

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KUM ZEMİNDE RİJİTLİĞİN GEOGAUGE İLE BELİRLENMESİ

BALBORA MERT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEOTEKNİK PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. HAVVANUR KILIÇ**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KUM ZEMİNDE RİJİTLİĞİN GEOGAUGE İLE BELİRLENMESİ

Balbora MERT tarafından hazırlanan tez çalışması ---2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

İstanbul Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca desteğini ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Havvanur Kılıç'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca dersleri birlikte takip ettiğim, deneysel çalışmaları birlikte yaptığım, fikirler paylaştığım, bana büyük katkıları olan çok değerli arkadaşlarım Emre AKINAY'a, Babak ROUZEGARI'ye ve Emrah TÜRER'e desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Son olarak her daim yanımda olan babam Mete MERT'e, annem Asuman MERT'e ve ablam Meltem MERT EREN'e sonsuz teşekkür ediyorum ve bu tez çalışmamı onlara armağan ediyorum...

Mart, 2014

Balbora MERT

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vviii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	1
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2	
LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1 GeoGauge	3
2.1.1 Tanımı	3
2.1.2 GeoGauge'in Çalışma Prensibi	6
2.1.3 Rijitliğin Tanımı ve Modüller	8
2.1.4 GeoGauge ile Zemin Rijitlik Modüllerinin Hesaplanması	10
2.1.5 GeoGauge'in Uygulama Esasları	11
2.2 Plaka Yükleme Deneyi.....	13
2.2.1 Tanım	13
2.2.2 Plaka Yükleme Deneyi ile Zemin Güvenli Taşıma Gücünün Belirlenmesi.....	16
2.2.3 Plaka Yükleme Deneyi ile Temel Oturmalarının Tahmini	17
2.2.4 Plaka Yükleme Deneyi ile Zemin Elastisite Modülünün Belirlenmesi	18
2.2.5 Plaka Yükleme Deneyi ile Zemin Yatak Katsayısının Belirlenmesi	19

2.3	GeoGauge ve Plaka Yükleme Deneyinin İlişkilendirilmesi	21
2.4	Araştırma Konusu ile İlgili Önceki Çalışmalar.....	22
2.4.1	Nelson ve Sondag (1999)	22
2.4.2	Fiedler (2000)	24
2.4.3	Gas Technology Institute (2005)	25
2.4.4	Seyman (2003)	29
2.4.5	Sawang Suriya (2002)	31
2.4.6	Sawang Suriya (2003)	34
BÖLÜM 3		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		37
3.1	Giriş	37
3.2	Deney Numunesinin Özellikleri ve Deney Tankı	37
3.3	GeoGauge Kalibrasyon Kontrolü ve Uygulama Farkları.....	39
3.4	GeoGauge'in Efektif Ölçüm Derinliğinin Belirlenmesi	40
3.5	GeoGauge Modüllerinin Rölatif Sıklık ile İlişkisinin İncelenmesi	42
3.6	Plaka Yükleme Deney Düzeneği.....	45
3.7	Plaka Yükleme Deneyinin Yapılışı.....	47
3.8	Plaka Yükleme Deneyi ile Bulunan Modüllerin GeoGauge ile Karşılaştırılması	51
BÖLÜM 4		
SONLU ELEMENLAR ANALİZ YÖNTEMİ		54
4.1	Giriş	54
4.2	Sonlu Elemanlar Analizde Seçilen Malzeme Modeli	54
4.3	Sonlu Elemanlar Analizde Kullanılan Malzeme Parametreleri	55
4.4	Sonlu Elemanlar Analizi İçin Oluşturulan Geometrik Modeller	59
4.4.1	Plaka Yükleme Deneyi Birinci Seri Analizler	62
4.4.2	Plaka Yükleme Deneyi İkinci Seri Analizler	65
4.4.3	GeoGauge Analizleri.....	68
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER		74
KAYNAKLAR		77
ÖZGEÇMİŞ		79

SİMGE LİSTESİ

α	Rayleigh Alfa
β	Rayleigh Beta
B_p	Plaka genişliği
B_T	Temel genişliği
c	Kohezyon
C_u	Üniformluk katsayısı
C_c	Sınıflandırma katsayısı
D_{10}	Efektif dane çapı
D_{50}	Ortalama dane çapı
D_r	Rölatif sıkılık
e	Boşluk oranı
e_{maks}	Maksimum boşluk oranı
e_{min}	Minimum boşluk oranı
E	Elastisite modülü
E_G	GeoGauge modülü
E_i	Başlangıç modülü
E_u	Boşaltma modülü
E_r	Tekrar yükleme modülü
E_{ur}	Boşaltma-tekrar yükleme modülü
E_{ur}^{ref}	Referans boşaltma-tekrar yükleme modülü
E_{50}	Ortalama sekant modülü
E_{oed}	Ödometre koşulunda tanjant modülü
E_{oed}^{ref}	Referans ödometre koşulunda tanjant yükleme modülü
E_{PLAXIS}	PLAXIS ile belirlenmiş elastisite modülü
F	Kuvvet
G_s	Özgül yoğunluk
G	Kayma modülü
h	Derinlik
k	Rijitlik
k_f	Esnek plaka rijitliği
k_G	GeoGuge rijitliği
k_z	Zemin rijitliği
k_G	GeoGauge rijitliği
k_{PLAXIS}	PLAXIS ile belirlenmiş rijitlik
K	Zemin yatak katsayısı

K_p	Yük plakası için bulunan zemin yatak katsayısı
K_0	Sükûnetteki toprak basıncı katsayısı
K_0^{nc}	Normal konsolide sükûnetteki toprak basıncı
M	Şekil etki faktörü
m	Gerilme seviyesine bağlı rijitlik üs değeri
n	Farklı frekans sayısı
P	Yük
q_a	Göçme yükünün asimptot değeri
q_f	Göçme yükü
q_p	Basınç gerilmesi
R	Plaka veya temel çapı
R_f	Göçme oranı
St	Zemin oturması
St_p	Plaka oturması
St_T	Temel oturması
V_1	Rijit plakanın hızı
V_2	Esnek plakanın hızı
ν	Poisson Oranı
w	Su muhtevası
w_{opt}	Optimum su muhtevası
X_1	Rijit plakanın yer değiştirmesi
X_2	Esnek plakanın yer değiştirmesi
ε	Normal şekil değiştirme
σ	Normal gerilme
σ_{ref}	Referans çevre gerilmesi
ϕ	Kayma dayanımı açısı
ψ	Genleşme açısı
$\Delta\varepsilon$	Şekil değiştirme artışı
$\Delta\sigma$	Gerilme değiştirme artışı

KISALTMA LİSTESİ

AASHTO	Karayolları Zemin Sınıflandırma Sistemi
CD	Konsolidasyonlu Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi
GS	Güvenlik Katsayısı
PYD	Plaka Yükleme Deneyi
RS	Rölatif Sıklık
RK	Rölatif Kompaksiyon
HS	Hardening Soil
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
SP	Kötü Derecelenmiş Kum
SS	Sönümleyisi Sınır
SSG	Soil Stiffness Gauge (GeoGauge)
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistem
VM	Verifier Mass

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Humbolt GeoGauge H4140 cihaz	4
Şekil 2.2	GeoGauge'in şeması [1]	7
Şekil 2.3	Gerilme deformasyon grafiğinde akma öncesi modül ve dayanım [3].....	8
Şekil 2.4	Gerilme deformasyon eğrisinde tanjant ve sekant modülleri [3].....	9
Şekil 2.5	Plaka yükleme deney grafiği [8]	13
Şekil 2.6	Plaka yükleme deney düzenekleri [8]	14
Şekil 2.7	Plaka yükleme deneyi için açılmış deney çukuru [8]	15
Şekil 2.8	Plaka genişliğine bağlı yük etki ilişkisi [8]	15
Şekil 2.9	Zeminlerde oluşan farklı göçme zarfları [8]	16
Şekil 2.10	GeoGauge ve plaka yükleme deneyinin karşılaştırılması	21
Şekil 2.11	Sıkıştırılan zeminde GeoGauge okumaları alınan işaret noktaları [14]	22
Şekil 2.12	Plaka yükleme deneyi yük-oturma grafiği [14].....	23
Şekil 2.13	Plaka yükleme deneyi ile bulunan başlangıç, boşaltma ve tekrar yükleme rijitlik değerleri [16]	24
Şekil 2.14	Dolgu malzemelerinin granülometri eğrileri [16]	25
Şekil 2.15	Kumda GeoGauge rijitlik değeri ve rölatif kompaksiyon ilişkisi [16]	26
Şekil 2.16	Siltli kilde GeoGauge rijitlik değeri ve rölatif kompaksiyon ilişkisi [16]	26
Şekil 2.17	Kırmataşta GeoGauge rijitlik değeri ve rölatif kompaksiyon ilişkisi [16].....	27
Şekil 2.18	Kum, GeoGauge rijitlik değeri ve su muhtevasının ilişkisi [16].....	28
Şekil 2.19	Siltli kil, GeoGauge rijitlik değeri ve su muhtevasının ilişkisi [16].....	28
Şekil 2.20	Kırmataş, GeoGauge rijitlik değeri ve su muhtevasının ilişkisi [16].....	29
Şekil 2.21	Kum1, plaka yükleme deneyi ile elde edilmiş gerilme-oturma eğrisi [17] ..	30
Şekil 2.22	Kum2, plaka yükleme deneyi ile elde edilmiş gerilme-oturma eğrisi [17] ..	30
Şekil 2.23	Kum3, plaka yükleme deneyi ile elde edilmiş gerilme-oturma eğrisi [17] ..	30
Şekil 2.24	Sonlu elemanlar modelinin düşey ve yatay kesit görünüşleri [6]	32
Şekil 2.25	Orta sıkı kumda yağmurlama ve kürek ile doldurma farklarının GeoGauge rijitlik ölçümüne etkisi [6]	33
Şekil 2.26	Orta sıkı kum numunede, farklı kalıp çaplarına bağlı olarak tabaka kalınlığının GeoGauge rijitlik ölçümüne etkisi [6]	33
Şekil 2.27	Kırma taş, kum ve kum-naylon plastik karışımı numunelerde tabaka kalınlığının GeoGauge rijitlik ölçümüne etkisi [6]	34
Şekil 2.28	İvme ölçümü ile belirlenen frekans farklarının SEA ile karşılaştırılması ve belirlenen dinamik yükler[18].....	35
Şekil 2.29	Farklı modüller ve farklı Rayleigh katsayısına bağlı SEA sonuçları [18]	36

Şekil 3.1	Deney numunesinin dane çapı dağılım eğrisi	37
Şekil 3.2	Zeminin yerleştirileceği deney tankı	38
Şekil 3.3	Verifier Mass ile kalibrasyon kontrolü	39
Şekil 3.4	GeoGauge ile serilen katmandan ölçüm alınması	40
Şekil 3.5	GeoGauge ile ölçülen rijitlik değerinin zemin kalınlığına bağlı değişimi.....	41
Şekil 3.6	Lazer metre ve cetvel yardımı ile tabaka kalınlığının ayarlanması	43
Şekil 3.7	GeoGauge ile ölçülen rijitlik modülünün rölatif sıklıkla değişimi.....	44
Şekil 3.8	GeoGauge ile ölçülen elastisite modülünün rölatif sıklıkla değişimi	44
Şekil 3.9	Deney tankı ve plaka yükleme hücresi.....	45
Şekil 3.10	(a) Hidrolik yük kolu ve analog yük kadranı, (b) Hidrolik başlık.....	45
Şekil 3.11	Yükleme başlığı ve deplasman sensörlerinin yerleşim şekli	46
Şekil 3.12	Plaka yükleme deney şeması	47
Şekil 3.13	$Dr=50$ sıklık değeri için plaka yükleme deneyi yük-oturma eğrileri.....	48
Şekil 3.14	$Dr=50$ kumda meydana gelen yerel göçme zarfı ile oluşan kabarma.....	49
Şekil 3.15	$Dr=90$ sıklık değeri için plaka yükleme deneyi yük-oturma eğrileri.....	50
Şekil 3.16	$Dr=90$ kumda meydana gelen genel göçme zarfının sınırları	50
Şekil 3.17	Örnek bir gerilme deformasyon eğrisi ve elastisite modülü değerleri.....	51
Şekil 3.18	GeoGauge ve plaka yükleme deneyi modüllerinin karşılaştırılması.....	52
Şekil 3.19	Rölatif sıklık deneyinde ve plaka yükleme deneyinde okunan GeoGauge modüllerinin karşılaştırılması.....	53
Şekil 4.1	Standart bir drenajlı üç eksenli basınç deneyinde hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [20]	55
Şekil 4.2	PYD modeli üzerinde (a) birim deplasman ve (b) yayılı yük geometrileri....	60
Şekil 4.3	GeoGauge geometrik model üzerinde dinamik ve statik kuvvet.....	61
Şekil 4.4	$Dr=50$, farklı elastisite modüllerine bağlı PLAXIS birim deplasman analizleri.....	63
Şekil 4.5	$Dr=90$, farklı elastisite modüllerine bağlı PLAXIS birim deplasman analizleri.....	63
Şekil 4.6	$Dr=50$, PLAXIS birim deplasman analizi ve PYD karşılaştırılması.....	64
Şekil 4.7	$Dr=90$, PLAXIS birim deplasman analizi ve PYD karşılaştırılması.....	64
Şekil 4.8	$Dr=50$, farklı elastisite modüllerine bağlı PLAXIS yayılı yük analizleri	66
Şekil 4.9	$Dr=90$, farklı elastisite modüllerine bağlı PLAXIS yayılı yük analizleri	66
Şekil 4.10	$Dr=50$, PLAXIS yayılı yük analizi ve PYD karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.11	$Dr=90$, PLAXIS yayılı yük analizi ve PYD karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.12	Tek genlik deplasmanından rijitliğin hesaplanması	69
Şekil 4.13	$Dr=50$, 100 Hz için farklı Rayleigh katsayıları ile elde edilen dalga genlikleri ve sönümleyici sınır etkisinin karşılaştırılması	70
Şekil 4.14	$Dr=50$, 196 Hz için farklı Rayleigh katsayıları ile elde edilen dalga genlikleri ve sönümleyici sınır etkisinin karşılaştırılması	70
Şekil 4.15	$Dr=90$, 100 Hz için farklı Rayleigh katsayıları ile elde edilen dalga genlikleri ve sönümleyici sınır etkisinin karşılaştırılması	71
Şekil 4.16	$Dr=90$, 196 Hz için farklı Rayleigh katsayıları ile elde edilen dalga genlikleri ve Sönümleyici sınır etkisinin karşılaştırılması.....	71

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 GeoGauge'in teknik özellikleri [1]	5
Çizelge 2.2 Farklı zemin türleri için Poisson Oranı değerleri [7]	12
Çizelge 2.3 Belirli zemin türleri için zemin yatak katsayıları [12]	19
Çizelge 2.4 Zemin yatak katsayısının hesaplanması için geliştirilmiş eşitlikler [13]	20
Çizelge 2.5 GeoGauge ile okunan "k" rijitlik değerleri (MN/m) [14]	22
Çizelge 2.6 Plaka yükleme deneyi ile bulunan "k" ve "E" değerleri [14]	23
Çizelge 2.7 GeoGauge'in ve PYD'nin aynı noktadaki modül değerleri [14]	24
Çizelge 2.8 Dolgu malzemelerinin modifiye proktor deneyi sonuçları [16]	27
Çizelge 2.9 Deney Numunesinin Zemin Özellikleri ve Zemin Parametreleri [17]	29
Çizelge 2.10 Başlangıç, tekrar yükleme ve GeoGauge elastisite modülleri [17]	31
Çizelge 3.1 Deney numunesinin indeks özellikleri	38
Çizelge 3.2 İri daneli zeminlerin sıklık dereceleri [19]	42
Çizelge 3.3 Kum seviyesine bağlı olarak değişen rölatif sıklık değerleri	43
Çizelge 3.4 PYD ve GeoGauge modül değerleri	52
Çizelge 3.5 GeoGauge modül değerlerinin PYD modüllerine oranları	53
Çizelge 4.1 $Dr=50$ ve $Dr=90$ sıklıklardaki farklı modül değerleri	57
Çizelge 4.2 HS model için belirlenen model zemin parametreleri	59
Çizelge 4.3 $Dr=50$, 100 Hz ve 196 Hz dalga genliklerine göre rijitlik ve elastisite modülü ortalamaları değerleri	72
Çizelge 4.4 $Dr=90$, 100 Hz ve 196 Hz dalga genliklerine göre rijitlik ve elastisite modülü ortalamaları değerleri	72
Çizelge 4.5 GeoGauge ölçümleri ve PLAXIS analizlerinin karşılaştırılması	73

KUM ZEMİNDE RİJİTLİĞİN GEOGAUGE İLE BELİRLENMESİ

Balbora MERT

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Havvanur KILIÇ

Baraj ve yol dolgularında tabakaların, kaplamalarda temel altı ve temel kademelerinin ve de benzer zemin imalatlarının uygulamaları sırasında yerleşim kalitesinin kontrolü esastır. Humboldt GeoGauge yerleşim üniformluğunun kontrol edilmesinde kullanımı giderek yaygınlaşan bir arazi ölçüm cihazıdır. Bu çalışmada, dolgu malzemesi olarak kullanılan kötü derecelenmiş temiz orta kum (SP) ile kuru koşulda model deneyler yapılarak (i) GeoGauge rijitliği ile rölatif sıklık derecesi arasındaki ilişkinin ve (ii) GeoGauge rijitliği ile plaka yükleme deneyinden elde edilen rijitlikler arasındaki ilişkinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneyler sonucunda, GeoGauge rijitliği ile rölatif sıklık derecesi arasında (yerleşim sıklığı $Dr \geq 40\%$ için) doğrusal bir ilişki elde edilmiştir. GeoGauge rijitliğinin (E_G) plaka yükleme deneyinden elde edilen yük boşaltma rijitliğine (E_u) yakın değerler verdiği ($E_G/E_u \approx 0.93$) görülmüştür. GeoGauge rijitliği ile ortalama sekant rijitliği arasındaki ilişkinin yerleşim sıklığına bağlı olarak değiştiği görülmüş, orta sıkı kum için $E_G/E_{50} \approx 9.71$ ve çok sıkı kum için $E_G/E_{50} \approx 4.03$ ilişkileri elde edilmiştir. GeoGauge ve plaka yükleme deneyleri sonlu elemanlar analiz yöntemini kullanan PLAXIS yazılımı ile modellenmiş, deney sonuçları ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır.

ABSTRACT

DETERMINATION OF STIFFNESS OF SAND BY USING GEOGAUGE

Balbora MERT

Department of Civil Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Havvanur KILIÇ

Quality control in compaction of soil layers in applications such as dam construction and highway construction etc. is essential. Humboldt Geogauge is a device developed for this purpose and is widely used. In this study, laboratory model tests on poorly-graded clean medium sand (SP) are performed in order to determine (i) relationship between GeoGauge measurement and relative density and (ii) relationship between GeoGauge measurement and stiffness moduli obtained from plate load test. A linear relationship between GeoGauge measurement and relative density (for $D_r \geq 40\%$) is found. GeoGauge measurement is found very close to unloading modulus in all cases ($E_G/E_U=0.93$) while relationship between GeoGauge measurement and average secant modulus depends on relative density. Ratio of GeoGauge measurement to average secant modulus is determined as 9.71 for medium dense sand and 4.03 for very dense sand. Plate load tests and GeoGauge tests are modeled by using PLAXIS 2D Finite Element Code. Analysis results and test results are compared and evaluated.

1.1 Literatür Özeti

Baraj ve yol dolgularında tabakaların, kaplamalarda temel altı ve temel kademelerinin ve de benzer zemin imalatlarının uygulamaları sırasında yerleşim kalitesinin kontrolü esastır. Üniform yerleşimli bir zemin tabakasında her bir noktada yoğunluğun ve bununla beraber rijitliğin aynı olması beklenir.

Humboldt GeoGauge yerleşim üniformluğunun kontrol edilmesinde kullanımı giderek yaygınlaşan bir arazi ölçüm cihazıdır. Cihaz, altında yer alan halka ayak aracılığı ile zemine dinamik yük uygulamakta ve meydana gelen yer değiştirmeyi dikkate alarak zemin rijitliğini hesaplamaktadır. Kullanımı için eğitilmiş teknik elemana gereksinim duyulmaması, ölçümün oldukça kısa sürmesi, zemini örselememesi ve buna bağlı olarak deneylerin tekrarlanabilir olması cihazın ön plana çıkan özellikleridir.

1.2 Tezin Amacı

GeoGauge cihazı ile rijitlik ölçümü bir tür plaka yükleme deneyi olarak da düşünülebilir. Ancak, cihaz tarafından uygulanan dinamik yük altında küçük düşey yer değiştirmeler ($< 1.27 \times 10^{-6}$ m @ 125 Hz) meydana gelmektedir. Bu nedenle elde edilen rijitliğin plaka yükleme deneyi ile elde edilen yük-oturma ilişkisi üzerinde hangi eğimi temsil ettiği belirlenmelidir.

Bu çalışmada, temiz orta kum ile kuru koşulda model deneyler yapılarak:

- GeoGauge modülü ile rölatif sıkılık arasındaki ilişkinin belirlenmesi,

- Farklı rölatif sıklık derecelerinde hazırlanmış model zemin ortamlarında önce GeoGauge deneyinin ve sonrasında plaka yükleme deneyinin yapılarak GeoGauge rijitliğinin plaka yükleme deneyi ile elde edilen yük-oturma ilişkisi üzerinde hangi eğimi temsil ettiğinin belirlenmesi ve
- GeoGauge ve plaka yükleme deneyleri sonlu elemanlar analiz yöntemini kullanan PLAXIS yazılımı ile modellenerek deney sonuçları ile analiz sonuçlarının karşılaştırılmasının yapılması amaçlanmaktadır.

1.3 Hipotez

GeoGauge modülü ile rölatif sıklık arasındaki ilişki belirlenebilir, ve böylelikle alınan GeoGauge ölçümleri ile yerleşim üniformluğunu kontrol etmek olanaklı olabilir. Bununla beraber, GeoGauge modülü ile plaka yükleme deneyinden elde edilecek modüller (başlangıç modülü, ortalama sekant modülü, boşaltma modülü ve tekrar yükleme modülü) ilişkilendirilebilir. Böylelikle kullanımı oldukça basit olan ve kısa sürede ölçüm alan bir cihaz kullanılarak zemin rijitliği hakkında bilgi edinilebilmesi olanaklı olur.

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 GeoGauge

2.1.1 Tanımı

GeoGauge H4140 ya da diğer adıyla SSG (Soil Stiffness Gauge) zemin rijitliğini yerinde ölçmek için geliştirilmiş taşınabilir bir cihazdır. Ölçüm alınırken zemini örselemez ve özel eğitilmiş bir teknik operatöre ihtiyaç duyulmaz. Yüzlerce ölçümü kaydedebilecek geniş bir hafıza kapasitesine sahip olması ve bu ölçümleri çok kısa sürede yapabildiği için GeoGauge pratik bir ölçüm cihazı olarak düşünülebilir. Aynı zamanda Humboldt Manufacturing Company isimli şirket tarafından geliştirilmiş patentli bir cihazdır (Şekil 2.1).

GeoGauge kolay taşınabilir, 28 cm çapında, 25.4 cm yüksekliğinde ve yaklaşık 10 kg ağırlığında silindirik bir hücreden oluşmaktadır. Cihazın altında 88 mm iç çapı, 114 mm dış çapı olan 13 mm et kalınlığında metal bir halka ayak mevcuttur. Ölçüm alınırken ayak doğrudan zemine temas eder. Bu esnada lastik izolasyon ayakları cihazı titreşimden korur. Bu metal ayaktan gönderilen değişik frekanslardaki titreşimler yardımıyla zeminden ölçüm alınmaktadır.

GeoGauge; sıkıştırılmış zeminlerin, kaplamalarda temel altı ve temel kademelerinin ve de benzer zemin imalatlarının uygulamaları sırasında zemin rijitlik modülleri E ve k'nin yerinde ölçülmesinde kullanılan bir cihazdır. Çizelge 2.1'de GeoGauge'in teknik özellikleri belirtilmiştir.



Şekil 2.1 Humbolt GeoGauge H4140 cihazı

Zemin serme işleminde hedeflenen sıklığa ulaşmak için her silindir geçişinden sonra eş zamanlı olarak GeoGauge ile ölçüm alınabilir. Bu sayede farklı zemin tabakalarının sıkıştırılmasında da tercih edilen bir cihazdır. Ayrıca bu tezin referanslarında görülebileceği gibi akademik araştırmalarda ve özel laboratuvarlarda yürütülen ortak çalışmalarda da sıkça kullanılan bir cihazdır.

Çizelge 2.1 GeoGauge'in teknik özellikleri [1]

Zemin Ölçüm Aralığı <i>Rijitlik (k)</i> <i>Young Modülü (E)</i> <i>Ölçüm Kesinliği</i>	3 MN/m ~ 70 MN/m 26 MPa ~ 610 MPa < + 10 %
Yüzeyden Ölçüm Derinliği	220 mm ~ 310 mm
Kalibrasyon <i>Kesinlik Payı (%)</i> <i>Etkin Aralık</i>	< + 1% 4 MN/m ~ 16 MN/m
Elektrik Aksamı <i>Güç Kaynağı</i> <i>Batarya Ömrü</i>	6 adet (D) tek kullanımlık pil. 500 ila 1500 ölçüm.
Mekanik Aksam <i>Harici Malzemeler</i> <i>Titreşim</i> <i>Düşey Terazisi</i> <i>Çalıştırma Çevre Sıcaklığı</i> <i>Depolama Sıcaklığı</i> <i>Nem (%)</i> <i>Cihaz Boyutları</i> <i>Ağırlık</i>	Alüminyum kutu < 1.27×10^{-6} m @ 125 Hz $\pm 5^\circ$ 0°C ~ 38°C -20°C ~ 50°C 98% 28 cm genişlik 25.5 cm yükseklik Net 10 kg Taşıma Kutusu ile 16,8 kg
Standart Aksesuarlar	Taşıma Kutusu, 6 adet (D) pil, Kullanım Kılavuzu
İsteğe Bağlı Aksesuarlar	Cihazın kalibrasyonu için Verifier Mass cihazı. Data Aktarımı için kızılötesi okuyuculu kablolu serial adaptör.

2.1.2 GeoGauge'in Çalışma Prensibi

GeoGauge zemin rijitliğini saptarken, Şekil 2.2'de verilen kesitte görüldüğü üzere cihazın altında yer alan rijit bir halka ayak (1) ile cihazın içinde bulunan esnek bir plakanın (3) kuvvet-deplasman ölçümlerinden faydalanır. Cihazın içinde bulunan mekanik bir titreşim aleti (4), cihazın altında bulunan metal ayaktan (1) ölçüm alınacak zemine 100 Hz ile 196 Hz arasında, 25 farklı frekansta düşey yönde dinamik kuvvet uygulayarak titreşim gönderir. Metal ayağa bağlı özel iki sensör her frekansta zemine uygulanan kuvveti ve zamana bağlı deplasmanı ölçer. Mikroişlemciler bu ölçümlerden zeminin deplasman direncini yani rijitliğini belirler. Farklı frekanstaki rijitliklerin ortalamasını alarak tek bir rijitlik değeri ekrana verilir. Ölçüm esnasında cihaz zeminde 1.27×10^{-6} m'den daha az deplasmanlara sebep olur [1].

GeoGauge zemin rijitliğini hesaplarken aşağıdaki Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2'den faydalanır.

$$F = k_f (X_2 - X_1) \quad (2.1)$$

$$k_z = \frac{F}{X_1} \quad (2.2)$$

Burada;

F : Titreşim cihazının uyguladığı kuvvet (N),

k_f : Esnek plakanın rijitliği (MN/m),

X_1 : Rijit plakanın yer değiştirmesi (m),

X_2 : Esnek plakanın yer değiştirmesi (m),

k_z : Zeminin rijitliği (MN/m) olarak belirtilir.

Buradan da zemin rijitliği aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$k_z = \frac{k_f (X_2 - X_1)}{X_1} \quad (2.3)$$

Uygulanan 25 farklı frekans sayısı ile rijitlik ortalaması da;

$$k_z = k_f \sum_1^n \left(\frac{(X_2 - X_1)}{X_1} \right) = k_f \sum_1^n \left(\frac{(V_2 - V_1)}{V_1} \right) \quad (2.4)$$

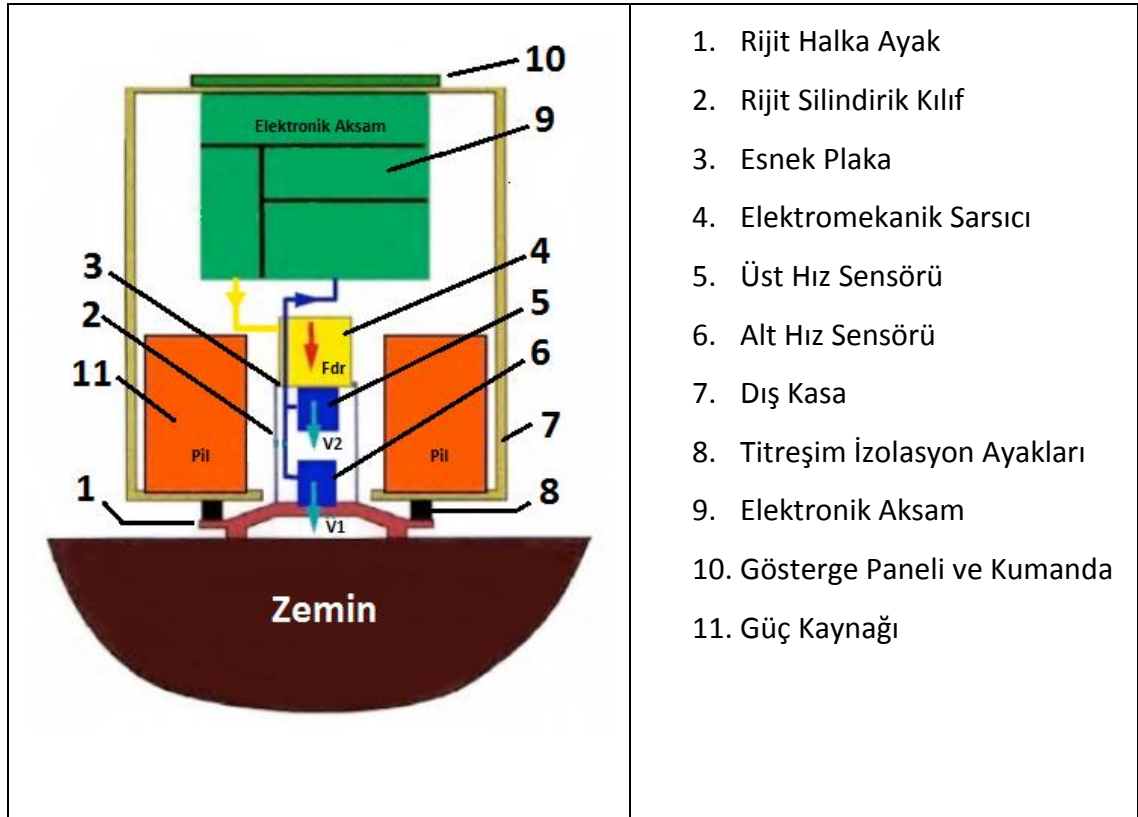
bağıntısı kullanılarak bulunur [2].

Burada “n” uygulanan frekansların sayısıdır. Eşitlik 2.4’de görüldüğü gibi deplasmanlar yerine hız değerleri de kullanılabilir. Hız ölçümlerinin kullanılması, zeminde oluşan deplasmanları ölçmek için sabit bir referans noktasına gereksinimi ortadan kaldırmaktadır. Bu da zeminde meydana gelen küçük oturmaların hassas bir şekilde ölçülmesine izin vermektedir.

