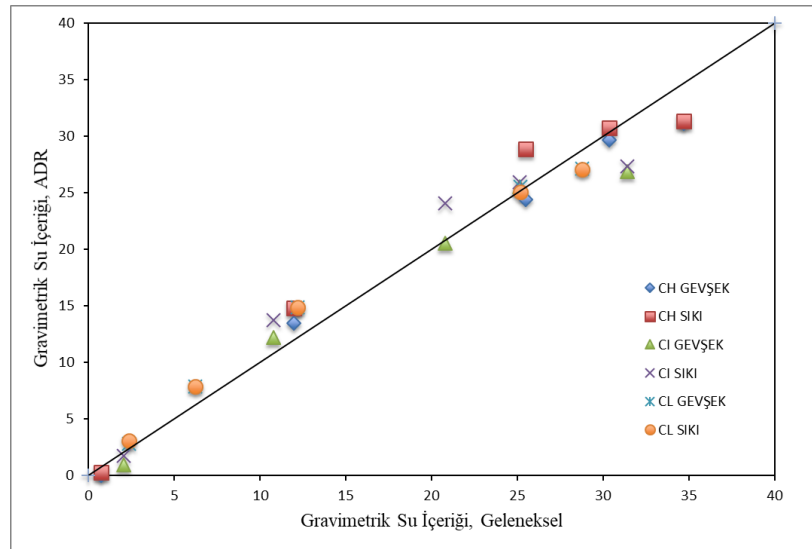
Değerler kontrol edildiğinde, gevşek numuneler 1:1 bandının üst tarafında yer alırken, sıkı numunelerin 1:1 bandının alt ve üstünde yer aldığı görülmüştür.

Şekil 7.16’ da ise kuru yoğunluk farklarının görüldüğü grafik verilmiştir.



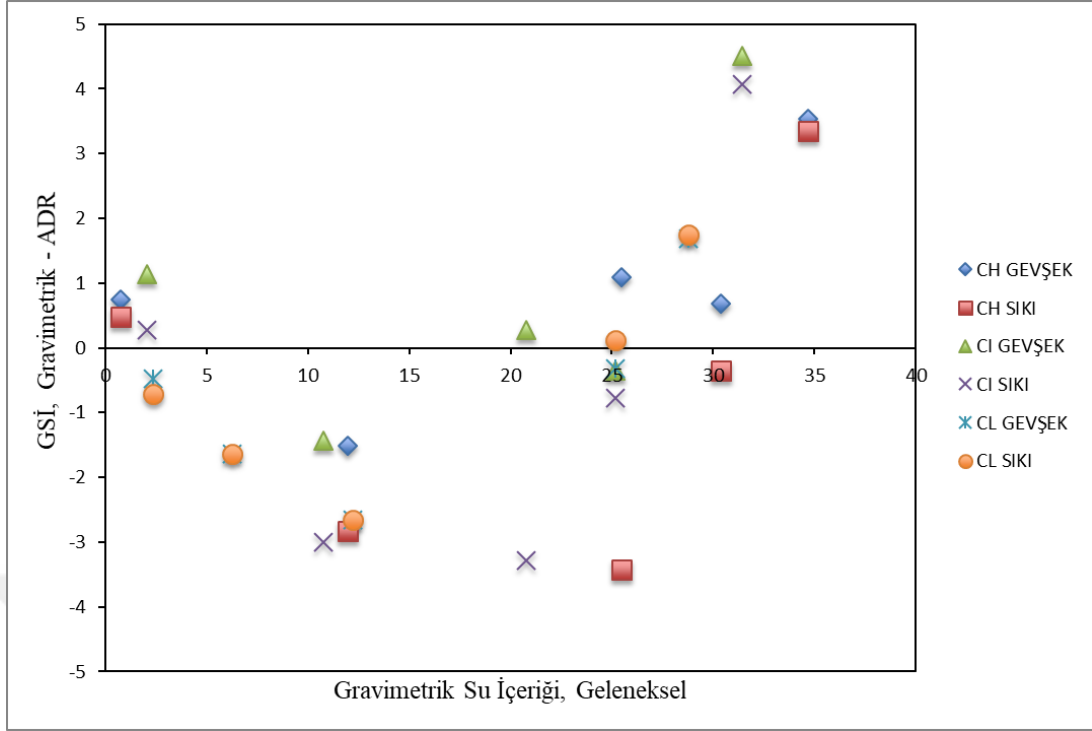
Şekil 7.16. Kil grubu kuru yoğunluk hata miktarları

Grafik kontrol edildiğinde ise aradaki farkın $\pm 0,2 \text{ grcm}^{-3}$ aralığında kaldığı görülmüştür. En fazla gevşek sıklıkta hazırlanan CL için $\pm 0,4 \text{ grcm}^{-3}$ mertebelerinde olduğu görülmektedir. Geleneksel olarak elde edilen gravimetrik su içeriği değerleri ile ADR ölçümleri sonucunda elde edilen gravimetrik su içeriği değerlerinin karşılaştırıldığı grafikte aşağıda Şekil 7.17’ de verilmiştir. Şekil kontrol edildiğinde değerlerin 1:1 çizgisi üzerinde yer almadığı daha çok çevresinde kümелendiği görülmektedir. Artan su içeriği değerlerinde ise çizgiden uzaklaştığı görülmektedir.



Şekil 7.17. Kil grubu gravimetrik su içeriği

Şekil 7.18’ de ise gravimetrik su içeriği değerleri arasındaki farklar görülmektedir.



Şekil 7.18. Kil grubu gravimetrik su içeriği hata miktarları

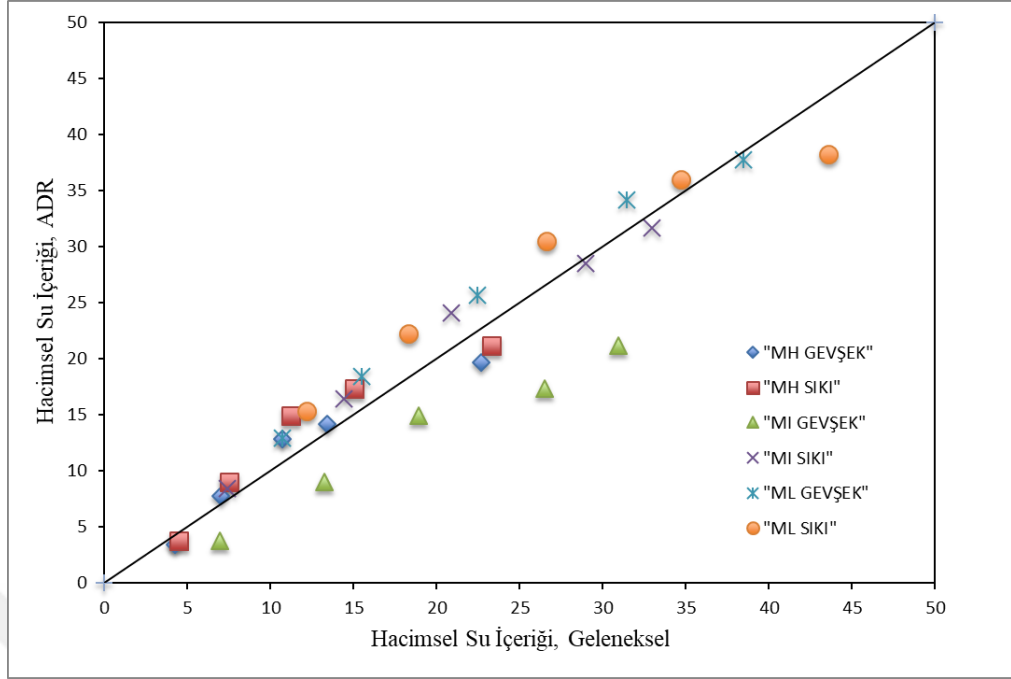
İki değer arasındaki farklar ağırlıklı olarak $\pm 3,0$ bandında olmasına rağmen, en büyük fark gevşek ve sıkı CI numunesi için $\pm 5,0$ civarında olduğu grafikten görülmektedir.

7.4. Silt Grubu (MH, MI ve ML) Zeminler

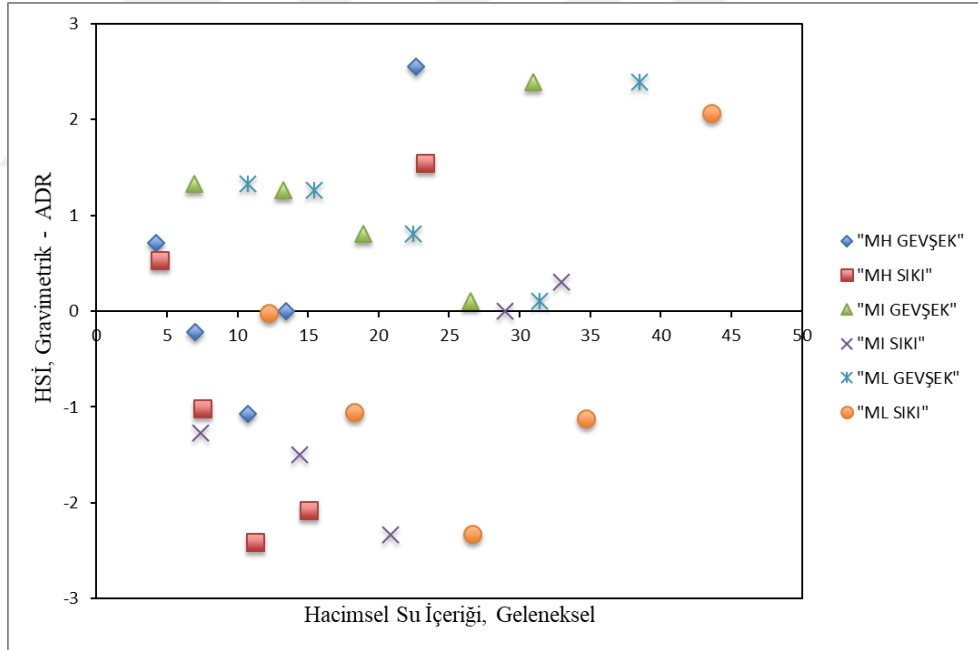
Tıpkı kil numunelerine benzer olarak, silt numuneleri için de elde edilen değerlerin karşılaştırıldığı grafikler aşağıdakiler gibi verilmiştir. Karşılaştırma grafiklerinin yanı sıra, değerler arasındaki farkları gösteren grafikler de ayrıca mevcuttur.

