T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEVCUT YAPILARIN DEPREM HASAR RİSKİNİN AZALTILMASINDA GEOTEKNİK SİSMİK YALITIMININ KULLANILMASI

Ayşegül ÇETİN

DANIŞMAN
Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İstanbul, 2022

Aileme…

BÜTÇE DESTEKLERİ

MEVCUT YAPILARIN DEPREM HASAR RİSKİNİN AZALTILMASINDA GEOTEKNİK SİSMİK YALITIMININ KULLANILMASI

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Öncelikle hem yüksek lisans hem de profesyonel meslek yaşantımın her anında emekleri ve katkısı olan, çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım

Hem yüksek lisans dönemimde hem de profesyonel meslek yaşantımın ilk gününden beri yanımda olan ve desteğinin üzerimden eksik etmeyen ARS Geoteknik ailesine ve özellikle meslek yaşantıma geniş çerçeveden bakmamı sağlayan meslektaşım, abim Yüksek İnşaat Mühendisi Bora ARSLAN ve Jeoloji Mühendisi Cemal SAMUR'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen, beni yetiştiren ve bugünlere gelmemi sağlayan kıymetli aileme, anneme, babama, kardeşlerime ve ÇETİN ailesine çok teşekkür ederim.

Hayatıma girdiği günden beri bana hayat arkadaşı olan, hayatımın ve tezimin tüm sürecinde kahrımı, stresimi en çok çeken Akın GÜNERİ'ye tüm kalbimle teşekkürlerimi sunarım.

Hayatı boyunca tek başına ayakta güçlü duran ve ailemizin bu günlere gelmesinde en çok emeği olan, idolüm canımdan öte babaannem AYŞE KONU'ya tüm kalbimle teşekkür ederim.

Ekim 2022 Ayşegül ÇETİN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **ix**
TABLO LİSTESİ ..... **xv**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xvi**
ÖZET ..... **xviii**
ABSTRACT ..... **xx**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **4**
2.1. SİSMİK İZOLASYON 4
2.2. GEOTEKNİK SİSMİK İZOLASYON 5
2.2.1. Zeminde Kayar Yüzeylerin Kullanımı 6
2.2.2. Kauçuk-Zemin (RSM) Karışımının Kullanılması 8
2.2.3. Zeminde Sert ve Yumuşak Bariyerlerin Kullanılması 12
2.3. SONLU ELEMANLAR PROGRAMLARI 26
2.3.1. Plaxis 2D Yazılımı 26
2.3.2. Gts Nx Midas Yazılımı 29
3. YÖNTEM **31**
3.1. T19 KULESİ VE SURLAR 31
3.1.1. Tarihçesi 31
3.1.2. İnşaat Malzemesi ve Yapımı 35
3.1.3. 1999 Kocaeli Depreminin T19 Kulesine Etkileri 36
3.1.4. T19 Kulesi Yapısal Çözümlemesi 37
3.2. KULLANILAN DEPREM KAYDI 40
3.3. T19 KULESİ GEOTEKNİK ARAZİ KARAKTERİZASYONU 40

3.4. DEPREM ETKİSİ ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞININ MODELLENMESİ 42
3.5. SÜPER EMİCİ POLİMER (SAP) MALZEMESİNİN ÖZELLİKLERİ 51
3.6. MODEL DOĞRULAMA VE HASSASLIK ANALİZLERİ 57
3.6.1. Bir Boyutlu Model Hassaslık Analizleri 58
3.6.2. İki Boyutlu Model Hassaslık Analizleri 61
3.6.3. Hassaslık Analizleri Genel Değerlendirme 66
3.7. İKİ BOYUTLU ANALİZLERDE KULLANILACAK NÜMERİK MODEL 67
4. BULGULAR 73
4.1. DERİNLİĞE BAĞLI YUMUŞAK BARİYER ANALİZLERİ 73
4.2. EN/BOY (B/H) ORANINA BAĞLI YUMUŞAK BARİYER ANALİZLERİ 78
4.3. T19 KULESİNE AİT YUMUŞAK BARİYER ANALİZİ 83
4.4. YUMUŞAK BARİYER SİSTEMİNİN İMALAT AŞAMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ 85
5. TARTIŞMA 86
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 88
KAYNAKLAR 89
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 90
ETİK KURUL İZİN YAZISI 91
KURUM İZNİ YAZILARI 92
ÖZGEÇMİŞ 93

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2-1. Sismik izolasyon sistemlerinin tipik gösterim şeması (Tsang, 2009).....5

Şekil 2-2. Temel izolasyonunun yumuşak sentetik tabaka ile şematik gösterimi (Yegian ve Khadakal, 2004). 7

Şekil 2-3. Zemin izolasyonunun yumuşak sentetik tabaka ile şematik gösterimi (Yegian ve Khadakal, 2004). 7

Şekil 2-4. RSM metodu ile sismik izolasyon uygulaması (Tsang, 2009). 8

Şekil 2-5. (a) Kayma modülü degradasyon grafiği (b) Sönümlenme oranı grafiği.....9

Şekil 2-6. Yatay (a) ve düşey (b) ivmenin Fourier Spektrumu (Tsang, 2009); ve bunlara denk gelen normalize edilmiş yatay (c) ve düşey (d) yer ivme-zaman grafikleri. 10

Şekil 2-7. RSM metodu için geoteknik santrifüj deney düzeneği, "National Central University, (NCU)", Tayvan. 10

Şekil 2-8. RSM Metodu için geoteknik santrifüj deney düzeneği, "National Central University, (NCU)", Tayvan. 11

Şekil 2-9. Farklı deprem (1994 Northridge depremi, 1985 Algarobbo depremi, 2001 El Salvador depremi, 1940 Imprerial Valley depremi) etkileri altında çatı seviyesindeki GSI numunesi ve sadece kum numunesi üzerindeki zaman ivme grafikleri. 12

Şekil 2-10. Kirtas ve Pitilakis (2009) tarafından analiz edilen izolasyon şemaları.....13

Şekil 2-11. Kısa uzunluktaki yumuşak yatay bariyerin zaman tanım alanındaki etkisi (Kirtas ve Pitilakis, 2009).....13

Şekil 2-12. Zaman tanım alanında yumuşak dikey bariyerlerin etkisi: (a) EQ1; (b) EQ2 (Kirtas ve Pitilakis, 2009).....14

Şekil 2-13. Yumuşak keson: üstyapı için ivme oranı-zaman grafiği (a) Tstr=0.2s ve (b) Tstr=0.6s; (c) üstyapı için ivme-zaman grafiği Tstr=0.2s ve (d) Tstr=0.6s (Kirtas ve Pitilakis, 2009).....14

Şekil 2-14. Yumuşak keson etkisi ile oluşan taban yer değiştirmesi (Kirtas ve Pitilakis, 2009). 15

Şekil 2-15. Yumuşak bariyerlerin mekanik davranış şekli. 16

Şekil 2-16. SAP malzemesinin danecik yapısı; hidrasyondan önce ve sonraki halleri. 16

Şekil 2-17. Ödometre deney sonuçları; düşey birim deformasyon-düşey efektif gerilme (Flora vd., 2015). 18

Şekil 2-18. Direkt kesme deney sonuçları; kayma gerilmeleri ve düşey deformasyon ile, düşey deformasyon ve yatay deformasyon grafikleri (Flora vd., 2015). 18

Şekil 2-19. Farklı oranlarda SAP malzemesinden oluşturulmuş kumun içsel sürtünme değeri grafiği ve SAP zemin karışımının grafiksel gösterimi (Flora ve ark., 2015). 19

Şekil 2-20. Üç eksenli hücre düzeneği ve farklı oranlarda SAP malzemesinden oluşturulmuş numuneler üzerinde elde edilmiş Vs değerleri (Flora vd., 2015). 19

Şekil 2-21. Santrifüj deney düzeneği a) yatay bariyer b) V şeklinde bariyer düzeneği (Nappa vd., 2018). 20

Şekil 2-22. Yatay bariyer deneyinde, A3 ve A4 noktalarında kaydedilmiş ivme zaman grafiği (Nappa vd., 2018). 20

Şekil 2-23. V tipi bariyer deneyinde, L1 ve L2 noktalarında yapılan oturma okumaları grafiği (Nappa vd., 2018). 21

Şekil 2-24. Yatay bariyer modelinde kaydedilen ve hesaplanan ivme ve Fourier spektrum grafikleri (Nappa vd., 2018). 21

Şekil 2-25. V tipi model deneyinde bariyer altında ve bariyer üzerindeki ivme amplifikasyon grafiği (Nappa vd., 2018). 22

Şekil 2-26. V tipi bariyerlerde taşıma kapasitesi sonuç grafiği (Nappa vd., 2018). 22

Şekil 2-27. Dikdörtgen tipi bariyerlerde taşıma kapasitesi sonuç grafiği (Nappa vd., 2018). . 22

Şekil 2-28. a) V tipi bariyer $a_{max,SAP}/a_{max}$ oranı, b) V tipi bariyer PSA-T grafiği (Nappa vd., 2018). 23

Şekil 2-29. a) Dikdörtgen tipi bariyer $a_{max,SAP}/a_{max}$ oranı, b) Dikdörtgen tipi bariyer PSA-T grafiği (Nappa vd., 2018). 23

Şekil 2-30. a) Düşey bariyer b) Piramit bariyer plan gösterimleri tipi bariyer PSA-T grafiği (Nappa vd., 2019). 24

Şekil 2-31. a) Düşey bariyer için kazıdan sonraki görünümü, b) Düşey bariyerin SAP ile doldurulmuş hali, c) piramit bariyer için kazıdan sonraki görünümü, d) piramit bariyerin SAP ve zemin ile doldurulmuş hali (Nappa vd., 2019). 24

Şekil 2-32. Saha deney ölçüm noktası yerleşim planı (Nappa vd., 2019). 25

Şekil 2-33. Düşey bariyer ivme-zaman grafiği- Signal 1, Signal 2 ve Signal 3 yüzey dalgalarına göre. 25

Şekil 2-34. Döndürülmüş piramit bariyer ivme-zaman grafiği- Signal 1, Signal 2 ve Signal 3 yüzey dalgalarına göre. 26

Şekil 2-35. GTS NX Midas program ara yüzü. 30

Şekil 3-1. 1453'de Osmanlı Devleti tarafından fethedildiği sırada İstanbul haritası. 32

Şekil 3-2. İstanbul kara surlarının ve kulelerinin tipik kesiti. 33

Şekil 3-3. Marmara bölgesindeki depremlerin tarihi geçmişi. 34

Şekil 3-4. 1894 Kocaeli depreminden sonra İstanbul kara surlarının iç kulelerinden birindeki hasar görünümü (İnce, 2011). 34

Şekil 3-5. İstanbul kara surlarının 20. yy. başlarındaki göçme durumu, onarılmış sismik hasarların kanıtı (Almanya Arkeoloji kurumu, 1939). 35

Şekil 3-6. İstanbul kara surlarının şematik kesiti, duvarların ve kulelerin boyut gösterimi. ... 36

Şekil 3-7. a) T19 Kulesinin yakınındaki sondajların (BH-1 ve BH-2) plan görünüm ve b)T19 Kulesinin yakın tarihli fotoğrafı. Farklı yapım teknikleri açıkça görülebilir. 37

Şekil 3-8. T19 Kulesinin mevcut hali. 37

Şekil 3-9. T19 Kulesi sonlu elemanlar modeli (P1: Bizans tekniği ile yapılmış son restorasyon çalışmaları, P2: Osmanlı dönemi, P3: Bizans dönemi duvar tipleri) 38

Şekil 3-10. T19 Kulesi gözlemlenen hasar ile sonlu elemanlar analizi maksimum çekme gerilmesi dağılımı; a) Kuzey yönü, b) Güney yönü, c) Batı yönü ve d) Doğu yönü 39

Şekil 3-11. 1999 Kocaeli depremi ivme-zaman grafiği. 40

Şekil 3-12. T19 Kulesinin altındaki idealize zemin profili ve kayma dalgası hızının grafiği.. 41

Şekil 3-13. Tarihi yarımada için a) Anakaya derinlik haritası b) Eşdeğer kayma dalgası hızına göre saha sınıflandırılması (İnce, 2008). 42

Şekil 3-14. "HSsmall" bünye modeli a) pekleşme mekanizması (Brinkgreve, 2007) b) plastik akma ve boşaltma (Brinkgreve, 2013). 44

Şekil 3-15. Tipik kayma deformasyon aralıkları ile zemin kayma modülü azalım ve sönümlenme grafiği. 44

Şekil 3-16. Histerik zemin davranışı. 45

Şekil 3-17. Plaxis 1D zemin davranış analizi model görünümü. 47

Şekil 3-18. Plaxis programı deprem kaydı tanımlama alanı. 48

Şekil 3-19. GTS NX Midas bir boyutlu analiz girdi ekran görüntüsü. 49

Şekil 3-20. GTS NX Midas bir boyutlu analiz dinamik eğriler tanımlama bölümü. 49

Şekil 3-21. Farklı zemin tabakaları için sönümlenme oranı ve kayma modülü azalım eğrisi. 50

Şekil 3-22. GTS NX Midas programı deprem kaydı tanımlama alanı. 50

Şekil 3-23. İncelenen numuneler için SAP hacim yüzdesi şeması. 52

Şekil 3-24. Hostun kumunun kayma modülü azalım sönümlenme oranı eğrileri. 53

Şekil 3-25. SAP80, SAP60, SAP40 ve Hostun kumu için kayma modülü azalım ve sönümlenme oranı eğrileri. 54

Şekil 3-26. GTS NX Midas 1D analiz 15m derinlikte farklı oranlardaki (SAP80-SAP60) yumuşak bariyerler için a) kayma deformasyonu (%), b) sönümlenme oranı (%) ve c) kayma modülü (MPa) değişimleri. 55

Şekil 3-27. GTS NX Midas 1D analiz SAP60 yumuşak bariyer için a) kayma deformasyonu (%), b) sönümlenme oranı (%) ve c) kayma modülü (MPa) değişimleri. 56

Şekil 3-28. GTS NX Midas 1D analiz SAP80 yumuşak bariyer için a) kayma deformasyonu (%), b) sönümlenme oranı (%) ve c) kayma modülü (MPa) değişimleri. 56

Şekil 3-29. GTS NX Midas 1D / Plaxis 1D /Strada yazılımları bir boyutlu analiz sonuçları. . 57

Şekil 3-30. GTS NX Midas 2D / Plaxis 2D yazılımları iki boyutlu analiz sonuçları. 58

Şekil 3-31. Taban kayası kalınlık analiz sonuçları-Plaxis 1D Zemin Davranış Analizi. 59

Şekil 3-32. Taban kayası kalınlık analiz sonuçları-GTS NX Midas 1D Serbest Alan Analizi. 60

Şekil 3-33. Zemin tabakaları kalınlık hassasiyeti analiz sonuçları-Plaxis 1D Zemin Davranış Analizi. 60

Şekil 3-34. Zemin tabakaları kalınlık hassasiyeti analiz sonuçları-GTS NX Midas 1D Serbest Alan Analizi. 61

Şekil 3-35. İki boyutlu analizlerde kullanılan kesit görünümü. 61

Şekil 3-36. Plaxis 2D ağ boyutu analiz modeli. 63

Şekil 3-37. GTS NX Midas 2D ağ boyutu analiz modeli. 63

Şekil 3-38. Ağ boyutu analiz sonuçları-Plaxis 2D. 63

Şekil 3-39. Ağ boyutu analiz sonuçları-GTS NX Midas 2D. 64

Şekil 3-40. Taban kayası kalınlık analiz sonuçları-Plaxis 2D. 65

Şekil 3-41. Taban kayası kalınlık analiz sonuçları-GTS NX Midas 2D. 65

Şekil 3-42. Zemin tabakaları kalınlık hassasiyeti analiz sonuçları – Plaxis 2D. 66

Şekil 3-43. Zemin tabakaları kalınlık hassasiyeti analiz sonuçları – GTS NX Midas 2D. 66

Şekil 3-44. Analizlerde kullanılacak olan nümerik model. 67

Şekil 3-45. GTS NX Midas 2D eşdeğer zemin modeli girdi ekranı-1. 68

Şekil 3-46. GTS NX Midas 2D eşdeğer zemin modeli dinamik eğri girdi ekranı-2. 69

Şekil 3-47. T19 Kulesi Google Earth plan görünümü. 70

Şekil 3-48. T19 Kulesi Kesit-1 en kesit görünümü (Kuzey-Güney doğrultusu). 71

Şekil 3-49. T19 Kulesi Kesit-2 en kesit görünümü (Doğu-Batı doğrultusu). 71

Şekil 4-1. GTS NX Midas 2D yumuşak bariyer H=5m için nümerik model. 73

Şekil 4-2. GTS NX Midas 2D yumuşak bariyer H=10m için nümerik model. 73

Şekil 4-3. GTS NX Midas 2D yumuşak bariyer H=15m için nümerik model. 74

Şekil 4-4. GTS NX Midas 2D yumuşak bariyer H=20m için nümerik model. 74

Şekil 4-5. Yumuşak bariyerli (SAP60) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği. 75

Şekil 4-6. Yumuşak bariyerli (SAP60) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği (tüm derinlikler). 76

Şekil 4-7. Yumuşak bariyerli (SAP80) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği. 77

Şekil 4-8. Yumuşak bariyerli (SAP80) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği (tüm derinlikler). 77

Şekil 4-9. Yumuşak bariyerli (SAP60-SAP80) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği (H=10m ve H=15m). 78

Şekil 4-10. GTS NX Midas 2D yumuşak bariyer B/H=2 için nümerik model. 79

Şekil 4-11. GTS NX Midas 2D yumuşak bariyer B/H=4 için nümerik model. 79

Şekil 4-12. GTS NX Midas 2D yumuşak bariyer B/H=6 için nümerik model. 79

Şekil 4-13. Yumuşak bariyerli (SAP60) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği. 80

Şekil 4-14. Yumuşak bariyerli (SAP60) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği (B/H=2,4 ve 6). 81

Şekil 4-15. Yumuşak bariyerli (SAP80) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği. 82

Şekil 4-16. Yumuşak bariyerli (SAP80) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği (B/H=2,4 ve 6). 82

Şekil 4-17. Yumuşak bariyerli (SAP60 ve SAP80) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki karşılaştırılmalı spektrum-zaman grafiği (B/H=4). 83

Şekil 4-18. Kesit-1 ve Kesit-2 modeline (SAP80) göre T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği. 84

Şekil 4-19. Kesit-1 ve Kesit-2 modeline (SAP80) göre T19 Kulesi temelindeki karşılaştırılmalı spektrum-zaman grafiği. 84

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2-1. Malzemelerin küçük gerinim kayma modülü (G_0, MPa) ve yoğunluk (ρ, kg/m^3) değerleri. 11

Tablo 2-2. SAP malzemesinin farklı karışım oranları ile uygulanan deneyler (Flora vd., 2015). 17

Tablo 3-1. T19 Kulesi duvar özellikleri. 38

Tablo 3-2. Fatih İstasyonu 1999 Kocaeli depremi bilgileri. 40

Tablo 3-3. T19 Kulesi zemin parametreleri-1 46

Tablo 3-4. T19 Kulesi zemin parametreleri-2 46

Tablo 3-5. Farklı oranlardaki SAP-kum üzerinde yapılan dinamik deneyler. 52

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
G	: Kayma modülü
ɣ0.7	: Kayma gerinimi
g	: Yer çekimi ivmesi
T	: Doğal titreşim periyodu
$(Vs)_{30}$	: Üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı
Vs	: Kayma dalga hızı
c'	: Efektif kohezyon
c_u	: Drenajsız kayma dayanımı
γ	: Birim hacim ağırlık
q_u	: Tek eksenli basınç dayanımı
Φ	: Kayma mukavemeti açısı
E_{50}	: Deviatorik referans modülü
E_{oed}	: Sıkışma referans modülü
E_{ur}	: Yükleme boşaltma referans modülü
E	: Normal direnç

Kısaltmalar	Açıklama
1D	: Bir boyutlu
2D	: İki boyutlu
3D	: Üç boyutlu
GSI	: Geoteknik sismik izolasyon
RSM	: Atık-lastik kum karışımları
RSM75	: % 75 kauçuklu
ZB	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde yer alan yerel zemin sınıfı
HS	: Pekleşen zemin modeli
SDOF	**:** Tek serbestlik derecesi
SAP	**:** Süper Sönümleyici Polimer
MS	:Milattan sonra

yy. :Yüzyıl

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEVCUT YAPILARIN DEPREM HASAR RİSKİNİN AZALTILMASINDA GEOTEKNİK SİSMİK YALITIMININ KULLANILMASI

Ayşegül ÇETİN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Danışman: Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

Son yıllarda, mevcut veya yeni binaların sismik riskiyle başa çıkmak için bir dizi teknik geliştirilmiştir. Yeni binalar söz konusu olduğunda, yapı mühendisleri günümüzde sismik enerjinin çoğunu dağıtabilen rafine teknik elemanlar üzerine çalışmışlardır (örneğin sismik izolatörler ve sönümleyiciler). Mevcut binaların sismik koruması ise hala büyük bir endişe konusudur. Türkiye gibi yüksek deprem tehlikesi olan ülkelerde ve birçok binanın yüzlerce yıllık olduğu eski veya çok eski şehirlerde, bu yapıların deprem etkisi altındaki davranışı, hem nüfusun hem de kültürel mirasın korunmasıyla ilgili en önemli sorunlardan biridir.

Sismik izolasyonlar büyük yapılarda ve gelişmiş ülkelerde yaygın olarak kullanılmasına karşın diğer yandan inşaat maliyetlerini de oldukça yukarı çekmektedir. Ayrıca mevcut tarihi yapılarda ve yığma yapılarda tarihi dokuya zarar vermeden bu sistemlerin kullanılması oldukça güçtür. Bu nedenle bu sisteme alternatif daha ekonomik ve pratik olan yumuşak enjeksiyon yaklaşımına dayalı bir sistem olan "Geoteknik Sismik İzolasyon (GSI)" sistemi kullanılmaya ve yaygınlaşmaya başlamıştır. "Geoteknik Sismik İzolasyon (GSI)" aslında sismik izolatörler yapının depremden etkilenmesini en aza indirgemek amacını hedeflese de bunu yapım şekli ile geleneksel sismik izolatörlerden ayrılmaktadır. Yumuşak enjeksiyonlu geoteknik sismik

izolasyon sisteminde üstyapıya herhangi bir yapısal müdahale söz konusu değildir. Burada üstyapının temelinin altında, deprem yüklerini absorbe edebilecek ve temeli izole edebilecek yumuşak bariyer yaklaşımı ile ayrı bir bariyer oluşturma esasına dayanmaktadır. Özellikle mevcut yapılarda ve tarihi yapılarda, mevcut sisteme müdahale etmek son derece riskli olabilmektedir. Yumuşak bariyerli geoteknik sismik izolasyon sistemi ile mevcut yapıya fiziksel bir müdahale olmaksızın deprem hareketlerine karşı izole edilebilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, ilk olarak nümerik model çalışmalarına referans olma niteliği taşıyan farklı sonlu elemanlar programı kullanılarak doğrulama ve hassasiyet analizleri yapılmıştır. Hassasiyet analizlerine göre zamandan tasarruf sağlayacak ve analiz sonuçlarını da etkilemeyecek nümerik model seçilerek bu tezin ana konusu olan geoteknik sismik izolasyon analizleri yapılmıştır. Geoteknik sismik izolasyon sisteminin deprem kaydı kullanılarak performansa bağlı tasarımı incelenmiştir. Bu kapsamda yatay ve düşey bariyerlerin etkisi statik ve dinamik koşullar altında irdelenmştir.

Ekim 2022 , 115 sayfa.

Anahtar kelimeler: geoteknik, sismik izolasyon, geoteknik izolasyon sistemi, yumuşak bariyer, GTS NX Midas, İstanbul Surları

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

UTİLİZATİON OF GEOTECHNİCAL SEİSMİC ISOLATİON FOR REDUCİNG THE EARTHQUAKE DAMAGE RİSK OF EXİSTİNG STRUCTURES

Ayşegül ÇETİN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Programme of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

In recent years, a number of techniques have been developed to deal with the seismic risk of existing or new buildings. In the case of new buildings, structural engineers today have developed refined technical elements that can dissipate most of the seismic energy (e.g. seismic isolators and dampers). On the contrary, seismic protection of existing buildings is still a major concern. In countries with high earthquake risk such as Turkey, and in old or very old cities where many buildings are hundreds of years old, this is one of the most important problems regarding the protection of both population and cultural heritage.

Although seismic isolations are widely used in large buildings and in developed countries, they also increase the construction costs considerably. In addition, it is very difficult to use these systems in existing historical buildings and masonry structures without damaging the historical texture. For this reason, the "Geotechnical Seismic Isolation (GSI)" system, which is a more economical and practical alternative to this system, based on the soft injection approach, has started to be used and become widespread. Although “Geotechnical Seismic Isolation (GSI)” actually aims to minimize the effect of earthquake on the structure intended by seismic isolators, it differs from traditional seismic isolators with its construction method. In the soft-injected

geotechnical seismic isolation system, there is no structural intervention to the superstructure. Here, it is based on the principle of creating a separate barrier under the foundation of the superstructure with a soft injection approach that can absorb earthquake loads and isolate the foundation. It can be extremely risky to interfere with the existing system, especially in existing buildings and historical buildings. With the soft injection geotechnical seismic isolation system, it can be isolated against earthquake movements without any physical intervention to the existing structure.

Within the scope of this thesis, first of all, sensitivity analyzes were carried out using different finite element programs that serve as a reference for numerical model studies. Geotechnical seismic isolation analysis, which is the main subject of this thesis, has been performed by choosing a numerical model that will save time and not affect the analysis results according to the sensitivity analysis. The performance-based design of the geotechnical seismic isolation system was investigated using earthquake recording. In this context, the effect of horizontal and vertical barriers was investigated under static and dynamic conditions.

October 2022, 115 pages.

Keywords: geotechnical, geotechnical seismic isolation system, seismic isolation, soft barrier, GTS NX Midas, Istanbul Walls

1. GİRİŞ

Son yıllarda, mevcut veya yeni binaların sismik riskiyle başa çıkabilmek için bir dizi teknik geliştirilmiştir. Yeni binalar söz konusu olduğunda, yapı mühendisleri günümüzde sismik enerjinin çoğunu dağıtabilen rafine teknik elemanlar geliştirmişlerdir (örneğin sismik izolatörler ve sönümleyiciler). Mevcut binaların sismik koruması ise hala büyük bir endişe konusudur. Türkiye gibi yüksek deprem tehlikesi olan ülkelerde ve birçok binanın yüzlerce yıllık olduğu eski veya çok eski şehirlerde, bu hem nüfusun hem de kültürel mirasın korunmasıyla ilgili en önemli sorunlardan biridir.

Bir yapının sismik yüklere karşı tasarımı yapılırken iki seçenek vardır. Yapı çok miktarda inşaat malzemesi kullanılarak pahalı bir tasarıma yol açacak şekilde güçlü ve rijit olacak şekilde tasarlanabilir. Alternatif olarak yapı, sismik yüklemeye maruz kaldığında hasar görmeden deforme olabilecek şekilde esnek olarak tasarlanabilir. Deforme olan yapı ya doğal yapısal sönümleme yoluyla ya da ek mühendislik yapısal sönümleme çözümlerinin yardımıyla enerjiyi yayacaktır.

Yapı mühendisleri üst yapıya enerji transferini en aza indirmek için yapıya sarsma hareketinden izole etmek için temel ile yapı arasına bir sistem tasarlarlar. Yapısal sismik izolasyon sistemleri hakkında ayrıntılı açıklamalar bu tezin kapsamı dışındadır. Ancak yapısal sismik izolasyonlar hakkında çok sayıda araştırma ve literatür çalışmaları bulunmaktadır. Literatürde sismik izolatörlerin geçmişi Yeni Zelanda'ya, 1960'ların sonuna kadar dayanmaktadır. O dönemlerde uygulanan yöntemler mühendislik açısından pratik kabul edilmezken, bugün gelinen noktada depreme karşı insan hayatını korumak amaçlı en önemli tekniklerden biri olarak kabul edilmektedir (Tsang, 2009).

Sismik izolasyonlar büyük yapılarda ve gelişmiş ülkelerde yaygın olarak kullanılmasına karşın diğer yandan inşaat maliyetlerini de oldukça yukarı çekmektedir. Ayrıca mevcut tarihi yapılarda ve yığma yapılarda tarihi dokuya zarar vermeden bu sistemlerin kullanılması oldukça güçtür. Bu nedenle bu sisteme alternatif daha ekonomik ve pratik olan yumuşak enjeksiyon yaklaşımına dayalı bir sistem olan "Geoteknik Sismik İzolasyon (GSI)" sistemi kullanılmaya ve yaygınlaşmaya başlamıştır. "Geoteknik Sismik İzolasyon (GSI)" aslında sismik izolatörlerin

amaçladığı yapının depremden etkilenmesini en aza indirgemek amacını hedeflese de bunu yapım şekli ile geleneksel sismik izolatörlerden ayrılmaktadır. Yumuşak enjeksiyonlu geoteknik sismik izolasyon sisteminde üstyapıya herhangi bir yapısal müdahale söz konusu değildir. Burada üstyapının temelinin altında, deprem yüklerini absorbe edebilecek ve temeli izole edebilecek yumuşak enjeksiyon yaklaşımı ile ayrı bir bariyer oluşturma esasına dayanmaktadır. Özellikle mevcut yapılarda ve tarihi yapılarda, mevcut sisteme müdahale etmek son derece riskli olabilmektedir. Yumuşak enjeksiyonlu geoteknik sismik izolasyon sistemi ile mevcut yapıya fiziksel bir müdahale olmaksızın deprem hareketlerine karşı izole edilebilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, geoteknik sismik izolasyon sisteminin deprem kaydı kullanılarak performansa bağlı tasarımı irdelenecektir. Bu kapsamda yatay ve düşey bariyerlerin etkisi sismik koşullar altında incelenecektir.

Geoteknik sismik izolasyonunun deprem kaydı ile nümerik olarak modellenmesinden önce Plaxis 1D-2D ile GTS NX Midas 1D-2D sonlu elemanlar programlarının doğrulama ve hassaslık analizleri yapılacaktır. Hassaslık analizlerinde sınır koşulları, ağ boyutu, taban kayasının kalınlığı ile zemin tabakasının kalınlığı gibi çeşitli faktörlerin etkisi ortaya konacak ve geoteknik tasarıma olan etkileri tespit edilecektir.

Tez bölümlerinin kapsamı ayrıntılı bir şekilde aşağıdaki paragraflarda açıklanacaktır.

Bölüm 2'de Geoteknik Sismik İzolasyon ile ilgili literatür incelemesi ele alınacaktır. Bu bölüm özellikle Geoteknik Sismik İzolasyonun tüm temel yönlerini vurgulamaktadır. Bölüm 2' de ek olarak nümerik analizlerin yapılacağı ve sonlu elemanlar programı olan Plaxis ve GTS NX Midas yazılımları hakkında da bilgi verilecektir.

Bölüm 3'de öncelik olarak tez çalışmasına konu olan T19 kulesi ve surlarının tarihi ve yapısal durumu hakkında ve T19 kule bölgesinin zemin profili hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra deprem sırasında doğrusal olmayan zemin davranışı hakkında bilgi verilecektir. Bu tezin ana konusu olan yumuşak bariyer analizlerinde kullanılacak olan "Süper Emici Polimer (SAP)" malzemesi Somma (2022)' nin yapmış olduğu deneylere göre değerlendirilecektir. SAP malzemesinin değerlendirilmesinden sonra nümerik analizlerin doğru, sağlıklı ve aynı zamanda hızlı bir şekilde yapmak adına doğrulama ve hassasiyet analiz sonuçları verilecektir. Son olarak

da T19 Kule bölgesine ait yumuşak bariyer sisteminin tasarımı ve iki boyutlu nümerik modeli hakkında genel bir bilgi verilecektir.

Bölüm 4 Bulgular bölümünde, GTS NX Midas 2D sonlu elemanlar programı ile teze konu olan vaka çalışmasına farklı derinliklerdeki ve farklı en-boy oranındaki yumuşak bariyerlerin etkisi incelenecektir. Bu incelemenin sonunda ve teze konu olan T19 Kulesinin çevre, zemin koşullarına bağlı olarak en uygun yumuşak bariyer sistemini belirlemek adına iki farklı doğrultuda analizi yapılıp değerlendirilecektir.

Bölüm 5 ve 6 da ise bu tez çalışmasının sonuçları yorumlanarak ele alınan vaka çalışması ile ilgili sonuçlar tartışılmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. SİSMİK İZOLASYON

Geleneksel olarak sismik izolasyon, zeminin hareketlerini üstyapının hareketlerinden ayırmak amacı ile üstyapı ile temel arasına konulan esnek veya kayan bir ara yüzdür. Sismik izolasyonlar özellikle son yıllarda gelişen teknoloji ile deprem bölgelerinde inşa edilen yapılarda yaygın bir şekilde kullanılan metottur. Sismik izolasyonun dayandığı temel düşünce, yapıların doğal periyodunu, rezonans tehlikesi bulunan aralıktan uzaklaşacak şekilde değiştirerek, deprem nedeniyle oluşan eylemsizlik kuvvetlerini azaltmak ve deplasman ve enerji sönümleme talebini bu amaç için tasarlanmış olan sismik izolasyon ve enerji sönümleyici cihazlar üzerinde yoğunlaştırarak karşılamaktır. Dolayısıyla üstyapı deprem hareketlerine olduğundan çok daha az bir şekilde maruz kalmaktadır. Sismik izolasyon, deprem etkilerine karşı koymak konusunda geleneksel yapı tasarım yöntemlerine kıyasla, depreme dayanıklı yapı tasarlamak için önemli bir yaklaşımdır.

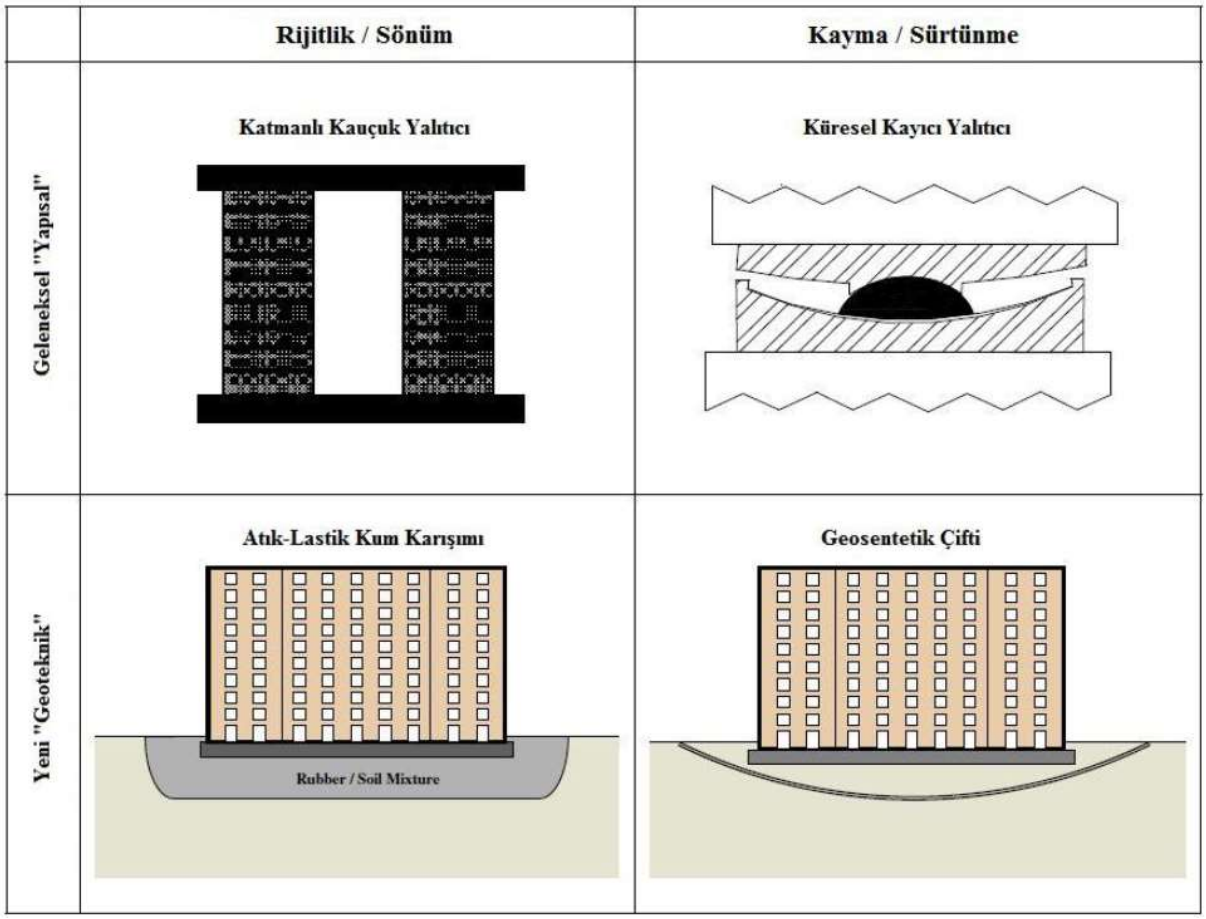
Literatürde sismik izolatörlerin geçmişi Yeni Zelanda'ya, 1960'ların sonuna kadar dayanmaktadır. O dönemlerde uygulanan yöntemler mühendislik açısından pratik kabul edilmezken, bugün gelinen noktada depreme karşı insan hayatını korumak amaçlı en önemli tekniklerden biri olarak kabul edilmektedir (Tsang, 2009).

Sismik izolasyonların ekonomik açıdan pahalı olması ve uygulanabilirliğinin zor olması, gelişmekte olan ülkeler için sorun teşkil etmektedir. Ayrıca mevcut tarihi yapılarda ve yığma yapılarda tarihi dokuya zarar vermeden bu sistemlerin kullanılması oldukça güçtür. Bu sebeple, alternatif yöntem olarak doğal zemin ve/veya insan yapımı güçlendirilmiş zemin malzemeleri ile doğrudan etkileşimi içeren bir sismik izolasyon olarak kullanılması günümüzde önem kazanmaktadır. Bu sisteme, "Geoteknik Sismik İzolasyon (GSI)" adı verilmektedir. Geoteknik Sismik İzolasyon (GSI) aslında sismik izolatörler gibi yapının depremden etkilenmesini en aza indirgemeyi amaçlasa da bunu yapım şekli ile geleneksel sismik izolatörlerden ayrılmaktadır. Geoteknik sismik izolasyonu geleneksel sismik izolatörlerden ayıran en büyük nedenlerden birisi de binaya herhangi bir müdahale olmaksızın bina temeli altında izole bir bariyer olarak

gerçekleştirilmesidir. Bu nedenle GSI, üstyapının mimari özelliğinden ödün vermeden iyi bir yapısal sonuç elde etmeye izin veriyor.

2.2. GEOTEKNİK SİSMİK İZOLASYON

Geoteknik Sismik İzolasyon (GSI) konsepti detaylı bir şekilde literatürde bahsedilmiştir. Geoteknik sismik izolasyon zamanla Yegian ve Lahlaf (1992), Kavazanjian vd. (1991), Yegian ve Catan (2004), Yegian ve Kadakal (2004) Georgarakos vd. (2005), Kirtas vd. (2009), Kirtas ve Pitilakis (2009) ve Flora vd. (2015) gibi pek çok araştırmacıyı kendine çekmiştir (Somma, 2022). Özellikle "Geoteknik Sismik İzolasyon" adı ilk olarak 2009 yılında Tsang tarafından tanıtıldı. Sismik izolasyonları Tsang (2009), Geleneksel Yapısal ve Yeni Geoteknik olarak iki bölüm şeklinde gruplandırmıştır. Sismik izolasyon sistemlerinin tipik gösterim şeması Şekil 2-1'de verilmiştir (Tsang, 2009).



Şekil 2-1. Sismik izolasyon sistemlerinin tipik gösterim şeması (Tsang, 2009).

Geleneksel yapısal izolasyonlar yapı zemin etkileşiminin olduğu dolayısıyla yapının kauçuk, kayıcı gibi bir malzeme ile yalıtıldığı durumları kapsamaktadır. Burada yapı tasarımı fiziksel olarak bu sistem ile yapılmaktadır. Bunlar, "Katmanlı Kauçuk Yalıtıcı" ve "Küresel Kayıcı Yalıtıcı" olarak tanımlanmaktadır. Ancak geleneksel sismik izolasyonların yeni binalardaki uygulama zorlukları, yapıyla fiziksel etkileşim halinde olması ve oldukça yüksek maliyetli olması nedeniyle ekonomik ve pratik uygulamalar olarak görülmemektedir. Bu nedenle de geoteknik sismik izolasyonlar ön plana çıkmakta ve uygulama alanları zaman içerisinde önem kazanmaktadır.

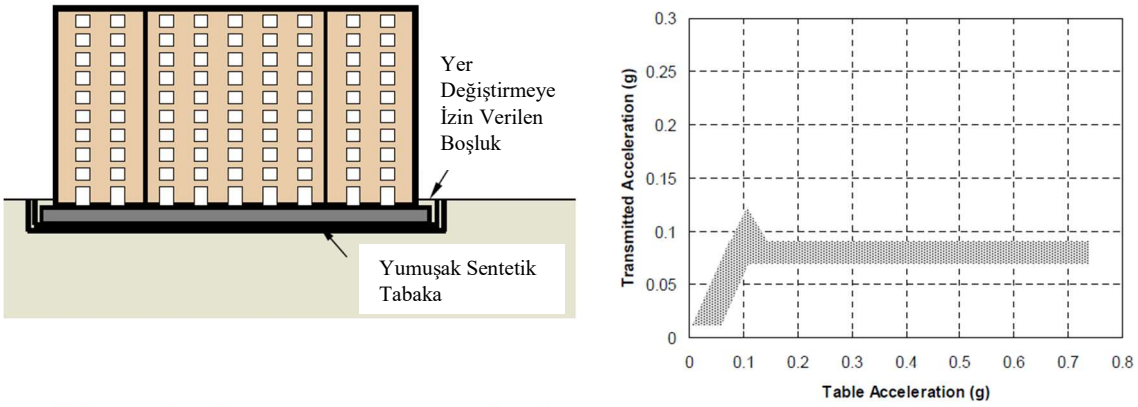
Geoteknik sismik izolasyonlarda ise zemine yapılan uygulamalar ile yapı tasarlanmaktadır. Bunlar "geosentetikler" ve "atık lastik-kum karışımları (RSM)" ile yapılan izolasyon metotlarıdır (Yegian ve Khadakal, 2004; Yegian ve Catan, 2004). Son yıllarda, geosentetik malzemeler deprem etkilerini azaltmada alternatif bir malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır. Geosentetiklerin sismik izolasyon malzemesi olarak kullanılması konusunda birçok araştırma mevcuttur.

