

**SUYA DOYGUN VE DOYGUN OLMAYAN
KUM ZEMİNLERİN DİNAMİK YÜKLER
ALTINDA DAVRANIŞLARININ
BELİRLENMESİ**

Mehmet İnanç ONUR
Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Kasım-2015

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 020509**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Mehmet İnanç ONUR'un "Suya Doygun ve Doygun Olmayan Kum Zeminlerin Dinamik Yükler Altında Davranışlarının Belirlenmesi" başlıklı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Doktora Tezi 24.11.2015 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	<u>Adı Soyadı</u>	İmza
Üye (Tez Danışmanı) :	Prof.Dr. MUSTAFA TUNCAN
Üye :	Prof.Dr. AYDIN DOĞAN
Üye :	Doç.Dr. D. VOLKAN OKUR
Üye :	Doç.Dr. NAZİLE URAL
Üye :	Yard.Doç.Dr. SERKAN KIVRAK

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

SUYA DOYGUN VE DOYGUN OLMAYAN KUM ZEMİNLERİN DİNAMİK YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

M. İnanç ONUR

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mustafa TUNCAN

2015, 113 Sayfa

Bu çalışmada; dinamik yükler altında suya doygun ve doygun olmayan kum zeminlerde meydana gelen davranış değişimi genel bir bakış açısıyla incelenmiş ve özellikle doygunluk, rölatif sıkılık ve çevre gerilmesinin kum zeminlerin dinamik parametreleri üzerindeki etkileri rezonant kolon deney sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Deneylemlerin sonuçları analitik yaklaşımlar ile birlikte sunulmuştur. Zeminlerin dinamik yükleme altındaki davranışlarının belirlenmesi geoteknik mühendisliğinin önemli problemlerinden birisidir. Deneysel çalışmalar kapsamında, Toyoura kumu kullanılarak hazırlanan zemin numunelerinin kayma dalgası hızı ve kayma modülü gibi zemin dinamik parametreleri belirlenmiştir. Değerlendirme kısmında ise deneysel sonuçlar Matlab programı kullanılarak irdelenmiştir. Kayma modülü ve kayma dalgası hızını % 90 uygunluk ile tahmin eden alternatif eşitlikler geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dinamik kayma modülü, kayma dalgası hızı, rezonant kolon deneyi, Toyoura kumu.

ABSTRACT

PhD Dissertation

DETERMINATION OF THE BEHAVIOR OF SATURATED AND UNSATURATED SAND SOILS UNDER DYNAMIC LOADS

M. Inanc ONUR

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Civil Engineering Program**

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa TUNCAN

2015, 113 pages

In this study, a general aspect of behavior of saturated and unsaturated sand soils under dynamic loads is examined and especially effects of saturation, relative density and confining pressure on the dynamic properties of sand soils is determined by using resonant column test. Test results are presented by using analytical approaches. Determination of the behavior of soils under dynamic loading is one of the important problems of geotechnical engineering. In the scope of the experimental studies; dynamic parameters such as shear wave velocity and shear modulus of reconstituted Toyoura sand samples are determined. Experimental results are discussed by using Matlab program in the evaluation part of the study. Alternative equations are derived with 90 % relevance for estimation of shear modulus and shear wave velocity values.

Keywords: Dynamic shear modulus, shear wave velocity, resonant column test, Toyoura sand.

TEŞEKKÜR

Öğrencisi olduğum günden beri engin bilgisi ile desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Mustafa TUNCAN'a, tecrübelerinden sıkça yararlandığım hocam Prof. Dr. Ahmet TUNCAN'a ve başta Doç. Dr. Volkan OKUR olmak üzere tüm doktora tez jüri üyelerine teşekkür ederim.

Tez çalışmaları ve projesi kapsamında gerekli ekipman ve malzeme desteği için Anadolu Üniversitesi Rektörlüğüne ve Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığına teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca, eğitim-öğretim hayatım boyunca üzerimde emeği olan tüm hocalarıma, hayat kaynağım eşim ve beni yetiştirip bu günlere ulaşmamı sağlayan aileme teşekkür ederim.

M. İnanç ONUR

Kasım 2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Konu Üzerine Daha Önce Yapılan Çalışmalar.....	2
2. DİNAMİK ETKİLER ALTINDA ZEMİNLERİN ÖZELİKLERİ	28
2.1. Zeminlere Etkiyen Dinamik Yükler	28
2.2. Depremler ve Deprem Karakteristikleri	28
2.3. Dinamik Etkiler Altında Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi	29
2.4. Dinamik Etkiler Altında Zeminlerin Davranışı.....	34
2.5. Dinamik Etkiler Altında Zeminlerde Meydana Gelen Deformasyonlar	35
3. ZEMİNLERİN DİNAMİK ETKİLER ALTINDA DAVRANIŞI	36
3.1. Kayma Modülü.....	36
3.2. Sönüm Oranı	42
3.3. Kayma Dalgası Hızı	44
3.4. Basınç Dalgası Hızı	49
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	52
4.1. Malzeme Özellikleri	52
4.2. Deney Sistemi	54
4.3. Kalibrasyon Deneyleri.....	57
4.4. Deney Aşamaları	63
4.5. Deney Verilerinin İrdelenmesi	65

4.6. Matlab Programı.....	66
4.7. Regresyon Analizi	66
4.8. Yeni Denklem Üretilmesi.....	80
4.9. Davranış Eğiliminin Belirlenmesi	81
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR	96
Ek 1. Kodlar.....	104

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesi [14]	30
2.2. Laboratuvar ve arazi deneyleri uygulama şeması [64]	31
2.3. Laboratuvar deneylerinde ölçülebilen parametreler [64]	33
3.1. Histerisis ilmeği ve omurga eğrisi [41]	37
3.2. Yeni nesil kayma modülü grafikleri [7]	41
3.3. Kayma modülü ve sönüm oranı ilişkisi [40]	44
3.4. S dalgası hareketi [69]	45
3.5. Kayma dalgası hızı değişim grafiği [64]	47
3.6. Yeni nesil kayma dalgası hızı grafikleri [7]	49
3.7. P dalgası hareketi [69]	50
3.8. Basınç dalgası hızı değişim grafiği [64]	51
4.1. Toyoura kumu tane çapı dağılımı	53
4.2. Rezonant kolon cihazı	54
4.3. Cihazın sürücü sistemi	55
4.4. Burulmalı uyarım deneyi örneği	56
4.5. Eğilme uyarım deneyi örneği	56
4.6. Deney I-A sonuçları	58
4.7. Deney I-B sonuçları	59
4.8. Deney I-C sonuçları	59
4.9. Dinamik üç eksenli deneyi sinüzoidal yükleme	60
4.10. Örnek histerisis ilmeği grafiği	61
4.11. Bender eleman deneyi uygulaması	62
4.12. Bender eleman deneyinde kayma dalgası hızı ölçümü	62
4.13. Kayma modülü, efektif çevre gerilmesi ve boşluk oranı ilişkisi	69
4.14. Kayma modülü, efektif çevre gerilmesi ve doyunluk ilişkisi	70
4.15. Kayma modülü, doyunluk ve rölatif sıkılık ilişkisi	71
4.16. Kayma dalgası hızı, efektif çevre gerilmesi ve boşluk oranı ilişkisi	73
4.17. Kayma dalgası hızı, efektif çevre gerilmesi ve doyunluk ilişkisi	74
4.18. Kayma dalgası hızı, doyunluk ve rölatif sıkılık ilişkisi	75
4.19. Basınç dalgası hızı, efektif çevre gerilmesi ve boşluk oranı ilişkisi	77

4.20. Basınç dalgası hızı, efektif çevre gerilmesi ve doyunluk ilişkisi	78
4.21. Basınç dalgası hızı, doyunluk rölatif sıklık ilişkisi	79
4.22. Kayma modülü ve doyunluk ilişkisi (Dr:% 40)	82
4.23. Kayma modülü ve doyunluk ilişkisi (Dr:% 60)	83
4.24. Kayma modülü ve doyunluk ilişkisi (Dr:% 80)	83
4.25. Kayma modülü ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 40)	84
4.26. Kayma modülü ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 60)	84
4.27. Kayma modülü ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 100)	85
4.28. Kayma modülü davranış eğilimi	85
4.29. Kayma dalgası hızı ve doyunluk derecesi ilişkisi (Dr:% 40)	86
4.30. Kayma dalgası hızı ve doyunluk derecesi ilişkisi (Dr:% 60)	87
4.31. Kayma dalgası hızı ve doyunluk derecesi ilişkisi (Dr:% 80)	87
4.32. Kayma dalgası hızı ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 40)	88
4.33. Kayma dalgası hızı ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 60)	88
4.34. Kayma dalgası hızı ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 100)	89
4.35. Kayma dalgası davranış eğilimi	89
4.36. Basınç dalgası hızı ve doyunluk derecesi ilişkisi (Dr: % 40)	90
4.37. Basınç dalgası hızı ve doyunluk ilişkisi (Dr: % 60)	91
4.38. Basınç dalgası hızı ve doyunluk ilişkisi (Dr: % 80)	91
4.39. Basınç dalgası hızı ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 40)	92
4.40. Basınç dalgası hızı ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 60)	92
4.41. Basınç dalgası hızı ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 100)	93
4.42. Basınç dalgası davranış eğilimi	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. Laboratuvar deneyleri ve göreceli performans değerlendirmesi [64]	34
3.1. Çeşitli zeminler için kayma modülü değerleri [66]	38
3.2. Kayma modülü hesabı için eşitlikler [67]	39
3.3. Kayma modülü için doyumluk derecesi içeren eşitlikler [4]	40
3.4. Kohezyonlu zeminler için kayma modülü eşitlikleri [44].....	42
3.5. Zeminlerin ortalama kayma dalgası hızları [64]	47
3.6. Kayma dalgası hızı için eşitlikler [4]	48
3.7. Zeminlerin ortalama basınç dalgası hızları [64].....	50
4.1. Toyoura kumu genel özellikleri	52
4.2. Karşılaştırma deneyleri detayları	58
4.3. Dinamik üç eksenli deneyleri detayları.....	60
4.4. Dinamik üç eksenli sonuçları karşılaştırması.....	61
4.5. Bender eleman sonuçları karşılaştırması.....	63
4.6. Deney parametreleri	64
4.7. Seçilen deney parametreleri	82

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

G_0	: Başlangıç Kayma modülü
G_{max}	: Maksimum kayma modülü
G_{sek}	: Sekant kayma modülü
V_s	: Kayma dalgası hızı
V_p	: Basınç dalgası hızı
D	: Sönüm oranı
e	: Boşluk oranı
σ'	: Efektif gerilme
D_r	: Rölatif Sıklık
S	: Doygunluk derecesi
γ	: Dinamik birim kayma genliği
PI	: Plastisite indisi
E	: Elastisite modülü
μ	: Poisson oranı
D_{50}	: Ortalama tane çapı
D_{10}	: Efektif çap
C_u	: Üniformluk katsayısı
C_c	: Eğrisellik katsayısı
ρ_{maks}	: Maksimum Yoğunluk
ρ_{min}	: Minimum Yoğunluk
λ	: Lamé sabiti

Alt ve Üst İndisler

0	: Başlangıç
max	: Maksimum
min	: Minimum
sek	: Sekant
s	: Kayma
p	: Basınç
'	: Efektif
r	: Rölatif

1. GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı; geoteknik deprem mühendisliği içerisinde önemli bir yere sahip olan dinamik etkiler altında zemin parametrelerinin değişimi konusuna genel bir bakış sağlamaktır. Özellikle kayma modülü, kayma dalgası hızı ve basınç dalgası hızı gibi zemin dinamik parametreleri üzerinde literatürde sıkça sözü edilen doygunluk, çevre basıncı, rölatif sıklık gibi zemin özelliklerinin etkilerini deneysel çalışmalar ile birlikte sunmaktır. Ayrıca deneysel sonuçları analitik yaklaşımlarla irdeleyerek alternatif eşitlikleri literatüre kazandırmaktır.

Geoteknik deprem mühendisliği genel olarak titreşim teorisi, dalga enerjisinin zeminler içerisinde yayılışı, tekrarlı yükler altında zeminlerin gösterdiği davranış, dinamik yüklemeye maruz kalan temellerin davranışı ve diğer zemin yapılarının dinamik yükler altında davranışı konularını kapsamaktadır.

Dinamik etkilerin zeminlerde meydana getirebileceği deformasyon, taşıma gücü, stabilite vb. problemlere karşı önlem alınabilmesi için hem dinamik etkinin karakteristiklerinin tam olarak ortaya konulması hem de zemin özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Zeminlerin dinamik etki altında davranışının belirlenebilmesi için literatürde laboratuvar ve arazi deneyleri sonucunda geliştirilen tablolar ile çeşitli ampirik formüller verilmiştir.

Bu doktora tezinde; Toyoura kumu kullanılarak hazırlanan zemin numunelerinin kayma modülü, kayma dalgası hızı ve basınç dalgası hızı gibi zemin dinamik parametreleri rezonant kolon deney sistemleri kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca; deney sisteminin kalibrasyonu için birer seri dinamik üç eksenli ve bender eleman deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları Matlab programı ile regresyon analizine tabi tutulmuştur. İlave olarak dinamik etkiler altında zeminlerin davranışlarının tahmini amacıyla alternatif eşitlikler geliştirilmiştir. Değerlendirme kısmında ise deneysel sonuçlar ve analitik çalışmalar yorumlanmıştır.

1.1. Konu Üzerine Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Dinamik etkiler altında meydana gelebilecek stabilite, taşıma gücü ve deformasyon gibi problemlere karşı güvenli ve ekonomik önlemler alınabilmesi için dinamik etkiler altında zemin davranışının çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Dünyada 1950'li yılların sonlarından itibaren, ülkemizde ise 2000'li yılların başından itibaren bu konuda çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu kısımda konu ile ilgili çalışmalar ve sonuçları özetlenecektir.

Youn ve ark. [1] tarafından bender eleman, rezonant kolon ve burulmalı kesme deneyleri kullanılarak kuru ve doymuş kumların dinamik parametreleri belirlenmiştir. Toyoura kumu ve silika kumu numuneleri için farklı sıklık ve efektif çevre gerilmesi altında kayma dalgası hızı ve kayma modülü ilişkisi araştırılmıştır. Üç farklı cihaz ile elde edilen sonuçlardan şu çıkarımlara ulaşılmıştır: Bender eleman deneyinde kare dalga yerine sinüs dalga tercihi daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Kuru durum için bender eleman ve rezonant kolon deneyleri ile V_s , G_{max} ölçümleri uyum içindeyken yükleme frekansına bağlı olarak burulmalı kesme deneyinde çok küçük farklılıklar elde edilmiştir. Doymuş durum için ise bender eleman deneyinde diğer iki deneye göre daha yüksek V_s değerleri ölçülmüştür. Bu durum için doymuş numunelerde kayma dalgası hızı ölçümü sırasında toplam kütle yoğunluğu değerinin sonuçları etkilediği yorumu yapılmıştır.

Baxter ve ark. [2] dinamik mukavemet oranı ile kayma dalgası hızı arasında yeni bir korelasyon oluşturmak amacıyla bir dizi dinamik üç eksenli ve bender eleman deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneylerde iki non-plastik silt kullanılmıştır. Sıvılaşma deneyleri gerçekleştirilirken kayma dalgası hızları da belirlenmiş, sıvılaşma direnci ile kayma dalgası hızı arasında çalışma sonucunda bir bağıntı verilmiştir. Sonuç olarak özellikle siltli numunelerde sıvılaşma mukavemeti ile kayma dalgası hızı eğrileri için daha fazla dinamik deneyin gerekliliği önerilmiştir.

Tatsuoka ve ark. [3] tarafından numune hazırlama yöntemlerinin kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkisi rezonant kolon ve burulmalı kesme deneyleri ile belirlenmiştir. Full drenajlı olarak gerçekleştirilen deneylerde yağmurlama, sıkıştırma, nemlendirme, doyurma vb. teknikler kullanılarak hazırlanan Toyoura kumu numunelerinin dinamik parametreleri ayrı ayrı

ölçülmüştür. Bu farklı yöntemlerle hazırlanmış numunelerden elde edilen kayma modülü ve sönüm oranı değerleri literatür ile karşılaştırılarak şu çıkarımlar yapılmıştır: Toyoura kumunun kayma modülü 10^{-6} ile 10^{-4} arasındaki kayma birim deformasyon genliklerinde doygunluk derecesindeki artış ile çok az olarak azalmaktadır. 10^{-5} ile 10^{-2} arasındaki kayma birim deformasyon genliğinde ise doygunluk derecesindeki değişimden kayma modülü ve sönüm oranı önemli ölçüde etkilenmemektedir. Toyoura kumlarının kayma modülü ve sönüm oranı dinamik yükleme altında ve drenajlı koşullarda yağmurlama, sıkıştırma, doyurma, kurutma, nemlendirme, dondurma veya çözme gibi numune hazırlama metotlarından bağımsızdır. Ayrıca Toyoura kumu temiz bir kum çeşidi olduğundan temiz olmayan ve diğer tip kumlar için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

Bartake ve Singh [4] kumların kayma dalgası hızını belirlemek amacıyla bender eleman deneyleri gerçekleştirmiştir. Literatürde verilen ampirik bağıntılar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu bağıntılarda efektif gerilme ve boşluk oranı parametrelerinin dikkate alındığı ancak kumların temel karakteristiklerinden olan kuru veya doymuş haller ile parçacık ebatlarının direkt olarak dikkate alınmadığı vurgulanmıştır. Üç farklı gradasyona sahip Kuvartz kumu kullanarak farklı boşluk oranlarında kuru ve doymuş numuneler hazırlanmış bender eleman deneyi ile kayma dalgası hızları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda ise şu tespitler yapılmıştır: Boşluk oranı arttıkça kayma dalgası hızı azalmaktadır ancak $e > 0.85$ değerinden sonra herhangi bir farklılık gözlemlenmemiştir. Kuru numuneler doymuş numunelere göre daha yüksek kayma dalgası hızına sahiptir. Aynı boşluk oranı değerinde ince taneli kumlarda kalın taneli kumlara göre daha yüksek kayma dalgası hızı değerleri tespit edilmiştir. Bu durum, kayma dalgası hızı üzerindeki tane boyutunun etkisini gösterdiği ve geçmiş eşitliklere malzemenin tane yapısını belirleyen bir parametre ile doymuşluk yapısını belirleyen bir parametrenin ilave edilmesi gerektiği iddia edilmiştir. Çalışmada bu parametreleri içeren genelleştirilmiş bir bağıntı verilmiş ancak bağıntının geliştirilmesi için daha fazla deneye ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır.

Yunmin ve ark. [5] tarafından laboratuvar deneyleri kullanarak sıvılaştırma direnci ile kayma dalgası hızı arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Hangzhou kumu üzerinde dinamik üç eksenli deneyleri gerçekleştirilmiş ve literatürde diğer

kumlar için verilen çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca dinamik üç eksenli deneyleri yapılırken hücre içerisine yerleştirilmiş bender eleman cihazı ile kayma dalgası hızları da ölçülmüştür. Böylece kayma dalgası hızı üzerinde sıklık ve çevre basıncı etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Geçmiş çalışmalardan hareketle kayma modülünün çevre basıncı ve boşluk oranının bir fonksiyonu olarak verilmesine rağmen özellikle çevre basıncının karekökünün kayma modülü ile doğrudan orantılı olduğu yorumu yapılmıştır. Deneyler sonucunda; kayma dalgası hızı 100 m/sn ile 200 m/sn arasındaki değerler için sıvılaşma direncini belirlemek amacıyla arazi deneyleri yerine laboratuvar deneylerinin kullanılabilmesi ancak 100 m/sn den küçük 200 m/sn den büyük kayma dalgası hızına sahip zeminler için arazi deneyi gerekliliği vurgulanmıştır. Ayrıca çalışmada sunulan basitleştirilmiş prosedür ile ölçülen kayma modülü değeri kullanılarak sıvılaşma karakteristiklerinin tahmin edilebileceği belirtilmiştir.

Wang ve Kuwano [6] killi kum numunelerin kayma modülü ve sönüm oranlarını modellemeye çalışmıştır. Kawasaki kili ve Toyoura kumu ağırlıkça karıştırılarak hazırlanmış üç tip numune ile yalnızca kilden hazırlanan bir numune olmak üzere toplam dört farklı tip deney numuneleri farklı efektif çevre gerilmelerinde ve yükleme çevrimlerinde drenajsız olarak dinamik üç eksenli deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca deneyler sırasında boşluk suyu basıncı gelişimi de incelenmiştir. Çevrim sayısına bağlı olarak aşırı boşluk suyu basıncı artışı gözlemlenmiştir. Araştırmacıların deney sonuçlarından şu çıkarımlar yapılmıştır: Kayma modülü eşitliğinde ince malzeme içeriğini belirten bir parametre verilmelidir. Kayma modülü değeri aşırı boşluk suyu basıncı oluşması nedeni ile yüksek deformasyon aralıklarında çevrimsel yükleme ile azalmaktadır. Burada kayma modülü, başlangıç kayma modülü değeri ile ve efektif çevre basıncı ile normalize edilirse daha gerçeğe yakın eğriler elde edilebilir. Sönüm oranı çevre basıncından çok fazla etkilenmemektedir. Kayma modülü üzerinde yükleme düzensizliklerinin etkisi, aşırı boşluk suyu basıncı ve kalıcı birim deformasyon oluşumunda en yüksek değere ulaşmaktadır.

Markowska-Lech [7] doymuş kohezyonlu zeminlerin kayma modülünü belirlemek amacıyla yaptığı çalışmada bender eleman içeren üç eksenli deneyi kullanmıştır. Örselenmeden alınan on adet aşırı konsolide Warsaw kilinin kayma

dalgası hızları ölçülmüştür. Efektif gerilme artışı sırasında numunede boşluk oranı azaldığından kayma dalgası hızı artışı gözlemlenmiştir. Elde edilen deney verilerinden boşluk oranı, efektif gerilme ve kayma modülü ile kayma dalgası hızı arasındaki korelasyonun tam olarak görülebilmesi amacıyla üç boyutlu grafikler çizilmiştir. Ayrıca, kayma modülü ve kayma dalgası hızı sonuçları için en uygun eşitlikler çıkarılmaya çalışılmıştır. Tüm bu çalışmalar sonucunda araştırmacı tarafından şu yorumlar sunulmuştur: Zeminlerin kayma dalgası hızı üzerinde efektif gerilme ve boşluk oranı büyük bir etkiye sahiptir, özellikle efektif gerilme ile kayma dalgası arasında lineer bir ilişki vardır. 100 kPa ve altındaki efektif gerilmelerde ve yüksek frekanslı sinyallerde kayma dalgası hızlarının belirlenmesinde problemler bulunmaktadır ve daha fazla deneye gerek duyulmaktadır.

Cascante ve ark. [8] standart burulmalı rezonant kolon cihazında modifikasyon yapmışlar ve geliştirdikleri deney sistemini sunmuşlardır. Deneyle farklı su muhtevalarında hazırlanan uniform silika kumu numunelerinin burulma ve eğilme uyarımları altında kayma dalgası hızı ile sönüm oranları belirlenmiştir. Kayma dalgası hızı tüm doymuş numunelerde yükleme ve boşaltma durumları için tutarlı bir eğilim göstermiştir. Hız ve gerilme ilişkisi hava kuru ve nemli numuneler için yaklaşık olarak sabittir. Ayrıca kayma dalgası hızı efektif gerilme ve kütle yoğunluğu sabit tutulduğunda geri basınca duyarlı değildir. Kısmi doymuş deneylede kapiler kuvvetler birim deformasyonu etkilemek için çok düşük kalmıştır. Burulmalı uyarım sırasında belirlenen sönümlenme değeri ise sıkı kumlar için çevre gerilmesine karşı düşük hassasiyet göstermektedir. Çünkü sıkı kumlarda parçacıkların kayması veya dönmesi sınırlıdır ve sürtünme hareketi engellenmektedir. Genel olarak kuru numunelerde nemli numunelere göre %25 daha az sönümlenme gözlemlenmiştir. Basınç dalgası hızı kuru durumdan doymuş duruma doğru azalmaktadır. Burada; bu durumun kütle yoğunluğundaki artışa bağlı olduğu beklenebilir. Ayrıca çevre basıncından bağımsız olarak ve kütle yoğunluğundaki artışa bağlı olarak basınç dalgası hızı tam doymuş durumdan kısmi doymuş duruma doğru artmaktadır. Eğilme uyarımı altında elde edilen sönümlenme kuru durumdan ıslak duruma doğru yüksek bir artış sergilemektedir. Bu durum zemin iskeleti içerisindeki suyun göreceli hareketini ve akımın önemini ayrıca membran etkisinin düşük frekanslarda maksimuma ulaştığını göstermektedir.

Builes ve ark. [9] tarafından Toyoura kumlarının statik ve dinamik Young modülünü belirlemek amacıyla üç eksenli deneyleri ile bender eleman ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen P dalgası değerinden dinamik Young modülü, S dalgası değerinden ise kayma modülü hesaplanmıştır. Analizler sonucunda dinamik Young modülü birincil dalga hızı ölçülerek belirlendiğinde statik ölçüme göre daha yüksektir ve bu fark numunelerin yoğunluğu azaldıkça artmaktadır. Bender eleman kullanılarak bulunan dinamik ölçüm sonuçları ise numune yoğunluklarında farklılıklar göstermektedir ve daha detaylı deneyler gerekmektedir. Anizotropi etkisi dikkate alındığında kayma dalgası hızı bazlı kayma modülü hesabı ile Young modülünden hesaplanan kayma modülü değeri dinamik ve statik ölçümler için birbiriyle çakışmaktadır. Bu durum farklı düzlemlerdeki elastik özelliklerin karşılaştırılmasında anizotropi etkisinin göz önüne alınmasının gerekliliğini ortaya koymuştur.

Khan ve ark. [10] rezonant kolon ve dinamik üç eksenli deneyinden elde edilen kayma modülü değerinin birbirine bağdaştırılması için bir metot geliştirmeyi amaçlamıştır. Aynı birim deformasyon seviyelerinde farklı sonuçlar verebilen bu iki deney için kuru kum ve bentonit karışımları farklı doygunluk derecelerinde hazırlanmış ve farklı frekans değerlerinde deneylere tabi tutulmuştur. Kayma modülü frekans ile lineer olarak artarken, sönüm oranı frekans ile hafif artış göstermiştir. Kil numune için ise sönüm oranının düştüğü tespit edilmiştir. Deneyler sonucunda şu çıkarımlar yapılmıştır: Rezonant kolon ve dinamik üç eksenli deneyinden elde edilen sonuçlara göre dinamik kayma modülü frekans ile artmaktadır. Daha düşük birim deformasyon seviyesi nedeni ile rezonant kolon deneyinde daha yüksek bir kayma modülü değeri elde edilmektedir. Standart rezonant kolon deney metodu yeni önerdikleri metoda göre daha yüksek dinamik kayma modülü tahmin etmektedir. Ancak bu fark rezonant frekansındaki düşüş ve kayma birim deformasyondaki artışa bağlı olarak azalmaktadır. Bunun yanı sıra dinamik üç eksenli deneyinden elde edilen sonuçlar, kayma modülü değerleri için çok daha yüksek bir eğilim göstermektedir. Kuru kumların düşük birim deformasyon seviyelerindeki kayma modülleri viskoelastik davranış göstermesine rağmen çok belirgin değildir ve daha fazla deneye ihtiyaç vardır. Plastik ince tanelerin artması kumların viskoelastisitesini artırmaktadır.

Kokousho [11] 10^{-6} ile 10^{-3} birim deformasyon aralığında dinamik zemin özelliklerini belirlemek amacıyla doygun ve izotropik konsolide edilmiş Toyoura kumu numunelerine dinamik üç eksenli deneyleri uygulamıştır. Elde edilen kayma modülü değerlerinin literatürde rezonant kolon deneyi için verilen formüllerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu deneylere ilave olarak çöküntü kum tabakalarından alınan örselenmemiş numuneler üzerinde benzer deneyler uygulanmıştır. Deneylerin sonuçları karşılaştırıldığında küçük birim deformasyon seviyelerinde örselenmemiş çökellerdeki kayma modülü oranı Toyoura kumu numunelerine göre azalma eğilimindedir. Bu durumun nedeninin ise çimentolanma etkisi olduğu belirtilmiştir. Toyoura kumu numuneleri ile örselenmemiş kum numunelerinin sönüm oranları karşılaştırıldığında ise 10^{-4} birim deformasyondan düşük seviyeler için benzer özellik gösterdiği, daha yüksek seviyeler için ise çökel numunelerinin daha küçük değerler verdiği belirlenmiştir. Ayrıca deneylerde elde edilen kayma modülü değerinden hesaplanan kayma dalgası hızı arazide yapılan sismik deney sonuçları ile karşılaştırılmış aralarında % 6 ile % 33 oranında farklılıklar olduğu görülmüştür. Kayma modülündeki bu düşüş laboratuvar ortamında deney hazırlanırken örselenme ve arazideki çimentolanma etkisi olarak yorumlanmıştır.

Altun ve Ansal [12] burulmalı kesme deney aleti ile dinamik kayma modülü ve sönüm oranı üzerinde çevrim sayısı, çevre gerilmesi ve boşluk oranı gibi faktörlerin etkilerini araştırmıştır. Çalışmada temiz kum numuneleri kullanılarak her beş çevrimde bir artırılan gerilme genlikleri ile tekrarlı yükleme uygulanmış küçük deformasyon seviyeleri için gerilme ve şekil değiştirme genlikleri ölçülmüştür. Daha sonra yüksek gerilme ve deformasyon seviyelerine uygun yükleme oluşturularak sonuçlar birleştirilmiş, kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri elde edilmiştir. Çalışma sonucunda literatür de verilen bağıntılar incelenerek kayma modülü için boşluk oranı, atmosfer basıncı ve çevre basıncının fonksiyonu olan bir eşitlik önerilmiştir.

Şener ve ark. [13] tarafından zeminlerin dinamik üç eksenli ve burulmalı deney sistemlerindeki davranışlarını belirlemek amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Adapazarı kent merkezinden elde edilen zemin numuneleri kuru yağmurlama yöntemi ile hazırlanarak drenajsız koşullarda deneylere tabi

tutulmuş gerilme, şekil değiştirme ve boşluk suyu basınçları incelenmiştir. Dinamik üç eksenli deneyinde uygulanan dinamik yük ile eksenel deformasyon ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısına bağlı olarak değişimi grafiklendirilmiş ve literatürdeki çalışmalarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. İçi boş silindirik burulmalı dinamik kesme deney aleti ile gerçekleştirilen deneylerde dinamik kayma gerilmesi, birim kayma ve boşluk suyu basıncında oluşan değişimler grafiklerle gösterilmiştir. Deney sonuçları karşılaştırıldığında zemin numunelerinin üç eksenli deney sisteminde daha büyük dinamik kayma gerilmesi oranlarında göçme kriterine ulaştığı belirlenmiştir. İlave olarak gerilme oranları arttıkça boşluk suyu basıncının arttığı ve deformasyonlarda büyük artışlar meydana geldiği rapor edilmiştir.

Terauchi ve ark. [14] suya doymuş kumlu zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışını belirlemek amacıyla burulmalı dinamik deney aleti kullanmıştır. Kuru yağmurlama yöntemi ile farklı sıklıklarda hazırlanan Toyoura kumu numuneleri silindirik içi boş burulmalı deney sisteminde dinamik yüklemeye maruz bırakılmıştır. Deneyler sonucunda 11. çevrimde boşluk suyu basıncının toplam gerilmeye ulaştığı ve birim kayma değerinin % 7,5 u aşarak numunenin sıvılaştığı tespit edilmiştir. Yazarlar burulmalı deney sisteminin ilave yükleme ve ölçümleme özelliklerine sahip olmasından dolayı daha gerçekçi ve arazi şartlarını daha iyi yansıtan bir sistem olduğunu ancak numune hazırlamadaki zorluklar ve pratikliğin zayıf olmasının sistemin eksik yönleri olduğunu belirtmiştir. Çalışma sonucunda sıvılaşmaya neden olan çevrim sayıları incelendiğinde daha düşük gerilme oranlarının daha yüksek çevrim sayılarına karşılık geldiği belirlenmiş ve statik mukavemetlerinde de azalma görüldüğü vurgulanmıştır.

Altun ve Ansal [15] burulmalı kesme deney aleti ile suya doymuş kumların farklı fiziksel özellikler ve deneysel koşullar altında gerilme, şekil değiştirme özelliklerindeki değişimleri incelemiştir. Drenajsız koşullarda gerilme kontrollü olarak Toyoura kumundan hazırlanan içi boş silindirik numuneler 0.1 Hz frekanslarda tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Numuneler farklı rölatif sıklıklarda hazırlanmış izotropik olarak konsolide edilmiş ve sinüzoidal yüklemeye tabi tutulmuştur. Deneylerde çevre basıncındaki artışla birlikte dinamik kayma modülünde de artış olduğu ve çevrim sayısı ile dinamik parametrelerde değişiklikler meydana geldiği saptanmıştır. Çevrim sayısındaki artış kayma modülü

değerlerinde doğru orantılı bir değişim etkisi oluştururken sönüm oranı değerlerinde azalmaya neden olmaktadır. İlave olarak zeminlerin rölatif sıkılık ve boşluk oranı değerlerinin dinamik kayma modülü üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen verilerin literatür ile uyumluluk gösterdiği belirtilmiştir.

Koseki ve ark. [16] Toyoura kumlarının sıvılaşma potansiyeli ile yarı elastik deformasyon özellikleri arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Kuru yağmurlama yöntemi ile hazırlanan ve izotropik olarak konsolide edilen sıkı Toyoura kumu numuneleri dinamik burulmalı kesme ve üç eksenli deneyine tabi tutulmuştur. Farklı gerilmeler altında küçük genlikli dinamik burulma ve düşey yük uygulanarak yarı elastik deformasyon özellikleri ölçülmüştür. Sonuçlar irdelendiğinde izotropik konsolidasyon sırasında drenaj koşulu ne olursa olsun drenajlı ve drenajsız kayma modülünün yaklaşık olarak aynı olduğu ancak Young modülünde bir farklılık gözlemlendiği bu durumda membran etkisi olarak açıklanabileceği belirtilmiştir. Drenajsız tekrarlı yükleme altındaki sıvılaşma sürecinde kayma modülü ve Young modülü değerlerinde yaklaşık olarak eşit azalım görülmüştür. Ayrıca bu parametrelerdeki azalım üç eksenli deneyinde burulmalı kesme deneyine göre daha fazla olarak ölçülmüştür. Bu durum ise sıvılaşma sürecinde zemin yapısında meydana gelen hasarın etkisi olarak yorumlanmıştır.

Teachavorasinskun ve ark. [17] tarafından Bangkok kilinin kayma modülü ve sönüm oranı dinamik üç eksenli deneyi ile tespit edilmiştir. Örselenmemiş olarak alınan kil numuneleri tam doygun hale getirildikten sonra 15 çevrimlik drenajsız dinamik yüklemeye maruz bırakılarak kayma modülü ve sönüm oranı belirlenmiştir. Ölçülen kayma modülü değerleri literatürde verilen benzer plastisiteye sahip killer ile aynı aralık değerlerine sahiptir. Sönüm oranları ise % 0.01 gibi küçük birim deformasyonlarda % 5, % 10 gibi büyük birim deformasyonlarda % 30 farklılıklar göstermiştir. Çalışma sırasında yükleme frekansının ve dinamik gerilme geçmişinin kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkisine bakıldığında; 0,1 Hz'den 1 Hz'e olan frekans artışı kayma modülü üzerinde herhangi bir etkiye sebep olmamasına rağmen sönümlenme değerinde küçük bir azalma yaratmıştır. Dinamik yükleme geçmişinin ise deneye tabi tutulan boşluk oranı aralığında kayda değer bir etkisi gözlemlenmemiştir.

Zhou ve Chen [18] sismik yükleme geçmişinin doygun kumların kayma modülü üzerindeki etkisini araştırmıştır. Suya doygun zeminlerde dinamik yükleme nedeni ile efektif gerilme azalımı ve zemin iskeletinin yeniden düzenlenmesinin zeminin rijitlik ve mukavemet özelliklerinde değişime neden olacağı belirtilmiş ve dinamik üç eksenli deneyleri ile bu etki ortaya konulmaya çalışılmıştır. İzotropik olarak konsolide edilen doygun kum numunelerine drenajsız dinamik yükleme yapılırken aralıklarla bender eleman deneyi de uygulanmış ve sıvılaşma süreci boyunca kayma dalgası hızları ölçülmüştür. İnce ve kaba taneli olmak üzere iki farklı kum tipi seçilerek % 60 sıklıkta hazırlanmış numuneler 5 farklı çevre basıncı seviyesinde yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda çeşitli zaman aralıklarında ölçülen kayma modülü değerleri karşılaştırıldığında şu yorumlar çıkarılmıştır: Kayma modülleri arasındaki fark dinamik yüklemenin başlangıcında ortaya çıkmış, efektif gerilmenin azalması ile artmış ve sıvılaşma sürecinin ortalarında stabil hale gelmiştir. Depremler sırasında zeminlerin yapısında meydana gelebilecek değişimler göz önüne alındığında ve deney sonuçları incelendiğinde kayma modülü değerleri olduğundan yüksek tahmin edilebilmektedir.

