T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

TEK YÖNLÜ KONSOLİDASYON PROBLEMİNİN ALTERNATİF YÖNTEMLER İLE ARAŞTIRILMASI

Yüksek Lisans Tezi

RAND MAJID RASOOL ZWAYEN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad Noori

İstanbul – 2024

TEZ TANITIM FORMU

Yazar Adı Soyadı : RAND MAJID RASOOL ZWAYEN

Tezin Dili **:** Türkçe

Tezin Adı **:** Tek Yönlü Konsolidasyon Probleminin Alternatif Yöntemler İle Araştırılması

Enstitü **:** İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı **:** İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tezin Türü **:** Yüksek Lisans

Tezin Tarihi **:** 18 / 01 /2024

Sayfa Sayısı **:** 154

Tez Danışmanları **:** Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad Noori

Dizin Terimleri **:** Tek boyutlu konsolidasyon, Tamamlayıcı fonksiyon yöntemi (TFY), Tekrarlı yükler, Laplace Dönüşümü

Türkçe Özet **:** Bu tez çalışmasında, tek boyutlu konsolidasyon zemin problemini çözmek ve fazla boşluk suyu basıncının sonuçlarını elde etmek için önerilen yöntem ilk kez sunulmuştur. Sabit yük tipi ve tekrarlı yükler için farklı zemin tiplerinin konsolidasyon üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Dağıtım Listesi **:**

1. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne
2. YÖK Ulusal Tez Merkezine

İmzası

Rand Zwayen

T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

TEK YÖNLÜ KONSOLİDASYON PROBLEMİNİN ALTERNATİF YÖNTEMLER İLE ARAŞTIRILMASI

Yüksek Lisans Tezi

RAND MAJID RASOOL ZWAYEN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad Noori

İstanbul – 2024

BEYAN

Bu tezin hazırlanmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğu, kullanılan verilerde herhangi tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez olarak sunulmadığını beyan ederim.

Rand Zwayen

…/…/2024

İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Rand Majid Rasool Zwayen'in Tek Yönlü Konsolidasyon Probleminin Alternatif Yöntemler İle Araştırılması adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği anabilim dalı, İnşaat Mühendisliği bilim dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

Başkan — *Dr. Öğr. Üyesi Ferruh MAHNAMFAR*

İmza

Üye — *Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORİ*

(Danışman)

Üye — *İmza*

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa NURİ

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

... / ... / 2024

İmzası

Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmanın temel amacı, zamanla değişen yüklere maruz kalan farklı tiplerdeki zeminlerde kum, lemli kum, kumlu lem, lem, silt lem, kumlu kil lem, kil lem, siltli kil lem, kumlu kil, siltli kil, kil zemin tek boyutlu konsolidasyon problemlerini ve aşırı boşluk suyu basıncına verilen tepkileri teorik olarak araştırmaktır.

Bu çalışmada önerilen yöntem ilk kez konsolidasyon problemlerine uygulanmıştır. Kısmi bir diferansiyel denklem olan tek boyutlu konsolidasyon denklemini çözmek ve onu adi diferansiyel denkleme dönüştürmek için Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY) ile Laplace dönüşümü kullanılmıştır. Önerilen yöntemde olayı idare eden diferansiyel denklemler esas alınmış ve bu yöntem ile sınır değer problemleri başlangıç değer problemlere indirgenerek çözülmüştür. Bu çalışmada, önerilen yöntemin uygulanabilmesi için FORTRAN dilinde bir bilgisayar programı yazılmıştır. Program aracılığıyla Laplace uzayında boşluk suyu fazla basınç sonuçları elde edilmiş ve sonuçlar ters Laplace dönüşümü kullanılarak zaman uzayında aktarılmıştır. Bu çalışmada, zamana bağlı farklı yükler, farklı zemin tiplerine uygulanmış ve elde edilen fazla boşluk suyu basıncı sonuçları literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda büyük bir uyum görülmüştür. Böylece önerilen yöntemin olayları idare eden kanonik denklemlerin çözümünde etkili ve başarılı olduğu kanıtlanmıştır.

Yapılan tez çalışmasının sonuçlarına göre, kum zemine ait boşluk suyu basıncı değerlerinin diğer zemin tiplerine göre daha az periyodik tepkiye sahip olduğunu, killi zeminlerin ise büyük bir periyodik tepki gösterdiği gözlemlenmektedir. Ayrıca zemin özelliklerinin konsolidasyon üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmamızda sabit yükleme altında farklı zemin tiplerinde fazla boşluk suyu basıncın değerinin giderek azaldığı tespit edilmiştir. Killi zeminlerin geçirgenliğinin düşük olmasından dolayı, fazla boşluk suyu basıncının dağılması diğer zeminlere göre daha uzun sürmekte, bu da bu olgunun nispeten daha uzun bir sürede meydana geldiği anlamına gelmektedir .

Anahtar Kelimeler: Tek boyutlu konsolidasyon, Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY), Tekrarlı yükler, Laplace Dönüşümü.

SUMMARY

The objective of this study is to investigate one-dimensional consolidation problems and responses to excess pore water pressure in different types of soils subjected to time-varying loads. In the study, a proposed new analytical method for solving the one-dimensional consolidation equation is introduced for the first time. A unified approach of the Complementary Functions Method (CFM) and Laplace transform are used to solve the one-dimensional consolidation equation, which is a partial differential equation, and transform it into an ordinary differential equation. From the features of the proposed method, the differential equations governing the event are taken as a basis. In this way, the boundary value problem is solved by being reduced to the initial value problem.

In order to apply the method proposed in this study, a computer program was developed in Fortran programming language to obtain the excess pore water pressure. The obtained results are subsequently retransferred to the time domain through an efficient numerical inverse Laplace method. Using Fortran program, various loads are applied to different soil types in this study the obtained results of excess pore water pressure have been compared with the existing studies in the literature. The comparison demonstrated a great agreement, thus proving that the proposed method is effective, applicable, and successful in solving the canonical equations governing the events.

The study's findings reveal that sandy soils exhibit a less pronounced cyclic response compared to other soil types, whereas clay soils exhibit significant periodicity in their response. The investigation into the effect of soil properties on consolidation revealed a gradual reduction in excess pore water pressure over time across various soil types subjected to a constant load. Due to the lower permeability of clay soils, the dissipation of excess pore water pressure takes a longer time compared to other soil types. Consequently, this phenomenon occurs over a relatively prolonged duration in clay soils.

Keywords: One-dimensional (1D) consolidation, Complementary Functions Method (CFM), Cyclic loadings, Laplace domain.

İÇİNDEKİLER

ÖZET……..... i
SUMMARY…….. ii
İÇİNDEKİLER……. iii
KISALTMALAR……..... vi
TABLOLAR LİSTESİ……. vii
ŞEKİLLER LİSTESİ……... viii
ÖNSÖZ……xviii
GİRİŞ……1

BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜRE TARAMASI

1.1 Sıkışma ve Deformasyon Arasındaki İlişki……3
1.2 Oturma……4
1.2.1 Oturmanın Nedenleri..... 5
1.2.2 Oturma Hasarları 7
1.3 Konsolidasyon……10
1.3.1 Konsolidasyonun Önemi..... 11
1.3.2 Konsolidasyonun Temelleri 12
1.3.3 Yay ve Piston Analojisi..... 14
1.3.4 Konsolidasyon Mekaniği 15
1.4 Konsolidasyon Teorileri……16
1.4.1 Klasik Konsolidasyon Teorisi Ve Terzaghi'nin Tek Boyutlu Denklemi……16
1.4.2 Konsolidasyon İle İlgili Diğer Teori ve Çalışmaları 18
1.4.3 Poroelastik Konsolidasyon Teorisi..... 22
1.4.4 Tekrarlı Yüklerin Zeminler Üzerindeki Etkisi 22
1.4.5 Rampa Yüklerin Zeminler Üzerindeki Etkisi..... 24
1.4.6 Laplace Dönüşümünü Kullanarak Konsolidasyon Problemini Ele Alan Önceki Çalışmalar..... 25
1.4.7 Sonlu Farklar yöntemini Kullanarak Konsolidasyon Problemini Ele Alan Önceki Çalışmalar..... 27

1.4.8 Sonlu Eleman Yöntemini Kullanarak Konsolidasyon Problemini Ele Alan Önceki Çalışmalar 28
1.4.9 Sonlu Fourier Sinüs Dönüşümü Yöntemini Kullanarak Konsolidasyon Problemini Ele Alan Önceki Çalışmalar 29

İKİNCİ BÖLÜM
MATERYAL VE METOT

2.1 Tek Boyutlu Konsolidasyonun Yönetici Denklemleri (Model Denklemler)……31
2.2 Başlangıç ve Sınır Şartları……33
2.3 Tek Boyutlu Konsolidasyon Probleminin Teorik Çözümü …….. 35
2.3.1 Laplace Uzayında Çözüm 35
2.3.2 Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yönteminin Uygulanması 37
2.4 Zamanla Değişen Dış Yükler İçin Laplace Dönüşümleri……. 38
2.4.1 Sabit Yük $q1(t)$ 38
2.4.2 Kosinüs Dalga Tipi Periyodik Yük $q2(t)$ 39
2.4.3 Kare Dalga Tipi Periyodik Yük $q3$(t)..... 40
2.4.4 Üçgen Dalga Tipi Periyodik Yük $q4$(t)..... 41
2.4.5 Yarım Sinüs Dalga Tipi Periyodik Yük $q5$(t) 44
2.4.6 Testere Dişi Dalga Tipi Periyodik Yük $q6$(t) 46
3.1 Önerilen Yaklaşımın Doğrulanması…….. 53
3.1.1 Tekrarlı Yüklemeye Maruz Kalan Kumlu Zeminler İçin Karşılaştırma 54
3.1.2 Tekrarlı Yüklemeye Maruz Kalan Killi Zeminler İçin Karşılaştırma 55
3.2 Zemin Özelliklerinin Tek Boyutlu Konsolidasyon Üzerine Etkisinin Araştırılması……..58
3.2.1 Sabit Yük $q1$(t) Durumu 58
3.2.2 Kosinüs Dalga Tipi Periyodik Yük $q2(t)$ Durumu 63
3.2.3 Kare Dalga Tipi Periyodik Yük $q3(t)$ Durumu 69
3.2.4 Üçgen Dalga Tipi Periyodik Yük $q4(t)$ Durumu..... 76
3.2.5 Yarım Sinüs Dalga Tipi Periyodik Yük $q5(t)$ Durumu..... 82

3.2.6 Testere Dişi Dalga Tipi Periyodik Yük $q6(t)$ Durumu..... 89
3.3 Aynı Zeminde Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi……95
3.3.1 Kum Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi..... 95
3.3.2 Lemli Kum Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi 97
3.3.3 Kumlu Lem Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi 99
3.3.4 Lem Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi..... 101
3.3.5 Silt Lem Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi..... 103
3.3.6 Kumlu Kil Lem Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkis105
3.3.7 Kil Lem Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi 107
3.3.8 Siltli Kil Lem Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi 109
3.3.9 Kumlu Kil Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi..... 111
3.3.10 Siltli Kil Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi..... 113
3.3.11 Kil Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi..... 115
SONUÇLAR…….119
KAYNAKLAR…….122
ÖZGEÇMİŞ……129

KISALTMALAR

p_f	:	Fazla Boşluk suyu basıncı
c_v	:	Konsolidasyon katsayısı
TFY	:	Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi
SDP	:	Sınır Değer Problemleri
BDP	:	Başlangıç Değer Problemleri
$p*$	:	Uygulanan basınç gerilimi
s	:	Laplace Dönüşüm Parametresi
p_f/p^*	:	Boyutsuz fazla boşluk suyu basıncı
q_1(t)	:	Zamanla Değişmeyen (sabit) Tipi Yük
q_2(t)	:	Kosinüs Dalga Tipi Yük
q_3(t)	:	Kare Dalga Tipi Yük
q_4(t)	:	Üçgen Dalga Tipi Yük
q_5(t)	:	Yarım Sinüs Dalgalı Doğrultucu Tipi Yük
q_6(t)	:	Testere Dişi Dalga Tipi Yük

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Başlangıç ve sınır koşulları 34

Tablo 2. Katı taneleri ve suyun hidrolik ve elastisite parametreleri 51

Tablo 3. Farklı zemin türleri için mekanik özellikler 52

Tablo 4. Farklı zemin türleri için M,α,γ ve cv değerleri 53

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Farklı oturmaların bazı olası nedenleri 6

Şekil 2. Mimari hasalar 7

Şekil 3. İşlevsel hasarlar 8

Şekil 4. Yapısal hasarlar Arslan ve Korkmaz (2007) 9

Şekil 5. Binanın temelinin altında oturma ve bina duvarının çatlaması şeması Döndüren ve ark (2017) 9

Şekil 6. Yatay ve düşey yüklerin neden olduğu taşıyıcı duvar çatlaklarının çeşitleri Döndüren ve ark (2017) 10

Şekil 7. Kohezyonlu doygun zeminler için zamana bağlı oturma ilişkisi (Uzuner (2012)) 13

Şekil 8. Kohezyonsuz zeminler için zamana bağlı oturma ilişkisi (Uzuner (2012)) 13

Şekil 9. Konsolidasyonun yay ve piston analojisi (Uzuner (2012)) 14

Şekil 10. Konsolidasyon testinde σ ,u ve σ' ' nun durumları 15

Şekil 11. Önerilen yöntem. 30

Şekil 12. Sabit fonksiyonu 38

Şekil 13. Kosinüs Dalga fonksiyonu 39

Şekil 14. Kare dalga fonksiyonu 40

Şekil 15. Üçgen dalga fonksiyonu 41

Şekil 16. Üçgen dalga fonksiyonu $F1(t)$ 42

Şekil 17. Üçgen dalga fonksiyonu $F2(t)$ 43

Şekil 18. Yarım sinüs dalgalı fonksiyonu 44

Şekil 19. Testere dişi dalga fonksiyonu 46

Şekil 20. Testere dişi dalga fonksiyonunun ilk periyodu 47

Şekil 21. Ugulanan yükler, (a) Sabit yük, (b) Kosinüs dalga tipi periyodik yük, (c) Kare dalga tipi periyodik yük, (ç) Üçgen dalga tipi periyodik yük, (d) Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük ve (e) Testere dişi dalga tipi periyodik yük. 50

Şekil 22. Kumlu zemin türü için sabit yük durumunda pf/p^*'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması 54

Şekil 23. Kumlu zemin türü için kosinüs dalga tipi periyodik yük durumunda pf/p^*'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması..... 54

Şekil 24. Kumlu zemin türü için üçgen dalga tipi periyodik yük durumunda pf/p^*'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması..... 55

Şekil 25. Killi zemin türü için sabit yük durumunda pf/p^*'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması 56

Şekil 26. Killi zemin türü için kosinüs dalga tipi periyodik yük durumunda pf/p^*'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması..... 56

Şekil 27. Killi zemin türü için kare dalga tipi periyodik yük durumunda pf/p^*'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması..... 57

Şekil 28. Killi zemin türü için üçgen dalga tipi periyodik yük durumunda pf/p^*'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması..... 57

Şekil 29. Sabit yük $q1$(t) için kumlu zemin için pf/p^* değerlerinin zamanla değişimi..... 58

Şekil 30. Sabit yük $q1$(t) için lemli kum zemin için pf/p^* değerlerinin zamanla değişimi..... 59

Şekil 31. Sabit yük $q1$(t) için kumlu lem zemin için pf/p^* değerlerinin zamanla değişimi..... 59

Şekil 32. Sabit yük $q1$(t) için lem zemin için pf/p^* değerlerinin zamanla değişimi..... 59

Şekil 33. Sabit yük $q1$(t) için silt lem zemin için pf/p^* değerlerinin zamanla değişimi..... 60

Şekil 34. Sabit yük $q1$(t) için kumlu kil lem zemin için $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 60

Şekil 35. Sabit yük $q1$(t) için kil lem zemin için $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 60

Şekil 36. Sabit yük $q1$(t) için siltli kill lem zemin için $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 61

Şekil 37. Sabit yük $q1$(t) için kumlu kil zemin için $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 61

Şekil 38. Sabit yük $q1$(t) için siltli kil zemin için $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 61

Şekil 39. Sabit yük $q1$(t) için kil zemin için $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 62

Şekil 40. Sabit yük $q1$(t) için $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması 62

Şekil 41. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t) için kumlu zemine ait $pf/p*$değerlerinin zamanla değişimi 63

Şekil 42 Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t) için lemli kum zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 63

Şekil 43. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t) için kumlu lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 64

Şekil 44. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t) için lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 64

Şekil 45. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t) için silt lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 64

Şekil 46. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t) için kumlu kil lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 65

Şekil 47. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t) için killi lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 65

Şekil 48. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t) için siltli kil lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 65

Şekil 49. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t) için kumlu kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 66

Şekil 50. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2(t)$ için siltli kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 66

Şekil 51. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2(t)$ için kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 66

Şekil 52. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t) için 11 farklı tipi zemin özelliklerine bağlı $pf/p*$değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması 67

Şekil 53. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t) için kum, lemli kum, kumlu lem zeminlere ait $pf/p*$değerlerinin zamanla değişimi 67

Şekil 54. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t) için lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminlere ait $pf/p*$değerlerinin zamanla değişimi 68

Şekil 55. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t) için killi lem, siltli killi lem, kumlu kil zeminlere ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 68

Şekil 56. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t) için siltli kil, kil zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 69

Şekil 57. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için kum zemine ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 70

Şekil 58. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için lemli kum zemine ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 70

Şekil 59. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için kumlu lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 70

Şekil 60. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 71

Şekil 61. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için siltli lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 71

Şekil 62. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için kumlu kil lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 71

Şekil 63. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için killi lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 72

Şekil 64. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için siltli kil lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 72

Şekil 65. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için kumlu kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 72

Şekil 66. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için siltli kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 73

Şekil 67. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 73

Şekil 68. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için 11 farklı zemin türüne ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 73

Şekil 69. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için kum, lemli kum, kumlu lem zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 74

Şekil 70. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 74

Şekil 71. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için killi lem, siltli killi lem, kumlu kil zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 75

Şekil 72. Kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) için siltli kil, kil zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 75

Şekil 73. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için kum zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 76

Şekil 74. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için lemli kum zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 76

Şekil 75. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için kumlu lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 77

Şekil 76. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 77

Şekil 77. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için siltli lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 77

Şekil 78. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için kumlu kil lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 78

Şekil 79. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için kil lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 78

Şekil 80. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için siltki kil lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 78

Şekil 81. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için kumlu kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 79

Şekil 82. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için siltli kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 79

Şekil 83. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 79

Şekil 84. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için 11 farklı zemin türüne ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 80

Şekil 85. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için kum, lemli kum, kumlu lem zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 80

Şekil 86. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 81

Şekil 87. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için killi lem, siltli killi lem, kumlu kil zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 81

Şekil 88. Üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) için siltli kil, kil zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 82

Şekil 89. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için kumlu zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 82

Şekil 90. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için lemli kum zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 83

Şekil 91. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için kumlu lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 83

Şekil 92. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 83

Şekil 93. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için siltli lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 84

Şekil 94. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için kumlu kil lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 84

Şekil 95. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için killi lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 84

Şekil 96. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için siltli kil lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 85

Şekil 97. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için kumlu kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 85

Şekil 98. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için siltli kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 85

Şekil 99. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 86

Şekil 100. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için 11 farklı zemin türüne ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 86

Şekil 101. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için kum, lemli kum, kumlu lem zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 87

Şekil 102. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 87

Şekil 103. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için killi lem, siltli kil lem, kumlu kil zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 88

Şekil 104. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q5$(t) için siltli kil, kil zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 88

Şekil 105. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için kum zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 89

Şekil 106. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için lemli kum zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 89

Şekil 107. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için kumlu lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 89

Şekil 108. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 90

Şekil 109. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için siltli lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 90

Şekil 110. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için kumlu kil lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 90

Şekil 111. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için killi lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 91

Şekil 112. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için siltli kil lem zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 91

Şekil 113. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için kumlu kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 91

Şekil 114. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için siltli kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 92

Şekil 115. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için kil zemine ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 92

Şekil 116. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için 11 farklı zemin türüne ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 92

Şekil 117. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için kum, lemli kum, kumlu lem zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 93

Şekil 118. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 93

Şekil 119. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için killi lem, siltli killi lem, kumlu kil zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 94

Şekil 120. Testere dişi dalga tipi periyodik yük $q6$(t) için siltli kil, kil zeminlere ait $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 94

Şekil 121. Kum zemin için zamanla değişen dış yükler altında pf/p * değerlerinin zamanla değişimi 96

Şekil 122. Kum zemin için zamanla değişen dış yükler altında $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması 97

Şekil 123. Lemli kum zemin için zamanla değişen dış yükler altında pf/p * değerlerinin zamanla değişimi 98

Şekil 124. Lemli kum zemin için zamanla değişen dış yükler altında pf/p * değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması 99

Şekil 125. Kumlu lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 100

Şekil 126. Kumlu lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması 101

Şekil 127. Lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 102

Şekil 128. Lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması 103

Şekil 129. Silt lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 104

Şekil 130. Silt lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması 105

Şekil 131. Kumlu kil lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 106

Şekil 132. Kumlu kil lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması 107

Şekil 133. Kil lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 108

Şekil 134. Kil lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimini karşılaştırılması 109

Şekil 135. Siltli kil lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 110

Şekil 136. Siltli kil lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $pf/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması 111

Şekil 137. Kumlu kil zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 112

Şekil 138. Kumlu kil zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması 113

Şekil 139. Siltli kil zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 114

Şekil 140. Siltli kil zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması 115

Şekil 141. Kil zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 116

Şekil 142. Kil zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması 117

Şekil 143. Sabit yük $q1$(t), kosinüs dalga tipi periyodik yük $q2$(t), kare dalga tipi periyodik yük $q3$(t) ve üçgen dalga tipi periyodik yük $q4$(t) altında kum, kumlu kil, kil zemin için $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi 118

ÖNSÖZ

Öncelikle, bana bu çalışmayı tamamlayabilme, şans, fırsat, güç ve sağlığı lütfeden yüce yaradan Allah (c.c)'ya şükürler olsun.

İstanbul Gelişim Üniversitesine, Türkiye Cumhuriyet Devleti ile Irak Cumhuriyet Devleti arasındaki işbirliği programı çerçevesinde bana sağladığınız burs, yalnızca akademik çalışmalarımda daha çok çalışmak için değil, aynı zamanda topluma katkı sağlamak için çağdaş verimli ve donanımlı bir bireyin yetişmesine katkıda bulunduğu için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez değerli hocam ve danışmanım sayın ***Dr. Öğr. Üyesi. Ahmad Reshad Noori'ye*** bu çalışma süresince ilk günden itibaren engin ve derin bilgileriyle, yapıcı ve yönlendirici fikirleri ile, yol gösteren ve kendisinden çok şey öğrendiğim bu çalışma süresinde beni cesaretlendirip, her detayda yanımda ve bana destek olduğu için en içten kalbimle teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca, bu çalışma boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım ve desteğini almaktan çekinmediğim, değerli hocam ***DOÇ.DR. SULEIMAN ALI SULEIMAN MOHAMED KHATRUSH*** ve eş danışman hocam ***Arş.Gör.Dr. TİMUÇİN ALP ASLAN'a*** bu yolda gösterdikleri özverilerden dolayı ayrı ayrı teşekkürlerimi iletiyorum. Tezin yazım dili konusunda destek veren ***Arş.Gör. ASENA PINAR ÖZER 'e*** ayrıca teşekkür ederim.

Bana her zaman sevmeyi, sevilmeyi öğreten maddi manevi desteklerini esirgemeden bu günlere gelmemi sağlayan, daima arkamda büyük güç olarak her zaman hissetiğimi ***sevgili aileme Babam*** ve ***anneme*** teşekkür etmeyi borç bilirm.

Bu yolda üniversite içinde ve dışında destek olan,duaların esirgemeyen bana aile ve arkadaş olan herkese teşekkür ve minnetlerimi sunuyorum.

Güzel İstanbul'da tanıştığım, bana iyi dilekler dileyen, tanıdık, yabancı tüm insanlara teşekkür ediyorum.

RAND

GİRİŞ

Konsolidasyon oturması, zamana bağlı olarak gözlemlenen bir olaydır ve genellikle ince taneli, düşük geçirimlilik katsayısına sahip doygun zeminlerde meydana gelmektedir. Oturma miktarını belirlemek için, belirli bir yükleme altında konsolide bir kil tabakasında herhangi bir konumda ve zamanda boşluk basıncını ve boşluk oranını tahmin edebilen bir denklemin olması gerekmektedir. Terzaghi, konsolidasyon sürecini, doygun zemindeki su içeriğinin hava ile değiştirilmeden azaltılması olarak tanımlamıştır.

Geoteknik mühendisliğinin önemli problemlerinden birinin yumuşak zemin stabilitesinin analiz edilmesi olduğu belirtilmiştir. Kil zeminler üzerine inşa edilen kolonlar, temeller veya dolguların stabilite analizinde konsolidasyon önemli bir rol oynamaktadır. Konsolidasyon davranışını anlamak, temel, bina, dolgu ve yol gibi yapıların oturmasını belirlemek için gereklidir. Konsolidasyon davranışını anlamak, oturmanın meydana gelmesi için gereken süreyi tahmin etmeye yardımcı olmaktadır. Konsolidasyon oturması, temel yapıların yük-taşıma gücünü etkiler.

Özellikle altyapı projelerinde demiryolu, havalimanı ve karayolu mühendisliği gibi çeşitli alanlarda geoteknik yapıların yol yatağı veya temel zeminin davranışı tekrarlı yük uygulamalarının zamanla değişen doğasından önemli derecede etkilenmektedir. Bu sebeple tasarım yaparken bu tür yüklerin dikkate alınması gerekmektedir.

Zeminler, özellikle karayollarında hareket eden araçların döngüsel yüklerinden dolayı farklı zorluklarla karşılaşırlar. Örneğin, yolların altındaki killi zeminlerde oturma meydana gelmektedir. Arazi üzerindeki bu döngüsel yüklerin varlığı, statik yükler temelinde yapılan teorik beklentilerden önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu nedenle, bu döngüsel yüklerin zemin oturması sorunlarına sebep olan etkilerini araştırmak son derece önemli hale gelmektedir. Farklı tekrarlı yüklerin zeminlerde meydana gelen konsolidasyon sürecine etkilerini incelemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmada, sabit yük, kosinüs dalga tipi periyodik yük, kare dalga tipi periyodik yük, üçgen dalga tipi periyodik yük, yarım sinüs dalga tipi periyodik yük ve

testere dişi dalga tipi periyodik yüklerin farklı zemin türleri için konsolidasyon üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Bu tezde tek boyutlu konsolidasyon zemin problemini çözmek ve fazla boşluk suyu basıncı (p_f) sonuçları elde etmek için önerilen yöntem ilk kez sunulmuştur. Kısmi bir diferansiyel denklem olan tek boyutlu konsolidasyon denklemini çözmek ve onu adi diferansiyel denkleme dönüştürmek için TFY ile Laplace dönüşümünü birlikte kullanılmıştır. Zaman uzayına geçiş için etkin bir sayısal ters Laplace dönüşüm metodu kullanılmıştır. Bu çalışmada p_f'nin sonuçları elde etmek için on bir adet farklı zemin tipi, altı farklı zamana bağlı yük altında Fortran dilinde bir programı hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatür çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırıldığında iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

BİRİNCİ BÖLÜM
LİTERATÜR TARAMASI

1.1 Sıkışma ve Deformasyon Arasındaki İlişki

Temeller üzerine gelen yapı yükünü ve kendi ağırlığını göçme olmadan altındaki zemine aktarmalıdır. Zemine aralıklarla uygulanan yükler ise temel genişliğini iki ila üç kat etkilemektedir. Bu yük uygulaması sonucu zemin katları arasında basınç oluşur ve sıkıştırma meydana gelmektedir. Belirli bir zemin kütlesinde meydana gelen küçük bileşenlerin deplasmanlarını belirleyerek, zeminde belirli bir sınırda meydana gelen deplasmanı bilmek mümkündür. Zemin içindeki gerilme dağılımındaki değişiklikler nedeniyle birim deformasyonlar oluşur ve bu gerilmeler, zeminde deplasmana yol açmaktadır.

Sıkıştırılmış topraklar, anlık sıkıştırma ve zamana bağlı sıkıştırma olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Herhangi bir türün sıkıştırma derecesi, zeminin boşluk geçirgenliği ve su akış hızı gibi faktörlerden etkilenir. Geçirimsiz olmayan zeminler genellikle yüksek geçirgenliğe sahiptir, bu yüksek geçirgenlik nedeniyle, bu tür zeminler sıkışma sürecini daha hızlı geçirirler. Öte yandan, kohezif zeminler daha az gözenekli oldukları için daha yavaş sıkışmaya sahiptir. Zeminin kendi ağırlığından kaynaklanan yüklerle ilgili analizler yapılırken, belirli varsayımlar yapılmaktadır. Bunlardan biri, zemini oluşturan katı taneciklerin ve boşluklarında bulunan suyun zeminin kütlesi içinde sıkıştırılamayacağını varsaymaktadır. Bu nedenle, doygun zeminlerde, zemin kütlesi sıkışma sürecine girdiğinde meydana gelen hacim değişikliği, taneciklerden su sızmasına bağlanabilmektedir.

Kısmen doygun zemin durumunda, zemin iskeletinin hacmindeki değişiklik boşluklardaki havanın suda çözünmesi veya zemindeki boşluklar arasında var olan havanın sıkıştırılması ve serbest bırakılması nedeniyle temel olarak iki faktöre bağlıdır.

Bir zeminin sıkıştırılabilirliği, zeminde bulunan tanelerin düzenlenmesi, zemin yapısının porozite ve gözeneklilik özelliklerini belirler. Daha yüksek gözeneklilik ve porozite, zeminde daha fazla sıkışabilir alanın oluşmasına neden olur. Bunun yanı sıra, farklı zemin türüleri arasında da sıkışma özellikleri farklılık gösterir. Küresel tanelere sahip zeminler, düz taneli zeminlere göre daha az sıkışabilirlik göstermektedir.

Zeminin davranışı ne plastik ne de tamamen elastiktir. Sıkıştırıldığında, zemin katmanları, zeminlerin birbirleri arasında düzeni ve kayması nedeniyle hacim değişikliklerine yol açar. Ancak, zemin üzerine uygulanan gerilme azaltıldığında, zeminin taneleri önceki konumlarına tamamen geri dönmez ve zeminde kalıcı deformasyona neden olmaktadır (Murthy (2002)) .

1.2 Oturma

İnşaat veya dolgu işlemleriyle zemine uygulanan yükler, zemin yüzeyinde düşey olarak meydana gelen toplam deformasyonlara neden olur, buna da oturma denir. Ayrıca, yeraltı suyu seviyesinin düşmesi efektif gerilmelerde bir artışa neden olur, bu da oturmaya yol açmaktadır. İnce taneli zeminlerde oturma meydana gelmesinin önemli bir yönü, zamana bağlı olmasıdır (Holtz ve ark. (1981)).

Das ve Sobhan (2002) kitabında, zemin tabakalarında oluşan sıkışmasının temel yükleri veya zemine etki eden diğer yüklerin neden olduğu gerilme artışı ile birlikte gerçekleştiğini belirtmiştir. Bu sıkışma, zemin tanelerinin deformasyonu, yer değiştirmesi ve zemin içindeki boşluklardan hava veya suyun çıkarılması gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Bu faktörler, uygulanan yüklerin etkisi altında zeminin sıkışmasına katkıda bulunmak üzere birleşir

Zemine uygulanan yüklerin sonucunda, sıkışma üç tipe ayrılabilir:

1. Ani oturma: Bu tip oturma, doygun, yaş ve kuru zeminlerde su içeriğini değiştirmeden zeminin elastik deformasyonu sonucunda meydana gelir.
2. Birincil Konsolidasyon oturması: Bu tür oturma, kil gibi doygun kohezyonlu zeminlerde zemin hacmindeki bir değişiklik nedeniyle meydana gelir. Bu oturmanın temel nedeni, zemin içindeki boşluklardan suyun çıkarılmasıdır
3. İkincil Konsolidasyon Oturması: Bu tür oturma, organik ve doygun kohezonlu zeminlerde, zeminin yapısının değiştirilmesi sonucu meydana gelir. Sürekli efektif gerilme altında, zemin taneleri yavaşça uyum sağlar ve yeniden düzenlenir, bu da uzun bir süre boyunca fazla sıkışma ve oturmaya neden olur.

Fazla boşluk suyu basıncı neredeyse tamamen kaybolduktan sonra, ikincil konsolidasyon oturması meydana gelmektedir.

Toplam oturma, Das ve Sobhan (2002)'de belirtildiği gibi Denklem (1)'den hesaplanabilir.

$$ST = Si + Sc + Ss \quad (1)$$

Burada:

ST: toplam oturmayı

Si: ani oturmayı

Sc: birincil konsolidasyon oturmasını

Ss: ikincil (sekonder) konsolidasyon oturmasını

temsil etmektedir.

1.2.1 Oturmanın Nedenleri

Uzuner (2012) çalışmasında zeminde meydana gelen oturma nedenlerini şu şekilde açıklamaktadır:

1. Dış Yükler: zemin üzerine uygulanan yükler nedeniyle oturma oluşabilir. Bu yükler genellikle inşaat çalışmaları, dolgu işlemleri veya zemin yüzeyine ek yüklerin uygulanmasından kaynaklanabilmektedir.
2. Zemin bozulması: kazı işlemleri zemin deformasyonuna yol açabilmektedir.
3. Yeraltı Suyu Seviyesi: düşük yeraltı suyu seviyeleri, zemin partiküllerinin sıkışmasına ve oturmasına neden olabilmektedir.
4. Titreşimler: özellikle depremler veya kazı çalışmaları gibi sürekli veya ani hareketler taneli zeminlerin oturmasına yol açabilmektedir.
5. Erozyon: yeraltı suyunun akışı nedeniyle erozyon meydana gelebilir ve sonuç olarak bu da oturmaya yol açabilmektedir.

6. Yeraltı zemin çökmesi: tünel, galeri ve mağaraların çökmesi tepki olarak çevre zeminin oturması söz konusu olabilmektedir.
7. Donma-çözülme Döngüsü: özellikle yüksek su içeriğine sahip olan zeminlerde donma-çözülme olayları zeminlerde oturma meydana getirebilmektedir.
8. Çeşitli faktörler: çelik elemanların paslanması ve korozyonu, sülfat içeren suyun betona etkisi, ahşap elemanların çürümesi gibi durumlar temel stabilitesini olumsuz etkilemektedir.
9. Şişmiş kil: kil gibi bazı zemin türleri, nem içeriğindeki değişiklikler nedeniyle şişme ve büzülmeye maruz kalabilir ve bu da oturmalara yol açabilmektedir.
10. Ağaç Büyümesi: kil zeminlerde ağaçların çabuk büyümesi de oturmasına sebep olabilmektedir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi farklı oturmaların bazı olası nedenleri gösterilmiştir.



Şekil 1. Farklı oturmaların bazı olası nedenleri
https://www.geotech.hr/en/differential-settlements

Gerilmelerden kaynaklanan zemin oturmalarının hesaplanması büyük önem taşımaktadır. Köprülerin çökmesi ve oturmasına sebep bulunan önemli faktörler şunlardır: temelde meydana gelen deformasyonlar, taşkın suyunun izin verilen değerin üzerinde arttırılması, deprem etkisi, köprüye uygulanan yüklerin arttırılması, köprünün ayak temelleri ve yamaçların bozulması, rüzgâr etkisinin ihmal edilmesi ve kaldırım temellerinin kayması da bu olguda önemli bir rol oynayabilmektedir (Yıldırım ve Gökaşan (2013)) .

1.2.2 Oturma Hasarları

Temel altındaki oturmalar yüksek değere ulaştığında, özellikle farklı noktalar arasındaki farklı değerler dikkate alınmazsa, bina veya yapı üzerinde birçok hasara neden olabilmektedir. Farklı oturmalar, doğrama eğilmeleri, sıva dökülmeleri ve yapıda çatlaklarına yol açarak binanın güvenliğini tehlikeye atabilmektedir. Sonuç olarak, yapı temel tasarımında oturmayı hesaplamak ve oturma düzeylerini müsaade edilebilir seviyelerin altında tutmak, binanın güvenliği ve dayanıklılığı açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu, yapıya uzun servis ömrü sağlar ve olası hasarları en aza indirmektedir (Kutay (2011)) .

Oturmanın meydana getireceği hasarlar ise şu şekilde ifade edilebilir:

1. Mimari hasarlar: taşıyıcı sistemi etkilemeden düzeltilebilen deformasyonlardır. Bu hasar, taşıyıcı olmayan elemanlar ile taşıyıcı elemanlar (döşeme, kiriş, duvar, perde vb.) arasındaki sıva tabakasında görünür çatlakları içerir. Ayrıca kiriş veya döşemelerin alt kısımlarında kılcal çatlaklar oluşabilmektedir. Bu tür hasarlar estetik açıdan hoş olmamakla beraber bina yapısının dayanıklılığını tehlikeye atmaz ve yapının stabilitesini etkilemeden onarılabilmektedir. Şekil 2, farklı oturmalardan kaynaklanan çatlaklar nedeniyle yapı duvarında oluşan çatlaklar olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Mimari hasalar
https://www.geotech.hr/en/differential-settlements/

2. İşlevsel hasarlar: bir yapıdaki elemanların veya bileşenlerin düzgün işleyişini etkileyen sorunları ifade eder. Bu tür hasarlar taşıyıcı sistemini etkilemese de etkilenen elemanların işlevselliğini olumsuz etkileyebilir ve ciddi sonuçlara yol açabilmektedir. Örneğin, kapı ve pencerelerin düzgün açılıp kapanmasında zorluklar yaşanabilir, rayların hizalanmasındaki sorunlar raylı sistemin düzgün çalışmasına engel olabilir ve asansörlerin düşey hareketinde sapmalar meydana gelebilir. Makinelerin veya cihazların işletilmesinde yaşanan sorunlar, yapının düzgün çalışmasını ve kullanılabilirliğini sağlamak için bu işlevsel problemler derhal ele alınmalıdır.

Şekil 3'te görülen beton basamaklar zamanla şiddetli oturmalara maruz kalmış ve temel yapısından ayrılmıştır.



Şekil 3. İşlevsel hasarlar
https://www.dryprosystems.com/resources/concrete-lifting/mudjacking

3. Yapısal hasarlar: bu tür hasarların boyutunun değerlendirilmesi ve en uygun onarım yöntemlerinin belirlenmesinde uzmanların müdahalesi gereklidir. Kiriş, döşeme, perde ve duvarlar gibi taşıyıcı elemanlarda meydana gelen çatlaklar, yapıyı tehdit edebilecek ciddi bir sorun oluşturmaktadır. Taşıyıcı elemanlardaki çatlaklar, yapının taşıyıcı sisteminin bütünlüğünü tehlikeye atabilir. Bu nedenle, böyle sorunların uzmanlar tarafından dikkatlice ve uzmanlıkla ele alınması gerekmektedir. Potansiyel olarak yapıyı yıkıma götürebilecek çözümler dikkatli bir şekilde değerlendirilmektedir. Bu

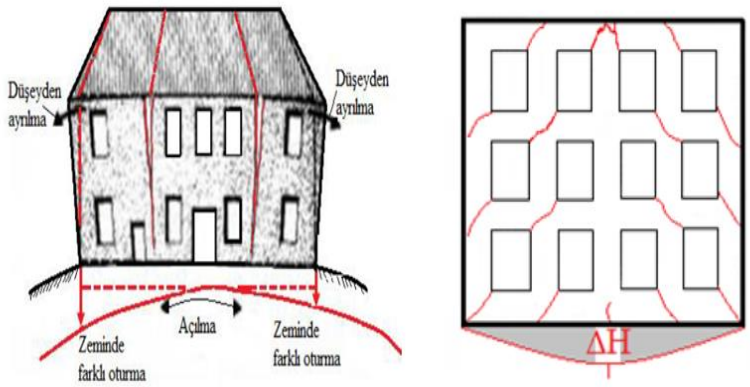
şekilde, yapı güvenliği sağlanır ve yapıya zarar veren çatlaklar uygun yöntemlerle düzeltilmektedir (Uzuner (2012)).

Şekil 4'te, zeminin oturması nedeniyle kolonda meydana gelen deformasyonlar gözlemlenmiştir (Arslan ve Korkmaz (2007)).



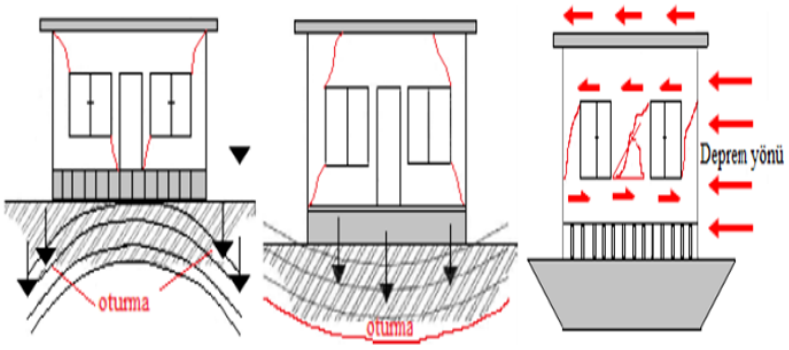
Şekil 4. Yapısal hasarlar Arslan ve Korkmaz (2007)

Binanın temelinin altında oturma ve bina duvarının çatlaması şekil 5'te gösterilmiştir (Döndüren ve ark. (2017)).



Şekil 5. Binanın temelinin altında oturma ve bina duvarının çatlaması şeması Döndüren ve ark (2017)

Taşıyıcı duvarlarda yatay ve düşey yüklerin neden olduğu çatlak türleri şekil 6'da gösterilmiştir (Döndüren ve ark (2017)).



Şekil 6. Yatay ve düşey yüklerin neden olduğu taşıyıcı duvar çatlaklarının çeşitleri Döndüren ve ark (2017) .

1.3 Konsolidasyon

Konsolidasyon oturması, zamana bağlı olarak gözlemlenen bir olaydır ve genellikle ince taneli, düşük geçirimlilik katsayısına sahip doygun zeminlerde meydana gelmektedir. Oturmanın meydana geldiği hız, boşluk suyunun drenaj hızıyla doğrudan bağlantılıdır. Kil zeminlerde oturma, yük altında sıkıştırma sonucu düşük geçirgenliğinden dolayı suyun boşluklarından atılma hızına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bu olaya konsolidasyon denir ve zamanla değişen bir süreçtir. Gerilme, birim deformasyon ve zamanla ilişkilidir. Ortaya çıkan deformasyon, aylar, yıllar ve hatta on yıllar boyunca değişen uzun süreler boyunca devam edebilmektedir. Oturma miktarını tahmin etmek için, belirli bir yükleme uygulandıktan sonra konsolide bir kil tabakasında herhangi bir konumda ve zamanda boşluk basıncını ve boşluk oranını tahmin edebilen bir denklemin olması gerekmektedir. 1923 yılında tek boyutlu konsolidasyon teorisi Terzaghi tarafından önerilmiştir. Terzaghi'nin teorisi, doygun zeminlerde konsolidasyon sürecinin tek yönlü olarak gerçekleştiğini varsaymıştır. Belli bir süre yük uygulandıktan sonra, kil tabakasının tam kalınlığı için denklemi entegre ederek, tabakanın kalınlıkta meydana gelecek değişimi veya oturmayı hesaplamak mümkündür (Holtz ve ark. (1981)).

Zaman içinde, fazla boşluk suyu basıncının kademeli olarak azaldığı ve tamamen kaybolduğu belirtilmektedir. Sonunda uygulanan yük, efektif gerilimeye eşit olduğu noktaya ulaşmaktadır.

Terzaghi, konsolidasyon sürecini, doygun zemindeki su içeriğinin hava ile değiştirilmeden azaltılması olarak tanımlamıştır, çünkü kil gibi yüksek sıkışabilirliğe sahip zeminlerde efektif gerilmeler, su dolu boşlukların hacmini değiştirmektedir. Bu efektif gerilmelerin su içeriği üzerinde etkisi vardır. Düşük geçirgenlik, suyun zeminin içinde daha yavaş ve kademeli bir şekilde hareket etmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, gerilme durumundaki değişiklikler su içeriğinde değişikliklere yol açar. Gerilme uygulandığında su içeriğindeki değişiklikler çok yavaş bir hızda ve aşamalı olarak gerçekleşir. Bu olayın bir sonucu olarak, düşük geçirgenliğe sahip sıkışabilir bir tabakaya etki eden dış kuvvetlerle zeminin su içeriğindeki eşdeğer değişiklik arasında bir zaman gecikmesi bulunmaktadır (Karl (1943)).

1.3.1 Konsolidasyonun Önemi

- Stabilite Analizi: Geoteknik mühendisliğinin önemli problemlerinden birinin yumuşak zemin stabilitesinin analiz edilmesi olduğu belirtilmiştir. Kil zeminler üzerine inşa edilen kolonlar, temeller veya dolguların stabilite analizinde konsolidasyon önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle inşaat projelerinde, yapıların oturma davranışı ve boşluk suyu basıncı birlikte değerlendirerek konsolidasyon problemi çözülmektedir (Radhika ve ark. (2020)).

- Oturma tahmini: Konsolidasyon davranışını anlamak, temel, bina, dolgu ve yol gibi yapıların oturmasını tahmin etmek için gereklidir. Daha önce bahsedildiği gibi, zemindeki toplam oturma, ani konsolidasyon, birincil ve ikincil konsolidasyon olmak üzere üç tip oturmaya dikkate alınarak belirlenir. Ancak temelin aşırı yüklenmeye maruz kalmadığı durumlarda ani oturma hesapta dikkate alınmaz (Kumbasar ve Kip (1999)). Benzer şekilde, ikincil konsolidasyon değerleri genellikle küçük olduğundan

çoğu zaman ihmal edilir (Kutay (2011)). Bu nedenle, temel için toplam oturma değerini en çok etkileyen faktör, birincil konsolidasyon oturmasıdır.

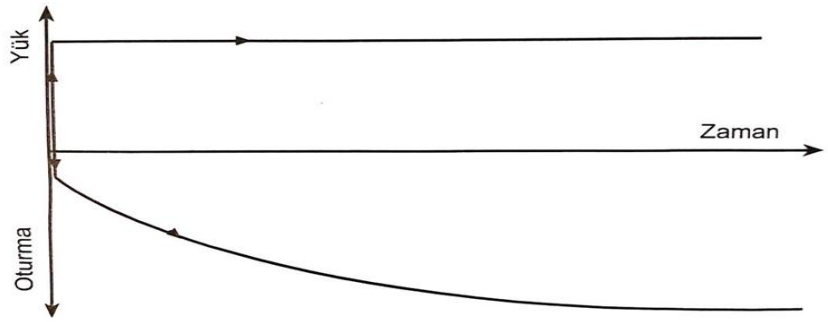
- Zamana bağlı davranış: Oturma süreci, zemin tabakasının kalınlığı ve tipi, uygulanan gerilme ve başlangıç boşluk suyu oranı gibi birçok faktörden etkilenir. Ayrıca, konsolidasyon süreci zaman içinde gelişir ve çoğunlukla zamana bağlıdır. Bu nedenle, konsolidasyon davranışını anlamak, oturmanın meydana gelmesi için gereken süreyi tahmin etmeye yardımcı olmaktadır.
- Yük Taşıma gücü: Konsolidasyon oturması, temel yapıların yük- taşıma gücünü etkiler. Aşırı oturma, yapıların performansı ve güvenliği için riskler oluşturur ve bu nedenle temel tasarımında konsolidasyonun dikkate alınması önem arz etmektedir.
- Risk değerlendirmesi: Konsolidasyon, yumuşak veya sıkıştırılmış zeminler üzerinde inşaa edilen yapılar ile ilgili risklerin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Konsolidasyon davranışını anlayarak, potansiyel geoteknik tehlikeler etkili bir şekilde tanımlanabilmekte ve uygun mühendislik teknikleri kullanılarak ele alınabilmektedir.
- Tasarım optimizasyonu, mühendislerin yapı ve temel sistemlerini en iyi şekilde tasarlayarak daha verimli ve ekonomik projeler oluşturmalarını sağlayan bir süreçtir. Konsolidasyon etkilerini dikkate almak, bu optimizasyon sürecinde önemli bir rol oynamaktadır.

1.3.2 Konsolidasyonun Temelleri

Zemindeki boşluk oranı zeminin konsolidasyon sürecinde önemli rol oynamaktadır. Dış yükler zemine uygulandığında, boşluklardaki su ve hava zeminden dışarı atılır, bu da sıkışmaya ve ardından zemin deformasyonuna yol açar ve sonunda oturmaya neden olmaktadır.

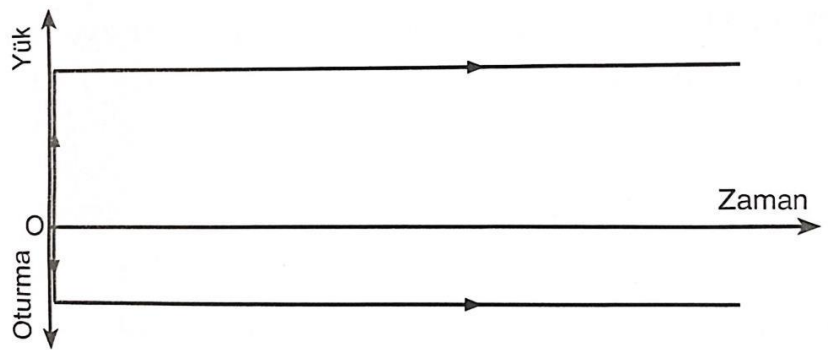
Doygun zemine belirli bir yük uygulandığında, gerilmede bir artış meydana gelir ve bu da boşluk suyu basıncında ani bir yükselmeye sebep olur (Das ve Sobhan (2002)).