Silt numuneleri için elde edilen hacimsel su içeriği değerlerinin çoğunlukla 1:1 çizgisinin çevresinde toplandığı grafikten görülmektedir. Gevşek MI için değerler çizginin altında yer alırken, diğerlerinin çizginin üstünde yer aldığı görülmektedir.

Şekil 7.20' de ise hacimsel su içeriği değerleri arasındaki farkların gösterildiği grafik verilmiştir.



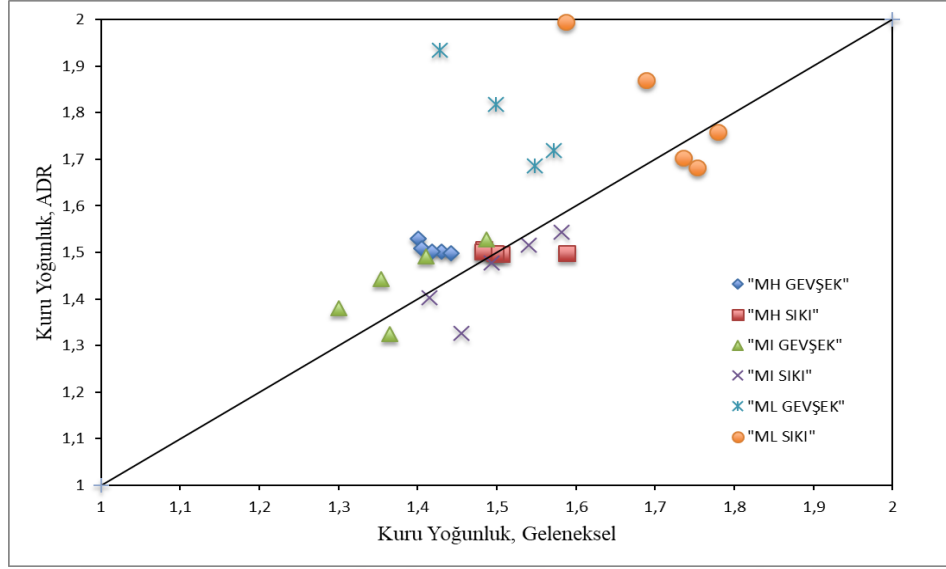
Şekil 7.19. Silt grubu hacimsel su içeriği



Şekil 7.20. Silt grubu hacimsel su içeriği hata miktarları

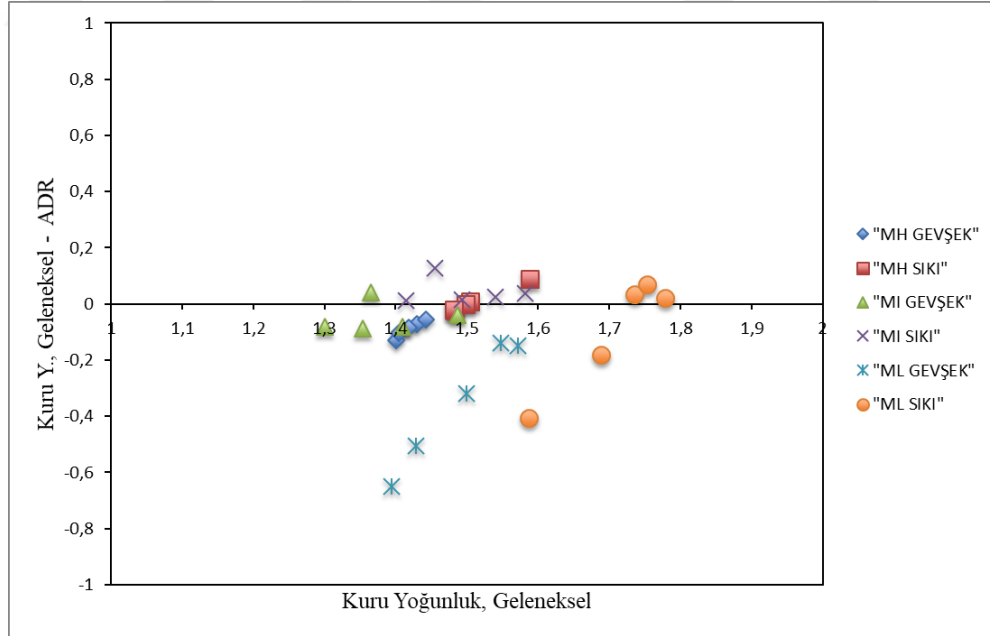
Elde edilen hacimsel su içeriği değerleri arasındaki farklar kontrol edildiğinde, gevşek olarak hazırlanmış numuneler için farklar $\pm 1,0$ aralığında değişirken, sıkı olarak hazırlanan numunelerde farkların daha da arttığı ve $\pm 3,0$ değerine yaklaştığı anlaşılmaktadır.

Kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 7.21’ de verilmiştir.



Şekil 7.21. Silt grubu kuru yoğunluk

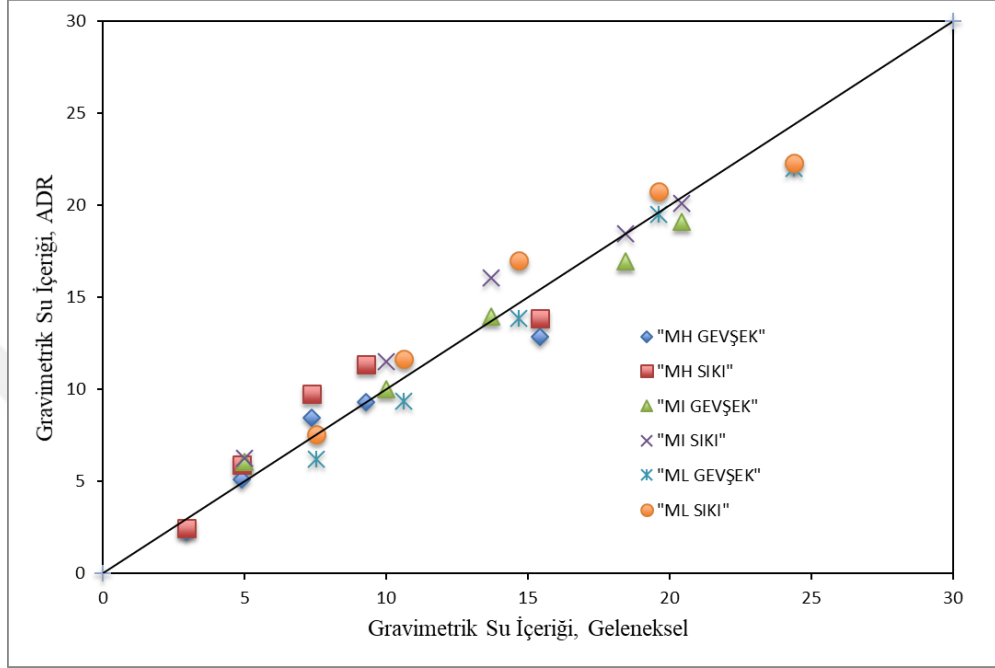
Kuru yoğunluk değerleri kıyaslandığında ise ML numunesi için elde edilen değerlerin 1:1 çizgisinden uzaklaştığı, diğer silt numuneleri için bulunan değerlerin 1:1 çizgisi çevresinde toplandığı görülmektedir. Kuru yoğunluk farklarının gösterildiği grafik ise aşağıda verilmiştir.



Şekil 7. 22. Silt grubu kuru yoğunluk hata miktarları

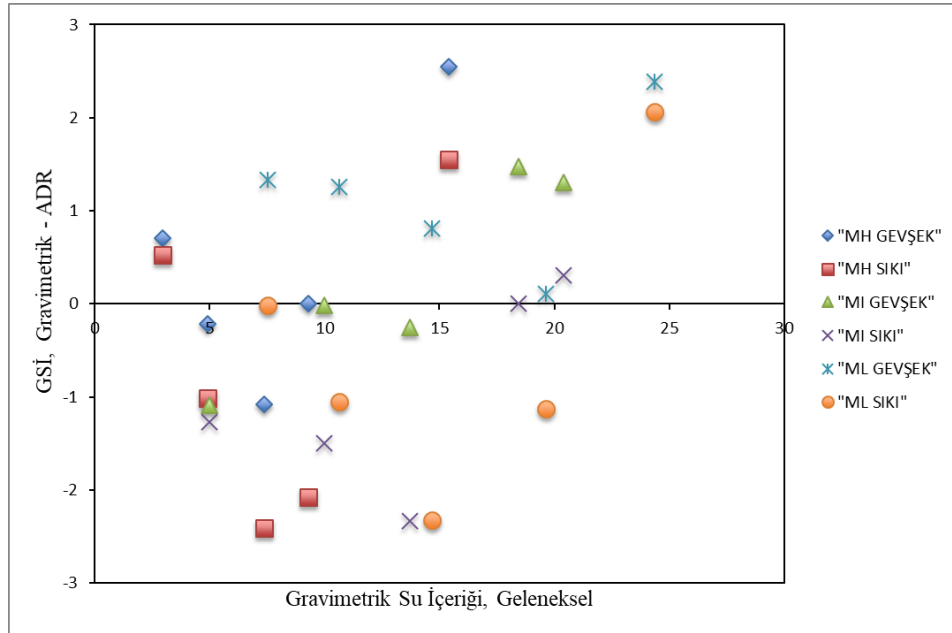
Kuru yoğunluk değerleri arasındaki farkın neredeyse tüm silt numuneleri için $\pm 0,2 \text{ grcm}^{-3}$ aralığında değiştiği görülürken, ML numunelerinde bu farkın biraz daha arttığı ve $\pm 0,7 \text{ grcm}^{-3}$ fark oluştuğu belirlenmiştir. Silt numuneleri için gravimetrik su

içeriklerinin kıyaslandığı grafik Şekil 7.23’ de verilmiştir. Değerlerin bazılar 1:1 çizgisi üzerinde yer alsa da genellikle çizginin üzerinde olmadığı, çizgiden uzaklaşma eğiliminde olduğu görülmektedir. Sıkı olarak hazırlanmış MH ve ML zeminlerinde bu fark açıkça görülmektedir.



Şekil 7.23. Silt grubu gravimetrik su içeriği

Gravimetrik su içeriği arasındaki farklar ise Şekil 7.24’ de verilmiştir.