Patel ve ark. [19] granüler malzemelerde tane morfolojisinin kayma dalgası hızı üzerindeki etkisini araştırmış ve ampirik bir eşitlik sunmuştur. Araştırma için kum ve cam içeren dört farklı tip numune kullanılmış, hazırlanan numuneler bender eleman deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin kayma dalgası hızları belirlenirken morfolojik karakterleri, ortalama tane boyutu, tane şekli, çevre gerilmeleri, kuru ve doygun halleri de göz önüne alınmıştır. Deneyler sonucunda granüler malzemelerde küresellik, yuvarlaklık vb. tane morfolojisi ile tane ebatlarının kayma dalgası hızını etkilediği tespit edilmiştir. Aynı zamanda çevre basıncı, kuru ve doygun hal şartlarının da kayma dalgası hızı üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar ışıkında formüle edilen ampirik eşitlik literatür ile karşılaştırılarak uyumlu olduğu gözlemlenmiş ve kayma dalgası hızlarının belirlenmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir.

Kısmi doygun kumların sıvılaşma mukavemetinin değerlendirilmesi isimli çalışmalarında Yang ve ark. [20] basınç dalgası hızını kullanarak sıvılaşma mukavemetini belirlemeye çalışmıştır. Laboratuvar deneyleri ışıkında öncelikle sıvılaşma mukavemeti ile boşluk suyu basıncı katsayısı (B) arasında ampirik bir

korelasyon bulunduğu, benzer şekilde P dalgaları ile B katsayısı arasında da bir ilişki olduğu öne sürülmüştür. Literatürde Ottawa, Toyoura, Niigata ve Tongjiazhi kumları için verilen sıvılaşma deney verileri yeniden analiz edilmiş doygunluk ile sıvılaşma mukavemeti arasındaki ilişki grafiklendirilmiştir. Çizilen bu grafiklerden P dalgası hızı ile sıvılaşma mukavemeti arasındaki ilişki ampirik bir eşitlik ile ifade edilmiştir.

Richter ve Huber [21] tarafından rezonant kolon cihazı kullanarak ince taneli zeminler için tane boyutu, efektif gerilme ve boşluk suyu basıncının kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Ayrıca ikincil konsolidasyon deneyleri ile zamana bağlı davranışta incelenmiştir. Bozulma ve çözülme ile kimyasal bağ oluşumu gibi süreçler, kayma mukavemetinde zamana bağlı olarak artışa sebep olmuştur. Ancak mukavemet artışında numune yoğunluğunun ve tanelerinin koordinatlarının etkisi ile ilgili herhangi bir bulguya rastlanılmamıştır.

Bilge ve Çetin [22] suya doygun kumlu zeminlerin tekrarlı boşluk suyu basıncı gelişim davranışlarını modellemek amacıyla literatürde verilen dinamik üç eksenli ve basit kesme deney sonuçlarını yeniden analiz etmiştir. Deney sonuçları olasılıksal yöntemlerle değerlendirilerek pratik kullanıma uygun bir model sunulmuştur. Modelin performans sonuçlarına bakıldığında başarılı tahminler ürettiği görülmüştür. Ancak araştırmacılar daha başarılı modellerin üretilmesi için hem olasılıksal yapı ile problem belirsizliklerini hem de dinamik zemin davranışının farklı yönlerinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır.

Cabalar ve Çevik [23] tarafından kum, mika karışımlarının sönüm oranı ve kayma modülü yapay sinir ağları kullanarak analiz edilmiştir. Deneysel veriler iki farklı yapay sinir ağı modeli ile karşılaştırılmış, sonuçlar basit bir matematiksel fonksiyon olarak sunulmuştur. Çalışmada yuvarlak ve kaba tane yapısına sahip Leighton Buzzard kumu ve mika karışımları doygun olarak hazırlanıp rezonant kolon deneyine tabi tutulmuştur. Model tahmin değerleri ile deney sonuçları arasında kayma modülü için % 99, sönüm oranı için % 97 uyum olduğu gösterilmiştir. Bu sonuçlar ışığında dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesinde yapay sinir ağı modellerinin de güvenli bir yöntem olduğu vurgulanmıştır.

Altun ve Göktepe [24] yoğunluk ve gerilme seviyesinin uniform kumların dinamik kayma modülüne etkisini araştırdıkları çalışmalarında burulmalı kesme deneyi kullanarak elde ettikleri sonuçları non-lineer çoklu regrasyon, yapay sinir ağı ve bulanık mantık metotları ile analiz etmişlerdir. Çalışmanın ilk kısmında Toyoura kumu kullanılarak farklı sıklıkta hazırlanan doygun numuneler çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuş, farklı çevre basınçları altında dinamik kayma modülleri ve kayma birim deformasyon genlikleri ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler bahsedilen numerik yöntemlerle tahmin edilen kayma modülleri ile karşılaştırılmış ve şu sonuçlar verilmiştir: Kumların kayma modülü değeri üzerinde rölâtif sıklık ve boşluk oranı önemli bir etkiye sahiptir, diğer bir önemli faktör ise efektif çevre basıncıdır. Model çalışmalarına bakıldığında non-lineer regrasyon analizinin pratik amaçlar için daha uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca kısmi olarak yapay sinir ağı modellerinin bulanık mantık modellerinden daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Ancak çalışma sonucunda kayma modülü davranışı üzerinde etkisi olan diğer parametrelerinde göz önüne alınarak araştırmanın geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Schneider ve ark. [25] tarafından Piedmont çökel zeminlerinin dinamik kayma modülünün ölçümü amacıyla laboratuvarda rezonant kolon deneyi, arazide ise sismik kuyudan kuyuya, sismik dilatometre ve yüzey dalgası deneyleri uygulanmıştır. Laboratuvarda boşluk oranı, aşırı konsolidasyon oranı, plastiklik, çevre basıncı ve aşınma derecesinin etkileri araştırılırken, arazide derinlik, aşırı konsolidasyon oranı, toplam kütle ve boşluk oranı etkileri araştırılmıştır. Siltli kumlu ve düşük plastisiteli zemin özelliğine sahip bölgeden örselenmemiş olarak alınan numunelerin dinamik kayma modülleri belirlenmiştir. Laboratuvar ve arazi deneylerinin sonuçları arasında büyük bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca şu sonuçlara ulaşılmıştır: Kayma modülü derinlik ile artmaktadır. Ayrıca doygunluk derecesi zeminin dinamik davranışını etkilemektedir. Yer altı su seviyesi üzerinde daha yüksek kayma modülü ve kayma dalgası hızı elde edilirken, su seviyesi altında düşüş gözlemlenmiştir. Numune alımı sırasındaki örselenmeden dolayı laboratuvarda elde edilen kayma modülü değeri arazide ölçülenden daha düşük olarak ölçülmektedir. Laboratuvarda konsolidasyon deneyi ile arazide ise kayma dalgası hızı ölçümünden elde edilen aşırı konsolidasyon oranı değerleri

birbiriyle uyumludur. Boşluk oranı ve kütle yoğunluğu araştırılan bölge için genel olarak sabit olduğundan kayma dalgası hızı ölçümlerinde laboratuvar ve arazi deney sonuçları birbirini eşlemektedir. Plastisite indeksi kayma modülü üzerinde büyük bir etkiye sahip olmamasına rağmen, artışı ile kayma modülü azalım eğilimi göstermektedir.

Elibol ve Erken [26] doygun, kısmi doygun ve kuru kum numunelerin dinamik davranışlarının incelenmesi amacıyla dinamik üç eksenli deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneylerde orta ince tane çapına sahip temiz kum kullanılmış, farklı dinamik gerilme oranlarında sıvılaşmaya karşı davranışları analiz edilmiştir. Deney sonuçları değerlendirildiğinde aynı doygunluk ve sıklığa sahip numunelerde büyük gerilmelere maruz kalanların daha az çevrim sayısında göçme kriterine ulaştığı ve sıvılaşma oluşumunun başladığı görülmüştür.

Christakos [27] dinamik yük altındaki zemin davranışını deneysel yöntemlerle ölçüp istatistiksel yöntemlerle modellemiştir. Dinamik üç eksenli deney cihazı ile orta kaba kum sınıfında olan Leighton Buzzard kumu ve daha ince tane yapısına sahip iki farklı kum tipi doyurulduktan ve konsolide edildikten sonra tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Deney sonuçları analiz edildiğinde eksenel deformasyonlar ve boşluk suyu basınçlarında sinüzoidal dalga yüklemesine göre kare dalga yüklemesinde daha hızlı bir artış olduğu, benzer şekilde yüksek yükleme frekanslarında da aynı davranışın gözlemlendiği belirtilmiştir. Kalıcı yükler uygulanan numunelerde eksenel deformasyon ve boşluk suyu basınçlarında azalma gözlemlenmiştir. Bu durum statik yük artışının numunede konsolidasyona sebep olması şeklinde açıklanmaktadır. Tüm deneylerde genel olarak boşluk suyu basıncındaki değişimlerin eksenel deformasyonun davranış eğilimini takip ettiği gözlemlenmiştir. İlave olarak dinamik üç eksenli deney sonuçlarının; numune hazırlama prosedürü, numunenin yoğunluğundaki değişim, dinamik yükün şekli, çevre basıncı ve boşluk oranından doğrudan etkilendiği belirlenmiştir. Sonuçlar istatistiksel olarak incelendiğinde ise sinüzoidal dalga formunun kare dalga forma göre deprem hareketini daha iyi yansıttığı saptanmıştır. Beklenildiği gibi gevşek numuneler sıvılaştığında çok daha büyük deformasyonlar elde edilmiştir. Numune üzerindeki çekme kuvvetlerinin basınç kuvvetlerine göre daha fazla eksenel deformasyon meydana getirdiği ve tek yönlü yüklemeye göre iki yönlü yüklemenin

iki kat deformasyona neden olduğu tespit edilmiştir. Son olarak kullanılan numune hazırlama yöntemlerinden hangisinin araziye yansıtmak bakımından en başarılı olduğu henüz ortaya konulamamıştır.

Sitharam ve ark. [28] tarafından zeminlerin sıvılaşma potansiyelleri ile dinamik özelliklerinin belirlenmesi ve etkileyen parametrelerin ortaya konulması amacıyla dinamik deneyler gerçekleştirilmiştir. Sabarmati nehri kıyısından alınan sıvılaşabilir kum numuneleri farklı sıklıklarda hazırlanmış ve dinamik üç eksenli deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları analiz edildiğinde şu yorumlar verilmiştir: Yüksek birim deformasyon genliklerinde kayma modülünde azalım ve sönümlenmede dikkate değer artışlar meydana gelmektedir. Numunenin başlangıç yoğunluğunun artışı kayma modülünde artışa neden olurken, dinamik yükün uygulanması ile boşluk suyu basıncı artmaktadır. Yüksek birim deformasyon genlikleri boşluk suyu basıncının daha hızlı artmasına ve daha az çevrimde sıvılaşmaya ulaşılmasına neden olmaktadır. Yoğunluktaki artış dinamik mukavemeti artırırken sıvılaşma potansiyelini de azaltmaktadır.

Hadge [29] kumların drenajlı ve drenajsız dinamik davranışları arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla dinamik üç eksenli deneyleri kullanmış ve sonuçları değerlendirerek bir eşitlik ortaya koymuştur. Eşitlikte parametreler olarak porosite, dinamik kayma gerilme oranı, efektif gerilme ve çevrim sayısı kabul edilerek, boşluk suyu basıncı tahmini yapılmış ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda tahmin edilen ile ölçülen boşluk suyu basıncı verilerinin tam olarak uyduğu dolayısıyla bu ilişkinin geçerli olduğu iddia edilmiştir. Çalışma sonucunda drenajlı ve drenajsız dinamik davranışın modellenmesi amacıyla verilen eşitliğin tanımlanan limitler içerisinde geçerli olduğu ve ileri deneylerin gerekliliği yazar tarafından vurgulanmıştır.

Ghahramani ve ark. [30] laboratuvar ve arazi deneyleri ile doymuş kumların sıvılaşma potansiyelini belirlemiştir. Öncelikle laboratuvarda birisi ince, birisi kaba taneli olmak üzere iki farklı kum tipi kullanılarak hazırlanan numunelere üç eksenli basınç deneyi ve burulmalı kesme deneyi uygulanmıştır. Daha sonra arazi çalışmaları kapsamında zemin yapısı gevşek doymuş kum olan bölgede standart penetrasyon deneyi ve arazide burulmalı kesme deneyi uygulanmıştır. Arazide burulma deneyi uygulanabilmesi için standart SPT numune alıcısı, modifiye

edilmiş burulma kuvveti verebilecek şekilde tasarlanmıştır. Çalışma sonuçları kıyaslandığında klasik SPT deneyinde yapılacak modifikasyon ile arazide burulmalı kesme deneyi yapılabileceği ve kumların sıvılaşma potansiyelini belirlemesi amacıyla kullanabileceği görülmüştür.

Meidani ve ark. [31] tarafından çakıl kil karışımlarının dinamik davranışını belirlemek amacıyla dinamik ve statik üç eksenli deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kuzey Tahran bölgesinden elde edilen düşük plastisiteli kil malzemesi ile Hazar denizi kıyılarından elde edilen kötü derecelendirilmiş çakıl özelliği gösteren farklı şekil yapısına sahip numuneler 5 farklı yüzde ile karıştırılmıştır. Çalışma sonucunda ise şu değerlendirmeler yapılmıştır: Öncelikle % 44 ün altında çakıl içeren karışımlarda genel davranışın kil parçacıkları etkisinde olduğu, bunda çakıl parçacıkları arasındaki etkileşimin yetersizliği nedeni ile gerçekleştiği gözlemlenmiştir. % 54 ve üzerindeki çakıl içeriğinde ise davranışın çakıl taneleri tarafından kontrol edildiği tespit edilmiştir. Çakıl içeriği arttıkça numunenin kayma modülü ve sönüm oranı değerleri üzerinde çakıl tanelerinin etkisi artmakta ve bu tanelerin şekillerinin etkisi de belirginleşmektedir. Yuvarlak tane yapısına sahip karışımlarda daha yüksek kayma modülü değeri gözlemlenmiş ve bu fark yüksek çevre basınçları altında daha belirgin hale gelmiştir. Sönüm oranlarına bakıldığında ise çakıl oranı arttıkça sönüm oranı düşmekte ve yuvarlak tane yapısına sahip çakılların bulunduğu karışımlarda daha yüksek sönüm oranları gözlemlenmiştir. Tüm bu sonuçlar ışığında yuvarlak tane yapısına sahip çakıl karışımlarının yüksek kayma modülü ve sönüm oranları nedeni ile düşük oturma istenilen zemin çalışmalarında kullanılmasının uygun olacağı önerilmiştir.

Vucetic ve ark. [32] drenajsız dinamik kesme deneyini kullanarak sönüm oranını bulmak amacıyla iki farklı kum ve üç farklı kil numunesi üzerinde deneyler gerçekleştirmiştir. Deneyler düşük birim deformasyon genliklerinde ve değişken efektif gerilmelerde uygulanmıştır. Deneyler sonucunda hem kum hem kil numuneler için sönüm oranının efektif gerilme ve aşırı konsolidasyon oranı ile azaldığı ancak plastisite indeksi ve efektif gerilme artışı halinde bu etkinin düştüğü tespit edilmiştir. Deney sonuçlarında dinamik yükleme frekansının etkisi tam olarak görülememiştir. Kayma birim deformasyon genliklerinin % 0.01 den büyük olduğu durumlarda kumların sönüm oranının killerinkinden yüksek olduğu, temiz kumun

sönüm oranının siltli kumdan yine yüksek olduğu, killerde ise plastisite indeksindeki artış ile azaldığı belirlenmiştir. Kayma birim deformasyonunun % 0.005 in altında ise killerin sönüm oranının kumlarınkinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. İlave olarak siltli kum ile temiz kumun sönüm oranlarının yaklaşık olarak aynı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yüksek efektif basınçlarda konsolide edilen veya aşırı konsolidasyon oranına ve yüksek plastisite indeksine sahip killerde yüksek sönüm oranları elde edilmiştir. Çalışma sonucunda yüksek kayma birim deformasyonlarda kumların, düşük kayma birim deformasyonlarda ise killerin daha büyük sönüm oranlarına sahip olduğu vurgulanmıştır. Bu durum ise genel olarak kumların killere göre daha fazla non-lineer olması ve killerin daha fazla viskoz olması şeklinde açıklanmıştır.

Sugano ve Yanagisawa [33] depremler sırasında ortaya çıkan Love ve Rayleigh adı verilen yüzey dalgalarının kumların drenajsız dinamik deformasyon karakteristiklerine etkilerini belirlemiştir. Deneylerde Rayleigh dalgası içi boş silindirik burulmalı kesme cihazı ile oluşturulurken, Love dalgası için iki yönlü kesme aparatı tasarlanmıştır. Deneylerde kuru yağmurlama metodu ile hazırlanan Toyoura kumu kullanılmıştır. Deney sonuçlarında ise Rayleigh dalgasına tabi tutulan numunelerin sıvılaşma mukavemetinin anizotropiden etkilendiği belirlenmiştir. Love dalgasına tabi tutulan numunelerde ise sadece S dalgasının değil Love dalgasının da sıvılaşmaya neden olduğu ve deney verileri ile oluşturulacak kayma gerilmesi düzleminden sıvılaşma mukavemetinin tahmin edilebileceği belirtilmiştir.

Santos ve Correia [34] küçük ve orta deformasyon seviyelerinde dinamik yük altında zeminlerin rijitliğini araştırmıştır. Kayma modülü üzerinde etkiye sahip parametreler olan plastisite indeksi ve efektif gerilme farklı zemin tipleri için laboratuvar verileri ışığında karşılaştırılmıştır. Literatürde bulunan geçmiş çalışmaların verilerini yeniden analiz eden araştırmacılar şu sonuçlara varmıştır: Kum, silt, kil gibi tüm zemin tipleri için kayma modülü ile boşluk oranı ve efektif gerilme arasında bir ilişki vardır. Zeminlerin kayma modülü üzerindeki efektif gerilme ve plastisite indeksinin etkilerinin açıklanabilmesi için hacimsel eşik birim deformasyon kavramı tanımlanmıştır. Ancak bu yeni kavramın yükleme frekansı,

çevrim sayısı ve gerilme geçmişi vb. diğer parametreler ile ilişkisinin tanımlanabilmesi için yeni araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Sykora [35] zeminlerin kayma dalgası hızı ile kayma modülleri arasındaki korelasyonu belirlemek amacıyla yaptığı çalışmada şu sonuçlara ulaşmıştır: Kayma dalgası hızı veya kayma modülü ile arazi parametreleri korelasyon edilirken yalnızca derinlik faktörü değil jeolojik yaş, zemin tipi, efektif gerilme, göreceli sıkılık ve doygunluk derecesi de göz önüne alınmalıdır. Laboratuvar sonuçları ve arazi ölçümleri sonucunda özellikle granüler zeminlerde kayma dalgası hızı ile kayma modülü belirlemek için boşluk oranı ve efektif gerilmenin önemli faktörler olduğu ancak jeolojik yaşın çimentolanma ve zemin dokusu üzerinde etkisi olduğundan dikkate alınması gerektiği ortaya çıkmıştır. Arazi ölçümlerinde yalnızca SPT değerine bağlı kayma dalgası hızı tahmininin eksik olabileceği, kayma dalgası hızının SPT değeri, derinlik, jeolojik yaş ve rölatif tane boyutu ile arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca kayma dalgası hızı ile kayma modülü tahmini için mutlaka arazi araştırmalarının yapılması, sonuçları etkileyebilecek parametrelerin tek tek analiz edilmesi ve mutlaka gerçekçi korelasyonların ortaya konulması önerilmiştir.

Alla [36] doymun olmayan zeminlerin dinamik davranışını incelediği çalışmasında bir dizi dinamik deney gerçekleştirmiştir. Sıvılaşma potansiyeli olan siltli kum ve temiz kum olmak üzere iki farklı tip malzeme Buchner hunisi tekniği ile kısmi doymun hale getirilmiştir. Sıvılaşma potansiyellerinin belirlenmesi ve kayma dalgası hızı ile kayma modülü parametrelerinin ölçülmesi amacıyla numunelere bender eleman deneyi uygulanmıştır. Analizler sonucunda şu çıkarımlar yapılmıştır: Numune yoğunluğu arttıkça kayma dalgası hızı ve rijitlik artmaktadır. Benzer şekilde su içeriği azalırken kayma dalgası hızı ve rijitlikte artış gözlemlenmiştir. Kayma dalgası hızı 200 m/s nin altındaki değerlerde sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu, göreceli olarak daha kuru numunelerde kayma dalgası hızının bu değerden yüksek ölçüldüğü ve sıvılaşma potansiyelinin de azaldığı saptanmıştır.

Polito [37] kumlu zeminlerin sıvılaşma potansiyeline plastik ve plastik olmayan ince tanelerin etkilerini araştırdığı tez çalışmasında bir dizi dinamik üç eksenli deneyi gerçekleştirmiştir. Deneyler için Yatesville silti, Monteri kumu,

Kaolin ve Bentonit killeri kullanılmıştır. Deney sonuçları irdelendiğinde şu sonuçlara ulaşılmıştır: Temiz kumların ve plastik olmayan siltli kumların sıvılaşma davranışını yorumlamak için limit silt içeriği ve özgül rölatif yoğunluk isimli iki parametre tanımlanmalıdır ayrıca sıvılaşma davranışı zemin yapısındaki boşluklara bağlıdır. Eğer zemin içerisindeki silt miktarı tanımlanan limit değerinden düşük ise sıvılaşma direnci, özgül rölatif yoğunluk tarafından kontrol edilmektedir ve bu değer in yükselmesi zeminin direncini de artırmaktadır. Silt içeriği limit değerini geçtiği takdirde zemin özgül rölatif yoğunluğunun etkisi azalmakta sıvılaşma direnci siltli kısmın boşluk oranına bağlı olmaktadır. Bu boşluk oranı azaldığında zemin direnci artmaktadır. Plastik killi tanelerin varlığı zeminin sıvılaşmaya yatkınlığını azaltmaktadır. Sıvılaşma direncindeki artış likit limit, plastisite indeksi ve aktivite artışı ile doğru orantılıdır. Eğer plastisite değeri düşükse zeminin sıvılaşma direnci de düşmektedir. Deney sırasında sıfır efektif gerilme değerine ulaşıldığında sonuçların sıvılaşma yerine çevrimsel hareketlilik olarak tanımlanması gerektiği ve mukavemet kaybı ile büyük deformasyonların meydana geleceği iddia edilmiştir.

Chaudhary ve ark. [38] dinamik deformasyon karakteristiklerine zemin yapısının etkisini belirlemek amacıyla Toyoura kumu üzerinde dinamik deneyler gerçekleştirmiştir. Kuru yağmurlama, sulu çökeltme ve kuru çubuklama olmak üzere üç farklı numune hazırlama yöntemi kullanılarak yaklaşık %50 sıklıkta ve doymun olarak hazırlanan Toyoura kumu numuneleri içi boş silindirik burulmalı kesme deneyine tabi tutulmuştur. Deneylerde numunelerin kayma modülü ve sönüm oranları belirlenmiş ve şu yorumlar yapılmıştır: Farklı numune hazırlama teknikleri kullanılarak hazırlanan numunelerin zemin yapılarının kayma modülü ve sönüm oranındaki etkisi çok düşüktür. Numune hazırlama yöntemlerinin oluşturduğu anizotropi açısından karşılaştırıldığında kuru yağmurlama yöntemi en yüksek anizotropiyi verirken, kuru çubuklama metodu oldukça izotropik zemin yapısı vermektedir.

Ladd [39] kum zeminlerde dinamik üç eksenli deneyi için yeni bir numune hazırlama yöntemi önermiştir. Monterey kumu kullanarak yaklaşık % 60 sıklıkta ve doymun halde hazırlanan numuneler konsolide edildikten sonra sinüzoidal yüklemeye tabi tutulmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde önerilen numune

hazırlama yönteminin şu avantajları olduğu belirtilmiştir: Bu yöntem ile çok fazla tekrarlanabilen deney sonuçları elde edilebilmekte, belirsizliklerin bir kısmı azalmakta ve sonuçlarda daha kesinlik gözlenmektedir. Bu yeni kompaksiyon metodu ile tanelerin segregasyonu azalmakta, geniş bir aralıkta rölatif sıklıklar elde edilebilmekte ve kumlar için optimum dinamik mukavemet daha kolay belirlenebilmektedir.

Orense ve ark. [40] tarafından Ponza kumunun kayma modülü ve sönüm oranını belirlemek amacıyla içi boş silindirik burulmalı kesme cihazı ile bir seri dinamik deformasyon deneyi yapılmıştır. Deneylerde çevre basıncının ve ince tane oranının etkisinin belirlenmesi amacıyla çalışma sonuçları Toyoura kumu verileri ile karşılaştırılmıştır. Tüm numuneler 0,1 Hz frekans ile 11 çevrimlik sinüzoidal drenajsız dinamik yüklemeye maruz bırakılmıştır. Elde edilen kayma modülü ve sönüm oranı sonuçlarından şu yorumlar çıkarılmıştır: Kayma modülü çevre basıncındaki artışa ve ince tane oranındaki azalmaya bağlı olarak artmaktadır. Ponzanın sönüm oranı % 0,2 birim deformasyon seviyeleri altında çevre basıncı ve tane yapısından etkilenmemektedir, göçmenin meydana geldiği deformasyon seviyelerinde ise Toyoura kumunun sönüm oranının yaklaşık yarısına eşit olmaktadır.

Lanzo ve Delia [41] Toyoura kumunun dinamik özelliklerinin birim deformasyon genliği, efektif gerilme, yükleme frekansı ve çevrim sayısı ile ilişkisini belirlemek amacıyla bir seri dinamik deney gerçekleştirmiş ve sonuçları geçmiş literatür verileri ile karşılaştırmıştır. Hava kurusunda hazırlanan numuneler basit kesme deneyine tabi tutulmuş 90 ile 900 kPa arasında değişen efektif gerilme ile 0.02 Hz ile 1.5 Hz arasında değişen frekanslarda dinamik yükleme yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre araştırmacılar Toyoura kumlarının kayma modülü ve sönüm oranı parametreleri için şu yorumlarda bulunmuşlardır: Araştırılan parametrelerin etkilerinin literatürde verilenlerle büyük benzerlikler taşıdığı, efektif gerilme artışı ile kayma modülünde bir artış gözlemlendiği, oluşan çok küçük farklılıkların ise membran etkisine bağlı olduğu belirtilmiştir. % 0.01 birim deformasyon seviyelerinde çevrim sayısı artarken kayma modülü artmakta, sönüm oranı ise azalmaktadır ancak 0.01 Hz ile 1.0 Hz frekans aralığında sönüm oranının frekans değerinden bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Toyoura kumu için

literatürde verilen laboratuvar deneylerinden bender eleman, rezonant kolon, dinamik üç eksenli ve burulmalı deneyler ile karşılaştırıldığında sınır koşulları, deney prosedürü, analiz kriterleri gibi farklılıklar olmasına rağmen basit kesme deneyinin de yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Papadopoulou ve ark. [42] tarafından kohezyonlu zeminlerin dinamik özelliklerini ve siltli kumların sıvılaşma dirençlerini belirlemek amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. 1999 yılında $M_w = 7.4$ ve $M_w = 7.2$ büyüklüğünde iki büyük depremden etkilenen Düzce ili sınırları içinde 6 farklı bölgeden zemin numuneleri alınmıştır. Siltli kum özelliği taşıyan numunelere dinamik üç eksenli deneyi, örselenmeden laboratuvara getirilen killi numunelere ise rezonant kolon deneyi uygulanmıştır. Deneyler sonucunda ise siltli kum numunelerde sıvılaşma direnci için laboratuvar ortamında belirlenen parametreler ile zeminin doğal ortamındaki parametreler arasında bazı farklılıklar olduğu belirlenmiştir. Deneyde kullanılan kil numunesinin kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin diğer kohezyonlu zeminlerle benzer sonuçlar gösterdiği ve plastisitenin sonuçları etkilediği tespit edilmiştir.

Çapalar [43] mikalı kumlar üzerinde ödometre, üç eksenli ve rezonant kolon deneyleri gerçekleştirerek kayma modülü ve sönüm oranı ölçümü yapmıştır. Leighton Buzzard kumu ve mika çeşitli yüzdelerle karıştırılmış, numunelerin bir kısmı ödometre deneyi ile konsolidasyona bırakılmış, bir kısmı konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli deneyine, bir kısmı da rezonant kolon deneyine tabi tutulmuştur. Ödometre deneyinden kum tanelerinin sıkışma davranışındaki etkisi belirlenmiş, kum tanelerinin maksimum boşluk oranına etkisi için mika içeriği kullanılarak limit değeri tespit edilmiştir. Belirlenen limit değerine kadar bir boyutlu sıkışma davranışında kumun etkisi görülürken bu değer üzerinde mika tanelerinin etkisi gözlemlenmiştir. Benzer şekilde rezonant kolon ve üç eksenli deney sonuçları da bu limit değeri ile karışımın davranışı arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir.

Kallioglou ve ark. [44] tarafından rezonant kolon deney cihazı kullanılarak örselenmiş ve örselenmemiş kohezyonlu zeminlerin dinamik karakteristikleri ortaya konulmuştur. Çalışmada çevre basıncı, aşırı konsolidasyon oranı, boşluk oranı ve plastisite indeksinin kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkileri

araştırılmıştır. Kıbrıs ve Yunanistan'da çeşitli bölgelerden örselenmemiş olarak alınan ve laboratuvarında kaolin katılarak hazırlanan doymuş numuneler deneylere tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda plastisite, boşluk oranı, gerilme geçmişi, efektif gerilme ve zemin yapısının kayma modülü üzerinde büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Sönüm oranında ise en önemli parametrenin zemin yapısı olduğu belirtilmiş ve burada boşluk oranı için kritik eşik değerin 0.5 olduğu ifade edilmiştir. Boşluk oranı bu değerden küçük olduğunda çok yüksek sönüm oranı değerleri elde edildiği belirtilmiştir. Özellikle kohezyonlu zeminler için plastisite indeksinin kayma modülü ve sönüm oranında meydana gelen değişikliklerde etkin parametre olduğu ve çalışmada verilen eşitliklerin pratik amaçlar için kullanılabilmesi ifade edilmiştir.

Kumar ve Madhusudhan [45] farklı sıklık ve çevre basınçlarında kuru kum numunelerin kayma dalgası hızı ve basınç dalgası hızlarını ölçmüştür. Kayma dalgası hızının belirlenmesi için kullanılan bender eleman cihazına basınç dalgası hızını da belirlemek amacıyla yeni bir aparat ilave edilmiş ve sonuçların karşılaştırılması için de rezonant kolon deneyi gerçekleştirilmiştir. Köşeli tane yapısına sahip kum numuneleri 5 farklı sıklıkta kalibrasyonlu kurutma tekniği ile hazırlanmıştır. Yapılan deneyler ışığında araştırmacılar şu sonuçlara ulaşmıştır: Bender eleman kullanılarak yapılan dalga hızı ölçümlerinde P dalgası sonuçlarının S dalgası sonuçlarına göre daha güvenilir olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma zayıf sinyal başlangıcı ile numune ebatlarına bağlı yakınlık etkisinin neden olduğu belirtilmiştir. Ayrıca rezonant kolon deneyleri ile elde edilen kayma modülü değerlerinin bender eleman sonuçlarından hesaplanan değerler ile uyumlu olduğu saptanmıştır.

Ishibashi ve Zhang [46] kil ve kumların dinamik kayma modülü ve sönüm oranlarının belirlenmesinde her iki zemin tipi içinde kullanılacak bir eşitlik önermiştir. Bu amaçla literatürdeki kum ve killer için verilen deney dataları yeniden analiz edilmiştir. Literatürde kumların kayma modülü ölçülmesi için genellikle boşluk oranı ve efektif gerilmeye bağlı olarak verilen eşitlikler ile killerin kayma modülünün belirlenmesi için plastisite indeksine bağlı olarak verilen eşitlikler incelenmiş, deney dataları aynı grafikler üzerinde işaretlenerek bir bağıntı oluşturulmuştur. Analizler sonucunda kayma modülü ölçümü için rezonant kolon

deneyi ile elde edilen verilerin arazi deneyleri ile elde edilen veriler ile daha fazla benzerlik gösterdiği ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada önerilen bağıntı çakıllı ve aşırı konsolide zeminler göz ardı edilerek oluşturulmuştur. Ayrıca kumlar ve normal konsolide zeminler için pratik amaçlarla kullanılabileceği iddia edilmiştir.

Yang [47] zeminlerin doygunluk derecesinin dalga hızları üzerindeki etkisini arazi deneyleri ile incelemiştir. Arazide sismik çalışmalar ile oluşturulan S ve P dalgalarının kaya tabakası üzerinde bulunan tam doygun ve % 95 kısmi doygun zeminlerden geçiş hızları ölçülmüş ve şu sonuçlara ulaşılmıştır: Kaya tabakasının yüzeyde bulunan zemin içerisindeki dalga yayılımına etkisi çok küçüktür. Zemin tabakasının doygunluk derecesindeki değişim düşey yayılımda büyük etkiye sahipken yatay yayılımda ihmal edilebilecek kadar azdır. Doymuluktan kısmi doymuluğa geçiş sırasında zeminde ölçülen P dalgası 1562 m/s den 255 m/s ye düşerken, kaya tabakasında 1994 m/s den 1136 m/s ye düşmektedir. S dalgalarında ise her iki doymuluk durumunda da kum zemin için 145 m/s kaya tabakası için 655 m/s dalga hızı ölçülmüştür. Boşluk suyu basıncı varlığı nedeni ile tabakalı sistem sönümleme etkisi göstermiştir ve bu sönümleme boşluklardaki viskoz akım ile ilişkilendirilmiştir. Ancak araştırmacı doymuluk derecesi, boşluk basıncı ve yer hareketi arasındaki karmaşık ilişkiler nedeni ile daha detaylı araştırmalara ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir.

Georgiannou ve ark. [48] burulmalı yükleme altında kumların çevrimsel ve monotonik davranışlarını incelemiştir. Bu amaçla içi boş silindirik burulmalı kesme deney aleti kullanılmıştır. Deneylerde ince taneli uniform silika kumu tercih edilmiş, gevşek ve sıkı olarak 2 farklı tip numune hazırlanmıştır. Kumun sıvılaşma, rijitlik ve sönümleme karakteristikleri incelendiğinde şu sonuçlara ulaşılmıştır: Drenajsız monotonik yükleme altında gevşek kum numuneleri düşük kayma birim deformasyonlarda kararsız bir davranış göstermiştir. Drenajlı durumda kayma mukavemeti açısı karakteristik durumdan etkilenmezken dilatansi ile artmıştır. Deneyde kullanılan kumun sıvılaşma karakteristikleri literatürde ince kumlar için verilen diğer sonuçlarla benzerlikler taşımaktadır. Çevrimsel yükleme altında kumun rijitliği monotonik yüklemeye göre daha yüksek ölçülmüştür. Yüksek birim deformasyonlarda ise drenajsız duruma göre, drenajlı durumda daha yüksek rijitlik tespit edilmiştir.

Ülker [49] siltli ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışını araştırmak amacıyla yaptığı çalışmada dinamik burulmalı kesme aleti ile deneyler gerçekleştirmiştir. Deneyler için değişik plastisitelere siltli ve killi zemin numuneleri örselenmemiş olarak alınmış veya laboratuvarında kuru yağmurlama yöntemi ile hazırlanmıştır. Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilen deneyler ile şu sonuçlara ulaşılmıştır: Deney sonuçlarını etkileyen en önemli parametrelerin tekrarlı gerilme seviyesi, birim kayma genliği, çevrim sayısı, plastisite indisi, ince dane miktarı, konsolidasyon süresi, yükleme hızı, numune yapısı ve numune hazırlama yöntemi olduğu tespit edilmiştir. Laboratuvarında hazırlanan numunelerde örselenmemiş numunelere göre daha fazla dinamik mukavemet kaybı gözlemlenmiştir. Düşük plastisiteli siltli ve killi zeminlerde dinamik deneyler sırasında çevrim sayılarının artışı ile kayma birim deformasyonları artmakta ve taşıma gücü kayıpları oluşmakta ancak boşluk suyu basınçları sınırlı kalmaktadır. Düşük plastisiteli siltlerde mukavemet kayıpları ve birim deformasyonların yanı sıra boşluk suyu basınçlarının da arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca izotropik konsolidasyon sırasında örselenmemiş zeminde laboratuvarında hazırlanan numunelere göre boşluklar arasındaki azalmanın daha yüksek olduğu ve laboratuvarında hazırlanan numunelerdeki boşlukların birbirine bağlantılı olarak dağıldığı ancak örselenmemiş numunelerde bu dağılımın rastgele olduğu tespit edilmiştir.