Kil gibi kohezyonlu doygun zeminlerde düşük geçirimlilikleri nedeniyle oturma süreci uzun zaman alır. Bunun nedeni, boşluklardan suyun dışarı atılması için uzun bir zaman gerektirmesidir, bu da zeminin yavaş ve kademeli olarak oturmasına yol açmaktadır. Kohezyonlu zeminler için zamana bağlı oturma ilişkisi Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Kohezyonlu doygun zeminler için zamana bağlı oturma ilişkisi (Uzuner (2012))

Kohezyonsuz çakıl, kum gibi zeminlere yük uygulandıktan hemen sonra, yüksek geçirimlilikten dolayı suyun zemin boşluklarından hızla akmasına izin verir ve bunun sonucunda oturma kısa bir zamanda oluşur. Kohezyonsuz zeminler için zamana bağlı oturma ilişkisi Şekil 8'de gösterilmiştir (Uzuner (2012)) .

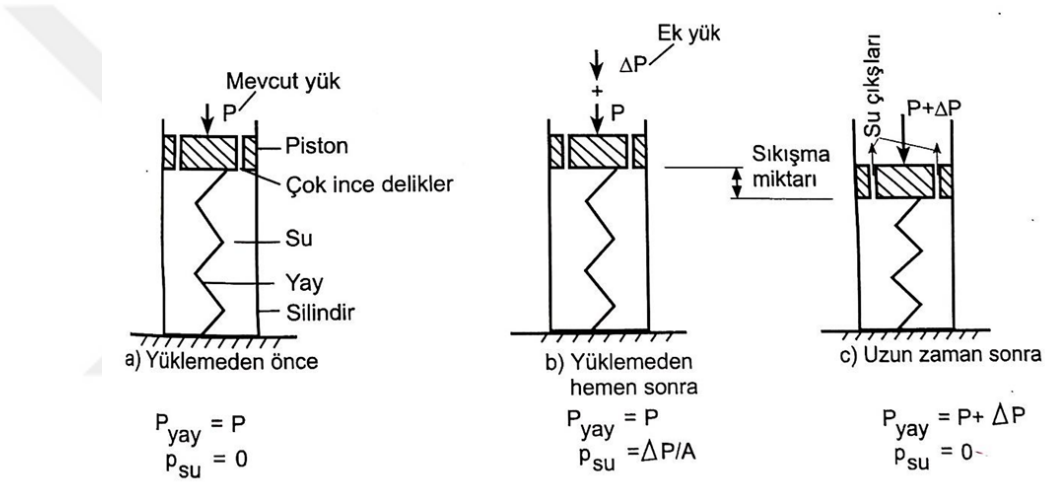


Şekil 8. Kohezyonsuz zeminler için zamana bağlı oturma ilişkisi (Uzuner (2012))

Konsolidasyon sürecini etkileyen diğer önemli faktörlerden biri de boşluklardaki su muhtevasıdır. Yükler uygulandığında, su içeriğinde değişiklikler meydana gelir ve bu da konsolidasyon davranışını etkiler.

1.3.3 Yay ve Piston Analojisi

Terzaghi, konsolidasyonun mekaniğini anlatmak için zemin ile bir yay arasında benzetme yapmış ve yay-damper modelini kullanmıştır. Doygun killerde, zamana bağlı deplasmanı anlamanın en iyi yolu, merkezinde bir yay olan basit bir model kullanmaktır. Şekil 9 (a)'da, silindirin iç alanını temsil eder. Silindir su ile doldurulmuştur ve akışta küçük delikler açılmış ve piston bir yay üzerinde oturmuştur.



Şekil 9. Konsolidasyonun yay ve piston analojisi (Uzuner (2012))

Belirli bir sabit P yükü uzun süre uygulanırsa, yük yay tarafından taşınır ve silindirdeki su tarafından hiç bir yük taşınmamaktadır, bu durum Şekil 9 (a) ile gösterilmiştir.

Bu durumda:

$$P_{yay} = P$$

$$p_{su} = 0$$

Piston üzerine bir yük ΔP uygulandığında, su bu durumda sıkıştırılamaz olduğundan dolayı ek yükü, Şekil 9 (b) durumu, gösterildiği gibi su tanelerini tarafından taşınır. Sonuç olarak, yay herhangi bir şekilde deforme olmaz.

Bu durumda:

$$P_{yay} = P$$

$$p_{su} = \frac{\Delta P}{A} \tag{2}$$

Bir süre yük uygulandıktan sonra deliklerden su akmaya başlayarak pistonun aşağı doğru hareket etmesine neden olur. Zamanla, yay üzerindeki yük artmaya devam eder ve sonunda yay yükü P + ΔP tamamen taşımaktadır. Aynı zamanda, su üzerindeki basınç giderek azalır ve fazla su sistemi boşaltıldıkça sıfıra ulaşır Şekil 9 (c). Bu süreç, zeminin konsolidasyonunu temsil eder, sistem dengeye gelir ve ekstra hidrostatik basınç sıfır olmaktadır.

Bu durumda:

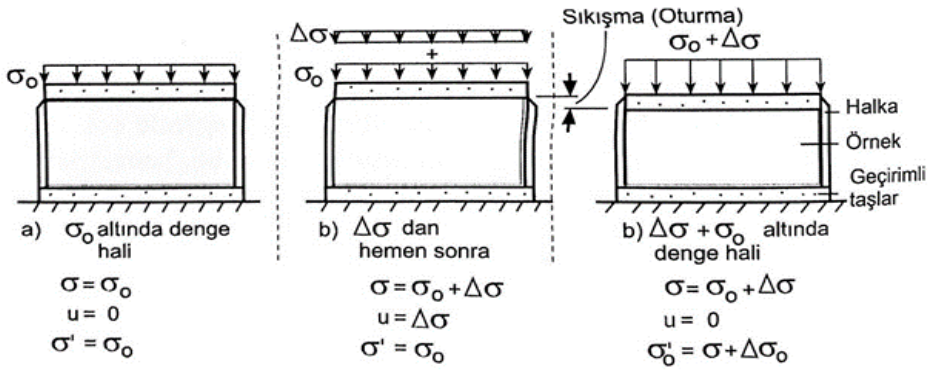
$$P_{yay} = P + \Delta P \tag{3}$$

$$p_{su} = 0$$

olmaktadır.

1.3.4 Konsolidasyon Mekaniği

Konsolidasyon mekaniği Şekil 10 üzerinden incelenebilinir. Zemin modeli ile ilgili olarak, bir katman doygun kil zemini düşünerek, bu katman Δσ gerilmene maruz kalmış ve iki kum tabakası arasına yerleştirilmiştir. Doygun zeminin veya bir zemin örneğinin konsolidasyon testi sırasında, yay ve piston benzetme mekanizması'nda açıklandığı gibi konsolidasyon meydana gelir (Uzuner (2012)).



Şekil 10. Konsolidasyon testinde σ ,u ve σ' ' nun durumları

Şekil 10 (a) durumu, yük uygulanmadan önce dengede olan bir konsalidasyon aşamasını temsil eder. Şekil 10 (b) durumu, gerilme Δσ miktarını ile artırdıktan sonra sıfır zamanındaki durumu gösterir ve ek gerilme artışı başlangıçta zemin boşluklarında bulunan su (boşluk suyu) tarafından taşınmaktadır. Sonuç olarak, suyun sıkıştırılamaz doğası nedeniyle, zemindeki boşluk suyu basıncı artar.

Belli bir süre sonra zemindeki su sızmaya başlar ve zamanla suyu basıncı azalır. Sonunda uzun bir sürenin ardından, boşluk suyu ek basıncındaki sıfıra ulaşır, bu da konsolidasyon sürecinin tamamlandığını göstermektedir. Şekil 10 (c) durumu $\sigma' + \Delta\sigma'$ gerilmeleri zemin taneleri tarafaından taşınmaktadır, Numunenin yüksekliği, Δh'ye eşit olduğu ve konsolidasyon oturmasının meydana geldiği bir durumda ulaşır.

Burada:

σ :Toplam gerilme

u :Boşluk suyu

σ' : Efektif gerilme

ifade etmektedir.

1.4 Konsolidasyon Teorileri

1.4.1 Klasik Konsolidasyon Teorisi Ve Terzaghi'nin Tek Boyutlu Denklemi

Karl Terzaghi, zemin mühendisliği alanında zemin davranışının temel kavramlarının geliştirilmesine büyük katkıda bulunmuştur. Özellikle doygun zeminlerde meydana gelen tek boyutlu konsolidasyon hakkında geliştirdiği teorisi ön plana çıkmaktadır. Terzaghi (1925) zemine yük uygulandığında, zeminde içindeki toplam gerilimin artmasına neden olduğunu ortaya koymuştur. Zemine uygulanan yükün ilk etkisi, bu yükün su molekülleri tarafından taşınmasıdır. Bu su basıncı, fazla boşluk suyunun zemin içinde artmasına yol açar. Fazla boşluk suyu basıncının artması, zemin içinde hidrolik bir gradyanın oluşmasına neden olur ve Darcy yasasına göre fazla suyun zemin boşluklarından akmasına neden olur.

Zaman içinde, fazla boşluk suyu basıncının kademeli olarak azaldığı ve tamamen kaybolduğu belirtilmektedir. Sonunda uygulanan yük, efektif gerilmeye eşit olduğu noktaya ulaşmaktadır. Sonuç olarak uygulanan yük zemin taneleri tarafından taşınarak toprak hacminin azalmasına yol açmaktadır.

Oturma miktarını bulmak için, belirli bir yük uygulandıktan sonra konsolide bir kil tabakasında herhangi bir konum ve zamanda boşluk suyu basıncını ve boşluk oranını tahmin eden bir denklemin bulunması gerekmektedir. Terzaghi`nin teorisi, doygun zeminlerde konsolidasyon sürecinin tek boyutlu olarak gerçekleştiğini varsaymıştır. Belli bir süre yük uygulandıktan sonra, kil tabakasının tam kalınlığı için denklemi entegre ederek, tabakanın kalınlıkta meydana gelen değişimi veya oturmayı hesaplamak mümkündür.

Karl Terzaghi'nin geliştirdiği teoride kabul ettiği varsayımlar şu şekildedir:

1. Zemin homojen ve izotropik olmalıdır.
2. Zemin tamamen suya doygundur.
3. Zemin ve su taneleri sıkışmazdır.
4. Yük yalnızca dikey yönde uygulanır.
5. Boşluk suyunun drenajı, yükün yönünde tek boyutludur.
6. Zemin kütlesi birincil konsolidasyon olduktan sonra doymuş kalır.
7. Zemin geçirgenlik katsayısı sabit kalır.
8. Belirli bir kil katman için sıkışma katsayısı (av) ve hacimsel sıkışma katsayısı (mv) sabittir.
9. Sıkışmanın zaman gecikmesi, kilin düşük geçirgenliğinden kaynaklanır.
10. Darcy yasası geçerlidir.

Fazla boşluk suyu basıncının zamana ve derinliğe göre azalmasını ve tek boyutlu konsolidasyon problemine ait kısmi diferansiyel denklemi şu şekilde yazabilir (Karl (1943)).

$$\frac{\partial p_f}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 p_f}{\partial z^2} \tag{4}$$

Burada:

p_f: Fazla boşluk suyu basıncı.

c_v : Konsolidasyon katsayısıdır.

Klasik konsolidasyon teorisi, Terzaghi tarafından geliştirilmiştir ve teorinin ele aldığı durumlar, zeminin statik yüklerle maruz kaldığı durumları dikkate almaktadır.

Terzaghi ve Fröhlich (1936), yapmış oldukları çalışmalarında zemin konsolidasyon problemini çözmek için kademeli yüklemeye maruz kalan zemin durumlarını ele almştır. Bu sürekli artan yükler, konsolidasyon oranının artmasına yol açar. Çalışmalarına dayanarak, özellikle inşaat projeleri gibi kademeli yükleme ile ilgili durumlar için zamanla konsolidasyon eğrilerini elde etmek için grafiksel teknikler geliştirmiştirler. Bu, dolgu ve binalar gibi yapısal inşaat durumlarına uygulanabilen özel bir yöntemdir.

1.4.2 Konsolidasyon İle İlgili Diğer Teori ve Çalışmaları

Biot (1941), zemin özelliklerini belirlemek için gerekli fiziksel sabitleri türetmiş ve bunlarla ilgili genel denklemleri kullanarak, üç boyutlu oturma ve gerilme problemlerini çözmek için güçlü bir matematiksel yöntem bulmuştur.

Schiffman (1958), Terzaghi'nin teorisini iki ilkeye dayanarak geliştirmiş ve genişletmiştir. Bunların ilki, zeminin geçirgenliğinin fazla boşluk suyu basıncındaki değişikliklere yanıt olarak sürekli bir değişim göstermesidir. Diğer ilke ise teorik problemin yükleme hızını ek bir faktör olarak dikkate almasıdır. Geçirgenlik katsayısı ile aşırı boşluk suyu basıncı arasındaki ilişkiyi açıklamak için üstel bir yaklaşım kullanmış ve çeşitli zamana bağlı yükler altında bir zemin tabakasındaki fazla boşluk suyu basınçlarını hesaplamak için bu ifadeyi kullanmışlardır. Yükün büyüklüğü ve başlangıç aşırı boşluk suyu basıncı geçirimliliği etkilediğinden konsolidasyon katsayısı ile ilişkilidir.

Gibson (1958), kil katmanın kalınlığı ile bu katmanın zaman içinde konsolidasyon hızı arasında bir ilişki olduğunu öne sürmüş ve kil katmanın kalınlığının artmasıyla birlikte konsolidasyon sürecinin hızlı ilerlediğini ortaya koymuştur.

Ying-chun ve Kang-he (2005), araştırma makalelerinde, zemin tekrarlı yüklemelere maruz kaldığı durumda, zeminin sıkışabilirliğini özellikle göz önünde bulundurarak, bir boyutlu konsolidasyon problemine yarı analitik bir yaklaşım sunmuşlardır. Zeminin değişken sıkışabilirliğini dikkate almayan döngüsel yükleme altında Konsolidasyon teorisini geleneksel yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre, değişken sıkıştırılabilirliğin dikkate alınması, geleneksel konsolidasyon teorisi hipotezine dayalı tahminlere göre daha yüksek bir zemin konsolidasyon oranına neden olduğunu ortaya koymuşlardır.

Xie ve ark.(2006), Davis ve Raymond (1965) yapmış oldukları varsayımlara dayanarak analitik bir çözüm elde etmişlerdir. Zemin konsolidasyonu sürecinde geçirgenlikteki azalma, sıkışabilirlikteki azalmayla orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada, Trapezoidal döngüsel yükleme altında zeminin tek boyutlu lineer olmayan davranış konsolidasyonu davranışını incelemişlerdir.

Mei ve Chen (2013), Terzaghi'nin tek boyutlu konsolidasyon denkleminin klasik başlangıç-sınır değer problemine uygun olup olmadığı konusundaki sorunları tartışmışlardır. Ayrıca, klasik sınırlama koşulları sınırlı durumlara uygun olduğunu ve bu durumlarda sınırlar tamamen geçirimli veya geçirimsiz olması gerektiğini açıklamışlardır. Bu sınırlamaları ele almak için, genel bir sınırlama koşulları dizisi önermişlerdir. Bu genel sınır koşullarının geçerliliği, elde edilen çözüm ile Terzaghi denkleminin klasik çözümünü karşılaştırarak belirlemişlerdir.

Herrmann ve El Gendy (2014), zamana bağlı oturma problemlerinin analiz edilmesi için Katman Denklem Metodu (KDM) uygulamışlardır. Diğer erişilebilir yöntemlerle karşılaştırıldığında, bu yöntem, daha az denklem terimi kullanarak sorunun karmaşıklığını en aza indirgemek ve yine de olağanüstü sonuçlar elde etmek açısından avantaj sağlamaktadır. Konsolidasyon sırasında zeminin geçirgenlik ve sıkışabilirliğindeki değişikliklere bağlı olarak boşluk suyu basıncının doğrusal olmayan davranışını bu çalışmada göz önünde bulundurmuşlardır.

Zhuo ve ark.(2018) tarafından sunulan makalede, konsolidasyon sürecinin tümünü kapsayan tek boyutlu konsolidasyon modelini önermişlerdir. Araştırmacılar, Sekiguchi ve Toriihara (1976) ve Yin ve ark. (2002) tarafından önerilen kil elastoplastik konsolidasyon modelinin bazı unsurlarını kendi tek boyutlu konsolidasyon modeline dahil etmişlerdir. Ayrıca, sürekli efektif gerilim koşullarında

tek boyutlu konsolidasyona uğrayan killer üzerinde zaman ve deformasyon hızı etkilerini araştırmışlardır. Kil örneğini bir bütünleşik sistem olarak ele almışlar ve sistem düzeyinde sınır koşulları uygulayarak killerin konsolidasyon problemini tanımlayan matematiksel denklemleri türetmişlerdir. Konsolidasyon sürecinde reolojik konsolidasyon modelinin başlangıç konsolidasyonunu tanımlamada bazı permeabilite değişikliklerinden kaynaklanan yanılgılar yaşandığını gözlemlemişlerdir. Bu problemi göz önünde bulundurarak modifiye edilmiş tek boyutlu konsolidasyon denklemini çıkarmışlardır.

Feng ve ark. (2021), tek boyutlu konsolidasyon problemine analitik bir çözüm sunmuşlardır. Önerilen çözümde başlangıçta, konsolidasyon sürecini anlamak için bir doğrulama sürecini içeren iki iyi yapılandırılmış analitik çözümün yanı sıra bir sayısal model kullanarak incelemişlerdir. Bu kapsamlı yaklaşımla, çözümün doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamayı ve aynı zamanda bu çözümün konsolidasyon süreci üzerindeki etkilerini anlamayı amaçlamışlardır. Çalışmanın bulgularında ise , yüksek drenaj katmanları kullanılmadan oluşan toplam oturmanın, yüksek drenaj katmanların kullanıldığı duruma kıyasla daha büyük olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Ayrıca konsolidasyon katsayısı (Cv) azaldıkça ve katmanın artma hızı (m) arttıkça nihai toplam oturmanın arttığını da göstermişlerdir.

Yuan ve Wang (2021), mühendislik uygulamaları için zeminde oturma miktarını doğru ve güvenli bir şekilde hesaplama zorluğunu ele almışlardır. Terzaghi teorisine dayanarak, zemindeki deformasyonun gözeneklerinden drenaj yapılan suyun hacmiyle eşdeğer olduğu kavramını dikkate almışlardır. Bu teoride, su içeriğindeki değişime bağlı olarak zeminin konsolidasyon derecesini hesaplama için teorik bir çerçeve sunmuşlardır. Bu kavramı uygulayarak, zeminin gözeneklerinden drenaj yapılan su miktarını niceliksel olarak belirlemişler ve zemin deformasyonunun derecesini tahmin etmek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Bulgularda ise, su içeriği tarafından belirlenen konsolidasyon derecesinin, aynı zamanda deformasyon tarafından belirlenen konsolidasyon derecesine göre daha düşük bir değer olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca boşluk suyu basıncı ve gözenek oranı arasında lineer bir ilişki bulmuşlardır.

Zheng ve ark. (2021), Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu testi görüntülerini inceleyerek yumuşak Şangay kilinin mikro yapısının konsolidasyon yüklemesi sonucunda nasıl değiştiği belirlemişlerdir. Yumuşak kilin bu süreç boyunca

nasıl davrandığını ve mikro yapısının nasıl değiştiğini anlamak için çeşitli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada mikroskobik ve mikro yapı özellikleri arasındaki ilişkiyi değerlendirmişlerdir. Bulgularında, daha düşük konsolidasyon basıncı değerlerinin daha büyük boşlukların önemli ölçüde sıkışmasına neden olduğunu, daha yüksek konsolidasyon basıncı değerlerinin ise küçük boşluk sayısının artmasına yol açtığını ortaya koymuşlardır. Sonuçlarında ise, yumuşak kilin konsolidasyon sürecinin üç aşamada gerçekleştiğini, bunların, doğal yapısal aşama, hafif değişim aşama ve yeniden yapılandırma aşaması olduğunu belirtmişlerdir.

Wang ve ark. (2021) makalelerinde, zemin konsolidasyon problemine basit bir çözüm sunmuş ve bir eşik gradyanını dikkate almışlardır. Bu çözümde, temel fonksiyonu kullanarak ifade etmiş ve bu da onun uygulanabilirliğini artırdığını göstermişlerdir. Ancak, makalede önerilen analitik çözümün, 1923 yılında Terzaghi tarafından formüle edilen bir boyutlu konsolidasyon denklemine tam olarak uymadığı görünmektedir. Makale, kendi önerdikleri basit çözümü, Pascal ve ark.(1981) sunduğu yaklaşık analitik çözümle karşılaştırmışlardır. Sonuçlarda, hareketli sınır koşulları dikkate alındığında su boşluk basıncının Pascal'ın sayısal çözümüne daha yakın olduğunu göstermişlerdir. Çalışmanın bulguları ve sonuçlarında konsolidasyon sürecinin sonunda fazla boşluk suyu basıncının tamamen dağılmadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, daha büyük bir eşik gradyanının (threshold gradient) daha yüksek bir kalıcı fazla boşluk suyu basıncına yol açtığını gözlemlemişlerdir.

Chen ve ark.(2023), Duhamel prensibi ve değişkenlerin ayrılması yöntemini kullanarak yeni bir analitik çözüm geliştirmeyi amaçlamıştırlar. Geliştirilen analitik çözümü, mevcut saha test verileri, diğer analitik çözümler ve sayısal simülasyon sonuçları ile karşılaştırarak detaylı bir şekilde doğrulamışlardır. Daha sonra, türetilmiş çözümü kullanarak, zemin kütlesinin kendi ağırlığı, sınır koşulları, yük desenleri ve zemin katmanı özellikleri gibi çeşitli faktörlerin etkilerini incelemişlerdir. Araştırma, zeminin kendi ağırlığının fazla boşluk suyu basıncını artırdığını, ancak bu etkinin zamanla azaldığını ve sonunda kaybolduğunu göstermektedir. Ayrıca, daha düşük bir konsolidasyon katsayısına sahip bir zemin katmanının varlığının fazla boşluk suyu basıncının dağılmasını engellediği ve bunun sonucunda konsolidasyonun tamamlanmasının daha uzun sürdüğü sonucuna varmışlardır.

1.4.3 Poroelastik Konsolidasyon Teorisi

Sandhu ve Wilson (1969), doygun, poroz, elastik ortamdaki akış problemini başlangıç sınırları ile çözmüşlerdir. Sonuç olarak, hem sıvı hem de katı fazlar için bu çözüm tekniği, keyfi sınır koşulları ve karmaşık geometrik yapılar altında deplasman ve gerilmelerin belirlenmesinde göstermişlerdir.

Deng ve ark.(2019), doygun zeminin zamana bağlı olarak farklı tiplerde harmonik dış yüklemeye maruz kalmasının etkisini incelemiştir. Bir simetrik formülasyon kullanarak, toplam oturma ve fazla boşluk suyu basıncının hem zamandan bağımsız durumunu hem de zamana bağlı davranışını dikkate alan bir dizi analitik çözüm geliştirmişlerdir. Fazla boşluk suyu basıncını belirlemek için sayısal hesaplamaları MATLAB programını kullanarak yapmışlardır.

Lo ve ark. (2021) yazmış oldukları makalelerinde, tamamen geçirgen sınır koşulları altında doygun ve doygun olmayan zemin katmanlarının konsolidasyon problemini ele almak için poroelastisite denklemini kullanmışlardır.

1.4.4 Tekrarlı Yüklerin Zeminler Üzerindeki Etkisi

Özellikle altyapı projelerinde demiryolu, havalimanı ve karayolu mühendisliği gibi çeşitli alanlarda geoteknik yapıların yol yatağı veya temel zeminin davranışı tekrarlı yük uygulamalarının zamanla değişen doğasından önemli derecede etkilenmektedir. Bu sebeple tasarım yaparken bu tür yüklerin dikkate alınması gerekmektedir.

Zemine uygulanan periyodik yüklerin çeşitli önemli örnekleri şunlardır:

- Kıyı bölgelerindeki dalga etkisi
- Endüstriyel tesislerde çalışan makine ve ekipmanlar
- Su seviyelerini etkileyen gelgit değişiklikleri
- Köprü ayaklarının deneyimlediği dinamik yükler ve rüzgârın yapılara uyguladığı yükler gibi durumları içerir.

Zeminler, özellikle karayollarında hareket eden araçların döngüsel yüklerinden dolayı farklı zorluklarla karşılaşırlar. Örneğin, yolların altındaki killi zeminlerde oturması meydana gelmektedir. Bu yüklere maruz kalma süresi normal trafikte genellikle yalnızca birkaç saniyedir, ancak kavşaklarda birkaç dakikaya kadar

uzayabilmektedir. Otopark alanlarında ise bu yükler birkaç saat boyunca devam edebilir. Arazi üzerindeki bu döngüsel yüklerin varlığı, statik yükler temelinde yapılan teorik beklentilerden önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu nedenle, bu döngüsel yüklerin zemin oturması sorunlarına sebep olan etkilerini araştırmak son derece önemli hale gelmektedir (Wilson ve Elgohary (1974)) .

Farklı tekrarlı yüklerin zeminlerde meydana gelen konsolidasyon sürecine etkilerini incelemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Sabit, sinüzoidal, dikdörtgen ve üçgen yükler gibi tekrarlı yüklerin etkisi, Terzaghi'nin prensiplerine dayalı olarak Xu ve ark. (2002) tarafından analiz edilmiştir. Ayrıca, aynı tür tekrarlıl yüklerin etkilerini Yuan-qiang ve ark. (2004) tarafından incelenmiş ve yarı analitik bir çözüm sunmuşlardır.

Ying-chun ve Kang-he (2005), lineer yükün tek boyutlu zemin konsolidasyon davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

Yaptıkları çalışmalarında Xie ve ark.(2006), trapezoidal tekrarlı yükleme altında tek boyutlu zemin konsolidasyonunun lineer olmayan davranışı için analitik bir çözüm elde etmişlerdir. Cai ve ark. (2007) da bu etkinin yanı sıra dikdörtgen ve üçgen yükler gibi diğer tekrarlı yük türlerinin etkilerini incelemek için araştırmalar yürütmüşlerdir.

Razouki ve Schanz (2011) ise bir boyutlu konsolidasyon sürecini tekrarlanan yüklerin haversian etkisini göz önünde bulundurarak araştırmışlardır.

Xie ve ark. (2014) Çalışmalarında, zamana bağlı olarak oluşan zeminin tek boyutlu konsolidasyonu için analitik bir çözüm sunmuşlardır. Çalışmalarında döngüsel pompalama, kademeli pompalama, kademeli yükleme ve sürekli yükleme gibi çeşitli pompalama ve yükleme türlerini incelemişlerdir. Elde edilen çözümleri kullanarak, zeminin konsolidasyon davranışını göstermek ve tartışmak için diyagramlar oluşturmuşlardır. Yük basıncı, pompa hızı ve özellikle yükleme ve pompa tipleri gibi parametrelerin, konsolidasyon davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermişlerdir.

Deng ve ark. (2019) sabit, kosinüs dalga tipi, kare dalga tipi ve üçgen dalga tipi periyodik yükler gibi farklı tekrarlı yüklemelerin doygun zemin üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

1.4.5 Rampa Yüklerin Zeminler Üzerindeki Etkisi

Rampa yüklerin zeminlerde meydana gelen konsolidasyon sürecine etkilerini incelemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır.

Liu ve Ma (2013), yumuşak zeminde meydana gelen tek boyutlu konsolidasyon problemine analitik bir çözüm bulmuşlardır. Bu çalışmada, derinlikle bağlantılı gerilme değişikliklerinin ve engellenmiş sınırların etkilerini içeren zamana bağlı bir konsolidasyon analizini gerçekleştirmişlerdir. Rampa yükünü, sonsuz serilerin ve değişkenlerin ayrıştırılması yöntemiyle, dik ilişkiler yöntemini kullanarak elde etmişlerdir. Elde ettikleri analitik çözüme dayanarak, hesaplamalı bir program oluşturmuşlar ve konsolidasyon sürecinin toplam gerilme artış dağılımın tarafından önemli ölçüde etkilendiği ve drenaj sınır koşullarından da etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Sivakugan ve ark.(2014), rampa yüklemeye maruz kalındığında konsolidasyonu incelemişlerdir. Araştırmada, tek boyutlu konsolidasyon analizinde yükün aniden uygulanması yerine belirli bir süre boyunca yavaşça uygulanmasının hesaplamalar üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak, sürekli hızlı yüklemeler için herhangi bir zamandaki ortalama konsolidasyon derecesi, anlık yüklemelere kıyasla önemli ölçüde daha küçük olduğunu ortaya koymuşlardır.

Kim ve ark. (2021), doygun zeminlerde tek boyutlu doğrusal olmayan konsolidasyon probleminin çözümü için analitik bir çözüm önermişlerdir. Zamana bağlı yükleme koşullarını karşılayan çok katmanlı zeminlerin iki tür yükleme türüne (rampa yükleme ve sabit yükleme) maruz kaldığı durumu ele almışlardır. Önerilen analitik çözümleri kullanarak tek katmanlı ve çift katmanlı zemin koşulları için hesaplamaları yapmışlar ve bu sonuçları literatürde bulunan mevcut çözümlerle karşılaştırmışlardır. Yükleme parametresi arttıkça fazla boşluk suyu basıncındaki azalma hızının yavaşladığı sonucuna varmışlardır. İnşaat süresi kısa bir süre içinde tamamlanırsa, konsolidasyon sürecinin daha hızlı gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Diğer yandan yük parametreleri ile basınç kaybı oranı arasında ve inşaat süresi ile zemin konsolidasyonunun gelişimi arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermişlerdir.

1.4.6 Laplace Dönüşümünü Kullanarak Konsolidasyon Problemini Ele Alan Önceki Çalışmalar

Xu ve ark. (2002), doygun zeminlerin yarı geçirgen sınırlarıyla etkin gerilmeler oranının, Terzaghi'nin varsayımlarına dayanarak, döngüsel yükler altında bir boyutta konsolidasyonu araştırmışlardır. Laplace dönüşümü ile elde edilen denklemlerin gerçek alana dönüşümü için sayısal ters dönüşümünü uygulayarak analiz etmişlerdir.

Wang ve ark. (2003), çift katmanlı zeminin bir boyutlu konsolidasyon problemine yönelik bir çözüm sunmuşlardır. Xie (1994) çalışmasını temel aldıkları çözümlerinde diferansiyel kareler eleman metodu kullanarak geliştirmişlerdir. Elde edilen sonuçları, Terzaghi'nin teorisine dayalı analitik çözümle karşılaştırmışlardır. Doğrusal entegrasyon yapmak için iki temel yöntem bulunmaktadır: analitik yaklaşım ve Laplace dönüşümü yöntemidir. Vaka çalışmalarında, zemin tabakasında hesaplanan boşluk suyu basıncı sonuçları ile analitik çözümden elde edilen sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu göstermişlerdir.

Yuan-qiang ve ark. (2004), toprak tankları ve yollar gibi sıklıkla zamana bağlı yüklemelere maruz kalan zeminlerde etkin gerilme oranının zaman içerisinde nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Terzaghi'nin tek boyutlu konsolidasyon teorisini temel aldıkları çalışmalarınada çözüm için Laplace dönüşümü kullanmışlardır.

Cai ve ark. (2007) tarafından yapılan başka bir araştırma, tek boyutlu konsolidasyon problemini, yükler altında zemin sıkışmasındaki değişikliği göz önüne alarak incelemişlerdir. Laplace dönüşümünü kullandıkları çözümlerinde Gibson'ın temel denklemine dayanarak basit bir yarı-analitik yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada konsolidasyon derecesi ve boşluk suyu basıncı değerlerinin yükleme aşamasında arttığı, boşaltma aşamasında azaldığı sonucuna varmışlardır.

Cai ve Geng (2009), zemin yüzeyine uygulanan dairesel bir basıncın etkisi altında yarı sonsuz, enine izotropik doygun kilin eksenel simetrik konsolidasyonunu incelemişlerdir. Transvers izotropik kil için Biot'un konsolidasyon denklemlerini kullanmış ve sorunun genel çözümlerini elde etmek için Laplace-Hankel dönüşüm tekniğini kullanmışlardır. Daha sonra, kil zeminlerde olan konsolidasyon davranışını zaman uzayında analiz etmek için sayısal bir ters çevirme prosedürü kullanmışlardır.

Wang ve ark.(2017), viskoelastik doygun zeminin döngüsel yüklemelere maruz kaldığı durumlara çözüm bulmaya çalışmışlardır. Çalışmalarında, Kelvin-Voigt için kesirli türevlerle birlikte tek boyutlu konsolidasyon denklemini çözmek için yarı-analitik bir yaklaşım sunmuşlardır. Bir boyutlu konsolidasyon denklemini çözmek için Laplace dönüşüm yöntemini kullanmışlar ve oturma ve efektif gerilme açısından Laplace uzayında çözümleri elde etmişlerdir. Ardından ters Laplace dönüşüm tekniği kullanılarak çözümler zaman alanına dönüştürülmüştür.

Ding ve ark. (2021) araştırmalarında, reolojik özellikleri incelemişlerdir. Reolojik zeminlerin konsolidasyon davranışını tanımlamak için Merchant modeline kısmi türevi kullanarak bir boyutlu reolojik konsolidasyon denklemini yeniden türetmişler ve Laplace uzayında analitik çözümünü elde etmişlerdir. Bu çözümü gerçek alanına zaman uzayına dönüştürmek için Abate'ın sabit Talbot yöntemi olarak bilinen bir sayısal ters Laplace dönüşüm yöntemi kullanmışlardır. Türetmede, konsolidasyon denkleminin çözümlerini sağlamada yarı analitik yaklaşımın daha verimli ve daha doğru olduğunu bulmuşlardır. Zati ağırlık gerilmesinin etkisini dikkate almanın, temelin nihai oturmasını ve konsolidasyon oturma oranını iyileştireceği sonucuna varmışlardır.

Huang ve ark. (2021), fazla boşluk suyu basıncını ve ortalama konsolidasyon derecesini hesaplamak için öz fonksiyon genişlemesi ve Laplace dönüşüm tekniklerini kullanmışlardır. Ayrıca, çalışmalarında anlık yükleme, genel döngüsel yükleme, sinüzoidal yükleme ve rampa yükleme gibi çeşitli yükleme türlerini ele almışlardır. Zemin içindeki toplam düşey gerilmenin derinlikle doğrusal olarak değiştiği varsayımı ile geliştirilen çözümleri mevcut teorilerle karşılaştırmışlar, doğruluk ve güvenilirliği değerlendirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, toplam düşey gerilme dağılımının fazla boşluk suyu basıncının dağılma hızını etkilediği ve ters trapezoidal dağılımın en etkili olduğunu bulmuşlardır.

Xu ve Cui (2022) , kıyı bölgelerinde yer alan yumuşak kil zeminlerin sıvılaşma ve konsolidasyon davranışını ele almışlardır. Çözümlerde iki farklı teorik modeli kısmi türevli Merchant modeli ile bir boyutlu konsolidasyon teorisinin birleşimini kullanmışlardır. Bu iki teorik modeli birleştirerek, doygun zeminlerin sıvı-katı etkileşim davranışını daha ayrıntılı bir şekilde açıklamak için matematiksel formülasyon geliştirmişlerdir. Bu çalışma, farklı yeraltı su seviyesi dalgalanmalarını

incelemek ve yönetim denklemlerini Laplace dönüşümünü kullanarak analitik çözümler elde etmek için matematiksel bir yaklaşım kullanılmıştır. Sayısal ters Laplace dönüşümünü elde etmek için Crump yöntemi kullanmış ve bu sayede bir boyutlu konsolidasyon için yarı-analitik bir çözüm türetmişlerdir. Çalışmada, kesirli derece, geçirimlilik, viskozite katsayısı, basınç modülü katsayısı gibi çeşitli parametreler ve yeraltı suyu seviyesi değişimlerini temsil eden çeşitli modellerle incelemişlerdir.

1.4.7 Sonlu Farklar yöntemini Kullanarak Konsolidasyon Problemini Ele Alan Önceki Çalışmalar

Hawlader ve ark. (2003) tarafından, viskozitenin konsolidasyon süreci üzerindeki etkisi incelenmiş ve tartışılmıştır. Kullanılan yöntem, büyük gerilmeler altında killerin konsolidasyonunu yöneten denklemleri çözmek için sonlu farklar yöntemini kullanmışlardır. Çeşitli problemleri ele almak için bağlantılı bir konsolidometre kullanarak elde edilen deneysel verilerin ve bir sayısal modelin inceleyerek sonuçların farklı olduğunu göstermiş ve bu farkın ana nedeni olarak yapısal viskozitenin konsolidasyonun ilk aşamasında baskın olmasını tespit etmişlerdir.

Razouki ve Schanz (2011) çalışmalarında, özellikle haversine tekrarlı maruz kalan yükün etkilerine odaklanarak tek boyutlu konsolidasyon sürecini incelemişlerdir. Dinlenme periyodu olan ve olmayan durumların konsolidasyon süreci sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Sayısal ve analitik kapalı sonlu fark yöntemlerini birleştiren hibrit bir yaklaşım kullanılarak analiz gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda haversine tipi tekrarlı yüklerin maruz kaldığı durumlarda dinlenme döneminin dahil edilmesinin konsolidasyon sürecinde yavaşlatıcı bir etkisi olduğunu göstermişlerdir.

Naser (2013), açık sonlu farklar yöntemlerine dayanan bir çözüm geliştirmiş ve BASIC dilinde yazılan bir bilgisayar programı aracılığıyla uygulamıştır. Bu program, incelenmesi gereken çeşitli durumlar altında tek bir kil tabakasının tek boyutlu konsolidasyon için özel olarak tasarlamıştır. Bu çözüm özellikle homojen bir kil tabakasının bir boyutta konsolidasyonunu ele almış olup, tabakanın üst kısmında

geçirgenlik ve altında geçirimsizlik dikkate alınmıştır. Geliştirdiği sayısal çözümde, ilk olarak eşit olmayan gözenek aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı durumunu kapsayan Craig (2007) çözümü ile karşılaştırmıştır. Karşılaştırmada, iki çözüm arasında yüksek düzeyde bir uyum olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Satwik ve Chakraborty (2022), döngüsel yükleme altında kilin Darciyen olmayan konsolidasyon davranışını ele almışlardır. Çalışma killi zeminlerin tek boyutlu konsolidasyonuna odaklanmakta ve belirli bir zemine döngüsel yükler uygulandığında, konsolidasyonda akış hızı ile sürücü potansiyel arasındaki doğrusal olmayan ilişkinin dikkate alınmasının önemini vurgulamışlardır. Üç farklı tip döngüsel yükleme (üçgen, haversine ve trapezoidal), dinlenme periyodu ile veya olmadan incelemişlerdir. Analizleri gerçekleştirmek için kapalı sonlu farklar yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada geçirimli ve geçirimsiz hidrolik sınır yüzeylerini dikkate almışlardır.

Oliveira ve ark. (2023), tek boyutlu konsolidasyon için doğrusal olmayan viskozite yasasını içeren bir reolojik model önermişlerdir. Bu model, Terzaghi'nin (1941) konsolidasyon mekanizmasının kavramsal tasarımına dayanmaktadır. Doğrusal olmayan viskozite sonucu olarak ortaya çıkan diferansiyel denklemler sistemini Sonlu Farklar Yöntemini kullanarak sayısal olarak çözmüşlerdir. Bu modelde özellikle doygun kil zeminlerin konsolidasyonunu ele alırken sürünmeyi dikkate alınır. Modelin, dünya çapındaki farklı bölgelerdeki laboratuvar deneyleri ile iyi bir uyum sağladığını belirtmişlerdir.

1.4.8 Sonlu Eleman Yöntemini Kullanarak Konsolidasyon Problemini Ele Alan Önceki Çalışmalar

Hassan ve Mohamad (2012), konsalidasyon problemini Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanarak ele almışlardır. Sonlu Elemanlar Yöntemi kodunu, MATLAB kullanarak özel olarak geliştirmişlerdir ve formülasyonda, sonlu fark zaman adımı algoritmalarını da kullanmışlardır. Çalışmada uygulanan sayısal algoritmalarla, Terzaghi'nin kesin çözümü ile yakından uyumlu olduklarını göstermişlerdir.

Müthing ve ark. (2016), dinlenme sürelerini içeren haversin yükleme dalga formunu sunmuşlardır. Çeşitli dinlenme süreleriyle haversin döngüsel yüklemeler için

analitik çözümü elde etmişlerdir. Ayrıca, haversin döngüsel yüklemelerle ilişkili konsolidasyon problemini Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanarak sayısal olarak çözmüşlerdir. Sonlu Elemanlar Yöntemi analizinden elde edilen sonuçlar, analitik çözümle uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

Chai ve ark. (2022), dalga, rüzgâr ve trafik döngüsel yükler gibi aralıklı tekrarlı yüklerin neden olduğu bir boyutlu konsolidasyon oturma eğrisini belirlemek için basit bir yöntem önermişlerdir. Bu mekanizmayı doğrulamak için, kare şeklinde aralıklı tekrarlı yükleri kullanarak Sonlu Elemanlar Yöntemi analizi yapmışlardır. Ayrıca, aralıklı tekrarlı yükler altında konsolidasyonu gözlemlemek amacıyla laboratuvar testlerini yapmışlar ve sonuçları kaydetmişlerdir. Son olarak laboratuvar deneylerinden elde edilen oturma eğrileri, önerilen yöntemin öngördüğü sonuçlarla karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin etkinliğini vurgulamışlardır.

1.4.9 Sonlu Fourier Sinüs Dönüşümü Yöntemini Kullanarak Konsolidasyon Problemini Ele Alan Önceki Çalışmalar

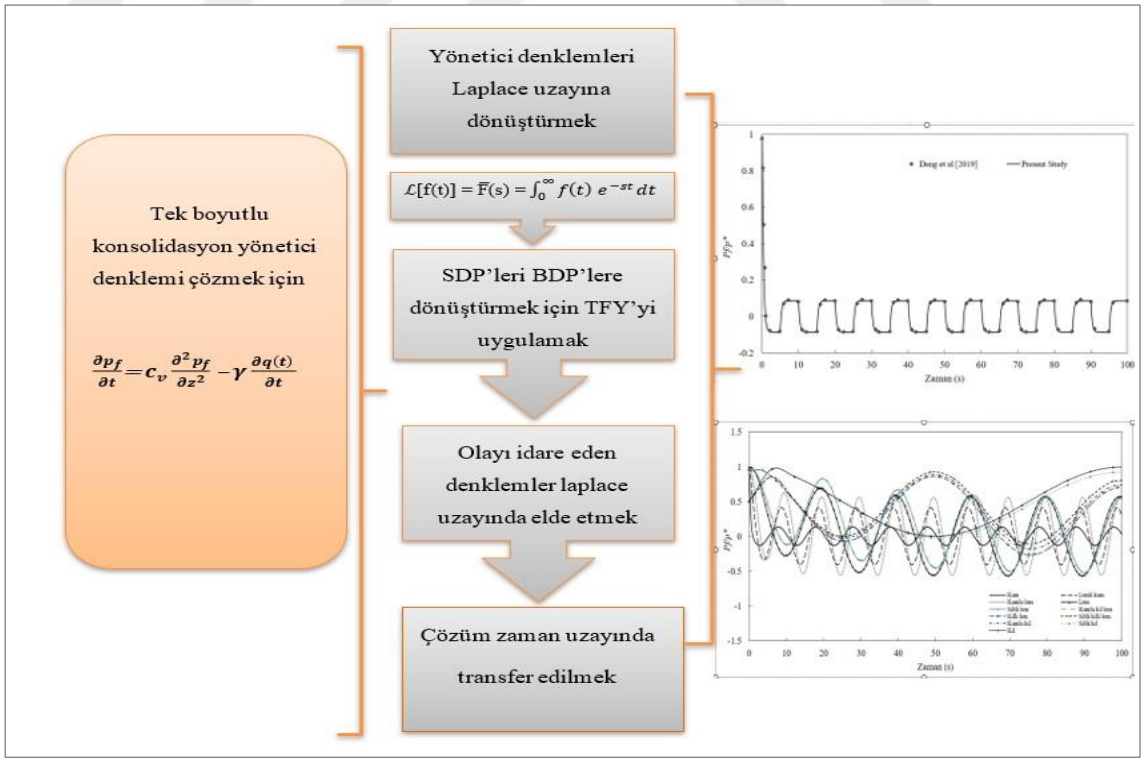
Conte ve Troncone (2006), zamanla değişen yüklemelere maruz kalan doygun zeminler üzerinde araştırma yapmışlardır. Fratik uygulamalar için Fourier serisini ve basit hesaplamaları kullanarak tek boyutlu konsolidasyon analizi için analitik çözümler sunmuşlardır. Önerilen çözümden elde edilen sonuçların, mevcut teorik çözümlerden elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir.

Feng ve ark. (2019), önerilen analitik çözümün özellikle zeminin konsolidasyon sürecinde kendi ağırlığının önemli kaldığı durumlar için uygun olduğunu belirtmişlerdir. Çözümü elde etmek için, tek boyutlu konsolidasyonla ilgili denklemleri bulmak için finit Fourier sinüs dönüşüm yöntemini kullanmışlardır.

İKİNCİ BÖLÜM
MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, kısmi diferansiyel denklem olan tek boyutlu konsolidasyon denklemini çözmek ve onu adi diferansiyel denkleme dönüştürmek için Laplace dönüşümü ile Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi birlikte kullanılmıştır. Problemde, olayı idare eden diferansiyel denklemler esas alınmış ve bu yöntem ile Sınır Değer Problemleri (SDP) Başlangıç Değer Problemlere (BDP) indirgenerek çözülmüştür. Olayı idare eden denklemler öncelikle Laplace uzayında elde edilmiş ve daha sonra bu çalışmada önerilen yöntemin uygulanabilmesi için ters Laplace dönüşümü kullanılarak sonuç zaman uzayına transfer edilmiştir. TFY ile Laplace dönüşümü daha önce birçok yapı mekaniği probleminde etkili bir şekilde uygulanmıştır [Temel ve ark. (2014), Temel ve ark. (2015) , Temel ve ark. (2017) , Noori ve ark. (2018a), Noori ve ark. (2018b) , Aslan ve ark. (2019), Noori ve ark. (2021)].

Şekil 11, tez kapsamında uygulanan yöntemin akış şeması ve elde edilen sonuçlarla birlikte diyagramı göstermektedir.



Şekil 11. Önerilen yöntem.

2.1 Tek Boyutlu Konsolidasyonun Yönetici Denklemleri (Model Denklemler)

Bu çalışmada Biot'un tek boyutlu teorisine dayanarak fazla boşluk suyu basıncının zamana ve derinliğe göre dağılımını belirleyen difüzyon denklemi kullanılmıştır. Bu denklem üst yüzeyi suya doygun gözenekli ortamda tekrarlı gerilme altında geçerlidir.

Tek boyutlu konsolidasyon problemi difüzyon denklemi aşağıda verilmiştir (Deng ve ark. (2019)).

$$\frac{\partial p_f}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 p_f}{\partial z^2} - \gamma \frac{\partial q(t)}{\partial t} \tag{5}$$

Burada:

$\frac{\partial p_f}{\partial t}$: Zaman (t) boyunca fazla boşluk suyu basıncının sönümlenebilmesi

c_v :Konsolidasyon katsayısı

$\frac{\partial^2 p_f}{\partial z^2}$: İkinci türev ile aşırı boşluk suyu basıncının derinliğe boyunca kaybı

γ: Yük verimi

$\frac{\partial q(t)}{\partial t}$: Zaman içinde üst yüzeye uygulanan tekrarlı gerilmeyi

ifade etmektedir.

Su içeren zeminin hidrolik ve elastik özelliklerini temsil eden c_v ve γ 'nin değerleri Denklem (6 -7) yardımıyla belirlenir (Deng ve ark. (2019)).

$$c_v = \frac{k_s}{\eta} / \left[\frac{\alpha^2}{(K_b + \frac{4}{3}G)} + \frac{1}{M}\right] \tag{6}$$

$$\gamma = \frac{\alpha M}{(K_b + \frac{4}{3}G + \alpha^2 M)} \tag{7}$$

Burada;

G: Gözenekli ortamda kayma modülü

k_s: Geçirimlilik katsayısı

η : Suyun dinamik kayma viskozite katsayısıdır.

Ayrıca denklemde α Biot-willis katsayısı Biot (1956):

$$\alpha = 1 - \frac{K_b}{K_s} \tag{8}$$

olarak tanımlanmaktadır.

Burada; K_b gözenekli ortamda zeminin bulk modülünü, K_s ise katı fazın bulk modülünü ifade eder.

Biot'un M olarak belirtilen gözeneklilik katsayısı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir Biot (1962):

$$M = \frac{K_s}{\left[1 - \emptyset - \frac{K_b}{K_s} + \emptyset\frac{K_s}{K_f}\right]} \tag{9}$$

Burada;

$\emptyset$: Porozite:

K_f: Suyun bulk modülüdür.

2.2 Başlangıç ve Sınır Şartları

Tek boyutlu konsolidasyon probleminin çözümünü gerçekleştirmek ve fazla boşluk suyu dağılımını zamanın bir fonksiyonu olarak belirlemek için başlangıç ve sınır koşullarının kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada önerilen yöntem ile, SDP'leri BDP'lere indirgenerek çözülmüştür. Başlangıç koşullarını belirlemek için drenajsız koşullar durumu kullanılmıştır. Drenajsız koşullar altında, doymuş zemine anlık yük (toplam basınç gerilmesi) $p*$ uygulandığında ne su ne de havanın ortamdan uzaklaşmadığı kabul edilir (Lo ve ark. (2014)).

$$p_f(z,0) = \gamma\, p* \tag{10}$$

Tek boyutlu konsolidasyon difüzyon temsil eden Denklem (5)'te, zaman (t) ve derinlik (z) bağımsız değişkenler, aşırı boşluk suyu basıncı p_f ise bağımlı değişken olarak kabul edilir. Bu nedenle u değişkeni derinliğe (z) göre iki, zamana (t) göre ise bir türev alır. Bu nedenle Denklemi (5) çözmek için iki sınır koşulunun belirlenmesi gerekir.