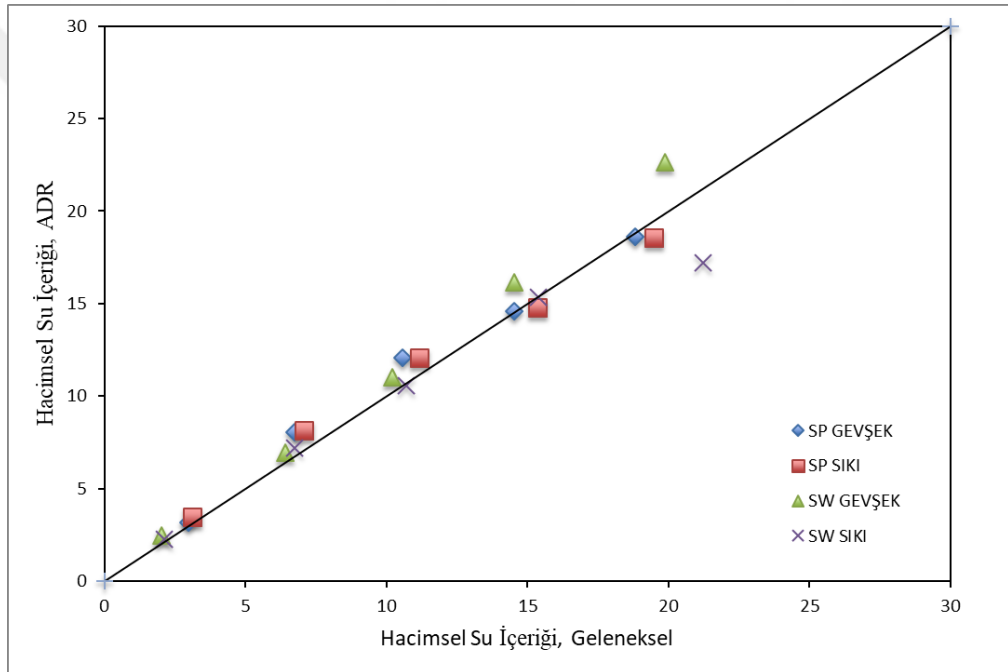
Şekil 7.24. Silt grubu gravimetrik su içeriği hata miktarları

Gravimetrik su içeriği değerleri arasındaki farklar kontrol edilince, sonuçların bir yere toplanmayıp dağınıklık gösterdiği ve $\pm\%3,0$ mertebelerine kadar ulaştığı görülmektedir.

7.5. SP ve SW Zeminleri

Gevşek ve sıkı olarak hazırlanan SP ve SW numuneleri üzerinde ölçümler yapılmış ve sonuçların doğruluğunu kontrol etmek amacı ile geleneksel yöntemlerle elde edilen değerler ile kıyaslama yapılmıştır.

Şekil 7.25’ te hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslaması yapılmıştır.



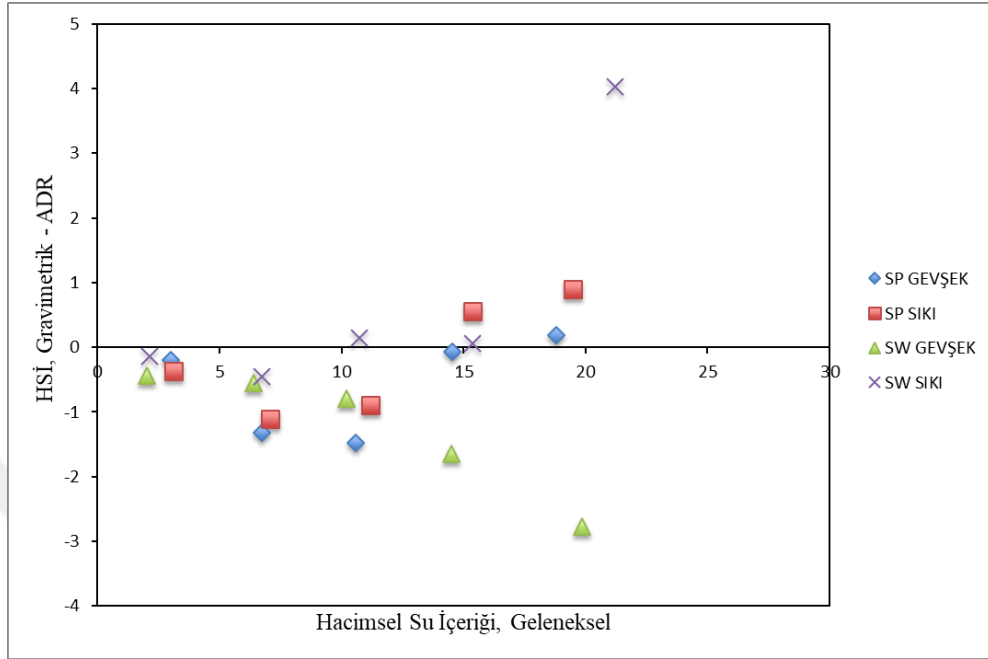
Şekil 7.25. SP ve SW zeminler hacimsel su içeriği

Grafik kontrol edildiğinde neredeyse bütün değerlerin 1:1 çizgisinin üzerinde olduğu, sadece SW numunesi için, en yüksek su muhtevasına sahip numunelerde bir miktar sapma görüldüğü tespit edilmiştir.

ADR yöntemi ve geleneksel yöntemle bulunan değerlerin arasındaki farkın kıyaslandığı grafik ise Şekil 7.26’ daki gibidir.

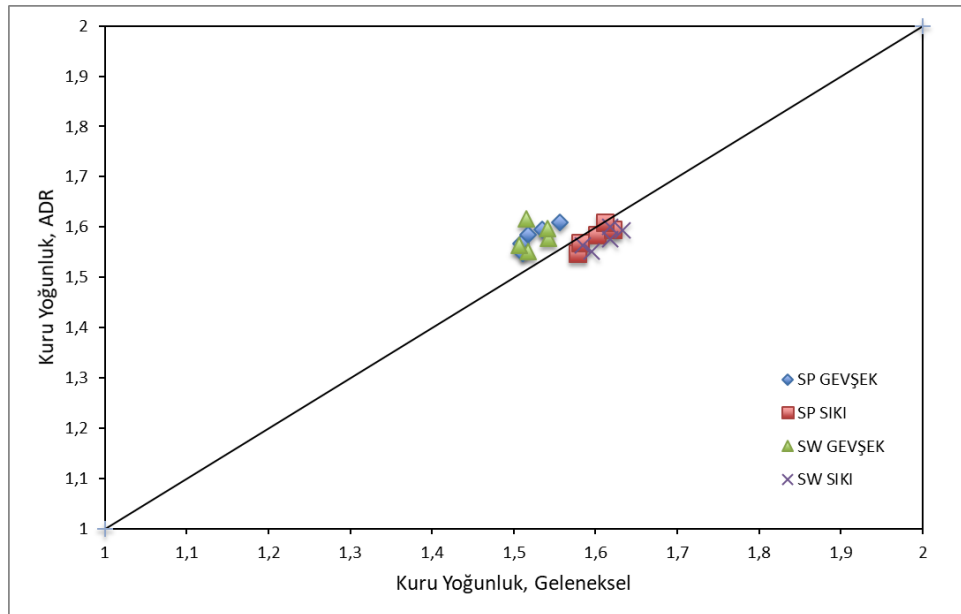
Değerlerin birçoğu kontrol edildiğinde, aradaki farkların ağırlıklı olarak $\pm\%1,0$ mertebelerinde olduğu görülmektedir. Gevşek olarak hazırlanmış numunelerin

birkaçında bu fark $\pm\%2,0$ civarında iken, tek bir noktada bu farkın $\pm\%4,0$ olduğu görülmektedir.



Şekil 7.26. SP ve SW zeminler hacimsel su içeriği hata miktarları

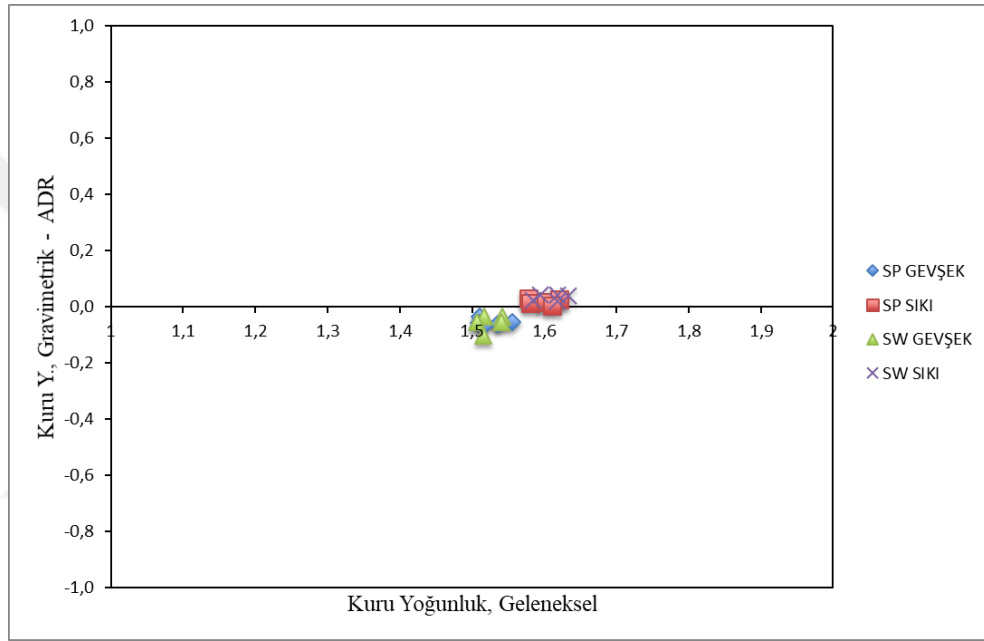
SP ve SW numuneleri için yapılan kuru yoğunluk çalışmaları sonucunda elde edilen değerlerin kıyaslandığı grafikler de aşağıda verilmiştir.



Şekil 7.27. SP ve SW zeminler kuru yoğunluk

Geleneksel ve ADR yöntemleri elde edilen kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı grafiğe bakıldığında, değerlerin tamamen 1:1 çizgisi etrafında toplandığı görülmektedir. Gevşek olarak hazırlanmış numunelerde değerler 1:1 çizgisinin hemen üzerinde iken, sıkı olarak hazırlanmış numunelerden elde edilen değerler 1:1 çizgisi üzerinde veya hemen altında yer almıştır.

Kuru yoğunluk değerleri arasındaki farkların kıyaslandığı grafik Şekil 7.28’ de verilmiştir.