Andrus ve Stokoe [50] kayma dalgası hızını kullanarak zeminlerin sıvılaşma direncini belirlemek amacıyla basitleştirilmiş bir yöntem önermiştir. Yöntem genel olarak Seed-Idris yöntemini baz almakla birlikte 70 den fazla arazi ölçümü ve 26 deprem verisi kullanılarak oluşturulmuştur. Değerlendirilen verilerde ince kumlardan çakıllı kumlara ve siltli kil tabakalarına kadar çeşitli zemin tipleri bulunmaktadır. Sıvılaşma direnci eğrileri için literatürde verilen dinamik gerilme oranı ve kayma dalgası hızı ilişkisi modifiye edilmiştir. Oluşturulan yeni eğriler ve SPT deneyi sonucu elde edilen kayma dalgası hızları ile sıvılaşma direnci tahmini oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Ayrıca zeminin tipi, ince tane miktarı ve penetrasyon direnci gibi parametrelerin belirlenmesinden sonra tahmin edilen kayma dalgası hızı ile beklenen deprem şiddeti ve ivme değerleri kullanılarak sıvılaşma direnci tahmini yapılmıştır.

Lee ve Huang [51] üç eksenli deney cihazı içine yerleştirilen iki çift piezo-elektrik eleman kullanarak farklı gerilmeler altında kumların mekanik özellikleri ile basınç ve kayma dalgası hızlarının değişimini belirlemiştir. Numuneler üzerinde P ve S dalgaları oluşturulup 10 kHz ile 40 kHz frekanslarında kare ve sinüzoidal dalgalar kullanılmıştır. Deneylerden şu sonuçlara ulaşılmıştır: Öncelikle dalga hızları gerilme durumuna bağlı olarak değişim göstermektedir ve yükleme sırasında zemin yapısında meydana gelecek değişikliklerde sonuçları etkilemektedir. Zemin yapısındaki değişimin ölçülmesi ve yapısal indeks olarak tanımlanması daha gerçekçi sonuçlar için önerilmiştir. Çevre basıncının artışı, yapısal indeks değerini artırmakta ve çevrim sayısı artışı ile tanelerde meydana gelen değişimlerde sonuçları etkilemektedir. Sonuç olarak basınç ve kayma dalgası hızlarının tanımlanan bu yapısal indeks değerinden etkilendiği tespit edilmiştir.

Osinov [52] granüler zeminlerde büyük genlikli dalgaların teorik olarak ortaya konulması amacıyla bazı dinamik eşitlikleri yeniden analiz ederek numerik yöntemler ile çözmeye çalışmıştır. Yapılan çözümler ışığında şu sonuçlara ulaşılmıştır: Tüm dalga hızları enine ve boyuna harekete bağlı olarak, bir üst ve bir alt olmak üzere 2 spektrum içermektedir. Üst spektrum boyuna dalgalar ile ilişkiliyken alt spektrumun enine dalgalar ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Numerik çözümlerde yarı düzlemde yayılım sınırlarında bozulmalar olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla sadece enine veya boyuna dalgalar ancak özel koşullarda oluşabilir. Eğer gerilme durumu hidro-statik değilse sınır değeri problemi ortaya çıkmaktadır.

Taiebat ve ark. [53] tarafından doygun kum dolguların sıvılaştırma potansiyeli ile deprem nedenli oluşan kayma dalgalarının yayılım mekanizması araştırılmıştır. Numerik çözümler ile bir matematiksel model kurulmuş ve bilgisayar uygulamaları ile doğruluğu analiz edilmiştir. Literatürde farklı yoğunluklarda, çevre basınçlarında, drenaj koşullarında ve yükleme durumlarında davranışları bilinen Toyoura kumu, Nevada kumu ve Sacramento kumu deney verileri yeniden analiz edilmiştir. Modelin kayma dalgası hızı, sönüm oranı gibi dinamik parametreleri tahmini laboratuvar verileri ile karşılaştırılmış ve çok başarılı olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda araştırmacılar şu yorumlarda bulunmuşlardır: Sonlu elemanlar metodu ve numerik araçlar kullanılarak yapılan analizlerin zeminlerde

dalga yayılımı ve sıvılaşma davranışlarını belirlemede başarılı olduğu ancak boşluklu ortam içerisinde doygunluk etkisine dikkat edilmesi gerektiği saptanmıştır. Modellerin yoğunluk ve yükleme durumuna bağlı zemin tepkisi ve faz değişimi gibi özelliklerini dikkate alması gerektiği böylece boşluk suyu basıncı artışı ve deformasyon tahmininin gerçekçi olacağı vurgulanmıştır.

Okur ve Ansal [54] örselenmemiş normal konsolide kil numuneler üzerinde 0.1 Hz frekanslarda gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyleri gerçekleştirmiştir. İstanbul Avcılar bölgesinden elde edilen kil numuneleri lineer olmayan elastik davranışı belirlemek amacıyla 10^{-4} birim kayma genliğinde sinüzoidal tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Deneyler sonucunda araştırmacılar şu yorumlarda bulunmuşlardır: Maksimum kayma modülü değerinin çevre basıncı ile orantılı olarak artmakta, plastisite indisinin lineer olmayan elastik davranış aralığında bir etkisi bulunmamakta ancak bu eşik değerinden sonra önemli bir faktör haline gelmektedir. Bu bağlamda kayma modülü tahmini için pratikte kullanılabilecek bir bağıntı önerilmiş ve arazi deneyleri ile karşılaştırıldığında laboratuvarında elde edilen dinamik kayma modülü değerinin 2,5 kat daha az olduğu ve bununda deneyler sırasında meydana gelen örselenme ve diğer laboratuvar koşulları sebebiyle oluşabileceği belirtilmiştir.

Tipi [55] Uşak Kaolini numuneleri üzerinde dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deneyleri gerçekleştirmiştir. Yükleme frekansının, gerilme oranının ve numune yapısının ince taneli zeminlerin mukavemet özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiş ve şu sonuçlara ulaşmıştır: Aynı frekans değerinde boşluk suyu basınçlarının artması ile birim kayma deformasyonunda artış gözlemlenmiştir. Ayrıca çevrim sayısının artışı boşluk suyu basıncında da artışa neden olmaktadır. Dinamik kayma gerilmesi oranı arttıkça tüm çevrimlerde deformasyon artışı gözlenmiş, birim kayma deformasyon değeri artmış fakat konsolidasyon oturmaları nedeni ile numune mukavemet kazanarak en küçük deformasyon artışları son çevrimlerde meydana gelmiştir. Numune davranışı üzerinde düşük gerilme seviyelerinde frekansın etkisi gözlemlenirken, gerilme oranının artışı ile bu etkinin kaybolduğu tespit edilmiştir.

Polito ve ark. [56] çevrimsel yüklemeye maruz bırakılan kumlar ve siltli kumlar için boşluk suyu basıncı değişimini modellemiştir. Öncelikle plastik

olmayan siltli zeminlerin dinamik yükleme altındaki boşluk suyu basıncı tahmini için literatürde verilen iki modelin uygulanabilirliği araştırılmış ve dinamik üç eksenli deneyleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda şu çıkarımlar yapılmıştır: Her iki modelinde boşluk suyu basıncı gelişiminde non-plastik ve siltli zeminler için kullanılabilmesi ancak ilk modelin % 85 rölatif sıkılığın altında daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Model tahminleri ve dinamik üç eksenli deney sonuçları karşılaştırıldığında bazı regrasyon teknikleri ile kalibrasyon parametrelerinin üretilmesi gerektiği belirlenmiştir. Yazarlar tarafından oluşturulan kalibrasyon parametrelerinin belirtilen limitlerde başarılı sonuçlar verdiği ancak tüm yükleme durumları ve diğer etkiler altındaki uygunluğunun yeni deneyler ile araştırılması gerektiği ortaya çıkmıştır.

Sanin ve Wijewickreme [57] düşük plastisiteli silt numunelerinin dinamik kayma davranışını belirlemek amacıyla sabit hacimli basit kesme deneyi gerçekleştirmiştir. Örselenmemiş olarak alınan numuneler çeşitli aşırı konsolidasyon oranlarında 0.1 Hz frekans ile basit kesme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarından numunelerde çevrimsel hareketlilik tipi deformasyon meydana geldiği tespit edilmiştir. Dinamik yük altında numuneler üzerinde kayma mukavemeti kaybı yani akma göçmeleri saptanmıştır. Çevrimsel mukavemetin 85 kPa ile 200 kPa arasındaki gerilmelerde başlangıç efektif gerilmelerden etkilenmediği ancak yüksek gerilme seviyelerinde ilave deneylerin gerektiği belirtilmiştir. Dinamik yükleme sonrası konsolidasyon deneyleri sonucunda ise ilave boşluk suyu basıncı oluşan numunelerde daha fazla hacimsel sıkışma tespit edilmiştir.

Altun [58] suya doymuş kumların drenajsız koşullarda tekrarlı yükler altındaki davranışını burulmalı kesme deney aletiyle incelemiştir. Deneylerde Toyoura kumu kullanılarak kuru yağmurlama metodu ile farklı sıklıklarda hazırlanan numuneler için boş burulmalı kesme deney aletiyle 0.1 Hz sabit frekansta sinüzoidal yüklemeye tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda suya doymuş kum zeminlerin dinamik mukavemet özelliklerinin yüksek birim deformasyon seviyelerinde çevrim sayısı, çevre basıncı, boşluk oranı ve izotropik olmayan koşullardan doğrudan etkilendiği tespit edilmiştir.

Okur ve ark. [59] tarafından örselenmemiş numuneler üzerinde üç eksenli ve dinamik burulmalı deneyler ile boşluk suyu basıncı değişimi incelenmiştir. Çeşitli bölgelerden alınan CL, ML ve CH sınıfındaki zeminlerin kayma modülü ve birim kayma şekil değiştirme değerleri ölçülmüştür. Deney sonuçlarından şu yorumlar yapılmıştır: İnce taneli zeminlerde boşluk suyu basıncındaki artış belirli bir eşik seviyesinden sonra başlamaktadır. Lineer olmayan elastik eşik aşıldıktan sonra artmakta ancak elasto-plastik aralıkta azalmakta ve göçmeye yakın sabit bir değerde kalmaktadır. Plastisite indisi arttıkça göçme anındaki boşluk suyu basıncı oranı azalmaktadır.

Ivsic [60] kum numunelerde dinamik deneyler sırasında oluşan boşluk suyu basıncını tahmin etmek amacıyla bir model sunmuştur. Önerilen model, deneyler sırasındaki değişkenleri baz alarak boşluk suyu basıncı artışı ilişkisini göstermektedir. Modele eşik birim deformasyon kavramı eklenmiş ve yayınlanmış dinamik deney verileri ile doğrulanmaya çalışılmıştır. Modelin parametreleri, geniş bir aralığa sahip kum zemin özellikleri için kısıtlı kalmıştır. Modelde ampirik eşitlikler ve eğriler oluşturulurken, etkili parametreler olarak eşik birim deformasyonun yanı sıra gerilme deformasyon özellikleri ve gerilme izi belirtilmiştir. Çalışma sonucunda sunulan modelin diğer dinamik deney verileriyle geliştirilebileceği ve böylece karşılaştırılmalı analiz yapılabileceği ifade edilmiştir.

2. DİNAMİK ETKİLER ALTINDA ZEMİNLERİN ÖZELLİKLERİ

Dinamik etkiler altında zeminlerin özelliklerinin belirlenebilmesi için öncelikle zeminlere etkiyen dinamik yüklerin tanımlanması, olası deformasyonların tahmini, kullanılan yöntemlerin anlatılması ve son olarak zeminlerin dinamik parametrelerinin yük altındaki değişiminin ortaya konulması gerekmektedir.

2.1. Zeminlere Etkiyen Dinamik Yükler

Zeminler statik yüklerin yanı sıra dinamik yüklere de maruz kalabilmektedir. Geoteknik deprem mühendisliği çalışmalarında depremler, dalga yükleri, makine temel titreşimleri ve trafik yükleri gibi tekrarlı yükler altında zeminlerin mukavemet özellikleri ile şekil değiştirmelerin belirlenmesi için öncelikli olarak bu yüklerin sınıflandırılması gerekmektedir. Dinamik yükler literatürde hareketin oluşumuna ve etkisine bağlı olarak sınıflandırılmıştır.

Zeminlere etkiyen dinamik yükler genel olarak harmonik hareketler, periyodik hareketler, gelişigüzel titreşimler ve geçici titreşimler şeklinde sınıflandırılmaktadır [61]. Harmonik hareketler genel olarak titreşimli makine temellerinin meydana getirdiği düzenli ve ahenkli hareketleri kapsamaktadır. Periyodik hareketler ise titreşimli makine temellerinin oluşturduğu aralıklı ve devirsel hareketleri içermektedir. Ayrıca depremler, dalgalar ve rüzgârlar nedeniyle oluşan hareketler gelişigüzel titreşimler darbe yüklemeli makineler, presler, tokmaklar nedeniyle oluşan hareketler ise geçici titreşimler olarak tanımlanmıştır.

Özellikle dinamik yükler arasından deprem yükleri zeminler üzerinde oluşturdukları etkiler göz önüne alınarak farklı bir öneme sahiptir. Güvenli ve ekonomik tasarımlar için deprem karakteristikleri geoteknik deprem mühendisleri tarafından iyi bilinmelidir.

2.2. Depremler ve Deprem Karakteristikleri

Yer kabuğunda soğuma veya çeşitli etkilerden meydana gelen şekil değiştirme enerjisinin ani olarak açığa çıkması ve oluşan titreşimlerin dalgalar

halinde yayılarak geçtikleri ortamları sarsma olayı deprem olarak tanımlanmaktadır. Deprem anında yer kabuğunu oluşturan plakalar kendisini sınırlayan çizgiler olan faylar boyunca ani olarak kayar ve ortaya çıkan yer değiştirme dalgaları sönümlenerek ortama yayılır [62].

Yerkabuğunu oluşturan levhaların birbirine göre göreceli hareketlerinin meydana geldiği sınır bölgelerinde fay adı verilen arazi kırıkları oluşmaktadır. Deprem enerjisinin ortaya çıktığı ilk noktaya odak noktası veya iç merkez denir. Odak noktasına en yakın olan yer üzerindeki nokta ise dış merkez, depremin en kuvvetli hissedildiği bölge ise merkez üstü olarak tanımlanır. Depremde enerjinin açığa çıktığı noktanın yeryüzünden en kısa uzaklığı, depremin odak derinliği olarak adlandırılır. Aynı şiddetle sarsılan noktaları birbirine bağlayan noktaların tamamlanmasıyla eş şiddet haritası ortaya çıkar. Herhangi bir derinlikte olan depremin, yeryüzünde hissedildiği bir noktadaki yapılar, doğa ve insanlar üzerindeki etkilerinin bir ölçüsü depremin şiddeti, deprem sırasında açığa çıkan enerjinin bir ölçüsü onun büyüklüğü olarak belirlenir [63].

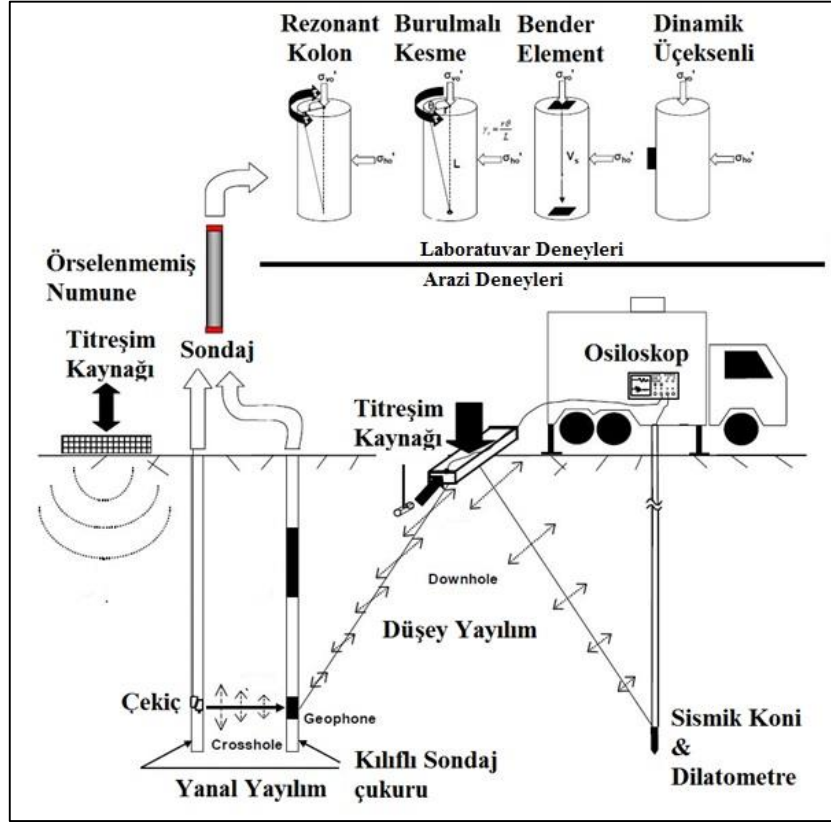
Depremler sırasında oluşan dalgalar; cisim dalgaları ve yüzey dalgaları şeklinde iki sınıfa ayrılmaktadır. Cisim dalgalarından ilki P dalgalarıdır ve geçtikleri ortamda hacimsel değişikliklere sebep olurlar. S dalgaları ise geçtikleri ortamda kayma deformasyonlarına sebep olmaktadır [62]. Yüzey dalgaları, Love dalgaları ve Rayleigh dalgaları olarak isimlendirilir ve yer yüzeyine yakın olarak yayılırlar.

Deprem hareketi birçok farklı periyot, frekans, sönümlenme veya genliklere sahip üst üste binmiş titreşimler olarak da tanımlanabilmektedir. Periyot dalga hareketinin iki tepe noktası arasındaki zaman aralığı, frekans; birim zamanda kaydedilen periyodik hareket sayısı, sönüm ise hareketin zaman içerisinde büyüklüğünü kaybetmesi olarak ifade edilir.

2.3. Dinamik Etkiler Altında Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

Dinamik etkileye maruz kalan bir zeminin verebileceği tepkileri önceden yorumlayabilmek için çeşitli arazi, laboratuvar ve model deneyleri geliştirilmiştir. Şekil 2.1'de bu deneyler genel olarak gösterilmiştir. Bu deneyler ile zeminlerin

kayma modülü, sönüm oranı ve sıvılaşma direnci belirlenmektedir. Bu parametrelerin belirlenmesi ile dinamik yüklemeye maruz kalan zeminin mukavemet özellikleri ortaya konabilmektedir.



Şekil 2.1. Dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesi [14]

Geliştirilen arazi ve laboratuvar deneylerinin kullanım alanları ise deformasyon aralıklarına bağlı olarak değişmektedir. Deney numunesinde meydana gelecek birim deformasyon seviyesine bağlı olarak arazi ve laboratuvar deneylerinin zeminlerde meydana getirdiği deformasyon seviyesi ile karşılaştırma şeması Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Arazi deneyleri ile zemin özellikleri yerinde ölçülebilir ve daha büyük hacimli örnekler üzerinde daha az örselenme seviyesi sağlanır. Laboratuvar deneylerinde ise küçük ölçekli numuneler üzerinde arazi şartlarının tam olarak simüle edilmesi gerekmektedir. Laboratuvar deneylerinin avantajı ise daha az zaman alıcı ve ekonomik olmalarıdır.

Dinamik Arazi Deneyleri		Dinamik Üç Eksenli ve Dinamik Kesme Deneyleri			
Rezonant Kolon Deneyi					
		Sarsma Tablası Deneyi			
		Statik Plaka Yükleme Deneyi			
		Depremler			
10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻² 10 ⁻¹
Kayma Deformasyon Seviyesi, γ (%)					

Şekil 2.2. Laboratuvar ve arazi deneyleri uygulama şeması [64]

Arazi deneyleri düşük deformasyon deneyleri ve yüksek deformasyon deneyleri olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Düşük deformasyon deneylerinde % 0.001 ve altındaki kayma birim deformasyonları uygulanarak zeminlerin deformasyon modülleri ile cisim dalgası hızı ilişkisi belirlenir. Sismik yansıma deneyi, sismik kırılma deneyi, katmanlanma deneyleri, askıda loglama deneyi, Rayleigh dalgası deneyi, kuyudan-kuyuya ve kuyu aşağı (yukarı) sismik deneyi gibi farklı uygulamaları vardır [63]. Bu deneyler arasında sıkça kullanılan sismik kırılma deneyi yüzeysel olarak geniş alanlarda ve ön bilgi amacıyla yapılır ve küçük genliklerde çalışır. Deney sırasında farklı uzaklıklarda oluşturulan dalga hareketinin zemin yüzeyinde bulunan jeofana ulaşım süresi ölçülmektedir. Kuyudan kuyuya sismik deneyinde dalga iletimi yöntemiyle sınırlı alan içerisinde en az bir kaynak kuyusu ve bir ölçüm kuyusu ile çalışılır. Kuyulardan birinde dalga hareketi oluşturulur ve diğer kuyuya yerleştirilen alıcı ile hareketin hızı ölçülür. Sismik kuyu aşağı (yukarı) deneyinde ise bir kuyu yeterlidir ve belirlenen alanda düşük hızların ölçümüne uygundur. Açılan kuyu içerisine kaynak yerleştirilip alıcının yüzeyde olduğu sistemler kuyu yukarı, kaynağın yüzeyde alıcının kuyu içerisinde olduğu sistemler ise kuyu aşağı olarak isimlendirilmektedir. Değişik derinliklere kaynak yerleştirilerek oluşturulan dalgaların hız ölçümleri yapılabilmektedir. Yüksek deformasyon deneyleri içerisinde geoteknik mühendisliğinde sıkça kullanılan standart penetrasyon deneyi ilk sıradadır [63].

Ayrıca son yıllarda geliştirilen jeotomografi yöntemi ve kuyuda burulma deney sistemi arazide ölçümler için kullanılmaya başlanan yeni yöntemlerdir. Standart penetrasyon deneyi uygulama kolaylığı nedeni ile uzun yıllardır sıkça kullanılmaktadır ancak deney sonuçlarını etkileyen faktörlerin iyi analiz edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Numune alıcının zemini çakımı sırasında vuruş sayıları kaydedilip çeşitli tablo ve grafikler kullanılarak zemin dinamik parametreleri belirlenmektedir.

Laboratuvar deneyleri; düşük deformasyon eleman deneyleri, yüksek deformasyon eleman deneyleri ve model deneyleri olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.3'de bu laboratuvar deneyleri ile ölçülebilen parametreler verilmiştir. Düşük deformasyon eleman deneylerinden rezonant kolon deneyi ile silindirik numuneler elektromanyetik yükleme sistemi vasıtasıyla burulma veya eksenel yüklemeye maruz bırakılarak zemin rijitlik ve sönümlenme özellikleri ölçülürken, ultrasonik pals deneyi ve bender eleman deneyi ile dalga yayılma hızları belirlenmektedir [63]. Rezonant kolon deneyi 10^{-6} ile 10^{-3} birim deformasyon aralığında kullanılır. Zeminlerin analizi doğrusal ve elastik yaklaşımlara dayanmaktadır. Deney sırasında içi dolu veya boş silindirik numuneler üzerine elektromanyetik yükleme sistemi ile tekrarlı burulma veya eksenel yük uygulanır zeminin tepkisi rezonant frekansı olarak ölçülür. Ölçülen rezonant frekansı ile çeşitli eşitlikler kullanılarak zeminin kayma modülü ve kayma dalgası hızı belirlenir. Ultrasonik pals deneyinde ise numunenin uçlarına yerleştirilen alıcı ve vericiler ile oluşturulan gerilme dalgasının ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Bender eleman deneyinde iki piyoelektrik malzemenin arasına yerleştirilen zemin numunesine kayma dalgası uygulanarak dalganın hızı ölçülür.

Yüksek deformasyon eleman deneyleri; dinamik üç eksenli, dinamik basit kesme ve tekrarlı burulmalı deneyleridir [63]. Dinamik üç eksenli deneyinde, zemin numunesi için gerilme ve birim deformasyonlar ölçülerek kayma modülü ve sönüm oranı değerleri hesaplanır. Dinamik üç eksenli deney sisteminde zemin numunesine deviatör gerilmeler gerilme kontrollü veya deformasyon kontrollü olarak uygulanabilmektedir. Dinamik yükleme sırasında boşluk suyu basıncı değişimi ölçülerek zeminin sıvılaşma direnci de belirlenir. Benzer şekilde dinamik basit kesme ve tekrarlı burulmalı kesme deney sistemleri ile gerilme şartlarına bağlı

deformasyonlar ölçülerek numunelerin rijitlik ve sönümleme özellikleri tespit edilir. Dinamik basit kesme deneyinde zemin numunesine tekrarlı yatay kayma gerilmeleri uygulanarak arazi şartları ve deprem yüklemeleri daha iyi modellenmektedir. Tekrarlı burulmalı kesme deneyinde izotrop veya anizotrop başlangıç gerilme koşulları oluşturulup içi dolu veya boş silindirik numuneler üzerinde yatay düzlemde kayma gerilmeleri uygulanır. Çizelge 2.1’de bazı laboratuvar deneyleri ve göreceli performans değerlendirmesi verilmiştir.

		Rezonant Kolon Deneyi	Çevrimsel Üç Eksenli Deneyi	Çevrimsel Basit Kesme Deneyi	Burulmalı Kesme Deneyi
Yük		Rezonans Frekansı	Eksenel Yük	Yatay Yük	Burulma
Deformasyon	Eksenel	Düşey Deformasyon	Düşey Deformasyon	Düşey Deformasyon	Düşey Deformasyon
	Kesme	İvme	Ölçülmez	Yatay Deformasyon	Dönme
	Yatay	Genellikle Ölçülmez	Genellikle Ölçülmez	Genellikle Kontrol Edilir	Genellikle Ölçülmez
	Hacimsel	Drenajsız testlerde ölçülmez (Drenajlı testlerde numuneden çıkan ve giren sıvı hacmi ölçülür)			
Boşluk Suyu Basıncı		Genellikle Ölçülmez	Sınır Koşullarında Ölçülür	Sınır Koşullarında Ölçülür	Sınır Koşullarında Ölçülür

Şekil 2.3. Laboratuvar deneylerinde ölçülebilen parametreler [64]

Model deneylerinde ise arazi şartlarının yansıtılması amacıyla bir prototip üzerine tekrarlı yükleme uygulanarak zemin davranışı ölçülür. Model deneyleri içerisinde, sarsma tablası deneyleri ile santrifüj deneyleri en sık kullanılan yöntemlerdir [62]. Sarsma tablası deneylerinde farklı ebatlardaki tablalar üzerine geniş ölçekli zemin numuneleri hazırlanarak dinamik yükleme uygulanır ve zeminlerin tepkisi belirlenir.

Çizelge 2.1. Laboratuvar deneyleri ve göreceli performans değerlendirilmesi [64]

	Kayma Modülü	Young Modülü	Malzeme Sönümü	Çevrim Sayısı Etkisi
Rezonant Kolon Deneyi	İyi	İyi	İyi	İyi
Ultrasonik Darbe Deneyi	Orta	Orta	-	-
Çevrimsel Üç Eksenli Deneyi	-	İyi	İyi	İyi
Çevrimsel Basit Kesme Deneyi	İyi	-	İyi	İyi
Çevrimsel Burulmalı Kesme Deneyi	İyi	-	İyi	İyi

2.4. Dinamik Etkiler Altında Zeminlerin Davranışı

Zeminlerin dinamik yükler altında davranışlarının; gerilme şartları, zemin yapısı, zemin yoğunluğu, gerilme deformasyon geçmişi, boşluk oranı, plastisite indisi, aşırı konsolidasyon oranı gibi birçok faktöre bağlı olduğu literatürde ortaya konulmuştur. Bu tezinde konusu olan bu parametrelerin değişimi ile ilgili detaylı açıklama Bölüm 3 altında verilecektir. Ancak genel yaklaşım olarak literatürde zemin davranışının açıklanabilmesi amacıyla eşdeğer doğrusal modeller, tekrarlı doğrusal olmayan modeller ve ileri yapıcı modeller olmak üzere üç model geliştirilmiştir [63].

Eşdeğer doğrusal modeller, simetrik tekrarlı yüklemeye maruz zeminlerin histerezis döngüsü sergilediğini ve bu döngünün iki önemli özelliğinin eğim ve genişlik olduğunu belirtmektedir. Bu histerezis eğrisi üzerinden kayma modülü ve sönüm oranı belirlenmektedir [63]. Tekrarlı doğrusal olmayan modeller ile düzensiz yükleme, yoğunlaşma, boşluk suyu basıncı değişimi gibi faktörlerin zemin davranışı üzerindeki etkileri modellenmeye çalışılmıştır. İleri yapıcı modeller ise gerilme şartları, gerilme izleri, drenajlı ve drenajsız zemin davranışı gibi birçok faktörün etkisinin gözlemlenebilmesi amacıyla geliştirilmiştir.

Zeminlerin dinamik davranışlarını etkileyen yapısal özellikler ise izotropik olmayan yükleme, heterojen yapı, gerilme geçmişi, dilatansi gibi makro etkiler, taneler arası kontak noktaları, tanecik dağılımı, boşlukların dağılımı gibi mikro etkiler ve numune hazırlama süreci ve uzun süreli konsolidasyon gibi diğer faktörler olarak literatürde verilmiştir [64].

2.5. Dinamik Etkiler Altında Zeminlerde Meydana Gelen Deformasyonlar

Dinamik etkiler sonucu zeminlerde gözlemlenen deformasyonlar yüzey yırtılması, bölgesel çökme, yamaç hareketleri, hacimsel sıkışma ve sıvılaşma şeklinde sıralanmaktadır. Sıvılaşma ise oturma ve taşıma gücü yenilmeleri, akma kaymaları ve kum volkanları şeklinde gözlemlenmektedir [63].

Yüzey yırtılması bir fayın iki kenarının göreceli hareketinin yüzeyde meydana getirdiği kırıklar olarak tanımlanmıştır. Yüzey kırıklarından farklı olarak, depremlerle birlikte gelişen diğer tektonik etkiler de yükselme veya bölgesel çökmeler olarak gözlemlenmiştir. Depremlerin ikincil etkilerinden biriside yamaç hareketleridir. Deprem kökenli yamaç hareketi düşmeler ve kaymalar olarak iki gruba ayrılır. Hacimsel sıkışma, zemin danelerinin sıkışmasına neden olan deprem kökenli yer sarsıntısı ile meydana gelir. Kuru ve gevşek kumlar veya çakıllar gibi çimentolanmamış kohezyonsuz zeminler, bu tip harekete daha fazla duyarlıdır. Yer sarsıntısı nedeniyle yüksek boşluk suyu basınçlarının gelişimi gevşek kumlarda sıvılaşmayı meydana getirmektedir. Sıvılaşma sırasında zeminin kayma mukavemeti sıfıra düşmektedir ve oturma ve taşıma gücü yenilmeleri meydana gelmektedir. Sıvılaşma eğimli bir zemin kütlesi içinde veya altında meydana gelirse, tüm kütle akma kayması şeklinde akar veya yanal olarak desteksiz bir kenara ötelenir. Yüzeye yakın örtünün ince olması durumunda, gelişen aşırı boşluk suyu basıncı çatlak şeklinde yer yarılmasına ve kum volkanlarına neden olur. Sıvılaşmaya duyarlı zemin tipi, yüzeye yakın yeraltı su seviyesine sahip yeni çökelmiş veya dolgu yapılmış gevşek kumlardır. Zeminlerde sıvılaşma süresi deprem nedeniyle sismik sarsıntının süresi, sıvılaşan zeminin drenaj şartları bağlı olarak değişmektedir [63].

3. ZEMİNLERİN DİNAMİK ETKİLER ALTINDA DAVRANIŞI

Zeminlerin dinamik etkilere verdikleri tepkiler çeşitli faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Özellikle dinamik yükler altında zeminlerin mukavemet özellikleri ve oluşacak deformasyon seviyelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan geçmiş araştırmalar sonucunda bazı parametreler ortaya konulmuştur. Bu parametreler; kayma modülü (G), dinamik birim kayma genliği (γ), ve sönüm oranı (D) olarak verilmiştir. Ayrıca bazı kaynaklarda zeminlerin kayma dalgası hızı (V_s) ve basınç dalgası hızı (V_p) de zeminlerin dinamik davranışlarını açıklamak amacıyla kullanılmıştır.

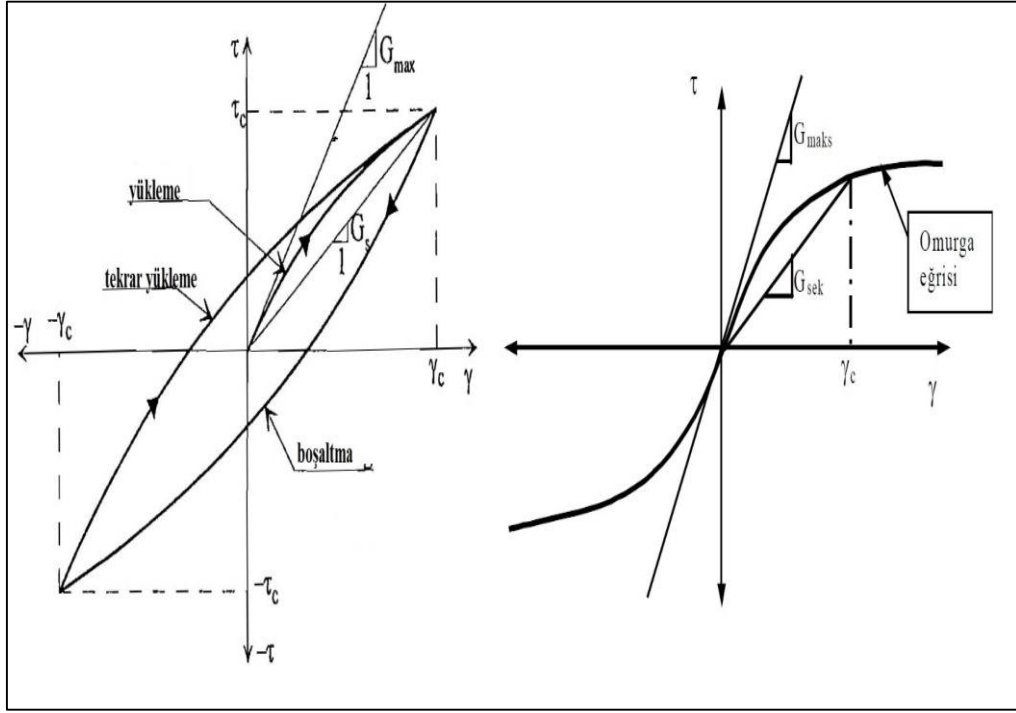
3.1. Kayma Modülü

Dinamik zemin davranışını tanımlayan malzeme karakteristikleri içerisinde kayma modülü özellikle sismik davranış analizlerinde, nonlinear zemin davranışını tanımlamada kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Zeminlerin dinamik yüklerle karşı gerilme-şekil değiştirme davranışlarını yani dinamik mukavemet özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen grafik “histerisis ilmeği” olarak tanımlanmıştır. Grafikte dikey eksen kayma gerilmesi, yatay eksen ise birim şekil değiştirmedir. Bu ilmeğin eğimi dinamik kayma modülü (G) olarak isimlendirilmiştir. Dinamik kayma modülü eşitlik olarak denklem (3.1) şeklinde de gösterilebilir.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3.1)$$

Ayrıca literatürde kayma modülünün yanı sıra, başlangıç kayma modülü (G_0), maksimum kayma modülü (G_{max}) ve secant kayma modülü (G_{sek}) gibi farklı şekillerde tanımlamalarda bulunmaktadır. Histerisis eğrisinin uç noktalarından geçen eğri “omurga eğrisi” olarak tanımlanırken bu eğriye teğet geçen doğrunun eğimi ise G_{max} olarak verilmiştir. Benzer şekilde G_{sec} de omurga eğrisinden belirlenebilmektedir. Şekil 3.1’de örnek bir zemin numunesi için histerisis ilmeği ve omurga eğrisi verilmiştir. Histerisis ilmeğinin yapısı gerilme kontrollü olarak

gerçekleştirilen deneylerde yüklemeye bağlı olarak daha büyük ve yatık olduğu gözlemlenirken, deformasyon kontrollü deneylerde ise sınır birim deformasyon değerinden sonra sabit kaldığı rapor edilmiştir [55].