Bu koşullar genellikle aşırı boşluk suyu basıncı değerinin bilindiği zemin tabakasının farklı derinliklerinden kaynaklanır.

Bu sınır koşulları, tek yönlü drenaj veya iki yönlü drenaj olarak ortaya çıkar ve konsolidasyonun meydana geldiği kil tabakasının üstündeki ve altındaki belirli katmanlara bağlıdır.

Sınır koşulları, alt yüzeyde z = 0 ve üst yüzeyde z = h olmak üzere geçirgen yüzeyleri dikkate alır. Denklem (11-12) belirtildiği gibi yüksekliklerin geçirgen olduğu ve suyun bu sınırlar boyunca serbestçe akmasına izin verdiği varsayılmaktadır (Lo ve ark. (2014)) .

$$p_f(0,t) = 0 \tag{11}$$

$$p_f(h,t) = 0 \tag{12}$$

Başlangıç ve sınır koşullarının değerleri Lovisa (2012)'te belirtildiği gibi Tablo 1'de özetlenebilir.

Tablo 1. Başlangıç ve sınır koşulları

Sınır Koşulları	Matematiksel ifadeler
Zemin tabakasının üst kısmında tam drenaj mevcut ise;	$p_f(0,t) = 0$
Zemin tabakasının alt kısmında tam drenaj mevcut ise;	$p_f(h,t) = 0$
Zemin tabakasının alt kısmı geçirgen değilse;	$\frac{\partial p_f(h,t)}{\partial z} = 0$
Konsolidasyon işleminin başlangıcında uygulanan basınç, boşluk suyunun başlangıçtaki fazla basıncına eşit ise;	$p_f(z,0) = \Delta\sigma_v$

$\Delta\sigma_v$: başlangıçta uygulanan basınç

Bu çalışmada, ikili drenaj sistemi kullanılmıştır. Bu, boşluk suyu basıncının zemin gözeneklerinden ve drenajlarından iki yönde çıktığı anlamına gelir: yukarı doğru, üst drenaj sınırına doğru ve aşağı, alt drenaj sınırına doğru.

Ayrıca, t = 0 olduğunda, başlangıç koşulunda uygulanan yük q değeri için Denklem (13)'te belirlenmiştir.

$$q(0) = -p* \tag{13}$$

2.3 Tek Boyutlu Konsolidasyon Probleminin Teorik Çözümü

2.3.1 Laplace Uzayında Çözüm

Laplace dönüşümü, kısmi bir diferansiyel denklem olan zamana bağlı yükleme için tek boyutlu konsolidasyon Denklemini (5) adi diferansiyel denklemine dönüştürmek için kullanılmıştır.

$$\frac{\partial p_f}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 p_f}{\partial z^2} - \gamma \frac{\partial q(t)}{\partial t} \tag{5}$$

Zamana bağlı f(t) fonksiyonunun Laplace dönüşümü (Spiegel, 1965), Denklem (14)'te gibi alınır.

$$\mathcal{L}[\mathrm{f(t)}] = \overline{\mathrm{F}}(\mathrm{s}) = \int_0^\infty f(t)\, e^{-st}\, dt \tag{14}$$

$\overline{\mathrm{F}}$(s) Laplace parametresine bağlı formülasyon olarak tanımlanmaktadır. Burada s, Laplace dönüşüm parametresini temsil etmektedir.

Birinci mertebeden türevin zamana göre Laplace dönüşümü kapalı olarak Denklem (15)'te tarif edilmektedir:

$$\mathcal{L}\left[\dot{f}(\mathrm{t})\right] = \mathrm{s}\,\overline{\mathrm{F}}(\mathrm{s}) - f\,(0) \tag{15}$$

Denklem (5)'in her bir terimine Laplace dönüşümü uygularken, denklemin başlangıç koşullarını göz önüne almak gerekmektedir.

$$\mathcal{L}\left[\frac{\partial p_f}{\partial t}\right] = s\bar{p}_f(s) - p_f(0) \tag{16}$$

Başlangıç koşullarını yardımıyla ve (10) eşitlik (16) da yerine yazıldığında,

$$\mathcal{L}\left[\frac{\partial p_f}{\partial t}\right] = s\bar{p}_f(s) - \gamma\, p* \tag{17}$$

şeklinde elde edilmiştir.

Denklem (5)'in ikinci terimi için Leibnitz kuralını kullanarak (Spiegel, 1965),

$$\mathcal{L}\left[\frac{\partial^2 p_f}{\partial z^2}\right] = \frac{d^2 \bar{p}_f}{dz^2} \tag{18}$$

şeklinde elde edilmiştir.

Benzer şekilde denklemin (5)'in üçüncü terimine Laplace dönüşümü uygulanarak;

$$\mathcal{L}\left[\frac{\partial q}{\partial t}\right] = s\bar{q}(s) - q(0) \tag{19}$$

şeklini alınmıştır.

Başlangıç koşullarını yardımıyla ve (13) eşitlik (19) da yerine yazıldığında,

$$\mathcal{L}\left[\frac{\partial q}{\partial t}\right] = s\bar{q}(s) + p* \tag{20}$$

eşitliği elde edilmiştir.

Olay idare eden Denklem (5)'in Laplace dönüşümü alınıp kanonik Denklemler (21-24) elde edilmiştir. Bu olay idare eden denklemler, ilk kez bu çalışmada sunulmuştur.

$$s\bar{p}_f(s) - \gamma\, p* = c_v \frac{d^2 \bar{p}_f}{dz^2} - \gamma(\, s\bar{q}(s) + p*\,) \tag{21}$$

$$s\bar{p}_f(s) - \gamma\, p* = c_v \frac{d^2 \bar{p}_f}{dz^2} - \gamma\, s\bar{q}(s) - \gamma\, p* \tag{22}$$

$$s\bar{p}_f(s) = c_v \frac{d^2 \bar{p}_f}{dz^2} - \gamma\, s\bar{q}(s) - 2\,\gamma\, p* \tag{23}$$

$$c_v \frac{d^2 \bar{p}_f}{dz^2} = s\bar{p}_f(s) + \gamma\, s\bar{q}(s) + 2\,\gamma\, p* \tag{24}$$

Bu ifade (24) de düzenlenirse

$$\frac{d^2 \bar{p}_f}{dz^2} = \frac{1}{c_v}\,(s\bar{p}_f(s) + \gamma\, s\bar{q}(s) + 2\,\gamma\, p*) \tag{25}$$

şeklini almıştır.

2.3.2 Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yönteminin Uygulanması

Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY)'yi kullanılarak Laplace uzayında çözüm elde edilecektir. TFY'de, olayı idare eden diferansiyel denklemler temel alınmıştır. Bu yaklaşımın temel fikri, iki noktalı sınır değer problemleri başlangıç değer problemlere indirgenerek çözmektir. TFY, bu tür problemin çözümü için kullanıldığında etkili ve doğru bir yöntemdir.

Çözüm için;

$$y_1 = \bar{p}_f \tag{26}$$

olarak kabul edilirse;

$$\frac{d\bar{p}_f}{dz} = \frac{dy_1}{dz} = \acute{y_1} = y_2 \tag{27}$$

varsayılarak ki, eşitlik (26) ve (27) elde edilmişter.

$$\frac{d^2\bar{p}_f}{dz^2} = y_2{}' = \frac{dy_2}{dz} = \frac{1}{c_v}\left(s\bar{p}_f(s) + \gamma\, s\bar{q}(s) + 2\,\gamma\, p*\right)$$

$$\frac{dy_1}{dz} = y_2 \tag{28}$$

ve

$$\frac{dy_2}{dz} = \frac{1}{c_v}\left(s\bar{p}_f(s) + \gamma\, s\bar{q}(s) + 2\,\gamma\, p*\right) \tag{29}$$

böylece olayı idare eden kanonik Denklemler (28) ve (29) elde edilmiştir.

Tek boyutlu konsolidasyon problemini çözmek için bir bilgisayar programı yazılmıştır. Bu çalışmada, Laplace uzayında elde edilen kanonik denklemler FORTRAN program diline dahil edilmiştir. Programa veri aktarımı için girdi dosyaları hazırlanmıştır.

Tez kapsamında 11 adet farklı zemin türü seçilmiş ve zemin türülerine ait özelliklerle ilgili veriler girilerek program bu dosyaları okumuş ve programda zamana bağlı 6 farklı yük tipi, denklemleri Laplace uzayına dönüştürüldükten sonra uygulanmıştır. Daha sonra bu çalışmada önerilen yöntemi uygulamak ve boşluk suyu aşırı basınç sonuçlarını elde etmek için sonuçlar ters Laplace dönüşümü kullanılarak zaman

uzayında aktarılmıştır. Programda tüm işlemler çift hassasiyetle gerçekleştirilir. Sonuçlar daha sonra Excel programına aktarılmıştır.

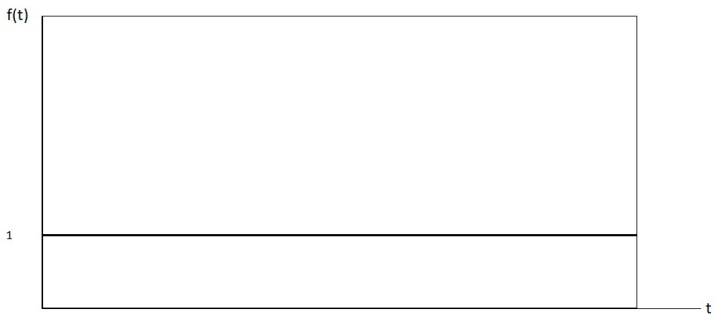
Tablolar ve şekiller her zemin türü için hazırlanıp, daha sonra detaylı olarak 3. bölümde gösterilecektir.

2.4 Zamanla Değişen Dış Yükler İçin Laplace Dönüşümleri

Bu çalışmada, farklı zemin türüne çeşitli tekrarlı yükler uygulanmıştır ve bunların zemin durumuna etkileri bu çalışmada önerilen yöntem kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Tekrarlı yük, çalışma kapsamında Laplace alanına dönüştürülmüş ve Fortran dili kullanılarak hazırlanan program içinde uygulanmıştır. Tüm türevler ve dönüşümler bu bölümde detaylı bir şekilde açıklanacaktır.

2.4.1 Sabit Yük q_1(t)

Şekil 12'de sabit tipi fonksiyon gösterilmiştir.



Şekil 12. Sabit fonksiyonu

$$q_1(\mathrm{t}) = -\,p\,* \tag{30}$$

Burada , $p\,*$ uygulanan gerilmeyi temsil etmektedir.

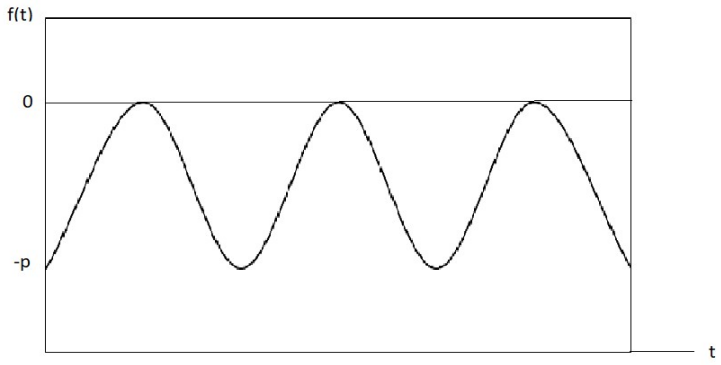
Denklemin (30) için Laplace dönüşümü (Spiegel, 1965);

$$\overline{q_1}(s) = \frac{1}{s} \tag{31}$$

şeklini alır. Burada s Laplace dönüşüm parametresini temsil etmektedir.

2.4.2 Kosinüs Dalga Tipi Periyodik Yük $q_2(t)$

Şekil 13'te kosinüs dalga fonksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 13. Kosinüs Dalga fonksiyonu

$$q_2(\mathrm{t}) = -\,p\,cos^2(\frac{\omega t}{2}) \tag{32}$$

Burada ω, kosinüs dalgasının açısal frekansını temsil etmektedir. Denklem (32) 'nin Laplace dönüşümü;

$$\overline{q_2}(s) = -p\,[\frac{1}{2s} + \frac{s}{2(s^2+\omega^2)}] \tag{33}$$

şeklinde almıştır. Burada $\omega = 2\,\pi\,f \;\; ve \;\; f = \frac{1}{T}$

$\omega = \frac{2\pi}{T}$, $T = a$ varsayarak ki;

$$\omega = \frac{2\pi}{a} \tag{34}$$

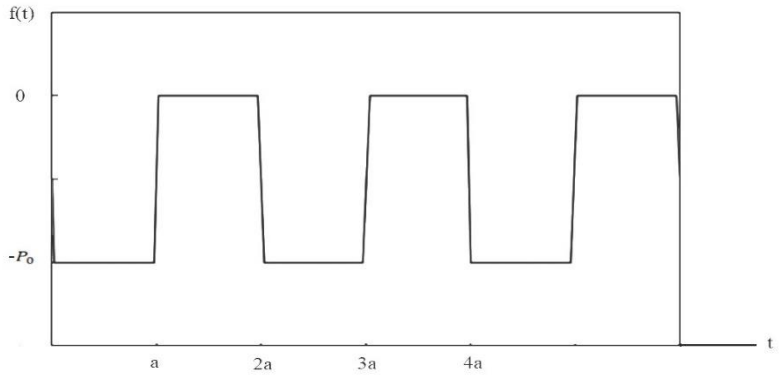
şeklinde ifade edilmektedir. Burada ; T = a: , dalganın periyodunu temsil eder, f: m/s cinsinden ölçülen hertz cinsinden frekanstır. Eşitlik (34) eşitlik (33)'te yerine yazıldığında ;

$$\overline{q_2}(s) = -\frac{p\,(2\pi^2 + a^2s^2)}{4\pi^2 s + a^2 s^3} \tag{35}$$

Laplace uzayında kosinüs dalga tipi periyodik yük formülü elde edilmiştir.

2.4.3 Kare Dalga Tipi Periyodik Yük q_3(t)

Şekil 14'te kare dalga fonksiyonu gösterilmiştir. P_0 darbenin Maksimum yüksekliği ile, darbe periyodu 2a 'e ve darbe genişliği a'ya eşittir.



Şekil 14. Kare dalga fonksiyonu

f(t) periyodik olan bir fonksiyon olduğunda Laplace dönüşümü;

$$\mathcal{L}[f(t)] = \frac{1}{1-e^{-SP}} \int_0^p e^{-St} f(t)\, dt \tag{36}$$

şeklini alır. Burada *p*, darbe periyodu 2a'ya eşittir.

$$\mathcal{L}[f(t)] = \frac{1}{1-e^{-2Sa}} \int_0^a e^{-St} (-P_0)\, dt \tag{37}$$

Denklem (37)'nin integrali alınırsa ;

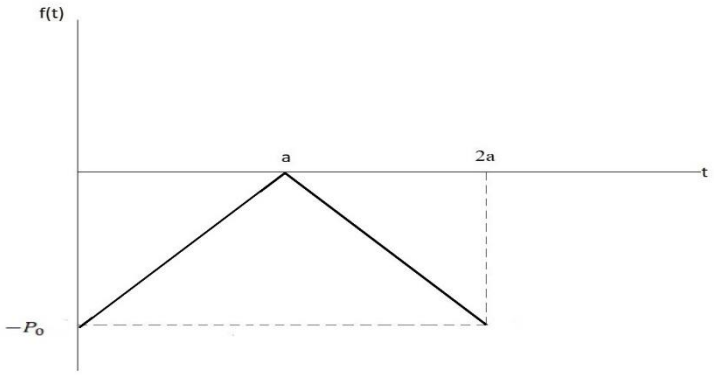
$$= \frac{-P_0}{(-S)(1-e^{-2as})} [e^{-st} - 1] \tag{38}$$

formu elde edilmiştir. Laplace uzayında kare dalga tipi periyodik yük formülü aşağıda verilmiştir:

$$\overline{q_3}(s) = \frac{-P_0\,(1-e^{-as})}{(S)(1-e^{-2as})} \tag{39}$$

2.4.4 Üçgen Dalga Tipi Periyodik Yük q_4(t)

Şekil 15'te üçgen dalga fonksiyonu gösterilmiştir. P_0 darbenin Maksimum yüksekliği ile, periyod genişliği 2a'ya eşittir.



Şekil 15. Üçgen dalga fonksiyonu

f(t) periyodik olan bir fonksiyon olduğunda Laplace dönüşümü elde etmek için Denklem (36) 'yı kullanılmıştir.

$$\mathcal{L}[f(t)] = \frac{1}{1-e^{-SP}} \int_0^p e^{-St}\, f(t)\, dt \tag{36}$$

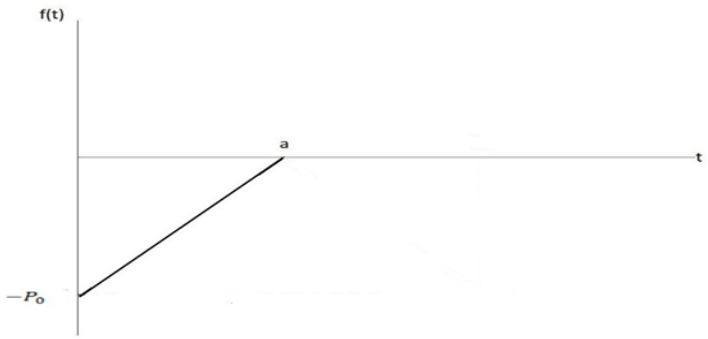
Burada P, darbe periyodu 2a'ya eşittir.

$$\mathcal{L}[f(t)] = \frac{1}{1-e^{-2Sa}} \int_0^{2a} e^{-St}\, f(t)\, dt \tag{40}$$

Denklem (40)'ın iki adıma bölünmesi aşağıdaki denklemi verilmiştir:

$$\mathcal{L}[f(t)] = \frac{1}{1-e^{-2Sa}} \left[\int_0^a e^{-St}\, F_1(t)\, dt + \int_a^{2a} e^{-St}\, F_2(t)\, dt\right] \tag{41}$$

Şekil 16'da gösterilen $F_1(t)$ fonksiyonunun denklemini bulmak için çözümü aşağıda detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 16. Üçgen dalga fonksiyonu $F_1(t)$

t_1= 0 olduğunda, $f_1(t)$= -P_0 (42)

t_2= a olduğunda, $f_2(t)$= 0 (43)

Çizgi için doğrunun eğimi denklemini kullanılarak;

$$M=\frac{f_2(t)-f_1(t)}{t_2-t_1}=\frac{P_0}{a} \quad (44)$$

ifadeyi elde edilmiştir. Düz çizgi denkleminin genel temsili

$$F(t)=m\,(t-t_1)+f_1(t) \quad (45)$$

şeklinde almaktadır. Eşitlik (42) ve (44) eşitlik (45)'te yerine yazıldığında,

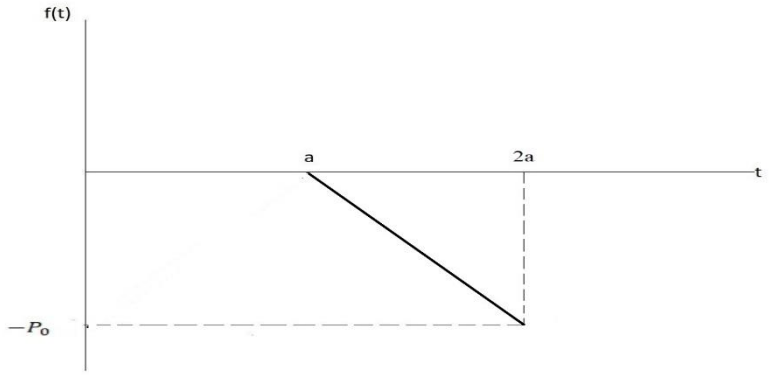
$$F_1(t)=\frac{P_0}{a}\,(t-0\,)-P_0 \quad (46)$$

Denklem (46)'i elde edilmiştir. Bu ifade (46) de düzenlenirse ,

$$F_1(t)=\ P_0\left(\frac{t}{a}-1\right) \quad (47)$$

denklemi verilmiştir.

Şekil 17’de gösterilen $F_2(t)$ fonksiyonunun denklemini bulmak için çözümü aşağıda detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 17. Üçgen dalga fonksiyonu $F_2(t)$

$$t_1 = \text{a olduğunda}, f_1(t) = 0 \tag{48}$$

$$t_2 = 2\text{a olduğunda}, f_2(t) = -P_0 \tag{49}$$

Çizgi için doğrunun eğimi denklemini kullanılarak;

$$\text{M} = \frac{f_2(t) - f_1(t)}{t_2 - t_1} = \frac{-P_0}{a} \tag{50}$$

ifadeyi elde edilir. Düz çizgi temsil eden genel Denklem (45) 'i kullanarak, eşitlik (48) ve (50) eşitlik (45) 'te yerine yazıldığında;

$$F_2(t) = \frac{-P_0}{a}\,(t - a\,) \tag{51}$$

Denklem (51) 'i elde edilmiştir. Denklem (47) ve (51) Denklem (41)'de yerine konularak ve integrasyon işlemi yapılarak çözüme gidilebilir:

$$\frac{P_0\,(-as + tanh\,(\frac{as}{2}))}{(as^2)} \tag{52}$$

Bilindiği gibi $tanh\,(\frac{as}{2}) = \frac{(e^{as}-1)}{(e^{as}+1)}$ olarak verilmektedir. Bu ifade Denklem (52)'de yerine yazıldığında ,

$$\overline{q_4}(s) = \left[\frac{-as + \frac{(e^{as}-1)}{(e^{as}+1)}}{(as^2)}\right] P_0 \tag{53}$$

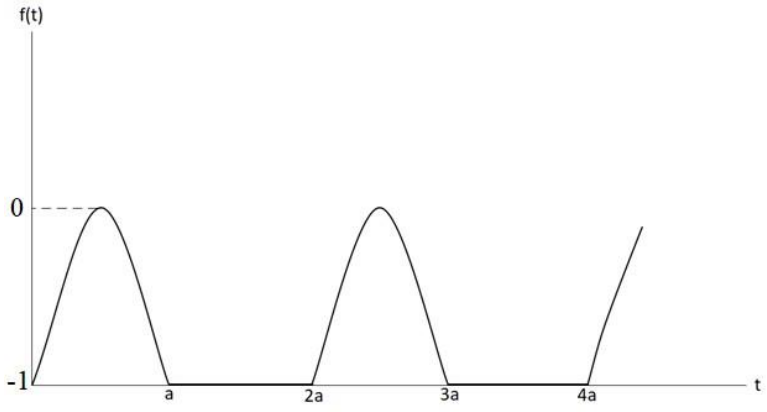
Laplace uzayında üçgen dalga tipi periyodik yük formülü elde edilmiştir.

2.4.5 Yarım Sinüs Dalga Tipi Periyodik Yük q_5(t)

Şekil 18'de yarım sinüs dalgalı fonksiyonu gösterilmiştir.1darbenin Maksimum yüksekliği ile, periyod genişliği 2a'ya eşittir.

$2a = 2\frac{\pi}{\omega} \quad \therefore a = \frac{\pi}{\omega}$

Burada ω dalganın açısal frekansını temsil eder.



Şekil 18. Yarım sinüs dalgalı fonksiyonu

f(t) periyodik olan bir fonksiyon olduğunda Laplace dönüşümü elde etmek için Denklem (36)'yı kullanılmış ve Denklem (54) elde edilmiştir.

$$\mathcal{L}[f(t)] = \frac{1}{1 - e^{-2S\frac{\pi}{\omega}}} \int_0^{2\frac{\pi}{\omega}} e^{-St}\, f(t)\, dt \tag{54}$$

$$= \frac{1}{1 - e^{-2S\frac{\pi}{\omega}}} \left[\int_0^{\frac{\pi}{\omega}} e^{-St}\, sinwt\ \ dt + \int_{\frac{\pi}{\omega}}^{2\frac{\pi}{\omega}} e^{-St}\, 0\ \ dt \right] \tag{55}$$

Genel formülü kullanarak;

$$\int_0^{\frac{\pi}{\omega}} e^{-St}\, sin\omega t\, dt = \left[\frac{e^{-St}}{s^2 + \omega^2} (-s.sin\omega t - \omega.cos\omega t) \right]_0^{\frac{\pi}{\omega}} \tag{56}$$

$$= \frac{e^{-S\frac{\pi}{\omega}}}{s^2 + \omega^2} [-s.sin\pi - \omega cos\pi] - \frac{e^0}{s^2 + \omega^2} [0 - \omega cos0] \tag{57}$$

$$= \frac{e^{-S\frac{\pi}{\omega}}}{s^2 + \omega^2} [\omega] + \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} = (1 + e^{-S\frac{\pi}{\omega}})(\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}) \tag{58}$$

$$= \frac{1}{\left(1 - e^{-2S\frac{\pi}{\omega}}\right)} \left[\left(\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right) \left(1 + e^{-S\frac{\pi}{\omega}} \right) \right] \tag{59}$$

$$= \frac{1}{\left(1 - e^{-S\frac{\pi}{\omega}}\right)\left(1 - e^{-S\frac{\pi}{\omega}}\right)} \left[\left(\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right) \left(1 + e^{-S\frac{\pi}{\omega}} \right) \right] \tag{60}$$

$$= \left[\frac{\omega}{(s^2+\omega^2)(1-e^{-s\frac{\pi}{\omega}})}\right] \quad (61)$$

Bilindiği gibi $a = \frac{\pi}{\omega} \quad \therefore \ \omega = \frac{\pi}{a}$ bu ifade Denklem (61)'de yerine yazıldığında ,

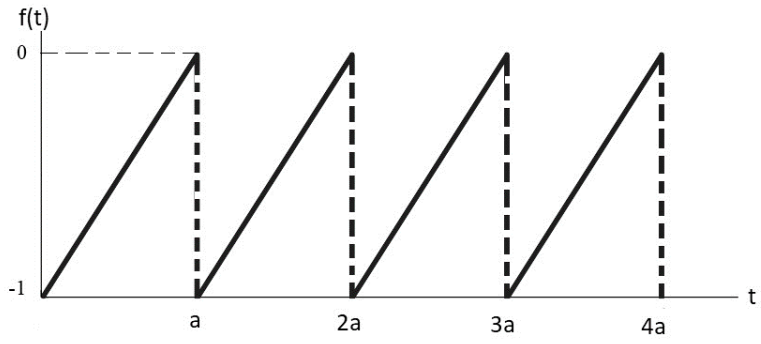
$$\left[\frac{\frac{\pi}{a}}{(s^2+\frac{\pi^2}{a^2})(1-e^{-sa})}\right] \quad (62)$$

denklemi elde edilmiştir.Laplace uzayında yarım sinüs dalga tipi periyodik yük formülü aşağıda verilmiştir:

$$\overline{q_5}(s) = \left[\frac{\pi a}{(a^2s^2+\pi^2)(1-e^{-as})}\right] \quad (63)$$

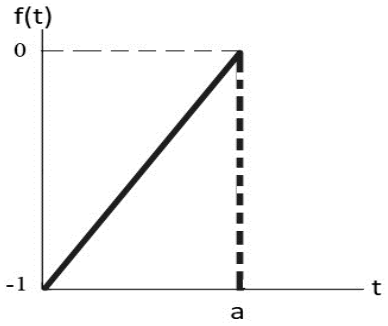
2.4.6 Testere Dişi Dalga Tipi Periyodik Yük q_6(t)

Şekil 19'da testere dişi dalga fonksiyonu gösterilmiştir. -1 darbenin Maksimum yüksekliği ile, periyod genişliği a'ya eşittir.



Şekil 19. Testere dişi dalga fonksiyonu

Şekil 20'de gösterilen $f(t)$ fonksiyonunun denklemini bulmak için nokta-eğim genel denklemi kullanılmış, çözümü aşağıda detaylı olarak verilmiştir. İlk döngü için t=a verilmiştir.



Şekil 20. Testere dişi dalga fonksiyonunun ilk periyodu

$$y\text{-}y_1 = \left(\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}\right)(x-x_1) \tag{64}$$

$$f(t) - 0 = \left(\frac{0+1}{a-0}\right)(t-0) \tag{65}$$

$$f(t) = \frac{1}{a}\, t \tag{66}$$

$$= \frac{1}{a}.\, t[u(t-0) - u(t-1)] = \frac{1}{a}[t \cdot u(t) - t \cdot u(t-1)] \tag{67}$$

$$= \frac{1}{a}[t \cdot u(t) - (t-1+1)u(t-1)] = \frac{1}{a}[t \cdot u(t) - (t-1)u(t-1) - u(t-1)] \tag{68}$$

$$= \frac{1}{a}t.u(t) - \frac{1}{a}(t-1)u(t-1) - \frac{1}{a}.u(t-1) \tag{69}$$

Denklem (69) için Laplace dönüşümü;

$$= \frac{1}{a}.\frac{1}{s^2} - \frac{1}{a}.\frac{1}{s^2}.e^{-st} - \frac{1}{a}.a.\frac{1}{s}.e^{-st} = \frac{1}{a}\left[\frac{1}{s^2} - \frac{e^{-st}}{s^2}\right] - \frac{1}{s}e^{-st}$$

$$= \frac{1}{a}\left[\frac{1-e^{-st}}{s^2}\right] - \frac{1}{s}e^{-st} \tag{70}$$

şeklini alır. Periyodik fonksiyonu elde etmek için aşağıdaki çözümden gidilebilmektedir.

$$f(s) = \frac{1}{1-e^{-st}} \cdot f(s) \tag{71}$$

$$= \frac{1}{1-e^{-sa}}\left[\frac{1}{a}\left(\frac{1-e^{-sa}}{s^2}\right) - \frac{1}{s}e^{-sa}\right] = \frac{1}{as^2} - \frac{e^{-as}}{s(1-e^{-as})}$$

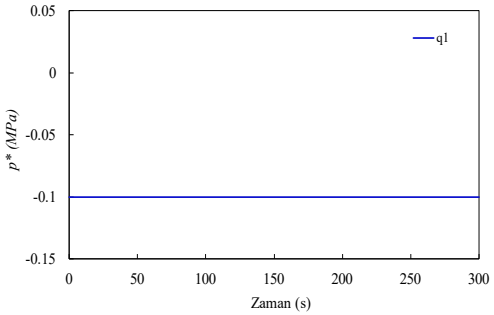
Laplace uzayında testere dişi dalga tipi periyodik yük formülü aşağıda verilmiştir:

$$\overline{q_6}(s) = \left[\frac{1}{(as^2)} - \frac{e^{-as}}{s(1-e^{-as})}\right] \tag{72}$$

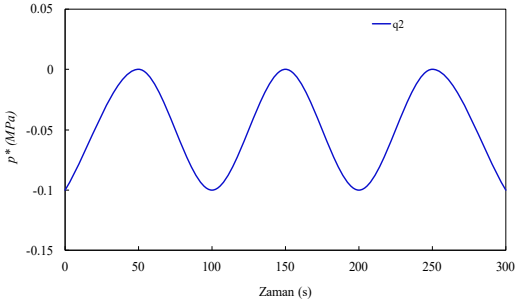
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, Şekil 21'de verilen sabit ve tekrarlı yüklemeye maruz kalan 11 adet farklı zemin türü için tek boyutlu konsolidasyon problemi ve bunun sonucunda ortaya çıkan fazla boşluk suyu basıncının zamanla değişimi ele alınmıştır. Denklemler Laplace uzayına dönüştürüldükten sonra bu zeminlerin davranışı zamana bağlı farklı yükler etkisi altında elde edilen sonuçlara göre incelenecektir. Bu çalışmada, on bir adet farklı zemin türü p_f 'nin sonuçlarını elde etmek, altı farklı zamana bağlı yük için Fortran dilinde bir programı hazırlanmıştır. Ayrıca, önerilen yöntemi doğrulama amacıyla bu çalışmadan elde edilen sonuçlar literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

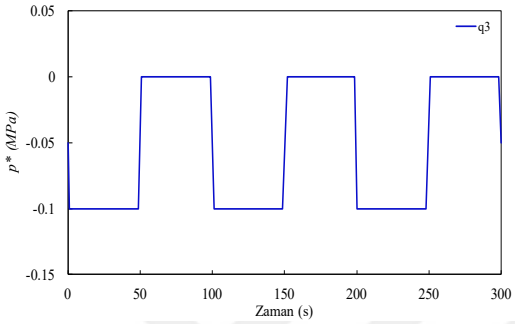
Bu araştırmada, zemin özelliklerinin konsolidasyon üzerine etkisi incelenmiş ve aynı zemine sabit ve beş tane farklı tekrarlı yük uygulayarak konsalidasyon araştırılmıştır. Zaman uzayında elde edilen boyutsuz fazla boşluk suyu basıncı p_f/p^* 'nin sonuçları grafik formunda sunulmuştur. Kum, lemli kum, kumlu lem, lem, silt lem, kumlu kil lem, kil lem, siltli kil lem, kumlu kil, siltli kil, kil zemin için sonuçları elde edilmiş ve karşılaştırmalar sunulmuştur.



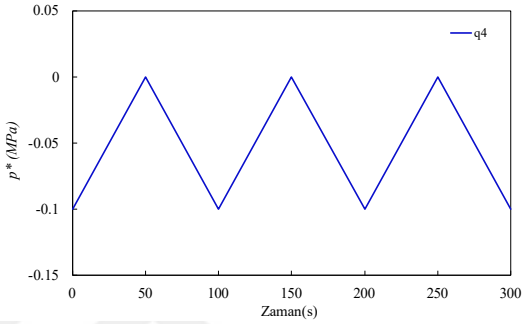
(a) q_1(t)



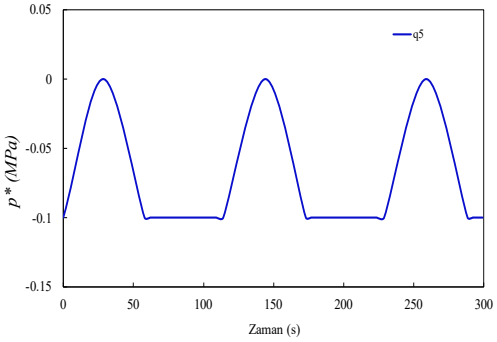
(b) q_2(t)



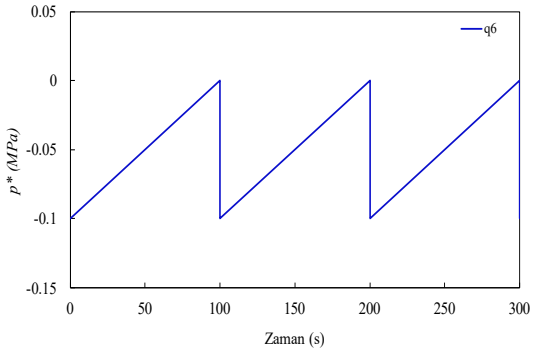
(c) q_3(t)



(ç) q_4(t)



(d) q_5(t)



(e) q_6(t)

Şekil 21. Ugulanan yükler, (a) Sabit yük, (b) Kosinüs dalga tipi periyodik yük, (c) Kare dalga tipi periyodik yük, (ç) Üçgen dalga tipi periyodik yük, (d) Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük ve (e) Testere dişi dalga tipi periyodik yük.

Bu çalışmada kullanılan zemin (katı) tanelerine ve suya ait hidrolik ve elastik parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Lo ve ark. (2014) (2016).

Tablo 2. Katı taneleri ve suyun hidrolik ve elastisite parametreleri

Katı fazın bulk modülü	$\boldsymbol{K_S}$ =35 GPa
Suyun bulk modülü	K_f =2.25 GPa
Suyun dinamik viskozite katsayısı	η =0.001 Ns/m^2
Uygulanan basınç gerilimi	p* = 0 . 1 MPa
Zemin örneğinin yüksekliği	H=1m

Bu çalışmada, kullanılan porozite ∅, gözenekli ortamda zeminin bulk modülü K_b, kayma modülü G ve geçirimlilik katsayısı k_s gibi sayısal hesaplamalar için gerekli parametreler Tablo 3'te sunulmuştur [(Rawls ve ark.(1992), Lo ve ark. (2007)].

Tablo 3. Farklı zemin türleri için mekanik özellikler

Zemin türü	Porozite ∅	Zeminin bulk modülü K_b (Mpa)	Kayma modülü G (Mpa)	Geçirimlilik katsayısı k_s (m^2)
Kum	0.437	35.3	13.3	5.946×10^{-12}
Lemli kum	0.437	29.9	11.3	1.730×10^{-12}
Kumlu lem	0.453	25.4	9.3	7.334×10^{-13}
Lem	0.463	17.6	6.3	3.738×10^{-13}
Silt Lem	0.501	16.2	5.5	1.925×10^{-13}
Kumlu Kil Lem	0.398	23.8	9.1	1.218×10^{-13}
Kil Lem	0.464	13.7	5.7	6.513×10^{-14}
Siltli Kil Lem	0.471	12.3	4.3	4.247×10^{-14}
Kumlu Kil	0.430	20.7	8.0	3.398×10^{-14}
Siltli Kil	0.479	11.5	4.1	2.548×10^{-14}
Kil	0.475	4.5	2.4	1.699×10^{-14}

Bu tezin parametrik çalışmaları için $M, \alpha, , \gamma$ ve c_v değerleri Tablo 2, Tablo 3'teki mevcut veriler ve denklem (6-9)'i kullanılarak heaplanmıştır ve Tablo 4'te listelenmiştir.

Tablo 4. Farklı zemin türleri için M,α,γ ve c_v değerleri

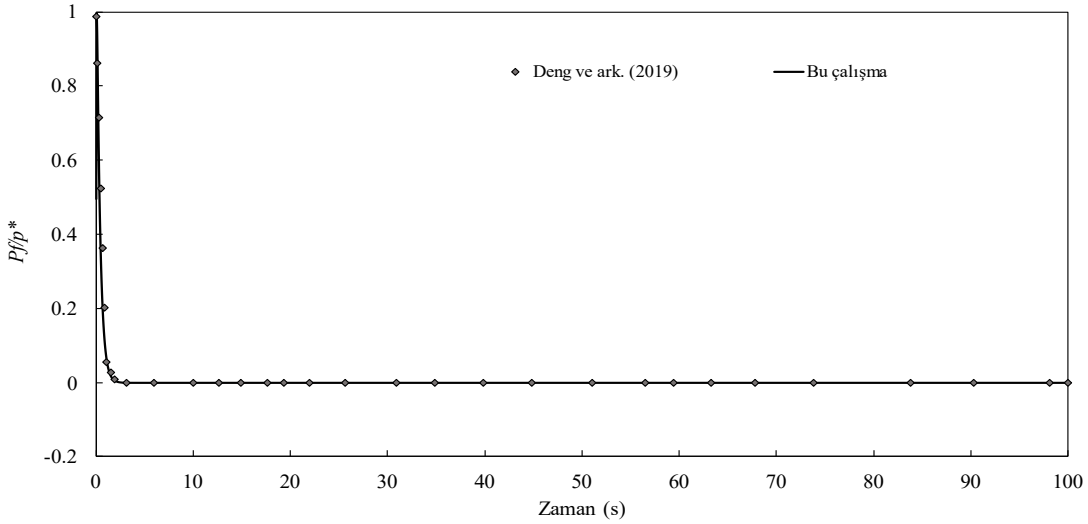
Zemin türü	Biot'un gözeneklilik katsayısı M (Pa)	Biot-willis katsayısı α	yük verimi γ	Konsolidasyon katsayısı $\boldsymbol{c_v}$ $\boldsymbol{(m^2/s)}$
Kum	4.76×10^{9}	0.998991429	0.989947587	3.12×10^{-1}
Lemli kum	4.76×10^{9}	0.999145714	0.991463943	7.72×10^{-2}
Kumlu lem	4.61×10^{9}	0.999274286	0.992574927	2.75×10^{-2}
Lem	4.52×10^{9}	0.999497143	0.994778608	9.67×10^{-3}
Silt lem	4.22×10^{9}	0.999537143	0.99491101	4.51×10^{-3}
Kumlu Kil Lem	5.15×10^{9}	0.99932	0.993741113	4.35×10^{-3}
Kil Lem	4.51×10^{9}	0.999608571	0.99568975	1.38×10^{-3}
Siltli Kil Lem	4.46×10^{9}	0.999648571	0.996316268	7.63×10^{-4}
Kumlu Kil	4.82×10^{9}	0.999408571	0.99411757	1.06×10^{-3}
Siltli Kil	4.39×10^{9}	0.999671429	0.996475352	4.31×10^{-4}
Kil	4.42×10^{9}	0.999871429	0.998389917	1.31×10^{-4}

3.1 Önerilen Yaklaşımın Doğrulanması

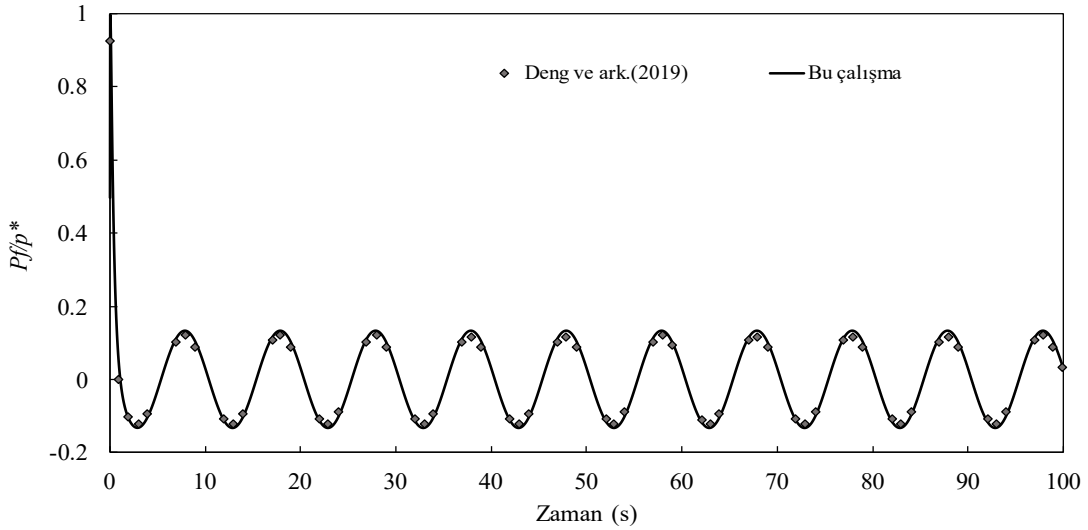
Bu kısımda, önerilen yöntemle elde edilen boyutsuz fazla boşluk suyu basıncı p_f/p^* sonuçları ile Deng ve ark. (2019) tarafından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma tekrarlı yükleme etkisi altında kum ve kil zemin türleri için yapılmıştır.

3.1.1 Tekrarlı Yüklemeye Maruz Kalan Kumlu Zeminler İçin Karşılaştırma

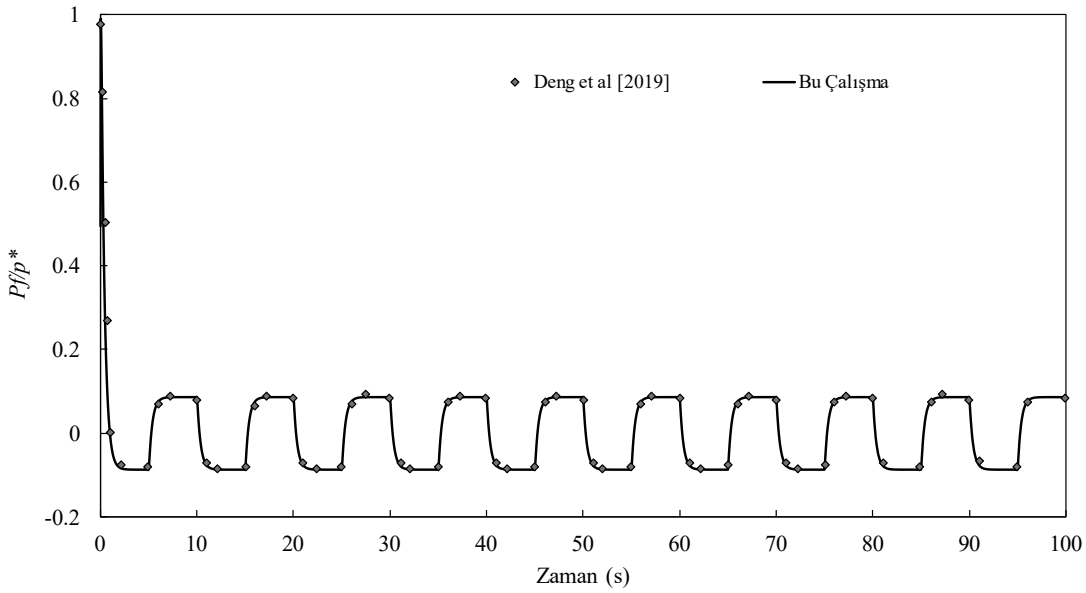
Bu çalışmada, üç tip tekrarlı yüklemeye maruz kalan kumlu zeminler için elde edilen p_f/p^*'nin sonuçları Deng ve ark.(2019) tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tekrarlı yüklemeye maruz kalan bu tür kumlu zemin için karşılaştırma sonuçları, sabit tipi yük için Şekil 22'de, kosinüs dalga tipi periyodik yük için Şekil 23'te ve üçgen dalga tipi periyodik yük için Şekil 24'te gösterilmiştir.



Şekil 22. Kumlu zemin türü için sabit yük durumunda p_f/p^*'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması



Şekil 23. Kumlu zemin türü için kosinüs dalga tipi periyodik yük durumunda p_f/p^*'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması



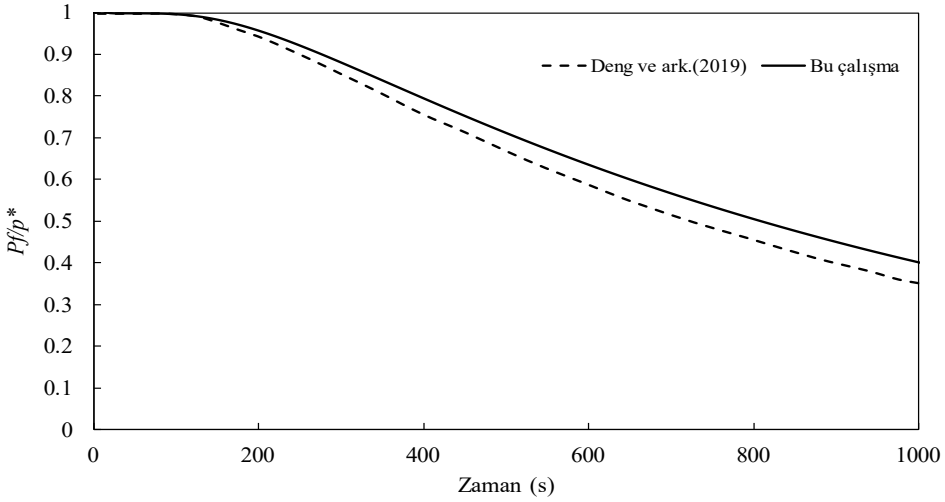
Şekil 24. Kumlu zemin türü için üçgen dalga tipi periyodik yük durumunda p_f/p^*'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması

Şekil 22 incelendiğinde, bu çalışmada elde edilen p_f/p^* sonuçların ile Deng ve ark.(2019) tarafından elde edilen sonuçların üst üste çakıştığı görülmektedir. Ancak Şekiller (23-24) incelendiğinde, sonuçların birbirine uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

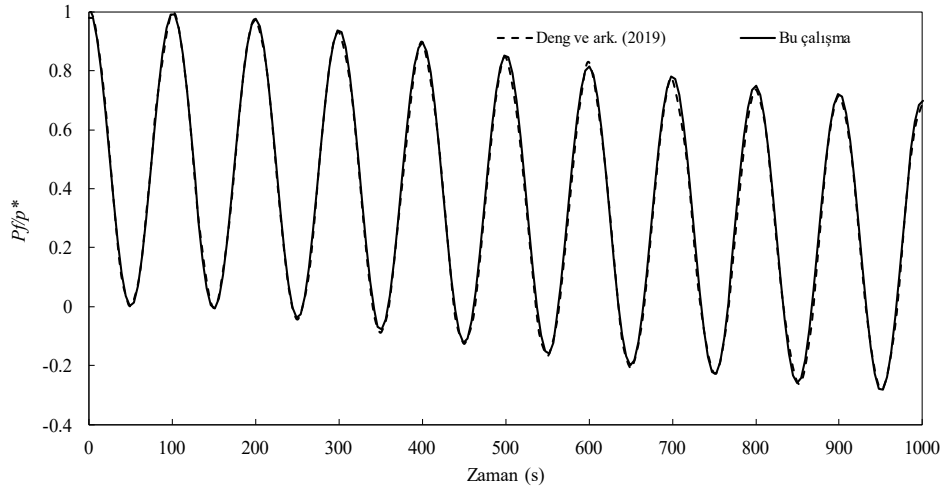
3.1.2 Tekrarlı Yüklemeye Maruz Kalan Killi Zeminler İçin Karşılaştırma

Bu çalışmada, dört tip tekrarlı yüklemeye maruz kalan killi zeminler için elde edilen p_f/p^*'nin zamanla sonuçları Deng ve ark.(2019) tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sabit ve Tekrarlı yüklemeye maruz kalan killi zemin türü için karşılaştırma sonuçları, sabit tip yük için şekil 25'te, kosinüs dalga tipi periyodik yük için şekil 26'da kare dalga tipi periyodik yük için şekil 27'de ve üçgen dalga tipi periyodik yük için şekil 28'de gösterilmiştir.

