



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**KÖPRÜLERİN DEPREM ETKİLERİ ALTINDAKİ
DAVRANIŞLARI**

Ezgi ÖZTORUN KÖROĞLU

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Cenk ALHAN**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2020

Bu alışma 26.06.2020 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliğı Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliğı Programı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Prof. Dr. Cenk ALHAN
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Gebrail BEKDAş
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Savaş ERDEM
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Mehmet H. OMURTAG
İstanbul Medipol Üniversitesi
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

Prof. Dr. Y. Cengiz TOKLU
Beykent Üniversitesi
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Duruşu ve olaylara yaklaşımlarıyla bana yolculuğumda ışık tutan, doktora öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarımda bana öğrettiklerinin ve manevi yardımlarının karşılığını asla ödeyemeyeceğim çok değerli hocam Prof. Dr. Cenk ALHAN'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Kendinizi daha önce hiç görmediğiniz büyük bir salonda hayal edin. Karşınızda çok sayıda kapı. Bu kapıların arkasında ne olduğunu merak ederek birini açtığınızı düşünün. Çok daha büyük bir salon ve çok daha fazla kapı... Açtığınız her kapıda karşınıza çıkan bu görüntünün tekrarı ve sonsuzluk... Bilimi bu şekilde tanımlayan ve desteğini asla esirgemeyen Prof. Dr. Namık Kemal ÖZTORUN'a çok teşekkür ederim.

İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nün çok değerli hocalarına ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma manevi desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Değerli ve sabırlı annem İnci ÖZTORUN'a, değerli eşim Can KÖROĞLU'na ve tüm aile fertlerime teşekkürü borç bilirim.

Haziran 2020

Ezgi ÖZTORUN KÖROĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	xiii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xiv
ÖZET	xvi
SUMMARY	xviii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	8
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	35
3.1. YAYGIN ANALİZ YÖNTEMLERİNİN ETKİSİ	36
3.1.1. Bina Türü Olmayan Yapısal Sistemler.....	38
3.1.2. Konsantre Kat Kütlesi ve Kayma Çerçevesi Varsayımı.....	40
3.1.3. Konsantre Düğüm Noktası Kütleleri ve Kayma Çerçevesi Varsayımı	42
3.1.4. Konsantre Düğüm Noktası Kütleleri (Tüm Bileşenler).....	43
3.1.5. Yayılı Yükler ve İlgili Yayılı Kütleler (Tüm Bileşenler).....	44
3.2. GEREÇLER	45
3.2.1. Yöntem A	45
3.2.2. Yöntem B.....	45
3.3. YÖNTEMLER	47
3.3.1. Düşey Deprem Etkisi.....	47
3.4. GP-DYNA PROGRAMI.....	49
3.4.1. Çalışma Şekli Hakkında Genel Bilgi.....	54
3.4.2. Modüller	54
3.4.2.1. “GENERATION” OTOMATİK DATA OLUŞTURMA PROGRAMININ YAPISI ve KULLANIMI	57
“NOD” DÜĞÜM NOKTASI BİLGİ GİRİŞ BLOĞU.....	60
“TRU” KAFES KİRİŞ “TRUSS” ELEMANI BİLGİ GİRİŞ BLOĞU	62
“FRA” ÇERÇEVE “FRAME” ELEMANI BİLGİ GİRİŞ BLOĞU	65

“FRP” ÇERÇEVE “FRAME” ELEMANI KESİT-MALZEME ÖZELLİĞİ BİLGİ GİRİŞ BLOĞU	69
“TRP” KAFES KİRİŞ “TRUSS” ELEMANI KESİT-MALZEME ÖZELLİĞİ BİLGİ GİRİŞ BLOĞU	69
“LOA” DÜĞÜM NOKTASI KONSATRE YÜK BİLGİ GİRİŞ BLOĞU	70
“BOU” SINIR ŞARTI BİLGİ GİRİŞ BLOĞU	72
3.4.2.2. ADIM ADIM INTEGRASYON (STEP BY STEP INTEGRATION)	74
3.4.2.3. DXF” ACAD PROGRAMINA DXF DOSYASI HAZIRLAYAN PROGRAM MODÜLÜ.....	76
3.5. GP-DYNA PROGRAMININ DOĞRULANMASI	79
3.5.1. Statik Örnek GP-DYNA ile SAP2000 Karşılaştırması	81
3.5.2. Üç Serbestlik Dereceli Sistem GP-DYNA ile CAL91 Karşılaştırması.....	85
3.5.3. Tek Serbestlik Dereceli Sistem GP-DYNA ile SAP2000 Karşılaştırması	86
3.5.4. Dört Katlı Kayma Yapısı GP-DYNA ile Matlab Kodu Karşılaştırması	92
3.5.5. Üç Katlı Kayma Yapısı GP-DYNA ile SAP2000 Karşılaştırması.....	97
3.5.6. Örnek Köprü Modeli	107
3.6. DEPREM KAYITLARI.....	118
4. BULGULAR.....	123
4.1. ÇERÇEVE SİSTEM ANALİZİ	123
4.2. KÖPRÜ ÖRNEĞİ ANALİZİ.....	125
4.3. BİLGİSAYAR PROGRAMININ AVANTAJLARI.....	134
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	136
KAYNAKLAR.....	139
ÖZGEÇMİŞ	155