Şekil 3.1. Histerisis ilmeği ve omurga eğrisi [41]

Kayma modülünün belirlenmesi amacıyla yapılan birçok laboratuvar ve arazi çalışması sonucunda birçok değişkenden etkilendiği tespit edilmiştir [65]. Genel olarak bu değişkenler denklem (3.2) de verildiği gibi, efektif çevre gerilmesi, boşluk oranı, gerilme geçmişi, doygunluk derecesi, başlangıç kayma gerilmesi, dane özellikleri, titreşim genliği, titreşim frekansı, zaman etkisi, zemin yapısı ve sıcaklık olarak tanımlanmıştır [55].

$$G = f(\sigma', e, S, H, \tau_0, C_g, A_p, F, T, O, T_k) \quad (3.2)$$

Ayrıca son yıllarda yapılan çalışmalarda efektif çevre gerilmesi, boşluk oranı, doygunluk derecesi ve kayma deformasyon genliğinin kayma modülü üzerinde daha fazla etkiye sahip olan parametreler olarak verilmektedir. Ancak bu

parametrelerin aynı anda etkileri henüz ortaya konulamamıştır [8]. Kohezyonlu zeminlerde ise aşırı konsolidasyon oranı ve plastisite indisinin kayma modülü üzerinde daha fazla etkili olduğu bilinmektedir. Kayma modülünün bazı parametreler ile değişimi şu şekilde sıralanabilir;

- Çevre basıncı arttıkça artar,
- Boşluk oranı arttıkça azalır,
- Doygunluk derecesi arttıkça azalır,
- Aşırı konsolidasyon oranı arttıkça artar,
- Plastisite indisi arttıkça aşırı konsolide killerde artar,
- Çimentolanma arttıkça artar,
- Rölatif sıklık arttıkça artar,
- Kayma gerilmesi ile azalır.

Dinamik kayma modülü üzerine yapılan deneyler sonucunda zemin tiplerine bağlı olarak değişimi genel olarak grafik ve tablolar şeklinde verilmiştir. Aşağıda verilen Çizelge 3.1'de AASHTO [66] tarafından yayınlanan kayma modülü değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çeşitli zeminler için kayma modülü değerleri [66]

Zemin Tipi	Kayma Modülü (kPa)
Sıkı Kum & Çakıl	69000 – 345000
Siltli Kum	27600 – 138000
Orta Katı Kil	6900 – 34500
Yumuşak Kil	2750 - 13750

Kayma modülünün belirlenmesi amacıyla çeşitli ampirik formüllerde geliştirilmiştir. Bu eşitlikler zeminin kohezyonlu veya kohezyonsuz olmasına bağlı olarak değişmektedir. Kohezyonsuz zeminlerde özellikle efektif çevre gerilmesi ve boşluk oranı parametrelerine bağlı olarak eşitlikler sıkça verilmiştir. Bu eşitlikler

genellikle denklem (3.3) de verilen genel formdan yararlanılarak geliştirilmiştir [67].

$$G_0 = AF(e)(\sigma'_0)^n \quad (3.3)$$

Özellikle 1963 ile 1984 arasında çeşitli araştırmacılar tarafından verilen eşitlikler yıllarca hesaplamalarda kullanılmıştır. Bu eşitlikler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kayma modülü hesabı için eşitlikler [67]

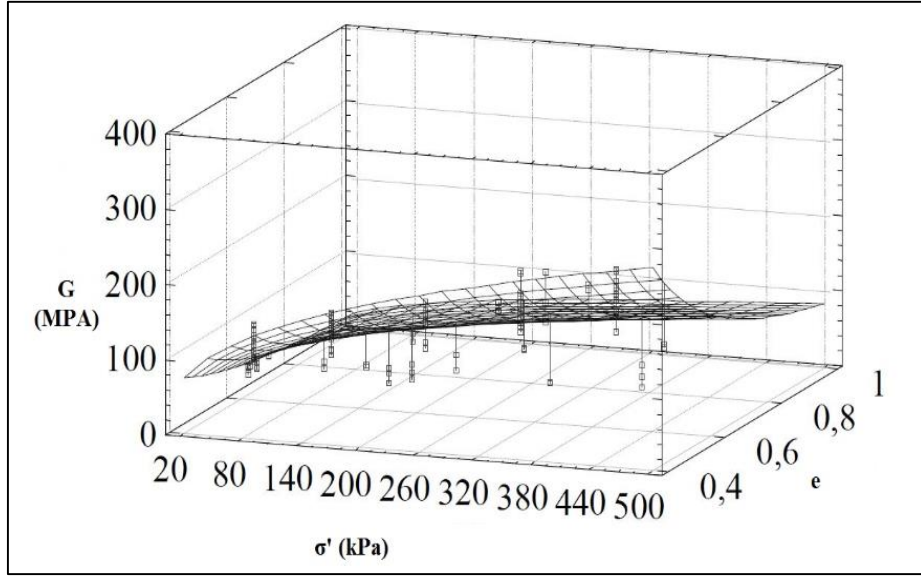
Kullanılan Yöntem	Kullanılan Malzeme	Önerilen Eşitlik	Çalışma Tarihi, Araştırmacı
Rezonant Kolon Deneyi	Yuvarlak Taneli Kum	$G = 7000 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1963, Hardin & Richart
	Köşeli Taneli Quartz	$G = 3300 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1963, Hardin & Richart
	Yuvarlak Taneli Quartz	$G = 6908 \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1968, Hardin & Black
	Köşeli Taneli Quartz	$G = 3230 \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1968, Hardin & Black
	Temiz Kum	$G = 850 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.44}$	1978, Iwasaki
	Temiz Kum	$G = 9000 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.38}$	1978, Iwasaki
	Temiz Kum	$G = 7000 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1984, Yu & Richart
Dinamik Üç Eksenli Deneyi	Temiz Kum	$G = 8400 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1980, Kokusho
Ultrasonik Pals Deneyi	Temiz Kum	$G = 8400 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1975, Shibata & Soelarno

İlerleyen yıllarda ise kayma modülü üzerinde doygunluk derecesinin etkisi göz önüne alınarak yeni eşitlikler geliştirilmiş ve geçmiş eşitlikler sınıflandırılmıştır. Çizelge 3.3’de bu eşitlikler verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kayma modülü için doyunluk derecesi içeren eşitlikler [4]

Doygunluk Durumu	Kullanılan Yöntem	Kullanılan Malzeme	Önerilen Eşitlik	Çalışma Tarihi, Araştırmacı
Kuru	Rezonant Kolon Deneyi	Ottawa Kumu	$G = 7000 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1963, Hardin & Richart
		Temiz Kum	$G = 850 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.44}$	1978, Iwasaki
		İnce-Orta Kum	$G = 2.75 \frac{(1.46 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.21} 100^{0.58}$	1996, Cascante & Santamarina
Doygun	Bender Element Deneyi	Ottawa Kumu	$G = \frac{612(100^{0.56})(2.17 - e)^2 \sigma^{0.44}}{(1 + e)}$	2000, Salgado ve ark.
		Toyoura Kumu	$G = 1255 e^{-0.18} \sigma^{0.56}$	2004, Sahaphol & Miura
		İnce Kum	$G = 2.121 \frac{(2.973 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.505}$	2005, Zhou & Chen

Son yıllarda yapılan çalışmalarda ise kayma modülüne etkiyen parametrelerin aynı anda etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler yeni yöntemlerle değerlendirilmiş ve Şekil 3.2’de verildiği gibi üç boyutlu grafikler çizilmiştir. Bu grafiklerin idealizasyonu ile elde edilen % 83 temsil başarısına sahip yeni eşitlik de denklem (3.4) ile verilmiştir [7].



Şekil 3.2. Yeni nesil kayma modülü grafikleri [7]

$$G = 2.16 \sigma^{0.4} e^{-1.26} \quad (3.4)$$

Dinamik kayma modülü ve kayma dalgası hızı arasın ilişki ise çeşitli deneyler sonucunda zemin yoğunluğuna bağlı olarak denklem (3.5) de verildiği şekilde tespit edilmiştir [64].

$$G_{maks} = \rho V_s^2 \quad (3.5)$$

Dinamik kayma modülünün standart penetrasyon deneyine bağlı değişimi ise denklem (3.6) da verildiği şekilde tespit edilmiştir [64]. Arazide yapılan çalışmalar ile laboratuvar deneyleri karşılaştırıldığında ise arazi deneylerinden elde edilen değerlerin daha yüksek olduğu çeşitli araştırmalarda rapor edilmiştir. Denklem (3.7) de arazi, laboratuvar ilişkisi verilmiştir [54].

$$G_{maks} = 5652,5 N^{0.34} \sigma^{0.4} \quad (3.6)$$

$$(G_{maks})_{arazi} = 2.67(G_{maks})_{lab}^{0.95} \quad (3.7)$$

Kohezyonlu zeminlerde kayma modülü üzerine yapılan çalışmalarda ise plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranının en önemli parametre olduğu

belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen eşitlikler Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kohezyonlu zeminler için kayma modülü eşitlikleri [44]

Kullanılan Yöntem	Kullanılan Malzeme	Önerilen Eşitlik	Çalışma Tarihi, Araştırmacı
Rezonant Kolon Deneyi	Kaolin	$G = 3231 \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1968, Hardin & Black
	Bentonit	$G = 445 \frac{(4.4 - e)^2}{(1 + e)}$	1972, Marcuson & Whals
	Kil	$G = 3230 \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5} OCR^K$	1972, Hardin & Drnevich
	Kil	$G = 9600 \frac{1}{(1 + 1.2e)^2} \sigma^{0.5}$	1999, Vrettos & Savidis
	Siltli Kum	$G = 358 \frac{1}{(e)^{1.21}} \sigma^{0.5} P^{(1-0.5)}$	1996, Delia & LAnzo
	Siltli Kil	$G = 370 \frac{1}{(0.3 + 0.7e)^2} \sigma^{0.54} P^{(1-0.54)}$	1995, Stokoe ve ark.
	Kaolin	$G = 677 \frac{1}{(0.3 + 0.7e)^2} \sigma^{0.487} P^{(1-0.419)}$	1981, Athanaspoulos
	Kil	$G = \frac{1}{(0.4 + 0.7e)} \sigma^{358-(3.8Pl)}$	1992, Kawaga
Arazi Deneyleri	Kil	$G = 5000 \frac{1}{(e)^{1.5}} \sigma^{0.5}$	1994, Athanaspoulos
	Kil	$G = 5000 \frac{1}{(e)^{1.5}} \sigma^{0.5}$	1996, Shibuya & Tanaka

3.2. Sönüm Oranı

Titreşim hareketi yapan sistemlerde titreşimin zaman içerisinde tamamlanması amacıyla sönüm oranı tabiri geliştirilmiştir. Zeminlerde ise dinamik yükler altında oluşan deformasyonlar ve enerji kayıpları sönüm oranı olarak

tanımlanmıştır. Sönüm oranı histerisis ilmeğinden denklem (3.8) de verildiği şekilde hesaplanabilmektedir.

$$D = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\text{Histerisis İlmeğinin Alanı}}{\text{Eğrinin Altında Kalan Üçgenin Alanı}} \right) \quad (3.8)$$

Sönüm oranını ile ilgili çalışmalar sonucunda çevrim sayısı ile azaldığı, yükleme frekansından etkilendiği ve arttığı Sönüm oranının bazı parametreler ile değişimi şu şekilde sıralanabilir;

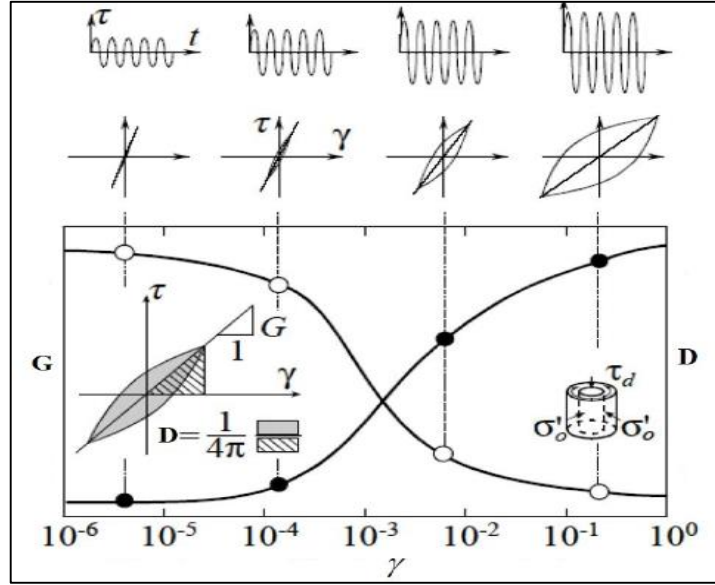
- Çevre basıncı arttıkça sabit kalır yada azalır,
- Boşluk oranı arttıkça azalır,
- Aşırı konsolidasyon oranı ile değişmez,
- Plastisite indisine arttıkça azalır,
- Çimentolanma ile azalır.

Sönüm oranının belirlenmesi amacıyla son yıllarda yapılan çalışmalarda kohezyonlu zeminler için plastisite indisine bağlı denklemler (3.9) ve (3.10) verilmiştir. [68].

$$D = 21.05 (0.99^{PI})(1.17 - \exp(-12.75 (0.99^{PI}\gamma))) \quad (3.9)$$

$$D = 0.333 \frac{1+\exp[-0.0145(PI)]}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \left(\frac{G}{G_{max}} \right) + 1 \right] \quad (3.10)$$

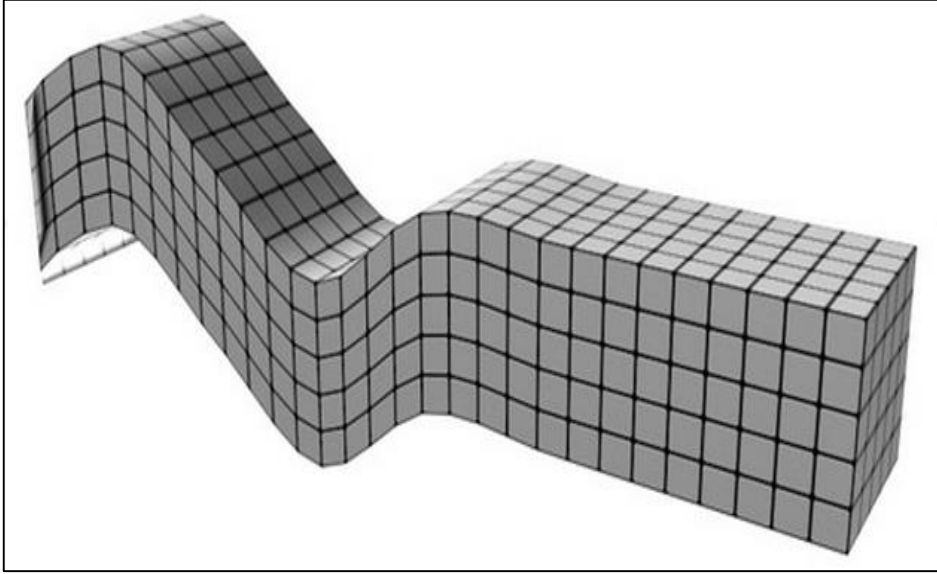
Laboratuvar ve arazi deneyleri sonucunda zeminlerin dinamik etkiler altında verdiği tepkiyi gösteren en önemli parametrelerden olan sönüm oranı ile kayma modülü arasında bağıntılar kurulmaya çalışılmıştır. Şekil 3.3'de benzer bir ilişki gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kayma modülü ve sönüm oranı ilişkisi [40]

3.3. Kayma Dalgası Hızı

Bir cisim üzerine herhangi bir gerilme uygulandığında dalgalar yolu ile bu gerilme tüm cisim yapısı içerisine dağılmaktadır [64]. Zeminler üzerine etkileyen sismik dalgalar; cisim dalgaları ve yüzey dalgaları olarak tanımlanmıştır [63]. Cisimde kayma deformasyonlarına neden olan ve hızı göreceli olarak daha az olan S dalgaları kayma dalgası, ikincil dalga ve enine dalga gibi isimlerle bilinmektedir. S dalga hareketi Şekil 3.4'de verilmiştir. Depremler sırasında yer kabuğu içerisinde oluşan cisim dalgaları yeryüzünde salınımlar oluştururlar ve geçtikleri ortamlarda değişikliklere sebep olurlar. Zeminlerde oluşan deformasyonlar ve yapılarda meydana gelen hasarlar nedeniyle dalga hızları araştırma konusu olmuştur. Yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları sonrası zemin tiplerine bağlı olarak dalga hızları belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.4. S dalgası hareketi [69]

Cisim dalgası hızlarından ve dalga karakteristiklerinden zemin litolojisi, doyumluk derecesi, kayma modülü, sönüm oranı, dalga dağılımı ve birim deformasyon derecesi gibi parametreler belirlenebilmektedir [63]. Literatürde dalga hızları ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Arazi ve laboratuvarında dalga hızlarının ve dalga hızlarına etkiyen parametrelerin belirlenmesi, kayma dalgası hızı ile sıvılaşma tahmini, kayma modülü ve kayma dalgası hızının ilişkisinin tespiti vb. konular araştırmacılar tarafından sıkça irdelenmektedir [70]. Dalga hızlarının belirlenmesi ile içinden geçtiği zemin dinamik karakteristiği hakkında yorum yapılabilmektedir. Literatürde kayma dalgası hızları ile zeminin elastisite modülü (E) ve kayma modülü (G) arasında verilen eşitlikler ile zeminlerin gerilme deformasyon özellikleri de belirlenebilmektedir [64]. Aşağıda denklem (3.11) ve (3.12) de literatürde sıkça kullanılan eşitliklerden bazıları verilmiştir.

$$V_s = \sqrt{G/\rho} \quad (3.11)$$

$$V_s = \sqrt{E/(2\rho(1 + \mu))} \quad (3.12)$$

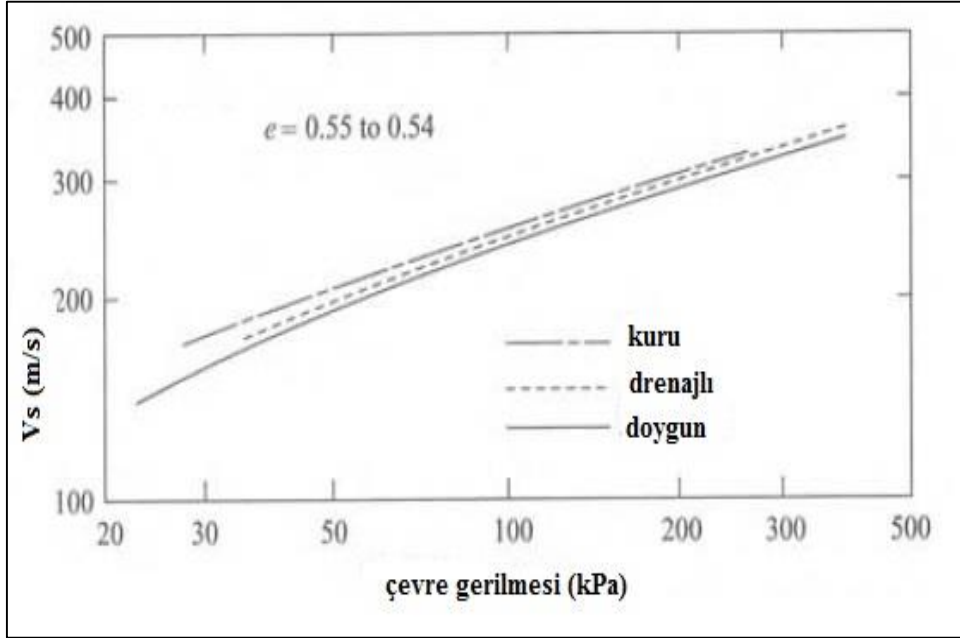
Dinamik deneyler sonucunda kayma dalgası ile ilgili şu tespitler yapılmıştır [2,4,5,8,19, 35,36];

- Sıvılaşma direnci ile kayma dalgası hızı arasında ilişki vardır.
- Boşluk oranı arttıka kayma dalgası hızı azalım göstermekte ve kuru numunelerde doygun numunelere göre daha yüksek kayma dalgası hızı tespit edilmektedir.
- Ayrıca, aynı boşluk oranı değerinde ince taneli kumların kalın taneli kumlara göre daha yüksek kayma dalgası hızı değerlerine sahip olmaktadır.
- Granüler malzemelerde küresellik, yuvarlaklık vb. tane morfolojisi ile tane ebatlarının kayma dalgası hızını etkilemektedir
- evre basıncı, kuru ve doygun hal şartlarının da kayma dalgası hızı üzerinde etkisi yüksektir.
- Arazi lmleri ile Vs tahmininde derinlik, jeolojik yaş ve rölatif tane boyutunun etkisi belirlenmelidir.
- Zeminlerin su içeriği azalırken kayma dalgası hızı ve rijitliklerinde artış gözlemlenmiştir.

Yapılan arazi ve laboratuvar deneyleri sonucunda kayma dalgası hızının zemin tipine bağlı değişimi yaklaşık olarak belirlenmiş ve izelge 3.5’de aralık olarak verilmiştir. Ayrıca kayma dalgası hızının boşluk oranı, efektif evre gerilmesi ve doygunluk ile değişimi grafiksel olarak çeşitli çalışmalarda ifade edilmiştir. şekil 3.5’de örnek bir grafik verilmiştir.

Çizelge 3.5. Zeminlerin ortalama kayma dalgası hızları [64]

Zemin Tipi	Kayma Dalgası Hızı (Vs)
İnce Kum	90-150 m/s
Sıkı Kum	220-250 m/s
Çakıl	180-330 m/s
Nemli Kil	500-550 m/s
Granit	2130-3360 m/s



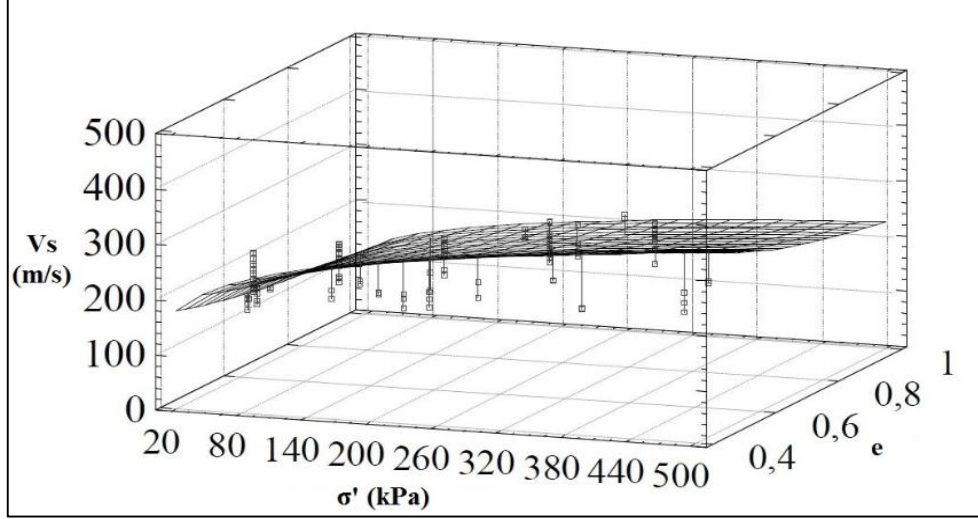
Şekil 3.5. Kayma dalgası hızı değişim grafiği [64]

Ayrıca yapılan deneyler sonucunda kayma dalgası üzerinde etkiyen faktörler göz önüne alınarak yeni eşitlikler geliştirilmiştir. Çizelge 3.6'da bu eşitlikler verilmiştir.

Çizelge 3.6. Kayma dalgası hızı için eşitlikler [4]

Doygunluk Durumu	Kullanılan Yöntem	Kullanılan Malzeme	Önerilen Eşitlik	Çalışma Tarihi, Araştırmacı
Kuru	Bender Element	Ottowa Kumu	$V_s = (120.9 - 59e)\sigma^{0.25}$	1984, DeAlba ve ark.
		Silika Kumu	$V_s = 153.3\sigma^{0.23}$	1998, Brocanelli & Rinaldi
		Nevada Kumu	$V_s = 67.9\sigma^{0.25}$	2000, Arulnathan ve ark.
		Silika Kumu	$V_s = 91\sigma^{0.211}$	2004, Ortiz
		Silika Kumu	$V_s = 120\sigma^{0.12}$	2005, Ismail ve ark,
	Rezonant Kolon	Silika Kumu	$V_s = \sqrt{\frac{G(1 - S_r)^\eta}{\rho_w G_s (1 - n) + \rho_w n S_r}}$	1996, Cascante & Santamarina
		İnce Kum	$V_s = 78\sigma^{0.23}$	2002, Fam ve ark.
Doygun	Bender Element	İnce Kum	$V_s = (91 - 44.6e)\sigma^{0.25}$	2004, Huang ve ark.
		Silika Kumu	$V_s = 78\sigma^{0.28}$	2005, Ismail ve ark,
		Toyoura Kumu	$V_s = \sqrt{\frac{4786 \sigma^{0.256} (1 + e)}{G_s e^{1.16}}}$	2005, Mohsin & Airey
	Rezonant Kolon	İnce Kum	$V_s = (135 - 86.6e)\sigma^{0.25}$	1996, Wei ve ark.
		İnce-Kaba Kum	$V_s = (68.5 - 65.5e)\sigma^{0.25}$	2000, Chien & oh

Son yıllarda yapılan çalışmalarda ise kayma dalgası hızına etkiyen parametrelerin yeni yöntemlerle değerlendirilmesi ile Şekil 3.6'da verildiği gibi üç boyutlu grafikler çizilmiştir. Bu grafiklerin idealizasyonu ile elde edilen % 82 temsil başarı oranına sahip yeni eşitlik de denklem (3.13) ile verilmiştir [7].



Şekil 3.6. Yeni nesil kayma dalgası hızı grafikleri [7]

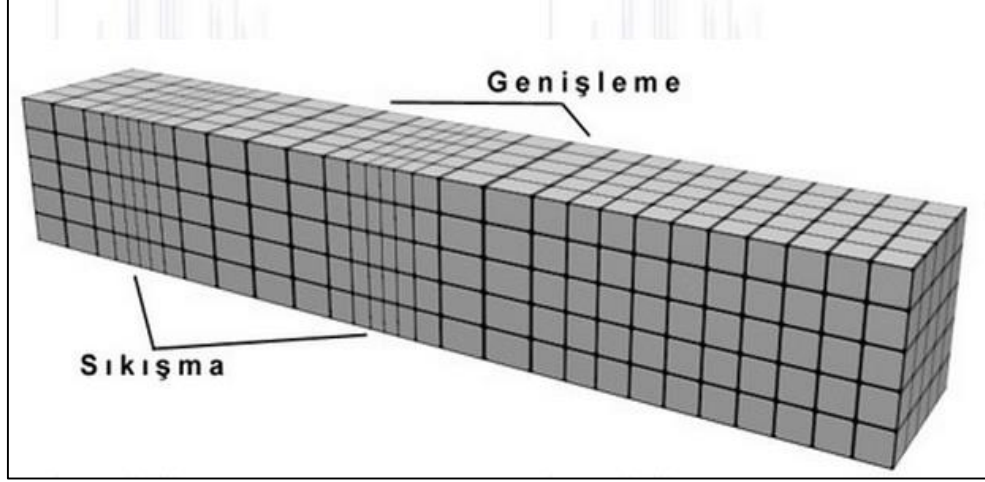
$$V_s = 60.87 \sigma^{0.21} e^{-0.46} \quad (3.13)$$

3.4. Basınç Dalgası Hızı

Cisim dalgalarından içinden geçtiği cismin sıkışma ve genişlemesine neden olan hızı en yüksek olan P dalgası, basınç dalgası, primer dalga ve boyuna dalga şeklinde de isimlendirilmektedir. Basınç dalga hareketi Şekil 3.7'de verilmiştir. Basınç dalgası, kayma dalgasında olduğu gibi içinden geçtiği zeminin dinamik karakteristiği hakkında bilgi vermektedir. Basınç dalgası hızı kullanarak sıvılaşma mukavemetini belirlenebilmektedir [20]. Literatürde basınç dalgası dalga hızları ile zeminin elastisite modülü (E), poisson oranı (μ) ve lame sabiti (λ) arasında verilen eşitlikle ile zeminlerin gerilme deformasyon özellikleri de belirlenebilmektedir [64]. Aşağıda denklem (3.14) ve (3.15) de literatürde sıkça kullanılan eşitliklerden bazıları verilmiştir.

$$V_p = \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho} \quad (3.14)$$

$$V_p = \sqrt{(E(1 - \mu))/(\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu))} \quad (3.15)$$



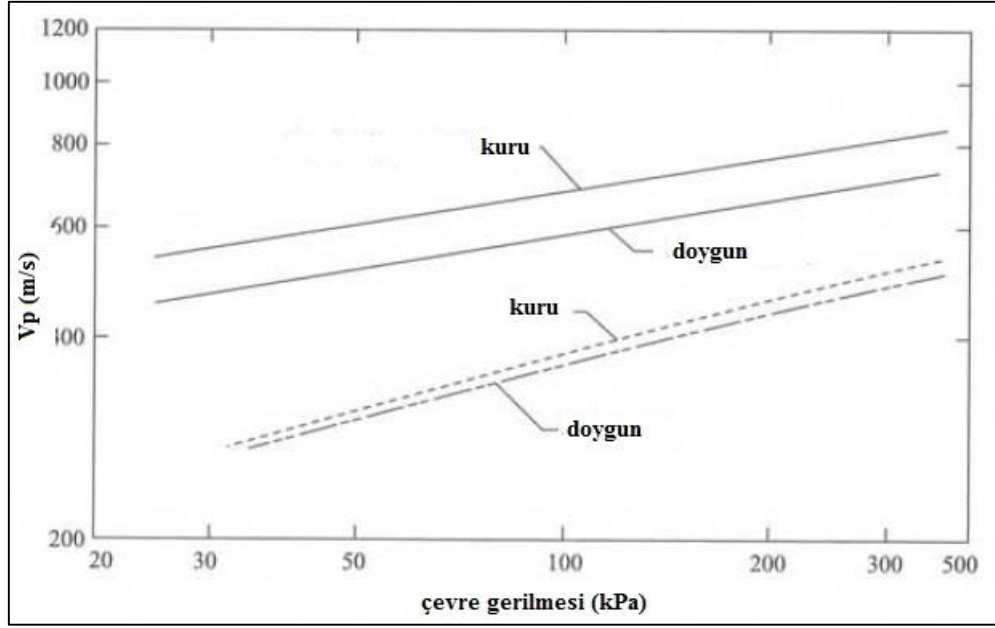
Şekil 3.7. P dalgası hareketi [69]

Yapılan arazi ve laboratuvar deneyleri sonucunda basınç dalgası hızının zemin tipine bağlı değişimi yaklaşık olarak belirlenmiş ve Çizelge 3.7’de aralık olarak verilmiştir.

Çizelge 3.7. Zeminlerin ortalama basınç dalgası hızları [64]

Zemin Tipi	Basınç Dalgası Hızı (Vp)
İnce Kum	300-330 m/s
Sıkı Kum	450-470 m/s
Çakıl	760-800 m/s
Nemli Kil	1200-1380 m/s
Granit	3960-5490 m/s

Ayrıca basınç dalgası hızının boşluk oranı, efektif çevre gerilmesi ve doygunluk ile değişimi grafiksel olarak çeşitli çalışmalarda ifade edilmiştir. Şekil 3.8’de örnek bir grafik verilmiştir.



Şekil 3.8. Basınç dalgası hızı değişim grafiği [64]

Literatürde basınç dalgası hesapları genellikle Poisson oranı ve kayma dalgası kullanılarak denklem (3.14) de verilen eşitlik ile yapılmıştır. Bazı çalışmalarda ise her iki dalga ölçülüp zeminlerin Poisson oranları hesaplanmıştır.

$$V_p/V_s = \sqrt{(2(1 - \mu))/(1 - 2\mu)} \quad (3.14)$$

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

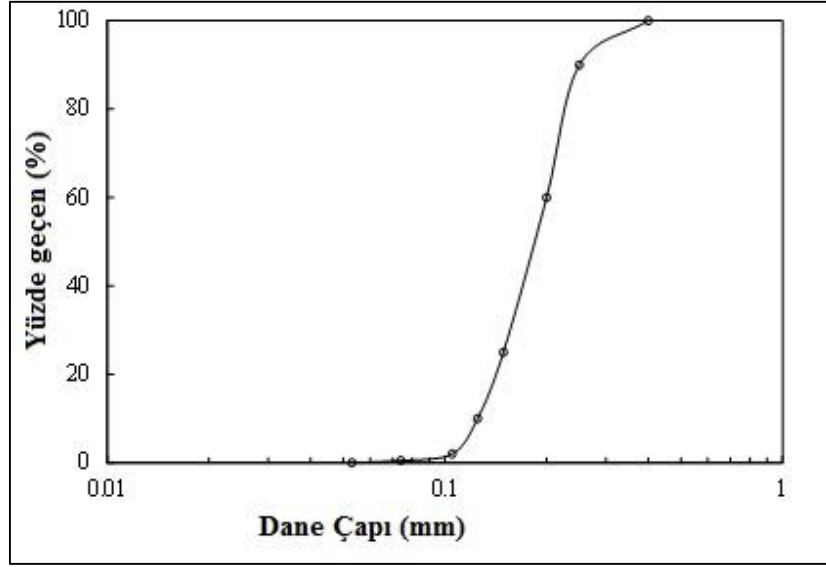
Bu bölümde tez çalışması kapsamında zeminlerin dinamik özelliklerini açıklamak amacıyla kullanılan en önemli parametreler olan kayma modülü ile kayma ve basınç dalgası hızlarının tespit edilmesi anlatılacaktır. Literatürde bu parametreleri en çok etkileyen değişkenler olarak verilen efektif çevre gerilmesi, boşluk oranı, rölatif sıklık ve doygunluk derecesine bağlı değişimlerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneyler sunulacaktır. Deneysel çalışmalar iki bölümden oluşmaktadır, ilk bölüm deney cihazının performansını ölçmek ve literatür ile karşılaştırmak amacıyla yapılan başlangıç kalibrasyon deneyleridir. İkinci bölüm ise dinamik davranışın değişimi üzerindeki etmenleri tespit amacıyla yapılan dinamik deneyleri kapsamaktadır. Deney sonuçları ve ileri yapıcı modeller kullanılarak açıklanacaktır.

4.1. Malzeme Özellikleri

Dinamik deneylerde kullanılan çalışmalar için literatürde sıkça kullanılan Toyoura kumu tercih edilmiştir. Toyoura kumu non-plastik, ince taneli ve temiz kum olarak tanımlanmıştır. Toyoura kumu için diğer bazı özellikler Tablo 2’de verilmiştir. Ayrıca tane çapı dağılımı eğrisi de Şekil 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Toyoura kumu genel özellikleri

Birleştirilmiş Zemin Sınıfı, USCS	SP
Ortalama Tane Çapı, D_{50}	0,26 mm
Efektif Çap, D_{10}	0,21 mm
Üniformluk Katsayısı, C_u	1,33
Eğrisellik Katsayısı, C_c	0,98
Maksimum Yoğunluk, ρ_{maks}	1.34 Mg/m ³
Minimum Yoğunluk, ρ_{min}	1.64 Mg/m ³
Maksimum Boşluk Oranı, e_{maks}	0,98
Minimum Boşluk Oranı, e_{min}	0,62



Şekil 4.1. Toyoura kumu tane çapı dağılımı

Deneylerde kullanılan zemin numuneleri 70 mm çap ve 145 mm uzunluğa sahip olup deney programında belirlenen rölatif sıklık ve doygunluk değerlerine göre ahşap kompaktör ile sıkıştırılarak ve nemli yerleştirme yöntemine uygun olarak hazırlanmıştır. Ayrıca tüm deney aşamaları ASTM D4015-07 [71] standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Rezonant kolon deney sonuçlarının numune hazırlama yöntemlerinden (yağmurlama, sıkıştırma, nemlendirme, ıslak sıkıştırma vb) bağımsız olduğu çeşitli araştırmalarda rapor edilmiştir [3], [38]. Bu çalışmada numuneler ıslak halde 10 mm'lik tabakalar halinde numune kalıbına yerleştirilmiş ve ahşap tokmakla sıkıştırılmıştır. Numuneler standart teknikler kullanılarak doyurulmuş ve konsolide edilmiştir. Doymunluk alt başlıktan üst başlığa doğru su geçirmek suretiyle yapılmaktadır. Deney başlangıcında numuneyi örselememek için düşük hidrolik eğimlerde su geçirilmiştir. Skempton B değeri 0.95 ve üzeri olan numunelerde deneyler yapılmıştır. Konsolidasyon aşaması da hacim değişimi gözlenmeyene kadar devam ettirilmiştir.