Bu metotlar sismik yer hareketi sırasında davranış şekillerine göre farklılık göstermektedir. RSM metodunda sismik davranış oluşturulan kauçuk zemin karışımı yapı içerisinde sönümlenmekte iken, diğer yöntemde sismik davranış oluşturulan geosentetik çifti ile kayma yoluyla ortamdan uzaklaştırmakta ve yapıya etkiyen deprem ivme ve sismik enerjinin absorbe edilerek üst katlara azaltarak aktarılması prensibine dayanır. Ayrıca iki tip geoteknik sismik izolasyon sisteminin ilginç bir özelliği, geleneksel yapısal sismik izolasyon (katmanlı kauçuk yalıtıcı ve küresel kayar yalıtıcı) ile geoteknik sismik izolasyonun (geosentetikler ve atık-lastik-kum karışımları) çalışma mantığı olarak birbirlerine benzer olmalarıdır (Şekil 2-1) (Tsang, 2009). Kayar yüzeylerden ve RSM sisteminden oluşan GSI sistemi aşağıdaki bölümde daha detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

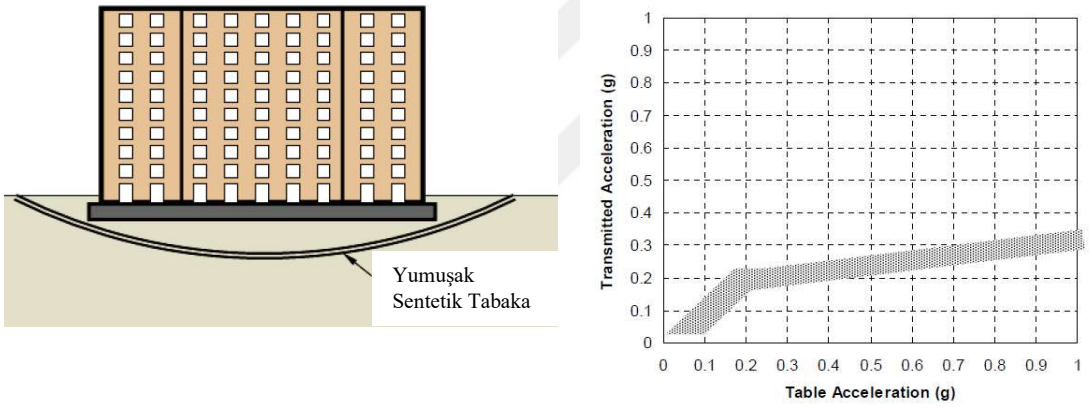
2.2.1. Zeminde Kayar Yüzeylerin Kullanımı

Binanın temelinin altına düşük kayma dayanımlı bir yüzey yerleştirilmesini dikkate alan çok sayıda çalışma vardır. Bu kavram fiziksel olarak anlatılacak olursa; arayüzeyin düşük sürtünme açısı nedeniyle, sismik enerjide önemli bir kayıp olması durumudur (Somma, 2022). Birçok araştırmacı bina temeli altında geosentetik kullanarak farklı kayma katmanları üzerinde çalışmıştır. Yegian ve Khadakal (2004), Yegian ve Catan (2004) sismik enerjiyi kayma yoluyla

dağıtmak için yapıların temeli altında veya zemin katmanları arasında pürüzsüz sentetik tabakalar önermiştir (Şekil 2-2 ve Şekil 2-3).



Şekil 2-2. Temel izolasyonunun yumuşak sentetik tabaka ile şematik gösterimi (Yegian ve Khadakal, 2004).

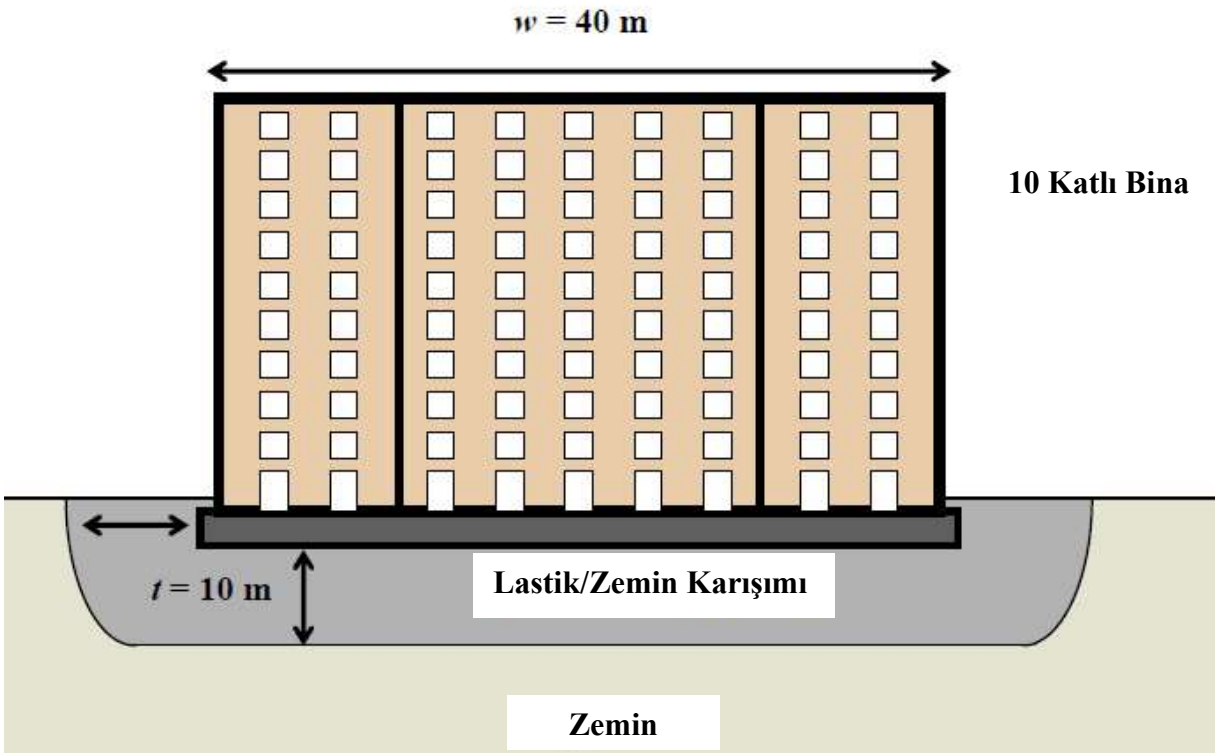


Şekil 2-3. Zemin izolasyonunun yumuşak sentetik tabaka ile şematik gösterimi (Yegian ve Khadakal, 2004).

Geosentetiklerin temel izolasyon malzemesi olarak kullanılması, Yegian vd. (1999) tarafından çalışılmıştır ve daha sonra Yegian ve Khadakal (2004) ile geliştirilmiştir. Geosentetik tabaka ile temel izolasyonu, bina temelinin hemen altına yatay olarak yerleştirilen geosentetik çiftinin yapıya etkiyen deprem ivme ve sismik enerjinin absorbe edilerek üst katlara azaltarak aktarılması prensibine dayanır. Zemin izolasyonu, tabakanın üzerindeki zemin tabakasının alttaki zemin birikintilerinden izole edildiği, geosentetiklerin kullanıldığı başka bir sismik izolasyon yöntemidir. Zemin izolasyonunun uygulama kapsamı, potansiyel olarak temel izolasyonundan daha geniştir ve ıslah edilmiş arazilerin, yamaçların ve bentlerin inşasına kadar genişletilebilir (Tsang, 2009).

2.2.2. Kauçuk-Zemin (RSM) Karışımının Kullanılması

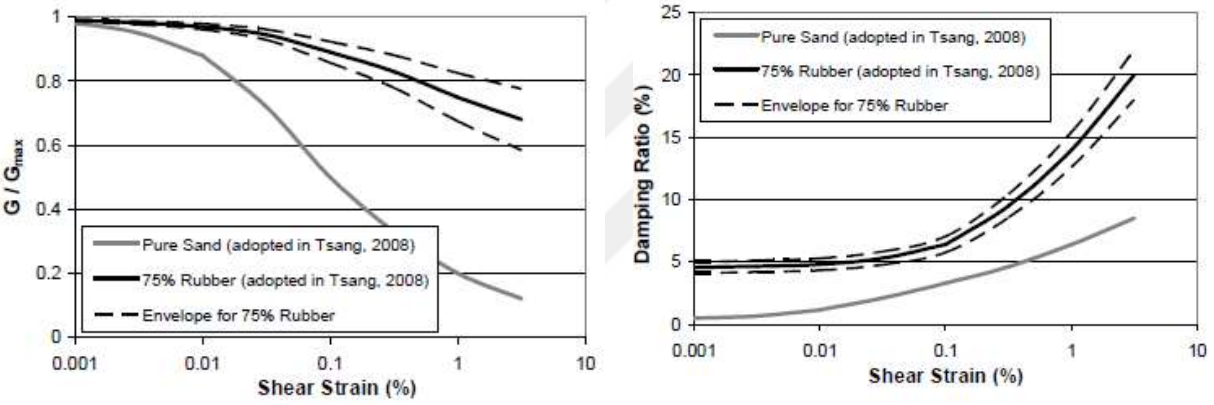
Kaymaya çalışan sistemlerin yanı sıra bir diğer yaklaşım da sismik davranışın sönümlendirildiği kauçuk-zemin karışım (RSM) yöntemidir. Kauçuk-zemin karışımları (RSM), sismik enerjiyi absorbe etmek ve yastık işlevine benzer bir işlev uygulamak için yapıların temeli etrafında önerilmiştir (Tsang, 2009). Bu yöntemde deprem esnasındaki ivmenin yapıya etkisinin azaltılması amaçlanmıştır.



Şekil 2-4. RSM metodu ile sismik izolasyon uygulaması (Tsang, 2009).

Enerji kaybı, sismik yer sarsıntısının azaltılmasındaki en önemli mekanizmadır. Kauçuk, mükemmel enerji emme kapasitesi ile bilinir ve bu nedenle, otomotiv bileşenlerinde olduğu gibi titreşim kontrolü ve sönümleme için kullanımları kapsamlı olmuştur (Tsang, 2009). Otomotiv atıkları, araç lastikleri gibi malzemeler değişik oranlarda doğal zemine karıştırıldığında deprem yer hareketlerinin sönümlendirilmesinde ve yapıya olan etkisinin azaltılmasında oldukça olumlu sonuçlar alınmıştır. Bir başka şekilde açıklanacak olunursa kauçuk ile doğal zemin parçacıkları işlevlerinde tamamlayıcıdır. Doğal zeminlerle karşılaştırıldığında, kauçukla güçlendirilmiş zemin, kayma mukavemetinde önemli bir artış ve daha da önemlisi, enerji dağıtma kabiliyetinde muazzam bir artış gösterir (Tsang, 2009).

RSM'nin kompaksiyon özellikleri, sıkıştırılabilirlik, geçirgenlik, kayma mukavemeti, elastik modül ve poisson oranı gibi temel mühendislik özelliklerini araştırmak için kapsamlı araştırmalar yapılmıştır (Edil ve Bosscher, 1994; Masad ve diğerleri, 1996; Humphrey ve Manion, 1992; Lee ve diğerleri, 1999). Tsang'da (2009) sonlu eleman modellemesi için seçilen hacimce %75 kauçuklu (RSM75 olarak kısaltılır) RSM'nin birim hacim ağırlık değeri 9.5 kN/m^3, poisson oranı 0.3'dür. Zeminlerin dinamik özellikleri, zemin kayma şekil değiştirmelerine önemli ölçüde bağımlı olmaları nedeniyle iyi bilinmektedir. RSM' nin dinamik özellikleri Feng ve Sutter (2000) tarafından araştırılmıştır. Zeminin kayma modülü (G_{max}), kayma şekil değiştirmeleri çok küçük olduğunda (%10^{-5} – %10^{-3}) maksimumdur. Tsang'da (2009) RSM75 için kabul edilen G_{max} değeri 7,5 MPa'dır. Kayma modülünün kayma deformasyonuna bağlı G/G_{max} oranı, Şekil 2-5 (a)' da çizilmiştir.



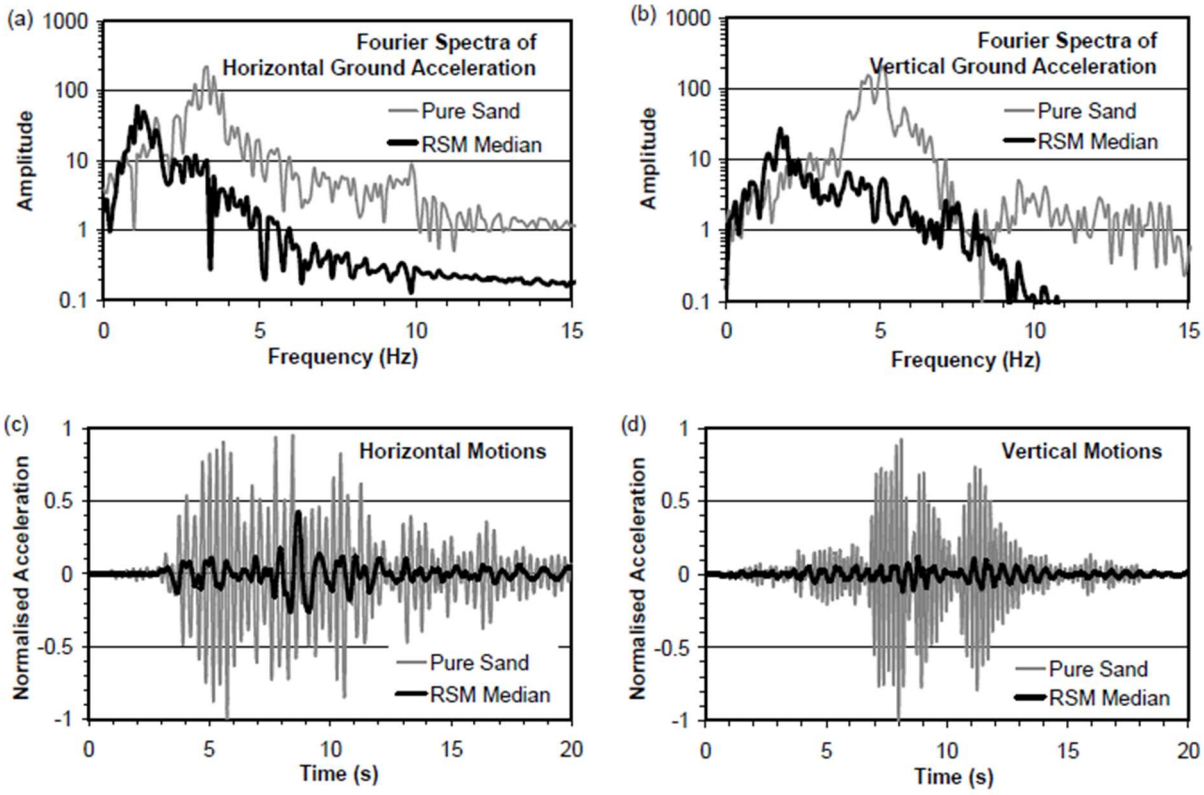
(a) (b)

Şekil 2-5. (a) Kayma modülü degradasyon grafiği (b) Sönümlenme oranı grafiği.

Zemin malzemelerinin dinamik özelliklerinin tahmininde büyük bir belirsizlik kaçınılmazdır ve bu nedenle kayma modülü azalım eğrisi ve sönümünün modellenmesinde artı ve eksi %10 civarında toleransa izin verilmiştir (Tsang, 2009). Kavramsal üst sınır ve alt sınır eğrileri, Şekil 2-5'de kesikli çizgilerle çizilmiştir.

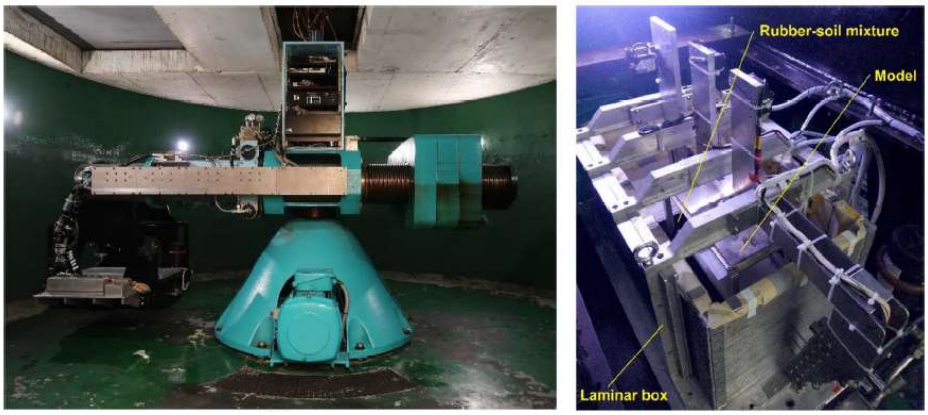
Tsang (2009), yukarıdaki paragraflarda anlatılan analiz modeli ve parametreleri kullanarak son birkaç yıldır yaygın olarak kullanılan sonlu eleman programı olan QUAD4M (Hudson, 1994) ile 3 farklı deprem etkisi altına sayısal analiz gerçekleştirmiştir. Şekil 2-6'da görülmektedir ki; RSM sisteminin sunulan en kötü durum senaryoları için bile hem yatay hem düşey yer ivme değerlerinin belirgin şekilde azalması sağlanmıştır. Bu durum RSM sistemin en belirgin

özelliğini de ortaya koymaktadır ki; uygulanan diğer yöntemlerde düşey ivme değerlerinde bu kadar belirgin düşüşler elde edilmesi oldukça zordur.



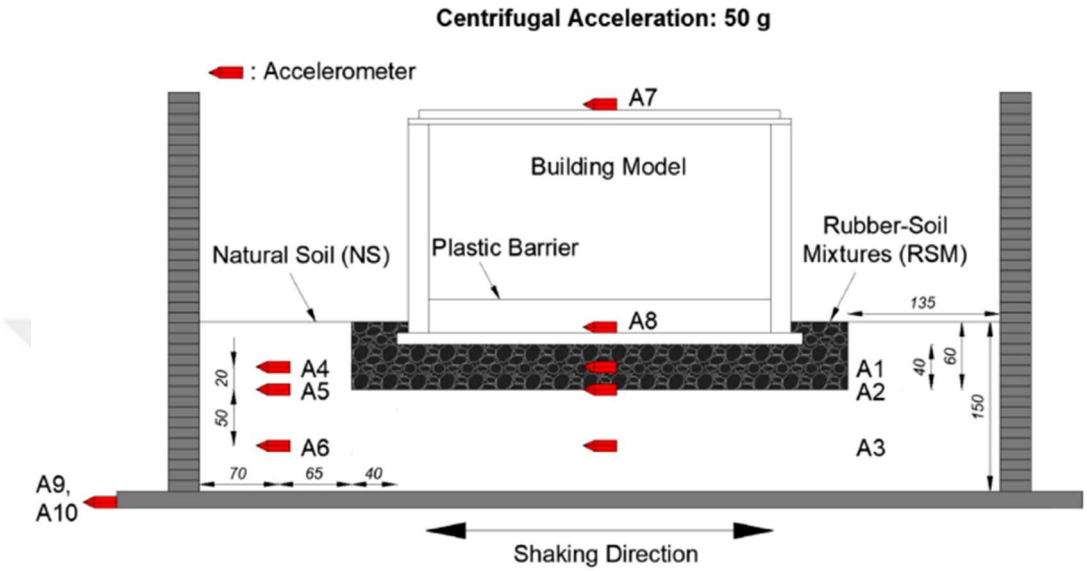
Şekil 2-6. Yatay (a) ve düşey (b) ivmenin Fourier Spektrumu (Tsang, 2009); ve bunlara denk gelen normalize edilmiş yatay (c) ve düşey (d) yer ivme-zaman grafikleri.

RSM'ye dayalı GSI sisteminin deprem yer hareketini azaltmadaki etkinliğinin daha iyi anlaşılması için gerekli olan deneysel çalışma Hing-Ho Tsang ve ark. (2020) tarafından çalışılmıştır. Tayvan'da yer alan "National Central University, (NCU)" bünyesindeki santrifüj deney düzeneği kullanılmıştır (Şekil 2-7).



Şekil 2-7. RSM metodu için geoteknik santrifüj deney düzeneği, "National Central University, (NCU)", Tayvan.

Santrifüj deney çalışmasında, deney modelinin tasarımına rehberlik etmesi için beş katlı çerçeve bir bina modeli düşünülmüştür. Bina modelinin kat planı 18 m'ye 12 m, temel planı ise 0.5 m radye temel olarak planlanmıştır. Santrifüj deneyinde 50g' lik bir merkezkaç ivme alanı seçilmiştir (Şekil 2-8).



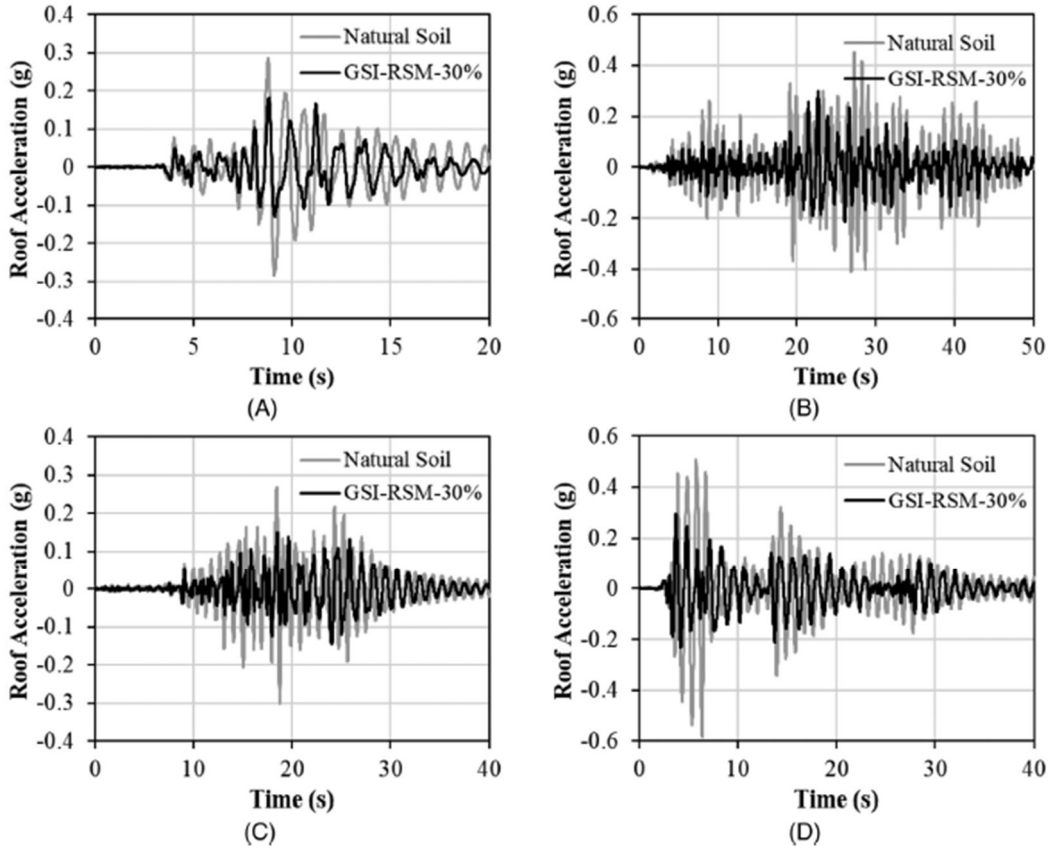
Şekil 2-8. RSM Metodu için geoteknik santrifüj deney düzeneği, "National Central University, (NCU)", Tayvan.

RSM' nin mekanik özellikleri önemli ölçüde efektif yanal basınca, kauçuk ve zemin arasındaki orana ve zemin ile kauçuk parçacıkları arasındaki rölatif boyuta ($D_{50,s}/D_{50,r}$) bağlıdır (Hing-Ho Tsang ve ark. (2020)). Hing-Ho Tsang ve ark. (2020) santrifüj deney çalışmasında doğal zemine ve RSM' ye ait kullanılan zemin parametrelerini Tablo 2-1'deki belirlemiştir.

Tablo 2-1. Malzemelerin küçük gerinim kayma modülü (G_0, MPa) ve yoğunluk (ρ, kg/m^3) değerleri.

Malzeme	**Atık-Lastik İçeriği (% ağırlıkça)**	**Yoğunluk (kg/m^3)**	**SASW metodu ile hesaplanmış G_0**	**Anastasiadis ve ark. (2012) dayalı olarak tahmin edilen G_0**
Doğal Zemin	0	1680	78	106
RSM-%30	30	1160	5.0	5.8

RSM metodu santrifüj deneyine tabi edildiğinde, sadece kum ve RSM sistemlerinin dört faklı deprem etkisi altında oluşan ivme zaman sonuçları grafiklendirilmiştir (Şekil 2-9). Doğal zemin ve RSM' ya ait sonuçlar kıyaslandığında, sistem üzerinde oluşan ivme değerlerinin önemli ölçüde düşürüldüğü tespit edilmiştir.

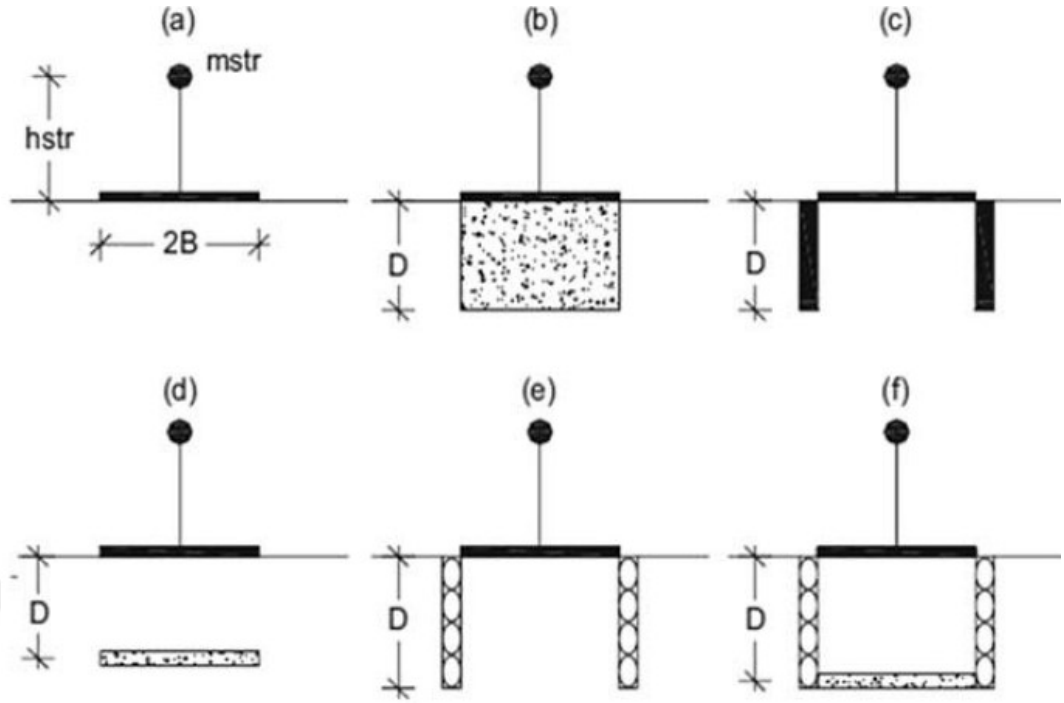


Şekil 2-9. Farklı deprem (1994 Northridge depremi, 1985 Algarobbo depremi, 2001 El Salvador depremi, 1940 Imprerial Valley depremi) etkileri altında çatı seviyesindeki GSI numunesi ve sadece kum numunesi üzerindeki zaman ivme grafikleri.

RSM sistemi daha geniş binalar için (düşük ila orta katlı binalar) yatay ivmelerde ortalama %40-60'lık bir azalma ve temel yapısal periyotta dikkate değer bir artış öngörmektedir. Buna karşın kauçukların mevcut yapıların altında zemin ve kauçuğu karıştırmadaki zorluk ile sıcaklık duyarlığı önemli bir dezavantaj olarak öngörülmektedir. Özellikle kauçuk-zemin karışımının sıcaklık duyarlılığı verimliliği açısından çok zararlı olabilir (Somma, 2022).

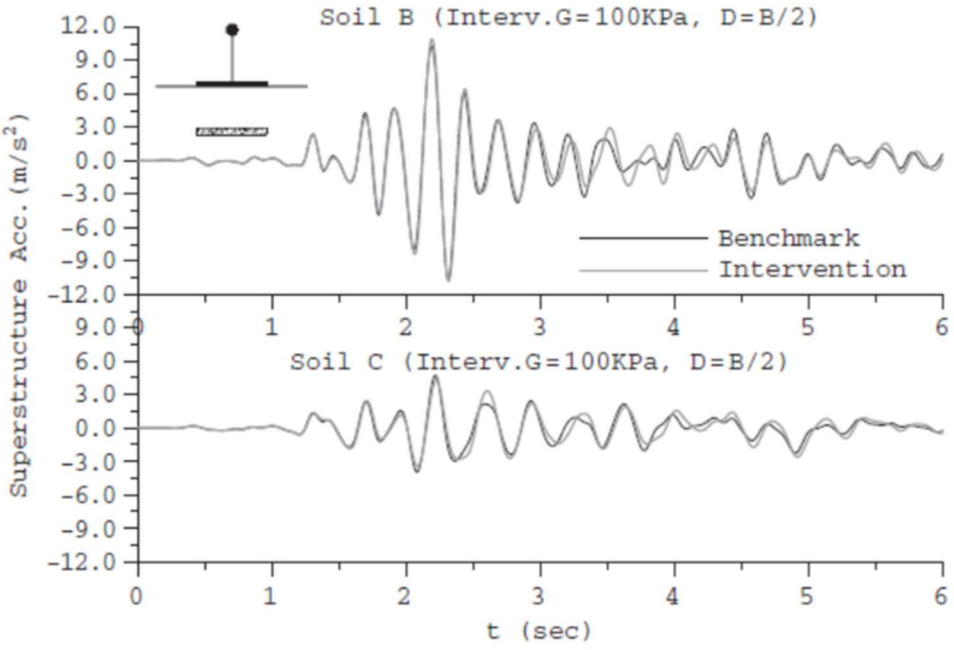
2.2.3. Zeminde Sert ve Yumuşak Bariyerlerin Kullanılması

Geoteknik Sismik İzolasyon metodolojisinde yeni bir bakış olan bariyerlerin çalışma mantığı yapısal izolatörlerin kullanıma benzer ancak literatürde yapısal izolatörlere göre daha az araştırılmıştır. Kirtas ve Pitilakis (2009) makalelerinde izolasyon bariyerinin farklı geometrik şemalarını ele alıyorlar ve binayı SDOF (Tek Serbestlik Derecesi) sistemine benzetiyorlar (Şekil 2-10).



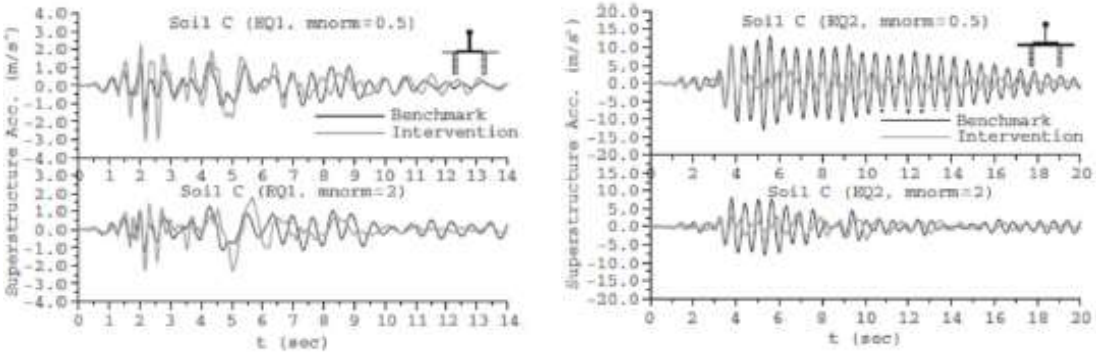
Şekil 2-10. Kirtas ve Pitilakis (2009) tarafından analiz edilen izolasyon şemaları.

Şekil 2-10c' deki dikey rijit ve sert malzemeden oluşan bariyerler sismik enerjiyi absorbe etmede işe yaramadığı gibi zararlı olduğu belirtilmiştir (Flora vd. 2016). Temelin altındaki zemine inşa edilen kısa yumuşak yatay bir bariyer de (Şekil 2-10d) sismik enerjiyi önemli ölçüde etkilemez (Şekil 2-11).



Şekil 2-11. Kısa uzunluktaki yumuşak yatay bariyerin zaman tanım alanındaki etkisi (Kirtas ve Pitilakis, 2009).

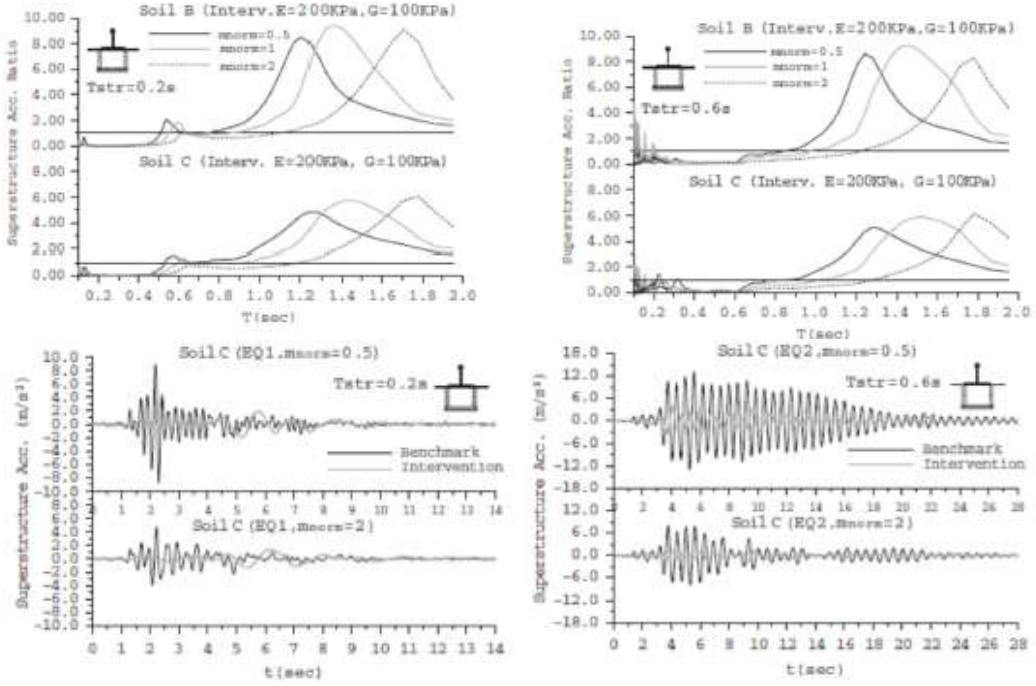
Öte yandan temele yakın dikey esnek bariyerlerin (Şekil 2-10e) inşası çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu sistemin dezavantajı ise orijinal duruma göre oluşturduğu deforme olabilirliğin artması nedeniyle, yapı-zemin sisteminin yer değiştirmesinde artış beklenmektedir.



(a) (b)

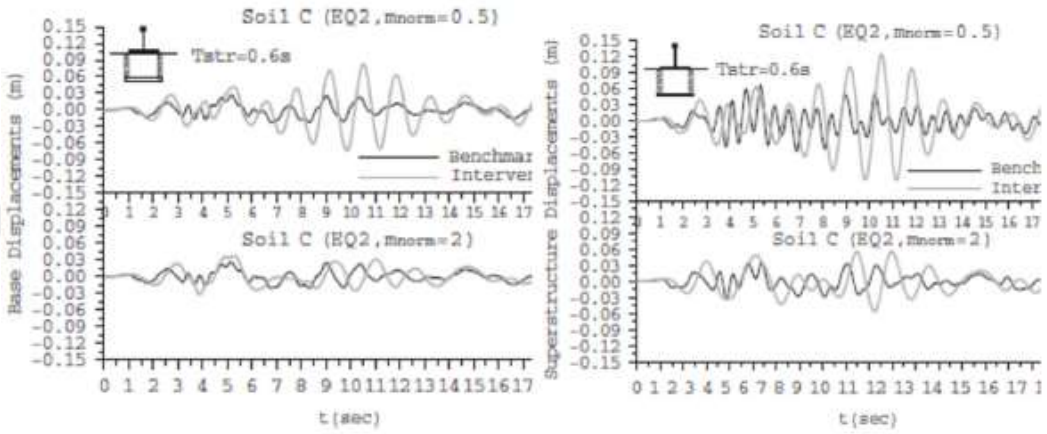
Şekil 2-12. Zaman tanım alanında yumuşak dikey bariyerlerin etkisi: (a) EQ1; (b) EQ2 (Kirtas ve Pitilakis, 2009).

En etkili izolasyon şeması, tabanda düşük kayma mukavemetli bir tabaka ve etrafındaki düşük sertlikte dikey panellerden oluşan kapalı keson (Şekil 2-10f) olarak adlandırılan sistemdir. Şekil 2-10f' deki etkin şema, yapısal tepkiyi tipik az katlı yapılar için daha az kritik olan daha yüksek periyotlara kaydırabilmektedir (Şekil 2-13).



Şekil 2-13. Yumuşak keson: üstyapı için ivme oranı-zaman grafiği (a) Tstr=0.2s ve (b) Tstr=0.6s; (c) üstyapı için ivme-zaman grafiği Tstr=0.2s ve (d) Tstr=0.6s (Kirtas ve Pitilakis, 2009).

Kirtas ve Pitilakis (2009), kapalı bir yumuşak kesonun, yalnızca niteliksel olarak da olsa, deprem sırasında yapısal yer değiştirmeler ve zemin deformasyonları açısından zararlı etkileri olabileceği konusunda açıkça uyarıyorlar (Şekil 2-14). Ancak Kirtas ve Pitilakis (2009), bu tür yumuşak bariyerlerin oluşturulması için herhangi bir özel materyal tanımlamamaktadır. Dikey bariyerler için normal direnç (normal stiffness) değeri olan E' yi 200 kPa ve yatay bariyerler için çok düşük bir kayma direnç (shear stiffness) değeri olan G' yi 100 kPa seçer (Şekil 2-14).

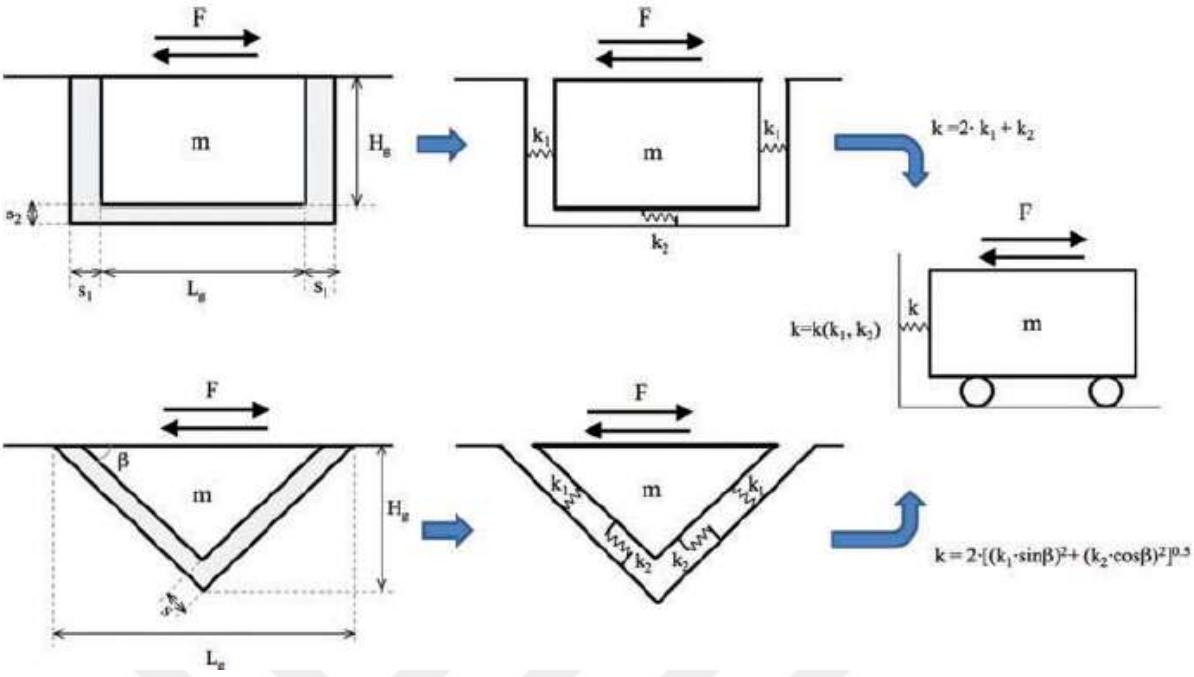


Şekil 2-14. Yumuşak keson etkisi ile oluşan taban yer değiştirmesi (Kirtas ve Pitilakis, 2009).

Flora vd. (2015) Süper Sönümleyici Polimer (SAP) bir malzeme kullanmak suretiyle, yumuşak enjeksiyonlu bariyerleri geliştirmişlerdir.