Burada;

V_1 : Rijit plakanın hızı (m/s),

V_2 : Esnek plakanın hızı (m/s) olarak alınır [2].



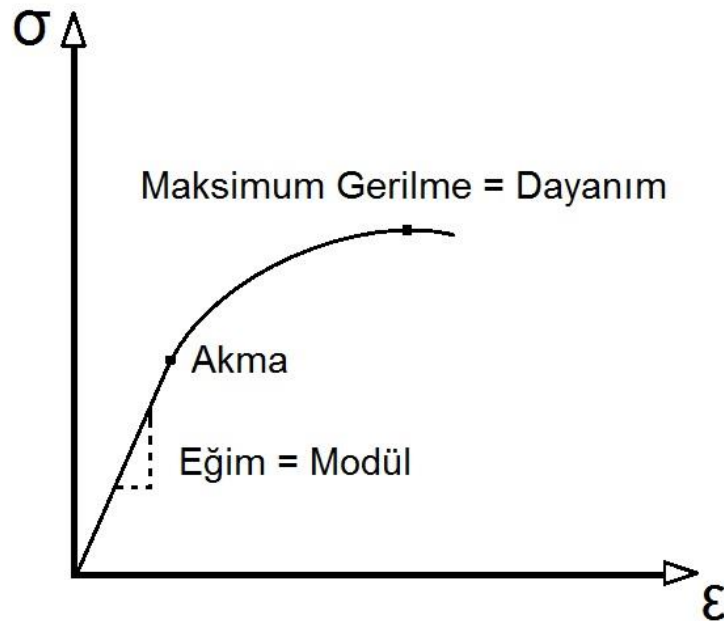
Şekil 2.2 GeoGauge'in şeması [1]

2.1.3 Rijitliğin Tanımı ve Modüller

Zeminin rijitliği, uygulanan gerilme ile buna karşılık meydana gelen deformasyonlar arasındaki ilişkidir. Bir başka deyişle rijitlik, malzemeye uygulanan gerime karşısında malzemede oluşan deformasyon yapma direncidir. Rijitliği tanımlayacak parametreler ise gerilmeler ile deformasyonlar arasındaki ilişkiyi tanımlayan modüllerdir. Bu modüller gerilme-deformasyon eğrisindeki eğim olarak da tanımlanabilir. Buna göre malzeme uygulanan gerilme altında ne kadar az deformasyon yaparsa rijitliği o kadar yüksek kabul edilebilir.

Normal gerilmeler ile eksenel deformasyonlar arasındaki ilişkiyi elastisite modülü (E), kayma gerilmeleri ile kayma deformasyonları arasındaki ilişkiyi kayma modülü (G) tanımlar. Sözü edilen modüller (E, G) gerilme-deformasyon grafiğinde akmadan önceki kısmı kontrol etmektedir. Enine şekil değiştirmenin boyuna şekil değiştirmeye oranı olan Poisson Oranı (ν) ise sadece rijitlik bölgesini değil akma sonrası doğrusal olmayan davranışı da kontrol etmektedir. Bir malzemenin taşıyabileceği nihai gerilmeye o malzemenin dayanımı denir.

Şekil 2.3’de basit bir lineer elastik malzemenin akmaya kadar olan ve sonrasında kopmaya kadar olan maksimum gerilme noktası görülmektedir. Bu nokta malzemenin dayanım noktası olarak tanımlanır.



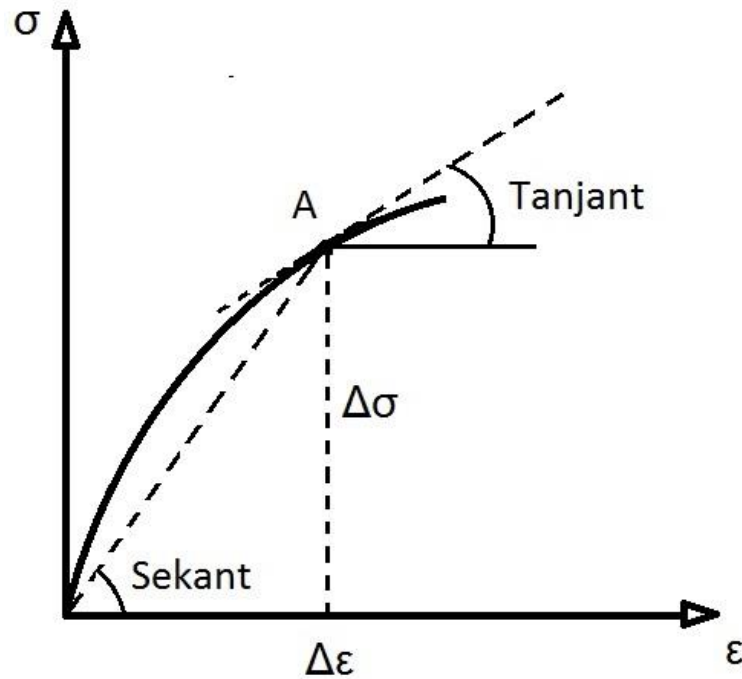
Şekil 2.3 Gerilme deformasyon grafiğinde akma öncesi modül ve dayanım [3]

Modül ve dayanım birbiriyle karıştırılmaması gereken farklı kavramlardır. Aynı elastisite modülüne sahip iki malzemenin farklı dayanım noktaları olabilir. Örneğin camın ve alüminyumun elastisite modülleri 70,000 MPa mertebelerindedir. Buna karşılık camın dayanımı 1000 MPa, alüminyumun 100 MPa mertebelerindedir [3].

Eğer gerilme-deformasyon eğrisi doğrusal artış gösteriyorsa modül değerlerini saptamak kolay olmaktadır. Ancak eğri Şekil 2.4’de ki “A” noktasında olduğu gibi bir yay çiziyorsa noktanın tanjant modülü veya sekant modülü aşağıdaki Eşitlik 2.5 ve Eşitlik 2.6 ile bulunur.

$$\text{Tanjantmodülü} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (2.5)$$

$$\text{Sekantmodülü} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2.6)$$



Şekil 2.4 Gerilme deformasyon eğrisinde tanjant ve sekant modülleri [3]

Burada dikkat edilmesi gereken nokta, söz konusu modüllerin bir malzeme özelliği olduğudur. Yani malzemenin boyutuna ve formuna bağlı olmayan intensif bir özellik olmasıdır. Ancak rijitlik (k) malzemenin boyutlarına bağlı olan ekstensif bir özelliktir. Örnek olarak metal bir çubuk için rijitlik (k) ile elastisite modülü (E) arasındaki bağıntı;

$$k = \frac{EA}{L} \quad (2.7)$$

Eşitliği ile tanımlanır. Eşitlik 2.7’de “A” metal çubuğun kesit alanı ve “L” de metal çubuğun boyudur. Mevcut bir gerilme-deformasyon eğrisinden birçok modül değeri elde edilebilir. Bunlar başlangıç modülü, sekant modülü, tanjant modülü, boşaltma modülü ve tekrar yükleme modülleri olabilir. Eğer cisim elastik davranış gösteriyorsa tanjant modülü ve sekant modülü aynı olmaktadır.

2.1.4 GeoGauge ile Zemin Rijitlik Modüllerinin Hesaplanması

Elastisite teorisine bağlı olarak GeoGauge ile ölçülen zemin rijitliği (k) ile zeminin elastisite modülü (E) ve kayma modülü (G) hesaplanabilir. Bunun için GeoGauge’in geometrik ölçüleri ve zeminin Poisson Oranı gerekmektedir [4].

$$k = \frac{ER}{(1-\nu^2)\omega(n)} \quad (2.8)$$

Burada;

k : GeoGauge tarafından ölçülen zemin rijitliği (MN/m),

E : Elastisite modülü (MPa),

ν : Poisson Oranı,

R : Halka ayağın dış çapıdır. GeoGauge için bu değer 0.05715 m’dir.

$\omega(n)$: Halka ayağın iç çapıyla dış çapı arasındaki orana bağlı bir katsayıdır. GeoGauge için bu değer 0.565’tir.

Buradan “k” değeri;

$$k = \frac{1.77ER}{(1-\nu^2)} \quad (2.9)$$

olarak bulunur.

Elastisite modülü ve kayma modülü arasındaki bağıntı;

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.10)$$

olduğundan "k" değerine bağlı kayma modülü;

$$G = \frac{k(1-\nu)}{3.54R} \quad (2.11)$$

şeklinde bulunur [4].

GeoGauge'in ölçüm sonuçlarında verdiği rijitlik ve elastisite modülü değerleri arasında Poisson Oranı'na bağlı olarak yaklaşık 1/9 oranı olduğu görülmektedir.

Elastik Teori; yarı sonsuz elastik bir ortamın üstüne etkiyen noktasal bir kuvvetin meydana getirdiği şekil deformasyonunu veren Bussinesg Denklemi'ne dayanır. Fakat doğal toprak zeminler Hooke Yasası'na uymadıklarından ve homojen olmadıklarından elastik teori gerçekte bu zeminlere uygulanamaz [5].

Zeminlerin davranışının Hooke Yasası'na uygun olmamasına karşın Eşitlik 2.8, 2.9, 2.10 ve 2.11; homojen, izotrop ve yarı sonsuz bir ortam için elastisite teorisi göz önüne alınarak türetilmiştir [4].

Çizelge 2.1'de GeoGauge'in efektif ölçüm derinliğinin 220 mm ve 310 mm arasında olduğu belirtilmektedir. Ancak çok katmanlı bir zemin yapısında (örneğin yol yapımında veya toprak dolgu bir baraj inşasında) tabaka kalınlığının yetersiz olduğu durumlarda GeoGauge ile alınan rijitlik ölçümleri alt tabakanın rijitliğinden etkilenmektedir [6]. Laboratuvar çalışmaları GeoGauge ile alınan rijitlik ölçümlerinin model deney ortamının sınır koşullarından etkilendiğini göstermiştir. Ölçümler üzerindeki bu etki model deney ortamının sınırları genişledikçe azalmaktadır. Bununla beraber silindirik bir tankın çapının 60 cm veya daha büyük olması durumunda alınan ölçümlerin sınır koşullarından etkilenmediği görülmüştür [6].

2.1.5 GeoGauge'in Uygulama Esasları

GeoGauge ile iyi bir ölçüm yapabilmek için sırasıyla yapılması gerekenler şunlardır [1];

1- Zemin yüzeyi ölçüm için hazırlanır.

- a- Zemin yüzeyi süpürülüp gevşek malzemedan temizlenir. Daha sonra tesviye edilir.
- b- İri agrega ve sert kilden oluşan zeminlerde halka, yüzeye tam temas sağlayamıyorsa zemine 3-6 mm kalınlığında nemli kum serpmek gerekebilir.

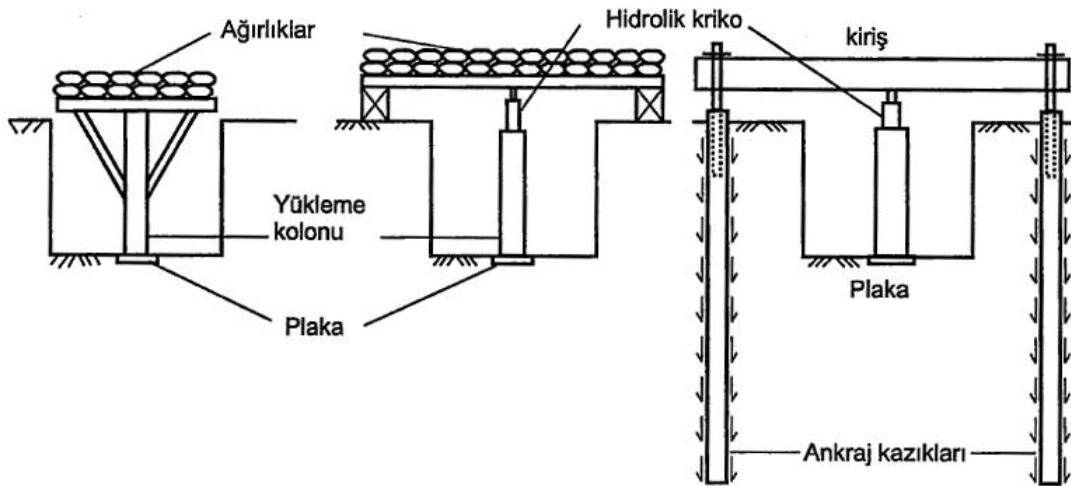
- c- Cihazın etrafında bir miktar açıklık alan sağlanmalıdır. Cihazın zemin dışında bir yüzeye temas etmemesi gerekir.
- 2- Metal halka ayağı toprak kalıntılarından temizlenir.
- 3- Cihaz zemine oturtulur ve bir miktar bastırılarak zemine tam yerleştirilir. Zemine bağlı olarak 5-6 kg kuvvet yeterli olacaktır. Fakat kuru kum gibi kohezyonsuz zeminlerde ve halka ayağın tam iz yapabildiği diğer yumuşak zeminlerde cihazı yerleştirirken kuvvet uygulamamak gerekir.
- 4- Tutarlı ve doğru ölçüm almak için yönetmelik [2] cihazın halka ayağı zemine en aşağı %60 oranında temas etmesi gerektiğini söylemektedir, ancak çalışmalar en doğru sonuçların tam temas (%100) ile sağlandığında elde edilebildiğini göstermiştir.
- 5- Cihaz, “ON” tuşuna basılarak çalıştırılır.
- 6- Cihazın gösterge panelinden gerekli datalar girilir (hedeflenen rijitlik, Poisson Oranı ve/veya yer belirleyici). Bunun için önce SHIFT+MEASURE tuşlarına basarak zeminin tahmini Poisson Oranı seçilir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 Farklı zemin türleri için Poisson Oranı değerleri [7]

Zemin Cinsi	Poisson Oranı, (ν)
Gevşek Kum	0.20 - 0.40
Orta Sıkı Kum	0.25 - 0.40
Sıkı Kum	0.30 - 0.45
Siltli Kum	0.20 - 0.40
Yumuşak Kil	0.15 - 0.25
Orta Katı Kil	0.20 - 0.50

- 7- “MEASURE” tuşuna basılarak ölçüm alınır. Cihaz ölçüm almaya başladığında gönderdiği frekanslar aracılığıyla ilk önce civardaki inşaat gürültülerini saptar (noise) daha sonra rijitliği ölçer. Ortalama rijitlik (k) MN/m (lb/in) ve elastisite modülü (E) MPa (psi) olarak ekranda görünür. Civarda inşaat gürültüsü varsa cihaz 25 m kadar uzağa götürülerek ölçüm alınabilir.
- 8- Her ölçümden sonra “SAVE” tuşuna basılarak ölçümler kaydedilir.

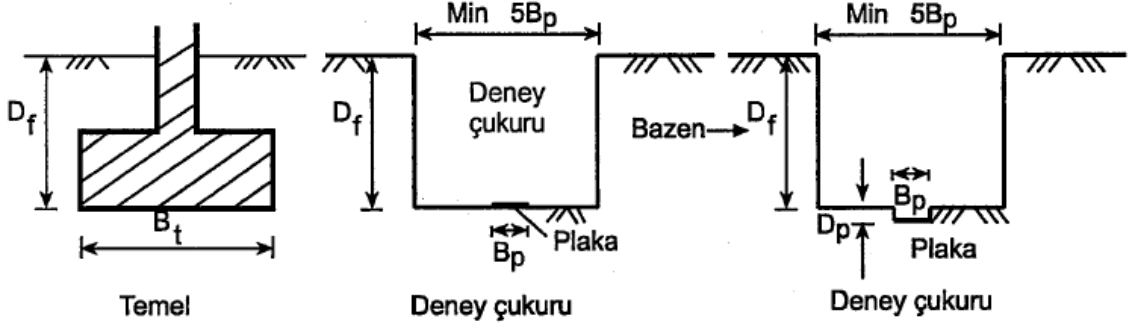
kaydedilir. Yükleme, zeminde göçme gerçekleşinceye kadar, yani plaka ani bir şekilde batmaya başlayana kadar devam eder. Deney, plaka izin verilebilir taşıma gücünün birkaç katına kadar da devam ettirilebilir. Zemine yüklenen plaka daire veya kare kesitli olabilir. Daire plaka, daire şeklindeki temel ayakları için seçilirken; kare, geriye kalan tüm temeller için kullanılabilir. Büyük çaplı plakalar kullanıldığında rijitliği arttırmak için küçük plakalar daha büyüklerin üzerine piramit şeklinde yerleştirilerek yükleme yapılabilir.



Şekil 2.6 Plaka yükleme deney düzenekleri [8]

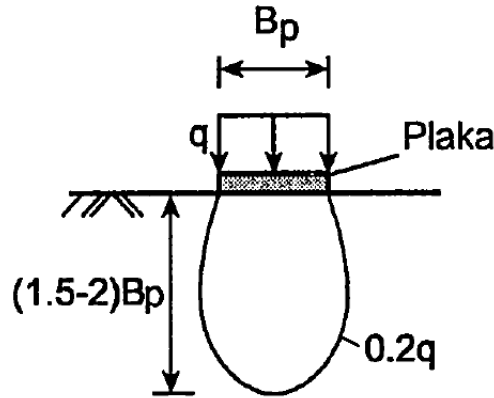
ASTM [11] de yüklemeler sırasında oluşacak taban basınçlarının plakayı eğmemesi için plaka kalınlığının 25 mm'den az olmaması önerilmiştir. Çünkü temel pratik olarak rijit sayılır. Yine ASTM [11], 152 mm ile 762 mm arasında değişen farklı çaplardaki plakaların üst üste konulmasıyla piramit şeklinde rijit bir blok oluşturulmasını önermiştir. Literatürlerde nadiren de olsa daha büyük çaplı plâkaların kullanıldığı görülmüştür.

Arazideki deney zemin yüzeyinde veya temelin oturacağı derinliğine kadar yüzeyi alınmış bölgede yapılır. Deney için açılan çukurların genişliğinin, yük plakasının genişliğinin en az beş katı olması gerekir [8]. Bunun nedeni; çukur derinliğine bağlı olarak, çukur kenarındaki yüksek toprak yükünün deney yapılan kısımdaki yük taşıma kapasitesini arttırmaması yani duvarlardan kaynaklanan düşey toprak basınçlarının deney sonuçları üzerindeki etkisini önlemektir. Şekil 2.7'de plaka yükleme deneyi için açılan deney çukurlarında derinlik ve genişlik oranları görülmektedir.



Şekil 2.7 Plaka yükleme deneyi için açılmış deney çukuru [8]

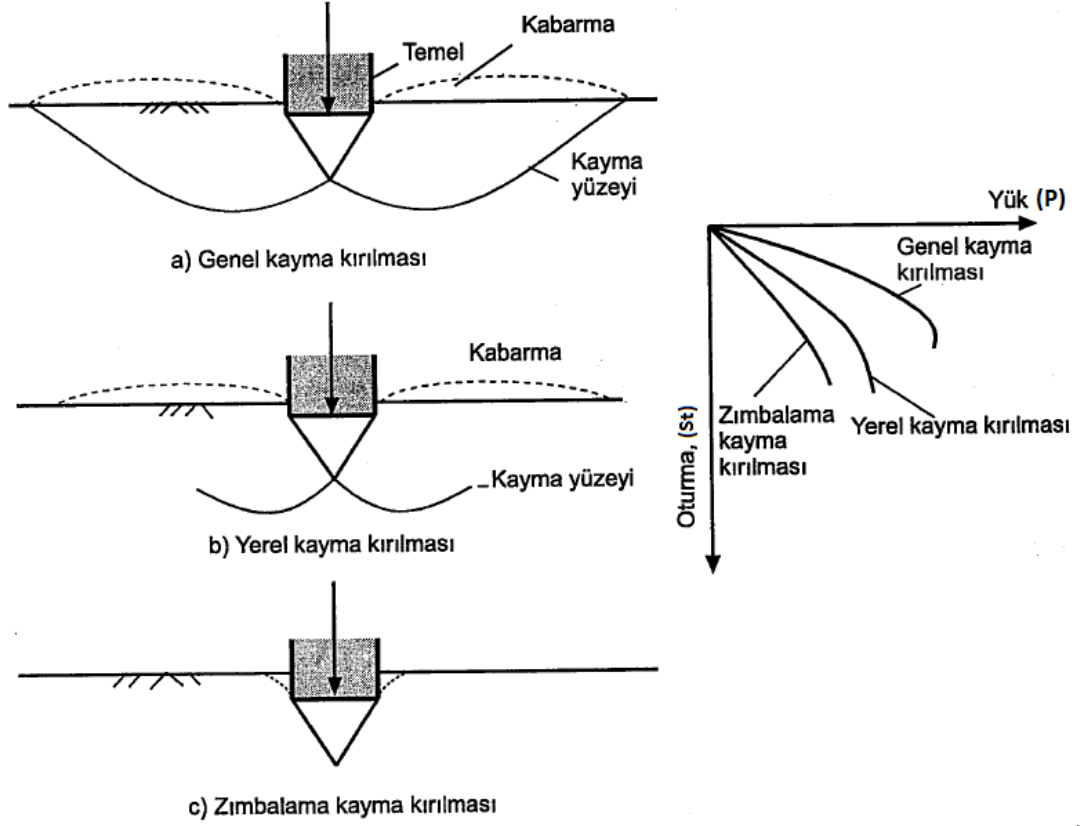
Plaka yükleme deneylerinde kullanılan yükleme plakası boyutlarının oturma ve sıkışma üzerine önemli ölçüde etkisi vardır. “ B_p ” genişliğinde bir yükleme plakası ile zemine uygulanan “ q ” yükü, plaka genişliğinin 1.5-2 katı derinliğe $0.2q$ oranında etkimektedir. Bu sebeple kare veya daire plakalar ve temeller için anlamlı derinlik, yani taşıma gücü ve oturma gibi olayların meydana geldiği derinlik $(1.5-2)B_p$ olarak tanımlanır (Şekil 2.8). Yani küçük yükleme plakaları ile ancak zeminlerin yüzey tabakaları üzerinde ölçümler alınabilir. Buna bağlı olarak da sıklık, zemin cinsi, kayma direnci parametreleri gibi zemin özelliklerinin derinlikte değiştiği durumlarda, plaka yükleme deneyi yanıltıcı sonuçlar verebilir [8].



Şekil 2.8 Plaka genişliğine bağlı yük etki ilişkisi [8]

Temel veya başka bir yük plakası ile zemine yük uygulandığında zeminin taşıma kapasitesinin aşılması durumunda üç tip kayma meydana gelebilir (Şekil 2.9). Bunlar genel göçme (a), yerel göçme (b) ve zımbalama göçmesi (c) olarak tanımlanır. Genel göçmede kayma yüzeyi belirginken diğer iki göçmede belirgin değildir. Kayma sırasında

yanlarda kabarma görülür ancak zımbalama göçmesinde bu kabarma görülmemektedir.



Şekil 2.9 Zeminlerde oluşan farklı göçme zarfları [8]

Genel göçme sıkı veya katı zeminlerde; yerel göçme ise gevşek veya yumuşak zeminlerde meydana gelir. Bu konuda çeşitli ölçütler olup, $D_r > \%70$ ise genel göçme, $D_r < \%30$ ise yerel veya zımbalama göçmesinin meydana geldiği genel olarak söylenebilir [8].

2.2.2 Plaka Yükleme Deneyi ile Zemin Güvenli Taşıma Gücünün Belirlenmesi

Plakanın güvenli taşıma gücü, plaka sınır taşıma gücünün bir güvenlik sayısına bölünmesi ile bulunur [10].

$$q_{e_p} = \frac{q_{s_p}}{GS} \quad (2.12)$$

Plakanın bir model temel olması nedeniyle, temel için; zemin güvenli taşıma gücü, kohezyonlu zeminlerde;

$$qe_T = qe_p \quad (2.13)$$

Kohezyonsuz zeminlerde;

$$qe_T = qe_p \left(\frac{B_T}{B_p} \right) \quad (2.14)$$

olarak hesaplanabilir. Burada;

qs_p : Plaka için sınır zemin taşıma gücü,

GS : Güvenlik katsayısı (genelde 2-3 gibi bir değerdir),

qe_T : Temel için güvenli zemin taşıma gücü,

qe_p : Plaka için güvenli zemin taşıma gücü,

B_T : Temel genişliği veya çapı,

B_p : Plaka genişliği veya çapı olarak tanımlanır.

Oturma-yük eğrisinde, kırılma noktası belirgin değilse veya plaka, sınır taşıma gücüne kadar yüklenmemişse, ampirik bir şekilde örneğin 10 mm'lik oturmaya karşılık gelen taban basınç değeri güvenlik sayısına bölünerek, plaka güvenli taşıma gücü belirlenir [10].

2.2.3 Plaka Yükleme Deneyi ile Temel Oturmalarının Tahmini

Plaka yükleme deneyi göreceli olarak kısa süreli bir deneydir. Bu nedenle kohezyonlu zeminlerde meydana gelen uzun süreli konsolidasyon oturmalarının plaka yükleme deneyi ile tam olarak ölçülmesi pek olası değildir. Zeminin geçirimliliğine bağlı olarak oturma kohezyonlu zeminlerde oldukça güçtür. Kohezyonsuz zeminlerde bu değer;

$$St_T = St_p \left(\frac{2B_T}{B_T + B_p} \right)^2 \quad (2.15)$$

bağıntısıyla, kohezyonlu zeminlerde ise;

$$St_T = St_p \left(\frac{B_T}{B_p} \right) \quad (2.16)$$

bağıntısıyla bulunabilir. Burada;

St_p : Plakadaki oturma,

St_T : Aynı basınç altında temelde oluşabilecek oturmadır [10].

2.2.4 Plaka Yükleme Deneyi ile Zemin Elastisite Modülünün Belirlenmesi

Her ne kadar zemin; elastik, lineer bir davranış göstermese de, bazı yaklaşık hesaplamalarda zemin elastisite modülünün bilinmesi gerekir. Zeminin elastisite modülünün bilinmesi için birçok yol olup, bunlardan biri de plaka yükleme deneyidir. Elastisite Teorisine göre, yarı sonsuz, elastik, lineer izotrop homojen bir ortam üzerindeki rijit bir plakanın oturması (St_p) şu bağıntıyla verilmektedir [10].

$$St_p = I_w \left(\frac{q_p B_p}{E_z} \right) (1 - \nu^2) \quad (2.17)$$

Yük-oturma eğrisinin başlangıç kısmından şu bağıntıyla zemin elastisite modülü hesaplanabilir.

$$E_z = I_w \left(\frac{q_p B_p}{St_p} \right) (1 - \nu^2) \quad (2.18)$$

Burada;

E_z : Zemin elastisite modülü,

ν : Zemin Poisson Oranı,

q_p : Oturma-yük eğrisinde, başlangıç doğrusal kısımda seçilen (St_p) plaka oturmasına karşılık gelen basınç gerilmesidir.

I_w : Şekil etki faktörü olup, daire için 0.875, kare için 0.815 olarak alınır.

2.2.5 Plaka Yükleme Deneyi ile Zemin Yatak Katsayısının Belirlenmesi

Winkler Hipotezi'ne göre zemin üzerindeki herhangi bir noktadaki basınç gerilmesi ile o noktadaki oturma arasında doğrusal bir bağıntı vardır.

$$K = \frac{q_p}{St} \quad (2.19)$$

Burada;

K : Zemin yatak katsayısı,

q_p : Basınç gerilmesi,

St : Zeminde oluşan oturmadır.

Çizelge 2.3 Belirli zemin türleri için zemin yatak katsayıları [12]

Zemin Türü	K (MN/m ³)
Balçık Turba	<2
Plastik Kil	5-10
Yarı Sert Kil	10-15
Sert Kil	15-30
Dolgu Toprak	10-20
Gevşek Kum	10-20
Orta Sıkılıkta Kum	20-50
Sıkı Kum	50-100
Sıkı Kum ve Çakıl	100-150
Sağlam Şist	>500
Kaya	>2000

Zemin yatak katsayısı (K), birim oturmaya karşılık gelen gerilme olarak tanımlanabilir. Çizelge 2.3'de belirli zemin türleri için yaklaşık K değerleri belirtilmiştir. Birimi (MN/m²)/m'den MN/m³ veya MPa/m boyutundadır. Zemin yatak katsayısı, şerit ve radye temellerin Winkler Hipotezi'ne göre hesaplanmasında dönmeye ve çökmeye karşı elastik ankastre mesnetlerin hesaplanmasında kullanılır. Zemin yatak katsayısı, plaka yükleme deneyinin başlangıç doğrusal kısmının eğimi olarak hesaplanır. Zemin

rijitliği birçok etmene, bu arada plaka genişliğine bağlı olarak değişir. Plaka yükleme deneyinden belirlenecek yatak katsayısından, temel yatak katsayısına Terzaghi'nin (1955) geliştirdiği aşağıdaki bağıntıyla geçilebilir [10].

$$K_T = K_p \left(\frac{B_T + B_p}{2B_T} \right)^2 \quad (2.20)$$

Kohezyonlu zeminlerde ise;

$$K_T = K_p \left(\frac{B_p}{B_T} \right) \quad (2.21)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanır.

Aşağıdaki izelgede (izelge 2.4)  nceki araştırmacıların geliştirdiği zemin yatak katsayısı ve elastisite modülü arasındaki ilişkiyi gösteren bazı eşitlikler belirtilmiştir.

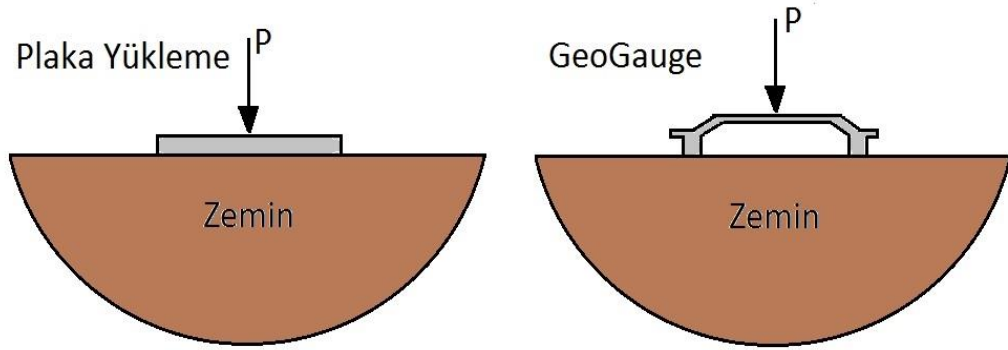
Çizelge 2.4 Zemin yatak katsayısının hesaplanması için geliştirilmiş eşitlikler [13]

Winkler (1867)	$K = \frac{q_p}{St}$
Biot (1937)	$K = \frac{0.95E}{B(1-\nu^2)} \left(\frac{B^4 E}{(1-\nu^2)EI} \right)^{0.108}$
Terzaghi (1955)	$K = K_p \left(\frac{B_T + B_p}{2B_T} \right)^2$
Vesic (1961)	$K = \frac{0.65E}{B(1-\nu^2)} \sqrt[1.2]{\frac{EB^4}{EI}}$
Meyerhof and Baike (1965)	$K = \frac{E}{B(1-\nu^2)}$
Selvadurai (1984)	$K = \frac{0.65E}{B(1-\nu^2)}$
Bowles (1998)	$K = \frac{E}{B_p(1-\nu^2)MI_s I_f}$

Yukarıdaki tabloda “E” zeminin elastisite modülü, “EI” eğilme rijitliği, “v” Poisson Oranı, “B_p” ve B_T” plaka ve temel genişliği, K_p y k plakası için bulunan zemin yatak katsayısı, “I_s” ve “I_f” temel şekline bağlı etki faktörleridir. “M” ise şekil etki faktörü olup, temel kenarına, köşesine ve ortasına göre sırasıyla 1,2 ve 4 değerisi olarak alınır.

