

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

YER TEPKİSİNİN ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMAN YÖNTEMİYLE
BELİRLENMESİ

Ayhan DOĞAN

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA

2021

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

YER TEPKİSİNİN ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMAN YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

Ayhan DOĞAN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ünal DİKMEN

Deprem gibi kuvvetli yer hareketleri sonucu oluşacak yer dinamik davranışının belirlenmesi, mühendislik yapıları ve insan yaşamı için oldukça önemli fakat karmaşık bir işlemdir. Birçok çalışmada bilgisayar kapasitesinin yetersiz olması ve çözüm süresinin uzunluğu, model üretmedeki güçlükler ve kullanılan yazılımlardaki zorluklar gibi nedenlerle 1-boyutlu (1-B) veya 2-boyutlu (2-B) analiz yapılmakta 3-boyut (3-B) etkisi ihmal edilmektedir. Topoğrafik farklılıkların fazla olduğu bölgeler, derin havzalar, 3-B heterojen ve anizotrop ortamlar ile alüvyon gibi pekişmemiş birimlerde 3-B etkisi ihmal edilemeyecek düzeydedir. Bu çalışmada yer tepkisinin belirlenmesi amacıyla 3-B sonlu eleman modeli oluşturabilen ve Rayleigh sönüm yaklaşımı kullanarak dinamik analiz yapabilen bir yazılım (SiteEffect3D) Matlab programlama diliyle geliştirilmiş ve 3-B etkisi araştırılmıştır. SiteEffect3D yazılımı ile Quad4M programı kullanılarak farklı sentetik modellerle dinamik analizler karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 2-B ve 3-B dinamik analiz sonuçları incelenmiş ve 3-B dinamik analiz yapılmasının önemli olduğu durumlar ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada Marmara bölgesinde seçilen çalışma alanı için literatürdeki yayınlardan ve raporlardan elde edilen veriler ile sayısal yükseklik modeli verileri birlikte kullanılarak yeni 3-B sonlu eleman modeli üretilmiştir. Bu model üzerinde 17 Ağustos 1999 Marmara depremi ivme kayıtları kullanılarak SiteEffect3D programı test edilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan ivmeler ile bunlardan elde edilen spektral verilerle yapılan değerlendirmeler sonucunda SiteEffect3D programının başarılı sonuçlar ürettiği görülmüştür. SiteEffect3D programı 3-B sonlu eleman modeli oluşturma, giriş ivmesinin istenilen şekilde verilebilmesi, laboratuvar deney sonuçları gerektirmemesi gibi özellikleriyle çalışmalarda araştırma zamanını azaltmakta, araştırma kapasitesini ve çeşitliliğini artırmaktadır. Literatüre kazandırılan 3-boyutlu arazi modeli ve SiteEffect3D programıyla bundan sonra yapılacak çalışmalara da zemin hazırlanmıştır.

Kasım 2021, 140 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Üç boyutlu sonlu eleman, yer tepkisi, sönüm, dinamik analiz, SiteEffect3D

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DETERMINATION OF THE SITE EFFECT BY 3D FINITE ELEMENT METHOD

Ayhan DOĞAN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geophysical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ünal DİKMEN

Determining the ground dynamic behavior that will occur as a result of strong ground movements such as earthquakes is a very important but complex process for engineering structures and human life. In many studies, 1-dimensional (1-D) or 2-dimensional (2-D) dynamic analysis is performed due to insufficient computer capacity, long solution time, difficulties in producing models and difficulties in the software used. 3-D dynamic analysis should be performed in regions with high topographical differences, deep basins, unconsolidated units such as alluvium, 3-D heterogeneous and anisotropic environments. In this study, a software (SiteEffect3D) was developed to create a 3-D finite element model and perform dynamic analysis using the Rayleigh damping approach with the Matlab programming language in order to determine the site effect and the 3-D effect. Dynamic analyzes were performed comparatively with different synthetic models using SiteEffect3D software and Quad4M. In the study, the results of 2-D and 3-D dynamic analysis were examined and the importance of 3-D dynamic analysis were revealed.

Marmara region was selected as the study area. A new 3-D finite element model was produced by using the data obtained from the literature and reports together with the digital elevation model data. SiteEffect3D program was tested on this model by using the 17 August 1999 Marmara earthquake acceleration records. When the measured and calculated accelerations and spectral data were compared as a result of the evaluations, it was seen that the SiteEffect3D program produced successful results. SiteEffect3D program reduces research time in studies, increases research capacity and diversity with its features such as creating a 3-D finite element model, providing the input acceleration as desired and not requiring laboratory test results. With this study, 3-D terrain model and SiteEffect3D software was developed for future studies.

November 2021, 140 Pages

Key Words: Three-dimensional finite element, site effect, damping, dynamic analysis, SiteEffect3D

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmam sırasında katkı ve eleştirileriyle beni yönlendiren, tecrübesi ile akademik olarak gelişimime katkıda bulunan danışman hocam sayın Prof. Dr. Ünal DiKMEN'e (Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü) yardımları ve önerileri için teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitemde yer alan ve bilgi ve önerilerinden faydalandığım sayın Prof. Dr. Bahadır AKTUĞ (Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü) ve sayın Prof. Dr. Berna UNUTMAZ'a (Hacettepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü) katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca zemin parametrelerinden bir kısmını belirlemek için kullandığım TÜBİTAK raporuna ulaşabilmem konusunda yardımları için Araş. Gör. Dr. İsmail DEMİRCİ'ye (Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü) ve diğer bölüm çalışanlarına destekleri için teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım boyunca bana destek olan değerli eşime ve çocuklarıma teşekkür ederim. Beni yetiştiren ve üzerimde emeği olan başta anne ve babam olmak üzere tüm aileme ve hocalarıma teşekkür ederim.

Ayhan DOĞAN

Ankara, Kasım 2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. YER DİNAMİK DAVRANIŞI	6
2.1 Modelleme	7
2.2 Sonlu Eleman Yöntemi.....	8
2.2.1 Sonlu eleman yöntemiyle problem çözüm algoritması.....	11
2.2.2 Ağ (mesh) tasarımı.....	12
2.3 Yer Değiştirme Fonksiyonları	13
2.4 Şekil Fonksiyonları	14
2.5 Hareket Denkleminin Sonlu Eleman Yapısı	16
2.6 Genel Dizey Denkleminin Oluşturulması	18
2.7 Sınır Koşullarının Uygulanması.....	21
2.8 Sönüm Teriminin Hesaplanması.....	21
2.9 Genel Dizey Denkleminin Dinamik Çözümü	23
2.10 Makaslama Modül Oranı (G/Gmax) ve Sönüm Oranının (D) Dinamik Analizde Sönüme Yansıtılması	25
3. ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMAN YÖNTEMİNDE ELEMAN BOYUTU VE SAYISININ DİNAMİK ANALİZ SONUCUNA ETKİSİ	27
4. YÜZEY TOPOĞRAFYASININ ZEMİN BÜYÜTMESİNE ETKİSİ	36
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	69
5.1 Uygulamalar	69
5.1.1 Model 1	70
5.1.2 Model 2	74

5.1.3 Model 3	78
5.1.4 Model 4	81
5.1.5 Model 5	85
5.1.6 Model 6 – Gerçek Arazi Modeli	88
5.2 Uygulamaların Sonuçları	113
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	115
KAYNAKLAR	120
EKLER.....	127
EK 1 OpenSees Programında 2-B Basit Bir Model Oluşturmak İçin	
Gerekli Örnek Komutlar	127
EK 2 SiteEffect3D Bilgisayar Yazılımı Grafik Arayüzü	128
ÖZGEÇMİŞ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

a_i, b_i, c_i, d_i	Şekil Fonksiyonu Katsayıları
B	Kinematik Dizey
C	Sönüm Dizeyi
c	Sönüm Katsayısı
cm	Santimetre
D	Poisson Oranı ve Elastisite (E) Değerine Bağlı Dizey
E	Elastisite
F(t)	Zamana Bağlı Dış Kuvvet
F_{mod}	Etkin Kuvvet Dizeyi
g	Yer Çekim İvmesi
G_{max}	Maksimum Makaslama Modülü
K	Eleman Sıkılık Dizeyi
k	Yay Sabiti
kg	Kilogram
km	Kilometre
K_{mod}	Etkin Sıkılık Dizeyi
m	Kütle
M	Eleman Kütle Dizeyi
M_w	Moment Magnitud Ölçeği (Moment Magnitude Scale)
N	Şekil Fonksiyonu
s	Saniye
t	Zaman
u	X Yönündeki Yer Değiştirme
U	Yer Değiştirme Fonksiyonu
Ü	Hız
Û	İvme
V	Elemanın Hacmi

v	Y Yönündeki Yer Değişirme
V_p	P dalgası hızı
V_s	S dalgası hızı
w	Z Yönündeki Yer Değişirme
w_i	Açısal Frekans
α, β	Rayleigh Sönüm Katsayıları
Δt	Zaman aralığı
ϵ	Deformasyon
ν	Poisson Oranı
ξ	Sönüm Oranı
ρ (Rho)	Yoğunluk
σ	Gerilme

Kısaltmalar

1-B	Bir Boyutlu
2-B	İki Boyutlu
3-B	Üç Boyutlu
DOS	Disk İşletim Sistemi (Disk Operating System)
GTOPO30	30 Ark-Saniye Örnekleme Aralıklı Küresel Sayısal Yükseklik Modeli (Global Topography In 30 Sec)
LU	LU Ayrışımı (LU Decomposition)
MAT	Matlab Programı İkili Veri Dosyası Türü
PGA	Maksimum Yer İvmesi (Peak Ground Acceleration)
QR	QR Ayrışımı (QR Decomposition)
SVD	Tekil Değer Ayrışımı (Singular Value Decomposition)
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli (Digital Elevation Model)
USGS	Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırma Kurumu (United States Geological Survey)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Kelvin-Voigt Modeli.....	6
Şekil 2.2 Tetrahedral	9
Şekil 2.3 Tetrahedral elemanda düğüm numaralandırması.....	9
Şekil 2.4 a) Tetrahedral elemanlara bölünmüş yarım küre b) Tetrahedral elemanlara bölünmüş küp	10
Şekil 2.5 a) Voronoi Diyagramı b) Delaunay Üçgenlemesi	12
Şekil 2.6 Çevrel Çember	13
Şekil 2.7 3-B (tetrahedral) eleman	15
Şekil 2.8 48 Tetrahedral ve 27 düğüm noktasından oluşan 3-B sonlu eleman ağı.....	19
Şekil 2.9 Sönüm oranının doğal titreşim frekansı ile değişimi	23
Şekil 2.10 Killi ve kumlu zeminlerdeki kayma deformasyonu, makaslama modül oranı (G/Gmax) ve sönüm oranı değerleri	25
Şekil 2.11 SiteEffect3D programının işlem akış şeması.....	26
Şekil 3.1 Eleman sayısına göre bağlı hatadaki değişim	30
Şekil 3.2 Model 1, toplam eleman sayısı 1050	31
Şekil 3.3 Model 2, toplam eleman sayısı 2100	32
Şekil 3.4 Model 3, toplam eleman sayısı 4200	32
Şekil 3.5 Model 4, toplam eleman sayısı 8400	33
Şekil 3.6 Model 5, toplam eleman sayısı 16800	33
Şekil 3.7 Model 4 ve Model 5 için karşılıklı bağlı hataların hesaplandığı aynı koordinatlara karşılık gelen yüzeydeki düğüm numaraları (sarı)	34
Şekil 3.8 Model 3 ve Model 5 için karşılıklı bağlı hataların hesaplandığı aynı koordinatlara karşılık gelen yüzeydeki düğüm numaraları (sarı)	34
Şekil 3.9 Model 2 ve Model 5 için karşılıklı bağlı hataların hesaplandığı aynı koordinatlara karşılık gelen yüzeydeki düğüm numaraları (sarı)	35

Şekil 3.10 Model 1 ve Model 5 için karşılıklı bağıl hataların hesaplandığı aynı koordinatlara karşılık gelen yüzeydeki düğüm numaraları (sarı)	35
Şekil 4.1 Yüzey topoğrafyası farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri	38
Şekil 4.2 Yüzey topoğrafyası farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen X eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.1g)	39
Şekil 4.3 Yüzey topoğrafyası farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Y eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.1g)	40
Şekil 4.4 Yüzey topoğrafyası farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Z eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.1g)	41
Şekil 4.5 Yüzey topoğrafyası farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen X eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.51g)	42
Şekil 4.6 Yüzey topoğrafyası farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Y eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.51g)	43
Şekil 4.7 Yüzey topoğrafyası farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Z eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.51g)	44
Şekil 4.8 Yüzey topoğrafyası görece daha geniş alana sahip 3-B sonlu eleman modelleri	45
Şekil 4.9 Yüzey topoğrafyası görece daha geniş alana sahip ve farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen X eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.1g).....	46
Şekil 4.10 Yüzey topoğrafyası görece daha geniş alana sahip ve farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Y eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.1g).....	47

Şekil 4.11 Yüzey topoğrafyası görece daha geniş alana sahip ve farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Z eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.1g).....	48
Şekil 4.12 Giriş ivmesi olarak kullanılan 17 Ağustos 1999 tarihli 4106 Kocaeli Gebze istasyon kaydı (ölçekli).....	49
Şekil 4.13 Yüzey topoğrafyası görece daha geniş alana sahip ve farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen X eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 17 Ağustos 1999 tarihli ölçekli 4106 Kocaeli Gebze istasyon kaydı)	50
Şekil 4.14 Yüzey topoğrafyası görece daha geniş alana sahip ve farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Y eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 17 Ağustos 1999 tarihli ölçekli 4106 Kocaeli Gebze istasyon kaydı)	51
Şekil 4.15 Yüzey topoğrafyası görece daha geniş alana sahip ve farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Z eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 17 Ağustos 1999 tarihli ölçekli 4106 Kocaeli Gebze istasyon kaydı)	52
Şekil 4.16 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek araziye uygun 3-B sonlu eleman modelleri	54
Şekil 4.17 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen X bileşenine ait PGA grafikleri.....	55
Şekil 4.18 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen Y bileşenine ait PGA grafikleri.....	56
Şekil 4.19 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen Z bileşenine ait PGA grafikleri.....	57

Şekil 4.20 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 169-176 arasındaki düğüm noktalarının X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri	58
Şekil 4.21 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 177-184 arasındaki düğüm noktalarının X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri	59
Şekil 4.22 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 185-189 arasındaki düğüm noktalarının X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri	60
Şekil 4.23 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 169-176 arasındaki düğüm noktalarının Y bileşenine ait ivme-zaman grafikleri	61
Şekil 4.24 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 177-184 arasındaki düğüm noktalarının Y bileşenine ait ivme-zaman grafikleri	62
Şekil 4.25 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 185-189 arasındaki düğüm noktalarının Y bileşenine ait ivme-zaman grafikleri	63
Şekil 4.26 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 169-176 arasındaki düğüm noktalarının Z bileşenine ait ivme-zaman grafikleri	64
Şekil 4.27 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 177-184 arasındaki düğüm noktalarının Z bileşenine ait ivme-zaman grafikleri	65

Şekil 4.28 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 185-189 arasındaki düğüm noktalarının Z bileşenine ait ivme-zaman grafikleri.....	66
Şekil 4.29 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen ve Z yönünde yüzeyden tabana doğru elemanların (6658, 7034, 6502, 7687, 7560, 8298, 8290) YZ bileşenine ait kesme gerilme-zaman grafikleri	67
Şekil 5.1 SiteEffect3D için 3-B sonlu eleman modeli (Model1.1)	71
Şekil 5.2 Quad4M için 2-B sonlu eleman modeli (Model1.2).....	72
Şekil 5.3 Model1.1 ve Model1.2 ‘ye ait Q4M ve S3D programlarıyla yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri	73
Şekil 5.4 Model1.1 ve Model1.2 ‘ye ait Q4M ve S3D programlarıyla yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen XZ bileşenine ait gerilme-zaman grafikleri.....	73
Şekil 5.5 SiteEffect3D için 3-B sonlu eleman modeli (Model2.1)	74
Şekil 5.6 3-B sonlu eleman modeli üzerinde seçilen düğüm noktaları (sarı renkli) ve elemanlar (kırmızı renkli)	75
Şekil 5.7 Quad4M için 2-B sonlu eleman modeli (Model2.2).....	76
Şekil 5.8 Model2.1 ve Model2.2‘ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri.....	77
Şekil 5.9 Model2.1 ve Model2.2‘ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen XZ bileşenine ait gerilme-zaman grafikleri.....	77
Şekil 5.10 SiteEffect3D için 3-B sonlu eleman modeli (Model3.1)	78
Şekil 5.11 Quad4M için 2-B sonlu eleman modeli (Model3.2).....	79
Şekil 5.12 Model3.1 ve Model3.2 ‘ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri	80

Şekil 5.13 Model3.1 ve Model3.2 ‘ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen XZ bileşenine ait gerilme-zaman grafikleri.....	80
Şekil 5.14 SiteEffect3D için 3-B sonlu eleman modeli (Model4.1)	82
Şekil 5.15 Quad4M için 2-B sonlu eleman modeli (Model4.2).....	83
Şekil 5.16 Model4.1 ve Model4.2 ‘ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri	84
Şekil 5.17 Model4.1 ve Model4.2 ‘ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen XZ bileşenine ait gerilme-zaman grafikleri.....	84
Şekil 5.18 SiteEffect3D için 3-B sonlu eleman modeli (Model5.1)	85
Şekil 5.19 Quad4M için 2-B sonlu eleman modeli (Model5.2).....	86
Şekil 5.20 Model5.1 ve Model5.2 ‘ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri	87
Şekil 5.21 Model5.1 ve Model5.2 ‘ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen XZ bileşenine ait gerilme-zaman grafikleri.....	87
Şekil 5.22 Gerçek arazi modeli için seçilen çalışma alanını gösteren harita	88
Şekil 5.23 Çalışma alanına ait yükseklikler ve uzunluklar	88
Şekil 5.24 Çalışma alanı köşe koordinatları ve yerleşim yerleri.....	89
Şekil 5.25 Çalışma alanı (mavi çerçeve) içerisindeki faylar.....	89
Şekil 5.26 Türkiye Deprem Tehlike Haritası üzerinde çalışma alanının (mavi çerçeve) konumu	90
Şekil 5.27 Ölçü almak için kullanılan profiller, ölçü noktaları (mavi), farklı şekillerde ve dizi şeklinde yerleştirilmiş sismik istasyon ağları (mavi çerçeveler), çalışma alanı köşeleri (sarı) ve deprem kayıt istasyonları (kırmızı)	92
Şekil 5.28 Global Mapper programında çalışma alanının belirlenmesi.....	94
Şekil 5.29 SYM verisinden çalışma alanı koordinatlarına uygun veri üretme 1.aşaması	94

Şekil 5.30 SYM verisinden 10km X ve Y aralıklı kontur verisi üretme 2.aşaması	95
Şekil 5.31 10 km aralıklı gridlenmiş arazi yüksekliklerini gösteren kontur harita.....	95
Şekil 5.32 3-B sonlu eleman yöntemiyle oluşturulmuş gerçek arazi modeli.....	97
Şekil 5.33 4101-Kocaeli Merkez istasyonu ölçülen ve hesaplanan ivme- zaman ve ivme-frekans grafiği.....	98
Şekil 5.34 4106-Kocaeli Gebze istasyonu ölçülen ve hesaplanan ivme- zaman ve ivme-frekans grafiği.....	98
Şekil 5.35 1404-Bolu Göynük istasyonu ölçülen ve hesaplanan ivme-zaman ve ivme-frekans grafiği	99
Şekil 5.36 8101-Düzce Merkez istasyonu ölçülen ve hesaplanan ivme- zaman ve ivme-frekans grafiği.....	99
Şekil 5.37 1612-Bursa İznik istasyonu ölçülen ve hesaplanan ivme-zaman ve ivme-frekans grafiği	100
Şekil 5.38 Kocaeli Merkez (4101) istasyonunun bulunduğu zemine ait spektral ivme-periyot grafiği.....	100
Şekil 5.39 Kocaeli Gebze (4106) istasyonunun bulunduğu zemine ait spektral ivme-periyot grafiği.....	101
Şekil 5.40 Bolu Göynük (1404) istasyonunun bulunduğu zemine ait spektral ivme-periyot grafiği.....	101
Şekil 5.41 Bursa İznik (1612) istasyonunun bulunduğu zemine ait spektral ivme-periyot grafiği	102
Şekil 5.42 Düzce Merkez (8101) istasyonunun bulunduğu zemine ait spektral ivme-periyot grafiği.....	102
Şekil 5.43 Periyodu 0.2s olan X bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita	103
Şekil 5.44 Periyodu 0.2s olan Y bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita	103
Şekil 5.45 Periyodu 0.2s olan Z bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita	104

Şekil 5.46 Periyodu 0.5s olan X bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita	104
Şekil 5.47 Periyodu 0.5s olan Y bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita	105
Şekil 5.48 Periyodu 0.5s olan Z bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita	105
Şekil 5.49 Periyodu 1.0s olan X bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita	106
Şekil 5.50 Periyodu 1.0s olan Y bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita	106
Şekil 5.51 Periyodu 1.0s olan Z bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita	107
Şekil 5.52 Periyodu 1.5s olan X bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita	107
Şekil 5.53 Periyodu 1.5s olan Y bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita	108
Şekil 5.54 Periyodu 1.5s olan Z bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita	108
Şekil 5.55 Dinamik analiz sonuçlarının gösterildiği örnek düğüm noktaları (sarı) ve elemanlar (kırmızı)	109
Şekil 5.56 Seçilen örnek düğüm noktaları için çıkış ivme-zaman grafikleri	110
Şekil 5.57 Seçilen örnek elemanlar için gerilme-zaman grafikleri	110
Şekil 5.58 İvme-zaman, hız-zaman ve yer değiştirme-zaman sonuçlarını grafiklemek için modelin üst kısmında seçilen örnek düğüm noktaları	111
Şekil 5.59 Modelin üst kısmında bulunan 177 ile 184 arasındaki düğüm noktalarında ivme-zaman grafikleri	111
Şekil 5.60 Modelin üst kısmında bulunan 177 ile 184 arasındaki düğüm noktalarında hız-zaman grafikleri	112
Şekil 5.61 Modelin üst kısmında bulunan 177 ile 184 arasındaki düğüm noktalarında yer değiştirme-zaman grafikleri	112

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 3-B sonlu eleman modellerinin özellikleri ve dinamik analizden elde edilen PGA değerlerinin yüzde bağıl hata sonuçları	29
Çizelge 5.1 Model 4.1'e ait tabaka kalınlıkları ve zemin parametreleri	81
Çizelge 5.2 Model 4.2'ye ait tabaka kalınlıkları ve zemin parametreleri	82
Çizelge 5.3 Gerçek arazi modeli hazırlanırken kullanılan akademik kaynaklar	91
Çizelge 5.4 3-B sonlu eleman modeli için hazırlanan verilerden örnekler	96



1. GİRİŞ

Deprem tüm dünyada doğal afetlerin başında gelmektedir. Aslında depremin doğrudan verdiği zarardan çok daha fazlası, insan hataları nedeniyle oluşmaktadır. Bunların başında inşaat yapılacak zeminin özelliklerinin iyi araştırılmaması ve zemine uygun yapı tasarımının doğru yapılmaması gelir. Zira bazı zeminler gelen deprem dalgalarının genliklerini çok fazla büyütebilmektedir. Bu büyütme neticesinde kaynaktan yapının zeminine ve yapıya gelen deprem ivmesi katlanarak büyümekte ve çok büyük hasarlara ve can kayıplarına neden olabilmektedir. Örneğin; Kaptan ve Tezcan, yapmış oldukları çalışmada tabandaki maksimum ivmenin değerinin 0.05g olduğunu ancak yüzeyde bu değer 6.6 kat büyütülerek 0.33g değerine çıktığını söylemektedir (Kaptan ve Tezcan 2012). Zemin tabakalarının birbirine göre sismik dalga hızları, sönüm oranı, yoğunluk, tabaka kalınlığı, sertlik ve çeşitli fiziksel özelliklerindeki farklılıklar ile geometriden kaynaklanan sismik dalgaların odaklanması veya saçılması gibi nedenler zemin büyütmesine neden olabilirler. Genellikle yumuşak zeminlerin gelen deprem dalgasının genliğini büyüttüğü ve yüzeyde oluşan hasarda büyük rol oynadığı bilinmektedir (Gutenberg ve Richter 1956, Niazi ve Mortgat 1992). Zemin büyütmesine verilebilecek birçok örnek olmakla birlikte, 1985 Mexico City (M_w 8.0) ve 1989 Loma Prieta (M_w 6.9) depremleri en bilinen örneklerdendir (Campillo vd. 1989, Plafkers ve Galloway 1989, Seed ve Sun 1989). Dalga genliğinin büyütülmesindeki temel neden, farklı jeolojik ortamlardaki tanelerin hareketlerine ortamın gösterdiği direncin farklı olmasıdır, oluşan bu dirence empedans, farka da empedans farkı denir (Kramer 1996, Pratt vd. 2003). Empedans farkı dışında dalga genliğinin büyümesinde rol oynayan önemli faktörlerden bazıları da tabaka ve zemin geometrisi ile ortamın fiziksel özelliklerinin farklı yönlerdeki değişimi (anizotropi)'dir (Newmark 1965, Bruno vd. 1999, Pratt vd. 2003, Kishida vd. 2018). Aki ve Richards, yanal yönlü uzanımlarda zemin tabaka kenarlarında yüzey dalgalarının oluştuğunu ve bunun rezonans etkisi oluşturarak genliğin artmasına neden olduğunu söylemişlerdir (Aki ve Richards 2009). Genliğin artması depremin olumsuz etkisini artırmakta, yer değiştirme ve deformasyonların büyümesine neden olmaktadır.

Zemin dinamik davranışı karmaşık bir problemdir ve tümüyle tanımlanması günümüz bilgi düzeyi için oldukça zordur. Gerekli hesaplamaların yapılabilmesi için sürekli

ortamda sismik dalganın yayılımının incelenmesi gereklidir. Zemin dinamik davranışı çözüme daha hızlı ulaşılabilmesi, daha az bilgisayar kaynağı gerektirmesi, model üretme kolaylığı gibi nedenlerle çoğunlukla 1-B veya 2-B olarak yapılmaktadır. Ancak gerçekte zemin dinamik davranışı üç boyutludur. Dinamik analizlerin 3-B yapılmamasının nedenlerinden birisi de 3-B dinamik analiz programlarında karşılaşılan bazı zorluklardır.

Deprem gibi kuvvetli yer hareketleri sonucu oluşacak yer dinamik davranışını temsil eden büyüklüklerin hesaplanması, mühendislik yapılarının depreme dayanıklı tasarımı için çok önemlidir. Yer dinamik davranışının 3-B tepkisi hareket denklemi (equation of motion) ile tanımlanır (Jacobsen ve Ayre 1958, Newmark ve Rosenblueth 1971, Johnson ve Hurty 1972). Bu denklem kuadratik diferansiyel denklemdir. Bu denklemin çözümü 1-B (Schnabel vd. 1972) ve 2-B (Hudson vd. 1994, Dikmen 2004) hız modelleri için çözülmektedir. Bu denklemin 3-B çözümü konusu havza modellemesi için yer değiştirme ve deformasyon hesaplanarak yorumlanmıştır (Uebayashi vd. 1992, Shinozaki 1996, Shinozaki ve Yoshida 1996). Ancak bu denklemin 3-B hız modeli için hesaplanarak çözümünden, zamana bağlı yer değiştirme ile yer değiştirme ve türevlerinde deformasyonun 3-B dağılımı, eksenel ve makaslama gerilmeleri ve zamana bağlı hız ve ivmenin değişimleri hesaplanmamıştır. Bu değişkenlerin 3-B ortamdaki davranışı sismik dalgaların yayılımı ve dalga enerjisinin soğurulmasına bağlıdır. Hesaplanan bu değişkenler araştırılan alana ilişkin yapılaşmada hesaplamalara doğrudan/dolaylı giren parametrelerdir.

Sismik dalga enerjisinin soğurulması sönüm olarak bilinmektedir. Sönümün hesaplanmasında çok farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları; deneysel yaklaşımlar, Rayleigh ve Coughy sönüm yaklaşımları, mekanik model ve karmaşık model, kesirsel mertebeli türev yaklaşımı olarak sayılabilir (Hall ve Richart 1963, Idriss ve Seed 1968, Seed ve Idriss 1969, Hardin ve Drnevich 1972, Ross 1975, Sherif ve Ishibashi 1976, Mavko ve Nur 1979, Moroto 1980, Menke vd. 1985, Seed vd. 1986, Chopra 1995, Dikmen 2004).

Bu tez kapsamında hareket denklemini, sonlu eleman sayısal çözüm tekniği ile üç boyutta çözen bir algoritma geliştirmiştir. Bu algoritma ile birincil değişken olarak yer değiştirme

ve ikincil değişkenler (deformasyon, eksenel ve makaslama gerilmeleri, hız ve ivmenin zamana bağlı değişimi) hesaplanmıştır. Bu tez çalışmasında geliştirilen yazılımın test edilmesi; geçmişte Marmara bölgesinde yapılmış olan jeoteknik raporlar ve çeşitli bilimsel çalışmalardan elde edilen verilerden oluşturulan yer modeli ve 17 Ağustos 1999 Marmara depremi sürecinde bölgede ölçülen ivme kayıtları kullanılarak, geliştirilen yazılımın üstün ve zayıf yanları ortaya konulmuştur.

Yer tepkisinin belirlenmesi amacıyla geliştirilen bilimsel amaçlı yazılımların çoğu 1-B, birkaçı ise 2-B analiz yapabilmektedir (DeepSoil (Hashash ve Park 2001, Phillips ve Hashash 2009), SHAKE (Schnabel vd. 1972), ProShake (Anonymous 2017), Quad4M (Hudson vd. 1994), Dyn2D (Dikmen 2004)). 3-B analiz yapabilen açık kaynaklı OpenSees (Mazzoni vd. 2020) gibi bir kaç yazılım bulunsa da bu yazılımları kullanabilmek için ciddi bir çaba ve deneyim gerekmektedir. OpenSees programının resmi web sitesi incelendiğinde (Mazzoni vd. 2020) programı çalıştırmanın en iyi yolu olarak DOS terminal ekranı tavsiye edilmekte, dinamik analiz yapabilmek için gerekli olan işlemlerin ise komut satırına yazılacak komutlarla yapılabildiği görülmektedir. Bu işlemleri yapabilmek için bu komutları ve kullanımlarını öğrenmek ve deneyim kazanmak gerekmektedir. Örneğin; OpenSees programında sadece 2-B basit bir model oluşturmak için bile önce model oluşturucuyu kullanmak, sonrasında her bir düğümün koordinatlarını, sınır koşullarını, düğümlerdeki kütle değerlerini, elemanları ve elemanlarla ilgili parametreleri ve gerekli diğer tüm işlemlerin her birini ayrı ayrı komut satırları olarak girmek veya bu komut satırlarının girildiği dosyaların oluşturulması gerekmektedir (Ek 1).

Literatürdeki birçok 3-B dinamik analiz programında giriş ivmesi sadece belirli bir yöntemle analize dahil edilebilmekte, yöntem seçimi tüm programlarda mümkün olamamaktadır. Bu programlarda giriş ivmesi ya tüm düğüm noktalarına uygulanmakta veya sadece bir yüzeydeki düğümlere uygulanabilmektedir. Bu kısıtlamalar farklı bilimsel değerlendirmeleri zorlaştırmaktadır. Birçok dinamik analiz programında sadece bir sönüm yöntemi kullanılabilen, bazıları ise birkaç sönüm yöntemi içerisinden seçim yapmaya olanak sağlamaktadır. Yeni sönüm yöntemlerinin programlara dahil

edilebilmesi bazı programlarda çok fazla çaba gerektirmekte, bazı programlarda ise asıl geliştirici dışında yapılamamaktadır.

Bilimsel amaçlı geliştirilmiş dinamik analiz programları dışında, 3-B analiz yapabilen ticari amaçlı yazılımlar da bulunmaktadır (Flac3D (Anonymous 2021a), Plaxis 3D (Anonymous 2021b), Abaqus (Anonymous 2021c), Diana (Anonymous 2021d), GeoSlope Sigma/W (Anonymous 2021e), Lusas (Anonymous 2021f) vb.). Bu ticari yazılımların oldukça pahalı olmaları, kullandıkları matematiksel modeller, yöntemler, metotlar ve özelliklerin genellikle üretici firma dışında değiştirilememesi özellikle yer tepkisini incelerken farklı yöntemler uygulamak isteyen araştırmacılar açısından bazı zorluklar getirmektedir. Bu ticari programların büyük çoğunluğunun öncelikli olarak yapı ve yapı-zemin etkileşimini incelemek için üretildiği düşünüldüğünde özellikle sadece yer tepkisinin dinamik analizini incelemek isteyen araştırmacılar için bu durum aslında normal kabul edilebilir. Farklı ticari programlar sayısal çözüm yöntemi olarak farklı yaklaşımları tercih edebilmektedir. Örneğin; Flac3D yazılımı ayrıklaştırma yöntemi olarak açık sonlu hacim yöntemini (Anonymous 2021g), Plaxis 3D (Anonymous 2021b), Abaqus (Anonymous 2021c), Diana (Anonymous 2021d), GeoSlope Sigma/W (Anonymous 2021e) ve Lusas (Anonymous 2021f) yazılımları ise sonlu eleman yöntemini kullanmaktadır. Bu ticari yazılımlar genellikle birçok farklı mühendislik alanında değişik amaçlarda kullanılmak için üretildiklerinden, yer tepkisinin dinamik analizi için gerekli olmayan çok fazla özellik de bu programlarda bulunmaktadır. Bu durum programların kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Bu ve benzeri sebepler nedeniyle sözü edilen ticari programların özellikle yer tepkisini belirlemek amacıyla kullanılması istenildiğinde, özel bir çaba ve eğitime ihtiyaç ortaya çıkmaktadır.

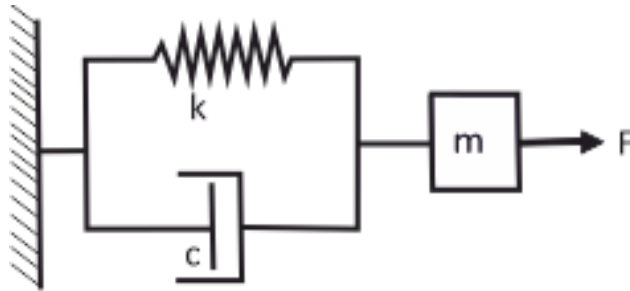
Yukarıda sayılan nedenlerle, özellikle bilimsel çalışmalarda yer tepkisi araştırılırken genellikle 3.boyut ihmal edilerek 1-B veya 2-B olarak incelenmektedir. Oysa ki 3-B heterojen ve anizotrop ortamlarda, havzalarda, yükseklik farklarının fazla olduğu bölgelerde ve alüvyon gibi pekişmemiş birimlerde 3.boyut etkisi ihmal edilemeyecek düzeydedir.

Bu tez çalışmasında yer tepkisi sonlu eleman yöntemiyle 3-B modellenerek üçüncü boyut etkisi araştırılmıştır. Algoritma ve geliştirilen yazılım, önceki çalışmalardan farklı olarak yer tepkisinin 3-B olarak kolay bir şekilde analiz edilebilmesine olanak sağlayacak özelliklere ve esnekliğe uygun olarak geliştirilmiştir. Örneğin; Literatürde kullanılan bazı bilimsel amaçlı dinamik analiz programları (Quad4M, Dyn2D vb.) içerisinde sonlu eleman modeli oluşturma özelliği bulunmamakta, bu veriler dışarıda hazırlanarak programa girdi olarak verilmektedir. Model hazırlama işlemi modelin geometrisine göre çok zaman alabilen bir işlemdir. Tez çalışmasında hazırlanan yazılımla (SiteEffect3D) sadece istenilen modelle ilgili birkaç temel parametre ile çok kolay bir şekilde istenilen büyüklükte sentetik 3-B sonlu eleman modeli veya arazi verileri girilerek gerçek arazi modeli oluşturulabilmektedir. SiteEffect3D programında standart sönüm yöntemi olarak Rayleigh sönümü kullanılmış ancak istenilen yeni sönüm yaklaşımlarının programa dahil edilebilmesi için yazılım modüler yapıda hazırlanmıştır. SiteEffect3D programı, çok gelişmiş yazılım alt yapısına sahip olan Matlab programı dili ile geliştirildiğinden istenilen yeni özellikler ve yeni sönüm yöntemlerinin içerisine kolay bir şekilde eklenebilmesine uygun yapıdadır. Bu sayede ileride istenilen sönüm yaklaşımları da programa kolayca eklenebilecek ve gerektiğinde farklı sönüm yaklaşımları kullanılarak yapılan dinamik analizler karşılaştırılabilecektir. Programda giriş ivmesi istenirse tek bir düğüm noktasından, istenirse bir yüzeyden ya da tüm düğüm noktalarından verilebilmektedir. Benzer esneklikler sınır koşulu uygularken de sağlanmıştır. Sınır koşulu uygulanacak düğüm noktaları programda kolayca seçilebilmekte, istenirse tüm düğüm noktalarına, bir yüzeye veya seçilecek düğüm noktalarına uygulanabilmektedir. SiteEffect3D yazılımında bulunan birçok özellik sayesinde, gerek bu tez çalışması kapsamında yapılan dinamik analizlere gerekse bundan sonra yapılacak çalışmalara zemin hazırlanmıştır.

2. YER DİNAMİK DAVRANIŞI

Deprem gibi kuvvetli yer hareketi altında zeminlerin kısa mesafelerde dahi çok farklı davranışlar sergilediği geçmiş depremlerden görülmüştür. Yer tepkisinin küçük alanlarda dahi belirgin farklılık göstermesindeki en önemli faktörlerden birisi, aynı jeolojik birim (örneğin; kil, silt gibi) olmasına rağmen fiziksel ve geometrik özelliklerdeki farklılıklardan ötürü deprem dalgalarına karşı farklı genlik büyütme ve enerji soğurma (attenuation) özelliği göstermeleridir. Zeminlerde sönüm işlemi ne tümüyle viskoz veya plastik ne de elastiktir. Ancak, bazı sönüm yaklaşımlarında sadece viskoz sönüm tercih edilirken (Terzaghi 1943, Love 1944, Timoshenko 1951, Lee ve Taylor 2001, Lin ve Chopra 2001) bazılarında viskoelastik sönüm yöntemi tercih edilmektedir (Thomson ve Kobori 1963, Lazan 1968). Bu tez çalışması kapsamında Rayleigh (viskoz) sönüm yaklaşımı benimsenmiştir. Geliştirilen SiteEffect3D yazılımında 3-B sonlu eleman ağı oluşturulabilmekte ve hareket denkleminin 3-B sonlu eleman yöntemiyle çözümünde Rayleigh sönüm yaklaşımı kullanılmaktadır. Bununla birlikte yazılım farklı sönüm yaklaşımları (coulomb veya kuru sürtünme, histerik sönüm vb.) da kolaylıkla uygulanabilecek yapıda tasarlanmıştır.

Şekil 2.1’de verilen, kütle, yay ve sönüm elamanından oluşan Kelvin-Voigt (en basit karmaşık model) mekanik modeline karşılık gelen matematiksel model, (2.1) hareket denklemi ile verilmektedir.



Şekil 2.1 Kelvin-Voigt Modeli

$$m \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + c \frac{d^\alpha u(t)}{dt^\alpha} + k u(t) = f(t) \quad (2.1)$$

(2.1) ile verilen hiperbolik türde ikinci mertebeden sabit katsayılı adi diferansiyel denklemde ilk terim atalet (eylemsizlik) kuvvetini, ikinci terim sönüm kuvvetini, üçüncü terim elastik kuvveti ve $f(t)$; dışarıdan uygulanan kuvveti temsil eder. (2.1) ifadesindeki sönüm teriminde bulunan türev mertebesi $\alpha=1$ değeri için ideal viskoz (viscous) ve $\alpha=0$ değeri için ideal elastik sönüm davranışını göstermektedir (Chopra 1995).

2.1 Modelleme

Geometrik ve fiziksel özelliklerinin tanımlanarak bir jeolojik modelin oluşturulması ve oluşturulan modelin oluşturacağı jeofizik belirtiyi matematik bağıntı kullanarak sayısal hesaplama işlemi modelleme olarak bilinmektedir. Jeofizik bilimi belirtiyi neden olan yer içindeki kaynağı modellemek ve yer içinin yapısını en doğru şekilde tahmin edebilmek için değişik yöntemler kullanır. Jeofizik yöntemler doğal (pasif) ve yapay (aktif) kaynaklı yöntemler olmak üzere iki başlık altında toplanabilir. Bunlardan doğal kaynaklı yöntemler, ölçüm ve araştırma yaparken dışarıdan bir etki yapmadan yer yuvarının fiziksel özelliklerinin araştırılmasıdır. Yapay yöntemlerde ise yer yuvarı dışarıdan bir dürtü ile uyarılmakta ve yer yuvarının buna verdiği tepki ölçülmektedir. Gerek yapay kaynaklı yöntemler gerekse doğal kaynaklı yöntemler kullanılsın yer altındaki yapının anlaşılabilmesi amacıyla modellenmesi gerekir. Modelleme çok farklı şekillerde yapılabilir. Bunlardan bazıları; kaynağın modellenmesi, uyarı sinyalinin modellenmesi, jeolojik yapının modellenmesi vb. olarak sayılabilir (Canitez 1997).

Fiziksel (yapısal veya mekanik) bir sistemin davranışını temsil eden matematik modellerin çözülebilmesi çeşitli varsayımlara dayanmaktadır. Bu matematik modeller genelde bir diferansiyel denklem ve sınır koşullarından oluşurlar. Yer yuvarının iç yapısını temsil etmesi için oluşturulan matematik modeldeki diferansiyel denklemin genellikle basit bir analitik çözümü yoktur. Bu nedenle, çözüm için sayısal çözüm

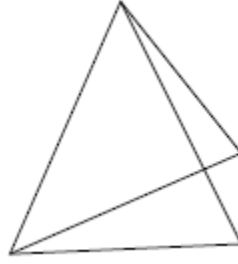
yöntemleri kullanılır. Bu yöntemlerin en yaygın olanlarından birisi de sonlu eleman yöntemidir. Bu yöntem karmaşık ortam geometrisini diğer birçok yönteme göre daha iyi tanımlamadaki üstünlüğü, kolay programlanabilmesi ve karmaşık problemlere uyarlanabilme özellikleriyle en çok tercih edilen sayısal çözüm yöntemlerinin başında gelmektedir. Modelleme yapılmak istenilen araştırmanın özelliklerine göre 1-B, 2-B veya 3-B olarak yapılabilir. 1-B modellemede araştırılan jeofizik belirtinin tek yönde değiştiği diğer yönlerde değişmediği varsayılır. Benzer şekilde 2-B modellemede ise jeofizik belirtinin iki yönde değiştiği üçüncü yönde değişmediği varsayılır. Oysa gerçekte jeofizik belirti her üç eksen yönünde de değişim göstermektedir. Modellemenin 1-B veya 2-B yapılma nedeni genelde daha kolay ve hızlı işlem yapabilmektir. Ancak, araştırılan jeofizik özellikler ve kullanılan yöntemler uygun planlanmadığında 1-B ve 2-B modelleme gerçek sonuçlardan uzaklaşabilmekte ve istenen sonucu verememektedir (Bard ve Bouchon 1980a, Bard ve Bouchon 1980b, Rasse vd. 1997, Haşal 2009).

Bu tez çalışmasında 3-B modelleme yöntemi kullanılmıştır. Bunun nedeni ise, incelenmek istenen jeofizik niceliğin gerçekte yer yuvarının içerisinde 3-B olarak değişmesidir. Böylece 1-B ve 2-B modellemeye göre gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilecektir. 3-B modellemenin getirdiği olumlu sonuçların yanında daha büyük düzey boyutları ve daha çok matematik işlem yapılması gibi olumsuz durumlar da mevcuttur. Ancak, günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle çok daha fazla işlem hacmine ve daha yüksek işlem hızına sahip bilgisayarlar üretilmiş ve bu sayede artık 3-B modelleme eskiye göre daha kolay yapılabilir olmuştur.

2.2 Sonlu Eleman Yöntemi

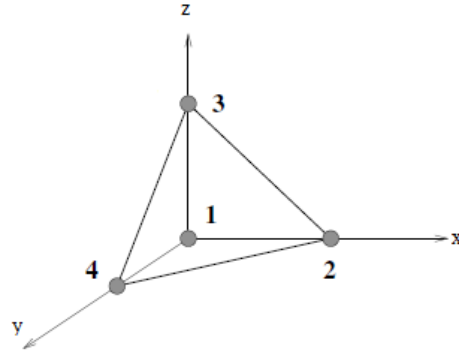
Sonlu eleman yöntemi; matematiksel modelimizde kullandığımız diferansiyel denklemin çözümü için kullanılan sayısal çözüm metotlarından birisidir. Bu yöntemin tercih edilmesinin en önemli nedeni, karmaşık problemlerin küçük parçalara ayrılarak kolay programlanabilmesine imkân vermesidir. Bu yöntemde ilk olarak diferansiyel denklem integral yapıda gösterilir ve problemin sınır ve başlangıç koşulları belirlenir. İkinci olarak çözüm bölgesi sonlu sayıda elemana ayrılır. Bu elemanların geometrik şekli, boyutları ve sayısı problemin fiziksel özelliklerini ve çözüm bölgesini yeterince temsil edebilmelidir.

Üç boyutta elemanlara ayırma işlemi yapılırken kullanılacak eleman şekilleri çok çeşitli olabilir. Bunlar genelde; dörtyüzlü (tetrahedral), piramit (pyramidal), prizmatik (prismatic) ve altı yüzlü (hexahedral) olabilir. Bu tez çalışmasında eleman temsil kabiliyeti ve kullanım kolaylığından dolayı tetrahedral eleman kullanılmıştır. Tetrahedral elemanda temel olarak 4 düğüm noktası, her bir düğüm noktası (node) için 3 serbestlik derecesi (bilinmeyen sayısı) olmak üzere toplam 12 serbestlik derecesi, 4 yüzey ve 6 düzgün kenar vardır. Şekil 2.2’de örnek bir tetrahedral görülmektedir.



Şekil 2.2 Tetrahedral

Çözüm bölgesi tetrahedral elemanlara bölünürken her bir tetrahedral elemanın köşe noktaları düğüm noktası olarak Şekil 2.3’deki gibi numaralandırılır.



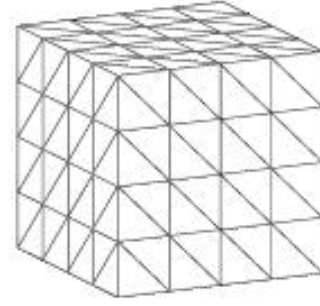
Şekil 2.3 Tetrahedral elemanda düğüm numaralandırması

Tetrahedral elemanlara bölünmüş yarımküre ve küp örneği Şekil 2.4’te görülmektedir.

a)Yarım küre



b)Küp



Şekil 2.4 a) Tetrahedral elemanlara bölünmüş yarım küre b) Tetrahedral elemanlara bölünmüş küp

Eleman şekli seçildikten sonra eleman boyunun da doğru seçilmesi gerekmektedir. Eleman boyunun gerekli olandan daha büyük seçilmesi çözümün duyarlılığını azaltırken, daha küçük seçilmesi ise işlem sayısının ve dolayısıyla işlem zamanının artmasına sebep olur. Daha sonraki aşamada, bilinmeyen değerler her eleman için tanımlanan bir yaklaşım (şekil) fonksiyonu ile (örneğin; polinom) temsil edilir. Bu çalışmada eleman içerisindeki yer değiştirmeleri tanımlamak için üç terimli polinom kullanılmıştır. Sonraki aşamada eleman düğüm noktalarına bağlı kalınarak alan değişkeni integral ifadesinde kullanılarak her bir eleman için doğrusal denklem takımları elde edilir ve bunlar birleştirilerek eleman düzey denklemleri oluşturulur. Bu çalışmada hareket denkleminin doğrusal bir denklem takımına dönüştürülmesi amacıyla, ortalama ivme yaklaşımının genel bir hali olan ve koşulsuz durağan çözüm veren Newmark Beta yaklaşımı kullanılmıştır (Newmark 1965). Eleman düzey denklemleri uygun şekilde birleştirilerek genel düzey denklemleri elde edilir. Toplam çözümün sürekli olabilmesi için elemanların ortak düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerleri veya türevleri birbirine eşit olacak şekilde ayarlanır. Birleştirilen denklem sistemi çözülmeden önce sisteme sınır koşulları dahil edilir ve daha sonra çözüm çeşitli tekniklerden birisiyle (LU ayrıklaştırması, Gauss eliminasyon vb.) gerçekleştirilir.

Sonlu eleman yöntemi uygulanırken çözümün hassasiyet derecesi ve yineleme sayısı gibi otomatik veya manuel kontrol yöntemleri ile model veya çözüm parametrelerinin değiştirilmesi işlemi gerçekleştirilerek istenilen doğrulukta bir sonuç elde edilmeye çalışılır.

2.2.1 Sonlu eleman yöntemiyle problem çözüm algoritması

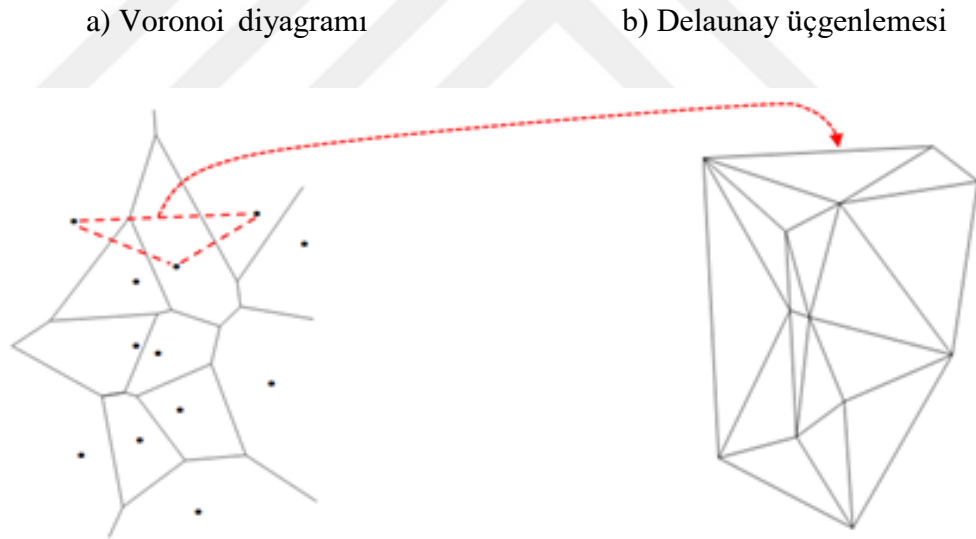
Sonlu eleman yöntemiyle problem çözümü işlem adımları aşağıdaki gibi yapılabilir:

- 1) Belirlenen fiziksel problemi temsil eden diferansiyel denklem integral yapısında ifade edilir.
- 2) Fiziksel problemi tanımlayan çözüm bölgesi sonlu sayıda elemana bölünür. Seçilecek geometrik eleman, fiziksel problemin özelliklerine ve araştırılan niceliğin koordinat sisteminde hangi yönlerde değiştiğinin kabulüne göre belirlenir. Bu çalışmada 3-B tetrahedral eleman seçilmiştir. Elemanlar birbirlerine düğüm noktalarıyla bağlanmıştır. Bu düğüm noktaları ve elemanlar farklı şekilde numaralandırılır. Sonlu eleman ağında her bir eleman kendi içinde yerel numaralara ve tüm çözüm bölgesinde ise global numaralara sahiptir. Bu numaralandırma özel bir sistem dahilinde gerçekleştirilir.
- 3) Problemi çözebilmek için her bir elemanı çözüme yaklaştıracak denklemler geliştirilir. Bu denklemler yaklaşım fonksiyonu ya da diğer bir ifadeyle şekil fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonlar genellikle polinomlar olup nadir de olsa trigonometrik fonksiyonlar da kullanılabilir. Bu çalışmada üç değişkenli polinom kullanılmıştır.
- 4) İlk adımda belirlenmiş olan integral ifadesi içerisinde düğüm noktalarında tanımlı alan değişkeni kullanılır. Her eleman için doğrusal denklem takımları üretilir ve bunlar birleştirilerek eleman düzey denklemleri oluşturulur.
- 5) Sonlu eleman ağı için eleman düzey denklemleri birleştirilerek genel düzey denklemleri elde edilir.
- 6) Sisteme sınır koşulları uygulanır.
- 7) Problem uygun bir sayısal yöntem ile çözülür. Dinamik problemde belirli bir Δt zaman aralıklarıyla çözüm işlemi tekrarlanır ve her bir tekrarlama model düzeyleri güncelleştirilir.

2.2.2 Ağ (mesh) tasarımı

Bu tez çalışmasında 3-B sonlu eleman ağı oluştururken kullanılacak elemanları belirlemek için Delaunay üçgenleme metodu kullanılmıştır. Bu yöntem Voronoi diyagramı temelli bir metottur (Sukumar vd. 2001, Özbek 2010).

Şekil 2.5a’da bir veri kümesine ait Voronoi diyagramı görülmektedir. “Bu diyagram en yakın nokta problemleri için kullanılan kesin bir yapıdır. Bir noktanın Voronoi çokgeni herhangi bir noktayı, kendisine en yakın konumdaki komşu noktalardan ayırmaktadır. Çokgenin kenarları, nokta ile komşu noktaları birleştiren doğru parçalarının kenar orta dikmelerinden oluşmakta, her nokta kendisine ait komşu noktalar ile birleştirildiğinde Delaunay üçgenlemesi elde edilmektedir” (Şişman 2021). Voronoi diyagramı verilmiş olan kümenin Delaunay üçgenleri şekil 2.5b’de görülmektedir.



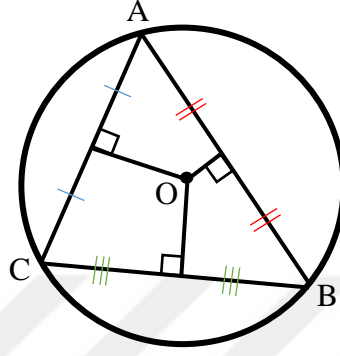
Şekil 2.5 a) Voronoi Diyagramı b) Delaunay Üçgenlemesi

Delaunay üçgenlemesine ait bazı önemli özellikler şunlardır:

- Oluşan üçgenler en olası eşkenar ya da ona yakın üçgenlerdir (eş açı özelliği). Çok dar açılı üçgenlerin oluşumu, dolayısıyla, birbirlerine uzak olan ve doğrudan

ilişkisi bulunmayan noktalar arasında doğrusal bir ilişki kurulması engellenmektedir.

- Üçgenlerin çevrel çemberi içerisinde bir başka nokta yer almamaktadır (çevrel çember özelliği). Çevrel çemberin merkezi; herhangi iki kenar orta dikmesinin kesişim noktasıdır.



Şekil 2.6 Çevrel Çember

2.3 Yer Değiştirme Fonksiyonları

Sonlu eleman yönteminde kullanılan elemanlardaki alan değişimini temsil edebilecek bir yaklaşım fonksiyonu kullanılır. Bu yaklaşım (yer değiştirme) fonksiyonu yakınsama ve uyumluluk koşullarını sağlamalıdır. Yakınsama koşuluna göre; yer değiştirme fonksiyonu elemanın katı hareketini temsil edebilmeli ve sürekli olmalıdır. Yani eleman düğümlerinde hareket miktarı aynıysa elemanda şekil değişikliği olmamalıdır. Bunun sağlanabilmesi için yer değiştirme fonksiyonunda sabit terim bulunur. Uyumluluk şartına göre; yer değiştirme fonksiyonu elemanın üzerinde sabit şekil değişikliğini temsil etmelidir. Bu nedenle fonksiyon doğrusal terimlerden oluşturulmalıdır. Birbirine bitişik elemanlardaki şekil değişikliklerinde elemanlar arası süreksizlik olmamalı, elemanlar ayrılmamalı ve üst üste binmemelidir. Uyumluluk ve yakınsama koşullarını birlikte sağlayan elemanlara uyumlu eleman denir. Polinomlar bu özellikleri sağladığı ve integral ve türev hesaplamaları kolay olduğundan sıklıkla yer değiştirme fonksiyonu olarak kullanılırlar. Bu çalışmada tetrahedral eleman için seçilen yer değiştirme fonksiyonu (2.2) ifadesiyle tanımlanmıştır.

$$U(x,y,z)= \alpha_1 +\alpha_2 x+\alpha_3 y+\alpha_4 z \quad (2.2)$$

İncelenen sistem 3-B olduğundan x, y ve z koordinat eksenlerini göstermektedir. (2.2) ile verilen doğrusal yer değiştirme fonksiyonu ile sonlu bir elemanın düğüm noktaları arasındaki değişimin doğrusal olduğu kabul edilmektedir. (2.2) yer değiştirme ifadesinde verilen α katsayılarına “genel koordinatlar” denir (Dikmen 2004, Camp 2018). Kullanılan tetrahedral elemanın dört düğüm noktasına karşılık yer değiştirme fonksiyonunda da dört α katsayısı vardır. Elemandaki x yönündeki yer değiştirme “u”, y yönündeki yer değiştirme “v” ve z yönündeki yer değiştirme “w” ile gösterilmiştir. Buna göre düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler dizey yapısında (2.3) eşitliğindeki gibi yazılabilir.

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ w_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$U = N \cdot \bar{U} \quad (2.4)$$

(2.4) eşitliğinde, N Şekil fonksiyonunu ifade etmektedir (Dikmen 2004, Liu ve Quek 2013, Rabczuk vd. 2019).