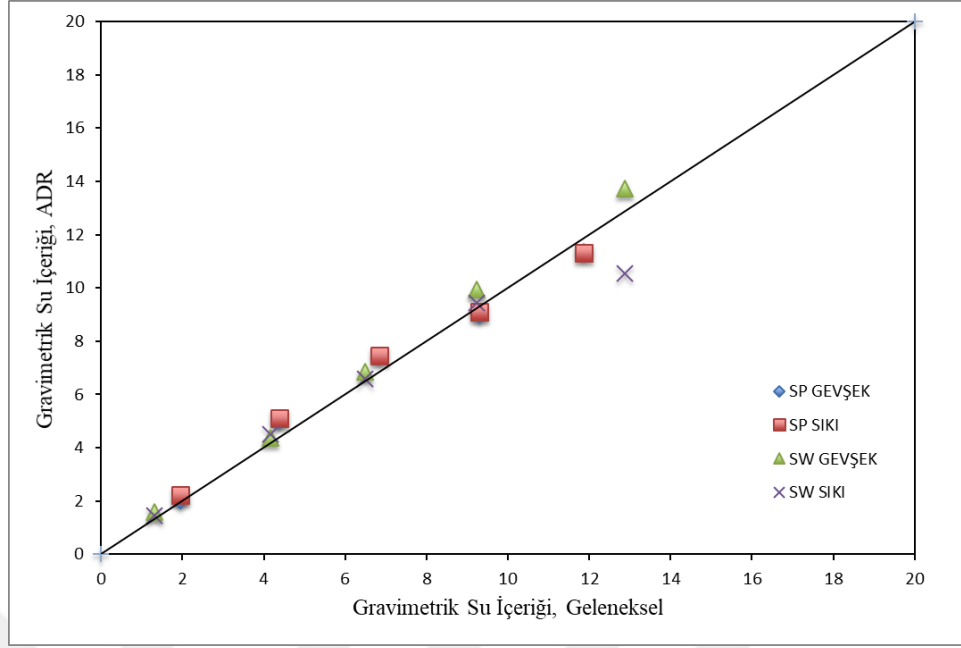


Şekil 7.28. SP ve SW zeminler kuru yoğunluk hata miktarları

Kuru yoğunlukların arasındaki farkların kıyaslandığı grafiğe bakılınca, iki değer arasındaki farkın sıfıra çok yakın olduğu, en fazla $\pm 0,1 \text{ grcm}^{-3}$ mertebesinde olduğu görülmektedir.

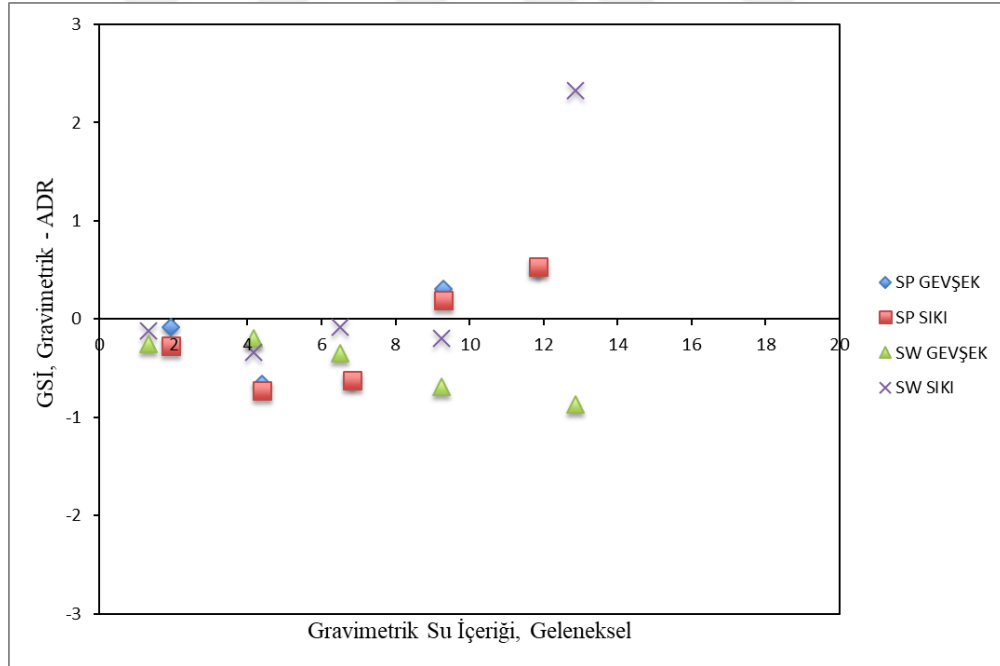
Şekil 7.29’ da verilen Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafiği incelediğimizde ise, tüm değerlerin neredeyse tamamının 1:1 çizgisinin üzerinde ve yakınında olduğu görülmektedir. Sadece yaklaşık olarak %14 su muhtevasında hazırlanan sıkı SW numunesi için 1:1 çizgisinden uzaklaşma olduğu görülmektedir.

Gravimetrik su içeriği değerleri arasındaki farkların kıyaslandığı yukardaki grafik kontrol edildiğinde, iki değer arasındaki farkın $\pm 1,0$ miktarını aşmadığı, sadece tek bir noktada $\pm 2,5$ mertebesinde olduğu görülmektedir.



Şekil 7.29. SP ve SW zeminler gravimetrik su içeriği

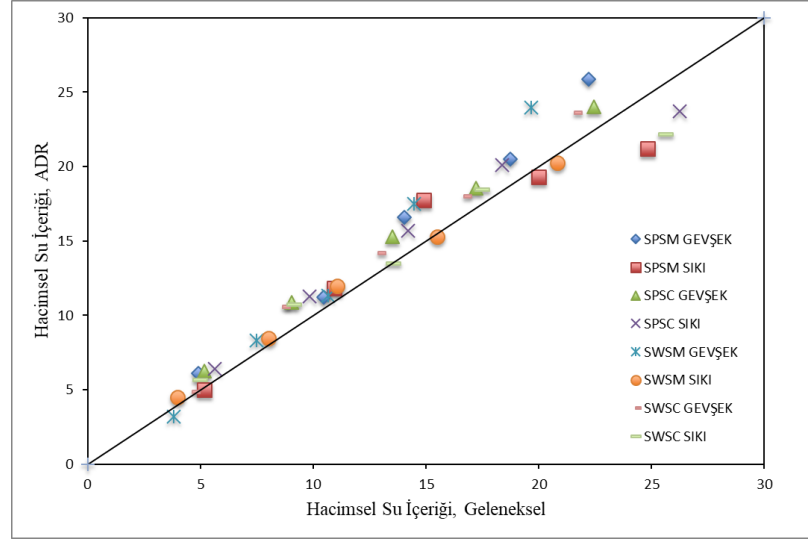
Şekil 7.30' da ise gravimetrik su içeriği değerleri arasındaki farklar görülmektedir.



Şekil 7.30. SP ve SW zeminler gravimetrik su içeriği hata miktarları

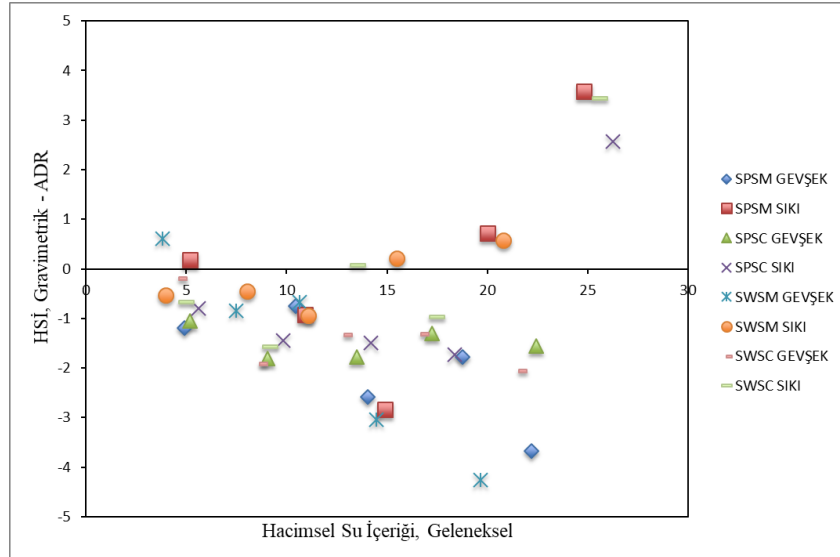
7.6. Çift Simgeli Zeminler

Hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik Şekil 7.31' de verilmiştir.



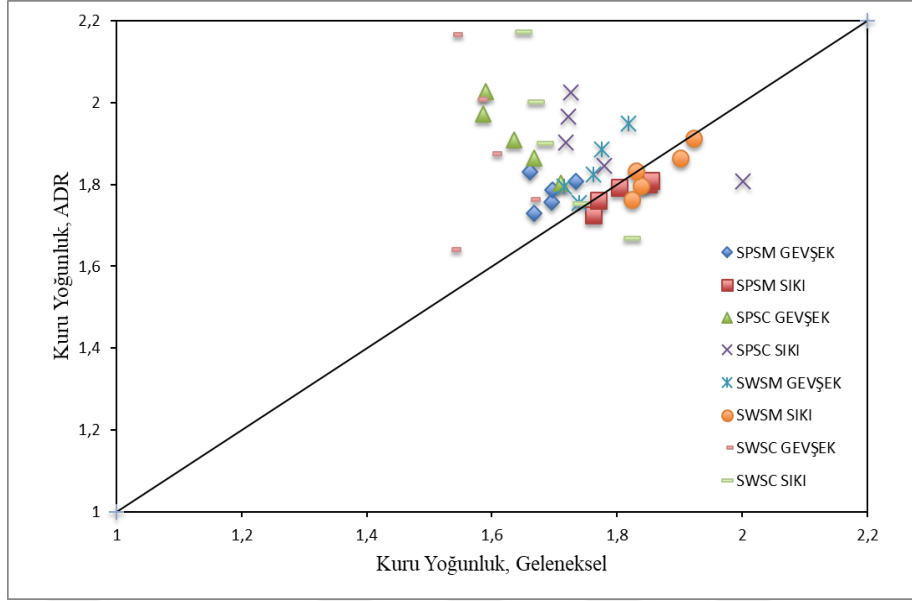
Şekil 7.31. Çift simgeli zeminler hacimsel su içeriği

Hacimsel su içeriği değeriinin kıyaslandığı şekle bakıldığı zaman, düşük su içeriklerinde hazırlanan numunelerden elde edilen değeriin 1:1 çizgisi üzerinde olduğu görülmüşken, su içeri arttıkça elde edilen değeriin 1:1 çizgisinden uzaklaştığı tespit edilmiştir. Her iki yöntemle bulunan hacimsel su içeriği değeriin arasındaki farkların kıyaslandığı grafik Şekil 7.32’ deki gibidir. Şekil kontrol edildiğinde, değeriin arasındaki farkların çoğunlukla $\pm 2,0$ mertebelerinde olduğu, birkaç tane değeriin için $\pm 4,0$ ’ e yaklaştığı, tek bir değeriin için $\pm 4,0$ ’ ü geçtiği görülmektedir.