Süper Sönümleyici Polimer (SAP) özellikle mevcut tarihi yapılar altında sonradan enjeksiyon yapılmak suretiyle kullanılabilmesi nedeniyle oldukça önemli ve alternatifsiz bir malzeme haline gelmiştir. Şekil 2-15' de görüldüğü üzere geometrik olarak iki farklı modelde yerleştirilebilmekte ve deprem esnasında oluşan yer hareketlerini bu geometrik yapı içerisinde sönümlendirilerek yapıya olan ivme etkisini azaltmaktadır.

Yumuşak bir bariyerin yerleştirilmesi, korunan zemin kütlesinin hareketini tamamen değiştirir. Keson, izole edilmiş zemin kütlesi içinde önemli deformasyonları önleyecek kadar yumuşak olduğu sürece, böyle bir kütlenin (m) neredeyse rijit cisim hareketine maruz kalacağını varsaymak mantıklıdır (Flora ve ark., 2016). "k" sertliği, çoğunlukla yumuşak bir bariyerin geometrik ve mekanik özellikleri tarafından yönetilen SDOF sistemi olarak düşünülebilir (Flora ve ark., 2016).



$$k_1 = \frac{E_g \cdot B_g}{S} \quad \textit{compression stiffness} \qquad k_2 = \frac{G_g \cdot B_g}{S} \quad \textit{tangent stiffness}$$

Şekil 2-15. Yumuşak bariyerlerin mekanik davranış şekli.

Süper Sönümleyici Polimer (SAP) malzeme, bir poliakrilik asit ve kısmi sodyum tuzundan oluşmaktadır. Süper Sönümleyici Polimer (SAP) sulu çözeltinin iyonik konsantrasyonu nedeniyle çok büyük miktarlarda suyu emebilen ve tutabilen bir tozdur (Şekil 2-16). Deiyonize ve damıtılmış suda Süper Sönümleyici Polimer (SAP), ağırlığının 500 katını emebilirken %0.9' luk tuzlu su çözeltisine daldırılırsa emiciliği ağırlığının yaklaşık 50 katına düşer (Flora vd., 2015).



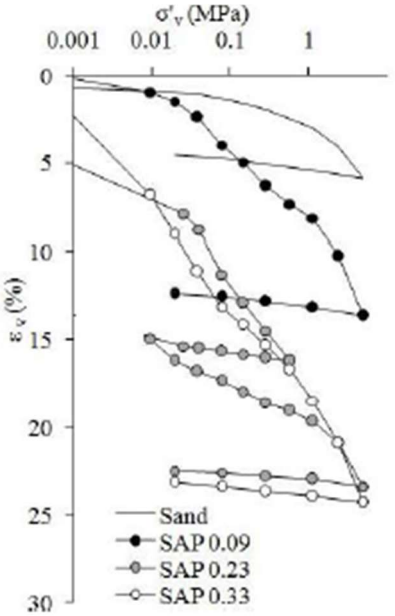
Şekil 2-16. SAP malzemesinin danecik yapısı; hidrasyondan önce ve sonraki halleri.

Su ile temas ettiğinde SAP tanelerinin hacimleri büyük ölçüde artar (Şekil 2-16). Bu nedenle daneler, su ile doldurulmuş balonlara benzer şekilde büyük bir deforme olabilirlik gösterir (Flora vd., 2015). Hidrasyona uğraşmış SAP danelerinin deforme olabilirliği nedeniyle (farklı miktarlarda SAP içeren karışımlar) üç eksenli veya burulma kesme cihazlarında deney olacak numuneleri hazırlama girişimleri başarısız olmuştur (Flora vd., 2015). Numune hazırlamadaki bu problemler, "Kum-SAP" karışımlarından oluşan numuneleri kinematik olarak kısıtlı yatay koşullar altında hazırlanan daha basit deneylere yöneltmiştir (ödometre deneyi, direk ve halka kesme deneyi). Ancak SAP karışımının Vs değerini öğrenebilmek adına geleneksel olmayan yöntemlerle büyük boyutlu üç eksenli deney düzeneği oluşturulmuştur.

Tablo 2-2. SAP malzemesinin farklı karışım oranları ile uygulanan deneyler (Flora vd., 2015).

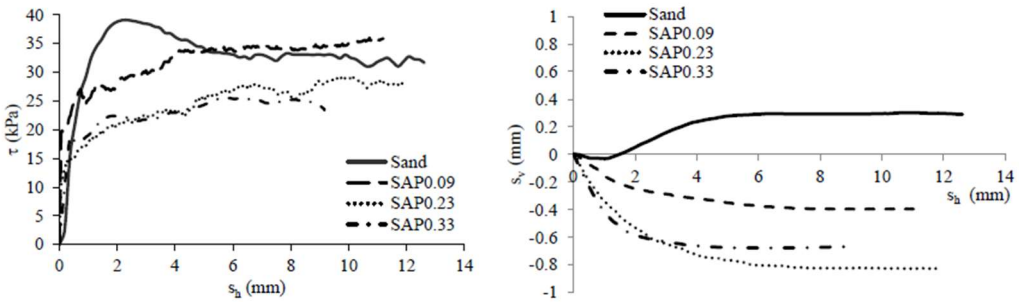
SAP-kum karışımı (SGS)	**Ağırlıkça %SAP**	**e_0**	**Ödeometre deneyi**	**Direk ve halka kesme deneyi**	**$Vs_{,SGS}$ deneyi**	**$V_{P,SGS}$ deneyi**
Kum	0	0.40-0.80	•	•	•	•
SGS_009	9	0.64	•	•		
SGS_023	23	0.49	•	•		
SGS_033	33	0.16	•	•	•	•
SGS_050	50	-		•	•	
SGS_070	70	-		•		•
SGS_090	90	-		•		
SGS_100	100	-			•	•

Ödometre deneyinde kullanılacak SAP ve kum örnekleri kuru numunelerden oluşturulduğu için konsolidasyon oluşması beklenmemektedir. Ancak SAP danelerinin büyük deformasyona uğraması nedeniyle oturmalarda zamanla artış gözlemlenmiştir. Şekil 2-17'de dört adet ödometre deneyinin sonuçlarına yer verilmiştir. Beklendiği gibi, SAP doğal kum malzemesinin sıkışabilirliğini arttırmaktadır.

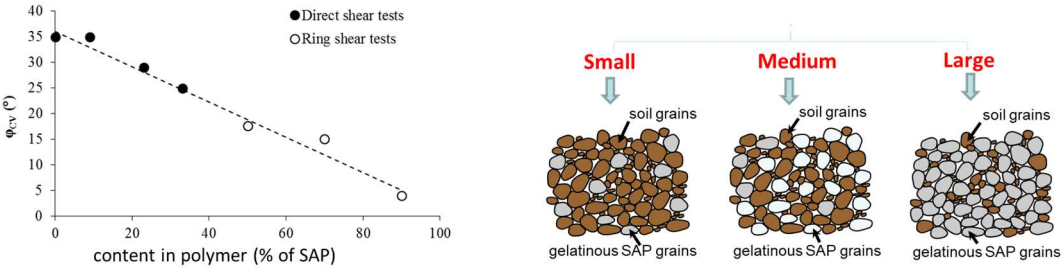


Şekil 2-17. Ödometre deney sonuçları; düşey birim deformasyon-düşey efektif gerilme (Flora vd., 2015).

Bir diğer deney ise direkt kesme deneyidir. Bu deney 50 kPa düşey efektif gerilme altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kumun mekanik davranışı, SAP malzemesinin oransal olarak artışı ile önemli ölçüde değiştirilmektedir. SAP malzemesi %9 olarak dahil edildiğinde kumun genişleme davranışı azalmakta ancak kayma gerilmeleri özellikle deney sonunda neredeyse kumun saf hali ile aynı olmaktadır. Buna karşın SAP oranı arttırıldığında sadece genişlemenin ortadan kalkması değil, nihai dayanımı üzerinde de önemli etkileri olmaktadır. Deneyde kullanılan malzemedeki SAP oranı arttıkça hem düşey deformasyon artmakta hem de kayma gerilmeleri azalmaktadır (Şekil 2-18). Şekil 2-19' da görüldüğü üzere SAP kum karışımındaki SAP oranı arttıkça içsel sürtünme açısı değeri düşmektedir.



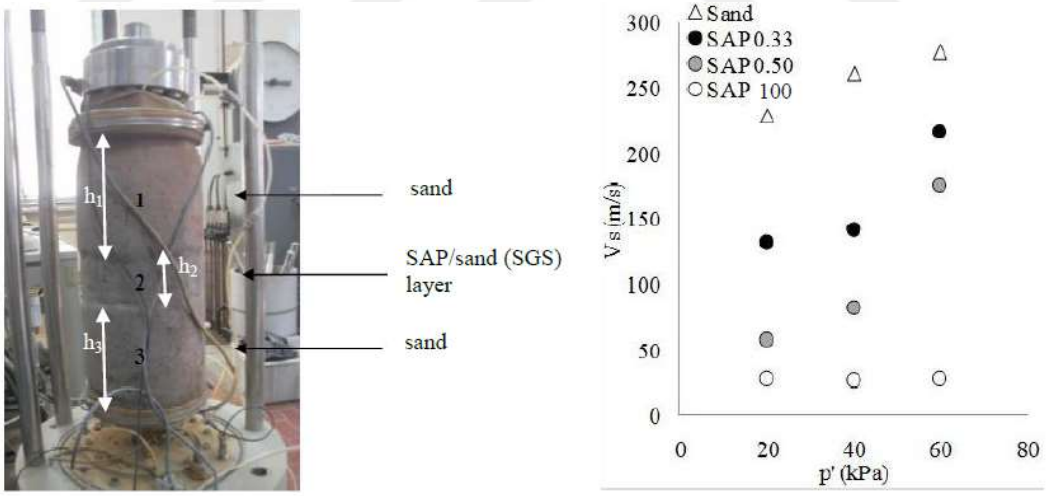
Şekil 2-18. Direkt kesme deney sonuçları; kayma gerilmeleri ve düşey deformasyon ile, düşey deformasyon ve yatay deformasyon grafikleri (Flora vd., 2015).



Şekil 2-19. Farklı oranlarda SAP malzemesinden oluşturulmuş kumun içsel sürtünme değeri grafiği ve SAP zemin karışımının grafiksel gösterimi (Flora ve ark., 2015).

Sonuncu olarak da büyük bir üç eksenli hücre düzeneği içerisinde Vs ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2-20'de görüldüğü üzere, h1 ve h3 kalınlıklarında kum tabakası arasına h2 kalınlığında SAP-kum karışımı yerleştirilmiştir. Numune üzerindeki kayma dalgalarının toplam seyahat süresi ve kumun karakteristik özellikleri de dikkate alınarak SAP karışımının Vs değerleri elde edilmiştir.

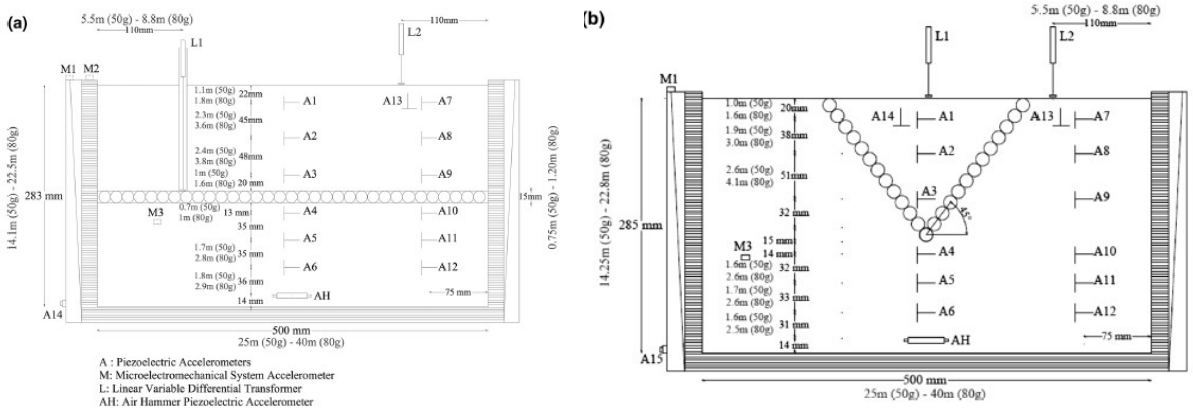
Buna göre, SAP karışım oranı arttıkça, Vs değerleri düşmektedir. SAP oranı %33 olan numunede Vs değerleri 250m/sn mertebesinde iken SAP oranı %100 olduğunda bu hız yaklaşık 25m/sn mertebesine kadar gerilemektedir.



Şekil 2-20. Üç eksenli hücre düzeneği ve farklı oranlarda SAP malzemesinden oluşturulmuş numuneler üzerinde elde edilmiş Vs değerleri (Flora vd., 2015).

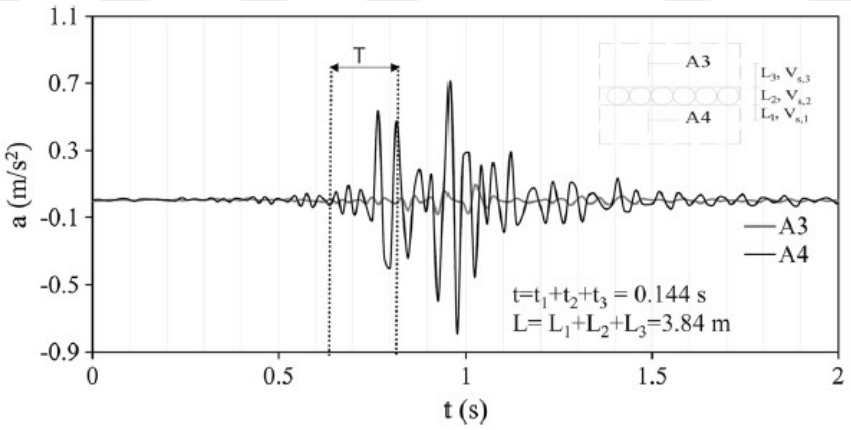
Nappa vd., (2018) SAP malzemesinin yumuşak bariyer olarak kullanılması konusunu, santrifüj deneyinde uygulayarak davranışını çözümlemeye çalışmıştır. Bu çalışmalar, "Schofield Centre of Cambridge University" merkezinde gerçekleştirilmiştir. Buna göre, iki indirgenmiş düzenek oluşturulmuştur. İlki yatay bariyer şeklinde tasarlanmış ve diğeri V şeklinde hazırlanmıştır (Şekil 2-21). 50 g ve 80 g'de santrifüjde test edilen iki model de kullanılan kap (laminer kutu)

sayesinde ana yatay ekseni boyunca sallanmayan yoğun bir Hostun kumu tabakasından oluşuyordu.



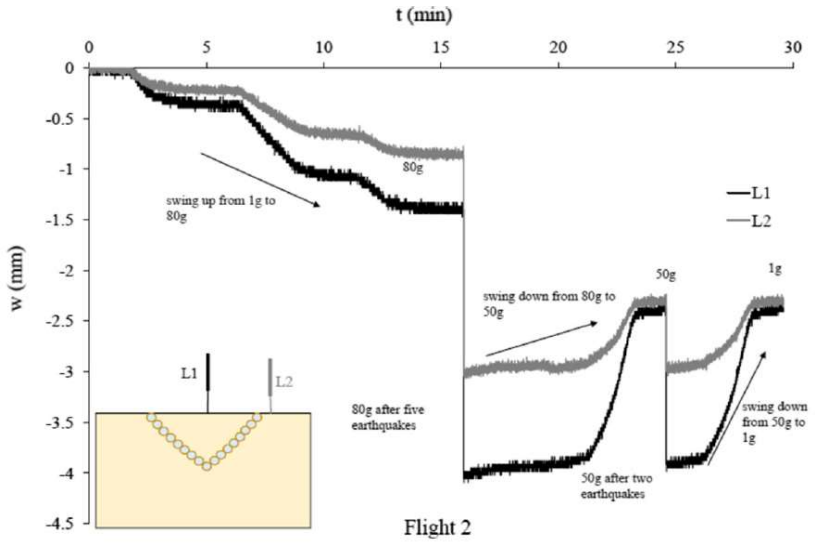
Şekil 2-21. Santrifüj deney düzeneği a) yatay bariyer b) V şeklinde bariyer düzeneği (Nappa vd., 2018).

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, Şekil 2-22'de yatay bariyer modelinde A3 ve A4 noktalarında kaydedilmiş ivme değerleri görülmektedir. Buna göre, yatay bariyer üzerinde yer alan A3 noktasındaki ivme zaman grafiği değerlerinin bariyer altındaki A4 noktasındaki ivme zaman değerlerine göre önemli ölçüde küçüldüğü tespit edilmiştir.



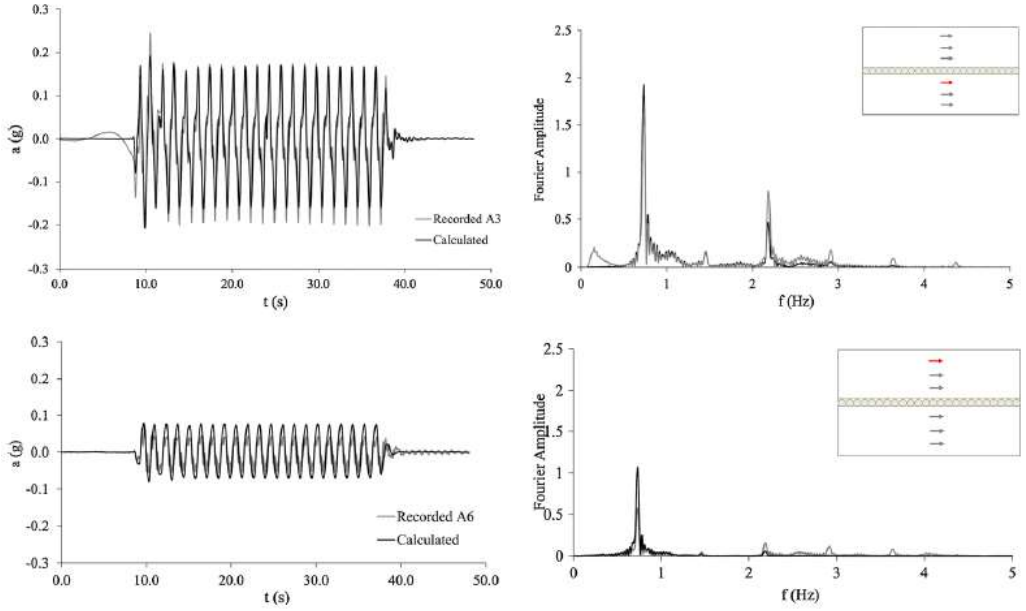
Şekil 2-22. Yatay bariyer deneyinde, A3 ve A4 noktalarında kaydedilmiş ivme zaman grafiği (Nappa vd., 2018).

V tipi modelde, bariyerin içerisinde ve dışarısında seçilen iki noktada yapılan oturma değerlendirmelerinde, özellikle 1g dan 80g değerine kadar olan artışta, izolasyon içerisinde olan noktada oturma değerlerinin belirgin şekilde yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 2-23).



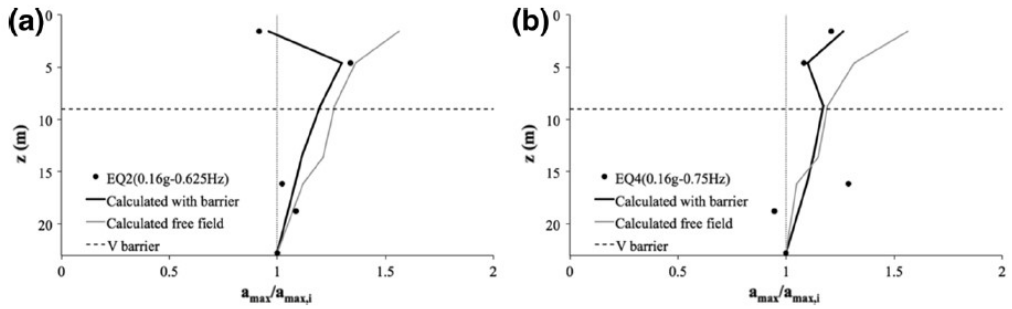
Şekil 2-23. V tipi bariyer deneyinde, L1 ve L2 noktalarında yapılan oturma okumaları grafiği (Nappa vd., 2018).

Yatay bariyer modelinde, deney sonuçlarına göre, bariyer altında ve üstüne iki farklı sonuç ortaya çıkmaktadır. Şekil 2-24'de bariyer altındaki seviyede yapılan ölçümlerde, ivme değerleri 0.2g seviyelerin üzerine çıkarken, bariyer üstünde yüzeye yakın seviyelerde 0.1g değerinin altında kalmaktadır. Benzer şekilde Fourier spektrumlarında da aynı frekans seviyelerinde pik değerler ulaşmasına karşın, ulaşılan ivme değerleri bariyer üzerinde oldukça küçülmektedir.



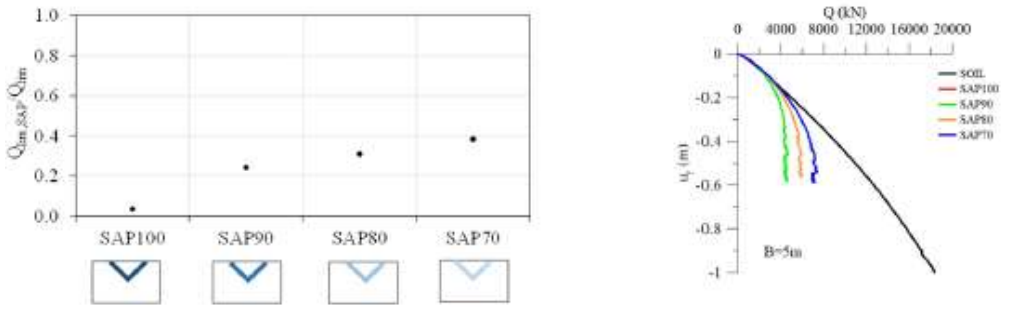
Şekil 2-24. Yatay bariyer modelinde kaydedilen ve hesaplanan ivme ve Fourier spektrum grafikleri (Nappa vd., 2018).

V tipi deneylerde Şekil 2-25'te görüldüğü üzere, iki farklı deprem için verilen grafiklerde bariyer altında ivme amplifikasyon değerleri eşit olmasına karşın, bariyer içerisine geçildiğinde bu değerlerde belirgin bir ayrışma olduğu tespit edilmiştir.

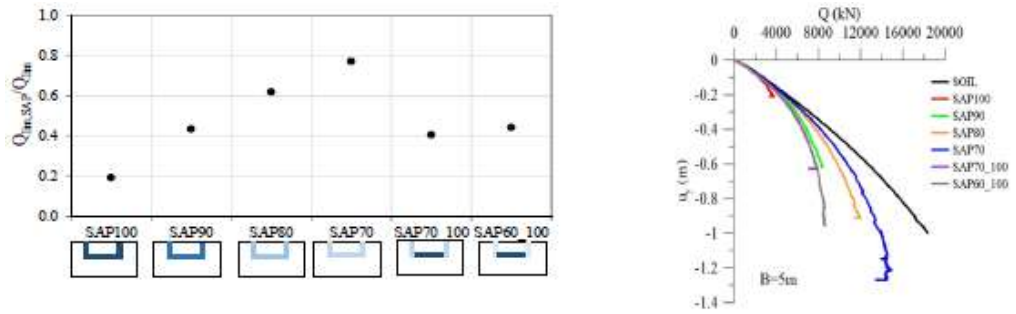


Şekil 2-25. V tipi model deneyinde bariyer altında ve bariyer üzerindeki ivme amplifikasyon grafiği (Nappa vd., 2018).

Nappa vd. (2018) santrifüj deneyini, kıyaslama yapabilmek adına sonlu elemanlar programı ile nümerik olarak da modelleyip analiz etmiştir. Nümerik modelde farklı kum-SAP karışımlarına sahip yumuşak bariyerlerin etkisini hem statik hem de dinamik olarak analiz etmek mümkün olmuştur. Nappa vd. (2018) statik durumda farklı kum-SAP karışımına sahip yumuşak bariyerlerini V ve dikdörtgen şekilleri göz önünde bulundurarak taşıma kapasite sonuçları Şekil 2-26 ve Şekil 2-27'de verilmiştir.

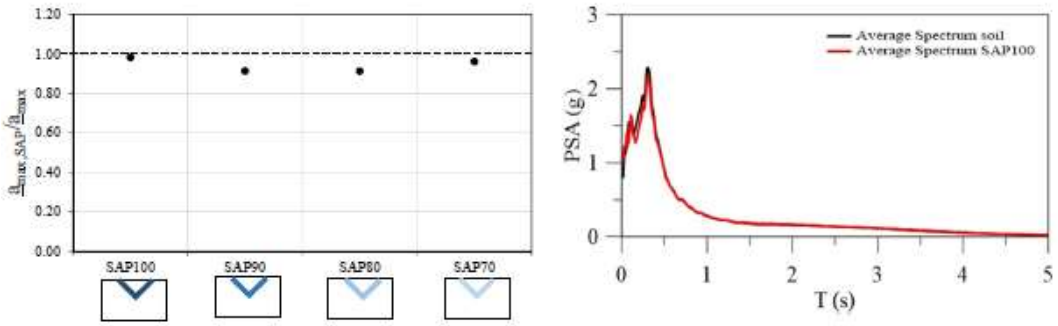


Şekil 2-26. V tipi bariyerlerde taşıma kapasitesi sonuç grafiği (Nappa vd., 2018).

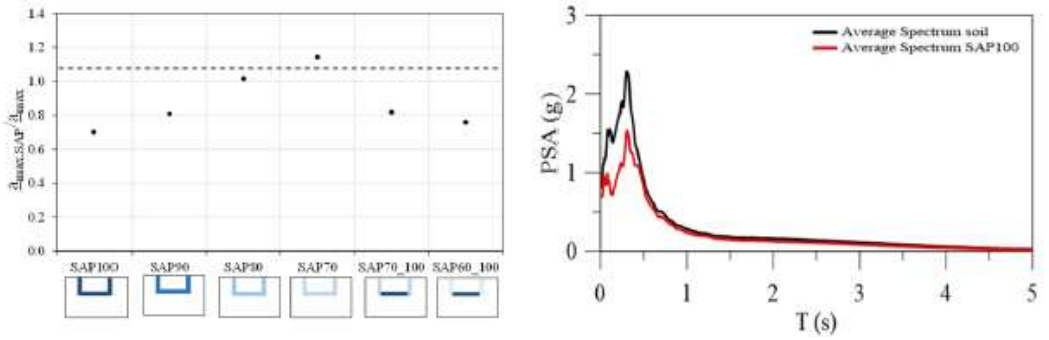


Şekil 2-27. Dikdörtgen tipi bariyerlerde taşıma kapasitesi sonuç grafiği (Nappa vd., 2018).

Sismik durumda yedi farklı deprem kaydı kullanılarak, zeminin yüzeyindeki maksimum ivmelerin azalmasının (a_{max},SAP/a_{max}) yanı sıra V tipi ve dikdörtgen tipi bariyerlere ait spektrum azalmasın durumunu da incelemiştir (Şekil 2-28 ve Şekil 2-29).



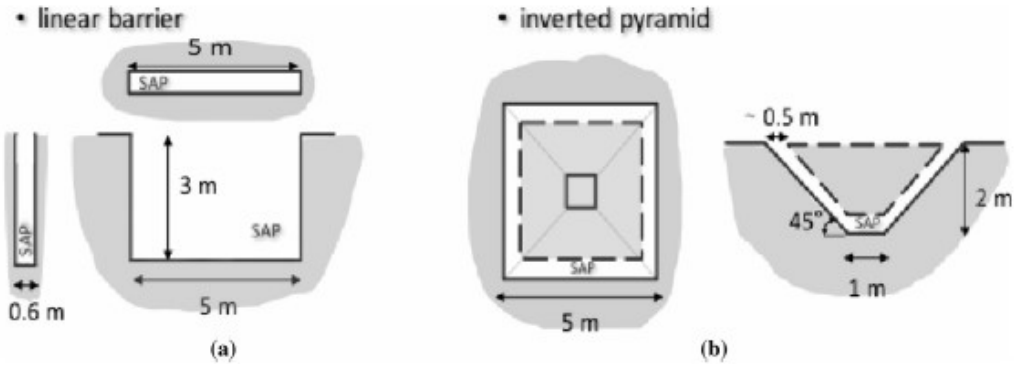
Şekil 2-28. a) V tipi bariyer $a_{max,SAP}/a_{max}$ oranı, b) V tipi bariyer PSA-T grafiği (Nappa vd., 2018).



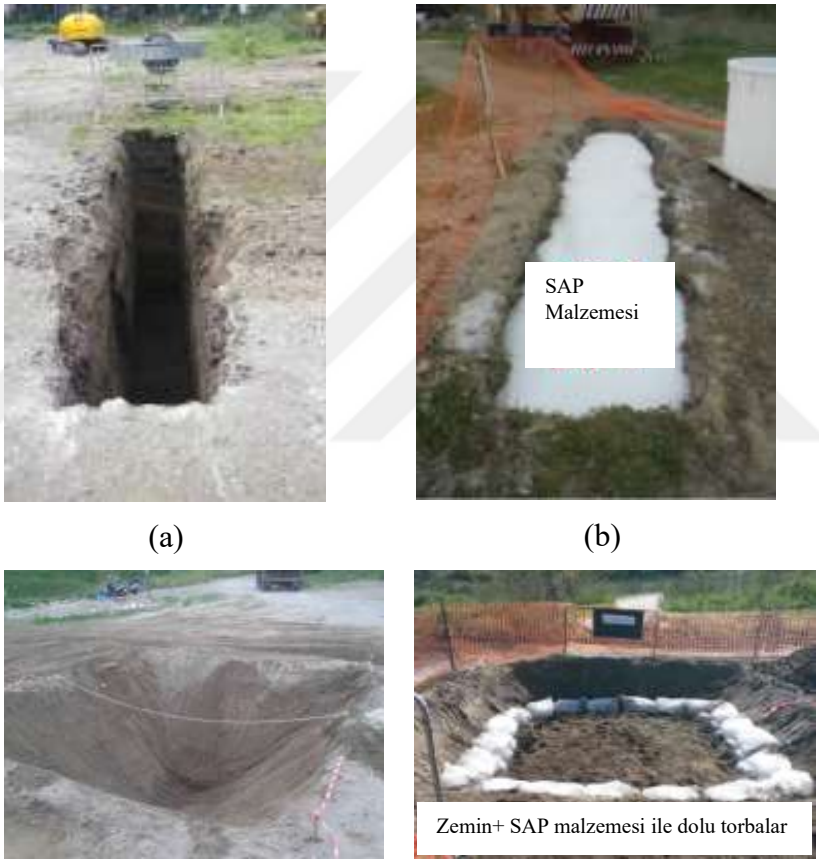
Şekil 2-29. a) Dikdörtgen tipi bariyer $a_{max,SAP}/a_{max}$ oranı, b) Dikdörtgen tipi bariyer PSA-T grafiği (Nappa vd., 2018).

Şekil 2-28'de görüldüğü gibi V tipi bariyer için ortalama maksimum ivmelerde %10 civarında azalma olmuştur. Bu nedenle V tipi bariyerlerin kullanılması önerilmemiştir. Şekil 2-29'da görüldüğü üzere sismik enerjiyi azaltmadaki optimum sistem, (hem statik hem de sismik durumda) iki farklı malzemeden (tabandaki bariyerde %100 SAP ve kenarlarda %60 veya %70 SAP) yapılmış dikdörtgen şeklindeki bariyer sistemidir.

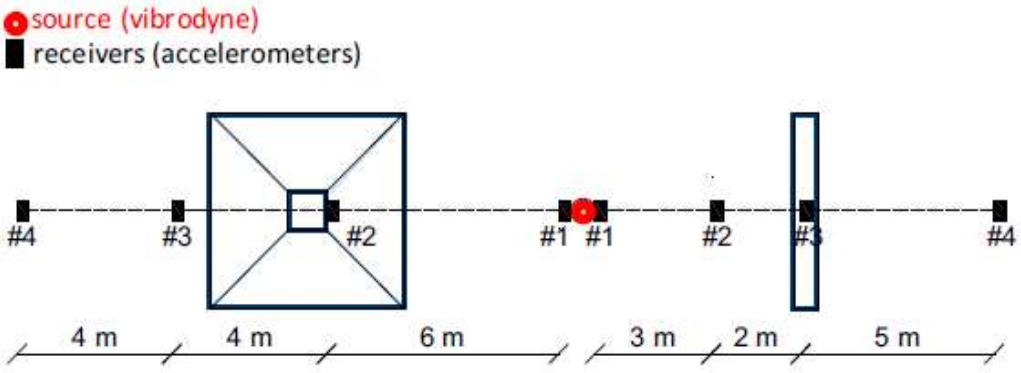
Nappa vd, (2019) deprem dalgaları değil ancak yüzeyden gelebilecek dalgalara yönelik SAP malzemesi kullanarak deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Buna göre yüzeyde üretilen sismik dalgaların iki farklı geometrik konfigürasyonu yapılarak (SAP malzemenin düşey bariyer şeklinde ve piramit şeklinde yerleşmesi) farklı noktalarda ivme davranışındaki etkileri incelenmiştir.



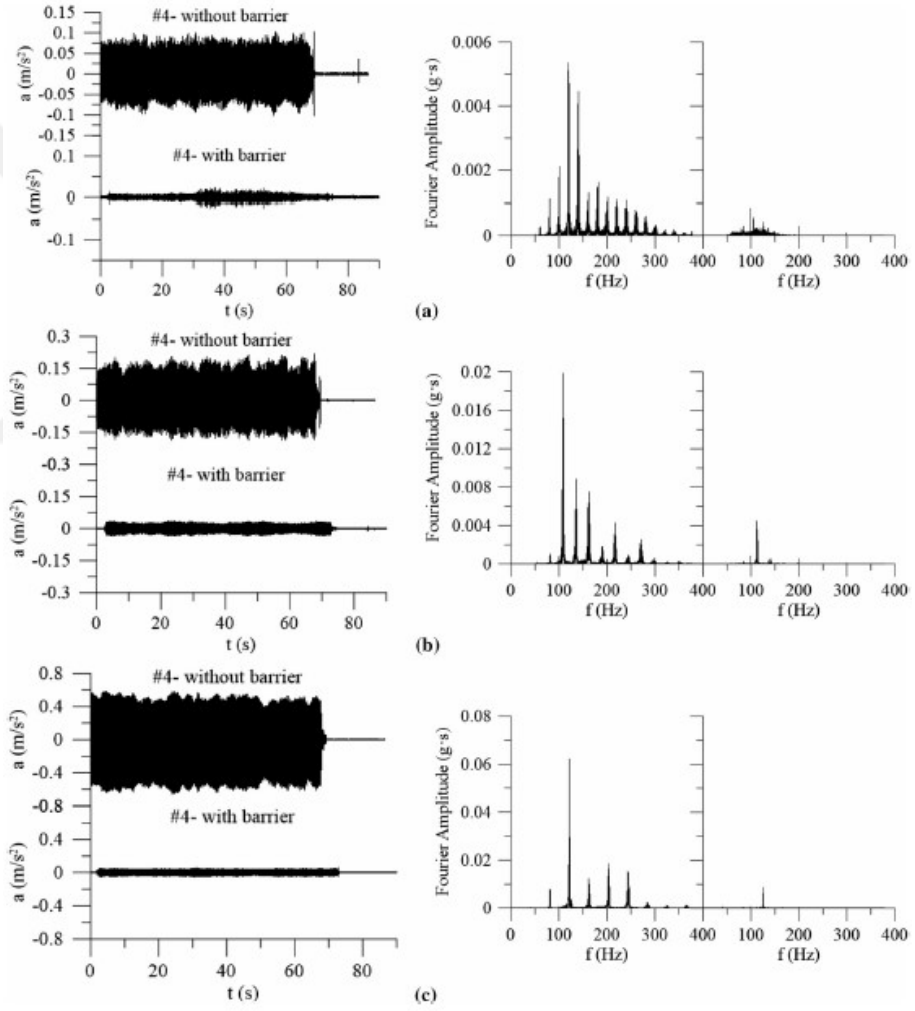
Şekil 2-30. a) Düşey bariyer b) Piramit bariyer plan gösterimleri tipi bariyer PSA-T grafiği (Nappa vd., 2019).



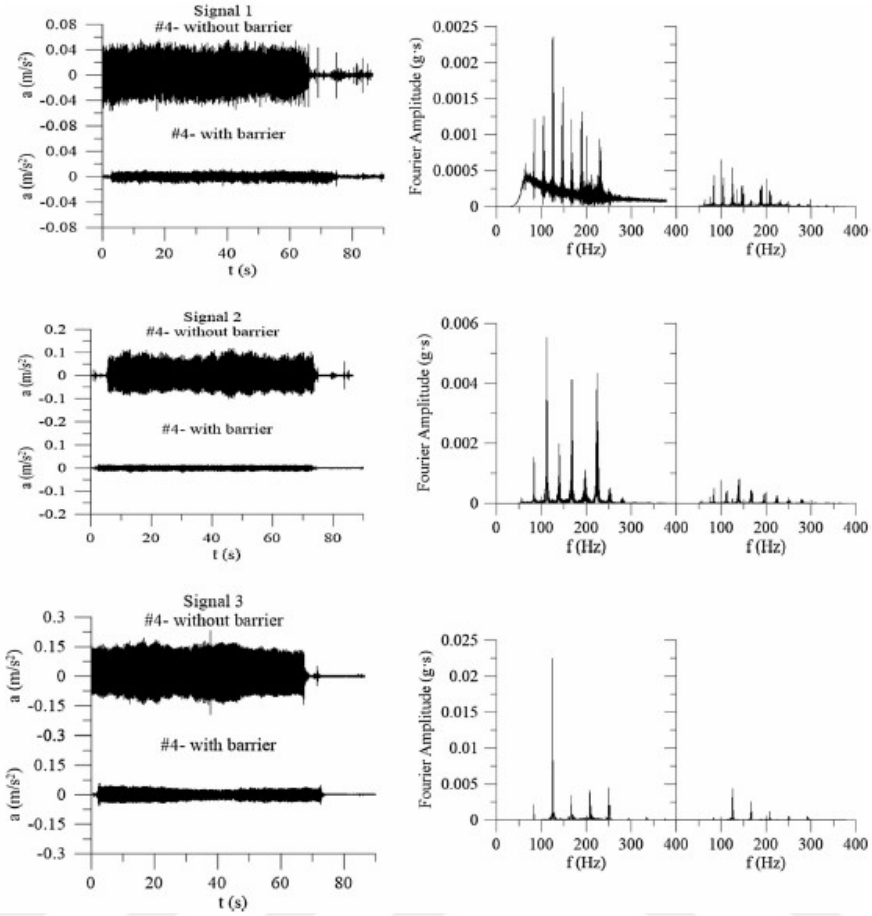
Şekil 2-31. a) Düşey bariyer için kazıdan sonraki görünümü, b) Düşey bariyerin SAP ile doldurulmuş hali, c) piramit bariyer için kazıdan sonraki görünümü, d) piramit bariyerin SAP ve zemin ile doldurulmuş hali (Nappa vd., 2019).



Şekil 2-32. Saha deney ölçüm noktası yerleşim planı (Nappa vd., 2019).



Şekil 2-33. Düşey bariyer ivme-zaman grafiği- Signal 1, Signal 2 ve Signal 3 yüzey dalgalarına göre.



Şekil 2-34. Döndürülmüş piramit bariyer ivme-zaman grafiği- Signal 1, Signal 2 ve Signal 3 yüzey dalgalarına göre.

Burada kaynakta kontrollü bir şekilde üretilen sismik dalgalara ait ivme zaman davranışı, 4'nolu noktada bariyer olması ve olmaması halleri için Şekil 2-33 ve Şekil 2-34'de grafiklendirilmiştir. Görüldüğü üzere, bariyer olmadığı durumlarda üç farklı sinyal için oldukça yüksek ivme değerleri ölçülmüşken, bariyer olduğu durumlarda bu değerlerinin oransal olarak düştüğü tespit edilmiştir.

2.3. SONLU ELEMANLAR PROGRAMLARI

Bu bölümde teze konu olan yumuşak bariyer sisteminin analizlerinde kullanılacak olan "Sonlu Elemanlar Programları" nın çalışma mantığı anlatılacaktır.

2.3.1. Plaxis 2D Yazılımı

Plaxis 2D, geoteknik mühendisliğinde deformasyon, stabilite ve yeraltı suyunun akışı için geliştirilmiş iki boyutlu sonlu elemanlar programıdır. Plaxis'in geliştirilmesi 1987 yılında Delft Teknoloji Üniversitesi'nde Hollanda Bayındırlık ve Su Yönetimi Bakanlığı'nın bir girişimi

olarak başlamıştır. Yazılımın geliştirilmesindeki esas amaç, Hollanda' da yumuşak zeminlerindeki nehir dolgularının analizi için kullanımı kolay 2D sonlu eleman kodu geliştirmektir.

Plaxis 2D programını kullanarak sonlu elemanlar analizi yapabilmek için ilk olarak problemin geometrisi x-y düzleminde oluşturulmalı ve malzeme özellikleri ile sınır koşulları belirlenmelidir. Bu adımlar "Input" bölümünün "Soil-Structure" sekmesinde yapılır. Daha sonra yine "Input" bölümünün "Mesh" sekmesinde mesh (ağ) boyutu oluşturulurken "Flow Conditions" sekmesinde kütle modeli içerisindeki su koşulu belirlenmektedir. "Input" bölümünün son aşamasındaki "Calculation" sekmesinde ise önceki sekmelerde belirlenen koşullara göre hesaplamalar yapılır.

Plaxis 2D, deformasyonlar için dördüncü dereceden bir interpolasyon sağlar ve sayısal entegrasyonlar on iki Gauss noktasını (gerilme noktaları) içerir. Problem çizildikten sonra, sınır koşulları kullanıcı tarafından kütüphane kısıtlamalarına göre atanabilir ya da statik veya dinamik analiz tipine göre otomatik olarak uygulanan sabit sınır koşulları seçilebilir. Geometrik ve yapısal ayarlar tamamlandıktan sonra oluşturulan iç veya dış noktalara uygulanan yayılı (sabit veya doğrusal) veya noktasal yükler ya da deplasmanlar hesaplamalara dahil edilebilir.