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Çöken San Francisco–Oakland Körfez Köprüsü’nün görüntüleri (Nakata ve diğ., 1999).....	2
Şekil 1.2: Çöken Cypress Viyadüğü’nün gövdesinden görüntüler (Nakata ve diğ., 1999).	2
Şekil 1.3: Çöken Cypress Viyadüğü’nün köprü ayaklarından görüntüler (Nakata ve diğ., 1999).....	3
Şekil 1.4: Çeşitli şartnamelerde verilmiş sadece yatay etkileri içeren izolatör tasarımı yöntemleri.....	5
Şekil 3.1: Sistem geometrisi, genel serbestlikler ve kirişlerde yayılı kütleler.....	37
Şekil 3.2: Sistem kütle matrisi (değer alan elemanlar).....	37
Şekil 3.3: Statik analizde serbestlikler ve düğüm noktası yer değiştirme bileşenleri.....	39
Şekil 3.4: Statik analizde sistem rijitlik matrisi görüntüsü.....	39
Şekil 3.5: Konsantre kat kütlesi ve kayma çerçevesi eşdeğer modeli.	40
Şekil 3.6: Konsantre kat kütlesi ve kayma çerçevesi varsayımında sistem kütle matrisi görüntüsü.	41
Şekil 3.7: Konsantre düğüm noktası kütleleri ve doğrusal bileşenler.	42
Şekil 3.8: Konsantre düğüm noktası kütleleri (yalnızca doğrusal bileşenler) varsayımında sistem kütle matrisi görüntüsü.	43
Şekil 3.9: Konsantre düğüm noktası kütleleri (tüm bileşenler).	43
Şekil 3.10: Konsantre düğüm noktası kütleleri (tüm bileşenler) ve sistem kütle matrisi görüntüsü.	44
Şekil 3.11: Yayılı yükler, ilgili yayılı kütleler (tüm bileşenler): önerilen ve çalışmada kullanılan yönteme göre sistem kütle matrisi görüntüsü.....	44
Şekil 3.12: Düşey deprem etkisi (sistem dengede).....	48
Şekil 3.13: Düşey deprem etkisi (sistem mekanizma).....	48
Şekil 3.14: GP-DYNA başlangıç görüntüsü.....	50