2.4 Şekil Fonksiyonları

Şekil fonksiyonlarının her biri kendi ait olduğu düğüm üzerinde 1 değerini, diğer düğümler üzerinde 0 değerini alır. İkisi arasında ise ara değerler alırlar. Bu çalışmada kullanılan şekil fonksiyonlarının dizey yapısı (2.5) ile verilmiştir.

$$[N(x,y,z)]=[N_i(x,y,z) \quad N_j(x,y,z) \quad N_k(x,y,z) \quad N_l(x,y,z)] \quad (2.5)$$

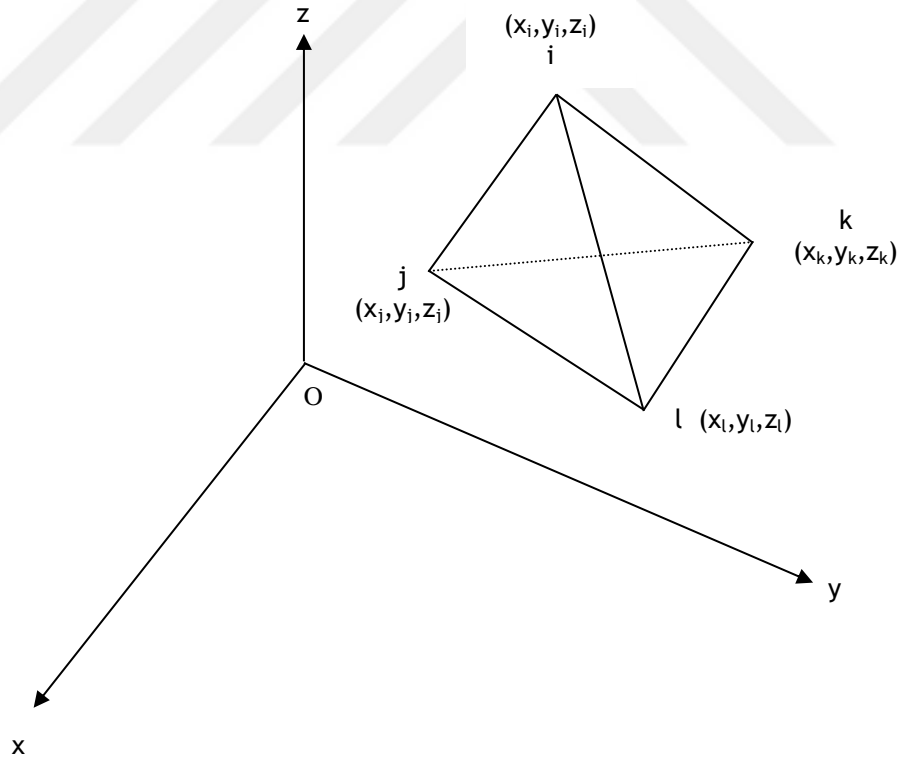
Şekil fonksiyonlarında kullanılan katsayı adedi düğüm sayısı kadardır.

$$N_i(x,y,z) = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (2.6)$$

$$N_j(x,y,z) = \frac{1}{6V} (a_j + b_j x + c_j y + d_j z) \quad (2.7)$$

$$N_k(x,y,z) = \frac{1}{6V} (a_k + b_k x + c_k y + d_k z) \quad (2.8)$$

$$N_l(x,y,z) = \frac{1}{6V} (a_l + b_l x + c_l y + d_l z) \quad (2.9)$$



Şekil 2.7 3-B (tetrahedral) eleman

Şekil fonksiyonları sonlu elemanın düğüm koordinatlarına bağlıdır. Şekil fonksiyonlarının katsayıları (2.10) ile hesaplanır. (2.10) ile verilen katsayı dizeylerindeki x , y ve z değerleri Şekil 2.7’de görüldüğü gibi her bir düğüm noktasına ait koordinatın x , y ve z değerleridir.

$$a_i = \begin{bmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \\ x_l & y_l & z_l \end{bmatrix} \quad b_i = \begin{bmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_l & z_l \end{bmatrix} \quad c_i = \begin{bmatrix} x_j & 1 & z_j \\ x_k & 1 & z_k \\ x_l & 1 & z_l \end{bmatrix} \quad d_i = \begin{bmatrix} x_j & y_j & 1 \\ x_k & y_k & 1 \\ x_l & y_l & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Şekil fonksiyonu (2.6)-(2.9) ifadelerinde görülen V üç boyutta sonlu elemanın hacmini gösterir ve (2.11) ile hesaplanabilir.

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad (2.11)$$

Tetrahedral eleman için şekil fonksiyonu 3-B’te dizey yapısında (2.12) gibi yazılabilir.

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.5 Hareket Denkleminin Sonlu Eleman Yapısı

Sonlu eleman yapısında oluşan deformasyon, düzlem deformasyon durumunda (2.13) ile ifade edilebilir (Rao 1989).

$$\vec{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = D.U = D.N.\bar{U} \quad (2.13)$$

(2.13) eşitliğinde verilen D.N düzeyine “kinematik düzey” yada diğer bir ifadeyle “deformasyon-yer değiştirme düzeyi” adı verilir (Zienkiewicz ve Taylor 1991). Kinematik düzey şekil fonksiyonlarının üç boyutta x, y ve z bağımsız değişkenlerine göre türevlerini içerir (2.14).

$$B = D.N = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial z} & 0 & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial z} & 0 & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial z} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Eşitlik (2.6),(2.7),(2.8),(2.9) ve (2.10) kullanılarak türevler alındığında kinematik düzey (2.15) şeklini alır.

$$B = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & b_3 & 0 & 0 & b_4 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & d_1 & 0 & 0 & d_2 & 0 & 0 & d_3 & 0 & 0 & d_4 \\ c_1 & b_1 & 0 & c_2 & b_2 & 0 & c_3 & b_3 & 0 & c_4 & b_4 & 0 \\ 0 & d_1 & c_1 & 0 & d_2 & c_2 & 0 & d_3 & c_3 & 0 & d_4 & c_4 \\ d_1 & 0 & b_1 & d_2 & 0 & b_2 & d_3 & 0 & b_3 & d_4 & 0 & b_4 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

(2.13) eşitliğindeki D dizeyi poisson oranı (ν) ve elastisite (E) değerine bağlı dizeydir. Düzlem deformasyon durumu için D dizeyi (2.16) eşitliğindeki gibidir.

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1-2\nu}{2}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1-2\nu}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1-2\nu}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Düzlem deformasyon durumu için gerilme–deformasyon ilişkisi (2.17) de verilmiştir.

$$\vec{\sigma} = D \cdot \vec{\epsilon} \quad (2.17)$$

Bu çalışmada sismik dalgaların zemin içerisindeki davranışını temsil edebilmek için Şekil 2.1’ de verilen “Kelvin-Voigt modeli” kullanılmıştır. Yukarıda verilen eşitlikler (2.1) ile verilen hareket denklemi için kullanılması durumunda denklemdeki katsayılar (2.18) ifadesindeki gibi birer dizey olarak karşımıza çıkar.

$$M\ddot{U}(x, y, z, t) + C\dot{U}(x, y, z, t) + KU(x, y, z, t) = F(x, y, z, t) \quad (2.18)$$

Bu durumda eşitlik (2.18) de M=Eleman kütle dizeyi, C=Sönüm dizeyi, K=Eleman sıklık dizeyi, $F(x,y,z,t)$ = konum ve zamana bağlı dış kuvvet yöneyini gösterir.

2.6 Genel Dizey Denkleminin Oluşturulması

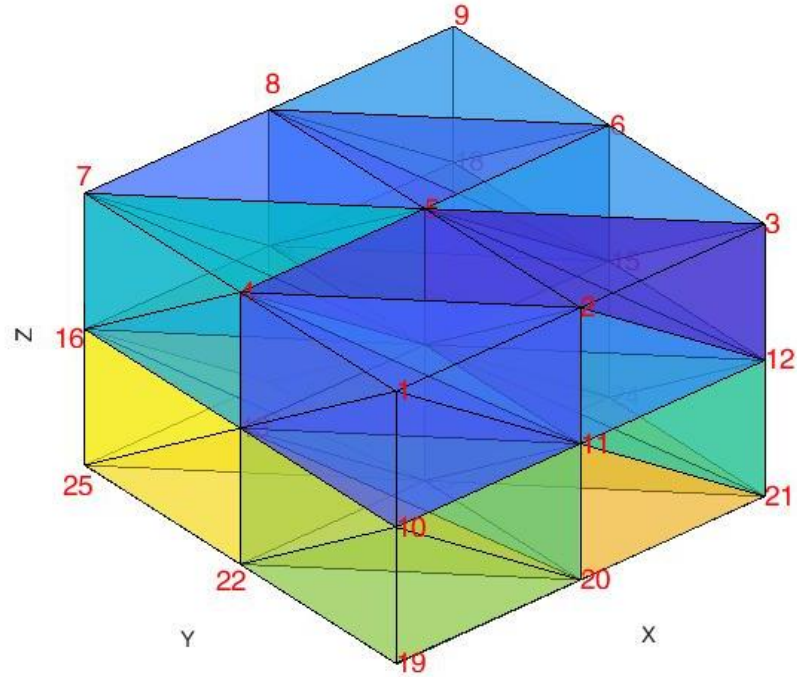
Sonlu eleman ağında öncelikle her bir eleman için dizey denklemleri oluşturulur. Eleman dizey denklemleri birleştirilerek genel dizey denklemi elde edilir. Bu birleştirme işlemleri yapılırken elemanların düğüm noktalarındaki uyumluluk koşulunun sağlanmasına dikkat edilir. Uyumluluk koşuluna göre ortak düğüm noktalarını kullanan farklı elemanlar için o düğüm noktasındaki yer değiştirmeler aynıdır. Uyumluluk koşulundan dolayı aynı düğümü kullanan elemanların o düğümdeki sıklık değerleri toplanır ve o düğümün global

sıkılık (stiffness) değeri bulunur. Her bir eleman için sıkılık değeri eşitlik (2.19) da verilmektedir. Aynı yöntemle modelin sönüm katsayı dizeyi hesaplanır.

$$[K^{(e)}] = \iiint V^{(e)} [B]^T [D] [B] dV \quad (2.19)$$

Eşitlik (2.20) ile eleman kütle dizeyi verilmektedir. Burada ρ =yoğunluk, N =Şekil fonksiyonu, V =eleman hacmidir. Eleman kütle dizeyleri birleştirilerek modele ait genel kütle dizeyi elde edilir. Model kütle dizeyi iki farklı şekilde üretilebilir (Rao 1989). Bunlardan birisi “yığın kütle (lumped mass)” diğeri de “sürekli kütle (consistent mass)” yaklaşımlarıdır. Yığın kütle yönteminde model kütle dizeyi köşegen yapıdadır ve her bir elemanın kütlesi o elemanın düğümlerine paylaşılır. Sürekli kütle yönteminde ise dizey simetrik yapıdadır ve eşitlik (2.20) deki integralin sayısal olarak hesaplanmasıyla bulunur. Bu çalışmada sürekli kütle yaklaşımı kullanılmıştır.

$$[M^{(e)}] = \iiint V^{(e)} \rho [N]^T [N] dV \quad (2.20)$$



Şekil 2.8 48 Tetrahedral ve 27 düğüm noktasından oluşan 3-B sonlu eleman ağı

Şekil 2.8'deki sonlu eleman ağı üzerindeki kırmızı renkli rakamlar global düğüm noktalarını göstermektedir. Her bir eleman içerisinde ise o elemana ait yerel düğüm noktaları tanımlanır (Şekil 2.3). Elemanların her biri için katsayı dizeyi, elemanın düğüm sayısına ve her bir düğümdeki serbestlik derecesine göre tanımlanır. Bu çalışmada 3-B sonlu eleman modeli ve tetrahedral eleman (4 düğümlü) kullanıldığından katsayı dizeyi 12x12 boyutundadır.

$$k^i = \begin{bmatrix} k_{11}^i & k_{12}^i & k_{13}^i & k_{14}^i & k_{15}^i & k_{16}^i & k_{17}^i & k_{18}^i & k_{19}^i & k_{110}^i & k_{111}^i & k_{112}^i \\ k_{21}^i & k_{22}^i & k_{23}^i & k_{24}^i & k_{25}^i & k_{26}^i & k_{27}^i & k_{28}^i & k_{29}^i & k_{210}^i & k_{211}^i & k_{212}^i \\ k_{31}^i & k_{32}^i & k_{33}^i & k_{34}^i & k_{35}^i & k_{36}^i & k_{37}^i & k_{38}^i & k_{39}^i & k_{310}^i & k_{311}^i & k_{312}^i \\ k_{41}^i & k_{42}^i & k_{43}^i & k_{44}^i & k_{45}^i & k_{46}^i & k_{47}^i & k_{48}^i & k_{49}^i & k_{410}^i & k_{411}^i & k_{412}^i \\ k_{51}^i & k_{52}^i & k_{53}^i & k_{54}^i & k_{55}^i & k_{56}^i & k_{57}^i & k_{58}^i & k_{59}^i & k_{510}^i & k_{511}^i & k_{512}^i \\ k_{61}^i & k_{62}^i & k_{63}^i & k_{64}^i & k_{65}^i & k_{66}^i & k_{67}^i & k_{68}^i & k_{69}^i & k_{610}^i & k_{611}^i & k_{612}^i \\ k_{71}^i & k_{72}^i & k_{73}^i & k_{74}^i & k_{75}^i & k_{76}^i & k_{77}^i & k_{78}^i & k_{79}^i & k_{710}^i & k_{711}^i & k_{712}^i \\ k_{81}^i & k_{82}^i & k_{83}^i & k_{84}^i & k_{85}^i & k_{86}^i & k_{87}^i & k_{88}^i & k_{89}^i & k_{810}^i & k_{811}^i & k_{812}^i \\ k_{91}^i & k_{92}^i & k_{93}^i & k_{94}^i & k_{95}^i & k_{96}^i & k_{97}^i & k_{98}^i & k_{99}^i & k_{910}^i & k_{911}^i & k_{912}^i \\ k_{101}^i & k_{102}^i & k_{103}^i & k_{104}^i & k_{105}^i & k_{106}^i & k_{107}^i & k_{108}^i & k_{109}^i & k_{1010}^i & k_{1011}^i & k_{1012}^i \\ k_{111}^i & k_{112}^i & k_{113}^i & k_{114}^i & k_{115}^i & k_{116}^i & k_{117}^i & k_{118}^i & k_{119}^i & k_{1110}^i & k_{1111}^i & k_{1112}^i \\ k_{121}^i & k_{122}^i & k_{123}^i & k_{124}^i & k_{125}^i & k_{126}^i & k_{127}^i & k_{128}^i & k_{129}^i & k_{1210}^i & k_{1211}^i & k_{1212}^i \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

(2.21) de eleman dizey denklemleri genel yapıda verilmektedir. Her bir eleman için bu dizeydeki “i” indis değeri 1,2,3...12 değerlerini almaktadır. Bu dizeydeki her bir satırdaki değerler ilgili satır numarasıyla aynı numaraya sahip olan elemana aittir. Örneğin: 1.satırdaki $k_{11}^i \dots k_{112}^i$ arasındakiler 1 nolu elemana aittir. Elemanın 4 düğüm noktası ve 3 serbestlik derecesi bulunduğundan 1.elemanın ilk düğümüne ait değerler; $k_{11}^i, k_{12}^i, k_{13}^i$ tür. Benzer şekilde sonraki 3 değer; $k_{14}^i, k_{15}^i, k_{16}^i$ ikinci düğüme, daha sonraki 3 değer; $k_{17}^i, k_{18}^i, k_{19}^i$ üçüncü düğüme ve en sondaki 3 değer; $k_{110}^i, k_{111}^i, k_{112}^i$ ise 4.düğüme aittir. Her bir 3'lü değer ilgili düğümün x, y ve z yönündeki değerleridir.

Genel dizey denklemleri elde edilirken her bir düğümdeki global düğüm numaraları kullanılarak eleman dizey denklemleri birleştirilir. Yani aynı global düğüm numarasını kullananlar birbiriyle toplanır. Bu şekilde yapılan birleştirmeler sonucunda genel dizey

denklemleri düğüm noktası sayısı ile serbestlik derecesinin çarpımı boyutunda kare bir dizey şeklinde oluşturulur. Örneğin Şekil 2.8’de verilen sonlu eleman ağı için düğüm sayısı=27, serbestlik derecesi=3 olduğundan üretilen genel dizey denkleminin boyutu (81x81) olan kare bir dizey oluşturulur.

Bu çalışmada sürekli kütle yöntemi kullanıldığından kütle için oluşturulacak genel dizey denklemleri de yukarıdaki sıklık genel dizeyinin oluşturulduğu yöntemle benzer şekilde oluşturulur.

2.7 Sınır Koşullarının Uygulanması

Bu çalışmada çözmeye çalıştığımız (2.1) veya (2.18) deki hareket denklemleri başlangıç koşulları ve sınır koşulları içerir. $t=0$ zamanındaki hız ve yer değiştirmeler başlangıç koşulunu oluşturur. Bilgisayarda problemi çözebilmek için sonsuz ortamın sınırlandırılmasına ihtiyaç vardır. Ortamı sınırlandırabilmek için Neumann ve Dirichlet sınır şartı yöntemleri kullanılır. Neumann sınır şartında eleman sınırlarında yer değiştirmelerin türevleri ön tanımlıdır. Dirichlet sınır şartında ise eleman sınırlarında yer değiştirmeler ön tanımlıdır. Bu iki sınır koşulu da uygulanarak hareket denklemleri sonlu eleman modeli için çözülür. Problemin sayısal olarak çözümünde sınır koşulları genel olarak şu şekilde uygulanır. Sınır koşulunu hangi eksen veya eksenler için uygulayacaksa ona ait olan serbestlik derecesine sahip düğüm noktalarının ait olduğu dizeydeki satır ve sütun elemanlarının global sıklık (stiffness) ve sönüm katsayıları bire eşitlenir, diğerleri ise sıfıra eşitlenir. Kütle dizeyleri için ise ilgili serbestlik derecesinin ait olduğu dizey elemanları sıfıra eşitlenir. Böylece sınır koşulları sayısal olarak uygulanmış olur.

2.8 Sönüm Teriminin Hesaplanması

Mühendislik yapılarının deprem gibi kuvvetli yer hareketlerine karşı dayanıklı olarak tasarlanması ve yapımı oldukça önemlidir. Bunun sağlıklı olarak yapılabilmesi yer dinamik davranışını temsil eden büyüklüklerin mümkün olduğunca doğru olarak

hesaplanmasına bağlıdır. Bu büyüklüklerin belirlenebilmesi ve hesaplanabilmesi için sismik dalga yayılımının ve sismik dalga enerjisinin soğurulması konularının ayrıntılı araştırılması gerekmektedir. Sismik dalga enerjisinin soğurulması sönüm olarak bilinmektedir. Sismik sönümün hesaplanmasında çok farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları; deneysel yaklaşımlar, Rayleigh ve Coughy sönüm yaklaşımları, mekanik model ve karmaşık model, kesirsel merteye türev yaklaşımı olarak sayılabilir. Bu çalışmada Coughy sönüm yaklaşımının (Dikmen 2004) özel bir hali olan ve (2. 22) ifadesiyle verilen Rayleigh sönüm yaklaşımı (Cook 1995, Dikmen 2004) kullanılmıştır.

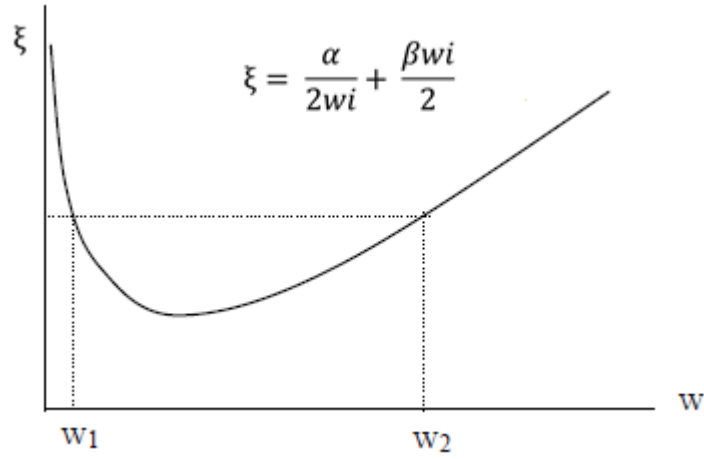
$$C = \alpha M + \beta K \quad (2. 22)$$

Rayleigh sönüm yaklaşımı viskoz sönüm uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir sönüm yaklaşımıdır. Rayleigh sönümü eşitlik (2. 22) de görüldüğü gibi hem kütle hem de sıklıkla orantılı bir sönüm uygular. Rayleigh sönümünün sıklıkla orantılı kısmı Voigt modelini (viskoelastisite modeli) ifade etmektedir (Shaban ve Caner 2015). Sıklıkla ilgili bu kısım deformasyona bağlı enerjideki kaybı modeller. Kütle ile orantılı kısmın ise fiziksel bir anlamı yoktur (Chopra 1995). Ancak, kütle orantılı kısım modal sönüm oranları üzerinde ilave kontrol sağladığı için kullanılmaktadır (Shaban ve Caner 2015).

(2. 22) eşitliğinde α ve β titreşim sisteminde ilgilenilen frekans aralığı ve sönüm oranına bağlı olarak belirlenen sabitlerdir. M kütle düzeyi, K ise sıklık düzeyidir. w_i frekans değeri olmak üzere, ξ sönüm oranı eşitlik (2. 23) te verilmektedir. w_i değerleri K düzeyinin öz değerlerinin karekökü alınarak elde edilebilir.

$$\xi = \frac{\alpha}{2w_i} + \frac{\beta w_i}{2} \quad (2. 23)$$

Rayleigh sönüm düzeyinin doğal frekanslara bağlı olarak değişimi Şekil 2.9'da gösterilmektedir (Dikmen 2004).



Şekil 2.9 Sönüm oranının doğal titreşim frekansı ile değişimi

Başlangıç anında titreşim w_1 ve w_2 frekansları arasında olması sağlanmaya çalışılır. Bunun amacı, ilgilenilen bu frekanslar arasında en küçük sönüm elde edilmesi ve bunu sağlayacak frekans aralığının seçilmesidir. Bu frekanslardan ilki titreşim hareketinin rezonans frekansıdır. İkinci frekans ise rezonans frekansın w_i/w_1 'den büyük en yakın tek tam sayı katı olacak şekilde tespit edilir (Hudson vd. 1994).

2.9 Genel Dizey Denkleminin Dinamik Çözümü

3-B sonlu eleman ağındaki tüm elemanlar düğüm noktalarından birbirine bağlıdır. Bu düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerin hesaplanabilmesi için genel dizey denkleminin çözülmesi gereklidir.

Eşitlik (2.18) de verilen hareket denkleminin sayısal olarak çözülebilmesi için denklemdaki ivme değeri bilinmelidir. Bu denklem sayısal olarak çözebilmek amacıyla doğrusal denklem takımına dönüştürülür. Bunun için bu çalışmada ortalama ivme yaklaşımının genel bir hali olan Newmark Beta yöntemi kullanılmıştır. Buna göre, yer değiştirme ve hız değerleri $t+\Delta t$ zamanı için Taylor serisine açılır. Taylor serisinin son terimleri devam eden terimler için bir yaklaşım olarak kabul edilir.

$$U_{t+\Delta t} = U_t + \Delta t \dot{U}_t + \frac{\Delta t^2}{2} (1 - \alpha) \ddot{U}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \alpha \ddot{U}_{t+\Delta t} \quad (2.24)$$

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = \dot{U}_t + \Delta t(1 - 2\beta) \ddot{U}_t + 2\Delta t\beta \ddot{U}_{t+\Delta t} \quad (2.25)$$

Eşitlik (2.24) ve (2.25) deki α ve β katsayıları integral denkleminin doğruluğunu ve durağanlığını gösterirler. Bu katsayılar $\alpha = 0.5$ ve $\beta = 0.25$ olarak alındığında (2.24) ve (2.25) bağıntıları “yamuk kuralı” veya “ortalama ivme yaklaşımı” olarak bilinir.

$t+\Delta t$ zamanında yer değiştirme, hız ve ivme değerlerini hesaplayabilmek için (2.24) ve (2.25) bağıntıları (2.18) hareket denkleminde birlikte kullanılarak eşitlik (2.26) elde edilir.

$$\ddot{U}_{t+\Delta t} = \frac{4}{\Delta t^2} [U_{t+\Delta t} - U_t] - \frac{4}{\Delta t} [\dot{U}_t - \dot{U}_{t+\Delta t}] \quad (2.26)$$

Eşitlik (2.24), (2.25) ve (2.26) kullanılarak (2.27) etkin sıkılık ve (2.28) etkin kuvvet dizeyleri elde edilir.

$$K_{mod} = \frac{4}{\Delta t^2} M + \frac{2}{\Delta t} C + K \quad (2.27)$$

$$F_{mod} = U_t \left[\frac{4}{\Delta t^2} M + \frac{2}{\Delta t} C \right] + \dot{U}_t \left[\frac{4}{\Delta t} M + C \right] + M \ddot{U}_t + F_{t+\Delta t} \quad (2.28)$$

Elde edilen (2.27) ve (2.28) bağıntıları (2.18) denkleminde yerine konulduğunda (2.29) bağıntısı elde edilir.

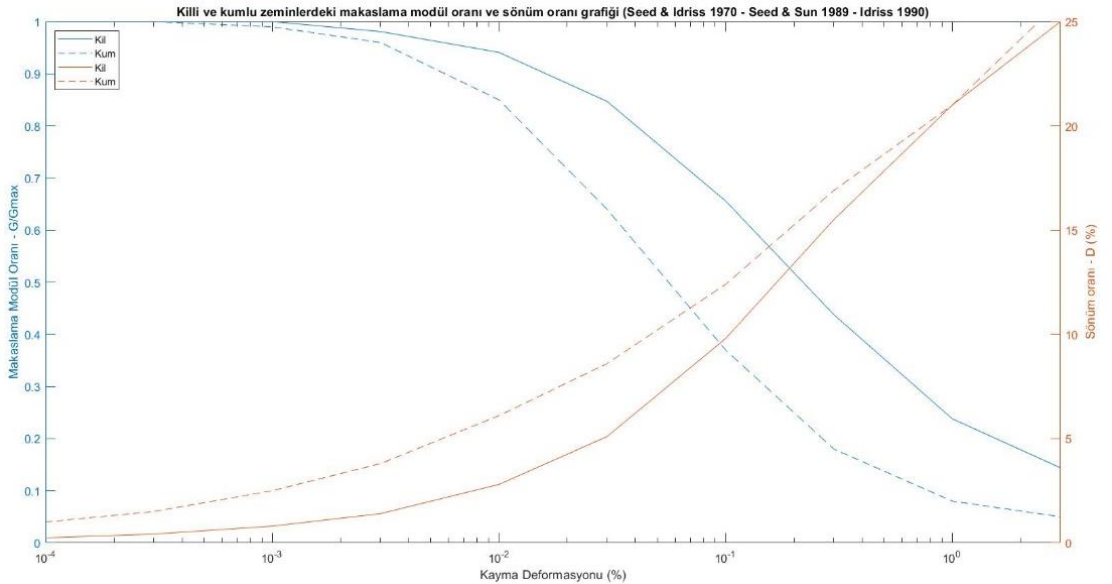
$$K_{mod} \cdot U_{t+\Delta t} = F_{mod} \quad (2.29)$$

Bu şekilde (2.18) deki hareket denkleminin (2.29) daki doğrusal denklem sistemi haline getirilir. Elde edilen (2.29) bağıntısının çözümlenmesi için etkin sıkılık düzeyi K_{mod} 'un tersinin alınabilmesi gerekir. Bir düzeyin tersinin alınabilmesi için Gauss yok etme (Gauss

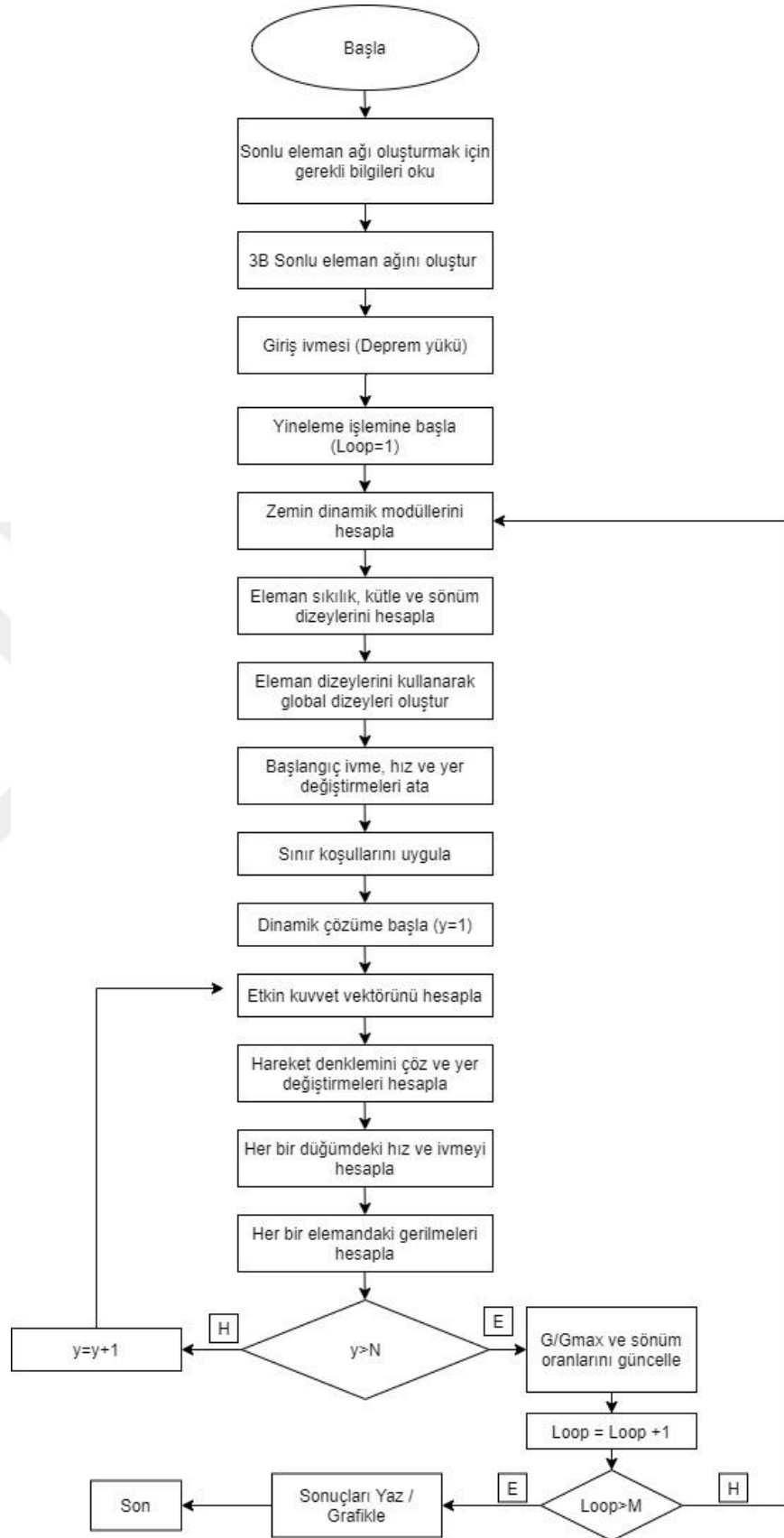
elimination) yöntemi, QR yöntemi, SVD yöntemi, LU ayrışım yöntemi gibi birçok yöntem mevcuttur. Bu çalışmada Gauss yok etme yöntemi kullanılmıştır. Gauss yok etme yöntemiyle K_{mod} dizeyi üç dizeyin çarpımı şekline indirgenir ve tersi alınabilir. $t+\Delta t$ zamanında yer değiştirmenin ($U_{t+\Delta t}$) çözülmesiyle $t+\Delta t$ zamanında hız ve ivme değerleri bulunur. Yer değiştirme, hız ve ivmenin bulunmasıyla her bir t zamanında elemandaki gerilme ve deformasyon değerleri (2.13) ve (2.17) bağıntıları kullanılarak bulunabilir.

2.10 Makaslama Modül Oranı (G/Gmax) ve Sönüm Oranının (D) Dinamik Analizde Sönüme Yansıtılması

Dinamik analizden elde edilen yer değiştirmeler, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde yapılan deneylerden elde edilmiş değerler aşağıdaki şekilde (Şekil 2.10) gösterilmektedir (Seed 1970, Sun vd. 1988, Idriss 1990). Zemin türüne göre, makaslama modül oranı ve sönüm oranı değerleri buradan elde edilir. Bu yeni değerler kullanılarak yeni sönüm dizeyi ve yeni sıklık dizeyi oluşturulur. Bu dizeler dinamik analizde bir sonraki yinelemede kullanılır. Şekil 2.11’de tez kapsamında geliştirilmiş olan ve SiteEffect3D adı verilen Matlab tabanlı yazılımın akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Killi ve kumlu zeminlerdeki kayma deformasyonu, makaslama modül oranı (G/Gmax) ve sönüm oranı değerleri



Şekil 2.11 SiteEffect3D programının işlem akış şeması

3. ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMAN YÖNTEMİNDE ELEMAN BOYUTU VE SAYISININ DİNAMİK ANALİZ SONUCUNA ETKİSİ

Mühendislikte kullanılan birçok matematik modeldeki diferansiyel denklemin genellikle basit bir analitik çözümü yoktur. Bu nedenle, çözüm için sayısal çözüm yöntemleri kullanılır. Sayısal çözüm yöntemlerinden birisi de sonlu eleman yöntemidir. Bu yöntemde çözüm bölgesi sonlu sayıda elemanlara bölünerek bir ağ (mesh) oluşturulur. Bu ağ oluşturulurken kullanılan elemanların geometrisi, boyutları ve sayısı, yapılmak istenen analiz sonuçlarını etkilemektedir. Bu etki birçok kişi tarafından araştırılmıştır. Kardani vd. (2012) sonlu elemanlar ağındaki elemanları otomatik olarak iyileştirebilen bir yöntem olan h-uyarlamalı sonlu elemanlar tekniği (h-adaptive finite element technique) kullanarak daha iyi bir sonlu eleman ağı oluşturulabileceğini, ancak bu tekniğin zorluklarından dolayı o zamana kadar jeoteknik problemlerde yaygın olarak kullanılmadığını belirtmiştir. Liu (2013) çalışmasında farklı eleman sayılarında otomatik sonlu eleman ağları üretmiş ve bunları kullanarak, statik analiz, etki analizi ve modal analizi yapmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre çözüm süresi ve analiz sonuçlarının doğruluğunu karşılaştırarak en uygun eleman boyutu ve sayısını belirlemeye çalışmıştır. Dutt (2015) yapmış olduğu çalışmada sonlu eleman ağ boyutunun yapı elemanları için yapmış olduğu analiz sonuçlarına etkisini, farklı eleman boyutu ve sayıları için araştırmıştır. Nasery vd. (2019) çelik yapı elemanlarının sonlu eleman modeli için oluşturulan ağ sıklığının etkilerini araştırmıştır. Nasery vd. (2019) çalışmalarında farklı eleman boyutu ve sayılarından oluşturdukları sonlu eleman ağlarından elde ettikleri analiz sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlar ve sonlu eleman ağındaki eleman sayısının artması ile doğruluğun arttığını ancak çözüm süresinin bazı durumlarda çok fazla uzadığını bu nedenle hem gerçek sonuca en yakın hem de mümkün olan en kısa sürede sonuca ulaşabilmek için gerekli olan optimum ağ sıklığını elde etmeye çalışmışlardır. Elde ettikleri sonuçları değerlendirerek en uygun olan ağ sıklığının en çok eleman bulduran ağ olmadığı sonucuna varmışlardır. Aynı çalışmada farklı boyuttaki deney elemanları için sonucun farklı olabileceği söylenmektedir.

Bu çalışmada 3-B sonlu eleman modeli hazırlamak için temsil kabiliyeti ve kullanım kolaylığından dolayı tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. Kullanılan tetrahedral

elemanda 4 düğüm noktası, her bir düğüm noktasında 3 serbestlik derecesi olmak üzere toplam 12 serbestlik derecesi, 4 yüzey ve 6 düzgün kenar vardır.

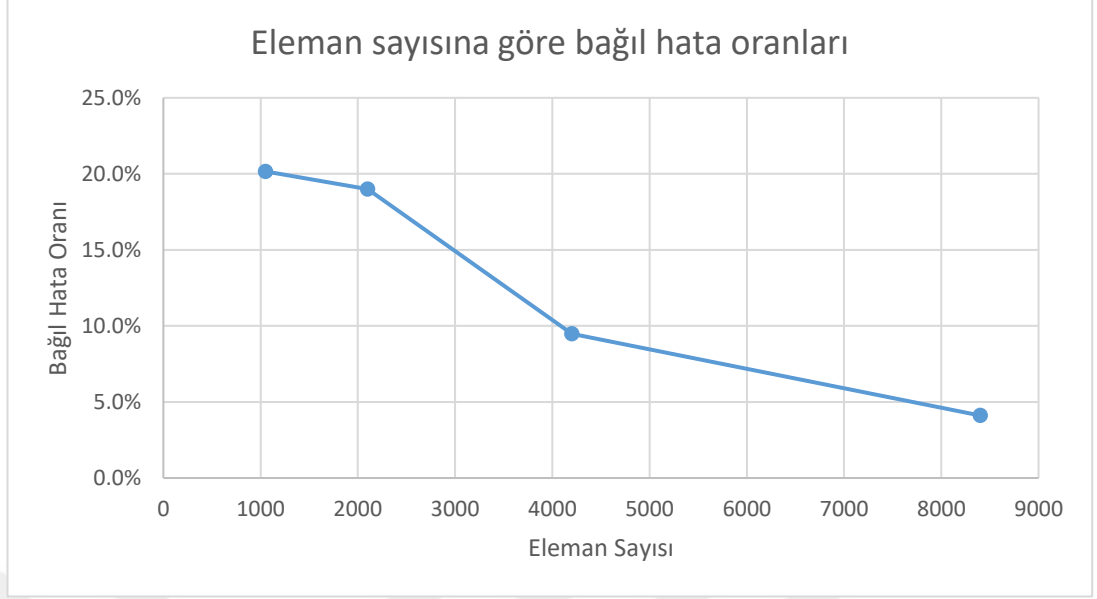
Gerçek araziye uygun olarak hazırlanmış olan 3-B sonlu eleman modelinde kullanılan eleman sayısının dinamik analiz sonuçlarına etkisi araştırılmıştır. Marmara bölgesinde belirlenen çalışma alanının boyutları; Doğu-Batı yönünde 200km, Kuzey-Güney yönünde 100km ve yer yüzeyinden 15 km derinlikte olmak üzere 200 km x 100 km x 15 km'dir. Bu alanda daha önce yapılmış birçok çalışmadaki ölçü aralıkları ve üretilen sonuçlar düşünüldüğünde oluşturulması planlanan 3-B sonlu eleman modelindeki düğüm noktaları arası uzaklıkların kilometre düzeyinde olduğu görülmektedir. Ayrıca oluşturulacak olan 3-B sonlu eleman modelindeki düğüm ve eleman sayısının elimizde bulunan mevcut bilgisayar alt yapısı ile çözülebilir olması gerekmektedir. Sonlu eleman yönteminde eleman boyutu küçüldükçe ve eleman sayısı arttıkça sonuçların doğruluğunun arttığı ancak aynı zamanda çözüm zamanının uzadığı ve bazı durumlarda mevcut bilgisayar alt yapısı (işlemci, RAM ve disk kapasitesi gibi) ile problemin çözülemez duruma gelebileceği bilinmektedir. Bu nedenle sonlu eleman modelinde düğüm noktası aralıkları ve eleman boyutu seçilirken, hem gerçek modele en yakın ve en az hata ile temsil edebilecek, hem de işlem süresini çok fazla artırmayacak sayıda eleman üretilmeye çalışılır. En uygun eleman boyutunun ve sayısının seçilebilmesi amacıyla birçok araştırmacı farklı yöntemler kullanmışlardır. Liu (2013) yaptığı çalışmada farklı eleman boyutlarında ağlar üretmiş ve statik analiz, etki analizi, modal analizi ve simülasyonların sonuçlarını kullanarak en uygun eleman boyutunu belirlemeye çalışmıştır. Kardani vd. (2012) çalışmalarında h-uyarlamalı sonlu elemanlar tekniğini kullanarak en uygun sonlu eleman ağını oluşturma yöntemini kullanırken, Dutt (2015) ve Nasery vd. (2019) ise çalışmalarında farklı eleman sayılarında test ağları oluşturarak optimum çözüm süresi ve hata oranına sahip sonlu eleman ağını tespit etmeye çalışmışlardır.

Bu çalışma kapsamında Marmara bölgesinde belirli bir çalışma alanı belirlendiği ve bu arazide yapılmış literatürde bulunan arazi verilerinin sıklığı sınırlı olduğu için uygulama kolaylığı da düşünülerek otomatik algoritmalar kullanmak yerine farklı eleman boyutlarında modeller üretilerek bu modeller kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından her bir eksen için ayrı ayrı elde edilen PGA değerleri arasındaki bağıl

hatalar hesaplanmıştır. Hesaplanan yüzde bağıl hata sonuçlarına göre güvenli aralıkta olduğu düşünülen optimum bir model için model parametreleri seçilmiş ve gerçek arazi modeli üzerindeki çalışmalar bu model parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Optimum model parametrelerini tespit etmek için farklı sayıda düğüm noktası ve eleman için yapılan çalışma sonuçları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Ayrıca eleman sayısına göre bağıl hatadaki değişimi gösteren grafik Şekil 3.1’de verilmiştir. Yapılan dinamik analizlerde 17 Ağustos 1999 Kocaeli Gebze ivme kayıt istasyonu ivme kayıtları kullanılmıştır. Oluşturulan modeller kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarının doğru ve kolay bir şekilde karşılaştırılabilmesi için tüm modellerdeki zemin parametreleri aynı alınmış ve modeller homojen olarak üretilmiştir. Tüm modellerde $V_p= 770$ m/s, $V_s= 240$ m/s, $\rho=1.9$ g/cm³ olarak alınmıştır.

Çizelge 3.1 3-B sonlu eleman modellerinin özellikleri ve dinamik analizden elde edilen PGA değerlerinin yüzde bağıl hata sonuçları

Model No	3-B sonlu eleman modelinin özellikleri					Model 5 (41x11x8) ile arasındaki bağıl hata yüzdesi (PGA)				Dinamik Analiz Çözüm Süresi
	Düğüm Sayısı			Toplam Düğüm Sayısı	Toplam Eleman Sayısı	X	Y	Z	Ort.	
	X	Y	Z							
1	6	6	8	288	1050	17.72	26.71	16.06	20.16	1 dakika
2	11	6	8	528	2100	17.85	24.08	15.08	19.00	2 dakika
3	11	11	8	968	4200	8.31	7.87	12.27	9.48	6 dakika
4	21	11	8	1848	8400	4.29	2.19	5.84	4.11	31 dakika
5	41	11	8	3608	16800	Referans alınan model				93 dakika
6	41	21	8	6888	33600	Çözülemedi				



Şekil 3.1 Eleman sayısına göre bağıl hatadaki değişim

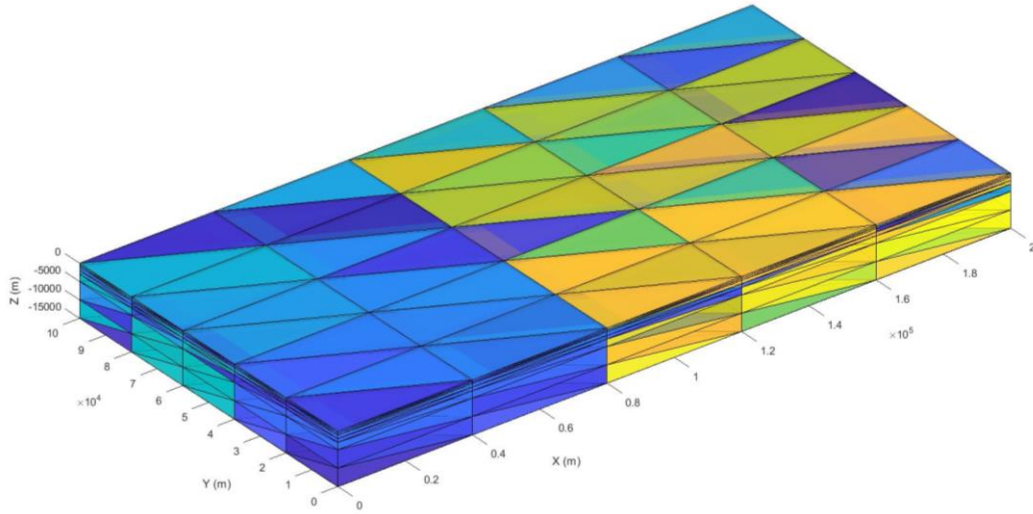
Dinamik analizleri yapabilmek için Intel Core i7 10510U 2.3 GHz 8 çekirdekli 10. nesil işlemciye sahip, 16 GB RAM, 256 GB SSD diske sahip bir bilgisayar sistemi kullanılmıştır. Bilgisayar sisteminin mevcut bellek kapasitesini artırmak amacıyla ayrıca SSD disk üzerinde 40 GB sanal bellek alanı ayrılmıştır. Böylece sistemin toplam fiziksel ve sanal bellek kapasitesi 56 GB'a yükseltilmiştir. Bilindiği gibi Windows işletim sistemi fiziksel bellek yetmediğinde diski belirlenen oranlarda sanal bellek olarak kullanabilmektedir. Ancak diskin sanal bellek olarak kullanılması sırasında işlem hızı düşmektedir. Bu bilgisayar sistemi ile Model 6 için çözüm yapılamamıştır. Model 6'nın düğüm sayısı ve eleman sayısının çokluğu nedeniyle sistemin toplam fiziksel ve sanal belleği yetersiz kalmıştır. Model 5 için yapılan dinamik analizlerde de bellek yetersizliği sorunu ile karşılaşmış, ancak bu problem çözüm sırasında sadece kullanılan dizeylerin bellekte tutularak diğerlerinin kullanılmadığı zamanlarda bellekten silinmesi ve gerektiğinde yeniden yüklenmesi şeklinde yazılıma ilave kodlar eklenmesi sayesinde aşılmıştır. Aynı yöntem Model 6 için de denenmiş ancak bu şekilde de Model 6 çözülememiştir. Diğer modellerin çözümünde herhangi bir problemle karşılaşılmamıştır.

Mevcut bilgisayar olanakları ile çözülebilen en fazla eleman sayısına sahip olan Model5 referans model olarak seçilmiştir. Referans model ile diğer modeller karşılaştırılmış ve yüzde bağıl hatalar hesaplanmıştır. Kullanılan farklı eleman boyutlarındaki 3-B sonlu

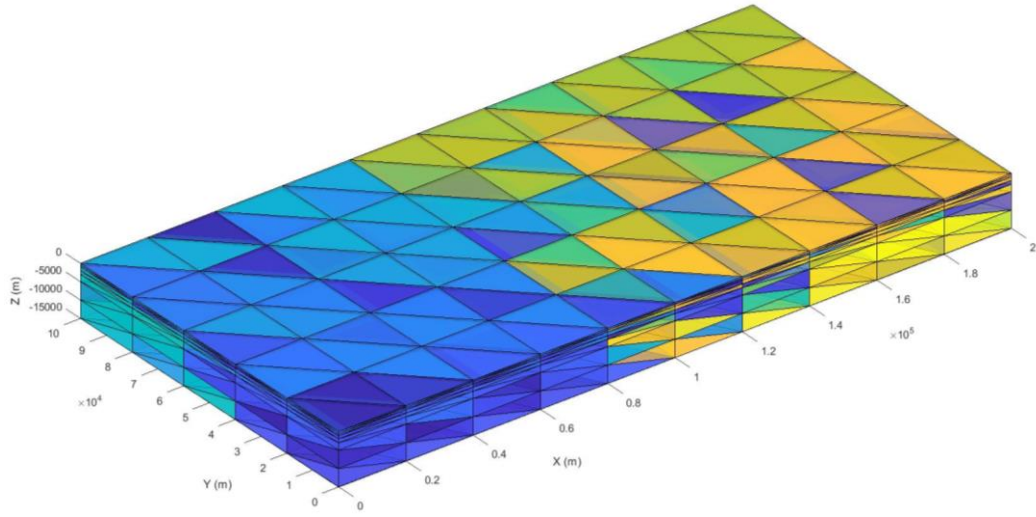
eleman modellerinden elde edilen bağıl hatalar değerlendirildiğinde en uygun modelin Model 4 olduğu sonucuna varılmıştır. Model 4 ile Model 5 arasındaki bağıl hata % 4.11 düzeyine kadar indiğinden Model 4 ile elde edilecek dinamik analiz sonuçlarının yeterli çözüm hassasiyetine sahip olduğu düşünülmüştür. Aynı zamanda Model 4 kullanılarak yapılacak çok sayıda dinamik analizlerin işlem süresinin yeterli çözüm hızına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan model testleri topoğrafyasız modeller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Modele yüzey topoğrafyası katmanı eklendiğinde modeldeki düğüm ve eleman sayısı daha da artmaktadır.

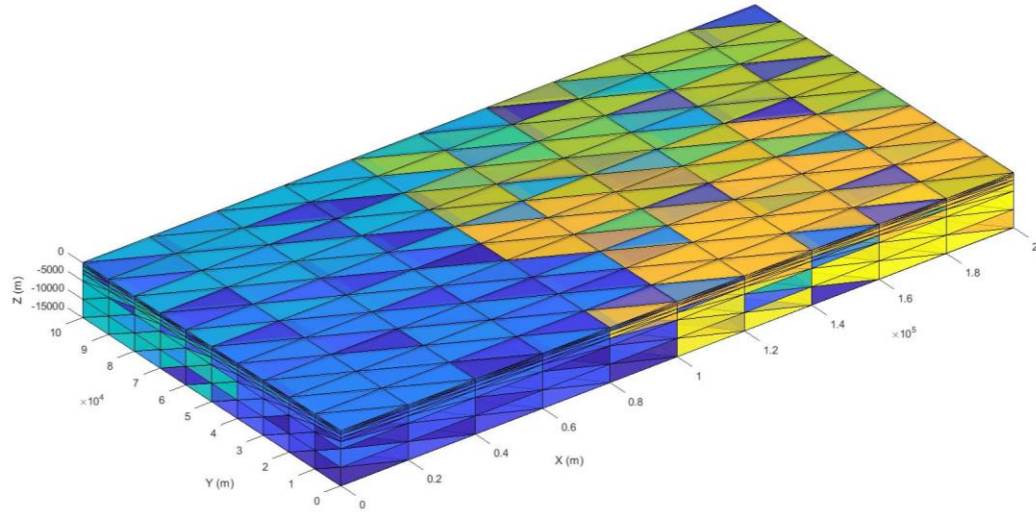
Çizelge 3.1’de düğüm ve eleman sayıları verilen 3-B sonlu eleman modelleri aşağıdaki şekillerde (Şekil 3.2-3.6) gösterilmiştir.



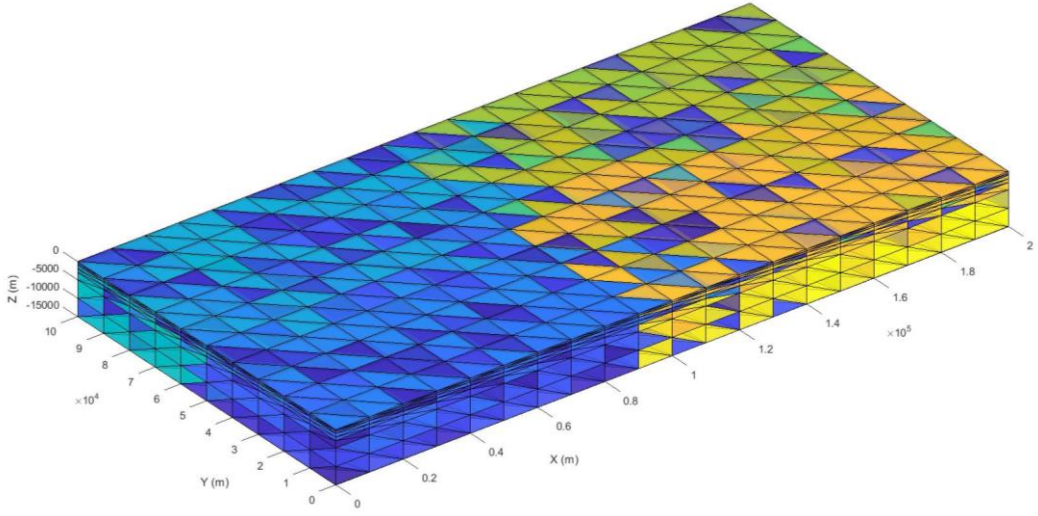
Şekil 3.2 Model 1, toplam eleman sayısı 1050



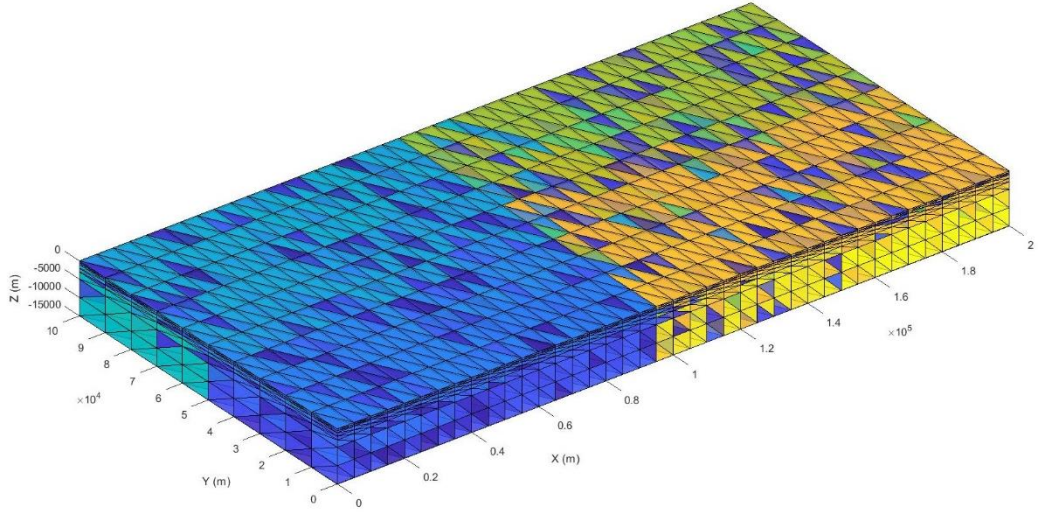
Şekil 3.3 Model 2, toplam eleman sayısı 2100



Şekil 3.4 Model 3, toplam eleman sayısı 4200



Şekil 3.5 Model 4, toplam eleman sayısı 8400



Şekil 3.6 Model 5, toplam eleman sayısı 16800

Çizelge 3.1’de düğüm ve eleman sayıları verilen modellere ait yüzeydeki düğüm numaralarının model üzerinde yerleşimlerini ve koordinat olarak aynı noktalara karşılık gelecek şekilde bağıl hataların hesaplandığı düğümler aşağıdaki şekillerde (Şekil 3.7-3.10) gösterilmiştir. En dış kenarlarda kalan düğümler sınır koşulları ve yansımalarından kaynaklı olarak sonuçları etkileyebileceği düşünülerek bağıl hata hesaplamalarına dahil edilmemiştir. Model 5, mevcut bilgisayar sistemi ile çözülebilen en fazla eleman sayısına

sahip model olduğundan, bağıl hatalar bu model ile diğer modelleri karşılaştırarak hesaplanmıştır.

Model 4																				
211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231
190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189
148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147
106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21

Model 5																																								
411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451
370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410
329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369
288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328
247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287
206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246
165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205
124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164
83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123
42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41

Şekil 3.7 Model 4 ve Model 5 için karşılıklı bağıl hataların hesaplandığı aynı koordinatlara karşılık gelen yüzeydeki düğüm numaraları (sarı)

Model 3																			
111		112		113		114		115		117		118		119		120		121	
100		101		102		103		104		105		106		107		108		109	110
89		90		91		92		93		94		95		96		97		98	99
78		79		80		81		82		83		84		85		86		87	88
67		68		69		70		71		72		73		74		75		76	77
56		57		58		59		60		61		62		63		64		65	66
45		46		47		48		49		50		51		52		53		54	55
34		35		36		37		38		39		40		41		42		43	44
23		24		25		26		27		28		29		30		31		32	33
12		13		14		15		16		17		18		19		20		21	22
1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	11

Model 5																																								
411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451
370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410
329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369
288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328
247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287
206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246
165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205
124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164
83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123
42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41

Şekil 3.8 Model 3 ve Model 5 için karşılıklı bağıl hataların hesaplandığı aynı koordinatlara karşılık gelen yüzeydeki düğüm numaraları (sarı)

Model 2										
56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Model 5																																								
411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451
370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410
329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369
288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328
247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287
206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246
165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205
124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164
83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123
42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41

Şekil 3.9 Model 2 ve Model 5 için karşılıklı bağıl hataların hesaplandığı aynı koordinatlara karşılık gelen yüzeydeki düğüm numaraları (sarı)

Model 1										
31	32	33	34	35	36					
25	26	27	28	29	30					
19	20	21	22	23	24					
13	14	15	16	17	18					
7	8	9	10	11	12					
1	2	3	4	5	6					

Model 5																																								
411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451
370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410
329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369
288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328
247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287
206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246
165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205
124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164
83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123
42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41

Şekil 3.10 Model 1 ve Model 5 için karşılıklı bağıl hataların hesaplandığı aynı koordinatlara karşılık gelen yüzeydeki düğüm numaraları (sarı)

4. YÜZEY TOPOĞRAFYASININ ZEMİN BÜYÜTMESİNE ETKİSİ

Deprem dalgaları yer kürede ilerlerken genlikleri, frekans içerikleri ve sürelerinde birtakım farklılıklar meydana gelir. Bu farklılıkların birçok nedeni olabilir. Bu nedenler arasında, yüzeydeki zemin tabakası ile daha alttaki tabakalar ve ana kaya arasındaki yoğunluk ve sismik hızlardan kaynaklanan empedans farkları, taban kaya derinliği, yüzeydeki zemin tabakalarının kalınlığı, zemin tabakalarının fiziksel ve dinamik özellikleri, yanal süreksizlikler, ana kaya eğimi ve yüzey topoğrafyasının özellikleri sayılabilir.