Plaxis 2D programında, 6 tip sonlu elemanlar analizi yapılabilir. Bu analizler:

- Plastik analiz,
- Konsolidasyon analizi,
- Akış Analizi,
- Güvenlik analizi,
- Dinamik analiz,
- Konsolidasyonlu dinamik analizdir.

Plastik seçeneği, bir elasto-plastik deformasyon analizidir; Konsolidasyon seçeneği, boşluk basıncı artışlarının zamanla dağılımını dikkate alır; Güvenlik seçeneği, bir güvenlik faktörünü değerlendirmek için mukavemet parametrelerini azaltan bir stabilite analizi gerçekleştirir;

Dinamik seçeneği, modelin bir noktasına veya çizgisine karşılık gelen deprem hareketlerinin zamana bağlı uygulanmasından oluşur.

Plaxis 2D programında yapılan sonlu elemanlar analiz aşaması sona erdiğinde ya da durdurulduğunda (zemin göçmesi nedeniyle ya da manuel veya otomatik olarak) hesaplamanın sonuçları "Output" bölümünde incelenebilir. "Output" bölümünde görüntülenen sonuçlar şunlardır:

- Toplam veya artırımlı deformasyon, hız ve ivme;
- Toplam veya artırımlı gerinim (strain); Toplam veya artırımlı gerinimin kartezyen bileşenleri;
- Toplam veya efektif gerilemeler; Toplam ve efektif gerilmelerin kartezyen bileşenleri, toplam veya artırımlı boşluk suyu basıncı;
- Yapısal elemanlarda deplasmanlar ve kuvvetler.

Analiz sonuçları hem grafiksel (vektörel, konturlar veya gölgelemeler) hem de tablo listesi olarak sunulur. Plaxis 2D kullanıcı kendi belirlediği kesit çizgisi boyunca (grafik ve tablo biçiminde) yukarıda listelenen parametreleri de görüntüleyebilir. Yapısal elemanlarla ilgili olarak yazılım, model parametrelerinin değerlerini ve ayrıca son hesaplama adımları ile önceki adımların iç kuvvetleri (eksenel yükü, kesme kuvveti ve eğilme momenti) verir.

Dinamik analizlerin modellenmesi, genel anlamda diğer analiz türlerine benzer, ancak diğer analizlere kıyasla ilave parametreler ve sınır koşullarında farklılıklar vardır. Bir zemin tabakasının deprem hareketini gerçekleştirmek için, iki boyutlu bir modelin altına dinamik yükler uygulanır ve kayma dalgalarının zemin tabakasının yüzeyine kadar yayılmasına neden olur. Öngörülen deplasmanların (prescribed displacement) kullanımı, "Calculation" sekmesinde deplasman, hız veya ivmenin zamana bağlı olarak tanımlanmasına izin verilir. "Calculation" sekmesinde, sismik dalga yayılımının denklemi zaman tanım alanında çözülür.

Statik deformasyon analizi durumunda, sonlu eleman modelinin sınırlarına otomatik sınır koşulu tanıtılır. Dinamik analizde model uzunluğu statik analize göre çok daha büyük olmalıdır. Çünkü aksi takdirde, gerilme dalgaları yansıtılarak hesaplanan sonuçlarda bozulmaya neden

olacaktır. “Calculation” sekmesinde, doğru bir dinamik analiz yapabilmek için her dinamik fazda bazı parametrelerin doğru bir şekilde tanımlanması gerekir.

2.3.2. GTS NX Midas Yazılımı

GTS NX Midas, sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak zemin yapı etkileşiminin değerlendirilmesi için geliştirilmiş bir programdır. GTS NX Midas, derin temeller, kazılar, karmaşık tünel sistemleri, sızıntı analizi, konsolidasyon analizi, dolgu tasarımı, dinamik ve şev stabilite analizi de dahil olmak üzere geoteknik tasarım uygulamalarını çözümlemek için hazırlanmış kapsamlı bir sonlu elemanlar programıdır. Program, gerçek olayları simüle etmek için çeşitli koşulları (zemin özellikleri, yeraltı su seviyesi vb.) ve analitik metodolojileri destekler.

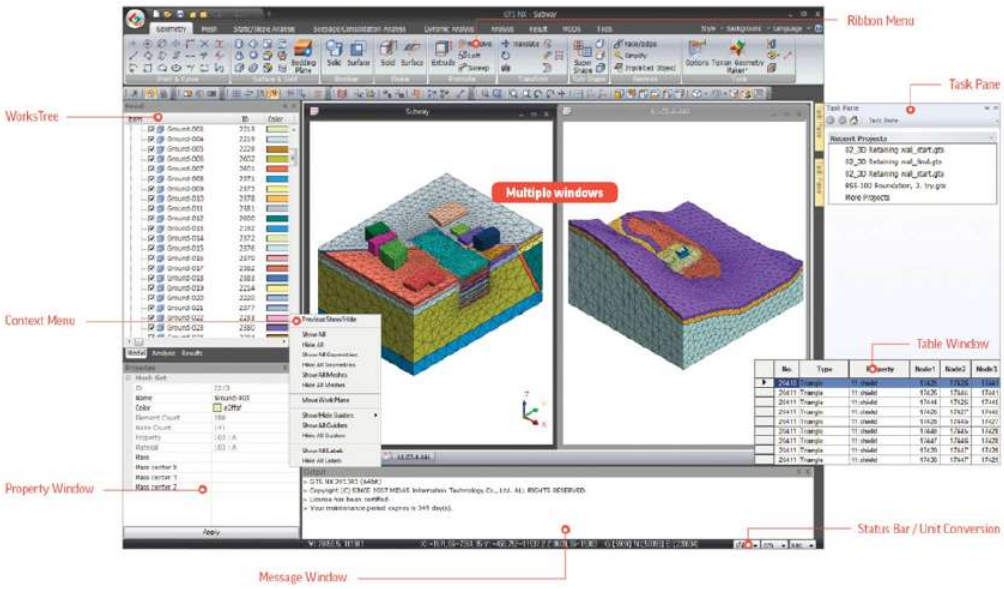
Her türlü saha koşulu için ayarlar, non-linear (doğrusal olmayan) analiz yöntemleri, (linear (doğrusal)/non-linear (doğrusal olmayan) statik analiz, linear /non-linear dinamik analiz, şev stabilite analizi, sızıntı ve konsolidasyon analizi vb.) ve çeşitli birleştirilmiş analizler (sızıntı-gerilme, gerilme-şev stabilitesi ve non-linear dinamik-şev stabilite gibi birleştirilmiş analizler) kullanılarak simüle edilebilir.

GTS NX Midas programında, “Geometry” bölümünde modellemenin ilk adımı olan geometrik şekil (çizgi, yüzey ve hacim) oluşturmadır. Aynı zamanda “CAD” tabanlı programlarda oluşturulan modellerde bu bölümde programa tanımlanır.

“Mesh” bölümünde ilk olarak Material komutundan malzeme özellikleri girilir ve sonrasında şekil ve boyut (1D, 2D, 3D) özelliklerine göre “Property” komutunda girilir. Malzeme özellikleri elemanlara “Mesh” işlemi sırasında atandığı için sonlu eleman ağı tüm modele tek seferde yapılmaz. Modeldeki her elemana boyut özelliklerine göre ayrı ayrı ”Mesh” işlemi yapılır.

“Analysis Method” bölümünde modellemenin son aşaması olan sınır ve yük koşulları tanımlanır. Sınır ve yük koşulları tanımlandıktan sonra analiz türüne göre inşaat sürecinin adım adım yorumlanması için inşaat aşamasını detaylı bir şekilde tanımlamaya olanak sağlar.

“Analysis” bölümünde modelleme ve analiz yöntemi tanımlandıktan sonra analiz koşulları ve kontrol seçenekleri analiz türlerine göre ayarlanır.



Şekil 2-35. GTS NX Midas program ara yüzü.

3. YÖNTEM

Günümüz şartlarında mevcut tarihi yapılarda ve yığma yapılarda tarihi dokuya zarar vermeden sismik izolasyon sistemi kullanılması oldukça güçtür. Bu nedenle bu sisteme alternatif daha ekonomik ve pratik olan yumuşak enjeksiyon yaklaşımına dayalı bir sistem olan "Geoteknik Sismik İzolasyon (GSI)" sistemi kullanılmaya ve yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu proje çalışması mevcut tarihi yapının deprem riskinin azaltılmasında kullanılacak olan GSI izolasyon sisteminin nasıl kullanılacağına dair bir hipotezdir.

Bu tez çalışması kapsamında mevcut tarihi yapılarda önceden oluşmuş hasarları deprem kuvvetinden korumak adına Napoli Üniversitesi ile ortak bir çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmaya konu olacak mevcut tarihi yapı olarak İstanbul Surları içerisinde bulunan T19 kulesi seçilmiştir. Bu nedenle T19 kulesine ait önceki yıllarda meydana gelmiş olan depremlere ait hasar kayıtları, zemin çalışmaları ve kulenin yakınında bulunan Fatih istasyonunda ölçülmüş olan 1999 Kocaeli depremine ait bilgiler toplanıp bu bölümde sunulmuştur.

Bu bölümde ilk olarak tezin konusunu oluşturan "Geoteknik Sismik İzolasyon (GSI)" sisteminin uygulanması tasarlanan bölgeye ait (T19 Kulesi) geometri bilgisi, zemin ve yapısal malzeme parametreleri ve deprem etkisi altında zemin davranışının modellenme yöntemleri anlatılacaktır. Sonrasında yumuşak bariyer sisteminde kullanılacak olan farklı karışım oranlarındaki SAP malzemesinin doğrusal olmayan davranışı detaylı bir şekilde anlatılacaktır. Sonlu elemanlar programları için doğrulama ve hassasiyet analizleri yapılarak en uygun nümerik model seçilecektir. Son olarak ise bu teze konu olan T19 Kule bölgesine ait yumuşak bariyer sistemi detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

3.1. T19 KULESİ VE SURLAR

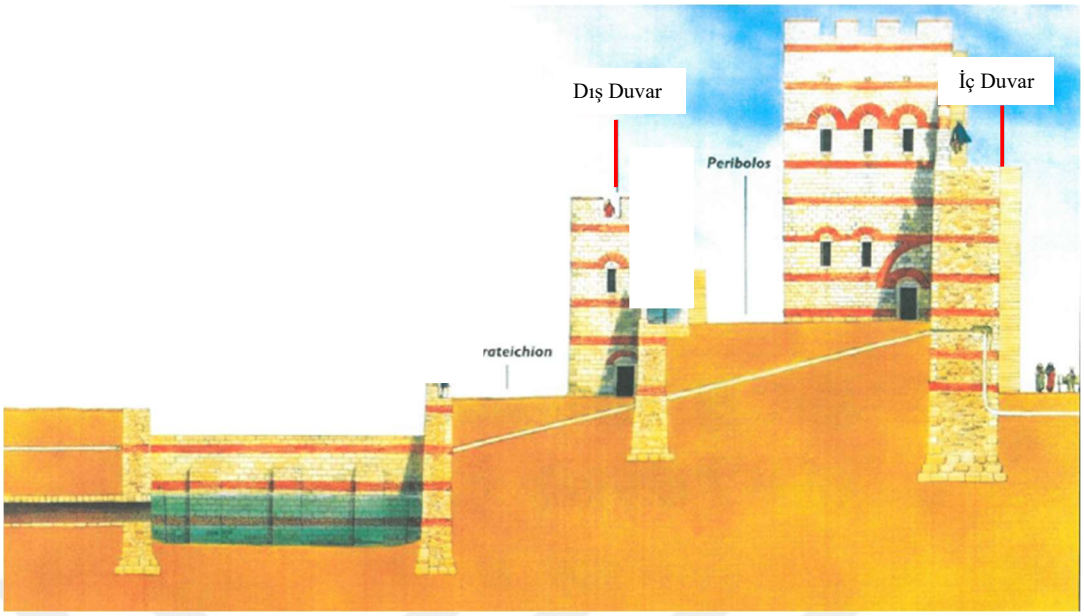
3.1.1. Tarihçesi

İstanbul surları, Bizans İmparatorluğunun askeri mimarisinin en etkileyici parçalarından biridir. Başlangıçta Büyük Konstantin (MS 272-337) tarafından, şehri dört bir yandan çevreleyerek onu hem denizden hem de karadan gelebilecek saldırılara karşı korumak amaçlı inşa edilmiştir. Şehrin büyümesiyle birlikte İmparator II. Theodosius (MS 408-450) döneminde, geçmiş dönemde yapılan surların yaklaşık 2 km batısında, kara tarafında çift sıra sur ilave edilmiştir. (Şekil 3-1).



Şekil 3-1. 1453'de Osmanlı Devleti tarafından fethedildiği sırada İstanbul haritası.

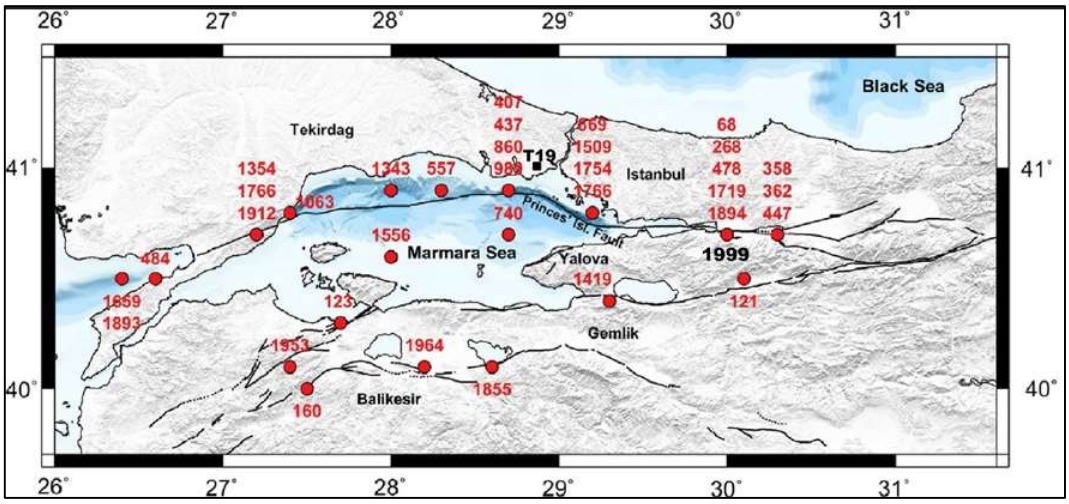
Şekil 3-2'de gösterilen kesite bakılacak olunursa, kara tarafında sistem birbirine yakın iki savunma hattından oluşmaktadır. Savunma sistemi; maksimum yüksekliği 12m olan bir iç duvar ve her biri kulelerle güçlendirilmiş daha düşük yükseklikte onlarca metre arayla yerleştirilmiş bir dış duvardan oluşmaktadır. İç kuleler 24m, dış kuleler ise yaklaşık 10m yüksekliğindedir. Şekil 3-2'de gösterildiği üzere iki duvar arasındaki terastaki zemin seviyesi, dış duvarın dışından birkaç metre (yaklaşık 5m) daha yüksektir. Bu nedenle saldıranlara karşın savunmacıları baskın konuma getirmiştir. Dış duvarların önü ilk savunma aracı olarak başlangıçta suyla doldurulmuş bir hendekle dışarıdan korunmuştur.



Şekil 3-2. İstanbul kara surlarının ve kulelerinin tipik kesiti.

Bu savunma sistemi, birçok kuşatma sırasında şehri kurtarmada önemli rol oynamıştır. Bununla birlikte ilerleyen zamanla barut kuşatma toplarının geliştirilmesi sistemi savunmasız hale getirmiştir. Nihayetinde, Osmanlılar tarafından kullanılan 8m açıklı topların önemli rol oynadığı altı haftalık kuşatmanın ardından şehir 29 Mayıs 1453'de Osmanlılar tarafından ele geçirilmiştir.

Tarihler boyunca surlar birçok deprem ve selden zarar görmüştür. Şekil 3-3, Marmara bölgesinin meydana gelen büyük depremlerin merkezlerini ve yıllarını göstermektedir. 447 yılındaki güçlü Kocaeli depremi 57 kulenin ve surların büyük bölümlerinin kısmen göçmesine neden olmuş, ardından gelen büyük depremler (1509, 1719, 1754, 1766 ve 1894) surlarda önemli hasarlara neden olmuştur. Bu nedenle, restorasyon işlerini üstlenen imparatorları veya hizmetkarlarını anan yazıtların da gösterildiği gibi birçok kez onarımlar yapılmıştır.

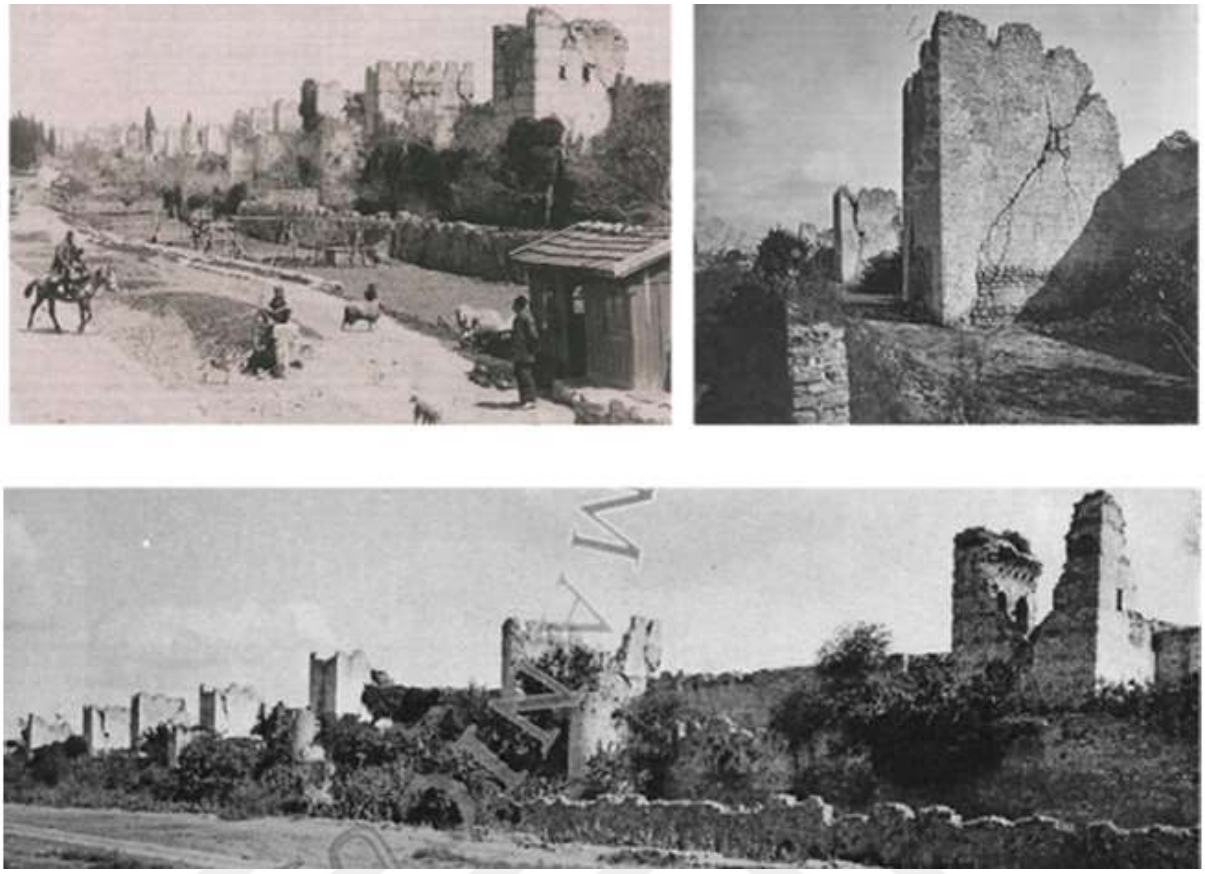


Şekil 3-3. Marmara bölgesindeki depremlerin tarihi geçmişi.

Surlar Osmanlı döneminin (1453-1922) çoğunda, şehir orta çağ sınırlarını aştığında, 19. yy. bazı bölümler sökülmeye başlayana kadar büyük ölçüde bozulmadan korunmuştur. Göçmeye ve bakım eksikliğine rağmen (Şekil 3-4 ve Şekil 3-5), surların ve kulelerin birçok kısmı günümüze ulaşmıştır.



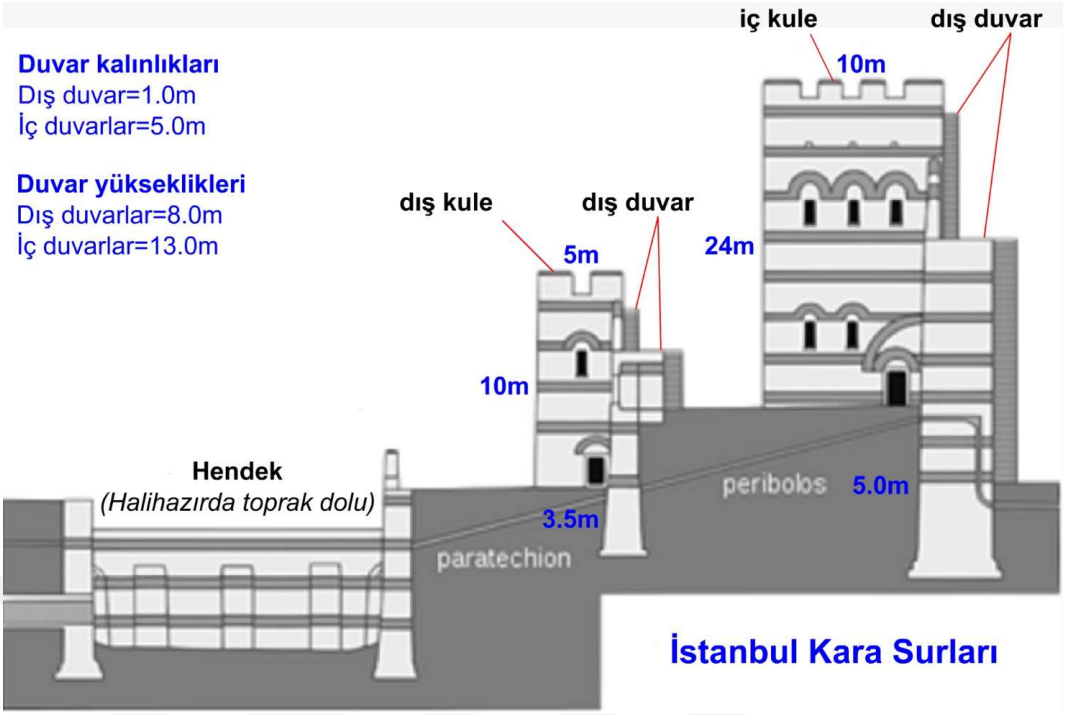
Şekil 3-4. 1894 Kocaeli depreminden sonra İstanbul kara surlarının iç kulelerinden birindeki hasar görünümü (İnce, 2011).



Şekil 3-5. İstanbul kara surlarının 20. yy. başlarındaki göçme durumu, onarılmış sismik hasarların kanıtı (Almanya Arkeoloji kurumu, 1939).

3.1.2. İnşaat Malzemesi ve Yapımı

Uzun kulelere bağlanan (üzerinde T19 kulesi olan) iç duvarlar yaklaşık 5m kalınlığa sahiptir (Şekil 3-6). Beşinci yüzyıla ait orijinal Bizans duvar işçiliği, düzenli aralıklarla yontulmuş taşlardan oluşan yaklaşık her biri 4cm yüksekliğindeki tuğla şeritlerinden oluşmaktadır. Beşinci yüzyıldan kalma orijinal inşaatta iç kuleler ve duvar için kullanılan bloklar, yakınlarda taş ocağından çıkarılan kumtaşından yapılmıştır. Orijinal harç, kireç, ezilmiş tuğla ve tuğla tozu karışımından oluşmaktadır. Daha sonraki restorasyon çalışmalarında da kireç esaslı harçlar kullanılmıştır. Her kulenin tepesinde mazgallı bir teras vardı. İçi genellikle bir zemin ile birbiriyle iletişim kurmayan iki odaya bölünmüştür. Ana duvardan şehre açılan alt oda depolama için kullanılırken, duvarın yürüyüş yolundan girilebilen ve pencereleri olan üstteki oda ise görüş ve savaş için kullanılmıştır. Duvara erişim yanlarındaki büyük rampalarla sağlanmaktadır (Turnbull 2004). Alt kata da küçük afişlerle peribolosların dan erişilmektedir.



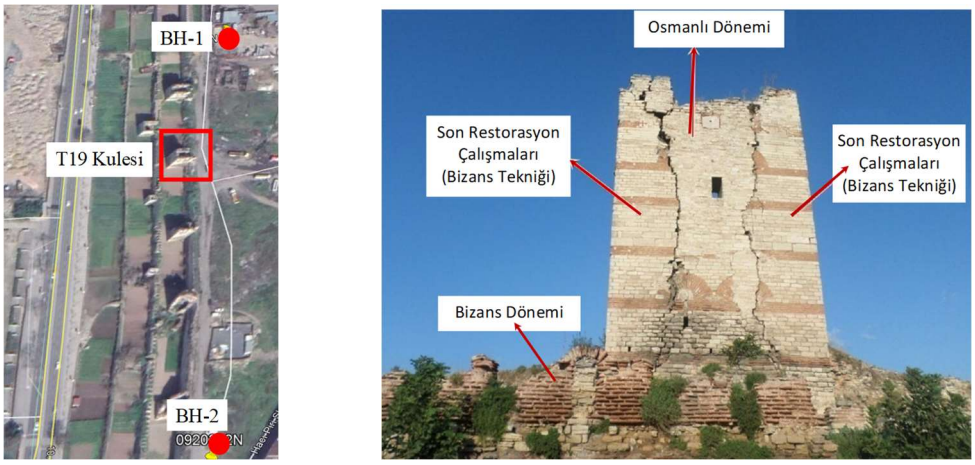
Şekil 3-6. İstanbul kara surlarının şematik kesiti, duvarların ve kulelerin boyut gösterimi.

Ana duvarın ayakta kalan kulelerinin çoğu ya Bizans ya da Osmanlı döneminde yeniden inşa edilmiştir ve sadece bazılarının temelleri orijinal Theodosius yapımıdır.

Ayrıca, 12. yüzyılın sonuna kadar yapılan restorasyonlar orijinal modeline büyük ölçüde benzetilirken, daha sonraki yıllarda yapılan restorasyonlar hem biçimsel hem de inşaat açısından; üst kattaki pencereler ve mazgallar göz ardı edilip binaya odaklanılmıştır. Bizans döneminde civardaki taş ocakları tükendiği için 12. yüzyıldan sonra duvarları ve kuleleri onarmak için kullanılan bloklar farklı bir kökene sahipti ve çok daha düzensiz bir şekle sahiptir. Tüm bu nedenlerden dolayı, ortaya çıkan yığma yapı daha az rafine ve daha az serttir.

3.1.3. 1999 Kocaeli Depreminin T19 Kulesine Etkileri

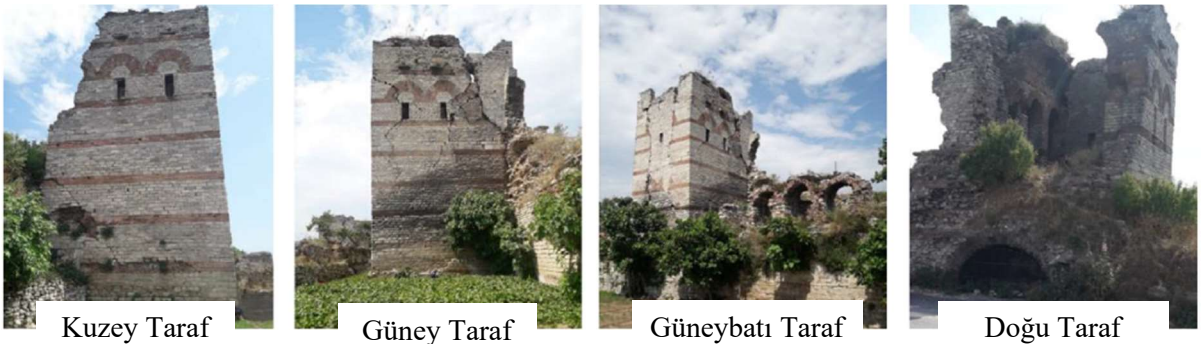
T19 Kulesi, İstanbul surlarının kara bölgesinin güney tarafında bulunmaktadır. Marmara denize yakındır (Şekil 3-1). Bölüm 3.1.1'de belirtildiği üzere 1999 Kocaeli depremi İstanbul'u yıkmadan önce İstanbul surları restore edilmiştir. Şekil 3-7'de görüleceği üzere T19 Kulesinde farklı yapım ve restorasyon teknikleri üst üste yapılmıştır. Özellikle kulenin alt kısmı hala orijinal Bizans duvarından yapılırken üst kısmı kısmen (merkezi) Osmanlı duvarından yapılmıştır. Son restorasyon çalışmaları ile kule orijinal Bizans tarzında tamamlamıştır. Sonuç olarak, tuğla bantlar yapıyı tam olarak bağlamamaktadır.



(a) (b)

Şekil 3-7. a) T19 Kulesinin yakınındaki sondajların (BH-1 ve BH-2) plan görünüm ve b)T19 Kulesinin yakın tarihli fotoğrafı. Farklı yapım teknikleri açıkça görülebilir.

Şekil 3-7b T19 kulesinin mevcut koşullarını göstermektedir. Açıkça, deprem kuleye büyük ölçüde zarar vermiş, batı tarafında yeniden inşa edilen ve Osmanlı tarzı olan duvarların birleştiği yerler ayrılmıştır. Ek olarak doğu tarafının üst köşelerinin göçmesine ve tipik diyagonal çatlakların açılmasına neden olmuştur (Şekil 3-8). Proje kapsamında ortak çalışma yürütülen Napoli Üniversitesinden araştırmacılar ile birlikte bu durum bilimsel makale kapsamında irdelenmiş ve yayımlanmıştır. Bu makalede T19 Kulesinin mevcut hali statik programlar kullanılarak modellemiştir. Bir sonraki bölümde bu analiz sonuçlarından ve farklı dönemlere ait duvar parametrelerinden bahsedilecektir.



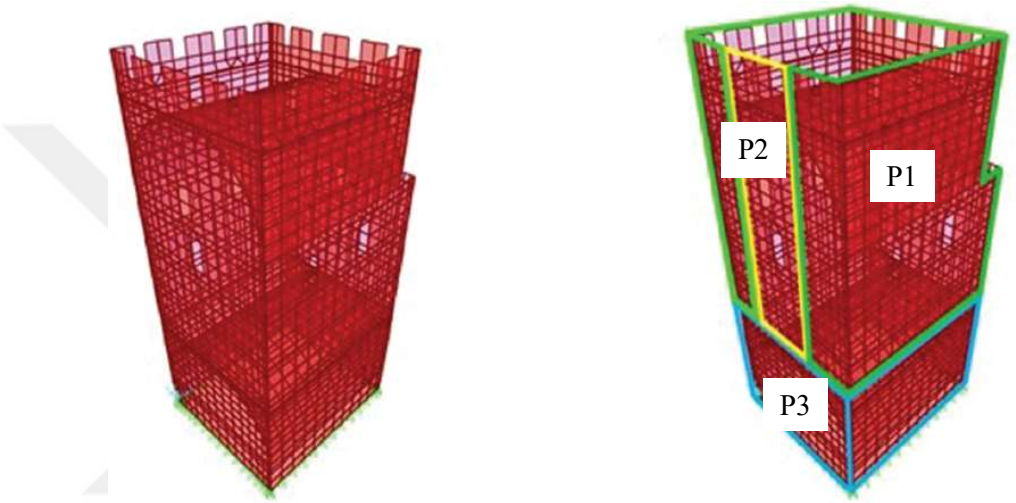
Şekil 3-8. T19 Kulesinin mevcut hali.

3.1.4. T19 Kulesi Yapısal Çözümlemesi

Bu proje kapsamında seçilen T19 Kulesi, surların en yüksek kulelerinden biridir. T19 Kulesi geçmiş yıllarda meydana gelen yıkıcı depremlerin hepsinde zarar alırken Kocaeli (1999) depreminde neredeyse tamamen yıkılmıştır. Yıkıcı depremler sonrasında kule kısmen yeniden inşa edilmiştir. Bu nedenle kulenin alt kısmı Bizans tarzı duvar işçiliği, üst orta kısmı Osmanlı

tarzı duvar işçiliği tarzındadır. Yakın zamanda yapılan restorasyon çalışmalarında Bizans tarzı duvar kullanılarak tamamlanmıştır.

Tüm bu bilgiler ışığında Flora (2021) T19 Kulesinin yapısal çözümlemesini yapmıştır. Bu bölümde de Flora (2021)'nın yapmış olduğu çalışmalardan bahsedilecektir. Flora (2021) T19 Kulesini doğru bir şekilde modellenebilmesi için çeşitli tarihi kaynaklara başvurmuştur. Bu tarihi kaynaklarda T19 Kulesinin ölçülerine ait detay bilgiler bulunmaktadır. Bu sayede T19 Kulesinin tam boyutlarını modellemek mümkün olmuştur (Şekil 3-9).



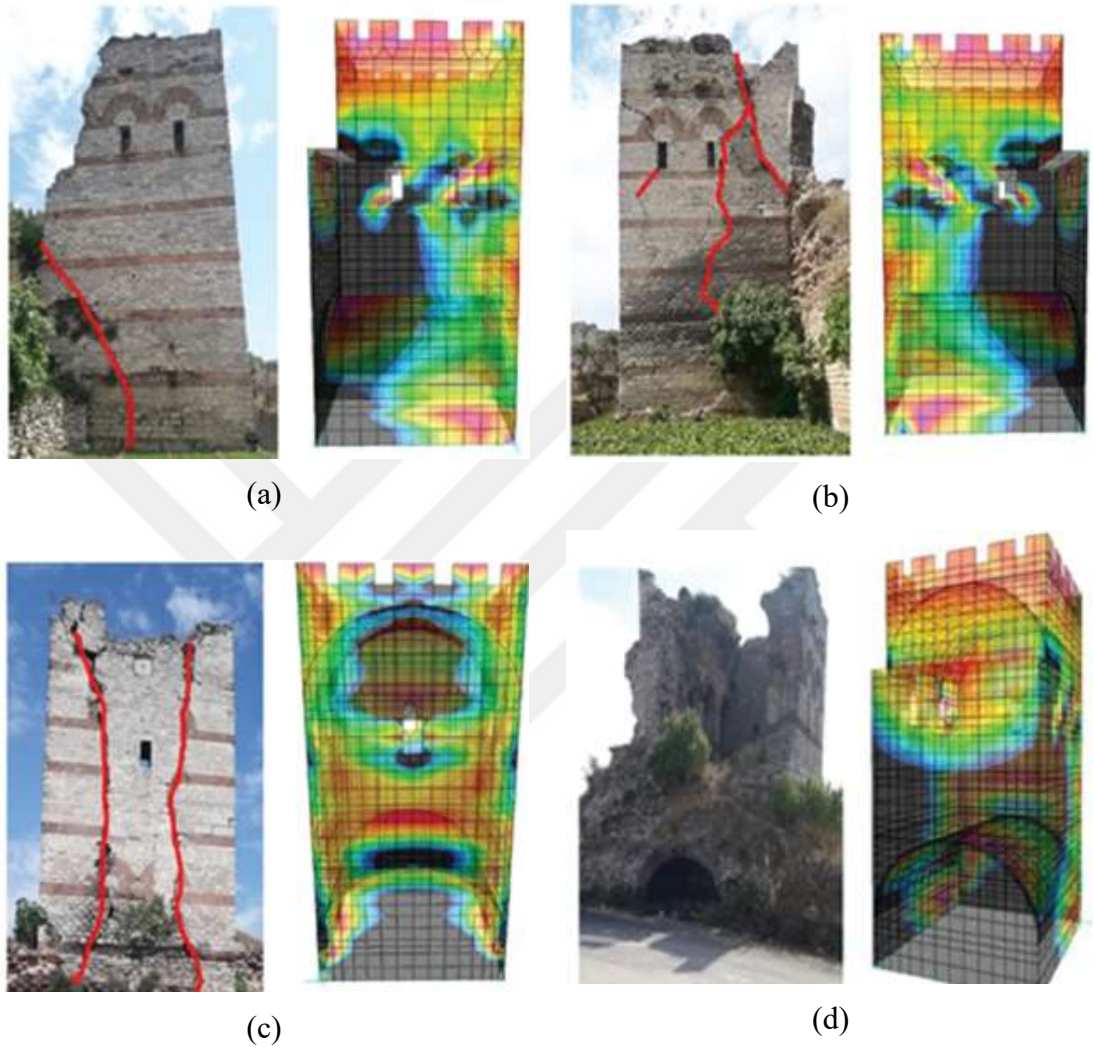
Şekil 3-9. T19 Kulesi sonlu elemanlar modeli (P1: Bizans tekniği ile yapılmış son restorasyon çalışmaları, P2: Osmanlı dönemi, P3: Bizans dönemi duvar tipleri).

Tablo 3-1'de FEM analizinde kullanılacak farklı duvar tiplerine göre parametreler verilmiştir. Bu parametreler T19 Kulesinin duvarının özellikleriyle ilgili bilgi eksikliğinden dolayı şartnamelerden (IBC ve Eurocode 6) seçilmiştir. Seçilen duvar özellikleri tarihi duvarların tipik bir örneğidir (Lourenco Paulo 1998; Lourenco 2002).

Tablo 3-1. T19 Kulesi duvar özellikleri.

Duvar Tipi	Young Modül, Em (MPa)	Birim Hacim Ağırlık, ɣ (kN/m^3)	Poison Oranı, ν	Sönüm Oranı, ƺ (%)
Bizans Tekniğine Göre-Son Restorasyon Çalışmaları (P1)	1800	18	0.2	5
Osmanlı Tipi (P2)	900	15	0.2	5
Bizans Tipi (P3)	1600	16	0.2	5

Bölüm 3.2'de anlatılacak olan 1999 Kocaeli deprem kaydı kullanılarak yapılan FEM analizleri sonucunda T19 Kulesinin 1999 Kocaeli depremindeki maksimum çekme gerilmelerinin dağılımı ile gerçekte gözlemlenen hasarın uyumlu olduğu söylenebilir (Şekil 3-10).



Şekil 3-10. T19 Kulesi gözlemlenen hasar ile sonlu elemanlar analizi maksimum çekme gerilmesi dağılımı; a) Kuzey yönü, b) Güney yönü, c) Batı yönü ve d) Doğu yönü.

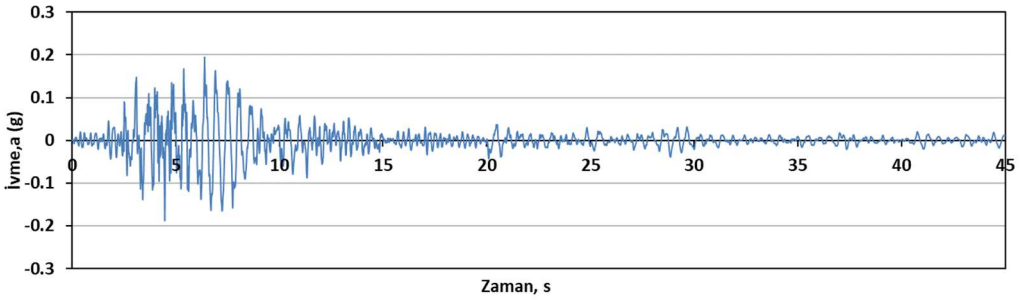
3.2. KULLANILAN DEPREM KAYDI

1999 Kocaeli depreminin yüzey hareketi, ZB zemin sınıfı üzerine kurulmuş Fatih istasyonunda (T19 Kule' sine yaklaşık 5 km uzaklıkta) kaydedilmiştir (EC8, 2004). Fatih istasyonu, sismik hareket sırasında 0.188g'lik bir PGA kaydetmiştir (Tablo 3-2).

Tablo 3-2. Fatih İstasyonu 1999 Kocaeli depremi bilgileri.

İstasyon İsmi	*Kayıt Numarası*	*Yıl*	*$V_{s,30}$ (m/sn)*	*PGA (g)*
Fatih	1160	1999	386.75	0.188

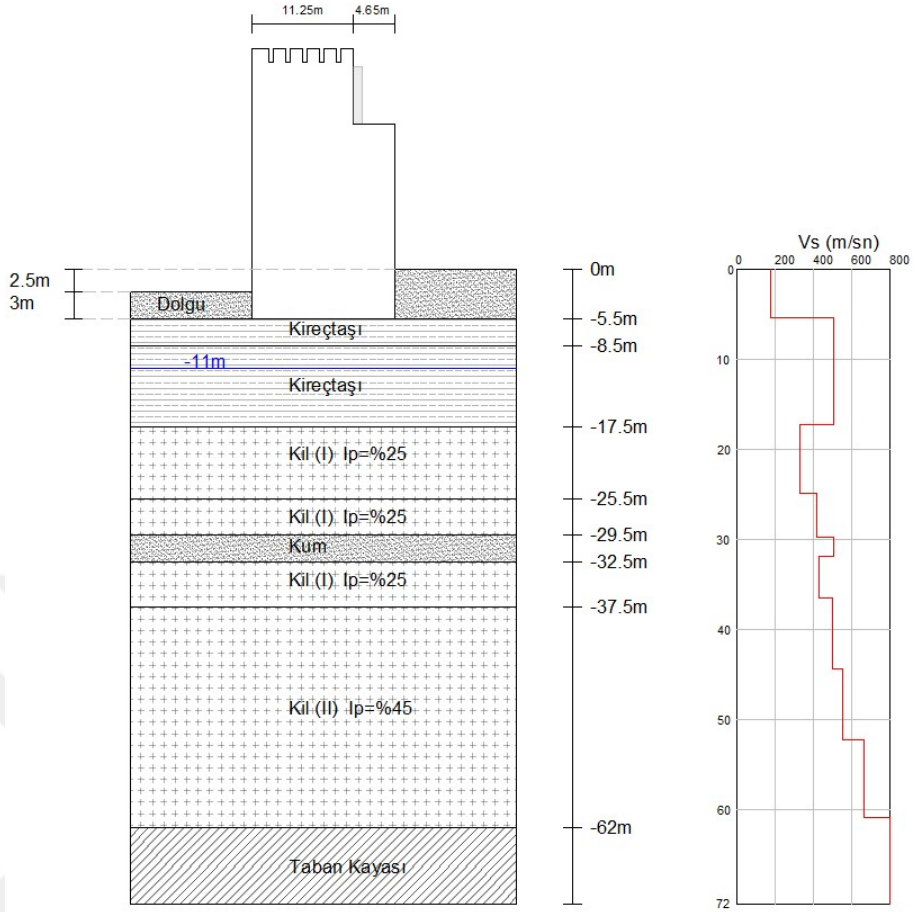
1999 Kocaeli deprem hareketi, Fatih istasyonundaki zemin profili ve özellikleri kullanılarak (Şekil 3-13) ilk önce anakaya derinliğinde (ters evrişim (dekonvolüsyon) hareket için verilen amax=0.195g (Şekil 3-11)) aşağı doğru yayılmıştır ve daha sonra T19 Kule bölgesinde zemin profiline uygulanmıştır. Fatih İstasyonu, T19 Kulesine yaklaşık 5 km uzaklıkta olduğu için sismik harekete başka bir değişiklik uygulanmamıştır.