Şekil 3.15: Çubuk elemanı uç kuvvetleri ve yer değiştirmeler için pozitif işaret notasyonu.....	50
Şekil 3.16: GP-DYNA Bilgisayar programının makro akış şeması (a).....	51
Şekil 3.17: GP-DYNA Bilgisayar programının makro akış şeması (b).	51
Şekil 3.18: GP-DYNA ikinci integrasyon modülünün akış şeması (a).	52
Şekil 3.19: GP-DYNA ikinci integrasyon modülünün akış şeması (b).	52
Şekil 3.20 GP-DYNA ikinci integrasyon modülünün akış şeması (c).	53
Şekil 3.21: GP-DYNA bilgi giriş modüllerinde kullanılan Karakaya Köprüsü'ne ait görüntü (Sarıcı ve diğ., 2011).	60
Şekil 3.22: Tanımlanan düğüm noktaları.	62
Şekil 3.23: Otomatik oluşturulan düğüm noktaları.	62
Şekil 3.24: Tanımlanan kafes kiriş elemanları.	64
Şekil 3.25: Otomatik oluşturulan kafes kiriş elemanları (ilk satır).....	65
Şekil 3.26: Otomatik oluşturulan kafes kiriş elemanları (ikinci satır).....	65
Şekil 3.27: Tanımlanan çerçeve elemanları.....	67
Şekil 3.28: Otomatik oluşturulan çerçeve elemanları (ilk satır).....	68
Şekil 3.29: Otomatik oluşturulan kafes kiriş elemanları (ikinci satır).....	68
Şekil 3.30: Bilgisayar modelinin nokta ve elemanları.....	68
Şekil 3.31: Örnek modelin tek açıklığını gösteren 3 boyutlu AutoCAD çizimi.	77
Şekil 3.32: Örnek modelin tek açıklığını gösteren AutoCAD çiziminin 2 boyutlu görünüşü.	77
Şekil 3.33: Örnek modelin tek açıklığını gösteren AutoCAD çiziminin 3 boyutlu görünüşü.	78
Şekil 3.34: Bilgisayar programıyla oluşturulan AutoCAD dosyası.	78
Şekil 3.35: Bilgisayar modelinde sisteme ait elemanların görünüşü.....	79
Şekil 3.36: Statik analiz karşılaştırması için örnek yapısal sistem.	81
Şekil 3.37: SAP2000 statik örnek için analiz sonuçları.	83
Şekil 3.38: Statik örnek için SAP2000 ile hesaplanan nokta deformasyonları.	84

Şekil 3.39: Örnek sistem ve yükleme fonksiyonu.....	85
Şekil 3.40: CAL91 plot graph seçeneği.....	86
Şekil 3.41: GP-DYNA hızlı ekran grafik seçeneği.....	86
Şekil 3.42: TSD sistemin GP-DYNA ile analizi sonucu görelî deplasman (m)-zaman (s) grafiğı.	88
Şekil 3.43: TSD sistemin SAP2000 ile analizi sonucu görelî deplasman (m)-zaman (s) grafiğı.	88
Şekil 3.44: TSD sistemin GP-DYNA ile analizi sonucu görelî hız (m/s)-zaman (s) grafiğı.	89
Şekil 3.45: TSD sistemin SAP2000 ile analizi sonucu görelî hız (m/s)-zaman (s) grafiğı.	89
Şekil 3.46: TSD sistemin GP-DYNA ile analizi sonucu görelî ivme (m/s ²)-zaman (s) grafiğı.	90
Şekil 3.47: TSD sistemin SAP2000 ile analizi sonucu görelî ivme (m/s ²)-zaman (s) grafiğı.	90
Şekil 3.48: TSD sistemin GP-DYNA ile analizi sonucu toplam ivme (m/s ²)-zaman (s) grafiğı.	91
Şekil 3.49: TSD sistemin GP-DYNA ile analizi sonucu toplam ivme (m/s ²)-zaman (s) grafiğı.	91
Şekil 3.50: 4 katlı kayma yapısı modeli.	92
Şekil 3.51: GP-DYNA MDOF sistem 4. kat için görelî deplasman (m)-zaman (s) grafiğı.	94
Şekil 3.52: MATLAB MDOF sistemin 4. katı için görelî deplasman (m) –zaman (s) grafiğı.	94
Şekil 3.53: GP-DYNA MDOF sistem 4. kat için görelî hız (m/s)-zaman (s) grafiğı.	95
Şekil 3.54: MATLAB sistemin 4. katı için görelî hız (m/s)-zaman (s) grafiğı.	95
Şekil 3.55: GP-DYNA MDOF sistem 4. kat için toplam ivme (m/s ²)-zaman (s) grafiğı.	96
Şekil 3.56: MATLAB MDOF sistem 4. kat için toplam ivme (m/s ²)-zaman (s) grafiğı.	96
Şekil 3.57: Topçu (2014) ders notlarından alınan üç katlı kayma yapısı örneğı.	97
Şekil 3.58: GP-DYNA Newmark yöntemi ile analiz 3. kat için görelî deplasman (m)-zaman (s) grafiğı.	99