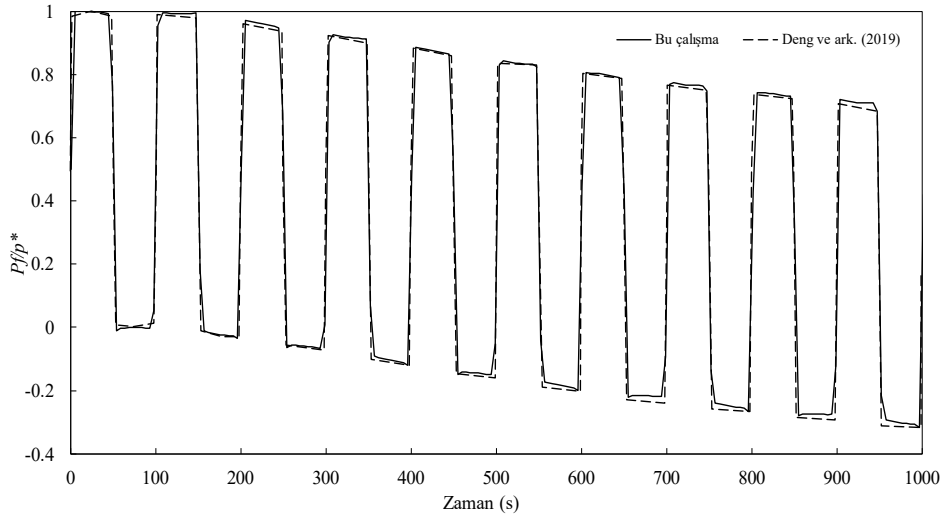
.



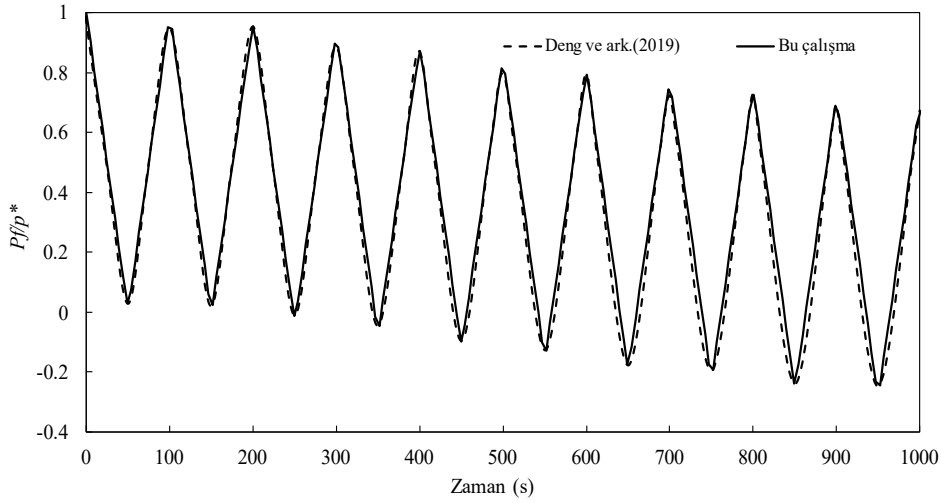
Şekil 25. Killi zemin türü için sabit yük durumunda p_f/p^*'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması



Şekil 26. Killi zemin türü için kosinüs dalga tipi periyodik yük durumunda p_f/p^*'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması



Şekil 27. Killi zemin türü için kare dalga tipi periyodik yük durumunda p_f/p^*'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması



Şekil 28. Killi zemin türü için üçgen dalga tipi periyodik yük durumunda p_f/p^*'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması

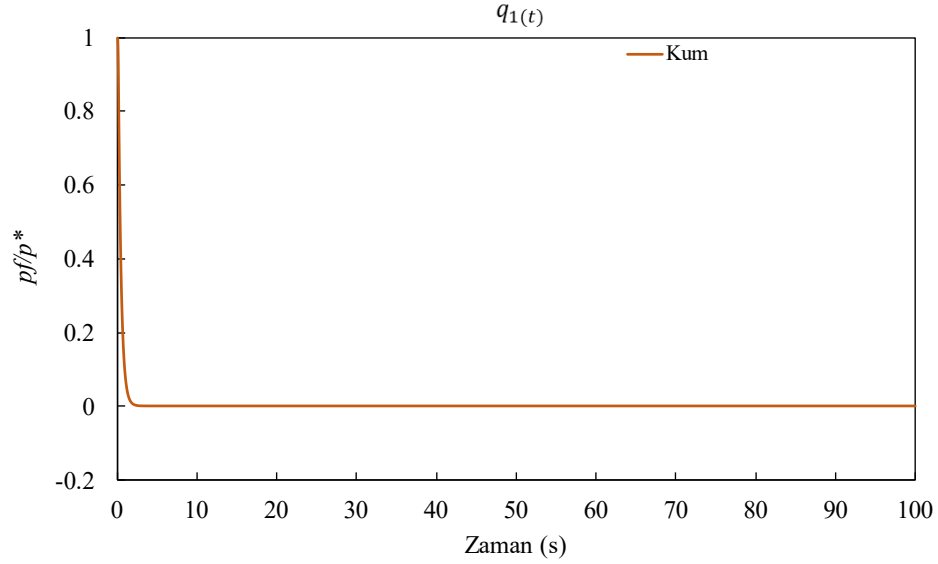
Yukarıda verilen Şekil 25 incelendiğinde, bu çalışmada elde edilen p_f/p^* sonuçların ile Deng ve ark.(2019) tarafından elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ancak, Şekiller (26-28) incelendiğinde, bu çalışmada p_f/p^* için elde edilen sonuçların literatür ile üst üste çakıştığı görülmektedir.

3.2 Zemin Özelliklerinin Tek Boyutlu Konsolidasyon Üzerine Etkisinin Araştırılması

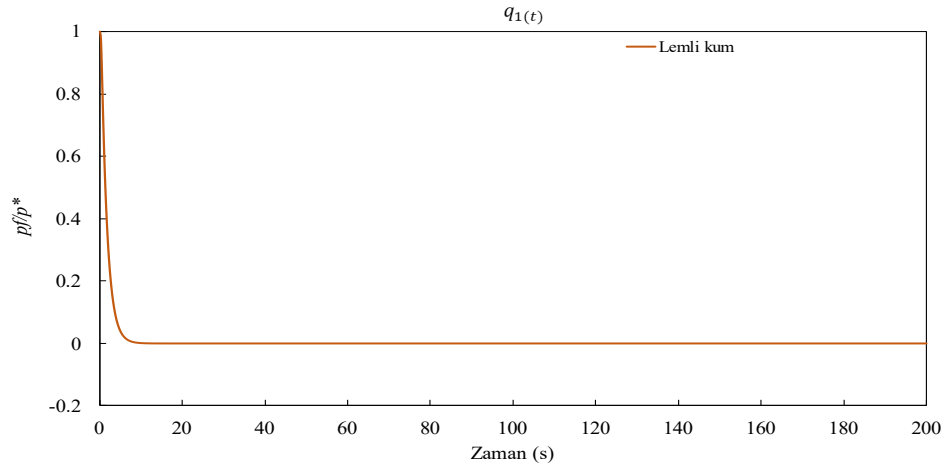
Sabit ve tekrarlı yükleme durum için olayı idare eden kanonik 28 ve 29 denklemler bu çalışmada hazırlanan program ile Laplace uzayında çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar ters Laplace dönüşümü ile zaman uzayına dönüştürülmüştür. Zaman uzayında elde edilen p_f/p *'nin sonuçları sunulmuştur. Bu bölümde Tablo 2 de verilen 11 adet farklı zemin türü için elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

3.2.1 Sabit Yük q_1(t) Durumu

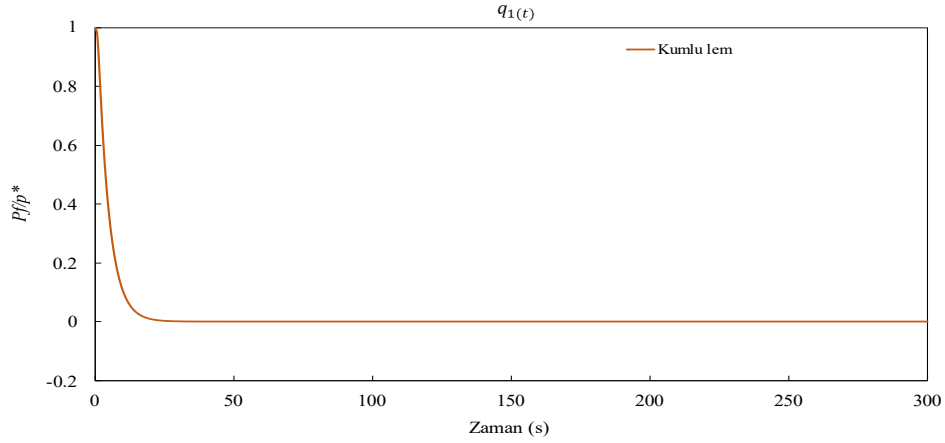
q_1(t) yükleme durum için elde edilen p_f/p* değerlerinin sonuçları Şekil (29-39)'de sunulmuştur.



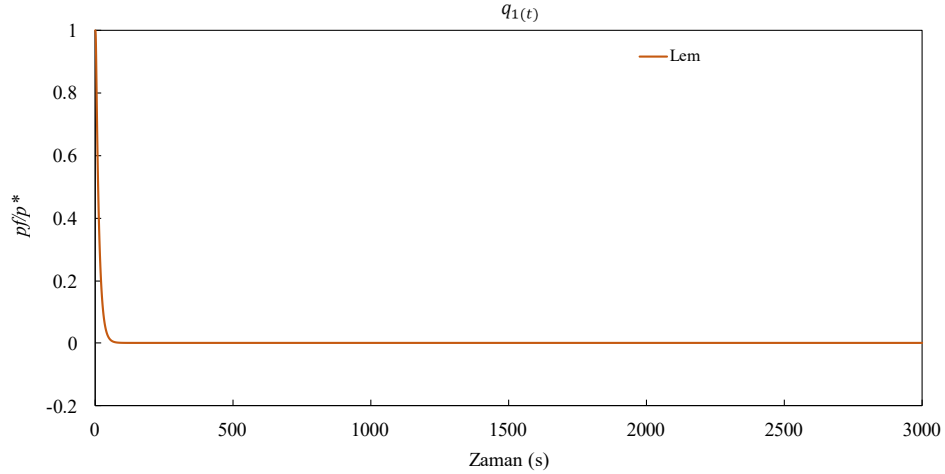
Şekil 29. Sabit yük q_1(t) için kumlu zemin için p_f/p* değerlerinin zamanla değişimi



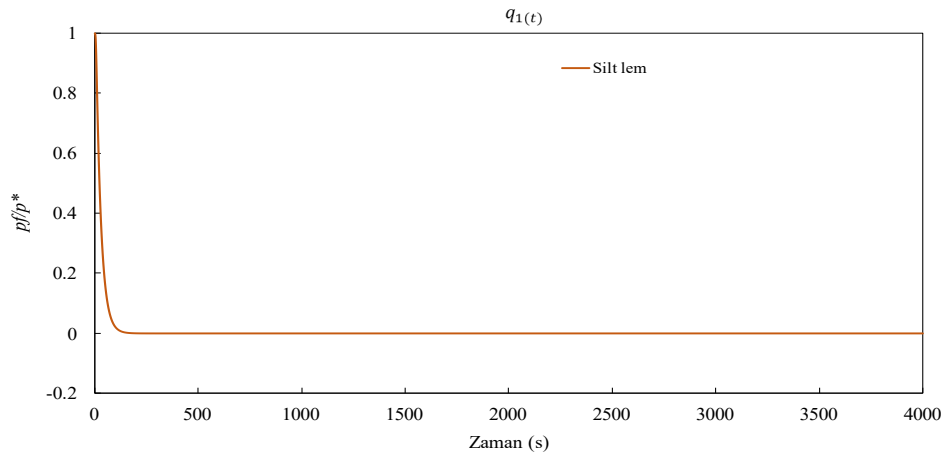
Şekil 30. Sabit yük q_1(t) için lemli kum zemin için p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



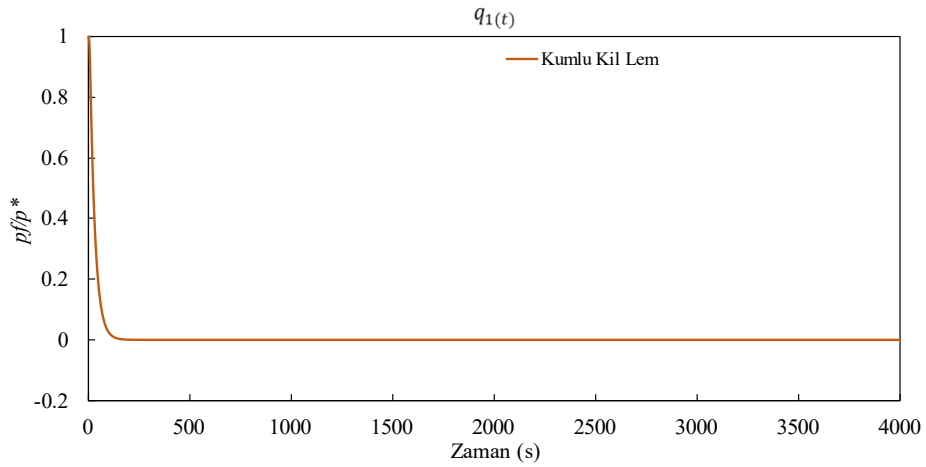
Şekil 31. Sabit yük q_1(t) için kumlu lem zemin için p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



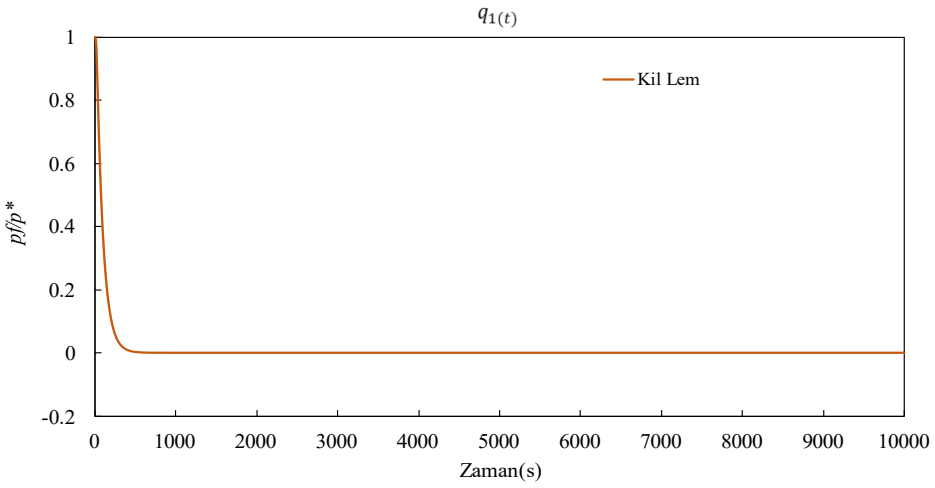
Şekil 32. Sabit yük q_1(t) için lem zemin için p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



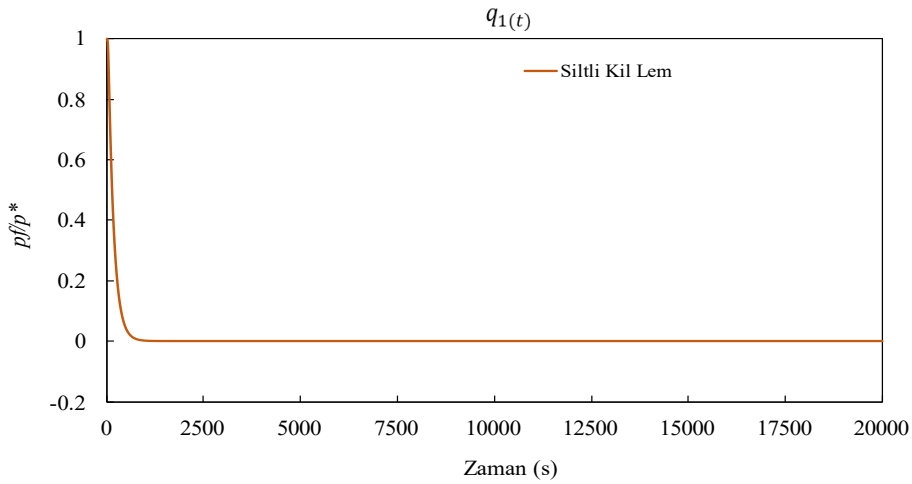
Şekil 33. Sabit yük q_1(t) için silt lem zemin için p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



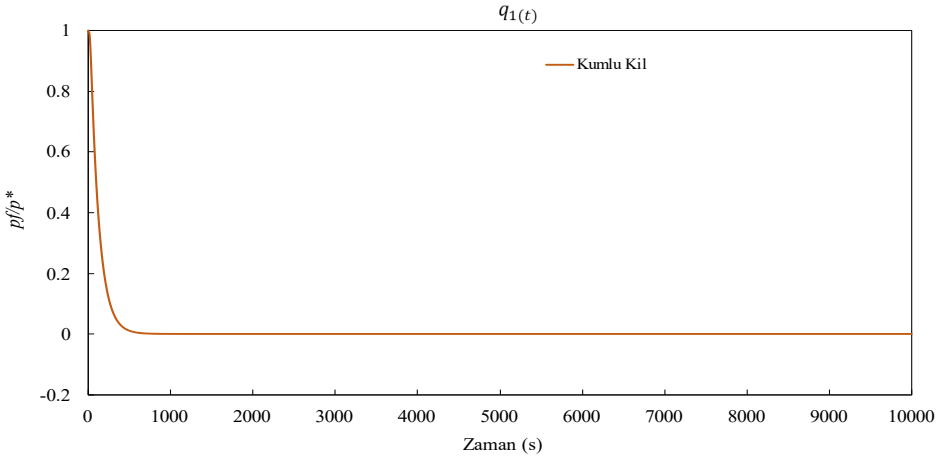
Şekil 34. Sabit yük q_1(t) için kumlu kil lem zemin için p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



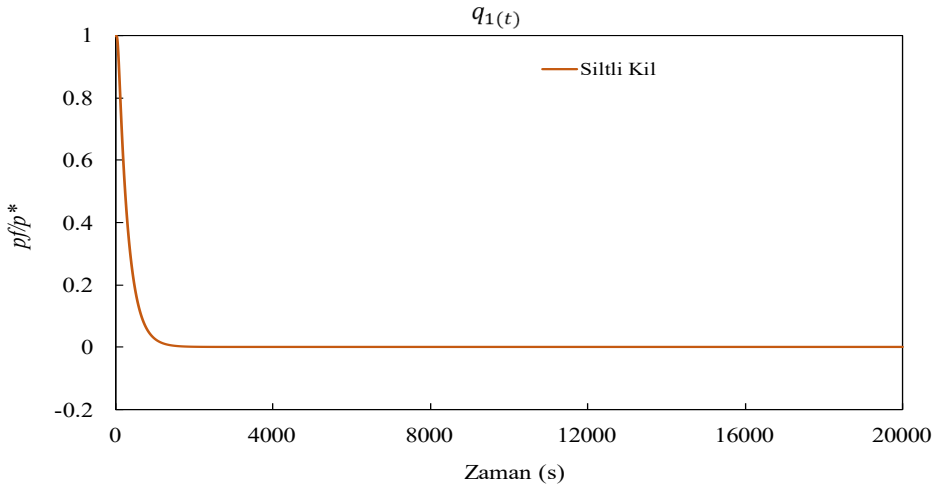
Şekil 35. Sabit yük q_1(t) için kil lem zemin için p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



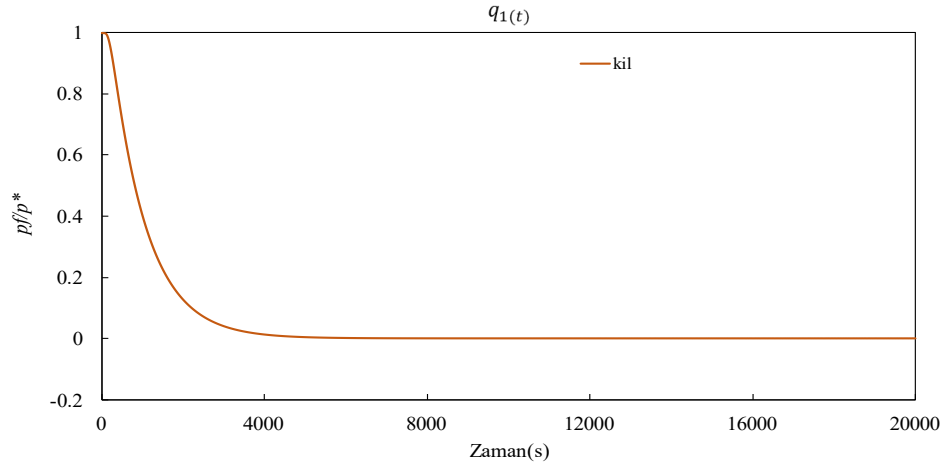
Şekil 36. Sabit yük q_1(t) için siltli kill lem zemin için p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 37. Sabit yük q_1(t) için kumlu kil zemin için p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

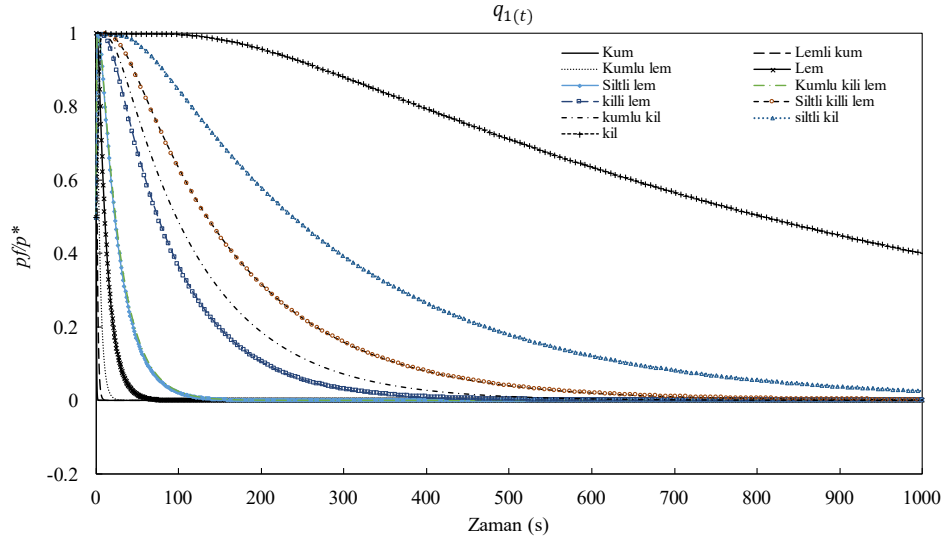


Şekil 38. Sabit yük q_1(t) için siltli kil zemin için p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 39. Sabit yük q_1(t) için kil zemin için p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

Sabit Tipi yükün q_1(t) uygulanmasının sonuçları tüm zemin sınıfları için, p_f/p^* değerlerinin Şekil 40'ta karşılaştırılmıştır.

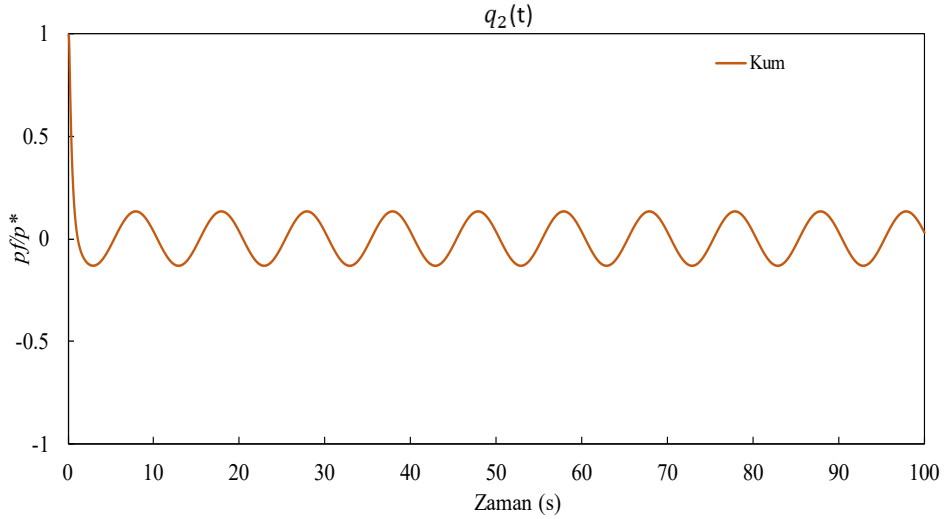


Şekil 40. Sabit yük q_1(t) için p_f/p^* değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması

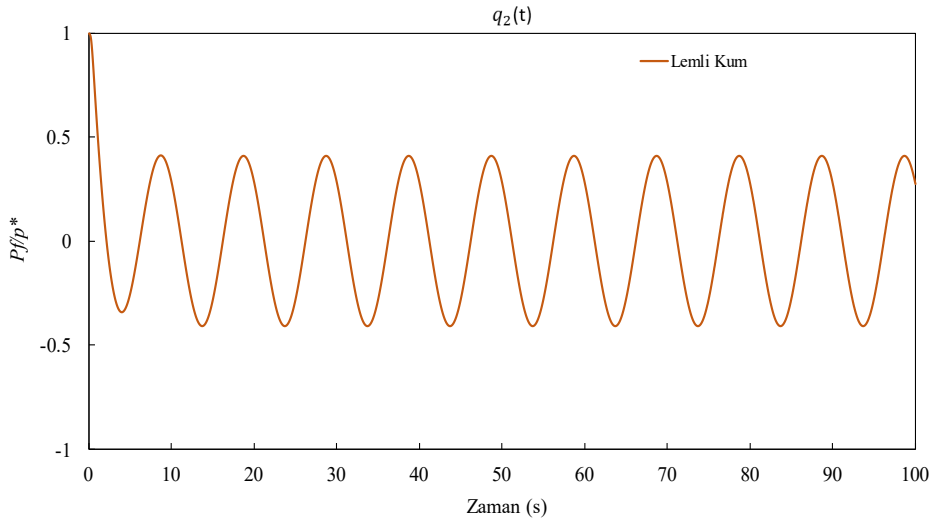
Şekil 40'tan görüldüğü gibi farklı zemin türlerinde p_f/p^* değerinin zamanla giderek azaldığı tespit edilmiştir. Kumlu zeminin geçirgenliği yüksek olduğundan p_f/p^* diğerinin zemin türlerine göre daha hızlı dağılır. Buna karşılık, killi zeminlerin geçirgenliği düşük olduğundan, p_f/p^* 'nin dağılması diğer zeminlere göre daha uzun sürer, bu da bu olgunun nispeten daha uzun bir sürede meydana geldiği anlamına gelmektedir.

3.2.2 Kosinüs Dalga Tipi Periyodik Yük $q_2(t)$ Durumu

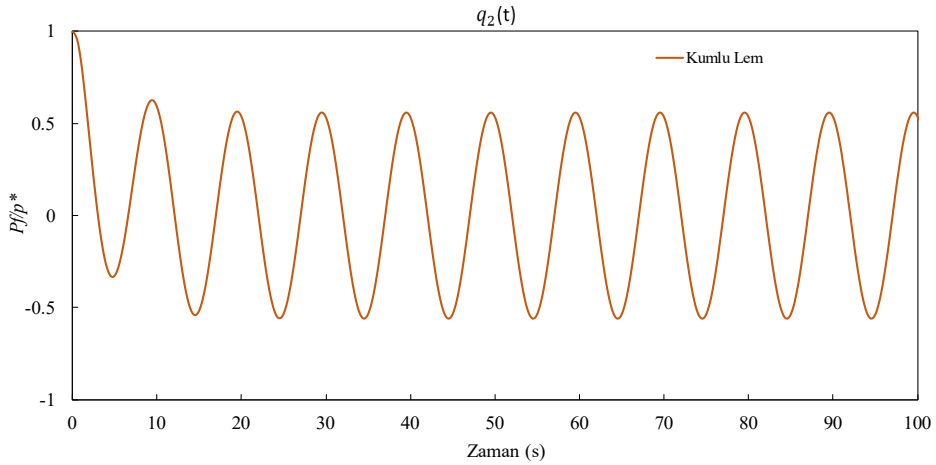
q_2(t) yükleme durum için zaman uzayında elde edilen p_f/p^*'nin sonuçları, ele alınan farklı zemin sınıfları için Şekil (41-51) arasında grafik formunda sunulmuştur.



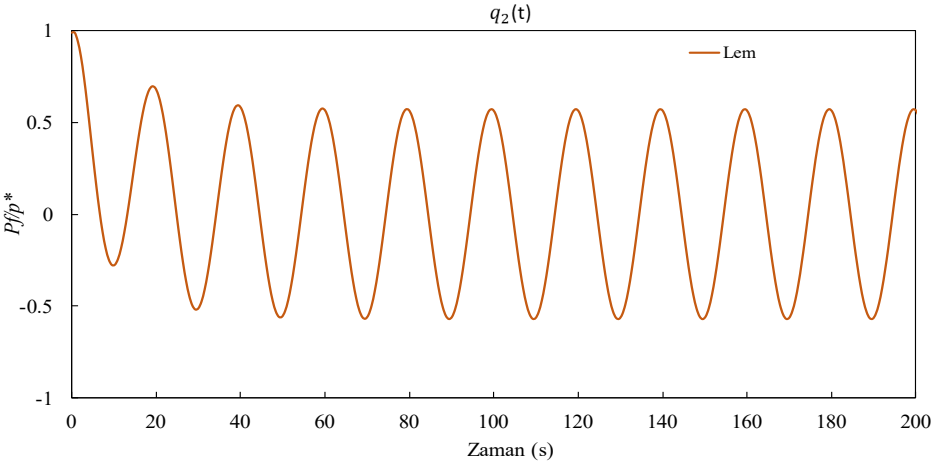
Şekil 41. Kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) için kumlu zemine ait p_f/p^*değerlerinin zamanla değişimi



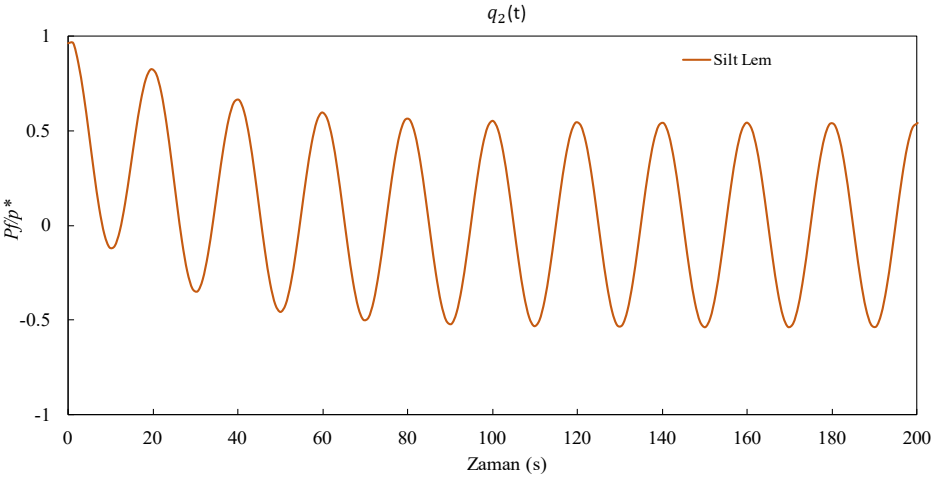
Şekil 42 Kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) için lemli kum zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



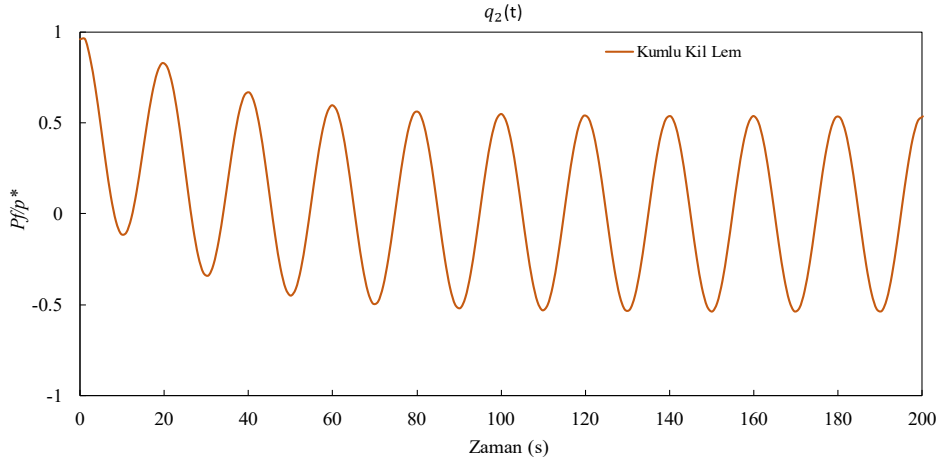
Şekil 43. Kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) için kumlu lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



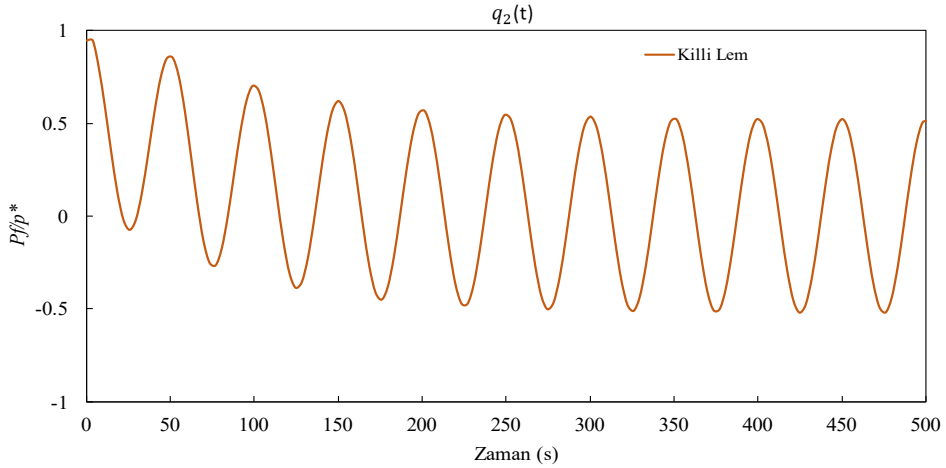
Şekil 44. Kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) için lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



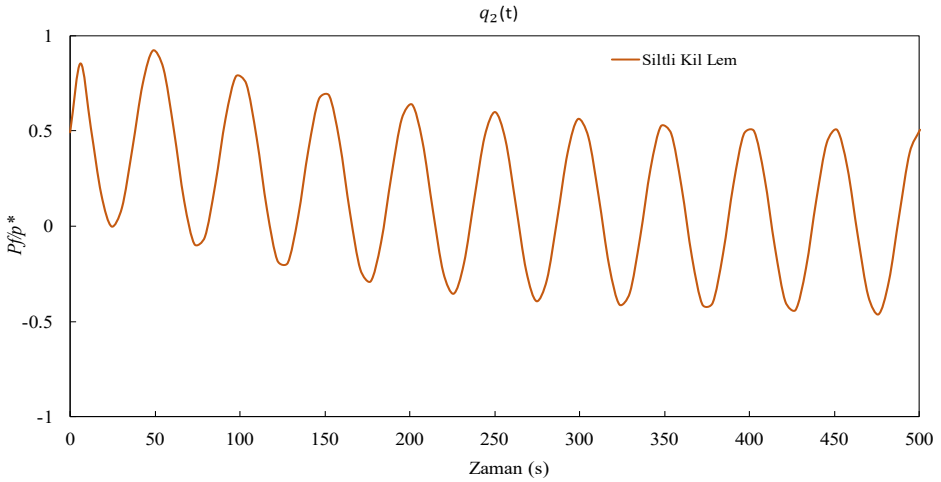
Şekil 45. Kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) için silt lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



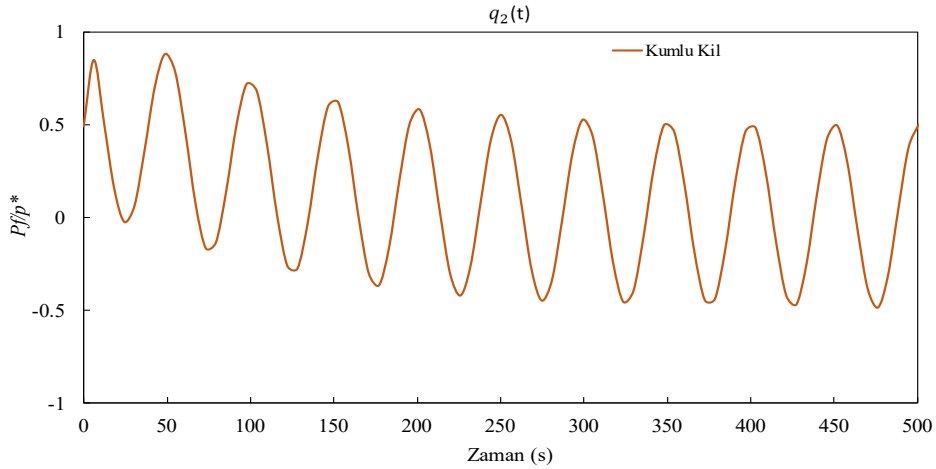
Şekil 46. Kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) için kumlu kil lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



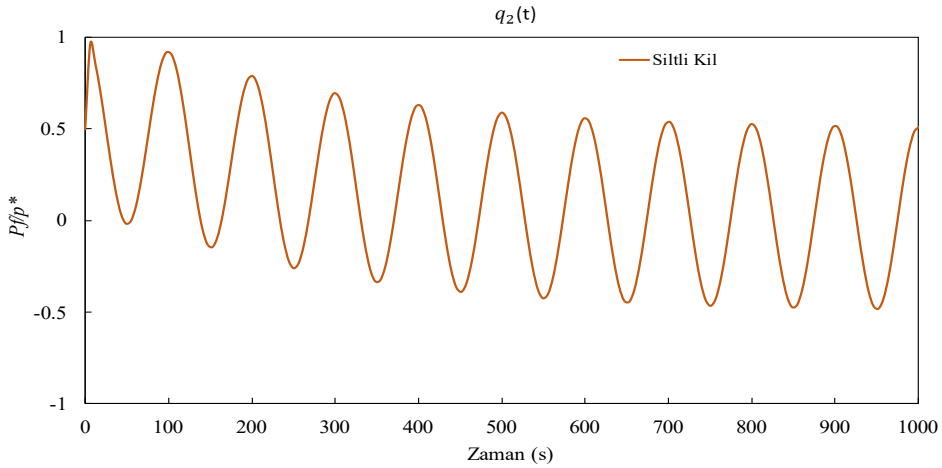
Şekil 47. Kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) için killi lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



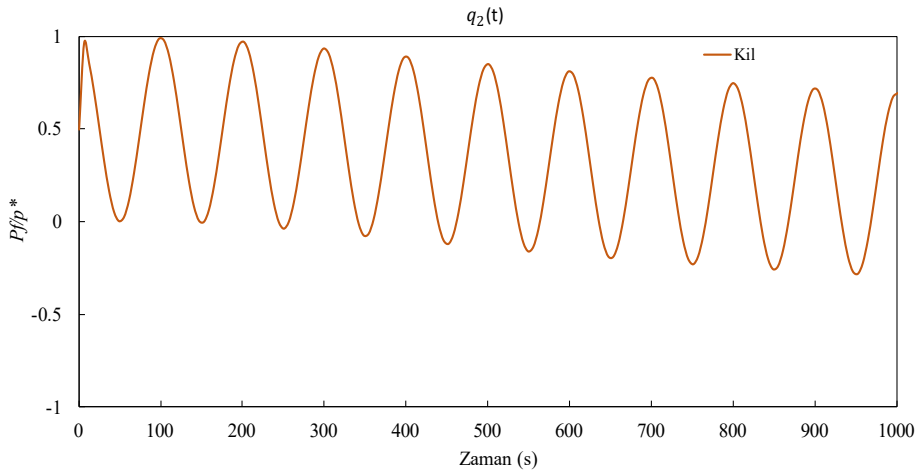
Şekil 48. Kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) için siltli kil lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 49. Kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) için kumlu kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

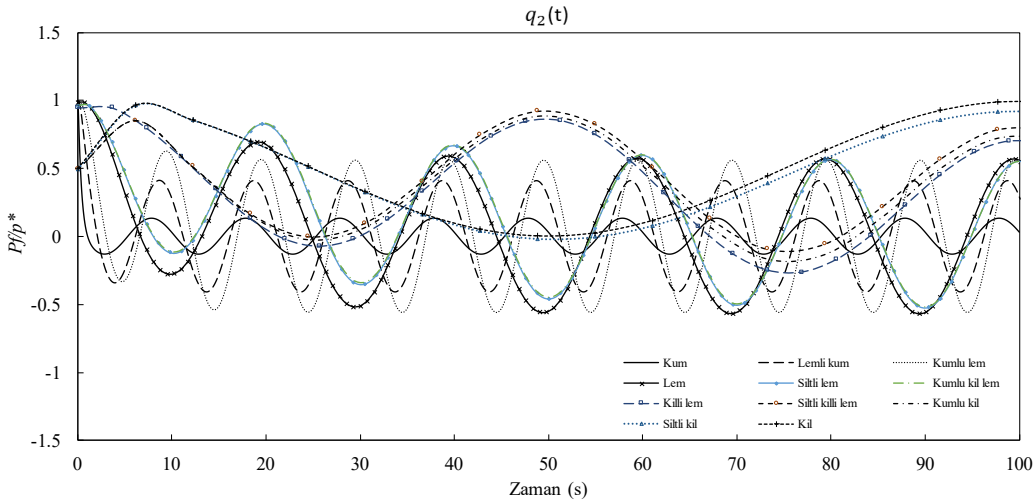


Şekil 50. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q_2(t)$ için siltli kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



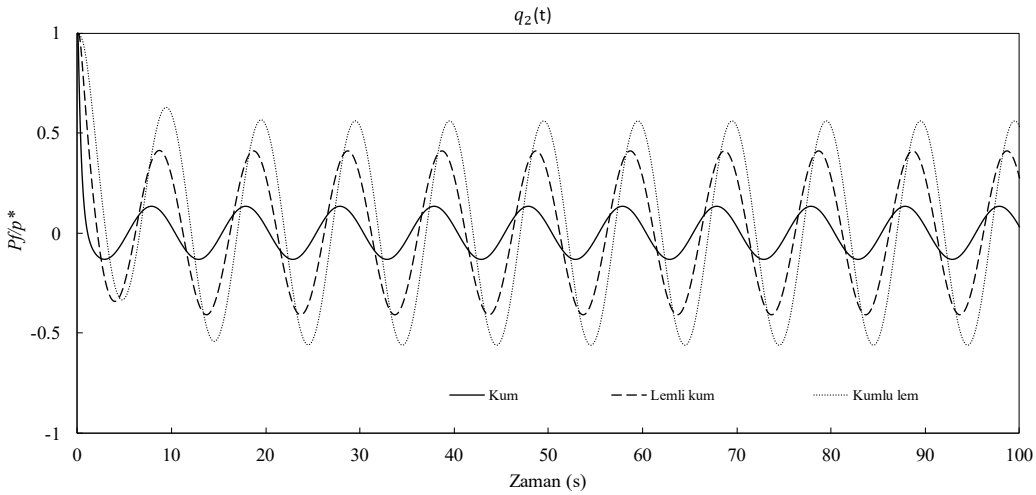
Şekil 51. Kosinüs dalga tipi periyodik yük $q_2(t)$ için kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

q_2(t) tipi yük durumu için elde edilen sonuçlar ele alınan farklı zemin türleri için şekil 52'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 52. Kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) için 11 farklı tipi zemin özelliklerine bağlı p_f/p*değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması

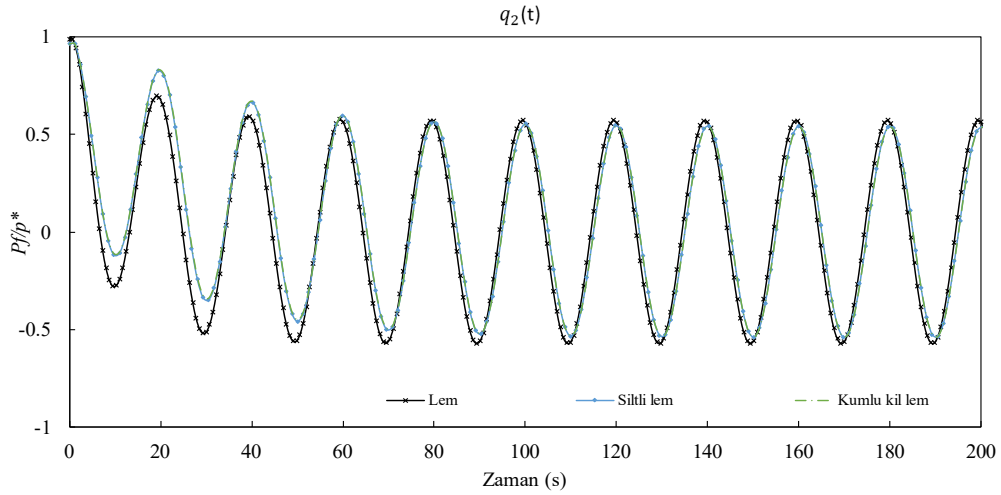
Kosinüs dalga tipi periyodik yük için daha detaylı bir karşılaştırma yapabilmek ve daha net yorum yapabilmek amacıyla şekil (53-56)'da sunulmuştur.



Şekil 53. Kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) için kum, lemli kum, kumlu lem zeminlere ait p_f/p*değerlerinin zamanla değişimi

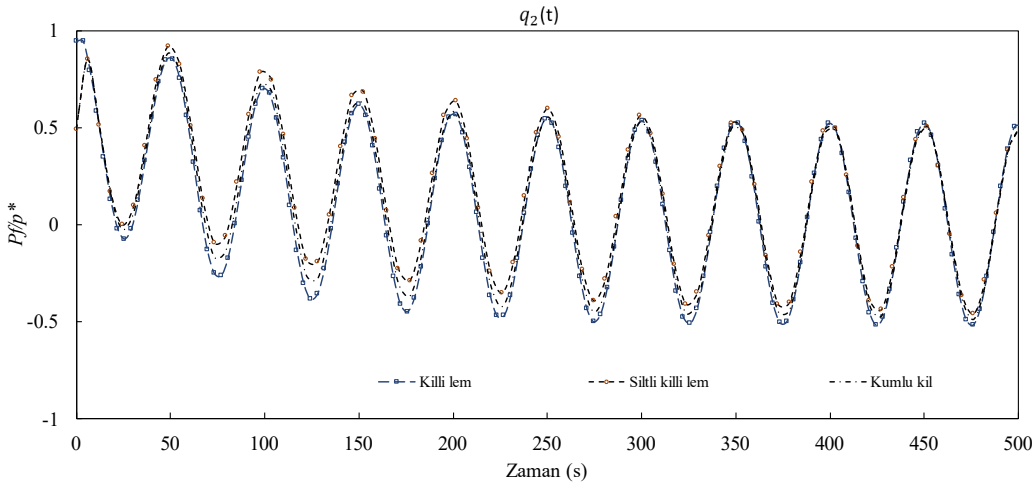
Şekil 53'te görüldüğü gibi, kosinüs dalga tipi q_2(t) yükün etkisinde kum, lemli kum, kumlu lem zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olmadığı görülmüştür. Kumlu lem zemine ait p_f/p* değerleri diğer zeminlere göre daha büyük olduğu

görülmüştür. Bunun nedeni yükleme verimliliği, kumlu lem için 0,992 , lemli kum için 0.991 ve kumlu zemin için 0,989 değerini almaktadır. Ayrıca p_f/p^* salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.



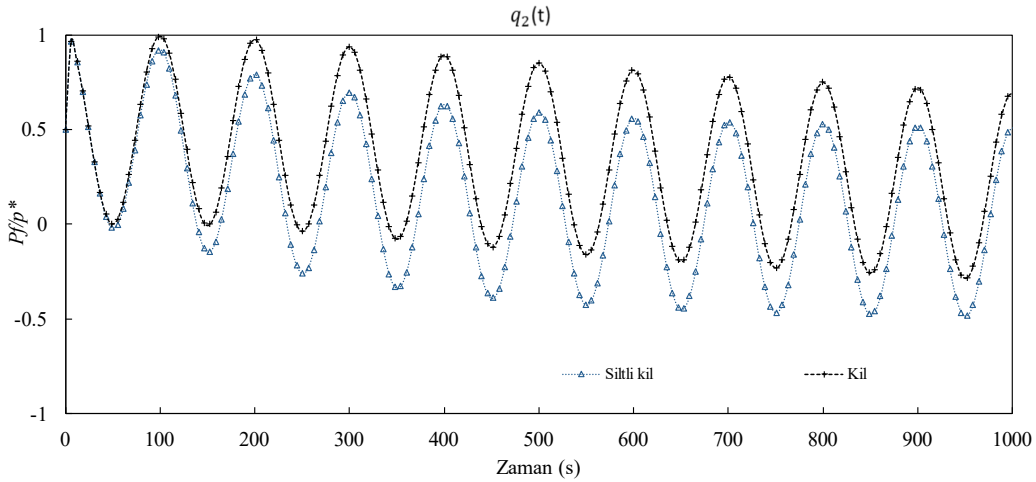
Şekil 54. Kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) için lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminlere ait p_f/p^*değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 54 incelendiğinde, kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) etkisi altında lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminler karşılaştırıldığında periyotlar eşit olduğu görülmüştür. Siltli lem ve kumlu kil leme ait genlik değerleri zamanla birbiri ile örtüşmüştür. Ancak lem zemine ait genlik değerleri başlangıçta diğer zeminlerden sapmakta, daha sonra diğer zeminlere yaklaşmaktadır. Ayrıca p_f/p^* salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.