Şekil 3-11. 1999 Kocaeli depremi ivme-zaman grafiği.

3.3. T19 KULESİ GEOTEKNİK ARAZİ KARAKTERİZASYONU

İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından 2007 yılında İstanbul İli Avrupa Yakası Güney'inin jeolojik, jeoteknik, jeofizik özelliklerinin ve deprem etkisi ve yerel zemin koşulları açısından farklı tehlike potansiyellerine sahip alanlarının belirlenmesi amacıyla mikro-bölgeleme çalışması yapılmıştır. T19 kulesi bölgesi yakınında mikro-bölgeleme projesi kapsamında yapılan saha çalışmaları (sondaj, jeofizik deneyler) kullanılarak kulenin altındaki zemin profili kayma dalgası hızı Vs'yi tahmin etmek mümkün olmuştur (Şekil 3-12).

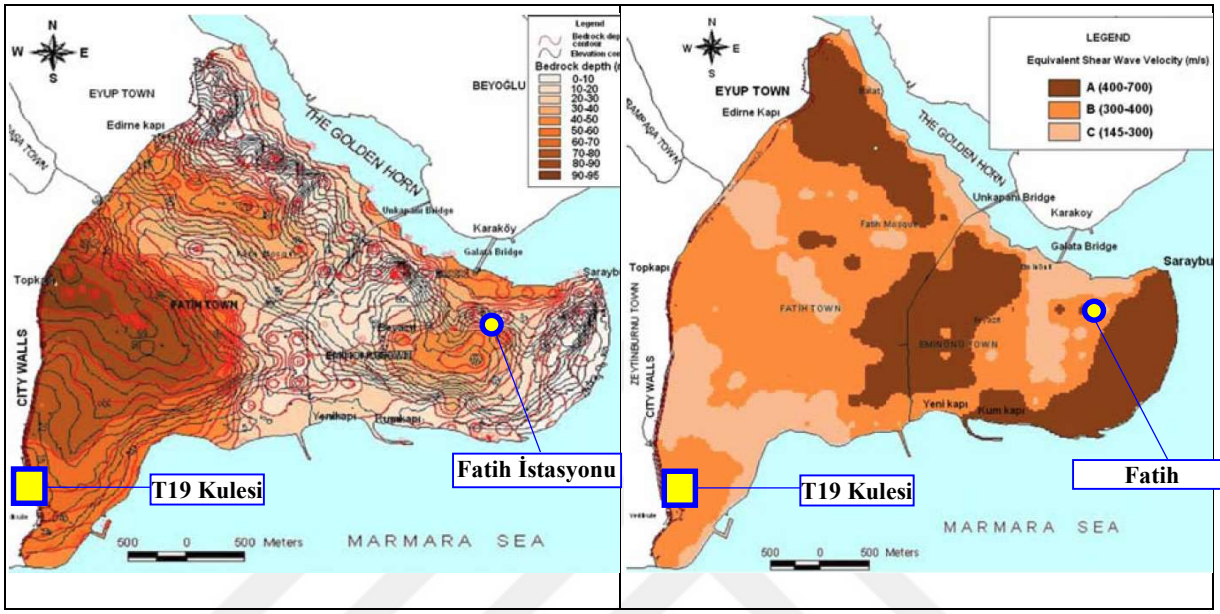


Şekil 3-12. T19 Kulesinin altındaki idealize zemin profili ve kayma dalgası hızının grafiği.

T19 Kulesinin yer altı su seviyesi 11 metre, temel derinliği ise 3 metrededir. Daha doğru bir deyişle kulenin sağ ve sol taraflarında 2 metrelik kot farkı vardır. Şekil 3-12'den daha açık bir şekilde görüleceği üzere T19 Kulesinin temelinin sağda 5.5 metre, solda 3 metre zemin seviyesinden aşağıda olduğunu söylemek mümkündür. Temel seviyesinin derinliği net olmamakla beraber basit değerlendirmeler neticesinde kireçtaşına oturduğu düşünülmektedir. Ayrıca sur ve kule gibi zamanının güçlü yapısının dolgu gibi yumuşak birime değil de kireçtaşı gibi sert bir malzemeye oturması gerekliliği de kulenin temelin kireçtaşı olduğu düşüncesini desteklemektedir.

T19 Kulesinin zemin profili ise; ince killi ara katmanlardan oluşan dolgunun (0m ile 5.5m derinlik) altında ayrışmış kireçtaşı (5.5m ile 17.5m) bulunmaktadır. Kireçtaşının altında, ince bir kum tabakası bandıyla (29.5m ile 32.5m arası) ayrılmış kalın bir kil-1 tabakası (17.5m'den 37.5m'ye kadar) vardır. Kil-2 tabakası ise 62 metreye kadar kalın bir sert kiltaşı/silttaşı tabakasının üzerinde durmaktadır.

İnce (2008) tarafından yapılan makro-bölgelemeye dayanarak, İstanbul Yarımadası boyunca anakayanın derinliğini ve ilk 30 metrelik zemin yüzeyinin eşdeğer kayma dalgası hızını belirlemek mümkündür. Mikro-bölgeleme çalışması ile değerlendirilen anakayanın derinliği, T19 Kulesi için yapılan stratigrafik yüzey araştırmaları ile belirlenen derinlikle örtüşmektedir.



Şekil 3-13. Tarihi yarımada için a) Anakaya derinlik haritası b) Eşdeğer kayma dalgası hızına göre saha sınıflandırılması (İnce, 2008).

3.4. DEPREM ETKİSİ ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

Bu tez kapsamındaki GSI sistemi (yumuşak bariyer) analizleri GTS NX Midas 2D programı ile yapılacaktır. GTS NX Midas 2D programının tercih edilmesinin sebepleri hızlı olması ve yumuşak bariyer sisteminde kullanılacak olan SAP malzemesini "2D Eşdeğer" zemin modeli olarak modellenmesidir. Bunun yanı sıra GTS NX Midas yazılımı Plaxis yazılımına göre daha az bilinen bir yazılımdır. Bu nedenle GTS NX Midas, Strada ve Plaxis yazılımları arasında ilerleyen bölümlerde doğrulama analizi yapılacaktır. Doğrulama analizi kapsamında yapılacak olan analizler şu şekilde:

- GTS NX Midas 1D Eşdeğer Doğrusal Analiz- Strada Eşdeğer Doğrusal Analiz,

- GTS NX Midas 1D Eşdeğer Doğrusal Analiz- Plaxis 1D Zemin Davranış Analiz,

- GTS NX Midas 2D Doğrusal Olmayan Analiz-Plaxis 2D Doğrusal Olmayan Analiz olarak sıralanabilir.

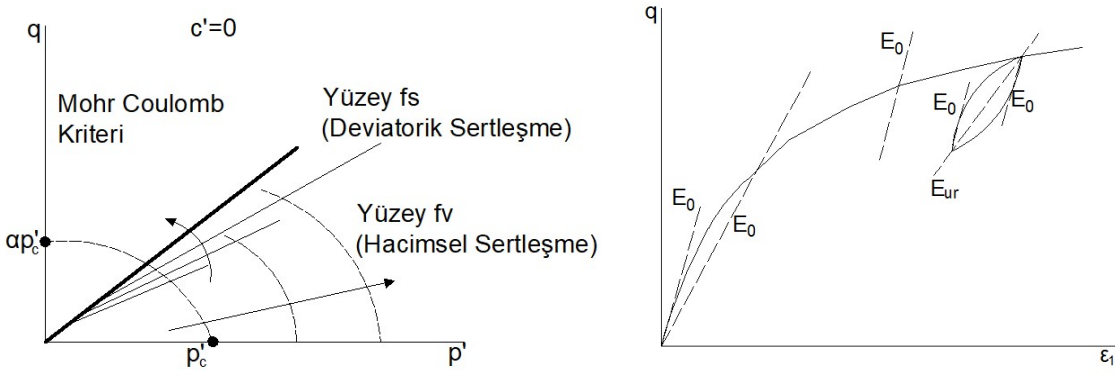
Bu bölümde yukarıda sıralanan analizlerde kullanılacak olan doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranış modellerinden bahsedilecektir.

Zemin tabakaları, sismik yükleme sırasında değişken zemin koşulları nedeniyle farklı davranış gösterebilmektedir. Ancak güncel şartnameler ve metodolojiler ile şekil değiştirmeye göre tasarıma yani doğrusal olmayan zemin davranışının modellenmesi üzerine dayalı davranış analizleri öne çıkmaktadır.

Doğrusal olmayan zemin davranış modeli, nümerik model hazırlanarak deformasyona bağlı fonksiyonları çözebilen yazılımlar aracılığıyla yapılabilmektedir. Bu yazılımlar içerisinde Flac3D, Plaxis 1D-2D-3D, GTS NX Midas 2D-3D gibi yazılımlar yer almakla beraber, bu tez kapsamında Plaxis 1D-2D ve GTS NX Midas 2D nümerik yazılımları kullanılmış ve çeşitli analizler üzerinde doğrusal olmayan zemin davranışı modellenmiştir. Plaxis 2D ve GTS NX Midas sonlu elemanlar programlarına ait detaylar Bölüm 2.3'de detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan Plaxis 1D-2D ve GTS NX Midas 2D yazılımlarında malzeme modeli olarak küçük birim deformasyonla pekleşen zemin modeli (Hardening Soil Small Strain) kullanılmıştır.

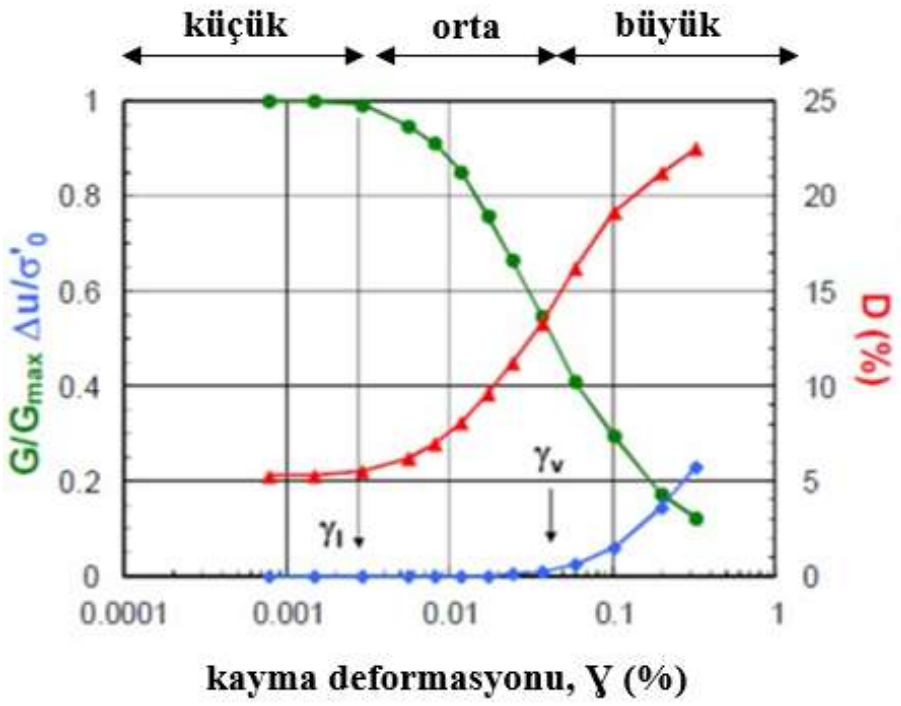
Zemin, gerilme veya şekil değiştirmelere maruz kaldığında doğrusal olmayan bir davranış sergileyebilir. Zeminin mukavemeti gerçekte gerilme seviyesine, gerilme davranışına ve birim deformasyona bağlıdır. Bu gibi özellikler, gelişmiş zemin bünye modellerinde yer almaktadır (Brinkgreve, 2017). Pekleşen zemin modeli, gerilmeye bağlı rijitlik, zemin gerilme geçmişi, plastik akma ve dilatasyon detaylarını kapsamaktadır. Aşağıdaki şekilde pekleşen zemin mekanizması ile plastik akma ve boşaltma grafikleri verilmiştir.



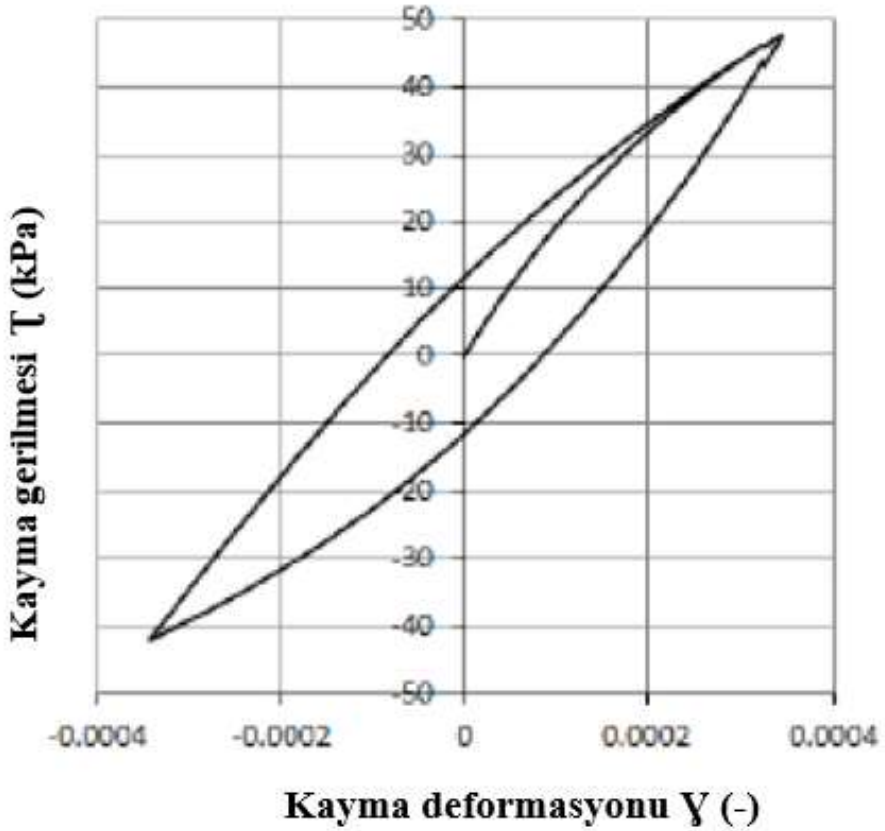
(a) (b)

Şekil 3-14. "HSsmall" bünye modeli a) pekleşme mekanizması (Brinkgreve, 2007) b) plastik akma ve boşaltma (Brinkgreve, 2013).

Küçük birim deformasyonla pekleşen zemin modeli, pekleşen zemin modelinin geliştirilmiş bir versiyonudur ve ek olarak iki önemli zemin davranışı dahil edilmiştir. Bunlardan ilki, birim deformasyona bağlı rijitlik değişimi (Şekil 3-15) ve ikincisi de histerik zemin davranışıdır (Şekil 3-16). Bu HSsmall modelini; istinat duvarları, tüneller gibi olan derin kazılar ile dinamik analizleri içeren yükleme-boşaltma koşullarının geçerli olduğu durumlar için daha kullanışlı hale getirmektedir.



Şekil 3-15. Tipik kayma deformasyon aralıkları ile zemin kayma modülü azalım ve sönümlenme grafiği.



Şekil 3-16. Histerik zemin davranışı.

Zeminlerin kayma deformasyonları küçük birim deformasyonlar bölgesinde normal şartlarda en yüksek seviyededir (Şekil 3-15). Bu noktadan itibaren birim deformasyon arttıkça kayma modülü azalımı görülür. HSsmall bünye modeli sayesinde bu azalım birim deformasyona bağlı olarak hesaplanabilmektedir.

HSsmall bünye modeline ait parametreleri sıralamak gerekirse, çok küçük birim deformasyondaki kayma modülü (G_0), eşik kayma deformasyonu ($\gamma_{0.7}$), referans sekant rijitlik modülü (E_{50ref}), referans tanjant ödometrik rijitlik modülü (E_{oedref}), referans yükleme boşaltma rijitlik modülü (E_{urref}), yükleme boşaltma Poisson oranı υ_{ur}, gerilmeye bağlı rijitlik katsayısı (m), kohezyon (c), sürtünme açısı (φ), dilatasyon açısı (ψ).

Plaxis 1D-2D ve GTS NX Midas 2D programlarında yapılacak olan analizlerde kullanılacak olan zemin birimleri için "Hardening Soil Small Strain (HSsmall)" modeli kullanılmıştır. Zeminin mukavemet parametreleri "Standart Penetrasyon Deneyleri (SPT)" nden elde edilmiştir. Elastisite modül (rijitlik) parametreleri ise Şekil 3-12'de verilmiş olan kayma dalgası hızına bağlı olarak belirlenmiştir. Zemin birimleri için kalibre edilmiş parametreler Tablo 3-3 ve Tablo 3-4'de gösterilmiştir.

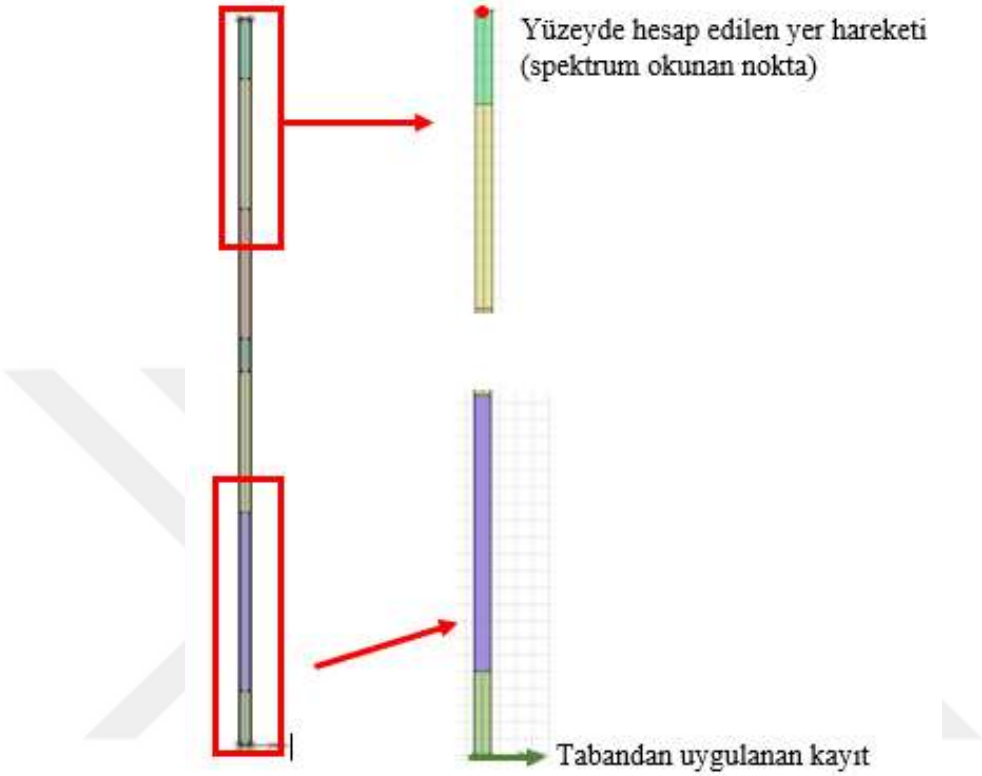
Tablo 3-3. T19 Kulesi zemin parametreleri-1.

Parameters	**Dolgu**	**LS.-1**	**LS-2**	**LS-3**	**Kil-1**	**Kil-2**	**Kil-3**	**Kum**	**Kil-4**
Malzeme Modeli	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
Malzeme Tipi	Drenajsız A	Drenajsız A	Drenajsız A	Drenajsız A	Drenajsız B	Drenajsız B	Drenajsız B	Und. A	Drenajsız B
Birim Hacim Ağırlık, γ (kN/m^3)	18.4	21.4	21.2	21.0	19.3	19.2	20.0	20.6	19.9
Deviatorik Referans Modülü, E_{50}^{ref} (MPa)	10,000	231,000	228,000	226,000	56,000	56,000	142,000	223,000	140,000
Basınç Referans Modülü, E_{oed}^{ref} (MPa)	10,000	231,000	228,000	226,000	56,000	56,000	142,000	223,000	140,000
Yükleme-Boşalma Modülü, E_{ur}^{ref} (MPa)	29,000	692,000	685,000	679,000	169,000	169,000	426,000	668,000	421,000
Bağımlı Gerilme Seviyesi, *m*	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Poison Oranı, ν_{ur}	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Referans Gerilme, p^{ref}, kPa	19	44	75	103	304	352	388	143	500
Göçme Oranı, R_f	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Kohezyon, *c* (kPa)	40	135	135	135	125	125	200	0	180
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	27	40	40	40	27	27	27	40	27

Tablo 3-4. T19 Kulesi zemin parametreleri-2.

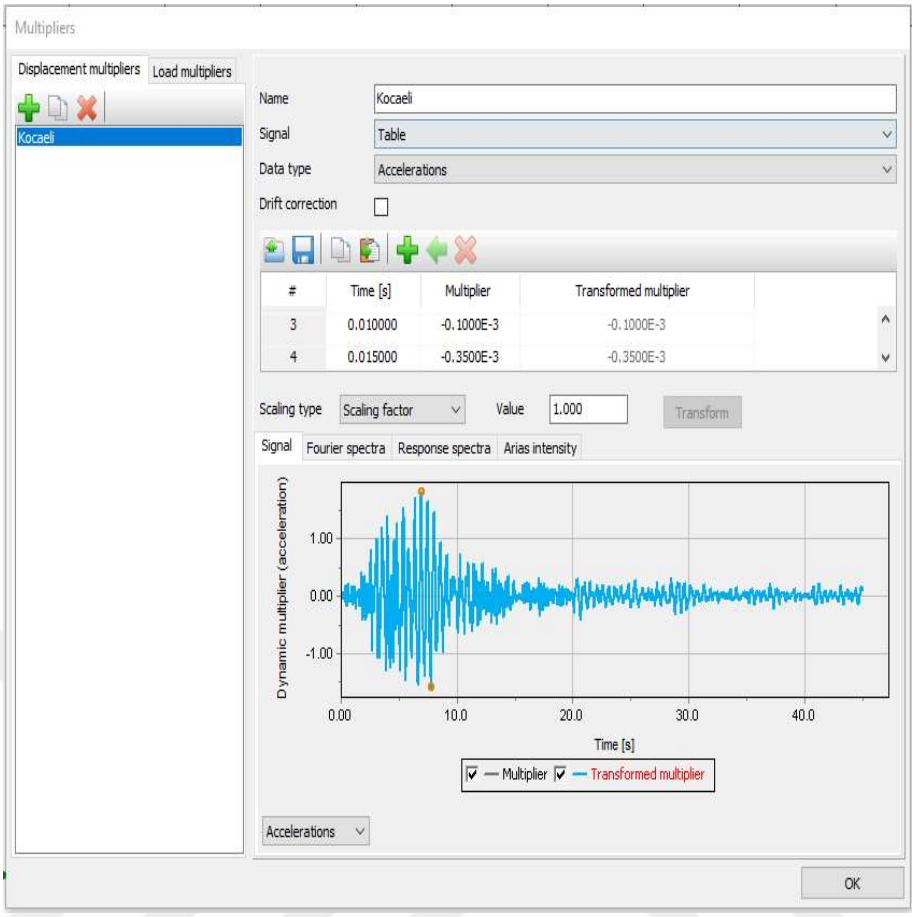
Parameters	**Clay-5**	**Clay-6**	**Clay-7**	**Clay-8**	**Clay-9**	**Clay-10**	**Claystone**
Malzeme Modeli	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
Malzeme Tipi	Drenajsız B	Drenajsız B	Drenajsız B	Drenajsız B	Drenajsız B	Drenajsız B	Drenajsız B
Birim Hacim Ağırlık, γ (kN/m^3)	20.5	20.4	20.8	20.7	21.4	20.7	21.4
Deviatorik Referans Modülü, E_{50}^{ref} (MPa)	221,000	221,000	277,000	277,000	411,000	410,000	819,000
Basınç Referans Modülü, E_{oed}^{ref} (MPa)	221,000	221,000	277,000	277,000	411,000	410,000	819,000
Yükleme-Boşalma Modülü, E_{ur}^{ref} (MPa)	664,000	662,000	831,000	830,000	1232,000	1232,000	2458,000
Bağımlı Gerilme Seviyesi, *m*	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Poison Oranı, ν_{ur}	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Referans Gerilme, p^{ref}, kPa	535	588	636	671	729	814	489
Göçme Oranı, R_f	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Kohezyon, *c* (kPa)	220	250	250	250	250	250	250
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	27	27	27	27	27	27	27

Şekil 3-17'de basit bir saha tepki analizine ait dinamik modelin Plaxis yazılımındaki görünümü verilmektedir. Plaxis programında doğrusal olmayan analizde sınır koşulu olarak model tabanında "compliant base" yanlarda ise "free-field" sınır koşulu kullanılmıştır.



Şekil 3-17. Plaxis 1D zemin davranış analizi model görünümü.

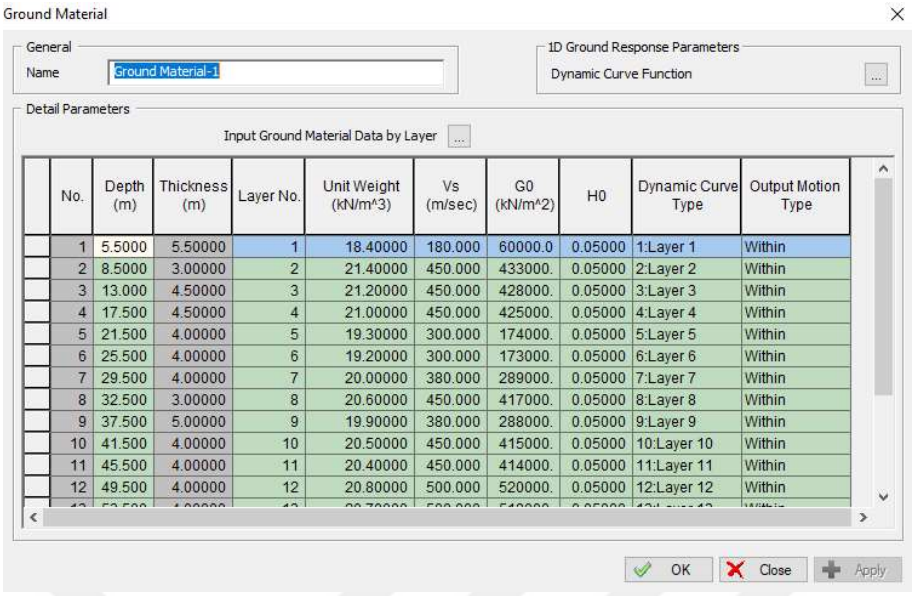
Plaxis programında, model tabanında daha önceden şartnamelere bağlı olarak ölçeklendirilmiş deprem kayıtları sisteme uygulanmakta olup nihai olarak yüzeyde hesap edilen spektrumlar analiz sonucu olarak irdelenmektedir (Şekil 3-17 ve Şekil 3-18). Plaxis programında, şartnameye göre ölçeklenen ve Bölüm 3.2'de bilgileri verilen Kocaeli deprem kaydı ivme (m/sn^2)- zaman (sn) olarak tanımlanır. Ancak taban kayasının rijitliği göz önünde bulundurmak ve yarı sonsuz bir alan içinde kayma dalgalarının yukarı doğru yayılma hareketini doğru hesaplayabilmek için ivme değerleri yarıya indirilmiştir.



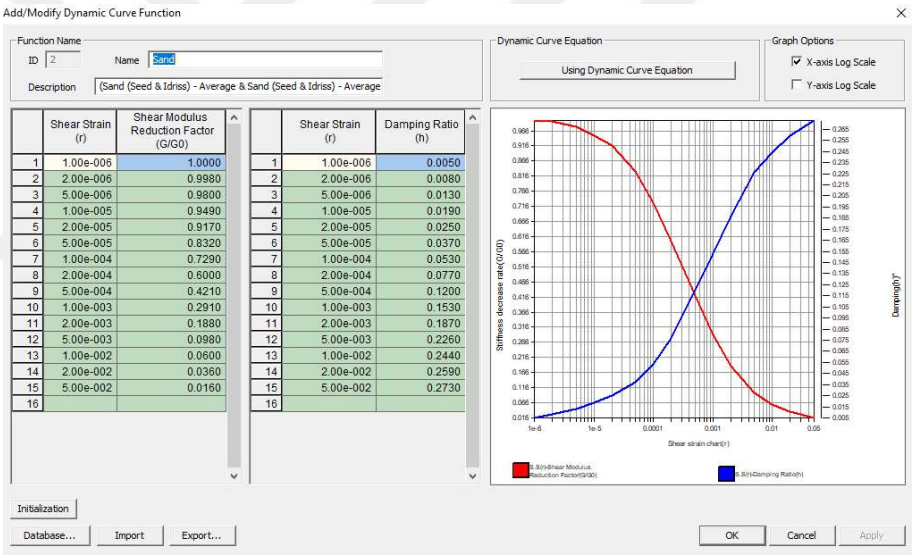
Şekil 3-18. Plaxis programı deprem kaydı tanımlama alanı.

GTS NX Midas 1D, kayma dalgası hızı modeline dayanarak eşdeğer doğrusal analiz yapabilen programdır. GTS NX Midas programında yapılacak olan bir boyutlu (1D) analizlerde kullanılacak olan parametreler;

- Zemin tabakası kalınlığı (m),
- Birim hacim ağırlık (kN/m^3),
- Kayma dalgası hızı (m/sn),
- Kayma modülü (kN/m^2),
- Sönümlenme oranı ve
- Dinamik eğriler (Kayma modül azalımı ve Sönüm oranı eğrileri)'dir (Şekil 3-19 ve Şekil 3-20).

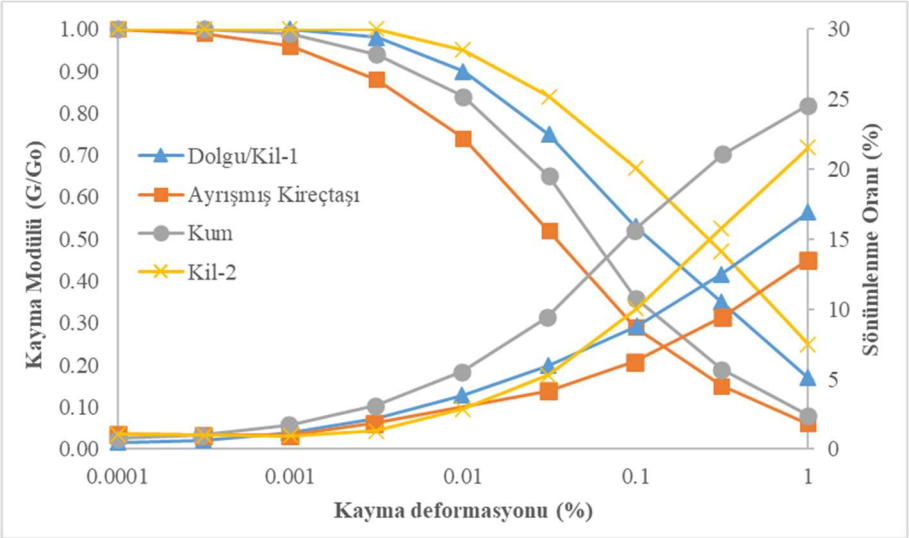


Şekil 3-19. GTS NX Midas bir boyutlu analiz girdi ekran görüntüsü.



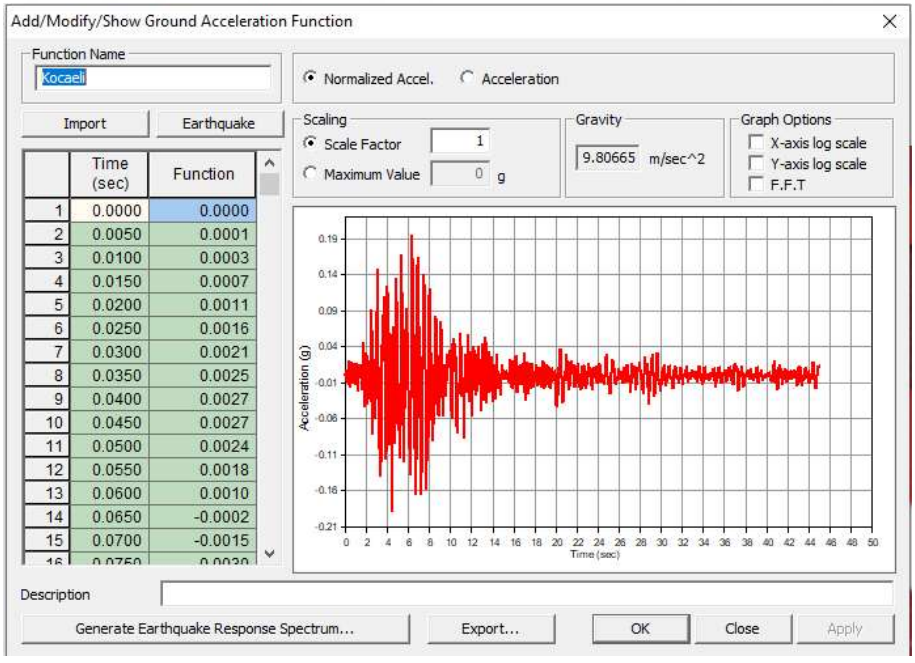
Şekil 3-20. GTS NX Midas bir boyutlu analiz dinamik eğriler tanımlama bölümü.

Ancak proje alanındaki zemin birimlerine ait laboratuvar deney sonuçlarının olmaması sebebiyle bir boyutlu analizlerde kullanılacak olan zeminlerin doğrusal olmayan zemin davranışı literatür eğrileri kullanılarak modellenmiştir. Killi katmanlar için plastisite indeksine bağlı olarak (Kil (I) için IP = %20-40 ve Kil (II) için IP = %40-80) Sun ve diğerleri tarafından önerilen eğriler kullanılmıştır. Kumlu katmanlar için Seed ve Idriss (1970) tarafından önerilen eğri benimsenirken, ayrışmış kireçtaşı için Park (2010) tarafından önerilen eğri benimsenmiştir (Şekil 3-21).



Şekil 3-21. Farklı zemin tabakaları için sönümlenme oranı ve kayma modülü azalım eğrisi.

GTS NX Midas programında deprem kaydını tanımlama şekli Plaxis programı ile çok benzerdir (Şekil 3-22). GTS NX Midas programının Plaxis programından farklarından biri tanımlanan ivme-zaman grafiğindeki ivmenin birimidir. GTS NX Midas programında ivme "g" olarak tanımlanmaktadır. Bir diğer fark ve hatta en önemlisi Plaxis programında deprem kaydının deplasman çizgisine tanımlanmasıdır.



Şekil 3-22. GTS NX Midas programı deprem kaydı tanımlama alanı.

Model tabanında daha önceden şartnamelere bağlı olarak ölçeklendirilmiş deprem kayıtları sisteme uygulanmakta olup nihai olarak yüzeyde hesap edilen spektrumlar analiz sonucu olarak irdelenmektedir.

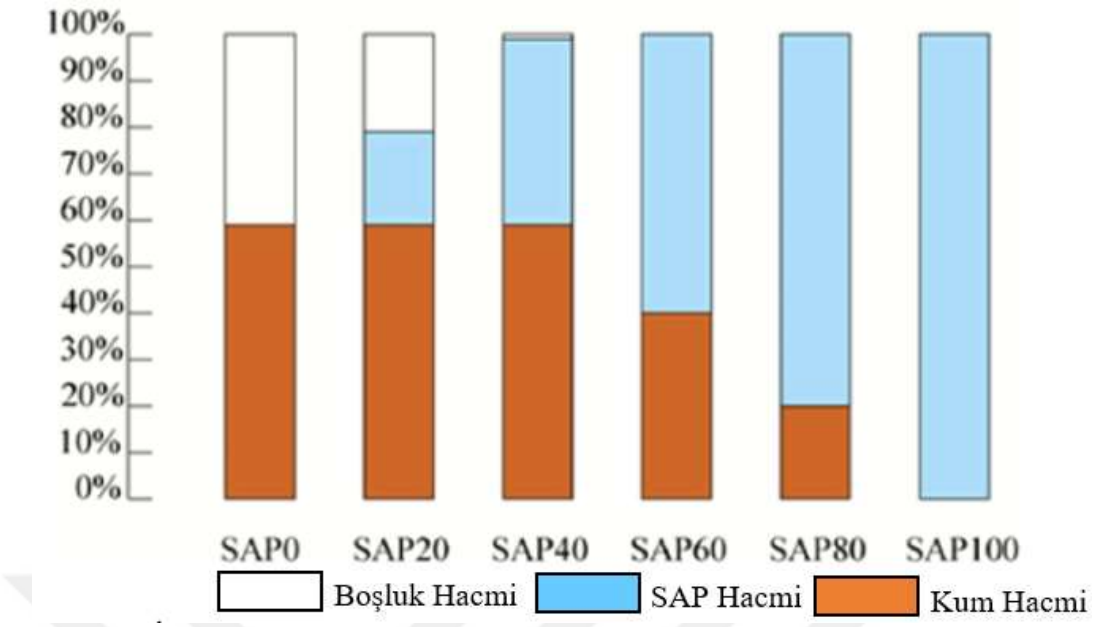
3.5. SÜPER EMİCİ POLİMER (SAP) MALZEMESİNİN ÖZELLİKLERİ

Yumuşak bariyerlerde kullanılacak olan "Süper Emici Polimer (SAP)" malzemesinin özelliklerini belirlemek adına geçmiş yıllardaki araştırmalar kapsamında yapılan deneyler Bölüm 2.2.3'de detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu bölümde ise Napoli Üniversitesinden Somma (2022)'nin yapmış olduğu deney çalışmaları ve bunun sonucunda farklı oranlardaki SAP malzemesinin davranışından bahsedilecektir.

Somma (2022), SAP malzemesinin doğrusal olmayan davranışını anlamak adına yapılan deneylerde kullanılacak olan zemin birimi için "kum" seçilmiştir. Deneylerde SAP-kum karışımları incelenmiştir. Bölüm 2.2.3'de bahsedildiği üzere SAP, sentetik toz malzemedir. Somma (2022) araştırmasında kullandığı SAP malzemesi, kendi başlangıç ağırlığının 240 katına (1:240) kadar damıtılmış suyu emebilmektedir. Kum olarak ise Hostun kumu seçilmiştir. Seçilen Hostun kumun özgül ağırlığı G_s=2.65, maksimum ve minimum boşluk oranı e_{max}=0.011- e_{min}=0.555 ve içsel sürtünme açısı ise $Ø_{cv}$=33°'dir.

SAP-kum karışımlarının fiziksel olarak tanımlanmasında ve deneysel sonuçlarının yorumlanmasında bazı kabuller yapılmıştır. Bu kabuller:

- Kum taneleri sonsuz kayma ve kütle rijitliğine sahiptir,
- Hidrasyondan sonra SAP parçacıkları sıkıştırılamazdır, ancak kolaylıkla şekil değiştirebilirler,
- SAP-kum karışımları SAP parçacıklarının homojen bir dağılımına sahiptir (bu hipotezin tutarlılığı Bölüm 2.2.3'de anlatılan deney sonuçlarında gözlemlenmektedir).



Şekil 3-23. İncelenen numuneler için SAP hacim yüzdesi şeması.

Şekil 3-23'de, SAPXX'in toplam hacme göre hacimce SAP yüzdesinin şematik olarak gösterimi verilmiştir. Bu çalışma kapsamında Somma (2022)'nın yapmış olduğu dinamik deneyler Tablo 3-5'de verilmiştir.

Tablo 3-5. Farklı oranlardaki SAP-kum üzerinde yapılan dinamik deneyler.