Topoğrafyanın kuvvetli yer hareketlerinin üzerindeki etkisi literatürde birçok çalışmaya konu olmuştur. Haşal (2009) tarafından topoğrafik düzensizliklerin zemin büyütmesine etkisi araştırılmıştır. Haşal (2009) çalışmasında topoğrafik özellikleri hem yüzeyde hem de yüzey altındaki tabakaların geometrik özellikleri olarak tanımlamaktadır. Haşal (2009) çalışmasında elde ettiği sonuçları değerlendirirken, “Zemin tabakalarının yatay yönde sınırlı genişliğe sahip olması, ova ve vadi kenarlarında dalga hareketi dönüşümlerine ve yüzey dalgalarının oluşmasına sebep olmakta, 2-B rezonans modelleri ortaya çıkmakta, yer hareketinin frekans içeriği ve genliği ova ve vadilerin ortasından kenarlarına doğru uzaklığa bağlı olarak değişmekte, dik yamaç ve tepelerde ani şiddet artışları oluşabilmektedir” demektedir. Beliceli (2006) yapmış olduğu çalışmada, topoğrafik olarak düz serbest yüzeyde tepe teşkil eden bölgelerde SH dalgalarının tepe üstünde en yüksek amplifikasyon değerine ulaşacağını, topoğrafik olarak vadi olan bölgelerde de vadi tabanında deamplifikasyon olacağını, büyütmenin yatay bileşenlerde daha belirgin olduğunu ve topoğrafyanın eğimi, deprem dalgasının geliş açısı ve yönüyle de ilişkili olduğunu söylemiştir. Jibson (1987) yapmış olduğu çalışmada bir yamacın tepe noktasında ölçülen ortalama en büyük ivmenin tabandaki ivmeye göre 2.5 kat fazla olduğunu söylemiştir. Bard ve Bouchon (1980a), Bard ve Bouchon (1980b) yaptıkları çalışmalarda alüvyon vadilerde kuvvetli yer hareketlerinin etkilerinin 1-B analizlerle tahmin edilemeyeceğini ortaya koymuşlardır. Bard ve Bouchon (1985) yaptıkları çalışmada alüvyon bir vadi üzerinde P, SV ve SH dalgalarının vadi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu araştırmada spektral büyütmelemin 1-B analiz ile elde edilen sonuçlara göre yaklaşık 4 kat daha büyük olabileceğini göstermişlerdir. Bard ve Gariel (1986) sığ

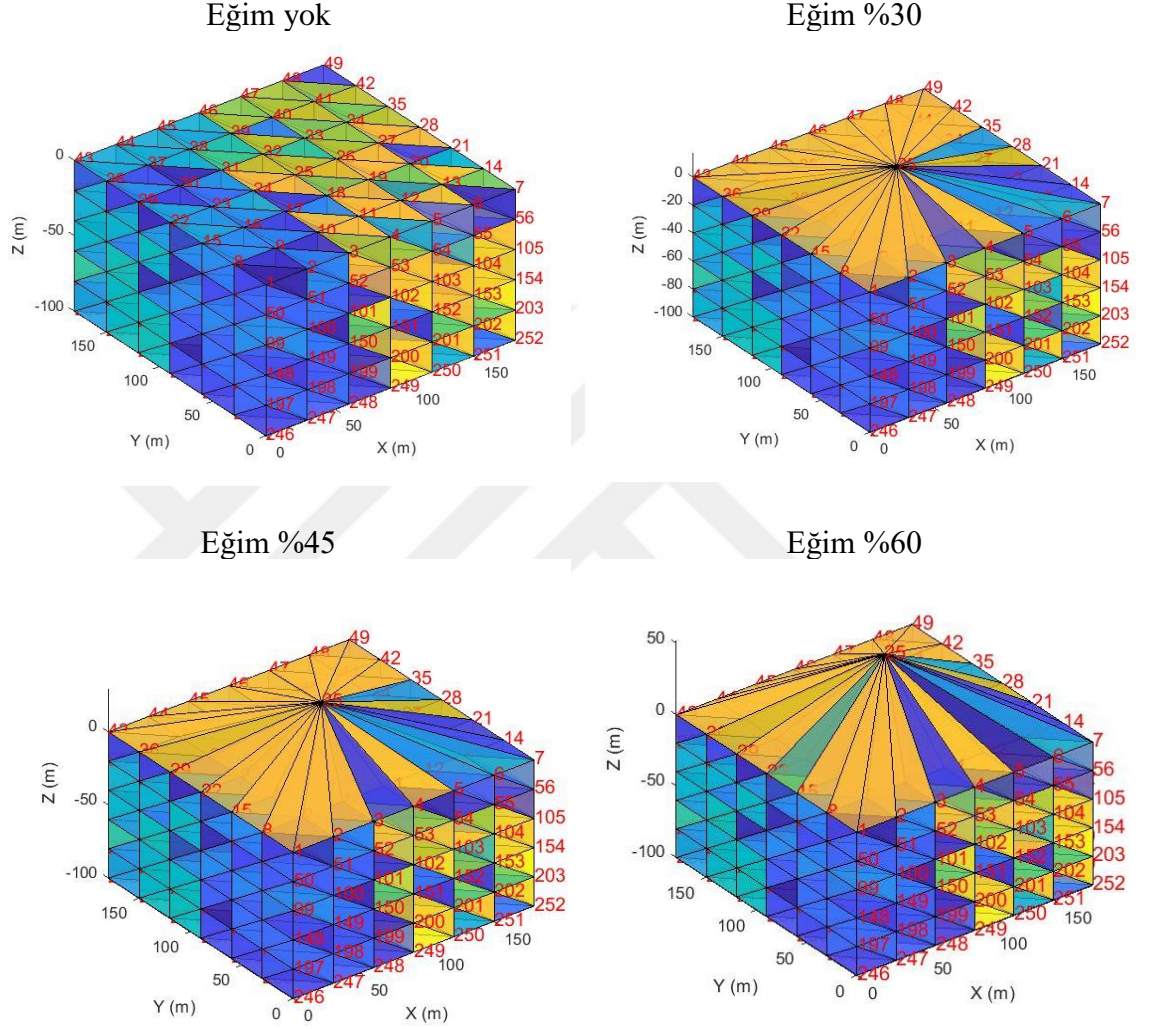
ve derin vadilerde 1-B ve 2-B analizler yapmışlar ve özellikle vadi ortasından vadi kenarlarına doğru gidildikçe transfer fonksiyonlarının birbirinden giderek farklılaştığını, vadi kenarında ise tamamen birbirinden farklı olduğunu söylemişlerdir. Rassem vd. (1995), Rassem vd. (1997) yaptıkları çalışmalarda vadi derinliğinin hâkim periyoda etkisinin vadi genişliğinden daha fazla olduğunu belirtmişler, vadi kenarındaki eğimin artmasıyla vadi ortasındaki spektral büyütme artacağını söylemişlerdir. Rassem vd. (1997) vadinin ortasındaki yerel zemin hâkim periyodunun vadinin diğer bölgelerine göre daha yüksek olduğunu söylemiştir.

Bu çalışmada zemin tabakalarının ve onun altındaki tabakaların sismik hızları ve yoğunlukları için mevcut literatürdeki bilgiler kullanılarak farklı 3-B sonlu eleman modelleri hazırlanmıştır. Bu modeller kullanılarak topoğrafyanın etkisi araştırılmıştır. Topoğrafya etkisi araştırılırken;

1. Hazırlanan yapay 3-B sonlu eleman modellerinin yüzeylerinde herhangi bir yükselti (eğim) olmayan ve farklı eğimlerde yükselti olan modellerin dinamik analizleri sonucunda elde edilen PGA grafikleri karşılaştırılmıştır.
2. Aynı modeller farklı giriş ivmelerine maruz bırakılarak yapılan dinamik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.
3. X ve Y yönünde daha büyük yeni modeller hazırlanarak daha geniş düzlükler üzerinde farklı eğimlerdeki yükselti etkileri araştırılmıştır.
4. Örnek 3'teki modeller için 17 Ağustos 1999 deprem ivme kaydı kullanılarak dinamik analizler yeniden yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.
5. Örnek 5'te ise Marmara bölgesi için seçilen çalışma alanının yüzeyi düz ve gerçeğe uygun topoğrafyalı olacak şekilde iki farklı model oluşturularak bu modeller üzerinde 17 Ağustos 1999 deprem ivme kaydı kullanılarak dinamik analizler yapılmıştır. Sonuçlar detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlarda seçilen bir hat boyunca (X eksen) düğüm noktalarındaki çıkış ivme değerlerinin X, Y ve Z bileşenleri ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Yine seçilen bir Z eksen hattı boyunca yukarıdan aşağı doğru ivme bileşenlerinin çıkışları ve elemanlardaki gerilmeler karşılaştırılmıştır.

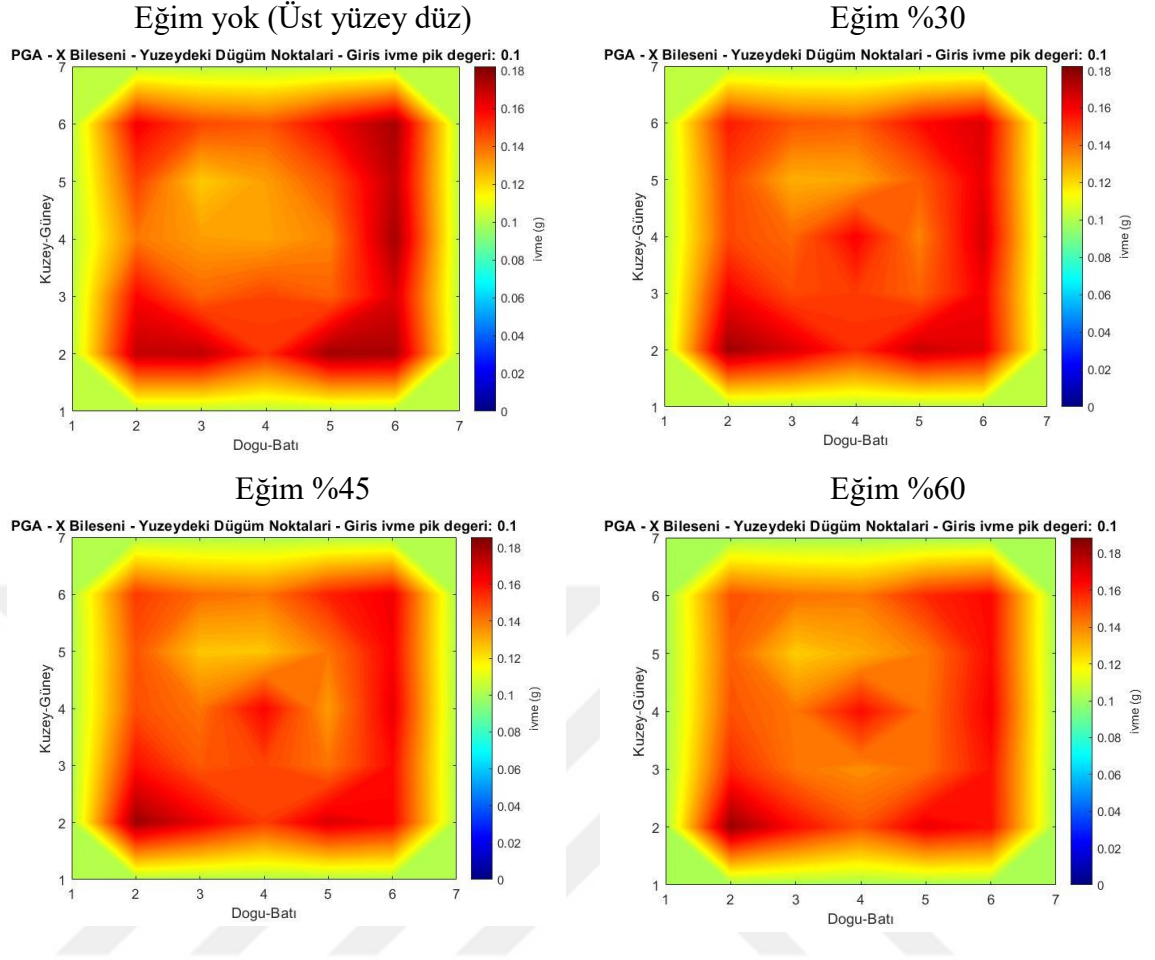
Kullanılan yapay modeller (Şekil 4.1) homojen olup, zemin parametreleri aşağıdaki gibidir.

$$V_p=770 \text{ m/s}, V_s=240 \text{ m/s}, \rho=1.9 \text{ g/cm}^3$$

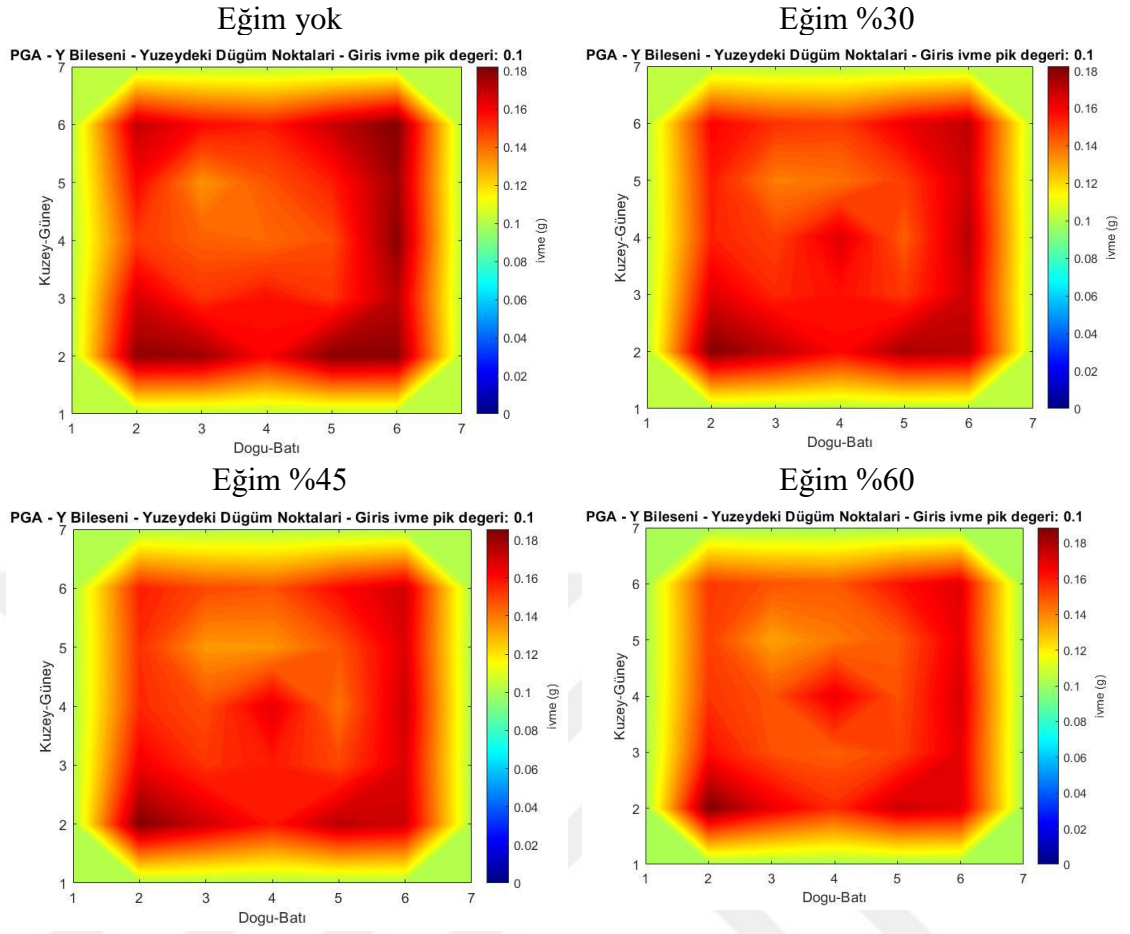


Şekil 4.1 Yüzey topoğrafyası farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri

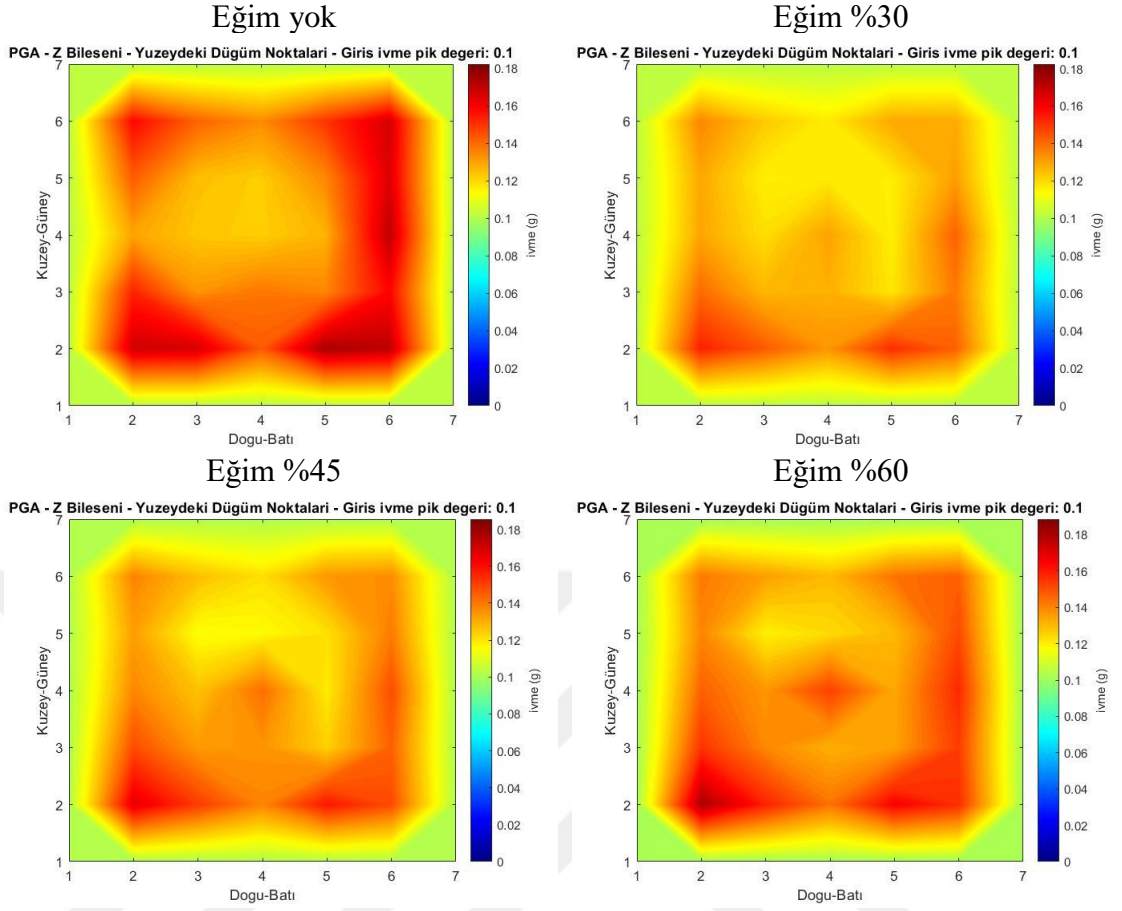
Örnek 1: Bu örnekte giriş ivmesi tüm zamanlarda ve tüm bileşenlerde sabit 0.1g olarak verilmiştir. Bazı örneklerde farklı ivmelerdeki sonuçları araştırmak için çok farklı giriş ivmeleri kullanıldığından her örnekteki renk skalaları kendi içinde aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. Üst yüzey hariç tüm yüzeylerde sınır koşulları uygulanmıştır.



Şekil 4.2 Yüzey topoğrafyası farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen X eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.1g)

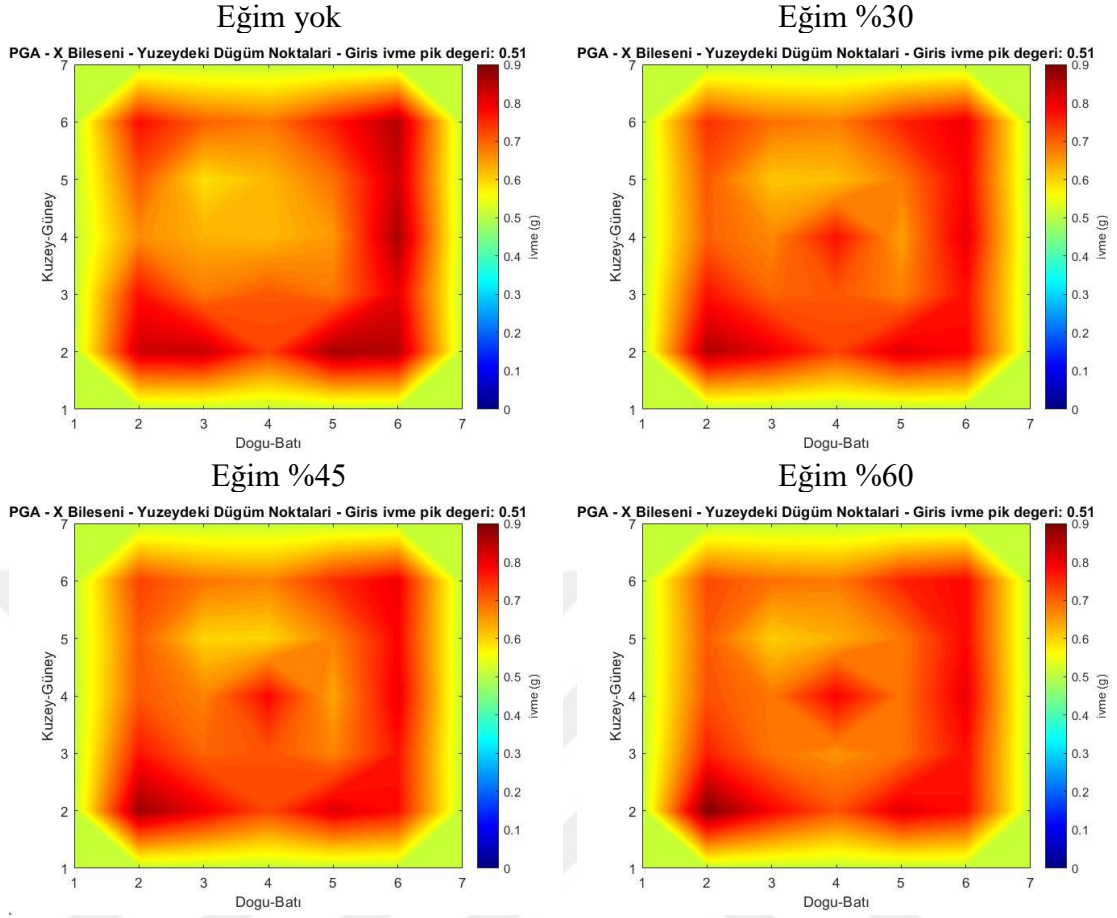


Şekil 4.3 Yüzey topoğrafyası farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Y eksenine ait PGA grafikleri (giris ivmesi 0.1g)

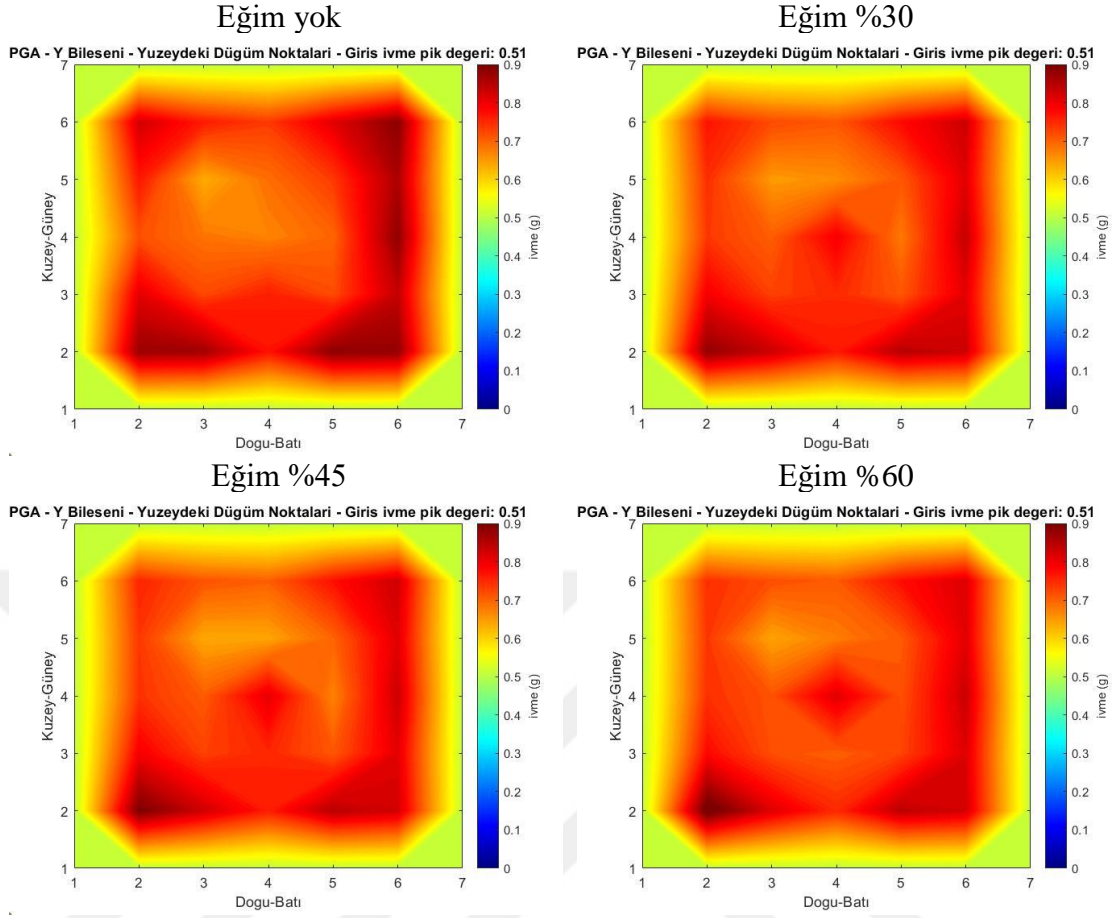


Şekil 4.4 Yüzey topoğrafyası farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Z eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.1g)

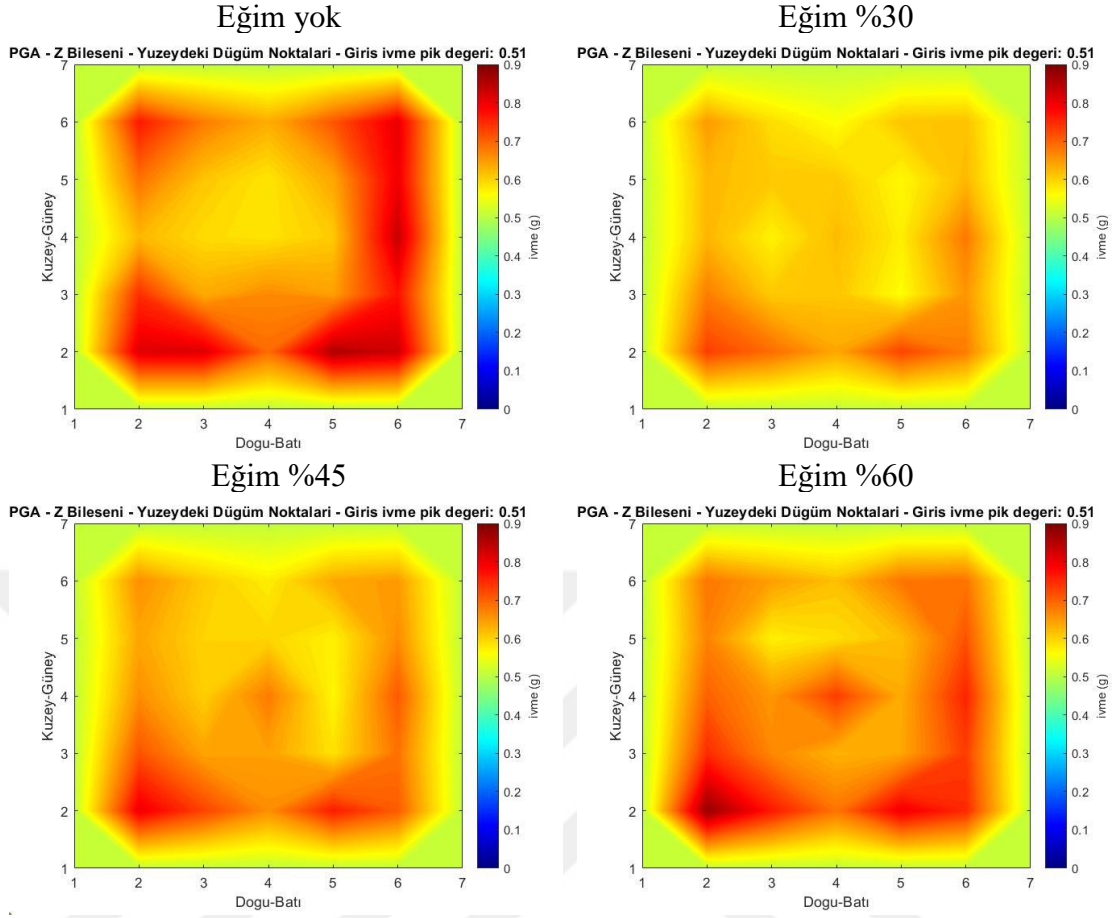
Örnek 2: Bu örnekte giriş ivmesi tüm zamanlarda ve tüm bileşenlerde sabit 0.51g olarak verilmiştir. Örnek 1 ile aynı 3-B sonlu eleman modelleri kullanılmıştır. Üst yüzey hariç tüm yüzeylerde sınır koşulları uygulanmıştır.



Şekil 4.5 Yüzey topoğrafyası farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen X eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.51g)



Şekil 4.6 Yüzey topoğrafyası farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Y eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.51g)



Şekil 4.7 Yüzey topoğrafyası farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Z eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.51g)

Örnek 3: Bu örnekte giriş ivmesi tüm zamanlarda ve tüm bileşenlerde sabit 0.1g olarak verilmiştir. 3-B sonlu eleman model boyutu X ve Y yönlerinde 2 kat büyütülmüştür. X ve Y yönünde modelin uzunluğu birbirine komşu düğüm noktalarının arasında ortalama uzaklığın 10 katından fazla olacak şekilde (12 katı) artırılmıştır. Üst yüzey hariç tüm yüzeylerde sınır koşulları uygulanmıştır.

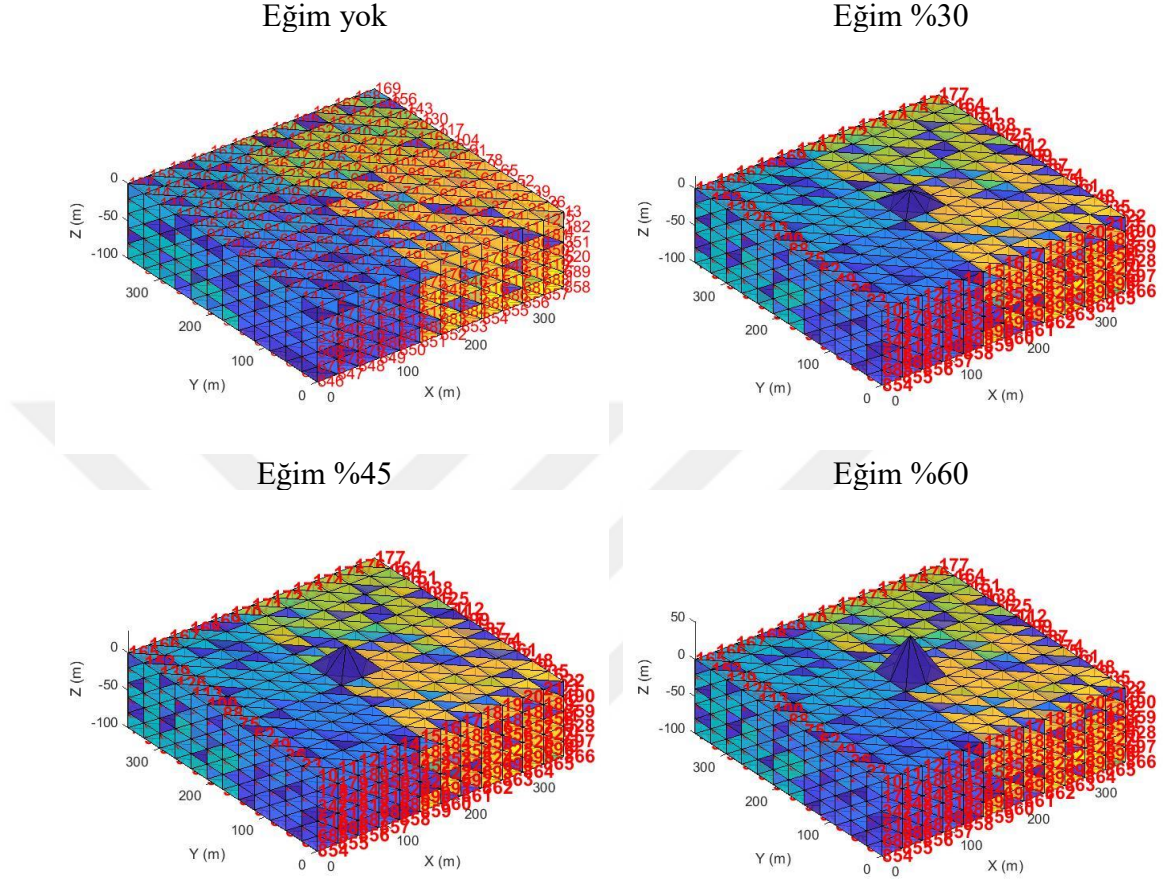
Aynı düzlemde birbirine en yakın düğüm noktaları arasındaki uzaklık: 30m

3-B sonlu eleman modelinin boyutları:

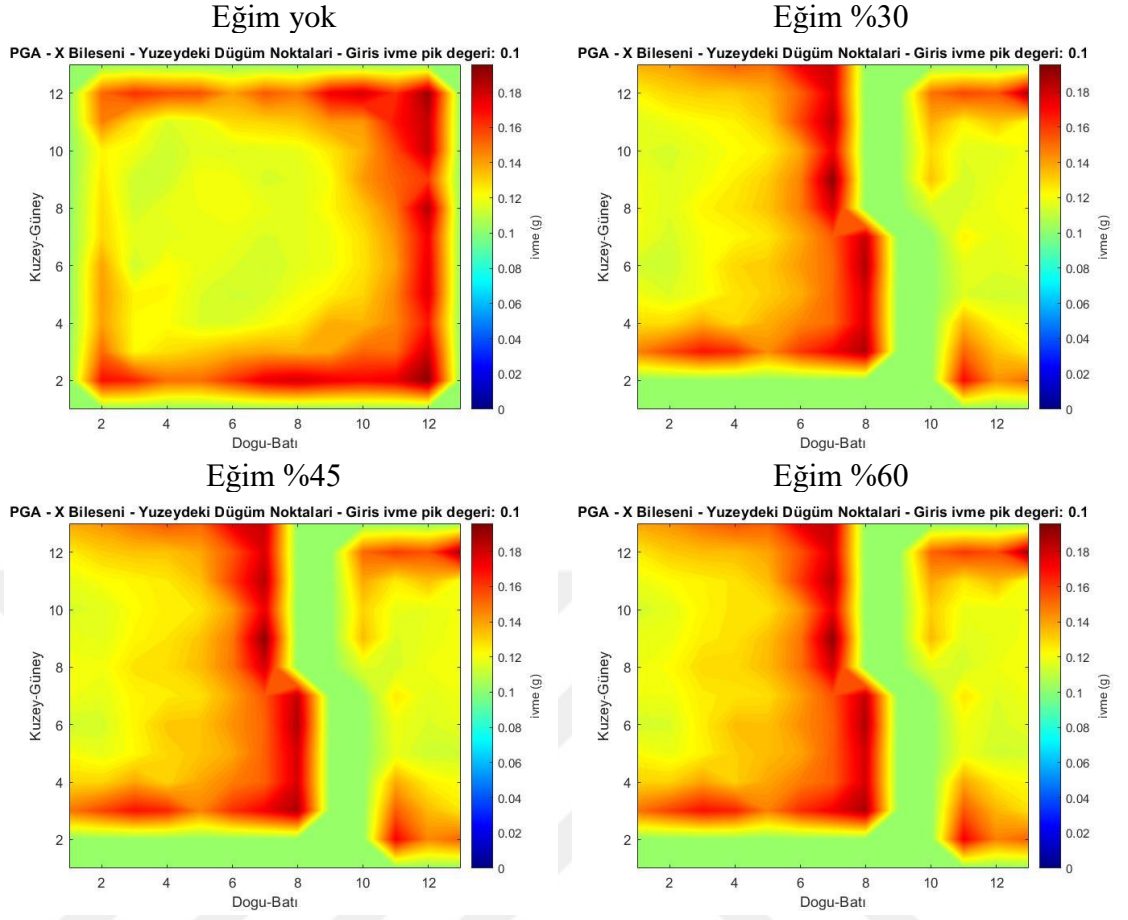
X=360m, Y=360m, Z=100m

Kullanılan modeller homojen olup, zemin parametreleri aşağıda verilmiştir.

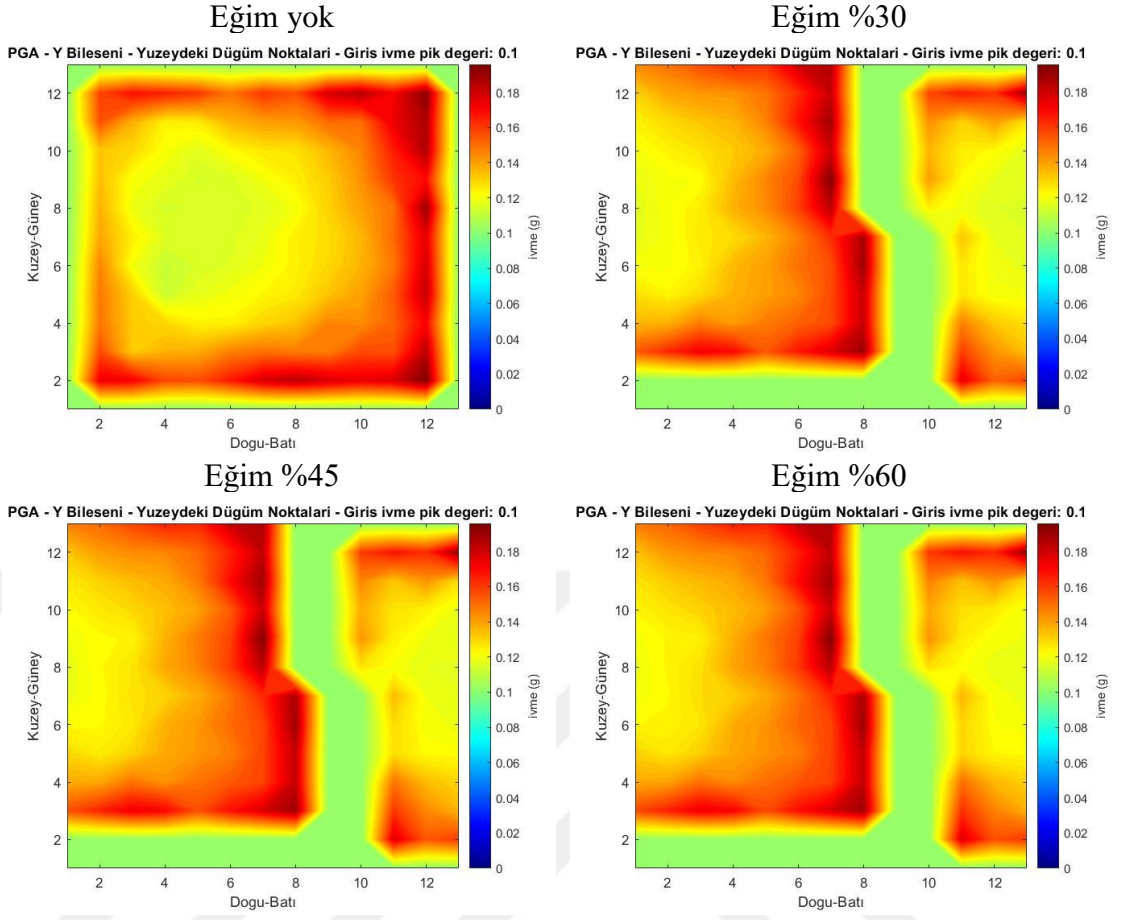
$$V_p=770 \text{ m/s}, V_s=240 \text{ m/s}, \rho=1.9 \text{ g/cm}^3$$



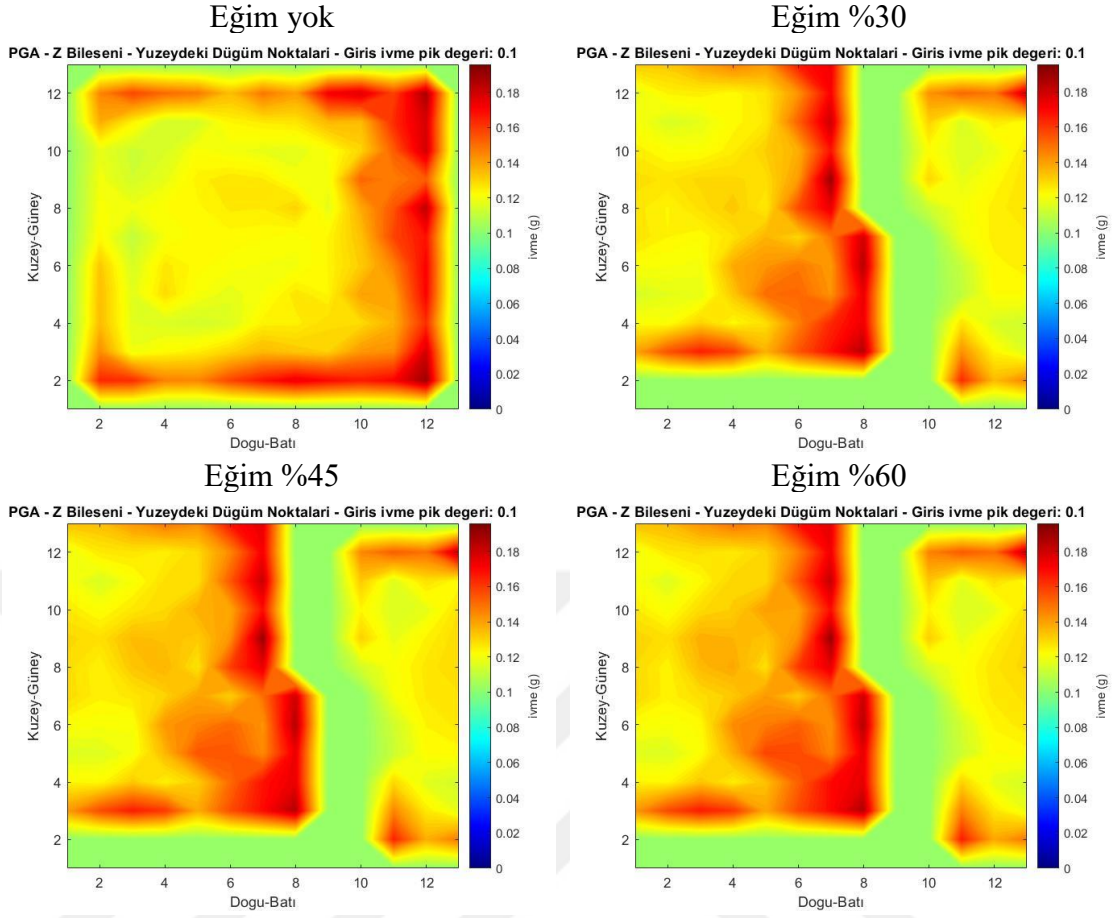
Şekil 4.8 Yüzey topoğrafyası görece daha geniş alana sahip 3-B sonlu eleman modelleri



Şekil 4.9 Yüzey topoğrafyası görece daha geniş alana sahip ve farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen X eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.1g)

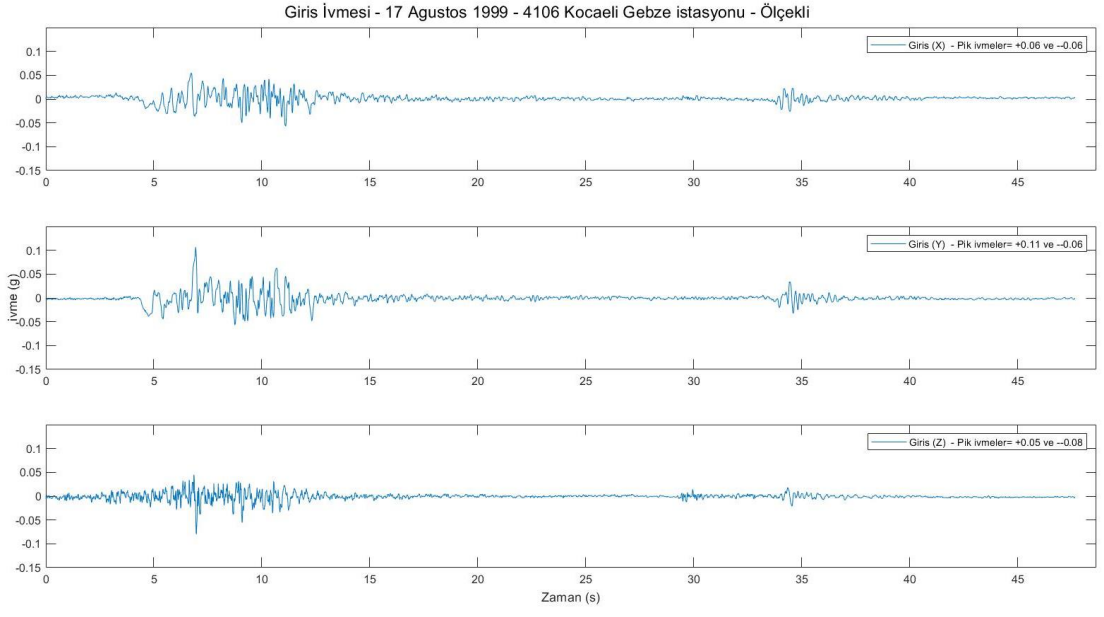


Şekil 4.10 Yüzey topoğrafyası görece daha geniş alana sahip ve farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Y eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.1g)

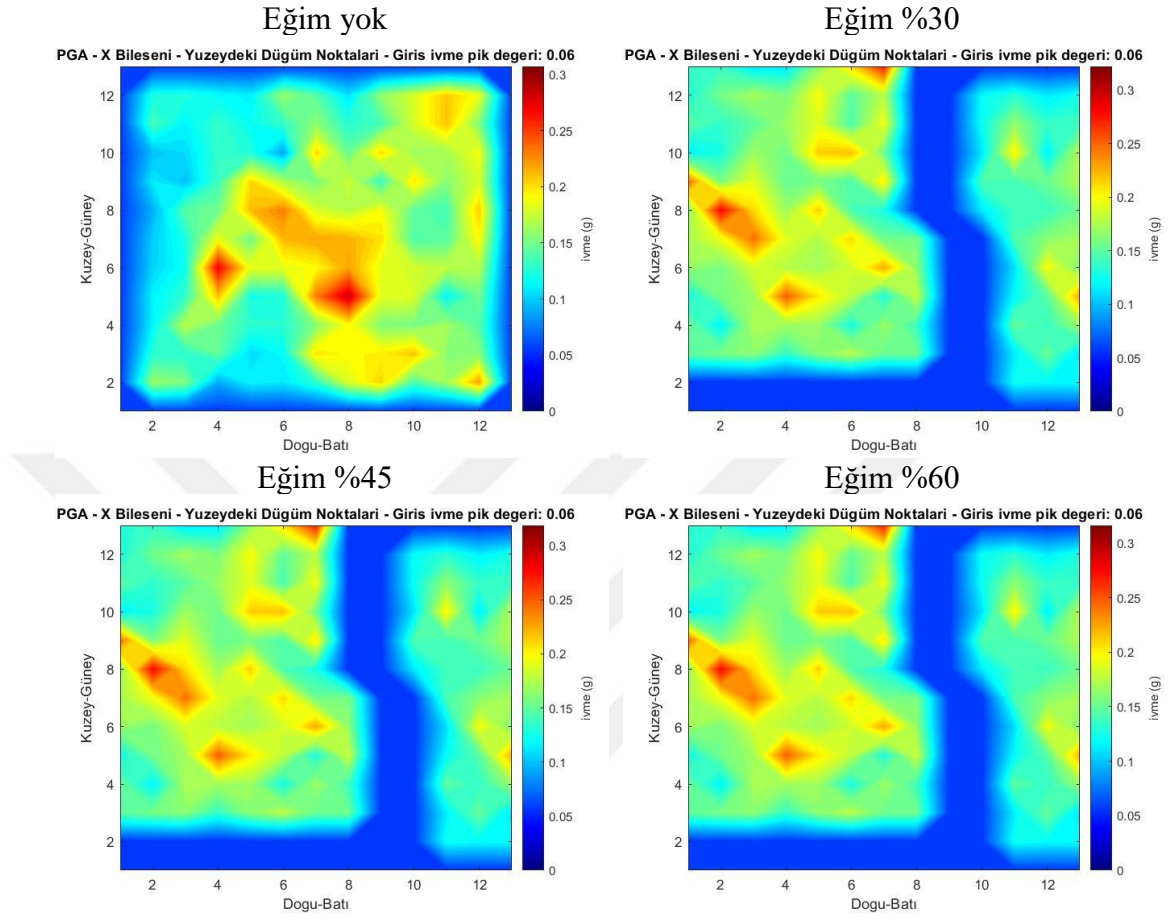


Şekil 4.11 Yüzey topoğrafyası görece daha geniş alana sahip ve farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Z eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 0.1g)

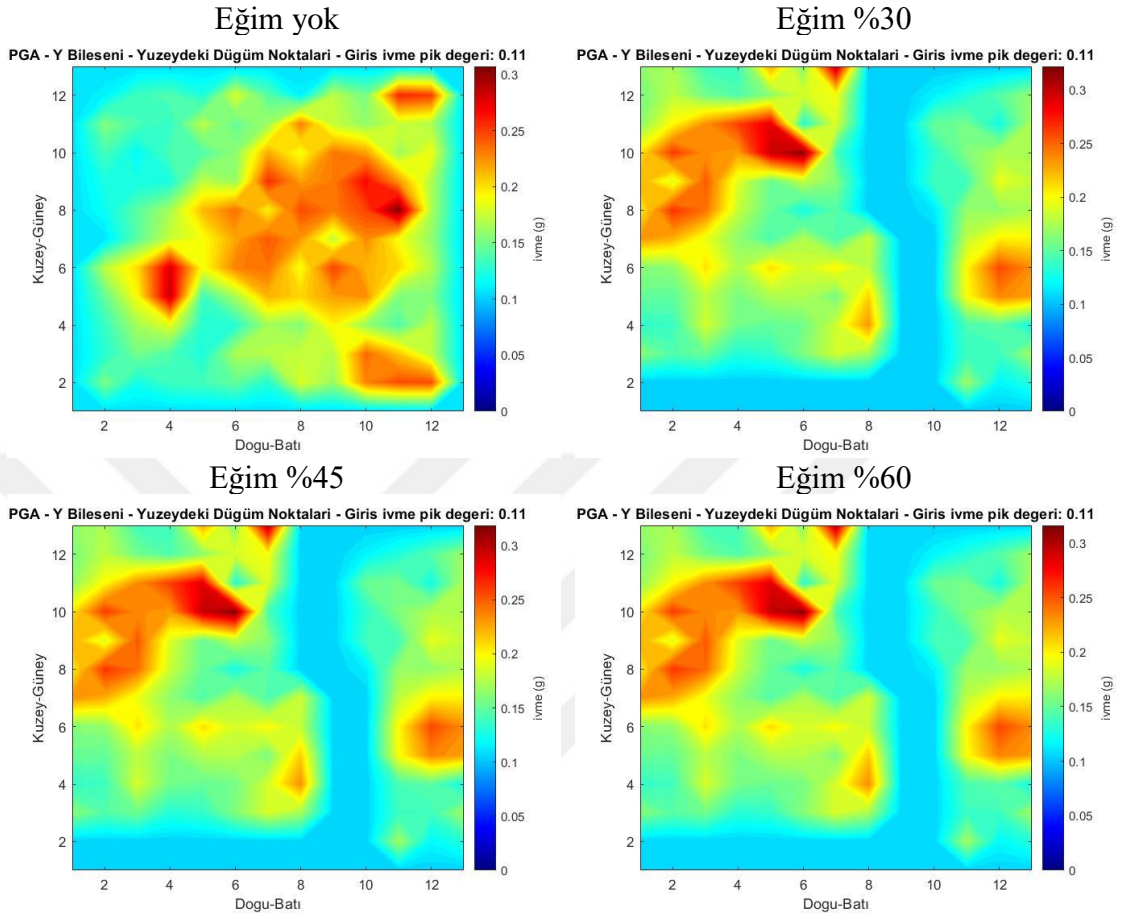
Örnek 4: Bu örnekte giriş ivmesi olarak 17 Ağustos 1999 tarihli 4106 Kocaeli Gebze istasyon kaydı ölçeklenerek verilmiştir. 3-B sonlu eleman modeli olarak Örnek 3'teki modeller kullanılmıştır. Üst yüzey hariç tüm yüzeylerde sınır koşulları uygulanmıştır.