Şekil 55. Kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) için killi lem, siltli killi lem, kumlu kil zeminlere ait p_f/p^*değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 55'te görüldüğü gibi, kosinüs dalga tipi periyodik q_2(t) yükün etkisi altında killi lem, siltli killi lem, kumlu kil zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olduğu görülmüştür. Genlik değerleri zamanla birbirlerine yaklaşmaktadır. Killi lem grafiğine ait sarma eğrisini zamanla daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.

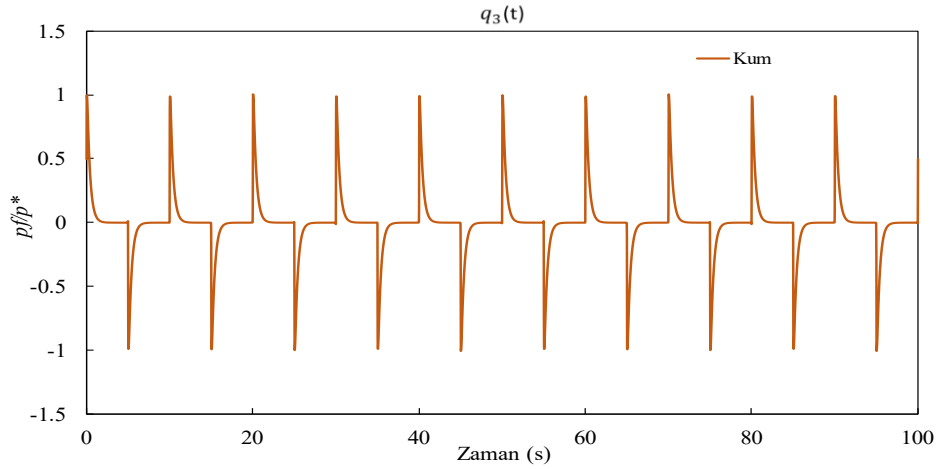


Şekil 56. Kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t) için siltli kil, kil zeminlere ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

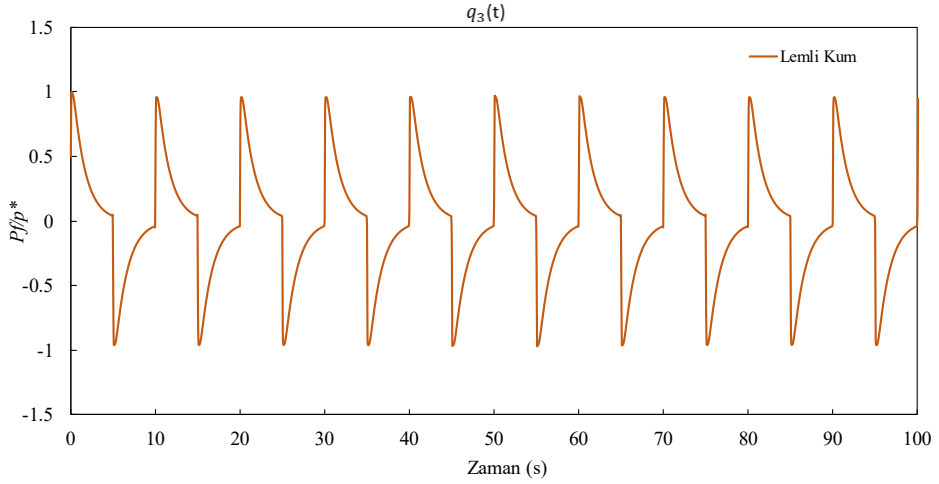
Şekil 56 incelendiğinde, Kosinüs dalga tipi periyodik q_2(t) yükün etkisinden siltli kil ve kil zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olduğu görülmüştür. Genlik değerleri zamanla birbirlerinden uzaklaşmışlardır. Siltli kil grafiğine ait sarma eğrisinin zamanla daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.

3.2.3 Kare Dalga Tipi Periyodik Yük q_3(t) Durumu

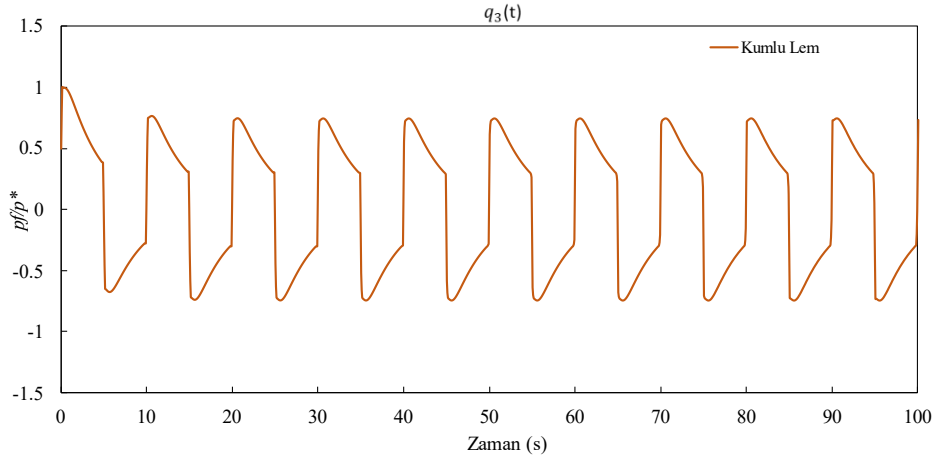
q_3(t) yükleme durum için $p_f/p*$'nin sonuçları, ele alınan tüm zemin türleri için Şekil (57-67) arasında çizilmiştir.



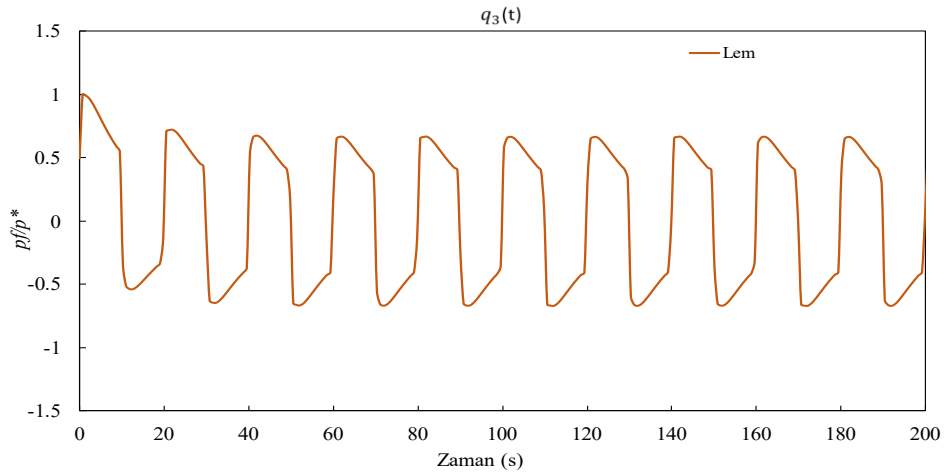
Şekil 57. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için kum zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



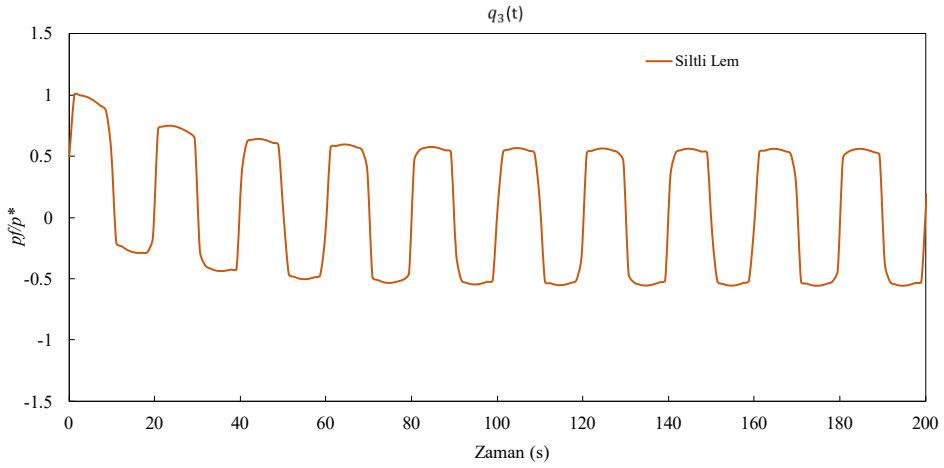
Şekil 58. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için lemli kum zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



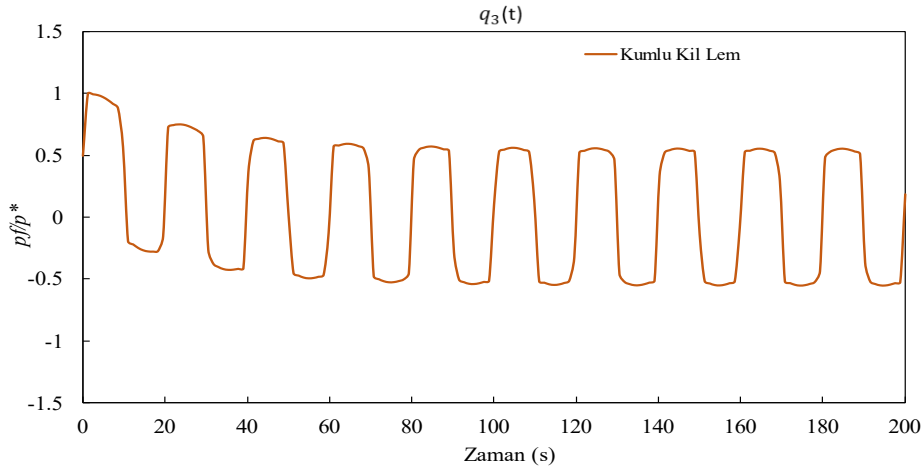
Şekil 59. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için kumlu lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



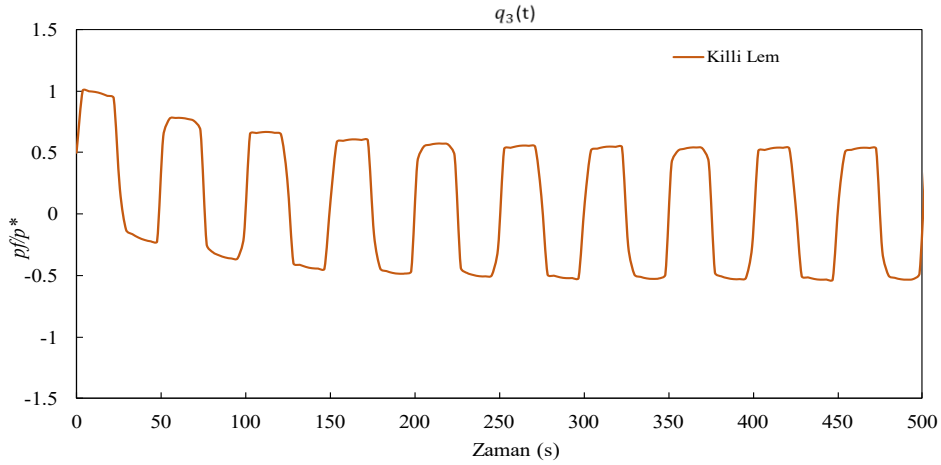
Şekil 60. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



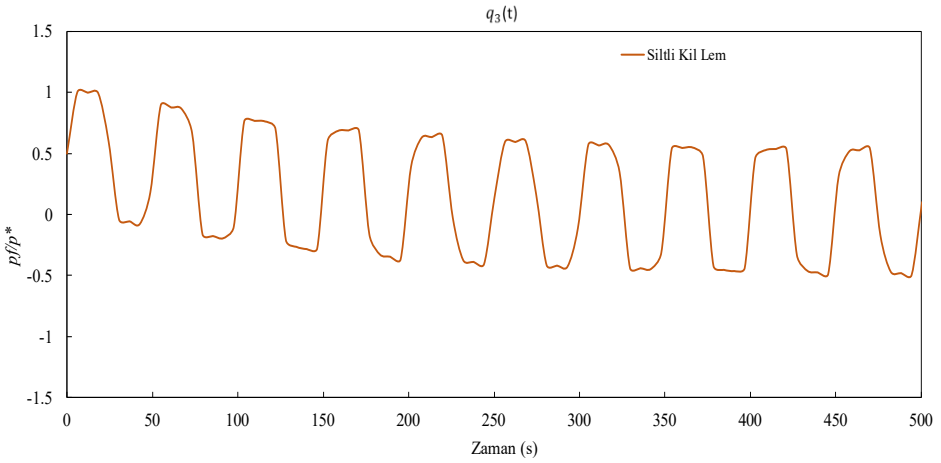
Şekil 61. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için siltli lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



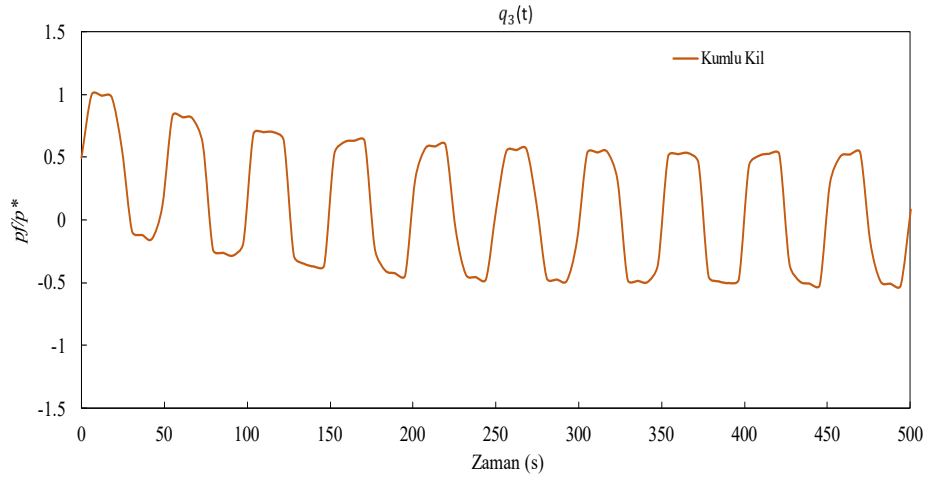
Şekil 62. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için kumlu kil lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



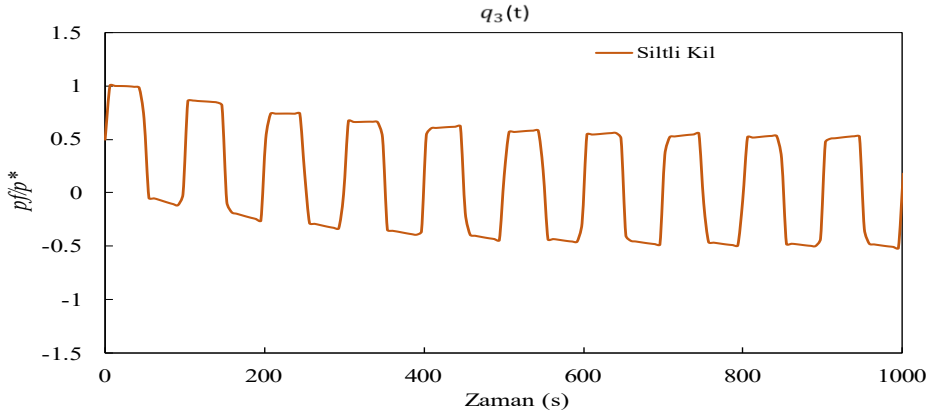
Şekil 63. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için killi lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



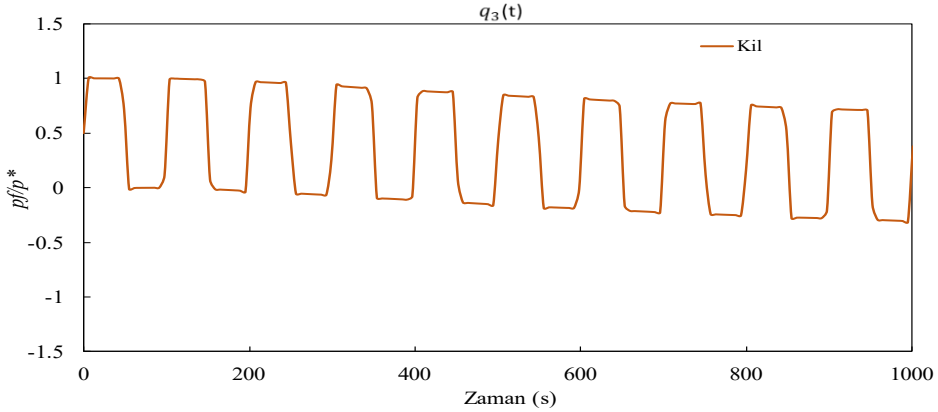
Şekil 64. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için siltli kil lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 65. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için kumlu kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

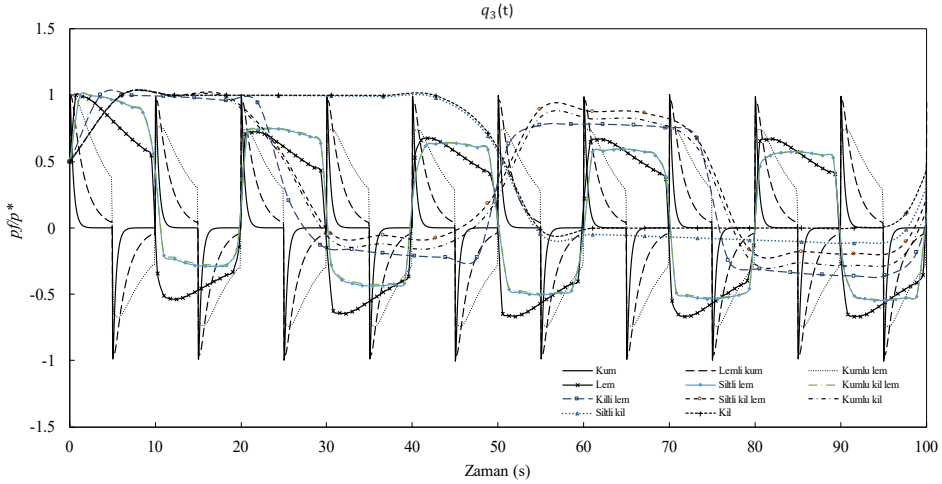


Şekil 66. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için siltli kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



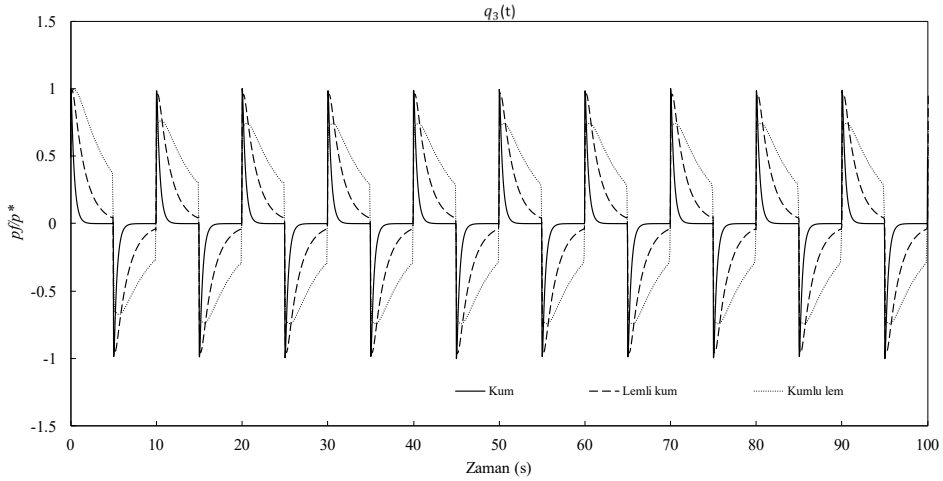
Şekil 67. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

q_3(t) tipi yük durumu için elde edilen sonuçlar, bu tezde ele alınan tüm zemin sınıfları için Şekil 68'de karşılaştırılmıştır.



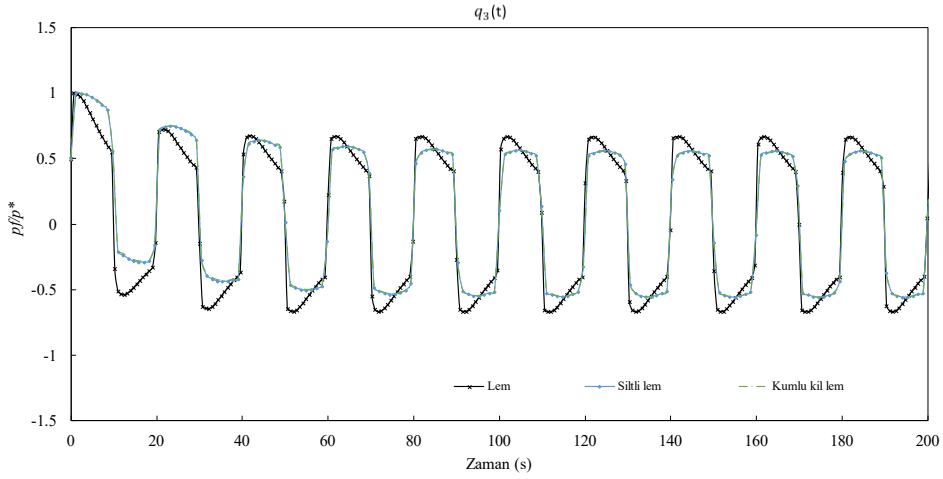
Şekil 68. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için 11 farklı zemin türüne ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

Kare dalga tipi periyodik yük altında daha detaylı bir karşılaştırma ve daha net yorum yapabilmek amacıyla sonuçlar Şekil (69-72)'de arasında grafik formunda sunulmuştur.



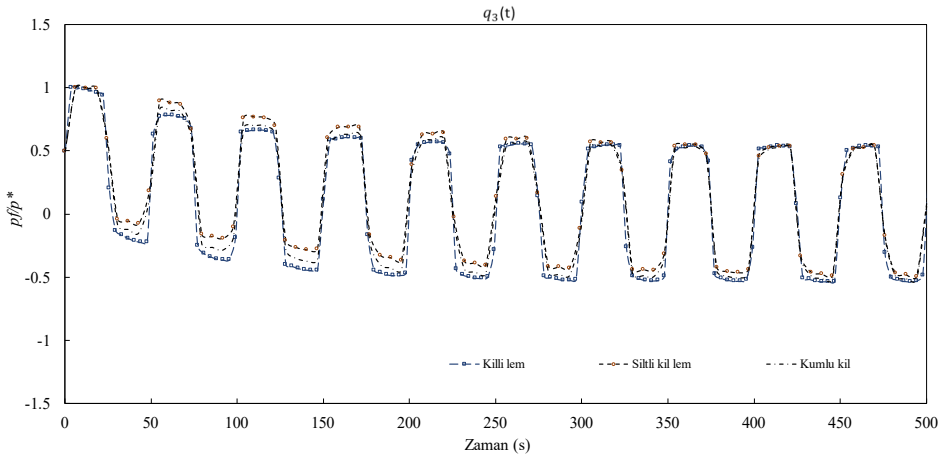
Şekil 69. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için kum, lemli kum, kumlu lem zeminlere ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 69'da görüldüğü gibi, kare dalga tipi periyodik q_3(t) yük etkisi altında kum, lemli kum , kumlu lem zeminler karşılaştırıldığında, kumlu zemine ait p_f/p^* değerleri diğer zeminlere göre daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca, lemli kum zemine ait p_f/p^* değerleri kumlu lem zemine göre daha büyük olduğnu görülmüştür. Ayrıca, p_f/p^* salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.



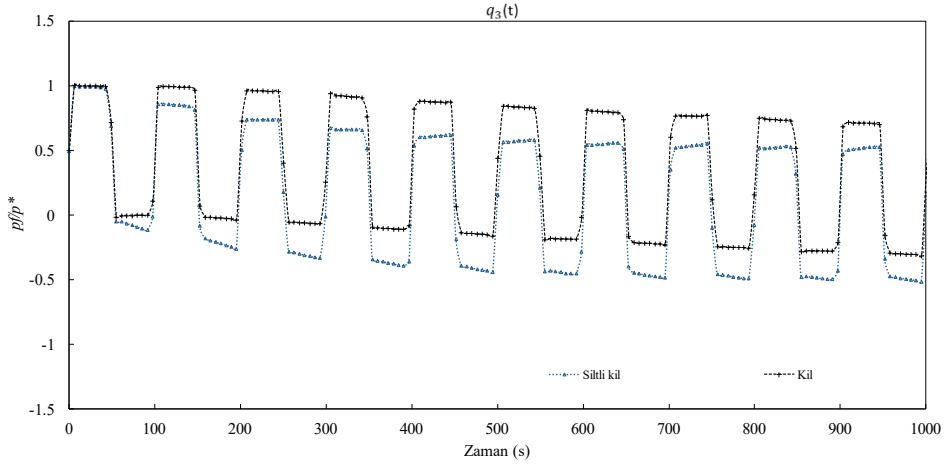
Şekil 70. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminlere ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 70 incelendiğinde, kare dalga tipi periyodik q_3(t) yük etkisi altında lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olduğu görülmüştür. Siltli lem ve kumlu kil lem grafiğilerine ait genlik değerleri zamanla birbiri ile örtüşmüştür. Ancak, lem zemine ait genlik değerleri başlangıçta diğer zeminlerden sapmaktadır. Ayrıca, $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.



Şekil 71. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için killi lem, siltli killi lem, kumlu kil zeminlere ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 71'de görüldüğü gibi, Kare dalga tipi periyodik q_3(t) yükün etkisi altında killi lem, siltli killi lem, kumlu kil zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olduğu görülmüştür. Genlik değerleri zamanla birbirlerine yaklaşmışlardır. Zaman artarken killi lem grafiğine ait sarma eğrisini zamanla daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca, $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.

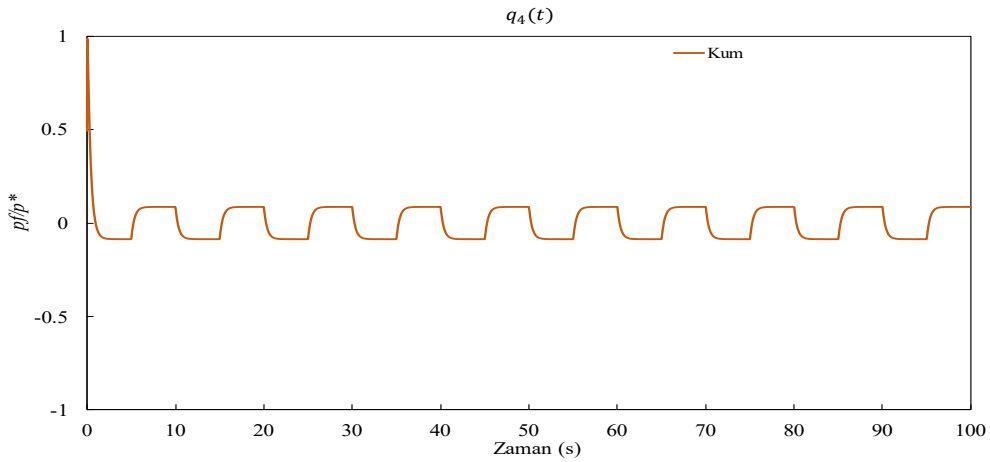


Şekil 72. Kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) için siltli kil, kil zeminlere ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

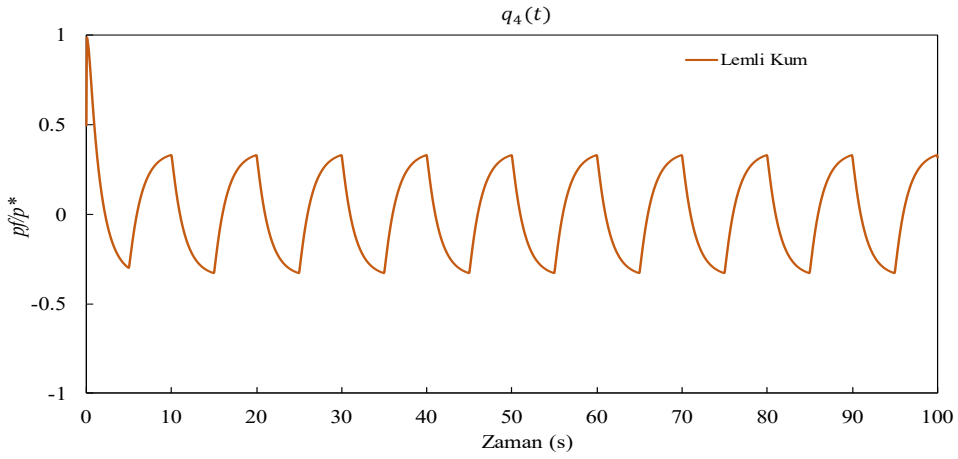
Şekil 72 incelendiğinde, kare dalga tipi periyodik q_3(t) yükün etkisinden siltli kil ve kil zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olduğu görülmüştür. Genlik değerlerinin zamanla birbirlerinden uzaklaşmışlardır. Zaman artarken siltli kil grafiğine ait sarma eğrisinin zamanla daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca, $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.

3.2.4 Üçgen Dalga Tipi Periyodik Yük q_4(t) Durumu

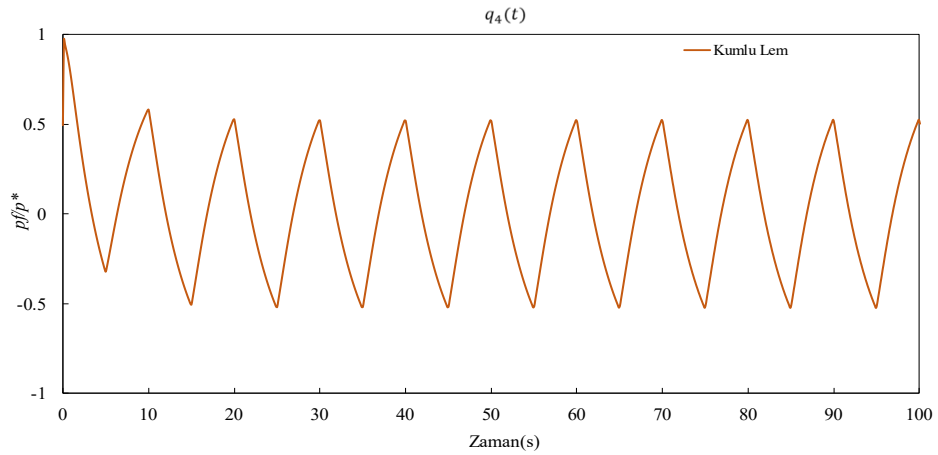
q_4(t) yükleme durum için elde edilen $p_f/p*$'nin sonuçları, ele alınan tüm zemin türleri için Şekil (73-83) arasında çizilmiştir.



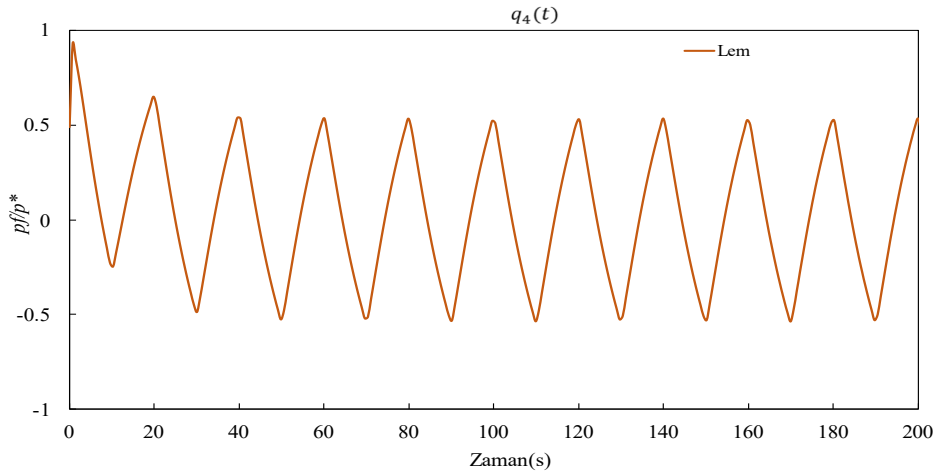
Şekil 73. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için kum zemine ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi



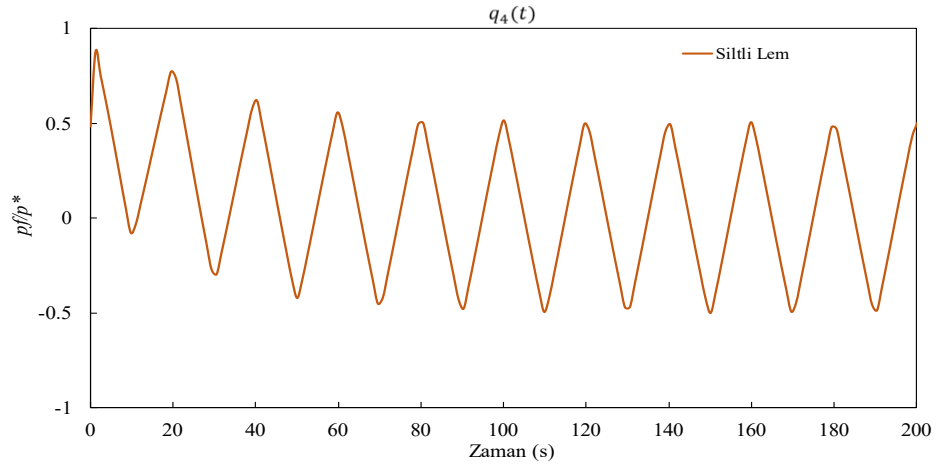
Şekil 74. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için lemli kum zemine ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi



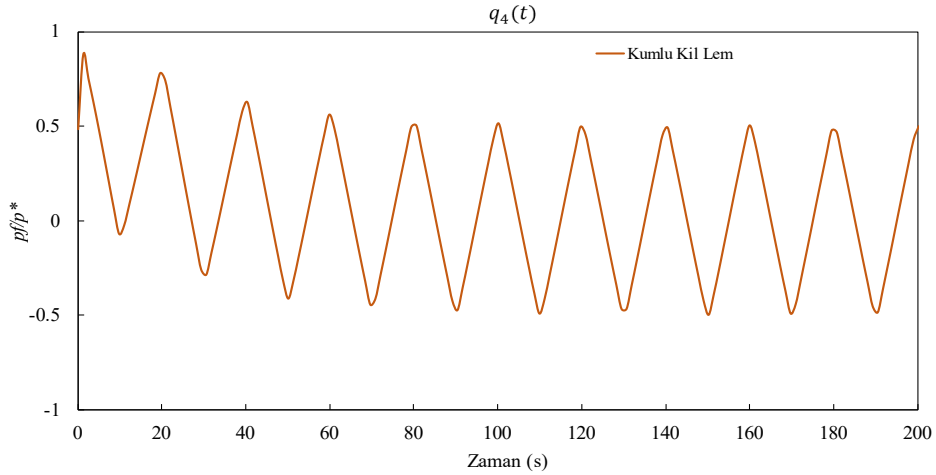
Şekil 75. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için kumlu lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



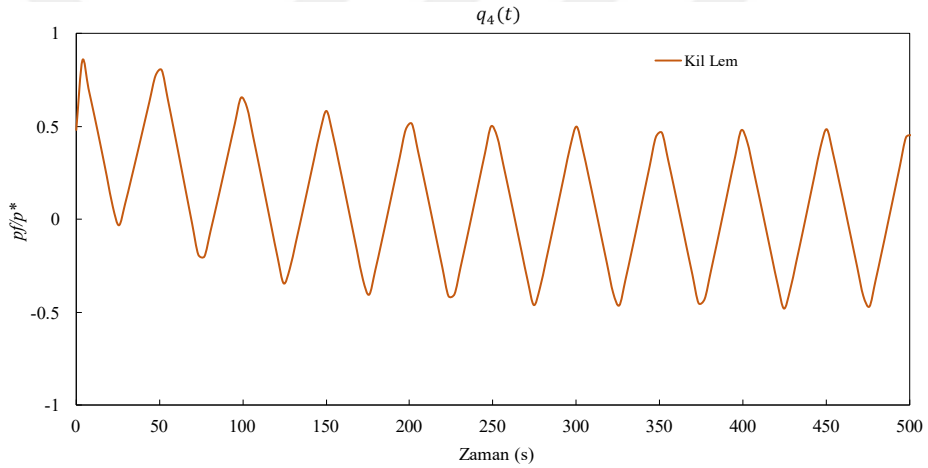
Şekil 76. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



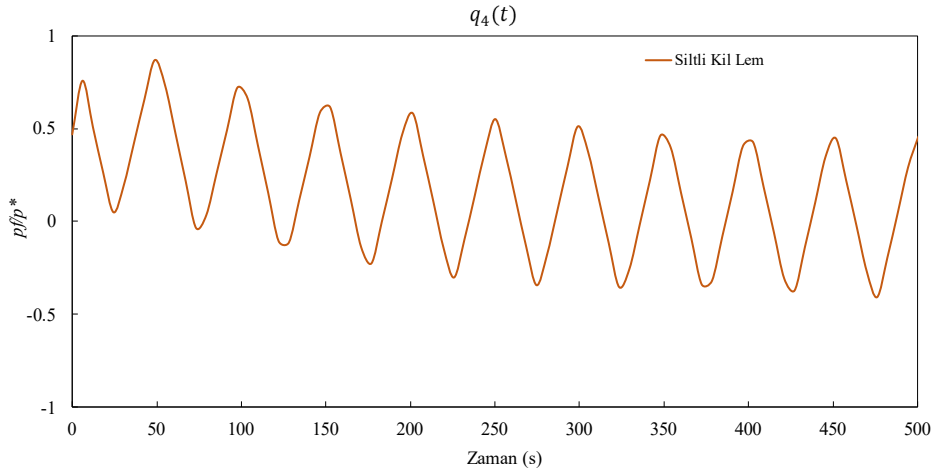
Şekil 77. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için siltli lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



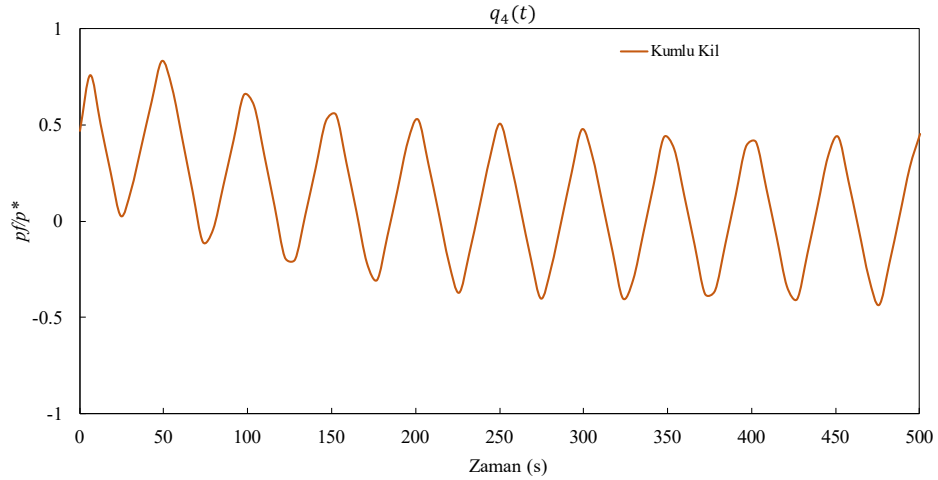
Şekil 78. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için kumlu kil lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



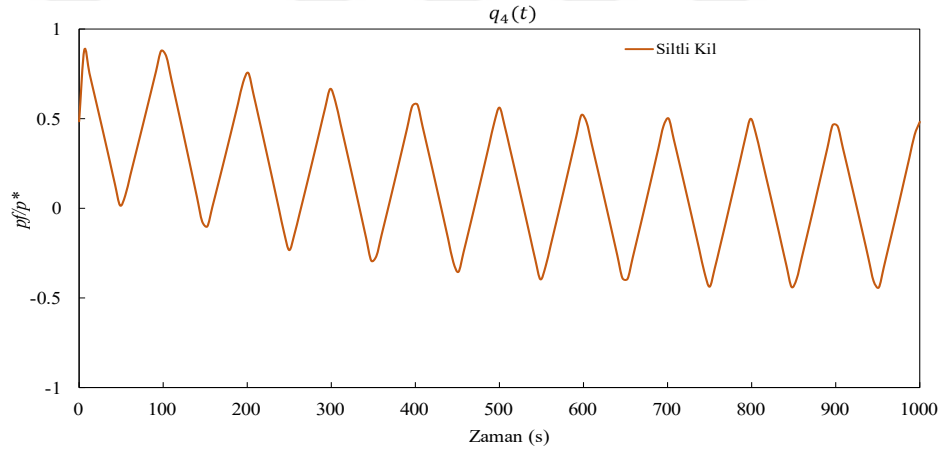
Şekil 79. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için kil lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



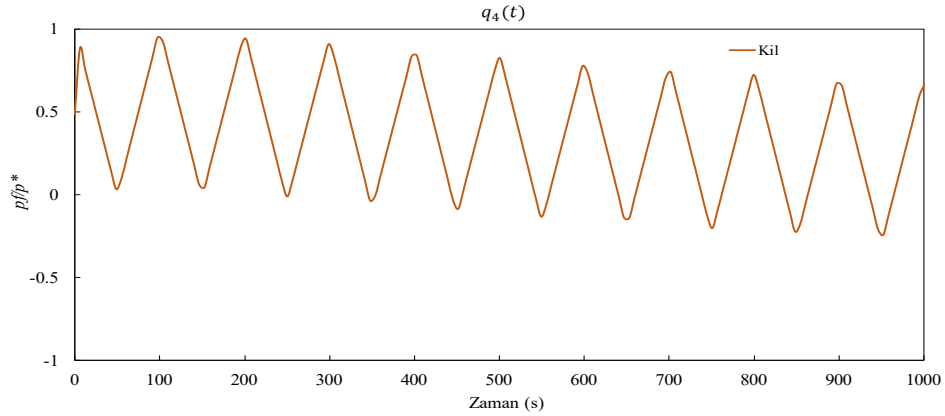
Şekil 80. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için siltki kil lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 81. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için kumlu kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

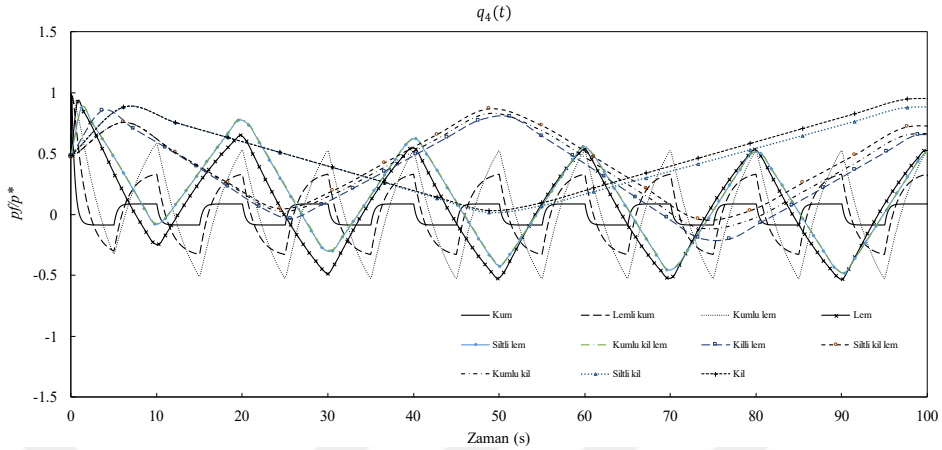


Şekil 82. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için siltli kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



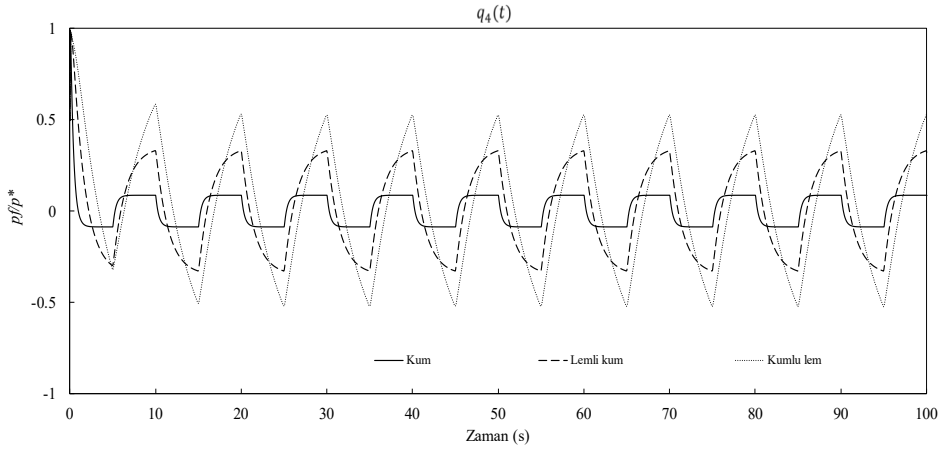
Şekil 83. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

q_4(t) tipi yük durumu için elde edilen sonuçlar, bu tezde ele alınan tüm zemin sınıfları için Şekil 84'te karşılaştırılmıştır.



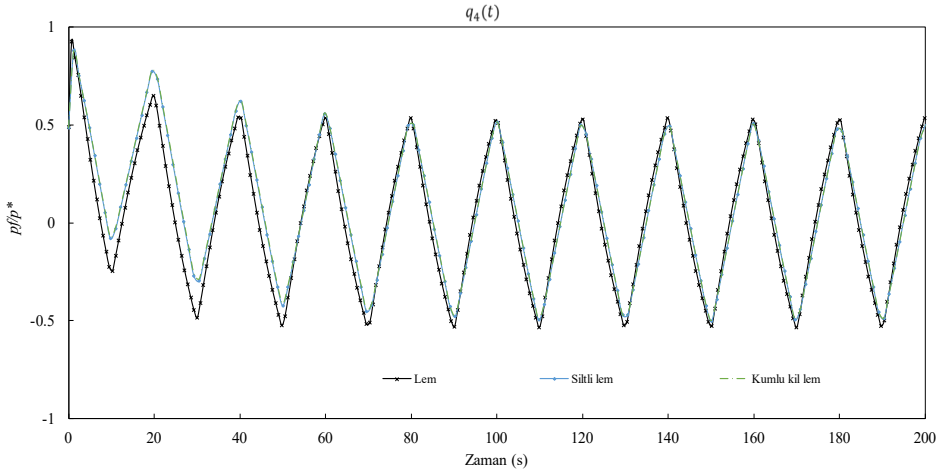
Şekil 84. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için 11 farklı zemin türüne ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

Üçgen dalga tipi periyodik yük altında daha detaylı bir karşılaştırma ve daha net yorum yapabilmek amacıyla sonuçlar Şekil (85-88)'de arasında çizilmiştir.



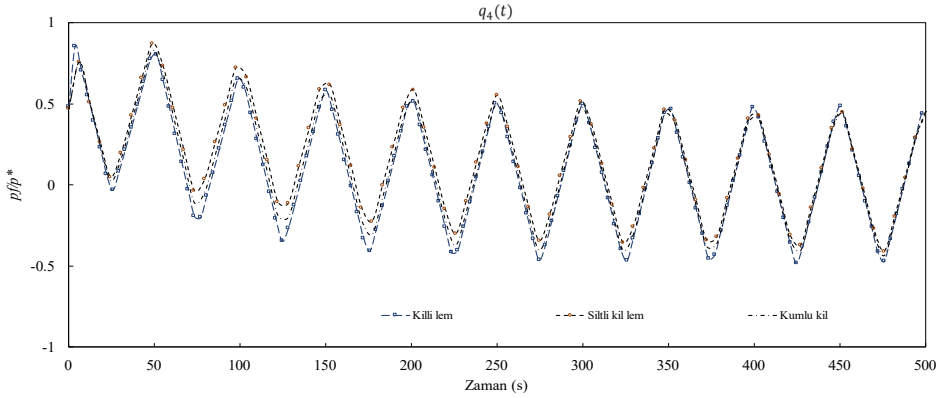
Şekil 85. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için kum, lemli kum, kumlu lem zeminlere ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 85'te görüldüğü gibi, üçgen dalga tipi periyodik q_4(t) yükün etkisinde kum, lemli kum, kumlu lem zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olmadığı görülmüştür. Kumlu lem zemine ait p_f/p^* değerleri diğer zeminlere göre daha büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni yükleme verimliliği, kumlu lem için 0.992, lemli kum için 0.991 ve kumlu zemin için 0.989 değerini almaktadır. Ayrıca, p_f/p^* salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.



Şekil 86. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminlere ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

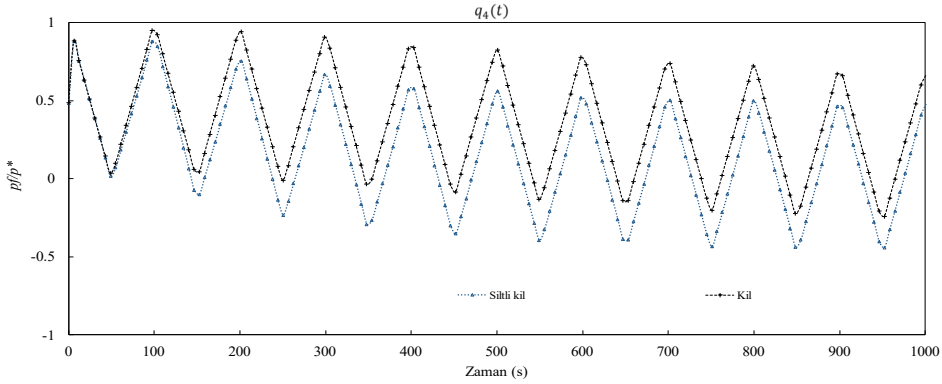
Şekil 86 incelendiğinde, üçgen dalga tipi periyodik q_4(t) yük etkisi altında lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminler karşılaştırıldığında periyotlar eşit olduğu görülmüştür. Siltli lem ve kumlu kil lem grafiğilerine ait genlik değerleri zamanla birbirlerine örtüşmüştür. Ancak, lem zemine ait genlik değerleri başlangıçta diğer zeminlerden sapmakta, daha sonra diğer zeminlere yaklaşmışlardır. Ayrıca, p_f/p^* salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.