SAP-kum karışımı	***Hacimce SAP (%)***	***B.E deneyi***	***C.S.S deneyi***	***R.C deneyi***
Kum	0	•		•
SAP40	40	•	•	
SAP60	60	•	•	
SAP80	80	•	•	
SAP100	100	•		

Yapılan Bender Element (BE) deneyi sonuçlarını yorumlayacak olursak, SAP yüzdesi ne kadar yüksek olursa numunedeki kayma dalgası hızı o kadar düşük olur. Ayrıca BE deneylerine göre kayma dalgası hızının değeri, numunedeki SAP yüzdesinin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Bu durumda belirlenen denklem:

$$\mathrm{Vs} = \mathrm{Vs},0 * \frac{1}{1+(\frac{SAP\%}{A})^{B}} \qquad 3.1$$

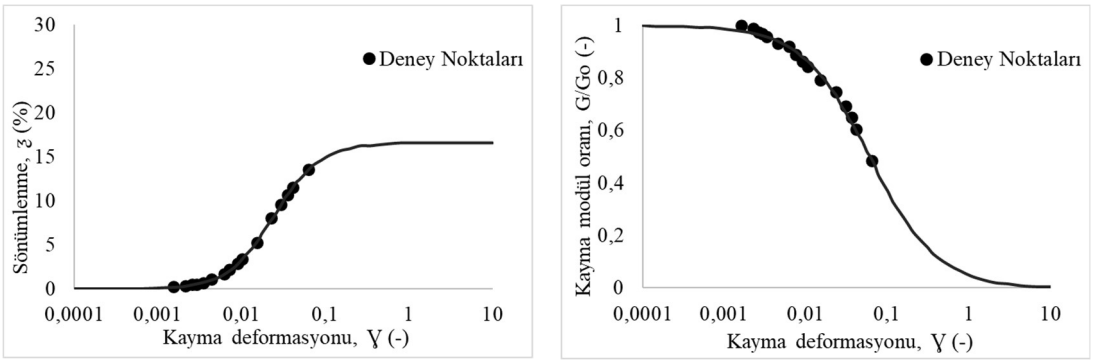
burada $V_{S,0}$, saf kumun kayma dalgası hızıdır, dikkate alınan sınırlama basıncında, SAP% karışımdaki SAP hacim yüzdesidir, A ve B sınırlayıcı hücre basıncına bağlı boyutsuz katsayılardır ve doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi kullanılarak en uygun şekilde değerlendirilmiştir. A ve B katsayıları ortalama efektif gerilme durumuna bağlıdır ve Somma (2022) BE deney sonuçlarına göre A ve B katsayıları için Denk. 3.2 ve 3.3 denklemlerini önermiştir.

$$A = 40.4 - 12.4\left(\frac{P'}{Pref}\right) + 17.9\left(\frac{P'}{Pref}\right)^2 \quad 3.2$$

$$B = 2.74 - 0.68\left(\frac{P'}{Pref}\right) + 2.25\left(\frac{P'}{Pref}\right)^2 \quad 3.3$$

*pref:100 kPa.

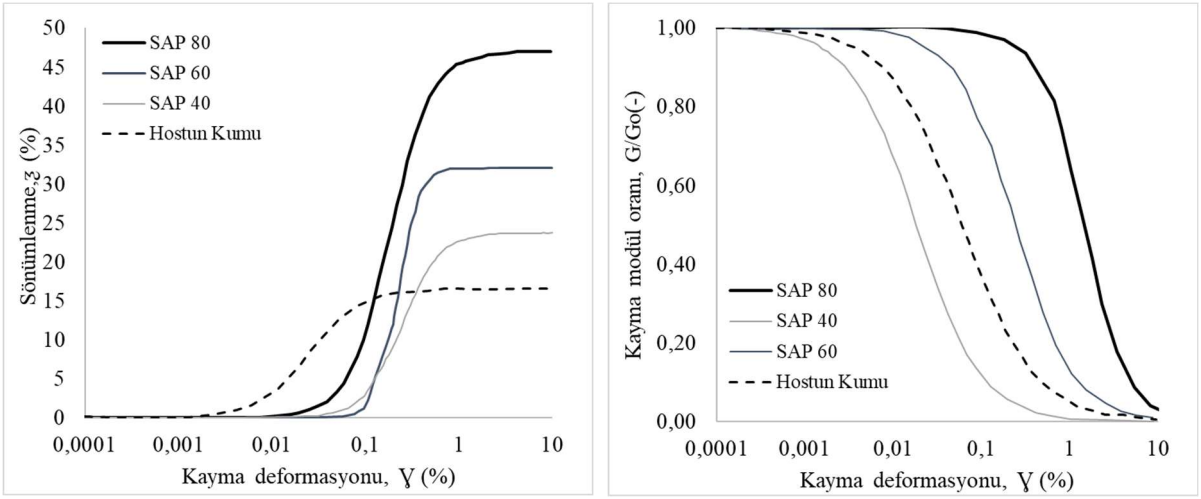
SAP-kum karışımlarının dinamik özelliklerini değerlendirebilmek için kumun doğrusal olmayan davranışını doğru karakterize etmek gerekir. Bu nedenle saf temiz kumun doğrusal olmayan davranışını doğru karakterize edebilmek adına "Rezonant (Titreşimli) Kolon Deneyi" yapılmıştır. "Rezonant (Titreşimli) Kolon Deney" sonuçlarından elde edilen kayma modülü (G_0) ve sönümlenme (ζ) Matasovic ve Vucetic (1993) tarafından MKZ modeli ile karşılaştırılmıştır.



(a) (b)

Şekil 3-24. Hostun kumunun kayma modülü azalım sönümlenme oranı eğrileri.

Tablo 3-5'de sunulan farklı SAP-kum karışımlarına ait doğrusal olmayan zemin davranışını anlayabilmek için dinamik basit kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonucuna göre çizdirilen dinamik eğriler Şekil 3-25'de verilmiştir. Hostun Kumunun "Rezonant (Titreşimli) Kolon Deney" inden elde edilen dinamik eğrisi Şekil 3-25'de SAP-kum karışımın etkisini çarpıcı bir şekilde sunmak için birlikte çizdirilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3-25. SAP80, SAP60, SAP40 ve Hostun kumu için kayma modülü azalım ve sönümlenme oranı eğrileri.

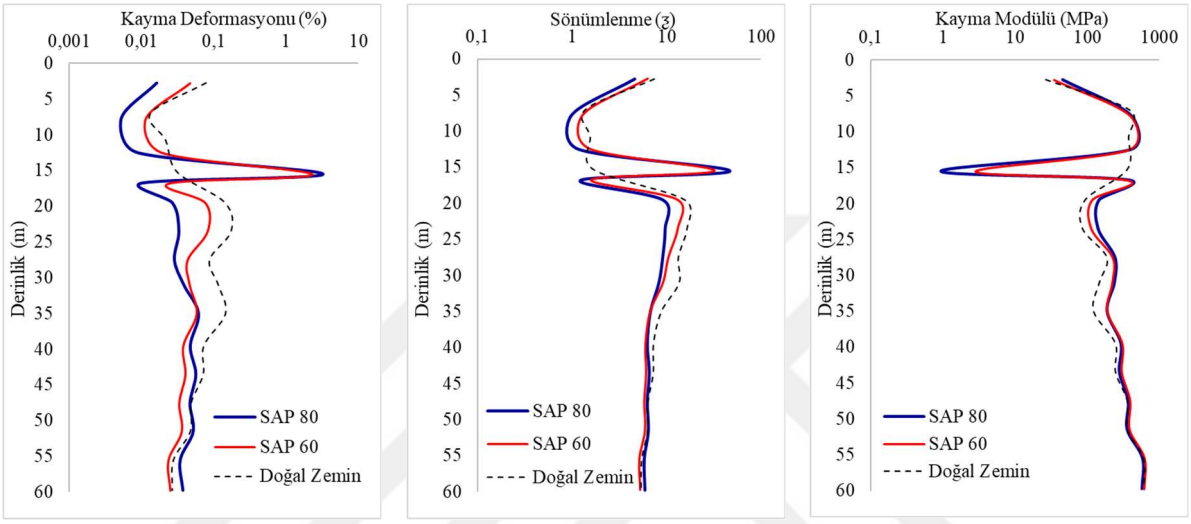
Farklı SAP-kum karışımların (SAP40-SAP60-SAP80) doğrusal olmayan zemin davranışlarını (Şekil 3-25) inceleyecek olursak SAP40 karışımının doğrusal olmayan zemin davranışı Hostun kumu ile benzer çıkmaktadır. Bu nedenle bu tezin bundan sonraki aşamasında SAP40 malzemesi incelenmeyecektir.

Yumuşak bariyerlerde kullanılacak olan SAP60 ve SAP80 malzemelerinin anti-sismik etkisini vurgulamak için bir boyutlu sismik tepki analizi yapılmıştır. GTS NX Midas 1D yazılımı aracılığıyla eşdeğer doğrusal analiz yapılmıştır. GTS NX 1D yazılımının deprem etkisi altındaki zemin davranış modeli Bölüm 3.3'de anlatılmıştır. Bir boyutlu analizlerde kullanılacak zemin profili bu tezin ana konusu olan T19 Kule bölgesine aittir. Taban kayası, deprem kuvvetinin, zemine transformasyonu bozulmadan iletilebilmesi için taban kayası %5 sönüm oranı ile doğrusal elastik olarak modellenmiştir. Hem T19 Kule bölgesindeki zemin birimlerine ait doğrusal olmayan özellikler (Şekil 3-21) hem de SAP60 ve SAP80 karışımlarının doğrusal olmayan özellikleri (Şekil 3-25) sayısal modele atanmıştır. SAP-kum karışımlarının kayma dalgası hızı ise karışımının yerleştirildiği derinliklerdeki ortalama efektif gerilme etkisi dikkate alınarak (Denk. 3.1) hesaplanmıştır. Belirlenen kayma dalgası hızı değerlerinden SAP-kum karışımlarına ait kayma modülü değeri hesaplanmıştır (Denk. 3.4).

$$G = \frac{\gamma}{g} * Vs^2 \qquad 3.4$$

Analizlerde kullanılacak olan 1999 Kocaeli depremine ait bilgiler Bölüm 3.2'de verilmiştir.

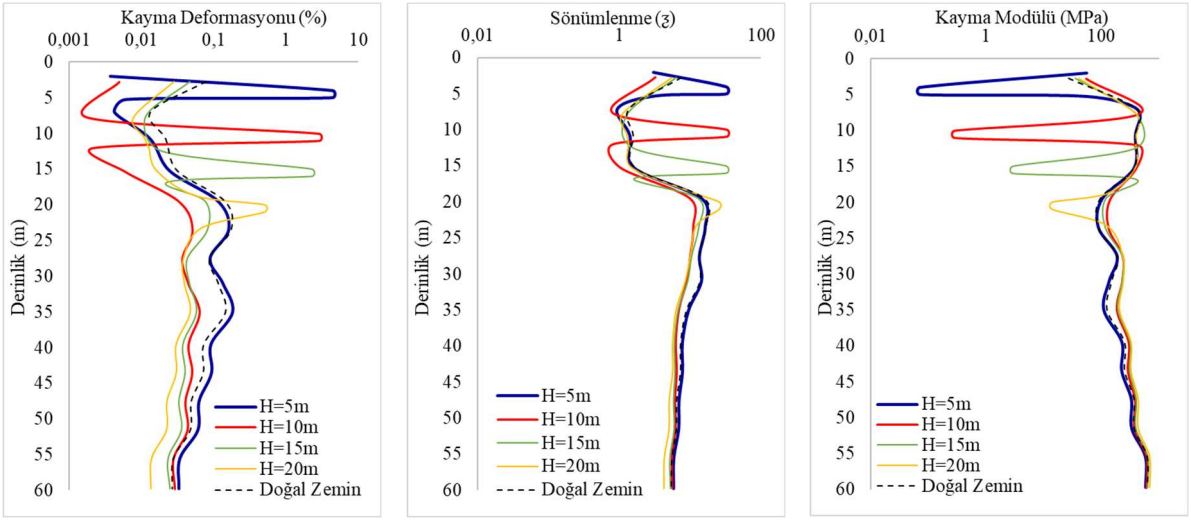
Tüm bu bilgiler ışığında ilk olarak SAP60 ve SAP80 karışımlarının laboratuvar deneylerinin doğrulamasını yapmak adına 1m kalınlıkta ve 15m derinliğe yerleştirilen yumuşak bariyer tabakasına ait bir boyutlu analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde yumuşak bariyerlerin anti-sismik verimliliğinin oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3-26). Bu sonuçlar aynı zamanda SAP-kum karışımlarına ait laboratuvar deneylerinin sonuçlarını kanıtlar niteliktedir (Şekil 3-26).



(a) (b) (c)

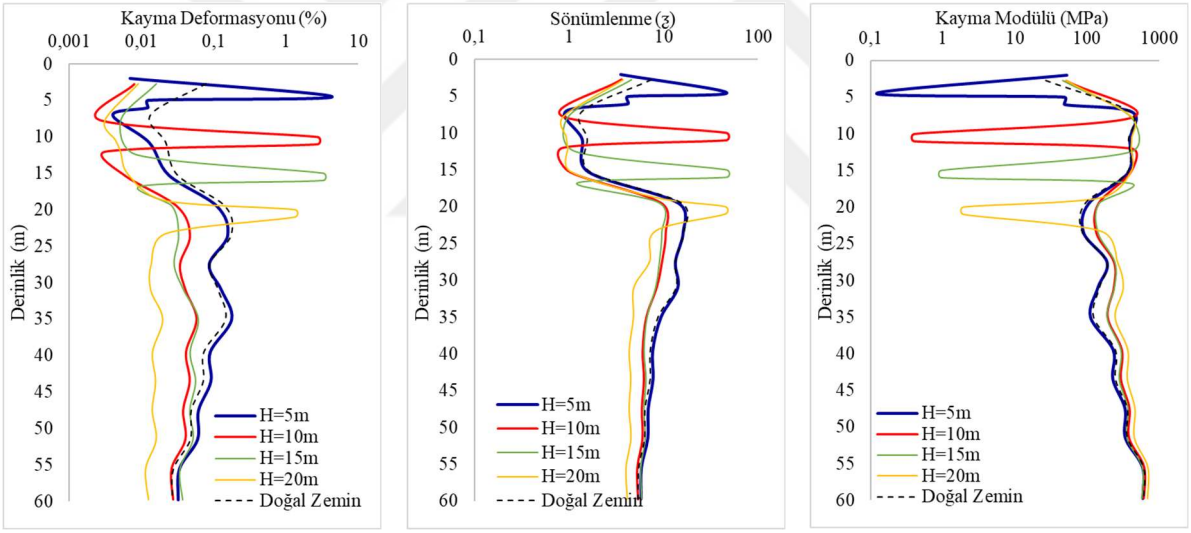
Şekil 3-26. GTS NX Midas 1D analiz 15m derinlikte farklı oranlardaki (SAP80-SAP60) yumuşak bariyerler için a) kayma deformasyonu (%), b) sönümlenme oranı (%) ve c) kayma modülü (MPa) değişimleri.

Daha sonra farklı derinliklerdeki (5m, 10m, 15m ve 20m) SAP60 ve SAP80 karışımlarının etkisini incelemek adına bir dizi sismik tepki analizi yapılmıştır. Bir boyutlu analizlerin sonuçları incelendiğinde yumuşak bariyer ne kadar derin olursa anti-sismik verimliliğini o kadar düşük olur sonucuna varılmaktadır. Yumuşak bariyer derinleştirildiğinde, zemin ve yumuşak bariyer arasındaki dinamik empedans kontrastı azalır. Bu nedenle yumuşak bariyer tabakası derinleştiğinde maksimum kayma deformasyonları ve sönüm azalmakta, kayma modülü artmaktadır. Bununla birlikte bir boyutlu analiz sonuçlarından ve deneylerden anlaşılacağı üzere zemindeki SAP'ın hacim yüzdesi arttığında anti-sismik etkinliğinin arttığı anlaşılmaktadır (Şekil 3-27 ve Şekil 3-28).



(a) (b) (c)

Şekil 3-27. GTS NX Midas 1D analiz SAP60 yumuşak bariyer için a) kayma deformasyonu (%), b) sönümlenme oranı (%) ve c) kayma modülü (MPa) değişimleri.

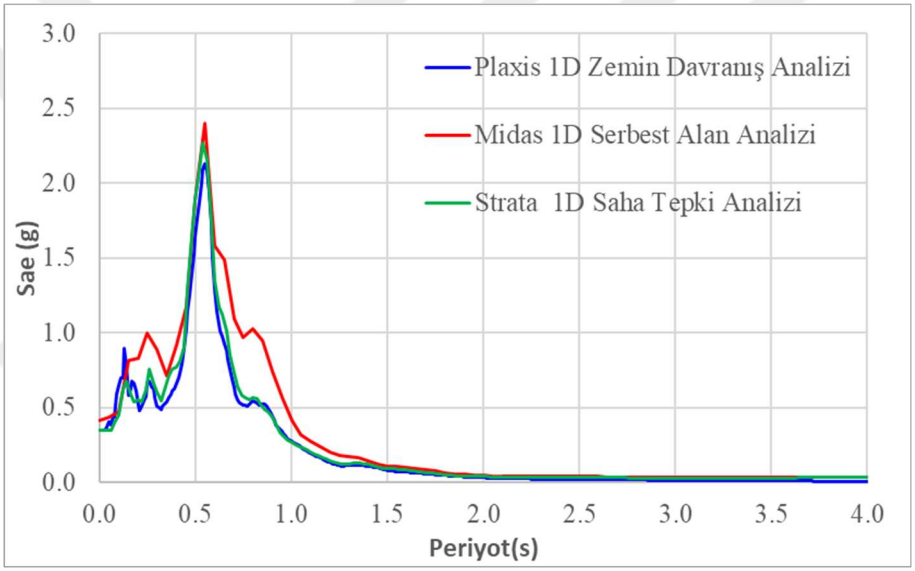


(a) (b) (c)

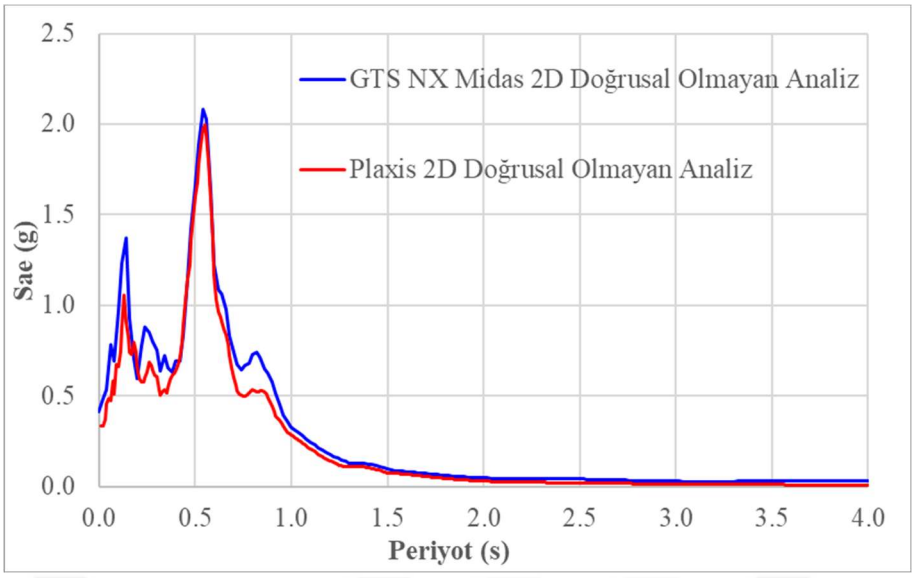
Şekil 3-28. GTS NX Midas 1D analiz SAP80 yumuşak bariyer için a) kayma deformasyonu (%), b) sönümlenme oranı (%) ve c) kayma modülü (MPa) değişimleri.

3.6. MODEL DOĞRULAMA VE HASSASLIK ANALİZLERİ

Bu tez kapsamındaki GSI sistemi (yumuşak bariyer) analizleri GTS NX Midas 2D programı ile yapılacaktır. Bölüm 3.3'de anlatıldığı üzere GTS NX Midas 2D programının tercih edilmesinin sebepleri ve deprem etkisi altındaki zemin davranışı detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Ancak GTS NX Midas yazılımı Plaxis yazılımına göre daha az bilinen bir yazılımdır. Bu nedenle GTS NX Midas, Strada ve Plaxis yazılımları arasında doğrulama analizi yapılmıştır. Doğrulama analizi için kullanılan zemin profili T19 Kule bölgesine aittir ve detaylar önceki bölümlerde açık bir şekilde verilmiştir. Şekil 3-29 ve Şekil 3-30'da GTS NX Midas 1D/ Plaxis 1D/ Strada ve GTS NX Midas 2D/ Plaxis 2D yazılımlarında yapılan analiz sonuçları verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde üç yazılımın da büyük oranda benzer sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.



Şekil 3-29. GTS NX Midas 1D / Plaxis 1D /Strada yazılımları bir boyutlu analiz sonuçları.



Şekil 3-30. GTS NX Midas 2D / Plaxis 2D yazılımları iki boyutlu analiz sonuçları.

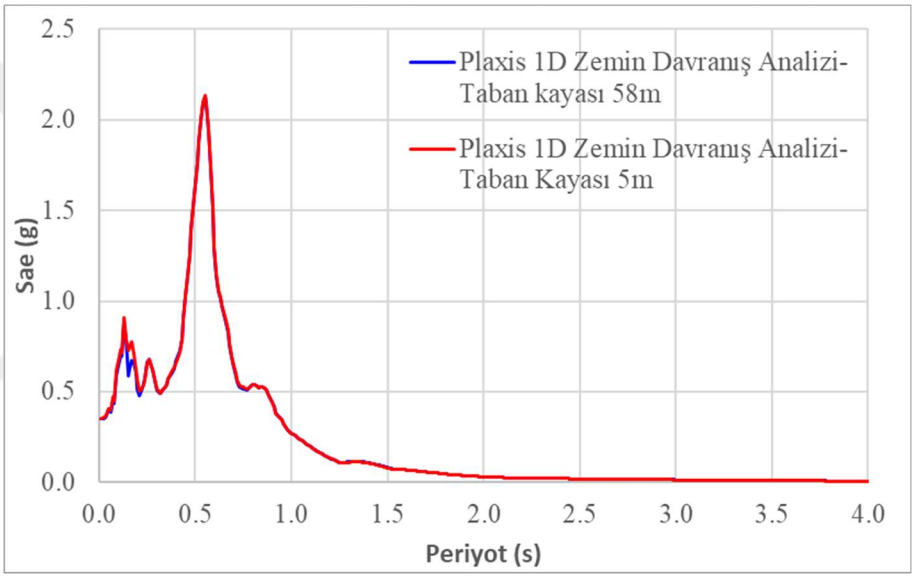
Doğrulama analizlerinden sonra GTS NX Midas ve Plaxis programlarının hassasiyet analizleri yapılmıştır. Yumuşak bariyer yapısının dinamik analiz model tasarımının en önemli konularından bir tanesi analizlerin yapılacağı nümerik modelin uygunluğudur. Zira bu uygunluk sağlanmadığı taktirde tasarım sonuçları güvenilir, doğru ve ekonomik olmaktan öteye gidebilir. Bu tez çalışmasına konu olan sistemin nümerik olarak modellenmesi sırasında nümerik modelin sınır koşulları, ağ boyutu, taban kayasının kalınlığı, zemin tabakasının kalınlığı ile alakalı hassasiyet tasarımın boyutlandırılmasına direkt olarak etki eden faktörler olarak bilinmektedir. Bu bölümde sırası ile bu etkenler 1 boyutlu ve 2 boyutlu analizlerde incelenmiştir.

3.6.1. Bir Boyutlu Model Hassaslık Analizleri

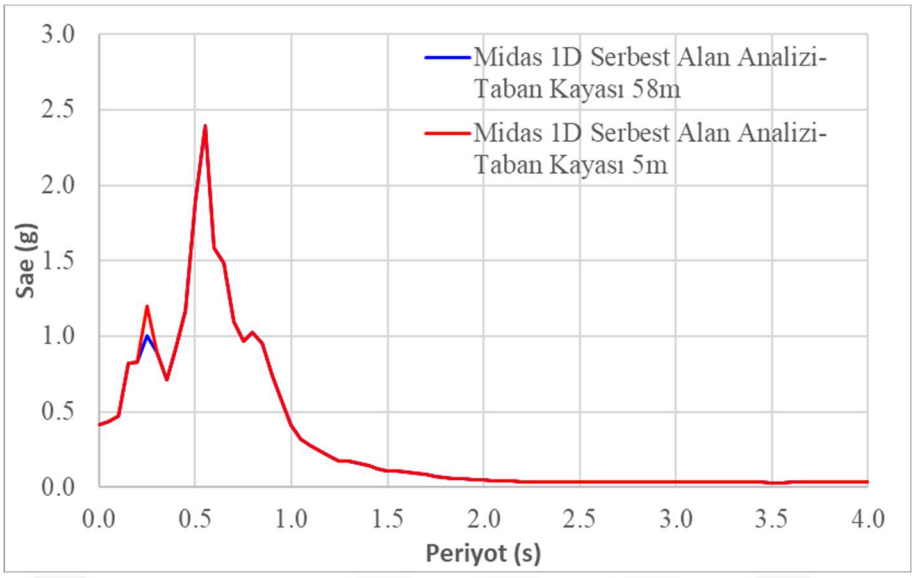
Bir boyutlu serbest alan analizi GTS NX Midas ve Plaxis yazılımları kullanılarak yapılmıştır. "Zemin Davranış Analizi" olarak da adlandırılan bir boyutlu serbest alan analizi, kazı veya inşaat öncesi deprem girdileri için zeminin tepkisini analiz etmek için kullanılır.

Bir boyutlu hassasiyet analizleri kapsamında taban kayasının kalınlığı ve zemin tabakasının kalınlığının etkisi incelenecektir. Analizler Bölüm 3.3'de anlatılan idealize zemin modeli kullanılarak ve Bölüm 3.3'deki deprem etkisinde zemin davranışı dikkate alınarak yapılmıştır. Taban kayası, deprem hareketinin transformasyonunun bozulmadan zemine iletilebilmesi için doğrusal elastik model olarak modellenmiştir.

Geçmiş yıllardaki literatür çalışmalarına göre dinamik analizlerde kullanılacak modelin alt tabanı ile zemin tabakası arasında etkileşim olmamasını sağlamak amacı ile taban kayasının kalınlığı en az modeldeki zemin birimin kalınlığı kadar olması gerektiği sonucu çıkmıştır. Ancak dinamik analizler, özellikle iki ve üç boyutlu dinamik analizler, çok zaman almaktadır. Bu nedenle güncel araştırmalarda taban kayasının kalınlığı tartışılmaya başlanmıştır. Bu bağlamda bu bölümde ilk olarak Plaxis ve GTS NX Midas programlarını kullanılarak bir boyutlu analizlerde taban kayasının etkisini anlayabilmek için 2 farklı analiz yapılmıştır. Taban kayasının 5m ve 58m kalınlıklarına göre 2 farklı analiz yapılmıştır. Tüm bu değerlendirmeler ışığında yapılan analiz sonuçları incelendiğinde taban kayasının kalınlığının 58m olmasına gerek olmadığı sonucu çıkarılmaktadır.

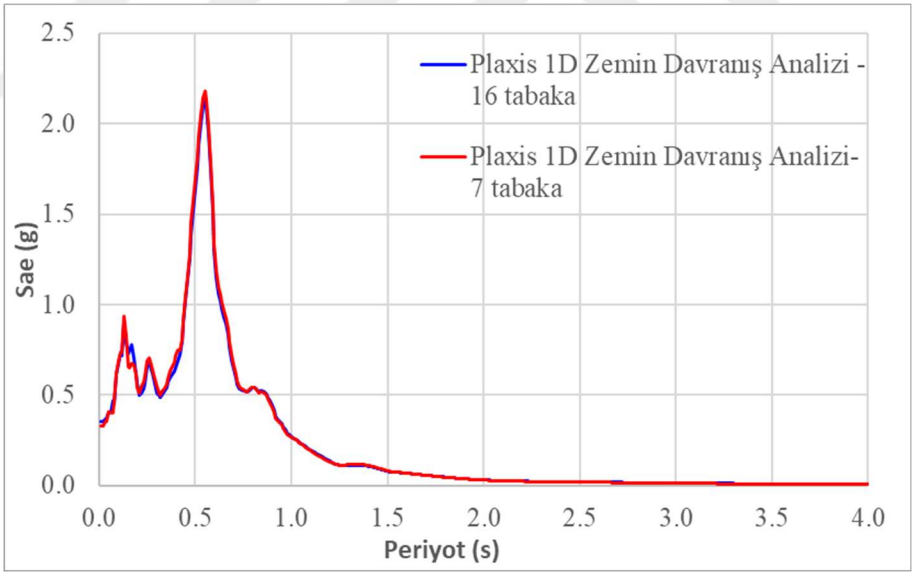


Şekil 3-31. Taban kayası kalınlık analiz sonuçları-Plaxis 1D Zemin Davranış Analizi.

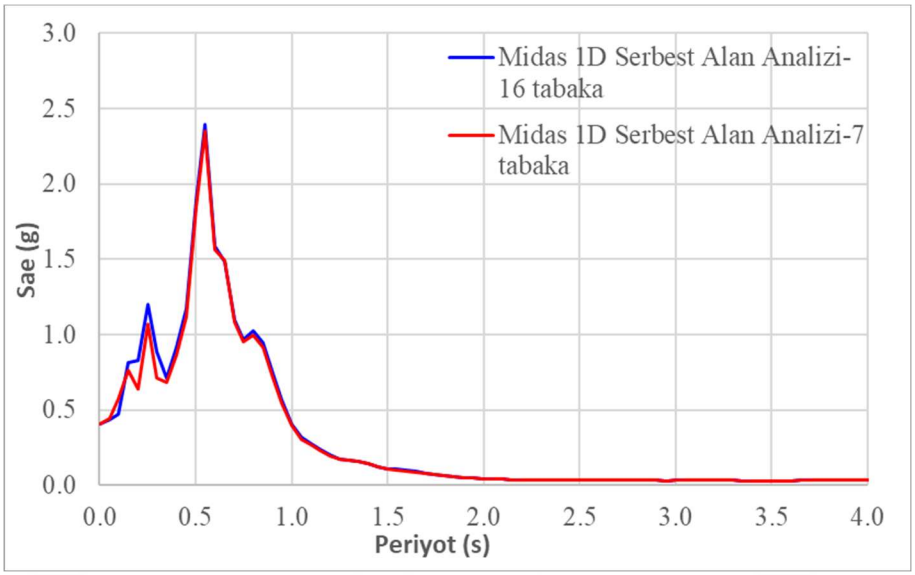


Şekil 3-32. Taban kayası kalınlık analiz sonuçları-GTS NX Midas 1D Serbest Alan Analizi.

Bir boyutlu analizlerde zemin tabakalarının kalınlığı ile alakalı analizler yapılmıştır. Zemin tabakalarının kalınlık hassasiyeti ile ilgili hem Plaxis hem GTS NX Midas programında analizler yapılmıştır.



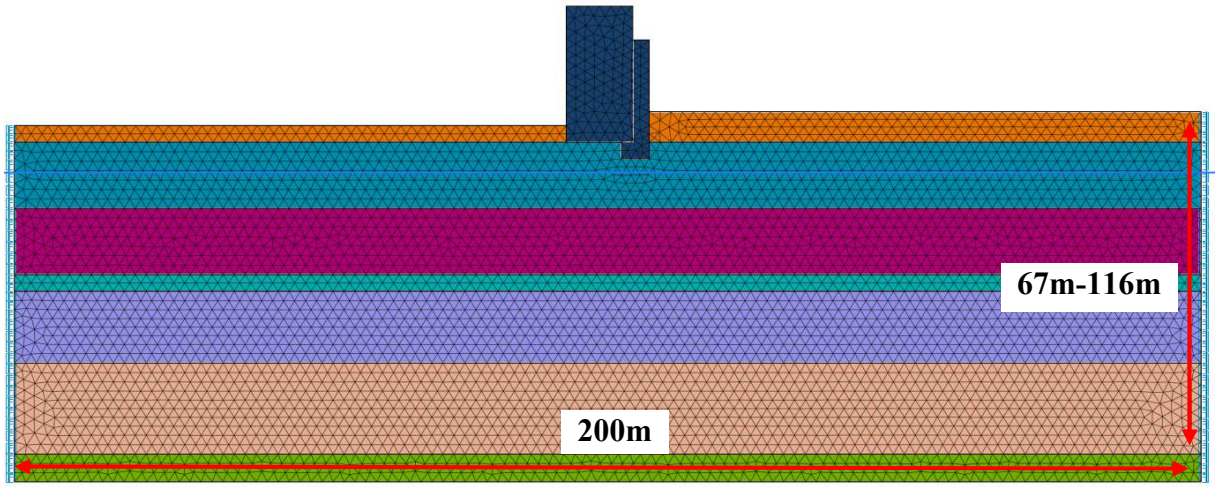
Şekil 3-33. Zemin tabakaları kalınlık hassasiyeti analiz sonuçları-Plaxis 1D Zemin Davranış Analizi.



Şekil 3-34. Zemin tabakaları kalınlık hassasiyeti analiz sonuçları-GTS NX Midas 1D Serbest Alan Analizi.

3.6.2. İki Boyutlu Model Hassaslık Analizleri

Bu tezin içeriğinde olan hassasiyet analizleri kapsamında iki boyutlu analizler yapılmıştır. İki boyutlu analizler Bölüm 3.3'de anlatılan zemin modeli ve sonlu eleman programları olan Plaxis 2D ve GTS NX Midas 2D kullanılarak yapılmıştır. Her iki programda doğrusal olmayan zemin modeli ile doğrusal olmayan analiz yapılmıştır. Analizlerde Tablo 3-3 ve Tablo 3-4'de verilen zemin parametreleri kullanılmıştır. Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinden 11m aşağıda kabul edilmiştir. Modelin genişliği 200 metre ve derinliği ise bu bölümün içeriği olan taban kayasının kalınlığına bağlı olarak tartışılacaktır (Şekil 3-35).



Şekil 3-35. İki boyutlu analizlerde kullanılan kesit görünümü.

Bölüm 3.6.1'de anlatıldığı üzere iki boyutlu model üzerinde sırası ile sınır koşulu, ağ boyutu, taban kayasının kalınlığı ve zemin tabakalarının kalınlık hassasiyeti ile ilgili nümerik analizler yapılmıştır.

3.6.2.1. Sınır Koşulları ve Ağ Boyutu

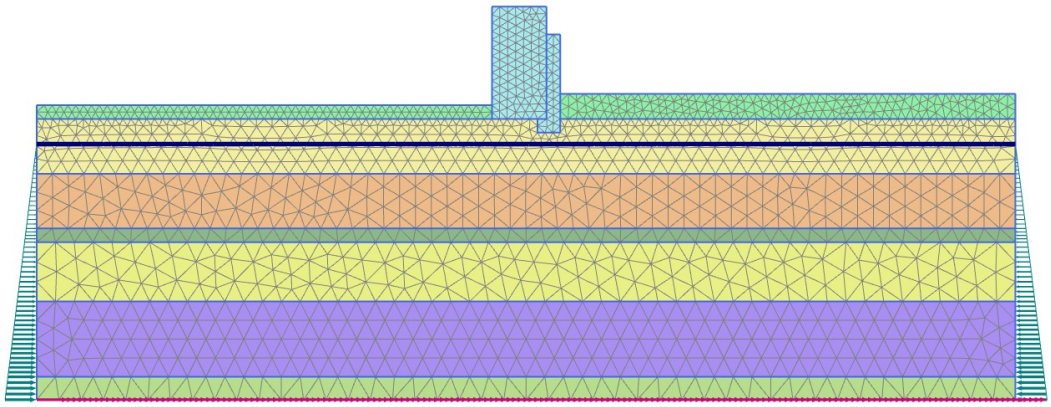
Plaxis yazılımında iki boyutlu analiz yapılırken sınır koşulu yanlarda "free-field" olarak kabul edilmiştir. Ancak taban kayasında "compliant base" ve "rigid base" olarak iki farklı sınır koşulu tanımlanabilir. "Compliant Base", bir öngörülen yer değiştirme çizgisi ve gerilme alanı sınırı kombinasyonundan oluşmaktadır. Dahili olarak öngörülen yer değiştirme geçmişi bir yük geçmişine aktarılır. Yük geçmişi ve gerilme alanının birleşimi, gelen dalgaları emmeye devam ederken deprem hareketinin girişine izin verir. Bu seçenek genel olarak deprem analizi için tercih edilir. "Rigid Base" sınırı, giriş seviyesi için kesin bir tabakalaşma gerektirir. Bu nedenle bu tez kapsamında Plaxis 2D modelinde "Compliant Base" sınırı kabul edilmiştir.

GTS NX Midas yazılımında iki boyutlu analiz yapılırken sınır koşulu yanlarda "free-field" olarak kabul edilmiştir. Ancak taban kayasında tek seçenek olan "fixed bottom" kabul edilmiştir.

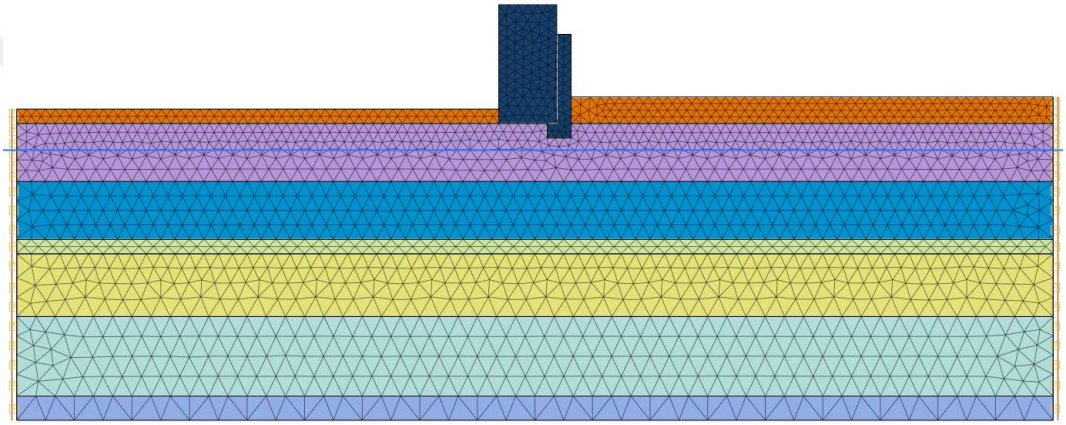
Ağ oluşturulması Plaxis ve GTS NX Midas sonlu elemanlar programlarında tamamen otomatik olarak yapılmaktadır. Yazılımlar, üçgen elemanların boyutunun kontrol edilmesi ve ağın eleman boyutunun ortalama uzunluğu için belirli bir değer atanmasına imkân sağlar. Kuhlemeyer ve Lysmer (1973), aşağıdaki denklem ile kayma dalgası hızının sekize ve maksimum frekansa bölünmesiyle elde edilen değere eşit veya daha küçük bir boyut almayı önermektedir.

$$\text{Ortalama ağ boyutu} \leq \lambda / 8 = V_{s,(min)} / (8 \, . \, f_{max}) \tag{3.5}$$

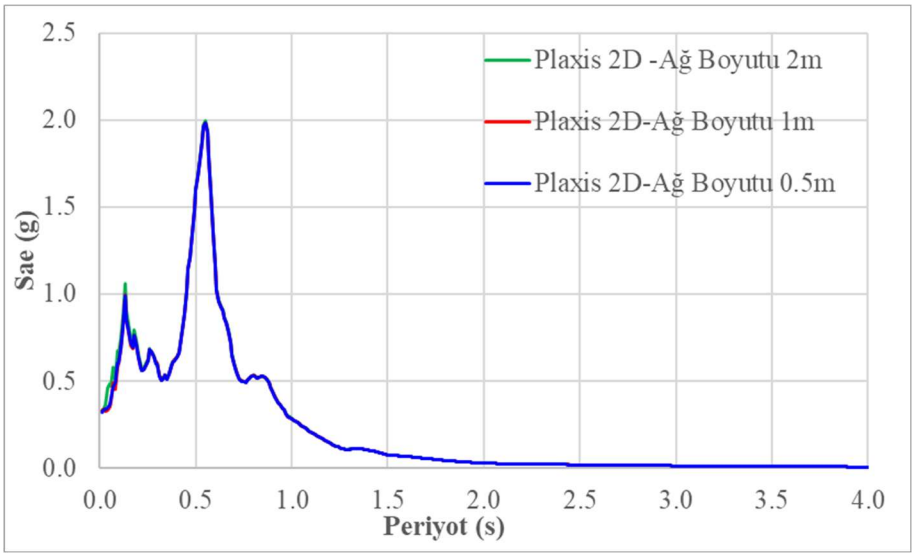
Bu bölümde üç farklı ağ boyutu kullanarak nümerik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu geometriler oluşturulurken en hassas ağ boyutunun Denklem 3.5'de belirtilen yaklaşıma uygun seçilmesine dikkat edilmiştir. Bu durum da modelde yaklaşık 0.5-2m'ye denk gelen ağ boyutu anlamına gelmektedir. Ancak dinamik analizler büyük boyutlu dosyalar olduğu için ağ boyutu, analiz süresini önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle bu bölümde izin verilen sınırlar içerisinde kullanılabilecek maksimum ağ boyutu için analizler yapılmıştır. Analizlerde kullanılan ağ boyutları yaklaşık 1.5m ve 2m yüksekliklerinde seçilmiş ve sonuçları incelenmiştir.



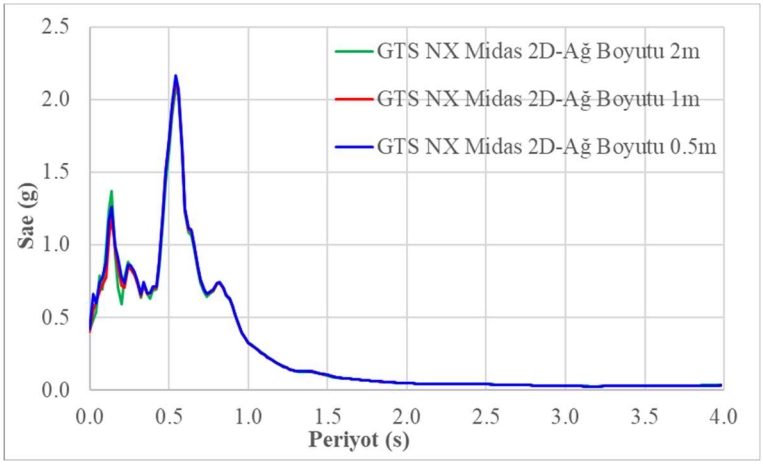
Şekil 3-36. Plaxis 2D ağ boyutu analiz modeli.



Şekil 3-37. GTS NX Midas 2D ağ boyutu analiz modeli.



Şekil 3-38. Ağ boyutu analiz sonuçları-Plaxis 2D.