4.2. Deney Sistemi

Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Deprem Mühendisliği laboratuvarında bulunan GDS marka rezonant kolon cihazı deneylerde kullanılmıştır. Cihaz sabit-serbest sistem şeklinde tasarlanmıştır, yani numunenin alt kısmı sabit iken üst kısmı serbesttir. Silindirik numune dalga uyarımına tabi tutulduğunda serbest uçtan dalga hareketinin hızı ölçülür ve çeşitli matematiksel eşitlikler ile kayma dalgası ve basınç dalgası hızının yanı sıra rezonant frekansı ve kayma modülü belirlenebilir. Cihazın görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Rezonant kolon cihazı

Rezonant kolon deneyinde, silindir şeklindeki numune üç eksenli bir hücreye yerleştirilip, arazi başlangıç gerilme koşullarında konsolide edilir. Frekans ve genliğin kontrol edilebildiği yükleme sisteminde, zemin kolonuna genellikle normal modların birincisinde boyuna veya burulmalı olacak şekilde, eğilme veya burulma kuvveti uygulanır. Birinci temel mod tespit edildikten sonra, dalga yayılım teorisi kullanılarak rezonant frekansı ve bu frekansa bağlı olarak kayma dalgası hızı, numune boyutları ve sürücü sistemin polar atalet momentinden hesaplanır. Titreşim sırasında oluşan kayma deformasyon genliği, ivme genliği titreşimin frekansından hesaplanır. Deney sistemlerinde genellikle numunenin üst kısmına bir

sürücü sistemi yerleştirilmekte ve numuneye farklı frekans ve genliklerde dinamik tork uygulanmaktadır [72].

Çalışmada kullanılan cihaz “sabit-serbest sistem”, diğer bir deyişle numune alt kısmı sabit üst kısmı serbest olduğu sistemdir. Şekil 4.3’de görülen cihazın sürücü sistemi elektromanyetik olup, neodimyum-demir-bor (NdReB) mıknatıslardan oluşmaktadır. Deney sırasında mıknatıslar ve mıknatısları çevreleyen bobinler arasında manyetik alan yaratılarak numuneye üst başlıktan tork uygulanmakta ve ivme ve deformasyon yine üst başlıktaki ivme ve deformasyon ölçerden ölçülmektedir. Numunede üst ve alt başlıklarda bulunan drenaj kanalları ile numune suya doyurulmakta, konsolide edilebilmekte ve alt başlıktan deney sırasında oluşan boşluk suyu basınçları ölçülebilmektedir.



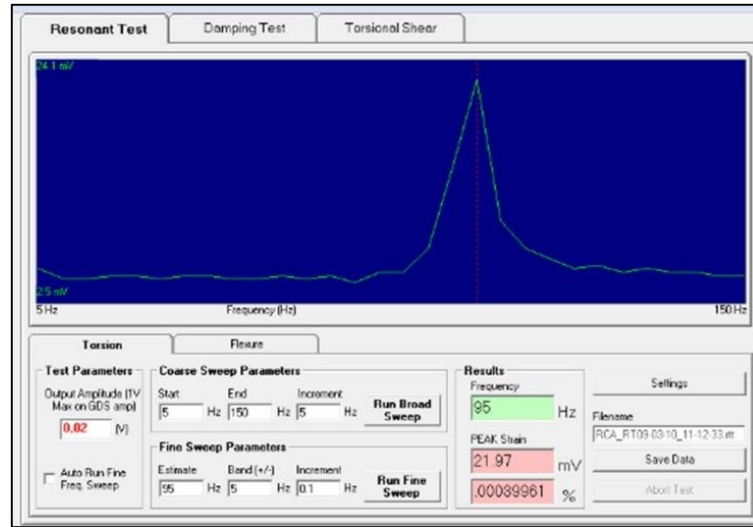
Şekil 4.3. Cihazın sürücü sistemi

Deneyin uygulanması sırasında ise; burulma veya eğilme kuvveti numunenin üst kısmından elektromanyetik sistem aracılığı ile uygulanmasının ardından uygulanan frekans ve ivmeölçer sonuçları cihazın programı aracılığı ile Şekil 4.4 ve 4.5’de gösterildiği gibi grafik olarak çizilir. Yine maksimum değer rezonant frekans değeri olarak gösterilir. Aşağıda verilen eşitlikler yardımı ile S ve P dalgası

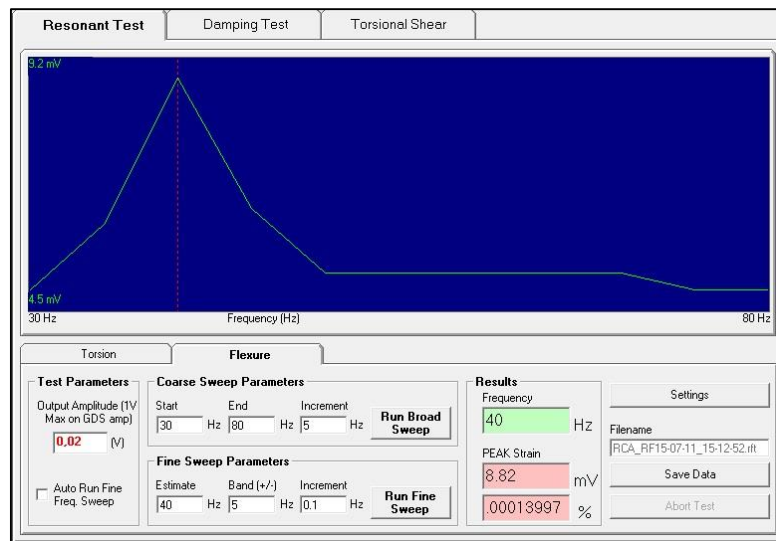
hızları hesaplanır. Eşitliklerde; f ; deneyde bulunan numunenin doğal frekansı (Hz), l ; numune boyu (m), β ; cihazın sürücü sistemi, numunenin polar momentlerine bağlı parametre, V_{rod} sınırlı ortamda boyuna dalga hızı ve μ ise Poisson oranını ifade etmektedir.

$$V_s = 2\pi fl/\beta \quad (4.1)$$

$$V_p = V_{rod} \sqrt{(1 - \mu)/((1 + \mu)(1 - 2\mu))} \quad (4.2)$$



Şekil 4.4. Burulmalı uyarım deneyi örneği



Şekil 4.5. Eğilme uyarım deneyi örneği

Cihazda ölçülen rezonant frekans değerinin bulunması için izlenen metot ise yoğunluğu $\rho=2.0 \text{ Mg/m}^3$ olan bir numune için aşağıda verilmiştir. Buna göre numune çapı 70 mm ve yüksekliği 145 mm olmak üzere denklem (4.3) ve (4.4) şu şekilde elde edilmektedir.

$$I_0 = \text{Sistemin Polar Atalet Momenti} = 0,0037 \text{ kg} - \text{m}^2$$

$$V_{\text{numune}}(\text{m}^3) = 5,3878 \times 10^{-4}$$

Kalıba konan malzeme miktarı ve polar atalet momenti;

$$m = V \times \rho = 1,07756 \text{ kg}$$

$$I = \frac{md^2}{8} = \frac{1,07756 \times 0,07^2}{8} = 6,60 \times 10^{-4} \text{ kg} - \text{m}^2$$

$$\frac{I}{I_0} = \frac{6,60 \times 10^{-4}}{0,0037} = 0,17838$$

β değeri;

$$\frac{I}{I_0} = \frac{6,60 \times 10^{-4}}{0,0037} = 0,17838 \rightarrow \beta$$

$$\beta = 0,9548 \times (0,17838)^{0,4892} = 0,41084$$

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega h}{V_s} \tan\left(\frac{\omega h}{V_s}\right), \quad \frac{\omega h}{V_s} = \beta \quad (4.3)$$

$$\beta = \frac{\omega h}{V_s} = \frac{2\pi f h}{V_s} \quad (4.4)$$

4.3. Kalibrasyon Deneyleri

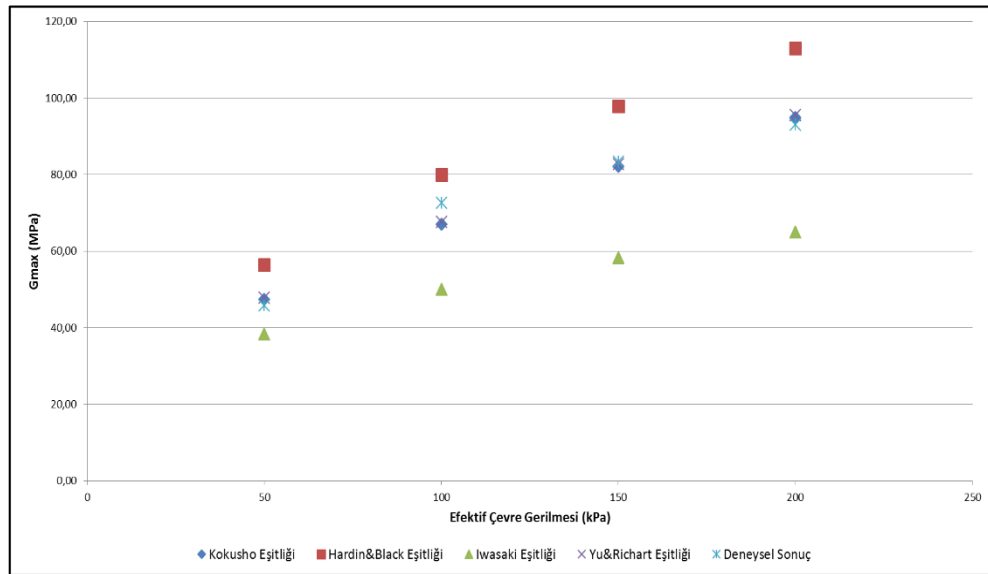
Çalışma kapsamında yapılacak deneylere başlamadan önce, deney aletinin performansının ve kalibrasyonunun ölçülmesi amacıyla bir seri rezonant kolon deneyi yapılmış ve sonuçlar geçmiş eşitlikler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bölüm zemin dinamiği laboratuvarında mevcut bulunan dinamik üç eksenli deneyi ile kayma modülü ölçümü yapılmış ve elde edilen sonuçlar rezonant kolon deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Son olarak kayma dalgası hızı ölçümü karşılaştırması için bir seri bender eleman deneyi gerçekleştirilmiştir.

Toyoura kumu kullanılarak tam doymun olarak hazırlanan numuneler farklı efektif çevre basınçlar altında deneylere tabi tutulmuş ve numunelerin rezonant kolon deneyi ile dinamik kayma modülü değerleri belirlenmiştir. Deney parametrelerinin detayları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

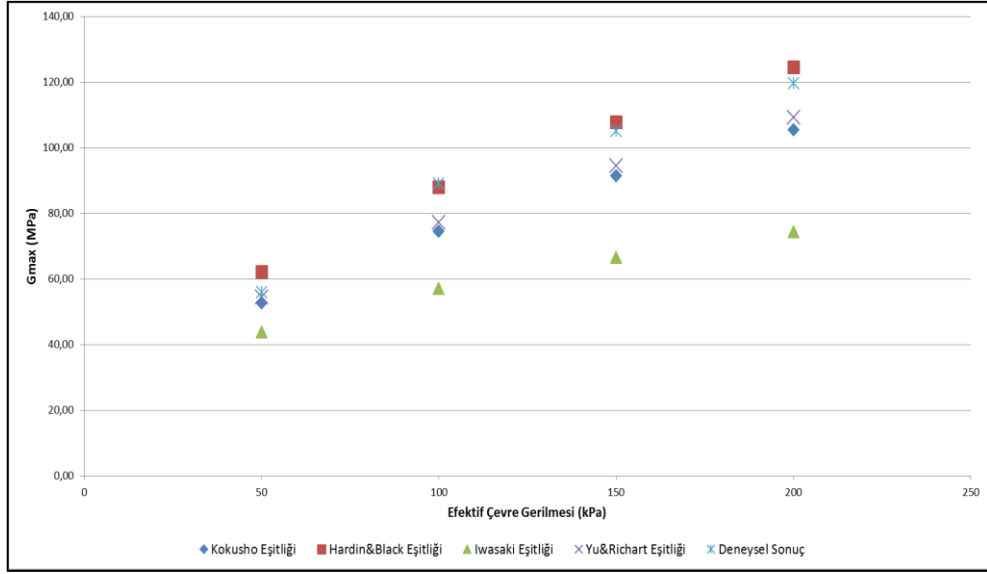
Çizelge 4.2. Karşılaştırma deneyleri detayları

Deney No	Boşluk Oranı	Rölatif Sıklık (%)	Efektif Çevre Basıncı (kPa)
I-A	0.8377	40	50 - 100 - 150 - 200
I-B	0.7717	60	50 - 100 - 150 - 200
I-C	0.7004	80	50 - 100 - 150 - 200

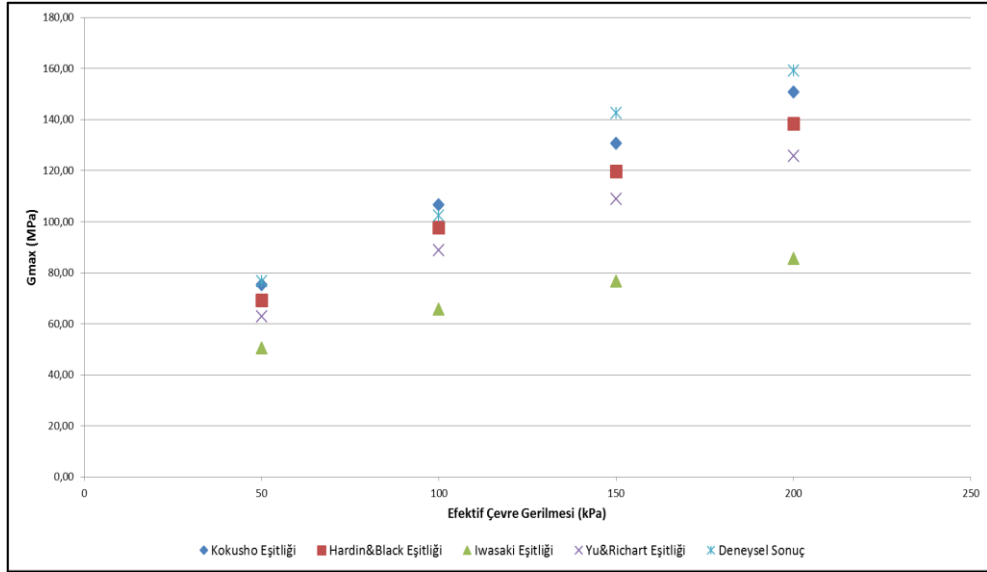
Deneyler sonucunda belirlenen kayma modülü değerleri Çizelge 3.2’de verilen Kokusho, Hardin&Black, Iwasaki ve Yu&Richart eşitlikleri ile hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları için çizilen grafikler Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde deneysel verilerin eşitlikler ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6. Deney I-A sonuçları



Şekil 4.7. Deney I-B sonuçları



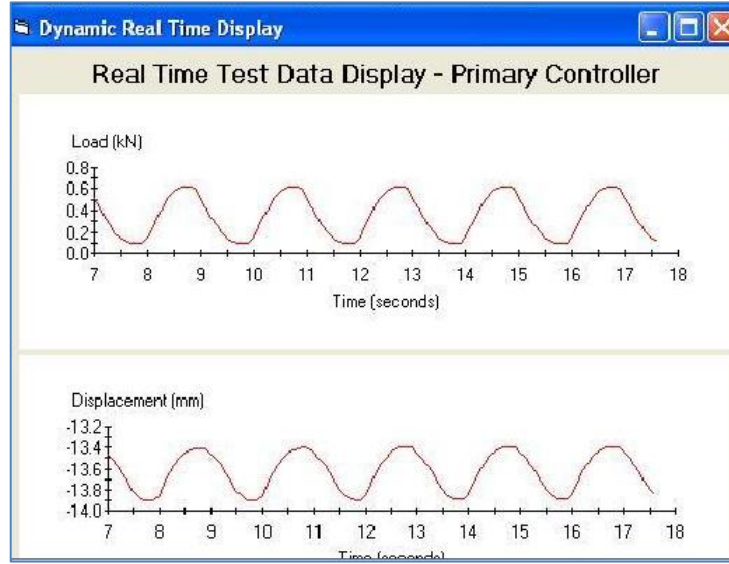
Şekil 4.8. Deney I-C sonuçları

Dinamik üç eksenli deneyi için Toyoura kumu ve Adapazarı silti ağırlıkça eşit oranda karıştırılarak ve tam doygun olarak hazırlanan numunelerin dinamik kayma modülü değerleri belirlenmiştir. Deneyler gerilme kontrollü ve yük kontrollü olarak tekrarlanmıştır. Deney parametrelerinin detayları Çizelge 4.3'de

verilmiştir. Dinamik üç eksenli deneyi sinüzoidal yükleme grafiği Şekil 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.3. Dinamik üç eksenli deneyleri detayları

Deney No	Doygunluk (%)	Efektif Çevre Basıncı (kPa)
II-A	100	100
II-B	100	100
II-C	100	100

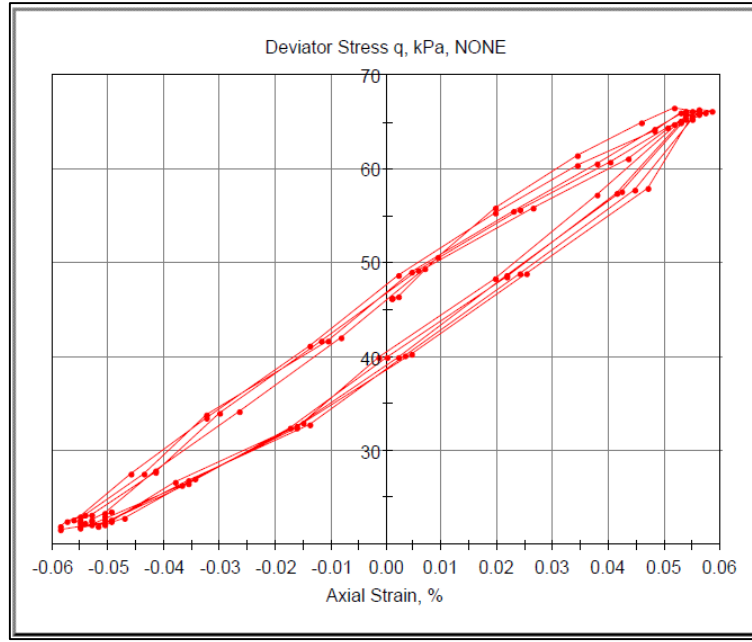


Şekil 4.9. Dinamik üç eksenli deneyi sinüzoidal yükleme

Deneyler sonucunda elde edilen histerisis ilmeği grafiklerinden dinamik kayma modülü değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4.10’da örnek histerisis ilmeği grafiği verilmiştir. Elde edilen dinamik kayma modülü değerleri karşılaştırıldığında rezonant kolon deneyi ile elde edilen değerler arasında yaklaşık % 10 fark olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun ise laboratuvar şartları ve alan hesaplama yönteminin eksikliği gibi nedenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çizelge 4.4’de görülebilen bu farkın ihmal edilebilecek boyutlarda olduğu ve literatür ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

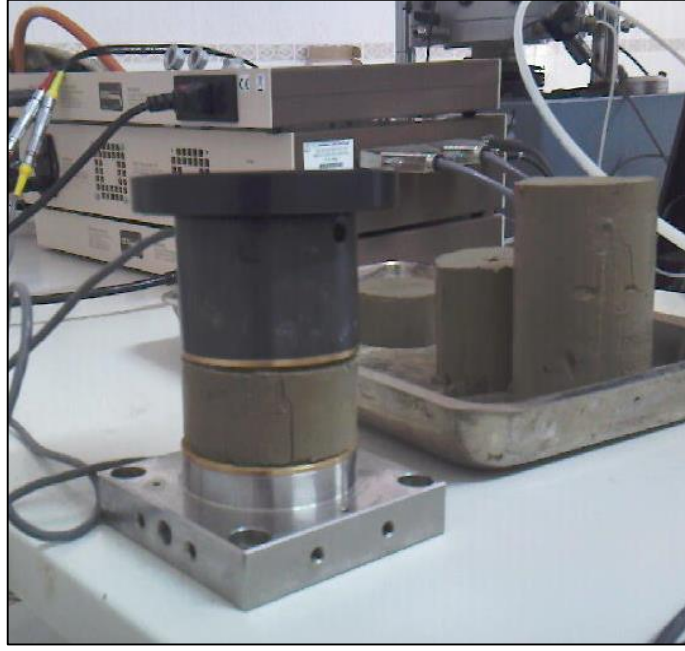
Çizelge 4.4. Dinamik üç eksenli sonuçları karşılaştırması

Deney No	G_{max} (Rezonant Kolon)	G_{max} (Dinamik Üç Eksenli)
II-A	49.50 MPa	45.33 MPa
II-B	51.05 MPa	45.01 MPa
II-C	50.42 MPa	44.89 MPa

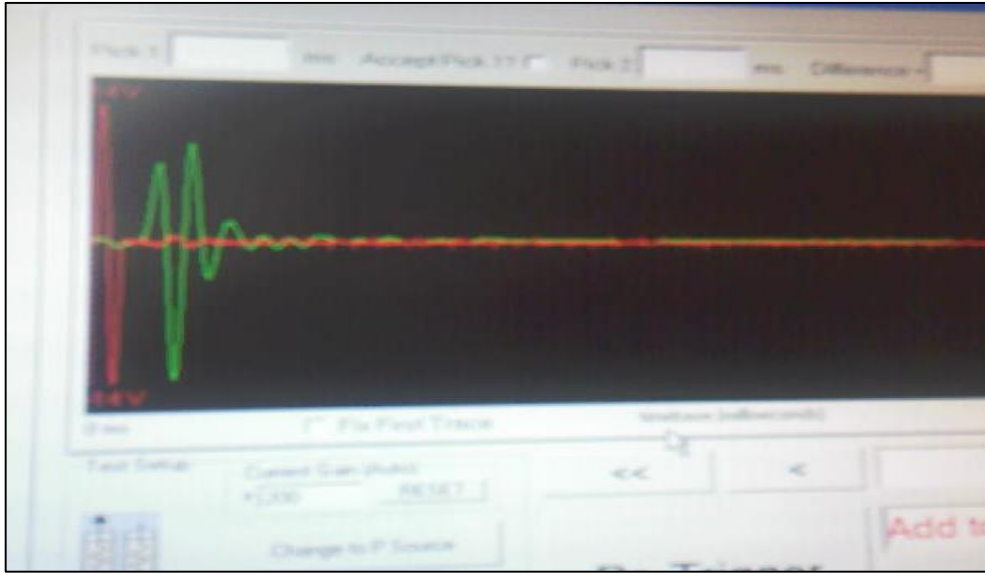


Şekil 4.10. Örnek histerisis ilmeği grafiği

Bender eleman deneyi için Ankara kilinden hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Kısmi doygun olarak hazırlanan numuneler 100 kPa efektif çevre gerilmesi altında konsolide edildikten sonra deneylere tabi tutulmuştur. Bender eleman ve rezonant kolon deney sonuçlarında elde edilen kayma dalgası hızı değerleri karşılaştırılmıştır. Bender eleman deneyi uygulaması Şekil 4.11’de verilmiştir. Bende eleman deneyi için deney numunelerine önce dinamik üç eksenli aleti içerisinde çevre gerilmesi uygulanmış daha sonra uyarım dalgaları verilmiştir. Bender eleman deneyinde elde edilen kayma dalgası hızının ölçüm grafiği örneği ise Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Bender eleman deneyi uygulaması



Şekil 4.12. Bender eleman deneyinde kayma dalgası hızı ölçümü

Elde edilen dinamik kayma dalgası hızı değerleri karşılaştırıldığında rezonant kolon deneyi ile elde edilen değerler arasında yaklaşık % 30 fark olduğu gözlemlenmiştir. Bu duruma ise örselenme, laboratuvar şartları ve bender eleman numunelerin boyutlarının etkisi neden olmuştur. Özellikle üç eksenli deney cihazı

içerisinde çevre gerilmesine maruz bırakıldıktan sonra alınıp bender eleman cihazına yerleştirilmesi nedeniyle arada geçen zamanın ve örselenmenin deney sonuçlarını etkilediği düşünülmektedir. Çizelge 4.5’de sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 4.5. Bender eleman sonuçları karşılaştırması

Deney No	V_s (Rezonant Kolon)	V_s (Bender Eleman)
III-A	279.99 m/s	209.02 m/s
III-B	285.15 m/s	211.65 m/s
III-C	283.24 m/s	207.41 m/s

Gerçekleştirilen başlangıç deneyleri sonucunda Rezonant kolon deney sisteminin hedeflenen çalışma için gerekli performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca cihazın dinamik davranışı açıklamakta kullanılan eşdeğer doğrusal modeller ve tekrarlı doğrusal olmayan modelleri başarı ile simule edebildiği sonucuna varılmıştır.

4.4. Deney Aşamaları

Kalibrasyon deneylerinin tamamlanmasının ardından tez çalışması için amaçlanan hedefler doğrultusunda özellikle kayma modülü, kayma dalgası hızı, basınç dalgası hızı gibi zemin dinamik parametreleri üzerinde literatürde sıkça sözü edilen doygunluk, çevre basıncı, rölatif sıkılık gibi zemin özelliklerinin etkilerini belirleme çalışmalarına başlanmıştır. Zeminlerin davranışlarını belirleyen bu parametreler literatürde şu şekilde tanımlanmıştır. Zemin yapısı; taneler ve bu taneler arasındaki boşluklarda bulunan hava ve sudan oluşmaktadır. **Boşluk oranı (e)**; zeminin içerdiği boşluk hacminin tanelerin hacmine oranı olarak ifade edilir. **Doygunluk derecesi (S)** zemin yapısı içerisinde suyun kapladığı hacmin boşlukların hacmine oranının yüzde olarak ifadesidir. **Rölatif Sıkılık (Dr)** ise kumlu zeminlerde kumun arazideki doğal birim hacim ağırlığı ile laboratuvarında ölçülen en sıkı ve en gevşek durumlardaki birim hacim ağırlıklarının

karşılaştırılması ile elde edilen sınıflandırma parametresidir [73]. Bu parametrelerin denklem olarak ifadeleri ise (4.5), (4.6) ve (4.7) ile verilmiştir.

$$e = \frac{V_{boşluk}}{V_{tane}} \quad (4.5)$$

$$S = \frac{V_{su}}{V_{boşluk}} 100 \quad (4.6)$$

$$Dr = \frac{e_{max} - e_{doğal}}{e_{max} - e_{min}} \quad (4.7)$$

Kum zeminlerde G, P ve S dalgalarının değişiminin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada farklı rölatif yoğunluk ve doygunluk derecelerinde hazırlanan numuneler farklı efektif çevre basınçları altında deneylere tabi tutulmuştur. Deney parametrelerinin detayları Çizelge 4.6’da verilmiştir. Tüm deney aşamaları ASTM D4015-07 [71] standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler düşük çevre basınçlarından başlanarak gerçekleştirilmiş, ilgili çevre basınçlarında elastik parametreler ölçüldükten sonra bir üst basınç seviyesine geçilmiş ve aynı işlemler bu basınç seviyesinde de tekrarlanmıştır.

Çizelge 4.6. Deney parametreleri

Deney No	Rölatif Sıklık (%)	Doygunluk Derecesi (%)	Efektif Çevre Basıncı (kPa)
1	66	35	50 - 100 -150 - 200
2	40	40	50 - 100 -150 - 200
3	60	40	50 - 100 -150 - 200
4	80	40	50 - 100 -150 - 200
5	80	50	50 - 100 -150 - 200
6	40	60	50 - 100 -150 - 200
7	60	60	50 - 100 -150 - 200
8	80	60	50 - 100 -150 - 200
9	80	65	50 - 100 -150 - 200
10	50	70	50 - 100 -150 - 200

11	40	80	50 - 100 -150 - 200
12	50	80	50 - 100 -150 - 200
13	60	80	50 - 100 -150 - 200
14	80	80	50 - 100 -150 - 200
15	40	100	50 - 100 -150 - 200
16	60	100	50 - 100 -150 - 200
17	80	100	50 - 100 -150 - 200
18	80	0	50 - 100 -150 - 200
19	60	0	50 - 100 -150 - 200
20	50	0	50 - 100 -150 - 200
21	40	0	50 - 100 -150 - 200

Rezonant kolon deney cihazı ile yukarıda verilen program dâhilinde deneyler gerçekleştirilmiş, numunelerin rezonant frekans değerleri bulunmuş, ilgili eşitlikler kullanılarak kayma modülü, kayma dalgası hızı ve basınç dalgası hızı değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde kayma modülü değerlerinin 35 MPa ile 166 MPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir. S dalgası hızlarının 155 m/s ile 326 m/s arasında P dalgası hızları ise 287 m/s ile 564 m/s arasında ölçülmüştür. Deney sonuçları irdelendiğinde elde edilen değerlerin literatürde verilen tablolar ve değerler ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca sonuçlar üzerinde çevre gerilmesi ve rölatif sıkılığın büyük bir etkiye sahip olduğu ve doygunluk derecesinin değişimine bağlı olarak elde edilen değerlerin etkilendiği tespit edilmiştir.

4.5. Deney Verilerinin İrdelenmesi

Rezonant kolon deney cihazı ile gerçekleştirilmiş deneyler sonucunda belirlenen kayma modülü, kayma dalgası hızı ve basınç dalgası hızı değerleri çalışma başlangıcında hedeflenmiş olan parametrelerin aynı anda etkilerini ölçmek ve literatüre yeni eşitlikler kazandırmak amacıyla Matlab programı ile irdelenmiştir.

4.6. Matlab Programı

Matlab programı sayısal hesaplama, görselleştirme ve programlama amacıyla geliştirilmiş paket programlama dilidir. Matlab ismi Matrix Laboratuvarının kısaltmasıdır ve matris içerikli matematik ortamında kullanılmak üzere hazırlanmıştır [74]. Matlab programı MathWorks şirketinin tescilli bir ürünü olup ilk kez Cleve Moler, tarafından 1970'lerin sonunda geliştirilmeye başlanmıştır. Matlab kullanarak, verilerin analizi için algoritmalar geliştirilir ve modellenip uygulanabilir. Programlama dili ve sahip olduğu araçlar ile matematik fonksiyonları için çoklu yaklaşımlar geliştirilerek geleneksel programlama dillerinden daha hızlı ve farklı çözümlere olanak sağlar. Bu nedenle temel bilimler ve mühendislik alanlarında her türlü sayısal hesaplama, veri analizi ve grafik oluşturma amacıyla sıkça kullanılmaktadır Ayrıca sinyal işleme, görüntü ve video işleme, kontrol sistemleri, deney ve ölçüm, hesaplama finans ve hesaplamalı biyoloji gibi çok farklı alanlardaki uygulamalar için Matlab kullanılabilir. Sahip olduğu kütüphane içeriği ile diğer program dilleri içinde komut yazılabilmektedir.

Matlab kodlardan oluşturulmuş ve kullanıcıların yeni komutlar oluşturması ile çalışan bir programdır. Komut penceresi ile kullanıcılar problemin çözümü için gerekli matematiksel fonksiyonu oluşturabileceği gibi çeşitli menüleri ile istenilen işleme de doğrudan ulaşım sağlanabilmektedir. Program ile değişkenler tanımlanır, istenilen yapıya dönüştürülür veya işlenir ve analiz edilebilir. Problemi oluşturan değişkenler ve sabitler, diğer değişkenlerin işlenmesinden veya fonksiyonlardan elde edilebilir. Matlab ile yalnızca tek veya iki boyutlu değil daha fazla boyutlarda oluşturulan veriler oluşturulup analiz edilebilir.

Programın yıllar içerisinde geliştirilen sürümleri ile matematiksel ve istatistiksel çözümlerin yanı sıra, optimizasyon, yapay sinir ağları, bulanık mantık, algoritma geliştirme, işaret ve görüntü işleme, kontrol tasarımları gibi çözümlerde gerçekleştirilebilmektedir.

4.7. Regresyon Analizi

Regresyon analizi, birden fazla değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla kullanılan analiz metodudur [75]. Sıkça tercih edilen istatistiksel

metotlardan olan regresyon analizinde eğer tek değişken kullanılıyorsa tek değişkenli regresyon, birden çok değişken kullanılıyorsa çok değişkenli regresyon analizi olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca regresyon analizi ile değişkenler arasındaki ilişkinin varlığı ve ilişkinin derecesi belirlenebilir. Regresyon analizinde değişkenler arasındaki ilişkinin fonksiyonel şekli bir doğru denklemi olarak, gösterilir ve değişkenlere değer verilerek diğerleri tahmin edilir [75]. Ancak bu işlem için değişkenlerin ölçekli olması gereklidir.

Regresyon analizi mühendislik alanında yıllardır kullanılmakta ve çeşitli problemlerin çözümü için eşitlikler elde edilmektedir. Bilgisayar teknolojileri ve programlama dillerinin gelişmesi ile karmaşık problemler daha hızlı çözülebilmektedir. Özellikle uzun zaman alan ve maliyetli deneylerin yerini bu tip analiz yöntemleri almıştır. Laboratuvar ortamında zemin numunelerinin doğal şartlarının yansıtılmasında yaşanan güçlükler, arazi deneylerinde gözlemlenen bazı parametrelerin değişimindeki bilinmeyenler araştırmacıların bu tip analiz yöntemlerini kullanmasını artırmıştır.

Basit regresyon analizinde bağımlı ve bağımsız değişken tanımlama eksikliği nedeniyle gerçek yaklaşımı tanımlamak eksik kalabilmektedir. Çoklu regresyon analizi ile birçok değişken eşzamanlı olarak analize tabi tutulur ve yaklaşımın belirlenmesine gerçek katkı sağlanabilir. Böylece oluşturulan modele değişkenlerin katkısı daha doğru olarak belirlenebilir. Ancak bu modelin çözümü için ileri seviye programlama dillerine ihtiyaç duyulmaktadır. Matlab programı kullanılarak ileri regresyon analizi kolay ve hızlı bir biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Matlab ile regresyon analizinde eğri uydurma (curve fitting) yöntemi kullanılmaktadır. Eğri uydurma yöntemi ile çözüme ait matematiksel fonksiyonda tanımlanabilmektedir. Matlab ile eğri uydurma işlemi grafik modülü veya doğrudan ilgili komutların kullanılması ile gerçekleştirilir.