2.3 GeoGauge ve Plaka Yükleme Deneyinin İlişkilendirilmesi

Plaka yükleme deneyi ve GeoGauge Şekil 2.10’da şematik olarak görülmektedir. Görüldüğü üzere her iki yöntemde de yukarıdan bir P yükü plaka veya halka ayak aracılığıyla zemine aktarılır. Plaka yükleme deneyinde uygulanan bu yük büyük bir değer iken GeoGauge de cihaz kendi ağırlığını dahi kullanmadan içindeki sarsıcı ile çok küçük bir yük meydana getirir. Buna bağlı olarak mertebesi çok küçük olsa da benzer şekilde zeminde deformasyonlara sebep olur.



Şekil 2.10 GeoGauge ve plaka yükleme deneyinin karşılaştırılması

Önceki bölümlerde belirtilen modül denklemlerini karşılaştırarak, yük ayaklarının geometrik farklarının sonuçları görülebilir.

Plaka yükleme deneyi için “P” yükü ilgili modüllerle;

$$P = \frac{2ER}{(1-\nu^2)} St = \frac{4RG}{1-\nu} St \quad (2.22)$$

şeklinde hesaplanırken, GeoGauge de;

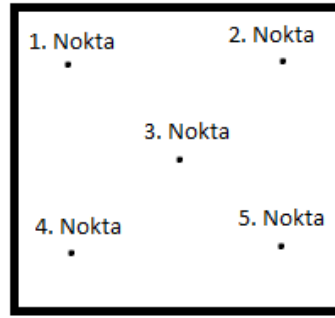
$$P \approx \frac{1.77ER}{(1-\nu^2)} St \approx \frac{3.54RG}{1-\nu} St \quad (2.23)$$

şeklinde hesaplanır [1].

2.4 Araştırma Konusu ile İlgili Önceki Çalışmalar

2.4.1 Nelson ve Sondag (1999)

Nelson ve Sondag [14] GeoGauge ölçümleri ile plaka yükleme deney sonuçları arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Yapılan çalışmada serilen zeminin üzerinden titreşimli kompaktörle geçilerek zemin sıkıştırılmıştır. 2, 4 ve 6 geçiş sonrasında GeoGauge ile zeminin 5 farklı yerinden (Şekil 2.11) rijitlik değerleri okunarak ortalamaları alınmıştır. Zemin çoğunlukla kum ve çakıldan oluşan dolgu malzemesidir. Poisson Oranı 0.35 ve zemin hafif nemlidir. Sıkıştırma sonucunda zemin rijitlik modülünde artış olması beklenirken, zemin sıklığı ile GeoGauge ile alınan rijitlik ölçümleri arasında tam bir ilişki olmadığı görülmüştür. Çizelge 2.5’de her noktanın sıkıştırma sonrası rijitlik değerleri verilmiştir.

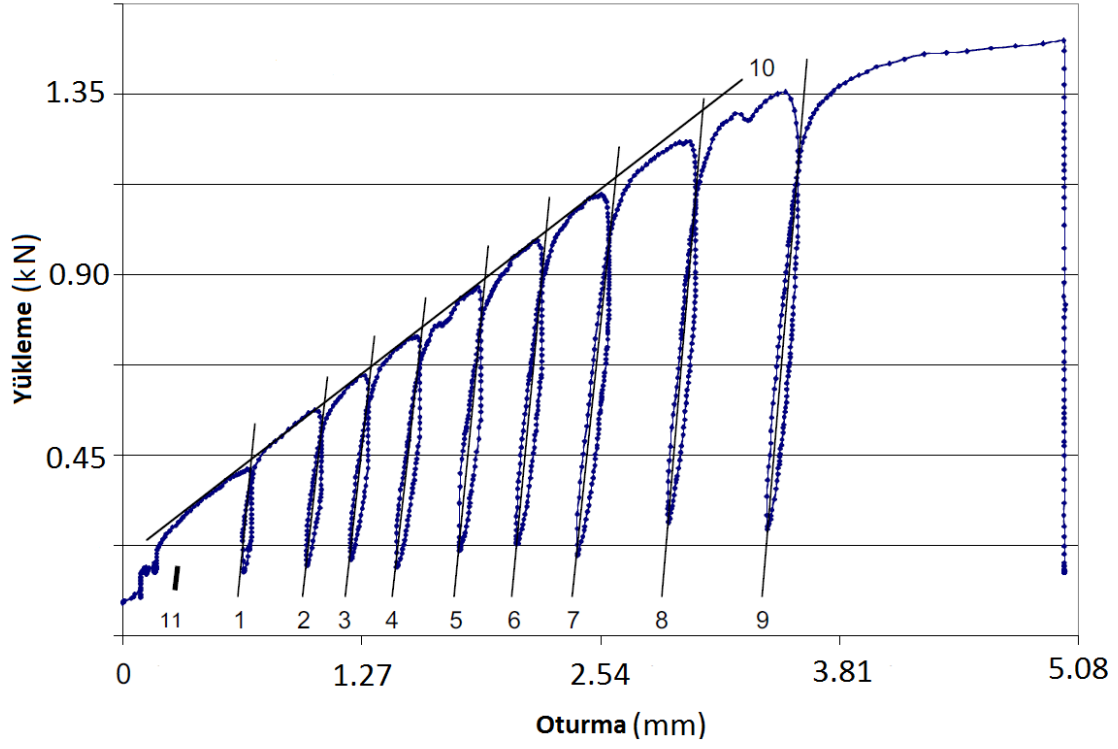


Şekil 2.11 Sıkıştırılan zeminde GeoGauge okumaları alınan işaret noktaları [14]

Çizelge 2.5 GeoGauge ile okunan “k” rijitlik değerleri (MN/m) [14]

Geçiş	1.Nokta	2.Nokta	3.Nokta	4.Nokta	5.Nokta	Ortalama
2	4.098	4.746	4.973	6.690	5.534	5.208
4	6.760	4.536	4.833	4.938	5.061	5.226
6	5.499	5.131	4.343	4.938	5.113	5.005

Altıncı geçişten sonra zeminin orta noktasında (3. Nokta) 11.5 cm çapında bir plaka ile çevrimli plaka yükleme deneyi yapılmıştır. Şekil 2.12’de yük çevrim eğrisi ve Çizelge 2.6’da bu eğriyle bulunan değerler verilmiştir.



Şekil 2.12 Plaka yükleme deneyi yük-oturma grafiği [14]

Çizelge 2.6 Plaka yükleme deneyi ile bulunan “k” ve “E” değerleri [14]

Yük Çevirimi	k (MN/m)	E (Mpa)
1	5.026	43.596
2	4.238	36.763
3	4.133	35.846
4	4.010	34.784
5	4.903	42.534
6	4.938	42.837
7	4.606	39.948
8	5.481	47.546
9	5.394	46.788

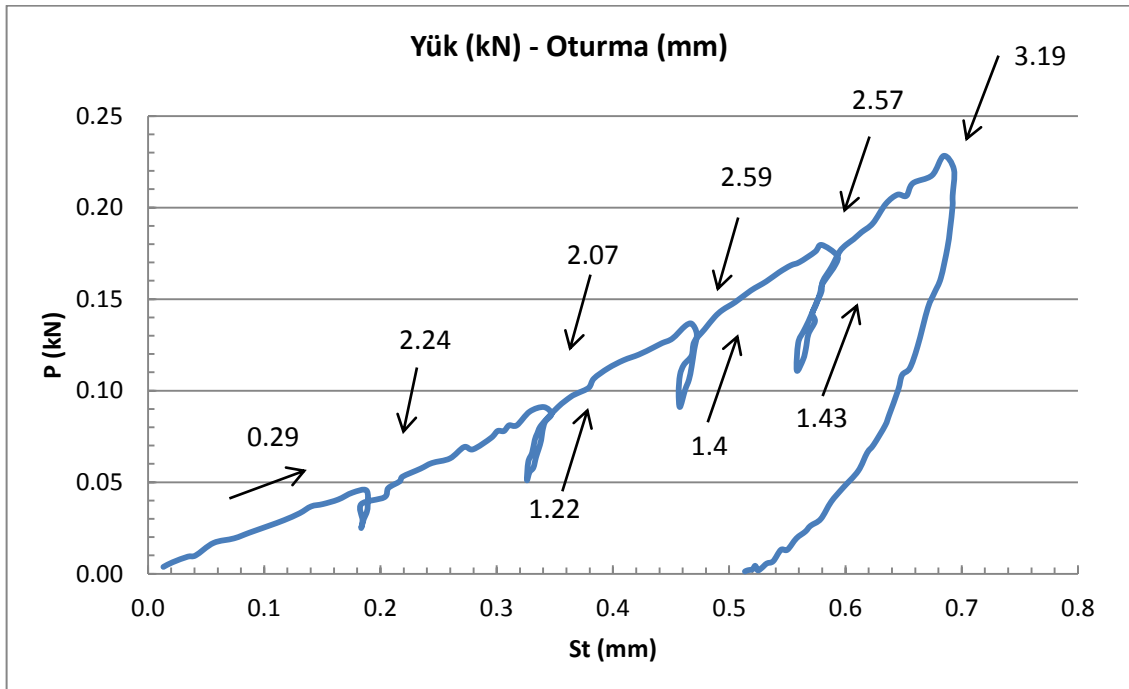
GeoGauge ölçümlerinde “k” değeri yaklaşık olarak 4.35 MN/m ve “E” değeri 37.7 MPa, plaka yükleme deneyine ise “k” değeri yaklaşık 4.75 MN/m ve “E” değeri 41.2 MPa olarak belirlenmiştir. (Çizelge 2.7). Bu sonuçlar arasında yaklaşık %10’luk bir sapma vardır. Bu da GeoGauge ile plaka yükleme deneyi arasında yakın bir ilişki olduğunu göstermektedir [14].

Çizelge 2.7 GeoGauge’in ve PYD’nin aynı noktadaki modül değerleri [14]

Modül Değerleri	k (MN/m)	E (MPa)
GeoGauge	4.35	37.7
PYD (ort.)	4.75	41.2

2.4.2 Fiedler (2000)

Fiedler vd. [15], Nelson ve Sondag tarafından gerçekleştirilen arazi çalışmasında [14] başlangıç modüllerine yakın değerleri temsil eden 0.25 kN’luk yüklemeye kadar olan oturmaları incelemiştir. Şekil 2.13’de çevrimli plaka yükleme deneyinin yük-oturma eğrisi üzerinde başlangıç, boşaltma ve tekrar yükleme rijitlik değerleri (k) MN/m cinsinden belirtilmiştir.

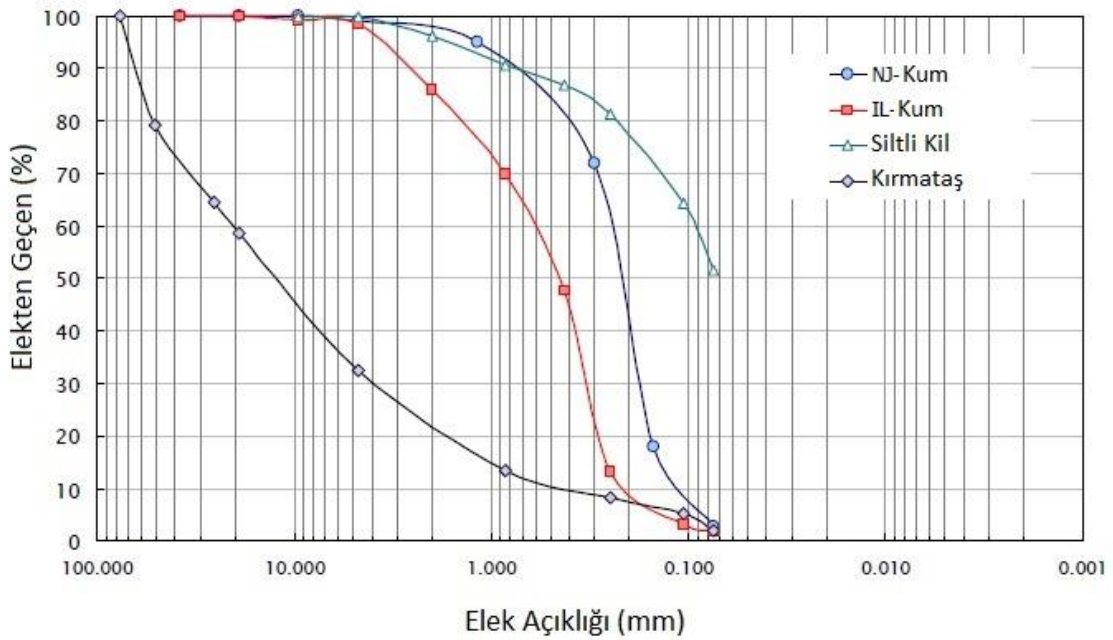


Şekil 2.13 Plaka yükleme deneyi ile bulunan başlangıç, boşaltma ve tekrar yükleme rijitlik değerleri [16]

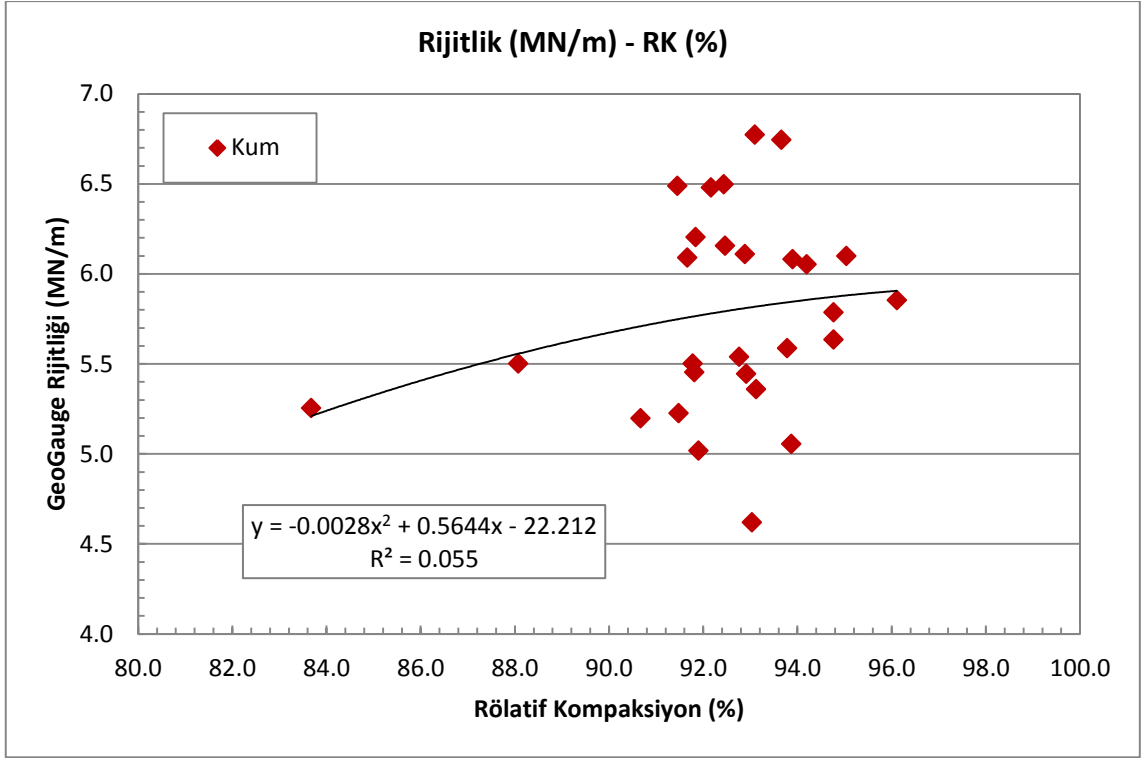
Çalışmada GeoGauge ile alınan ölçümler “k” için 2.54 MN/m değerlerini vermektedir. Buna göre; boşaltma modüllerinin ortalama değeri 2.53 MN/m, GeoGauge’e en yakın sonuçları göstermektedir.

2.4.3 Gas Technology Institute (2005)

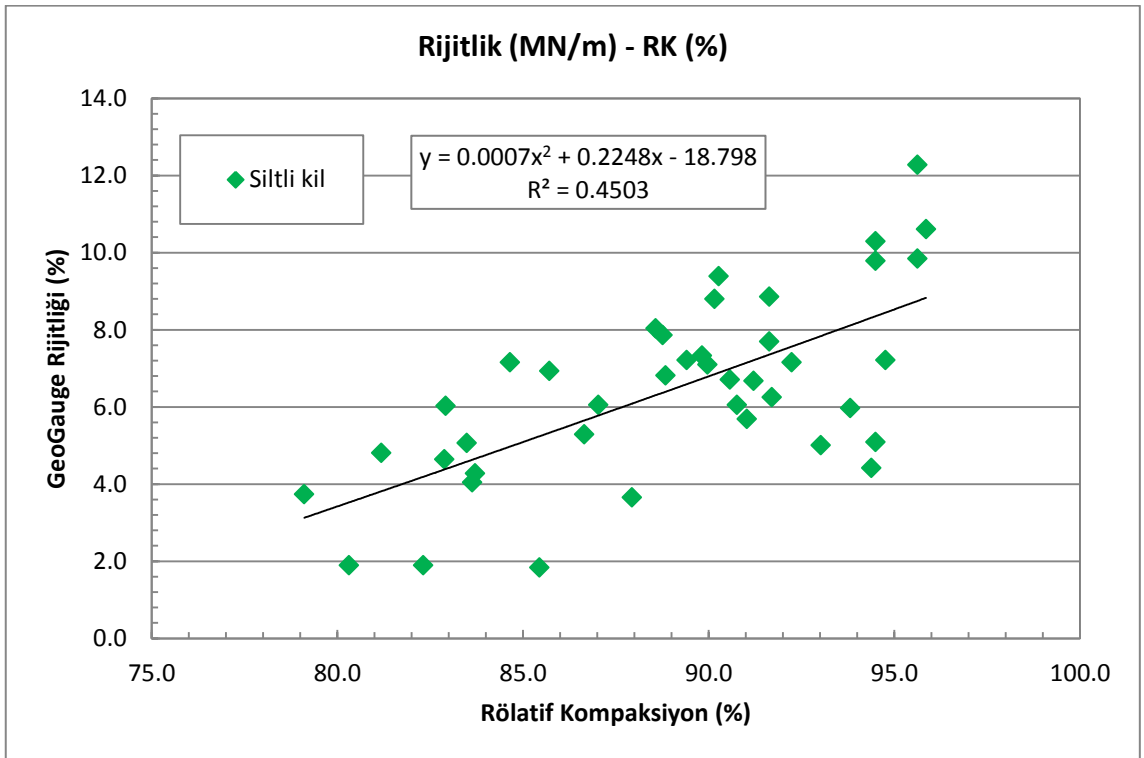
Gas Technology Institute [16], zemin su muhtevasının ve zemin rölatif kompaksiyonunun, GeoGauge’in rijitlik modülü (k) üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deney için yaklaşık 1 m²’lik çalışma çukurları açılmış ve dolgu malzemesi kompakte edilerek kademeli olarak serilmiştir. Seçilen dolgu malzemeleri; iyi derecelenmiş kırmataş, %50’si 200 no’lu elek altına geçen siltli kil ve üniform derecelenmiş iki farklı kum dolgu malzemesidir (Şekil 2.14). Dolgular farklı su muhtevalarında ve farklı sıkılıklarda hazırlanarak GeoGauge ile bulunan değerleri grafiklere yerleştirilerek karşılaştırılmıştır (Şekil 2.15, Şekil 2.16, Şekil 2.17). Çizelge 2.8’de dolgu malzemelerinin modifiye proktor deney sonuçları belirtilmiştir.



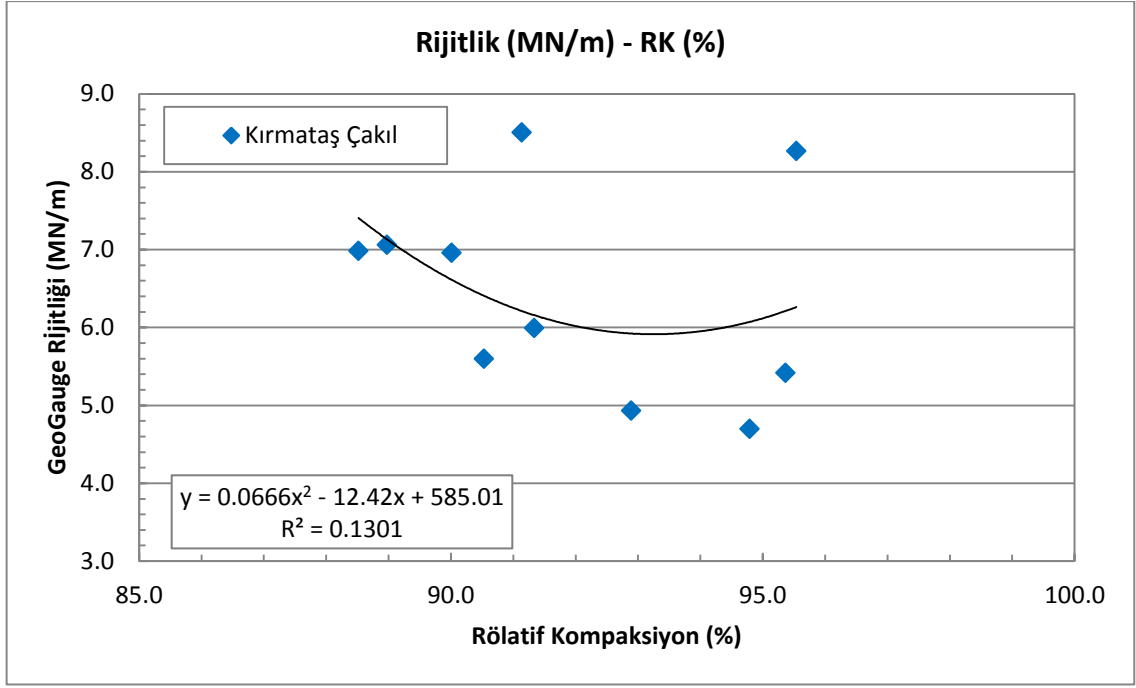
Şekil 2.14 Dolgu malzemelerinin granülometri eğrileri [16]



Şekil 2.15 Kumda GeoGauge rijitlik değeri ve rölatif kompaksiyon ilişkisi [16]



Şekil 2.16 Siltli kilde GeoGauge rijitlik değeri ve rölatif kompaksiyon ilişkisi [16]



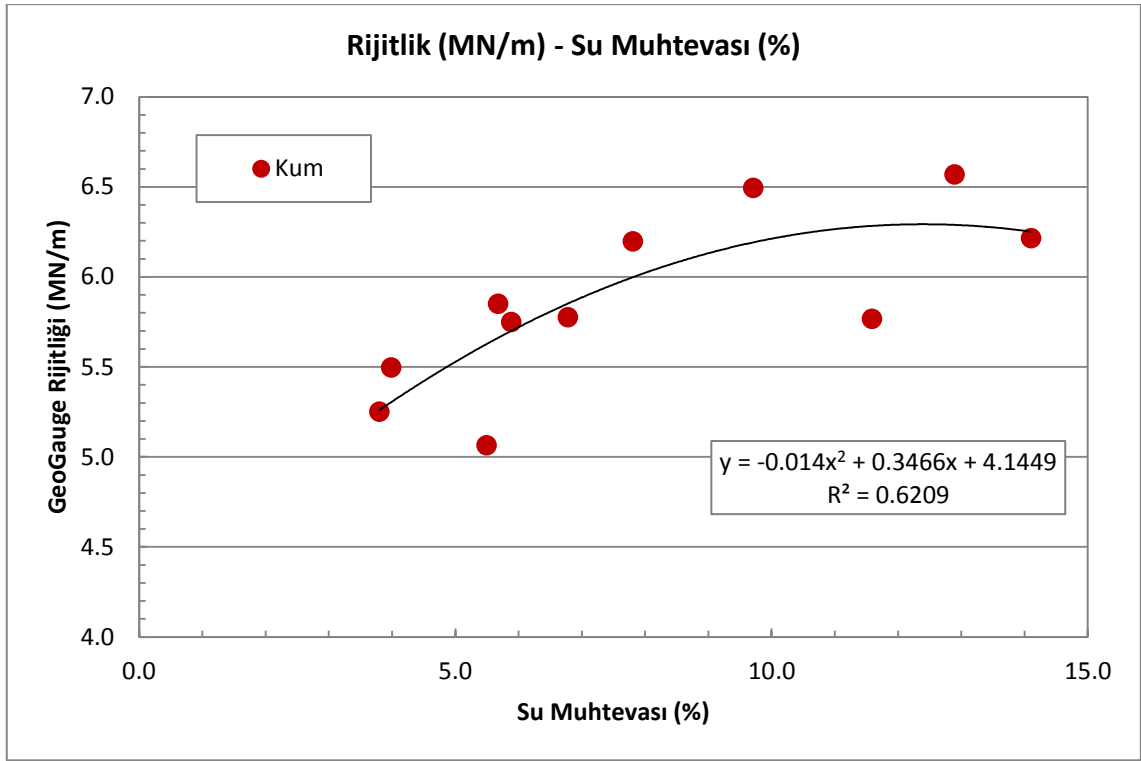
Şekil 2.17 Kırmataşta GeoGauge rijitlik değeri ve rölatif kompaksiyon ilişkisi [16]

Çizelge 2.8 Dolgu malzemelerinin modifiye proktor deneyi sonuçları [16]

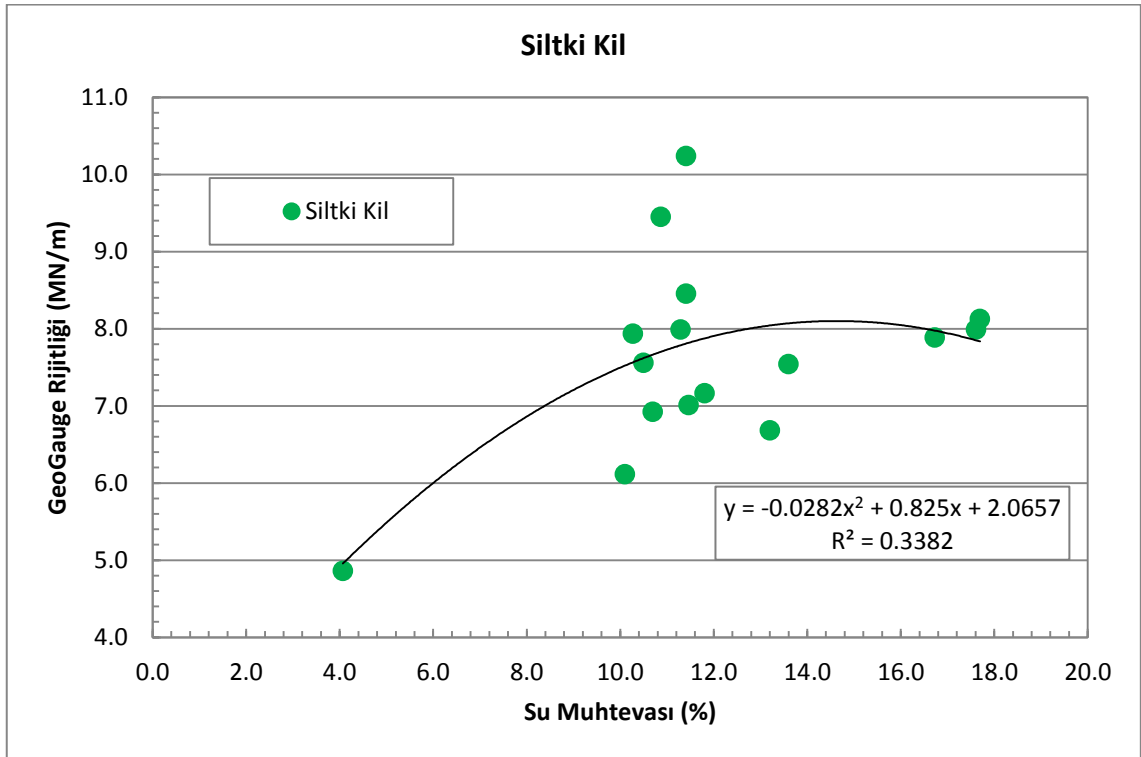
Dolgu Türü	Maksimum birim hacim ağırlık (kN/m ³)	Opt. Su muhtevası (%)
Illinois Kumu	18.7	5
New Jersey Kumu	16.0	9
Siltli Kil	19.43	13
Kırmataş Çakıl	22.44	7.8

Bu çalışmaya göre, kumlarda ve çakılda rölatif kompaksiyon ve rijitlik arasında zayıf bir ilişki olduğu gözlenmiştir. Bununla beraber siltli kil numunesinde bu ilişki diğer zemin numunelerine göre daha fazladır [16].

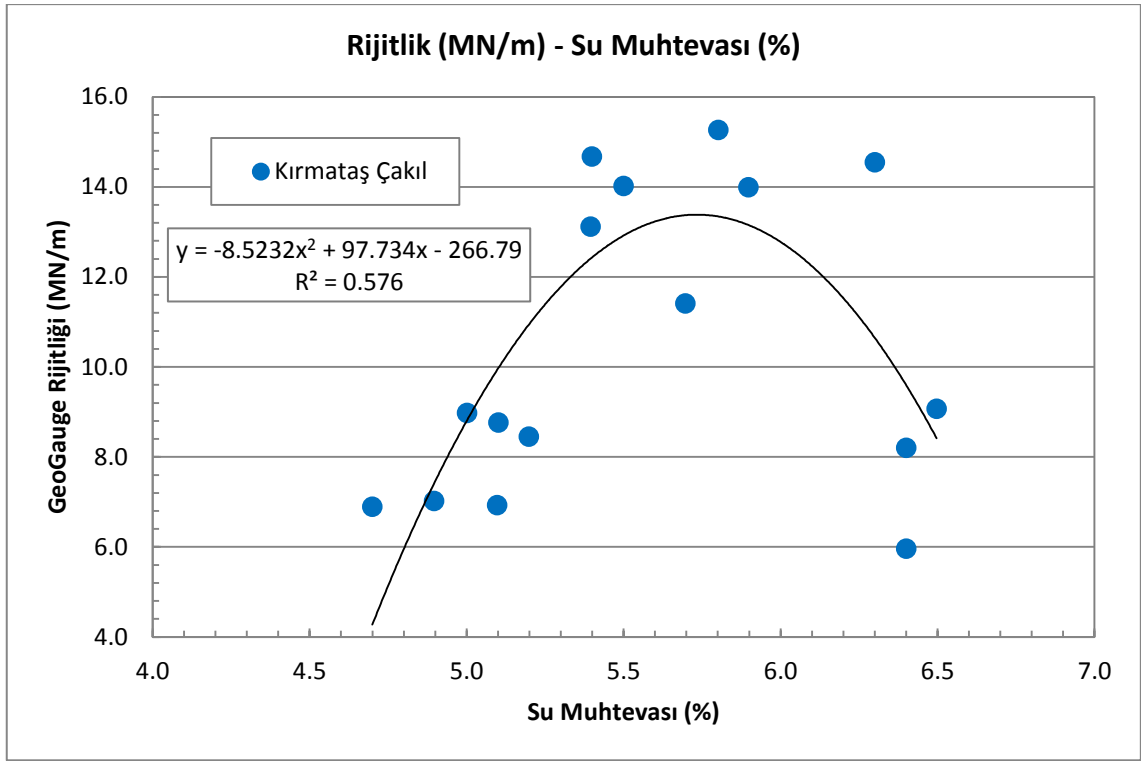
Aynı zemin ile sabit rölatif kompaksiyonda farklı su muhtevelarıyla yapılan çalışmada, zeminin rijitlik değeri su muhtevasının artmasıyla artış göstermiştir. Bununla beraber maksimum yoğunluktaki su muhtevası değeri ile okunan maksimum rijitlikteki su muhtevası değerleri birbiriyle tam olarak eşleşmemektedir (Şekil 2.18, Şekil 2.19, Şekil 2.20).