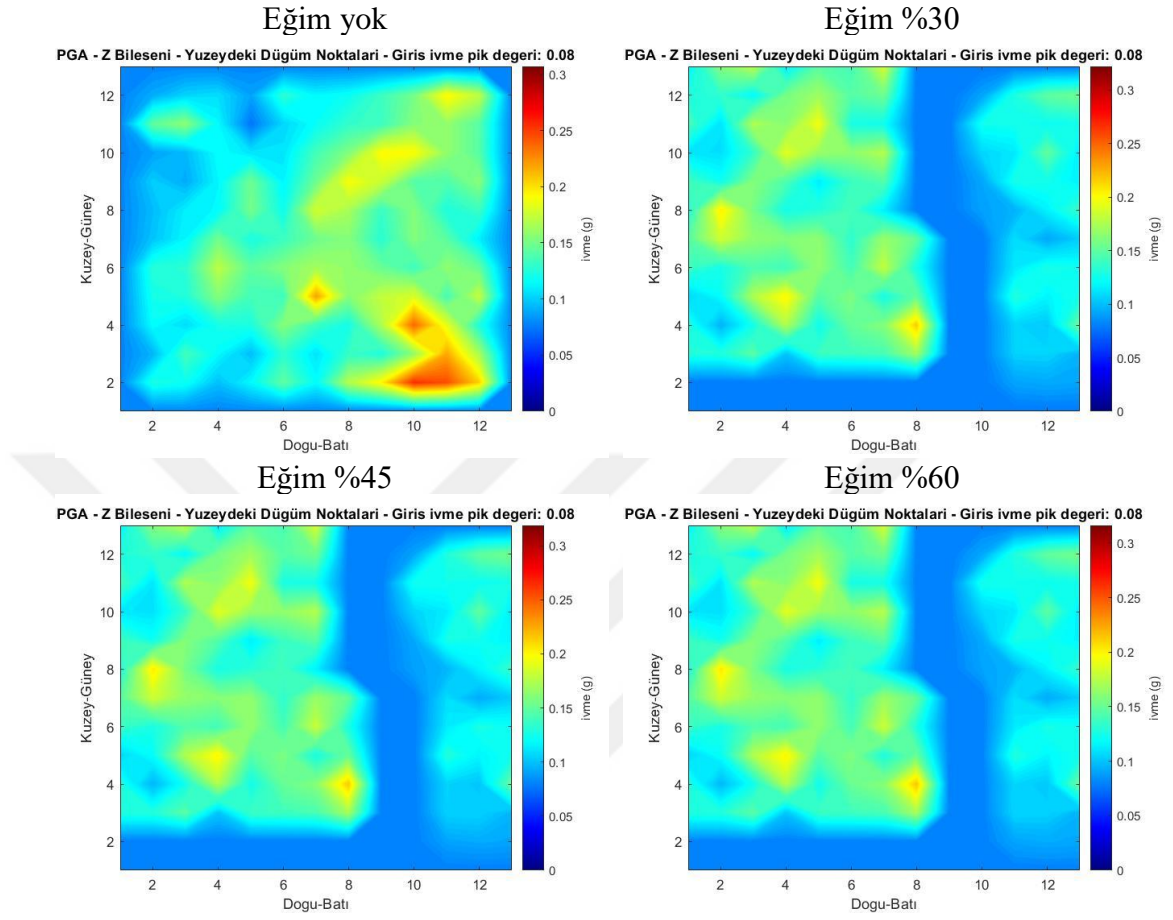
Şekil 4.12 Giriş ivmesi olarak kullanılan 17 Ağustos 1999 tarihli 4106 Kocaeli Gebze istasyon kaydı (ölçekli)



Şekil 4.13 Yüzey topoğrafyası görece daha geniş alana sahip ve farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen X eksenine ait PGA grafikleri (giris ivmesi 17 Ağustos 1999 tarihli ölçekli 4106 Kocaeli Gebze istasyon kaydı)



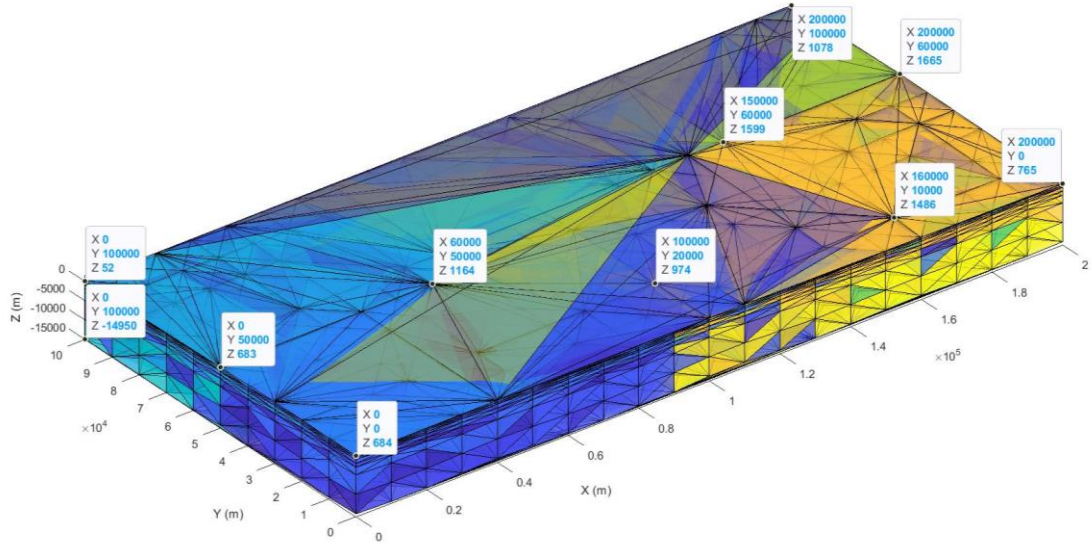
Şekil 4.14 Yüzey topoğrafyası görece daha geniş alana sahip ve farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Y eksenine ait PGA grafikleri (giris ivmesi 17 Ağustos 1999 tarihli ölçekli 4106 Kocaeli Gebze istasyon kaydı)



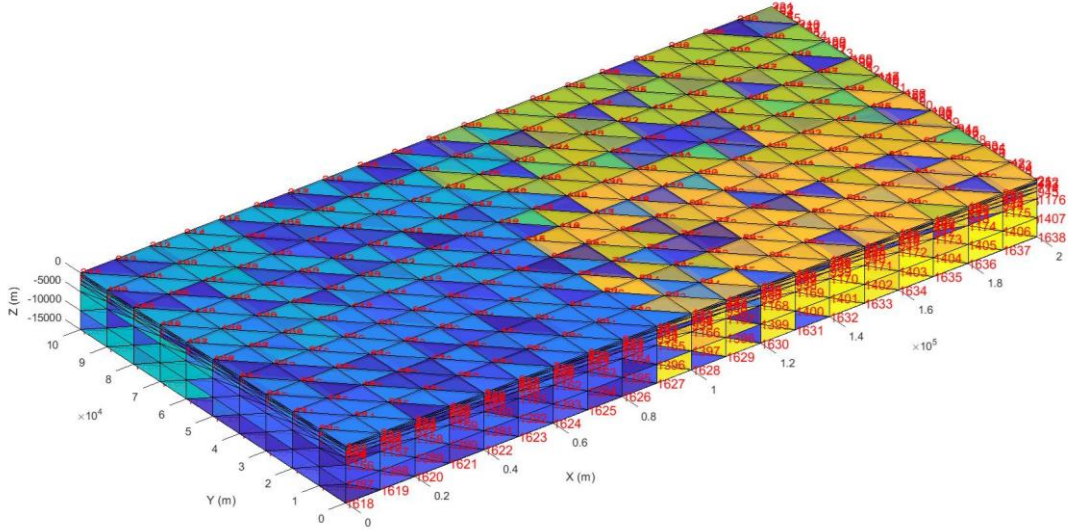
Şekil 4.15 Yüzey topoğrafyası görece daha geniş alana sahip ve farklı olan 3-B sonlu eleman modelleri kullanılarak yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen Z eksenine ait PGA grafikleri (giriş ivmesi 17 Ağustos 1999 tarihli ölçekli 4106 Kocaeli Gebze istasyon kaydı)

Örnek 5: Marmara bölgesinde seçilen çalışma alanı için hazırlanan gerçek arazi modeli kullanılarak yüzey topoğrafyası dahil edilmiş ve dahil edilmemiş iki ayrı 3-B sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Her iki model üzerinde yapılacak olan dinamik analiz için giriş ivmesi olarak 17 Ağustos 1999 tarihli 4106 Kocaeli Gebze istasyon kaydı ölçeklenerek verilmiştir. Bu istasyon, modelin kuzey-batı köşesine yakın olduğu için modelin kuzey ve batısındaki yüzeyler (1.YZ ve 2.XZ düzlemleri) sınır koşullarının ve giriş ivmesinin geldiği yüzeyler olarak kullanılmıştır. 3-B sonlu eleman modelindeki zemin parametreleri literatürdeki yayınlardan faydalanılarak tanımlanmıştır. Bu nedenle model her doğrultuda heterojen olup, modeldeki her bir düğüm noktasında ve elemanda farklılık gösterebilmektedir. 3-B sonlu eleman modelinin sınırlarındaki yansımaları önlemek için en dıştaki düğüm noktalarını sonsuzu temsil edebilecek şekilde düğüm noktaları arasındaki ortalama uzaklığın 20 katı dört bir yönde modelin dışına doğru taşınmıştır.

Yüzey Topoğrafyalı 3-B Sonlu Eleman Modeli



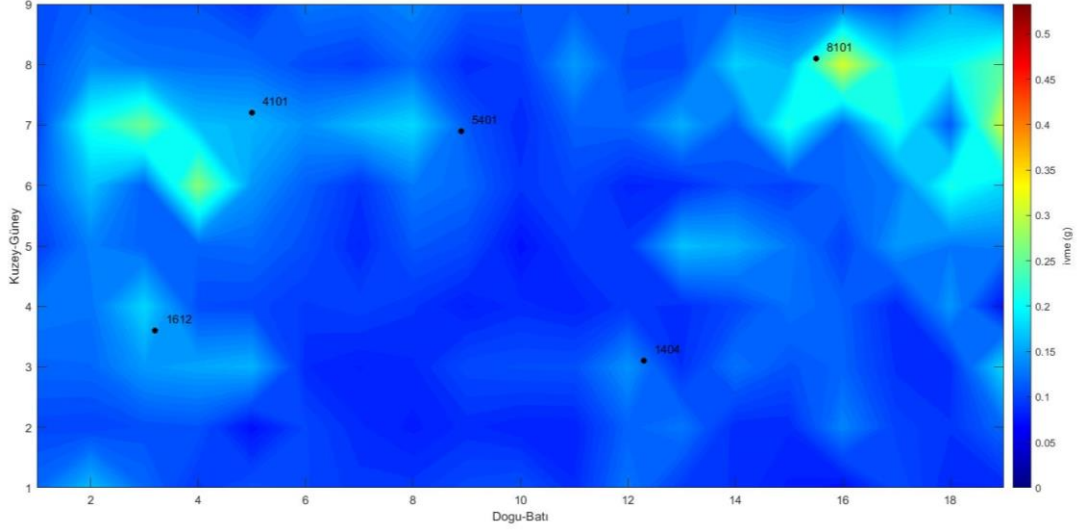
Yüzey Topoğrafyasız 3-B Sonlu Eleman Modeli



Şekil 4.16 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek araziye uygun 3-B sonlu eleman modelleri

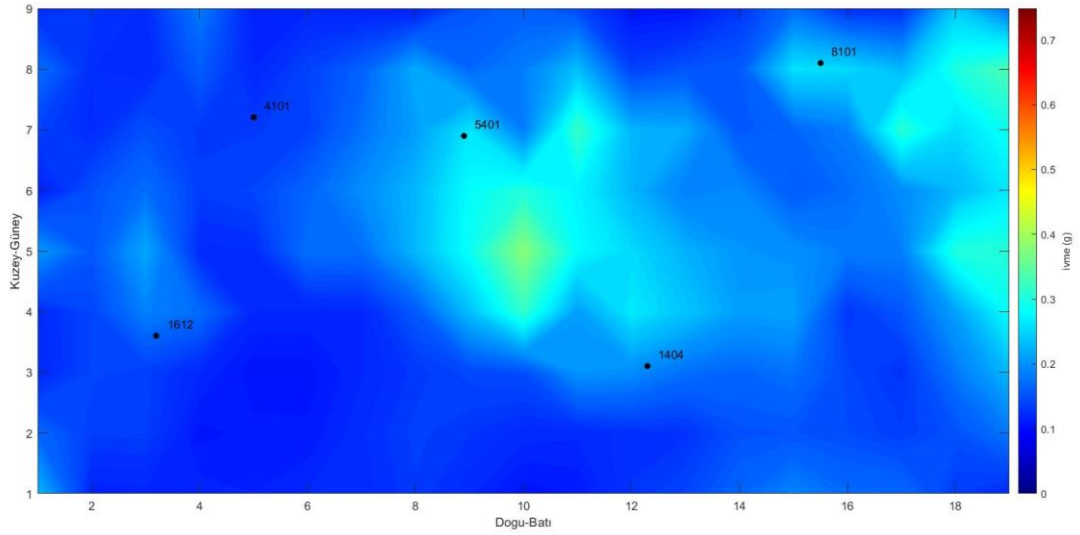
Yüzey Topoğrafyalı

Gerçek Arazi Modeli - PGA - X Bileseni - Yuzeydeki Dügüm Noktalari - Giris ivme pik degeri: 0.057



Yüzey Topoğrafyasız

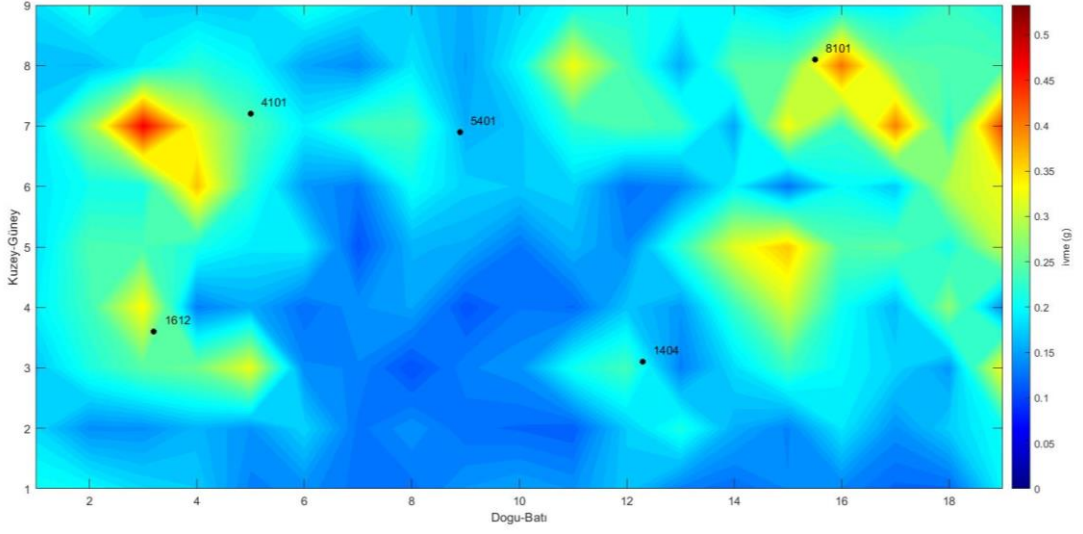
Gerçek Arazi Modeli - PGA - X Bileseni - Yuzeydeki Dügüm Noktalari - Giris ivme pik degeri: 0.057



Şekil 4.17 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen X bileşenine ait PGA grafikleri

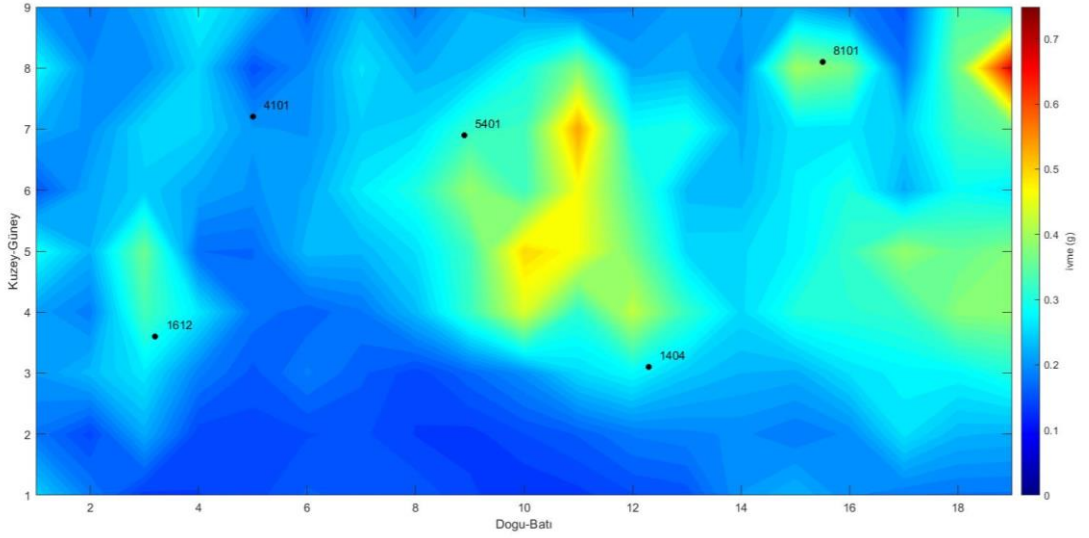
Yüzey Topoğrafyalı

Gerçek Arazi Modeli - PGA - Y Bileseni - Yuzeydeki Dügüm Noktalari - Giris ivme pik degeri: 0.107



Yüzey Topoğrafyasız

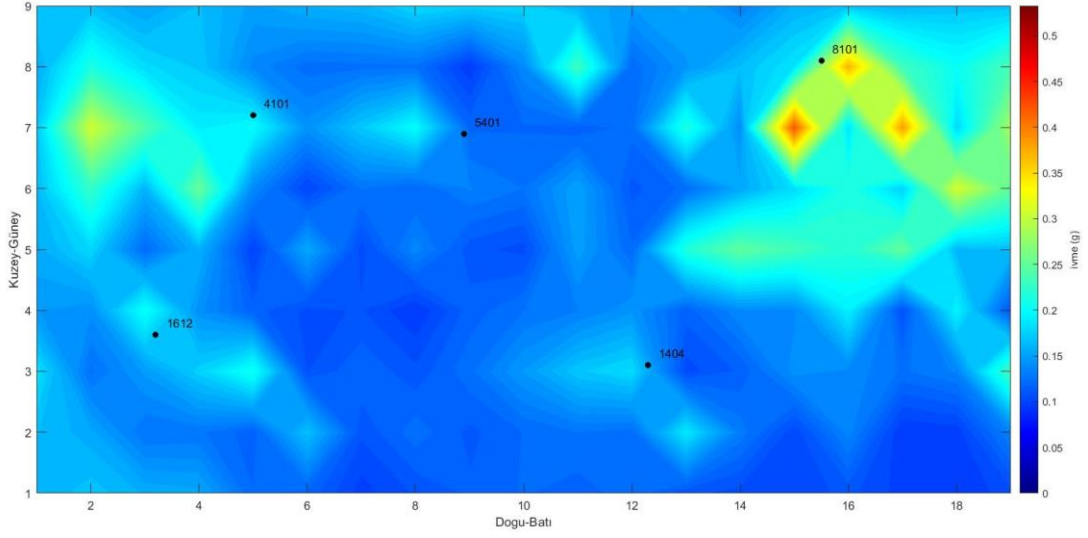
Gerçek Arazi Modeli - PGA - Y Bileseni - Yuzeydeki Dügüm Noktalari - Giris ivme pik degeri: 0.107



Şekil 4.18 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen Y bileşenine ait PGA grafikleri

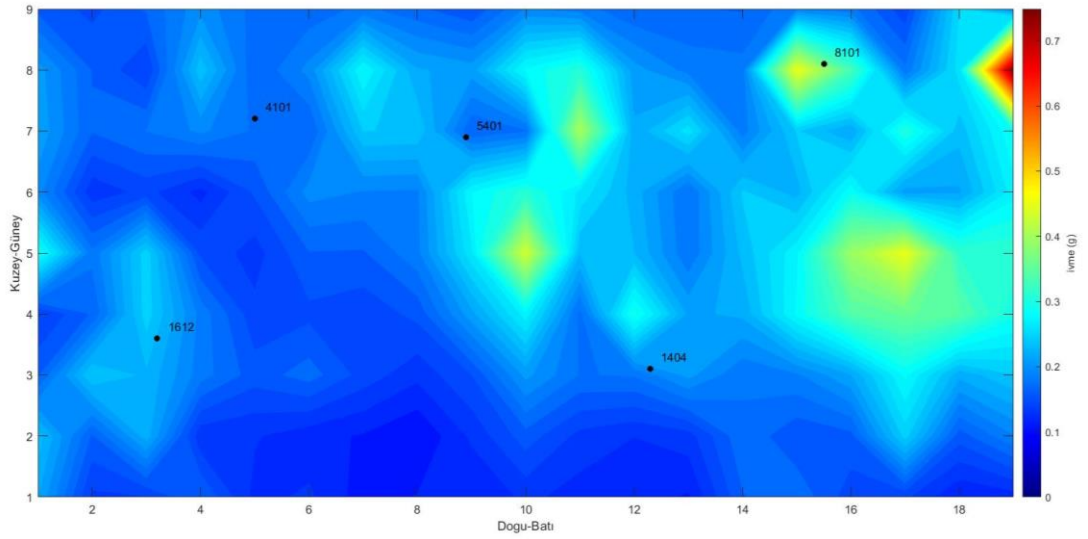
Yüzey Topoğrafyalı

Gerçek Arazi Modeli - PGA - Z Bileseni - Yuzeydeki Dügüm Noktalari - Giris ivme pik degeri: 0.08



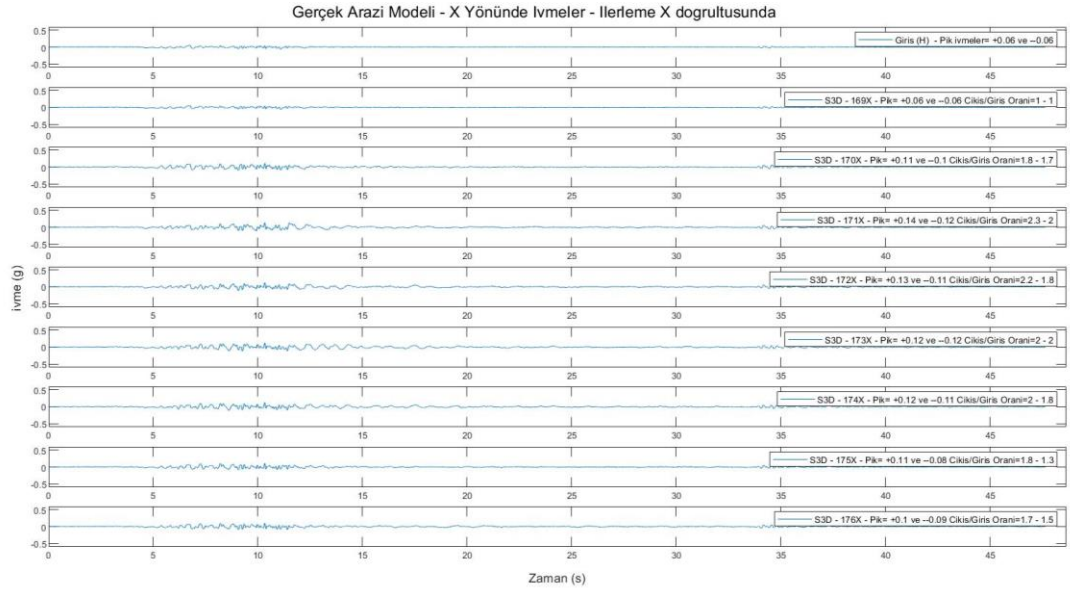
Yüzey Topoğrafyasız

Gerçek Arazi Modeli - PGA - Z Bileseni - Yuzeydeki Dügüm Noktalari - Giris ivme pik degeri: 0.08

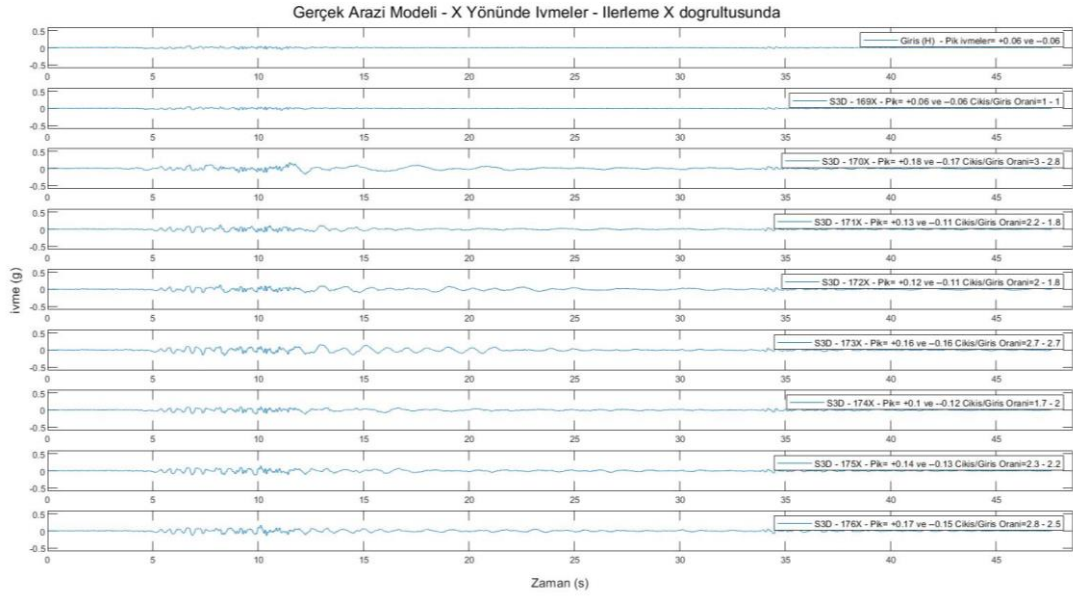


Şekil 4.19 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen Z bileşenine ait PGA grafikleri

Yüzey Topoğrafyalı

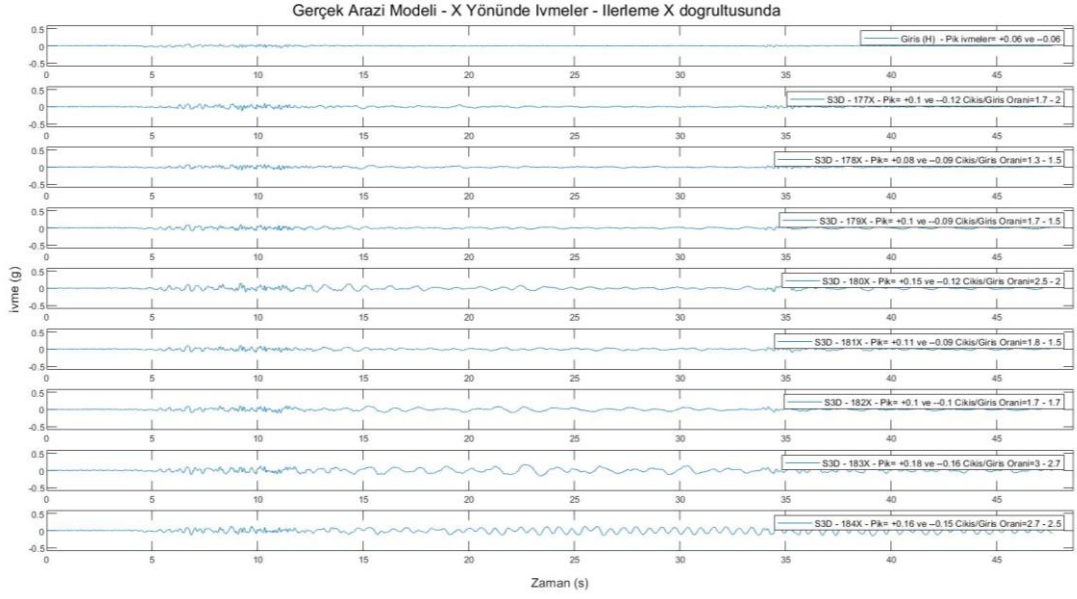


Yüzey Topoğrafyasız

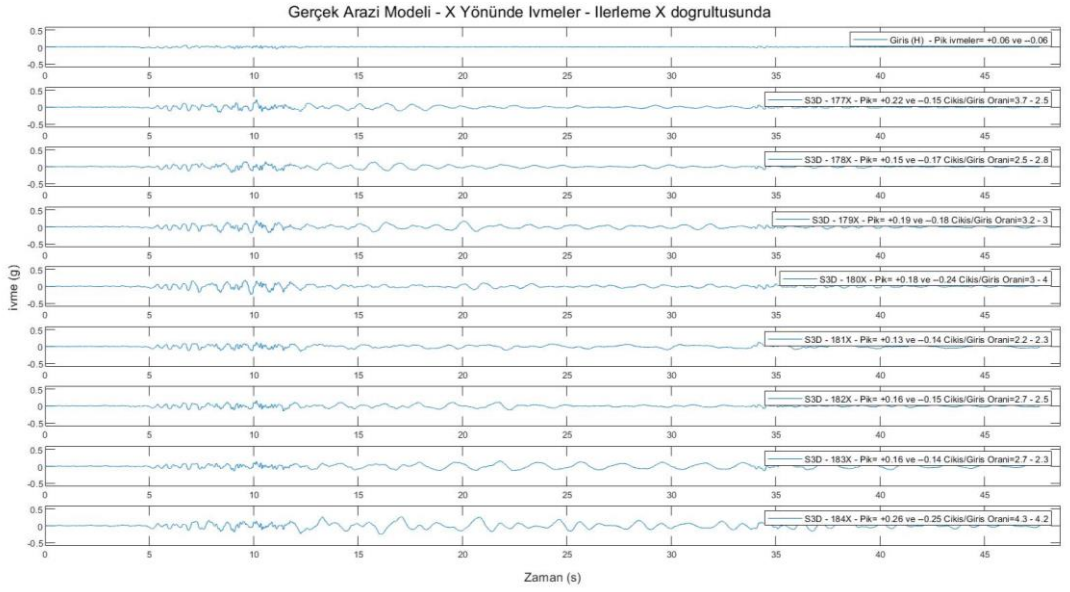


Şekil 4.20 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 169-176 arasındaki düğüm noktalarının X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri

Yüzey Topoğrafyalı

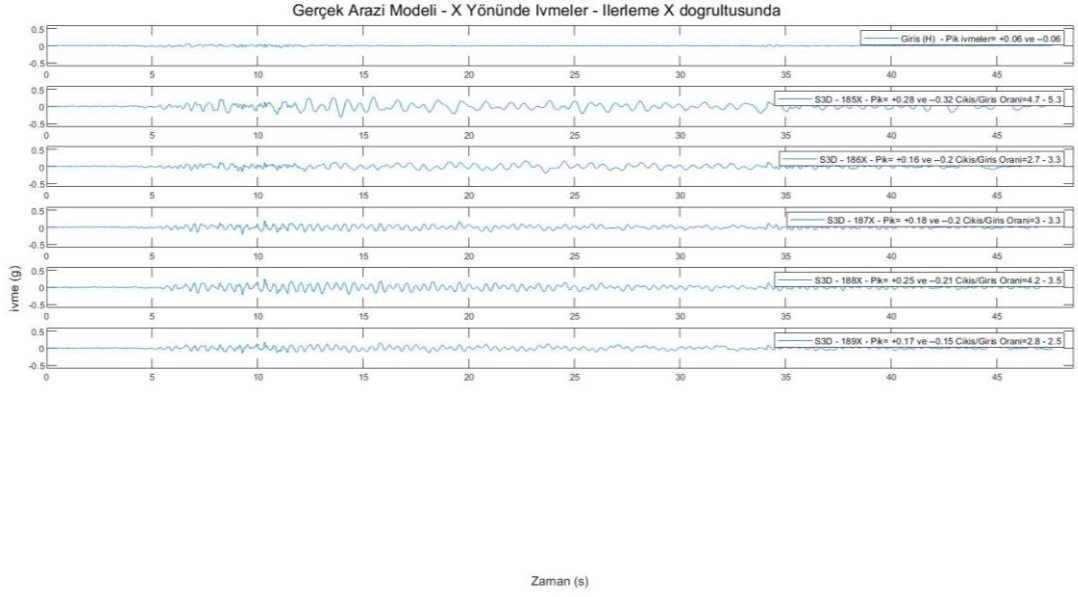


Yüzey Topoğrafyasız

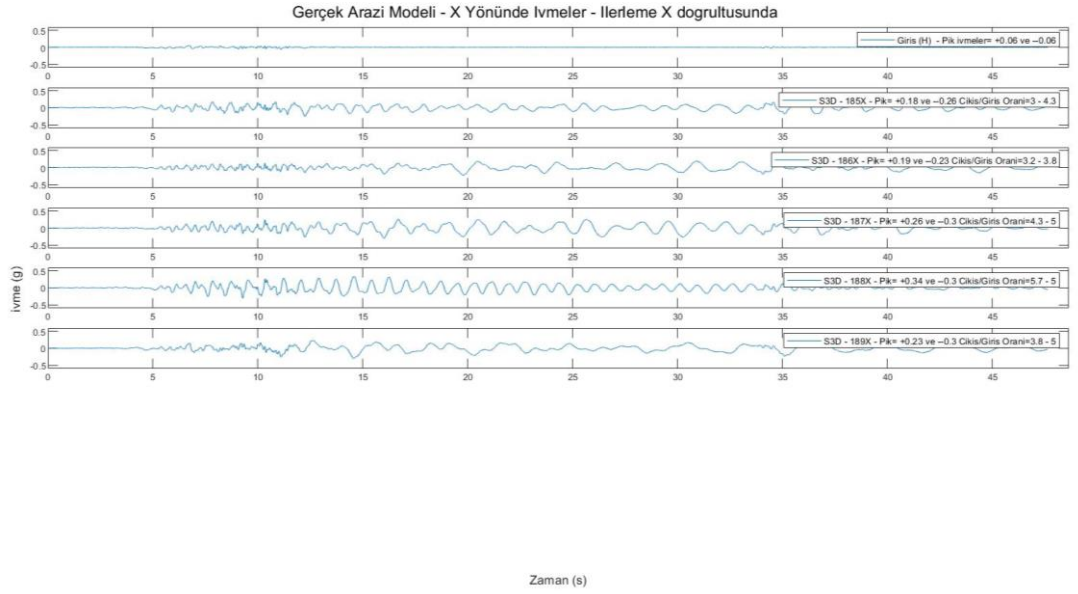


Şekil 4.21 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 177-184 arasındaki düğüm noktalarının X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri

Yüzey Topoğrafyalı

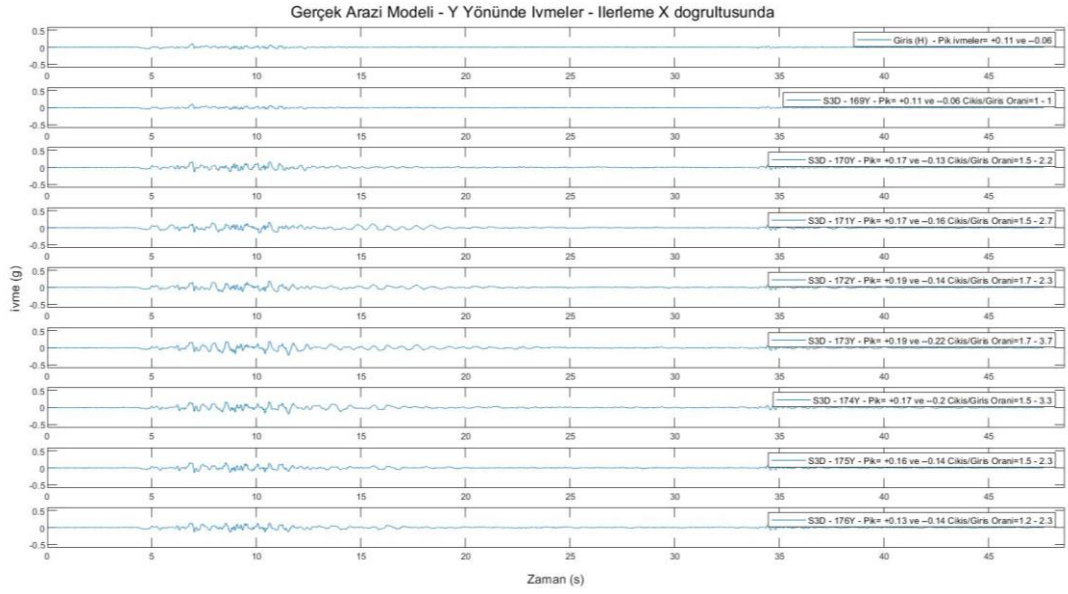


Yüzey Topoğrafyasız

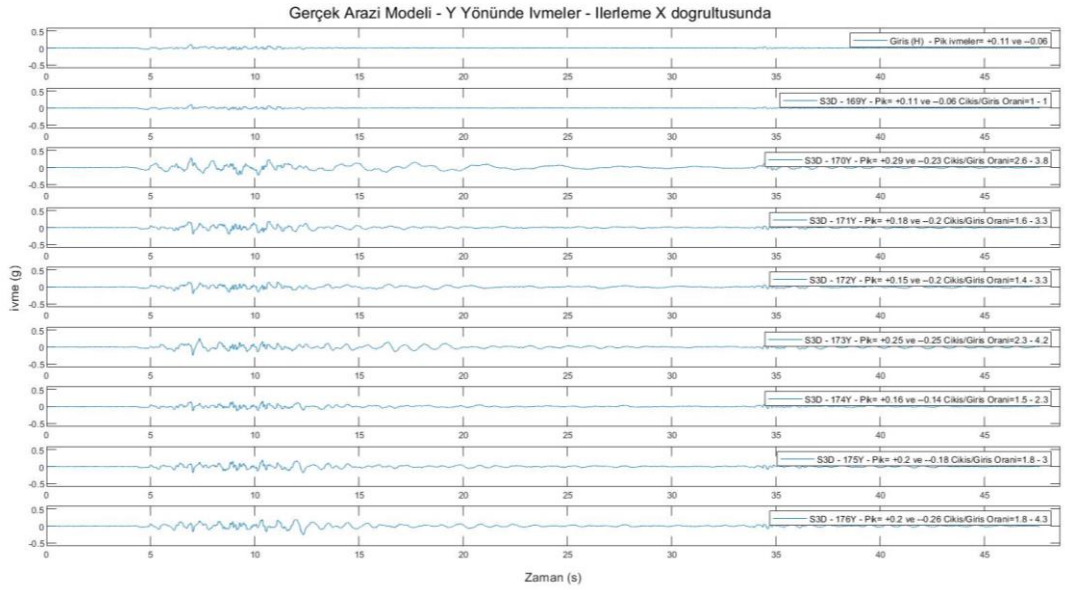


Şekil 4.22 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 185-189 arasındaki düğüm noktalarının X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri

Yüzey Topoğrafyalı

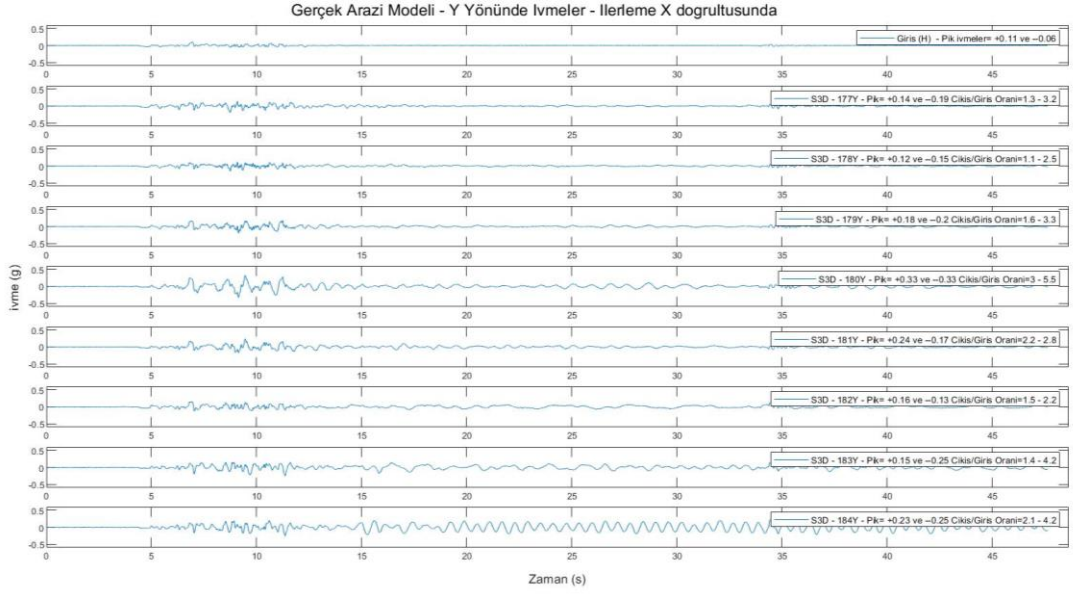


Yüzey Topoğrafyasız

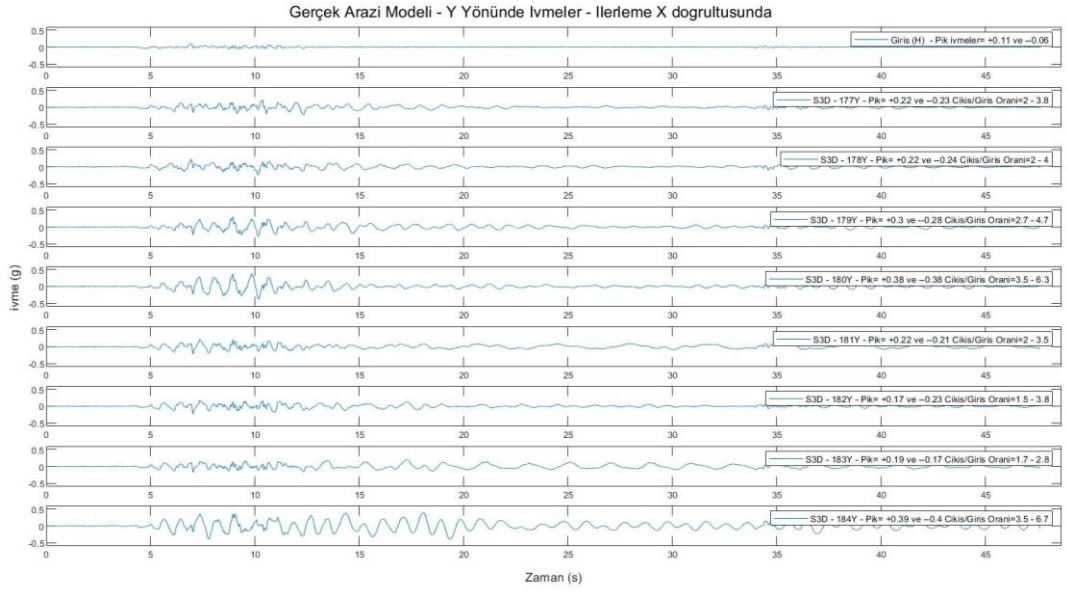


Şekil 4.23 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 169-176 arasındaki düğüm noktalarının Y bileşenine ait ivme-zaman grafikleri

Yüzey Topoğrafyalı

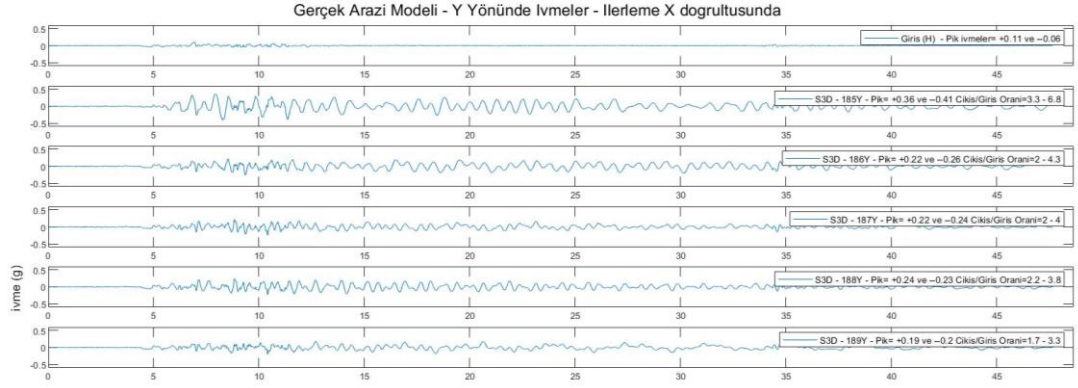


Yüzey Topoğrafyasız

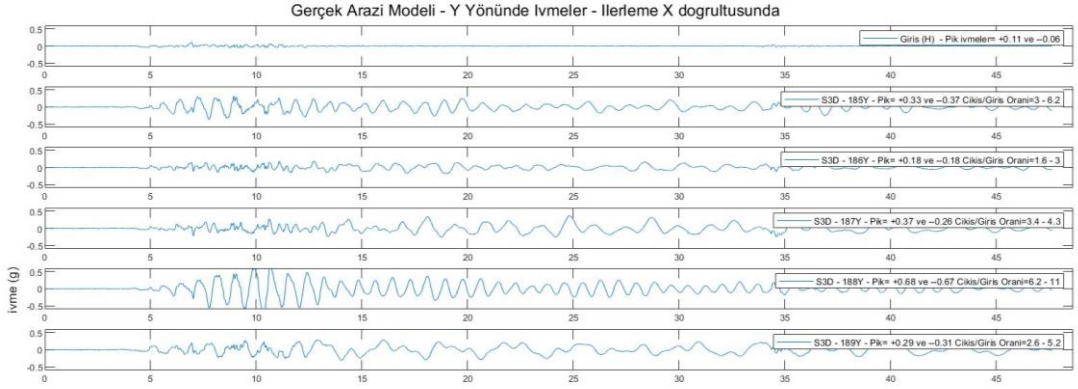


Şekil 4.24 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 177-184 arasındaki düğüm noktalarının Y bileşenine ait ivme-zaman grafikleri

Yüzey Topoğrafyalı

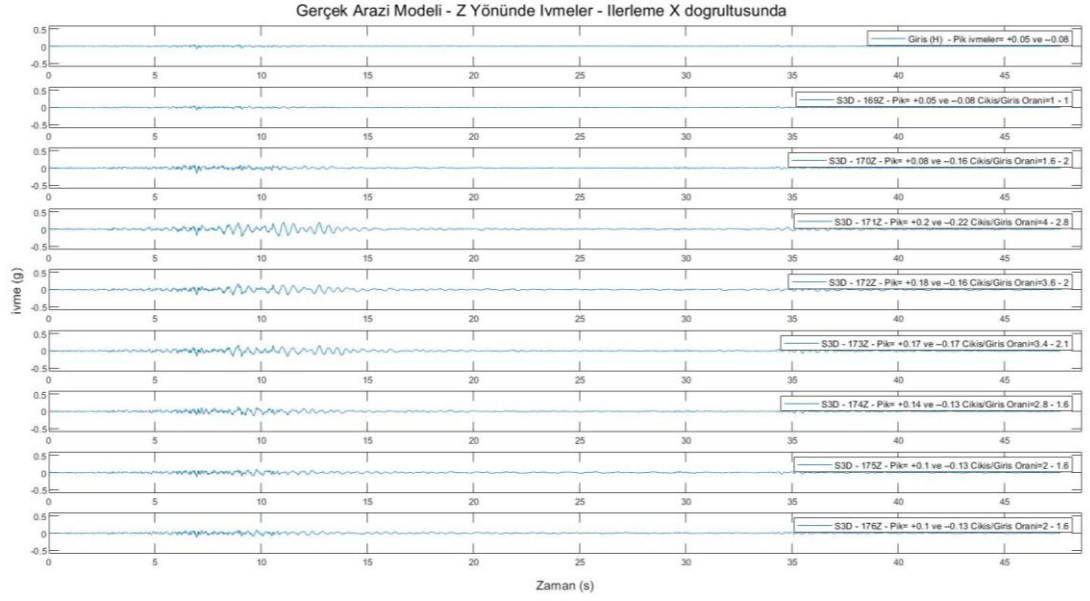


Yüzey Topoğrafyasız

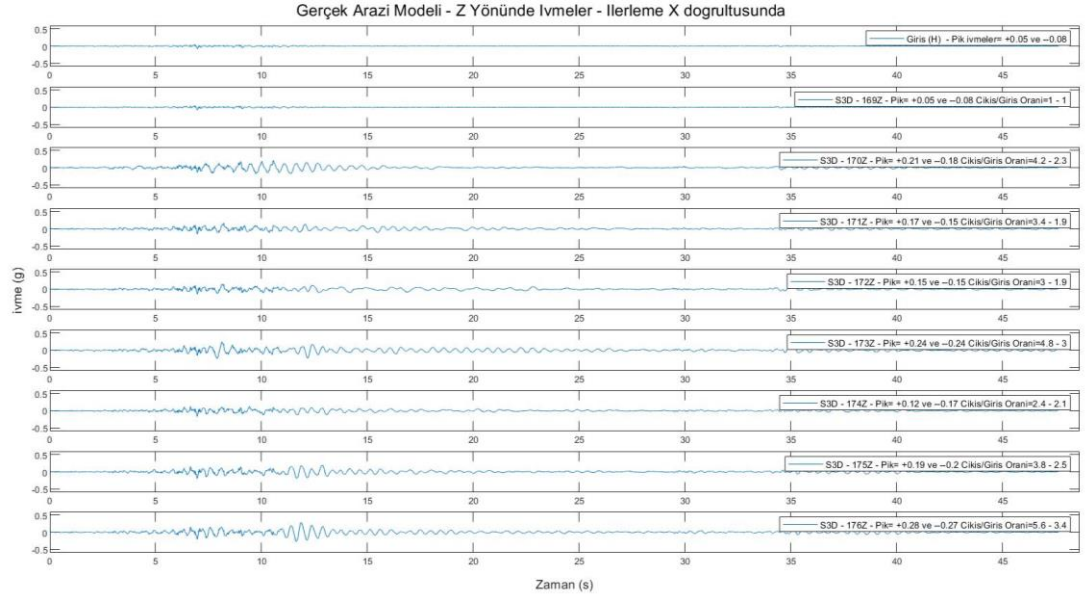


Şekil 4.25 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 185-189 arasındaki düğüm noktalarının Y bileşenine ait ivme-zaman grafikleri

Yüzey Topoğrafyalı

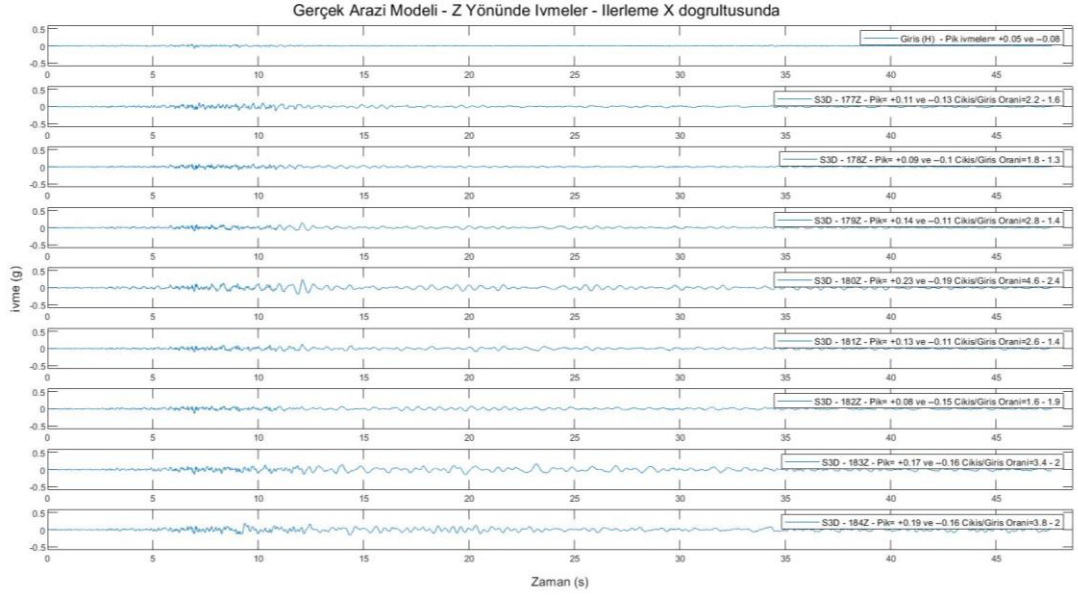


Yüzey Topoğrafyasız

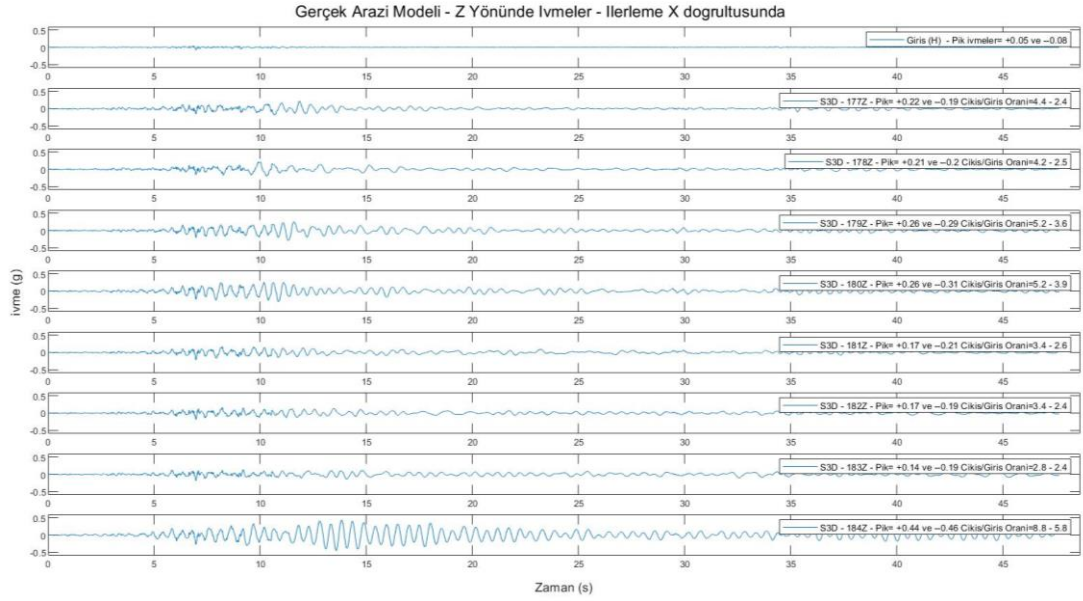


Şekil 4.26 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 169-176 arasındaki düğüm noktalarının Z bileşenine ait ivme-zaman grafikleri

Yüzey Topoğrafyalı

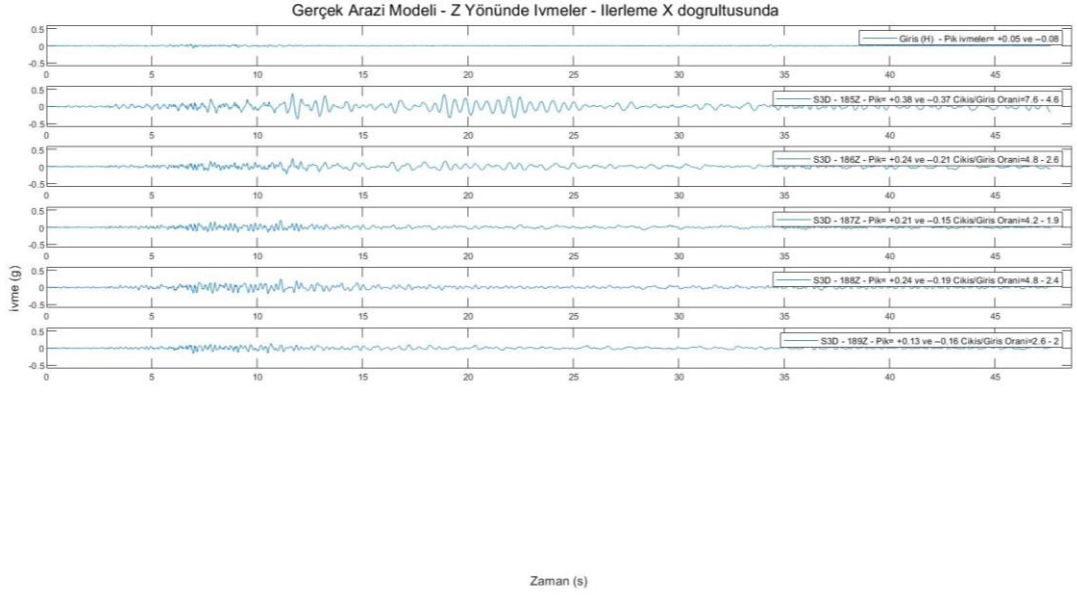


Yüzey Topoğrafyasız

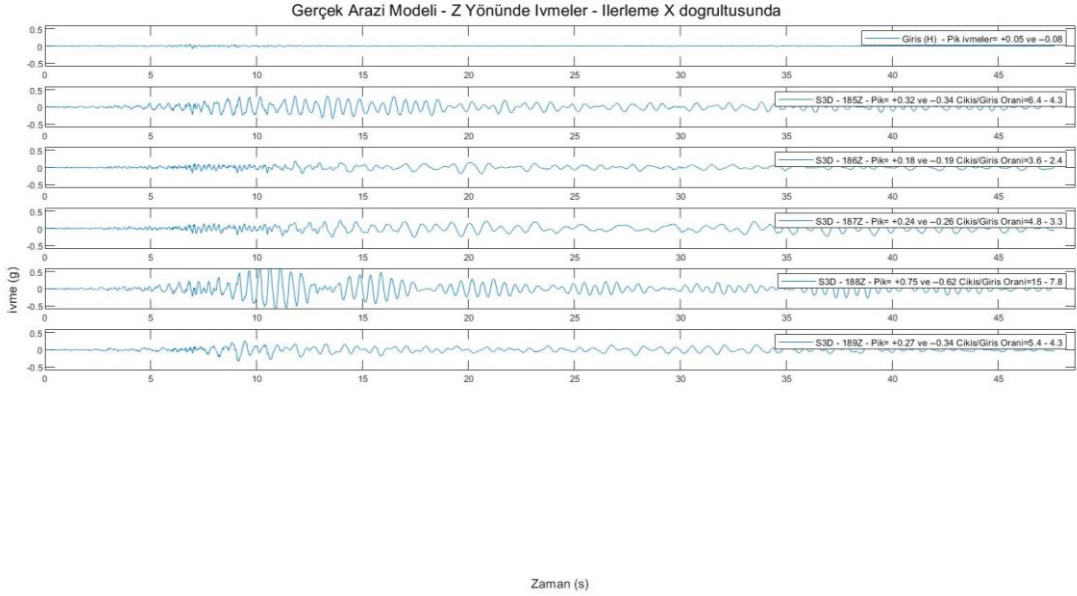


Şekil 4.27 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 177-184 arasındaki düğüm noktalarının Z bileşenine ait ivme-zaman grafikleri

Yüzey Topoğrafyalı

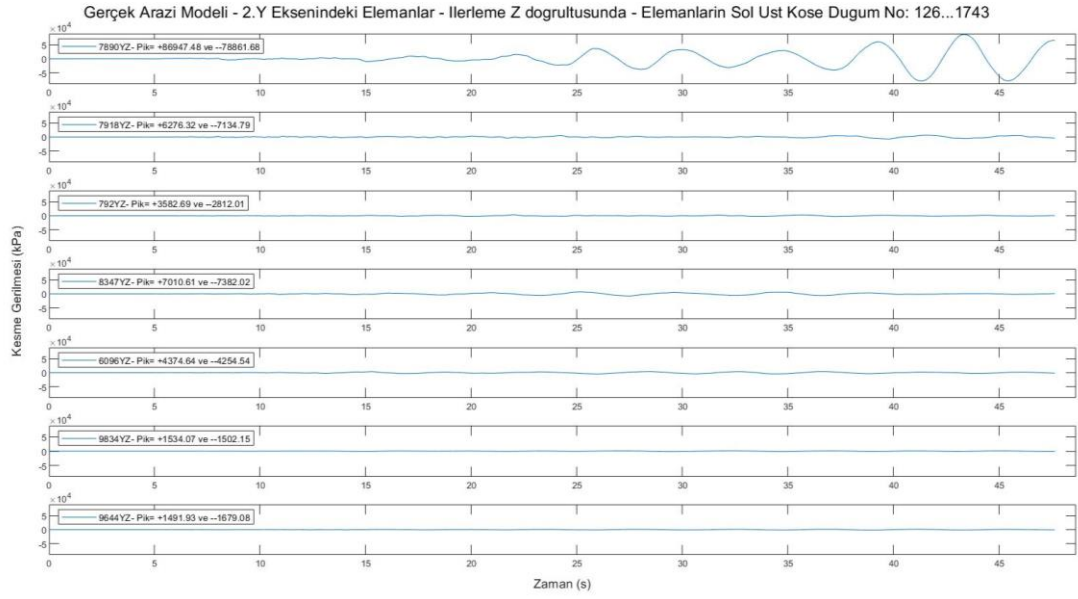


Yüzey Topoğrafyasız

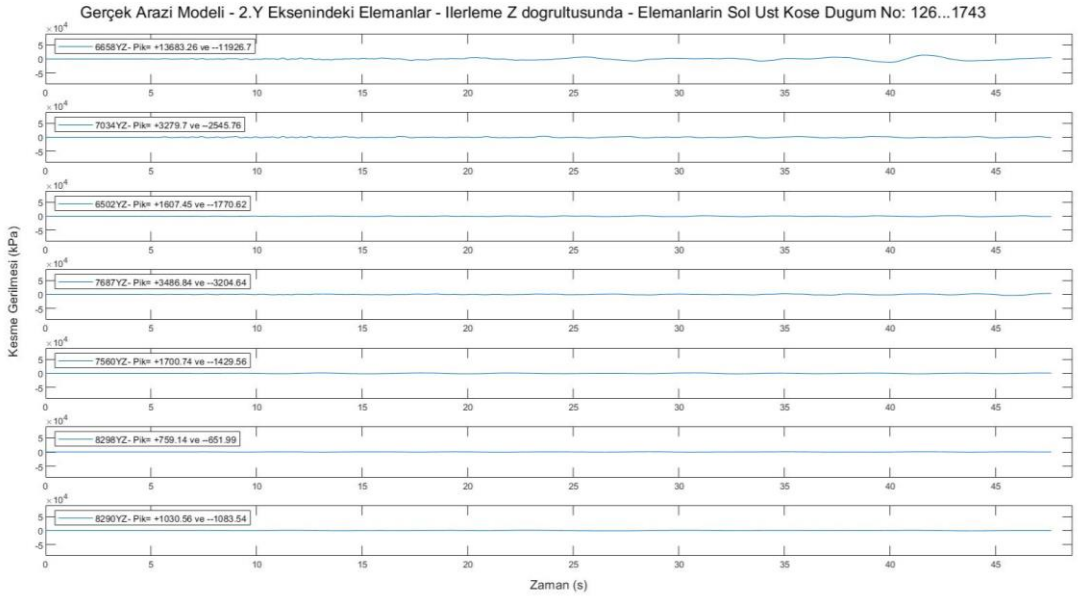


Şekil 4.28 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen 185-189 arasındaki düğüm noktalarının Z bileşenine ait ivme-zaman grafikleri

Yüzey Topoğrafyalı



Yüzey Topoğrafyasız



Şekil 4.29 Yüzey topoğrafyası eklenmiş ve eklenmemiş gerçek arazi modellerinin dinamik analiz sonuçlarından elde edilen ve Z yönünde yüzeyden tabana doğru elemanların (6658, 7034, 6502, 7687, 7560, 8298, 8290) YZ bileşenine ait kesme gerilmesi-zaman grafikleri

Yapılan dinamik analizler sonucunda yüzey topoğrafyasının, 3-B sonlu eleman modeli düğümlerindeki çıkış ivme değerlerini, elemanlardaki gerilmeleri ve maksimum yer ivme (PGA) değerlerini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır. Yapay modeller üzerinde yapılan araştırmalarda, alanı dar olan düzlükler üzerindeki tepelerde PGA

değerlerinin yükseldiği ve tepenin eğimiyle değiştiği, geniş düzlükler üzerinde tepe bulunması halinde yine PGA değerlerinde önemli değişimler olduğu fakat eğimin etkisinin geniş düzlüklü alanlarda azaldığı görülmüştür. Gerçek arazi modeli üzerinde yapılan dinamik analizlerin sonuçlarında da yine PGA, ivme ve gerilmelerde önemli farklılıklar olduğu, frekans içeriklerinin de farklılık gösterebildiği sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar modelde yüzey topoğrafyası kullanılmamasının dinamik analiz sonuçlarını etkileyebilecek önemli bir etken olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Araştırma sonuçları literatürdeki bilgilerle uyumludur.