Geoteknik deprem mühendisliği alanında kayma modülü, sönüm oranı ve kayma dalgası hızı gibi zeminlerin dinamik etkiler altındaki davranışlarının belirleyen parametrelerin tespiti amacıyla regresyon analizleri son yıllarda sıkça kullanılmaktadır. Çeşitli araştırmacılar [23], [24], [31], [44], [76] tarafından regresyon analizi sonucu verilen yeni eşitlikler (4.8) ile (4.13) arasında verilmiştir.

$$G = -449.27 e^2 + 481.62e - 0.10 \sigma^0 + 0.39 e \sigma^0 - 40.40 \quad (4.8)$$

$$G = 246 / (1 + e^{(-5.66+1.53\tan H1+9.2\tan H2)}) \quad (4.9)$$

$$D = 9.844 / (1 + e^{(8.48-17.16\tan H1-6.15\tan H2+\tan H3)}) \quad (4.10)$$

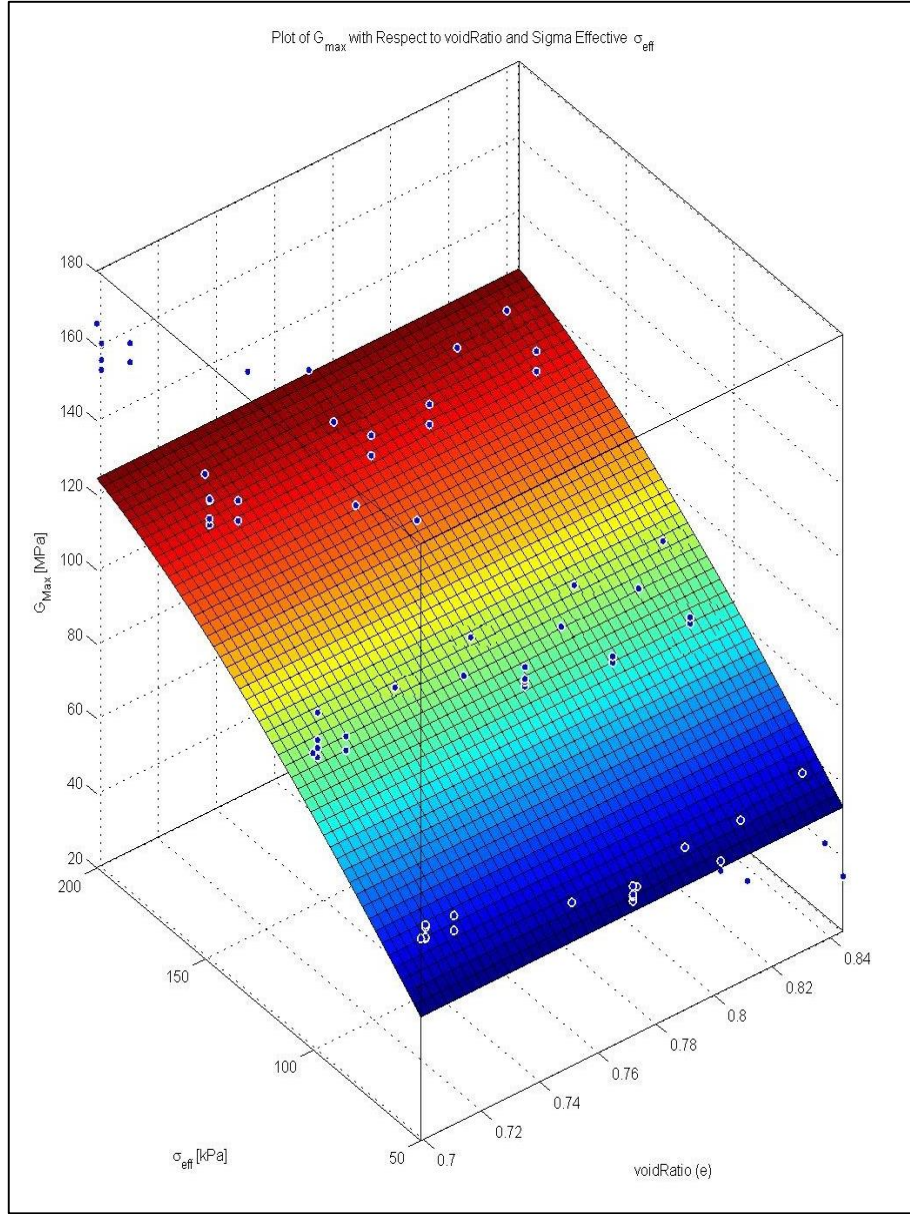
$$G = (6290 - 80PI) \sigma^{0.50} e^{-0.63} \quad (4.11)$$

$$D = r + s \tanh \left(w \left(\frac{G(\gamma)}{G_{max}} \right) \right) \quad (4.12)$$

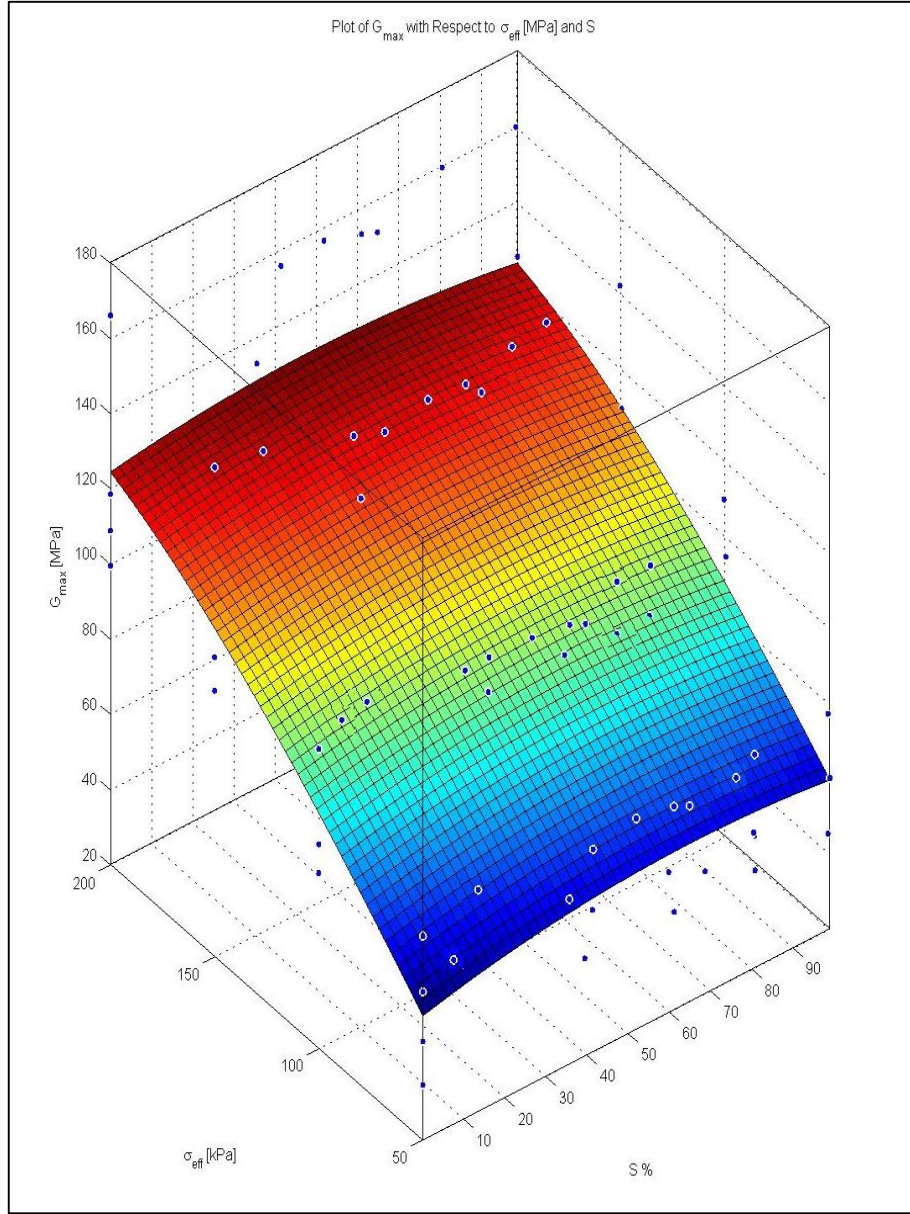
$$G = 113 \left(\frac{(1.88-e)^2}{1+e} \right) \quad (4.13)$$

Bu çalışmada gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar Matlab programı ile regresyon analizine tabi tutulmuş ve değişkenler arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Regresyon analizi yapılarak 3 boyutlu grafikler hazırlanmıştır. Şekil 4.13 ile Şekil 4.15 arasında verilen bu grafiklerden değişkenler arasındaki ilişki araştırılmıştır.

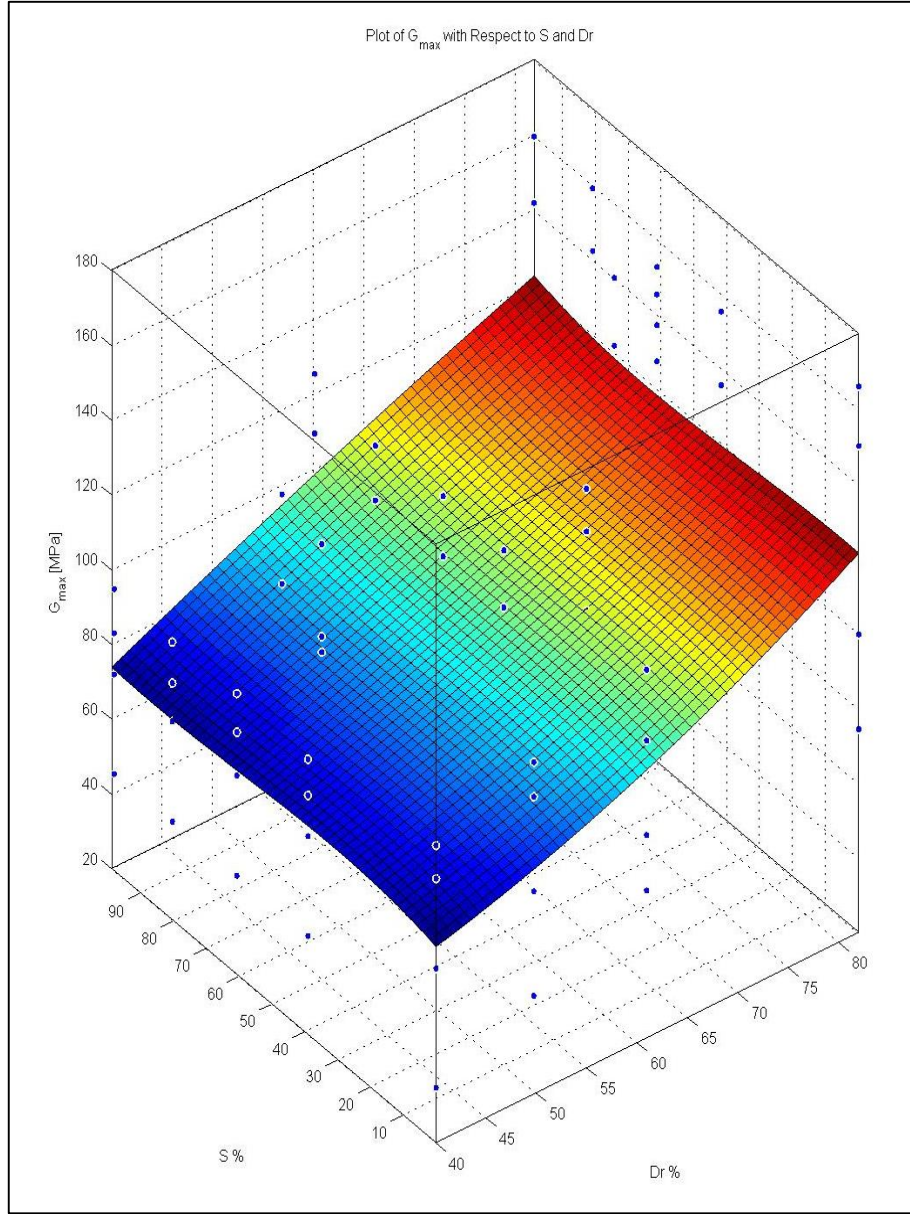
Regresyon modelleri üç gruba ayrılmıştır, ilk grupta kayma modülünün ikinci grupta kayma dalgası hızının üçüncü grupta ise basınç dalgası hızının değişkenlere bağlı davranışı gözlemlenmiştir. Öncelikle ilk gruptaki birinci modelde efektif çevre gerilmesinin artışı ve boşluk oranının değişimi sonucu kayma modülünde meydana gelen değişimin en uygun grafiği çizdirilmiştir. İkinci modelde ise kayma modülünün efektif çevre gerilmesi ve doygunluk yüzdesi ile değişimi sunulmuştur. Üçüncü modelde ise kayma modülü, doygunluk ve rölatif sıkılık ilişkisi ortaya konmuştur.



Şekil 4.13. Kayma modülü, efektif çevre gerilmesi ve boşluk oranı ilişkisi



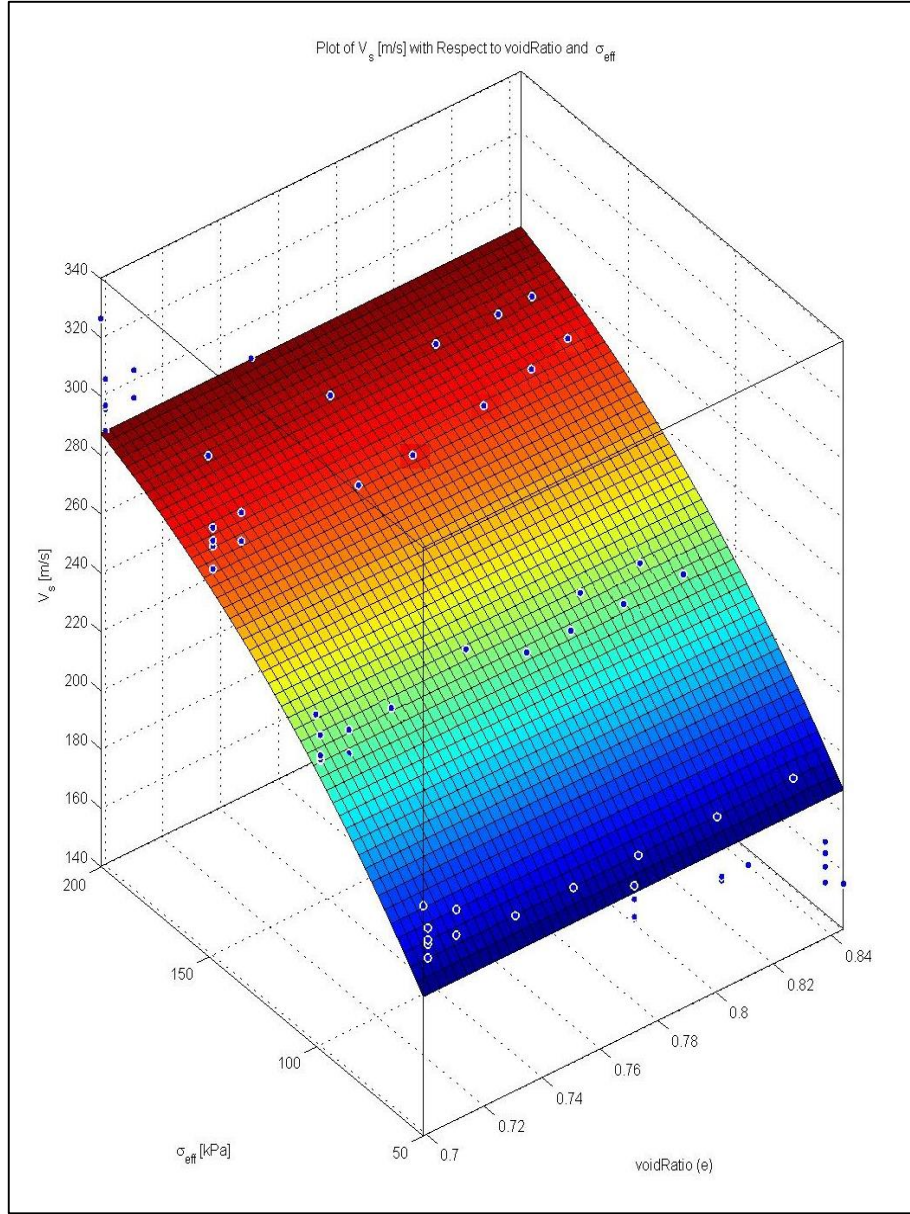
Şekil 4.14. Kayma modülü, efektif çevre gerilmesi ve doygunluk ilişkisi



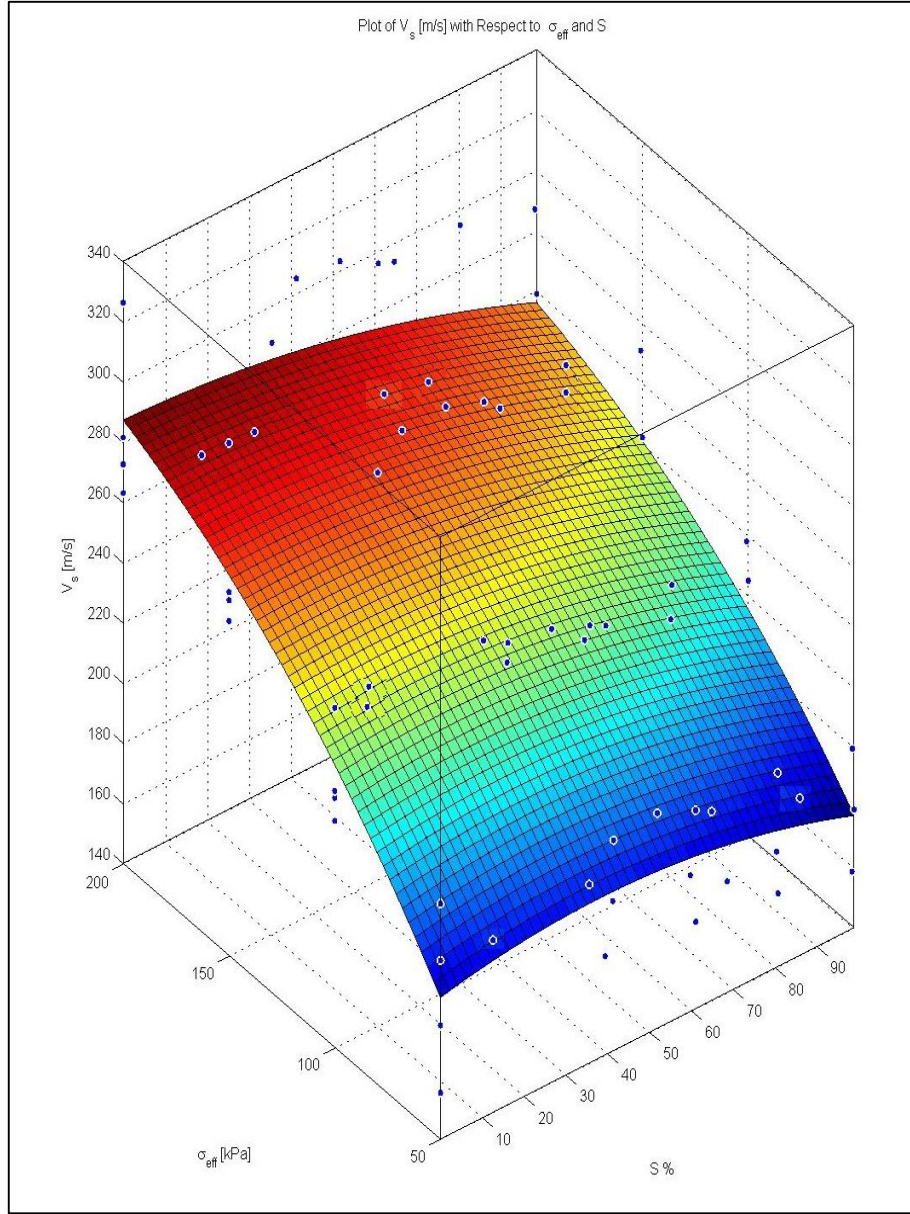
Şekil 4.15. Kayma modülü, doygunluk ve rölatif sıklık ilişkisi

İlk gruptaki regresyon analiz grafikleri incelendiğinde efektif çevre gerilmesinin artışı ve boşluk oranının değişimi ile kayma modülünde meydana gelen değişimin ve elde edilen değerlerin tanımlanabilir olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde ikinci grafikte efektif çevre gerilmesi ve doygunluk yüzdesi değişimi ile kayma modülünün gösterdiği eğilim, davranışın açıklanabilir olduğunu göstermiştir. Üçüncü grafikte ise doygunluk ve rölatif sıklık değerlerindeki değişim ile kayma modülü değerlerinin gösterdiği değişim ve eğilim önceki modellere göre daha dağınıktır ve açıklanabilmesi daha karmaşıktır.

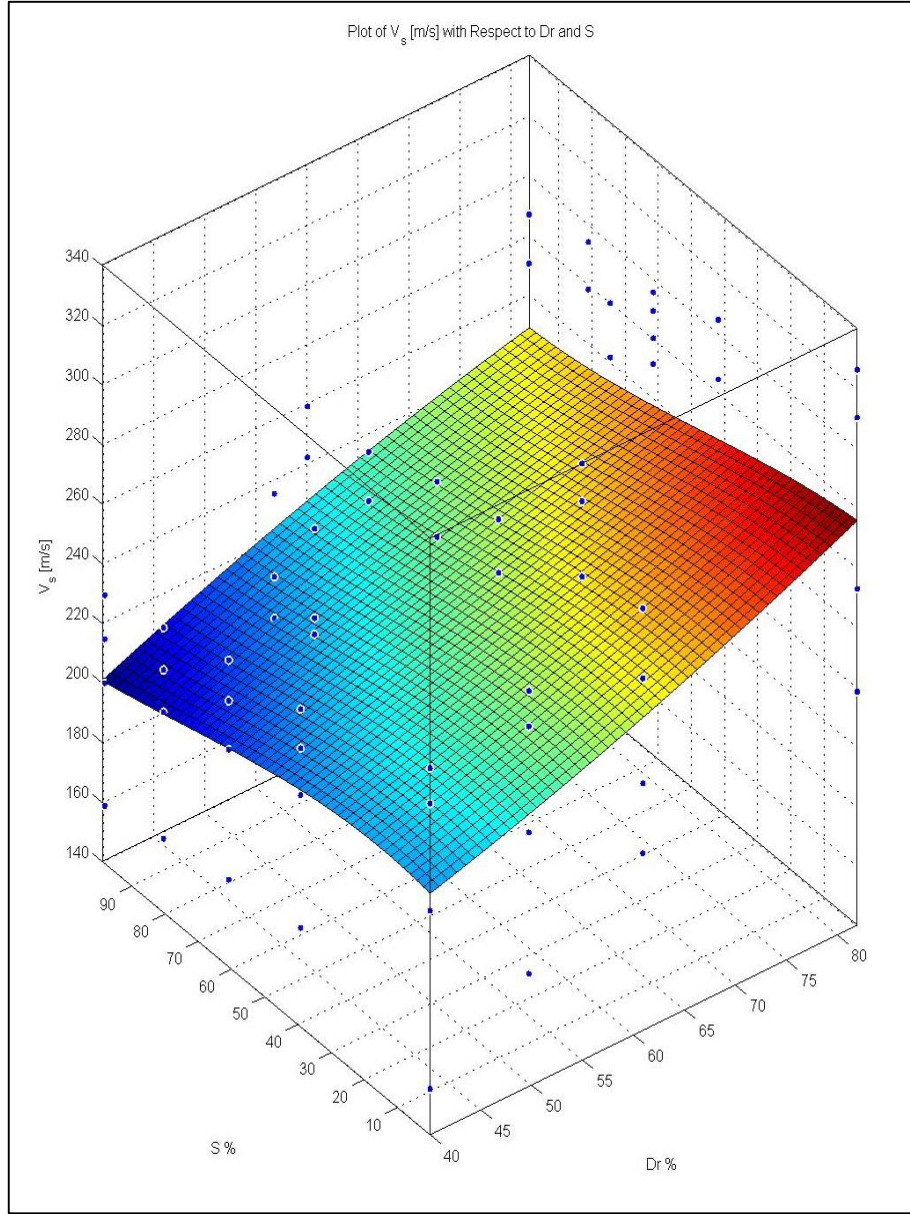
Regresyon analizinin ikinci grubunda kayma dalgası hızının davranışı analiz edilmiştir. Birinci modelde efektif çevre gerilmesinin artışı ve boşluk oranının değişimi sonucu, kayma dalgası hızında meydana gelen değişimin en uygun grafiği çizdirilmiştir. İkinci modelde ise kayma dalgası hızının efektif çevre gerilmesi ve doygunluk derecesi ile değişimi ortaya konmuştur. Üçüncü modelde ise kayma dalgası hızının doygunluk derecesi ve rölatif sıklık ilişkisi gösterilmiştir. 3 boyutlu grafikler aşağıda Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 ile verilmiştir.



Şekil 4.16. Kayma dalgası hızı, efektif çevre gerilmesi ve boşluk oranı ilişkisi



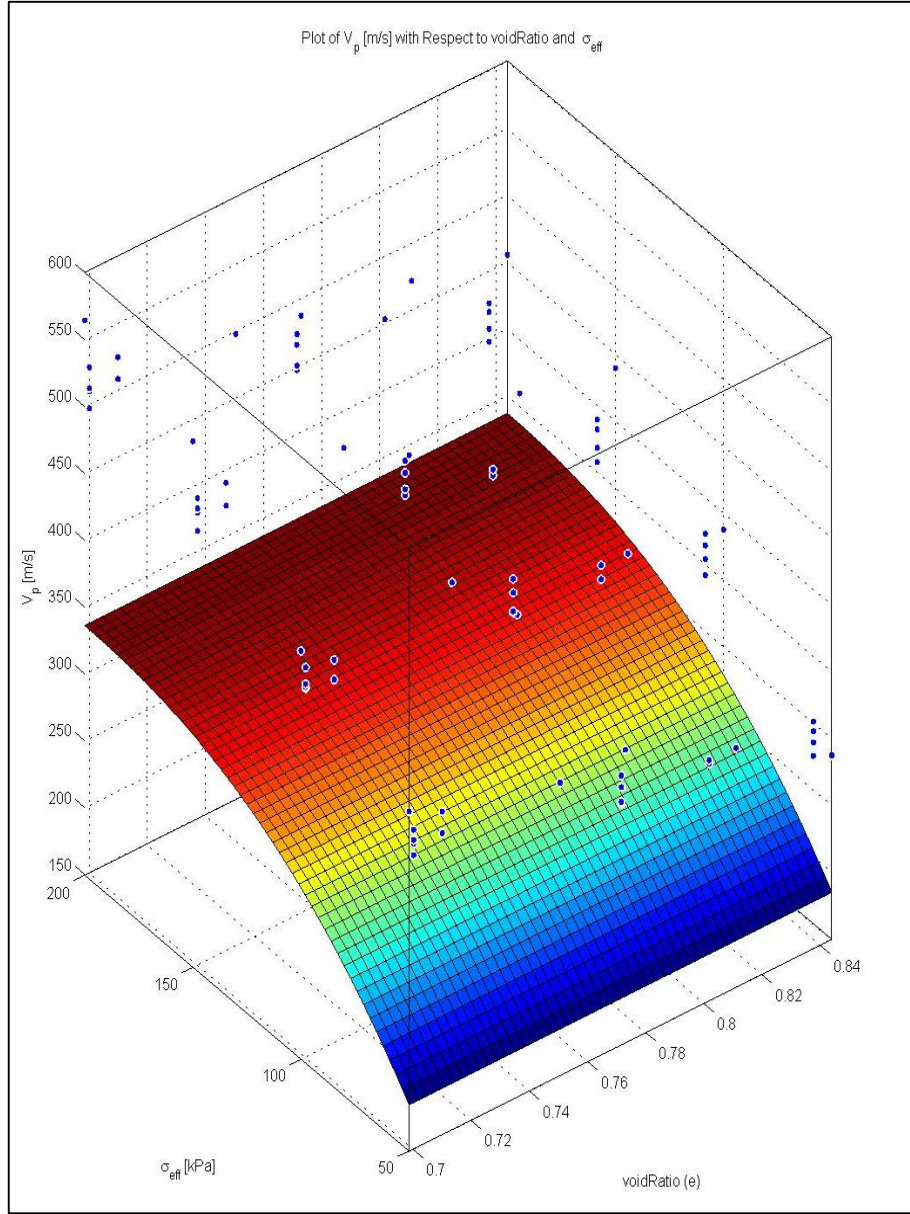
Şekil 4.17. Kayma dalgası hızı, efektif çevre gerilmesi ve doygunluk ilişkisi



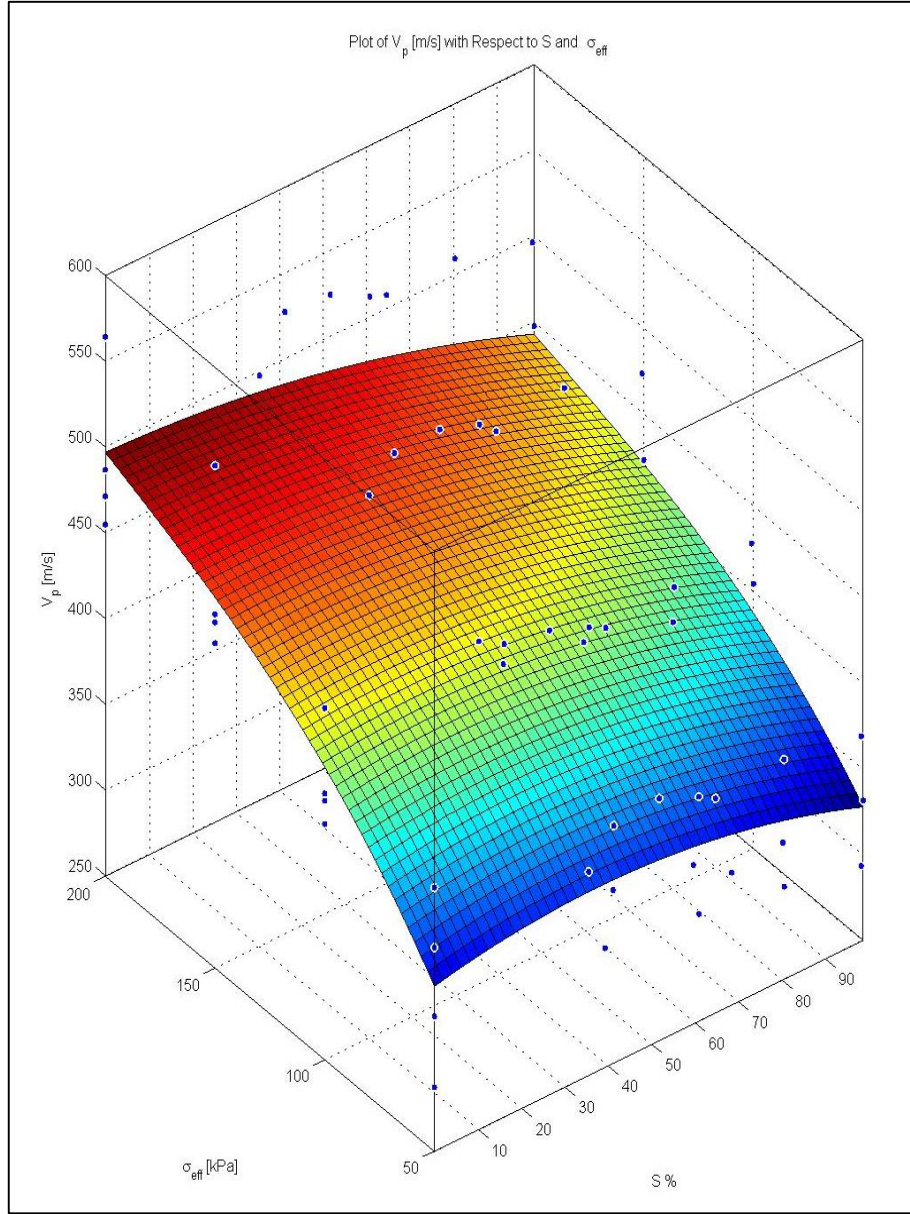
Şekil 4.18. Kayma dalgası hızı, doygunluk ve rölâtif sıklık ilişkisi

İkinci gruptaki regresyon analiz grafikleri incelendiğinde efektif çevre gerilmesinin artışı ve boşluk oranının değişimi ile kayma dalgası hızında meydana gelen değişimin ve elde edilen değerlerin tanımlanabilir olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde ikinci grafikte efektif çevre gerilmesi ve doygunluk yüzdesi değişimi ile kayma dalgası hızının gösterdiği eğilimin açıklanabilir olduğu görülmektedir. Üçüncü grafikte ise doygunluk ve rölatif sıklık değerlerindeki değişim ile kayma dalgası hızı değerlerinin gösterdiği değişim önceki grafiklere göre daha dağınıktır ve açıklanabilmesi daha karmaşıktır.

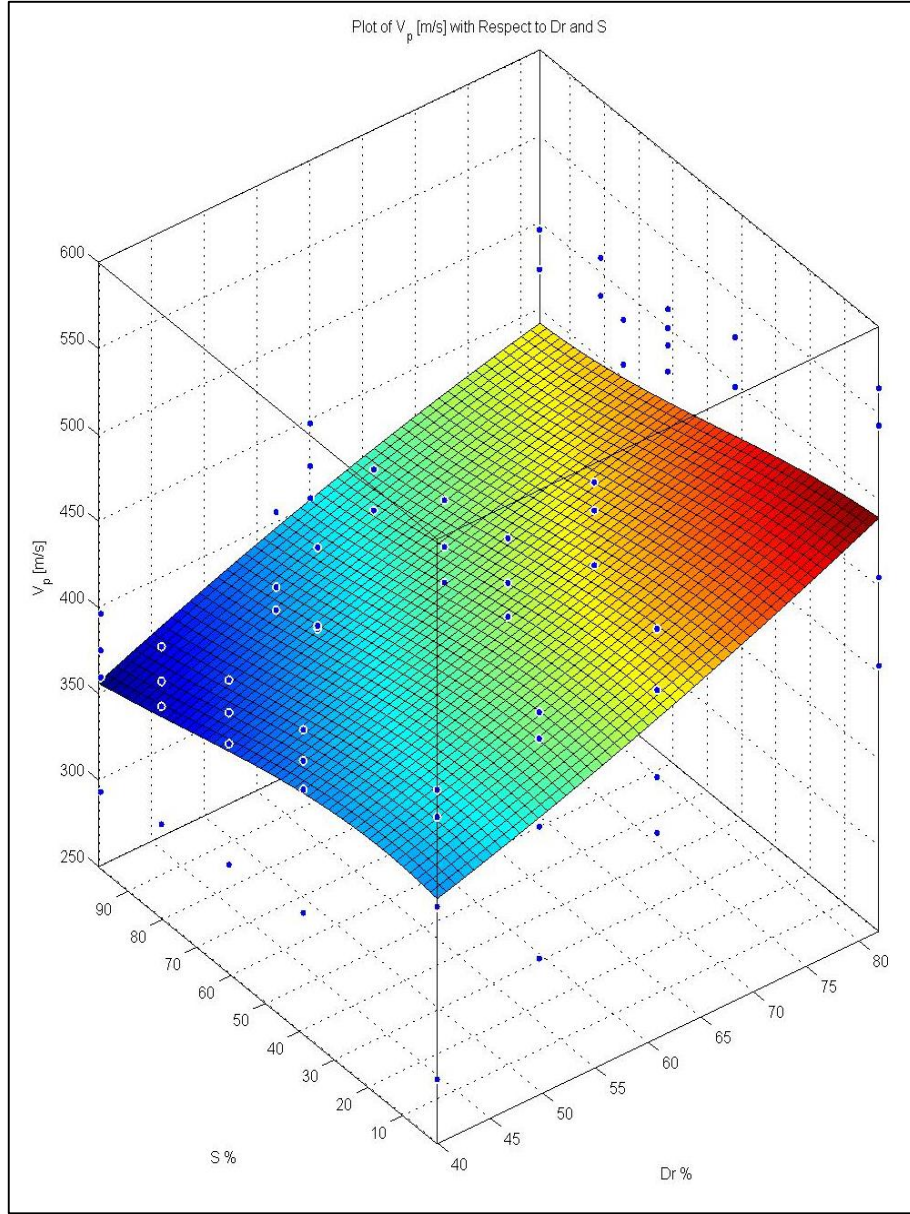
Üçüncü regresyon analizi grubunda basınç dalgası hızının davranışı analiz edilmiştir. Birinci modelde efektif çevre gerilmesinin artışı ve boşluk oranının değişimi sonucu basınç dalgası hızında meydana gelen değişimin en uygun grafiği çizdirilmiştir. İkinci modelde ise basınç dalgası hızının efektif çevre gerilmesi ve doygunluk derecesi ile değişimi sunulmuştur. Üçüncü modelde ise basınç dalgası hızının doygunluk derecesi ve rölatif sıklık ilişkisi gösterilmiştir. Regresyon analizi ile elde edilen 3 boyutlu grafikler Şekil 4.19 ile Şekil 4.21 arasında verilmiştir.



Şekil 4.19. Basınç dalgası hızı, efektif çevre gerilmesi ve boşluk oranı ilişkisi



Şekil 4.20. Basınç dalgası hızı, efektif çevre gerilmesi ve doygunluk ilişkisi



Şekil 4.21. Basınç dalgası hızı, doygunluk rölatif sıklık ilişkisi

Üçüncü gruptaki regresyon analiz grafikleri incelendiğinde efektif çevre gerilmesinin ve boşluk oranının değişimi ile basınç dalgası hızında meydana gelen değişimin ilk iki modele göre daha karmaşık ve düzensiz olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde ikinci grafikte efektif çevre gerilmesi ve doygunluk yüzdesi değişimi ile basınç dalgası hızının değişimi ilk iki modele göre daha karmaşık ve düzensizdir. Üçüncü grafikte ise doygunluk ve rölatif sıklık değerlerindeki değişim ile basınç dalgası hızı değerlerinin gösterdiği değişim ve eğilim önceki modellere göre daha dağınıktır.

4.8. Yeni Denklem Üretilmesi

Matlab programı kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucu elde edilen grafikler için en uygun matematiksel fonksiyonlar geliştirilmiştir. Elde edilen eşitlikler için yeniden analiz yapılarak temsili doğruluk oranı hesaplanmıştır. Eşitliklerden elde edilen sonuçlar deney verileri ile karşılaştırılmıştır ve uyumluluk dereceleri belirlenmiştir. Burada basınç dalgası hızı için çalışma yapılmamıştır. Bunun nedeni basınç dalgası için geliştirilen regresyon model grafiklerinin tüm verileri temsil etme düzeyinin düşük olması ve davranış eğilimlerinde ki düzensizliklerdir. Bu durumun nedeni ise Biot teorisinde verildiği gibi ideal sıvı ile doymuş katı cisimlerde iki adet hacimsel şekil değiştirme dalgası oluşması ve elastik yapı ile cismin elastik yapısı arasında yapısal etkileşim meydana gelmesidir [61]. Bu nedenle basınç dalgalarının bu tip doymuş ortamlarda yayılımı zaman zaman ölçümlerin güvenilirliğini sarsmaktadır ancak kayma dalgaları için böyle bir durum söz konusu değildir.