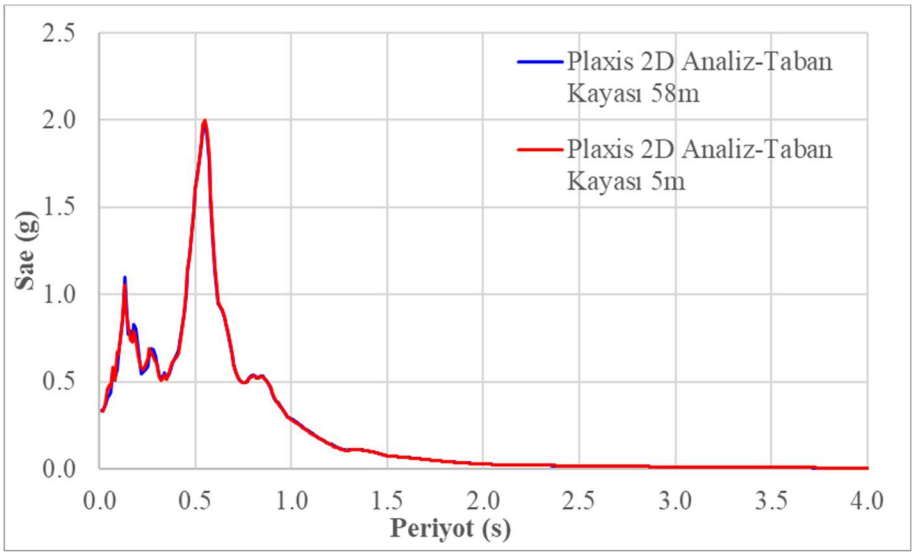


Şekil 3-39. Ağ boyutu analiz sonuçları-GTS NX Midas 2D.

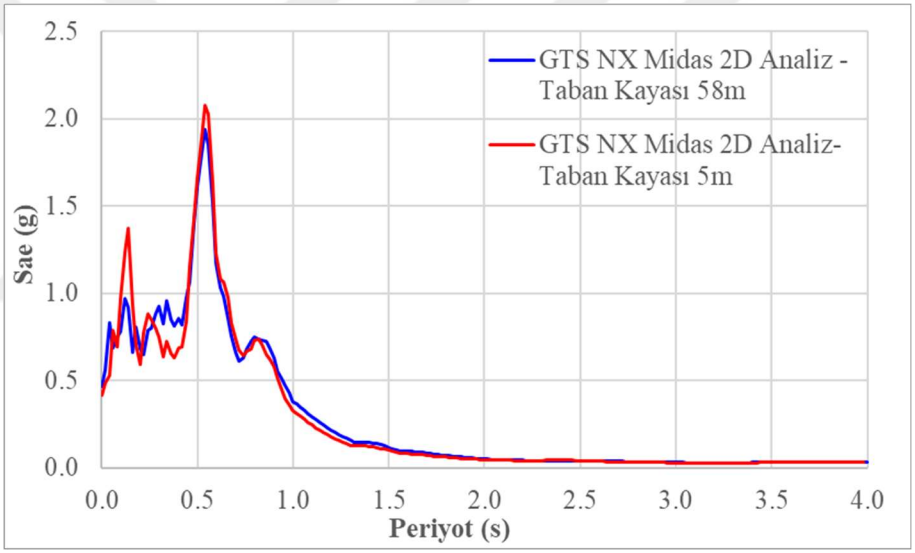
Şekil 3-36 ve Şekil 3-37'de 3 farklı ağ boyutu için (sırası ile ağ boyutları 2m, 1m, 0.5m) oluşturulan model geometrileri gösterilmiştir. Bu ağ boyutları ile yapılan analizler neticesinde ağ boyutunun 2m olduğu durumda oluşan spektrum hedef spektrum ile oldukça benzerlik göstermektedir (Şekil 3-38 ve Şekil 3-39).

3.6.2.2. Taban Kayası ve Zemin Tabakası Kalınlık Analiz Sonuçları

Bu bölümde iki boyutlu analizlerde taban kayasının kalınlığı ile alakalı analizler yapılmıştır. Geçmiş yıllardaki literatür çalışmalarına göre dinamik analizlerde kullanılacak modelin alt tabanı ile zemin tabakası arasında etkileşim olmamasını sağlamak amacı ile taban kayasının kalınlığı en az modeldeki zemin birimin kalınlığı kadar olması gerektiği sonucu çıkmıştır. Ancak dinamik analizler, özellikle iki ve üç boyutlu dinamik analizler, çok zaman almaktadır. Bu nedenle güncel araştırmalarda taban kayasının kalınlığı tartışılmaya başlanmıştır. Bu bağlamda bu bölümde ilk olarak Plaxis ve GTS NX Midas programlarını kullanılarak iki boyutlu analizlerde taban kayasının etkisini anlayabilmek için 2 farklı analiz yapılmıştır. Taban kayasının 5m ve 58m kalınlıklarına göre 2 farklı analiz yapılmıştır. Tüm bu değerlendirmeler ışığında yapılan analiz sonuçları incelendiğinde taban kayasının kalınlığının 58m olmasına gerek olmadığı sonucu çıkarılmaktadır.

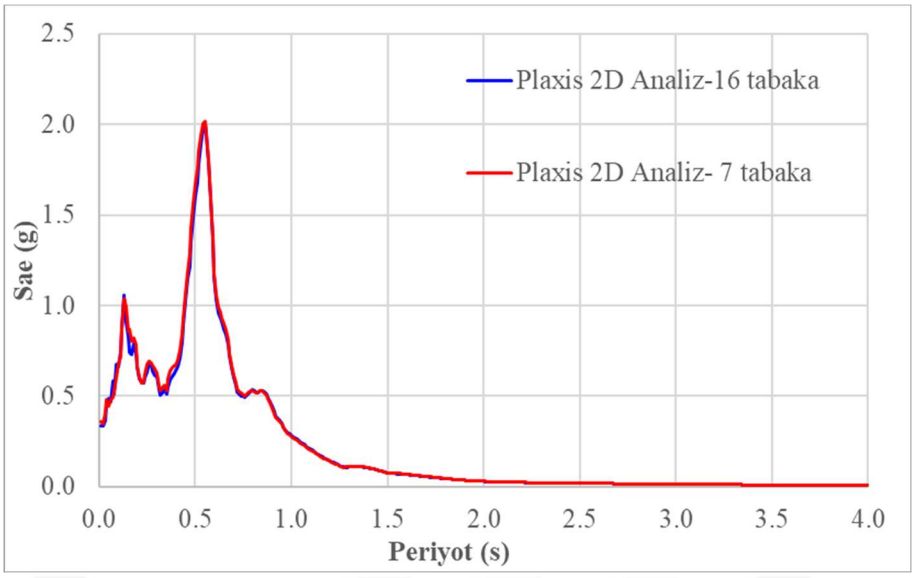


Şekil 3-40. Taban kayası kalınlık analiz sonuçları-Plaxis 2D.

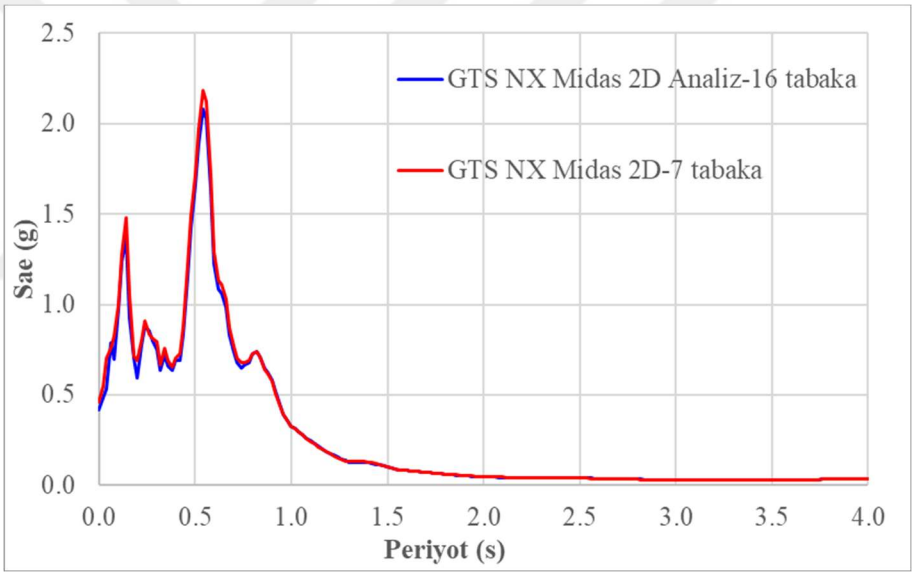


Şekil 3-41. Taban kayası kalınlık analiz sonuçları-GTS NX Midas 2D.

Zemin tabakalarının kalınlık hassasiyeti ile ilgili hem Plaxis hem GTS NX Midas programında analizler yapılmıştır.



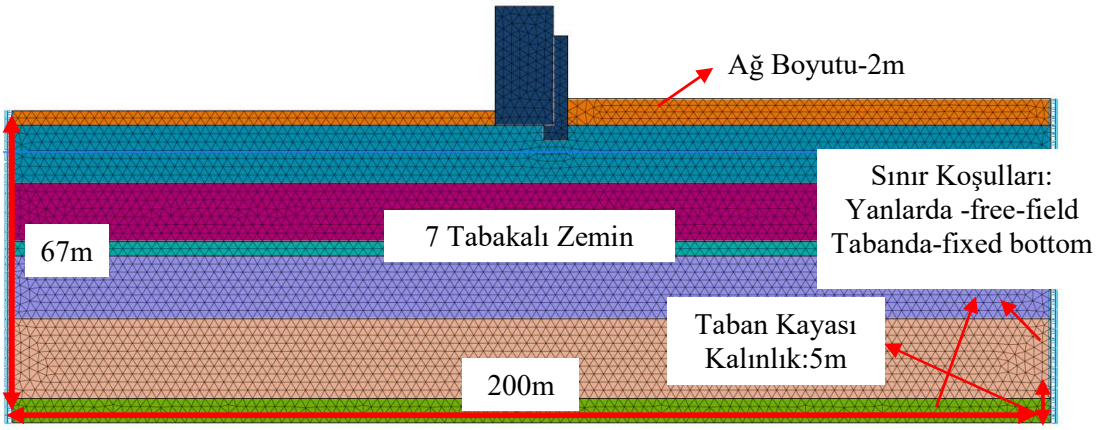
Şekil 3-42. Zemin tabakaları kalınlık hassasiyeti analiz sonuçları – Plaxis 2D.



Şekil 3-43. Zemin tabakaları kalınlık hassasiyeti analiz sonuçları – GTS NX Midas 2D.

3.6.3. Hassaslık Analizleri Genel Değerlendirme

Tezin ana konusu olan yumuşak bariyer analizlere ait dinamik analizlerde kullanılacak olan nümerik modelin uygunluğu için hassaslık analizleri yapılmıştır. Analizler neticesinde karar verilen model Şekil 3-44'de verilmiştir.



Şekil 3-44. Analizlerde kullanılacak olan nümerik model.

3.7. İKİ BOYUTLU ANALİZLERDE KULLANILACAK NÜMERİK MODEL

Bu bölümde, T19 Kulesine etkiyecek olan deprem kuvvetini azaltmak amacıyla tasarlanan "GSI" sistem analizinde kullanılacak olan nümerik model anlatılacaktır. İki boyutlu analizler GTS NX Midas 2D sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılacaktır. "GSI" sistemi yanlarda ve tabanda olacak şekilde yumuşak bariyerlerden oluşmaktadır. Yumuşak bariyerlerde kullanılacak olan "Süper Emici Polimer (SAP)" malzemesinin özelliklerini belirlemek adına yapılan deneyler ve parametreler Bölüm 3.5'de detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bölüm 3.5'deki deney sonuçları ve bir boyutlu analiz sonuçları incelendiğinde tezin ilerleyen bölümlerdeki analizlerde SAP60 ve SAP80 kullanılmaya karar verilmiştir.

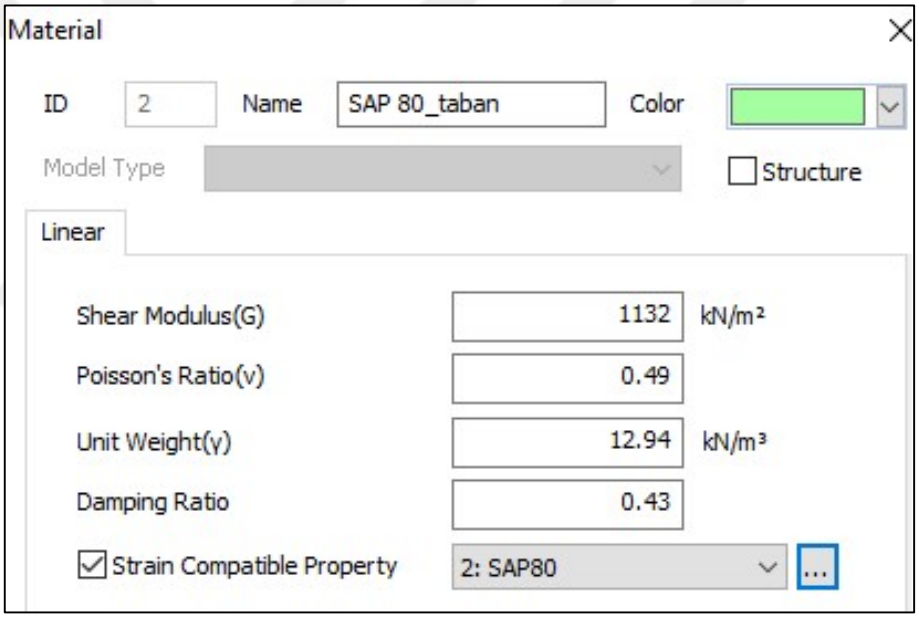
T19 Kulesinin altındaki zemin profili Bölüm 3.3'de detaylı bir şekilde açıklanmıştır. T19 Kulesine ait zemin birimlerinin özellikleri Şekil 3-12, Şekil 3-21 ve Tablo 3-3 ve Tablo 3-4'de verilmiştir.

İki boyutlu dinamik analizlerde, hassaslık ve bir boyutlu analizlerde kullanılan Kocaeli (1999) depremi kullanılacaktır.

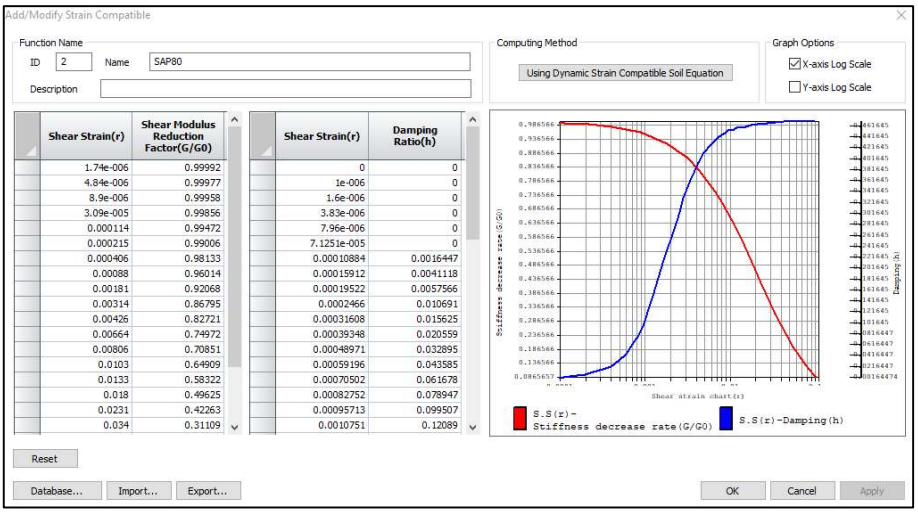
İki boyutlu analizlerde depremin etkisini bir boyutlu analizlerdeki gibi oluşturmak için modelin yan taraflarına "serbest alan (free-field)" sınır koşulu uygulanmıştır. Tabanda ise GTS NX Midas 2D programında tek seçenek olan "sabit alt (fixed bottom)" sınır koşulu uygulanmıştır.

İlk olarak yumuşak bariyer sisteminin farklı derinliklerdeki (5m, 10m, 15m ve 20m) anti-sismik etkisi iki boyutlu analizler ile irdelenecektir. Daha sonra Bölüm 4.1'de ki analiz sonuçlarına göre seçilen uygun bir derinlik için B/H (yani yumuşak bariyerin genişliğinin derinliğe oranı,

en/boy) oranı incelenecektir. Yatay bariyerin kalınlığı 1 metre, dikey bariyerlerin kalınlıkları 2 metre kabul edilmiştir. Alt yatay bariyerler için 1m üst sınırdır (oturma miktarları artmaması için). Dikey bariyerler için 2m kalınlık imalat tekniği açısından seçilmiştir. Yatay ve düşey bariyerlerin özellikleri bir boyutlu analizler ve deney sonuçları incelenerek SAP60 ve SAP80 olarak belirlenmiştir. SAP60 ve SAP80 malzemesi GTS NX Midas 2D içerisinde bulunan "2D eşdeğer (2D equivalent)" zemin modeli kullanılmıştır. 2D eşdeğer zemin modeli karmaşık doğrusal olmayan davranışını eşdeğer doğrusal özelliklere dönüştüren ve deprem etkisi altında zemin davranış analizine izin veren bir modeldir. Depremlerden veya diğer dinamik yüklemelerden kaynaklanan kayma deformasyonları sürekli değişmektedir ve eşdeğer bir doğrusal değer ayarlamak için etkin kayma deformasyonu kullanılmaktadır. Gerekli girdi parametreleri aşağıdaki gibi programa uygulanmaktadır.

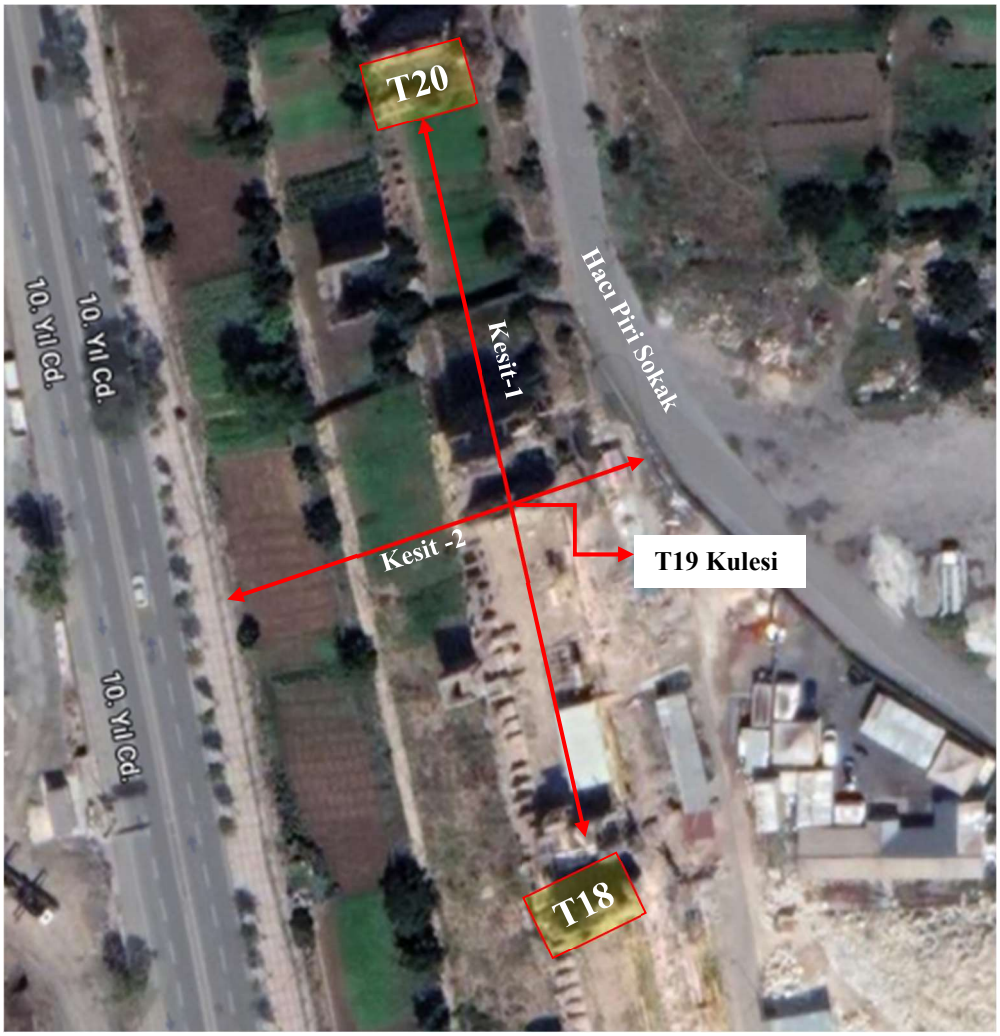


Şekil 3-45. GTS NX Midas 2D eşdeğer zemin modeli girdi ekranı-1.



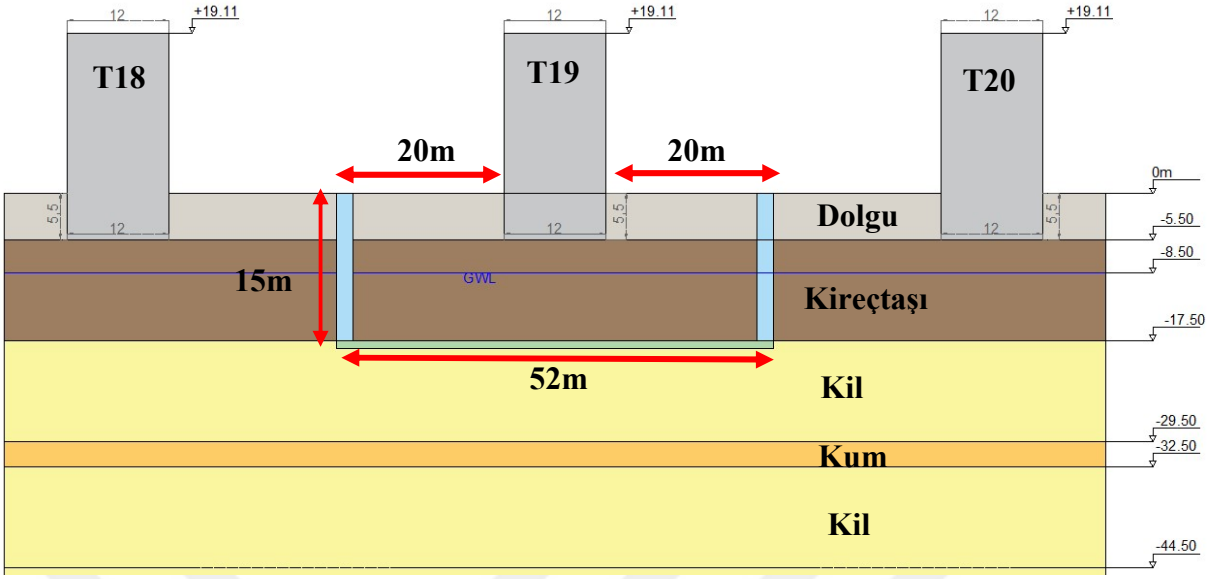
Şekil 3-46. GTS NX Midas 2D eşdeğer zemin modeli dinamik eğri girdi ekranı-2.

Tüm bu değerlendirmelerden sonra bu teze konu olan T19 Kule bölgesinin çevre, zemin vb. koşullar incelenerek en uygun "GSI" yumuşak bariyer sistemi seçilmesi için iki farklı doğrultuda analiz yapılacaktır. Analiz sonuçlarına göre T19 Kule bölgesine ait en uygun yumuşak bariyer sistemi seçilecektir.



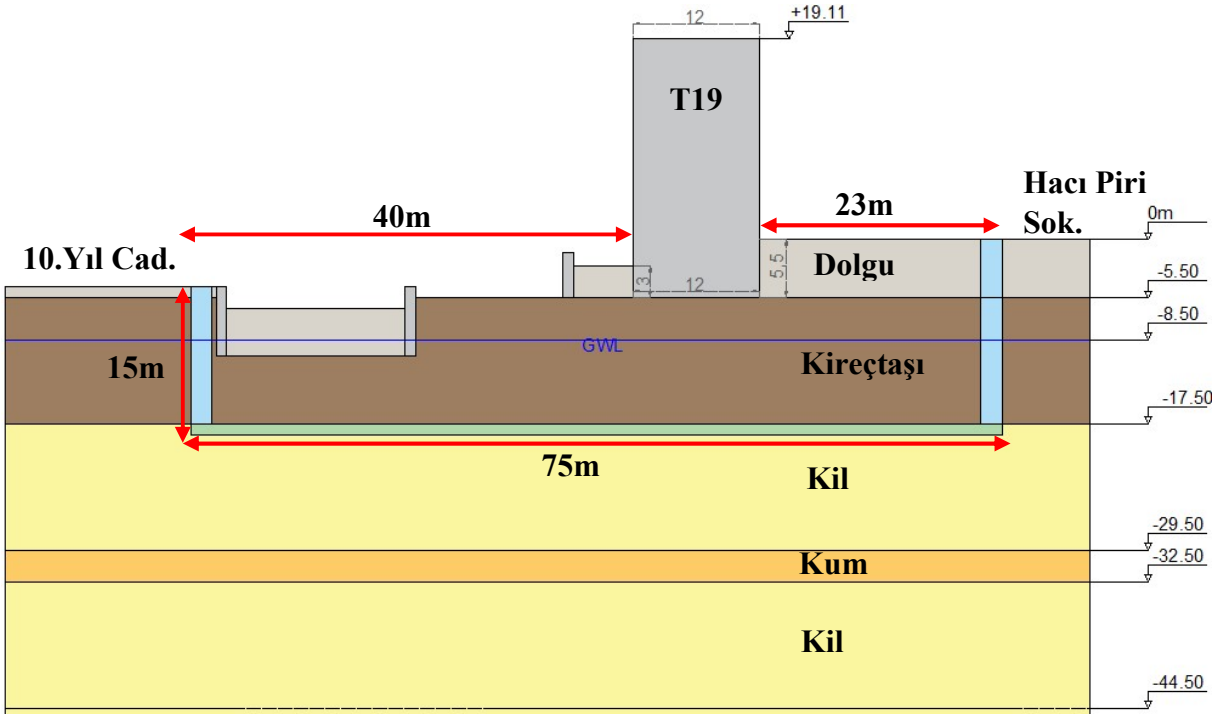
Şekil 3-47. T19 Kulesi Google Earth plan görünümü.

Şekil 3-47'de T19 kule bölgesinin "Google Earth" plan görünümü verilmiştir. Plan görünümü incelendiğinde T19 kulesinin komşu kulelere (Kuzey-Güney doğrultusu) uzaklığı yaklaşık 40m civarındadır. Bu nedenle bu cephedeki yumuşak bariyer genişliği 52m olmaktadır (Şekil 3-48).



Şekil 3-48. T19 Kulesi Kesit-1 en kesit görünümü (Kuzey-Güney doğrultusu).

T19 kulesinin 10. Yıl Caddesi ve Hacı Piri Sokak (Doğu-Batı doğrultusu) arasındaki cephe incelendiğinde ise yumuşak bariyer sisteminin genişliği maksimum 75m olmaktadır (Şekil 3-49'den görüleceği üzere bu cephedeki bariyerin yerleşimi asimetrik şekildedir. Bu nedenle bu cephede çözülecek olan analiz asimetrik yumuşak bariyerin deprem kuvvetini sönümlemesi hakkında fikir verecek olup, ilerde yapılacak olan yeni araştırmalara ışık tutmada önemli bir rol oynayacaktır.



Şekil 3-49. T19 Kulesi Kesit-2 en kesit görünümü (Doğu-Batı doğrultusu).

T19 Kulesinin altında bulunan kireçtaşı tabakasından dolayı her iki kesitte de yumuşak bariyer tabakası (yatay alt SAP tabakası), 15m derinlikten başlayarak yapılmalıdır. Çünkü kayalık (kireçtaşı) bir malzemede sürekli bir yatay SAP tabakası oluşturmak çok zor hatta oldukça güçtür. 15m derinliğe yumuşak bariyer tabakası yapılacağı için Bölüm 3.5'deki bir boyutlu analiz sonuçları da dikkate alınarak SAP80 kullanılmaya karar verilmiştir.

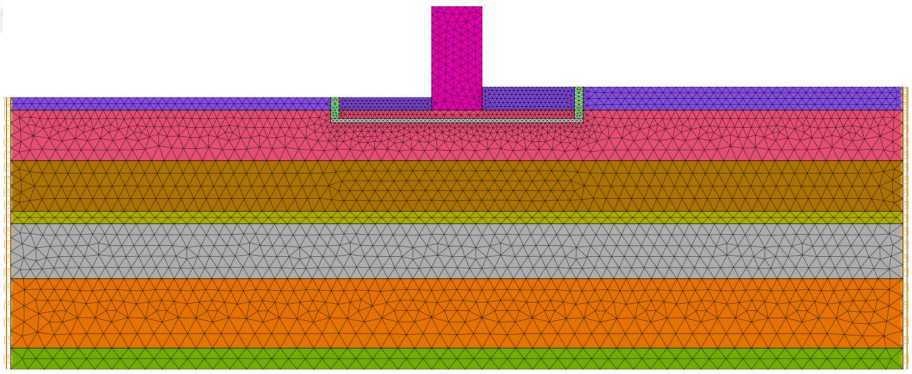
4. BULGULAR

Yumuşak bariyer yapısının dinamik analiz için model tasarımı, zemin ve SAP malzemesine ait parametreler Bölüm 3'de detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

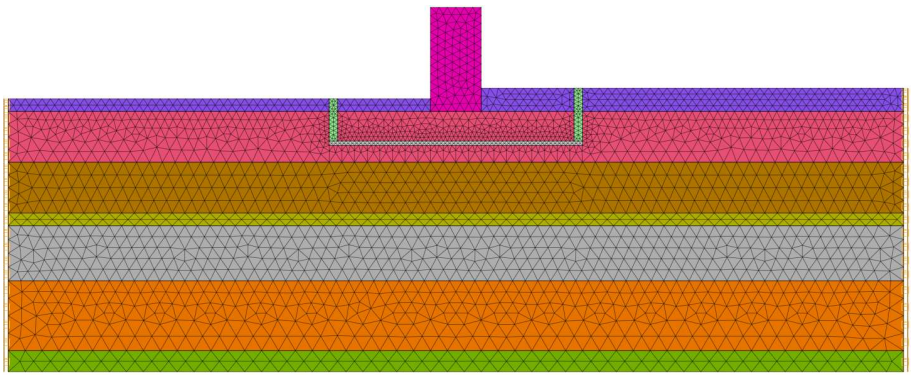
Bu bölümde ilk olarak GTS NX Midas 2D programı kullanılarak farklı oranda SAP karışımlarından (SAP60- SAP80) oluşan yumuşak bariyer analizlerin derinliğe bağlı değişimi incelenmiştir. Daha sonra uygun olan derinlik seçilerek B/H oranın analizlerdeki etkisi incelenmiştir. Son olarak ise T19 kule bölgesine uygun olan yumuşak bariyer tasarımı için belirlenen Kesit-1 ve Kesit-2 modellerinin analizleri yapılıp incelenmiştir.

4.1. DERİNLİĞE BAĞLI YUMUŞAK BARİYER ANALİZLERİ

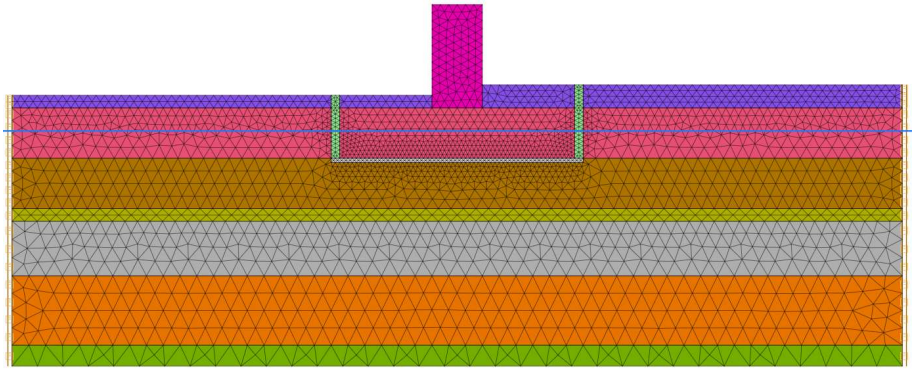
Bu bölümde yumuşak bariyerin derinliğe bağlı etkisi incelenmiştir. Derinlik (H) 5m, 10m, 15m ve 20m için analizler yapılmıştır. Yumuşak bariyer malzemesi olan SAP60 ve SAP80 için derinlik etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. SAP malzemesinin parametreleri Bölüm 3.5'de ve GTS NX Midas 2D programında modellenmesine ilişkin detaylar Bölüm 3.7'de anlatılmıştır.



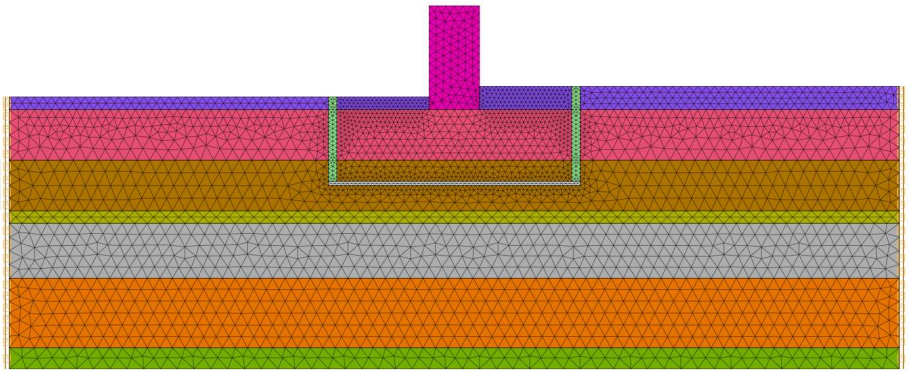
Şekil 4-1. GTS NX Midas 2D yumuşak bariyer H=5m için nümerik model.



Şekil 4-2. GTS NX Midas 2D yumuşak bariyer H=10m için nümerik model.

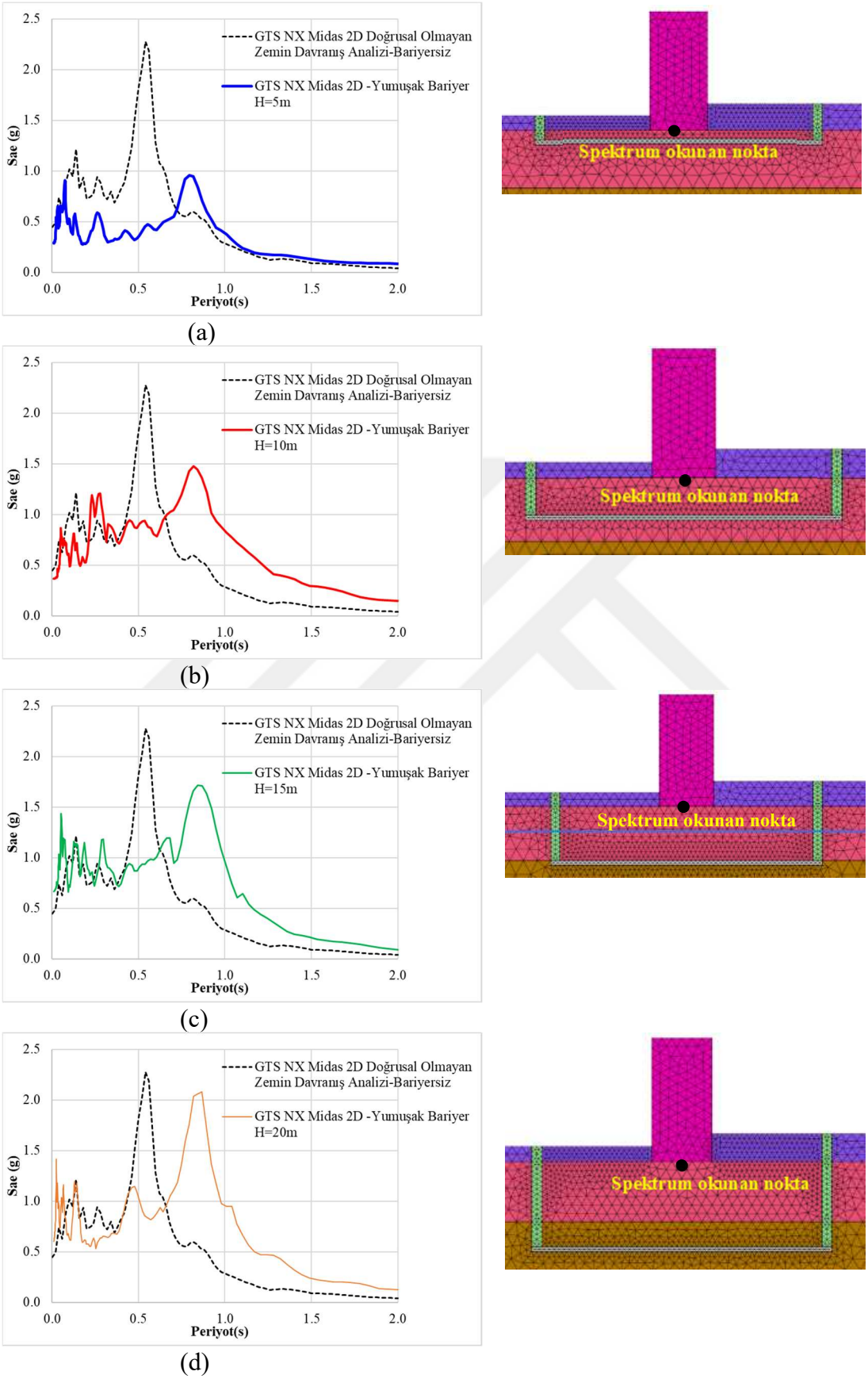


Şekil 4-3. GTS NX Midas 2D yumuşak bariyer H=15m için nümerik model.

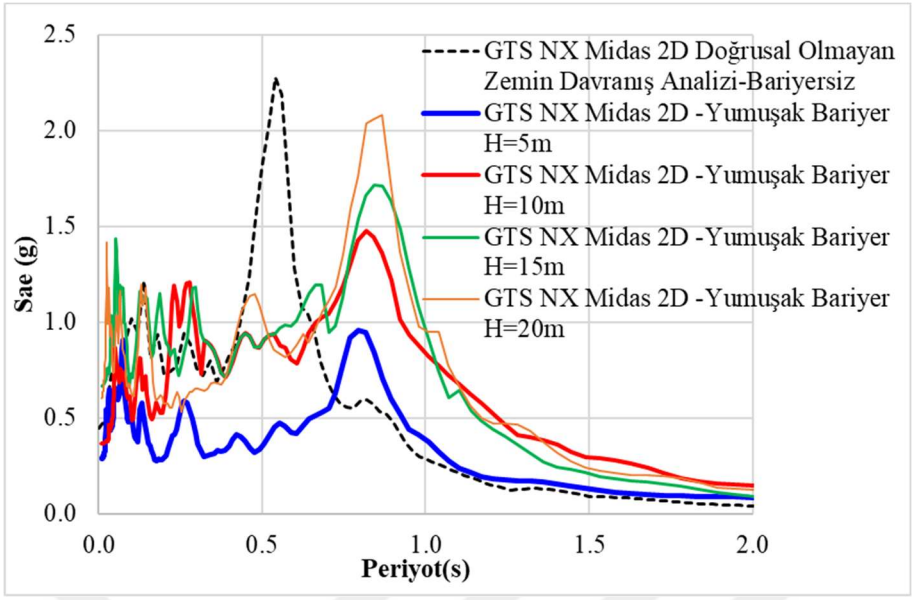


Şekil 4-4. GTS NX Midas 2D yumuşak bariyer H=20m için nümerik model.

Nümerik modelin boyutları ise Bölüm 3.3'de anlatılan hassaslık analiz sonuçlarına göre belirlenmiştir (model genişliği 200m, model derinliği 67m).

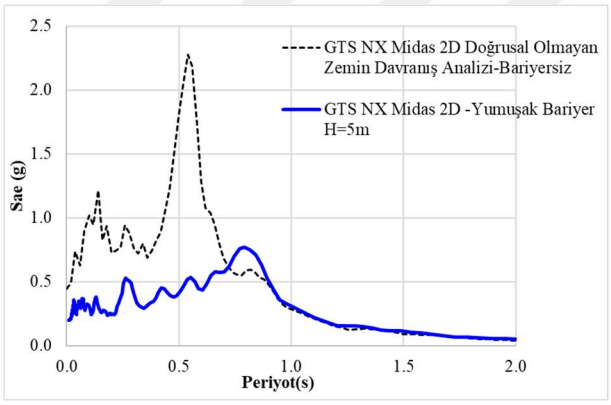


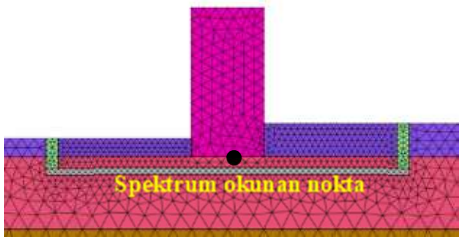
Şekil 4-5. Yumuşak bariyerli (SAP60) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği.



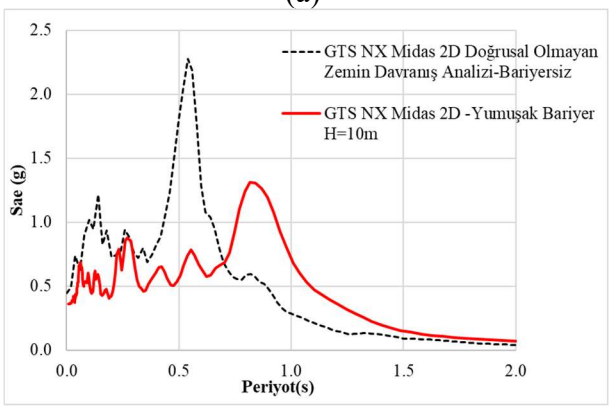
Şekil 4-6. Yumuşak bariyerli (SAP60) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği (tüm derinlikler).