Şekil 2.18 Kum, GeoGauge rijitlik değeri ve su muhtevasının ilişkisi [16]



Şekil 2.19 Siltli kil, GeoGauge rijitlik değeri ve su muhtevasının ilişkisi [16]



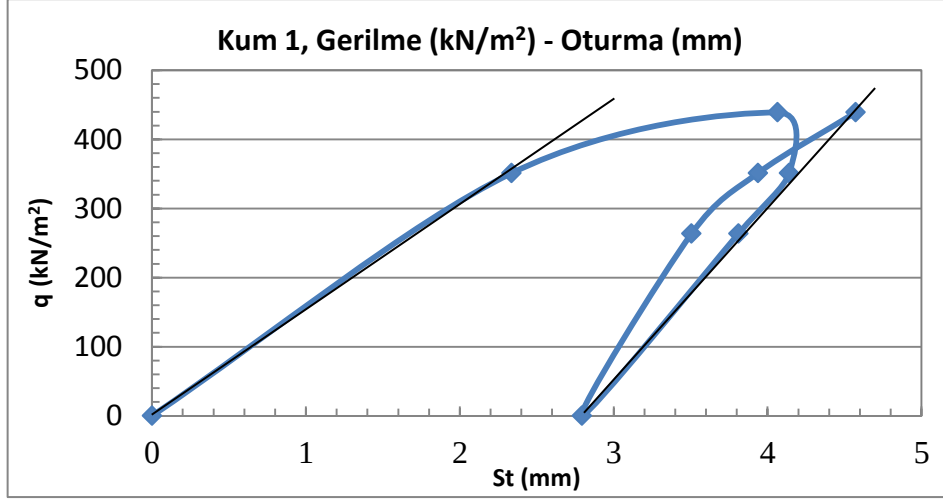
Şekil 2.20 Kırmetaş, GeoGauge rijitlik değeri ve su muhtevasının ilişkisi [16]

2.4.4 Seyman (2003)

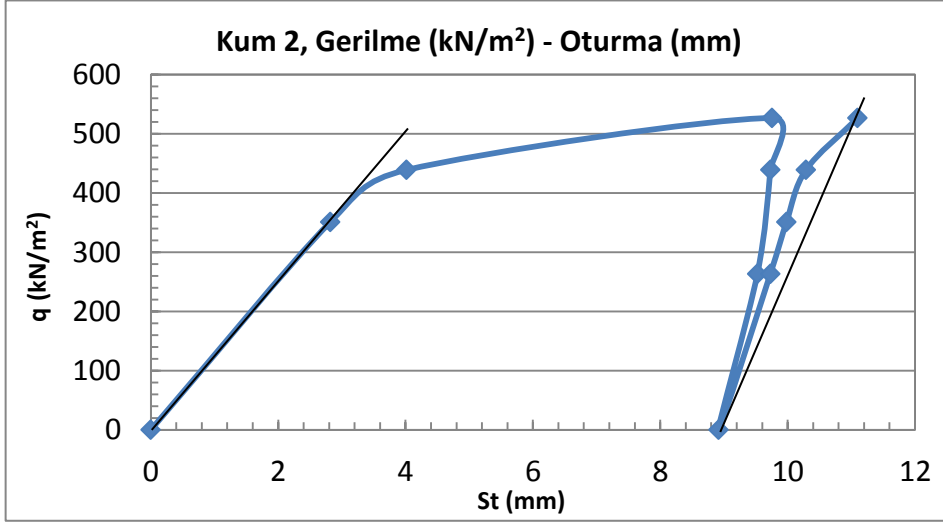
Seyman [17], GeoGauge ölçümleri ve plaka yükleme deney sonuçları arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Çalışmasında; plaka yükleme deneyi ile başlangıç elastisite modülünü (E_i) ve tekrar yükleme elastisite modülünü (E_r) belirleyerek, GeoGauge sonuçlarıyla ilişkilendirmiştir. Plaka yükleme deneylerinde 25,4 cm çaplı plaka ile yüklemeleri gerçekleştirmiştir. Ayrıca deneylerde 150x90 cm² genişliğinde ve 60 cm derinliğinde bir tank kullanmıştır. Kumla yapılan çalışmaların yanı sıra kırmetaş, killi kum, siltli kil gibi numuneler de incelenmiştir, ancak burada sadece kum numunelerde yapılan çalışmalar özetlenecektir. Şekil 2.21, Şekil 2.22 ve Şekil 2.23’de plaka yükleme deneyi eğrileri belirtilmiştir. Deneyde kullanılan kumun özellikleri de Çizelge 2.9’da verilmiştir.

Çizelge 2.9 Deney Numunesinin Zemin Özellikleri ve Zemin Parametreleri [17]

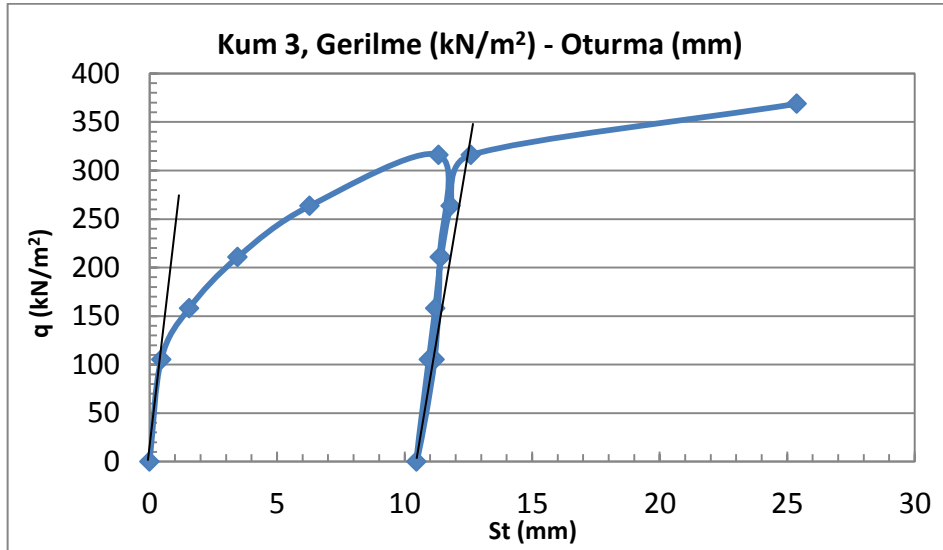
AASHTO	USCS	Poisson Oranı	w(%)	w _{opt} (%)	Cu	Cc
A-3	SP	0.3	2 - 2.5	4.2	1.7	0.98



Şekil 2.21 Kum1, plaka yükleme deneyi ile elde edilmiş gerilme-oturma eğrisi [17]



Şekil 2.22 Kum2, plaka yükleme deneyi ile elde edilmiş gerilme-oturma eğrisi [17]



Şekil 2.23 Kum3, plaka yükleme deneyi ile elde edilmiş gerilme-oturma eğrisi [17]

GeoGauge ile bulunmuş (E_G) elastisite modülü değerlerinin ortalaması, plaka yükleme deneyi ile elde edilen (E_{ip}) başlangıç elastisite modülü ve (E_{rp}) tekrar yükleme elastisite modülü değerleri karşılaştırıldığında, aralarında yaklaşık %20 oranında farklar olduğu görülmektedir (Çizelge 2.10). Çalışmaya göre dikkat edilmesi gereken nokta, zemin uygulamalarında E_{ip} veya E_{rp} modüllerinden hangisinin tercih edileceğidir.

Çizelge 2.10 Başlangıç, tekrar yükleme ve GeoGauge elastisite modülleri [17]

Numune	E_{ip} (MPa)	E_{rp} (MPa)	$E_{G(ort)}$ (MPa)
Kum 1	37.6	48.0	56.4
Kum 2	33.0	51.9	49.7
Kum 3	53.8	34.2	49.7

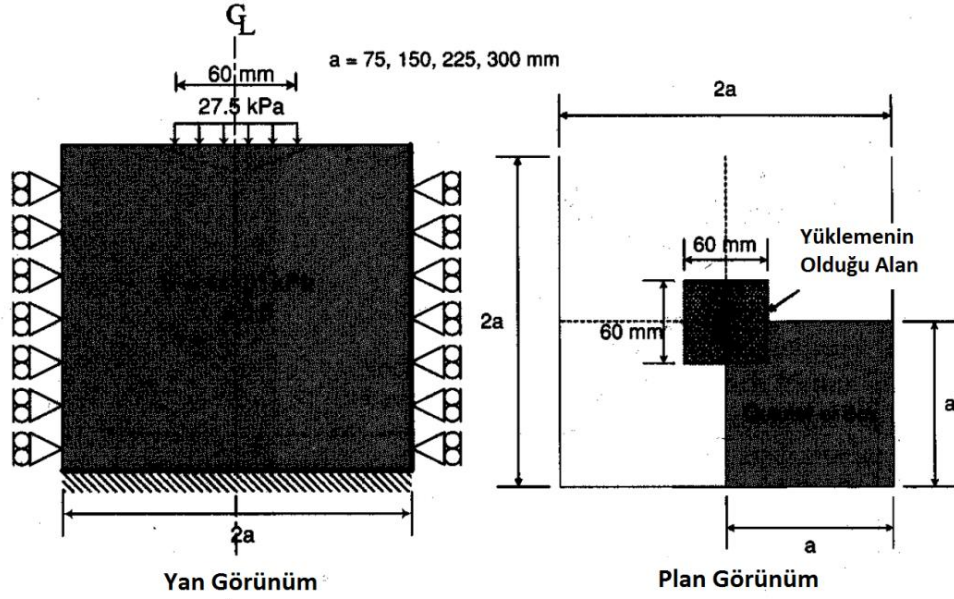
2.4.5 Sawangsuriya (2002)

Sawangsuriya vd. [6] farklı rijitlikteki üç değişik malzemede GeoGauge rijitlik ölçümlerinin derinlik ile değişimini incelemiştir. Çalışmanın amacı; farklı kalınlıklarda iki tabakadan oluşan zeminin numunesinde, üst tabakanın rijitlik ölçümlerinin alt tabaka rijitliğinden ne oranda etkilendiğini saptamaktır. Bu laboratuvar çalışmasına ek olarak ANSYS yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar analizi yapılmış ve GeoGauge'in etki alanı incelemiştir.

ANSYS de statik ve dinamik analiz yapılırken yükseklikleri 30 cm olan 15 cm, 30 cm, 45 cm ve 60 cm kenarları olan dört farklı genişlikte kare kutu modellenmiştir (Şekil 2.24).

Yapılan statik ve dinamik sonlu elemanlar analizlerinin sonunda sınır koşullarının 0.6 m'den geniş kutularda ihmal edilebilir olduğu saptanmıştır. Bölüm 3'de anlatılacak olan laboratuvar deneylerinde seçilen tank boyutları bu sonuca dayanarak belirlenmiştir.

Laboratuvar deneylerinde; yüksek rijitlikteki tabaka kırma taştan, orta derece rijitlikteki tabaka ise kötü derecelenmiş kuvars kumundan oluşturulmuştur. Düşük rijitlik değeri için; kaba kum dane boyutunda (elek No 4 ile elek No 8 arası) naylon plastik granül ile yukarıda belirtilmiş olan kum karıştırılmıştır.

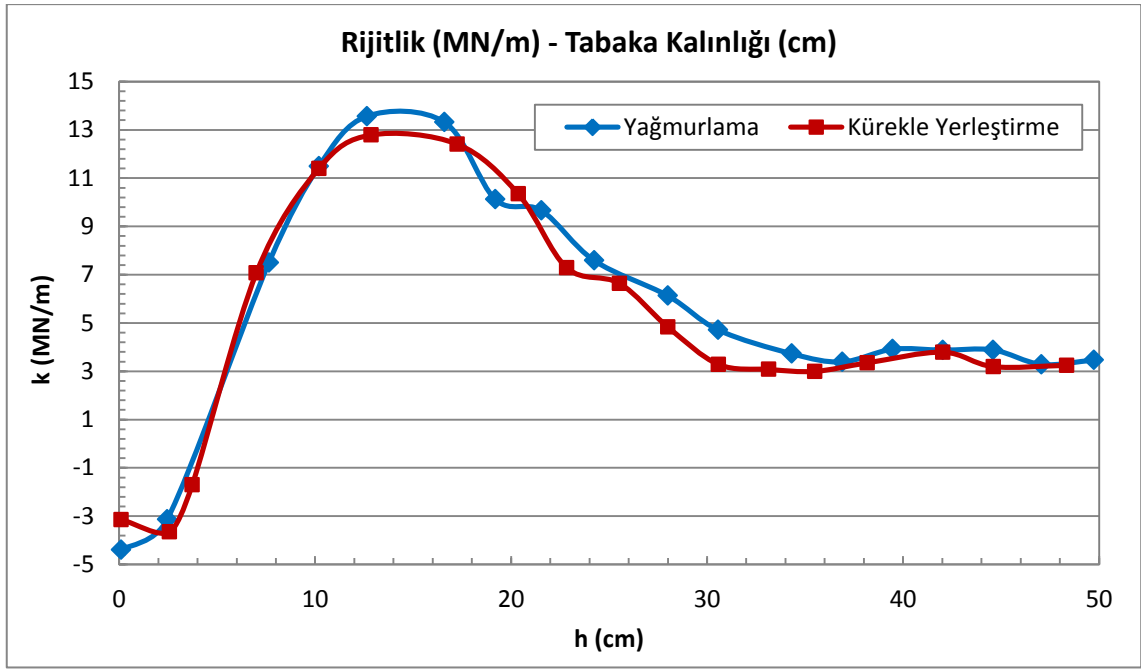


Şekil 2.24 Sonlu elemanlar modelinin düşey ve yatay kesit görünüşleri [6]

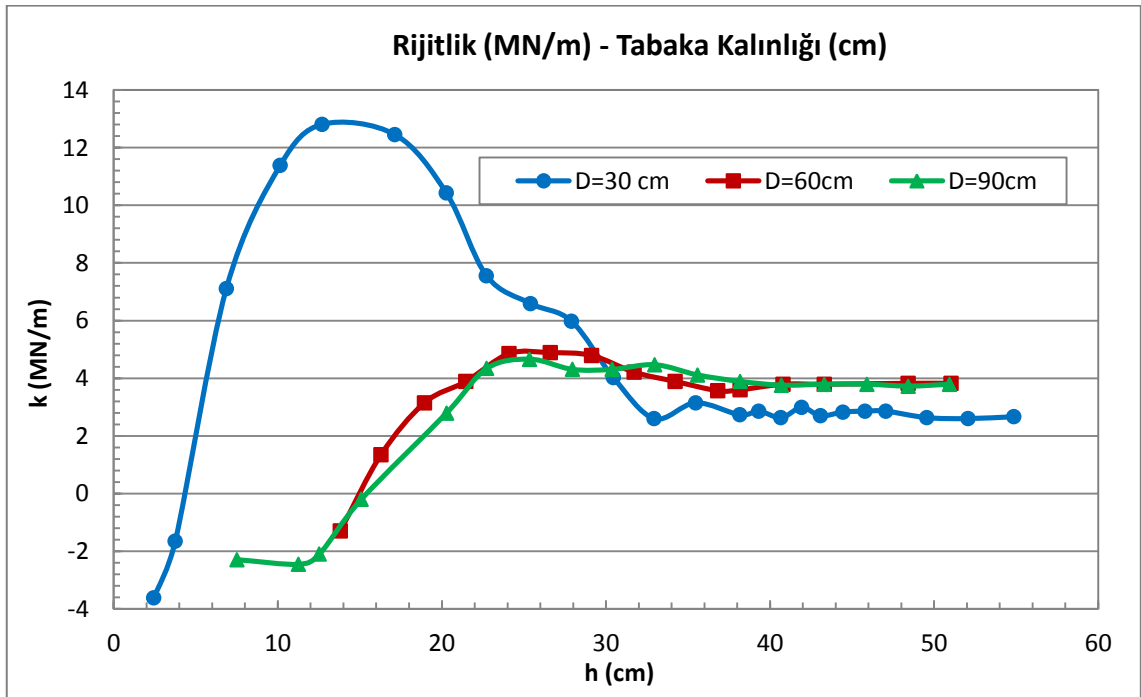
Deneylerde kullanılmak üzere bir kenarı 1.2 m olan kübik bir ahşap kutu hazırlanmış ve içini strafor köpük taneleri ile doldurulmuştur. Daha sonra deneylerde kullanılmak üzere kutunun içine geotekstil malzemeden hazırlanmış değişik çaplarda (0.3 m, 0.6 m ve 0.9 m) kalıplar yerleştirilmiştir. Deney numuneleri bu kalıpların içine yerleştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

Kum malzeme orta sıklıkta olacak şekilde, 0.3 m'lik kalıba kürekle ve yağmurlama tekniği ile yerleştirilerek rijitliğin tabaka kalınlığına ile değişiminde yerleştirme tekniğinin farkları incelenmiştir. Şekil 2.25'de görüldüğü gibi 2.5 cm'de bir alınan ölçüm sonuçlarında rijitlik okumaları negatif değerle başlayıp pozitif yönde artış göstermiştir. Her iki yerleştirme yöntemi arasında önemli bir fark görülmemektedir.

Çalışmada ayrıca rijitlik ile tabaka kalınlığı arasındaki ilişkide numune çapının etkisi incelemiştir. Orta sıklıktaki kum 30 cm, 60 cm ve 90 cm çapındaki geotekstil kalıpların içine yerleştirilerek ölçüm alınmıştır. Sonuçlara göre, 30 cm çapındaki numunede rijitlik değeri büyük bir artış göstermiş ve yaklaşık 12 cm numune kalınlığından sonra düşerek 32 cm kalınlıkta sabit hale gelmiştir. Buna karşılık 60 cm ve 90 cm çaplı numunelerde rijitlik artışı daha düşük seviyede olmuştur. Şekil 2.26'da görüldüğü üzere yaklaşık 35 cm numune kalınlığından sonra rijitlik sabit bir hal almıştır.

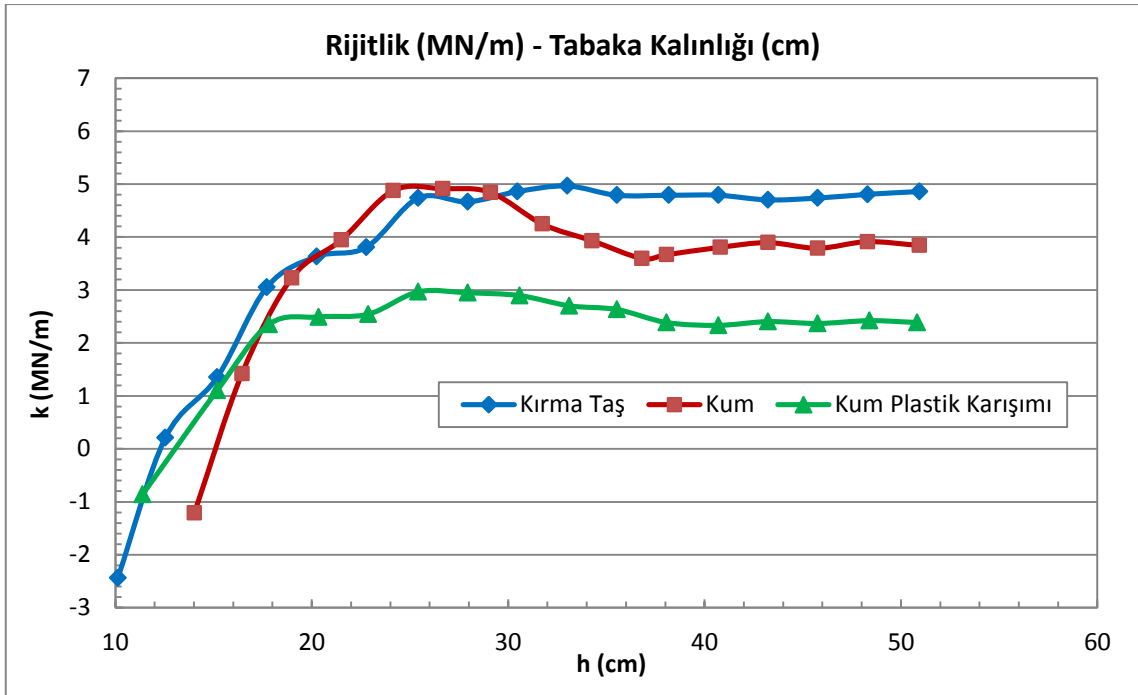


Şekil 2.25 Orta sıkı kumda yağmurlama ve kürek ile doldurma farklarının GeoGauge rijitlik ölçümüne etkisi [6]



Şekil 2.26 Orta sıkı kum numunede, farklı kalıp çaplarına bağlı olarak tabaka kalınlığının GeoGauge rijitlik ölçümüne etkisi [6]

İncelenen bir diğer konu tabaka kalınlığının malzeme türlerine bağlı olarak rijitlik değişimidir. Kırmı taş, kum ve kum-naylon plastik karışımı tabakalar üzerinde yapılan deneylerde 0.6 m çapındaki geotekstil bir kalıp kullanılmıştır. Önceki deneylerde de olduğu gibi kalıp içine numune katmanlar halinde yerleştirilerek her kalınlıkta GeoGauge ile rijitlik ölçümü alınmıştır. Rijitlik değeri GeoGauge tarafından negatif ölçülerek başlamıştır ve tabaka kalınlığı arttıkça pozitif değere dönerek artış göstermiştir. Artış, tabaka kalınlığı 38 cm'e ulaştığında sabitlenmiştir. Şekil 2.27'de deney sonuçları eğri üzerinde görülmektedir.



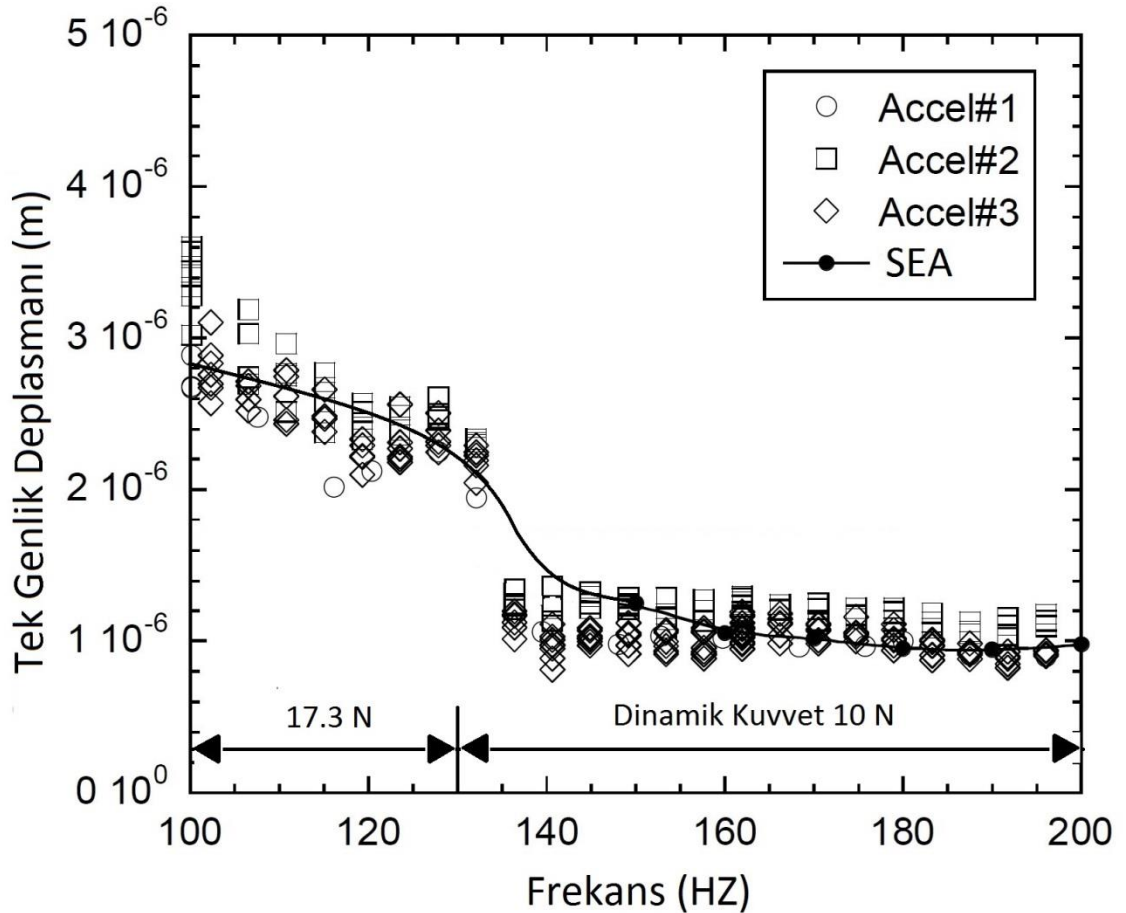
Şekil 2.27 Kırmı taş, kum ve kum-naylon plastik karışımı numunelerde tabaka kalınlığının GeoGauge rijitlik ölçümüne etkisi [6]

2.4.6 Sawangsuriya (2003)

Sawangsuriya vd. [18], sonlu elemanlar yöntemi ile çözümleme yapan PLAXIS paket yazılımı kullanarak GeoGauge ölçümlerini modellemiştir. Araştırmacılar GeoGauge'in metal ayağına yerleştirdikleri 3 adet ivme ölçer ile her bir frekans için dinamik deplasmanı ölçmüş ve buradan GeoGauge'in uyguladığı sabit dinamik kuvveti 10 N olarak belirlemiştir (Şekil 2.28). Titreşim frekansı 135 Hz iken dinamik deplasmanda görülen sıçrama GeoGauge ve ivme ölçer verilerinde tespit edilmiş olup, bunun GeoGauge elektronik aksamındaki kontrol sapması sonucu olabileceği belirtilmiştir.

Silindirik bir kalıp içerisinde yer alan zemin (orta sıkı kum) aksenal simetri koşullarında modellenmiş olup, model sınırına enerji sönümleyici eleman atanmıştır. Malzeme Mohr-Coulomb Modeli ile modellenmiştir. Malzemenin birim hacim ağırlığı 16 kN/m^3 ve kayma dayanımı açısı 35 derece olarak girilmiştir.

Dinamik davranışın gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için bir parametrik ön çalışma gerekli görülmüştür. Parametrik çalışmada ilk olarak model boyutlarının analiz sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk olarak orijinal model geometrisi ($r=0.3 \text{ m}$, $H=0.53 \text{ m}$) kullanılarak analiz yapılmış olup, sonrasında geometri boyutları değiştirilerek ($r=0.6 \text{ m}$, $H=0.53 \text{ m}$) ($r=0.9 \text{ m}$, $H=0.9 \text{ m}$) analizler tekrarlanmıştır. Malzeme sönümlenmesinin ihmal edildiği analizlerde model boyutlarının sonuçları önemli ölçüde etkilediği, buna karşın sönümlenmenin dikkate alındığı analizlerde model boyutlarının sonuçlar üzerindeki etkisinin daha küçük olduğu görülmüştür.

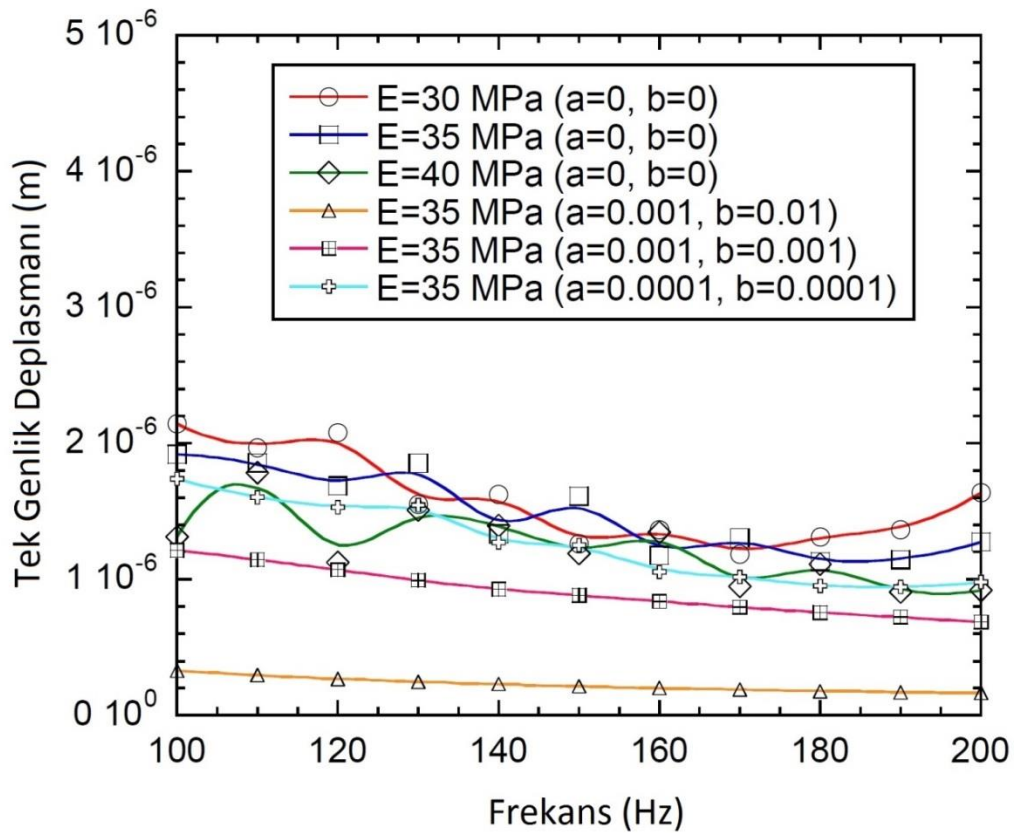


Şekil 2.28 İvme ölçümü ile belirlenen frekans farklarının SEA ile karşılaştırılması ve belirlenen dinamik yükler[18]

Parametrik çalışmada ikinci olarak Poisson Oranı'nın analiz sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kumlar için Poisson Oranı'nın genellikle 0.25 ile 0.30 arasında yer aldığı düşünülerek, bu iki değer kullanılarak analizler yapılmıştır. Sonuç olarak, Poisson Oranı'nın sonuçlar üzerindeki etkisinin küçük olduğu görülmüştür.

Parametrik çalışmada üçüncü ve dördüncü olarak da malzeme rijitlik modülü ile malzeme sönümlenmesinin analiz sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Malzeme rijitlik modülü olarak 30 MPa, 35 MPa ve 40 MPa kullanılmıştır. Malzeme sönümlenmesi ise farklı Rayleigh α (0.001 – 0.0001) ve β (0.01 – 0.001 – 0.0001) parametreleri girilerek dikkate alınmıştır. Rijitlik modülünün sistemin tepkisi üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve düşük modül değeri için sistem tepkisinin (tek genlik deplasmanının) daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra, sönümlenmenin de sonuçlar üzerinde önemli etkisi olduğu görülmüştür (Şekil 2.29).

Parametrik çalışma sonucunda, kullanılan zemin için rijitlik modülünün 35 MPa ve sönümlenme parametrelerinin de en küçük değerlerde ($\alpha=0.0001$, $\beta=0.0001$) girilmesi durumunda zeminden en uygun tepkinin alındığı görülmüştür.