Şekil 87. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için killi lem, siltli killi lem, kumlu kil zeminlere ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 87'de görüldüğü gibi, üçgen dalga tipi periyodik q_4(t) yükün etkisi altında killi lem, siltli killi lem, kumlu kil zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olduğu görülmüştür. Genlik değerleri zamanla birbirlerine yaklaşmışlardır. Zaman artarken killi

lem grafiğine ait sarma eğrisini zamanla daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca, $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.

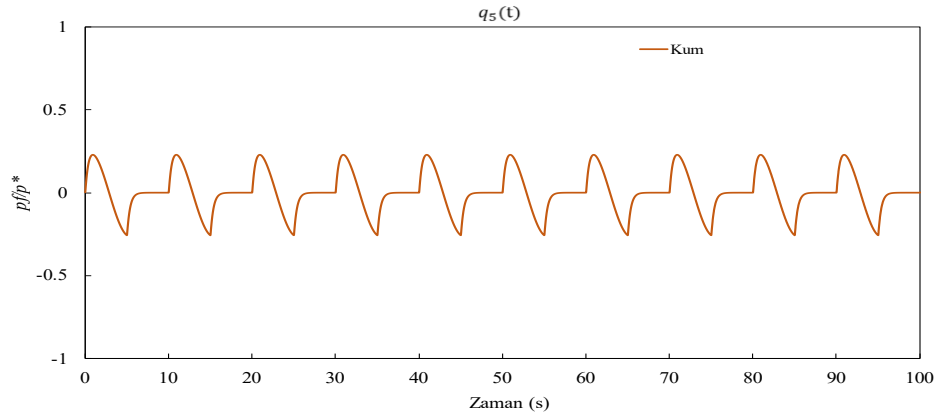


Şekil 88. Üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) için siltli kil, kil zeminlere ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

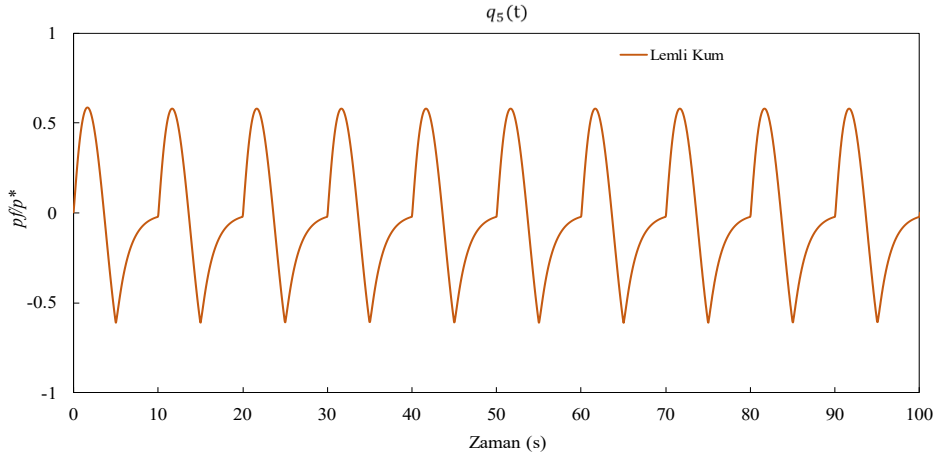
Şekil 88 incelendiğinde, üçgen dalga tipi periyodik q_4(t) yükün etkisinden siltli kil ve kil zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olduğu görülmüştür. Genlik değerleri zamanla birbirlerinden uzaklaşmışlardır. Siltli kil grafiğine ait sarma eğrisinin zamanla daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca, $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.

3.2.5 Yarım Sinüs Dalga Tipi Periyodik Yük q_5(t) Durumu

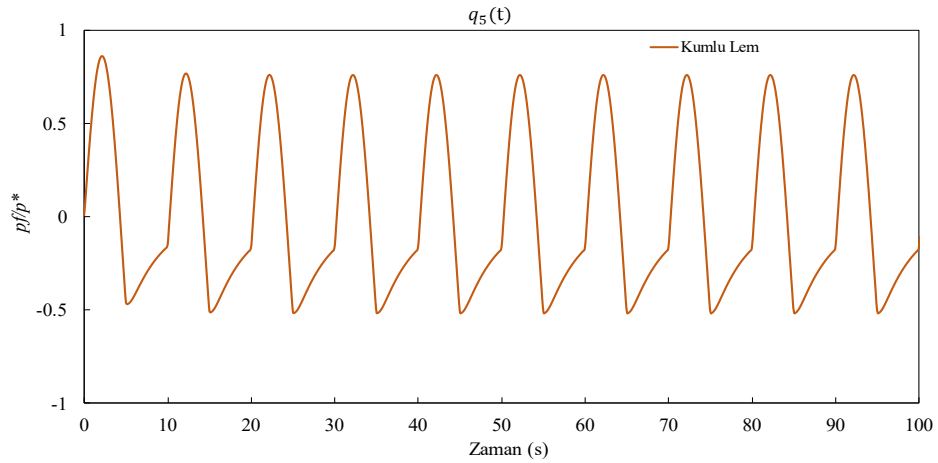
q_5(t) yükleme durum için zaman uzayında elde edilen $p_f/p*$'nin sonuçları, ele alınan farklı zemin sınıfları için Şekil (89-99) arasında grafik formunda sunulmuştur.



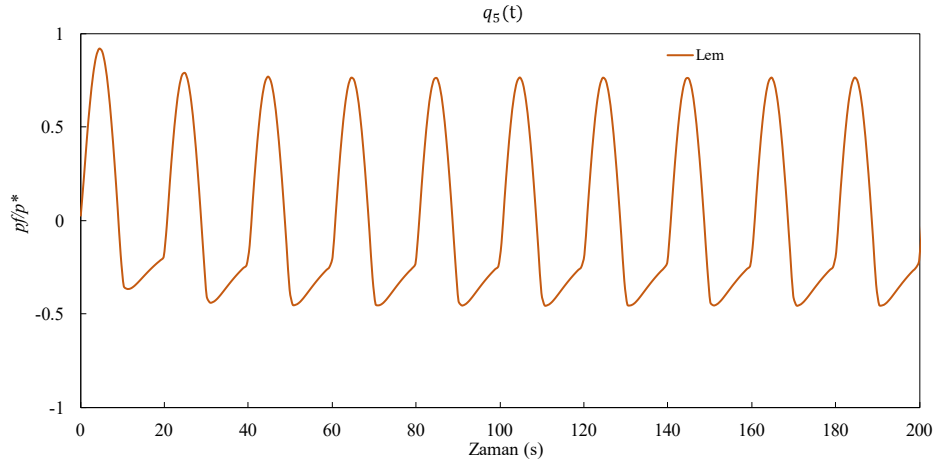
Şekil 89. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için kumlu zemine ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi



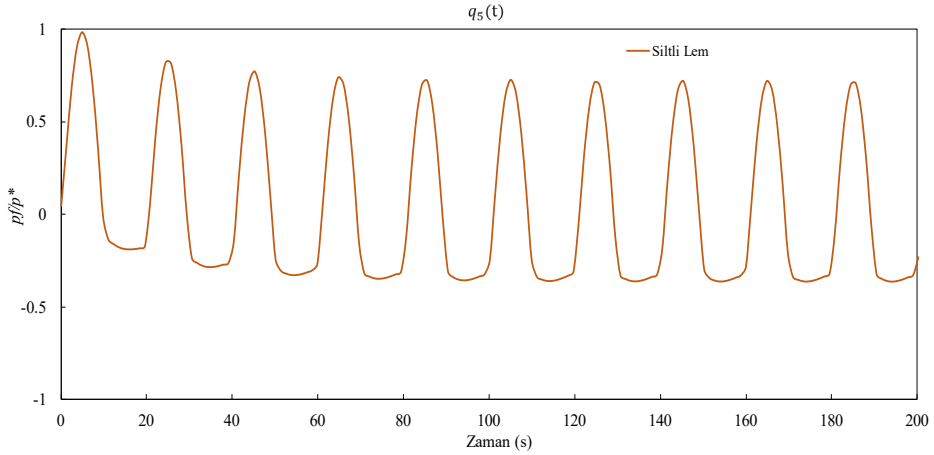
Şekil 90. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için lemli kum zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



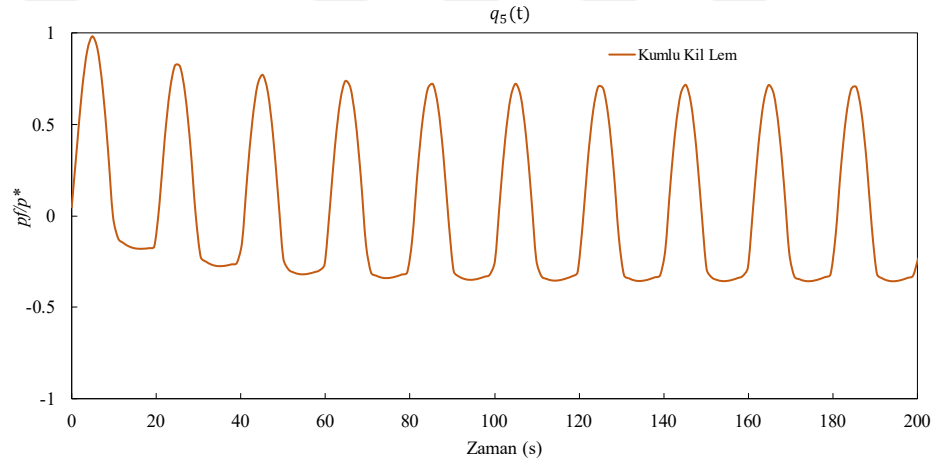
Şekil 91. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için kumlu lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



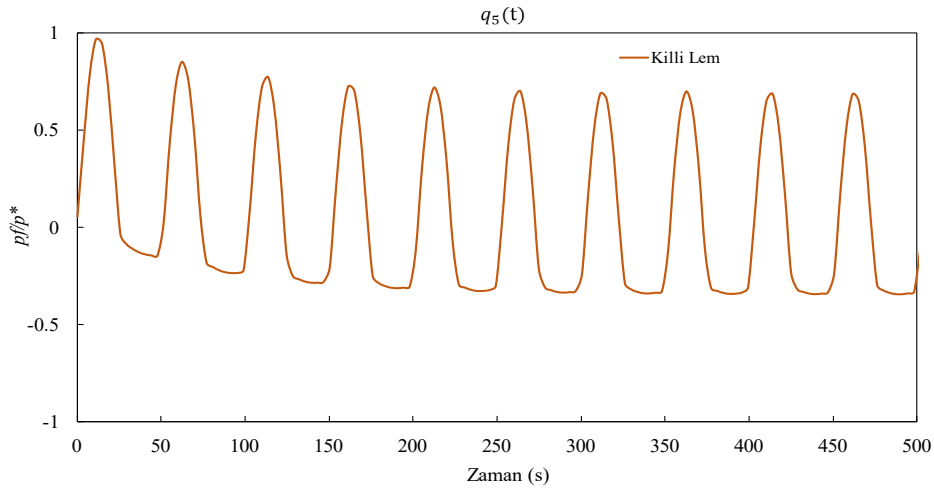
Şekil 92. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



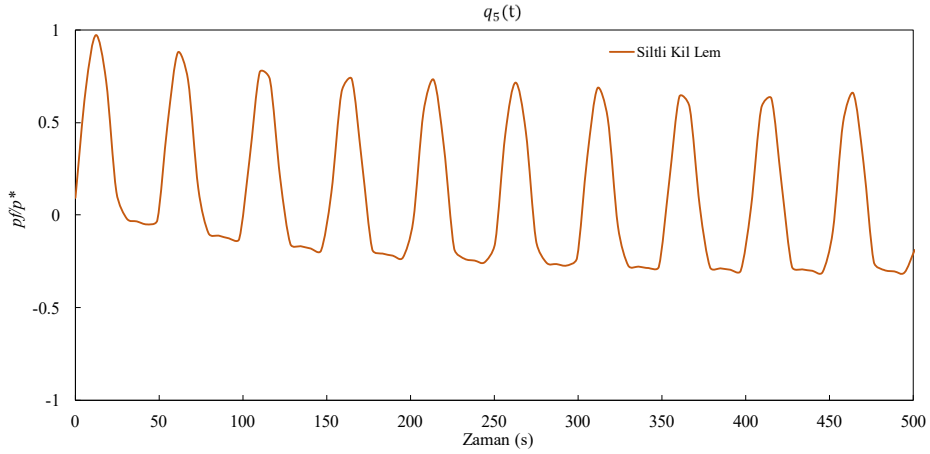
Şekil 93. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için siltli lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



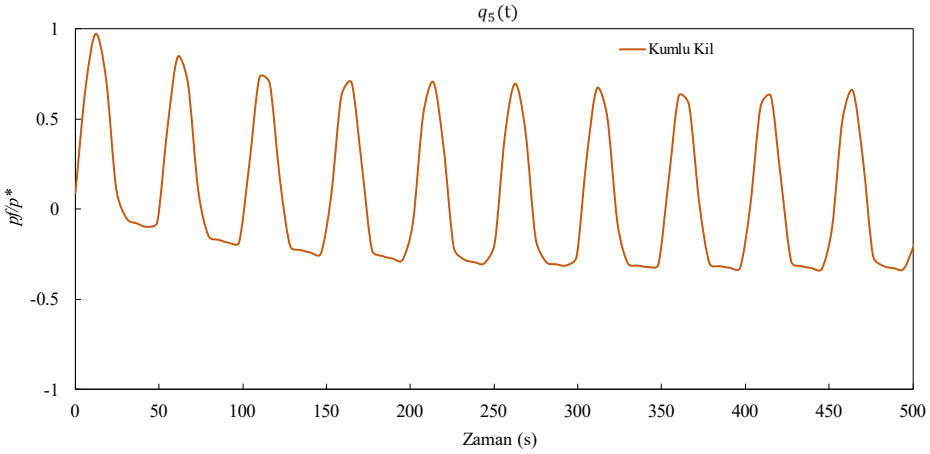
Şekil 94. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için kumlu kil lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



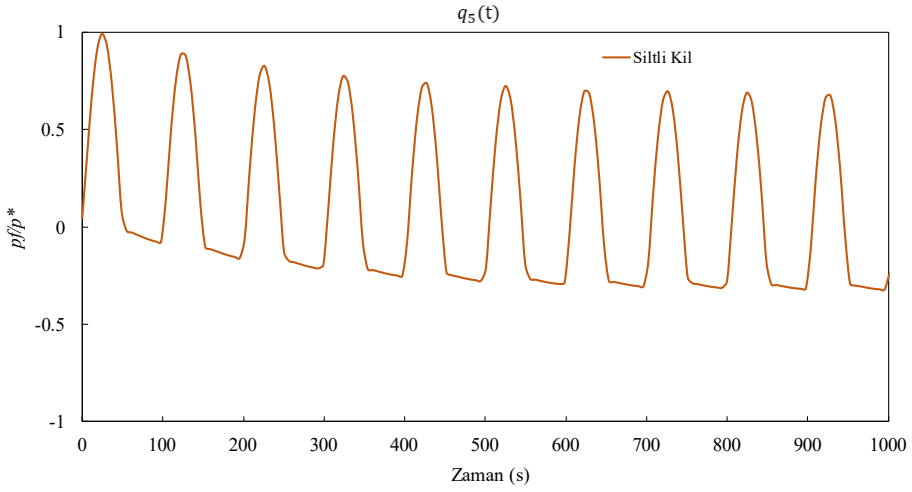
Şekil 95. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için killi lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



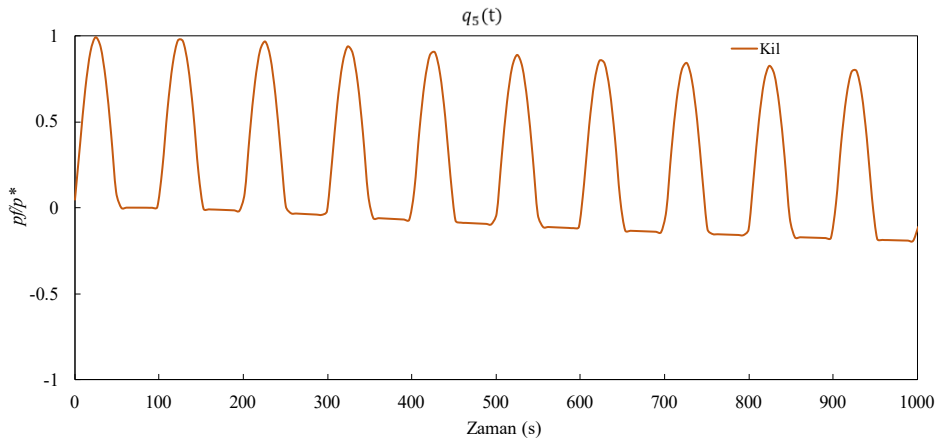
Şekil 96. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için siltli kil lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 97. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için kumlu kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

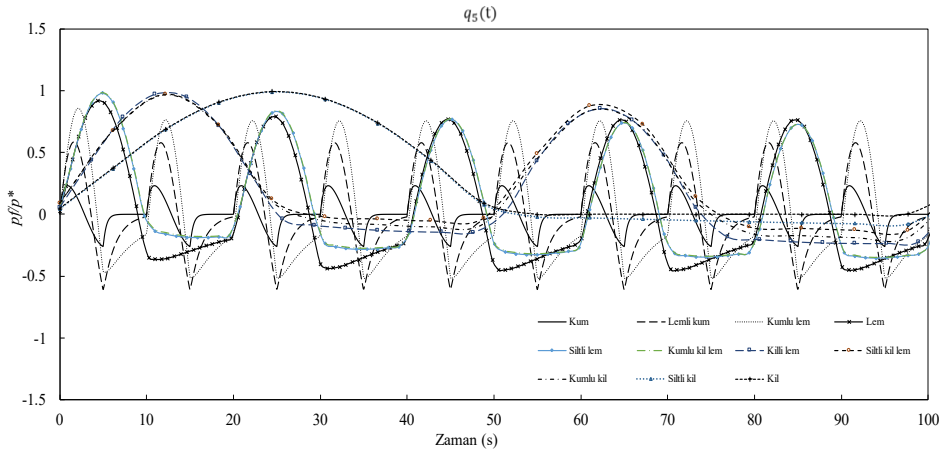


Şekil 98. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için siltli kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



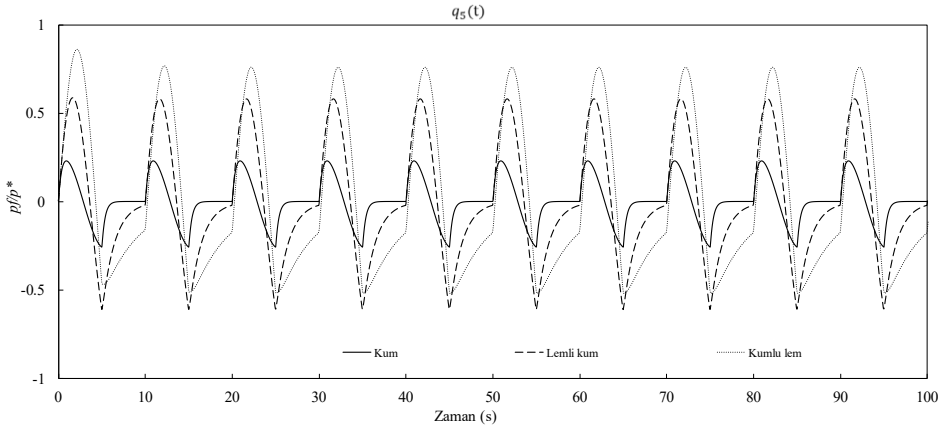
Şekil 99. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

q_5(t) tipi yük durumu için elde edilen sonuçlar, bu tezde ele alınan tüm zemin sınıfları için Şekil 100'de karşılaştırılmıştır.



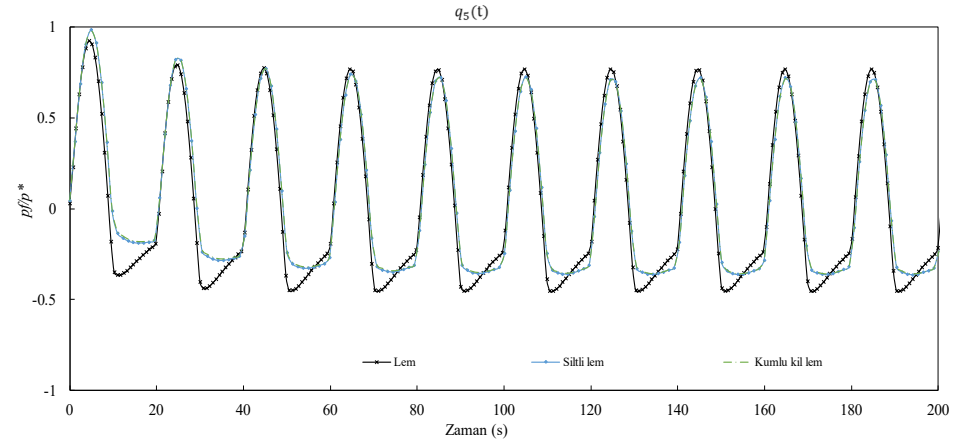
Şekil 100. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için 11 farklı zemin türüne ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için daha detaylı bir karşılaştırma ve daha net yorum yapabilmek amacıyla sonuçlar Şekil (101-104)'te sunulmuştur.



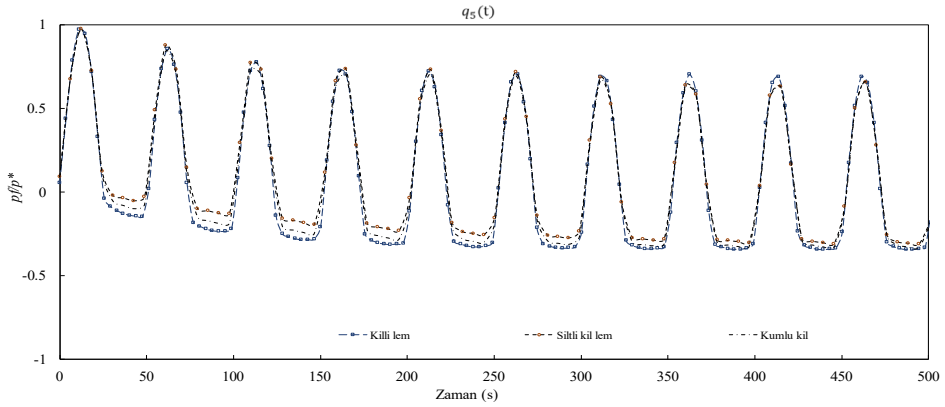
Şekil 101. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için kum, lemli kum, kumlu lem zeminlere ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 101'de görüldüğü gibi, yarım sinüs dalga tipi periyodik q_5(t) yükün etkisinde kum, lemli kum, kumlu lem zeminler karşılaştırıldığında, kumlu lem zemine ait $p_f/p*$ değerlerinin diğer zeminlere göre daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca, lemli kum zemine ait $p_f/p*$ değerlerinin kumlu zemine göre daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca, $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.



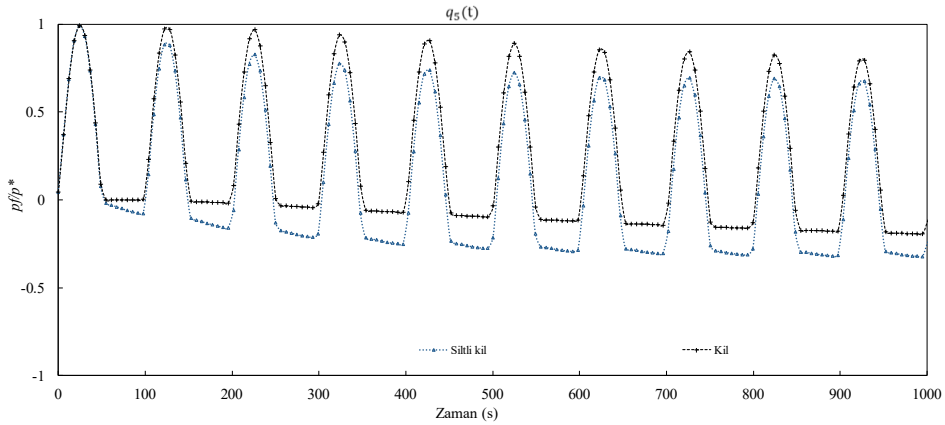
Şekil 102. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminlere ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 102 incelendiğinde, yarım sinüs dalga tipi periyodik q_5(t) yük etkisi altında lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olduğu görülmüştür. Siltli lem ve kumlu kil lem grafiğilerine ait genlik değerleri zamanla birbirlerine ile örtüşmüştür. Ancak, lem zemin grafiğine ait genlik değerleri diğer zeminlerden sapmaktadır. Ayrıca, $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.



Şekil 103. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için killi lem, siltli kil lem, kumlu kil zeminlere ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 103'te görüldüğü gibi, yarım sinüs dalga tipi periyodik q_5(t) yükün etkisi altında killi lem, siltli killi lem, kumlu kil zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olduğu görülmüştür. Genlik değerleri zamanla birbirlerine yaklaşmışlardır. Killi lem grafiğine ait sarma eğrisini zamanla daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca, $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.

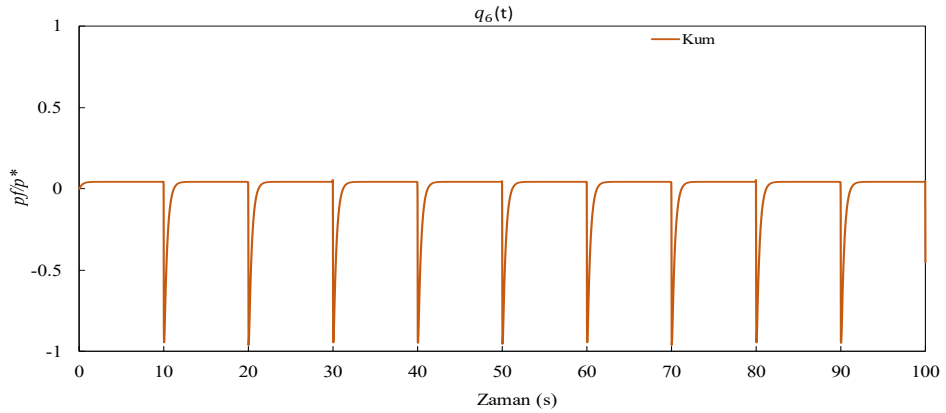


Şekil 104. Yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) için siltli kil, kil zeminlere ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

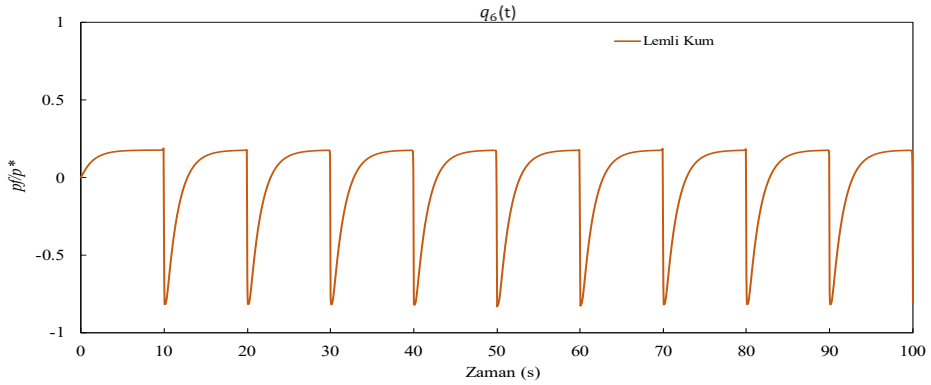
Şekil 104 incelendiğinde, yarım sinüs dalga tipi periyodik q_5(t) yükün etkisinden siltli kil ve kil zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olduğu görülmüştür. Genlik değerleri zamanla birbirlerinden uzaklaşmışlardır. Siltli kil grafiğine ait sarma eğrisinin zamanla daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca, $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.

3.2.6 Testere Dişi Dalga Tipi Periyodik Yük q_6(t) Durumu

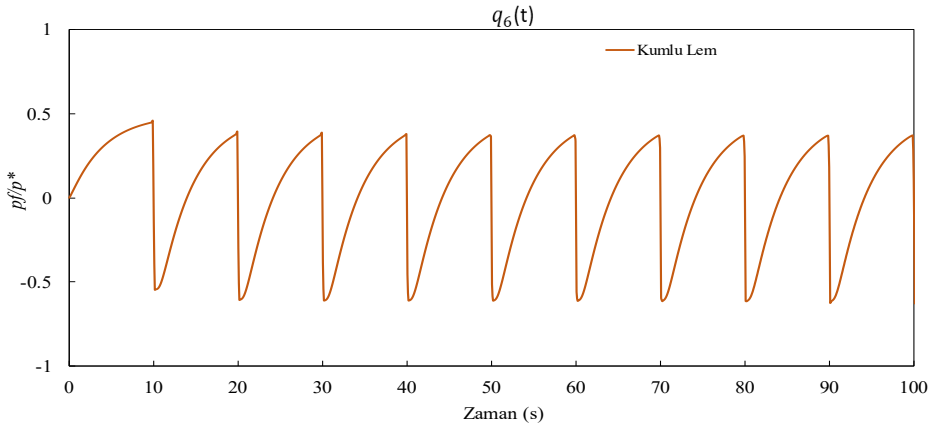
q_6(t) yükleme durum için elde edilen p_f/p^*'nin sonuçları , ele alınan tüm zemin türleri için Şekil (105-115) arasında çizilmiştir.



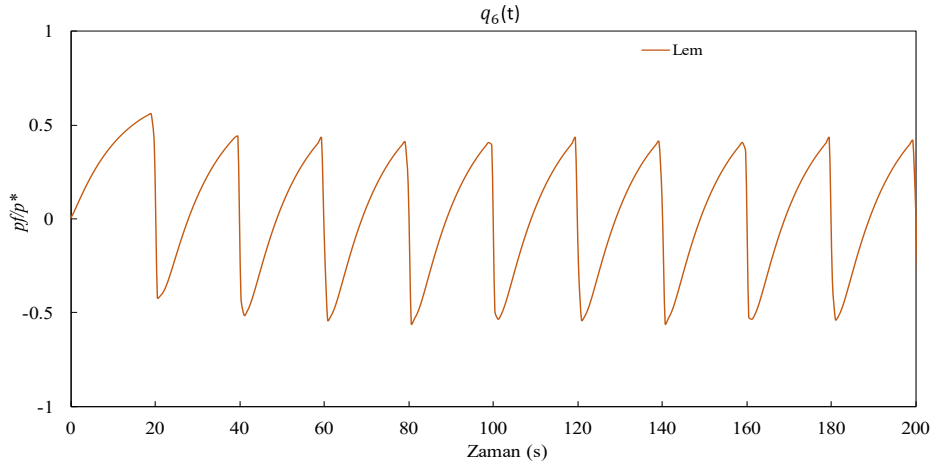
Şekil 105. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için kum zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



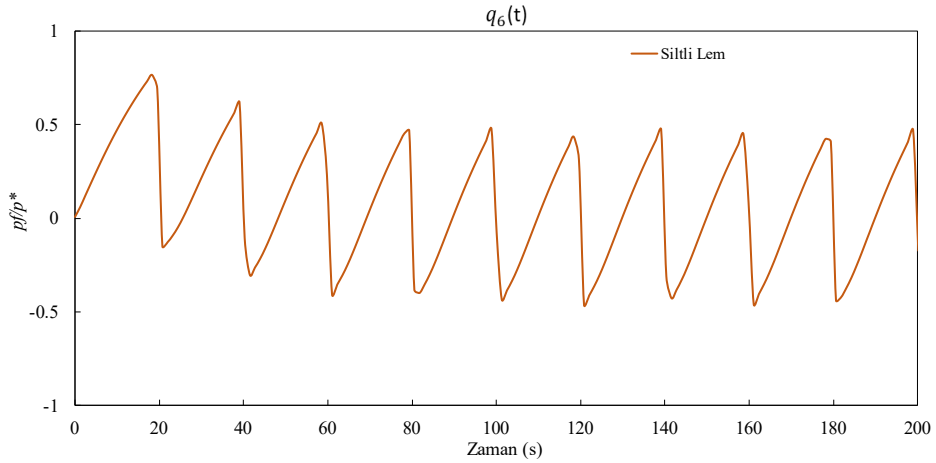
Şekil 106. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için lemli kum zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



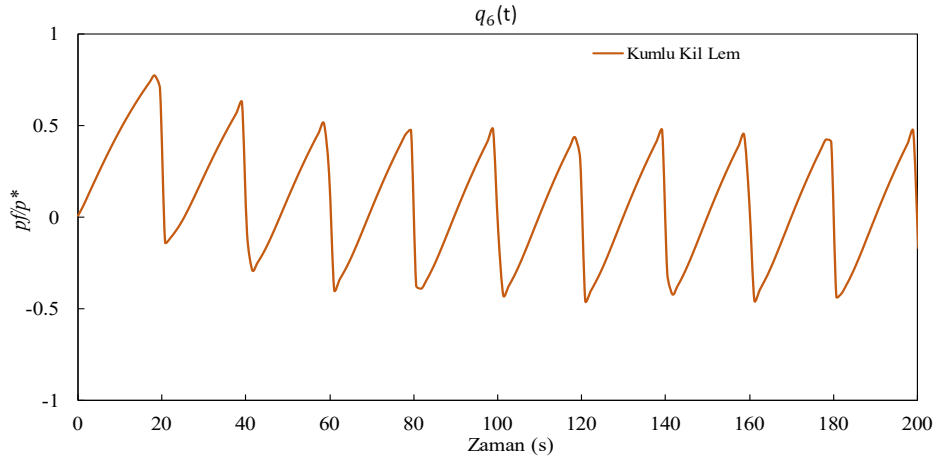
Şekil 107. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için kumlu lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



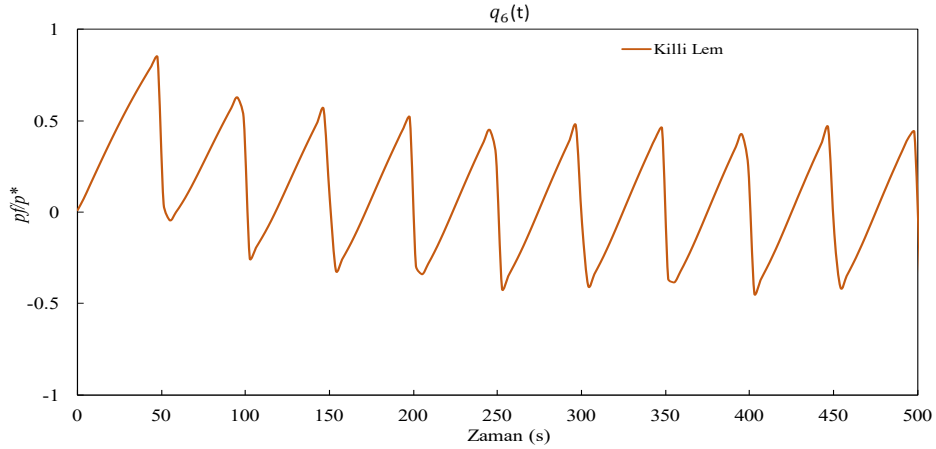
Şekil 108. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



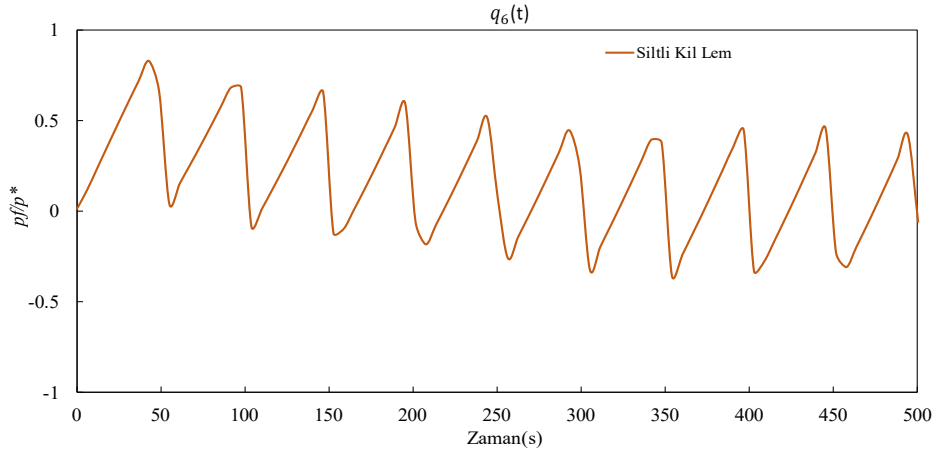
Şekil 109. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için siltli lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



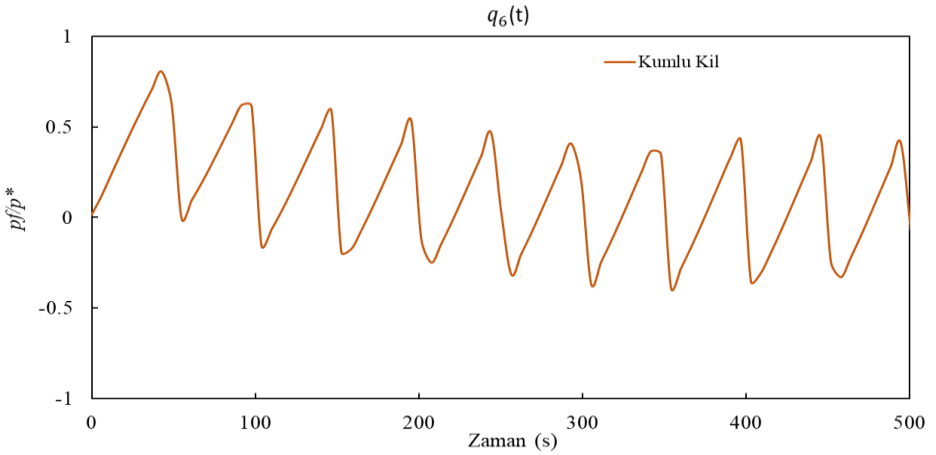
Şekil 110. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için kumlu kil lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



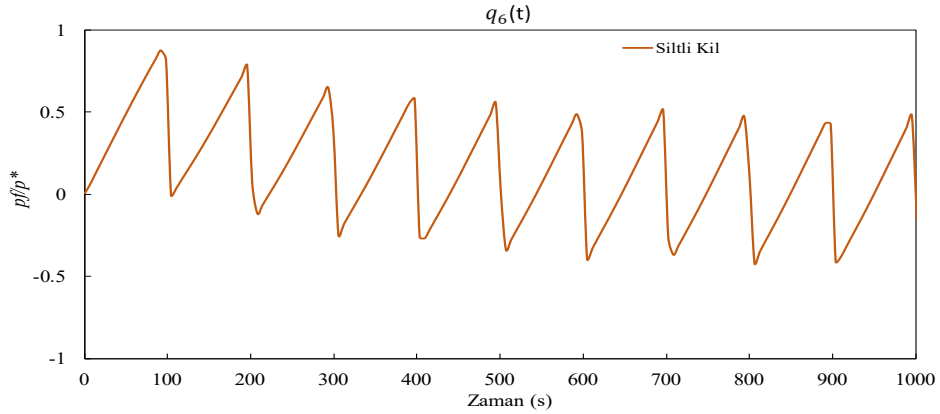
Şekil 111. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için killi lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



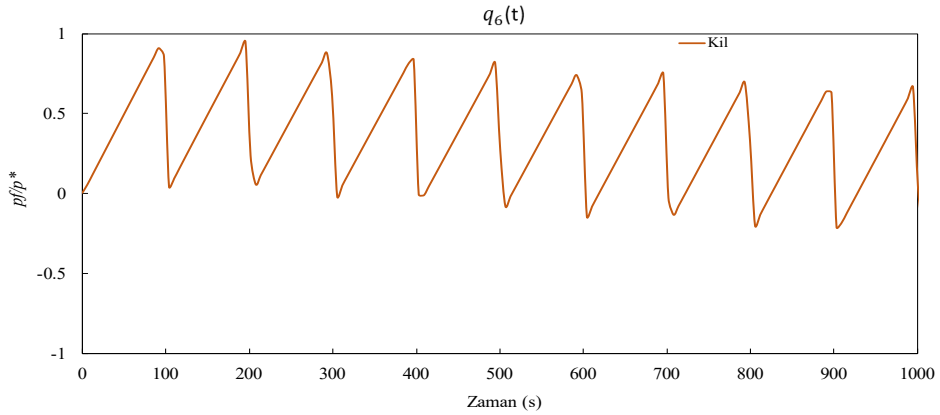
Şekil 112. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için siltli kil lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 113. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için kumlu kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

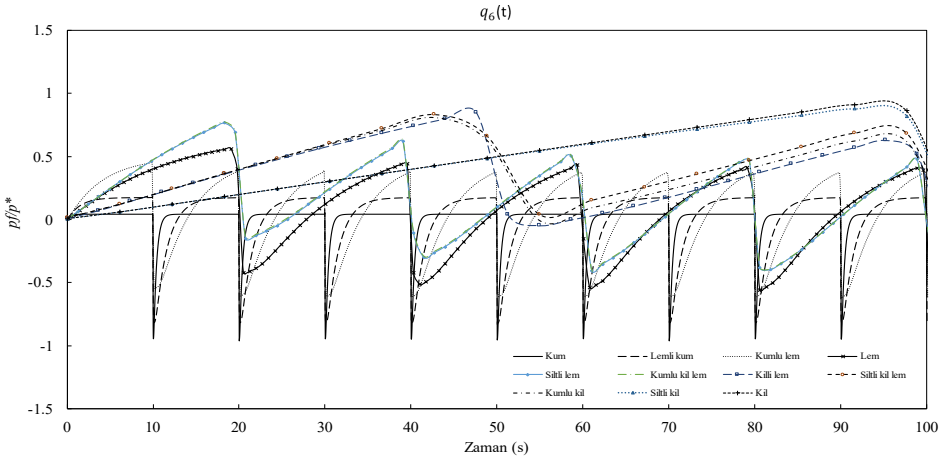


Şekil 114. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için siltli kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi



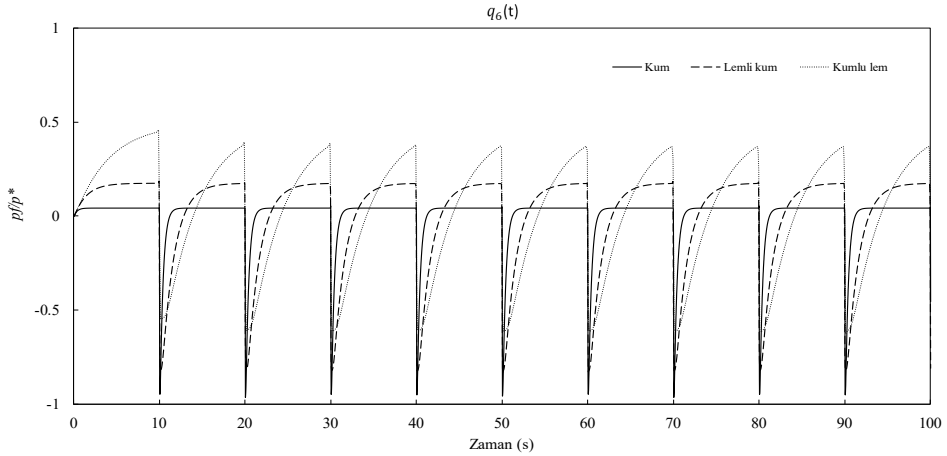
Şekil 115. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için kil zemine ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

q_6(t) tipi yük durumu için elde edilen sonuçlar, bu tezde ele alınan tüm zemin sınıfları için Şekil 116'da karşılaştırılmıştır.



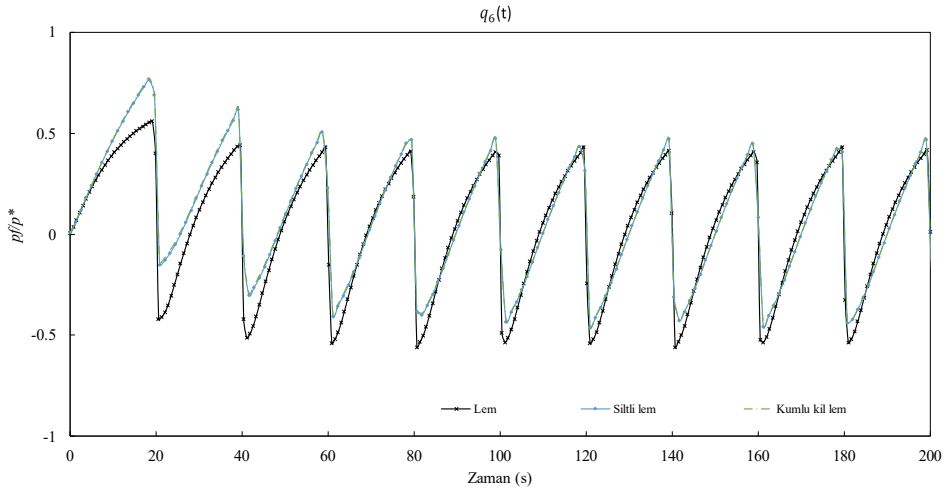
Şekil 116. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için 11 farklı zemin türüne ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

Testere dişi dalga tipi periyodik yük altında daha detaylı bir karşılaştırma ve daha net yorum yapabilmek amacıyla sonuçlar Şekil (117-120)'de sunulmuştur.



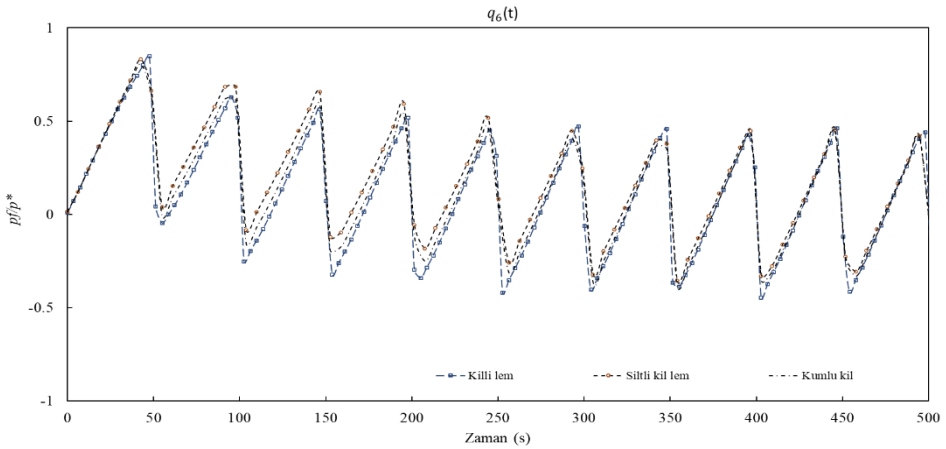
Şekil 117. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için kum, lemli kum, kumlu lem zeminlere ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 117'de görüldüğü gibi, testere dişi dalga tipi periyodik q_6(t) yükün etkisinde kum, lemli kum, kumlu lem zeminler karşılaştırıldığında, kumlu lem zemine ait p_f/p^* değerlerinin diğer zeminlere göre daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca, lemli kum zemine ait p_f/p^* değerlerinin kumlu zemine göre daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca, p_f/p^* salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.



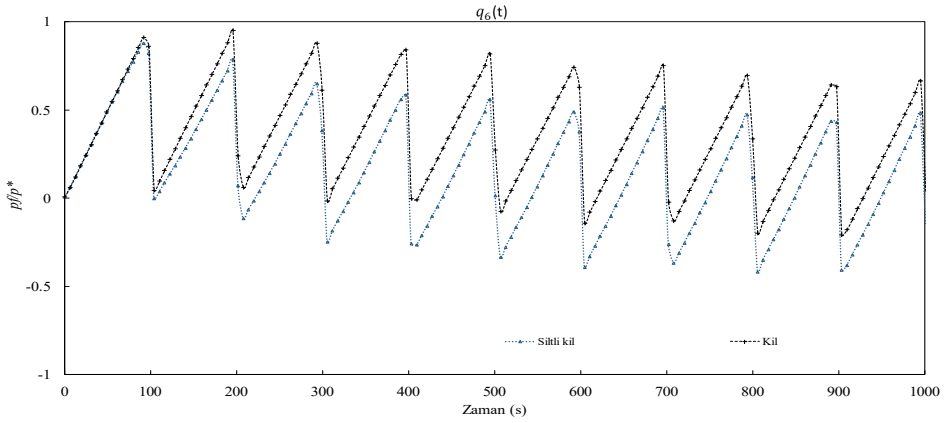
Şekil 118. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminlere ait p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 118 incelendiğinde, testere dişi dalga tipi periyodik q_6(t) yükün etkisinden lem, siltli lem, kumlu kil lem zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olduğu görülmüştür. Siltli lem ve kumlu kil lem grafiğilerine ait genlik değerleri zamanla birbiri ile örtüşmüştür. Ancak, lem zemine ait genlik değerleri başlangıçta diğer zeminlerden sapmakta, daha sonra diğer zeminlere yaklaşmışlardır. Ayrıca, $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.



Şekil 119. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için killi lem, siltli killi lem, kumlu kil zeminlere ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 119'da görüldüğü gibi, testere dişi dalga tipi periyodik q_6(t) yükün etkisi altında killi lem, siltli killi lem, kumlu kil zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olduğu görülmüştür. Genlik değerleri zamanla birbirlerine yaklaşmışlardır. Killi lem grafiğine ait sarma eğrisini zamanla daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca, $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.