5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1 Uygulamalar

Farklı zemin tabaklarında zemin dinamik özelliklerine bağlı olarak sismik dalga enerjisinde değişiklikler olur. Bu değişim genellikle ana kayadan zemine doğru enerjinin kaybı şeklindedir. Değişimi etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; zemin tabakalarının fiziksel ve geometrik özellikleri, sismik hızlar, yoğunluk, suya doygunluk olarak sayılabilir. Bu tez çalışmasında 3-B sonlu eleman yöntemi kullanılarak yer tepkisinin dinamik analizle belirlenebilmesi için SiteEffect3D isiminde bir bilgisayar yazılımı Matlab programlama dili ile geliştirilmiştir. Bu yazılım ile istenilen boyutlarda sentetik 3-B sonlu eleman modelleri üretilebilmektedir. Ayrıca gerçek arazi verisinden üretilmiş 3-B sonlu eleman modelleri de gerekli parametrik ayarlar yapılarak kullanılabilir. Bu sayede birçok farklı sentetik model üzerinde testler yapılmıştır. Tez çalışmasından elde edilen dinamik analiz sonuçları 2-B dinamik analiz yapabilen Quad4M programı sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Quad4M programı giriş verisi olarak laboratuvar sonuçlarını kullanır. Buna göre makaslama modül oranı, sönüm oranı, poisson oranı değerleri başlangıç değeri olarak dosyadan verilir ve sonrasında dinamik çözüm esnasında her iterasyonda bunların yeni değerleri hesaplanır. SiteEffect3D programında ise giriş verisi olarak sadece sismik hızlar ve yoğunluk değerleri verilir. Bu değerler kullanılarak diğer tüm değerler dinamik çözüm esnasında yinelemeli olarak program tarafından otomatik olarak hesaplanır. Her iki programda da çözümler zaman ortamında gerçekleştirilir. SiteEffect3D programında makaslama modül oranı (3. 30) eşitliği ile, poisson oranı ise (3. 31) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Maksimum makaslama modülü: } G_{\max} = \rho \times V_s^2 \quad (3. 30)$$

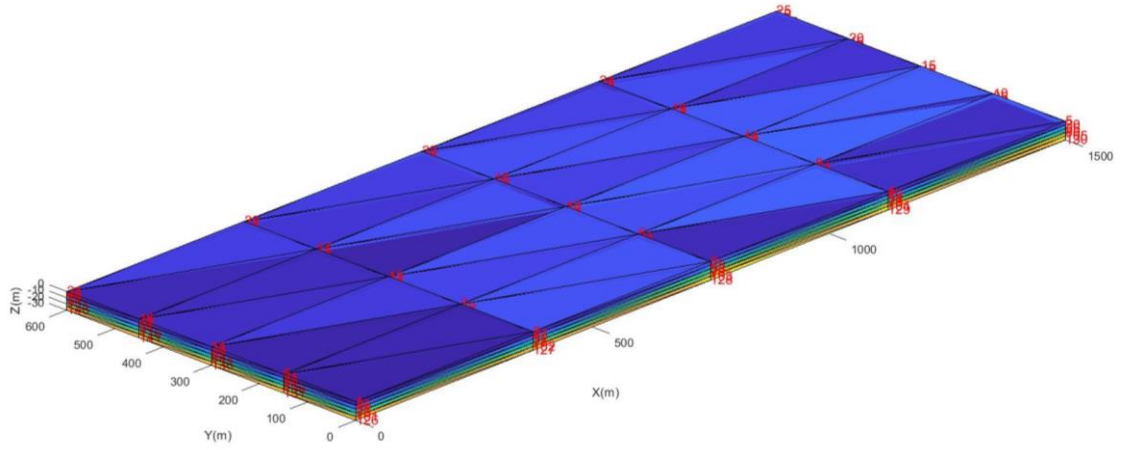
$$\text{Poisson oranı: } \nu = 0.5 \times \frac{2 - \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2}{1 - \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2} \quad (3. 31)$$

Bu bölümde 2-B ve 3-B dinamik analiz sonuçlarının karşılaştırıldığı 5 farklı sentetik model ve gerçek arazi verilerinden üretilmiş 3-B sonlu eleman modeli üzerinde yapılan test ve değerlendirmeler sonuç grafikleri ile birlikte verilmiştir.

5.1.1 Model 1

SiteEffect3D programında kullanılacak olan ilk model, X yönünde 1500m, Y yönünde 600 m ve Z yönünde 30 m uzunlukta olan 3-B sonlu eleman modelidir (Şekil 5.1). Modelde sismik hızlar ve yoğunluklar homojen olarak alınmıştır. Bu modelde $V_p=1200\text{m/s}$, $V_s=450\text{m/s}$, yoğunluk (ρ)= 2.3 g/cm^3 olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalar sonucu poisson oranı= 0.42 bulunmuştur. 3-B sonlu eleman modelinde geometrik olarak en dışta kalan tüm yüzeylerde (5 yüzey) sınır koşulları uygulanmış, sadece en üst yüzey sınırlandırılmamıştır. 3-B sonlu eleman modelinde yüzeylerde sınır koşulları uygulandığı için, X yönünde ortada Y yönünde 2.sıradaki düğümlere ait elemanların gerilmeleri (169, 265, 361, 457) ve yine aynı elemanların modelin içine bakan düğümlerdeki (33, 58, 83, 108) çıkış ivmeleri çizdirilmiştir.

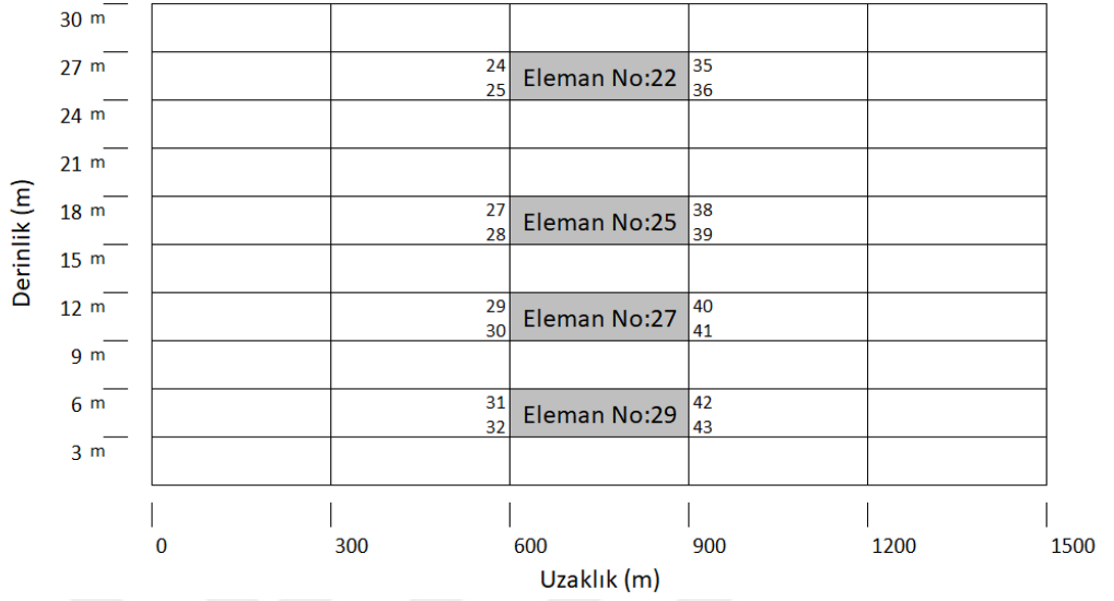
Giriş ivmesi olarak $M_w=6.9$ olan Loma Prieta depremi kullanılmıştır. Loma Prieta depreminin odak derinliği 18 km'dir. Bu deprem Amerika Birleşik Devletleri'nin Kaliforniya eyaletindeki San Andreas fayı üzerinde 17 Ekim 1989 yılında gerçekleşmiştir. Ana şok süresi 15 saniye olan depremde, 63 kişi hayatını kaybetmiş (Eberhart-Phillips vd. 1994), 3757 kişi yaralanmıştır (Palm ve Hodgson 1992). Bu deprem çok sayıda heyelan, zemin sıvılaşması, çökme ve zemin çatlaklarına sebep olmuş, yaklaşık 10 milyar dolarlık maddi zarar oluşmuş ve 27,000'den fazla yapıda hasara neden olmuştur (Board ve Institute 1994). Loma Prieta depreminin en belirgin özelliği, deprem dalgalarının zemin tabakaları tarafından önemli ölçüde büyütülmesinin önemli bir örneğini teşkil etmesidir.



Şekil 5.1 SiteEffect3D için 3-B sonlu eleman modeli (Model1.1)

Sonuçları Quad4M programı ile karşılaştırmak için X yönünde 1500m, Z yönünde 30m'lik 2-B sonlu eleman modeli (Şekil 5.2) kullanılmıştır. 2-B sonlu eleman modelindeki zemin parametreleri de 3-B sonlu eleman modeliyle aynı olacak şekilde $V_p=1200$ m/s, $V_s=450$ m/s, yoğunluk (ρ) = 2.3 g/cm³ olarak seçilmiştir. İki boyutlu sonlu eleman modelinde geometrik olarak en üst yüzey dışındaki yüzeylerde (3 yüzey) sınır koşulları uygulanmıştır. 2-B sonlu eleman modelinde 22, 25, 27 ve 29 nolu elemanlara ait gerilmeler ile 24, 27, 29 ve 31 nolu düğümlerdeki çıkış ivmeleri çizdirilmiştir. 3-B model ile 2-B modeli karşılaştırabilmek için olabildiğince benzer yerlerdeki elemanlar ve düğümlerde elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.

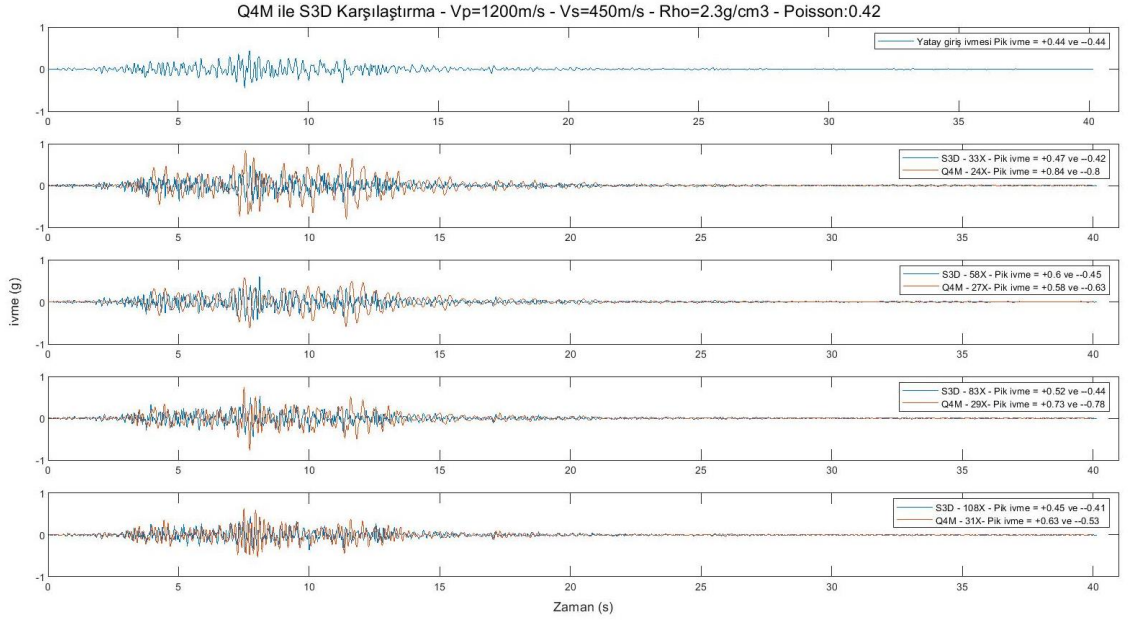
İki boyutlu sonlu eleman modeli – Quad4M için



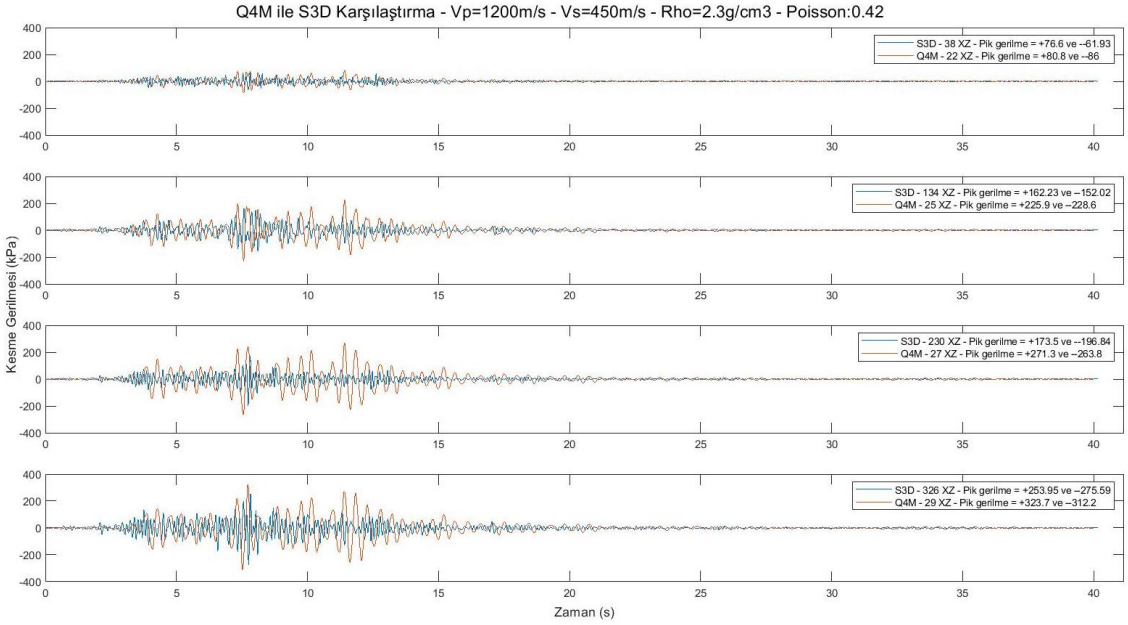
Şekil 5.2 Quad4M için 2-B sonlu eleman modeli (Model1.2)

Her iki programda yapılan dinamik analizler sonucunda elde edilen çıkış ivme-zaman grafikleri ve gerilme-zaman grafikleri aşağıda verilmiştir.

SiteEffect3D (S3D) programı ile Quad4M (Q4M) programı sonuçları incelendiğinde hâkim doruk periyotlarının genellikle benzer olduğu, ivme değerlerinin Q4M programında görece daha yüksek olduğu görülmektedir. Gerilme zaman geçişleri incelendiğinde hesaplanan gerilme değerlerinin özellikle yüzeye yakın yerlerde çok benzer olduğu ve derinliğe bağlı olarak her ikisinde de orantılı olarak arttığı ancak bu artışın Q4M programında daha fazla olduğu görülmektedir.



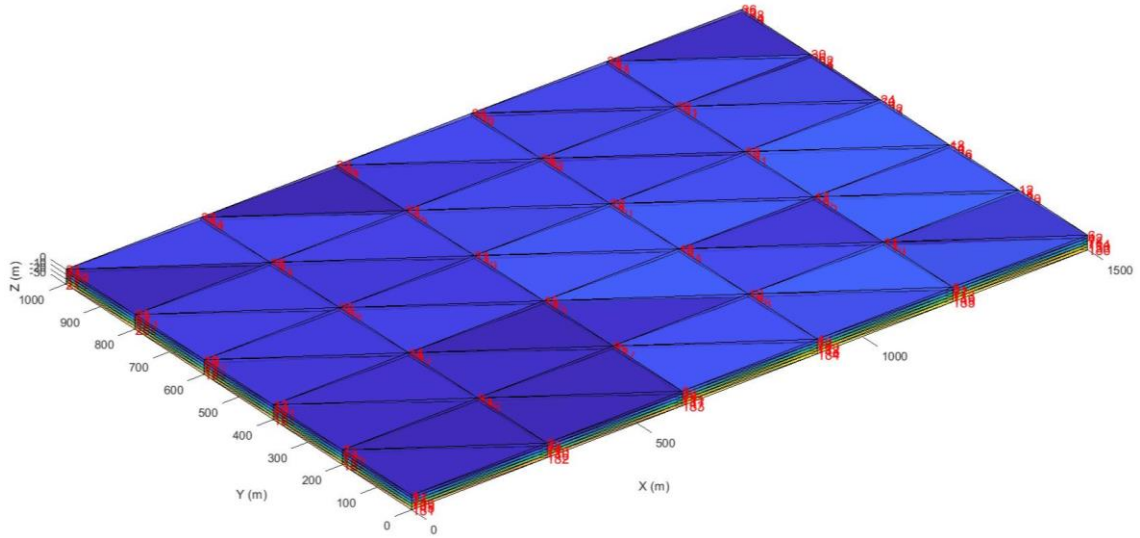
Şekil 5.3 Model1.1 ve Model1.2 'ye ait Q4M ve S3D programlarıyla yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri



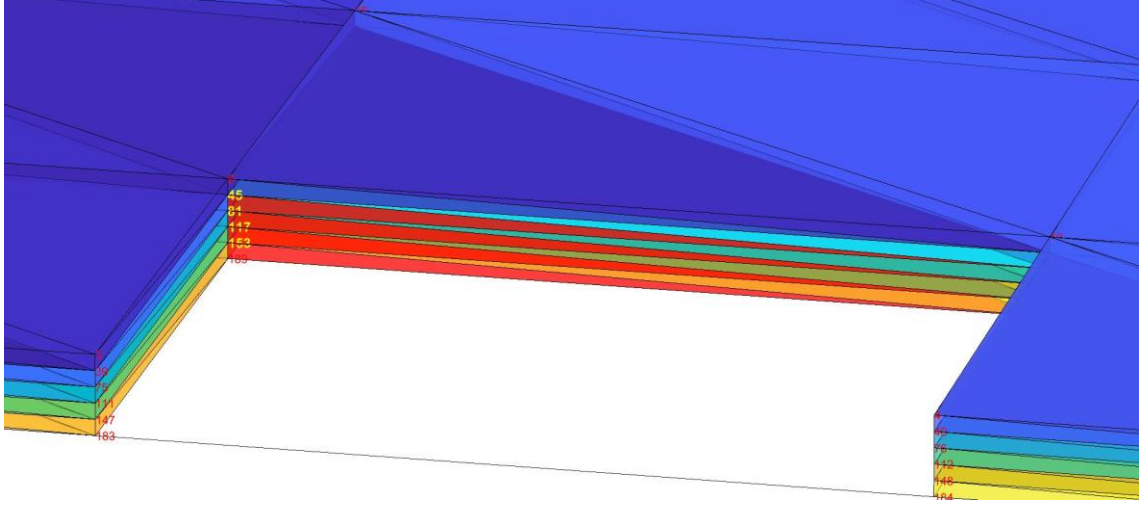
Şekil 5.4 Model1.1 ve Model1.2 'ye ait Q4M ve S3D programlarıyla yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen XZ bileşenine ait gerilme-zaman grafikleri

5.1.2 Model 2

SiteEffect3D programında kullanılacak olan ikinci model X yönünde 1500m, Y yönünde 1000 m ve Z yönünde 30 m uzunlukta olan bir 3-B sonlu eleman modelidir (Şekil 5.5). Modelde sismik hızlar ve yoğunluklar homojen olarak alınmıştır. Modelde $V_p=770$ m/s, $V_s=240$ m/s, $\rho = 1.9$ g/cm³ olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalar sonucu poisson oranı= 0.45 bulunmuştur. 3-B sonlu eleman modelinde geometrik olarak en dışta kalan tüm yüzeylerde (5 yüzey) sınır koşulları uygulanmış, sadece en üst yüzey sınırlandırılmamıştır. 3-B sonlu eleman modelinde üst yüzey dışındaki yüzeylerde sınır koşulları uygulandığı için Şekil 5.6'daki model üzerinde sarı renkte görünen düğüm noktalarında (45, 81, 117, 153) hesaplanan ivmeler ile kırmızı renkli elemanlardaki (171, 321, 471, 621) gerilmeler çizdirilmiştir. Hesaplanan ivme sonuçları Şekil 5.8'de, hesaplanan gerilme sonuçları ise Şekil 5.9'da verilmektedir. Bu modelde giriş ivmesi olarak Loma Prieta depremi kullanılmıştır.



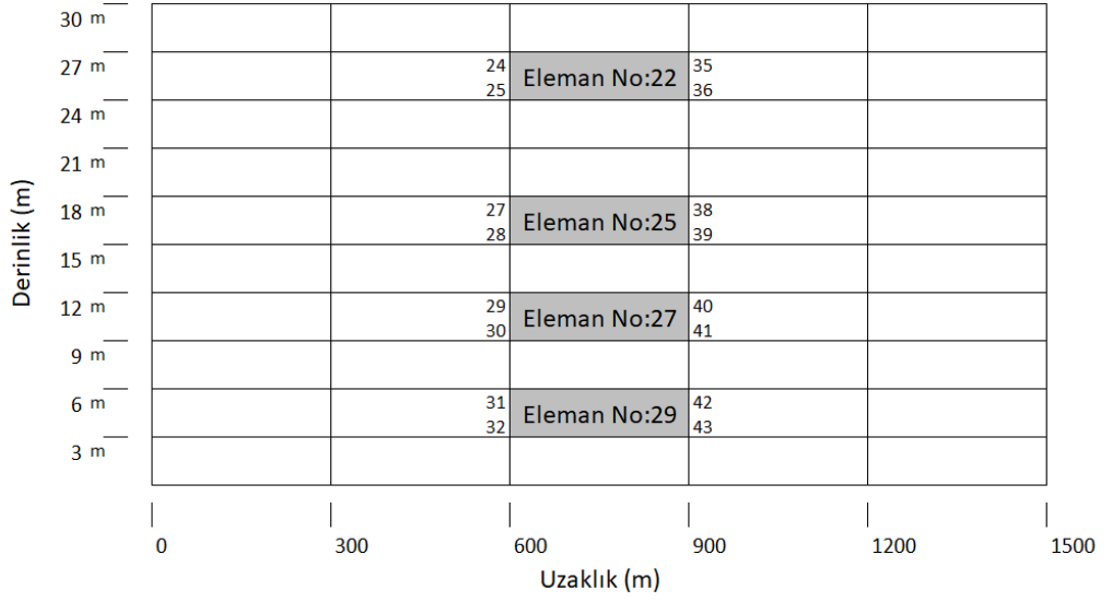
Şekil 5.5 SiteEffect3D için 3-B sonlu eleman modeli (Model2.1)



Şekil 5.6 3-B sonlu eleman modeli üzerinde seçilen düğüm noktaları (sarı renkli) ve elemanlar (kırmızı renkli)

Sonuçları Quad4M programı ile karşılaştırmak için X yönünde 1500m, Z yönünde 30m'lik 2-B sonlu eleman modeli kullanılmıştır (Şekil 5.7). 2-B sonlu eleman modelindeki zemin parametreleri de 3-B sonlu eleman modeliyle aynı olacak şekilde $V_p=770$ m/s, $V_s=240$ m/s, $\rho=1.9$ g/cm³ olarak seçilmiştir. İki boyutlu sonlu eleman modelinde geometrik olarak en üst yüzey dışındaki yüzeylerde (3 yüzey) sınır koşulları uygulanmıştır. 3-B model ile 2-B modeli karşılaştırabilmek için olabildiğince benzer yerlerdeki elemanlar ve düğümlerde elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.

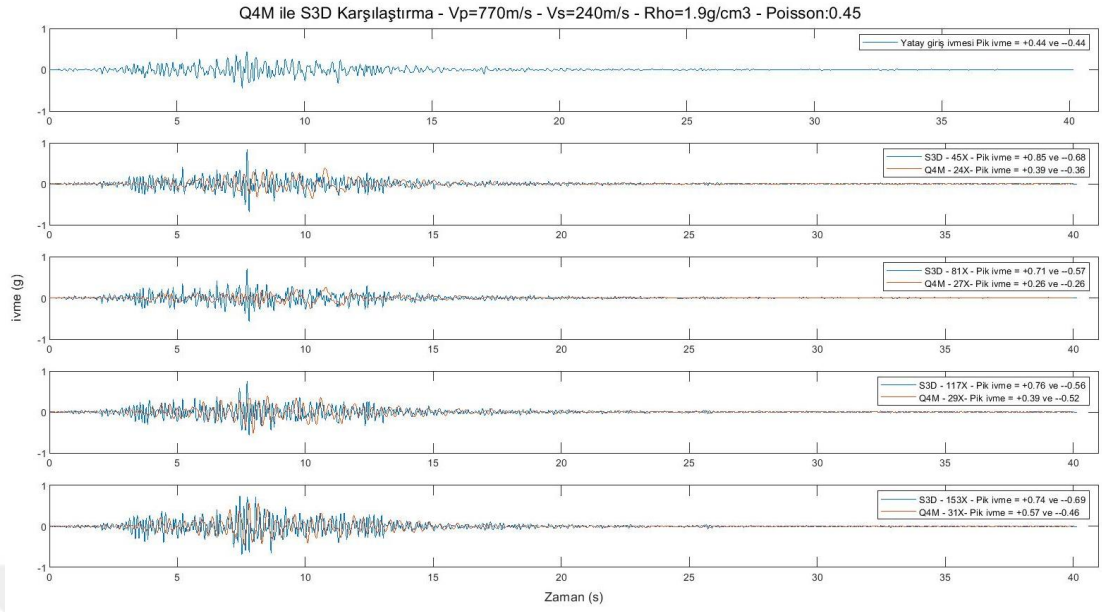
İki boyutlu sonlu eleman modeli – Quad4M için



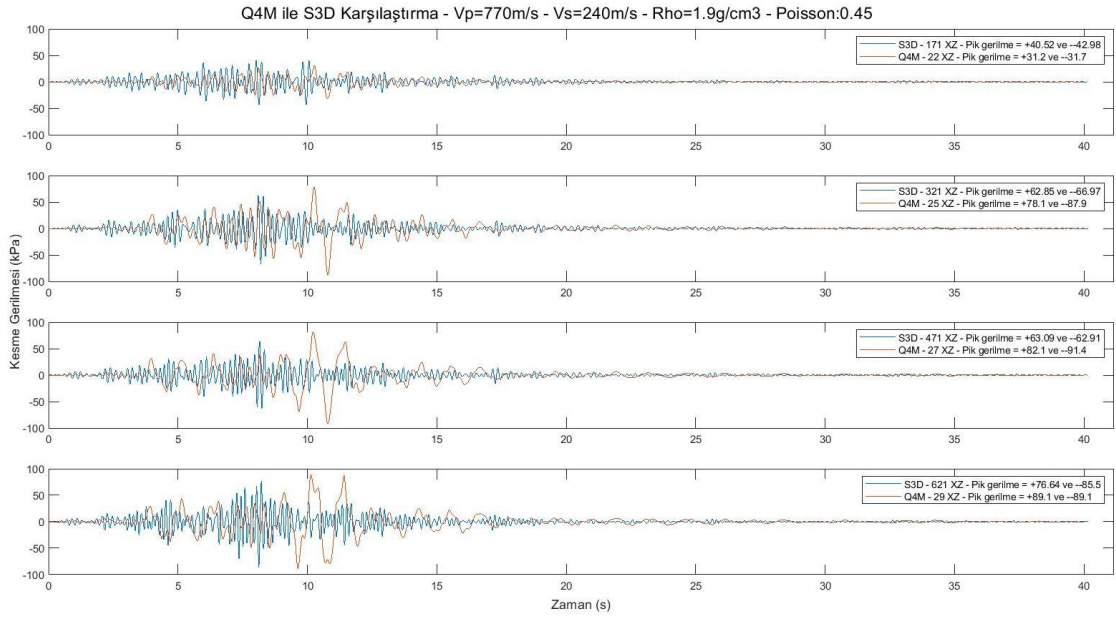
Şekil 5.7 Quad4M için 2-B sonlu eleman modeli (Model2.2)

Her iki programda yapılan dinamik analizler sonucunda elde edilen çıkış ivme-zaman grafikleri ve gerilme-zaman grafikleri aşağıda verilmiştir.

S3D programı ile Q4M programı sonuçları incelendiğinde ivme zaman geçmişleri düğüm ilerleme yönünde (Z ekseni) benzer şekilde artış ve azalış göstermekle birlikte 3-B analiz sonuçlarının pik ivmelerinin görece daha yüksek çıktığı görülmektedir. Gerilme zaman geçmişleri incelendiğinde hesaplanan gerilme değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve benzer elemanlarda derinliğe bağlı olarak benzer şekilde değiştiği görülmektedir. Ancak 2-B analiz sonuçlarında 8-12 saniye aralığında genel seyirden farklı yüksek pik gerilmeler görülmektedir. Bu farklılıkların 2-B, 3-B farkından ve algoritmalarındaki ufak değişikliklerden olabileceği düşünülmüştür.



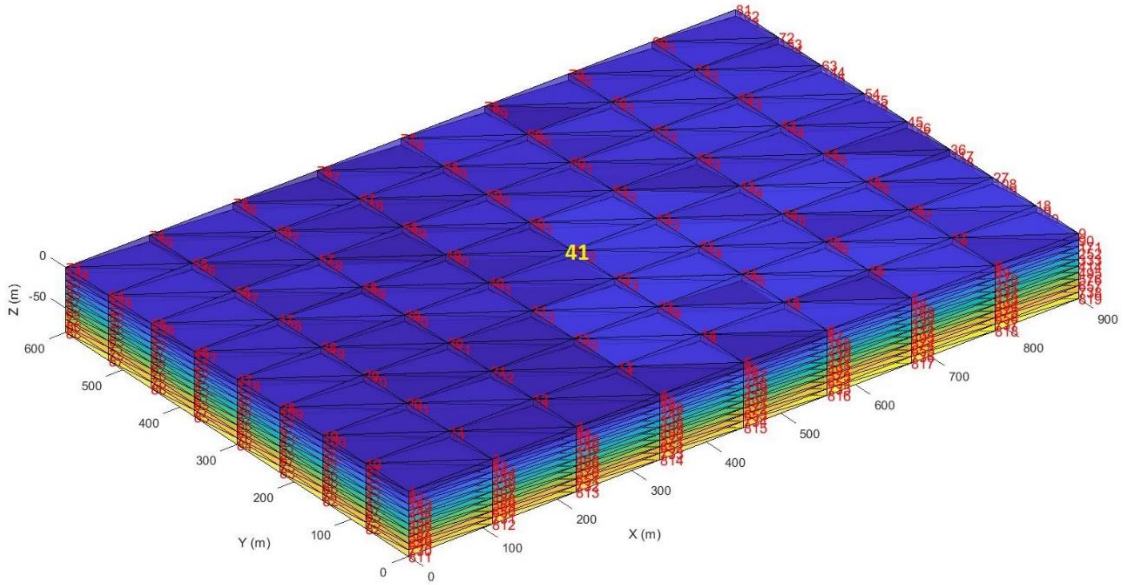
Şekil 5.8 Model2.1 ve Model2.2'ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri



Şekil 5.9 Model2.1 ve Model2.2'ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen XZ bileşenine ait gerilme-zaman grafikleri

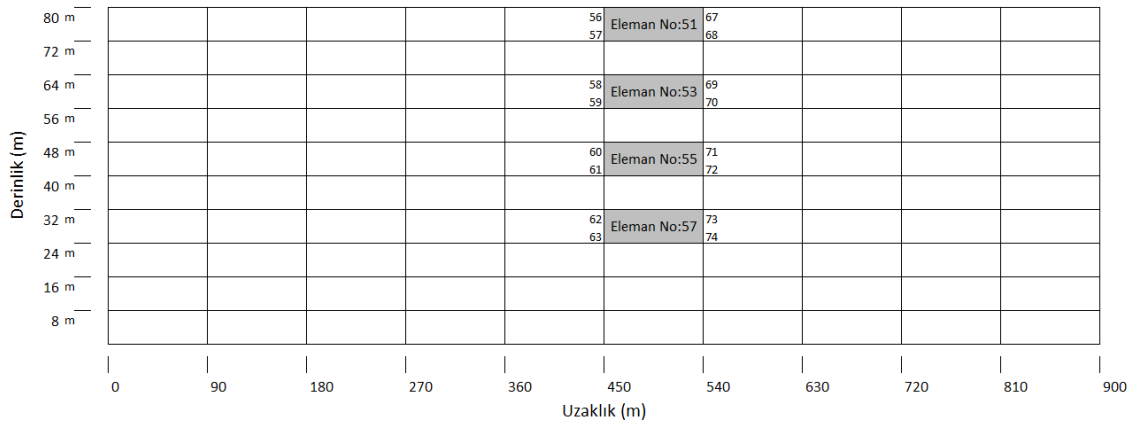
5.1.3 Model 3

SiteEffect3D programında kullanılacak olan üçüncü model X yönünde 900m, Y yönünde 600 m ve Z yönünde 80 m uzunlukta olan bir 3-B sonlu eleman modelidir (Şekil 5.10). Modelde sismik hızlar ve yoğunluklar homojen olarak alınmıştır. Bu model için $V_p=800\text{m/s}$, $V_s= 350 \text{ m/s}$, $\rho=1.83 \text{ g/cm}^3$ olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalar sonucu poisson oranı= 0.38 bulunmuştur. 3-B sonlu eleman modelinde geometrik olarak en dışta kalan 1.XZ yüzeyi, 1. YZ yüzeyi ve modelin tabanında (3 yüzeyde) sınır koşulları uygulanmış, diğer yüzeyler sınırlandırılmamıştır. 3-B sonlu eleman modelinde tam ortada kalan düğüm olan 41 nolu düğüm ve Z yönünde alta doğru birer atlayarak 203, 365 ve 527 nolu düğümlerdeki çıkış ivmeleri ve bir köşesi 41 nolu düğümde olan en üstteki 374 nolu eleman ve onun altındaki elemanlardan birer atlayarak 1526, 2678 ve 3446 nolu elemanlardaki gerilmeler çizdirilmiştir. Sonuç grafiklerinde anlaşılabilir bir karşılaştırma olabilmesi için birer atlanarak geometrik katmanlarda ilerlenerek düğüm noktası ve elemanlar seçilmiştir. Bu modelde giriş ivmesi olarak Loma Prieta depremi kullanılmıştır.



Şekil 5.10 SiteEffect3D için 3-B sonlu eleman modeli (Model3.1)

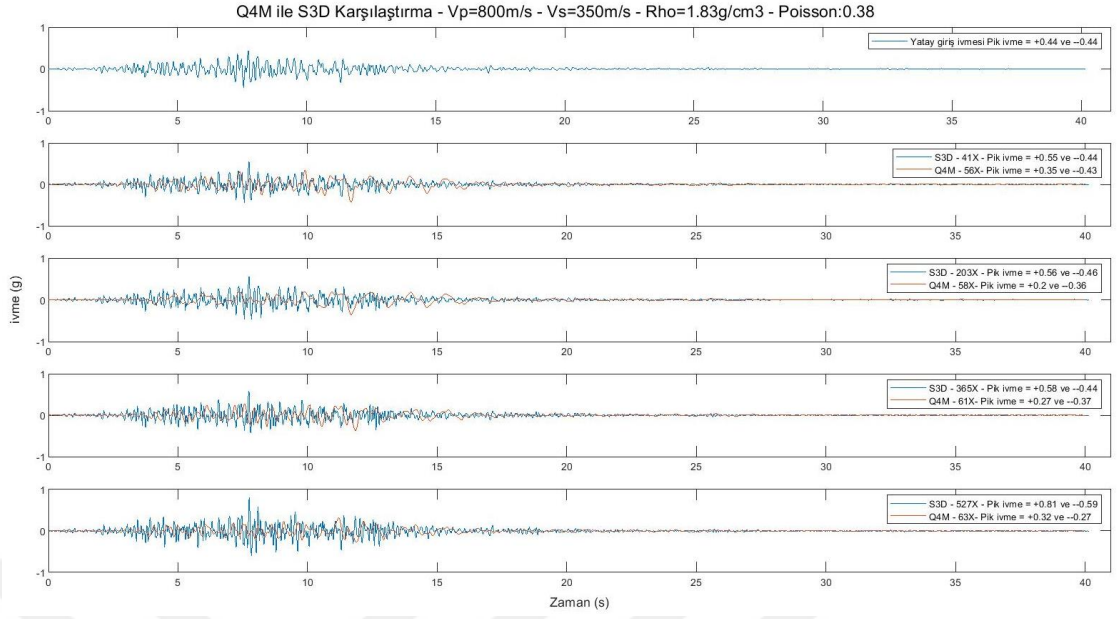
Sonuçları Quad4M programı ile karşılaştırmak için X yönünde 900m, Z yönünde 80m'lik 2-B sonlu eleman modeli (Şekil 5.11) kullanılmıştır. 2-B sonlu eleman modelindeki zemin parametreleri de 3-B sonlu eleman modeliyle aynı olacak şekilde $V_p=800$ m/s, $V_s=350$ m/s, $\rho=1.83$ g/cm³ olarak seçilmiştir. İki boyutlu sonlu eleman modelinde geometrik olarak en üst yüzey dışındaki yüzeylerde (3 yüzey) sınır koşulları uygulanmıştır. 3-B model ile 2-B modeli karşılaştırabilmek için olabildiğince benzer yerlerdeki elemanlar ve düğümlerde elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.



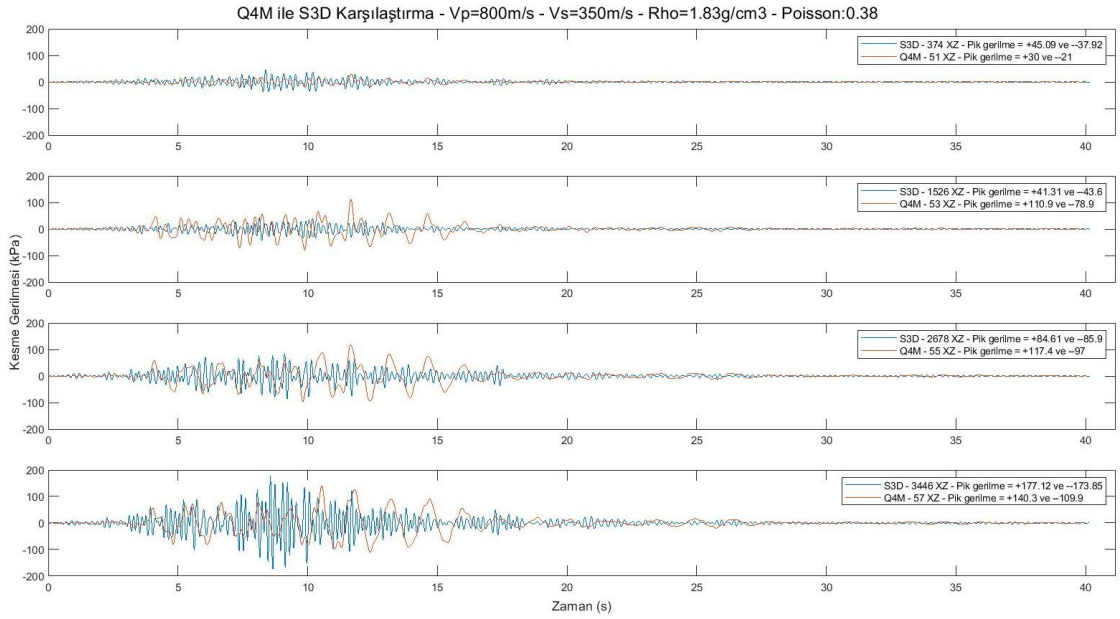
Şekil 5.11 Quad4M için 2-B sonlu eleman modeli (Model3.2)

Her iki programda yapılan dinamik analizler sonucunda elde edilen çıkış ivme-zaman grafikleri ve gerilme-zaman grafikleri aşağıda verilmiştir.

SiteEffect3D programı ile Quad4M programı sonuçları incelendiğinde 2-B dinamik analiz sonuçlarında pik ivmelerin görece daha düşük olduğu ve her iki dinamik analiz sonucunda da ivmelerin düğümlerde ilerledikçe benzer şekilde artış ve azalış gösterdiği görülmektedir. Gerilme zaman geçmişleri incelendiğinde Z yönünde aşağıdan yukarı yüzeye doğru gerilmelerin her iki dinamik analiz sonucunda da azaldığı, 2-B dinamik analiz sonucunda alt tabakalardaki gerilme genliklerinin büyüklük ve şekillerinde zamana bağlı bazı düzensizlikler olduğu fakat yüzeyde 3-B dinamik analize yakın sonuçlar ürettiği görülmektedir.



Şekil 5.12 Model3.1 ve Model3.2 'ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri



Şekil 5.13 Model3.1 ve Model3.2 'ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen XZ bileşenine ait gerilme-zaman grafikleri

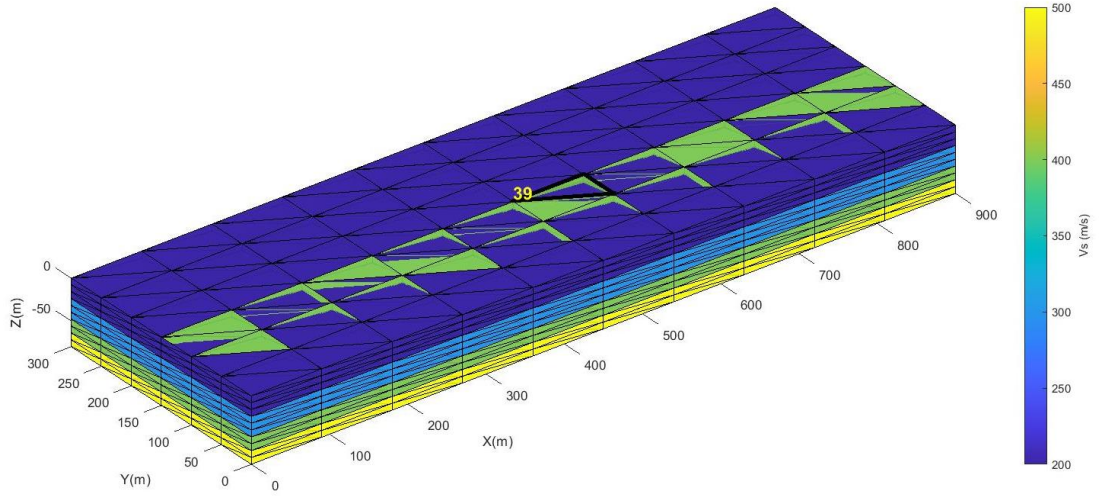
5.1.4 Model 4

SiteEffect3D programında kullanılacak olan dördüncü modelin geometrik özellikleri X yönünde 900m, Y yönünde 600 m ve Z yönünde 80 m uzunlukta olan bir 3-B sonlu eleman modelidir (Şekil 5.14). Bu modelin diğer modelden farkı, zemin parametrelerinin yönlere göre değişen tabakalı heterojen bir model olmasıdır. Modelde Z yönünde 4 ayrı tabakaya ilave olarak modelin Y yönünde ortasında yüzeyden başlayıp 8m derinliğe kadar inen ayrı bir tabaka bulunmaktadır. 2-B modellemede değişimlerin sadece iki yönde (X ve Z) olduğu diğer yönde (Y) değişmediği varsayıldığından 3-B model ile yapılan dinamik analizlerle aradaki farklılıkları daha iyi gözlemlemek amacıyla bu 5.tabaka modele eklenmiştir. Tabakaların özellikleri aşağıda verilmektedir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1 Model 4.1'e ait tabaka kalınlıkları ve zemin parametreleri

Tabaka No	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (g/cm ³)	Tabaka Kalınlığı (m)
1	700	200	1.6	24
2	900	300	1.7	24
3	1100	400	1.8	16
4	1300	500	1.9	16
5 (üst orta)	1000	400	1.8	8

3-B sonlu eleman modelinde geometrik olarak en üst yüzey dışındaki 5 yüzeyde sınır koşulları uygulanmıştır. 3-B sonlu eleman modelinin en üst ortasındaki 39 nolu düğüm ve Z yönünde alta doğru birer düğüm atlayarak 193, 347, 501 nolu düğümlerdeki çıkış ivmeleri ve bir köşesi 39 nolu düğümde olan en üstteki 337 nolu eleman ve onun altındaki elemanlardan birer eleman atlayarak 1057, 1777 ve 2497 nolu elemanlardaki gerilmeler çizdirilmiştir. Bu modelde giriş ivmesi olarak Loma Prieta depremi kullanılmıştır.



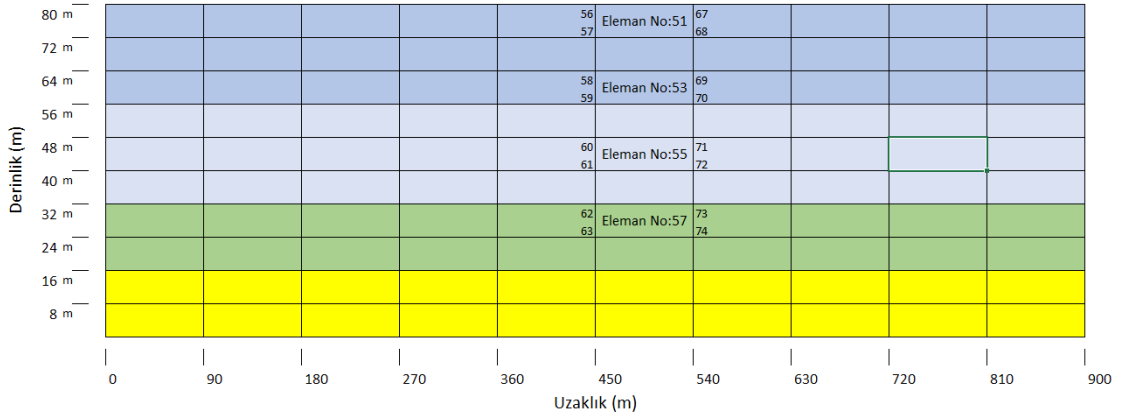
Şekil 5.14 SiteEffect3D için 3-B sonlu eleman modeli (Model4.1)

Sonuçları Quad4M programı ile karşılaştırmak için geometrik olarak X yönünde 900m, Z yönünde 80m'lik 2-B sonlu eleman modeli kullanılmıştır (Şekil 5.15). 2-B sonlu eleman modelindeki zemin parametreleri de 3-B sonlu eleman modeliyle benzer olacak şekilde verilmiştir. 2-B sonlu eleman modeline ait tabaka özellikleri ve zemin parametreleri aşağıda verilmektedir (Çizelge 5.2). Bu modelde 3-B modelden farklı olarak 5.tabaka bulunmamaktadır.

Çizelge 5.2 Model 4.2'ye ait tabaka kalınlıkları ve zemin parametreleri

Tabaka No	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (g/cm ³)	Tabaka Kalınlığı (m)
1	700	200	1.6	24
2	900	300	1.7	24
3	1100	400	1.8	16
4	1300	500	1.9	16

2-B sonlu eleman modelinde geometrik olarak en üst yüzey dışındaki diğer tüm yüzeylerde (3 yüzey) sınır koşulları uygulanmıştır. 3-B model ile 2-B modeli karşılaştırabilmek için olabildiğince benzer yerlerdeki elemanlar ve düğümlerde elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.

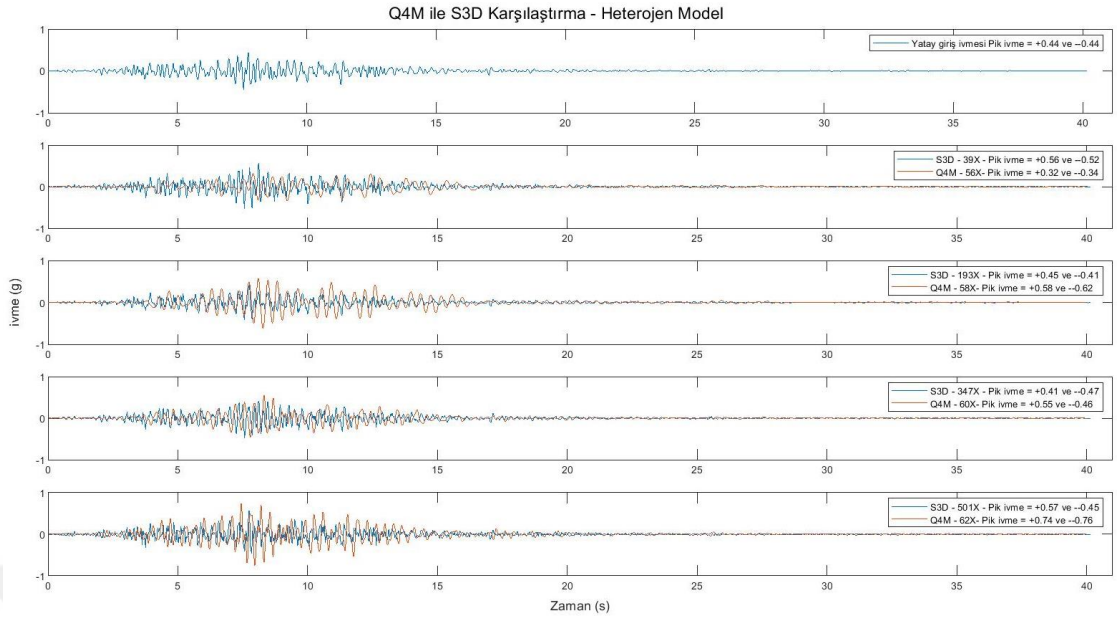


Şekil 5.15 Quad4M için 2-B sonlu eleman modeli (Model4.2)

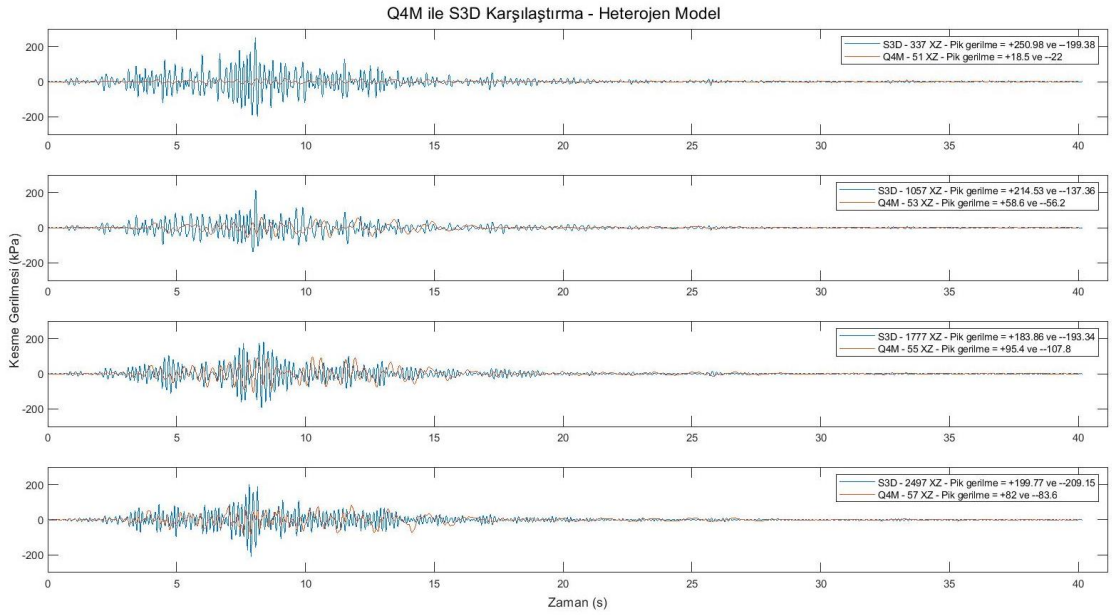
Her iki programda yapılan dinamik analizler sonucunda elde edilen çıkış ivme-zaman grafikleri ve gerilme-zaman grafikleri aşağıda verilmiştir.

SiteEffect3D programı ile Quad4M programı sonuçları incelendiğinde 2-B dinamik analiz sonuçlarında en alt tabakada pik ivmelerin görece çok yüksek olduğu ve üst tabakalara doğru aşırı sönümlendiği görülmektedir. 3-B dinamik analiz sonuçlarında ise en alt tabakadaki pik ivmeler 2-B dinamik analiz sonuçlarına göre daha düşük bir değerden başlayıp üst tabakaya doğru daha yavaş sönümlenmekte en üst tabakada tekrar artmaktadır. En üst tabakadaki bu farklılığın 3-B modelde Y yönünde modelin üst ortasında bulunan 5.tabakadan kaynaklandığı değerlendirilmiştir. 2-B modelde Y yönünde farklı tabaka özelliği verilemediğinden (2-B modelde değişimin sadece X ve Z yönlerinde olması) 5.tabakanın etkisini sonuçlara yansıtamamaktadır. Gerilme zaman geçişleri incelendiğinde 2-B ve 3-B dinamik analiz sonuçlarının birbirinden farklı olduğu görülmektedir. 2-B dinamik analiz sonuçlarında gerilmeler daha düşük çıkmıştır. Özellikle en üst tabakadaki gerilmeler 5.tabaka etkisinden dolayı 3-B dinamik analiz sonuçlarında daha yüksek, 2-B dinamik analiz sonuçlarında ise çok düşüktür.

Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde 2-B dinamik analizin yönlere göre değişen ve özellikle değişimin sabit kabul edildiği yönde (bu örnekte Y eksenine) farklı zemin tabakalarının olduğu ortamlarda (heterojen) yer tepkisini tam olarak yansıtamadığı anlaşılmaktadır.



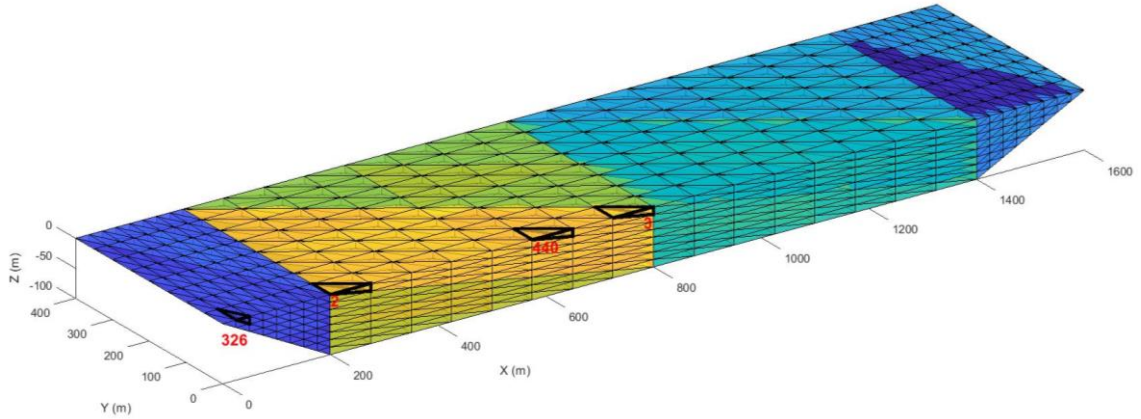
Şekil 5.16 Model4.1 ve Model4.2 'ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri



Şekil 5.17 Model4.1 ve Model4.2 'ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen XZ bileşenine ait gerilme-zaman grafikleri

5.1.5 Model 5

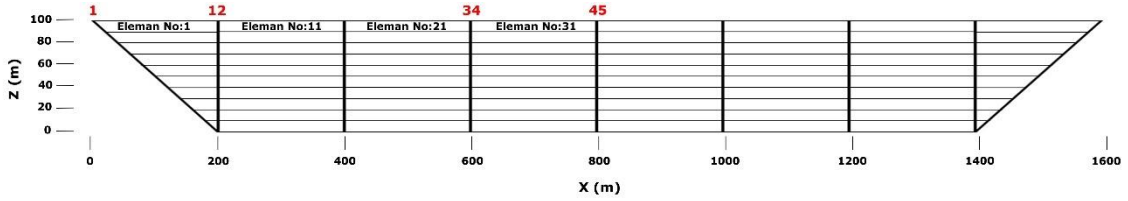
SiteEffect3D programında kullanılacak olan beşinci model X yönünde 1600m, Y yönünde 400 m ve Z yönünde 100 m uzunlukta olan V şeklinde basen yapısında bir 3-B sonlu eleman modelidir (Şekil 5.18). Modelde sismik hızlar ve yoğunluklar homojen olarak alınmıştır. Bu model için $V_p=1200$ m/s, $V_s= 450$ m/s, $\rho = 2.3$ g/cm³ olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalar sonucu poisson oranı=0.42 bulunmuştur. 3-B sonlu eleman modelinde geometrik olarak en altta kalan Z yüzeyi ve vadinin her iki tarafındaki eğimli yüzeylerde (3 yüzey) sınır koşulları uygulanmış, diğer yüzeyler sınırlandırılmamıştır. Şekil 5.18'deki 3-B sonlu eleman modelinde siyah çerçeveli olarak gösterilen elemanlardaki gerilmeler ve bu elemanların bir köşesinde modelde kırmızı renkte gösterilen 326, 2, 440 ve 3 nolu düğüm noktalarındaki çıkış ivmeleri çizdirilmiştir. Seçilen düğüm noktaları ve elemanlar Quad4M programıyla karşılaştırmayı daha iyi yapabilmek için 2-B sonlu eleman modelinde seçilen düğüm noktaları ve elemanlara benzer yerlerde seçilmiştir. Dinamik analizlerde modele dışarıdan verilen giriş ivmesi için Loma Prieta depremi ivme kaydı kullanılmıştır.