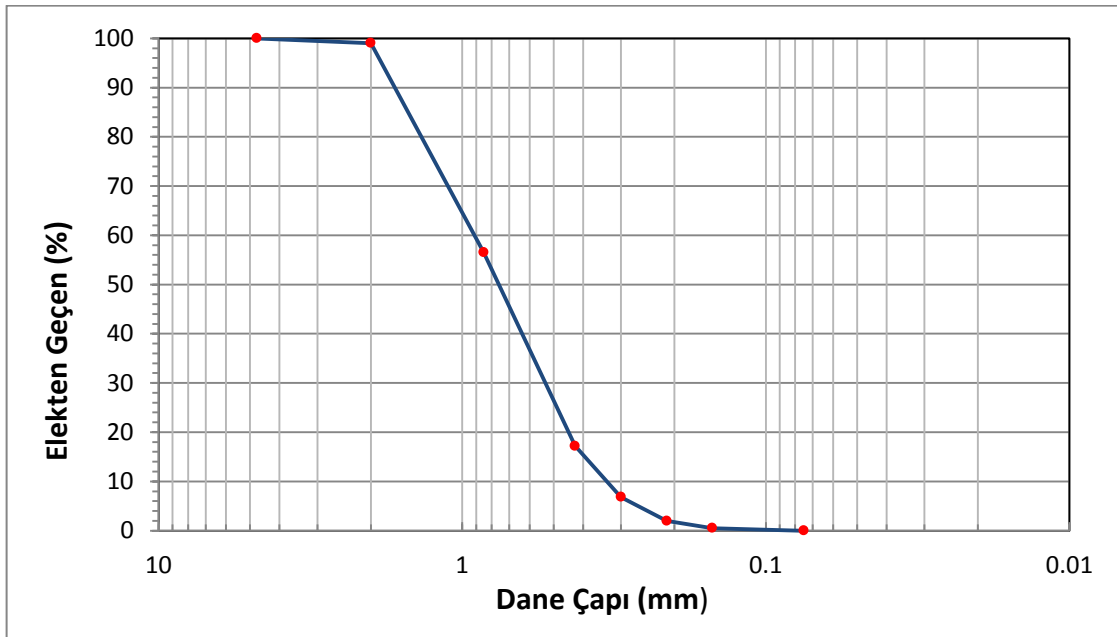
Şekil 2.29 Farklı modüller ve farklı Rayleigh katsayısına bağlı SEA sonuçları [18]

DENEYSEL ÇALIŞMALAR**3.1 Giriş**

Yapılan deneysel çalışmaların tamamı Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi'nin Geoteknik Anabilim Dalı Laboratuvarı'nda ve Yapı Anabilim Dalı Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. GeoGauge ölçümleri için numunenin Poisson Oranı ortalama 0.30 olarak belirlenmiştir.

3.2 Deney Numunesinin Özellikleri ve Deney Tankı

Bu tez çalışmasındaki deneyler için Tekirdağ Kumu olarak nitelendirilen ve dolgu malzemesi olarak kötü derecelenmiş orta kum kullanılmıştır. Seçilen kumun dane çapı dağılım eğrisi Şekil 3.1'de, indeks özellikleri ise Çizelge 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1 Deney numunesinin dane çapı dağılım eğrisi

Çizelge 3.1 Deney numunesinin indeks özellikleri

Zemin Sınıflandırılması (USCS)	Kötü Derecelenmiş Kum (SP)
Maksimum Boşluk Oranı (e_{max})	0.81
Minimum Boşluk Oranı (e_{min})	0.50
Ortalama Dane Çapı (mm) (D_{50})	0.76
Efektif Dane Çapı (mm) (D_{10})	0.35
Üniformluk Katsayısı (C_u)	2.57
Dereceleme Katsayısı (C_c)	0.92
Özgül Yoğunluk (G_s)	2.65

Deney numunesi için YTÜ Geoteknik Anabilim Dalı Laboratuvarlarında mevcut olan silindir şeklinde çelik bir tank kullanılmıştır. Mevcut tankın iç çapı 80 cm, derinliği 100 cm ve duvar et kalınlığı 0.6 cm'dir (Şekil 3.2). Tankın tabanında deformasyon oluşmaması için çelik profilden (18) ayaklar ile güçlendirilmiştir. Tank duvarı ile zemin ara yüzeyinde oluşacak sürtünme kuvvetlerini minimuma indirme amacı ile tankın iç yüzeyinde iyileştirme yapılmıştır. Bu iyileştirmede tankın iç yüzeyi, arası silikon gres ile kayganlaştırılmış iki katlı polietilen film tabakası ile kaplanmıştır.



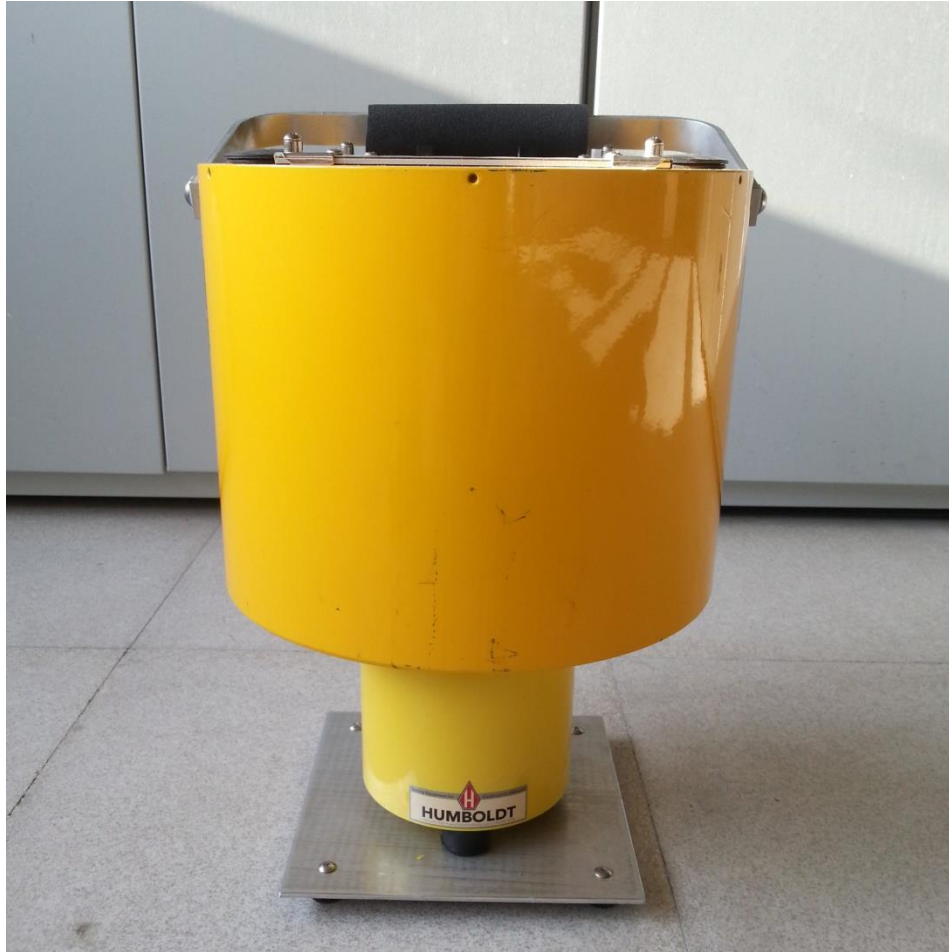
Şekil 3.2 Zeminin yerleştirileceği deney tankı

3.3 GeoGauge Kalibrasyon Kontrolü ve Uygulama Farkları

GeoGauge'in kullanma kılavuzunda [1] kalibrasyon kontrolü için geliştirilmiş Verifier Mass (VM) aparatı ile bu kontrolün nasıl yapıldığı belirtilmektedir. Kontrol basit şekilde GeoGauge'i VM cihazına oturtturarak ölçüm alınması şeklindedir. Bu uygulamadaki önemli nokta VM'nin omuz bölgelerine makine yağı sürülerek GeoGauge'in uyguladığı dinamik kuvvet dalgalarının VM'ye tam aktarılması ve bu sayede belirtilen “-9.3 MN/m” (+/- %5) değerini elde edilebilmesidir (Şekil 3.3).

VM ile yapılan kalibrasyon kontrolünde yağ kullanılmadan ve yağ kullanılarak yapılan ölçüm sonuçları ortalaması; yağ kullanılmadan “-10.85 MN/m” iken yağ kullanıldığında “-9.49 MN/m” değerini vermektedir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında dinamik kuvvetin zemine tam olarak aktarılmasının ölçüm sonuçlarında önemli bir etki oluşturduğu anlaşılmaktadır.

Deney çalışmaları kapsamında GeoGauge kalibrasyonu zaman zaman kontrol edilmiştir.



Şekil 3.3 Verifier Mass ile kalibrasyon kontrolü

3.4 GeoGauge'in Efektif Ölçüm Derinliğinin Belirlenmesi

GeoGauge'in bir arazi ölçüm cihazı olması nedeniyle, yapılacak laboratuvar deneylerinde ilk olarak GeoGauge'in efektif ölçüm derinliğinin saptanması gerekmektedir. Yeterli derinlikte numune oluşturularak cihazın ölçümünde tankın taban sınır koşullarından etkilenmemesi sağlanmış olacaktır.

Yapılan deneysel çalışmada kuru kum, tank içerisine katmanlar halinde serilerek kademe kademe yükseltilmiştir. Her bir katman 5 cm kalınlığında 40 kg kumdan oluşmaktadır. Toplamda 10 katmandan oluşan 400 kg kum kullanılmıştır. Hacmi ve ağırlığı bilinen kumun sıkılığını kontrol etmek mümkün olmaktadır ($Dr=\%60$). Her serme işleminde katmanlar sıkıştırılıp tesviye edildikten sonra GeoGauge ile rijitlik ölçümleri alınmış ve bir sonraki katman aynı şekilde serilmiştir (Şekil 3.4). Bu ve devamındaki tüm deneylerde tankın orta noktasından 10 adet ölçüm alınarak bunların ortalamaları değerlendirilmiştir. Her ölçümden önce GeoGauge yerinden kaldırılarak zemindeki temas yüzeyi el ile tesviye edilmiştir.

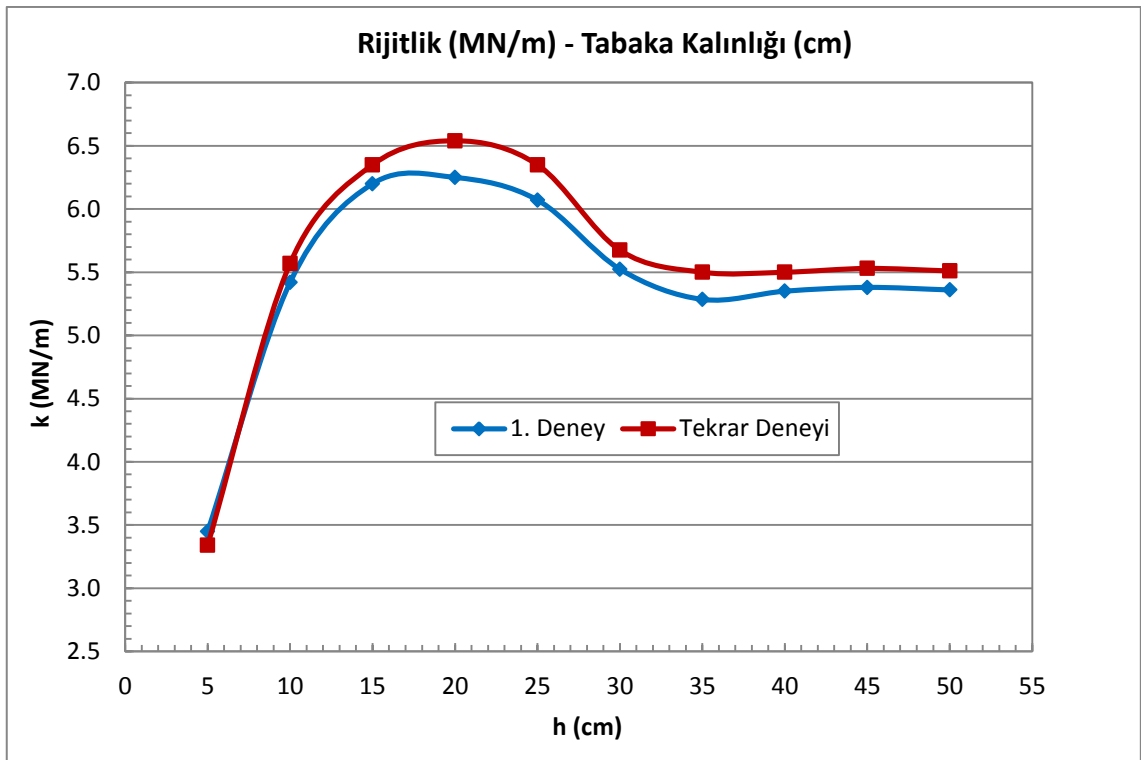


Şekil 3.4 GeoGauge ile serilen katmandan ölçüm alınması

Şekil 3.5’de görüldüğü gibi 5 cm kalınlığındaki numune üzerinde yaklaşık 3.4 MN/m rijitlik değeri okunurken numune kalınlığı arttıkça bu değer yaklaşık 6.5 MN/m mertebelerine gelmektedir. 20 cm kalınlıktan sonra rijitlikte gözle görülür düşüş gerçekleşmekte ve yaklaşık 35 cm kalınlıktan sonra rijitlik 5.5 MN/m mertebelerine inerek kararlı bir hal almaktadır. Deney tekrarlanmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Deney sonuçlarına dayanarak yerleştirildiği düşünülen belirli sıklıktaki zeminde tabandan uzaklaştıkça zemin rijitlik ölçümleri ve beraberindeki elastisite modülü ölçümleri değişmektedir.

Bu sonuçlara dayanarak GeoGauge’in rijit tank tabanından etkilenmediği efektif ölçüm derinliğinin 30 cm ile 35 cm arasında başladığı görülmektedir.



Şekil 3.5 GeoGauge İle ölçülen rijitlik değerinin zemin kalınlığına bağlı değişimi

3.5 GeoGauge Modüllerinin Rölatif Sıkılık ile İlişkisinin İncelenmesi

Bu deneysel çalışmada GeoGauge ile ölçülen rijitlik değerinin ve beraberindeki Elastisite modülü değerinin zeminin rölatif sıkılık değeri ile ilişkisi incelenmiştir.

Deneylerde ilk önce gevşek olarak yerleştirilen kumun rölatif sıkılığı kademeler halinde artırılmış ve her sıkılıkta sahip olduğu rijitlik değerleri ölçülmüştür. Kumun rölatif sıkılığını arttırmak için sarsma ve sıkıştırma uygulanarak kumun tanka oturması sağlanmıştır. Bu sayede rijitlik veya elastisite modülü ile rölatif sıkılık arasındaki bağıntı incelenmiştir.

Çizelge 3.2’de iri daneli zeminlerin sıkılık derecesini tanımlamak için kullanılan tarifler ve bunlara karşılık gelen rölatif sıkılık değerleri görülmektedir.

Çizelge 3.2 İri daneli zeminlerin sıkılık dereceleri [19]

Sıkılık Derecesi	Rölatif Sıkılık (D_r),%
Çok gevşek	0 - 15
Gevşek	15 - 35
Orta sıkı	35 - 65
Sıkı	65 - 85
Çok Sıkı	85 - 100

Deneyde tanka yerleştirilecek kuru kumun ilk tabaka kalınlığının 50 cm olması planlanmıştır. Kum büyük kitleler halinde tanka yerleştirilirken (8-10 kg) mümkün olduğu kadar gevşek halde bırakılmaya çalışılarak tesviyesi yapılmıştır. Tabaka kalınlığı 50 cm’e ulaşıncaya kadar toplamda 395 kg kuru kum tanka yerleştirilmiştir. Hacim ağırlık ilişkisine dayanarak kumun ilk rölatif sıkılığı orta sıkı olarak nitelendirilen $D_r = 39.5$ olarak hesaplanmıştır.

Sonraki adımlarda zemin sıkılığını arttırmak için tankın duvarları lastik tokmak ile tokmaklanarak kumun oturması sağlanmıştır. Bu oturmalar her sıkılık değeri için 0.5 cm olarak seçilmiştir. Tokmağın yetersiz kaldığı ($D_r > 50$) sıkılık değerinden sonra tank duvarlarına ve zemin üzerine 4 joule’lük elektrikli el kompaktörü ile titreşim

uygulanarak zemin sıkıştırılmıştır. Kum yüksekliği referans kirişi yardımı ile lazer metre kullanılarak farklı noktalardan ölçülmüştür ve tankın içinde bulunan metre sayesinde 50 cm den başlayarak 47 cm'ye kadar gönyeli olarak indirilmiştir (Şekil 3.6). Bu yolla altı farklı rölatif sıklık değeri elde edilmiştir. Her sıklık değerinde tankın orta noktasından GeoGauge ile 10 ölçüm alınmış ve ortalaması hesaplanmıştır. Ardından deney ikinci bir kez yapılarak tekrarlanmıştır. Çizelge 3.3'de kumun sıkışmasına bağlı olarak değişen tabaka kalınlığının ve buna karşılık gelen rölatif sıklık değerleri, beraberinde de her iki deneyde GeoGauge ile okunmuş rijitlik ve elastisite modüllerinin ortalamaları belirtilmiştir.

Çizelge 3.3 Kum seviyesine bağlı olarak değişen rölatif sıklık değerleri

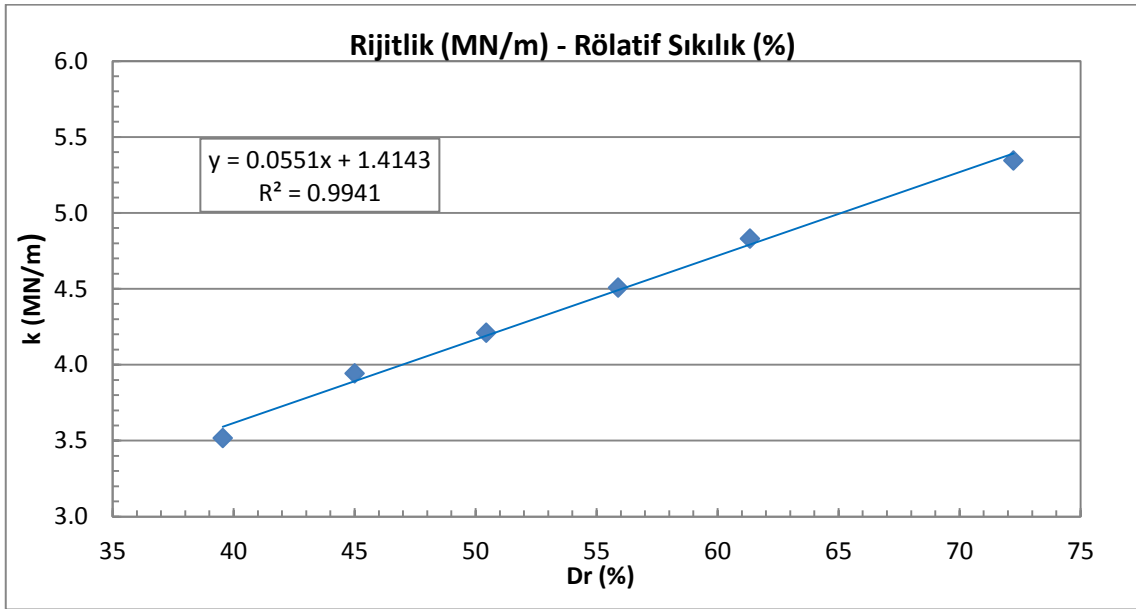
h (cm)	50	49.5	49	48.5	48	47
Dr (%)	39.55	45.0	50.45	55.9	61.35	72.24
K_G (MN/m)	3.52	3.94	4.21	4.51	4.83	5.34
E_G (MPa)	31.64	35.46	37.88	40.55	43.45	48.07



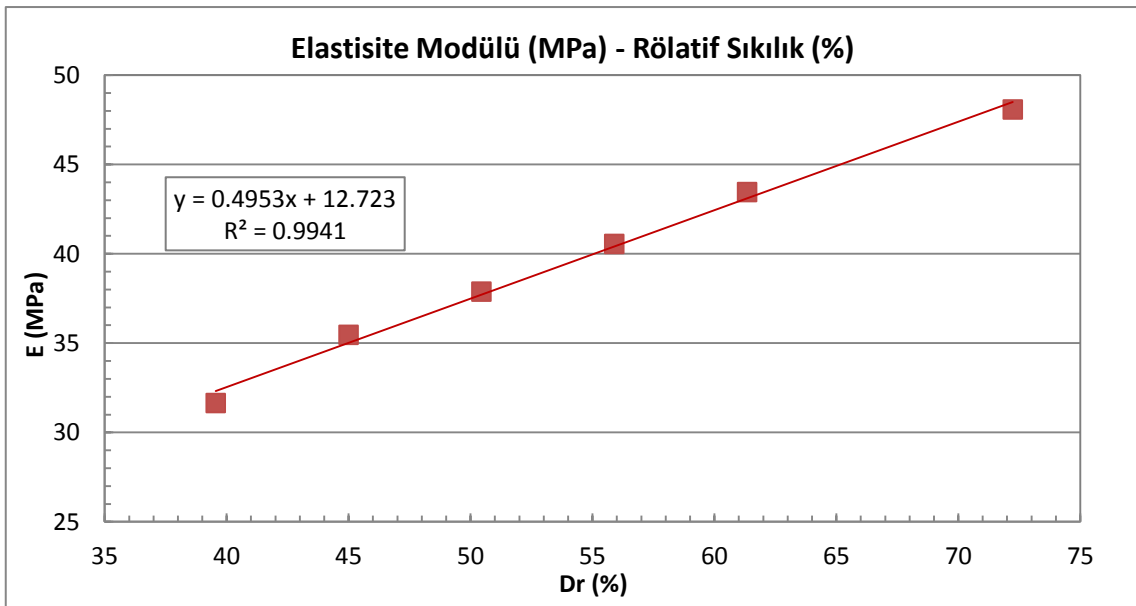
Şekil 3.6 Lazer metre ve cetvel yardımı ile tabaka kalınlığının ayarlanması

Deney sonuçlarından zeminde rölâtif sıkılık arttıkça rijitlik ve elastisite modülünde belirgin derecede doğrusal artışlar meydana geldiği gözlenmiştir.

Şekil 3.7 ve 3.8’de Çizelge 3.3’de belirtilen ortalama rijitlik ve ortalama elastisite modüllerinin rölâtif sıkılıkla ilişkileri görülmektedir.



Şekil 3.7 GeoGauge ile ölçülen rijitlik modülünün rölâtif sıkılıkla değişimi



Şekil 3.8 GeoGauge ile ölçülen elastisite modülünün rölâtif sıkılıkla değişimi

3.6 Plaka Yükleme Deney Düzeneği

Yükleme için mevcut bulunan, 200 kN kapasiteli ve 0,2 kN okuma hassasiyetli HI-TECH MAGNUS marka hidrolik yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresinin yapısı U40 profillerden oluşan 4 m genişliğinde ve 2,5 m yüksekliğinde kapalı bir çerçeveden meydana gelmektedir. Tank yük hücresine mevcut bir vinç yardımıyla yerleştirilmiştir. Şekil 3.9’de yük hücresi ve tankın yerleşim şekli görünmektedir. Yükleme plakasına hidrolik bir kol sayesinde manuel olarak yük uygulanıp analog kadranslardan yük kontrol edilebilmektedir (Şekil 3.10).



Şekil 3.9 Deney tankı ve plaka yükleme hücresi



Şekil 3.10 (a) Hidrolik yük kolu ve analog yük kadranı, (b) Hidrolik başlık

Yük hücresinin yıllık kalibrasyon sertifikasından alınan değerler kullanılarak uygulanan yükün gerçek değeri ile kadranından okunan değerler arasında kalibrasyon düzeltmesi yapılarak daha hassas ölçüm değerlerine ulaşılmıştır.

Plaka yükleme deneyi arazide yapılan bir deney olduğundan laboratuvarında yapılırken, zeminin tank duvarlarının oluşturacağı sınır koşullarından mümkün olduğunca az etkilenmesi istenmiştir. Bunu sağlamak için “Bölüm 2.2.1” de belirtildiği gibi kullanılacak yükleme plakasının çapı ile tank çapı arasında 1/5 oranı sağlanmıştır.

Hazırlanan plaka 15 cm çapında ve 2 cm kalınlığında olup daire şeklindedir. Yükleme sırasında plakada oluşan birim oturmaları ölçmek için iki adet Burster marka deplasman sensörü karşılıklı olarak plakanın üzerine yerleştirilmiştir. Yerleştirilen bu sensörler tank duvarlarına sabitlenerek zemindeki oturmanın referans noktası tank olarak ayarlanmıştır (Şekil 3.11).

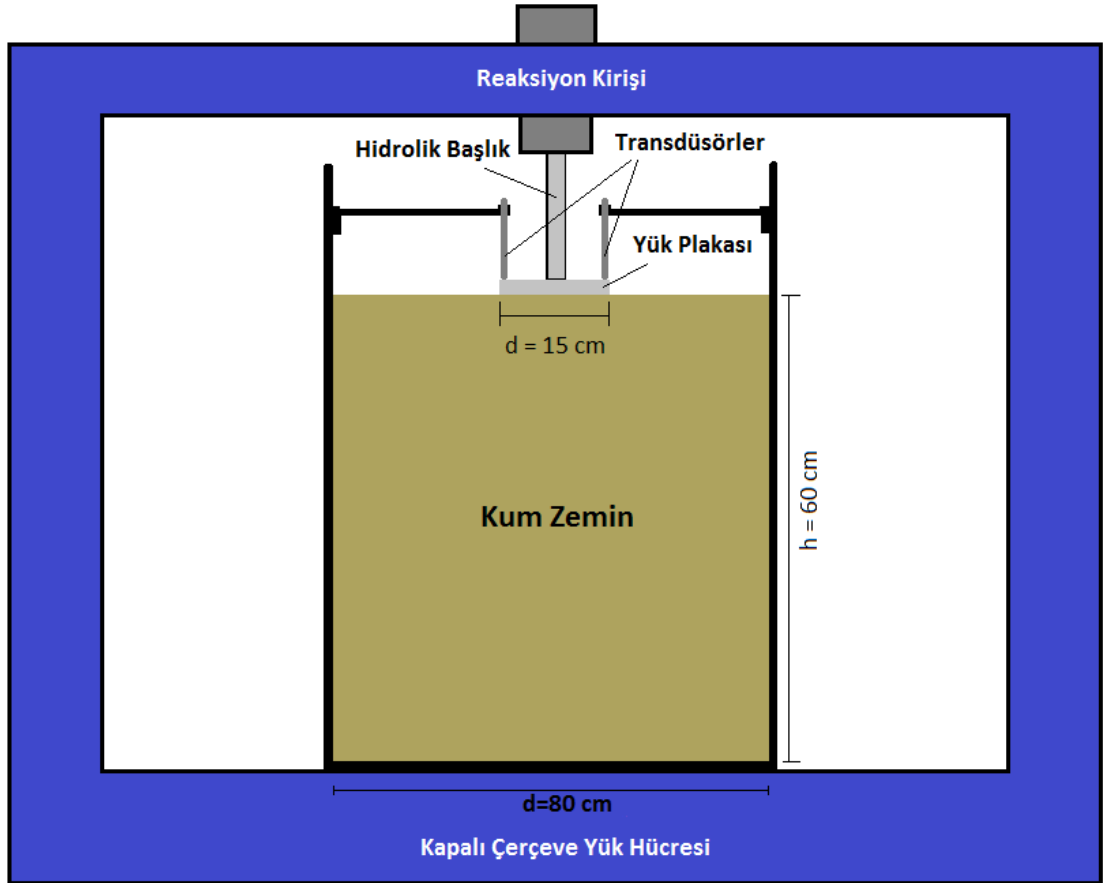


Şekil 3.11 Yükleme başlığı ve deplasman sensörlerinin yerleşim şekli

3.7 Plaka Yükleme Deneyinin Yapılışı

Bu deneysel çalışmada tezin asıl konusu olan GeoGauge ve plaka yükleme deneyi ile bulunan zemin parametrelerinin ilişkilendirilmesi hedeflenmiştir.

Plaka yükleme deneyi sırasında oluşacak gerilme soğanlarının tankın sınır koşullarından etkilenmemesi için plaka genişliği de göz önüne alınarak tabaka kalınlığı 60 cm olarak belirlenmiştir. Deney için kum zeminin sıklıkları seçilirken orta sıkı ($D_r=50\%$) ve çok sıkı ($D_r=90\%$) olmak üzere iki farklı rölatif sıklık değeri elde edilmek istenmiştir. Her sıklık değeri için kontrol amaçlı ikişer yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.12’de deney yükleme şeması görülmektedir.



Şekil 3.12 Plaka yükleme deney şeması

Bilinen tank çapı ve numune yüksekliğine göre hedeflenen sıklıklar için gerekli kum miktarları; $D_r=50\%$ için 483 kg ve $D_r=90\%$ için de 522 kg olarak hesaplanmıştır.

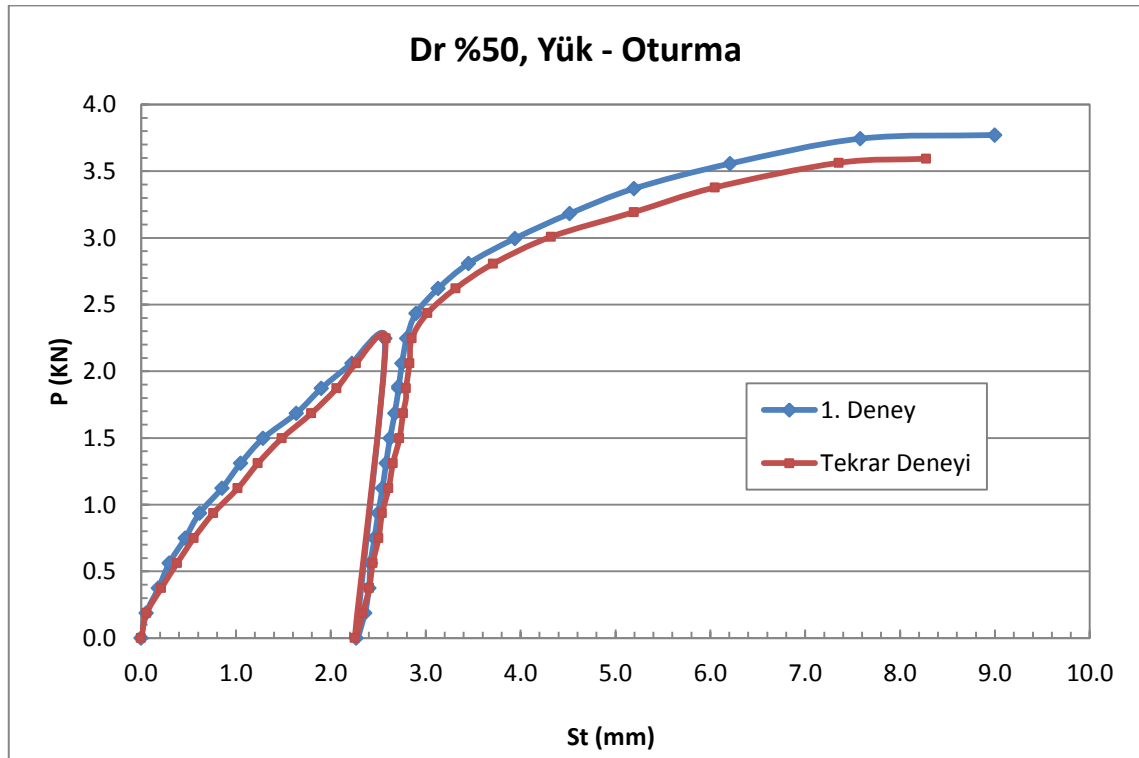
Her sıklık için hesaplanmış olan kum miktarı katmanlar halinde tanka serilerek sıkıştırılmıştır. Daha sonra sıkıştırılan kumun yüzeyi tesviye edilmiştir.

Kum tamamen yerleştirildikten sonra GeoGauge ile elastisite modülleri ve rijitlik ölçümleri her sıklık için 10 adet olacak şekilde tankın orta noktasından alınmıştır. GeoGauge ile ölçümler her defasında cihaz yerinden kaldırılıp ayak izi tesviye edilip tekrar yerleştirilerek yapılmıştır.