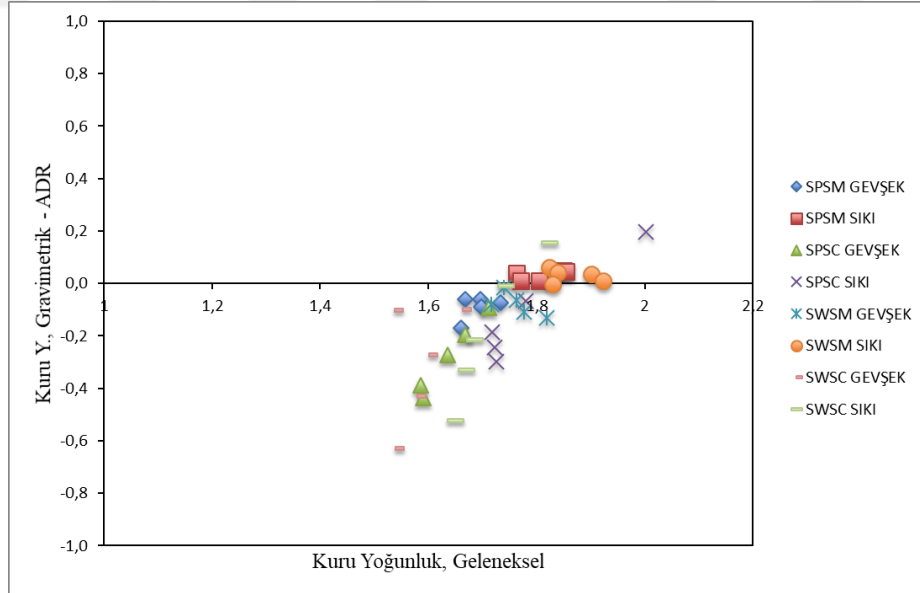
Şekil 7.32. Çift simgeli zeminler hacimsel su içeriği hata miktarları

Çift simgeli zeminler için hazırlanan numunelerden elde edilen kuru yoğunluk değeriin kıyaslandığı grafik ise Şekil 7.33’ de olduğu gibidir.



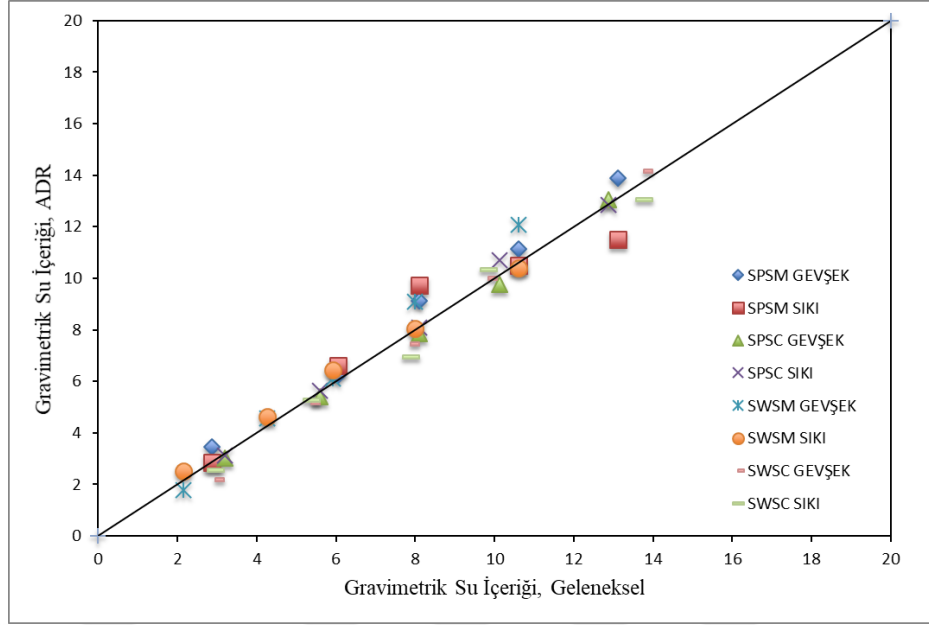
Şekil 7.33. Çift simgeli zeminler kuru yoğunluk

Silt içeren kumlu zeminlerden elde edilen değerlerin 1:1 çizgisi üzerinde ve çevresinde olduğu, kil içeren kumlu zeminlerden elde edilen değerlerin ise bu çizgiden uzaklaştığı görülmektedir. Kuru yoğunluk değerleri arasındaki farkların kıyaslandığı grafik ise Şekil 7.34’ de verilmiştir.



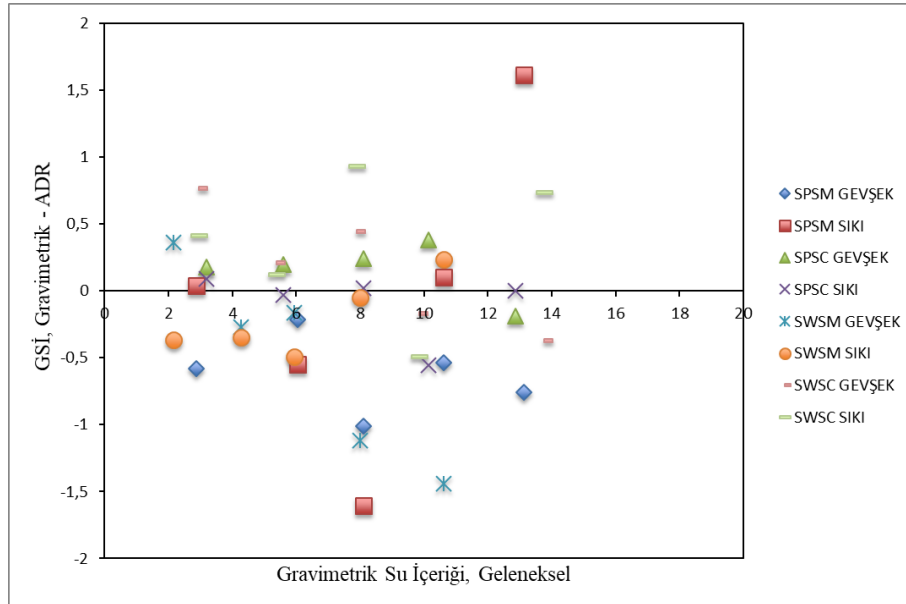
Şekil 7.34. Çift simgeli zeminler kuru yoğunluk hata miktarları

Silt içeren kumlu zeminler için aradaki farkların $\pm 0,2 \text{ grcm}^{-3}$ değerlerini geçmediği görülürken, kil içeren kumlu zeminler bu farkın $\pm 0,4 \text{ grcm}^{-3}$ civarında olduğu, iki noktada bu değeri geçip $\pm 0,6 \text{ grcm}^{-3}$ mertebesine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 7.35. Çift simgeli zeminler gravimetrik su içeriği

Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 7.35’ te verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi, değerlerin birçoğu 1:1 çizgisi üzerinde ve civarında toplanmıştır. Gravimetrik su içeriği değerleri arasındaki farkların gösterildiği grafik ise Şekil 7.36’ da verilmiştir.

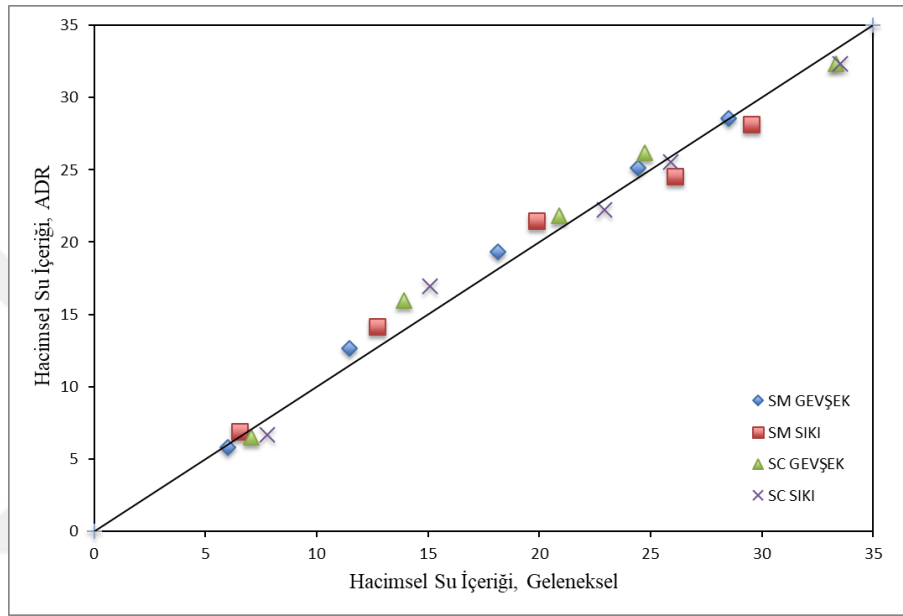


Şekil 7.36. Çift simgeli zeminler gravimetrik su içeriği hata miktarları

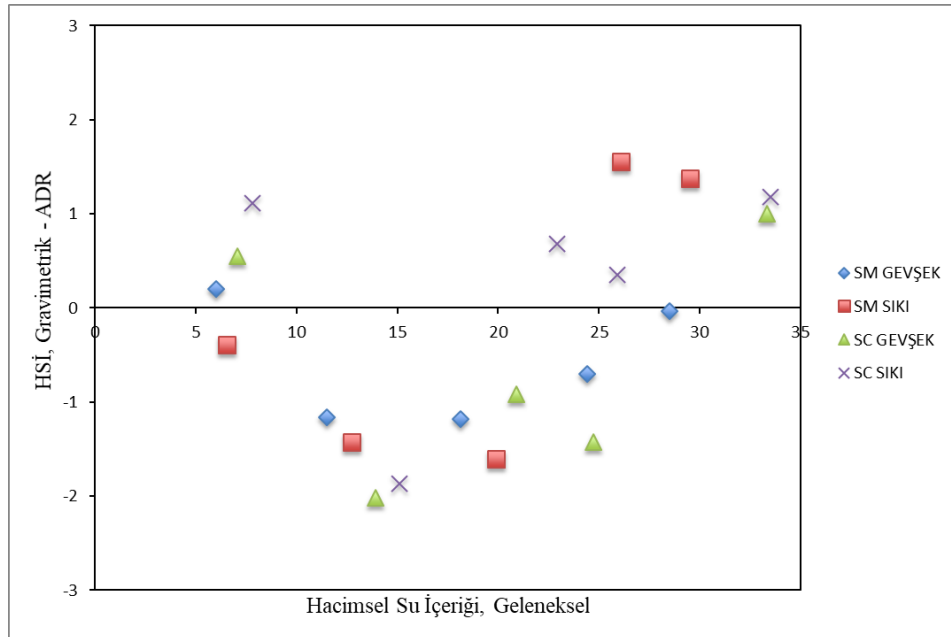
Değerlerin birçoğu için aradaki farkın $\pm 0,5$ olduğu görülmektedir. Bazı noktalarda bu fark artış göstermiş ve en fazla $\pm 1,7$ mertebelerine ulaşmıştır.