Şekil 3.59: GP-DYNA Wilson yöntemi ile analiz 3. kat için görelî deplasman (m)-zaman (s) grafiğı.	99
Şekil 3.60: SAP2000 ile analiz 3DOF sistem 3. kat için görelî deplasman (m)-zaman (s) grafiğı.	100
Şekil 3.61: SAP2000 ile analiz kayma çerçevesi 3. kat için görelî deplasman (m)-zaman (s) grafiğı.	100
Şekil 3.62: GP-DYNA Newmark yöntemi ile analiz 3. kat için görelî hız (m/s)-zaman (s) grafiğı.	101
Şekil 3.63: GP-DYNA Wilson yöntemi ile analiz 3. kat için görelî hız (m/s)-zaman (s) grafiğı.	101
Şekil 3.64: SAP2000 ile analiz 3DOF sistem 3. kat için görelî hız (m/s)-zaman (s) grafiğı.	102
Şekil 3.65: SAP2000 ile analiz kayma çerçevesi 3. kat için görelî hız (m/s)-zaman (s) grafiğı.	102
Şekil 3.66: GP-DYNA Newmark yöntemi ile analiz 3. kat için görelî ivme (m/s ²)-zaman (s) grafiğı.	103
Şekil 3.67: GP-DYNA Wilson yöntemi ile analiz 3. kat için görelî ivme (m/s ²)-zaman (s) grafiğı.	103
Şekil 3.68: SAP2000 ile analiz 3DOF sistem 3. kat için görelî ivme (m/s ²)-zaman (s) grafiğı.	104
Şekil 3.69: SAP2000 ile analiz kayma çerçevesi 3. kat için görelî ivme (m/s ²)-zaman (s) grafiğı.	104
Şekil 3.70: GP-DYNA Newmark yöntemi ile analiz 3. kat için toplam ivme (m/s ²)-zaman (s) grafiğı.	105
Şekil 3.71: GP-DYNA Wilson yöntemi ile analiz 3. kat için toplam ivme (m/s ²)-zaman (s) grafiğı.	105
Şekil 3.72: SAP2000 ile analiz 3DOF sistem 3. kat için toplam ivme (m/s ²)-zaman (s) grafiğı.	106
Şekil 3.73: SAP2000 ile analiz kayma çerçevesi 3. kat için toplam ivme (m/s ²)-zaman (s) grafiğı.	106
Şekil 3.74: Karakaya Köprüsü Malatya Kenarı (Sarıcı ve diğı., 2011).	108
Şekil 3.75: SAP2000 statik analiz modeli.	109
Şekil 3.76: Karakaya Köprüsü 3 açıklıklı 3D SAP2000 modeli.	109

Şekil 3.77: 3 açıklıklı 3D SAP2000 modeli eksenel kuvvet dağılımı.	111
Şekil 3.78: 3 açıklıklı 2D SAP2000 modeli eksenel kuvvet dağılımı.	111
Şekil 3.79: 3 açıklıklı 3D SAP2000 modeli kesme kuvveti dağılımı.	112
Şekil 3.80: 3 açıklıklı 2D SAP2000 modeli kesme kuvveti dağılımı.	112
Şekil 3.81: 3 açıklıklı 3D SAP2000 modeli moment dağılımı.	113
Şekil 3.82: 3 açıklıklı 2D SAP2000 modeli moment dağılımı.	113
Şekil 3.83: Programın oluşturduğu data modeli (a).	114
Şekil 3.84: Programın oluşturduğu data modeli (b).	114
Şekil 3.85: SAP2000 programına aktarılmış geometrik bilgiler.	114
Şekil 3.86: GP-DYNA bilgisayar modeli.	115
Şekil 3.87: GP-DYNA makro bilgisayar modeli ve numaralandırma sistemi.	115
Şekil 3.88: Yakın depremlere ait yatay kayıtların %5 sönüm oranı için deplasman – ivme spektrumu.	121
Şekil 3.89: Yakın depremlere ait düşey kayıtların %5 sönüm oranı için deplasman – ivme spektrumu.	121
Şekil 3.90: Uzak depremlere ait yatay kayıtların %5 sönüm oranı için deplasman – ivme spektrumu.	122
Şekil 3.91: Uzak depremlere ait düşey kayıtların %5 sönüm oranı için deplasman – ivme spektrumu.	122
Şekil 4.1: Sistem geometrisi ve sınır şartlarından bağımsız genel serbestlikler.	123
Şekil 4.2: Konsantre kütle, kolonlar ve kirişler serbest (genel çözüm).	123
Şekil 4.3: GP-DYNA programının 8 no’lu düğüm noktasındaki yatay serbestlik için iki ayrı integrasyon modülü deplasman sonuçlarının karşılaştırılması.	124
Şekil 4.4: Genel serbestlikler ve hem yatay hem de düşey deprem fonksiyonlarının hesaba katılması durumunda 8 no’lu düğüm noktasındaki yatay serbestlik için GP-DYNA ve SAP2000 görel ivme karşılaştırılması.	125
Şekil 4.5: 3 açıklıklı 3D SAP2000 modeli orta açıklıkta deplasman.	126
Şekil 4.6: 3 açıklıklı 2D SAP2000 modeli orta açıklıkta deplasman.	127
Şekil 4.7: Statik deformasyonlar (simetrik yükleme).	127
Şekil 4.8: Mod şekli 1 (yatay hareket).	128