Her deneyde yüklemeler çevrimli olarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede deney ile elde ettiğimiz yük-oturma eğrisinde boşaltma ve tekrar yükleme modülleri de elde edilebilmektedir.

Hazırlanan orta sıkı ($D_r = 50$) zeminde yükleme kademeli olarak yapılarak oturmaların sabitlenmesi beklenmiştir. Uygulanan yük 2.25 kN değerine ulaştığında boşaltılarak sıfırlanmıştır. Tekrar yükleme yapılarak zemin g  ene kadar (3.7 kN) yük kademeli olarak arttırılmıştır. Yükün göçme değerine ulaştığı andan itibaren plaka hızla batmaya başlayarak sabit yük değeri elde edilememiştir.

Deney aynı şekilde bir kere daha yapılarak tekrar deneyi elde edilmiştir. şekil 3.13'de %50 rölatif sıklık değeri için yük-oturma eğrileri, şekil 3.14'de deney sonunda zemin yüzeyinde meydana gelmiş kabarma görülmektedir.

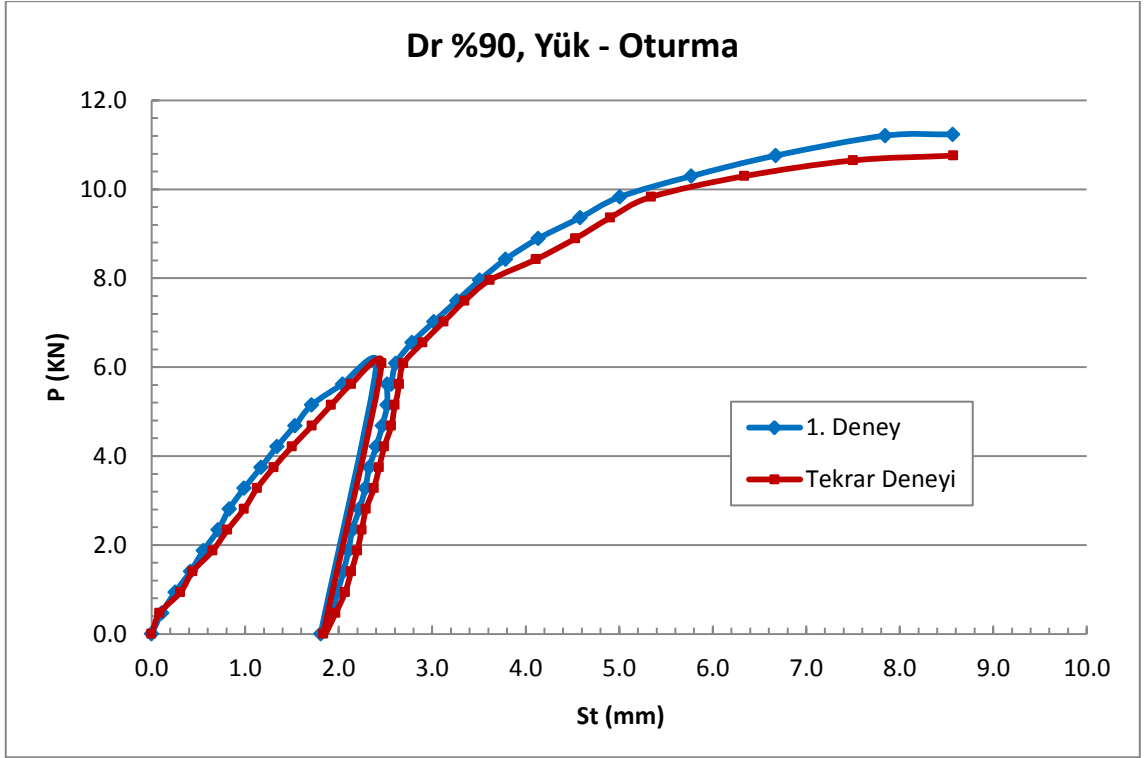


şekil 3.13 $D_r = 50$ sıklık değeri için plaka yükleme deneyi yük-oturma eğrileri



Şekil 3.14 $D_r=50\%$ kumda meydana gelen yerel göçme zarfı ile oluşan kabarma

Bir sonraki deneyde çok sıkı ($D_r=90\%$) zeminde aynı şekilde tek çevrimli plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. İlk yüklemede uygulanan yükün değeri 6 kN'a ulaştığında yük boşaltılmıştır. Tekrar yükleme yapılarak zemin göçene kadar (11.2 kN) yük kademeli olarak arttırılmıştır. Deney sonunda sıkı zeminlerde olması beklenen genel göçme zarfı gözlemlenmiştir. Göçme zarfının sınırları belirgin olup yaklaşık 52 cm çapındadır. Deney ikinci bir kez tekrarlanmıştır. Her iki deney içinde göçme anında ulaşılan oturma değeri yaklaşık 8.5 mm mertebelerindedir. Şekil 3.15'de ve Şekil 3.16'de %90 rölatif sıklık değeri için yük-oturma eğrisi ve meydana gelmiş genel göçme zarfı görülmektedir.



Şekil 3.15 Dr=%90 sıklık değeri için plaka yükleme deneyi yük-oturma eğrileri



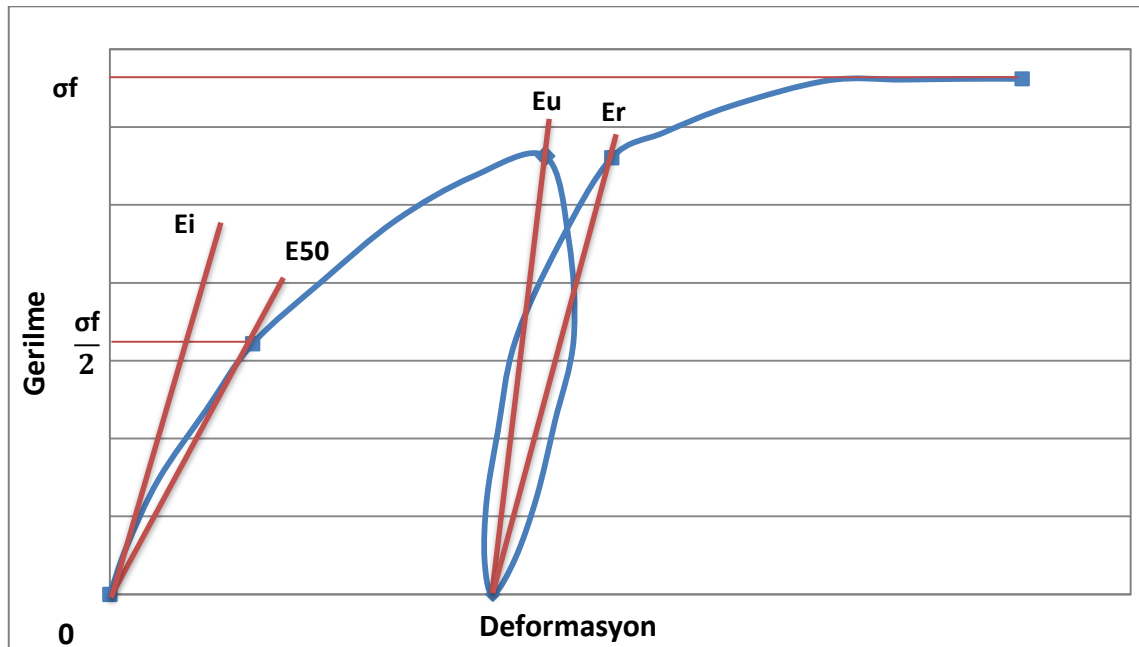
Şekil 3.16 Dr=%90 kumda meydana gelen genel göçme zarfının sınırları

3.8 Plaka Yükleme Deneyi ile Bulunan Modüllerin GeoGauge ile Karşılaştırılması

Bu bölümde ilk olarak Bölüm 3.7’de gerçekleştirilmiş plaka yükleme deneyinden elde edilen yük oturma eğrilerinden faydalanarak iki sıklık değeri için zeminin başlangıç modülleri (E_i), boşaltma modülleri (E_u), tekrar yükleme modülleri (E_r) ve ortalama sekant modülleri (E_{50}) hesaplanmış ve GeoGauge ile ölçülen elastisite modülleriyle karşılaştırılarak ilişkilendirilmiştir.

Elastisite modüllerini hesaplarken Bölüm 2.2.4’de belirtilen 2.18 eşitliğinden faydalanılmıştır.

Şekil 3.17 de bir gerilme deformasyon eğrisi üzerinde bulunun modül değerleri belirtilmiştir.

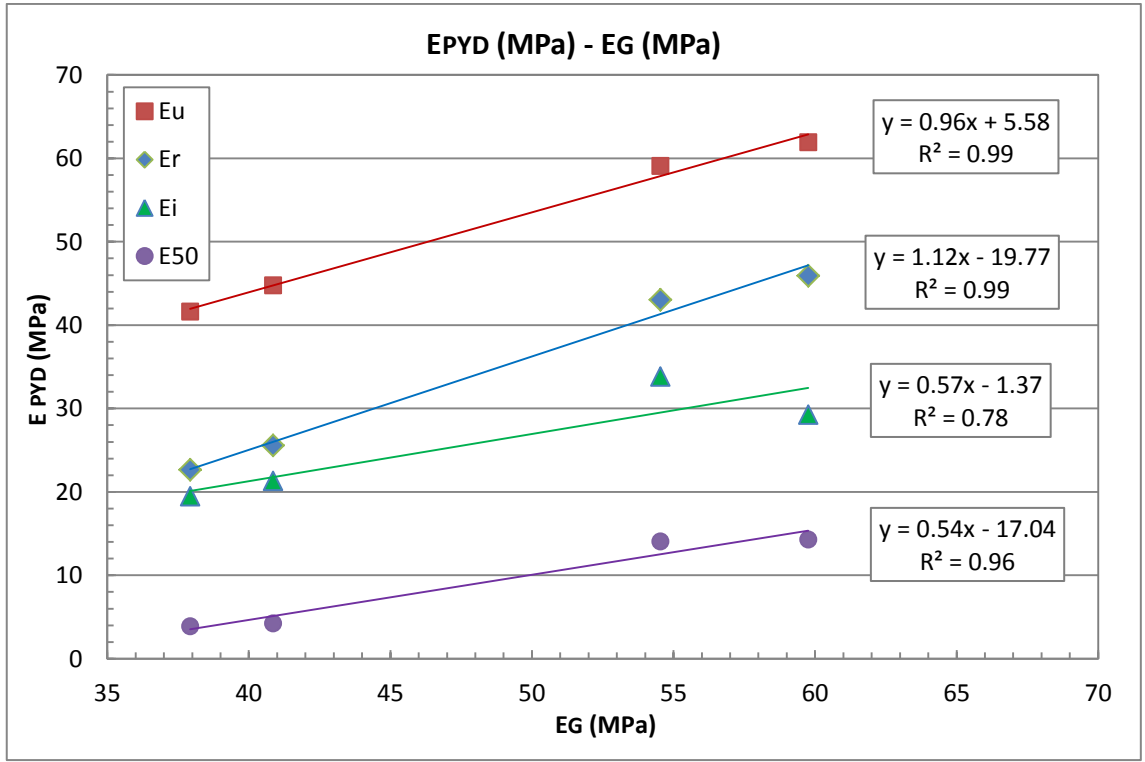


Şekil 3.17 Örnek bir gerilme deformasyon eğrisi ve elastisite modülü değerleri

Her iki sıklık için de GeoGauge ile ölçülen modül değerinin ve plaka yükleme deneyi ile hesaplanan modüllerin arasında belli ilişkiler olduğu görülmüştür. Çizelge 3.4’de elde edilen modül değerleri görülmektedir. Şekil 3.18’de GeoGauge ve plaka yükleme deneyi modülleri karşılaştırılmıştır ve Çizelge 3.5’de modüllerin oranları belirtilmiştir. Çizelge 3.5’de görüldüğü gibi her iki sıklıktaki zemin için de boşaltma modülü (E_u) GeoGauge modülüne (E_G) en yakın değerleri vermektedir.

Çizelge 3.4 PYD ve GeoGauge modül değerleri

	Ei (MPa)	Eu (MPa)	Er (MPa)	E ₅₀ (MPa)	E _G (MPa)	k _G (MN/m)
1. Deney (%50)	21.32	44.76	25.58	4.21	40.86	4.54
2. Deney (%50)	19.49	41.64	22.67	3.90	37.93	4.21
1. Deney (%90)	29.27	61.95	45.93	14.28	59.76	6.64
2. Deney (%90)	33.83	59.08	43.03	14.06	54.54	6.06

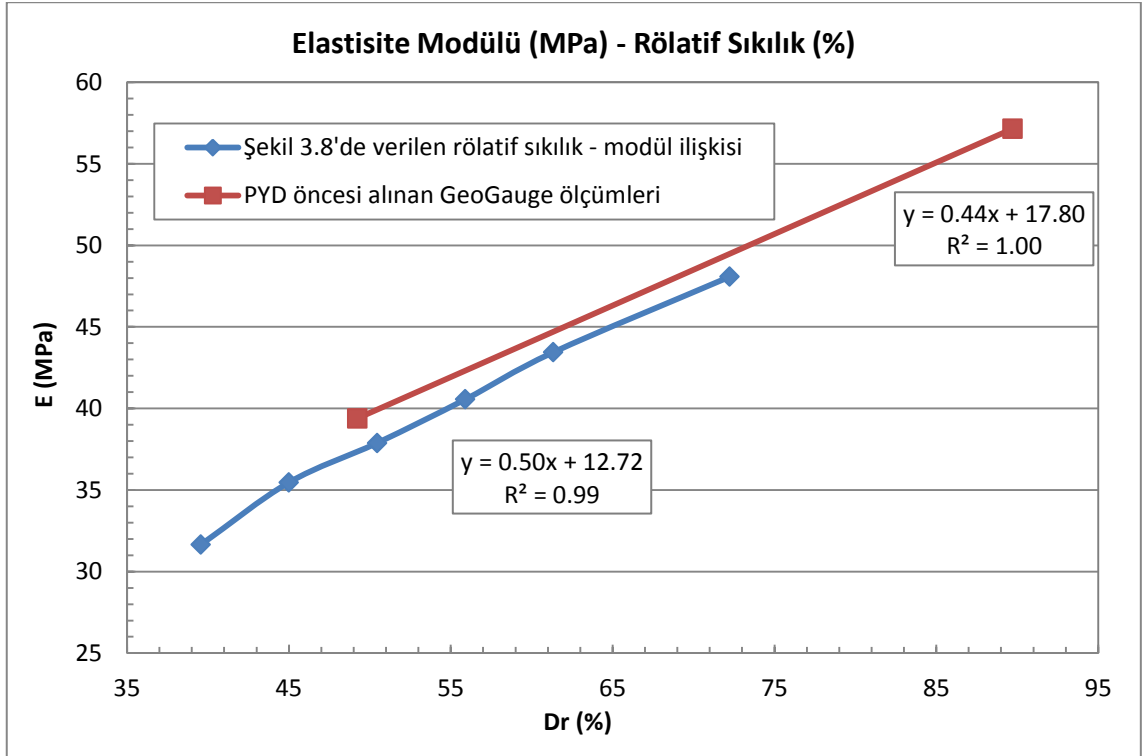


Şekil 3.18 GeoGauge ve plaka yükleme deneyi modüllerinin karşılaştırılması

Çizelge 3.5 GeoGauge modül değerlerinin PYD modüllerine oranları

	E_G/E_i	E_G/E_u	E_G/E_r	E_G/E_{50}
1. Deney (%50)	1.9	0.91	1.6	9.7
2. Deney (%50)	1.9	0.91	1.7	9.7
1. Deney (%90)	2.0	0.96	1.3	4.2
2. Deney (%90)	1.6	0.92	1.3	3.9

Diğer bir inceleme de Bölüm 3.5’de yer verilen rölatif sıkılığa bağlı GeoGauge değerleri ile Bölüm 3.7’de gerçekleştirilmiş GeoGauge okumalarının karşılaştırılmasıdır. Bu karşılaştırmanın amacı sıklık ve modüller arasındaki ilişkinin tutarlılığını kontrol etmektir. Şekil 3.19’da görüldüğü üzere iki farklı deneyde elde edilen ortalama GeoGauge modülleri %50 rölatif sıklılıkta yakın değerleri vermektedir. Her iki eğrinin de eğimlerinin birbirine yakın oldukları ve GeoGauge modülleri ile sıklık arasında tutarlı bir ilişki olduğu görülmektedir.



Şekil 3.19 Rölatif sıklık deneyinde ve plaka yükleme deneyinde okunan GeoGauge modüllerinin karşılaştırılması

SONLU ELEMANLAR ANALİZ YÖNTEMİ

4.1 Giriş

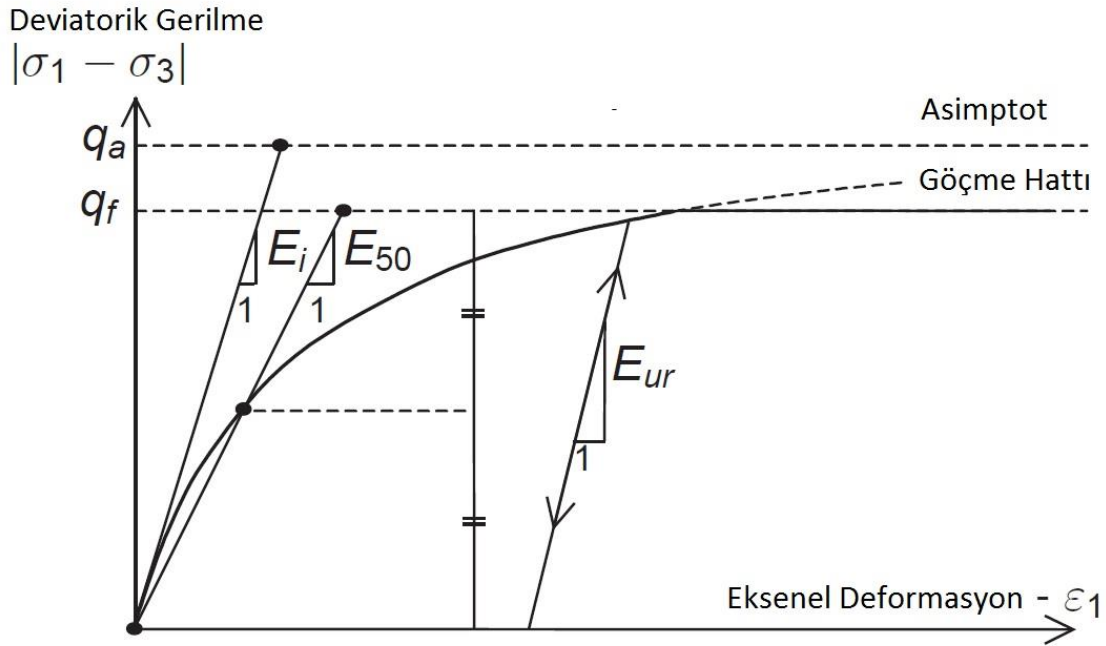
Bu bölümde, laboratuvarında elde edilmiş deney sonuçlarından yararlanarak deneyin numerik olarak modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla sonlu elemanlar analiz yöntemi ile çözüm yapan PLAXIS 2D paket yazılımı kullanılarak yükleme koşulları, sistem geometrisi ve iki farklı malzeme özelliği birebir modellenerek, kum zemine uygulanan plaka yükleme deneyi ve GeoGauge ile rijitlik ölçümü analizleri yapılmıştır.

4.2 Sonlu Elemanlar Analizde Seçilen Malzeme Modeli

Hardening Soil (HS) model farklı türdeki sert ve yumuşak zeminlerin davranışını modellemekte kullanılan gelişmiş bir malzeme modelidir. HS model, drenajlı üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen eksenel deformasyon ve deviatorik gerilme ilişkisinin yaklaşık hiperbol şeklinde olması esasına dayanır (Şekil 4.1). Gerilme seviyesi; kohezyon (c), kayma dayanımı açısı (ϕ) ve genleşme açısı (ψ) ile sınırlıdır. HS model, gerilme seviyesine bağlı rijitlik üs değeri (m) dikkate alınmaktadır. Buna göre zemin rijitliği basınçla birlikte artmaktadır. Bu ilişki ilk defa Kondner (1963) tarafından formüle edilmiştir. Daha sonra Duncan ve Chang (1970) tarafından geliştirilerek hiperbolik zemin modeli olarak tanımlanmıştır [20].

HS model, hiperbolik zemin modelinin yerini almış olmasına rağmen arasında önemli farklar vardır. Bu farklardan birincisi, modelde elastisite teorisinden çok plastisite teorisini kullanılmasıdır. İkinci fark, modelin zemin genleşmesini de kapsamayı, üçüncü fark ise, bir akma başlığı (yield cap) içermesidir [20].

HS modelin parabolik gerilme-şekil değiştirme eğrisi kullanması ve zeminin gerilmeye bağlı davranış göstermesi sebebiyle analizlerde bu model tercih edilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Standart bir drenajlı üç eksenli basınç deneyinde hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [20]

4.3 Sonlu Elemanlar Analizde Kullanılan Malzeme Parametreleri

Modellenecek olan zeminler HS model ile analiz edileceği için rijitlik ve dayanım parametrelerinin bulunması amacı ile %50 ve %90 rölatif sıkılık derecelerinde hazırlanan numuneler üzerinde konsolidasyonlu drenajlı (CD) üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen gerilme-eksenel şekil değiştirme ve eksenel şekil değiştirme-hacimsel şekil değiştirme ilişkileri dikkate alınarak HS Model için gerekli parametreler belirlenmiştir.

HS Model’de zemin rijitliği üç adet modül ile tanımlanmıştır. Bunlardan ilki, birinci yükleme için ortalama sekant modülüdür (E_{50}). Bu parametre göçme gerilmesinin yarısına denk gelen gerilmenin, bu gerilmeye karşılık gelen düşey deformasyona oranlanması ile elde edilir (Şekil 4.1). Zemin rijitliği gerilmeye bağımlı bir parametre olduğu için gerilme-deformasyon ilişkisi belirlenirken uygulanan çevre gerilmesinin bilinmesi gerekmektedir. HS Model’de sekant modülü ile beraber uygulanan çevre

gerilmesi (referans gerilme, σ_{ref}) ve gerilmeye bağımlılık miktarını ifade eden “m” değeri de girilmektedir.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{\sigma_3 + c \cot \varphi_p}{\sigma_{ref} + c \cot \varphi_p} \right)^m \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1’de; üç eksenli basınç deneyinden elde edilen “referans” başlangıç sekant modülü (E_{50}^{ref}), çevre gerilmesine bağımlı başlangıç sekant modülü (E_{50}), üç eksenli basınç deneyinde uygulanan “referans” çevre gerilmesi ($\sigma_{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$), çevre gerilmesi (σ_3), kohezyon (c), kayma dayanımı açısı (ϕ) ve gerilmeye bağımlılık miktarını ifade eden üstel kuvvettir (m).

Yazılımda, kohezyon değerinin $c=0$ alınması durumunda analizlerde formülasyondan dolayı bazı sıkıntılar doğabileceği ve bu yüzden “c” değerinin 0.2 kN/m^2 ’den büyük alınması önerilmektedir [20]. Bu sebeple analizlerde kohezyon değeri olarak $c=0.4 \text{ kN/m}^2$ değeri kullanılmıştır.

Janbu (1963), “m” değerlerinin Norveç kumu ve silti için 0.50 civarında, Von Soos (1980) ise, $0.50 < m < 1.00$ aralığında olduğunu belirtmiştir [20]. Analizlerde, yazılımda geçerli olarak verilen $m=0.50$ değeri kullanılmıştır.

Referans başlangıç sekant modülü, gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin elde edilmesinin ardından kolaylıkla belirlenebilmektedir. Ancak kullanılan numune, yerleştirme yöntemi, ortam sıcaklığı vb. parametreler aynı olsa bile insan eli ile hazırlanan bir deneyden elde edilen sonuçlar birebir aynı olmayabilmektedir. Örneğin, aynı koşullarda tekrarı yapılan bir üç eksenli basınç deneyinde numunenin dayanımı ilk yapılan deneyde elde edilen dayanımı ile aynı değerde bulunabilir. Bununla beraber, dayanım değerine karşılık gelen şekil değiştirme değerinin bir miktar farklılık göstermesi başlangıç sekant modülünü önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, sayısal analizlerde en uygun zemin tepkisini almak üzere her bir yerleşim sıklığı için dört farklı başlangıç sekant modülü seçilmiştir (Çizelge 4.1).

HS Model için girilen ikinci rijitlik modülü; K_0 koşulundaki (ödometre koşulu) bir yükleme deneyinden elde edilecek tanjant modülüdür (E_{oed}). Deneyden elde edilecek eğriye referans çevre basıncına karşılık gelen noktada çizilen tanjantın eğimi bu

parametreyi vermektedir (Eşitlik 4.2). HS Model’de bu parametre referans başlangıç sekant modülü ile aynı değerde girilebilmektedir.

Çizelge 4.1 Dr=%50 ve Dr=%90 sıklıklardaki farklı modül değerleri

	Dr=%50			Dr=%90		
Analiz No	E ₅₀ (kPa)	E _{oed} (kPa)	E _{ur} (kPa)	E ₅₀ (kPa)	E _{oed} (kPa)	E _{ur} (kPa)
1. Analiz	45000	45000	135000	75000	65000	225000
2. Analiz	40000	40000	120000	70000	60000	210000
3. Analiz	35000	35000	105000	65000	55000	195000
4. Analiz	30000	30000	90000	60000	50000	120000

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi_p - \frac{\sigma_3}{K_0^{nc}} \sin \varphi_p}{c \cos \varphi_p + \sigma_{ref} \sin \varphi_p} \right)^m \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.2’de; ödometre koşulunda yapılan deneyden elde edilen “referans” tanjant modülü (E_{oed}^{ref}), çevre gerilmesine bağlı tanjant modülü (E_{oed}) ve normal konsolidasyon için sükunetteki toprak basıncı katsayısıdır (K_0^{nc}).

HS Model için girilen üçüncü rijitlik modülü ise boşaltma-tekrar yükleme modülüdür (E_{ur}) (Şekil 4.1) (Eşitlik 4.3). Hardening Soil Model’de bu parametre referans başlangıç sekant modülünün üç katı olarak girilebilmektedir.

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi_p - \sigma_3 \sin \varphi_p}{c \cos \varphi_p + \sigma_{ref} \sin \varphi_p} \right)^m \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.3 ile verilenler; üç eksenli basınç deneyinden elde edilen “referans” boşaltma-tekrar yükleme modülü (E_{ur}^{ref}) ve çevre gerilmesine bağımlı boşaltma-tekrar yükleme modülüdür (E_{ur}).

Analizlerde kullanılan, üç eksenli boşaltma-yükleme rijitliği (E_{ur}) ve ödometre yükleme rijitliği (E_{oed}) değerleri, PLAXIS tarafından önerilen, $E_{oed} \approx E_{50}$ ve $E_{ur} \approx 3E_{50}$ bağıntıları kullanılarak elde edilmiştir. Bununla beraber PLAXIS, $Dr=\%50$ sıklıkta E_{50} modülü ile E_{oed} modülü eşit kabul ederken $Dr=\%90$ sıklıkta artan ϕ açısına bağlı olarak E_{oed} modülünü E_{50} modülünden daha düşük bir değere atamaktadır (Çizelge 4.1).

Göçme oranı ($R_f=q_f/q_a$) için PLAXIS’de geçerli olarak verilen 0.90 değeri seçilmiştir.

Dinamik yüklemelerde malzeme sönümü, genellikle malzemenin viskoz özelliklerine, kayma dayanımı açısına ve plastikleşmesine bağlıdır. PLAXIS’de bu sönümlenme, Rayleigh α ve β katsayılarının zemin parametresi olarak atanması ile Eşitlik 4.4’de belirtilen şekilde hesaplanır [21].

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4.4)$$

Eşitlik 4.4’de “C” sönümlenmeyi temsil eder. “M” ve “K” sırasıyla kütle ve rijitlik matrisleridir[21].

Rayleigh α zemin sönümlenmesinde kütlenin etkisini belirleyen parametredir. “ α ” değeri ne kadar yüksek olursa, düşük frekanslar o kadar fazla sönümlenir. Rayleigh β ise sistemin sönümlenmesinde rijitliğin etkisini belirleyen parametredir. “ β ” değeri ne kadar yüksek olursa yüksek frekanslar o kadar fazla sönümlenir [21].

GeoGauge modellemesinde zemine farklı Rayleigh α ve β sönümlenme katsayıları atanarak laboratuvar deneylerine en uygun sonucu veren katsayı araştırılmıştır.