7.7. SM ve SC Zeminler

İçerisinde yeterli miktarda ince malzeme barındıran SM ve SC zeminler üzerinde yapılan ölçüm sonuçları sonucunda hacimsel su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik Şekil 7.37’ de verilmiştir. Grafik kontrol edilince değerlerin 1:1 çizgisi üzerinde ve çevresinde toplandığı görülmektedir. Hacimsel su içeriği değerleri arasındaki farkların gösterildiği Şekil 7.38’ de görülmektedir.

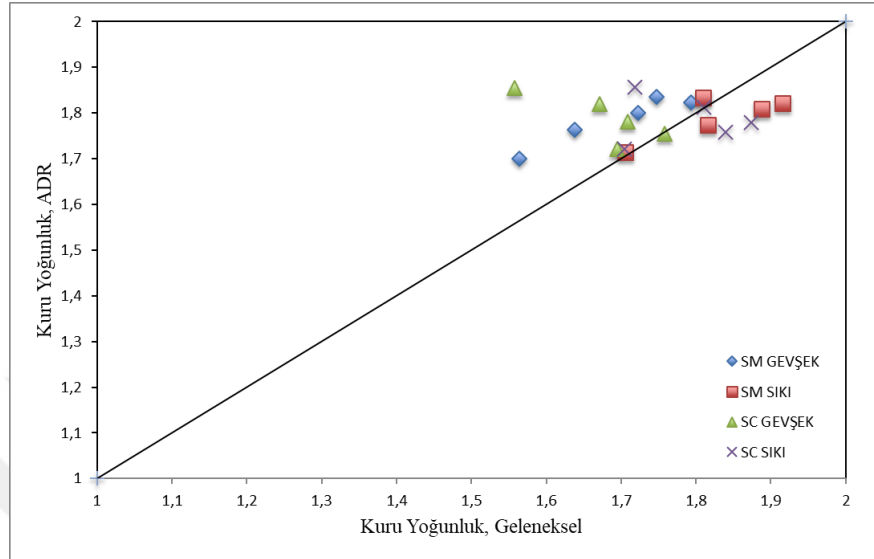


Şekil 7.37. SM ve SC zeminler hacimsel su içeriği



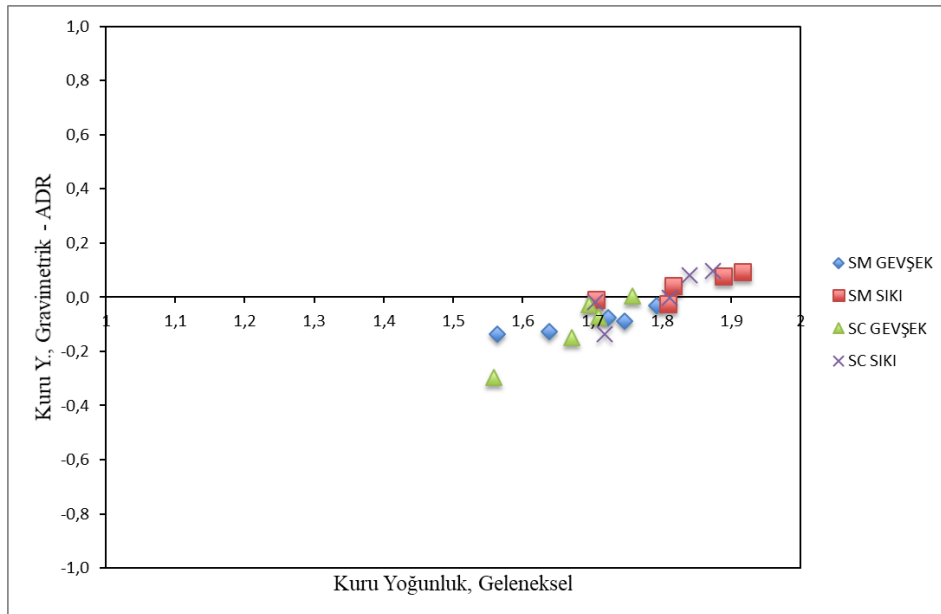
Şekil 7.38. . SM ve SC zeminler hacimsel su içeriği hata miktarları

Şekil kontrol edildiğinde, aradaki farkların çoğunluğunun $\pm 1,0$ civarında olduğu, birkaç değer için $\pm 1,0$ ' i aştığı, en yüksek $\pm 2,0$ olduğu görülmektedir. Şekil 7.39' da ise kuru yoğunluk değerlerinin kıyaslandığı grafik verilmiştir.



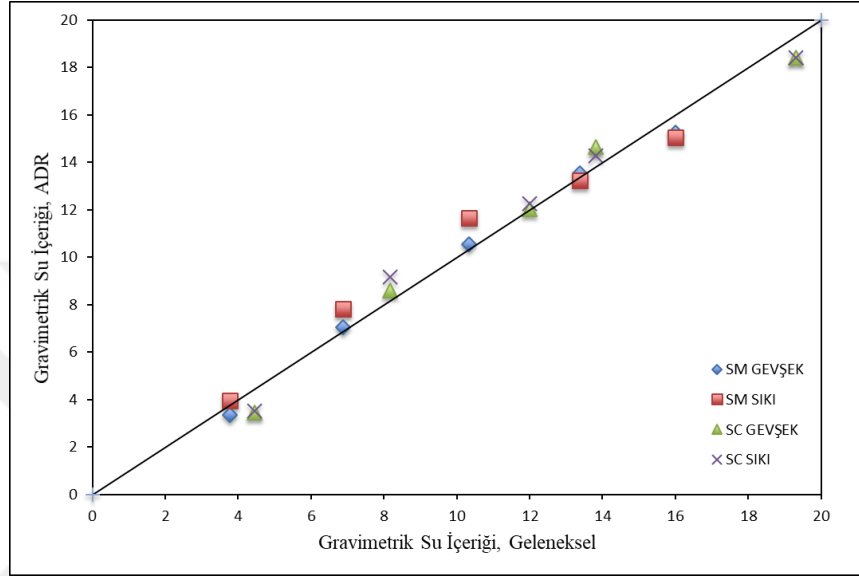
Şekil 7.39. SM ve SC zeminler kuru yoğunluk

Grafik kontrol edildiğinde gevşek haldeki numunelerden elde edilen değerlerin 1:1 çizgisinden uzaklaşırken, sıkı halde hazırlanan numunelerden elde edilen değerlerin 1:1 çizgisine yaklaştığı tespit edilmektedir. Kuru yoğunluk değerleri arasındaki farkların kıyaslandığı aşağıdaki grafik Şekil 7.40' daki gibidir.



Şekil 7.40. SM ve SC zeminler kuru yoğunluk hata miktarları

Şekil 7.40’ daki grafik kontrol edildiğinde ise, iki yöntemle elde edilen değerler arasındaki farkın $\pm 0,2 \text{ grcm}^{-3}$ civarında olduğu, sadece tek bir noktada bu değeri geçtiği görülmektedir. Gevşek sıklıkta hazırlanmış SC zemini için bu değer $\pm 0,3 \text{ grcm}^{-3}$ mertebelerine kadar ulaşmıştır. Gravimetrik su içeriği değerlerinin kıyaslandığı grafik ise aşağıdaki gibidir.

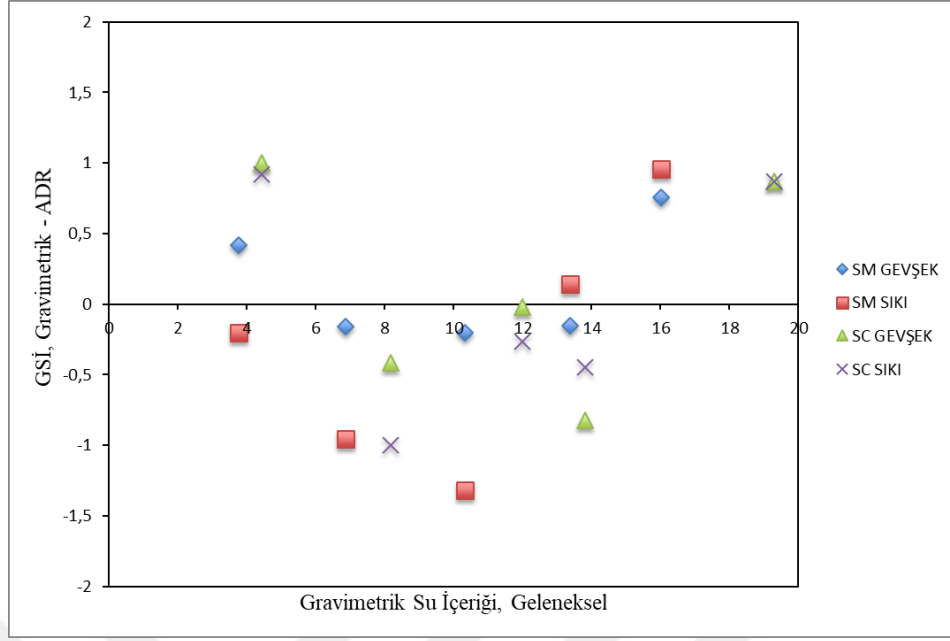


Şekil 7. 41. SM ve SC zeminler gravimetrik su içeriği

Değerlerin hemen hemen tamamına yakını 1:1 çizgisi üzerinde ve çevresinde toplanmıştır. Artan su içeriği değerlerinde özellikle hem gevşek hem de sıkı durumdaki SC zemini için 1:1 çizgisinden biraz daha fazla uzaklaştığı görülmektedir.