Şekil 5.18 SiteEffect3D için 3-B sonlu eleman modeli (Model5.1)

Sonuçları Quad4M programı ile karşılaştırmak için X yönünde 1600m, Z yönünde 100m'lik 2-B sonlu eleman modeli kullanılmıştır (Şekil 5.19). 2-B sonlu eleman modelindeki zemin parametreleri 3-B sonlu eleman modeliyle aynı olacak şekilde

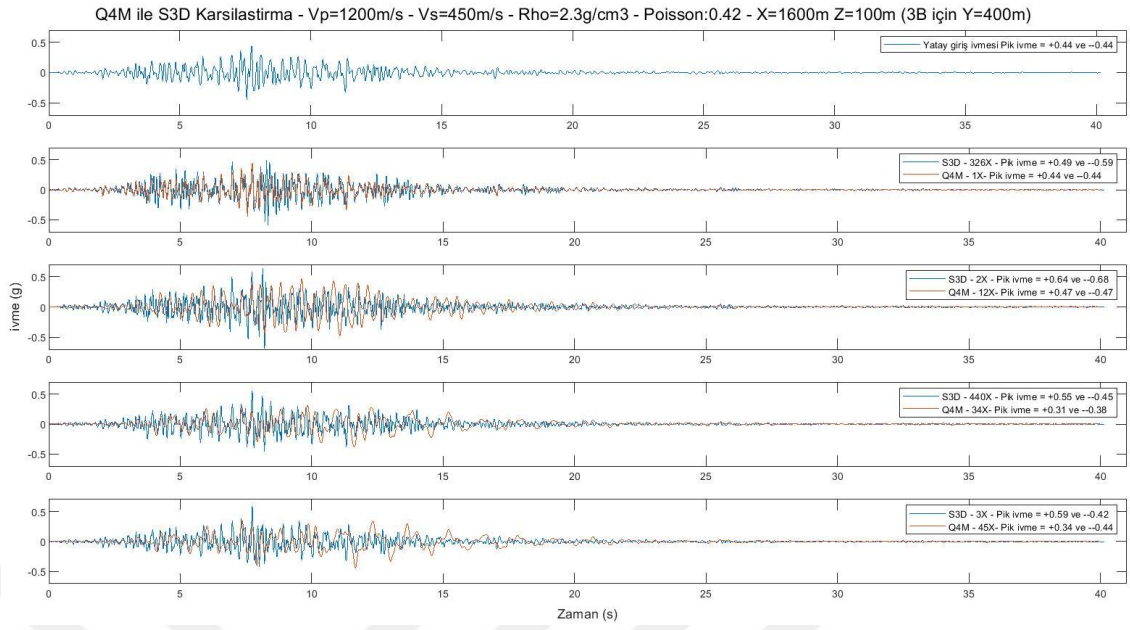
$V_p=1200$ m/s, $V_s=450$ m/s, yoğunluk (ρ)= 2.3 g/cm³ olarak seçilmiştir. 2-B sonlu eleman modelinde geometrik olarak en üst yüzey dışındaki yüzeylerde (3 yüzey) sınır koşulları uygulanmıştır. 2-B sonlu eleman modelinde 1, 11, 21 ve 31 nolu elemanlardaki gerilmeler ile 1, 12, 34 ve 45 nolu düğüm noktalarındaki çıkış ivmeleri çizdirilmiştir.



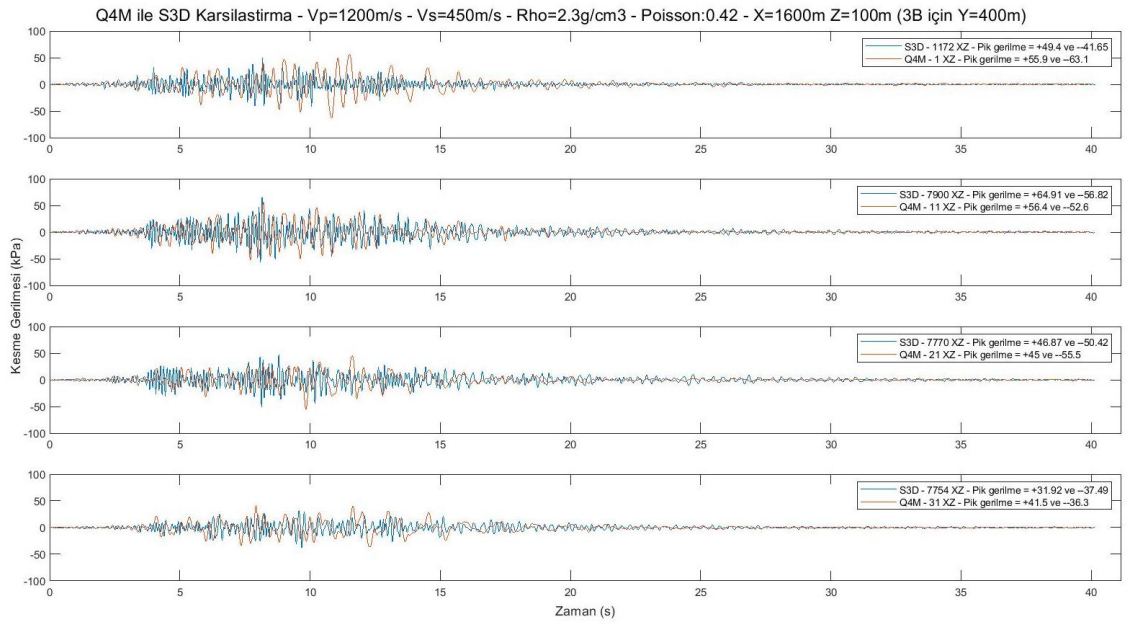
Şekil 5.19 Quad4M için 2-B sonlu eleman modeli (Model5.2)

Her iki programda yapılan dinamik analizler sonucunda elde edilen çıkış ivme-zaman grafikleri ve gerilme-zaman grafikleri ilerleme yönü X olacak şekilde incelenmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde her iki dinamik analiz sonucunda modelin kenarından ortasına doğru gidildikçe ivme değerlerinde azalmalar görülsede pik ivme değerlerinin SiteEffect3D programında modelin kenarlarında daha yüksek değerler aldığı (0.68g), ortasına doğru ilerledikçe önemli ölçüde azaldığı (0.59g) görülmektedir. Oysa ki Quad4M programında modelin kenarlarındaki pik ivme değerleriyle (0.47g) modelin ortalarındaki pik ivme değerleri (0.44g) birbirine çok yakındır. Literatürde vadi derinliği, eğimi ve uzunluğu da etkili olmakla birlikte vadi kenarlarında görece daha yüksek, vadi ortasında ise daha düşük ivme değerlerinin olması beklenmektedir (Haşal 2009). 3-B dinamik analiz bu durumu iyi bir şekilde yansıtırken, 2-B dinamik analiz sonuçları bu durumu tam olarak yansıtmamaktadır. Gerilme zaman geçmişleri incelendiğinde, 2-B ve 3-B dinamik analiz sonucu hesaplanan gerilme değerlerindeki farklılıkların ivme değerlerine kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Her iki dinamik analiz sonucu incelendiğinde ivme frekans içerikleri farklılık göstermektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde 2-B dinamik analiz sonuçlarının basen-basen sınırlarındaki sonuçları tam olarak yansıtamadığı ve yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Bu nedenle vadi ve havza benzeri ortamlarda yer tepkisinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla 3-B dinamik analiz yapılması daha uygun olacaktır.



Şekil 5.20 Model5.1 ve Model5.2 'ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen X bileşenine ait ivme-zaman grafikleri



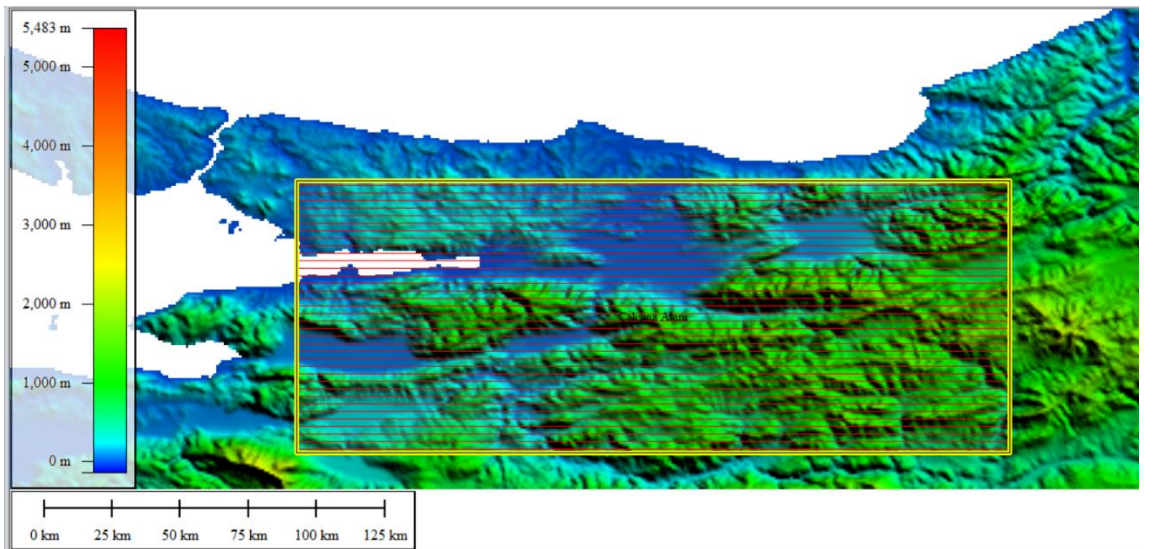
Şekil 5.21 Model5.1 ve Model5.2 'ye ait Q4M ve S3D programları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarından elde edilen XZ bileşenine ait gerilme-zaman grafikleri

5.1.6 Model 6 – Gerçek Arazi Modeli

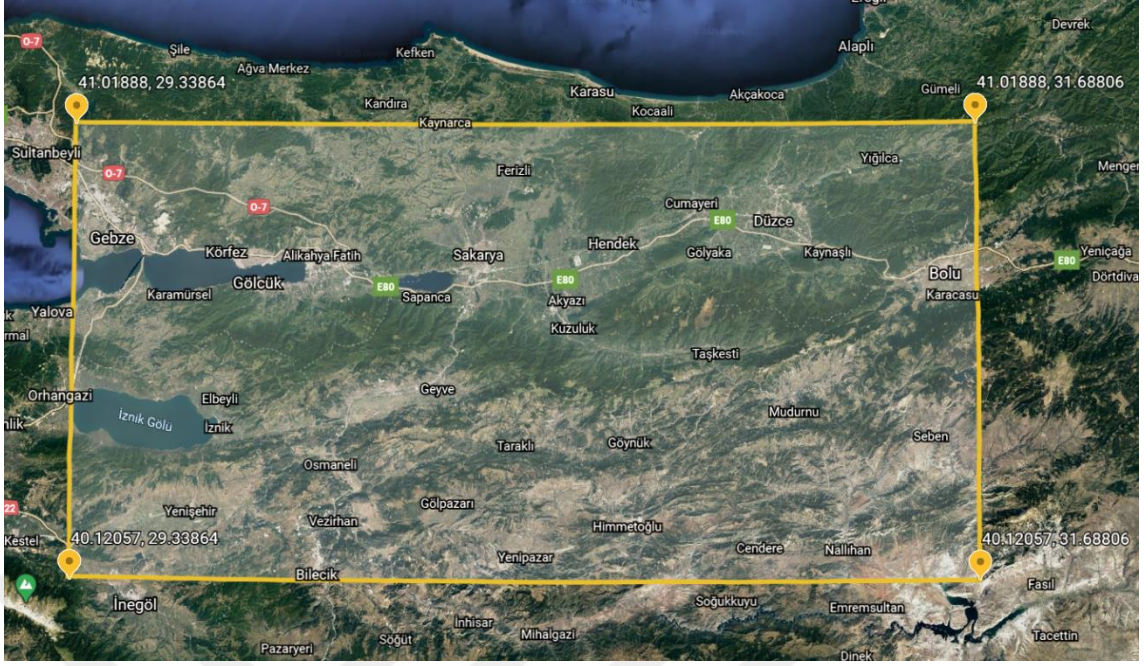
Bu tez çalışmasında Matlab programlama dili kullanılarak hazırlanan SiteEffect3D programının ve sonuçlarının test edilebilmesi amacıyla gerçek arazi modeli üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bunun için Marmara bölgesinde 200 km x 100 km 'lik bir alan belirlenmiştir. Bu alan aşağıdaki haritada (Şekil 5.22) kırmızı renkle gösterilen ve doğu-batı yönünde Yalova-Bolu, kuzey-güney yönünde Kaynarca-İnegöl arasındaki bölgedir.



Şekil 5.22 Gerçek arazi modeli için seçilen çalışma alanını gösteren harita

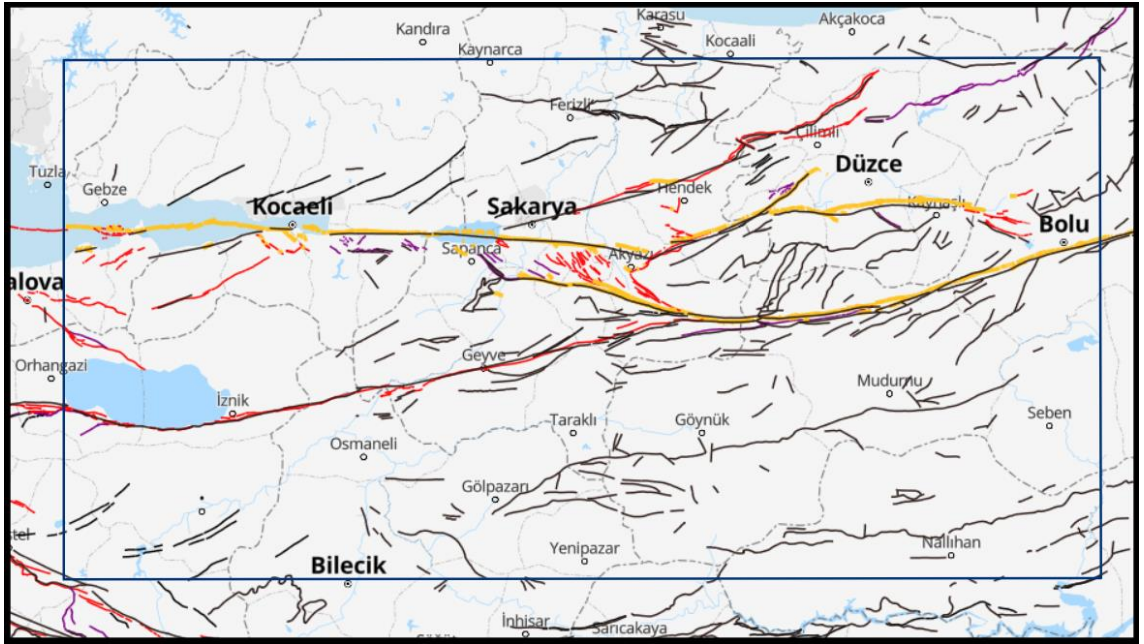


Şekil 5.23 Çalışma alanına ait yükseklikler ve uzunluklar



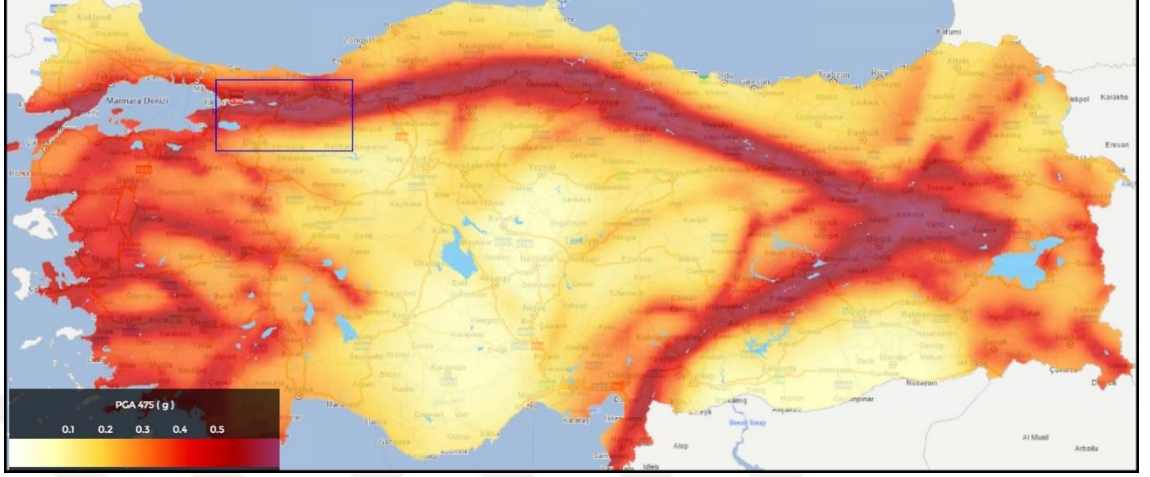
Şekil 5.24 Çalışma alanı köşe koordinatları ve yerleşim yerleri

Çalışma alanında çok sayıda fay bulunmaktadır. Bu fayların bir bölümü diri faylardır. Çalışma alanı içerisinde bulunan fay haritası (Anonim 2021a) aşağıda verilmektedir (Şekil 5.25).



Şekil 5.25 Çalışma alanı (mavi çerçeve) içerisindeki faylar

Çalışma alanının Türkiye Deprem Tehlike Haritası (Anonim 2021b) üzerindeki konumu aşağıda verilmektedir (Şekil 5.26).

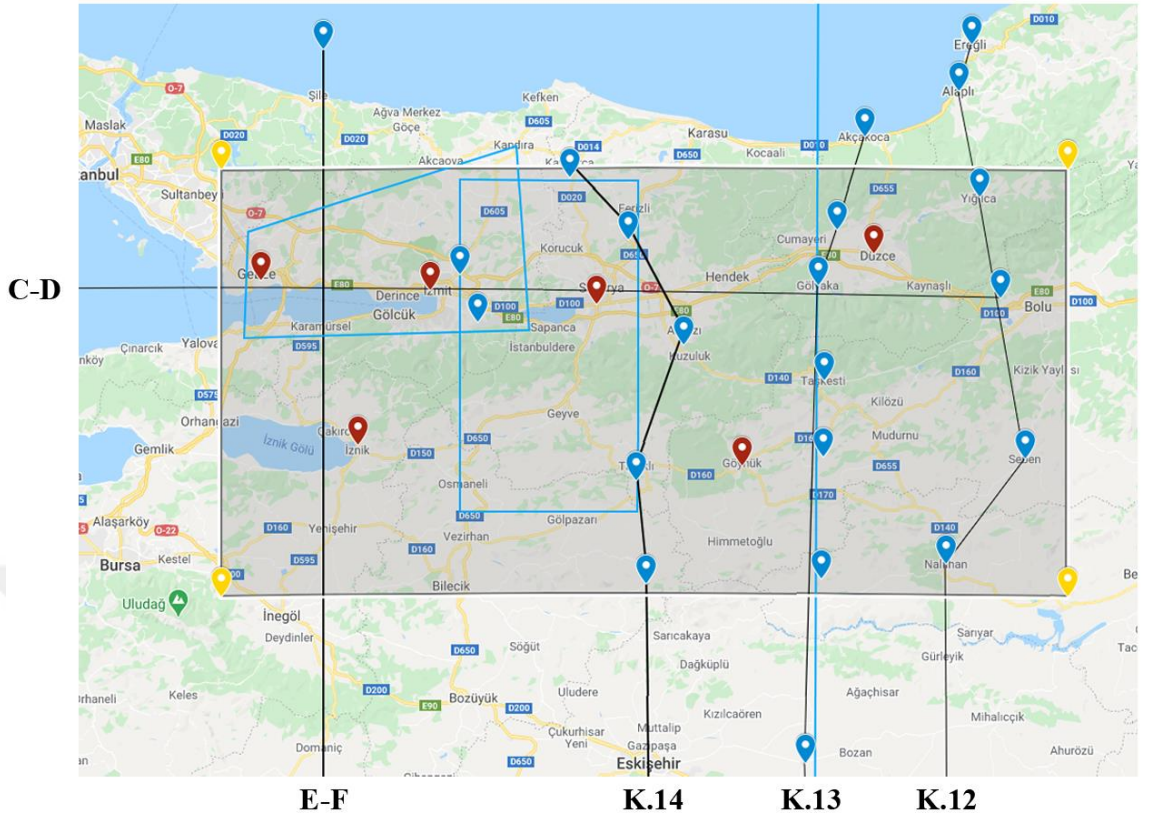


Şekil 5.26 Türkiye Deprem Tehlike Haritası üzerinde çalışma alanının (mavi çerçeve) konumu

Seçilen çalışma alanında gerçek arazi modeli oluşturabilmek için birçok akademik çalışmadan faydalanılmıştır. Arazi modeli oluştururken kullanılan akademik çalışmalardaki profil, kesit ve ölçü noktaları ile yararlanılan kaynaklar aşağıdaki çizelgede verilmektedir (Çizelge 5.3).

Çizelge 5.3 Gerçek arazi modeli hazırlanırken kullanılan akademik kaynaklar

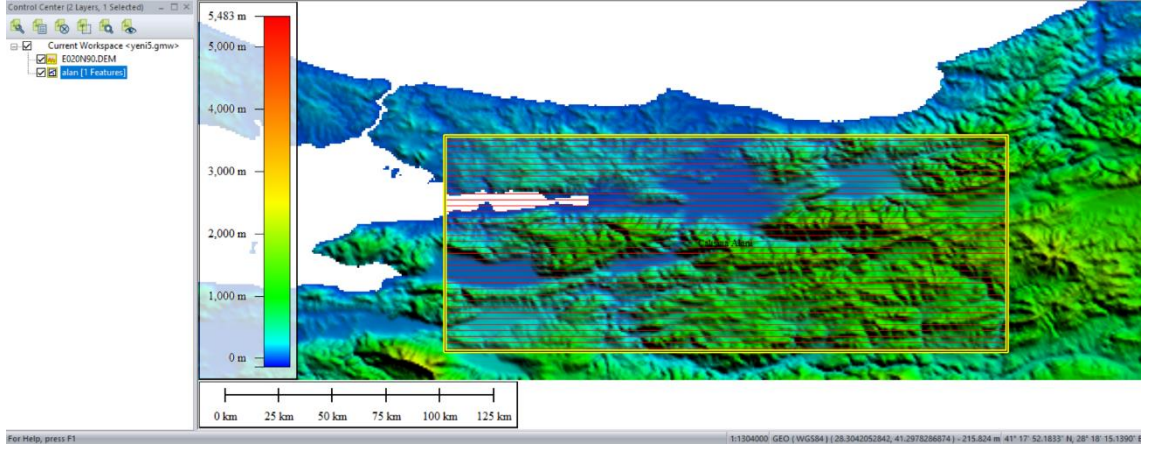
Profiller ve Ölçü Noktaları	Kaynaklar
C-D Profili ve E-F Profili	1) Tunç, B., “Marmara bölgesi’nin üç-boyutlu hız yapısının sismik tomografi yöntemi ile belirlenmesi”, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
K-12 Kesiti, K-13 Kesiti ve K-14 Kesiti	2) Candansayar, M.E. ve diğerleri, “Kuzey Batı Anadolu’nun Kabuk Yapısının Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması”, TÜBİTAK 105G145 nolu proje, 2010.
Diğer ölçü noktaları ve veri iyileştirme için kullanılan kaynaklar	3) Akın, U., “Investigation of the seismic velocity distribution and crustal structure of turkey by means of gravity data”, Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 153, 185-202, 2016.
	4) Barış, Ş. ve diğerleri, “Three-dimensional structure of Vp, Vs and Vp/Vs in the upper crust of the Marmara region, NW Turkey”, Earth Planets Space, 57, 1019-1038, 2005.
	5) Sabuncu, Ç.Y. ve diğerleri, “3-D crustal velocity structure of western Turkey: Constraints from full-waveform tomography”, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 270, 90–112, 2017.
	6) Soyuer, D., “Marmara bölgesinin kabuk yapısı ve hız dağılımının 3-Boyutlu tomografi ile belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
	7) Karahan, A.E. ve diğerleri, “Crustal structure at the western end of the North Anatolian Fault Zone from deep seismic sounding”, Annali Di Geofisica, 44, 49-68, 2001.
	8) Zor, E. ve diğerleri, “Shear wave velocity structure of the Izmit Bay area (Turkey) estimated from active–passive array surface wave and single-station microtremor methods”, Geophysical Journal International, 182, 1603-1618, 2010.
	9) Salah, K.M. ve diğerleri, “Crustal Velocity and Poisson’s Ratio Structures beneath Northwest Anatolia Imaged by Seismic Tomography”, European International Journal of Science and Technology, Vol 3.No:4, 133-157, 2014.
	10) Arslan, S., “Türkiye jeofizik rejyonel gravite haritaları ve genel değerlendirilmesi”, Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 153, 203-222, 2016.
	11) Karabulut, H. ve diğerleri, “Evolution of the seismicity in the eastern Marmara Sea a decade before and after the 17 August 1999 Izmit earthquake”, Tectonophysics, 510, 17-27, 2011.
	12) Kahraman, M. ve diğerleri, “Crustal-scale shear zones and heterogeneous structure beneath the North Anatolian Fault Zone, Turkey, revealed by a high-density seismometer array”, Earth and Planetary Science Letters, 430, 129-139, 2015.



Şekil 5.27 Ölçü almak için kullanılan profiller, ölçü noktaları (mavi), farklı şekillerde ve dizi şeklinde yerleştirilmiş sismik istasyon ağları (mavi çerçeveler), çalışma alanı köşeleri (sarı) ve deprem kayıt istasyonları (kırmızı)

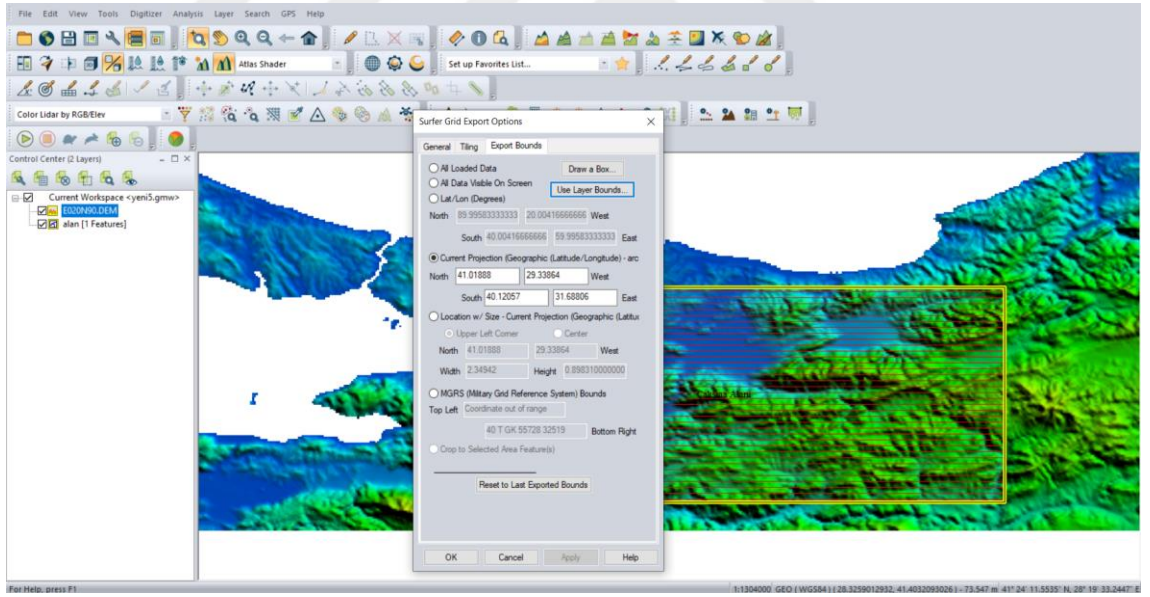
Şekil 5.27’de verilen harita üzerindeki kırmızı noktalar çalışma alanı içerisinde bulunan ve 17 Ağustos 1999 depremini kaydeden kayıt istasyonlarını, mavi noktalar ölçü alınan noktaları, çizgiler ise ölçü alınan profil ve kesitleri göstermektedir. Gerçek arazi modeli oluşturulurken kullanılacak olan ölçülere göre Z yönündeki düşey seviyeler tespit edilmiş ve buna uygun olarak 3-B sonlu eleman modeli için 8 farklı seviye seçilmiştir. Buna göre, düşey yönde 0, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10 ve 15 kilometre derinlik seviyelerindeki ölçüler kullanılmıştır. Böylece 8 farklı seviye ve 7 farklı katmandan oluşan 3-B sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Literatürdeki çalışmalardan elde edilen verilerin ölçü aralıkları ve 3-B sonlu eleman modeli kullanılarak bilgisayar ortamında gerçekleştirilecek olan dinamik çözüm için en uygun yatay aralıkların, X ve Y yönünde 10 km olmasına karar verilmiştir. 3-B sonlu eleman modeli için belirlenen çalışma alanına ait literatürdeki ölçüler kullanılarak bir Excel tablosu oluşturulmuştur. Oluşturulan tabloda 1848 düğüm noktası ve o düğüm noktalarına ait koordinatlar, V_p , V_s hızları ve yoğunluk değerleri

bulunmaktadır. Bu Excel tablosu oluşturulurken öncelikle 105G145 nolu TÜBİTAK projesinin sonuç raporunda (Candansayar vd. 2011) yayınlanan farklı derinlik seviyeleri için (0.5, 2, 5, 8, 12, 15km) verilen Vp hız kesitleri üzerinden belirlenen ölçü noktaları için profiller boyunca Vp hızları okunarak tabloya işlenmiştir. İkinci olarak Berna Tunç'un doktora tezinde (Tunç 2008) yayınlamış olduğu C-D ve E-F kesitlerinden farklı derinlik seviyeleri için (0, 5, 10, 15 km) Vp ve Vs hızları okunarak Excel tablosuna işlenmiştir. Yukarıda verilen çizelge 5.4'deki diğer akademik çalışmalardan (Eberhart-Phillips vd. 1994, Bariş vd. 2005, Zor vd. 2010, Karabulut vd. 2011, Soyuer 2012, Salah vd. 2014, Kahraman vd. 2015, Akın 2016, Arslan 2016, Sabuncu vd. 2017) elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan Excel tablosunda eksik olan veriler tamamlanmıştır. Bu işlem yapılırken bazı seviyeler ve düğüm noktaları için bilimsel yayınlardaki Vp/Vs oranlarının verildiği kesitler kullanılmıştır. Yeterli verinin olmadığı bazı durumlar için yakınındaki noktalar kullanılarak interpolasyon yöntemiyle değerler üretilmiştir. Tabaka yoğunlukları konuyla ilgili makalelerden alınmıştır (Çizelge 5.3). Bu işlemler tamamlandıktan sonra çalışma alanına ait yüzey topoğrafyasının 3-B sonlu eleman modeline dahil edilebilmesi için gerekli çalışmalar yapılmıştır. Çalışma alanına ait sayısal yükseklik modeli (SYM) verileri http://www.webgis.com/terr_world.html sitesinden alınmıştır. Bu veriler GTOPO30 formatında olup, USGS tarafından üretilmiş yaklaşık 1 km yatay ızgara aralığına sahiptir. Elde edilen SYM verilerinden Global Mapper ve Surfer yazılımları kullanılarak 10 km aralıklı gridlenmiş kontur haritası üretilmiştir. Bu işlemler yapılırken SYM verisi önce Global Mapper programında açılmış ve bu veri üzerine çalışma alanının koordinatları girilmiştir (Şekil 5.28).

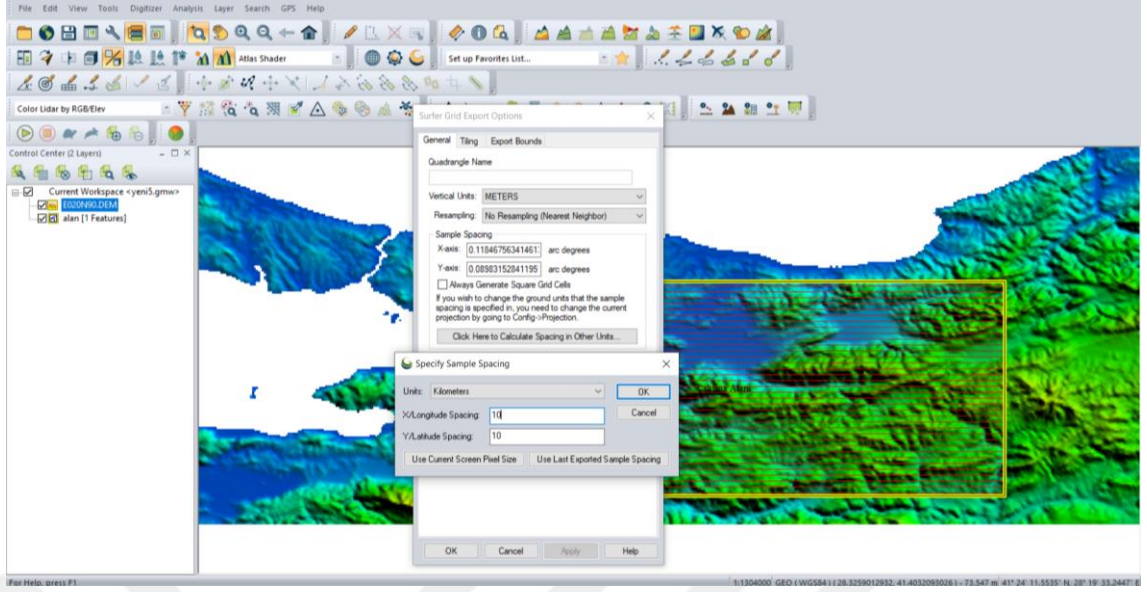


Şekil 5.28 Global Mapper programında çalışma alanının belirlenmesi

SYM verisinden çalışma alanı koordinatlarına uygun olarak (Şekil 5.29) X ve Y yönünde 10km aralıklı kontur harita verisi üretebilmek için Surfer Grid formatında Layer, Export işlemi yapılmıştır (Şekil 5.30).

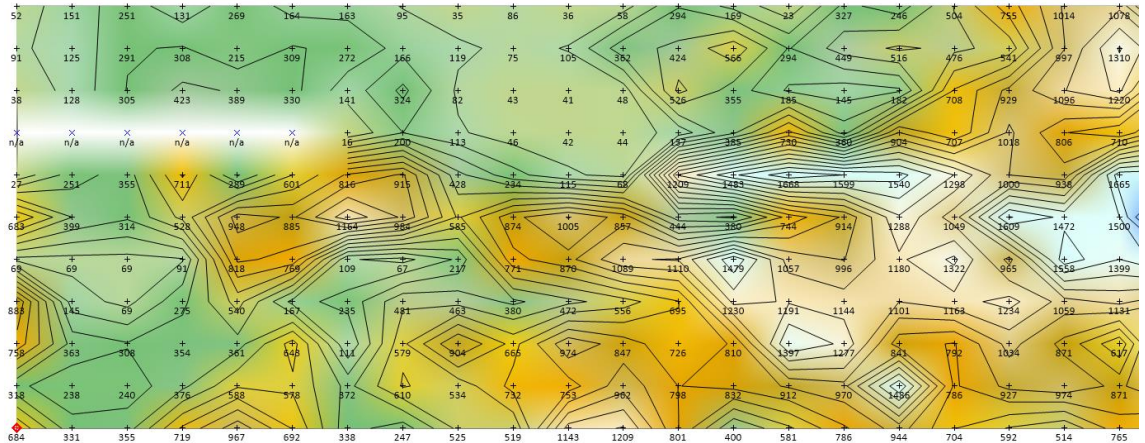


Şekil 5.29 SYM verisinden çalışma alanı koordinatlarına uygun veri üretme 1. aşaması



Şekil 5.30 SYM verisinden 10km X ve Y aralıklı kontur verisi üretme 2.aşaması

Surfer Grid yapısında üretilen dosya Surfer programında açılarak grid yapıda kontur haritası elde edilmiştir (Şekil 5.31).



Şekil 5.31 10 km aralıklı gridlenmiş arazi yüksekliklerini gösteren kontur harita

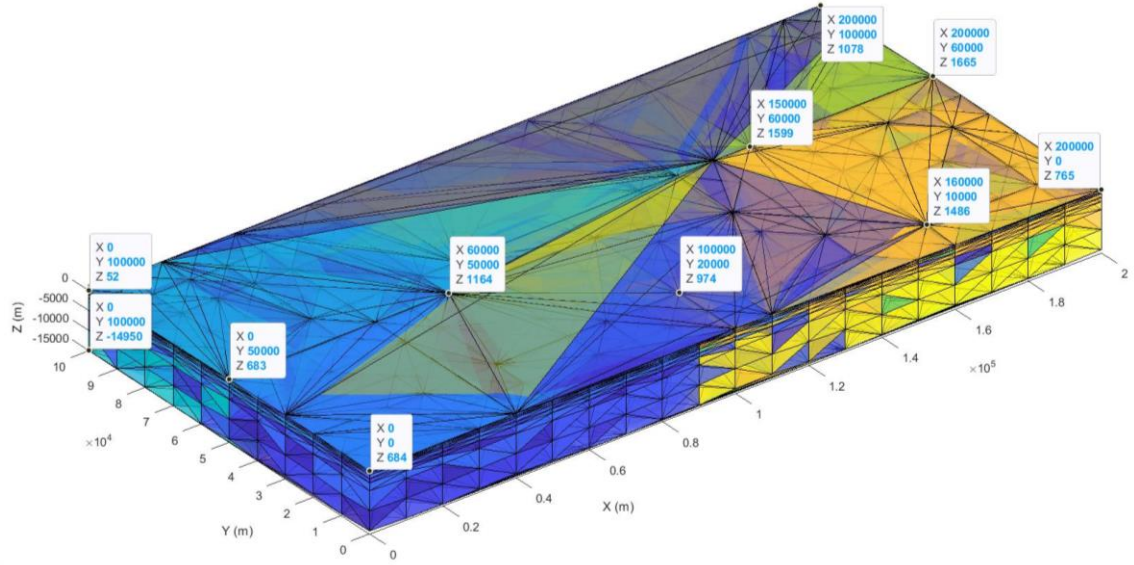
Elde edilen kontur haritası verileri uygun yapıda Excel verisine dönüştürülmüştür. Bu veriler önceden 3-B sonlu eleman modeli üretmek için hazırlanmış olan Excel dosyasına koordinatlar kullanılarak uygun şekilde işlenmiştir. Böylece çizelge 5.3’de verilen akademik çalışmalardan elde edilen verilerle SYM verilerinden elde edilen sonuçlar birleştirilmiştir. Çizelge 5.4’te 3-B sonlu eleman modeli için hazırlanan veriden örnekler

görülmektedir. Sonuç olarak hazırlanan tüm veriler Matlab içerisinde kolayca kullanılabilmesi için koordinat bilgileri, V_p , V_s , yoğunluk ve yükseklik bilgilerinin bulunduğu bir MAT dosyası olarak kaydedilmiştir.

Çizelge 5.4 3-B sonlu eleman modeli için hazırlanan verilerden örnekler

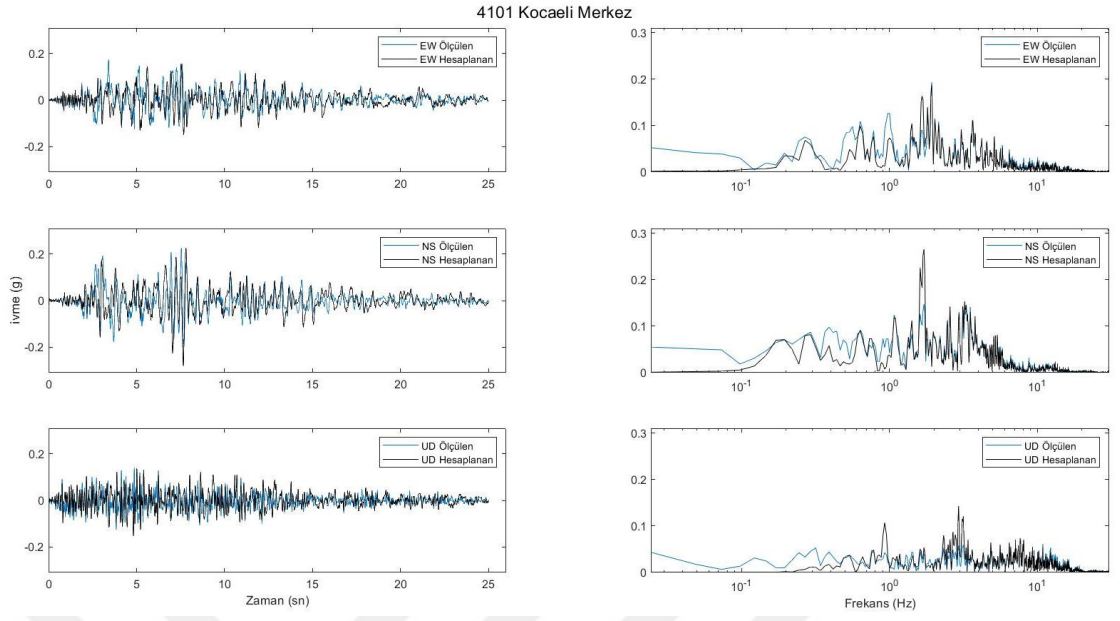
X (km)	Y (km)	Z (km)	Enlem	Boylam	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (g/cm ³)
0	0	0.68	40.12	29.34	1475	600	1.75
10	0	0.33	40.12	29.46	1100	348	1.65
20	0	0.36	40.12	29.58	1150	380	1.70
30	0	0.72	40.12	29.70	1550	650	1.85
40	0	0.97	40.12	29.82	2075	930	1.95
50	0	0.69	40.12	29.93	1500	650	1.80
60	0	0.34	40.12	30.05	1100	450	1.70
70	0	0.25	40.12	30.17	1050	400	1.65
80	0	0.53	40.12	30.29	1350	500	1.70
90	0	0.52	40.12	30.41	1300	500	1.65
100	0	1.14	40.12	30.52	2100	975	2.00
110	0	1.21	40.12	30.64	2200	1000	2.10
120	0	0.80	40.12	30.76	1925	900	1.95
130	0	0.40	40.12	30.88	1200	450	1.70
140	0	0.58	40.12	31.00	1400	550	1.75
150	0	0.79	40.12	31.11	1800	650	1.95
160	0	0.94	40.12	31.23	2000	850	1.95
170	0	0.70	40.12	31.35	1550	600	1.95
180	0	0.59	40.12	31.47	1450	600	1.80
190	0	0.51	40.12	31.59	1250	450	1.70
200	0	0.77	40.12	31.70	1650	700	1.90

Şekil 5.32’de hazırlanan veriden üretilen 3-B sonlu eleman yöntemiyle oluşturulmuş gerçek arazi modeli görülmektedir.

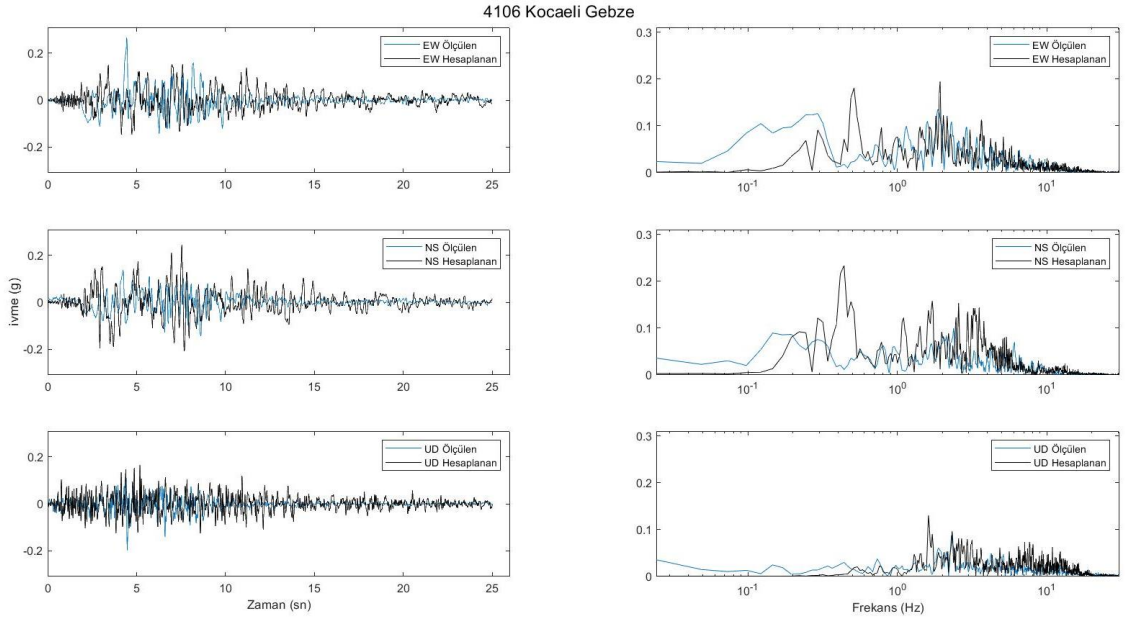


Şekil 5.32 3-B sonlu eleman yöntemiyle oluşturulmuş gerçek arazi modeli

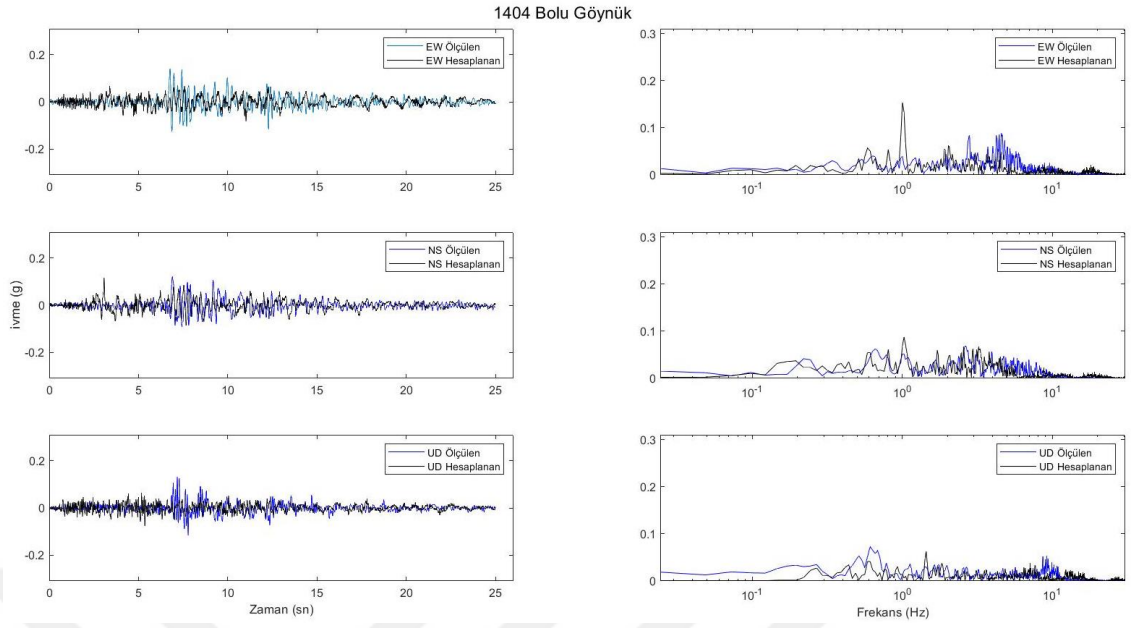
SiteEffect3D yazılımı ve oluşturulan 3-B sonlu eleman modelinin doğruluğunu test edebilmek amacıyla zemini ana kaya özelliği gösteren ($V_{s30} = 826$ m/s) 4101-Kocaeli Merkez deprem ivme kayıt istasyonuna ait 17 Ağustos 1999 İzmit depremi ivme kayıtları giriş ivmesi olarak kullanılmıştır. Yapılan dinamik analiz sonucu çalışma sahası içerisinde bulunan ve 17 Ağustos 1999 İzmit depreminde üç bileşenli ivme kaydı alabilen tüm istasyonlarda (4106- Kocaeli Gebze, 4101-Kocaeli Merkez, 1612-Bursa İznik, 1404-Bolu Göynük, 8101-Düzce Merkez) deprem anında ölçülen giriş ivmeleri ile dinamik analiz sonucunda hesaplanan ivmeler ve ivmelere ait frekans spektrumları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticesinde ölçülen ve hesaplanan değerlerin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 5.33-5.37). Çalışma sahası içerisinde bulunan ancak 17 Ağustos 1999 İzmit depreminin N-S bileşeninin sağlıklı olmadığı düşünülen 5401- Sakarya Merkez istasyon verisi çalışmaya dahil edilmemiştir. İvme kaydının etkin olan 25 saniyelik kısmı pencerelenerek alınmıştır. 3-B sonlu eleman modelinde 1.XZ yüzeyi ve 1.YZ yüzeylerinde sınır koşulları uygulanmıştır.



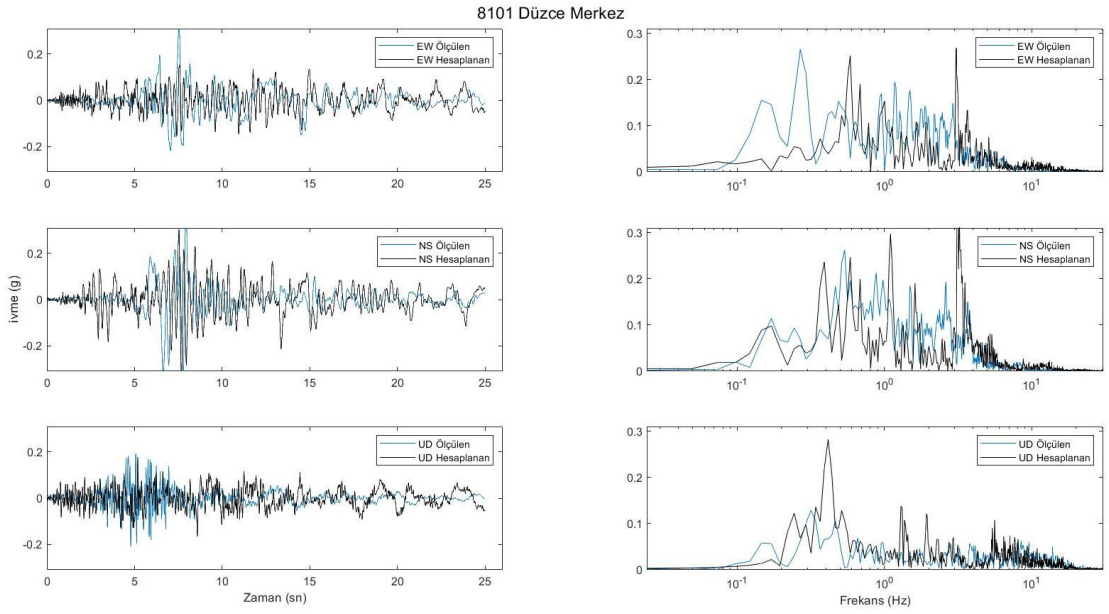
Şekil 5.33 4101-Kocaeli Merkez istasyonu ölçülen ve hesaplanan ivme-zaman ve ivme-frekans grafiği



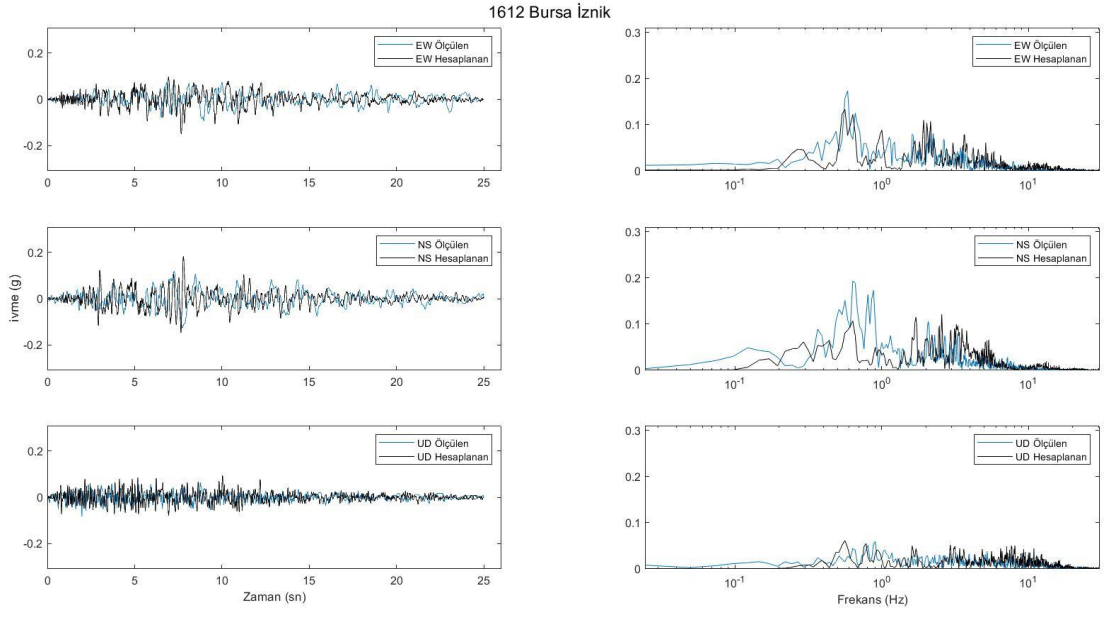
Şekil 5.34 4106-Kocaeli Gebze istasyonu ölçülen ve hesaplanan ivme-zaman ve ivme-frekans grafiği



Şekil 5.35 1404-Bolu Göynük istasyonu ölçülen ve hesaplanan ivme-zaman ve ivme-frekans grafiği

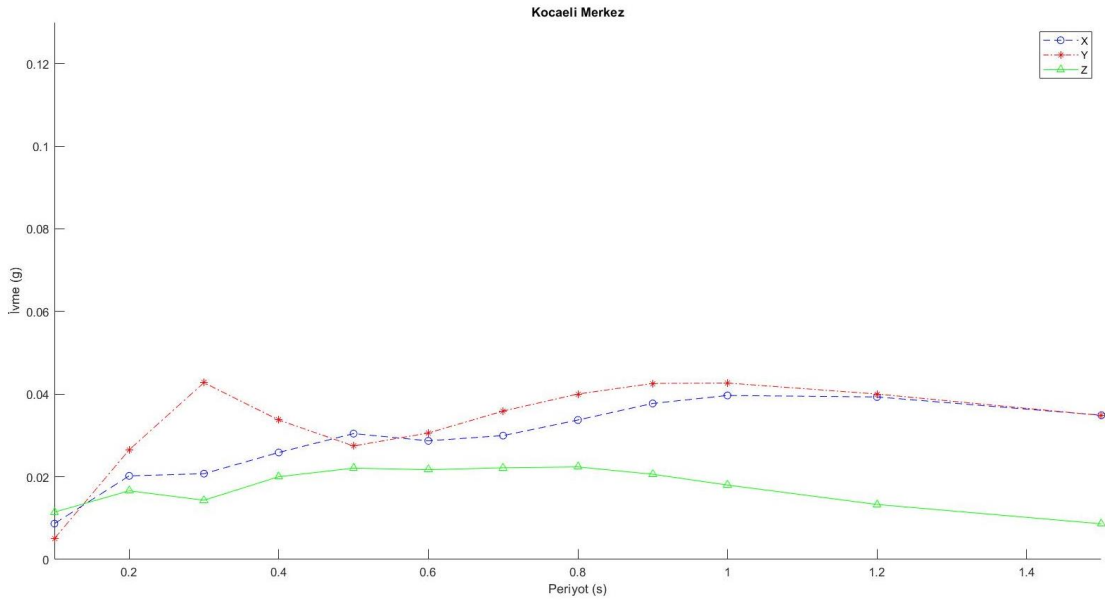


Şekil 5.36 8101-Düzce Merkez istasyonu ölçülen ve hesaplanan ivme-zaman ve ivme-frekans grafiği

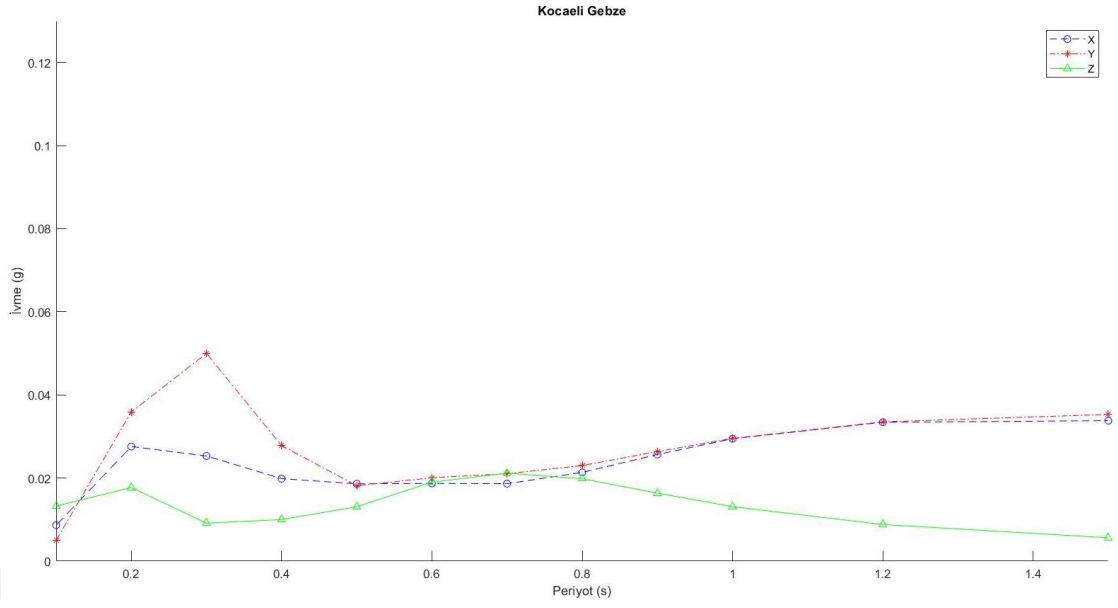


Şekil 5.37 1612-Bursa İznik istasyonu ölçülen ve hesaplanan ivme-zaman ve ivme-frekans grafiği

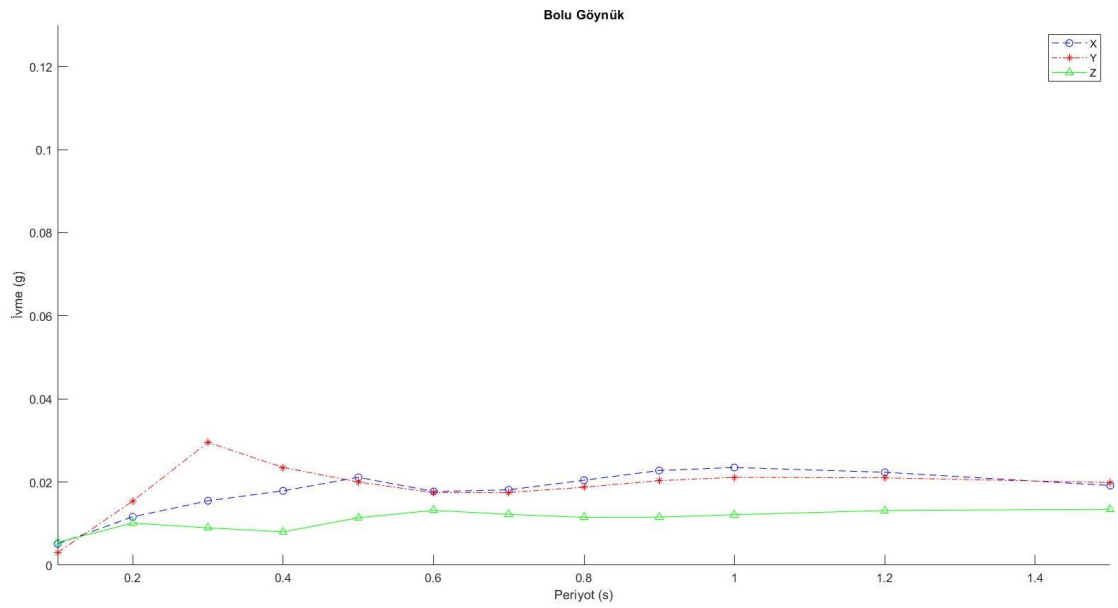
Dinamik analiz sonuçları kullanılarak farklı deprem kayıt istasyonlarının bulunduğu zeminlere ait ivme-periyot grafikleri aşağıda verilmiştir (Şekil 5.38-5.42).