Analizlerde kullanılan kum zeminin HS model parametreleri Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.2 HS model için belirlenen model zemin parametreleri

Parametre Adları	Sembol	Dr%50	Dr%90
Birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	γ_n	15.72	16.99
Referans çevre gerilmesi (kPa)	σ^{ref}	100	100
Gerilme seviyesine bağlı rijitlik üs değeri	m	0.5	0.5
Boşluk oranı	e	0.654	0.530
Kohezyon (kPa)	c	0.4	0.4
Kayma dayanımı açısı ($^{\circ}$)	ϕ	40.3	45.8
Genleşme açısı ($^{\circ}$)	ψ	14.2	19.7
Poisson oranı	ν	0.3	0.3
Göçme oranı	R_f	0.9	0.9

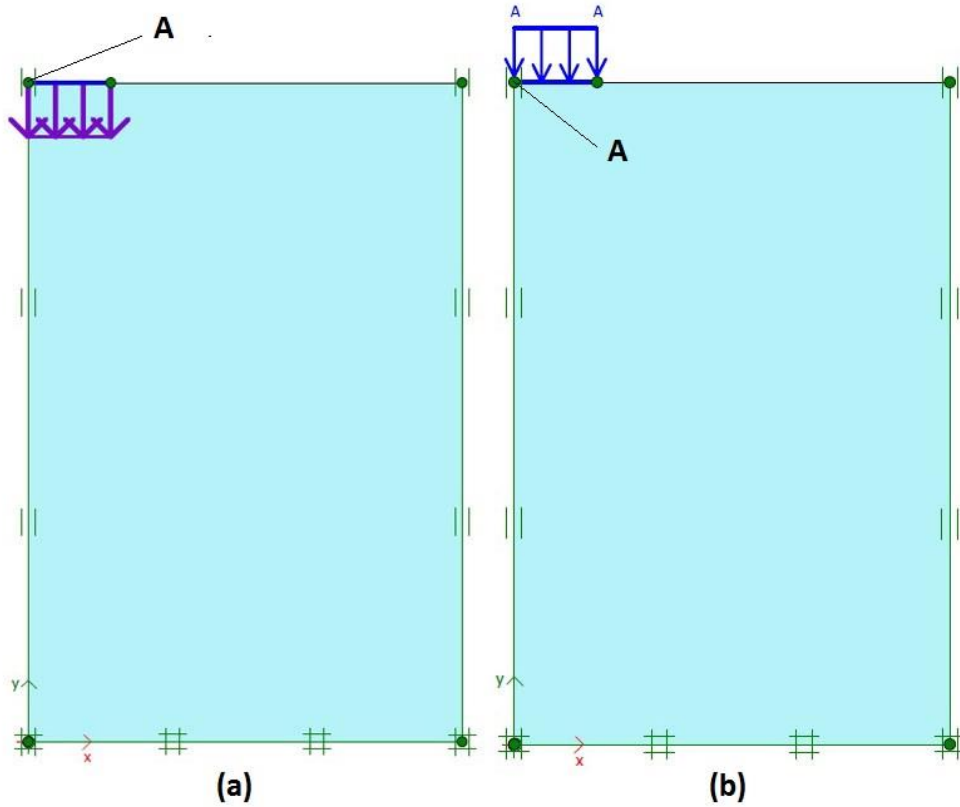
4.4 Sonlu Elemanlar Analizi İçin Oluşturulan Geometrik Modeller

PLAXIS yazılımında deney düzeneğinin geometrik modeli, iki boyutlu ve eksenel simetri şeklinde çizilerek düzlem şekil değiştirme koşullarında oluşturulmuştur. Zemin ortamı, daha hassas bir çözüm elde etmek amacıyla 15 düğüm noktalı üçgen elemanlarla modellenmiştir. PLAXIS’de sonlu elemanlar ağı (Mesh) otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Analizlerde orta sıklıkta ağ (Medium) tercih edilmiştir. Eksenel simetrik zemin geometrisi deney tankı ile aynı olacak şekilde, genişliği 40 cm ve zemin yüksekliği 60 cm olarak belirlenmiştir. Bu sayede mevcut geometri “Y” ekseninde bir tam tur döndürüldüğünde, silindir deney tankı, daire yük plakası ve GeoGauge’in halka ayağı tam olarak oluşturulmaktadır. Geometrik modelde PLAXIS’de mevcut olan standart sınır koşulları kullanılmıştır. Standart sınır koşullarında, geometrik modelin tabanında hem düşey hem yatay deplasmanlar engellenmektedir. Düşey kenarlarında ise, sadece yatay deplasmanlar engellenmektedir. Analizlerde model temel plakası modellenmiştir. Plaka malzeme özellikleri, $EI=140 \text{ kNm}^2/\text{m}$ ve $EA=4000 \text{ MN}/\text{m}$ ’dir. elemanın genişliği deneylerde kullanılan model temel genişliği ile ($B=70\text{mm}$) aynı

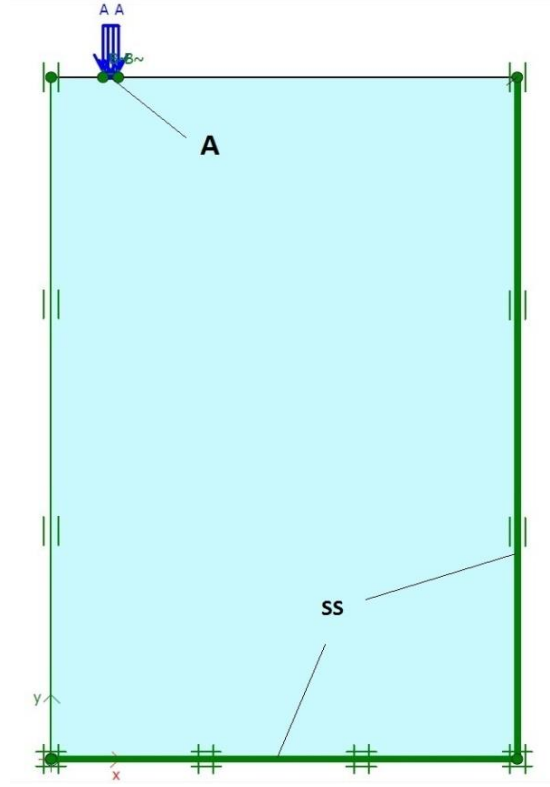
Plaka yükleme deneyi analizleri için iki farklı analiz serisi uygulanmıştır. Birinci seride zemin yüzeyine ön görülen deplasman (prescribed displacement) tanımlanarak zeminde oluşan yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir (Şekil 4.2a). İkinci seride ise zemin yüzeyine yayılı yük (Distributed Load) tanımlanmış ve yük kademeler halinde arttırılarak çevrimli yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir (Şekil 4.2b).

PLAXIS yazılımı ile bir arazi modellenirken dinamik yükler söz konusu ise, oluşturulan modelin geometrik sınırlarına dinamik yükten kaynaklanan dalgaların geri yansımaları engelleyecek sönümleyici sınırlar (Absorbent Boundaries) atanmalıdır. Bunun nedeni gerçek zemin ortamının yarı sonsuz kabul edilmesi ve gerçekte dinamik yüklerden oluşacak dalgaları yansıtacak bir sınır yüzeyinin bulunmamasıdır.

Gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde zemin, dinamik yükten kaynaklanacak dalgaları yansıtabilecek tank duvarlarıyla çevrilidir. Bu sebeple PLAXIS ile modelleme yapılırken GeoGauge'ın incelendiği analizlerde dinamik dalgaların yansımaları engelleyecek elemanların (SS) olması ve olmaması koşulları ayrı ayrı modellenerek incelenmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.2 PYD modeli üzerinde (a) birim deplasman ve (b) yayılı yük geometrileri

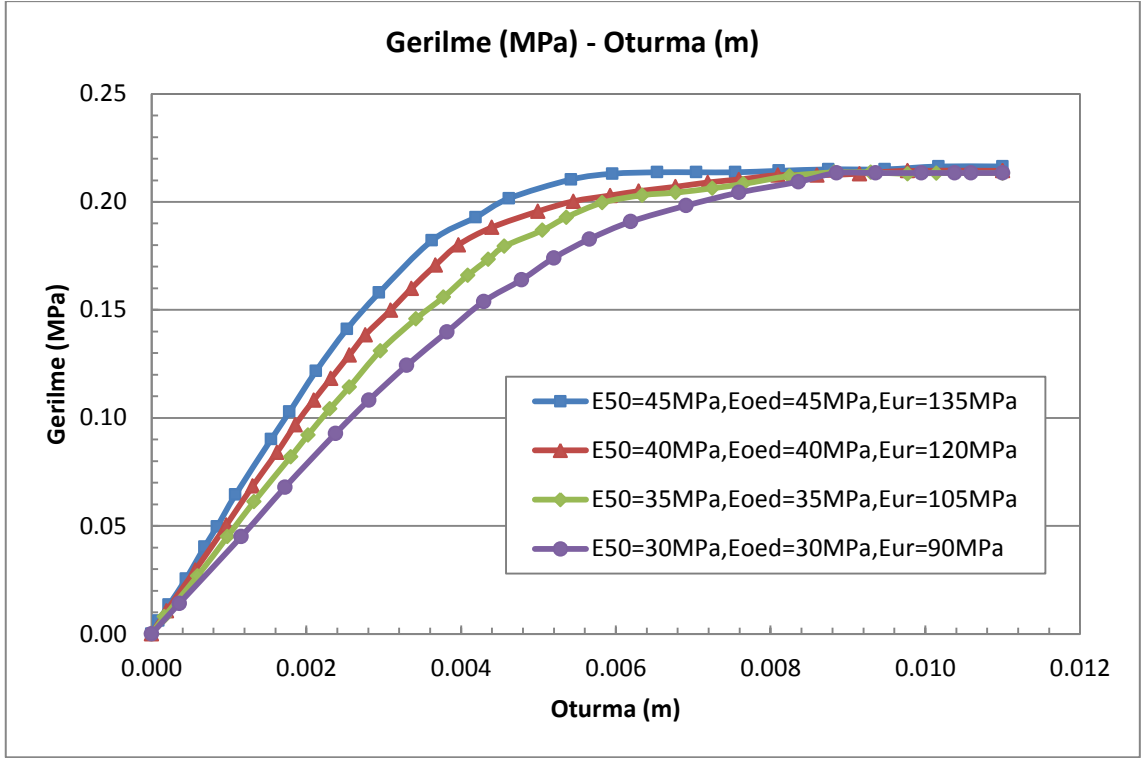


Şekil 4.3 GeoGauge geometrik model üzerinde dinamik ve statik kuvvet

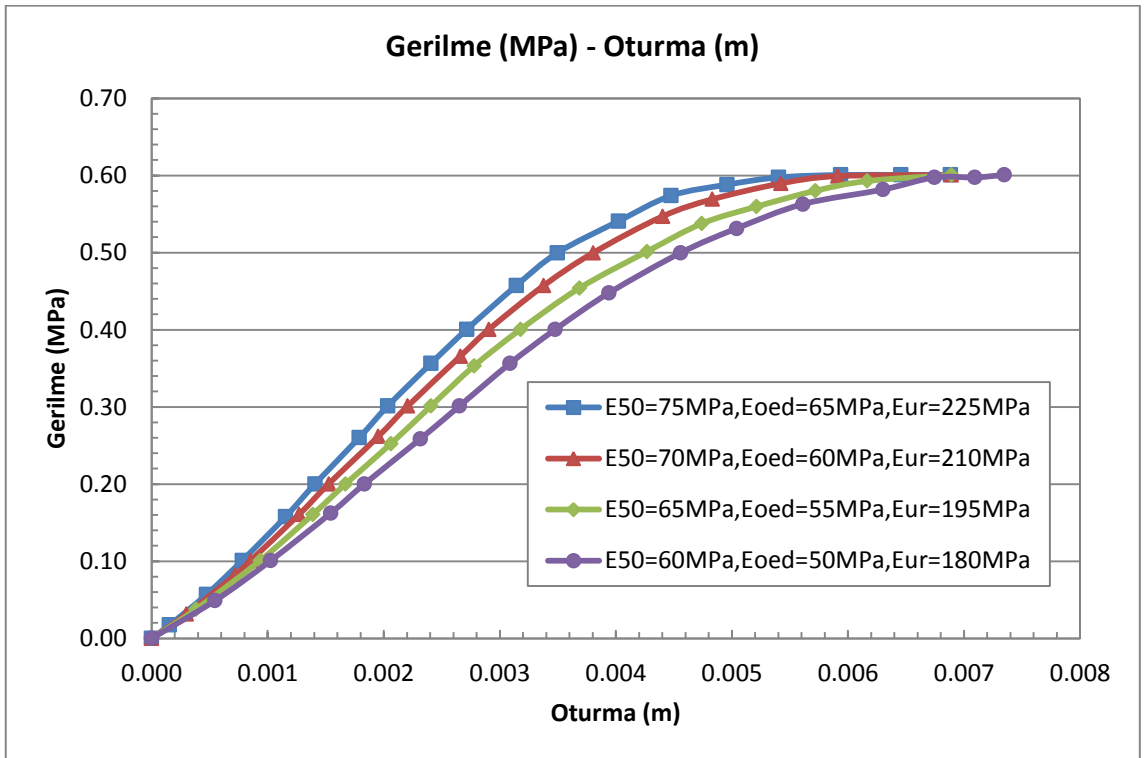
4.4.1 Plaka Yükleme Deneyi Birinci Seri Analizler

Birinci seri analizlerde ilk olarak geometrik modeli için Çizelge 4.2’de belirtilen model zemin parametreleri kullanılmış ve zemine plaka yarıçapına denk gelen 7.5 cm genişliğinde birim deplasman tanımlanmıştır (Şekil 4.2a). K_0 prosedüründe başlangıç fazı (Initial Phase) oluşturularak zeminin kendi ağırlığında oturması sağlanmıştır. Devamında oluşturulan faza her iki sıklıktaki model zemin için de negatif yönlü ve zemini tek seferde 10 cm oturtacak şekilde düşey birim deplasman atanmıştır. Hedeflenen deplasman miktarına ulaşılmadan zeminde göçme olması beklenmiştir. Analizler tamamlandığında zeminde yaklaşık 1 cm oturma olduğunda göçme meydana geldiği görülmüştür. Her iki sıklık için de Çizelge 4.1’de belirtilen modül değerleri ile zemin yüzeyinin orta noktasını belirtilen “A” noktası için farklı yük-deplasman eğriler elde edilmiştir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de her iki sıklık değeri için de elde edilen eğriler görülmektedir.

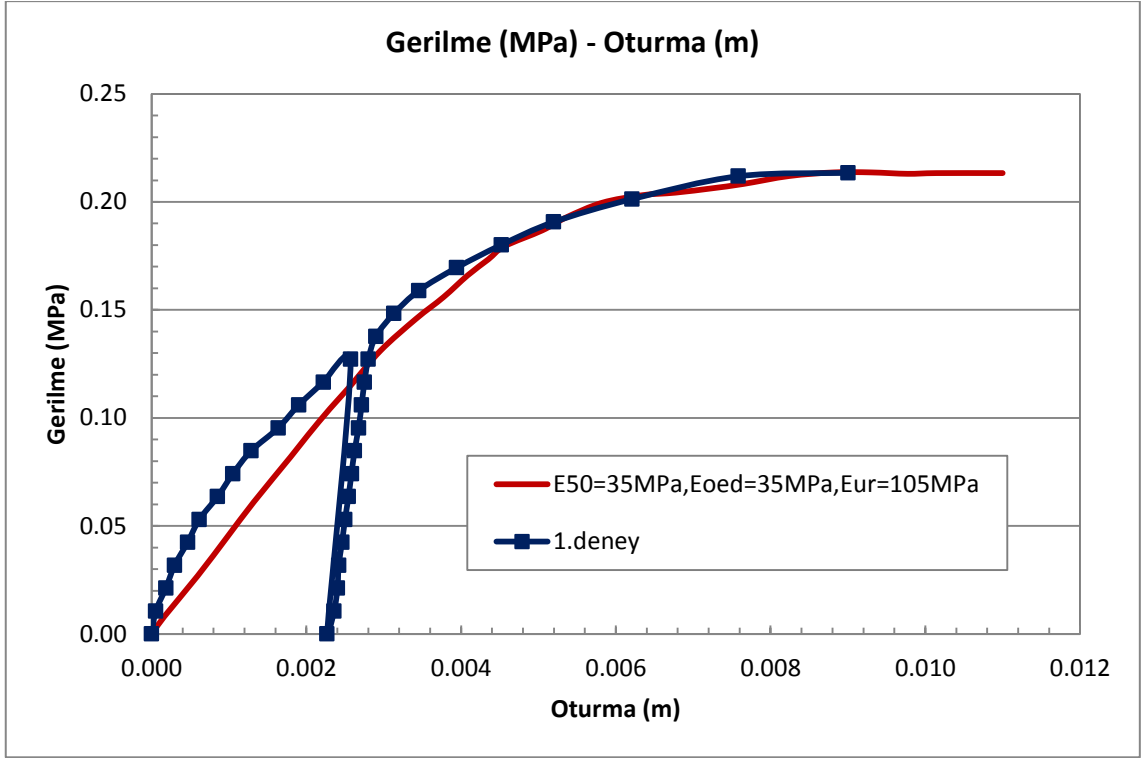
PLAXIS analizleri sonrasında elde edilen eğriler ile plaka yükleme deneyi eğrileri karşılaştırılmıştır. $Dr=50\%$ sıklıkta hazırlanmış zeminden elde edilmiş yük-deplasman eğrileri PLAXIS analizleri ile elde edilmiş $E_{50}=35000$ kPa modül değerine sahip eğri ile örtüşmektedir (Şekil 4.6). Bununla beraber $Dr=90\%$ sıklıkta hazırlanmış zeminden elde edilmiş yük-deplasman eğrisi PLAXIS ile elde edilmiş $E_{50}=70000$ kPa modül değerine sahip eğri ile örtüşmektedir (Şekil 4.7).



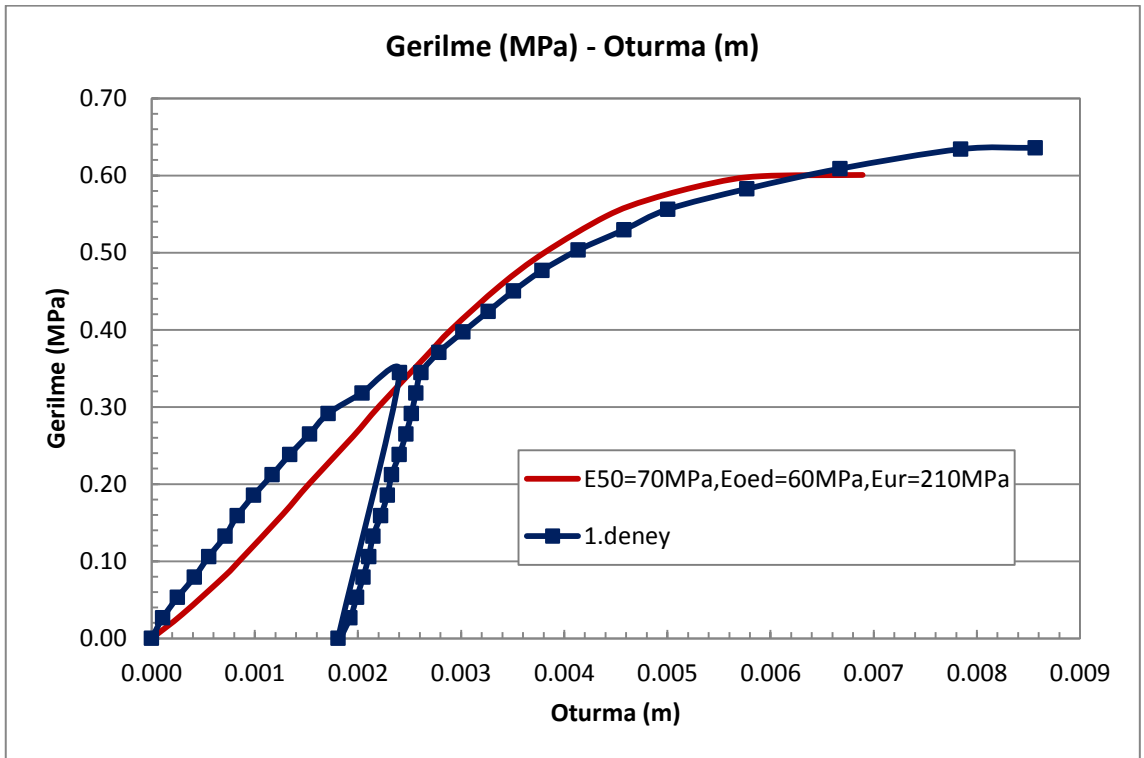
Şekil 4.4 Dr=%50, farklı elastisite modüllerine bağlı PLAXIS birim deplasman analizleri



Şekil 4.5 Dr=%90, farklı elastisite modüllerine bağlı PLAXIS birim deplasman analizleri



Şekil 4.6 $D_r=50\%$, PLAXIS birim deplasman analizi ve PYD karşılaştırılması

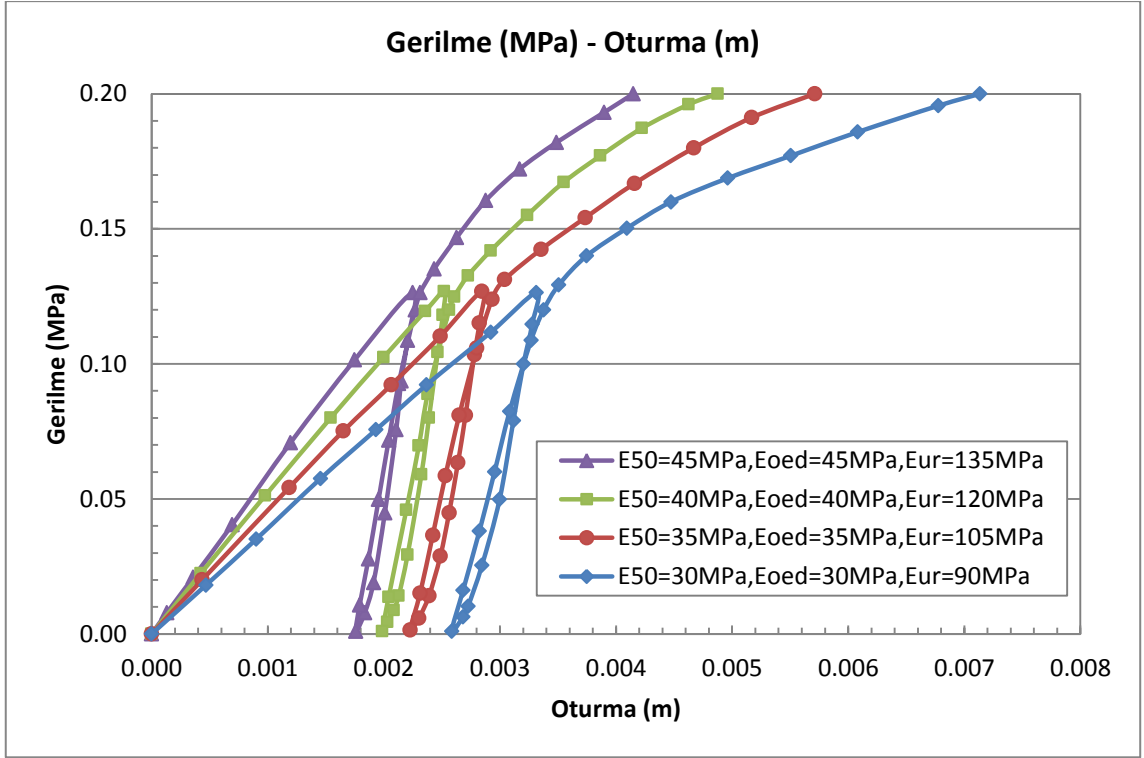


Şekil 4.7 $D_r=90\%$, PLAXIS birim deplasman analizi ve PYD karşılaştırılması

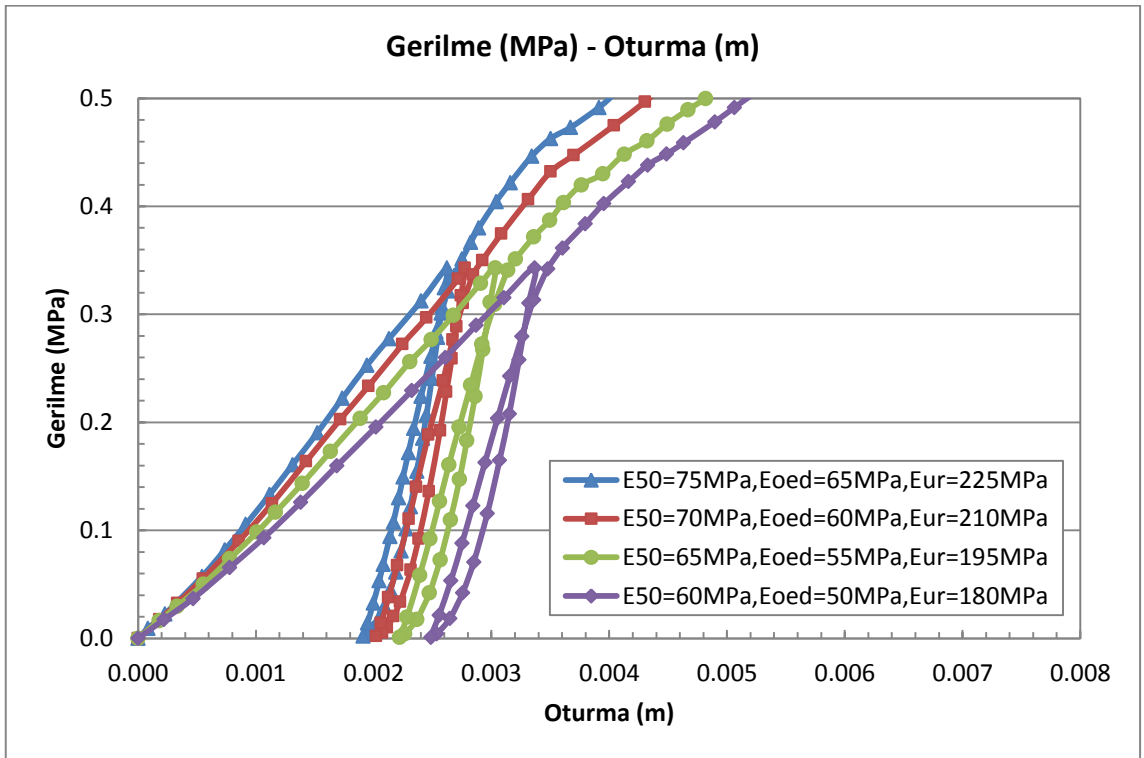
4.4.2 Plaka Yükleme Deneyi İkinci Seri Analizler

İkinci seri analizlerde ilk olarak geometrik modeli için Çizelge 4.2’de belirtilen model zemin parametreleri kullanılmış ve zemine plaka yarıçapına denk gelen 7.5 cm genişliğinde yayılı yük tanımlanmıştır (Şekil 4.2b). K_0 prosedüründe başlangıç fazı (Initial Phase) oluşturularak zeminin kendi ağırlığında oturması sağlanmıştır. Ardından oluşturulan faza negatif yönlü 1 kN/m^2 düşey gerilme atanmıştır. Tanımlanan yayılı yük ile yük çevrimi elde etmek için plaka yükleme deneyinde ulaşılan boşaltma yüküne kadar ($Dr=\%50$, 127 kN/m^2 , $Dr=\%90$, 344 kN/m^2) çıkılmıştır. Sonraki iki fazda ulaşılan yüklerden 1 kN/m^2 mertebesine inilmiş ve tekrar yüklenerek birer çevrim elde edilmiştir (Şekil 4.7, Şekil 4.8). Her iki sıklık için de Çizelge 4.1’de belirtilen modül değerleri sırasıyla kullanılarak zemin yüzeyinin orta noktasını belirtilen “A” noktası için farklı yük-deplasman eğriler elde edilmiştir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da her iki sıklık değeri için de elde edilen eğrileri görülmektedir.

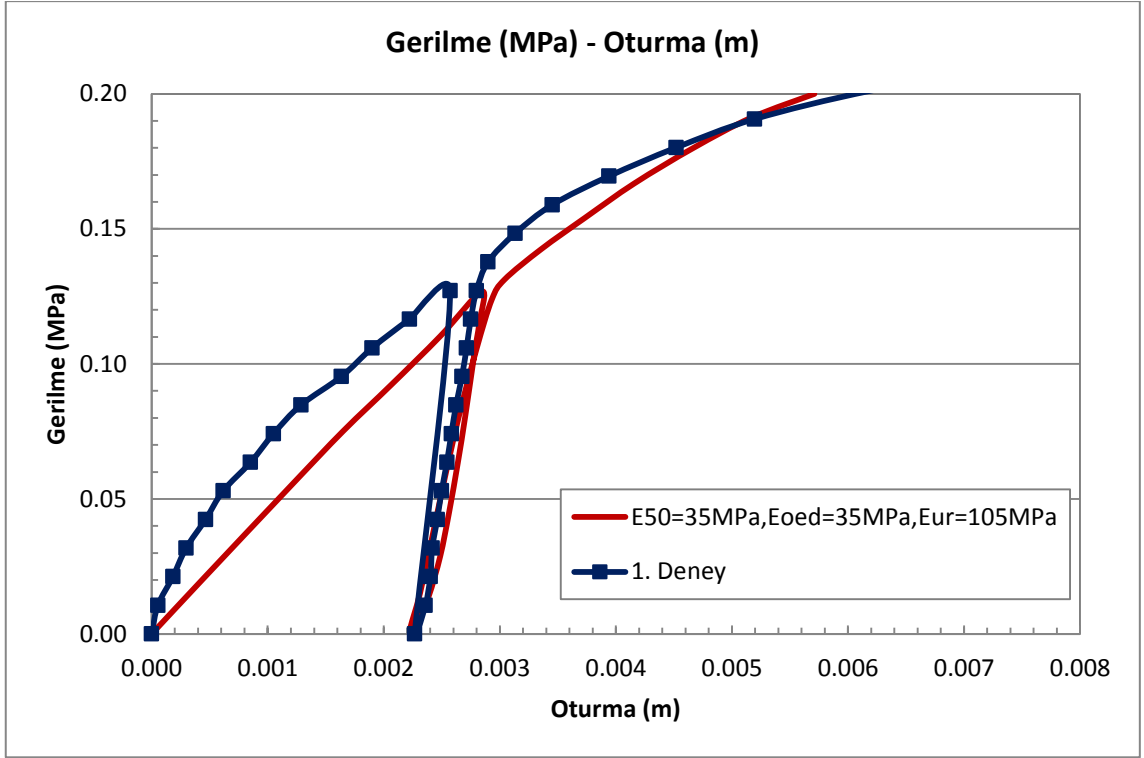
PLAXIS analizleri sonrasında elde edilen eğriler ile plaka yükleme deneyi eğrileri karşılaştırılmıştır. $Dr=\%50$ sıklıkta hazırlanmış zeminden elde edilmiş yük-deplasman eğrileri PLAXIS analizleri ile elde edilmiş $E_{50}=35000 \text{ kPa}$ modül değerine sahip eğri ile örtüşmektedir (Şekil 4.10). Bununla beraber $Dr=\%90$ sıklıkta hazırlanmış zeminden elde edilmiş yük-deplasman eğrisi PLAXIS ile elde edilmiş $E_{50}=70000 \text{ kPa}$ modül değerine sahip eğri ile örtüşmektedir (Şekil 4.11).



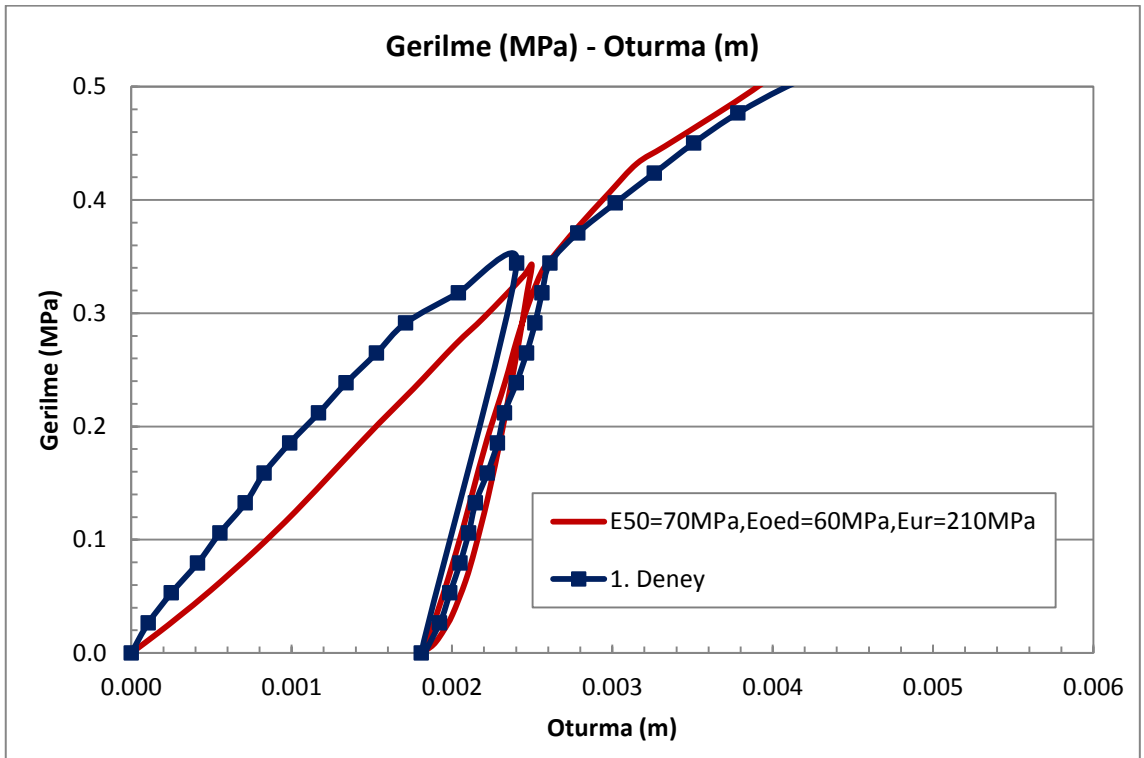
Şekil 4.8 $D_r=50\%$, farklı elastisite modüllerine bağlı PLAXIS yayılı yük analizleri



Şekil 4.9 $D_r=90\%$, farklı elastisite modüllerine bağlı PLAXIS yayılı yük analizleri



Şekil 4.10 $D_r=50\%$, PLAXIS yayılı yük analizi ve PYD karşılaştırılması



Şekil 4.11 $D_r=90\%$, PLAXIS yayılı yük analizi ve PYD karşılaştırılması

4.4.3 GeoGauge Analizleri

Birinci ve ikinci seri analizlerden elde edilen sonuçlar ışığında GeoGauge modellemesi için seçilen zemin modül değerleri $D_r=50$ 'de $E_{50}=35000$ kPa, $D_r=90$ 'da $E_{50}=70000$ kPa olan serileridir.