Şekil 120. Testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) için siltli kil, kil zeminlere ait $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

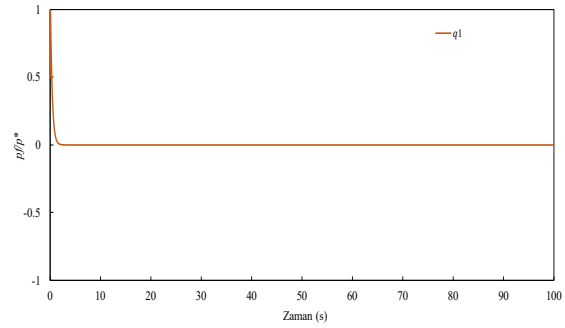
Şekil 120 incelendiğinde, testere dişi dalga tipi periyodik q_6(t) yükün etkisinden siltli kil ve kil zeminler karşılaştırıldığında periyotların eşit olduğu görülmüştür. Genlik değerleri zamanla birbirlerinden uzaklaşmışlardır. Siltli kil grafiğine ait sarma eğrisinin zamanla daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca, $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.

3.3 Aynı Zeminde Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi

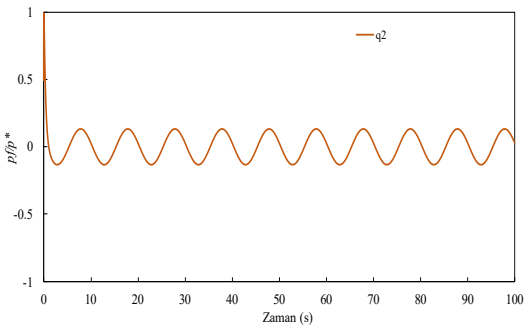
Aynı zemine sabit q_1(t) ve beş tane farklı tekrarlı yük uygulanmıştır. Bu çalışmada, uygulanan tekrarlı yükler şunlardır: kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t), kare dalga tipi periyodik yük q_3(t), üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t), yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) ve testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t). Olayı idare eden kanonik 28 ve 29 denklemler bu çalışmada hazırlanan program ile Laplace uzayında çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar ters Laplace dönüşümü ile zaman uzayına dönüştürülmüştür. Zaman uzayında elde edelen boyutsuz fazla boşluk suyu basıncı p_f/p*'nin sonuçları sunulmuştur. Bu çalışmada, kum, lemli kum, kumlu lem, lem, silt lem, kumlu kil lem, kil lem, siltli kil lem, kumlu kil , siltli kil, kil için sonuçlar incelenmiştir. Uygulanan yüklerin aynı zemin için sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu tezde, zaman aralığı 100 -1000 saniye olarak alınmıştır . Davranışın daha iyi incelenebilmesi amacıyla yükler için 0,1 ve 0,01 Hz frekanslar kullanılmıştır. Bu frekanslar zeminin mukavemetinin değerlendirmek için kullanıldığı ve aynı zamanda düşük sismik aralıkta yer aldığı için bu çalışmaya da dahil edilmiştir [Procter ve Khaffaf (1984) , Ivanov (2015)].

3.3.1 Kum Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi

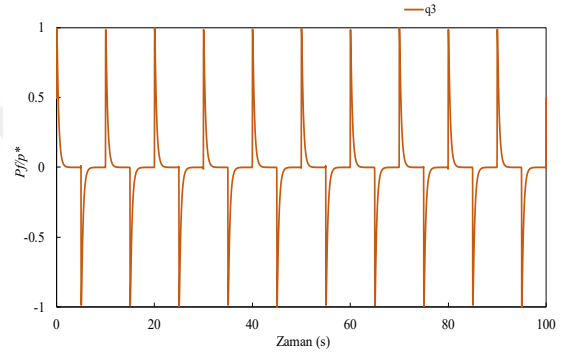
Kum zemin için sabit yük ve beş farklı periyodik yük altında elde edilen p_f/p* sonuçları aşağıdaki Şekil 121'de gösterilmiştir.



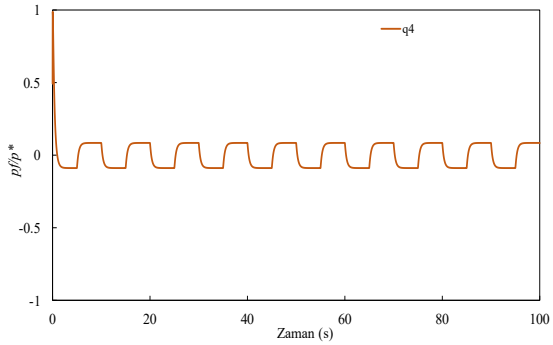
(a) q_1(t)



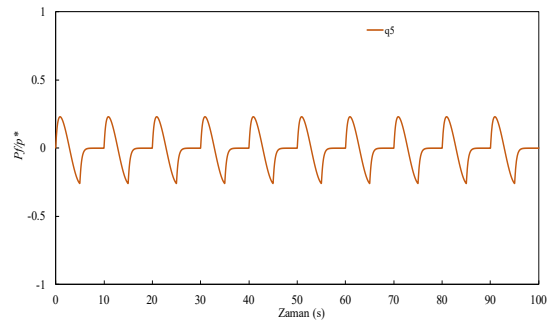
(b) q_2(t)



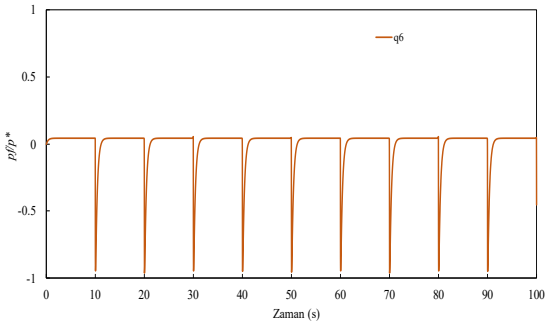
(c) q_3(t)



(ç) q_4(t)



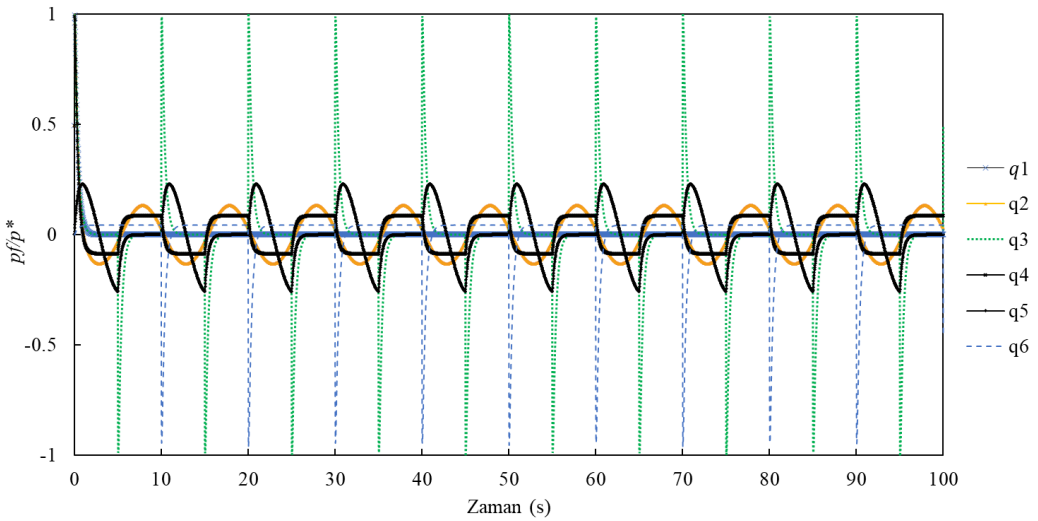
(d) q_5(t)



(e) q_6(t)

Şekil 121. Kum zemin için zamanla değişen dış yükler altında p_f/p * değerlerinin zamanla değişimi

Uygulanan zamanla değişen dış yükler altında elde edilen sonuçlar kum zemin için Şekil 122'de karşılaştırılmıştır.

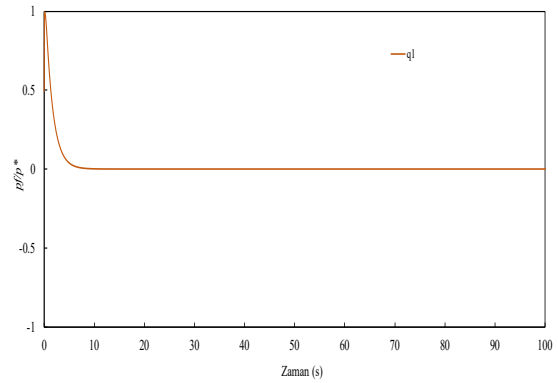


Şekil 122. Kum zemin için zamanla değişen dış yükler altında p_f/p^* değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması

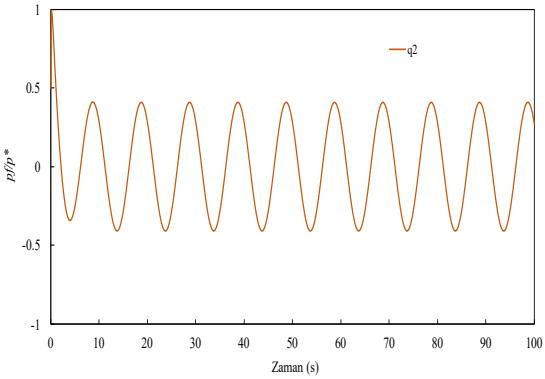
Şekil 122'de gösterilen zaman aralığı 100 saniye olarak alınmıştır. Davranışın daha iyi incelenebilmesi için bu zaman aralığı her bir periyodun 10 saniye olan yükler için kullanılmıştır. Şekil 122'de görüldüğü gibi, karşılaştığından yük fonksiyonları açısından kare dalga tipi yük q_3(t) fonksiyon için p_f/p^* değerlerinin en büyük değer aldığı anlaşılmıştır.

3.3.2 Lemli Kum Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi

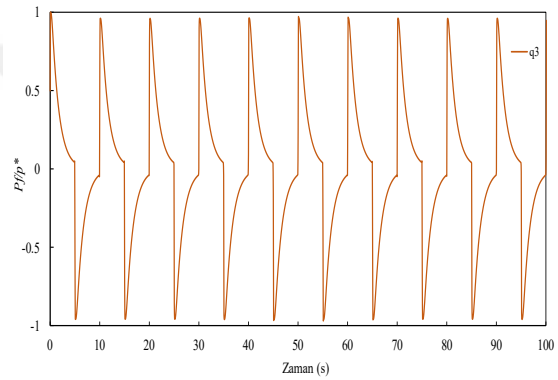
Lemli kum zemin için zaman uzayında sabit yük ve beş farklı periyodik yük altında elde edilen p_f/p^* sonuçları aşağıdaki Şekil 123'te gösterilmiştir.



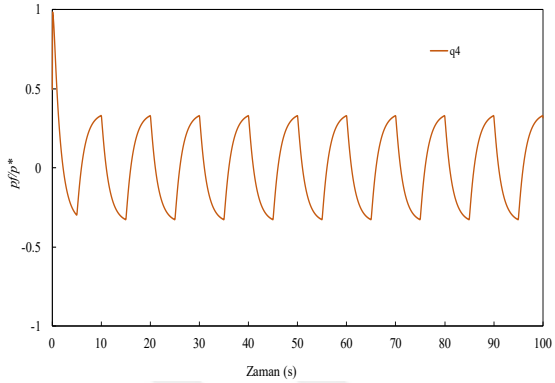
(a) q_1(t)



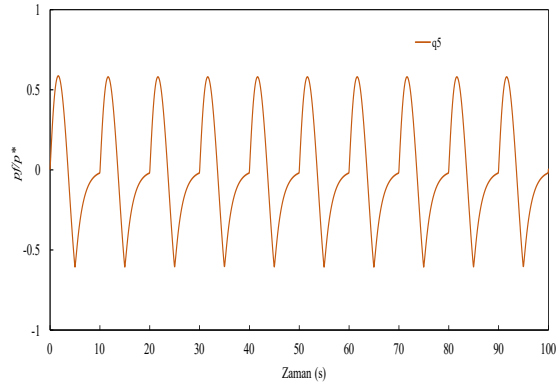
(b) q_2(t)



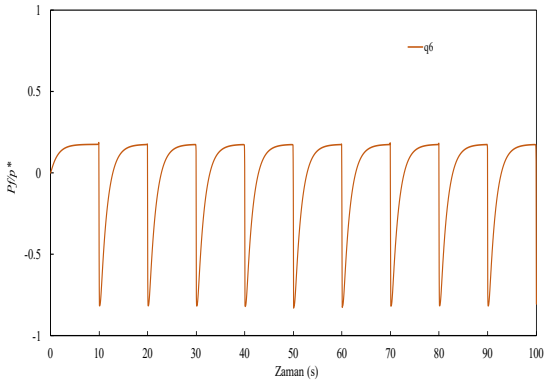
(c) q_2(t)



(ç) q_4(t)



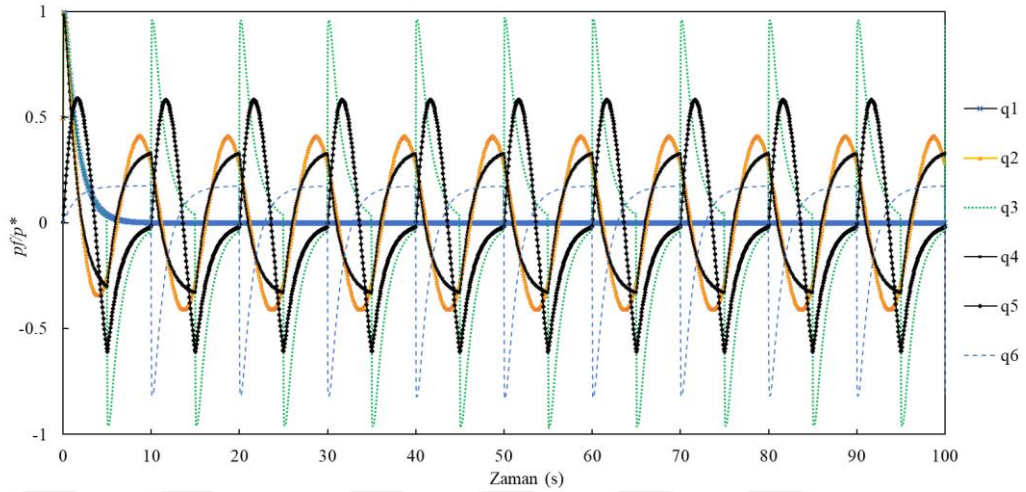
(d) q_5(t)



(e) q_6(t)

Şekil 123. Lemli kum zemin için zamanla değişen dış yükler altında p_f/p * değerlerinin zamanla değişimi

Uygulanan zamanla değişen dış yükler altında elde edilen sonuçlar lemli kum zemin için Şekil 124'te karşılaştırılmıştır.

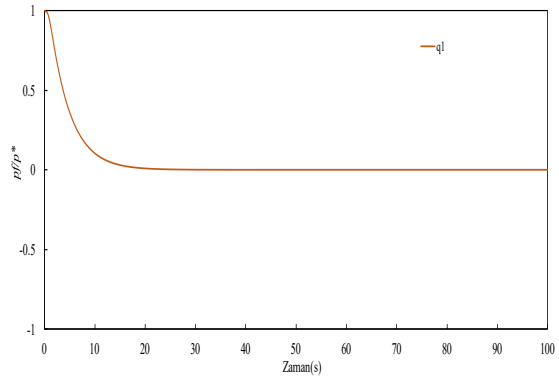


Şekil 124. Lemli kum zemin için zamanla değişen dış yükler altında p_f/p * değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması

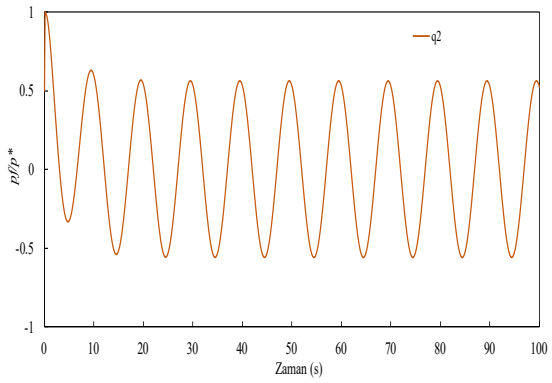
Şekil 124'te gösterilen zaman aralığı 100 saniye olarak alınmıştır. Davranışın daha iyi incelenebilmesi için bu zaman aralığı her bir periyodun 10 saniye olan yükler için kullanılmıştır. Şekil 124'te görüldüğü gibi, karşılaştığından yük fonksiyonları açısından kare dalga tipi yük q_3(t) fonksiyon için p_f/p* değerlerinin en büyük değer aldığı anlaşılmıştır.

3.3.3 Kumlu Lem Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi

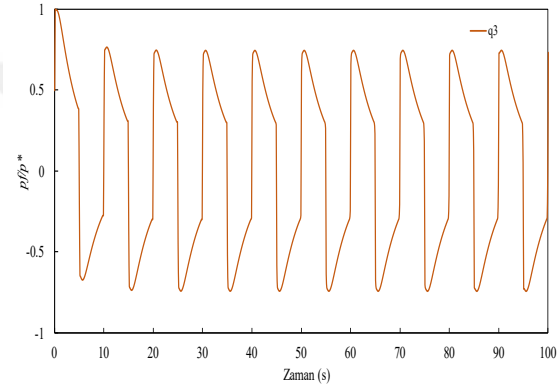
Kumlu lem zemin için zaman uzayında sabit yük ve beş farklı periyodik yük altında elde edilen p_f/p* sonuçları aşağıdaki Şekil 125'te gösterilmiştir.



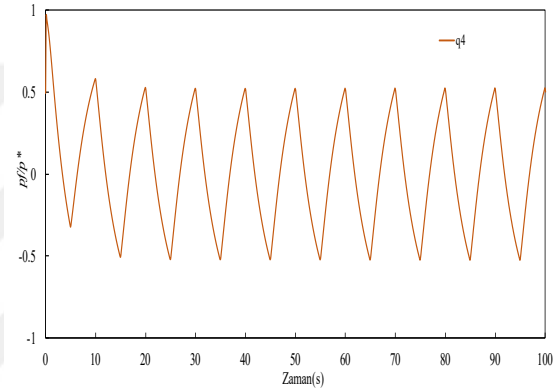
(a) q_1(t)



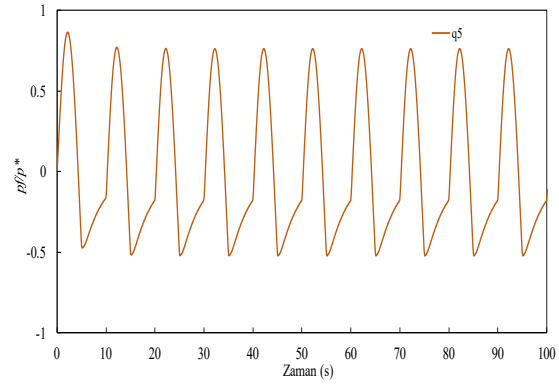
(b) q_2(t)



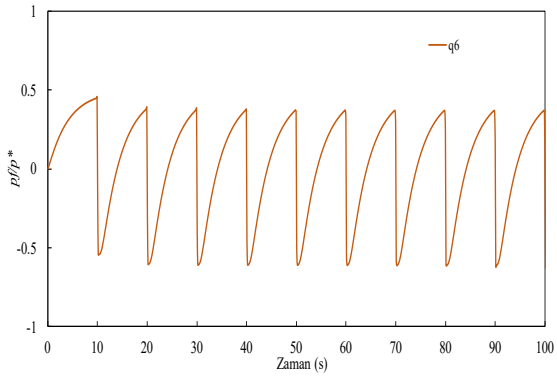
(c) q_3(t)



(ç) q_4(t)



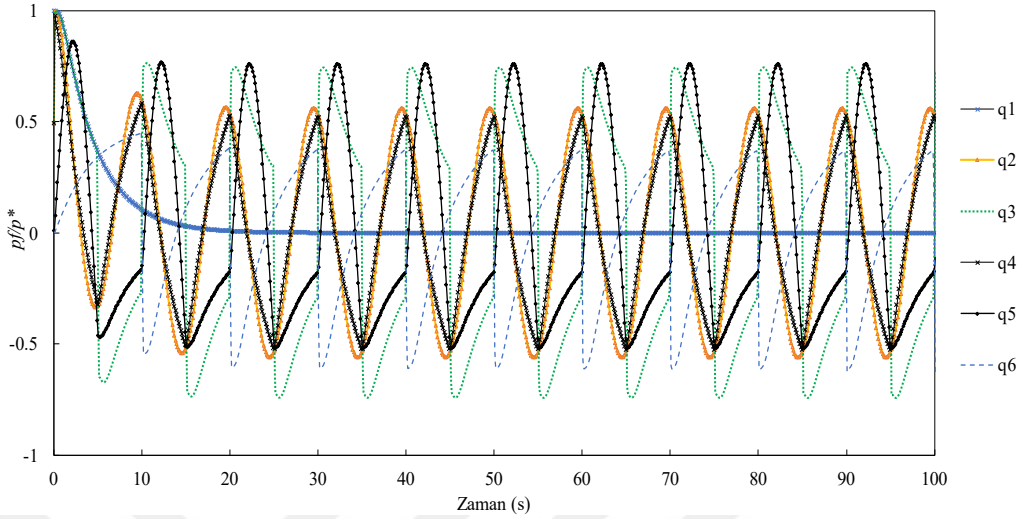
(d) q_5(t)



(e) q_6(t)

Şekil 125. Kumlu lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

Uygulanan zamanla değişen dış yükler altında elde edilen sonuçlar kumlu lem zemin için şekil 126'da karşılaştırılmıştır.

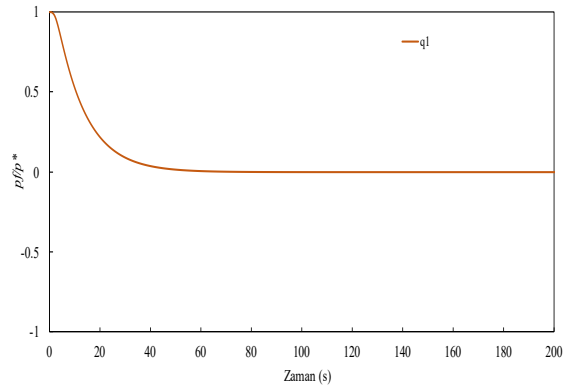


Şekil 126. Kumlu lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması

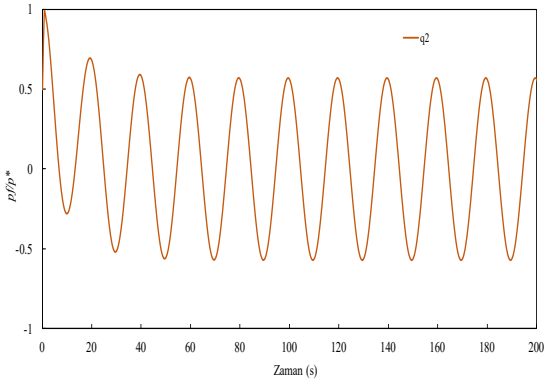
Şekil 126'da gösterilen zaman aralığı 100 saniye olarak alınmıştır. Davranışın daha iyi incelenebilmesi için bu zaman aralığı her bir periyodun 10 saniye olan yükler için kullanılmıştır. Şekil 126'da görüldüğü gibi karşılaştığından yük fonksiyonları açısından, yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) fonksiyon için $p_f/p*$ değerlerinin en büyük değer alıp ve kare dalga tipi periyodik q_3(t) yükü altındaki $p_f/p*$ değerlerine yakındır.

3.3.4 Lem Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi

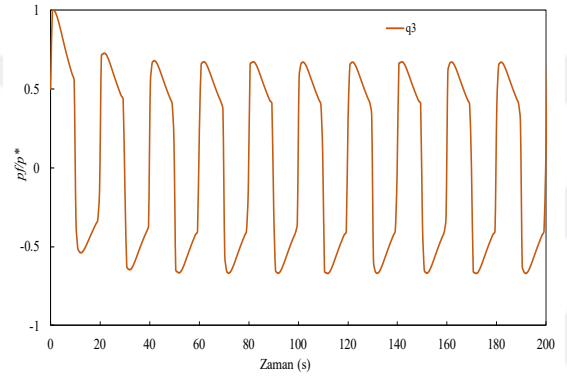
Lem zemin için zaman uzayında sabit yük ve beş farklı periyodik yük altında elde edilen $p_f/p*$ sonuçları aşağıdaki Şekil 127'de gösterilmiştir.



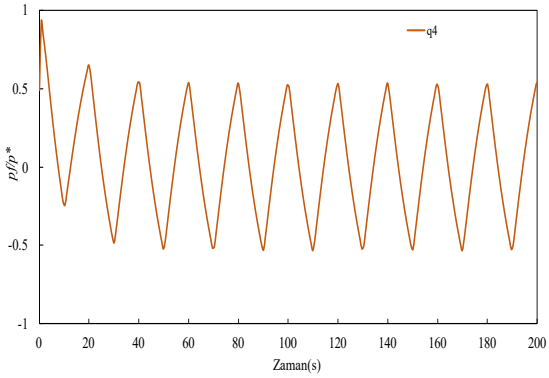
(a) q_1(t)



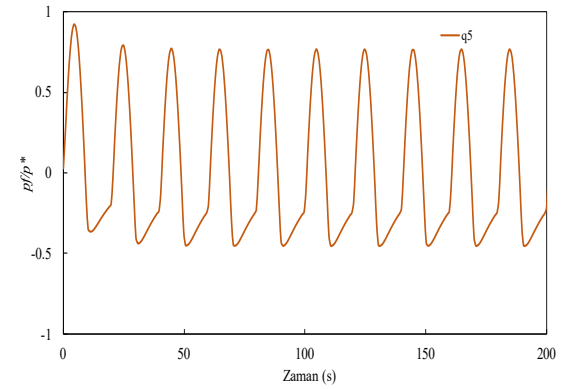
(b) q_2(t)



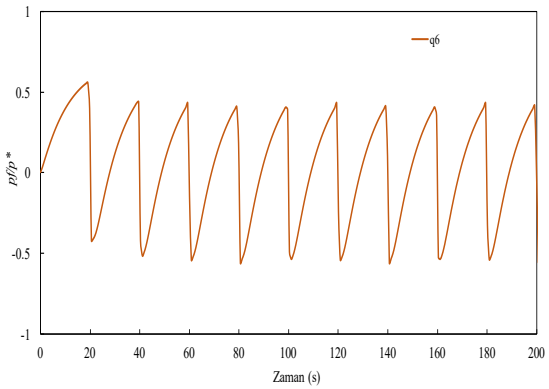
(c) q_3(t)



(ç) q_4(t)



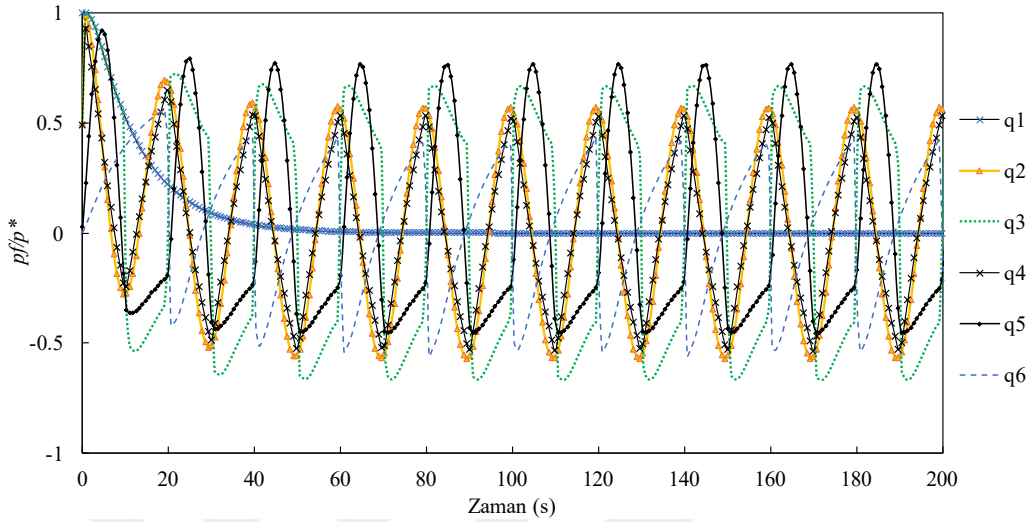
(d) q_5(t)



(e) q_6(t)

Şekil 127. Lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

Uygulanan zamanla değişen dış yükler altında elde edilen sonuçlar lem zemin için Şekil 128'de karşılaştırılmıştır.

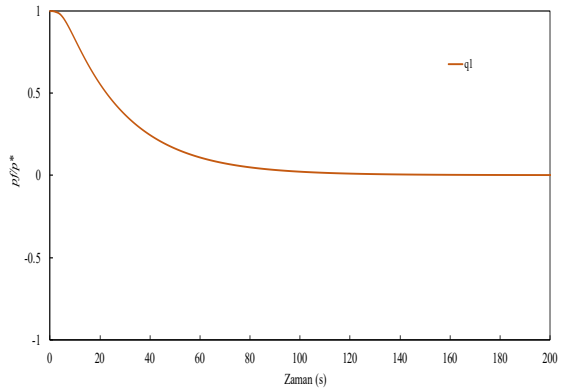


Şekil 128. Lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması

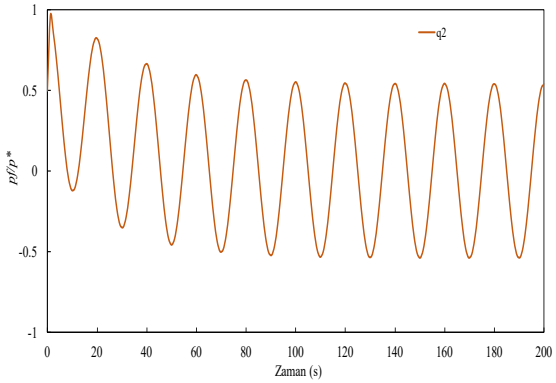
Şekil 128'de gösterilen zaman aralığı 200 saniye olarak alınmıştır. Davranışın daha iyi incelenebilmesi için bu zaman aralığı her bir periyodun 20 saniye olan yükler için kullanılmıştır. Şekil 128'de görüldüğü gibi karşılaştığından yük fonksiyonları açısından, yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) fonksiyon için $p_f/p*$ değerlerinin en büyük değer aldığı anlaşılmıştır.

3.3.5 Silt Lem Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi

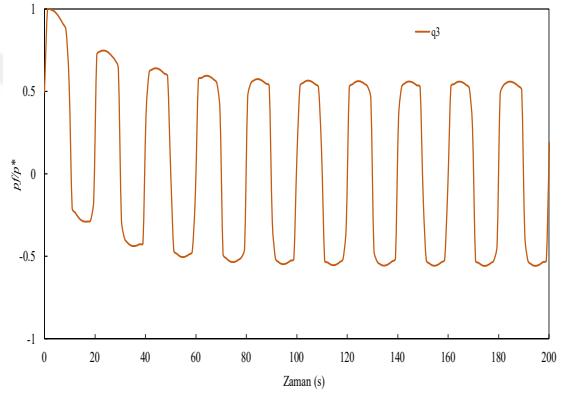
Silt lem zemin için sabit yük ve beş farklı periyodik yük altında elde edilen $p_f/p*$ sonuçları Şekil 129'da gösterilmiştir.



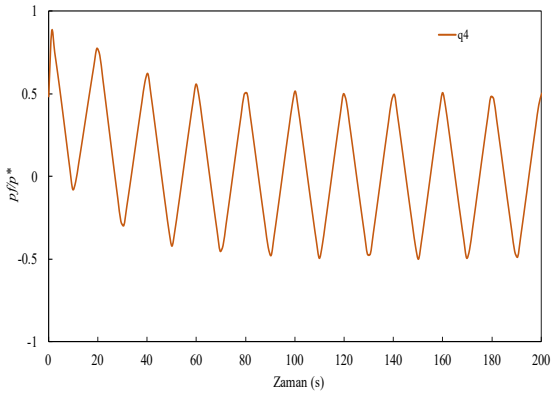
(a) q_1(t)



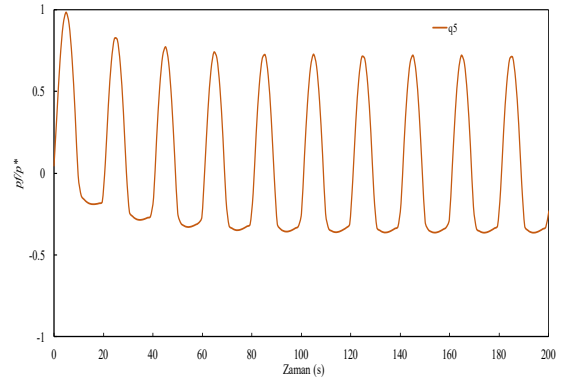
(b) q_2(t)



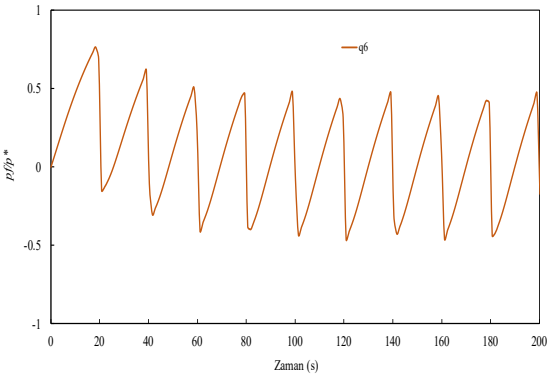
(c) q_3(t)



(ç) q_4(t)



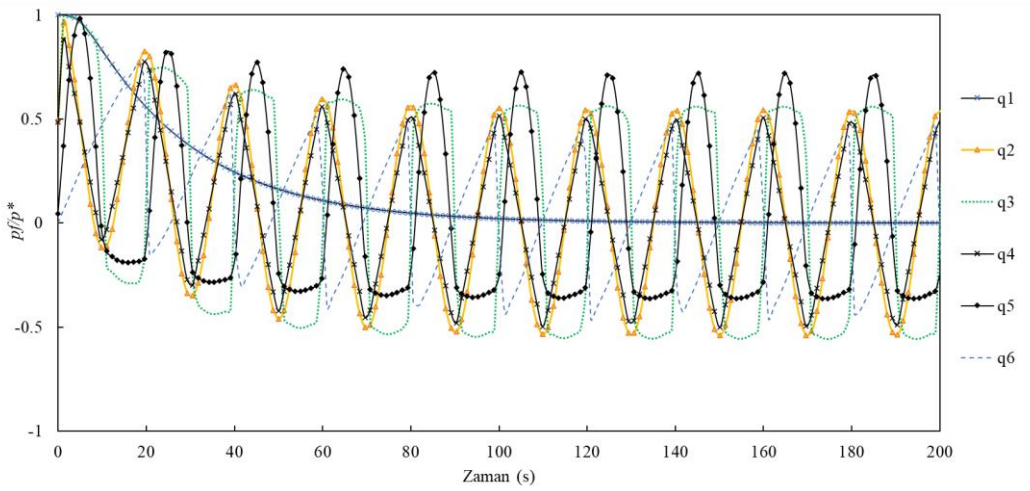
(d) q_5(t)



(e) q_6(t)

Şekil 129. Silt lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

Uygulanan zamanla değişen dış yükler altında elde edilen sonuçlar silt lem zemin için Şekil 130'da karşılaştırılmıştır.

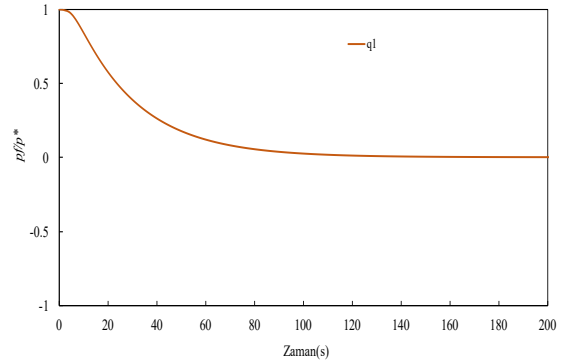


Şekil 130. Silt lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması

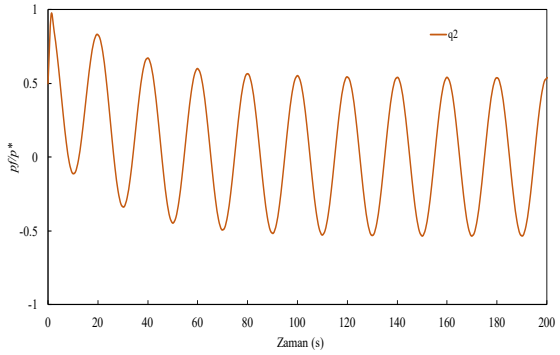
Şekil 130'da gösterilen zaman aralığı 200 saniye olarak alınmıştır. Davranışın daha iyi incelenebilmesi için bu zaman aralığı her bir periyodun 20 saniye olan yükler için kullanılmıştır. Şekil 130'da görüldüğü gibi karşılaştığından yük fonksiyonları açısından, yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) fonksiyon için $p_f/p*$ değerlerinin en büyük değer aldığı anlaşılmıştır.

3.3.6 Kumlu Kil Lem Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi

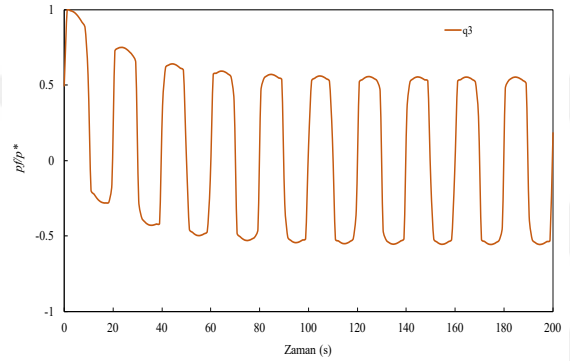
Kumlu kil lem zemin için zaman uzayında sabit yük ve beş farklı periyodik yük altında elde edilen $p_f/p*$ sonuçları aşağıdaki Şekil 131'de gösterilmiştir.



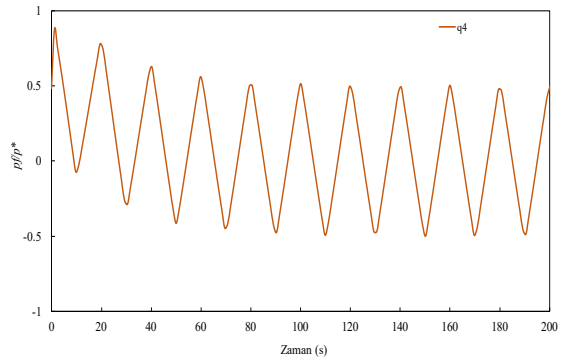
(a) q_1(t)



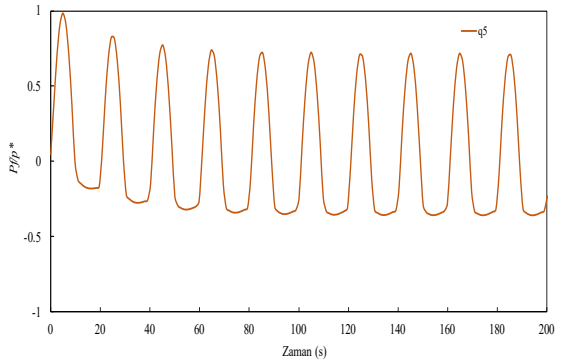
(b) q_2(t)



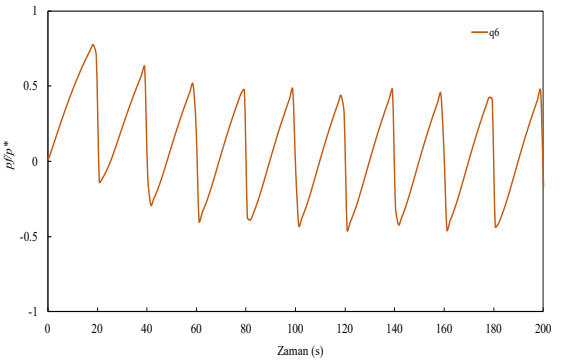
(c) q_3(t)



(ç) q_4(t)



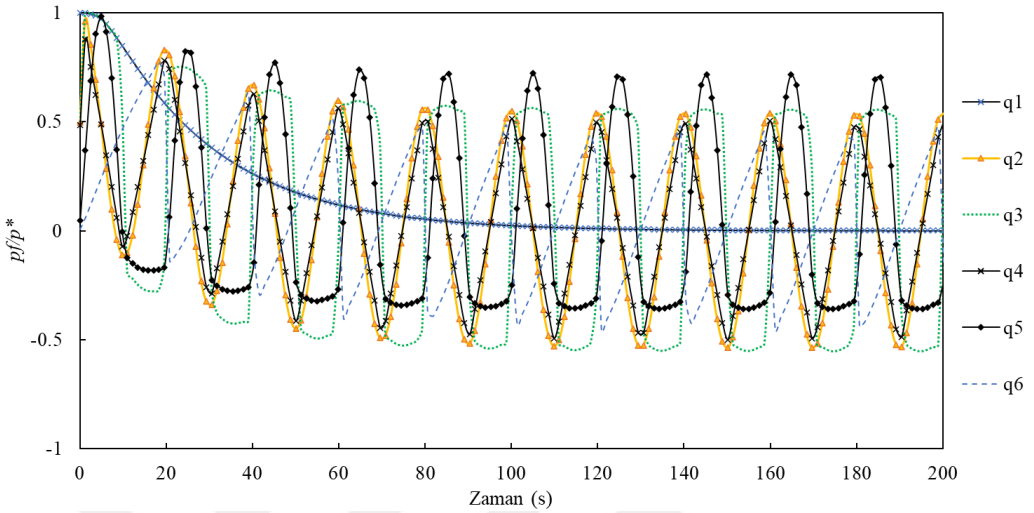
(d) q_5(t)



(e) q_6(t)

Şekil 131. Kumlu kil lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

Uygulanan zamanla değişen dış yükler altında elde edilen sonuçlar kumlu kil lem zemin için Şekil 132'de karşılaştırılmıştır.

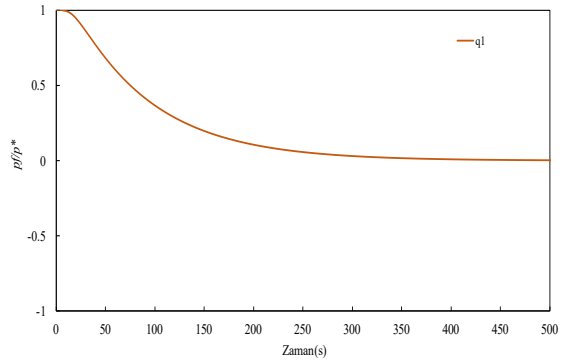


Şekil 132. Kumlu kil lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması

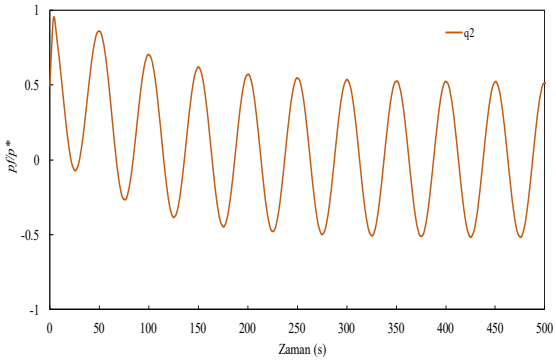
Şekil 132'de gösterilen zaman aralığı 200 saniye olarak alınmıştır. Davranışın daha iyi incelenebilmesi için bu zaman aralığı her bir periyodun 20 saniye olan yükler için kullanılmıştır. Kumlu kil lem zemin için yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) altında $p_f/p*$ değerlerinin en büyük değer aldığı anlaşılmıştır.

3.3.7 Kil Lem Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi

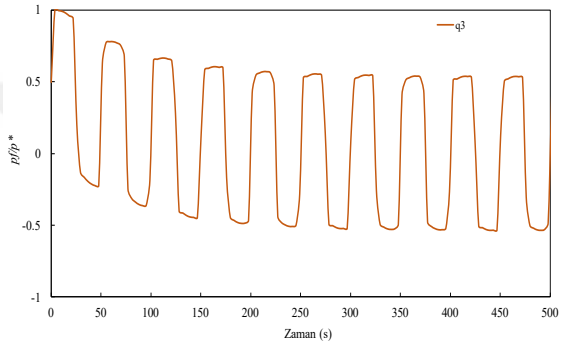
Kil lem zemin için zaman uzayında sabit yük ve beş farklı periyodik yük altında elde edilen $p_f/p*$ sonuçları aşağıdaki Şekil 133'te gösterilmiştir.



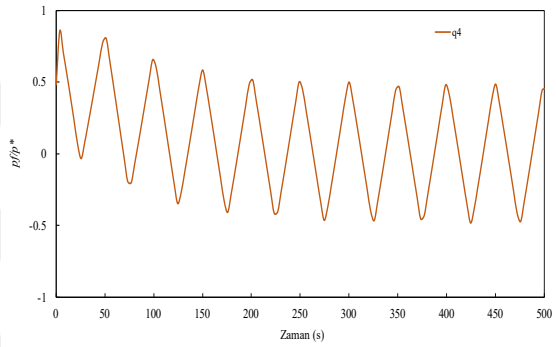
(a) q_1(t)



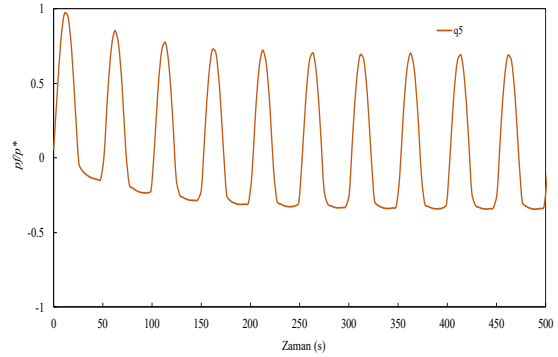
(b) q_2(t)



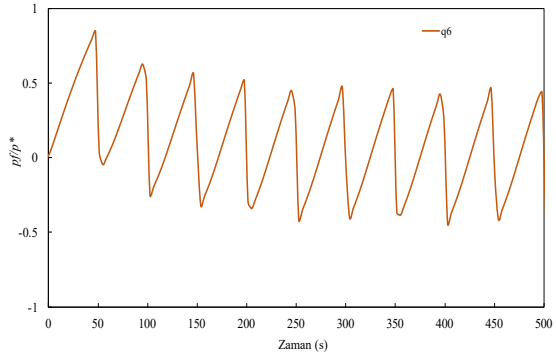
(c) q_3(t)



(ç) q_4(t)



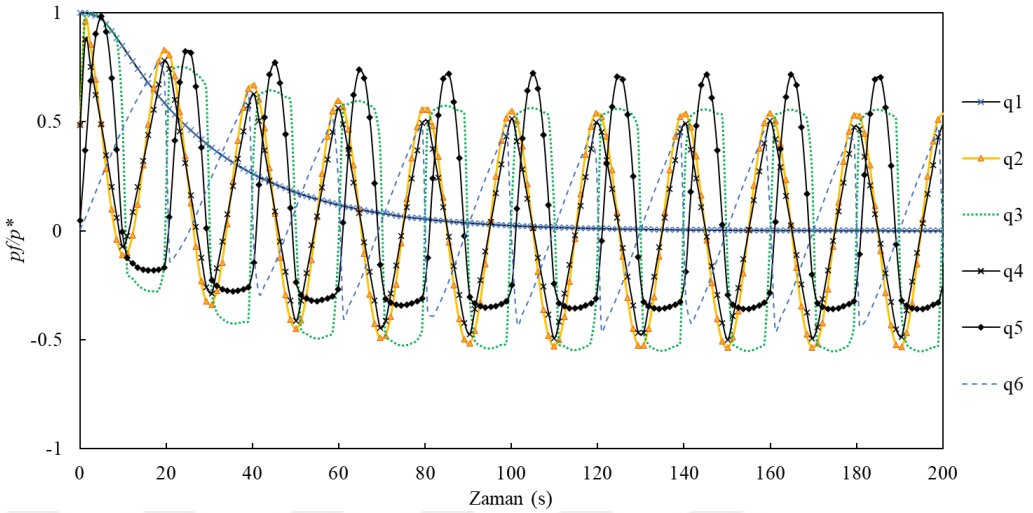
(d) $\boldsymbol{q_5}$(t)



(e) $\boldsymbol{q_6}$(t)

Şekil 133. Kil lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

Uygulanan zamanla değişen dış yükler altında elde edilen sonuçlar kil lem zemin için Şekil 134'te karşılaştırılmıştır.