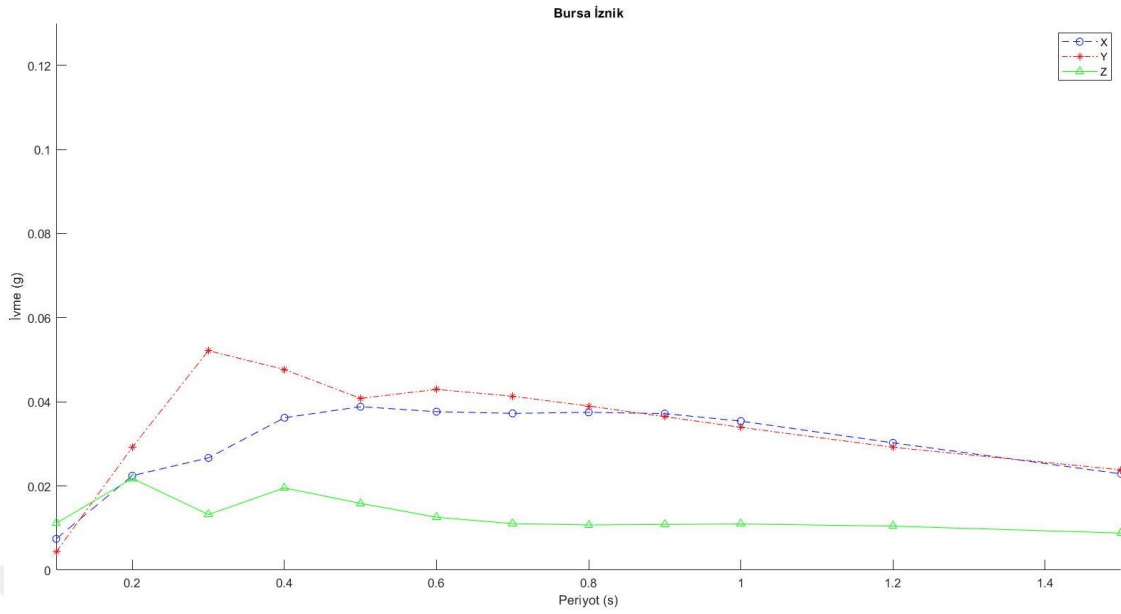
Şekil 5.38 Kocaeli Merkez (4101) istasyonunun bulunduğu zemine ait spektral ivme-periyot grafiği



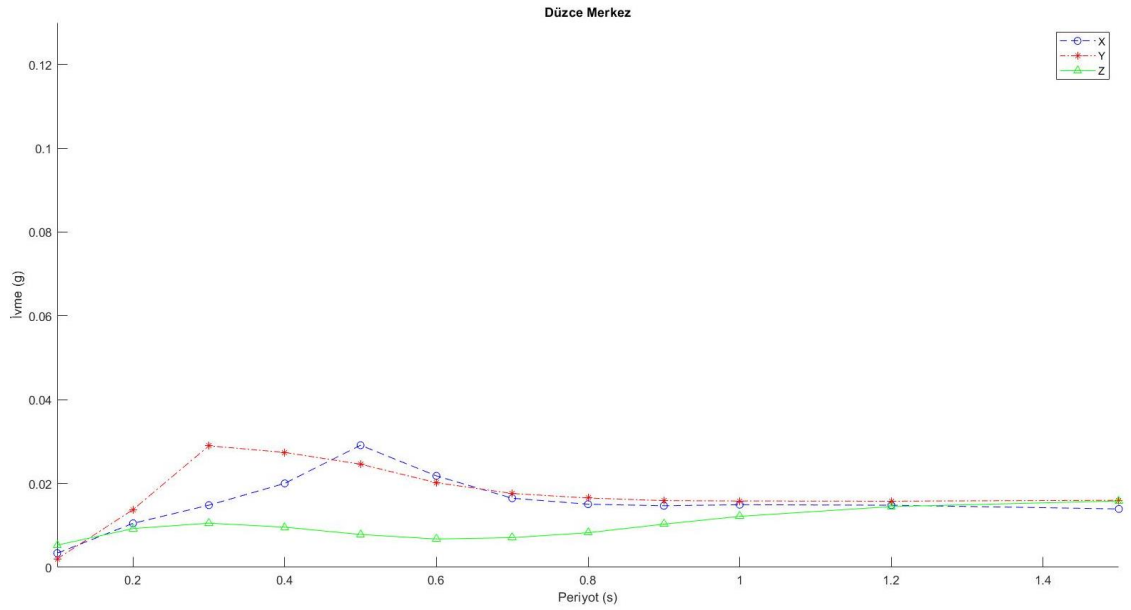
Şekil 5.39 Kocaeli Gebze (4106) istasyonunun bulunduğu zemine ait spektral ivme-periyot grafiği



Şekil 5.40 Bolu Göynük (1404) istasyonunun bulunduğu zemine ait spektral ivme-periyot grafiği



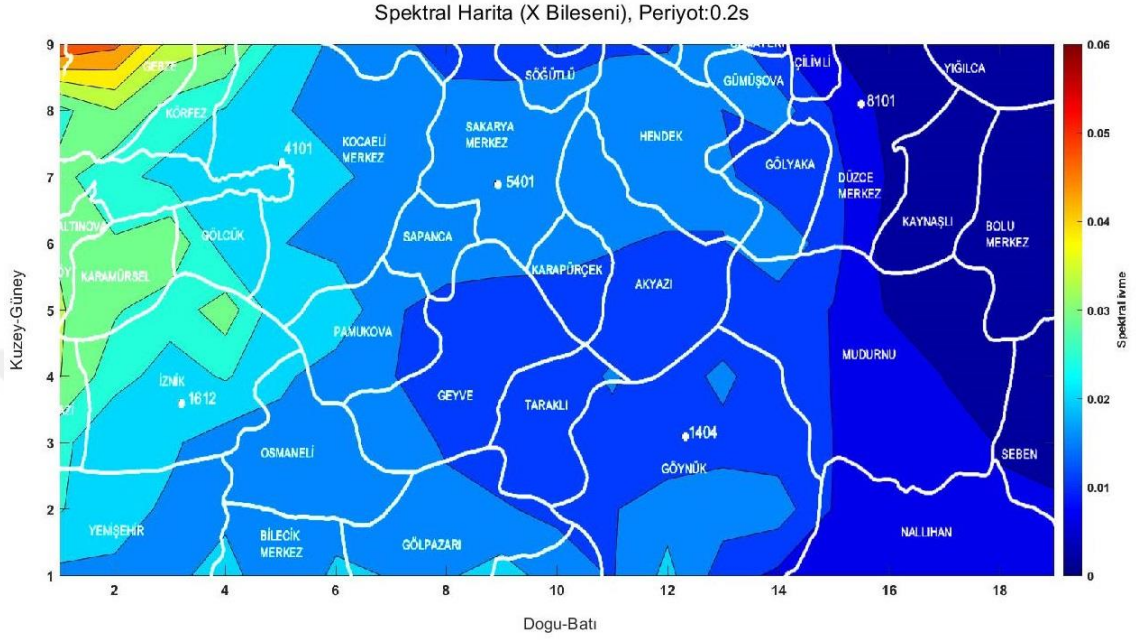
Şekil 5.41 Bursa İznik (1612) istasyonunun bulunduğu zemine ait spektral ivme-periyot grafiği



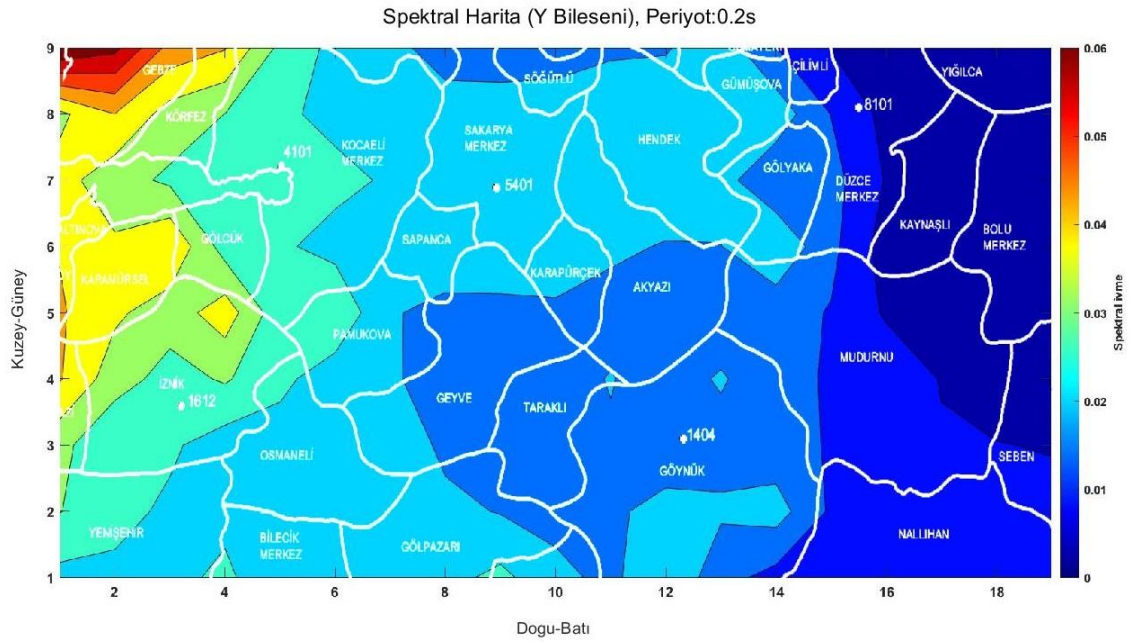
Şekil 5.42 Düzce Merkez (8101) istasyonunun bulunduğu zemine ait spektral ivme-periyot grafiği

Gerçek arazi modeli üzerinde yapılan dinamik analiz sonuçları kullanılarak örnek olarak seçilen farklı periyotlar için (0.2s, 0.5s, 1.0s ve 1.5s) hazırlanan ve üzerine ilçe sınırlarının

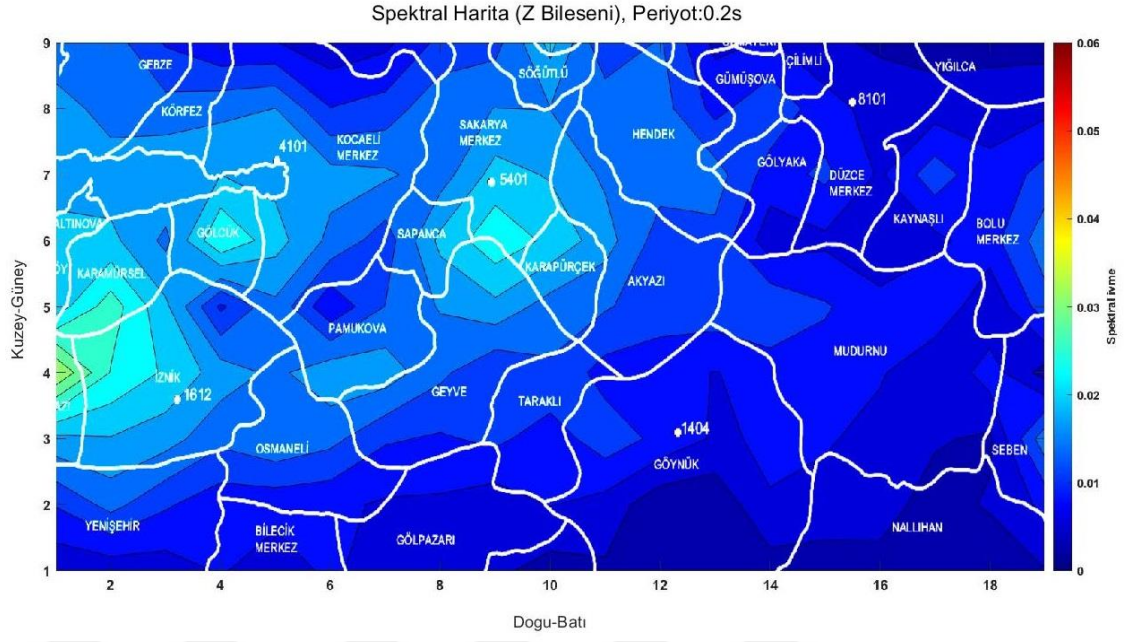
ve isimlerinin de belirtildiği spektral haritalar çizdirilmiştir (Şekil 5.43-5.54). Farklı periyotlardaki değerler birbirinden farklı aralıkta olduğundan her bir periyot ölçeği kendi içerisinde aynı olacak şekilde seçilmiştir.



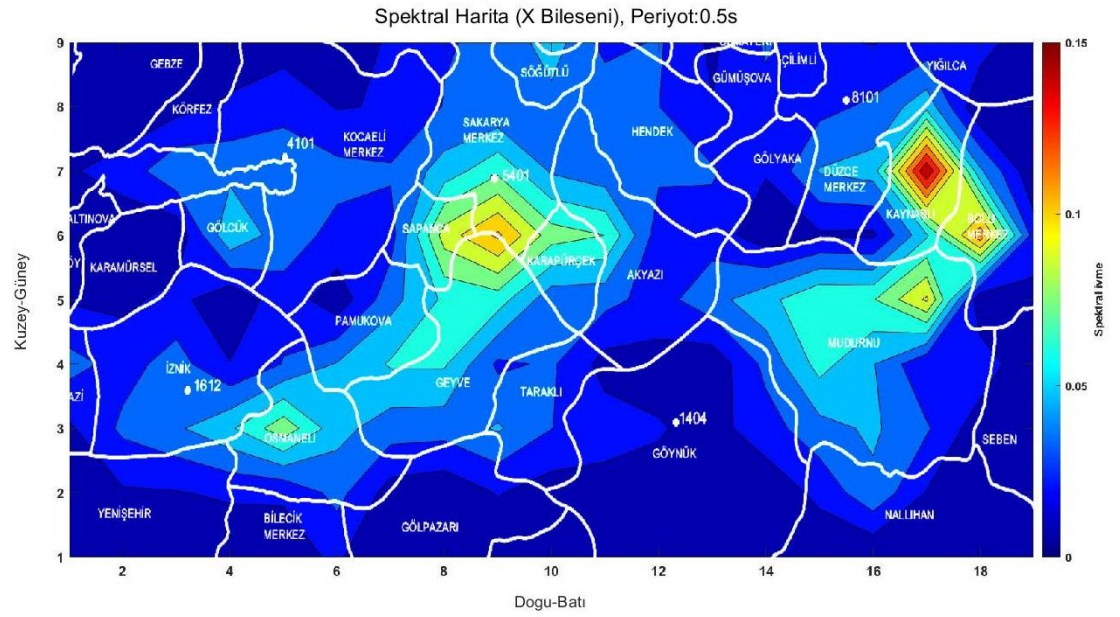
Şekil 5.43 Periyodu 0.2s olan X bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita



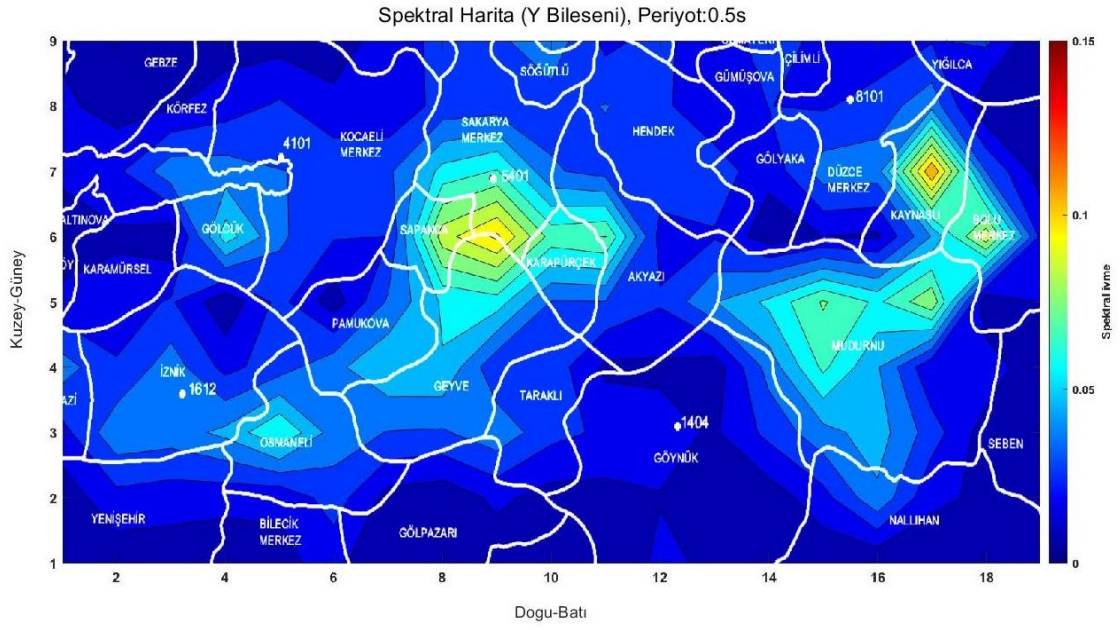
Şekil 5.44 Periyodu 0.2s olan Y bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita



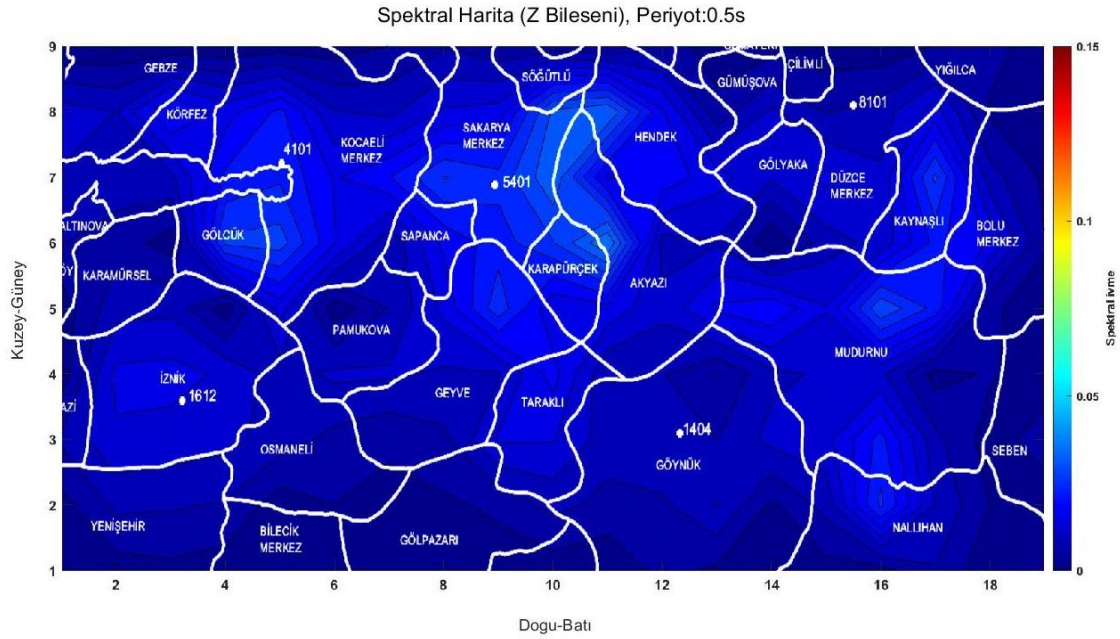
Şekil 5.45 Periyodu 0.2s olan Z bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita



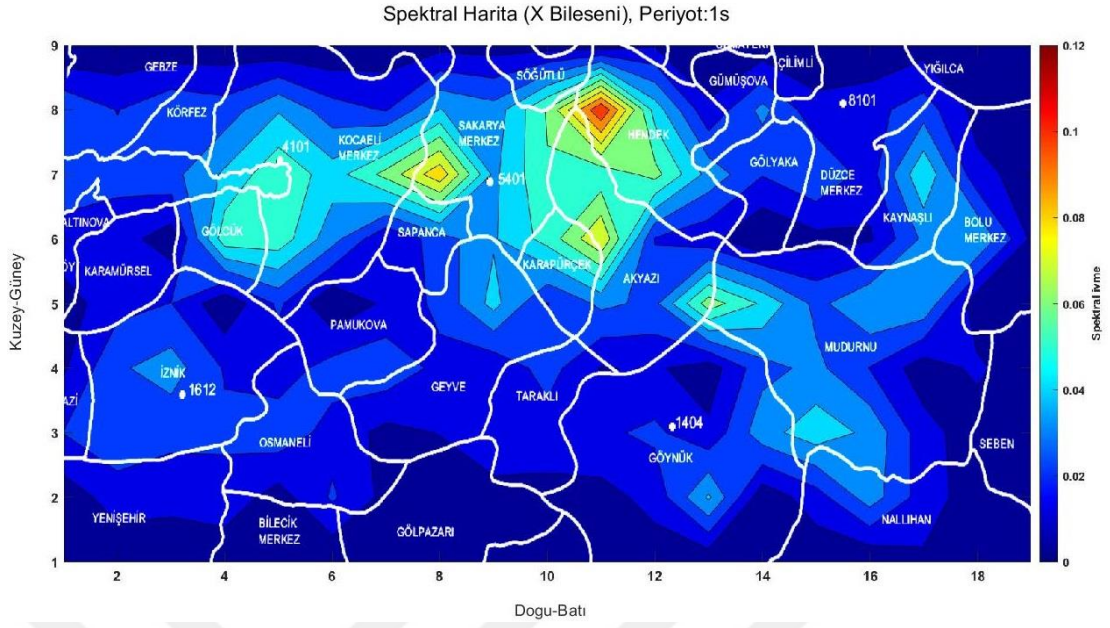
Şekil 5.46 Periyodu 0.5s olan X bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita



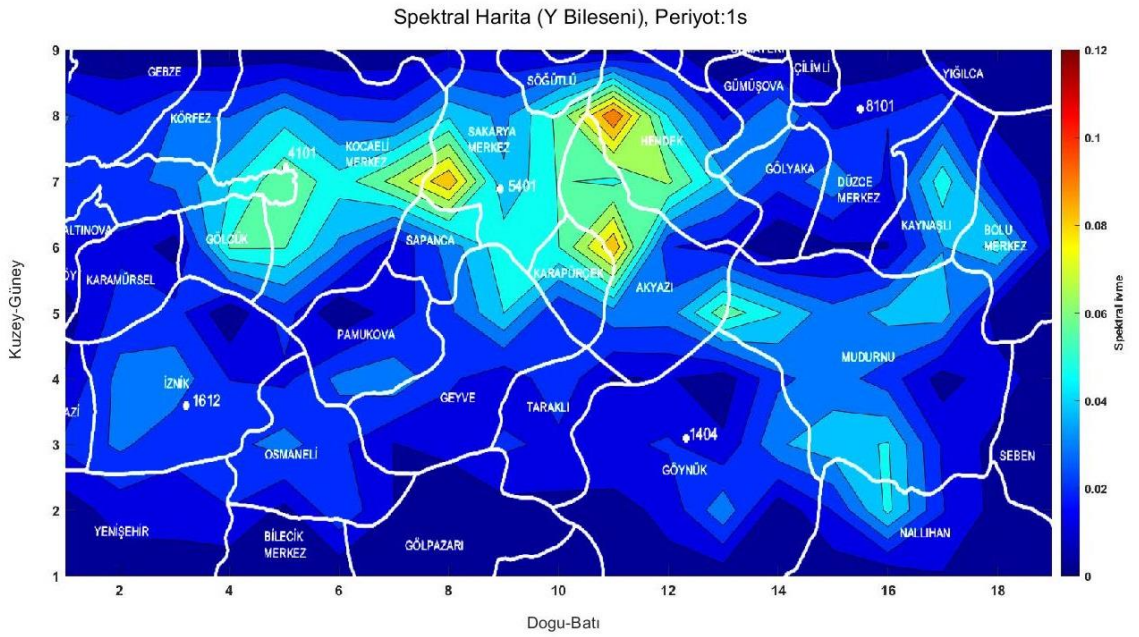
Şekil 5.47 Periyodu 0.5s olan Y bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita



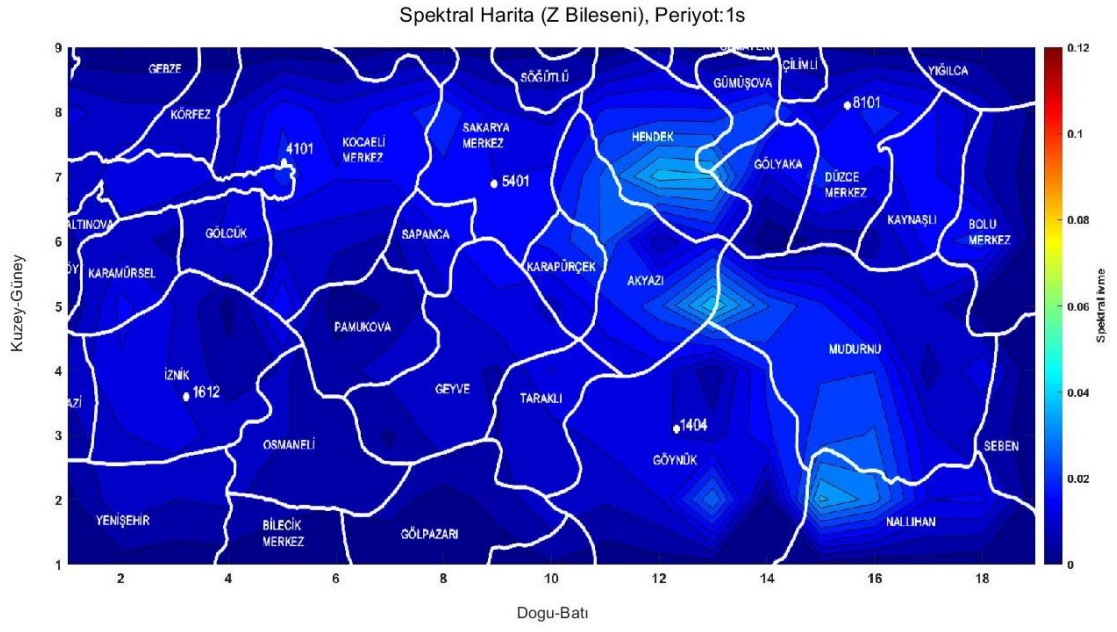
Şekil 5.48 Periyodu 0.5s olan Z bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita



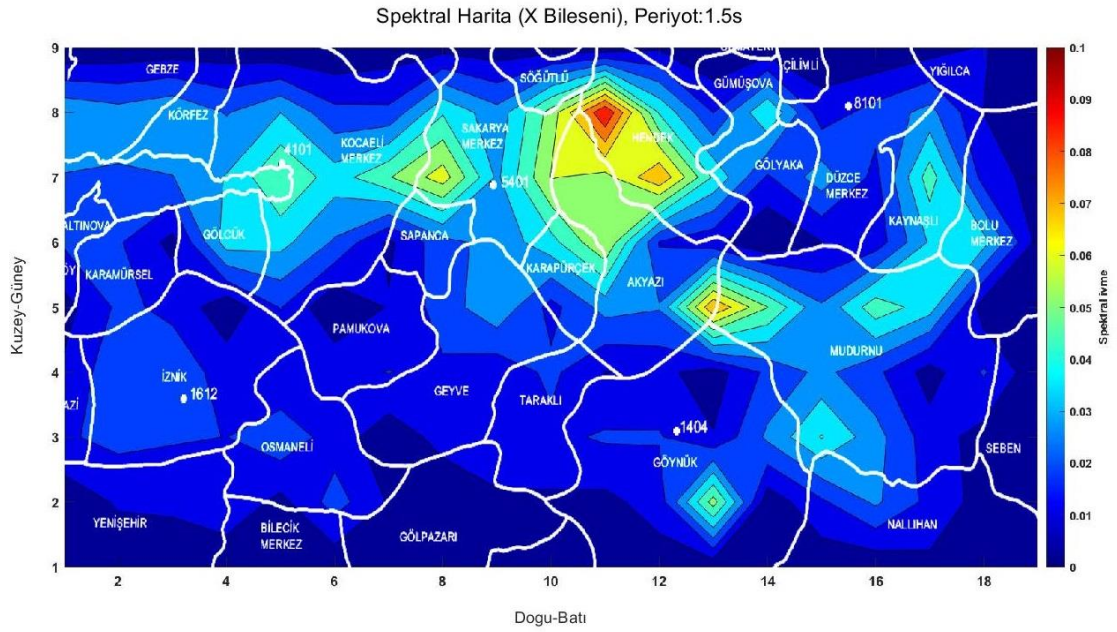
Şekil 5.49 Periyodu 1.0s olan X bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita



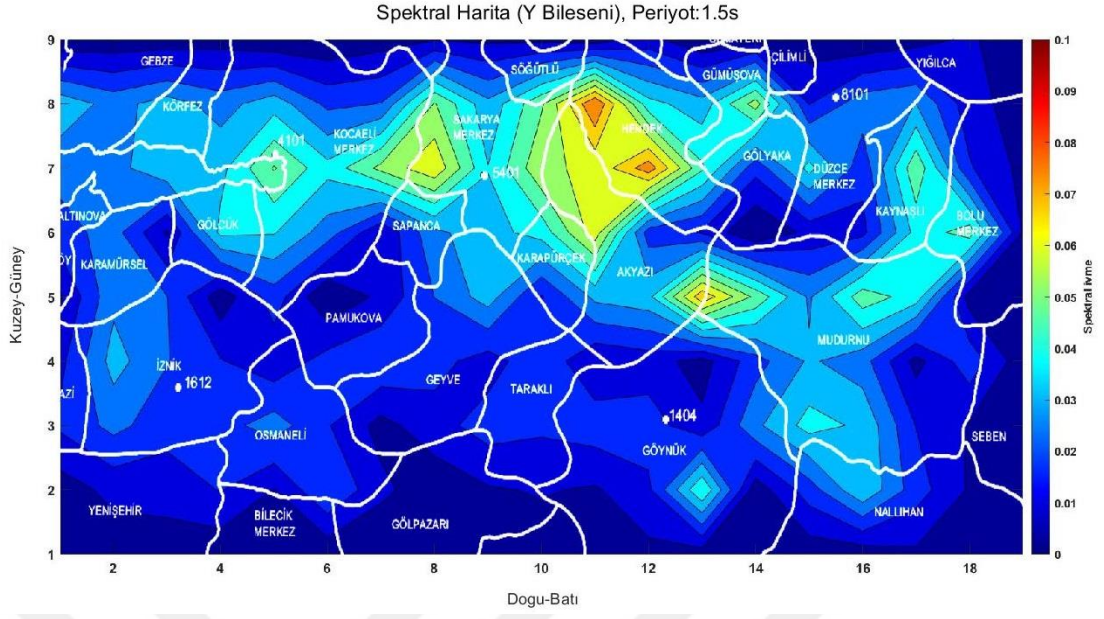
Şekil 5.50 Periyodu 1.0s olan Y bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita



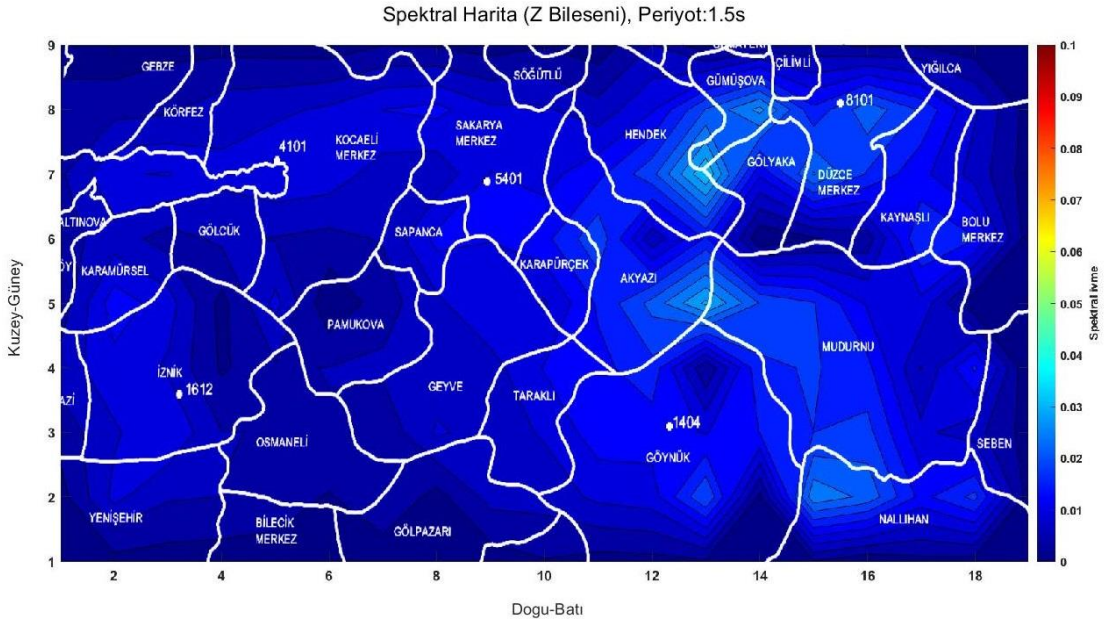
Şekil 5.51 Periyodu 1.0s olan Z bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita



Şekil 5.52 Periyodu 1.5s olan X bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita

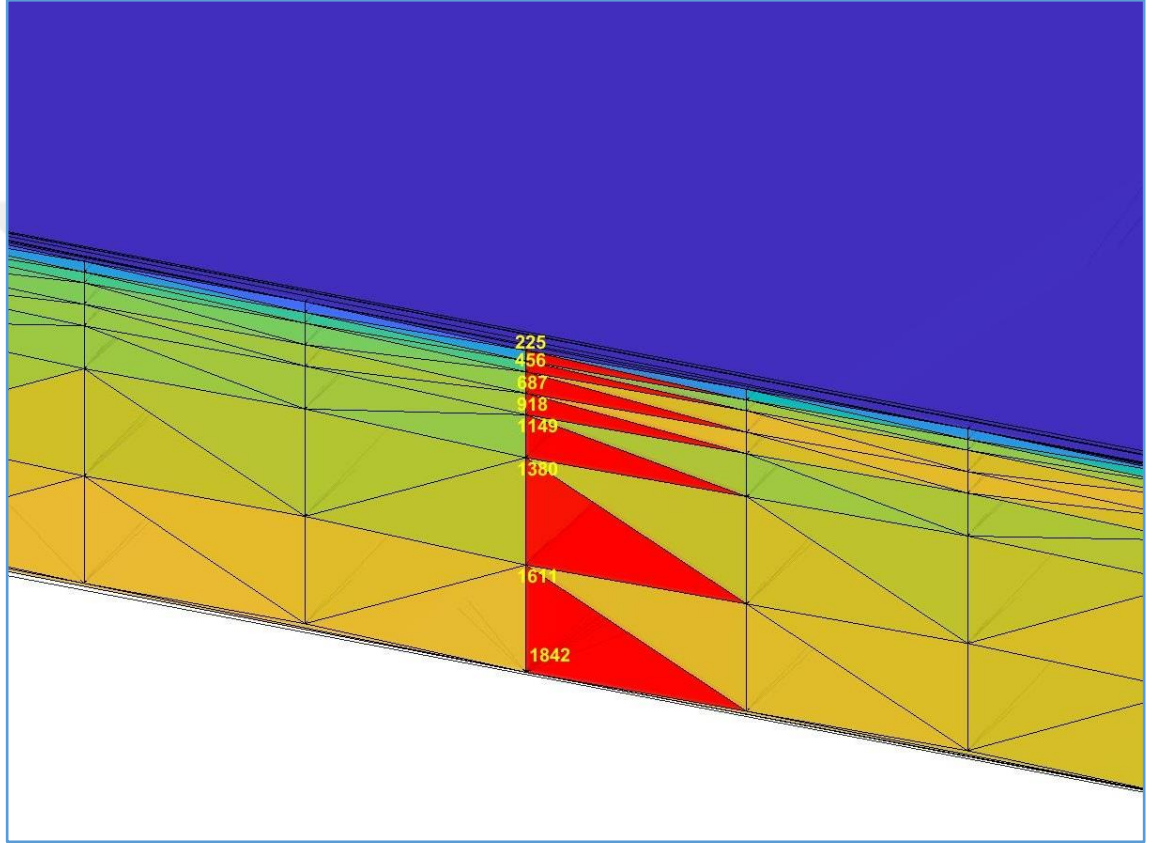


Şekil 5.53 Periyodu 1.5s olan Y bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita

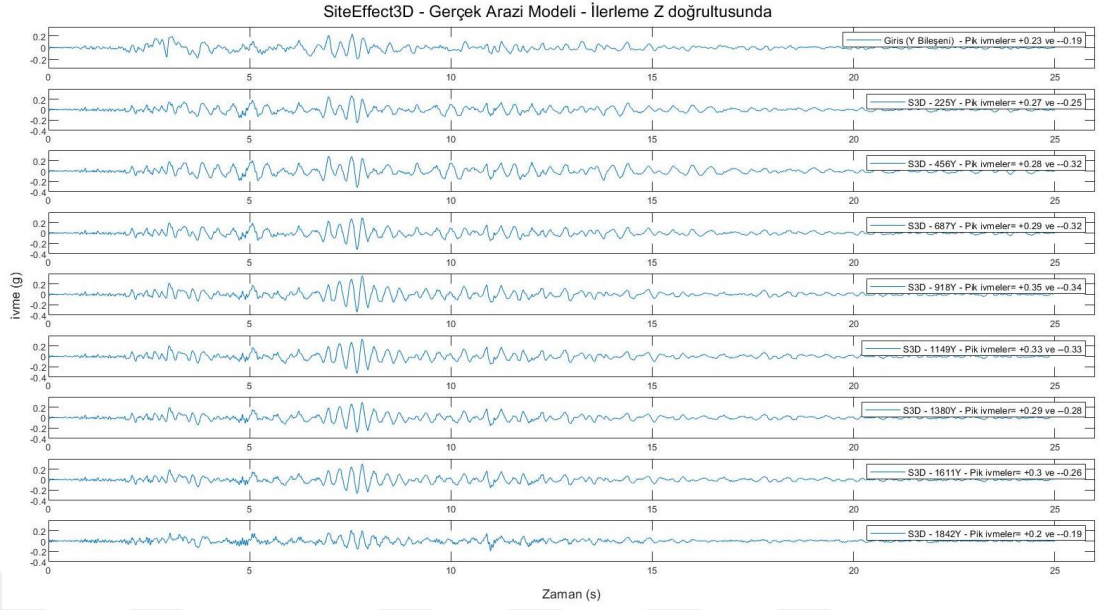


Şekil 5.54 Periyodu 1.5s olan Z bileşenine ait ilçe sınırlarıyla birlikte çizdirilmiş spektral harita

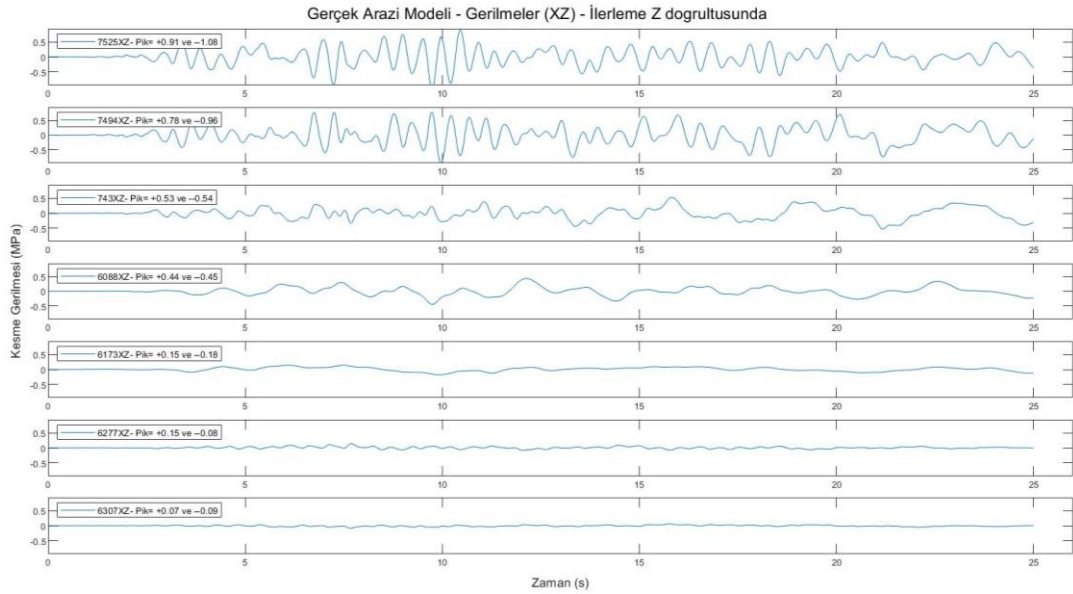
Yapılan dinamik analiz sonuçları kullanılarak örnek olarak seçilen düğüm noktaları (225, 456, 687, 918, 1149, 1380, 1611, 1842) için (Şekil 5.55) çıkış ivme-zaman grafiği (Şekil 5.56) ve modelde belirlenen elemanlar (kırmızı renkli) için (Şekil 5.55) gerilme-zaman grafiği (Şekil 5.57) çizdirilmiştir.



Şekil 5.55 Dinamik analiz sonuçlarının gösterildiği örnek düğüm noktaları (sarı) ve elemanlar (kırmızı)

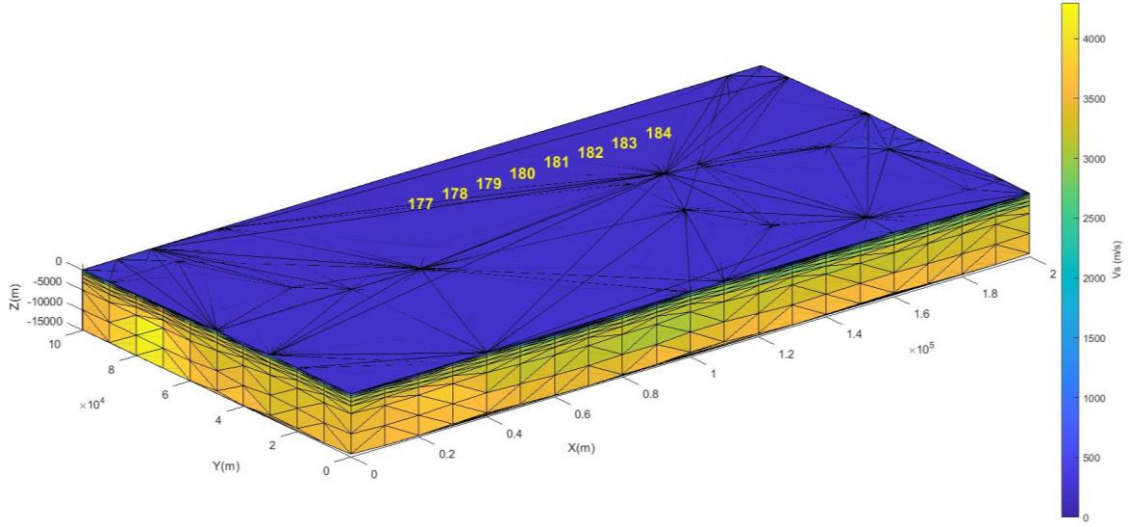


Şekil 5.56 Seçilen örnek düğüm noktaları için çıkış ivme-zaman grafikleri

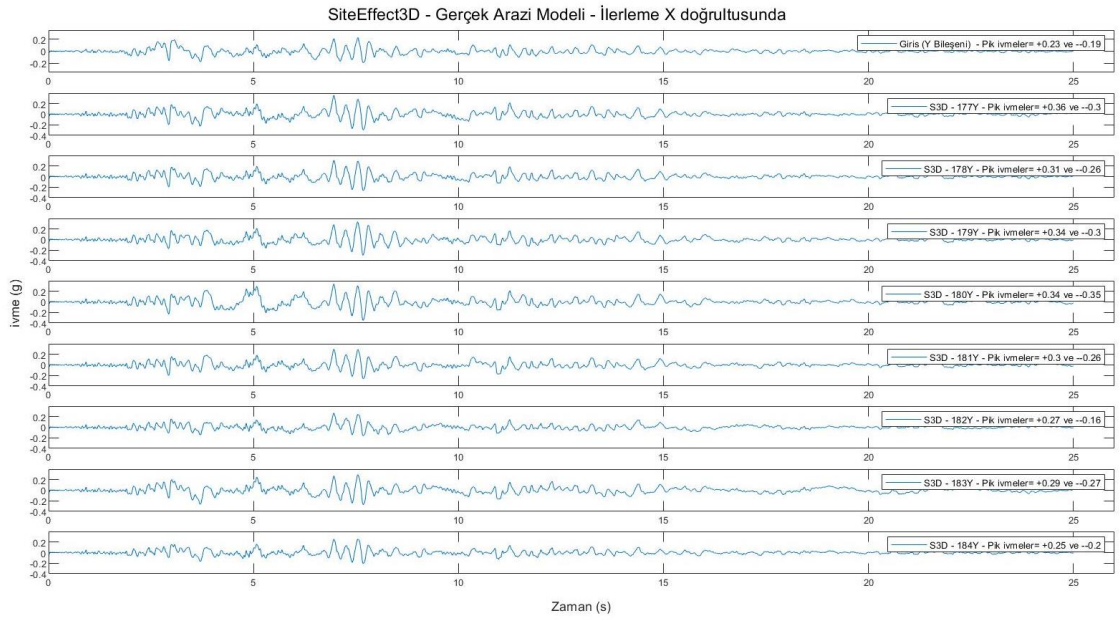


Şekil 5.57 Seçilen örnek elemanlar için gerilme-zaman grafikleri

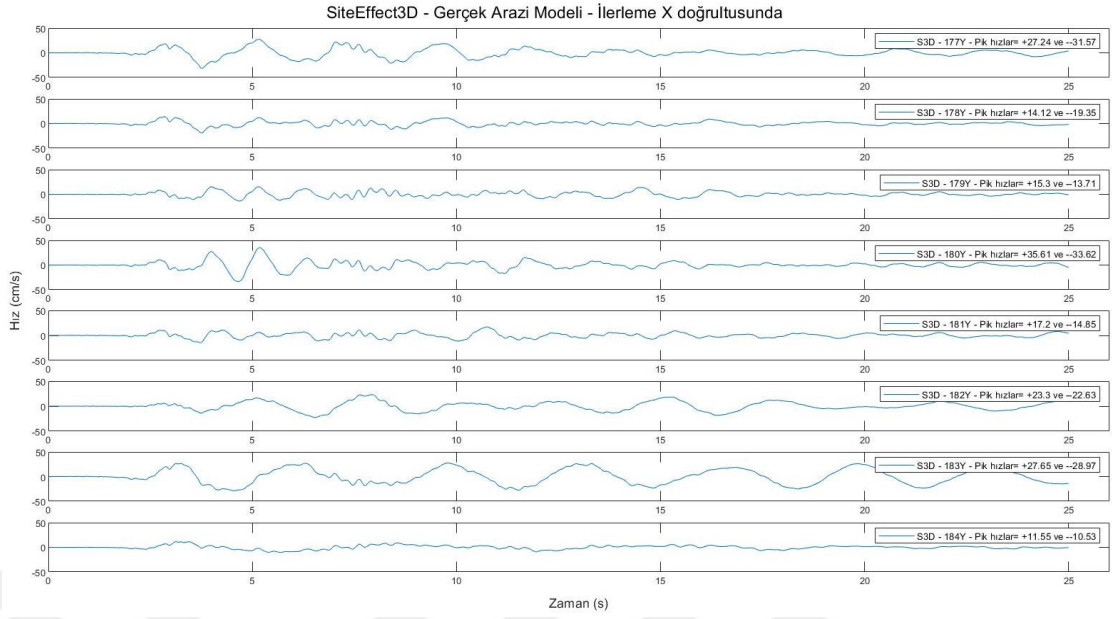
Aynı 3-B sonlu eleman modeli için yüzeyde aşağıdaki şekilde (Şekil 5.58) sarı renkle yazılmış olan düğüm noktalarındaki ivme-zaman grafiği (Şekil 5.59), hız-zaman grafiği (Şekil 5.60) ve yer değiştirme-zaman grafiği (Şekil 5.61) çizdirilmiştir.



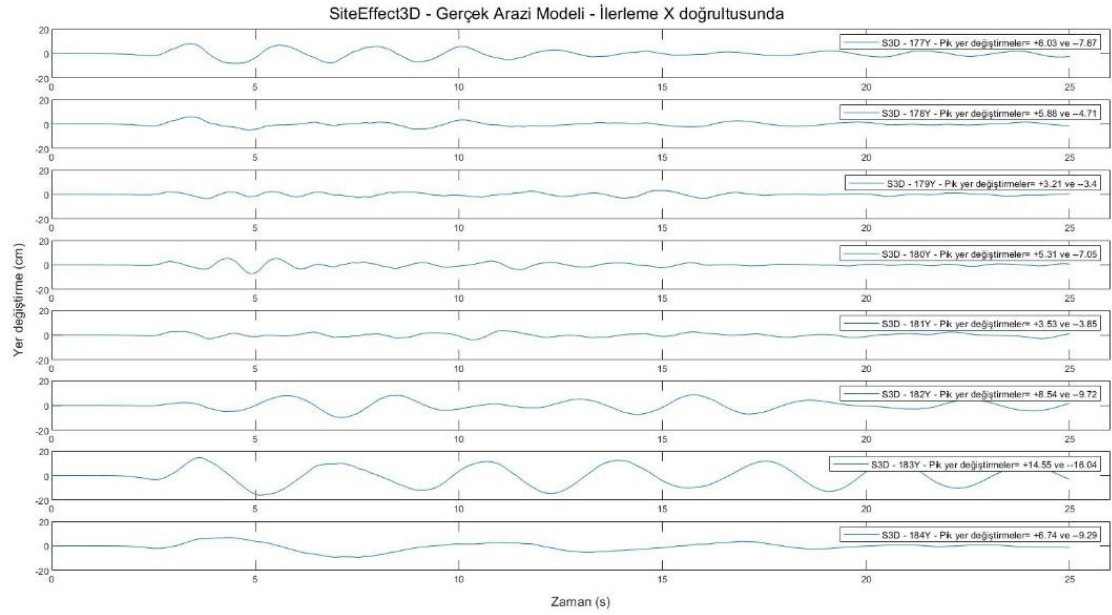
Şekil 5.58 İvme-zaman, hız-zaman ve yer değiştirme-zaman sonuçlarını grafiklemek için modelin üst kısmında seçilen örnek düğüm noktaları



Şekil 5.59 Modelin üst kısmında bulunan 177 ile 184 arasındaki düğüm noktalarında ivme-zaman grafikleri



Şekil 5.60 Modelin üst kısmında bulunan 177 ile 184 arasındaki düğüm noktalarında hız-zaman grafikleri



Şekil 5.61 Modelin üst kısmında bulunan 177 ile 184 arasındaki düğüm noktalarında yer değiştirme-zaman grafikleri

5.2 Uygulamaların Sonuçları

Farklı sentetik modeller ve gerçek arazi modeli üzerinde dinamik analizler yapılmış ve yukarıda bu dinamik analizlerin sonuçları verilmiştir. Sentetik modellerle yapılan 2-B ve 3-B dinamik analizler, literatürde yaygın olarak kullanılan Quad4M yazılımı ile bu çalışmada geliştirilen SiteEffect3D yazılımı kullanılarak yapılmış ve birbiri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca seçilen çalışma alanını temsil etmesi amacıyla hazırlanan 3-B sonlu eleman modeli (gerçek arazi modeli) kullanılarak SiteEffect3D programıyla dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Tüm bu çalışmalarla hem yeni geliştirilen SiteEffect3D programı test edilmiş hem de 2-B ve 3-B dinamik analizler farklı modeller ve zemin ortamları kullanılarak birbiriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan dinamik analizler ve testler literatürde var olan bilgilerle birlikte değerlendirilmiştir.

Yapılan değerlendirmeler ışığında sentetik modellerle yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde;

- Homojen ve izotrop ortamları temsil eden örnek 2-B ve 3-B modeller üzerinde yapılan dinamik analiz sonuçlarına göre;
 - Sismik hızları ve yoğunluğu görece daha yüksek olan görece daha sert zeminlerde 2-B ve 3-B dinamik analizlerin birbirine yakın sonuçlar ürettiği,
 - Sismik hızları ve yoğunluğu görece daha düşük olan görece daha yumuşak zeminlerde 2-B ve 3-B dinamik analizlerin farklı sonuçlar ürettiği, pik ivme ve pik gerilme değerlerinin ve frekans içeriklerinin birbirinden farklı olduğu,
 - Havza modellerinde basen-basen sınırlarında 2-B ve 3-B dinamik analizlerin çok farklı sonuçlar ürettiği ve 2-B dinamik analiz sonuçlarının literatürde belirtildiği şekilde beklenen sonuçları yansıtamadığı,
- Heterojen ve anizotrop ortamı temsil eden örnek 2-B ve 3-B modeller üzerinde yapılan dinamik analiz sonuçlarında da 2-B ve 3-B dinamik analiz sonuçlarında önemli farklılıklar olduğu, pik ivme ve pik gerilmelerin birbirinden farklı olduğu görülmüştür.

Gerçek arazi modeli ile yapılan dinamik analiz sonuçları değerlendirildiğinde;

- Çalışma sahası içerisinde bulunan ve 17 Ağustos 1999 İzmit depremini sağlıklı olarak kaydettiği düşünülen 5 ivme kayıt istasyonunda ölçülen ivme kayıtları ile dinamik analiz sonucunda hesaplanan ivme sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen ivme-zaman ve ivme-frekans grafikleri incelendiğinde ölçülen ve hesaplanan ivme değerlerinin ve frekans içeriklerinin genelde benzer olduğu,
- Gerçek arazi modeli ile yapılan dinamik analizlerden elde edilen ivme, hız, yer değiştirme ve gerilme grafikleri incelendiğinde genellikle literatürde belirtilen arazi şartlarına uygun olacak sonuçlar ürettiği,
- Gerçek arazi modeli ile yapılan dinamik analizlerden elde edilen veriler kullanılarak üretilen spektral ivme-periyot grafikleri ve farklı periyotlar için üretilen spektral haritalar incelendiğinde genellikle literatüre uygun sonuçlara ulaşılmıştır.