Tank geometrisi Bölüm 4.4'de bahsedilen şekilde hazırlanmıştır (Şekil 4.3). GeoGauge'in halka ayağının eksenel simetrik modeldeki kesitini elde etmek için 1.3 cm genişliğinde merkezden 4.4 cm uzaklıkta statik yayılı yük ve dinamik yük tanımlanmıştır. Tanımlanan statik yayılı yük cihazın ağırlığı (10 kgf) göz önünde bulundurularak 23.72 N/m^2 olarak hesaplanmıştır.

GeoGauge'in gerçekte uyguladığı 10 N değerinde dinamik yük [18] halka ayağa oranlanarak, modele 2.4243 kN/m^2 değerinde dinamik yük atanmıştır. Atanan dinamik yük maksimum ve minimum frekanslarda (100 Hz ve 196 Hz) ve 10'ar periyot olacak şekilde seçilmiştir. Bunun için 100 Hz'de 0.1 saniye ve 196 Hz için 0.05102 saniye sürecek dinamik zaman belirlenmiştir. Zemin tepkisi ilk periyotun ardından tutarlı duruma geldiği için ilk dalga değerlendirme dışında tutulmuştur.

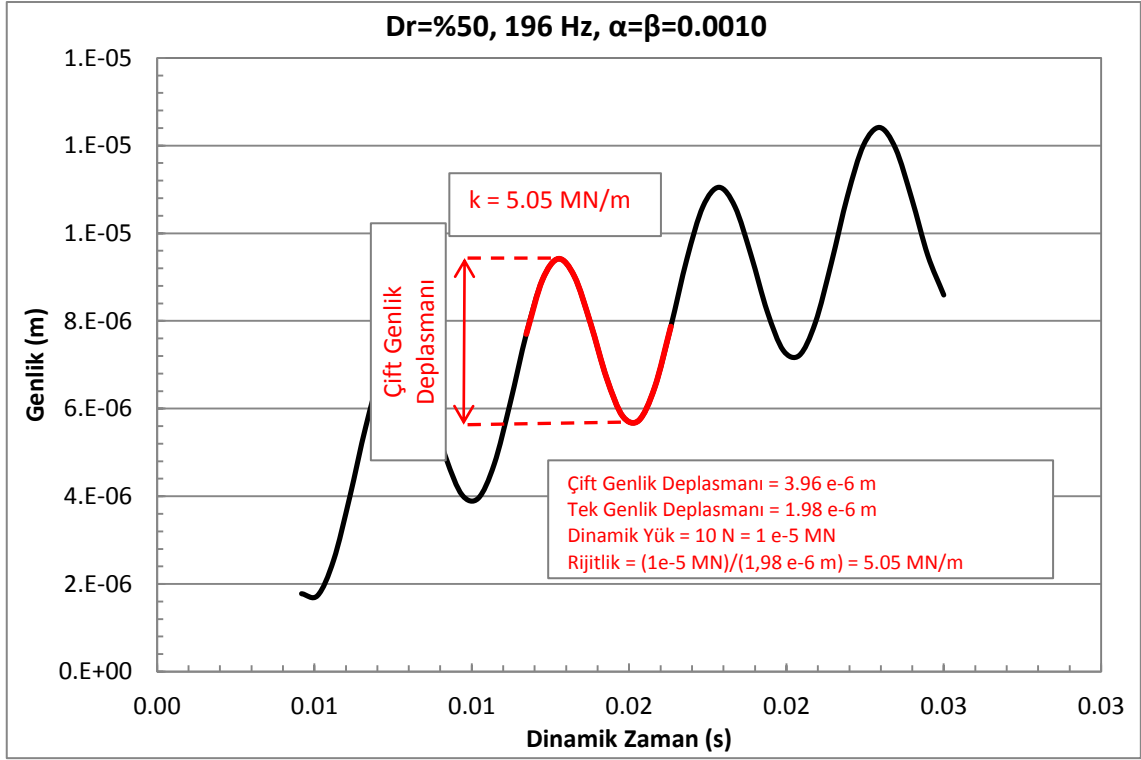
Bölüm 4.3 ve Bölüm 4.4'de belirtildiği gibi model geometrisine sönümleyici sınırlar (SS) ve zemine farklı sönümleme katsayıları (α , β) tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir.

100 Hz ve 196 Hz frekanslarda Rayleigh katsayılarının ve sönümleyici sınırın dalga genlikleri üzerindeki etkisi $D_r=50$ için Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de, $D_r=90$ için Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da karşılaştırılmıştır.

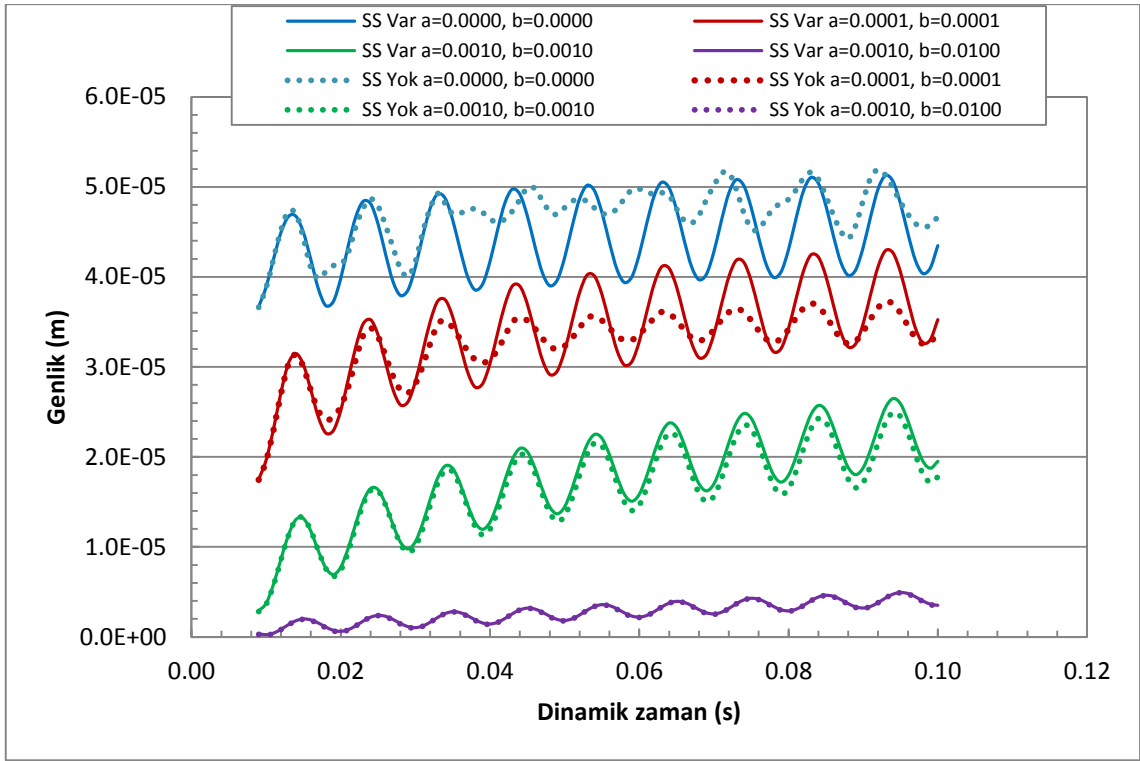
Dinamik zaman-genlik ilişkilerinden yararlanılarak, bir dalga serisini oluşturan her bir dalganın tek genlik deplasmanı belirlenmiştir. Bunun için tepe noktası ile çukur noktası arasında kalan mesafenin (çift genlik deplasmanı) yarısı alınmıştır. Cihazın uyguladığı dinamik yükün (10 N) tek genlik deplasmanına oranlanması ile her bir dalga için zemin rijitliği elde edilmiştir (Şekil 4.12). Bu rijitliklerin ortalaması alınarak her dalga serisi için ortalama rijitlik belirlenmiştir. Tanımlanan bu rijitlik hesabı 100 Hz ve 196 Hz frekanslarda yapılan analizler için ayrı ayrı yapılmıştır.

GeoGauge ile ölçülen rijitlik gerçekte 100 Hz ile 196 Hz arasında 25 farklı frekansta alınan ölçümlerin ortalamasıdır. Bu çalışmada, 100 Hz ve 196 Hz frekanslar için

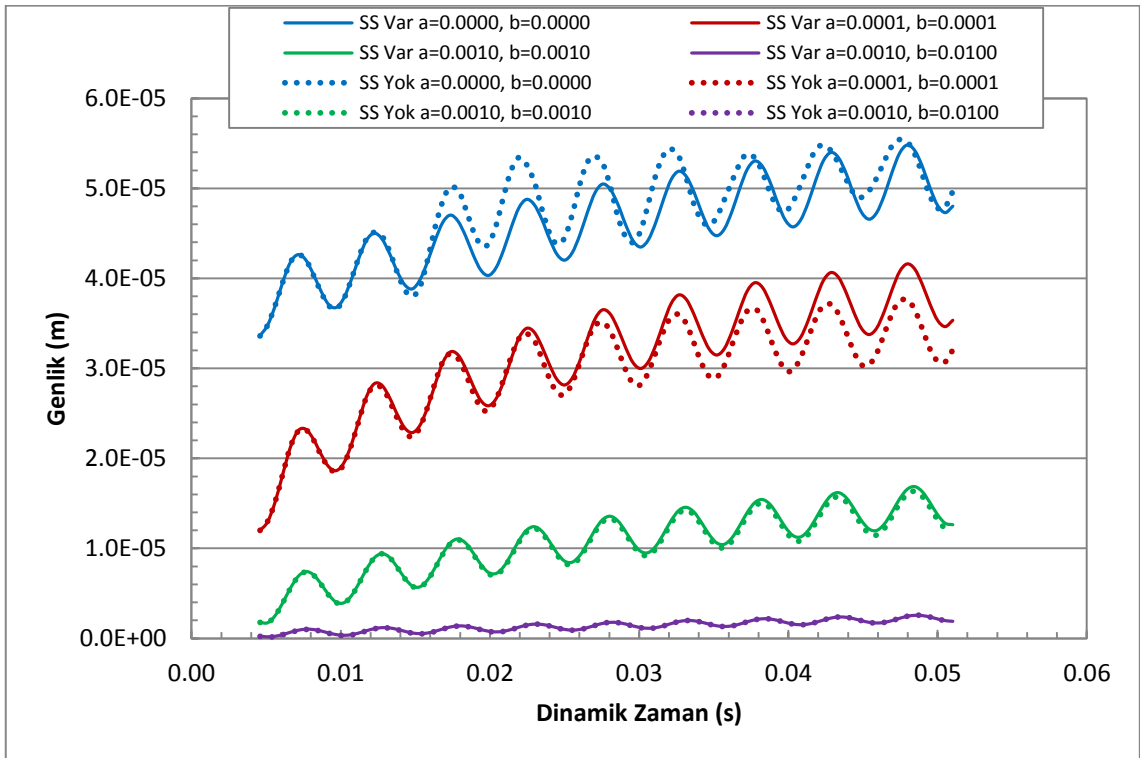
yukarıda belirtildiği şekilde elde edilen rijitliklerin ortalaması alınarak $D_r=50$ ve $D_r=90$ için zemin rijitliği belirlenmiştir (Çizelge 4.3, Çizelge 4.4)



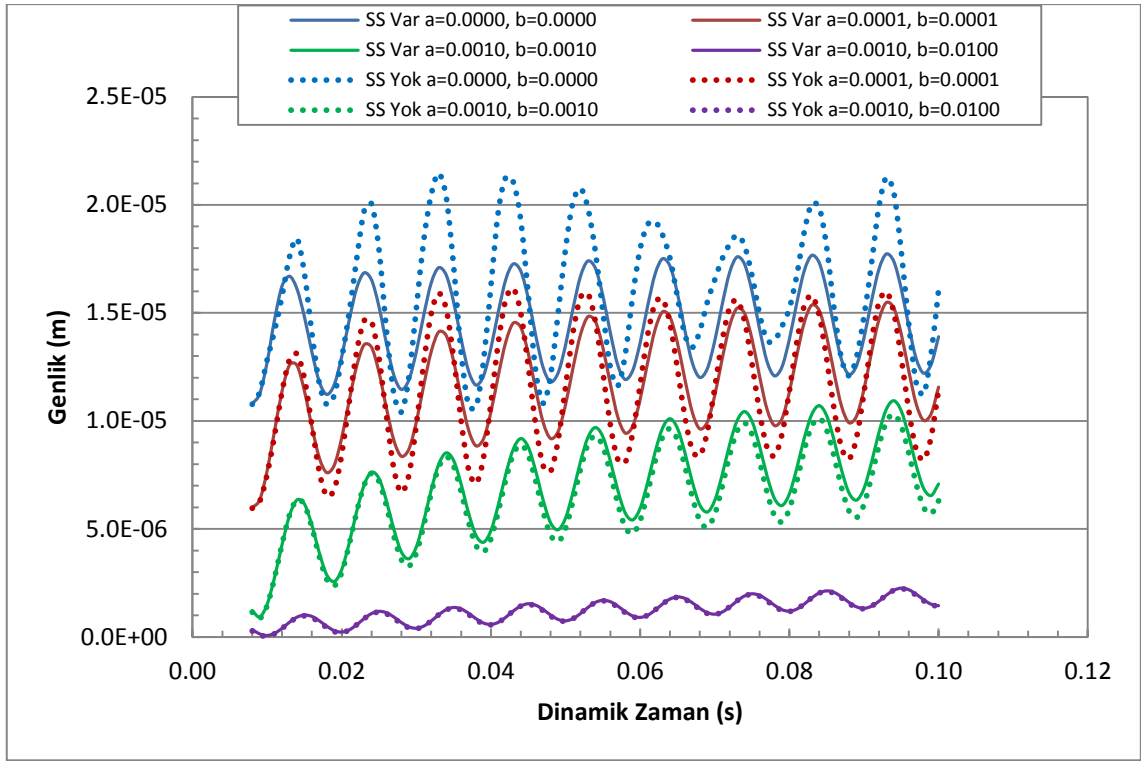
Şekil 4.12 Tek genlik deplasmanından rijitliğin hesaplanması



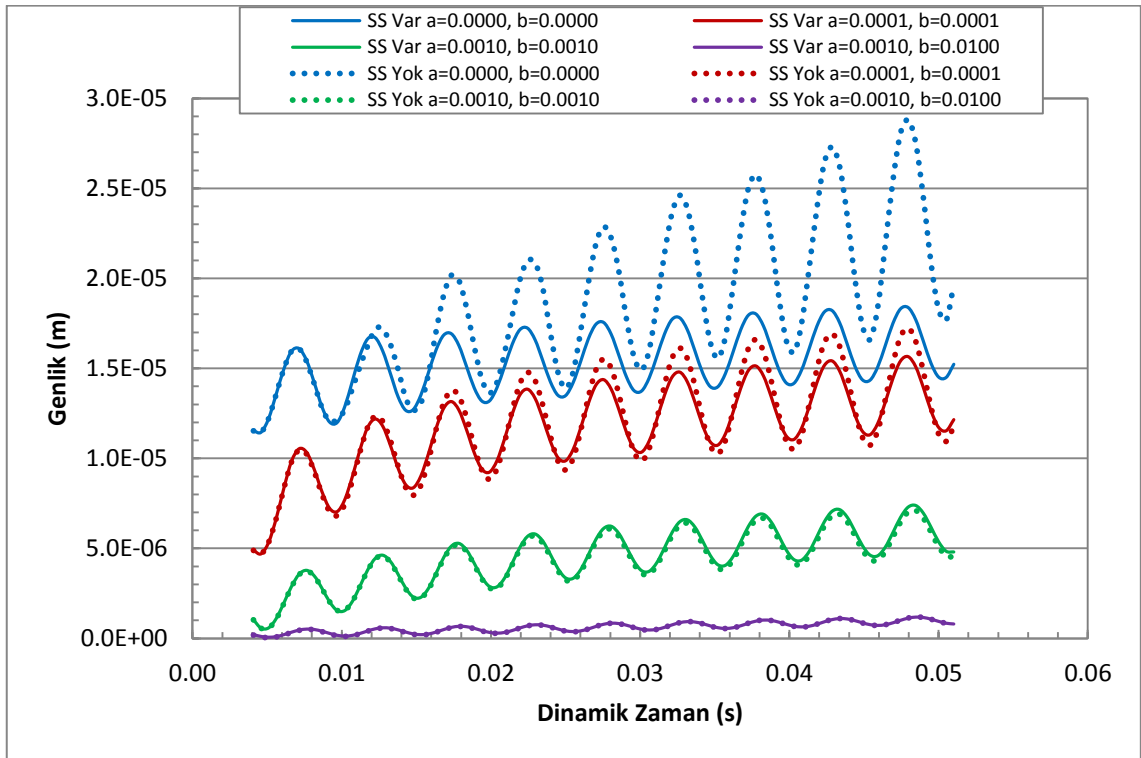
Şekil 4.13 $Dr=\%50$, 100 Hz için farklı Rayleigh katsayıları ile elde edilen dalga genlikleri ve sönümleyici sınır etkisinin karşılaştırılması



Şekil 4.14 $Dr=\%50$, 196 Hz için farklı Rayleigh katsayıları ile elde edilen dalga genlikleri ve sönümleyici sınır etkisinin karşılaştırılması



Şekil 4.15 Dr=%90, 100 Hz için farklı Rayleigh katsayıları ile elde edilen dalga genlikleri ve sönümleyici sınır etkisinin karşılaştırılması



Şekil 4.16 Dr=%90, 196 Hz için farklı Rayleigh katsayıları ile elde edilen dalga genlikleri ve Sönümleyici sınır etkisinin karşılaştırılması

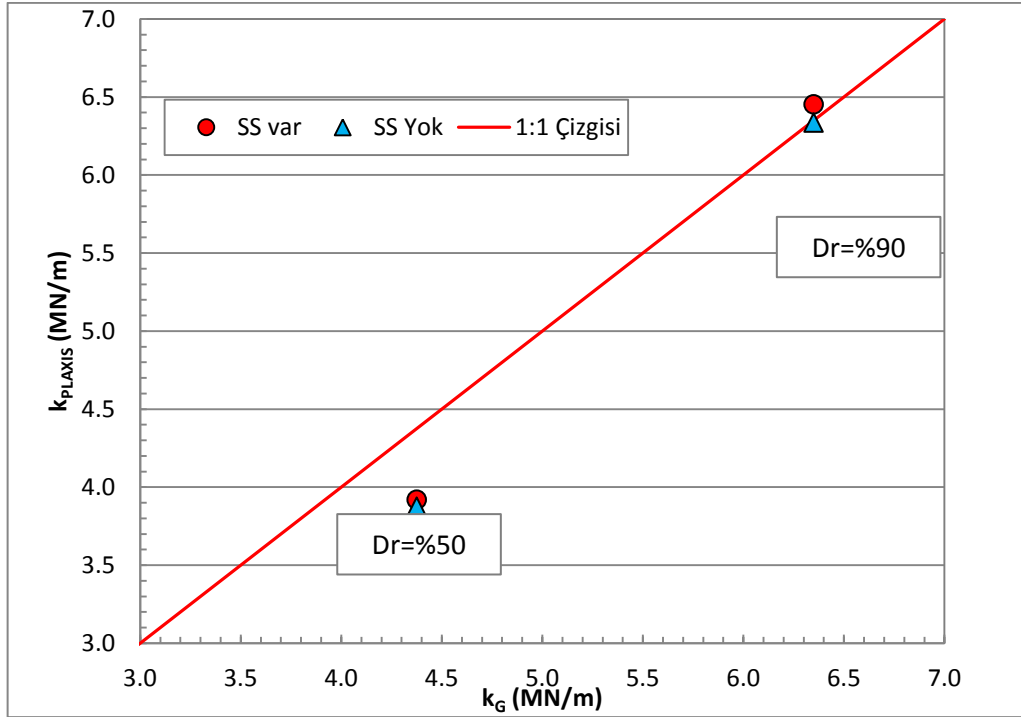
Çizelge 4.3 Dr=%50, 100 Hz ve 196 Hz dalga genliklerine göre rijitlik ve elastisite modülü ortalamaları değerleri

Rayleigh α - β	0.0000-0.0000		0.0001-0.0001		0.0010-0.0010		0.0010-0.0100	
Sınır Koşulları	SS Var	SS Yok	SS Var	SS Yok	SS Var	SS Yok	SS Var	SS Yok
100 Hz için k(MN/m)	1.88	-	2.04	4.82	2.77	2.74	14.42	14.21
196 Hz için k(MN/m)	2.92	2.78	3.26	3.17	5.07	5.01	31.51	29.92
Ortalama k _{PLAXIS} (MN/m)	2.40	2.78	2.65	4.00	3.92	3.88	22.97	22.07
Ortalama E _{PLAXIS} (MPa)	21.60	25.00	23.83	35.96	35.27	34.88	206.69	198.59

Çizelge 4.4 Dr=%90, 100 Hz ve 196 Hz dalga genliklerine göre rijitlik ve elastisite modülü ortalamaları değerleri

Rayleigh α - β	0.0000-0.0000		0.0001-0.0001		0.0010-0.0010		0.0010-0.0100	
Sınır Koşulları	SS Var	SS Yok	SS Var	SS Yok	SS Var	SS Yok	SS Var	SS Yok
100 Hz için k(MN/m)	3.65	2.52	3.76	2.64	4.76	4.50	25.12	25.44
196 Hz için k(MN/m)	5.17	2.85	5.07	3.82	8.14	8.17	52.61	51.64
Ortalama k _{PLAXIS} (MN/m)	4.41	2.68	4.42	3.23	6.45	6.34	38.86	38.54
Ortalama E _{PLAXIS} (MPa)	39.72	24.15	39.74	29.10	58.08	57.03	349.75	346.87

GeoGauge analiz sonuçları incelendiğinde Rayleigh α ve β sönümlenme katsayılarının genlikler üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu görülmüştür. Sönümleyici sınırların olduğu ve olmadığı koşullar incelenmiş ve α ve β katsayıları büyüdükçe genliklerin azaldığı ve sınır koşullarından daha az etkilendiği görülmüştür. Yapılan analizler içerisinde, Çizelge 3.4’de belirtilen GeoGauge rijitliklerine en yakın sonuçları veren Rayleigh katsayılarının $\alpha=\beta=0.0010$ olduğu görülmüştür (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 PLAXIS ile belirlenen rijitlikler ile GeoGauge rijitlikleri karşılaştırılması

Çizelge 4.5 GeoGauge ölçümleri ve PLAXIS analizlerinin karşılaştırılması

	Dr=%50	Dr=%90
GeoGauge Okumaları	k (MN/m)	k (MN/m)
1.Deney	4.54	6.64
Tekrar Deneyi	4.21	6.06
PLAXIS Analizleri ($\alpha=\beta=0.0010$)	k_{ort} (MN/m)	k_{ort} (MN/m)
SS Var	3.92	6.45
SS Yok	3.88	6.34

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, dolgu tabakalarının yerleşim uniformluğunun kontrolü ve rijitliğin değerlendirilmesi amacı ile Humboldt GeoGauge cihazının kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu amaç için, Yıldız Teknik Üniversitesi Geoteknik Anabilim Dalı Laboratuvarı ve Yapı Anabilim Dalı Laboratuvarı'ndaki olanaklar kullanılarak dolgu malzemesi olarak kullanılan kötü derecelenmiş orta kum ile kuru koşulda bir dizi model deney yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda edinilen deneyim aşağıda özet olarak verilmiş ve değerlendirilmiştir:

- GeoGauge rijitlik ölçümü ile yerleşim sıklığının ilişkilendirilmesine yönelik deneyler yapılmıştır. Bu amaç için, gevşek yerleşimli ($Dr \approx \%40$) olarak hazırlanan model zemin ortamı titreşim/darbe uygulanarak beş adımda sıkı yerleşimli ($Dr > \%70$) duruma getirilmiş ve her bir adımda zemin yüzeyinden GeoGauge ile rijitlik ölçümü alınmıştır. GeoGauge rijitlik ölçümü ile yerleşim sıklığı arasında ($Dr \geq \%40$ için) rijitlik,

$$k_G \text{ (MN/m)} = 5.51Dr + 1.4143$$

şeklinde ifade edilen doğrusal bir ilişki elde edilmiştir (Şekil 3.7).

- GeoGauge rijitlik ölçümü ile plaka yükleme deneyinden elde edilen rijitlikler arasındaki ilişkinin belirlenmesine yönelik deneyler yapılmıştır. Bu amaç için, orta sıkı ($Dr = \%50$) ve çok sıkı ($Dr = \%90$) olmak üzere iki farklı yerleşim sıklığında hazırlanan model zemin ortamlarının yüzeylerinden GeoGauge ile rijitlik ölçümü alınmış ve ardından plaka yükleme deneyi yapılmıştır. GeoGauge rijitlik ölçümleri ile yerleşim sıklığı arasındaki ilişkinin yukarıda verilen eşitlik ile tutarlı olduğu görülmüştür.

GeoGauge rijitlik değeri (k_G), zeminin Poisson Oranı'na ($\nu=0.3$) bağlı olarak " $k_G=E_G/9$ " ilişkisini vermektedir. GeoGauge modülünün (E_G) plaka yükleme deneyinden elde edilen boşaltma modülüne (E_U) yakın değerler verdiği ($E_G/E_U \approx 0.93$) görülmüştür. GeoGauge modülü ile ortalama sekant modülü (E_{50}) arasındaki ilişki beklenildiği gibi yerleşim sıklığına bağlı olarak değişmektedir; orta sıkı kum için $E_G/E_{50} \approx 9.71$ ve çok sıkı kum için $E_G/E_{50} \approx 4.03$ ilişkileri elde edilmiştir.

- PLAXIS ile gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi çalışmalarında ilk önce plaka yükleme deneyleri modellenerek, laboratuvar deneylerinde gözlemlenen zemin tepkilerine en yakın sonuçların elde edileceği elastisite modülleri belirlenmiştir ($Dr=\%50$ için 35 MPa, $Dr=\%90$ için 70 MPa).

Analiz çalışmalarının ikinci aşamasında ise plaka yükleme deneyleri öncesinde yapılan GeoGauge ölçüm deneyleri modellenmiştir. Belirlenen bu model zeminler üzerinde sönümlenme katsayıları (Rayleigh α, β) ve sönümleyici sınırların (SS) malzeme tepkisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Modele atanan dinamik yükten elde edilen rijitlik parametreleri (k_{PLAXIS}) ile GeoGauge rijitlikleri (k_G) karşılaştırıldığında zemin tepkisine en yakın sonuçların $\alpha=\beta=0.0010$ olarak atandığı analizlerden alındığı görülmüştür ($Dr=\%50$ için $k_G = 1.15k_{PLAXIS}$; $Dr=\%90$ için $k_G = 1.02k_{PLAXIS}$). Ayrıca Rayleigh katsayıları arttıkça sönümleyici sınır varlığının zemin tepkisi üzerindeki etkisinin göz ardı edilebilir olduğu görülmüştür.

Yukarıda sonuçları ile birlikte özetlenen model deneyler GeoGauge rijitlik ölçümünü anlamlı kılmak amacı ile yapılan kalibrasyon deneyleri olarak tanımlanabilir. Bu zeminin bir arazi uygulamasında dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda, serilen ve sıkıştırılan tabakaların yerleşim sıklığı GeoGauge kullanılarak ve model deneyler sonucunda edinilen deneyimler göz önünde bulundurularak kontrol edilebilir. GeoGauge rijitlik ölçümünün prosedürü standart ile belirlenmiş ve sıkça başvuru alan bir arazi deneyinden elde edilen rijitlikler ile ilişkilendirilmesi ise alınan ölçümü daha anlamlı ve değerlendirilebilir kılacaktır. Ancak, elde edilen ilişkilerin model zemin ortamını oluşturan zemin için (kötü derecelenmiş orta kum) ve kuru koşulda geçerli

olduğunun unutulmaması gereklidir. Söz konusu kalibrasyon deneyleri dolgu malzemesi olarak kullanılması düşünölen zeminler için de tekrarlanmalı ve yukarıda sözü edilen ilişkiler bu zeminler için elde edilmelidir. Bununla beraber, literatürde yer alan bir çok çalışmada olduğı gibi, kalibrasyon deneylerinin arazi ortamında da yapılarak elde edilecek sonuçların laboratuvar model deneylerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Humboldt Mfg. Co., (2007) "GeoGauge User Guide Version 4.1", 7300 West Agatite Avenue Norridge, Illinois 60706 U.S.A.
- [2] ASTM D 6758 – 08 (2008). "Standard Test Method for Measuring Stiffness and Apparent Modulus of Soil and Soil-Aggregate In-Place by Electro-Mechanical Method 1", United States.
- [3] Atkinson J. (2007). The Mechanics of Soils and Foundations Second Edition, Taylor&Francis Group, London-New York
- [4] Lenke, L. R.,McKeen, R. G., andGrush, M. P., 2003, "Laboratory Evaluation of The GeoGauge For Compaction Control," *Transportation Research Record 1849*, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- [5] Önalp, A. (1983-1984). İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi 1-2, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- [6] Sawangsuriya A, Edil T B and Bosscher P J (2002). "Laboratory Evaluation of the Soil Stiffness Gauge (SSG)."Transportation Research Board 81th Annual Meeting, Washington, D.C.
- [7] Das B. M. (2006) Principles of Geotechnical Engineering Fifth Edition, California State University, Sacramento, Australia.
- [8] Uzuner B. A., (2007). Temel Zemin Mekaniği, Derya Kitapevi, Trabzon.
- [9] Doğan K. (2004). Plaka Yükleme Deneyi Uygulamaları ve Analizleri, Selçuk Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü,Konya.
- [10] Uzuner B. A., (1998). Plaka Yükleme Deneyi Üzerine, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- [11] ASTM D1195/D1195M-09 (2009). "Standard Test Method for Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements", United States.

- [12] Celep Z., Kumbasar N. (2005). Betonarme Yapılar, Beta Yayın Dağıtım A.Ş, İstanbul.
- [13] Nashaat W. (2013) "An Experimental Study on the Effect of Foundation Depth, Size and Shape on Subgrade Reaction of Cohesionless Soil" Faculty of Engineering, Sinai University, El Arish, Egypt.
- [14] Nelson C.R., Sondag M. (1999). Comparison of the Humboldt Geogauge with in-Place Quasi-Static Plate Load Tests, CNA Consulting Engineers Report, Minneapolis, MN.
- [15] Fiedler S., Main M., DiMillio A. (2000). "In-Place Stiffness and Modulus Measurements." Performance Confirmation of Constructed Geotechnical Facilities.
- [16] Distribution & Pipeline Technology Division Gas Technology Institute (2005). Evaluation of Soil Compaction Measuring Devices, Illinois.
- [17] Seyman E. (2003). Laboratory Evaluation of in-Situ Tests As Potential Quality Control/Quality Assurance Tools, MSc. Thesis, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College The Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana.
- [18] Sawangsuriya A, Edil T B and Bosscher P J (2003). "Relationship Between Soil Stiffness Gauge Modulus and Other Test Moduli for Granular Soils" Transportation Research Record.
- [19] Özaydın K. (2008). Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [20] Keskin M.Salih (2009). Güçlendirilmiş Kumlu Şevlere Oturan Yüzeysel Temellerin Deneysel ve Teorik Analizi Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [21] "PLAXIS 2D Reference Manual 2012"

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Balbora MERT
Doğum Tarihi ve Yeri :19.02.1984 İstanbul
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :balboramert@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Geoteknik	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Trakya Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	Etiler Lisesi	2002