Şekil 7.42’ de ise Gravimetrik su içeriği değerleri arasındaki farkların kıyaslandığı grafik görülmektedir.

Grafik kontrol edildiğinde ise, aradaki farkın $\pm 1,0$ olduğu, tek bir noktada bu değeri aşarak $\pm 1,5$ civarında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.42. SM ve SC zeminler gravimetrik su içeriği hata miktarları

8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

ADR yönteminin geoteknik mühendisliğinde kullanılabilirliğini kontrol etmek amacı ile TS1500' de verilen zemin numunelerinin ve kaolin numunelerinin üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Çalışma ince daneli zeminler (CH, CI, CL, MH, MI ve ML) ile iri daneli zeminler; ince dane içermeyen zeminler (SP ve SW), çift simgeli zeminler (SP-SM, SP-SC, SW-SM ve SW-SC) ve ince dane içeren zeminler (SM ve SC) ve kaolin üzerinde yapılmıştır.

ADR probunun boyutları uygun olmadığı için çalışma çakıl grubu zeminler üzerinde yapılmamıştır.

Çalışmanın birinci aşamasında kum (SP) ile kaolin numuneleri ağırlıkça belirli oranlarda karıştırılmıştır. Ayrıca yine aynı kum numunesi kil (CL) numunesi ile yine ağırlıkça belirli oranlarda karıştırılmıştır.

Çalışmada Kum – Kaolin ve Kum – Kil karışımlarında zeminlere özgü kalibrasyon çalışmalarının yapıldığı sıklık ile test numunelerinin sıklıkları aynı ayarlanmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında TS 1500' de belirtilen zemin grupları gevşek, orta sıkı ve sıkı olacak şekilde ayarlanmıştır.

Çalışmada zeminlere özgü kalibrasyon katsayılarını belirlemek adına orta sıkı numuneler üzerinde çalışılmıştır. Test numuneleri ise gevşek ve sıkı olarak hazırlanmıştır.

Kum – kaolin karışımlarından elde edilen sonuçlar kontrol edildiğinde hacimsel su içeriği değerleri arasındaki farkların çoğunlukla $\pm 1,5$ civarında olduğu, en fazla $\pm 3,0$ 'e ulaştığı görülmektedir. Kuru yoğunluk değerleri için aradaki farkların ise $\pm 0,05 \text{ gcm}^{-3}$ olduğu belirlenmiştir. Gravimetrik su içeriğinde ise farkın çoğunlukla $\pm 1,0$ olduğu, en fazla ise $\pm 1,5$ olduğu tespit edilmiştir.

Kum – kil karışımlarından elde edilen sonuçlar kontrol edildiğinde hacimsel su içeriği değerleri arasındaki farkların çoğunlukla $\pm\%1,5$ civarında olduğu, en fazla $\pm\%3,0$ 'e ulaştığı görülmektedir. Kuru yoğunluk değerleri için aradaki farkların ise $\pm 0,05 \text{ grcm}^{-3}$ olduğu belirlenmiştir. Gravimetrik su içeriğinde ise farkın çoğunlukla $\pm\%1,0$ olduğu, en fazla ise $\pm\%2,5$ olduğu tespit edilmiştir.

İnce daneli kil grubu zeminlerden elde edilen değerler kontrol edildiğinde hacimsel su içeriği değerleri arasındaki farkların çoğunlukla $\pm\%4,0$ civarında olduğu, en fazla $\pm\%5,4$ 'e ulaştığı görülmektedir. Kuru yoğunluk değerleri için aradaki farkların ise $\pm 0,2 \text{ grcm}^{-3}$ olduğu belirlenmiştir. Gravimetrik su içeriğinde ise farkın çoğunlukla $\pm\%2,0$ olduğu, en fazla ise $\pm\%4,79$ olduğu tespit edilmiştir.

İnce daneli silt grubu zeminlerden elde edilen sonuçlarda ise hacimsel su içeriği farkları $\pm\%1,5$ civarında, en fazla $\pm\%5,29$ olduğu görülmektedir. Kuru yoğunluk farkları ise yine kil grubundakine benzer olarak $\pm 0,2 \text{ grcm}^{-3}$ civarındadır. Sadece gevşek olarak hazırlanmış ML için bu fark $\pm 0,6 \text{ grcm}^{-3}$ olmuştur. Gravimetrik su içeriği farklarına bakıldığında değer $\pm\%1,5$ olduğu görülmektedir. Bu fark en yüksek $\pm\%2,81$ değerine ulaşmıştır.

İçinde ince dane içermeyen kum grubu zeminler için elde edilen hacimsel su içeriği değerlerinin farkları kontrol edilince, bu değer $\pm\%1,0$ olduğu, en yüksek su içeriğinde hazırlanan gevşek SW için bu değer $\pm\%2,77$, sıkı SW için ise $\pm\%4,03$ olarak tespit edilmiştir. Kuru yoğunluk değerleri arasındaki farklar ise $\pm 0,1 \text{ grcm}^{-3}$ mertebelerindedir. Gravimetrik su içeriği değerleri arasındaki farklar ise $\pm\%0,5$ bandında olduğu, en fazla $\pm\%2,33$ olduğu tespit edilmiştir.

Çift simgeli kumlu zeminler için hacimsel su içeriği farkları kontrol edildiğinde, aradaki farkın $\pm\%2,0$ mertebelerinde olduğu, en fazla ise $\pm\%4,27$ ' ye çıktığı görülmektedir. Kuru yoğunluk farkları ise $\pm 0,2 \text{ grcm}^{-3}$ ' dir. Fakat içinde kil içeren zeminler için bu fark bir miktar açılmış ve en fazla $\pm 0,5 \text{ grcm}^{-3}$ ' e yaklaşmıştır. Gravimetrik su içeriği değerleri arasındaki farklar ise $\pm\%1,0$ mertebelerindedir. En yüksek $\pm\%1,48$ değerine ulaşmıştır.

İçinde ince dane içeren kum grubu zeminler için hacimsel su içeriği farkları kontrol edilince, değer $\pm\%2,0$ civarında olduğu görülmektedir. Kuru yoğunluk farklarının

ise $\pm 0,15 \text{ gr cm}^{-3}$ olduğu gör÷lmektedir. Gravimetrik su içeriği farkının ise $\pm \%1,0$ olduğu gör÷lmektedir.

Sonuçlar genel olarak kontrol edildiğinde kumlu zeminler için elde edilen sonuçların, ince daneli zeminler için elde edilen sonuçlara oranla gerçeğe yaklaştığı gör÷lmektedir.

Kumlu zeminler için bile, içerisindeki ince dane miktarı azaldıkça, sonuçların daha gerçeğe yakın olduğu belirlenmiştir. İnce dane içeren kumlarda sonuçlar birbirinden daha uzak iken, ince dane içermeyen kumlarda sonuçlar birbirleri ile örtüşmektedirler.

Sonuçlar düşün÷ldüğ÷nde, çok hassas kontrol içeren kumlu zeminler için yöntemin kullanılabilirliği çok mümkün iken, çok hassaslık gerektirmeyen ince daneli zeminler için de yöntem rahatlıkla kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Akhtaruzzaman M., Dielectric studies of some oxide materials, nitride ceramics and glasses, Ph.D. Thesis, Durham University, 1989.

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

Arsoy S., Constant energy calibration for permittivity based moisture probes, *Journal of Hydrology*, 2014, **510**, 79-91.

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

ASTM D 1556, Standard test method for density and unit weight of soil in Place by the Sand-Cone Method, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 2007.

ASTM D 2167, Standard test method for density and unit weight of soil in Place by the Rubber Balloon Method, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 2015.

ASTM D 2216, Standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 2010.

ASTM D 2937, Standard test method for density and unit weight of soil in Place by the Drive-Cylinder Method, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 2017.

ASTM D 3017, Standard test method for water content of soil and rock in-place by nuclear methods (shallow depth), *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 2005.

ASTM D 4643, Standard test method for field determination of water content of soil by calcium carbide gas pressure tester, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 2011.

ASTM D 4643, Standard test method for laboratory determination of water content of soil and rock by microwave oven heating, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 2017.

ASTM D 4959, Standard test method for laboratory determination of water content of soil and rock by direct heating, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 2016.

ASTM D 5195, Standard test method for density of soil and rock in-place depths below surface by nuclear methods, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 2014.

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.

Blake G.R. & Hartge K.H., Bulk density. In: (ed. A. Klute) *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph No.9 (2nd edn). 363- 375, 1986.

Burthfoot J.C., *Ferroelectrics, An Introduction to Physical Principles*, Van Nostrand-Reinbold, London, 1967.

Campbell G.S., Soil water potential measurement: an overview, *Irrigation Science*, 1988, **9**, 265-273.

Campbell J.E., Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz, *Soil Science Society of America Journal*, 1990, **54**, 332-341.

Carrow R.N., Shearman R.C., Watson J.R., Turfgrass. In: (eds. B.A. Stewart & D.R. Nielsen) *Irrigation of Agricultural Crops*. SSSA Monograph No. 30., 889-919, 1990.

Cerny R., Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: a review, *Measurement*, 2009, **42**, 329-336.

Cheng D.K., *Field and Wave Electromagnetics*, Addison and Wesley, Reading, Ma, USA, 1989.

Childs E.C., The use of soil moisture characteristics in soil studies, *Soil Science*, 1940, **50**, 239-252.

Chung C.C., Improved dielectric characterization of soil using time domain reflectometry, Research Proposal, National Chiao Tung University, Taiwan, 2005.

Corey A.T., Klute A., Application of the potential concept to soil water equilibrium and transport, *Soil Science Society of America Journal*, 1985, **49**, 3-11.

Cullen S.J., Everett L.G., Estimating the storage capacity of the vadose zone. In: (eds. L.G. Wilson, L.G. Everett & S.J. Cullen) *Handbook of Vadose Zone Characterization and Monitoring*, CRC Press, Boca Raton, FL USA, 1995.

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.

Dean T.J., Bell J.P., Baty, A.J.B., Soil Moisture Measurement by an Improved Capacitance Technique. Part I. Sensor Design and Performance, *Journal of Hydrology*, 1987, **93**, 67- 78.

Dickey G.L., Allen R.G., Wright J.L., Murray N.R., Stone, J.F. & Hunsaker, D.J., Soil bulk density sampling for neutron gauge calibration, *Proceedings of the ASCE National Conference on Irrigation and Drainage Engineering*, Park City, UT, USA, 1993.