Yapılan regresyon analizi sonucunda kayma modülü için aşağıda (4.14) ve (4.15) arasında verilen denklemler elde edilmiştir.

$$G = -450 e^2 + 500e - 0.2 \sigma + 0.4 e \sigma - 0.19S - 20 \quad (4.14)$$

$$G = 8200 \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)} \sigma^{0.495} \quad (4.15)$$

Eşitliklerden elde edilen sonuçlar deney verileri ile karşılaştırılmıştır ve uyumluluk dereceleri belirlenmiştir. Denklem (4.14) ile verilen eşitlikte % 89 temsili doğruluk yüzdesi elde edilmiştir. Denklem (4.15) ile verilen eşitlikte % 91 temsili doğruluk yüzdesi elde edilmiştir.

Yapılan regresyon analizi sonucunda kayma dalgası için aşağıda (4.16) ve (4.17) arasında verilen denklemler elde edilmiştir.

$$V_s = 150 + 30e - 0.5e^2 + 0.90e\sigma - 0.17S \quad (4.16)$$

$$Vs = 120\sigma^{0.30} - 70e\sigma^{0.30} \quad (4.17)$$

Eşitliklerden elde edilen sonuçlar deney verileri ile karşılaştırılmıştır ve uyumluluk dereceleri belirlenmiştir. Denklem (4.17) ile verilen eşitlikte % 90 temsili doğruluk yüzdesi elde edilmiştir. Denklem (4.18) ve (4.19) ile verilen eşitlikte % 91 temsili doğruluk yüzdesi elde edilmiştir.

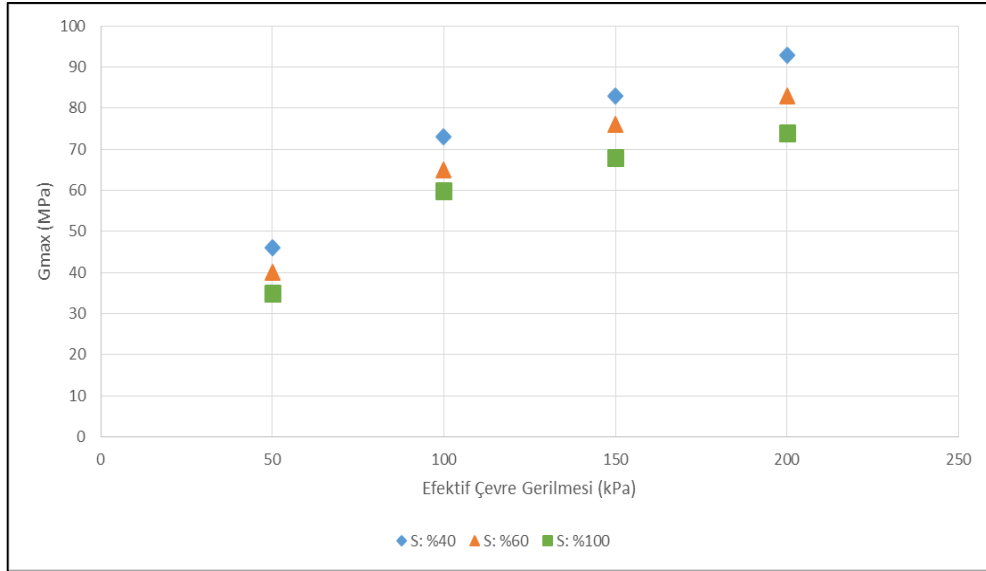
4.9. Davranış Eğiliminin Belirlenmesi

Zeminlerin dinamik davranışlarını belirleyen parametrelerin değişimi ile davranışta meydana gelen değişimlerin daha belirgin gözlenebilmesi amacıyla Excel programı kullanılarak modelleme çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada farklı rölatif yoğunluk ve doygunluk derecelerinde hazırlanan numuneler, farklı efektif çevre basınçları altında deneylere tabi tutulmuştur. Rölatif sıklık için % 40, 60 ve 80 dereceleri belirlenirken, doygunluk için ise % 40, % 60 ve tam doygunluk baz alınmıştır. Efektif çevre gerilmesi ise 50, 100, 150 ve 200 kPa olarak uygulanmıştır. Deney parametrelerinin detayları Çizelge 4.7’de verilmiştir. Rezonant kolon deney cihazı ile yukarıda verilen program dâhilinde deneyler gerçekleştirilmiş ve numunelerin kayma modülü ile S ve P dalgası hızları belirlenmiştir.

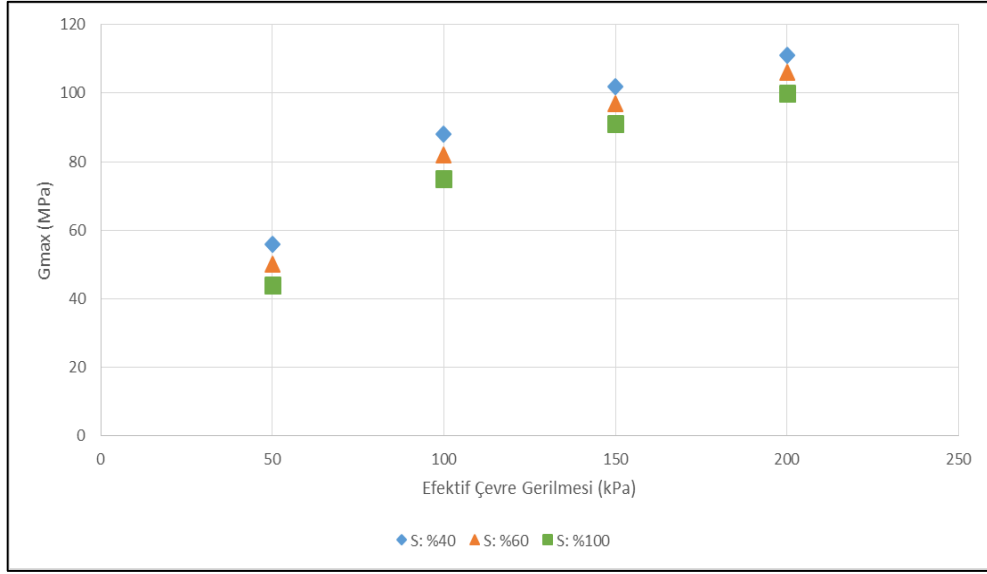
Çizelge 4.7. Seçilen deney parametreleri

Deney No	Rölatif Sıklık (%)	Doğunluk Derecesi (%)	Efektif Çevre Basıncı (kPa)
A	40	40	50 - 100 - 150 - 200
B	40	60	50 - 100 - 150 - 200
C	40	100	50 - 100 - 150 - 200
D	60	40	50 - 100 - 150 - 200
E	60	60	50 - 100 - 150 - 200
F	60	100	50 - 100 - 150 - 200
G	80	40	50 - 100 - 150 - 200
H	80	60	50 - 100 - 150 - 200
I	80	100	50 - 100 - 150 - 200

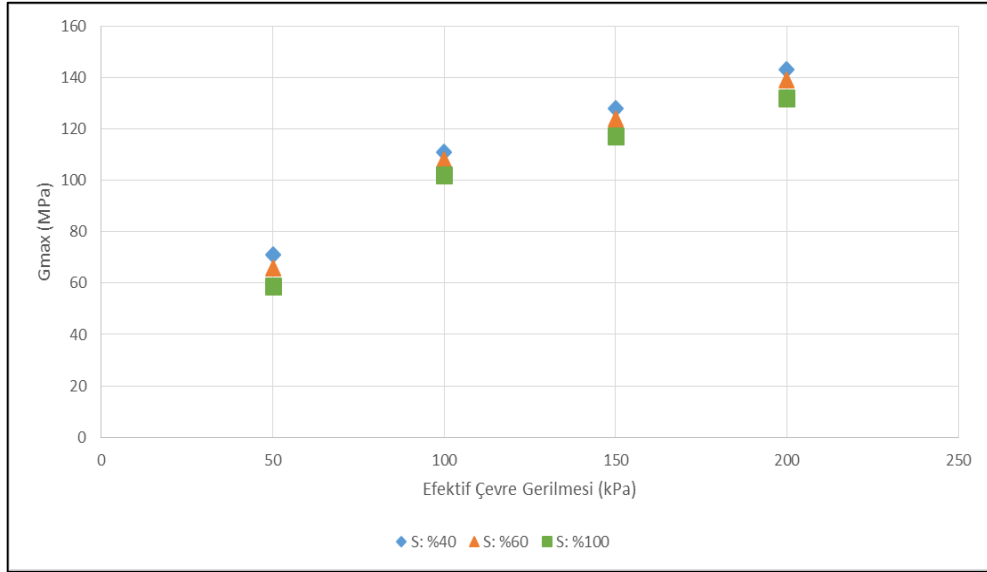
Kayma modülü davranışı için öncelikle doğunluk derecesinin etkisini görmek amacıyla rölatif sıklık % 40, % 60 ve % 80 alınarak Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 ile verilen grafikler hazırlanmıştır.



Şekil 4.22. Kayma modülü ve doğunluk ilişkisi (Dr:% 40)

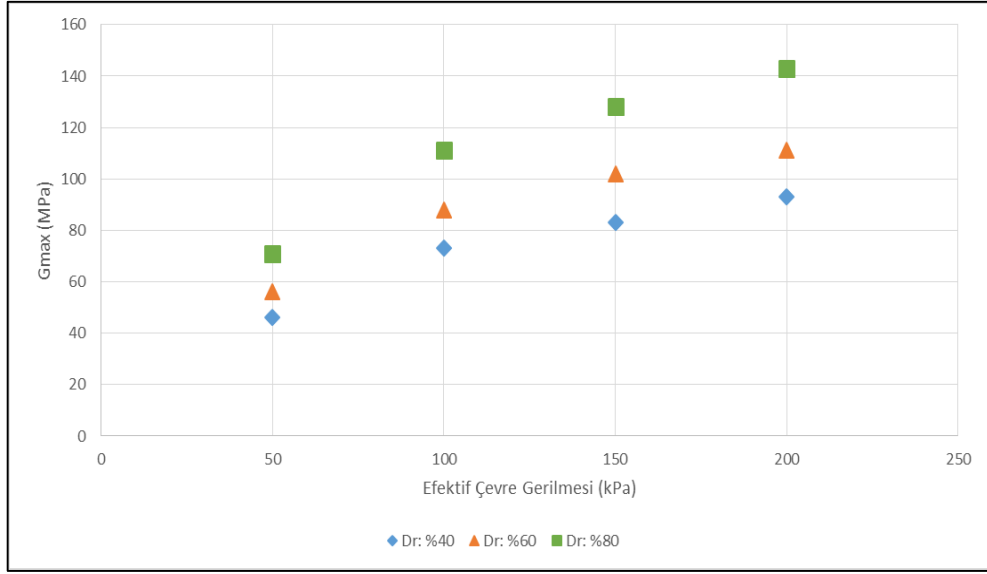


Şekil 4.23. Kayma modülü ve doygunluk ilişkisi (Dr:% 60)

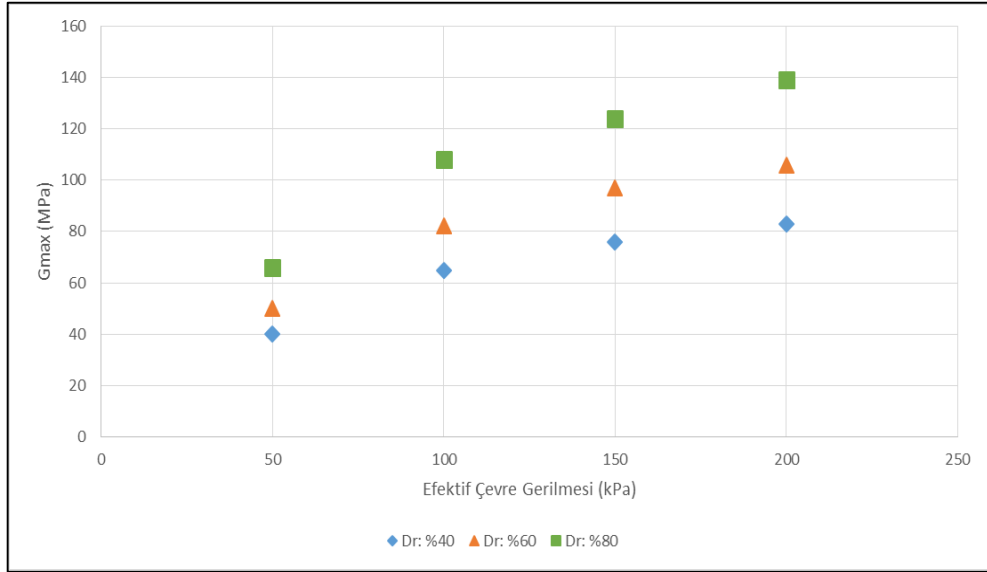


Şekil 4.24. Kayma modülü ve doygunluk ilişkisi (Dr:% 80)

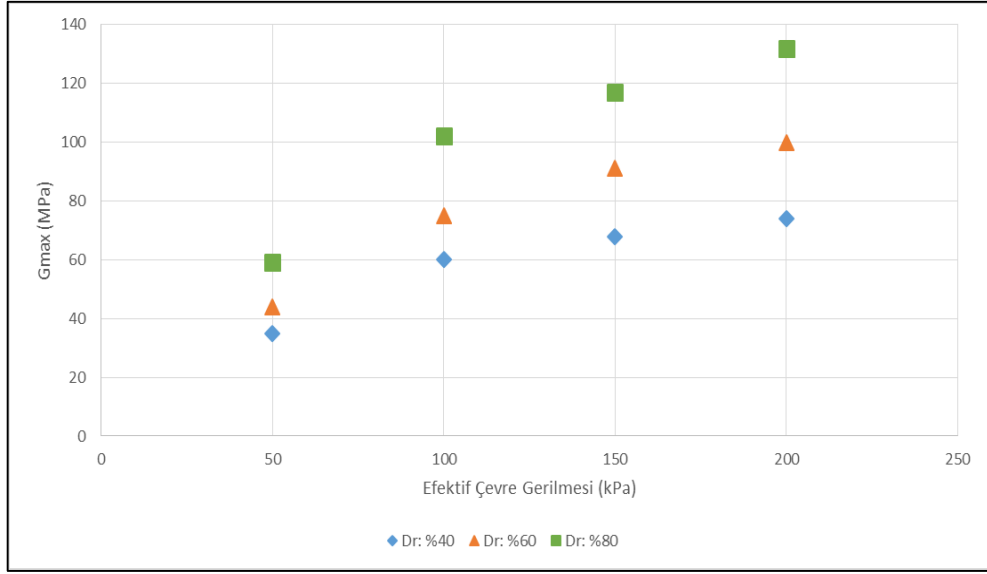
Kayma modülü davranışı üzerinde rölâtif sıklık etkisini görmek amacıyla öncelikle doygunluk derecesi % 40, % 60 ve % 100 alınarak Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27 ile verilen grafikler hazırlanmıştır.



Şekil 4.25. Kayma modülü ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 40)

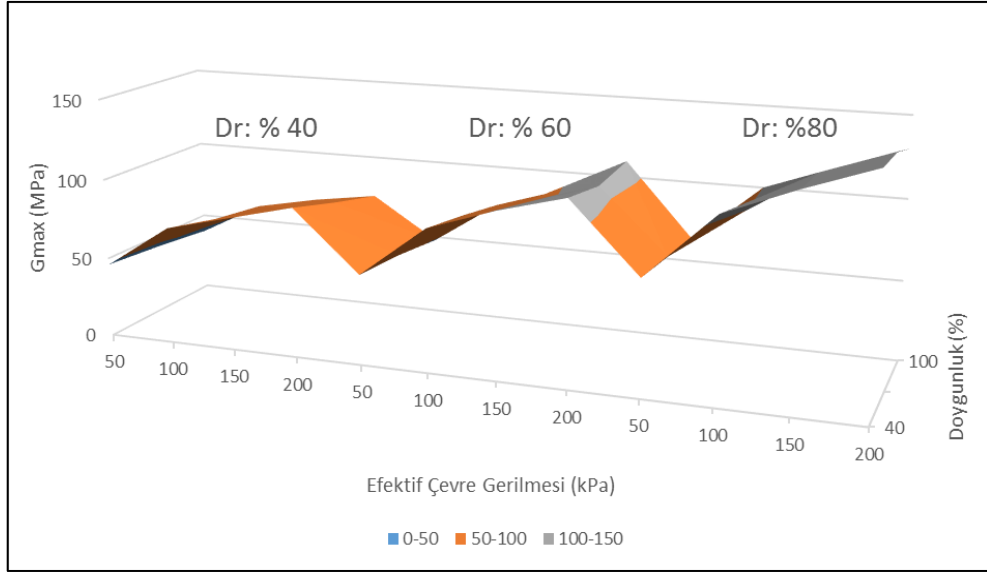


Şekil 4.26. Kayma modülü ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 60)



Şekil 4.27. Kayma modülü ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 100)

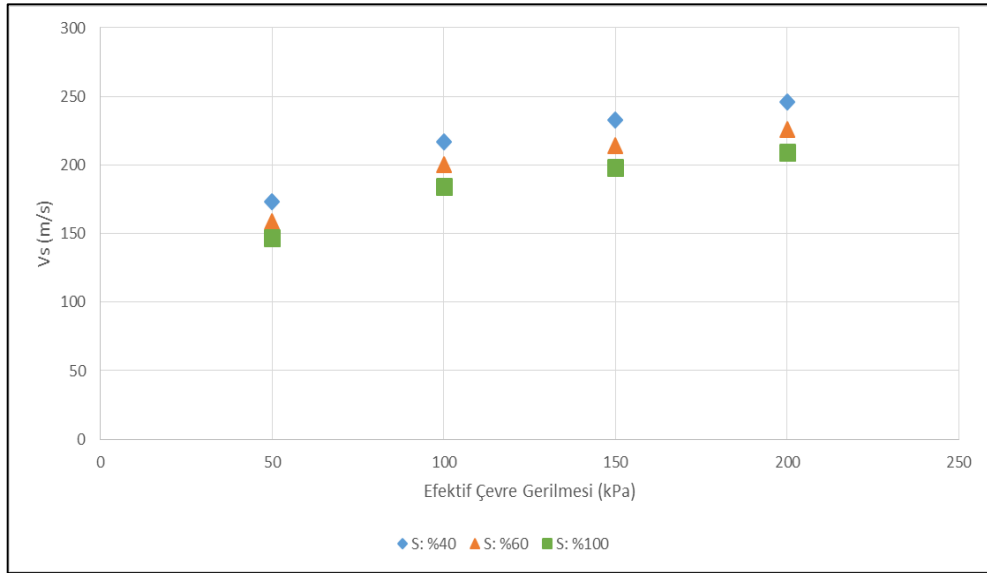
Kayma modülü davranışı üzerinde tüm etkileri görmek amacıyla son olarak rölatif sıklık ve doygunluk derecesinin görülebildiği Şekil 4.28 hazırlanmıştır.



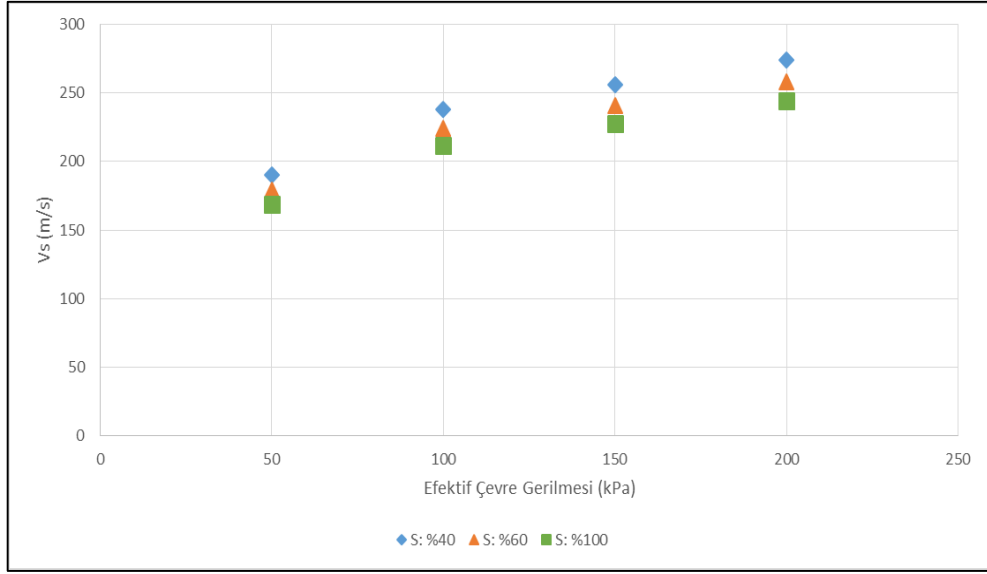
Şekil 4.28. Kayma modülü davranış eğilimi

Yukarıda verilen şekiller irdelendiğinde, kayma modülünün rölatif sıkılığın % 40 değerinden % 60 ve % 80 e artması durumunda % 20 ile % 25 arasında artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Efektif çevre gerilmesinin 50 kPa dan 100 kPa değerine artışına bağlı olarak yaklaşık % 50 arttığı ancak 100 kPa dan 200 kPa değerine artışına bağlı olarak yaklaşık % 20 arttığı tespit edilmiştir. Diğer yandan doygunluk derecesinin % 40, 60 ve 100 olarak değişimine bağlı olarak kayma dalgası hızlarının % 5 ile % 15 arasında azalım gösterdiği gözlemlenmiştir.

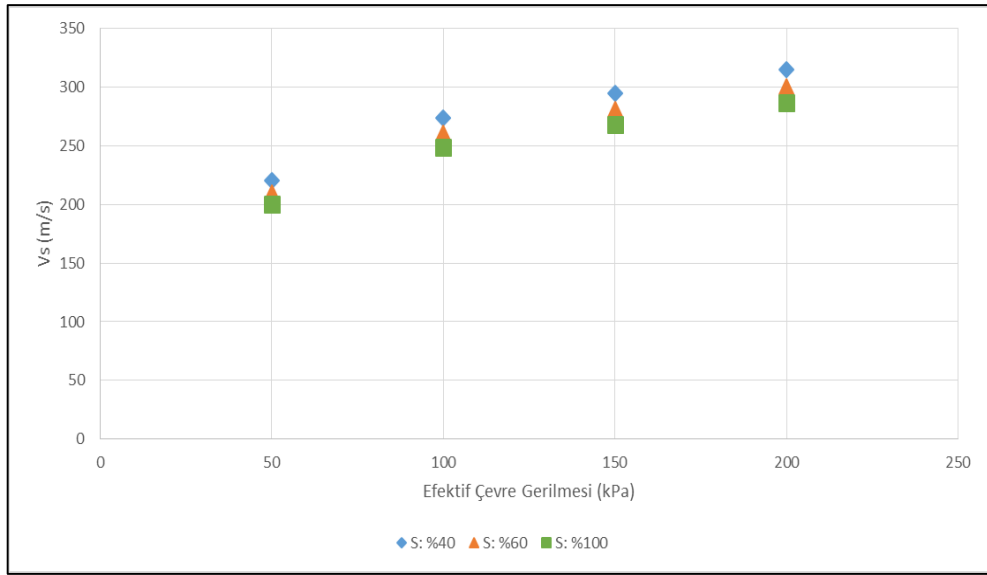
Kayma dalgası hızının davranışı için öncelikle doygunluk derecesinin etkisini görmek amacıyla rölatif sıkılık % 40, % 60 ve % 80 alınarak Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31 ile verilen grafikler hazırlanmıştır.



Şekil 4.29. Kayma dalgası hızı ve doygunluk derecesi ilişkisi (Dr:% 40)

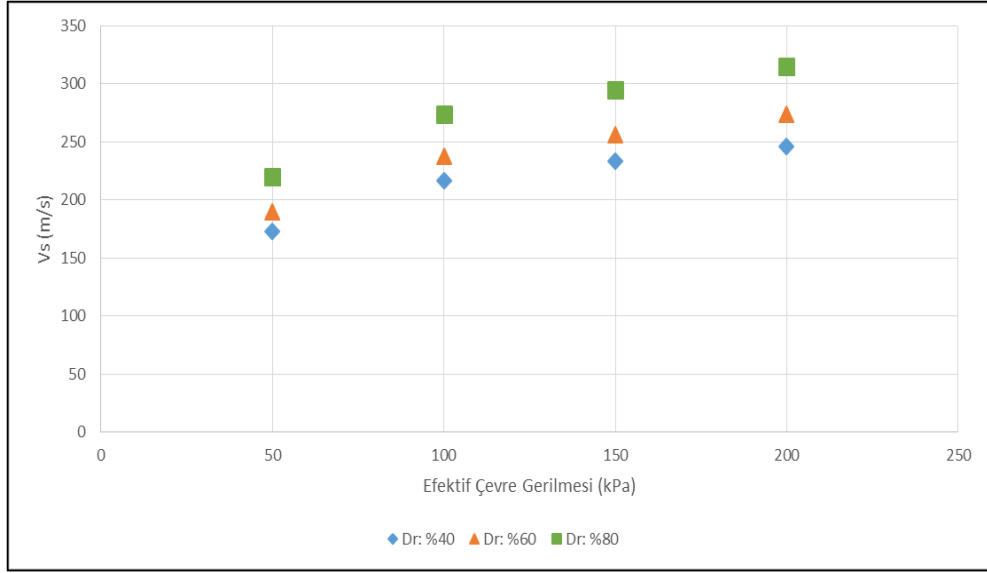


Şekil 4.30. Kayma dalgası hızı ve doygunluk derecesi ilişkisi (Dr:% 60)

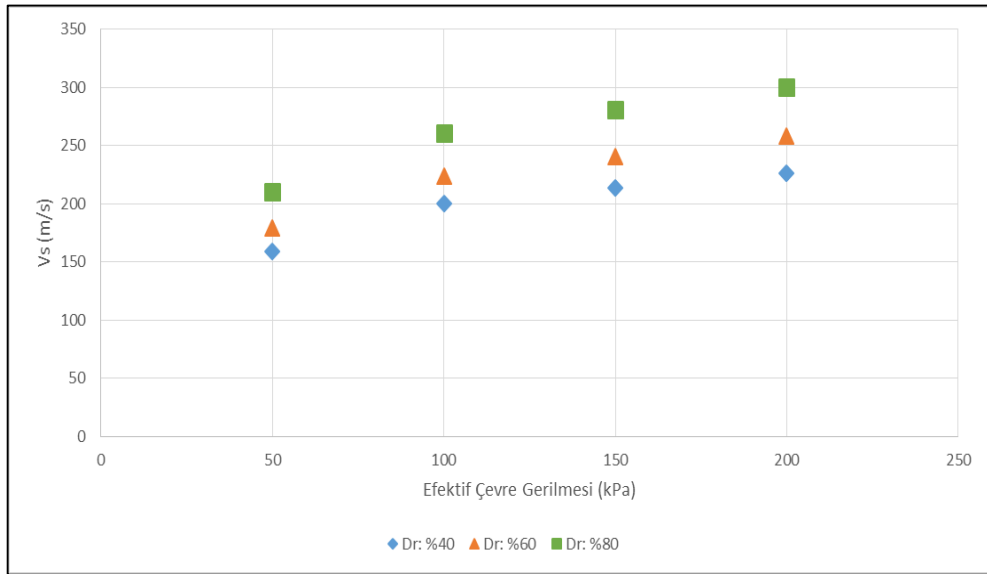


Şekil 4.31. Kayma dalgası hızı ve doygunluk derecesi ilişkisi (Dr:% 80)

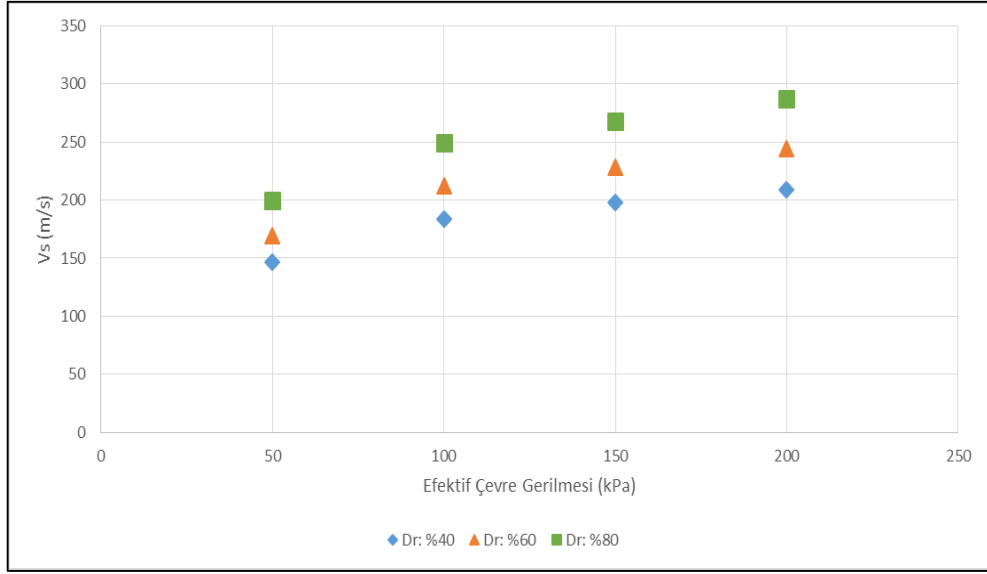
Kayma dalgası hızı davranışı üzerinde rölatif sıklık etkisini görmek amacıyla öncelikle doygunluk derecesi % 40, % 60 ve % 100 alınarak Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34 ile verilen grafikler hazırlanmıştır.



Şekil 4.32. Kayma dalgası hızı ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 40)

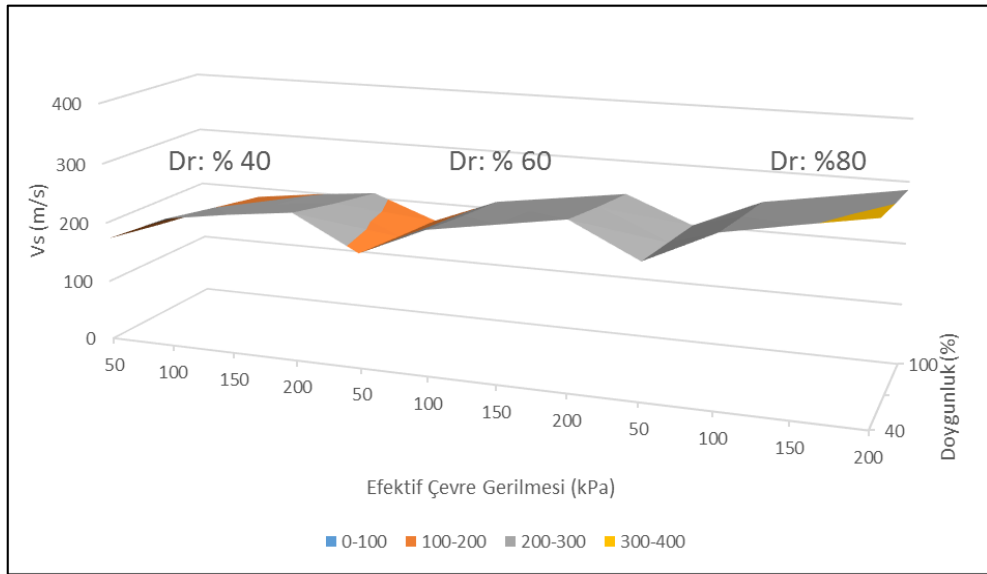


Şekil 4.33. Kayma dalgası hızı ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 60)



Şekil 4.34. Kayma dalgası hızı ve rölatif sıkılık ilişkisi (S: % 100)

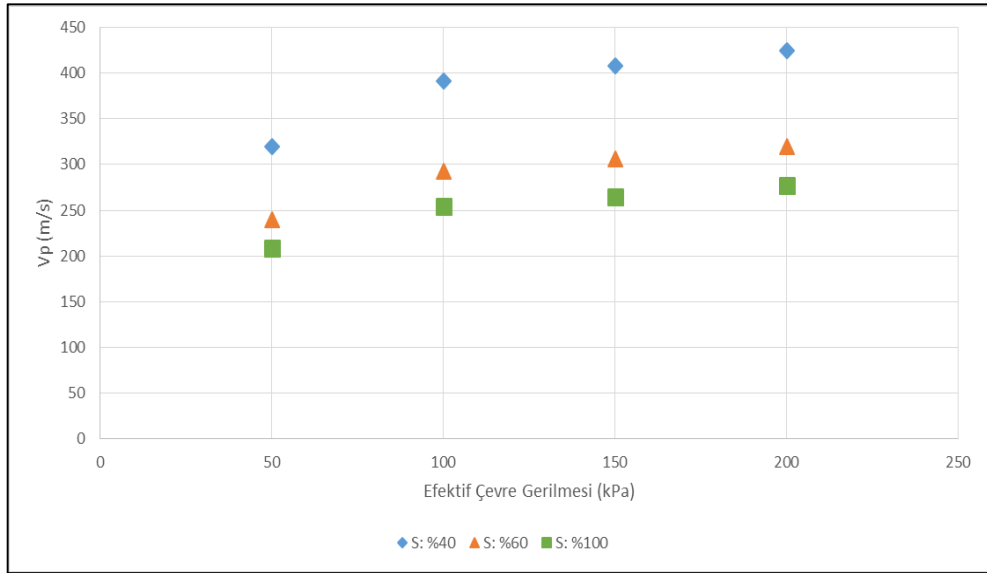
Kayma dalgası hızı davranışı üzerinde tüm etkileri görmek amacıyla son olarak rölatif sıkılık ve doygunluk derecesinin görülebildiği Şekil 4.35 hazırlanmıştır.



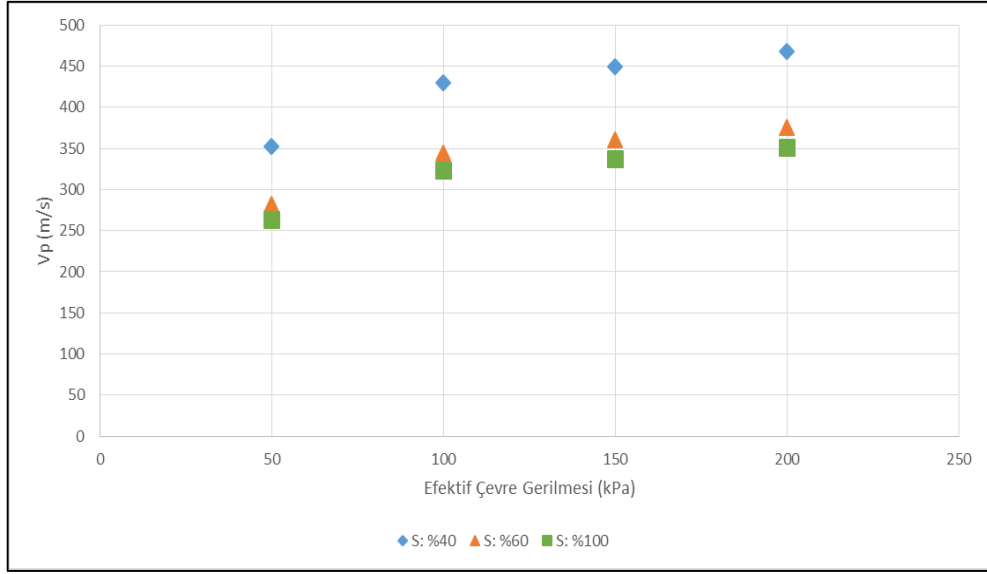
Şekil 4.35. Kayma dalgası davranış eğilimi

Yukarıda verilen şekiller incelendiğinde, kayma dalgası hızlarının rölatif sıklığın % 40 değerinden % 60 ve % 80 e artması durumunda % 15 ile % 20 arasında artış gösterdiği görülmüştür. Efektif çevre gerilmesinin 50 kPa dan 100 kPa değerine artışına bağlı olarak yaklaşık % 30 arttığı ancak 150 kPa dan 200 kPa değerine artışına bağlı olarak yaklaşık % 10 arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca doygunluk derecesinin % 40, 60 ve 100 olarak değişimine bağlı olarak kayma dalgası hızlarının % 5 ile % 10 arasında azalım gösterdiği gözlemlenmiştir.