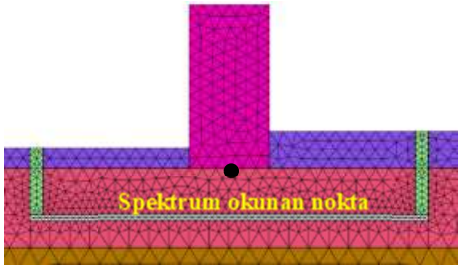
SAP60 karışımından oluşan yumuşak bariyer sisteminin analiz sonuçları (Şekil 4-6) incelendiğinde; 5m, 10m, 15m ve 20m derinliklerdeki bariyerin pik ivme üzerinde sırasıyla %60, %31, %23 ve %5 oranında azaltıcı etkisi vardır.



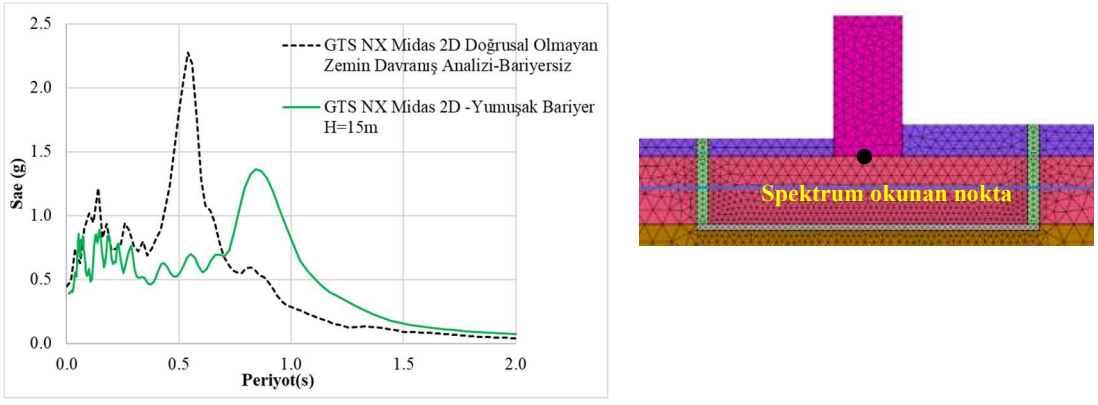


(a)

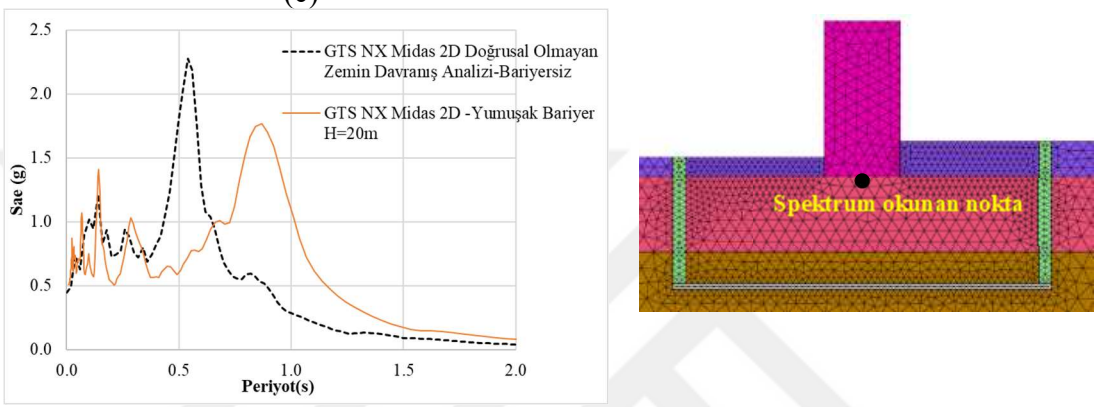




(b)

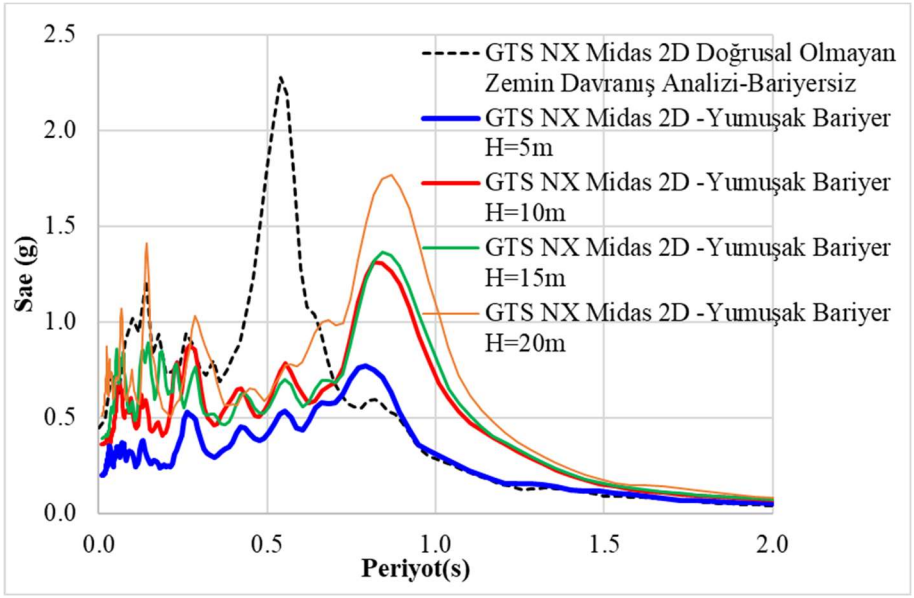


(c)



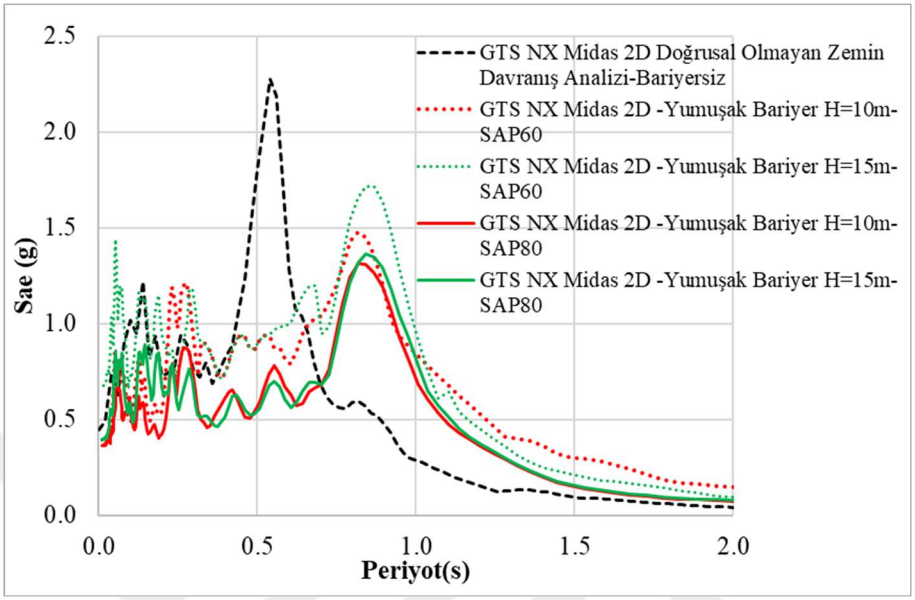
(d)

Şekil 4-7. Yumuşak bariyerli (SAP80) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği.



Şekil 4-8. Yumuşak bariyerli (SAP80) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği (tüm derinlikler).

SAP80 karışımından oluşan yumuşak bariyer sisteminin analiz sonuçları (Şekil 4-8) incelendiğinde; 5m, 10m, 15m ve 20m derinliklerdeki bariyerin pik ivme üzerinde sırasıyla %70, %40, %35 ve %27 oranında azaltıcı etkisi vardır.

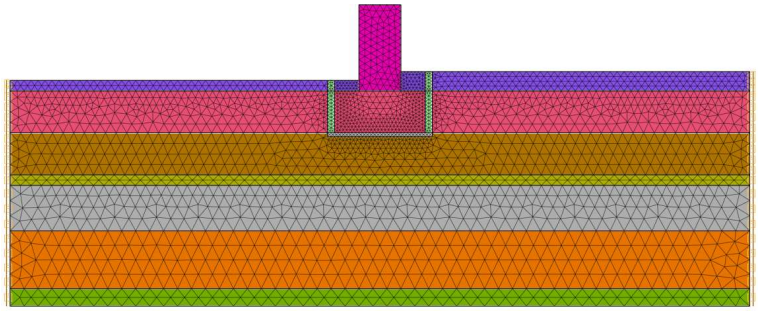


Şekil 4-9. Yumuşak bariyerli (SAP60-SAP80) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği (H=10m ve H=15m).

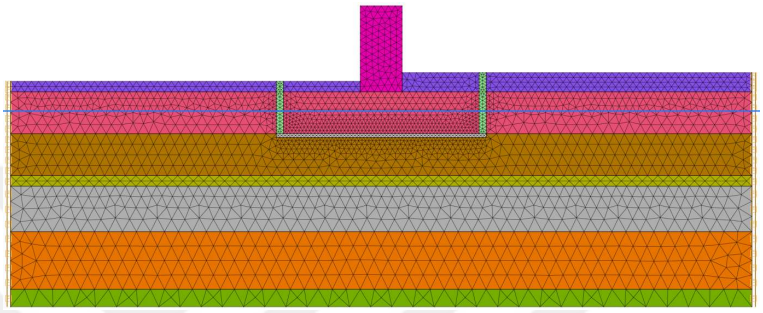
Zemine yumuşak bir tabaka yerleştirmenin ana dinamik etkisi, zeminin doğal rezonans periyodunun artmasıdır (Şekil 4-9). T19 Kule bölgesindeki zeminin ilk doğal rezonans periyodu 0.5s civarındayken, yumuşak tabaka yerleştirildiğinde 0.81-0.86s arasına kaymıştır. Bu nedenle yumuşak bariyerler, düşük dönemli binaları korumak için son derece etkili olabilirken, yüksek dönemli binalar için etkisiz hatta zararlı olabilir.

4.2. EN/BOY (B/H) ORANINA BAĞLI YUMUŞAK BARİYER ANALİZLERİ

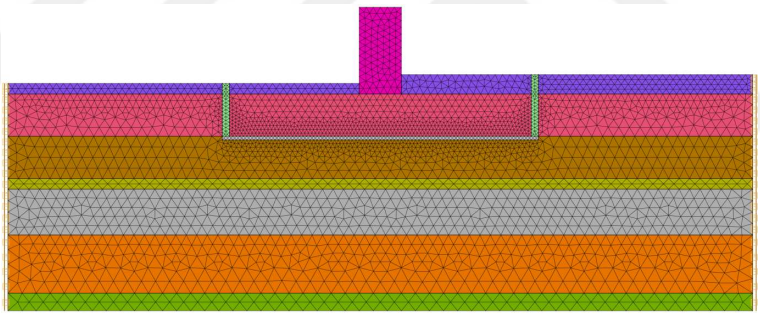
Bu bölümde 15m derinlik için yumuşak bariyerin tasarımının en-boy oranı (B/H, yani yumuşak bariyerin genişliğinin derinliğe oranı) incelenmiştir. Zemin modelinde bulunan kireçtaşı tabakasından dolayı ve 10m ve 15m derinlikleri arasında çok bir fark olmadığı için 15m seçilmiştir (Şekil 4-9). B/H oranı 2-4-6 olacak şekilde analizler yapılmıştır. Yumuşak bariyer malzemesi olan SAP60 ve SAP80 için B/H etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. SAP malzemesinin parametreleri Bölüm 3.5'de ve GTS NX Midas 2D programında modellenmesine ilişkin detaylar Bölüm 3.7'de anlatılmıştır.



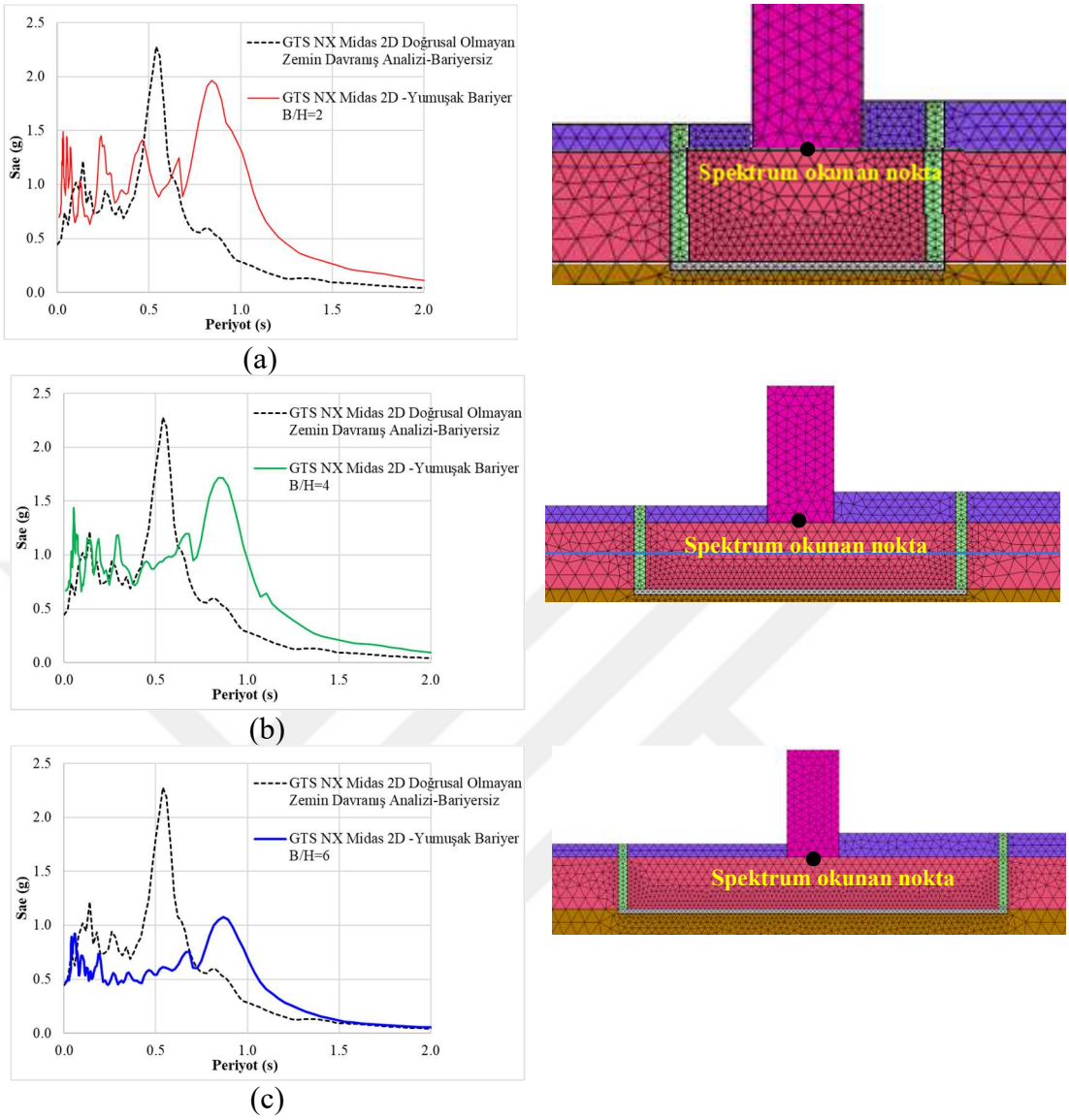
Şekil 4-10. GTS NX Midas 2D yumuşak bariyer B/H=2 için nümerik model.



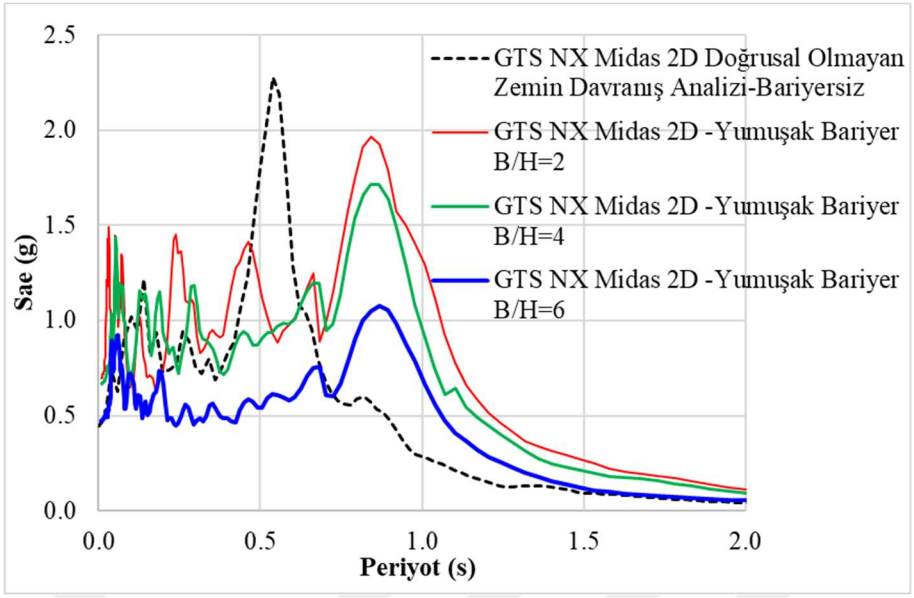
Şekil 4-11. GTS NX Midas 2D yumuşak bariyer B/H=4 için nümerik model.



Şekil 4-12. GTS NX Midas 2D yumuşak bariyer B/H=6 için nümerik model.

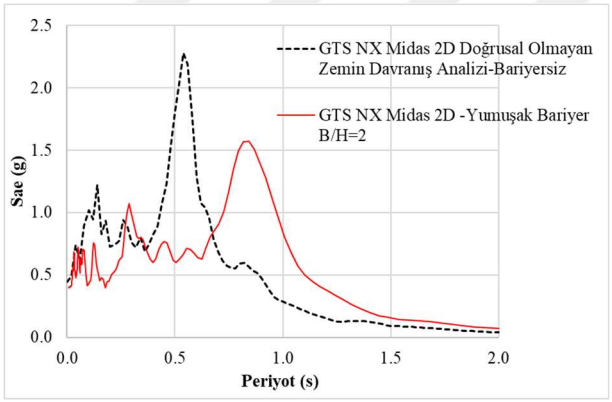


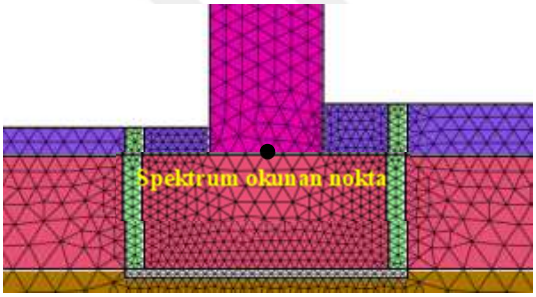
Şekil 4-13. Yumuşak bariyerli (SAP60) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği.



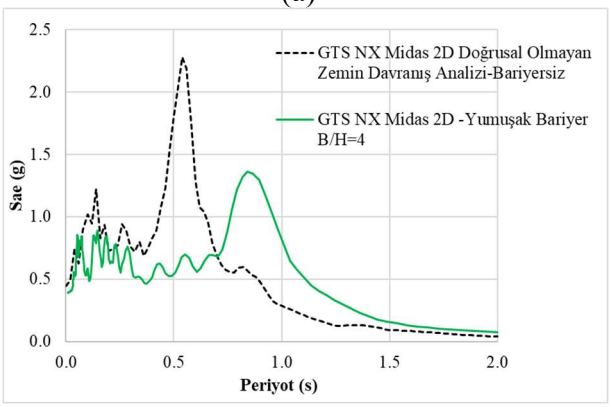
Şekil 4-14. Yumuşak bariyerli (SAP60) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği (B/H=2,4 ve 6).

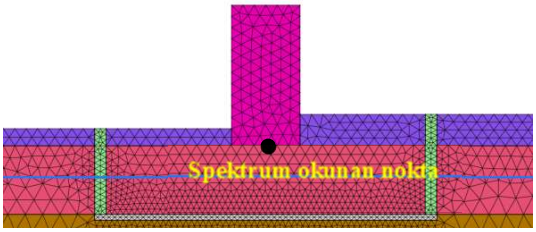
SAP60 karışımından oluşan yumuşak bariyer sisteminin analiz sonuçları (Şekil 4-14) incelendiğinde; B/H oranı sırasıyla 2, 4 ve 6 olan bariyerin pik ivme üzerinde sırasıyla %10, %23 ve %50 oranında azaltıcı etkisi olduğu görülmektedir.



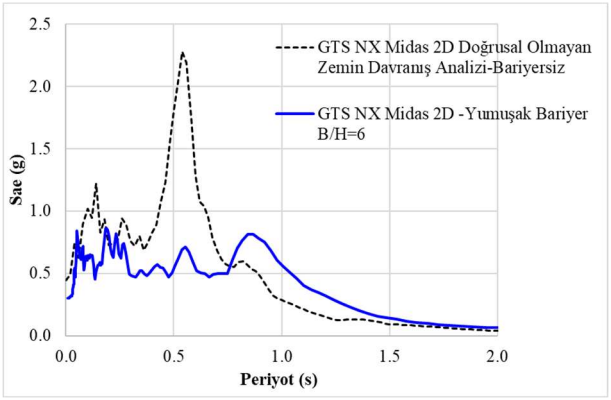


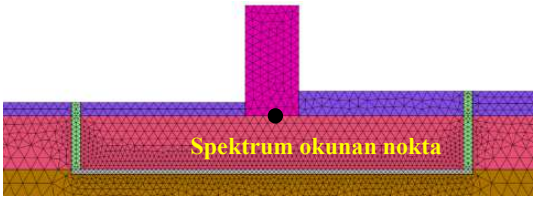
(a)





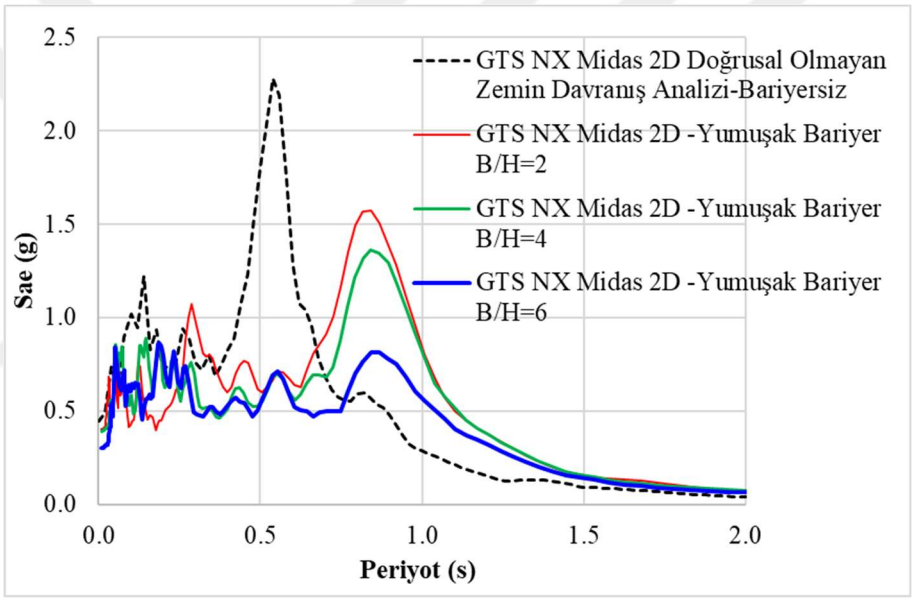
(b)





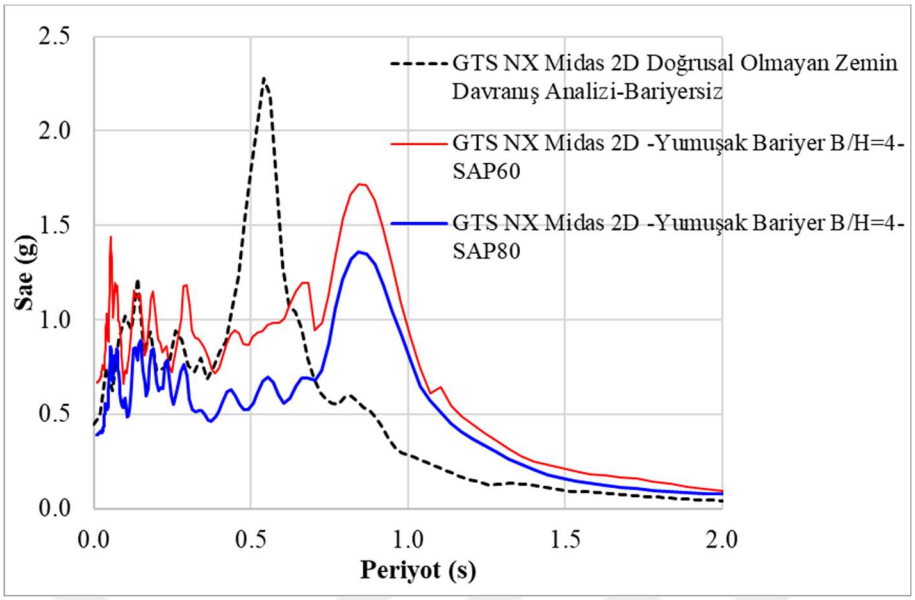
(c)

Şekil 4-15. Yumuşak bariyerli (SAP80) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği.



Şekil 4-16. Yumuşak bariyerli (SAP80) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği (B/H=2,4 ve 6).

SAP80 karışımından oluşan yumuşak bariyer sisteminin analiz sonuçları (Şekil 4-16) incelendiğinde; B/H oranı sırasıyla 2, 4 ve 6 olan bariyerin pik ivme üzerinde sırasıyla %20, %35 ve %65 oranında azaltıcı etkisi olduğu görülmektedir.

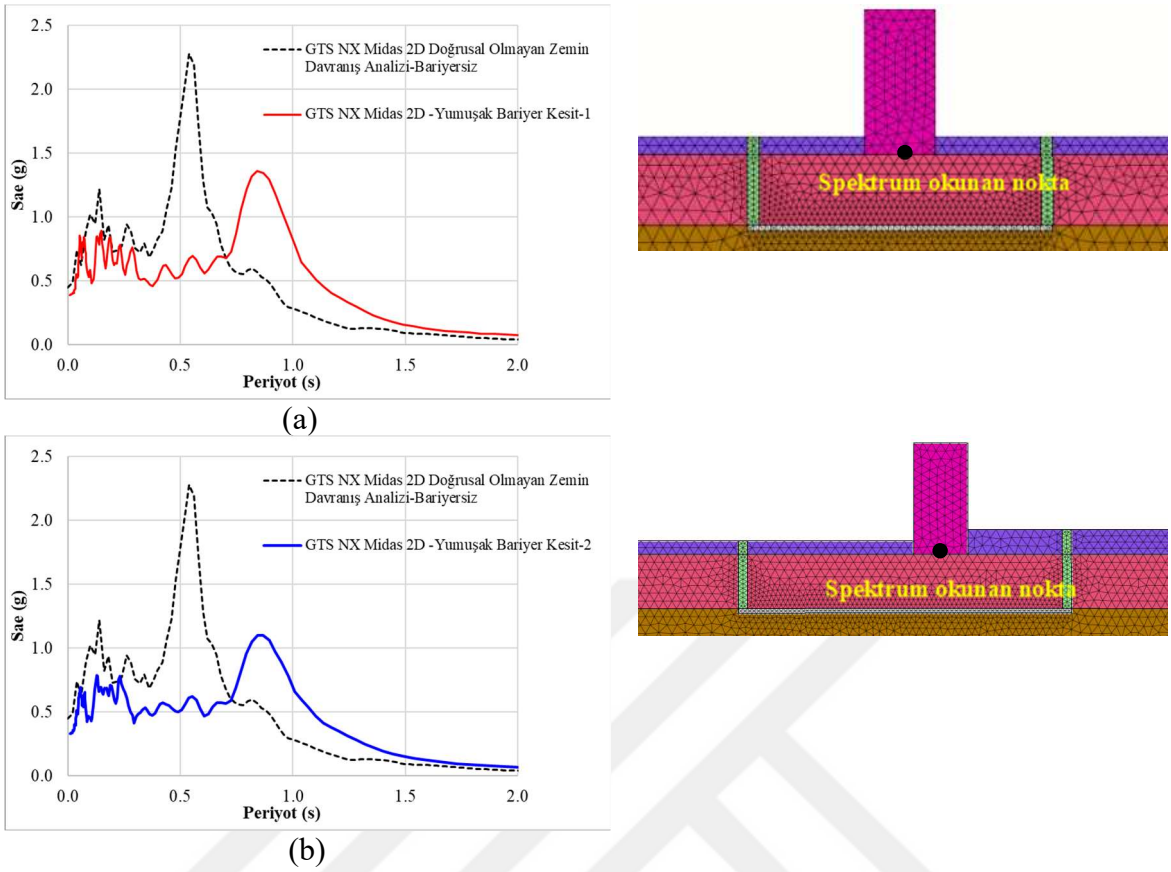


Şekil 4-17. Yumuşak bariyerli (SAP60 ve SAP80) ve bariyersiz durumda T19 Kulesi temelindeki karşılaştırılmalı spektrum-zaman grafiği (B/H=4).

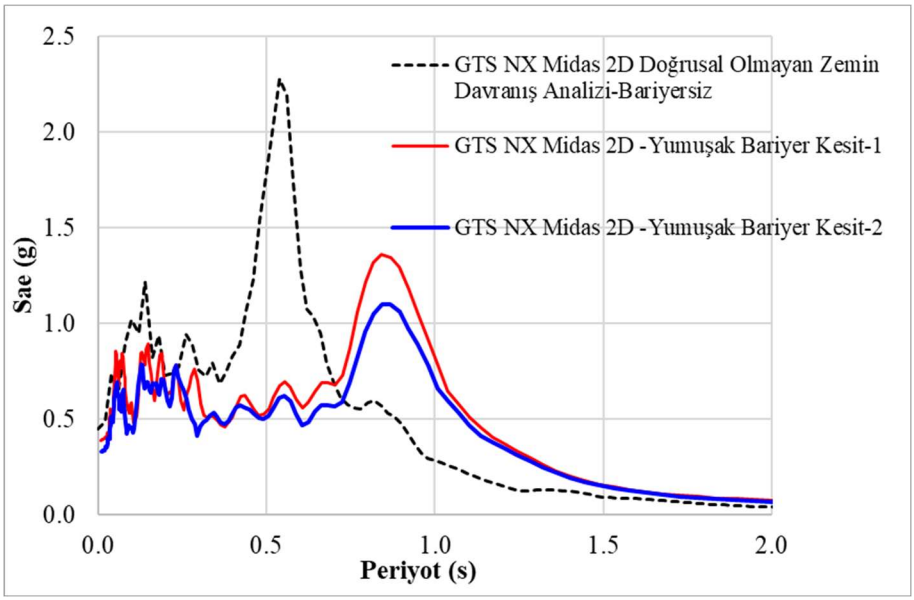
Zemine yumuşak bir tabaka yerleştirmenin ana dinamik etkisi, zeminin doğal rezonans periyodunun artmasıdır (Şekil 4-17). T19 Kule bölgesindeki zeminin ilk doğal rezonans periyodu 0.5s civarındayken, yumuşak tabaka yerleştirildiğinde 0.81-0.86s arasına kaymıştır. Bu nedenle yumuşak bariyerler, düşük dönemli binaları korumak için son derece etkili olabilirken, yüksek dönemli binalar için etkisiz hatta zararlı olabilir.

4.3. T19 KULESİNE AİT YUMUŞAK BARİYER ANALİZİ

Bu teze konu olan T19 kule bölgesinin çevre, zemin vb. koşullar incelenerek en uygun "GSI" yumuşak bariyer sistemi için iki farklı kesit analiz edilmiştir (Kesit-1 ve Kesit-2). Kesit 1 ve Kesit-2'ye ait analiz modelleri Şekil 3-48 ve Şekil 3-49'da verilmiştir. Analize ait parametre detayları da Bölüm 3.7'de detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Tüm bu bilgiler ışığında yapılan analizlerin sonuçları Şekil 4-18 ve Şekil 4-19' da verilmiştir.



Şekil 4-18. Kesit-1 ve Kesit-2 modeline (SAP80) göre T19 Kulesi temelindeki spektrum-zaman grafiği.



Şekil 4-19. Kesit-1 ve Kesit-2 modeline (SAP80) göre T19 Kulesi temelindeki karşılaştırılmalı spektrum-zaman grafiği.

T19 Kule bölgesine ait farklı doğrultu ve cephelere göre tasarım yapıldığında yumuşak bariyer sisteminin etkisi açıkça görülmektedir. Hatta asimetrik olarak nitelendirebileceğimiz Kesit-2

modeli, en-boy oranı (B/H) yaklaşık 3m olan Kesit-1 modeline göre daha etkili olmuştur (Şekil 4-19).

4.4. YUMUŞAK BARİYER SİSTEMİNİN İMALAT AŞAMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yumuşak bariyer sisteminin en önemli aşamalarından biri zemindeki imalat aşamasıdır. Bu nedenle Somma (2022) bu sistem ile ilgili dünyanın önde gelen şirketlerinden biri olan Keller Holding ile çeşitli toplantılar yapmıştır. Bu toplantıdan edinen deneyimlere göre bir dizi strateji geliştirmiştir. Dikey bariyerler, zemini kazıp içine SAP malzemesi doldurmaya dayalı olsa da aynı sistem yatay bariyerler için uygun değildir. Alt yatay yumuşak bariyerin imalat tekniği ile alakalı iki farklı uygulama senaryosu vardır. Bunlardan ilki alt yatay yumuşak bariyerin yeraltı su seviyesinin altına inşa edilmesi durumunda, toz (hidratsız) SAP malzemesi kullanmak mümkündür. Bu nedenle, derin kuru zemin karışımının gerçekleştirilmesi yoluyla toz SAP malzemesini belirli bir derinlikte zeminle karıştırmak mümkün olacaktır. Ve yeraltı su seviyesinin altında olduğundan SAP malzemesi doğal olarak hidratlanacaktır. Böyle bir teknik ile tek tip yatay SAP tabakasını, çok sayıda dikey derin zemin karıştırma yöntemi ile gerçekleştirmek mümkün olacaktır.

Yumuşak bariyer sisteminin uygulanacağı ortamda yeraltı su seviyesinin olmaması durumunda ise hidratlı SAP enjeksiyonları düşünülmüştür. Bununla birlikte Keller firması kolay imalat için alt yatay bariyerin altına ve üstüne çok ince jet-grout malzemesi yapılmasını önermiştir. Bu durum SAP malzemesinin yüksek basınçlarda daha fazla enjekte edilmesini sağlayacaktır. Keller firması; hidratlı SAP malzemesini çok yüksek basınçlarda enjekte etmenin, SAP malzemesinin dağılma olasılığı olmaksızın, hacimce çok yüksek SAP yüzdeleri (%60-70'den fazla) ile SAP-zemin bölgeleri oluşturarak zemin matrisini yok etmeyi sağlayacağını düşünmektedirler.

5. TARTIŞMA

Bu tezin amacı, yeni nesil Geoteknik İzolasyon Sistemi (GSI) olan yumuşak bariyerlerin sismik enerjiyi sönümleme etkisini değerlendirmektir.

Yumuşak bariyer sistemine ait nümerik analizler GTS NX Midas 2D programı kullanılarak yapılmıştır. Bu analizler sırasında hassasiyet analizleri alt başlığı altında nümerik analizlere direk etkisi olan bazı faktörlerin (taban kayası kalınlık, zemin tabaka sayısı, sınır koşulu ve ağ boyutu) etkisi ortaya konmuştur. Bu analizler, nümerik analiz yapacak olan araştırmacılara yol gösterici bir referans niteliği taşıyabilir.

Yumuşak bariyer sisteminde kullanılacak olan farklı oranlardaki SAP-kum karışımlarına ait deneyler ve sonuçlar anlatılmıştır. Farklı SAP-kum karışımlarının farklı derinliklerdeki etkisi bir boyutlu analizler ile parametrik olarak incelenmiştir. Daha sonra farklı yatay ve düşey bariyer sistemlerinin sismik enerjiyi sönümlemede etkisi iki boyutlu nümerik analizler ile incelenmiştir. Yumuşak bariyer sistemin B/H oranı arttırılarak, sistemin doğal titreşim periyodunun arttırılması sağlanır ve dolayısıyla sismik izolasyon etkisi dikkat çekici hale gelir.

Bu çalışmada tek bir deprem kaydının (1999 Kocaeli) etkisini dikkate alındığını belirtmekte fayda vardır. Detaylı bir değerlendirme kapsamında GSI sisteminin faydasını analiz etmek için tek bir deprem yeterli olmayabilir. Bu nedenle gelecekte bu proje hayata geçirilecek olursa TBDY (2018) şartnamesine göre T19 Kule bölgesindeki zemin koşullarına uygun 11 deprem kaydı ile analiz yapılmalıdır. Bu tezin amacı Kocaeli (1999) depremi sırasında GSI sistemi kullanılsaydı neler olacağını anlatmaktı.

Yumuşak bariyer sisteminin artıları:

- Ana hatlarıyla belirtilen tasarım algoritmasına dayanarak, sismik harekette açısından avantajlara yol açabilir,
- Düşük doğal titreşim periyoduna sahip binalar için bu tekniğin avantajları en üst düzeye çıkarılır; özellikle tarihi binalar, düşük ilk doğal titreşim periyodu ile karakterize edilir (genellikle 0,5 saniyeden az),
- Tarihi yapıların estetik bütünlüğü korunmuş olur şeklinde sıralanabilir.

- Yumuşak bariyer sisteminin eksileri:

- Yumuşak bariyer sistemini karışık bir sistemdir bu nedenle yumuşak bariyer sistemini oluşturmak için ileri teknoloji gerekmektedir,

- SAP malzemesi özellikle pahalı olmasa bile (yani toz halindeki bir kg SAP yaklaşık 150 litre su emebiliyor ve yaklaşık 50 Euro'ya mal oluyor), ancak uygulama maliyeti düşünüldüğünde (karmaşık teknolojinin gerçek ölçekte kullanılması için) maliyetlerin yüksek olması bekleniyor,

- Yumuşak bariyerin imalatı, binanın yan tarafında mevcut olamayacak geniş bir alan gerektirebilir olarak sıralanabilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında çalışan yumuşak bariyer sistemi bir giriş niteliğinde çalışılmıştır. Yurt içi ve yurt dışı araştırmalarda yeni çalışılan bir sistem olduğu için ilerleyen süreçte araştırılmaya ve geliştirilmeye açık bir konudur.

Gelecekteki araştırmacılar bu sistemi geliştirilmiş saha deneyleri ile daha geniş bir çerçevede değerlendirebilir. Özellikle yumuşak bariyerler için mevcut binaların altındaki uygulamaları hala bir sorundur ve kesinlikle araştırılmalıdır. Önerilen GSI tekniklerini diğer yapısal stratejilerle karşılaştırmak için maliyetler açısından faydaları değerlendirilebilir ve karşılaştırılabilir.

Geoteknik sismik izolasyon konusu içerisinde bulunan yumuşak bariyer sistemi henüz emekleme aşamasındadır ve gelecekteki çalışmalar ile potansiyelinin artması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Anastasiadis A, Pitilakis K, Senetakis K. "Dynamic shear modulus and damping ratio curves of sand/rubber mixtures". In: Proceedings of the earthquake geotechnical engineering satellite conference, XVIIth international conference on soil mechanics & geotechnical engineering, Alexandria, Egypt, 2009

Taylor, A.W. and Igusa, T. (Ed.) Primer on Seismic Isolation; American Society of Civil Engineers (ASCE): Reston, VA, 2004.

Lee, L. Advances in base isolation in China. In Soil-Structure Interaction; Cakmak, A. S.; Ed.; Elsevier Science Publishers: Amsterdam, Netherlands, 1987.

Tsang, H. H. 2009. Geotechnical seismic isolation. In Earthquake engineering: New research, 55‑87. New York, U.S.:Nova Science Publishers, Inc.

Tsang, H., Lo, S. H., Xu, X. & Sheikh, M. Neaz. 2012. Seismic isolation for low-to medium-rise buildings using granulated rubber-soil mixtures: Numerical study. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 41 (14), 2009-2024.

Tsang, H., Tran, D.P., Hung, W.Y., Pitilakis, K. 2020. Performance of geotechnical seismic isolation system using rubber-soil mixtures in centrifuge testing. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1271-1289.

Yegian, M.K. and Catan, M. Soil isolation for seismic protection using a smooth synthetic liner. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(11), 1131-1139.

Flora, A., Bilota, E., Lirer, S., Lombardi, D., Nappa, V., Behavior of a sand-polyacrilate mixturefor seismic isolation. Proceedings of the Sixth International Symposium On Deformation Characteristics Of Geomaterials, Buenos Aires, Argentina, 2015.

Nappa, V., Bilota, E., Flora, A., Madabhushi, SP.G., Centrifuge modelling of the seismic performance of soft buried barriers. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 14(10), 2881-2901.

Flora, A., Chiaradonna, A., Santics, L.D., Lignola, G.P., Nappa, V., Öztoprak, S., Ramaglia, G., Sargın, S., Understanding the Damages Caused by the 1999 Kocaeli Earthquake on One of the Towers of the Theodosian Walls of Constantinople. International Journal Of Architectural Heritage, 2021, 1-25.

Nappa, V., Bilota, E., Flora, A., Experimental and Numerical Investigation on the Effectiveness of Polymeric Barriers to Mitigate Vibrations. Geotechnical and Geological Engineering, 2009, 37(1).

Nappa, V., "SOFT GROUTING FOR SEISMIC ISOLATION: Numerical and Physical modelling". Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II (Italia), 2018.

4801190712-Aysegul Cetin YL tezi

ORİJİNALLİK RAPORU

%10	%8	%1	%3
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%4
2	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%2
3	docplayer.biz.tr İnternet Kaynağı	%1
4	www.gazetevatan.com İnternet Kaynağı	<%1
5	A. Flora, D. Lombardi, V. Nappa, E. Bilotta. "Numerical Analyses of the Effectiveness of Soft Barriers into the Soil for the Mitigation of Seismic Risk", Journal of Earthquake Engineering, 2016 Yayın	<%1
6	Submitted to Karadeniz Teknik University Öğrenci Ödevi	<%1
7	www.insaport.com İnternet Kaynağı	<%1