Dirksen C., Dasberg S., Improved calibration of time-domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, **57**, 660-667.

Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., El-Rayes M.A., Microwave dielectric behaviour of wet soil - Part II: Dielectric mixing models. *Institution of Electrical and Electronic Engineers Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23, 35-46, 1985.

Fellner-Feldegg, H., The measurement of dielectrics in the time-domain, *Journal of Physical Chemistry*, 1969, **73**, 616-623.

Gardner W.H., Water content. In: (ed. A. Klute) *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Agronomy Monograph No.9 (2nd edn)*., 493-544, 1986.

Gaskin G.J., Miller, J.D., Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1996, **63**, 153-160.

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.

Hanks R.J., Water Potentials. In: *Applied soil physics, Soil water and temperature applications. Springer-Verlag, New York*., 176, 1992.

Harrop P.J., *Dielectrics*, Butterworths, 1972.

Hartebrodt M., Kabitzch 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., 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.

Hilhorst M.A., A pore water conductivity sensor, *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**, 1922-1925.

Hilhorst M.A. & Dirksen, C., Dielectric water content sensors: time-domain versus frequency domain. *Symposium and Workshop on Time-domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications*, United States Bureau of Mines Special Publication SP 19-94, 23-33, 1994.

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.

Kabat P., Beekma, J., Water in the unsaturated zone. In: (eds. H.P. Ritzema) *Drainage Principles and Applications*. IRLI Publication 16, 383-434, 1994.

Kargas G., Kerkides P., Performance of the theta probe ML2 in presence of nonuniform soil water profiles, *Soil and Tillage Research*, 2009, **103**, 425-432.

Keskin E., Zemin Permeabilitesinin Elektriksel Analoji ile Belirlenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013.

Kraus J.D., Waveguides and resonators. In: *Electromagnetics*. McGraw-Hill Book Co, Singapore., 534-611, 1984.

Ledieu J., de Ridder P., de Clarc, P., Dautrebande S., A method of measuring soil moisture 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 C., Frequency domain versus travel time analyses of TDR waveforms for soil moisture measurements, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2003, **67**(3), 720-729.

Lökçü E., Spinel Mikrodalga Dielektrik Seramiklerinin Polimerik Jel Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.

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 Science*, 1996, **47**, 357-366.

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.

Nutting, P.G., Some standard thermal dehydration curves of minerals, *U.S. Geological Survey Professional Paper* 197-E, 1943.

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., 159-176.

Rawlins S.L., Campbell G.S., Water potential: thermocouple psychrometry. In: (ed. A. Klute) *Methods of soil analysis. Part 1 - Physical and mineralogical methods*. Agronomy Monograph No. 9 part 1. pp597-618, Remote Sensing, GE-23, 35-46, 1986.

Reynolds S.G., The gravimetric method of soil moisture determination, part I. A study of equipment, and methodological problems, *Journal of Hydrology*, 1970a, **11**, 258-273.

Reynolds S.G., The gravimetric method of soil moisture determination, part II. Typical required sample sizes and methods of reducing variability, *Journal of Hydrology*, 1970b, **11**, 274-287.

Robinson D.A., Jones S.B., Blonquist J.M., Friedman, S.P., A physical derived water content/permittivity calibration model for coarse-textures layered soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2005, **69**(5), 1372-1377.

Rose C.W., Water transport in soil with a daily temperature wave I. theory and experiment. *Australian Journal of Soil Research*, 1968, **6**, 31-44.

Ross P.J., Using bulk density to calculate soil water changes in soils with shrinkage cracks, *Australian Journal of Soil Research*, 1985, **23**, 109-113.

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.

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.

Starr J.L., Parkin T.B., Meisinger J.J., Influence of sample size on chemical and physical soil measurements, *Soil Science Society of America Journal*, 1995, **59**, 713-719.

Suwansawat S. Using time domain reflectometry for measuring water content in compacted clays, M.S. thesis, University of Wisconsin-Madison, 1997.

Tomer M.D., Anderson, J.L., Field evaluation of a soil water-capacitance probe in a fine sand. *Soil Science*, 1995, **159**(2), 90-98.

Topp G.C., Davis J.L., Annan, A.P., Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 1980, **16**, 574-582.

TS 1500, İnşaat mühendisliğinde zemin sınıflandırılması, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2000.

Von Hippel, A.T. (ed.), Dielectric Materials and Applications, MIT Press, Cambridge, USA, 1954.

Whalley W.R., Considerations on the use of time domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content, *Journal Soil Science*, 1993, **44**, 1-9.

White I., Zegelin S.J., Electric and dielectric methods for monitoring soil-water content. In: (eds. L.G. Wilson, L.G. Everett, S.J. Cullen) *Handbook of Vadose Zone Characterization and Monitoring*. CRC Press, Boca Raton, 343-385, 1995.

White I., Knight J.H., Zegelin S.J., Topp, G.C., Comments on 'Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content' by W.R. Whalley. *European Journal of Soil Science*, 1994, **45**, 503-508.

Wijaya K., Nishimura T., Makoto K., Estimation of bulk density of soil by using amplitude domain reflectometry (ADR) probe, *17th WCSS*, Thailand, 14-17 August 2002.

Wobschall D., Circuit Design for Electronic Instrumentation: Analog and Digital Devices from Sensor to Display., McGraw-Hill, 1979.

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.

Yeh J.T.C., Guzman-Guzman A., Tensiometry. In: (eds. L.G. Wilson, L.G. Everett & S.J. Cullen) *Handbook of vadose zone characterization and monitoring*. CRC Press, Baco Raton, Fl USA., 319-328, 1995.

Yu X., Drnevich V.P., Soil water content and dry density by time domain reflectometry, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, **130**, 922-934.

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 Measurement Using Time-domain Reflectometry. *Water Resources Research*, 1989, **25**, 2367-2376.

Zegelin S.J., White I., Russell G.F., A critique of the time-domain reflectometry technique for determining field soil-water content. In: (eds G.C.Topp, W.D.Reynolds, R.E.Green) *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. SSSA Special Publication No 30., 187-208, 1992.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Arsoy S., Özgür M., Keskin E., **Yılmaz C.**, Enhancing TDR based water content measurements by ANN in sandy soils, *Geoderma*, 2013, 195-196, 133-144., Doi: 10.1016/j.geoderma.2012.11.019

Arsoy S., Özgür M., Keskin E., **Yılmaz C.**, Usability of calcium carbide gas pressure method in hydrological sciences, *Journal of Hydrology*, 2013, 503, 67-76., Doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.08.044

Arsoy S., **Yılmaz C.**, Keskin E., Özgür M., Zemin yoğunluğunun TDR yöntemi ile belirlenebilirliği, 5. *Geoteknik Sempozyumu*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Adana, 5-7 Aralık 2013.

Arsoy S., Keskin E., **Yılmaz C.**, Özgür M., Kurutmaya dayalı zemin su muhtevasi ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması, *Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi*, İKÜ, İstanbul, 30 Eylül-1 Ekim 2010.

Arsoy S., Özgür M., Keskin E., **Yılmaz C.**, Accuracy of soil moisture content with ADR probes in saline soils, *The 10th International Conference On Electromagnetic Wave Interaction With Water And Moist Substances Conference*, The International Society for Electromagnetic Aquametry, Finland, 1-5 June 2009.

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., **Yılmaz C.**, Keskin E., Özgür M., İnfrared lambası kullanılarak zemin su içeriğinin tespit edilmesi, 3. *Geoteknik Sempozyumu*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Adana, 3-4 Aralık 2009.

Arsoy S., **Yılmaz C.**, Keskin E., Özgür M., Zemin su muhtevasının elektromanyetik yöntemlerle belirlenmesi, *Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi*, Selçuk Üniversitesi, Konya, 16-17 Ekim 2008.

Arsoy S., Özgür M., **Yılmaz C.**, Keskin E., ADR yöntemiyle belirlenen su içeriğine tuzluluğun etkisi, *Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi*, Selçuk Üniversitesi, Konya, 16-17 Ekim 2008.

Arsoy S., Keskin E., **Yılmaz C.**, Çevresel tarımsal ve peyzaj sulamalarında sensör kullanımıyla su kaynaklarının tasarrufu, *International Conference On Global Climate Change And Its Environmental Impacts*, Konya, 18-20 Ekim 2007.

Arsoy S., **Yılmaz C.**, Keskin E., Zeminlerin dielektrik özelliklerine bağlı olarak su muhtevalarının belirlenmesi, 2. *Geoteknik Sempozyumu*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Adana, 1-2 Aralık 2007.

Arsoy S., Keskin E., **Yılmaz C.**, Permeabilite ve konsolidasyon deneyleri ile elde edilen permeabilite katsayılarının karşılaştırılması, *2.Geoteknik Sempozyumu*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Adana, 1-2 Aralık 2007.

Arsoy S., **Yılmaz C.**, Keskin E., Arazi kullanımında taşıma gücü ve oturma kriterlerinin kullanılması, *Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 15-16 Eylül 2006.

Arsoy S., Keskin E., **Yılmaz C.**, Granüler zeminlerde gerilme şekil değiştirme eğrileri için normalleştirilmiş üniversal bağıntılar. *Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 15-16 Eylül 2006.

Kavak A., Keskin E., **Yılmaz C.**, Mutman U., Lime stabilization and its effect on road cross-section, *Proceedings Of International Conference On Problematic Soils*, Eastern Mediterranean University, North Cyprus, 25-27 May 2005.

Kavak A., **Yılmaz C.**, Keskin E., Mutman U., Otoyol alt temel dolgularında kullanılabilir yuvarlak ve köşeli dolgu malzemelerinin karşılaştırılması, *3. Kentsel Altyapı Sempozyumu*, Eskişehir, 11-12 Ekim 2001. Keskin E., Arsoy S., **Yılmaz C.**, Investigation effect of permeation grouting on shear strenght of soil via direct shear device, *Internatiponal Earthquake Symposium*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 22-24 October 2007.

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.

Yılmaz C., Arsoy S., ADR (Amplitude Domain Reflectometry) Yöntemi ile zemin kuru yoğunlukları ve su içeriklerinin belirlenebilirliği, *8. Uluslararası Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. 13-15 Kasım 2019.

ÖZGEÇMİŞ

Cüneyt YILMAZ, ilköğrenimini Gebze Atatürk İlkokulu, ortaokulu İstanbul Büyükçekmece Lisesi Ortaokul Kısımında, liseyi Samsun Ondokuz Mayıs Lisesinde tamamladı. 1999 yılında Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2004 yılında Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisansını tamamladı. 2000 yılında Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen çalışma hayatına devam etmektedir