Şekil 4.9: Mod şekli 2 (yatay ve düşey hareket).	128
Şekil 4.10: Mod şekli 3 (sağ kolon üzerinde düşey hareket).....	128
Şekil 4.11: Mod şekli 4 (sağ kolon üzerinde düşey hareket).....	129
Şekil 4.12: Mod şekli 5 (düşey hareket).	129
Şekil 4.13: GP-DYNA modeli araştırılan kesit tesirleri.	129
Şekil 4.14: GP-DYNA makro modelde dinamik yüklerin hesaplandığı serbestlikler ve serbestlik numaraları.	130
Şekil 4.15: San Fernando yatay ve düşey deprem kayıtları altında 47 numaralı serbestlikte oluşan (a) deplasman, (b) hız ve (c) ivme grafikleri.	133



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: “GENERATE” modülü “DATA” adlı örnek bir problem için geçici dosyalar.	58
Tablo 3.2: “DYNA” modülü “DATA” adlı örnek bir problem için dosyalar.	59
Tablo 3.3: Newmark parametreleri.....	76
Tablo 3.4: Statik örnek analizi GP-DYNA ile SAP2000 karşılaştırması.	83
Tablo 3.5: MDOF sistem 4. kat için GP-DYNA ile MATLAB karşılaştırması.	96
Tablo 3.6: GP-DYNA Newmark – Wilson yöntemleri ile SAP2000 3DOF sistem ve kayma çerçevesi karşılaştırması.	107
Tablo 3.7: Kafes kiriş elemanlarında kesit ve malzeme özellikleri.....	116
Tablo 3.8: Kafes kiriş elemanlarının matrisleri ile ilgili örnek.	116
Tablo 3.9: Çerçeve elemanlarının matrisleri ile ilgili örnek.....	117
Tablo 3.10: Sistem rijitlik matrisi (10 kolondan oluşan bloklar halinde yazılmaktadır).....	117
Tablo 3.11: Sistem rijitlik matrisinin evriği (10 kolondan oluşan bloklar halinde yazılmaktadır).....	117
Tablo 3.12: Öz vektörler (10 kolondan oluşan bloklar halinde yazılmaktadır).....	118
Tablo 3.13: Normalleştirilmiş öz vektörler (10 kolondan oluşan bloklar halinde yazılmaktadır).....	118
Tablo 3.14: Öz değerler, frekans ve periyotlar (örnek problemde 222 adet).	118
Tablo 3.15: Yakın Deprem Kayıtlarının Özellikleri.....	119
Tablo 3.16: Uzak Deprem Kayıtlarının Özellikleri.	120
Tablo 4.1: 3D ve 2D modelin kesit tesirlerinin karşılaştırılması.....	126
Tablo 4.2: 3D ve 2D modelin sehim ve deplasman miktarlarının karşılaştırılması.	126
Tablo 4.3: Uzak-fay ve yakın-fay depremlerine ait sonuçlar, oran: (toplam dinamik düşey yük)/(toplam statik düşey yük).....	132