Tüm uygulama sonuçları değerlendirildiğinde;

- Alüvyon veya ona yakın görece yumuşak zemin ortamları, heterojen anizotrop ortamlar ile havza ve vadi benzeri ortamlarda 3-B dinamik analiz yapılmasının daha uygun olacağı,
- SiteEffect3D programının başarılı sonuçlar ürettiği,
- Yeni oluşturulan 3-B sonlu eleman modelinin literatürdeki veriler ışığında önemli ölçüde gerçek arazi şartlarını yansıttığı,
- Gerçek arazi modeli kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarının literatürdeki verilerle karşılaştırıldığında bazı bölgelerde görülen az sayıda farklılığın nedeninin, çok büyük bir çalışma alanı için 3-B sonlu eleman modeli üretirken bazı alanlarda yeterli zemin parametresi sağlanamamasından kaynaklandığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Depremlerde oluşan hasarın en önemli nedenleri arasında; inşa edilecek yapının oturacağı zemin özelliklerinin iyi bilinmemesi, zemin özelliklerinin belirlenmesi için yapılan dinamik analiz çalışmalarında kullanılmak üzere doğru yer modeli oluşturulamaması, sönüm yöntem ve parametrelerinin doğru seçilememesi, yapıya gelebilecek olası deprem yükünün doğru tahmin edilememesi sayılabilir. Mümkün olduğunca tüm etkilerin doğru bir şekilde belirlenmesi ve hesaplanması deprem sırasında oluşabilecek hasarı en aza indirebilmek için hayati önem taşımaktadır. Bu nedenle yapılar inşa edilmeden önce yer tepkisinin iyi belirlenmesi gereklidir. Yer tepkisinin istenilen doğrulukta bilinmesi, zemin dinamik analiz çalışmalarının yeterli ölçüde yapılmış olmasına bağlıdır. Bu amaçla 1-B, 2-B ve 3-B dinamik analizler yapılmaktadır. Model üretmenin çok daha kolay olması, kullanılan dinamik analiz yazılımlarının kolaylığı ve sunduğu özellikler, daha az işlemci ve bellek gerektirmesi, daha kısa sürede çözümün elde edilebilmesi gibi birçok nedenle literatürde yaygın olarak 1-B ve 2-B dinamik analizler kullanılmaktadır. Oysaki özellikle havza modeli gibi zemin yapılarında üçüncü boyutun etkisi ihmal edilemeyecek düzeydedir. Yer altındaki 3-B zemin özelliklerinin farklılıklarına ilave olarak yüzey topoğrafyasındaki değişiklikler, 3-B heterojen ve anizotrop ortamlar ile alüvyon gibi pekişmemiş birimler de çözümün doğruluğunu önemli ölçüde etkileyebilmektedir.

Son dönemde 3-B dinamik analiz yapabilen bazı akademik ve ticari yazılımlar üretilmiştir. Bu yazılımlardan birçoğunun kullanımı oldukça zor ya da özellikleri yeterli düzeyde veya esneklikte değildir. Özellikle ticari yazılımların edinim maliyetleri çok yüksektir. Ticari yazılımlar çoğunlukla yapı analizleri için geliştirilmiş olup, bazıları yer dinamik analizi içinde kullanılabilirle birlikte, doğru sonuçlar alınabilmesi için uzun zamanda kazanılabilen deneyime ve detaylı kullanım bilgisine ihtiyaç bulunmaktadır. Bazı yazılımlar ise istenen özelliklere sahip değildir. Örneğin; birçok yazılımda sönüm katsayıları ya kullanıcı tarafından doğrudan verilmekte ya da yine kullanıcı tarafından verilen başlangıç sönüm oranlarından hesaplanmaktadır. Mevcut programların büyük çoğunluğu paket program yapısında oldukları için üreticinin sunmadığı ancak gerekli olabilecek özellikleri programa ekleyebilmek ya çok zor ya da hiç mümkün değildir.

Mevcut 3-B dinamik analiz yazılımlarıyla ilgili araştırmalar bu çalışmanın Giriş bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır.

Bu alışmada 3-B sonlu eleman yöntemi kullanarak dinamik analiz yapabilen SiteEffect3D isimli bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım sayesinde kuvvetli yer hareketleri sonucu oluşan yer tepkisinin 3-B etkisi dikkate alınarak, deprem davranışlarının daha iyi araştırılabilmesi mümkün olabilmektedir. Böylece deprem dalga genliklerinde büyütme ve sönümleme, topoğrafya geometrisine bağlı olarak odaklanma ve saçılma, 3-B heterojen ve anizotrop ortamları veya havza kenarlarındaki kamalanma nedeniyle yığışım olaylarını incelemeye olanak sağlanmıştır. SiteEffect3D yazılımı ile istenilen doğrultularda deprem yükü tanımlanabilmekte ve istenilen eleman veya düğüm noktalarında çıktı alınabilmektedir. Program ile yapılan 3-B dinamik analiz sonucunda modeldeki her düğüm noktası için pik ivme değerleri elde edilebilmektedir. Bu yazılım ile özel bir eğitime gerek olmadan kolay ve çok hızlı bir şekilde otomatik olarak 3-B sonlu eleman modeli oluşturulabilmekte, bu modelin dinamik analizi kolayca yapılabilmektedir. Üretilen programın Matlab programlama dili ve alt yapısı ile geliştirilmiş olması sayesinde programa yeni özellikler ve fonksiyonlar kolaylıkla eklenebilmektedir. Nitekim tez çalışması sırasında ilk planlama dışında da birçok özellik programa eklenmiştir. Ayrıca SiteEffect3D programı modüler yöntemle yazıldığından, ileride kullanılmak istenilen farklı sönüm yöntemleri gibi yeni özellikler çok kolay bir şekilde eklenebilecektir. Programda homojen 3-B sonlu eleman modeli oluşturmak için sadece; x, y, z yönlerinde model uzunlukları ve eleman sayıları, boyuna ve enine dalga hızları ile yoğunluk değerlerinin verilmesi yeterlidir. İstenirse program ile yüzey topoğrafyası bilgisinin de olduğu giriş verisi kullanılarak, belirlenen özelliklerde araziye uygun gerçek 3-B sonlu eleman modelleri de kolaylıkla oluşturulabilmektedir. Programda üretilen sonuçlar için yer tepki analizlerinde istenebilecek çıktılar (ivme-zaman, gerilme-zaman, ivme-frekans, yer değiştirme-zaman, 3-B sonlu eleman model grafikleri vb.) kolaylıkla üretilebilmektedir. Yazılımın kolay kullanılabilmesi amacıyla sade bir grafik arayüz hazırlanmıştır. Arayüz ile ilgili diğer özelliklere EK 2'deki SiteEffect3D Bilgisayar Yazılımı bölümünden ulaşılabilir.

SiteEffect3D yazılımı eşitlik (2.1) deki hareket denklemini 3-B sonlu eleman çözüm tekniği ile çözmektedir. Hareket denkleminin çözümünde koşulsuz durağan çözüm veren Newmark (1965) yöntemi kullanılmış, böylece $(t+\Delta t)$ zamanı ivme, hız ve yer değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Standart sönüm yaklaşımı olarak Rayleigh sönümü kullanılmıştır. Ancak programa yeni sönüm yöntemleri eklenebilmesi için sönüm işlemleri alt program yapısında hazırlanmış olup, ileride istenilen başka sönüm yaklaşımları da programa eklenebilecektir. Rayleigh sönümündeki, sönüm katsayıları çözüm sırasında diğer giriş verilerinden otomatik olarak her döngüde program tarafından üretilmektedir. Bu sayede kullanıcı deneyimine bağlı olmaksızın çok daha doğru sonuçlara ulaşmak mümkün olabilmektedir. Bu tez çalışmasında Marmara bölgesinde seçilen 200km x 100km x 15km'lik çalışma alanı için bir bütün halinde literatürde bulunmayan ancak ayrı ayrı yayınlarda farklı formatlarda bulunan veriler derlenerek tamamen yeni bir 3-B sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Yüzey topoğrafyası, sayısal yükseklik modeli verileri kullanılarak modele eklenmiştir.

Bu çalışmada ayrıca 3-B sonlu eleman modelinde kullanılan eleman sayısının ve yüzey topoğrafyasının dinamik analiz sonucuna etkileri araştırılmıştır. Eleman sayısının az olması sonuçlarda önemli hatalara neden olmaktadır. Eleman sayısının çok fazla olması ise hem problemin çözüm süresini çok uzatmakta hem de çok daha fazla işlemci ve bellek kapasitesine ihtiyaç duyulmaktadır. Benzer şekilde yüzey topoğrafyasının ihmal edildiği modellerin kullanıldığı dinamik analiz sonuçlarında, çıkış ivme değerleri, elemanlardaki gerilmeler ve PGA değerlerinde önemli farklılıklar görülmüştür. Tüm bu sonuçlar kullanılarak, literatüre ve bu çalışmada elde edilen sonuçlara uygun olacak şekilde gerçek arazi modeli üretilmiştir. Bu sayede elde edilen veriler ışığında gerçeğe en yakın 3-B sonlu eleman modeli elde edilmeye çalışılmıştır.

SiteEffect3D programıyla, önce sentetik modeller ve veriler kullanılarak dinamik analizler yapılmış, elde edilen sonuçlar literatürde yaygın olarak kullanılan Quad4M programı sonuçları ile karşılaştırılmış ve 2-B ve 3-B dinamik analiz sonuçlarının özellikle görece sert homojen modellerde uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ancak havza modeli ve 3-B heterojen, anizotrop ortamlar ile görece yumuşak zeminlerde 2-B ve 3-B dinamik

analiz sonuçlarında farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar bu tip ortamlarda 2-B dinamik analiz sonuçlarının yetersiz kalabileceği sonucunu düşündürmektedir.

Marmara bölgesinin doğusunda seçilen çalışma alanı için üretilen 3-B sonlu eleman modeli kullanılarak dinamik analizler yapılmıştır. Bu analizlerde çalışma alanı içerisinde yer alan deprem ivme kayıt istasyonlarına ait 17 Ağustos 1999 İzmit depremi ivme kayıtları kullanılmıştır. Kocaeli – Merkez deprem ivme kayıt istasyon zeminine ana kaya özelliği gösterdiğinden gerçek model üzerindeki çalışmalarda giriş ivmesi olarak özellikle bu istasyon kayıtları kullanılmıştır. Kocaeli-Merkez deprem ivme kayıt istasyonu zeminine ait V_{S30} değeri 826 m/s'dir. Yapılan çalışmalar sonucunda çalışma sahası içerisinde bulunan deprem ivme kayıt istasyonlarında deprem anında ölçülen giriş ivmeleri ile dinamik analiz sonucunda hesaplanan ivmeler ve ivmelere ait frekans spektrumları incelenmiştir. Ölçülen ve hesaplanan veriler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda ivme-zaman ve ivme-frekans grafiklerindeki genliklerin ve frekans içeriklerinin oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca spektral ivme-periyot, farklı periyotlardaki spektral haritalar ve modelin çeşitli düğümlerinde elde edilmiş ivme-zaman grafikleri ile çeşitli elemanlardaki gerilme-zaman grafikleri incelendiğinde literatürdeki yayınlarla genellikle uyumlu olduğu görülmüştür.

Bu tez kapsamında üretilen Marmara bölgesindeki geniş bir bölgeyi kapsayan çalışma alanına ait 3-B sonlu eleman modeli bundan sonraki büyük ölçekli benzer çalışmalarda altlık olarak kullanılabilir. Üretilen bu model ileride çalışma alanı içerisinde kalan tek bir il, ilçe veya mahalle gibi daha küçük alanlarda yapılacak bölgesel çalışmalarda da kullanılabilir. Ancak daha küçük ölçekli çalışmalarda mevcut modeldeki düğüm noktası aralıklarının sıklaştırılması ve buna uygun yeterli sıklıkta zemin parametresi sağlanması gerekecektir.

SiteEffect3D programı bundan sonraki akademik çalışmalar için önemli bir yazılım altyapısı sunmaktadır. İleride farklı sönüm yaklaşımlarının programa eklenmesi ve programın mevcut yetenekleri kullanılarak başka bölgeler için de 3-B sonlu eleman modellerinin üretilmesi düşünülmektedir. Böylece bu bölgeler için SiteEffect3D

programını kullanarak yapılan 3-B dinamik analizler sayesinde gerilme, deformasyon, yer değiştirme ıktıları ve sismik tehlike (ivme) haritaları da hazırlanabilecektir.



KAYNAKLAR

Aki, K. ve Richards, P. G. 2009. Quantitative Seismology Second Edition. University Science Books, 742, California.

Akın, U. 2016. Investigation of the seismic velocity distribution and crustal structure of turkey by means of gravity data. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 153, 185-202.

Anonim. 2021a. Web Sitesi: <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>, Erişim Tarihi: 15.03.2021.

Anonim. 2021b. Web Sitesi: <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>, Erişim Tarihi: 09.06.2021.

Anonymous 2017. ProShake Ground Response Analysis Program Version 2.0 User's Manual. EduPro Civil Systems, Inc, Washington.

Anonymous. 2021a. Web Sitesi: http://docs.itascacg.com/flac3d700/common/docproject/source/manual/program_guide/program_guide.html?node67, Erişim Tarihi: 09.06.2021.

Anonymous. 2021b. Web Sitesi: <https://www.bentley.com/en/products/product-line/geotechnical-engineering-software/plaxis-3d>, Erişim Tarihi: 09.06.2021.

Anonymous. 2021c. Web Sitesi: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>, Erişim Tarihi: 09.06.2021.

Anonymous. 2021d. Web Sitesi: https://dianafea.com/solution?gclid=EAIaIQobChMIkd3a6pmK8QIVjaSyCh3-uwWcEAAYASAAEgKLVDPD_BwE, Erişim Tarihi: 09.06.2021.

Anonymous. 2021e. Web Sitesi: <https://www.geoslope.com/products/sigma-w>, Erişim Tarihi: 09.06.2021.

Anonymous. 2021f. Web Sitesi: https://www.lusas.com/products/civil_tour_geotechnical.html, Erişim Tarihi: 09.06.2021.

Anonymous. 2021g. Web Sitesi: <https://www.itascacg.com/software/flac3d>, Erişim Tarihi: 09.06.2021.

Arslan, S. 2016. Türkiye jeofizik rejyonel gravite haritaları ve genel değerlendirilmesi. Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 153, 203-222.

Bard, P. Y. ve Bouchon, M. 1980a. The seismic response of sediment-filled valleys. part 1: The case of incident SH waves. Bulletin of the Seismological Society of America, 70, 1263-1286.

- Bard, P. Y. ve Bouchon, M. 1980b. The seismic response of sediment-filled valleys. part 2: The case of incident P and SV waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70, 1921-1941.
- Bard, P. Y. ve Bouchon, M. 1985. The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 519-541.
- Bard, P. Y. ve Gariel, J. C. 1986. The seismic response of two-dimensional sedimentary deposits with large vertical velocity gradients. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 76, 343-366.
- Bariş, Ş., vd. 2005. Three-dimensional structure of V_p , V_s and V_p/V_s in the upper crust of the Marmara region, NW Turkey. *Earth Planets Space*, 57, 1019-1038.
- Beliceli, A. 2006. Eskişehir yerleşim yeri zemininin büyütme etkisinin makaslama dalga hızına (V_s) bağlı olarak belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı,
- Board, G. ve Institute, E. E. R. 1994. Practical Lessons from the Loma Prieta Earthquake. National Academies Press, United States of America.
- Bruno, P. P. G., vd. 1999. Influence of geometrical and Geophysical parameters on the seismic site amplification factor. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 51-70.
- Camp, C. 2018. Web Sitesi: <http://www.ce.memphis.edu/7117/notes/notes.html>, Erişim Tarihi: 23.08.2021.
- Campillo, M., vd. 1989. Destructive strong ground motion in Mexico city: Source, path, and site effects during great 1985 Michoacán earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79(6), 1718-1735.
- Candansayar, M. E., vd. 2011. 105G145 nolu Kuzey Batı Anadolu'nun Kabuk Yapısının Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması Projesi. Ankara, TÜBİTAK.
- Canitez, N. 1997. Jeofizikte Modelleme. Literatür Yayıncılık, 368.
- Chopra, A. 1995. Dynamics of structures: Theory and Applications to earthquake engineering. Prentice-Hall Inc.
- Cook, R. D. 1995. Finite Element Modeling for Stress Analysis. John Wiley & Sons, Inc.
- Dikmen, Ü. 2004. Zeminlerde sismik dalga sönümünün kesirsel türev yaklaşımı ile modellenmesi. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 158, Ankara.

- Dutt, A. 2015. Effect of Mesh Size on Finite Element Analysis of Beam. SSRG International Journal of Mechanical Engineering, 2(12), 8-10.
- Eberhart-Phillips, J. E., vd. 1994. Profile of mortality from the 1989 Loma Prieta earthquake using coroner and medical examiner reports. Disasters, 18(2), 160-170.
- Gutenberg, B. ve Richter, C. F. 1956. Earthquake magnitude: intensity, energy and acceleration. Bulletin of the Seismological Society of America, 104-144.
- Hall, J. R. ve Richart, F. E. 1963. Dissipation of elastic wave energy in granular soils: 65.
- Hardin, B. O. ve Drnevich, V. P. 1972. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 98(sm6), 603-624.
- Hashash, Y. M. A. ve Park, D. 2001. Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment. Engineering Geology, 62(1), 185-206.
- Haşal, M. E. 2009. Topoğrafik düzensizliklerin zemin büyütmesine etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Mühendisliği Programı,
- Hudson, M., vd. 1994. User manual for Quad4m: A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using Finite element procedures and incorporating a compliant base. California, University of California: 74.
- Idriss, I. M. 1990. Response of soft soil sites during earthquakes, H. Bolton Seed Memorial Symposium Vol. 2, May 1990, Book of Abstracts, Vol 2, 273–289, Berkeley.
- Idriss, I. M. ve Seed, H. B. 1968. Seismic response of horizontal soil layers. Am Soc Civil Engr J Soil Mech, 1003-1031.
- Jacobsen, L. S. ve Ayre, R. S. 1958. Engineering vibrations: with applications to structures and machinery. McGraw-Hill.
- Jibson, R. 1987. Summary of research on the effects of topographic amplification of earthquake shaking on slope stability. California, US Geological Survey.
- Johnson, S. E. ve Hurty, W. C. 1972. Convergence in model synthesis. Journal of Engineering Mechanics division, EM 5, 1105-1114.
- Kahraman, M., vd. 2015. Crustal--scale shear zones and heterogeneous structure beneath the North Anatolian Fault Zone, Turkey, revealed by a high--density seismometer array. Earth and Planetary Science Letters, 430, 129-139.
- Kaptan, K. ve Tezcan, S. 2012. Deprem dalgalarının zemin büyütmesi üzerine örnekler. Tübvav Bilim Dergisi, 17-32.

Karabulut, H., vd. 2011. Evolution of the seismicity in the eastern Marmara sea a decade before and after the 17 August 1999 Izmit Earthquake. *Tectonophysics*, 510, 17-27.

Kardani, M., vd. 2012. Refined h-adaptive finite element procedure for large deformation geotechnical problems. *Computational Mechanics*, 49(1), 21-33.

Kishida, T., vd. 2018. Apparent Wave Velocity and Site Amplification at the California Strong Motion Instrumentation Program Carquinez Bridge Geotechnical Arrays During the 2014 M6.0 South Napa Earthquake Earthquake Spectra, 327-347.

Kramer, S. L. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey.

Lazan, B. J. 1968. *Damping of Materials and Members in Structural Mechanics*. Elsevier Science & Technology.

Lee, D. ve Taylor, D. P. 2001. Viscous damper development and future trends. *The Structural Design of Tall Buildings*, 10(5), 311-320.

Lin, W. H. ve Chopra, A. K. 2001. Understanding and predicting effects of supplemental viscous damping on seismic response of asymmetric one-storey systems. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 30(10), 1475-1494.

Liu, G. R. ve Quek, S. S. 2013. *The Finite Element Method*. Butterworth-Heinemann, Oxford.

Liu, Y. 2013. Choose the best element size to yield accurate fea results while reduce fe model's complexity. *British Journal of Engineering and Technology*, 1(7), 13-28.

Love, A. E. H. 1944. *A Treatise On The Mathematical Theory of Elasticity*, 4th Edition. Dover Publications.

Mavko, G. ve Nur, A. 1979. *Wave attenuation in partially saturated rocks: Geophysics*, GPYSA7.

Mazzoni, S., vd. 2020. *Getting_Started*. OpenSees.

Menke, W., vd. 1985. Laboratory test of apparent attenuation formulas. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(5), 1383-1393.

Moroto, N. 1980. Shearing deformation of granular materials. *Soils and Foundations*, 20(2), 113-118.

Nasery, M. M., vd. 2019. Darbe Etkisi Altında Bulunan Çelik Kirişlerin Sonlu Eleman Modellemesinde Çözüm Ağı Sıklığının İncelenmesi. *International Science and Engineering Applications Symposium on Hazards 2019*: 69-79.

Newmark, N. M. 1965. Effects of earthquake on dams and Embankments. *Geotechnique*, 139-160.

Newmark, N. M. ve Rosenblueth, E. 1971. Fundamentals of Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

Niazi, M. ve Mortgat, C. P. 1992. Attenuation of peak ground acceleration in central California from observations of the 17 October, 1989 Loma Prieta earthquake. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 493-507.

Özbek, B. 2010. İki ve üç boyutlu cisimlerin Voronoi diyagramlarının çıkarılması ve Delaunay mozaiklemeinin gerçekleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 91,

Palm, R. ve Hodgson, M. E. 1992. After a California Earthquake: Attitude and Behavior Change. University Of Chicago Press., Chicago.

Phillips, C. ve Hashash, Y. M. 2009. Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29(7), 1143-1158.

Plafkers, G. ve Galloway, P. J. 1989. Lessons learned from the Loma Prieta, California Earthquake of October 1989. Washington, USGS Open report.

Pratt, T. L., vd. 2003. Amplification of seismic waves by the Seattle basin, Washington State. Bulletin of the Seismological Society of America, 533-545.

Rabczuk, T., vd. 2019. Extended Finite Element and Meshfree Methods. Elsevier Inc.

Rao, S. S. 1989. The finite element method in engineering, second edition. Pergamon Press.

Rassem, M., vd. 1997. Engineering perspective for the seismic site response of alluvial valleys. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 26(4), 477-493.

Rassem, M., vd. 1995. A simple engineering model for the seismic site response of alluvial valleys. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 14(3), 199-210.

Ross, B. 1975. A brief history and exposition of the fundamental theory of fractional calculus, Fractional calculus and its applications. Ross, B. (eds), Springer, 1-36, Berlin.

Sabuncu, Y. Ç., vd. 2017. 3-D crustal velocity structure of western Turkey: Constraints from full-waveform tomography. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 270, 90-112.

Salah, M., vd. 2014. Crustal velocity and Poisson's ratio structures beneath northwest Anatolia imaged by seismic tomography. European International Journal of Science and Technology, 133-156.

Schnabel, P. B., vd. 1972. SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, EERC, 12.

Seed, H. B. ve Idriss, I. M. 1969. Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 95(1), 99-137.

Seed, H. B. ve Sun, J. I. 1989. Implications of Site Effects in the Mexico City Earthquake of September 19, 1985 for Earthquake-Resistant Design Criteria in the San Francisco Bay Area of California. Washington, National Science Foundation: 138.

Seed, H. B., vd. 1986. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of geotechnical engineering*, 112(11), 1016-1032.

Seed, H. B. a. I., I.M. 1970. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Berkeley, California., University of California.

Shaban, N. ve Caner, A. 2015. Sönüm modelleri ve yapısal dinamik analizlerin güvenilirliği, 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 14-16 Ekim, Bildiri Özetleri Kitabı, 3.TDMSK, İzmir.

Sherif, M. A. ve Ishibashi, I. 1976. Dynamic shear moduli for dry sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 102(ASCE# 12572), 1171-1184.

Shinozaki, Y. 1996. Boundary Element Modeling of Site Effects, Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, 23-28 June, Book of Abstracts, 11 WCEE, Mexico.

Shinozaki, Y. ve Yoshida, K. 1996. Seismic waves in 3-D sedimentary basins due to point source, Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, 23-28 June, Book of Abstracts, 11 WCEE, Mexico.

Soyuer, D. 2012. Marmara bölgesinin kabuk yapısı ve hız dağılımının 3-Boyutlu tomografi ile belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 71, Isparta.

Sukumar, N., vd. 2001. Natural neighbour Galerkin methods. *International journal for numerical methods in engineering*, 50(1), 1-27.

Sun, J. I., vd. 1988. Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils. Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley.

Şişman, A. 2021. Web Sitesi: <https://avys.omu.edu.tr/lessons/1/6/2730-932001/307921-134303>, Erişim Tarihi: 06.09.2021.

Terzaghi, K. 1943. Theoretical soil mechanics. John Wiley & Sons, Inc.

Thomson, W. T. ve Kobori, T. 1963. Dynamical compliance of rectangular foundations on an elastic half-space.

Timoshenko, S., Goodier, J.N. 1951. Theory of Elasticity. McGraw-Hill Book Co.Inc.

Tunç, B. 2008. Marmara bölgesi'nin üç-boyutlu hız yapısının sismik tomografi yöntemi ile belirlenmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 122, Kocaeli.

Uebayashi, H., vd. 1992. Seismic motion in a three-dimensional arbitrarily-shaped sedimentary basin, due to a rectangular dislocation source. *Journal of Physics of the Earth*, 40(1), 223-240.

Zienkiewicz, O. C. ve Taylor, R. L. 1991. *Finite element method, Solid and fluid mechanics dynamics and Non-Linearity*, v 2. McGraw-Hill Book Co.

Zor, E., vd. 2010. Shear wave velocity structure of the İzmit Bay area (Turkey) estimated from active-passive array surface wave and single-station microtremor methods. *Geophysical Journal International*, 1603-1618.



EKLER

EK 1 OpenSees Programında 2-B Basit Bir Model Oluşturmak İçin Gerekli Örnek

Komutlar

```
model basic -ndm 2 -ndf 3
# nodal coordinates:
node 1 0 0
node 2 504 0
node 3 0 432
node 4 504 432

# bondary conditions:
fix 1 1 1 1
fix 2 1 1 1
fix 3 0 0 0
fix 4 0 0 0

# nodal masses:
mass 3 5.18 0. 0.
mass 4 5.18 0. 0.

# transformation:
geomTransf Linear 1

# element connectivity:
element elasticBeamColumn 1 1 3 3600 4227 1080000 1
element elasticBeamColumn 2 2 4 3600 4227 1080000 1
element elasticBeamColumn 3 3 4 5760 4227 4423680 1

# recorders
recorder Node -file Node3.out -time -node 3 -dof 1 2 disp
recorder Element -file Element1.out -time -ele 1 force
```


EK 2 SiteEffect3D Bilgisayar Yazılımı Grafik Arayüzü

Bu bölümde SiteEffect3D programının kolay kullanılması için hazırlanan grafik arayüzü ve kullanımı ile ilgili bilgiler verilmektedir. Yazılımda kullanılan hesaplama yöntem ve metotları tez çalışmasının diğer bölümlerinde anlatılmıştır.

Bu çalışma kapsamında üretilen SiteEffect3D programı Matlab programlama dili ve alt yapısı kullanılarak geliştirilmiştir. Grafik arayüz Matlab için yeni geliştirilen App Designer alt yapısı kullanılarak hazırlanmıştır. Programda Dinamik Analiz ve Sonuçlar olmak üzere iki ana menü bulunmaktadır. Dinamik Analiz menüsü altında Dinamik Analiz İşlemleri ve Çıkış seçenekleri bulunmaktadır. Sonuçlar menüsü altında ise 3-B Sonlu Eleman Modeli, PGA Grafikleri, İvme-Zaman Grafikleri, Hız-Zaman Grafikleri, Yer Değiştirme-Zaman Grafikleri, Genlik-Frekans Grafikleri, Gerilme-Zaman Grafikleri seçenekleri bulunmaktadır. Dinamik Analiz İşlemleri seçeneği seçilerek yapılan örnek işlem penceresi aşağıda görülmektedir (Şekil 1). Ekran görüntüsünden de anlaşılacağı gibi model parametreleri istenirse elle verilebilmekte, istenirse dosyadan çağrılabilir. Program içerisinden çağrılan parametre dosyası kolay üretilebilmesi için Excel formatında hazırlanmıştır. Dosya içeriği Excel programında kolaylıkla oluşturulabilmektedir.

SiteEffect3D Uygulaması

Dinamik Analiz Sonuçlar

Model Parametreleri

Parametre Dosyası Oku C:\Doktora\SiteEffect3D\Uygulama\Model4.xlsx

Model Adı: Model4 İvme ver (X): 1 Sınır Koşulu (X): 1

Ağ Çeşidi (0/3): 0 İvme ver (Y): 1 Sınır Koşulu (Y): 1

PRM: 0.65 İvme ver (Z): 1 Sınır Koşulu (Z): 1

Dinamik Döngü: 3 İvme Katsayısı (m/s²): 0.01 Prinpüt Hesapla: x

Delta t: 0.005 Örnekleme K.(ivme): 1 Zemin Büyütme K.: 2.53

İvme Dosyası: 1999-08-17-4106-Kocaeli-Gebze.txt

3 Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

Ağ Oluşturma

Otomatik Ağ Oluştur

Ağ Dosyası Seç

Model Boyutları

X yönündeki eleman sayısı: 20 X uzunluğu (m): 200

Y yönündeki eleman sayısı: 10 Y uzunluğu (m): 100

Z yönündeki eleman sayısı: 10 Z uzunluğu (m): 100

Zemin Parametreleri

Vp (m/s): 800 Vs (m/s): 300 Yoğunluk (g/cm³): 1.9

İşlemler

Mesajlar: Dinamik analiz işlemi sürüyor. Lütfen bekleyiniz.

Dinamik Çözümeye Başla

Şekil 1 Dinamik analiz işlemleri penceresi

Model Parametreleri

Model Adı: Modele verilen isim

Ağ Çeşidi (0/3): 0 değeri otomatik ağ oluşturmak için, 3 değeri ise verisi önceden hazırlanmış 3-B sonlu eleman model ağ kullanmak için

PRM: Gmax oranı (Standart değeri:0.65)

Delta t: Kullanılacak ivme kaydına ait zaman aralığı (delta t)

İvme ver (X): Giriş ivmesinin X bileşeninin kullanılması için 1, verilmemesi için 0 değeri verilir.

İvme ver (Y): Giriş ivmesinin Y bileşeninin kullanılması için 1, verilmemesi için 0 değeri verilir.

İvme ver (Z): Giriş ivmesinin Z bileşeninin kullanılması için 1, verilmemesi için 0 değeri verilir.

İvme Katsayısı (m/s^2): Giriş ivmesinin m/s^2 birimine dönüştürülebilmesi için gerekli katsayı

Örnekleme K.(ivme): Giriş ivmesinin örnekleme katsayısı

Sınır Koşulu (X): X eksenine sınır koşulu uygulanacaksa 1, uygulanmayacaksa 0 değerini alır.

Sınır Koşulu (Y): Y eksenine sınır koşulu uygulanacaksa 1, uygulanmayacaksa 0 değerini alır.

Sınır Koşulu (Z): Z eksenine sınır koşulu uygulanacaksa 1, uygulanmayacaksa 0 değerini alır.

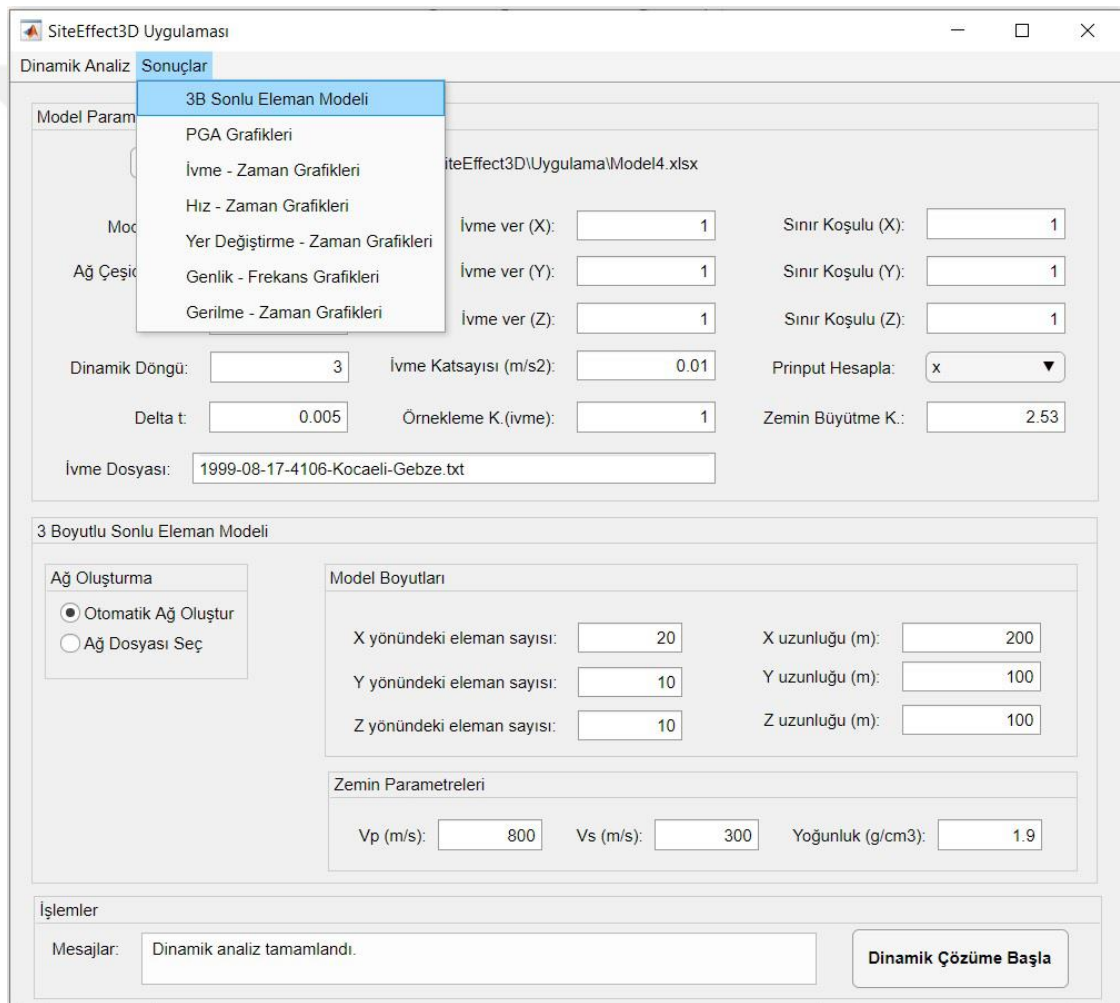
İvme Dosyası: Giriş ivmesi olarak kullanılacak olan 3 bileşenli verilerin olduğu dosyanın adı

3 Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

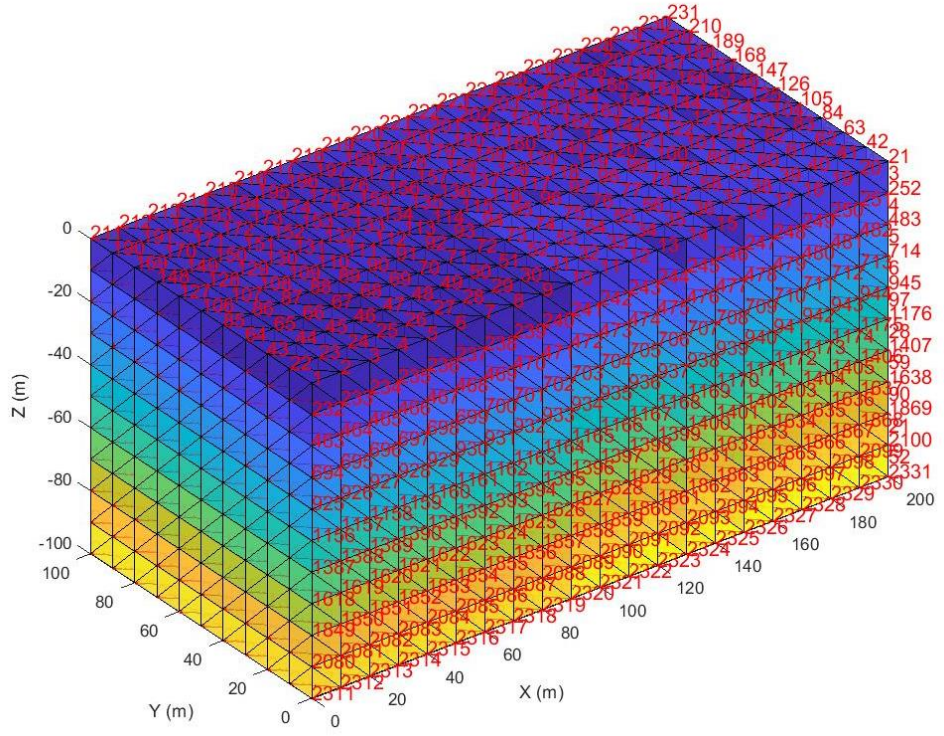
Ağ Oluşturma: İki seçeneklidir. Ağ Çeşidi 0 seçildiğinde buradan Otomatik Ağ Oluştur seçilmektedir. Otomatik Ağ Oluştur seçili iken sağdaki Model Boyutları ve Zemin Parametreleri panelleri açılmaktadır. Ağ Dosyası Seç işaretlendiğinde ise yandaki

paneller kapanmakta, dosya seçim penceresi açılarak daha önce hazırlanmış olan 3-B sonlu eleman model ağ dosyası seçilmektedir.

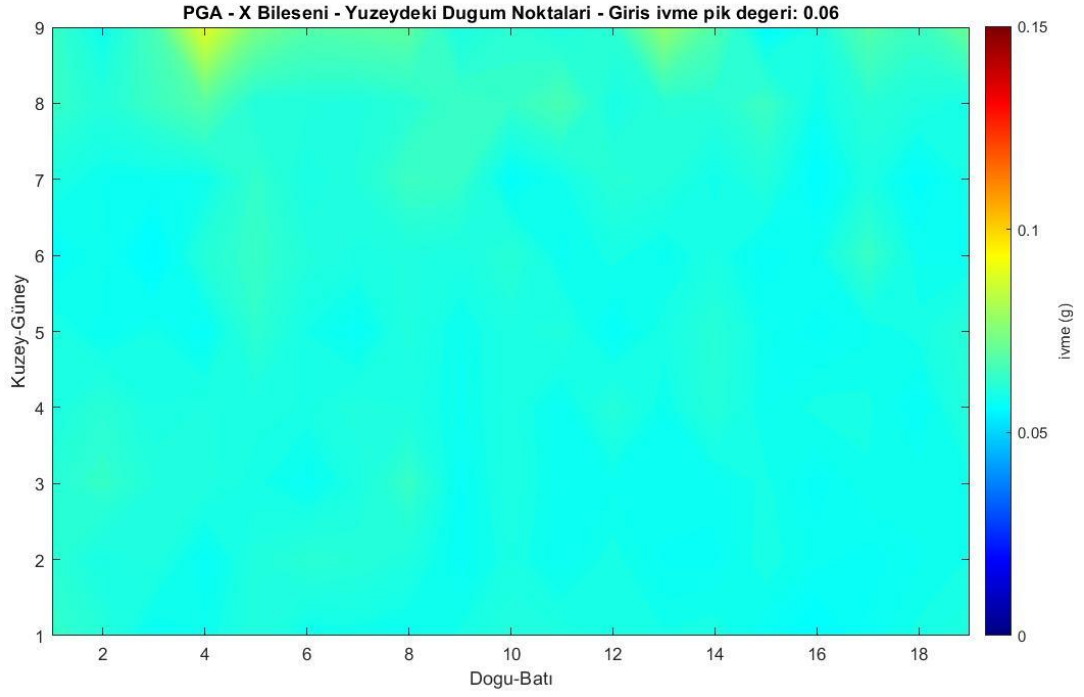
Aşağıdaki ekran görüntüsünde (Şekil 2) örnek bir dinamik analiz işlemi tamamlandıktan sonra sonuçları incelemek için seçilmiş Sonuçlar penceresi ve arka planda Dinamik Analiz İşlemleri penceresi görülmektedir. Bu pencereden 3-B Sonlu Eleman Modeli seçildiğinde program tarafından otomatik olarak üretilmiş olan 3-B sonlu eleman modeli Şekil 3’de gösterilmiştir.



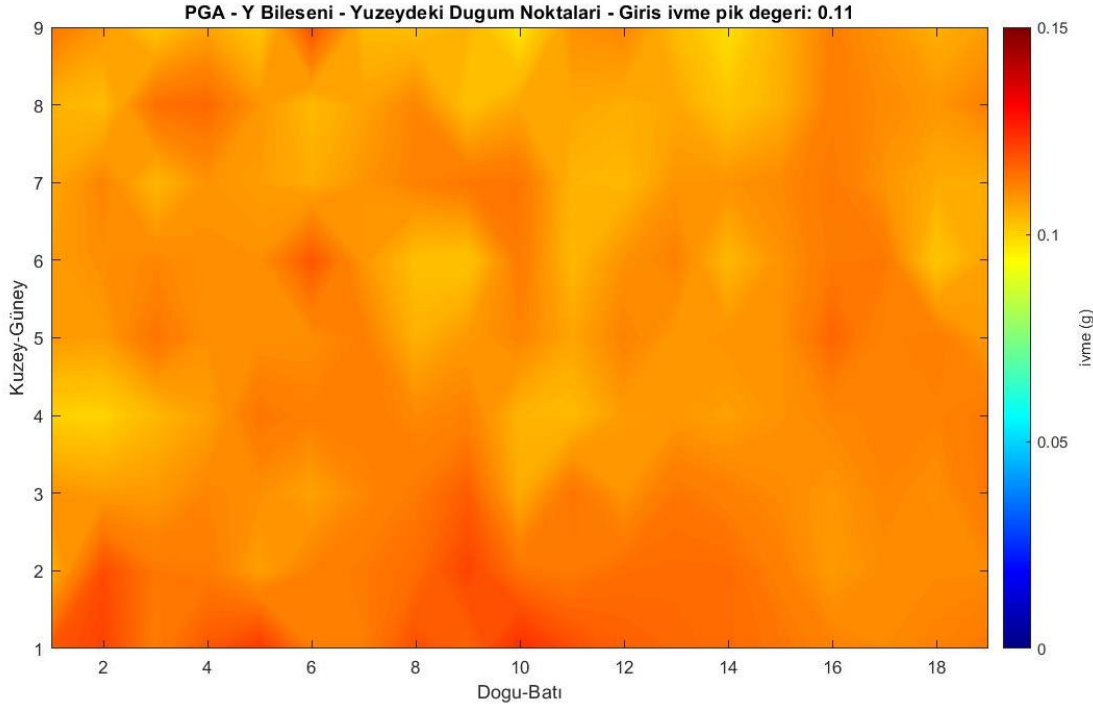
Şekil 2 Sonuçlar penceresi



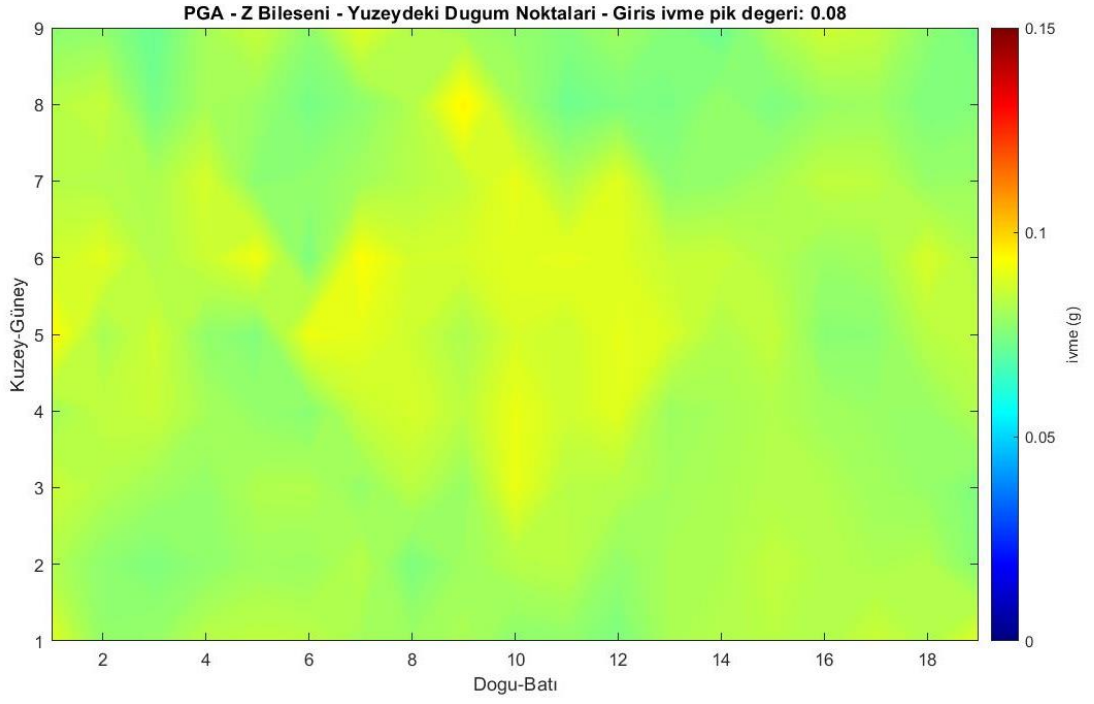
Şekil 3 SiteEffect3D programı ile otomatik olarak oluşturulan 3-B sonlu eleman modeli
Sonaçlar penceresinden PGA Grafikleri seçeneği seçildiğinde X, Y ve Z bileşenleri için
modele ait PGA grafikleri Şekil 4-6'da gösterilmektedir.



Şekil 4 Dinamik analiz sonucunda üretilen X bileşeni örnek PGA grafiği

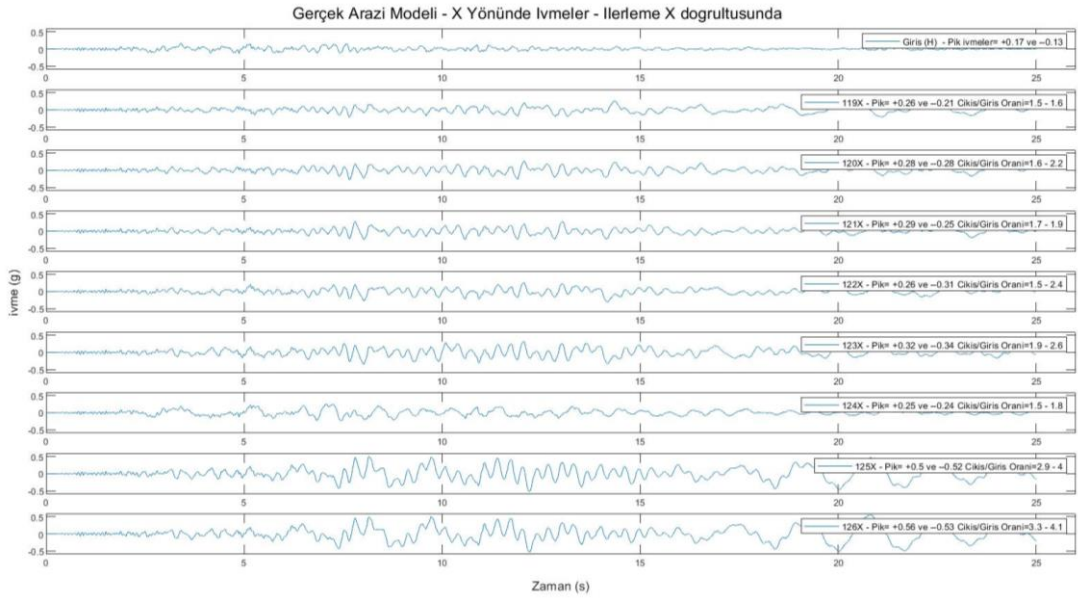


Şekil 5 Dinamik analiz sonucunda üretilen Y bileşeni örnek PGA grafiği



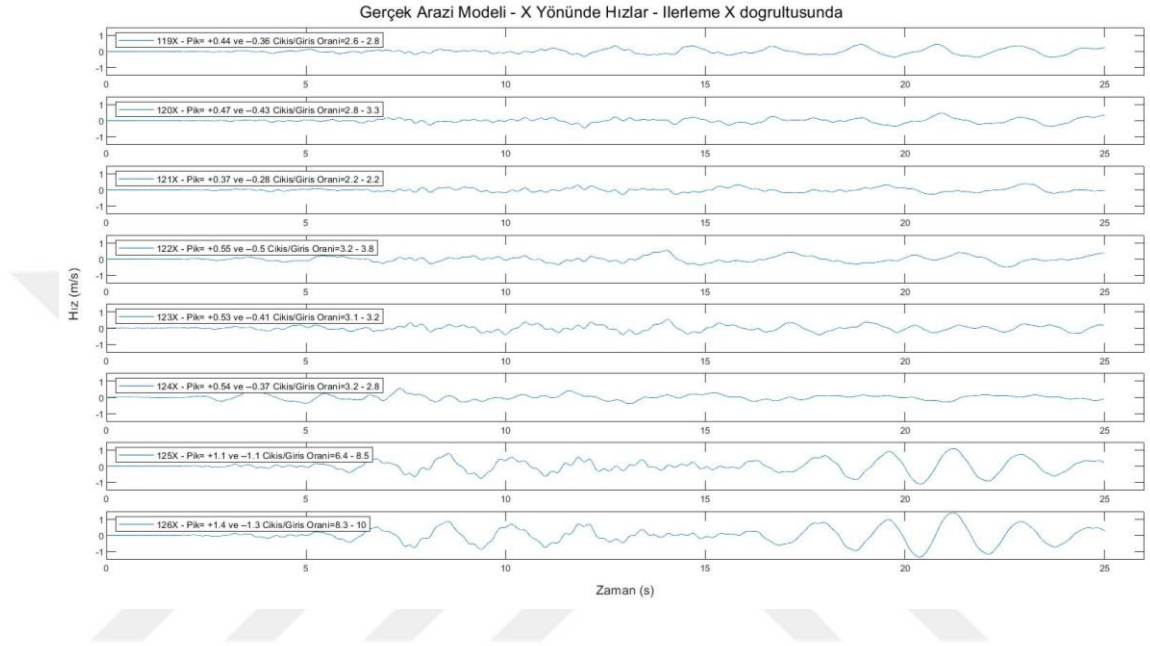
Şekil 6 Dinamik analiz sonucunda üretilen Z bileşeni örnek PGA grafiği

Sonuçlar penceresinden İvme-Zaman Grafikleri seçeneği seçildiğinde oluşan örnek grafik Şekil 7’de verilmiştir.



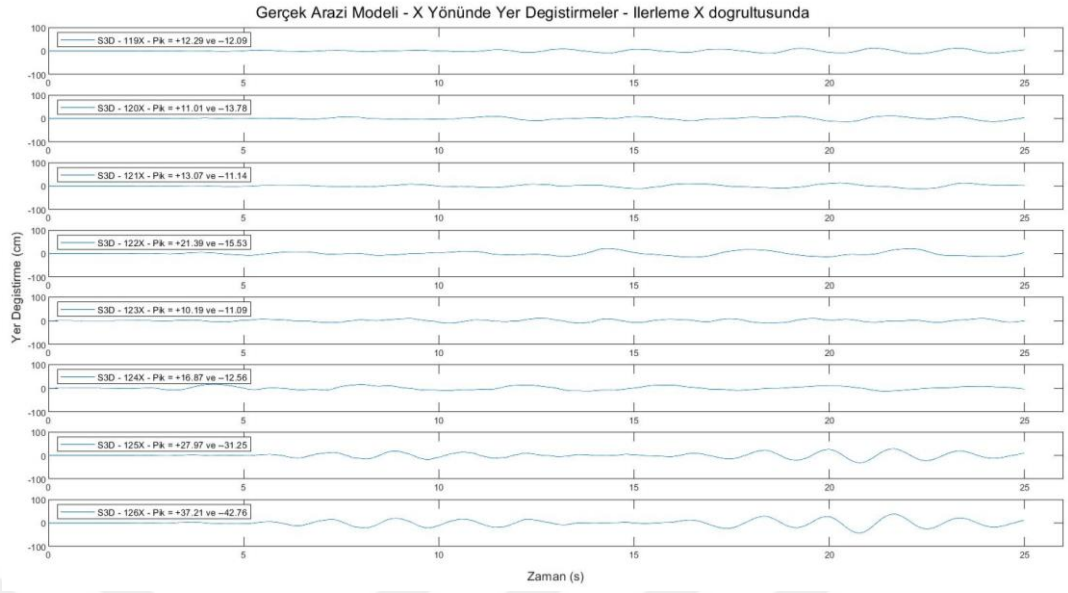
Şekil 7 Örnek ivme-zaman grafiği (X bileşeni)

Sonuçlar penceresinden Hız-Zaman Grafikleri seçeneği seçildiğinde oluşan örnek grafik Şekil 8’de verilmiştir.



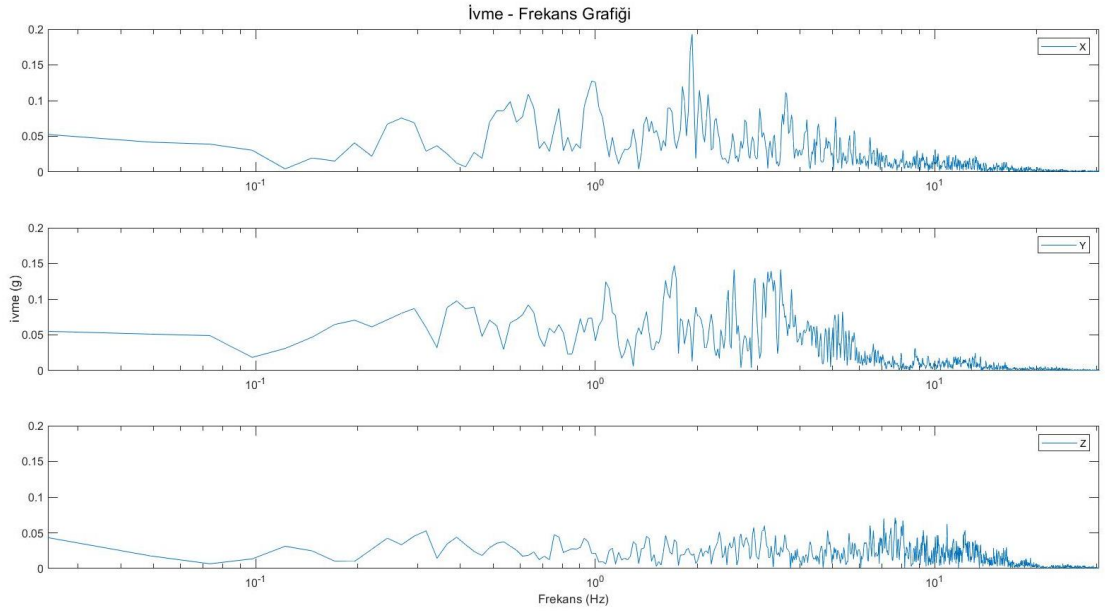
Şekil 8 Örnek hız-zaman grafiği (X bileşeni)

Sonuçlar penceresinden Yer Değiştirme-Zaman Grafikleri seçeneği seçildiğinde oluşan örnek grafik Şekil 9’da verilmiştir.



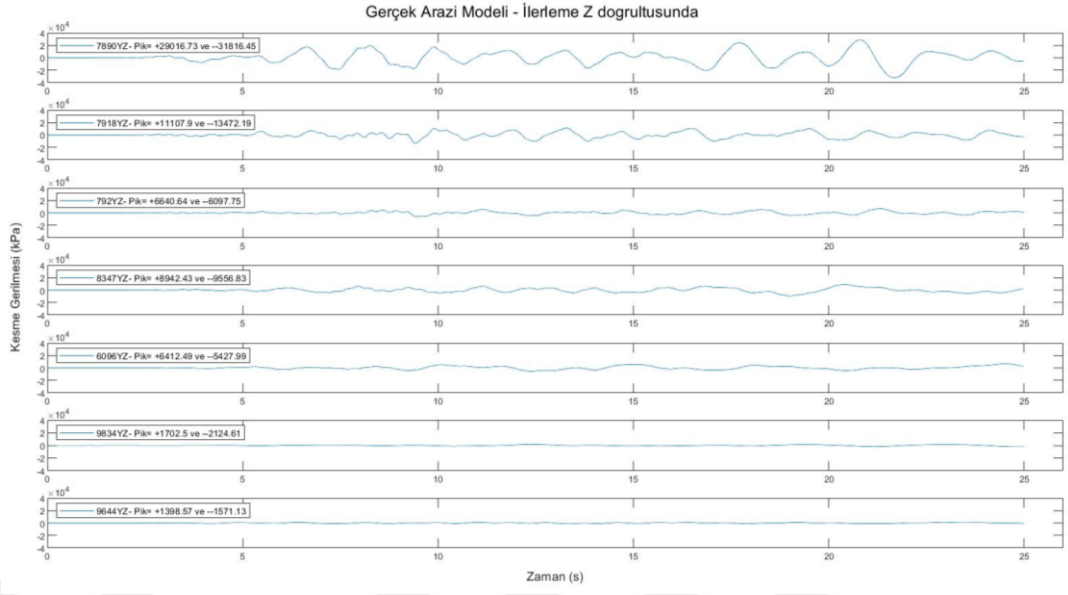
Şekil 9 Örnek yer değıştirme-zaman grafiği (X bileşeni)

Sonuçlar penceresinden Genlik-Frekans Grafikleri seçeneği seçildiğinde oluşan örnek grafik Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 10 Örnek genlik-frekans grafikleri

Sonuçlar penceresinden Gerilme-Zaman Grafikleri seçeneği seçildiğinde oluşan örnek grafik Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11 Örnek gerilme-zaman grafikleri