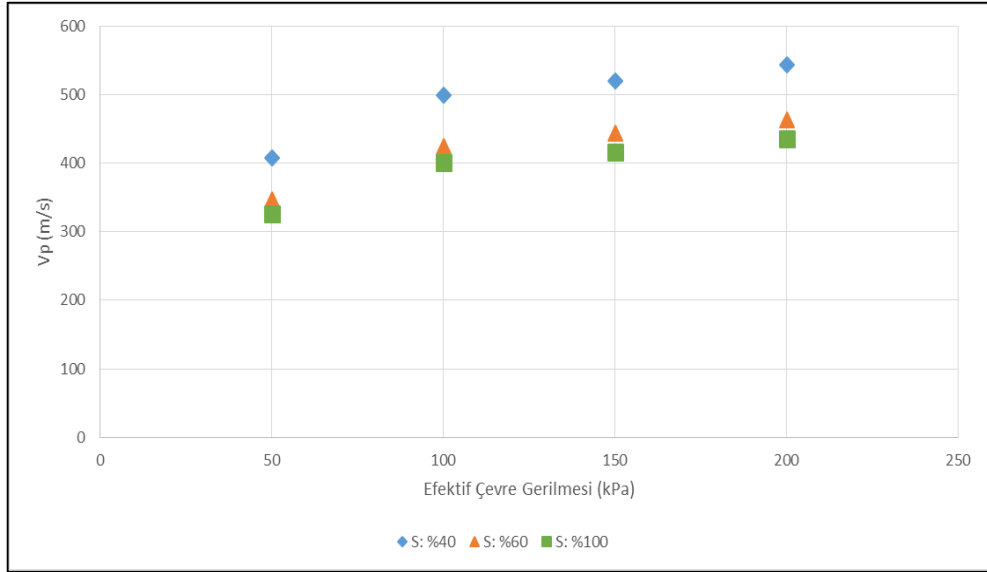
Basınç dalgası hızının davranışı için öncelikle doygunluk derecesinin etkisini görmek amacıyla rölatif sıklık % 40, % 60 ve % 80 alınarak Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38 ile verilen grafikler hazırlanmıştır.



Şekil 4.36. Basınç dalgası hızı ve doygunluk derecesi ilişkisi (Dr: % 40)

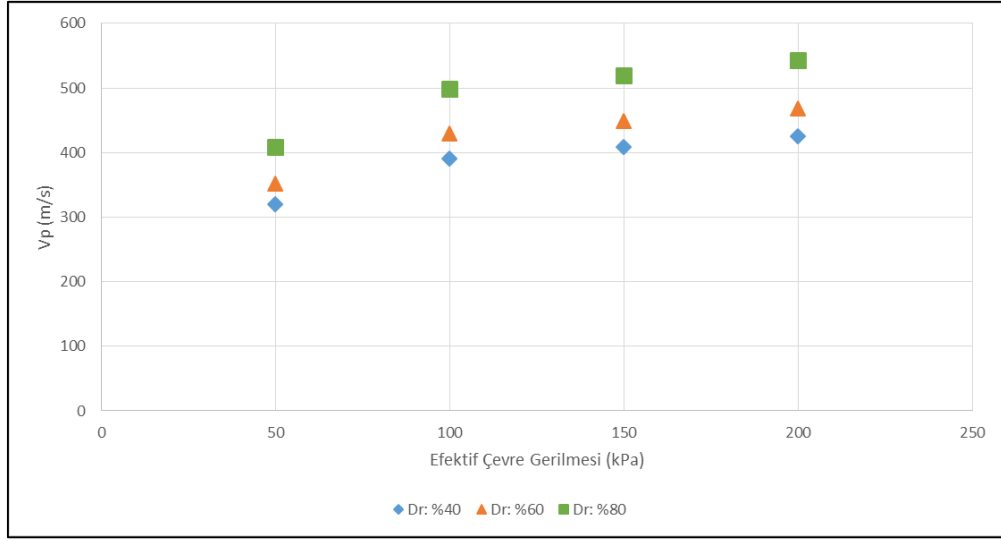


Şekil 4.37. Basınç dalgası hızı ve doygunluk ilişkisi (Dr: % 60)

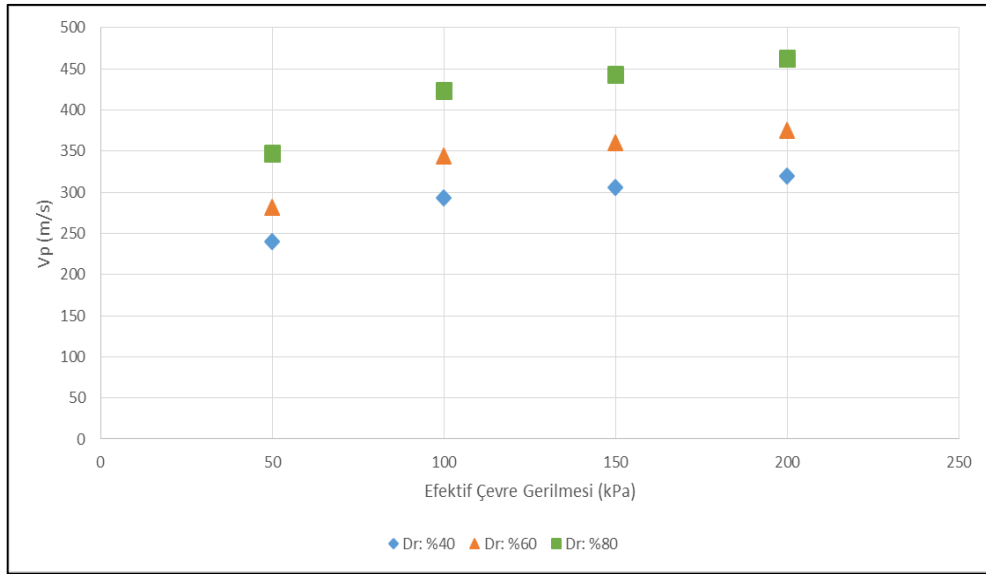


Şekil 4.38. Basınç dalgası hızı ve doygunluk ilişkisi (Dr: % 80)

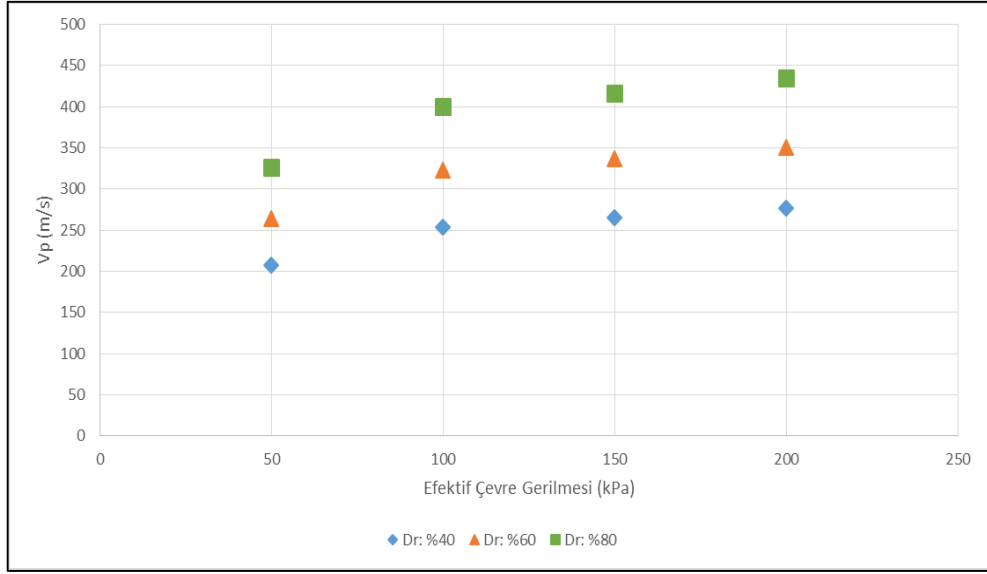
Basınç dalgası hızı davranışı üzerinde rölatif sıkılık etkisini görmek amacıyla öncelikle doygunluk derecesi % 40, % 60 ve % 100 alınarak Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41 ile verilen grafikler hazırlanmıştır.



Şekil 4.39. Basınç dalgası hızı ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 40)

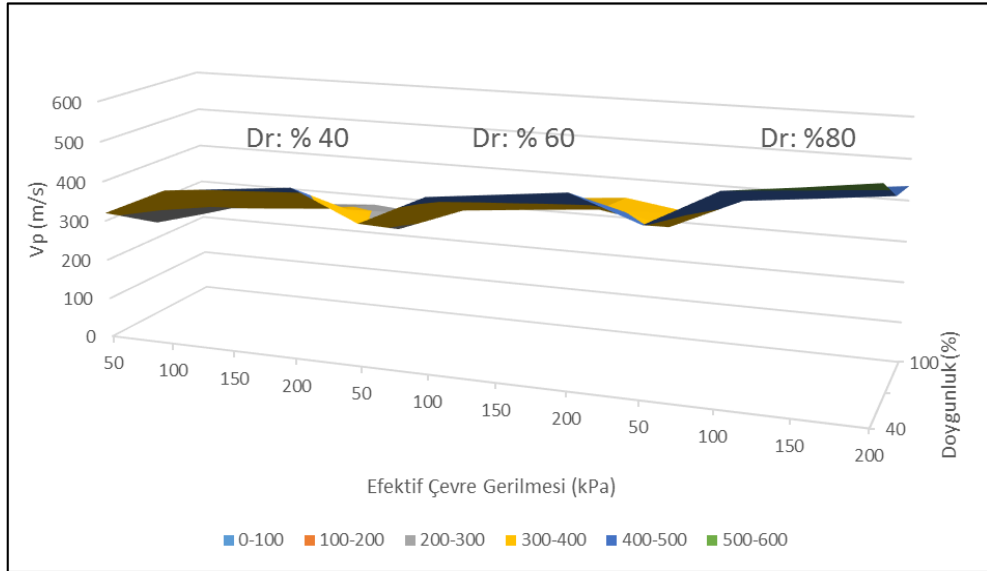


Şekil 4.40. Basınç dalgası hızı ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 60)



Şekil 4.41. Basınç dalgası hızı ve rölatif sıklık ilişkisi (S: % 100)

Basınç dalgası hızı davranışı üzerinde tüm etkileri görmek amacıyla son olarak rölatif sıklık ve doygunluk derecesinin görülebildiği Şekil 4.42 hazırlanmıştır.



Şekil 4.42. Basınç dalgası davranış eğilimi

Yukarıda verilen şekiller analiz edildiğinde, basınç dalgası hızlarının rölatif sıklılığın % 40 değerinden % 60 ve % 80 e artması durumunda %10 ile % 20 arasında artış tespit edilmiştir. Efektif çevre gerilmesinin 50 kPa dan 100 kPa değerine artışına bağılı olarak yaklaşık % 20 arttığı ancak 150 kPa dan 200 kPa değerine artışına bağılı olarak yaklaşık % 8 arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca doygunluk derecesinin % 40, 60 ve 100 olarak değışimine bağılı olarak kayma dalgası hızlarının % 10 ile % 35 arasında azalım gösterdiği tespit edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen tüm deneysel çalışmalar ve regresyon analizleri sonucunda zeminlerin dinamik etkiler altında davranışlarını gösteren kayma modülü, kayma dalgası hızı ve basınç dalgası hızı için aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Literatür ile uyumlu olarak efektif çevre gerilmesi, boşluk oranı ve doygunluk derecesi zeminlerin kayma modülü, kayma dalgası ve basınç dalgası hızı değerleri üzerinde etkili olan parametrelerdir.

Zeminlerin kayma modülü değerleri efektif çevre basıncı ile artmaktadır, ancak boşluk oranı ile azalmaktadır. Ayrıca doygunluk derecesi ile azalırken, rölatif sıklık ile artmaktadır. Benzer şekilde zeminlerin kayma dalgası hızı değerleri efektif çevre basıncı ile artarken boşluk oranı ile azalmaktadır. İlave olarak doygunluk derecesi ile azalmaktadır fakat rölatif sıklık ile artmaktadır. Zeminlerin basınç dalgası hızı değerleri ise efektif çevre basıncı ile artarken boşluk oranı ile azalmaktadır. Diğer yandan doygunluk derecesi ile azalmaktadır ancak rölatif sıklık ile artmaktadır.

Zeminlerin kayma modülü ve kayma dalgası hızları üzerinde doygunluk derecesinin etkisinin sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca efektif çevre gerilmesinin ve boşluk oranının etkisinin diğer faktörlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Rölatif sıklığın artması durumunda ve efektif çevre gerilmesinin artışına bağlı olarak kayma modülü ve kayma dalga hızlarından en yüksek değerler ölçülmüştür.

Kayma modülü ve kayma dalga hızı için rezonant kolon cihazı kullanılarak yapılan ölçümler literatür ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Deneysel sonuçların regresyon analizine tabi tutulmasıyla elde edilen alternatif eşitlikler ile zemin dinamik parametreleri başarılı bir şekilde tahmin edilebilmektedir.

Ayrıca, çalışma belirtilen aralıkları ve koşulları kapsamaktadır, kumların dinamik parametreleri ile alakalı daha detaylı yorumlar yapabilmek için arazi deneyleri ve daha geniş aralıkta laboratuvar deneylerine ihtiyaç olduğu açıktır.

KAYNAKLAR

- [1] Youn, J., Choo, Y.W., Kim, D.S., "Measurement of small-strain shear modulus G_{max} of dry and saturated sands by bender element, resonant column, and torsional shear tests," *Can. Geotech. Journal*, **45**, 1426-1438, 2008.
- [2] Baxter, C.D.P., Bradshaw, A.S., Green, R.A., Wang, J.H., "Correlation between cyclic resistance and shear-wave velocity for providence silts," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, **134** (1), 37-46, 2008.
- [3] Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Yoshida, S., Fukushima, S., Sudo, H., "Shear modulus and damping by drained tests on clean sand specimens reconstituted by various methods," *Soils and Foundations*, **19** (1), 39-54, 1979.
- [4] Bartake, P.P., Singh, D.N., "Studies on the determination of shear wave velocity in sands," *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, **2** (1), 41-49, 2007.
- [5] Yunmin, C., Han, K., Ren-peng, C., "Correlation of shear wave velocity with liquefaction resistance based on laboratory tests," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**, 461-469, 2005.
- [6] Wang, G.X., Kuwano, J., "Modelling of strain dependency of shear modulus and damping of clayey sand," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **18**, 463-471, 1999.
- [7] Markowska-Lech, K., "The determination of shear modulus in overconsolidated cohesive soils," *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, **12**, 61-71, 2008.
- [8] Cascante, G., Santamarina, C., Yassir, N., "Flexural excitation in a standard torsional-resonant column device," *Can. Geotech. Journal*, **35**, 478-490, 1998.
- [9] Builes, M., Garcia, E., Riveros, C.A., "Dynamic and static measurements of small strain moduli of Toyoura sand," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, **43**, 86-101, 2008.

- [10] Khan, A., El Naggar, M.H., Cascante, G., "Frequency dependent dynamic properties from resonant column and cyclic triaxial tests," *Journal of The Franklin Institute*, **348**, 1363-1376, 2011.
- [11] Kokusho, T., "Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range," *Soils and Foundations*, **20** (2), 305-312, 1980.
- [12] Altun, S., Ansal, A., "Kumlarda dinamik kayma modülünün belirlenmesi," *Türkiye İnşaat Müh. XVII. Teknik Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 403-406, 2004.
- [13] Şener, A., Özmen, M., Kaya, Z., Erken, A., "The behavior of soils in dynamic triaxial and torsional shear test systems," 2. *Geoteknik Sempoiumu Bildiriler Kitabı*, Adana, 359-371, 2007.
- [14] Terauchi, T., Altun, S., Erken, A., Yasuda, S., "Burulmalı dinamik deney sistemiyle sıvılaşma deneyleri," *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 584-591, 1998.
- [15] Altun, S., Ansal, A., "Tekrarlı yükler altında kumların gerilme-şekil değiştirme özellikleri," *itüdergisi*, **2** (4), 25-34, 2003.
- [16] Koseki, J., Kawakami, S., Nagayama, H., Sato, T., Hayano, K., Torimitsu, M., "Liquefaction tests of Toyoura sand measuring change of quasi-elastic deformation properties," *Bulletin Earthquake Resistant Structure Research Center*, **32**, 47-60, 1999.
- [17] Teachavorasinskun, S., Thongchim, P., Lukkunaprasit, P., "Shear modulus and damping of soft Bangkok clays," *Can. Geotech. Journal*, **39**, 1201-1208, 2002.
- [18] Zhou, Y., Chen, Y., "Influence of seismic cyclic loading history on small strain shear modulus of saturated sands," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**, 341-353, 2005.
- [19] Patel, A., Bartake, P.P., Singh, D.N., "An empirical relationship for determining shear wave velocity in granular materials accounting for grain morphology," *Geotechnical Testing Journal*, **32** (1), 1-10, 2008.

- [20] Yang, J., Savidis, S., Roemer, M., "Evaluating liquefaction strength of partially saturated sand," *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130** (9), 975-979, 2004.
- [21] Richter, S., Huber, G., "Time-dependent behavior of fine-grained model material in resonant column experiments," *Granular Matter*, **6**, 195-206, 2004.
- [22] Bilge, H.T., Çetin, K.Ö., "Suya doymun kumlu zeminlerin tekrarlı boşluk suyu basıncı gelişim davranışlarının modellenmesi," *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Ankara, 1-8, 2011.
- [23] Cabalar, A.F., Cevik, A., "Modelling damping ratio and shear modulus of sand-mica mixtures using neural networks," *Engineering Geology*, **104**, 31-40, 2009.
- [24] Altun, S., Göktepe, A.B., "Dependence of dynamic shear modulus of uniform sands on stress level and density," *Civil Engineering and Environmental Systems*, **23** (2), 101-116, 2006.
- [25] Schneider J.A., Hoyos Jr, L.P., Mayne, W., Macari, E.J., Rix, G.J., "Field and laboratory measurements of dynamic shear modulus of Piedmont residual soils," *ASCE Geotechnical Special Publication*, **92**, 12-25, 1999.
- [26] Elibol, B., Erken, A., "Doymun, kısmi doymun ve kuru kum numunelerin dinamik davranışlarının incelenmesi," *Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi*, Antalya, 1-11, 2005.
- [27] Chritakos, G., "Soil behaviour under dynamic loading conditions: experimental procedures and statistical trends," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **17**, 175–190, 2003.
- [28] Sitharam, T.G., Govindaraju, L., Sridharan, A., "Dynamic properties and liquefaction potential of soils," *Current Science Specal Section: Geotechics and Earthquake Hazards*, **87** (10), 1370-1378, 2004.
- [29] Hadge, W.E., *A relationship between the drained and undrained cyclic behavior of sand*, Master of Science Thesis, Massachusetts Insitute of Technology, USA, 1977.

- [30] Ghahramani, A., Dehghani, M., Habibagahi, G., Berrill, J., "Liquefaction potential by torsional shear," *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zeland, 1-6, 2000.
- [31] Meidani, M., Shafiee, A., Habibagahi, G., Jafari, M.K., Mohri, Y., Ghahramani, A., Chang, C.S. "Granule shape effect on the shear modulus and damping ratio of mixed gravel and clay," *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, **32** (B5), 501-518, 2008.
- [32] Vucetic, M., Lanzo, G., Doroudian, M., "Damping at small strains in cyclic simple shear test," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124** (7), 585-597, 1998.
- [33] Sugano, T. Yanagisawa, E., "Cyclic undrained shear behavior of sand under surface wave stress conditions," *Earthquake Engineering Tenth World Conference*, Rotterdam, 1323-1328, 1992.
- [34] Santos, J.A. Correia, A.G., "Shear modulus of soils under cyclic loading at small and medium strain level," *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zeland, 1-8, 2000.
- [35] Sykora, D.W. *Examination of existing shear wave velocity and shear modulus correlations in soils*, Department of the Army, Washington, USA, 1987.
- [36] Alla, P. *Dynamic behavior of unsaturated soils*, Louisiana, Master of Science Thesis, Louisiana State University, USA, 2009.
- [37] Polito, C.P., *The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils*, Doctor of Philosophy Thesis, Virginia Polytechnic Institute, USA 1999.
- [38] Chaudhary, S., Kuwano, J., Hashimoto, S., Hayano, Y., Nakamura, Y., "Effects of initial fabric and shearing direction on cyclic deformation characteristics of sand," *Soils and Foundations*, **42** (1), 147-157, 2002.
- [39] Ladd, R.S., "Preparing test specimens using undercompaction," *Geotechnical Testing Journal*, **1** (1), pp. 16-23, 1978.

- [40] Orense, R.P., Hyodo, M., Kaneko, T., "Dynamic deformation characteristics of pumice sand," *2012 NZSEE Annual Technical Conference*, Christchurch, 1-8, 2012.
- [41] Lanzo, G., Delia, B., "Cyclic properties of Toyoura sand at small to medium strains in simple shear test," *Rivista Italiana di Geotecnica*, **2**, 79-83, 2003.
- [42] Papadopoulou, A., Kallioglou, P., Tika, T., Papadopoulos, S., Batur, E., "Liquefaction resistance of silty sands and dynamic properties of cohesive soils from Düzce, Turkey," *Journal of Earthquake Engineering*, **14**, 351-362, 2010.
- [43] Cabalar, A.F., "Applications of the oedometer, triaxial and resonant column tests to the study of micaceous sands," *Engineering Geology*, **112**, 21-28, 2010.
- [44] Kallioglou, P., Tika T. Pitilakis, K., "Shear modulus and damping ratio of cohesive soils," *Journal of Earthquake Engineering*, **12**, 879-913, 2008.
- [45] Kumar, J. Madhusudhan, B.N., "A note on the measurement of travel times using bender and extender elements," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**, 630-634, 2010.
- [46] Ishibashi, I., Zhang, X., "Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay," *Soils and Foundations*, **33** (1), 182-191, 1993.
- [47] Yang, J., "Frequency-dependent amplification of unsaturated surface soil layer," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**, 526-531, 2006.
- [48] Georgiannou, N., Tsomokos, A., Stavrou, K., "Monotonic and cyclic behaviour of sand under torsional loading," *Geotechnique*, **58** (2), 13-124, 2008.
- [49] Ülker, M.B.C., *Siltli ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Ens., İstanbul, 2004.
- [50] Andrus, R.D., Stokoe, K.H., "Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **1**, 1015-1025, 2000.

- [51] Lee, C.J., Huang, H.Y., "Wave velocities and their relation to fabric evolution during the shearing of sands," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**, 1-13, 2007.
- [52] Osinov, V., "Theoretical investigation of large-amplitude waves in granular soils," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **17**, 13-28, 1998.
- [53] Taiebat, M., Jeremic, B., Dafalias, Y.F., Kaynia, A.M. Cheng, Z., "Propagation of seismic waves through liquefied soils," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**, 236-257, 2010.
- [54] Okur, V., Ansal, A., "Tekrarlı yük etkisinde kil zeminlerin lineer olmayan elastik davranışı," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **22** (1), 169-185, 2009.
- [55] Tipi, Ç., *Zeminlerin dinamik mukavemet özelliklerinin belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üni. Fen Bilimleri Enst., Kayseri, 2010.
- [56] Polito, C.P., Green, R.A., Lee, J., "Pore pressure generation models for sands and silty soils subjected to cyclic loading," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **1**, 1490-1500, 2008.
- [57] Sanin, M., Wijewickreme, D., "Cyclic shear response of channel-fill fraser river delta silt," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **26**, 854-869, 2006.
- [58] Altun, S., "Suya doygun kumların drenajsız koşullardaki davranışının tekrarlı yükler altında burulmalı kesme deney aleti ile incelenmesi,»" *DEÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, **6** (1), 139-152, 2004.
- [59] Okur, V., Altun, S., Ansal, A. "İnce daneli zeminlerde çevrimsel şekil değiştirme," *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, 199-208, 2007.
- [60] Ivsic, T., "A model for presentation of seismic pore water pressures," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **26**, 191-199, 2006.
- [61] Özaydın, K., *Zemin dinamiği*, Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayınları, İstanbul, 1982.

- [62] Celep, Z., Kumbasar, N., *Deprem mühendisliğine giriş*, İTÜ Yayınları, İstanbul, 2004.
- [63] Kramer, S.L., *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [64] Das, B.M., Ramana, G.V., *Principles of soil dynamics*, Cengage Learning, Stamford, 2010.
- [65] Onur, M.I., Tuncan, M. Tuncan, A., "An experimental study for determining the shear modulus of Toyoura sand," *Second European Conference on Earthquake Engineering And Seismology*, İstanbul, 1-7, 2014.
- [66] AASHTO, *Standard specification for highway bridges*, USA, 1996.
- [67] Ishihara, K., *Soil behavior in earthquake geotechnics*, Clarendon Press, Oxford, 2003.
- [68] Okur, D.V., *Farklı dinamik gerilme genlikleri altında ince daneli zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet davranışları*, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul, 2002.
- [69] Sakarya Üniversitesi Sakarya Meslek Yüksekokulu Deprem Araştırma ve Yer Hareketleri (Sismoloji) Resmi Web Sitesi, 2015, <http://www.sismo.sakarya.edu.tr>.
- [70] Onur, M.I, Umu S.U., Okur, D.V., Tuncan, M., Tuncan, A., "An experimental comparison between the shear and the plane waves by using resonant column test," *22. International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, 865-870, 2012.
- [71] ASTM, ASTM-D4015-07 *Standard test methods for modulus and damping of soils by resonant-column method*, USA, 2007.
- [72] Onur, M.I, Umu, S.U, Okur, D.V, Tuncan, M., Tuncan, A., Ansal, A., "Farklı konfigürasyona sahip iki rezonant kolon test cihazının deneysel karşılaştırması," *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi*, İstanbul, 265-276, 2010.
- [73] Önalp, A., Arel, E., *Geoteknik bilgisi 1 zeminler ve mekaniği*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2013.

- [74] İnan, A., *Matlab klavuzu*, Papatya Yayınevi, İstanbul, 2012.
- [75] Aydın, D., *Uygulamalı regresyon analizi kavramlar ve R hesaplamaları*, Nobel Akademik Yayıncılık, İstanbul, 2014.
- [76] Wichtmann, T., Triantafyllidis, T., "Influence of a cyclic and dynamic loading history on dynamic properties of dry sand part I: cyclic and dynamic torsional prestraining," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 127-147, 2003.

Ek 1. Kodlar

```
%% %%% CALCULATIONS AND DRAWING %%% %%% %%%
clear all;
close all;
clc;
%% construction of data set
file = 'allData.xlsx';
sheet = 1;
%%rangedefs
voidRatRange = 'A2:A85';
drRange = 'B2:B85';
sRange = 'C2:C85';
sigmaEffRange = 'D2:D85';
freqResRange = 'E2:E85';
vsRange = 'F2:F85';
vpRange = 'G2:G85';
gmaxRange = 'H2:H85';
%% sets
voidRatio = xlsread(file, sheet, voidRatRange);
dr = xlsread(file, sheet, drRange);
S = xlsread(file, sheet, sRange);
sigmaEff = xlsread(file, sheet, sigmaEffRange);
resFreq = xlsread(file, sheet, freqResRange);
Vs = xlsread(file, sheet, vsRange);
Vp = xlsread(file, sheet, vpRange);
gMax = xlsread(file, sheet, gmaxRange);

%% multivariable regression definitions
load franke;
%% % 1 fit for Dr S GMax
```

```

gMax1Fit = fit([dr, S], gMax, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure (1)
subplot(1,2,1);
plot(gMax1Fit, [dr, S], gMax)
title('Plot of G_{max} with Respect to S and Dr')
xlabel('Dr %');
ylabel('S %');
zlabel('G_{max} [MPa]');

subplot(1,2,2);
plot(gMax1Fit, [dr, S], gMax,'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of G_{max} with Respect to S and Dr')
xlabel('Dr %');
ylabel('S %');
zlabel('G_{max} [MPa]');
%% % 2 fit for voidRatio S Gmax

gMax2Fit = fit([voidRatio, S], gMax, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure(2)
subplot(1,2,1);
plot(gMax2Fit, [voidRatio, S], gMax)
title('Plot of G_{max} with Respect to Void Ratio (e) and Dr')
xlabel('Void Ratio (e)');
ylabel('S %');
zlabel('G_{max} [MPa]');

subplot(1,2,2);
plot(gMax2Fit, [voidRatio, S], gMax,'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of G_{max} with Respect to Void Ratio (e) and Dr')
xlabel('Void Ratio (e)');
ylabel('S %');
zlabel('G_{max} [MPa]');

```

```

%% %3 fit for S, sigma effective and GMax

gMax3Fit = fit([S, sigmaEff], gMax, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure (3)
subplot(1,2,1);
plot(gMax3Fit, [S, sigmaEff], gMax)
title('Plot of G_{max} with Respect to \sigma_{eff} [MPa] and S');
xlabel('S %');
ylabel('\sigma_{eff} [kPa]');
zlabel('G_{max} [MPa]');

subplot(1,2,2);
plot(gMax3Fit, [S, sigmaEff], gMax, 'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of G_{max} with Respect to \sigma_{eff} [MPa] and S')
xlabel('S %');
ylabel('\sigma_{eff} [MPa]');
zlabel('G_{max} [MPa]');
%% % fit for Dr void Ratio and GMax

gMax4Fit = fit([dr, voidRatio], gMax, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure (4)
subplot(1,2,1);
plot(gMax4Fit, [dr, voidRatio], gMax)
title('Plot of G_{max} with Respect to Dr and Void Ratio (e)');
xlabel('Dr %');
ylabel('Void Ratio (e)');
zlabel('G_{max}');

subplot(1,2,2);
plot(gMax4Fit, [dr, voidRatio], gMax, 'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of G_{max} with Respect to Dr and Void Ratio (e)');
xlabel('Dr');

```

```

ylabel('Void Ratio');
xlabel('G_{max} [MPa]');
%% % fit for S, sigma effective and GMax

gMax5Fit = fit([S, sigmaEff], gMax, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure (5)
subplot(1,2,1);
plot(gMax5Fit, [voidRatio, sigmaEff], gMax)
title('Plot of G_{max} with Respect to voidRatio and Sigma Effective
\sigma_{eff}');
xlabel('voidRatio (e)');
ylabel('\sigma_{eff} [kPa]');
xlabel('G_{Max} [MPa]');

subplot(1,2,2);
plot(gMax5Fit, [voidRatio, sigmaEff], gMax, 'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of G_{max} with Respect to voidRatio and Sigma
Effective \sigma_{eff}');
xlabel('Dr');
ylabel('Void Ratio');
xlabel('G_{max} [MPa]');

%% % fit for dr s and vs

vs1Fit = fit([dr, S], Vs, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure (6)
subplot(1,2,1);
plot(vs1Fit, [dr, S], Vs)
title('Plot of V_{s} [m/s] with Respect to Dr and S');
xlabel('Dr %');
ylabel('S %');
xlabel('V_{s} [m/s]');

```

```

subplot(1,2,2);
plot(vs1Fit, [dr, S], Vs, 'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of V_{s} with Respect to D_{r} and S %');
xlabel('Dr');
ylabel('S %');
zlabel('V_{s} [m/s]');

%% % fit for s e and Vs 7

vs2Fit = fit([S, voidRatio], Vs, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure (7)
subplot(1,2,1);
plot(vs2Fit, [S, voidRatio], Vs)
title('Plot of V_{s} [m/s] with Respect to Void Ratio (e) and S');
xlabel('S %');
ylabel('Void Ratio (e)');
zlabel('V_{s} [m/s]');

subplot(1,2,2);
plot(vs2Fit, [S, voidRatio], Vs, 'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of V_{s} with Respect to S% and Void Ratio (e)');
xlabel('S %');
ylabel('Void Ratio (e)');
zlabel('V_{s} [m/s]');

%% % 8 fit for s sigma effective and vs

vs3Fit = fit([S, sigmaEff], Vs, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure (8)
subplot(1,2,1);
plot(vs3Fit, [S, sigmaEff], Vs)

```

```

title('Plot of  $V_{s}$  [m/s] with Respect to  $\sigma_{eff}$  and S');
xlabel('S %');
ylabel('\sigma_{eff} [kPa]');
zlabel('V_{s} [m/s]');

subplot(1,2,2);
plot(vs3Fit, [S, sigmaEff], Vs, 'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of  $V_{s}$  with Respect to S% and Void Ratio (e)');
xlabel('S %');
ylabel('\sigma_{eff} [MPa]');
zlabel('V_{s} [m/s]');

%% % 9 fit for dr e and Vs

vs4Fit = fit([dr, voidRatio], Vs, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure (9)
subplot(1,2,1);
plot(vs4Fit, [dr, voidRatio], Vs)
title('Plot of  $V_{s}$  [m/s] with Respect to dr and Void Ratio (e)');
xlabel('Dr %');
ylabel('Void Ratio (e)');
zlabel('V_{s} [m/s]');

subplot(1,2,2);
plot(vs4Fit, [dr, voidRatio], Vs, 'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of  $V_{s}$  with Respect to dr and Void Ratio (e)');
xlabel('Dr');
ylabel('Void Ratio (e)');
zlabel('V_{s} [m/s]');

%% % 10 fit for S sigma effective and Vs

```



```

vs5Fit = fit([S, sigmaEff], Vs, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure (10)
subplot(1,2,1);
plot(vs5Fit, [voidRatio, sigmaEff], Vs)
title('Plot of V_{s} [m/s] with Respect to voidRatio and \sigma_{eff}');
xlabel('voidRatio (e)');
ylabel('\sigma_{eff} [kPa]');
zlabel('V_{s} [m/s]');

subplot(1,2,2);
plot(vs5Fit, [S, sigmaEff], Vs, 'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of V_{s} with Respect to S and \sigma_{eff}');
xlabel('S');
ylabel('\sigma_{eff}');
zlabel('V_{s} [m/s]');

%% % 11 fit for Dr S Vp

vp1Fit = fit([dr, S], Vp, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure (11)
subplot(1,2,1);
plot(vp1Fit, [dr, S], Vp)
title('Plot of V_{p} [m/s] with Respect to Dr and S');
xlabel('Dr %');
ylabel('S %');
zlabel('V_{p} [m/s]');

subplot(1,2,2);
plot(vp1Fit, [dr, S], Vp, 'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of V_{p} with Respect to D_{r} and S %');
xlabel('Dr');
ylabel('S %');

```

```

xlabel('V_{p} [m/s]');

%% % 12 fit for S e Vp

vp2Fit = fit([S, voidRatio], Vp, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure (12)
subplot(1,2,1);
plot(vp2Fit, [S, voidRatio], Vp)
title('Plot of V_{p} [m/s] with Respect to Void Ratio (e) and S');
xlabel('S %');
ylabel('Void Ratio (e)');
zlabel('V_{p} [m/s]');

subplot(1,2,2);
plot(vp2Fit, [S, voidRatio], Vp, 'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of V_{p} with Respect to S% and Void Ratio (e)');
xlabel('S %');
ylabel('Void Ratio (e)');
zlabel('V_{p} [m/s]');

%% % 13 fit for Dr sigma effective and vp

vp3Fit = fit([dr, sigmaEff], Vp, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure (13)
subplot(1,2,1);
plot(vp3Fit, [voidRatio, sigmaEff], Vp)
title('Plot of V_{p} [m/s] with Respect to voidRatio and \sigma_{eff}');
xlabel('voidRatio (e)');
ylabel('\sigma_{eff} [kPa]');
zlabel('V_{p} [m/s]');

subplot(1,2,2);

```

```

plot(vp3Fit, [S, sigmaEff], Vp, 'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of  $V_{p}$  [m/s] with Respect to Dr and  $\sigma_{eff}$ ');
xlabel('dr');
ylabel('\sigma_{eff}');
zlabel('V_{p}');

%% % 14 fit for dr e vp

vp4Fit = fit([dr, voidRatio], Vp, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure (14)
subplot(1,2,1);
plot(vp4Fit, [dr, voidRatio], Vp)
title('Plot of  $V_{p}$  [m/s] with Respect to Dr and Void Ratio');
xlabel('Dr %');
ylabel('Void Ratio (e)');
zlabel('V_{p} [m/s]');

subplot(1,2,2);
plot(vp4Fit, [S, voidRatio], Vp, 'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of  $V_{p}$  [m/s] with Respect to Dr and Void Ratio');
xlabel('Dr');
ylabel('Void Ratio (e)');
zlabel('V_{p}');

%% % 15 fit for S effective stress and Vp

vp5Fit = fit([S, sigmaEff], Vp, 'poly23', 'normalize', 'on')
figure (15)
subplot(1,2,1);
plot(vp5Fit, [S, sigmaEff], Vp)
title('Plot of  $V_{p}$  [m/s] with Respect to S and  $\sigma_{eff}$ ');
xlabel('S %');

```

```

ylabel('\sigma_{eff} [kPa]');
xlabel('V_{p} [m/s]');

subplot(1,2,2);
plot(vp5Fit, [S, sigmaEff], Vp, 'Style', 'Residuals')
title('Plot of Residuals of V_{p} [m/s] with Respect to S and \sigma_{eff}');
xlabel('S');
ylabel('\sigma_{eff}');
xlabel('V_{p}');

%%%%%% RELATIONS BETWEEN E S SigmaEff with Gmax VS
VP%%%%%%

```