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$[A_t]$	: t zaman adımındaki ivme vektörü
$[C]$	: Sistem sönüm matrisi
$[K]$	: Sistem rijitlik matrisi
$[M]$	: Sistem kütle matrisi
$[P_t]$	: t zaman adımındaki düğüm noktası yük vektörü
$[U_t]$	: t zaman adımındaki deplasman vektörü
$[V_t]$	: t zaman adımındaki hız vektörü
A	: Çerçeve elemanı enkesit alanı
α	: Newmark adım adım integrasyon metodu parametresi
δ	: Newmark adım adım integrasyon metodu parametresi
DT	: Fortran kodunda Newmark adım adım integrasyon zaman artışı
E	: Çerçeve elemanı malzeme Elastisite Modülü
F_1	: Yatay eksen yönünde doğrusal yük
F_2	: Düşey eksen yönünde doğrusal yük
g	: Yer çekimi ivmesi ya da ivme
I	: Çerçeve elemanı enkesit atalet momenti
K_x	: Yatay eksen yönünde serbestlik
K_y	: Düşey eksen yönünde serbestlik
K_z	: Düzleme dik eksen etrafında serbestlik
M_3	: Düzleme dik eksen etrafında açısallık yük
N	: Fortran kodunda eleman grup veya düğüm noktası numarası
R_x	: Yatay eksen yönünde doğrusal rijitlik
R_y	: Düşey eksen yönünde doğrusal rijitlik
R_z	: Düzleme dik eksen etrafında açısallık rijitlik
t	: Zamana bağlı vektörler için zaman adımı
θ	: Newmark adım adım integrasyon metodu parametresi
U_x	: Yatay eksen yönünde doğrusal deplasman
U_y	: Düşey eksen yönünde doğrusal deplasman
U_z	: Düzleme dik eksen etrafında açısallık deplasman

W	: Çerçeve elemanı üzerindeki açıklık yükü
ν	: Çerçeve elemanı malzeme Poisson Oranı

Kısaltmalar	Açıklama
BOU	: Sınır şartı bilgileri ve otomatik data oluşturma opsiyonu “BOUndary conditions”
END	: Bilgi girişini sonlandıran komut
FRA	: Çerçeve elemanı bilgileri ve otomatik data oluşturma opsiyonu “FRame”
FRP	: Çerçeve elemanı kesit-malzeme özelliği bilgileri “FRame Properties”
LOA	: Düğüm noktası konsantre yük bilgileri ve otomatik data oluşturma opsiyonu “LOAD”
NOD	: Düğüm noktası bilgileri ve otomatik data oluşturma opsiyonu “NODal point”
STE	: Adım adım integrasyon “STEp by step”
TRP	: Kafes kiriş elemanı kesit-malzeme özelliği bilgileri “TRuss Properties”
TRU	: Kafes kiriş elemanı bilgileri ve otomatik data oluşturma opsiyonu “TRUss”

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KÖPRÜLERİN DEPREM ETKİLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI

Ezgi ÖZTORUN KÖROĞLU

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Cenk ALHAN

Depremlerde köprü, viyadük ve benzeri yapıların hasar görebildiği ve hatta yıkılabildiği bilinmekle birlikte; nedenleri henüz kesin olarak belirlenememiştir. Deprem etkisine maruz köprü türü yapıların davranışları araştırılırken, mevcut araştırmalarda genellikle sadece yatay etkilerin hesaba katıldığı görülmektedir. Hatta günümüze kadar süregelen önemli uluslararası şartnamelerde de yalnızca yatay etki hesaba katılmaktadır. Yalnızca yatay etkilerin hesaba katılmasında önemli nedenlerden bir tanesi, düşey yüklerin deprem esnasında meydana gelebilen olası çekme kuvvetlerine kıyasla küçük olması durumunda sistemin mekanizma haline gelmesi (oynak olması) ve sonuçta çözümün pratik olarak imkânsız hale gelmesidir. Bu durumda problem çözilememekte ve düşey etkiler hesaba katılamamaktadır. Mevcut çalışmada yapısal sistemlerin alışlagelmiş deprem analizlerinin yanı sıra düşey etkiler de hesaba katılmaktadır. Düşey etkiler de dâhil olmak üzere bir yapısal sistemin geleneksel statik ve modal analizlerini gerçekleştirebilen genel amaçlı bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu yazılım kullanarak, örnek köprü modelinin mod şekilleri ve dinamik özellikleri elde edilmiştir. Kütle matrisi ile yapısal sistemin rijitlik matrisi aynı boyutlara sahip olduğu için, program açısıl bileşenler de dâhil olmak üzere her serbestlik derecesine karşılık gelen bir kütle bileşeni içermektedir. Ayrıca, yayılı kütle ve açısıl bileşenlerin yanı sıra; yatay, düşey bileşenlerin ve kombinasyonları ile birlikte etkileşimlerinin dikkate alınması gibi seçenekler de mümkündür. Yapısal sistemin zaman alanı analizi için kodlara Doğrudan Entegrasyon Teknikleri uygulanarak; her bir düğüm noktasında ivme, hız, yer değiştirme ve kuvvet bileşenlerinin elde edilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu haliyle, program, mevcut genel amaçlı sonlu eleman

programlarının sınırlarını zorlayan çok sayıda (milyonlarca) bilinmeyen için analiz yapabilmektedir. Analiz edilen köprü modeline dayanan bulgular, düşey hareketin dikkate alınmasının kritik olabileceğini ortaya koymaktadır.