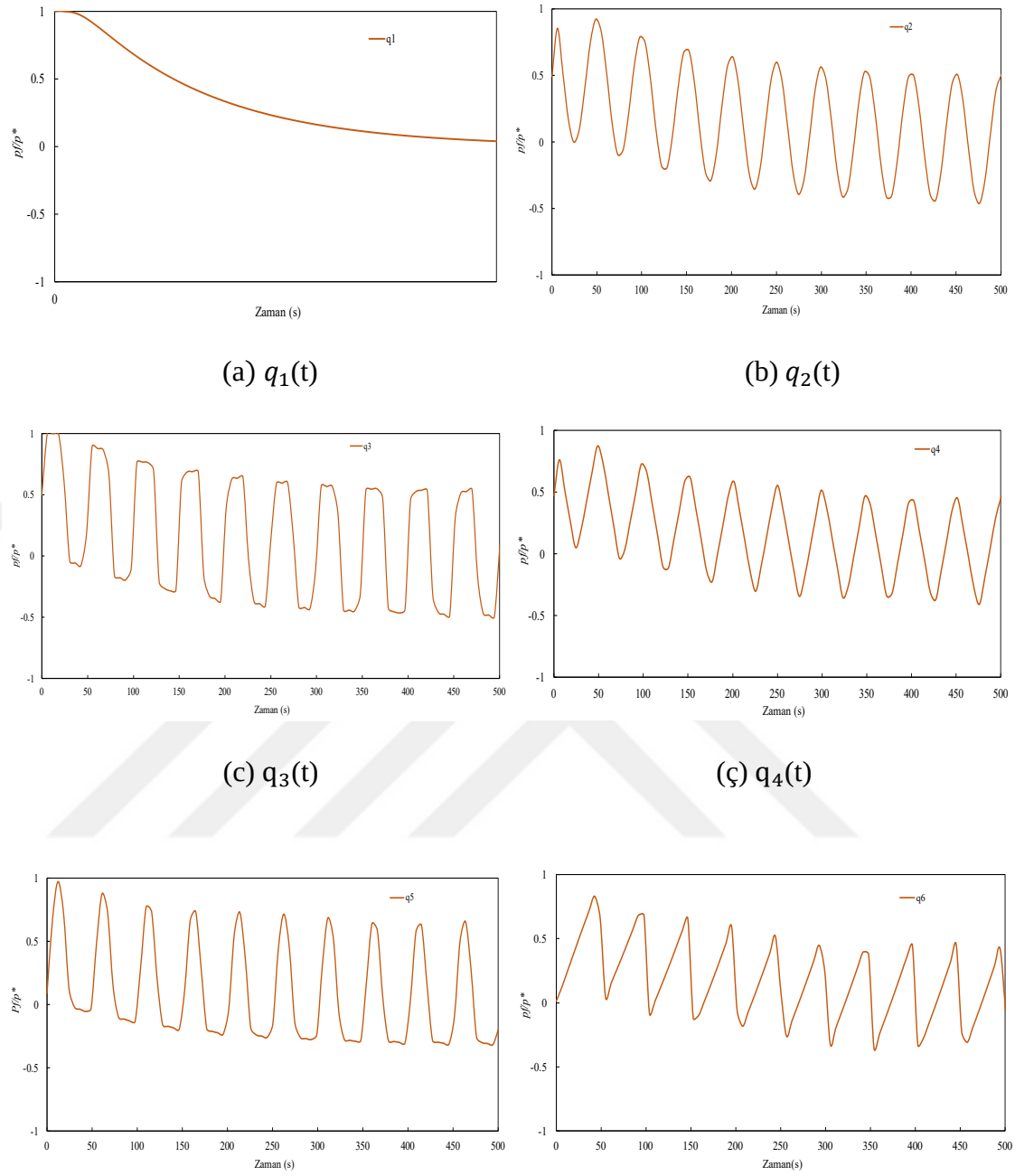


Şekil 134. Kil lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimini karşılaştırılması

Şekil 134'te gösterilen zaman aralığı 200 saniye olarak alınmıştır. Davranışın daha iyi incelenebilmesi için bu zaman aralığı her bir periyodun 20 saniye olan yükler için kullanılmıştır. Şekil 134'te görüldüğü gibi karşılaştığından yük fonksiyonları açısından, yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) fonksiyon için $p_f/p*$ değerlerinin en büyük değer aldığı anlaşılmıştır.

3.3.8 Siltli Kil Lem Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi

Siltli kil lem zemin için zaman uzayında sabit yük ve beş farklı periyodik yük altında elde edilen $p_f/p*$ sonuçları aşağıdaki Şekil 135'te gösterilmiştir.



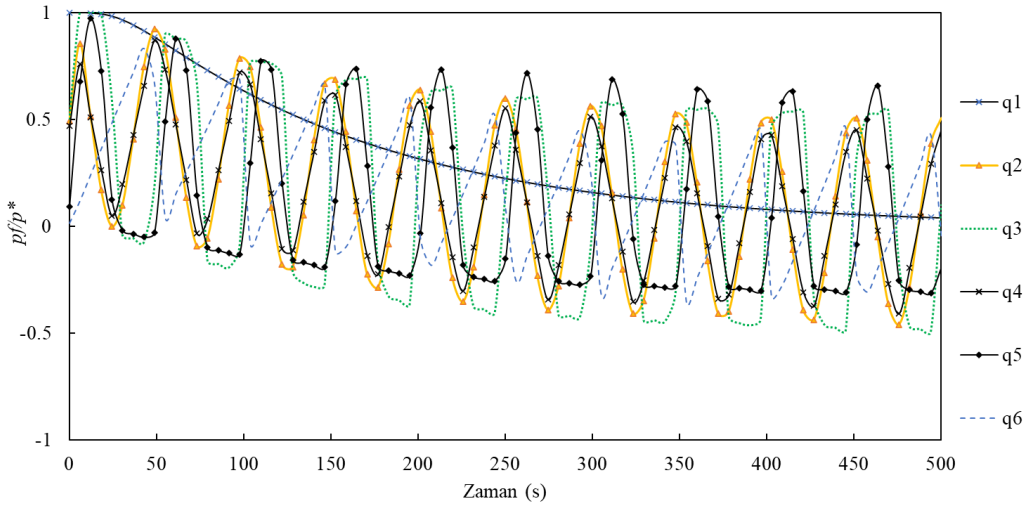
(a) q_1(t) (b) q_2(t)

(c) q_3(t) (ç) q_4(t)

(d) q_5(t) (e) q_6(t)

Şekil 135. Siltli kil lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

Uygulanan zamanla değişen dış yükler altında elde edilen sonuçlar siltli kil lem zemin için şekil 136'da karşılaştırılmıştır.

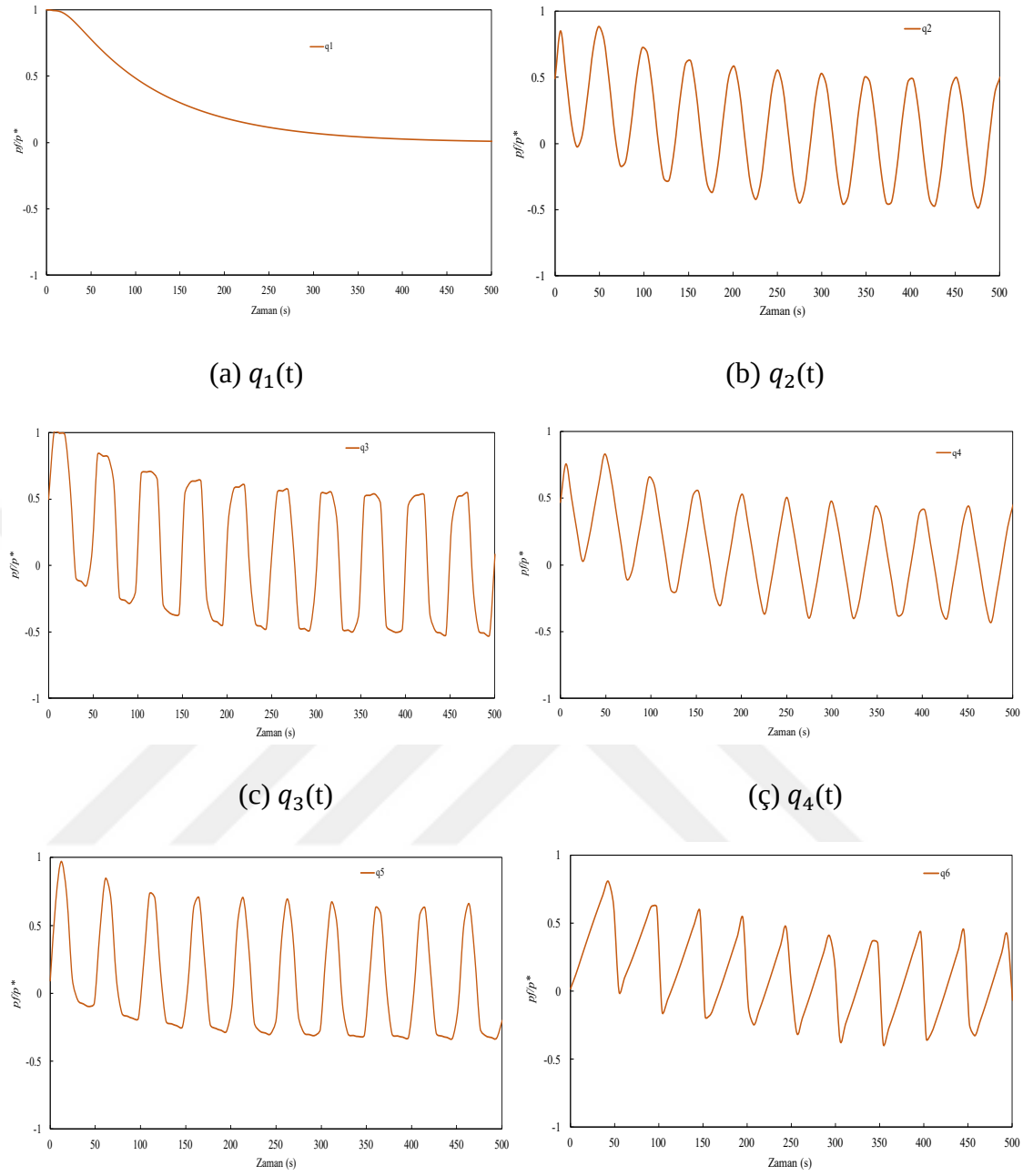


Şekil 136. Siltli kil lem zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması

Şekil 136'da gösterilen zaman aralığı 500 saniye olarak alınmıştır. Davranışın daha iyi incelenebilmesi için bu zaman aralığı her bir periyodun 50 saniye olan yükler için kullanılmıştır. Şekil 136'da görüldüğü gibi karşılaştığından yük fonksiyonları açısından, yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) fonksiyon için $p_f/p*$ değerlerinin en büyük değer aldığı anlaşılmıştır.

3.3.9 Kumlu Kil Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi

Kumlu kil zemin için zaman uzayında sabit yük ve beş farklı periyodik yük altında elde edilen $p_f/p*$ sonuçları aşağıdaki Şekil 137'de gösterilmiştir.



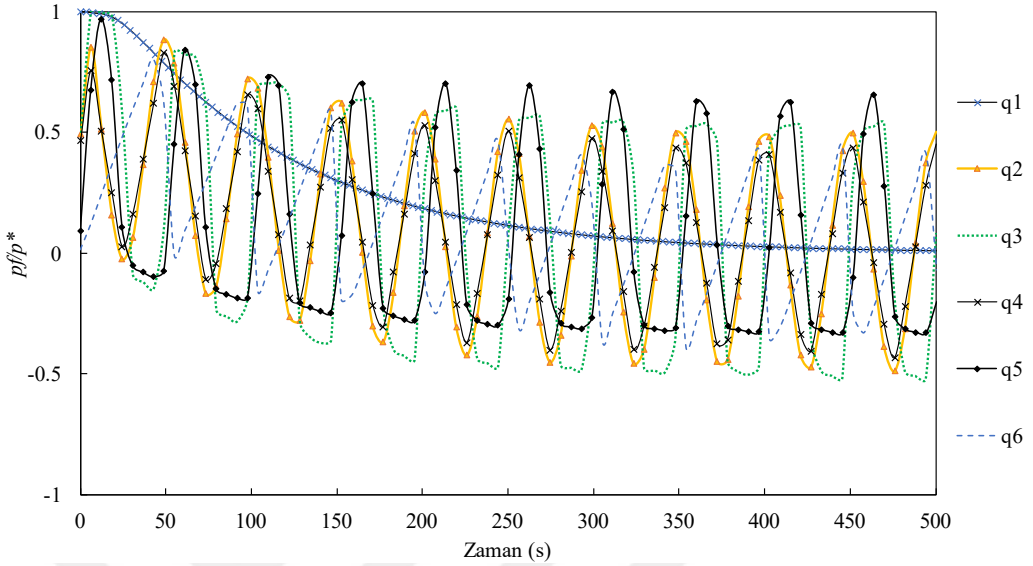
(a) q_1(t) (b) q_2(t)

(c) q_3(t) (ç) q_4(t)

(d) q_5(t) (e) q_6(t)

Şekil 137. Kumlu kil zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

Uygulanan zamanla değişen dış yükler altında elde edilen sonuçlar kumlu kil zemin için Şekil 138'de karşılaştırılmıştır.

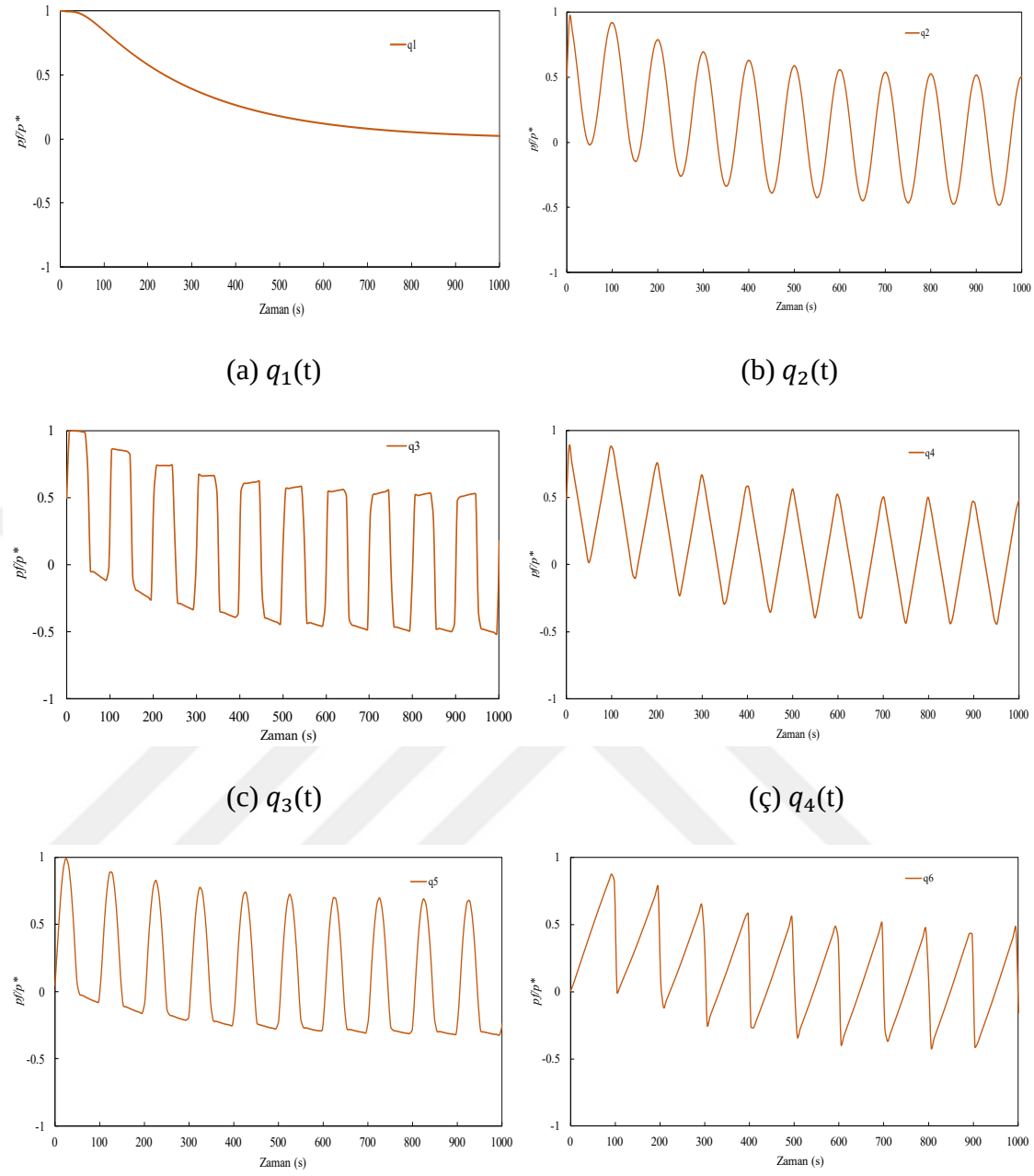


Şekil 138. Kumlu kil zemin için zamanla değişen dış yükler altında p_f/p^* değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması

Şekil 138'de gösterilen zaman aralığı 500 saniye olarak alınmıştır. Davranışın daha iyi incelenebilmesi için bu zaman aralığı her bir periyodun 50 saniye olan yükler için kullanılmıştır. Şekil 138'de görüldüğü gibi karşılaştığından yük fonksiyonları açısından, yarım sinüs dalga tipi periyodik yük $q_5(t)$ fonksiyon için p_f/p^* değerlerinin en büyük değer aldığı anlaşılmıştır.

3.3.10 Siltli Kil Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi

Siltli kil zemin için zaman uzayında sabit yük ve beş farklı periyodik yük altında elde edilen p_f/p^* sonuçları aşağıdaki Şekil 139'da gösterilmiştir.



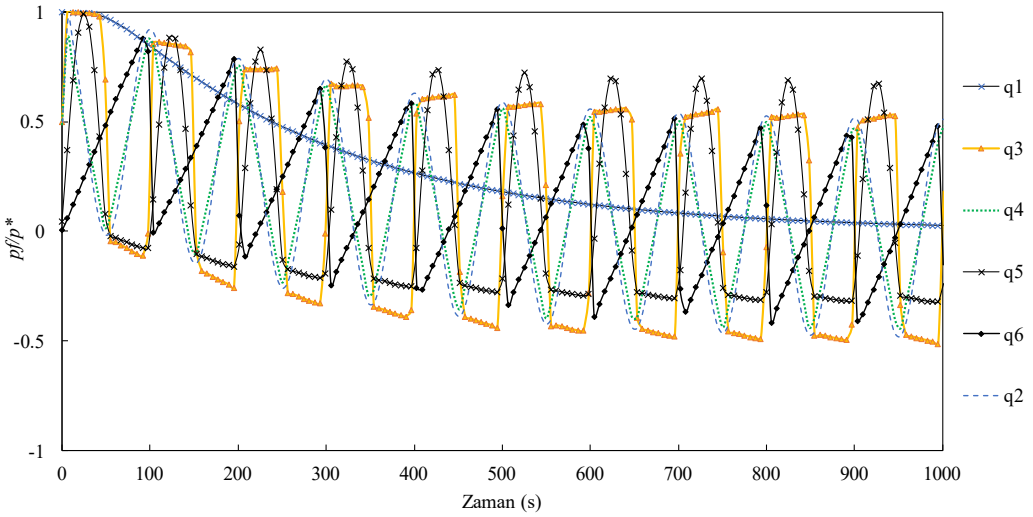
(a) q_1(t) (b) q_2(t)

(c) q_3(t) (ç) q_4(t)

(d) q_5(t) (e) q_6(t)

Şekil 139. Siltli kil zemin için zamanla değişen dış yükler altında p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

Uygulanan zamanla değişen dış yükler altında elde edilen sonuçlar siltli kil zemin için Şekil 140'ta karşılaştırılmıştır.

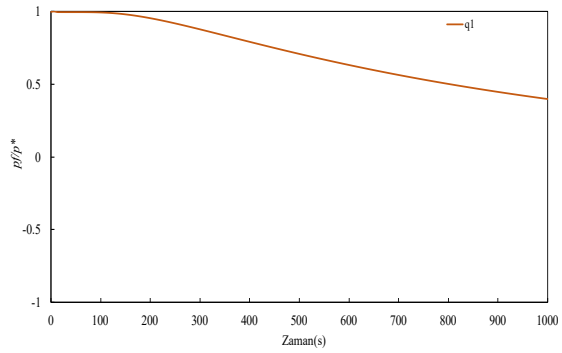


Şekil 140. Siltli kil zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması

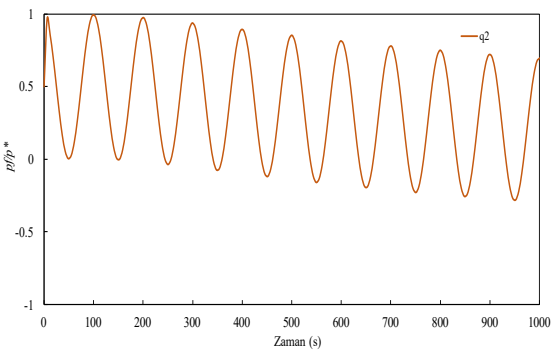
Şekil 140'ta gösterilen zaman aralığı 1000 saniye olarak alınmıştır. Davranışın daha iyi incelenebilmesi için bu zaman aralığı her bir periyodun 100 saniye olan yükler için kullanılmıştır. Şekil 140'ta görüldüğü gibi karşılaştığından yük fonksiyonları açısından, yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) fonksiyon için $p_f/p*$ değerlerinin en büyük değer aldığı anlaşılmıştır.

3.3.11 Kil Zemin İçin Farklı Periyodik Yüklerin Etkisi

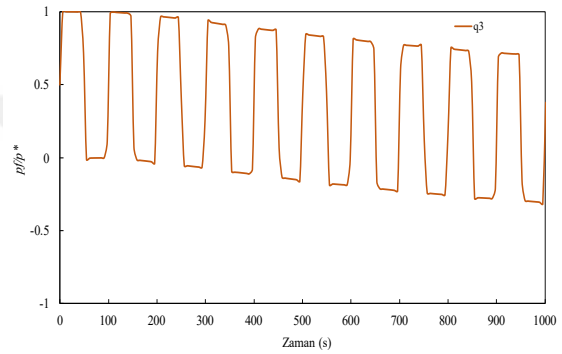
Kil zemin için zaman uzayında sabit yük ve beş farklı periyodik yük altında elde edilen $p_f/p*$ sonuçları aşağıdaki Şekil 141'de gösterilmiştir.



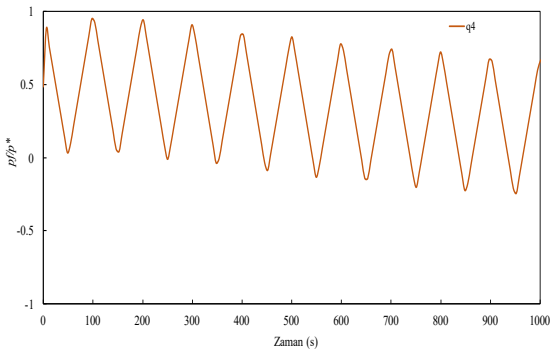
(a) q_1(t)



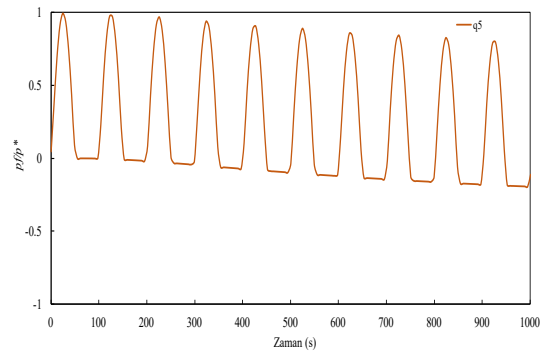
(b) q_2(t)



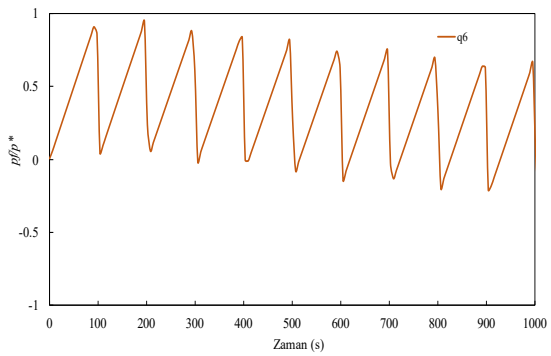
(c) q_3(t)



(ç) q_4(t)



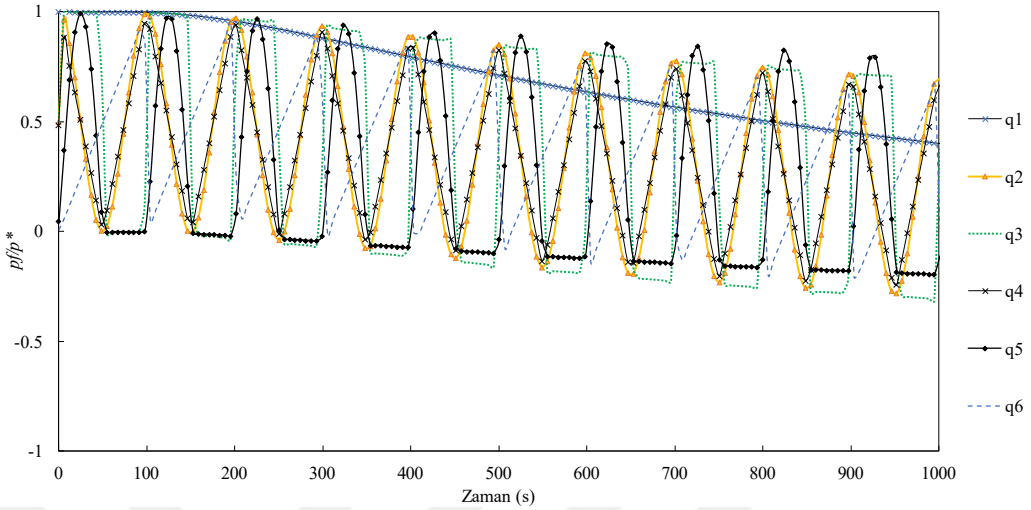
(d) q_5(t)



(e) q_6(t)

Şekil 141. Kil zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişimi

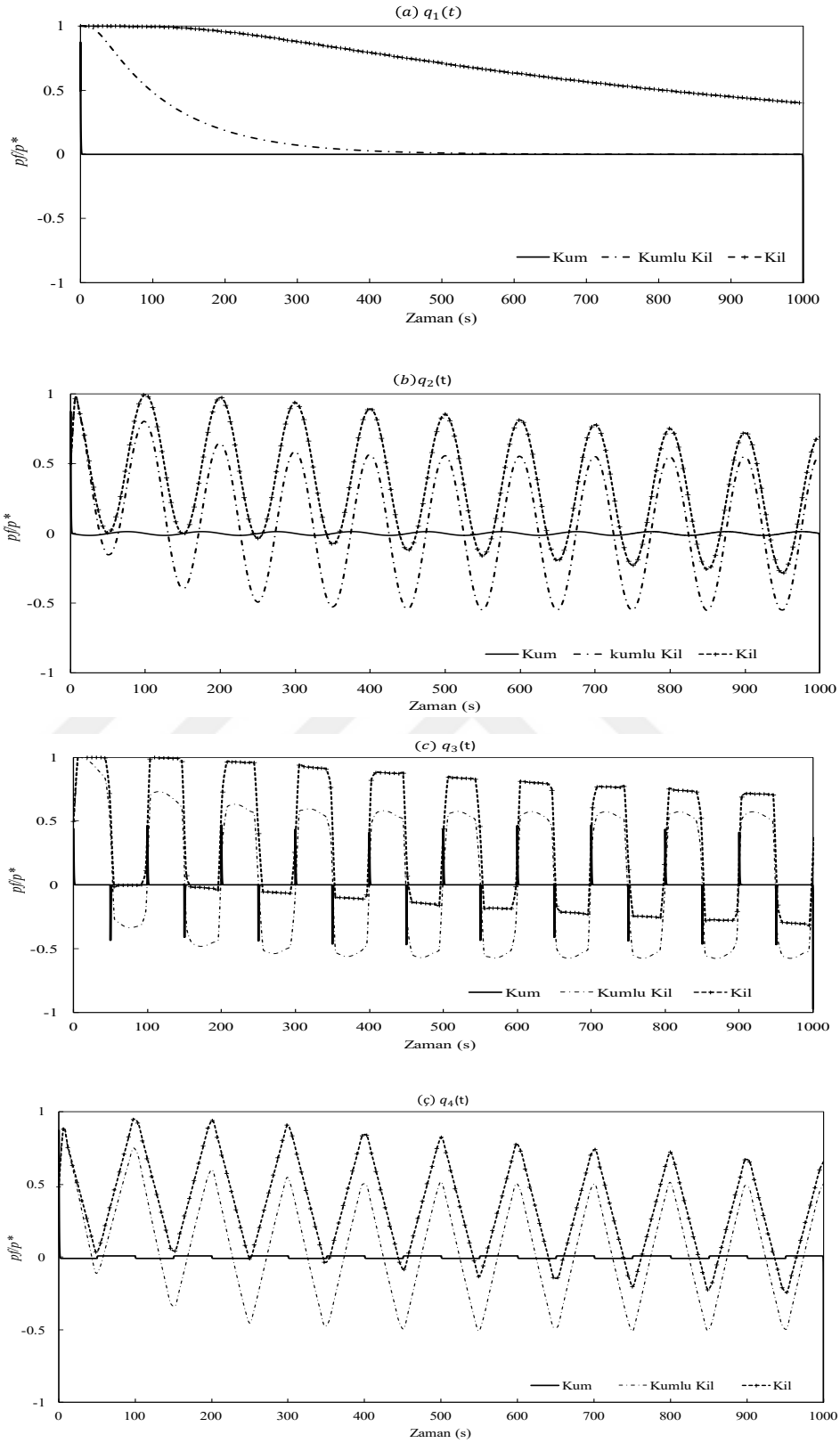
Uygulanan zamanla değişen dış yükler altında elde edilen sonuçlar kil zemin için şekil 142'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 142. Kil zemin için zamanla değişen dış yükler altında $p_f/p*$ değerlerinin zamanla değişiminin karşılaştırılması

Şekil 142'de gösterilen zaman aralığı 1000 saniye olarak alınmıştır. Davranışın daha iyi incelenebilmesi için bu zaman aralığı her bir periyodun 100 saniye olan yükler için kullanılmıştır. Karşılaştığından yük fonksiyonları açısından $p_f/p*$ değerlerinine ait grafikleri yaklaşık olarak aynı değerlerde salınmaktadır.

$p_f/p*$ 'nin tam davranışını ve tepkisini anlamak için kumlu, kumlu kil ve kil olmak üzere üç farklı zemin türü, dört farklı zamana bağlı yük altında Şekil 143 incelenmiştir. Her tür için Zaman aralığı 1000 saniye olarak alınmıştır. Davranışın daha iyi incelenebilmesi için bu zaman aralığı her bir periyodun 100 saniye olan yükler için kullanılmıştır. Şeki 143 (a durumu) , sabit q_1(t) yükü altında fazla boşluk suyu basıncının dağılımı kumlu zeminde tamamlanırken killi zeminde tam değildir. Bu eğri Terzaghi'nin kesin çözümüne benzemektedir. q_2(t) , q_3(t) ve q_4(t) durumu 1000 saniye zamanında, kum grafiğine ait $p_f/p*$ değerleri dağılımının neredeyse tamamlandığı, ancak killi ve kumlu killi zeminlerde periyodik tepkinin belirgin kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, $p_f/p*$ salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.



Şekil 143. Sabit yük q_1(t), kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t), kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) ve üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) altında kum, kumlu kil, kil zemin için p_f/p^* değerlerinin zamanla değişimi

SONUÇLAR

Bu çalışmada, tek boyutlu konsolidasyon zemin probleminin çözülmesi ve fazla boşluk suyu basıncı p_f sonuçları elde edilmesi için önerilen yöntem ilk kez sunulmuştur. Kısmi bir diferansiyel denklem olan tek boyutlu konsolidasyon denklemi çözmek ve onu adi diferansiyel denkleme dönüştürmek için TFY ile Laplace dönüşümünü birlikte kullanılmıştır. Bu çalışmada, p_f'nin sonuçlarını elde etmek için on bir adet farklı zemin türü ve altı farklı zamana bağlı yük fonksiyon kullanılmıştır ve bu amaç ile Fortran dilinde bir programı hazırlanmıştır.

Bu tezde önerilen metodun esasları doğrultusunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. TFY olayı idare eden diferansiyel denklemler esas alınmış ve bu yöntem ile sınır değer problemleri başlangıç değer problemlere indirgenerek çözülmüştür. Olayı idare eden kanonik denklemler öncelikle Laplace dönüşümünü kullanarak Laplace uzayına transfer edilmiştir, daha sonra bu çalışmada önerilen metodun uygulanabilmesi için Laplace uzayında elde edilen sonuçlar ters Laplace dönüşümü ile zaman uzayına transfer edilmiştir.
2. Sabit yük q_1(t) altında killi zemin için elde edilen p_f/p^* değerinin zamanla değişim eğrisi, Terzaghi'nin kesin çözümüne benzerdir ve önerilen yöntemin etkinliğini kanıtlamaktadır.
3. Bu çalışmada elde edilen p_f/p^* sonuçları, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıldığında büyük bir uyum göstermiştir. Böylece önerilen yöntemin olayları idare eden kanonik denklemlerin çözümünde etkili ve başarılı olduğu kanıtlanmıştır. Bu karşılaştırma, önerilen çözümün güvenilir, daha geniş uygulanabilirliğe sahip olduğunu ve zeminlerin zamana bağlı yükleme altındaki tek boyutlu konsolidasyon davranışını analiz etmek için uygun olduğunu göstermektedir.
4. Bu tezde, zemin özelliklerinin konsolidasyon üzerine etkisi incelenmiştir. Sabit yük q_1(t) altında farklı zemin tiplerinde p_f/p^* değerinin zamanla giderek azaldığı tespit edilmiştir. Kumlu zeminin geçirgenliği yüksek olduğundan p_f/p^* değerinin zemin tiplerine göre daha hızlı dağılır. Buna karşılık, killi zeminlerin geçirgenliği

düşük olduğundan, p_f/p^*'nin dağılması diğer zeminlere göre daha uzun sürmekte, bu da bu olgunun nispeten daha uzun bir sürede meydana geldiği anlamına gelmektedir.

5. Zemin özelliklerinin konsolidasyon üzerine etkisini incelendiğinde, kosinüs dalga tipi periyodik yük q_2(t), kare dalga tipi periyodik yük q_3(t), üçgen dalga tipi periyodik yük q_4(t) , yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) ve testere dişi dalga tipi periyodik yük q_6(t) yükler altında, kumlu zeminlerde periyodik tepkinin diğer zeminlere göre daha az, killi zeminlerde periyodik tepkinin daha belirgin kaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni yükleme verimliliği, kumlu zemin için 0.989 ve kil zemin için 0.998 değerini almaktadır. Zaman artarken siltli kil ve kil grafiğinin ait sarma eğrisinin daha belirgin olduğu görülmektedir. Ayrıca, p_f/p^* salınımları zamanla sıfırın altına düşmektedir.

   Bu araştırmada, ayrıca aynı zemine sabit q_1(t) ve beş tane farklı tekrarlı yük uygulanmıştır.

   - Kum ve lemli kum zemin için kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) altında ait p_f/p^* değerleri en büyük değer almaktadır.
   - Kumlu lem zemin için yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) altında ait $p_f/p*$ değerleri en büyük değer alıp ve kare dalga tipi periyodik yük q_3(t) altındaki $p_f/p*$ değerlerine yakın olduğu görülmüştür.
   - Lem, silt lem, kumlu kil lem, kil lem, siltli kil lem, kumlu kil, siltli kil zemin için yarım sinüs dalga tipi periyodik yük q_5(t) altında ait $p_f/p*$ değerleri en büyük değer almaktadır.
   - Kil zemin için $p_f/p*$ değerlerinin ait yükler grafikleri yaklaşık olarak aynı değerlerde salınmaktadır.

6. p_f/p^*'nin tam davranışını ve tepkisini anlamak için kumlu, kumlu kil ve kil olmak üzere üç farklı zemin türü, dört farklı zamana bağlı yük altında incelenmiştir. Her tür için zaman aralığı 1000 saniye olarak alınmıştır. Sabit q_1(t) yükü altında fazla boşluk suyu basıncının dağılımı kumlu zeminde tamamlanırken killi zeminde tam değildir. Ayrıca, Negatif basınç yoktur ve bu eğri Terzaghi'nin kesin çözümüne benzemektedir. q_2(t), q_3(t), ve q_4(t), durumu 1000 saniye zamanında, kum zemine

ait p_f/p^* değerler diğer zemine türlerine göre daha az belirgin bir periyodik tepkiye sahip olduğunu, killi zeminlerin ise büyük belirgin bir periyodik tepki gösterdiğini gözlemlenmektedir.

KAYNAKLAR

Arslan, M. H., & Korkmaz, H. H. (2007). What is to be learned from damage and failure of reinforced concrete structures during recent earthquakes in Turkey? *Engineering Failure Analysis*, *14*(1), 1–22.

Biot, M. A. (1941). General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*, *12*(2), 155–164.

Biot, M. A. (1956). Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *28*(2), 179–191.

Biot, M. A. (1962). Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *Journal of Applied Physics*, *33*(4), 1482–1498.

Cai, Y.-Q., Geng, X.-Y., & Xu, C.-J. (2007). Solution of one-dimensional finite-strain consolidation of soil with variable compressibility under cyclic loadings. *Computers and Geotechnics*, *34*(1), 31–40.

Cai, Y., & Geng, X. (2009). Consolidation analysis of a semi-infinite transversely isotropic saturated soil under general time-varying loadings. *Computers and Geotechnics*, *36*(3), 484–492.

Chai, J.-C., Shen, S.-L., Wang, J., & Liu, M. D. (2022). Intermittent cyclic load induced 1D consolidation settlement. *Transportation Geotechnics*, *36*, 100814.

Chen, H.-X., Feng, S.-J., Zhu, Z.-W., Gao, L., Chen, Z.-L., & Wang, S.-R. (2023). One-dimensional self-weight consolidation of layered soil under variable load and semi-permeable boundary condition. *Computers and Geotechnics*, *159*, 105431.

Conte, E., & Troncone, A. (2006). One-dimensional consolidation under general time-dependent loading. *Canadian Geotechnical Journal*, *43*(11), 1107–1116.

Das, B. M., & Sobhan, K. (2002). *Principles of Geotechnical Engineering, SI*. Brooks/Cole-Thomson Learning Inc Boston, MA, USA.

Davis, E. H., & Raymond, G. P. (1965). A non-linear theory of consolidation. *Geotechnique*, *15*(2), 161–173.

Deng, J.-H., Lee, J.-W., & Lo, W. (2019). Closed-form solutions for one-dimensional

consolidation in saturated soils under different waveforms of time-varying external loading. *Journal of Hydrology*, *573*, 395–405.

Ding, P., Xu, R., Ju, L., Qiu, Z., Cheng, G., & Zhan, X. (2021). Semi-analytical analysis of fractional derivative rheological consolidation considering the effect of self-weight stress. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, *45*(8), 1049–1066.

Döndüren, M. sami, Şişik, Ö., & Demiröz, A. (2017). Tarihi yapılarda görülen hasar türleri. *Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, *13*, 45–58.

Feng, J., Ni, P., & Mei, G. (2019). One-dimensional self-weight consolidation with continuous drainage boundary conditions: Solution and application to clay-drain reclamation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, *43*(8), 1634–1652.

Feng, S.-J., Wang, W.-T., Chen, Z.-L., & Chen, H.-X. (2021). Analytical solution to consolidation of accreting soil considering step load and horizontal drainage layers. *Marine Georesources & Geotechnology*, *39*(8), 889–905.

Gibson, R. E. (1958). The progress of consolidation in a clay layer increasing in thickness with time. *Geotechnique*, *8*(4), 171–182.

Hassan, W., & Mohamad, H. (2012). Evaluation of finite element formulation for one-dimensional consolidation. *International Journal of Scientific Engineering and Research*, *3*, 1–5.

Hawlader, B. C., Muhunthan, B., & Imai, G. (2003). Viscosity effects on one-dimensional consolidation of clay. *International Journal of Geomechanics*, *3*(1), 99–110.

Herrmann, R., & El Gendy, M. (2014). A layer equation method for 1-D consolidation under time-dependent reloading. *Ain Shams Engineering Journal*, *5*(4), 1043–1057.

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (1981). *An introduction to geotechnical engineering* (Vol. 733). Prentice-Hall Englewood Cliffs.

Huang, M., Lv, C., Zhou, S., Zhou, S., & Kang, J. (2021). One-dimensional consolidation of viscoelastic soils incorporating caputo-fabrizio fractional derivative. *Applied Sciences*, *11*(3), 927.

Ivanov, D. (2015). *Seismic resistant design and technology*. CRC Press.

Karl, T. (1943). *Theoretical soil mechanics*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Kim, P., Kim, H.-S., Pak, C.-U., Paek, C.-H., Ri, G.-H., & Myong, H.-B. (2021). Analytical solution for one-dimensional nonlinear consolidation of saturated multi-layered soil under time-dependent loading. *Journal of Ocean Engineering and Science*, *6*(1), 21–29.

Knappett, J., & Craig, R. F. (2007). *Craig's soil mechanics*. CRC press.

Kumbasar, V., & Kip, F. (1999). *Zemin mekaniği problemleri*. Çağlayan Kitabevi.

Kutay, Ö. (2011). *Zemin Mekaniği*. İstanbul.

Liu, J., & Ma, Q. (2013). One-dimensional consolidation of soft ground with impeded boundaries under depth-dependent ramp load. In *Pavement and geotechnical engineering for transportation* (pp. 127–134).

Lo, W.-C., Sposito, G., & Chu, H. (2014). Poroelastic theory of consolidation in unsaturated soils. *Vadose Zone Journal*, *13*(5), 1–12.

Lo, W.-C., Sposito, G., Lee, J.-W., & Chu, H. (2016). One-dimensional consolidation in unsaturated soils under cyclic loading. *Advances in Water Resources*, *91*, 122–137.

Lo, W.-C., Yeh, C.-L., & Tsai, C.-T. (2007). Effect of soil texture on the propagation and attenuation of acoustic wave at unsaturated conditions. *Journal of Hydrology*, *338*(3–4), 273–284.

Lo, W., Borja, R. I., Deng, J.-H., & Lee, J.-W. (2021). Poroelastic theory of consolidation for a two-layer system with an upper unsaturated soil and a lower saturated soil under fully permeable boundary conditions. *Journal of Hydrology*, *596*, 125700.

Lovisa, J. (2012). *An insight into time rate of consolidation*. James Cook University.

Mei, G., & Chen, Q. (2013). Solution of Terzaghi one-dimensional consolidation equation with general boundary conditions. *Journal of Central South University*, *20*(8), 2239–2244.

Murthy, V. N. S. (2002). *Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. CRC press.

Müthing, N., Razouki, S. S., Datcheva, M., & Schanz, T. (2016). Rigorous solution for 1-D consolidation of a clay layer under haversine cyclic loading with rest period.

SpringerPlus, *5*(1), 1–13.

Naser, A. H. (2013). Finite difference analysis of one dimensional consolidation of homogeneous clay layer. *Journal of Babylon University*, *21*, 1661–1674.

Noori, A. R., Aslan, T. A., & Temel, B. (2018a). An efficient approach for in-plane free and forced vibrations of axially functionally graded parabolic arches with nonuniform cross section. *Composite Structures*, *200*, 701–710.

Noori, A. R., Aslan, T. A., & Temel, B. (2018b). Damped transient response of in-plane and out-of-plane loaded stepped curved rods. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *40*, 1–25.

Noori, A. R., Aslan, T. A., & Temel, B. (2021). Dynamic analysis of functionally graded porous beams using complementary functions method in the Laplace domain. *Composite Structures*, *256*, 113094.

Oliveira, F. S., Martins, I. S. M., & Guimarães, L. J. N. (2023). A model for one-dimensional consolidation of clayey soils with non-linear viscosity. *Computers and Geotechnics*, *159*, 105426.

Pascal, F., Pascal, H., & Murray, D. W. (1981). Consolidation with threshold gradients. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, *5*(3), 247–261.

Procter, D. C., & Khaffaf, J. H. (1984). Cyclic triaxial tests on remoulded clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, *110*(10), 1431–1445.

Radhika, B. P., Krishnamoorthy, A., & Rao, A. U. (2020). A review on consolidation theories and its application. *International Journal of Geotechnical Engineering*, *14*(1), 9–15. https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1390899

Rawls, W. J., Ahuja, L. R., & Brakensiek, D. L. (1992). Estimating soil hydraulic properties from soils data. *Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*, *32*(9), 329–340.

Razouki, S. S., & Schanz, T. (2011). One-dimensional consolidation under haversine repeated loading with rest period. *Acta Geotechnica*, *6*, 13–20.

Sandhu, R. S., & Wilson, E. L. (1969). Finite-element analysis of seepage in elastic media. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, *95*(3), 641–652.

Satwik, C. S., & Chakraborty, M. (2022). Numerical analysis of one-dimensional consolidation of soft clays subjected to cyclic loading and non-Darcian flow. *Computers and Geotechnics*, *146*, 104742.

Schiffman, R. L. (1958). Consolidation of soil under time-dependent loading and varying permeability. *Proceedings of the Highway Research Board*, *37*, 584–617.

Sekiguchi, H., & Toriihara, M. (1976). Theory of one-dimensional consolidation of clays with consideration of their rheological properties. *Soils and Foundations*, *16*(1), 27–44.

Sivakugan, N., Lovisa, J., Ameratunga, J., & Das, B. M. (2014). Consolidation settlement due to ramp loading. *International Journal of Geotechnical Engineering*, *8*(2), 191–196.

Spiegel, M. R. (1965). *Laplace transforms*. McGraw-Hill New York.

Temel, B., Aslan, T. A., & Noori, A. R. (2017). An efficient dynamic analysis of planar arches. *European Mechanical Science*, *1*(3), 82–88.

Temel, B., Yildirim, S., & Tutuncu, N. (2014). Elastic and viscoelastic response of heterogeneous annular structures under arbitrary transient pressure. *International Journal of Mechanical Sciences*, *89*, 78–83.

Temel, B., Yıldırım, S., & Tütüncü, N. (2015). *Keyfi Dinamik İç Basınç Altındaki Heterojen Dairesel Yapıların Elastik Ve Viskoelastik Davranışları*.

Terzaghi, K. (1925). Principles of soil mechanics. IV. Settlement and consolidation of clay. *Engineering News-Record*, *95*, 874.

Terzaghi, K. (1941). *Undisturbed clay samples and undisturbed clays*. Harvard University.

Terzaghi, K., & Fröhlich, O. K. (1936). *Theorie der setzung von tonschichten: eine einführung in die analytische tonmechanik*.

Uzuner, B. A. (2012). *Çözümlü problemlerle temel zemin mekaniği*. İnşaat Mühendisleri Odası Trabzon Şubesi.

Wang, H.-X., Xu, W., Zhang, Y.-Y., & Sun, D.-A. (2021). Simplified solution to one-dimensional consolidation with threshold gradient. *Computers and Geotechnics*,

131, 103943.

Wang, H., Chen, Y., & Huang, B. (2003). Computation of one-dimensional consolidation of double layered ground using differential quadrature method. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, *4*(2), 195–201.

Wang, L., Sun, D., Li, P., & Xie, Y. (2017). Semi-analytical solution for one-dimensional consolidation of fractional derivative viscoelastic saturated soils. *Computers and Geotechnics*, *83*, 30–39.

Wilson, N. E., & Elgohary, M. M. (1974). Consolidation of soils under cyclic loading. *Canadian Geotechnical Journal*, *11*(3), 420–423.

Xie. (1994). Theory of one dimensional consolidation of double-layered ground and its applications. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, *16*(5), 24–35.

Xie, K.-H., Huang, D.-Z., Wang, Y.-L., & Deng, Y.-B. (2014). Analytical theory for one-dimensional consolidation of soil induced by time-dependent pumping and loading. *Marine Georesources & Geotechnology*, *32*(4), 328–350.

Xie, K., Qi, T., & Dong, Y. (2006). Nonlinear analytical solution for one-dimensional consolidation of soft soil under cyclic loading. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, *7*(8), 1358–1364.

Xu, L., Yuan-qiang, C., & Shi-ming, W. (2002). Study on one-dimensional consolidation of saturated soil with semi-pervious boundaries and under cyclic loading. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, *3*(5), 513–519.

Xu, X.-B., & Cui, Z.-D. (2022). Investigation of one-dimensional consolidation of fractional derivative model for viscoelastic saturated soils caused by the groundwater level change. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *26*(12), 4997–5009.

Yin, J.-H., Zhu, J.-G., & Graham, J. (2002). A new elastic viscoplastic model for time-dependent behaviour of normally and overconsolidated clays: theory and verification. *Canadian Geotechnical Journal*, *39*(1), 157–173.

Ying-chun, Z., & Kang-he, X. (2005). Study on one-dimensional consolidation of soil under cyclic loading and with varied compressibility. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, *6*(2), 141–147.

Yıldırım, M., & Gökaşan, E. (2013). *Mühendisler için jeoloji bilgileri*. Yıldız Teknik

Üniversitesi.

Yuan-qiang, C., Xu, L., & Shi-ming, W. (2004). One-dimensional consolidation of layered soils with impeded boundaries under time-dependent loadings. *Applied Mathematics and Mechanics*, *25*(8), 937–944.

Yuan, W., & Wang, J. (2021). One-dimensional consolidation analysis of saturated soft clay based on water content variation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *25*(1), 107–113.

Zheng, Y., Sun, H., Hou, M., & Ge, X. (2021). Microstructure evolution of soft clay under consolidation loading. *Engineering Geology*, *293*, 106284.

Zhuo, C., JinGen, D., Baohua, Y., Haoyang, W., Jie, W., & Xinjiang, Y. (2018). Research of one-dimensional consolidation of clays considering their rehological properties. *The Academic Research Community Publication*, *2*(4), 346–356.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : RAND MAJID RASOOL ZWAYEN

Uyruğu : IRAK

Doğum tarihi ve yeri :

Telefon :

Faks :

E-mail :

Eğitim

Derece	**Eğitim Birimi**	**Mezuniyet Tarihi**
Lisans	Al-Muthanna Üniversitesi	2014
Lise	AL-Krama Kız lise	2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	**Görev**
2014-2015	Samawa Olimpiyat Stadyumu Projesi	Şantiye laboratuvmühendisi
2017-2019	Albayadell Konut Projesi	Yönetici Mühendisi

Yabancı Dil

Arapça: Ana dili

Ingilizce:

Türkçe:

.