Haziran 2020, 156 sayfa.

Anahtar kelimeler: Köprü, Deprem Etkisi, Düşey Mod Etkisi, Düşey Deformasyon, Direkt Entegrasyon Tekniği



SUMMARY

Ph.D. THESIS

BEHAVIOUR OF BRIDGES UNDER EARTHQUAKE EFFECTS

Ezgi ÖZTORUN KÖROĞLU

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Cenk ALHAN

It is well-known that bridges, viaducts, and similar structures have been damaged and even destroyed under earthquake excitation; however, reliable reasons have not been determined yet. It is observed that, generally, only horizontal seismic effects are included in the current studies and vertical motion is neglected for the investigation of the behavior of bridge-type structures subjected to earthquakes. Likewise, only the horizontal impact is taken into account by important prevailing international specifications/codes. One of the main reasons for excluding vertical behavior is the possibility for the system to become mechanism if the vertical loads are small compared to the potential tension forces during the earthquake since the solution will become practically impossible. A general purpose computer program, that can perform the conventional static and modal analyses of a structural system including the vertical effects has been developed. By using this software, the mode shapes and dynamic characteristics of an example bridge model have been obtained. Since the dimensions of the mass matrix and the stiffness matrix of the structural system are the same, the program included a mass component corresponding to each degree of freedom, including angular components. Moreover; accounting horizontal, vertical components and their interactions together with combinations as well as taking distributed mass and angular components into consideration are possible options. At this stage of the study, by implementing Direct Integration Techniques to the aforementioned code for time history analysis of the structural system; obtaining acceleration, velocity, displacement and force components at each nodal point has become possible. As it stands, the program is

capable of performing analysis for a large number (millions) of unknowns that push the limits of extent of general purpose finite element programs. Findings based on the analyzed bridge model reveal that taking vertical motion into consideration may be crucial.

June 2020, 156 pages.

Keywords: Bridge, Earthquake, Effect of Vertical Modes, Vertical Deformation, Direct Integration Technique



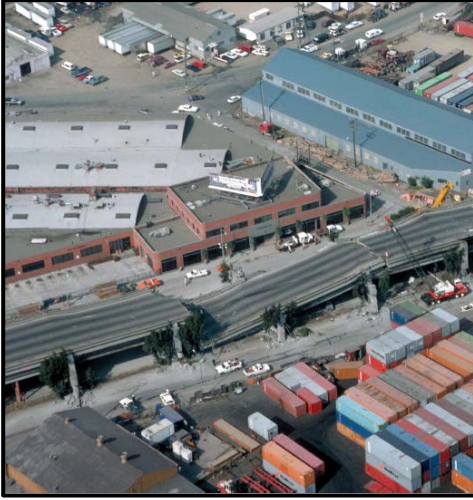
1. GİRİŞ

Depremlerde köprü, viyadük ve benzeri yapıların hasar görebildiği ve hatta yıkılabildiği bilinmekle birlikte tüm nedenler henüz kesin olarak belirlenememiştir. Deprem etkisine maruz köprü türü yapıların davranışları araştırılırken, günümüze dek yapılan araştırmalarda genellikle sadece yatay etkilerin hesaba katıldığı görülmektedir. Hatta günümüze kadar süregelen önemli uluslararası şartnamelerde de yalnızca yatay etki hesaba katılabilmektedir. Yalnızca yatay etkilerin hesaba katılmasındaki önemli nedenlerden bir tanesi, düşey yüklerin deprem esnasında oluşabilen olası çekme kuvvetlerine kıyasla küçük olması durumunda sistemin mekanizma haline gelmesi (labil olması) ve sonuçta çözümün pratik olarak imkânsız hale gelmesidir. Bu durumda problem çözülememekte ve düşey etkiler hesaba katılamamaktadır.

Literatürde köprülerin hangi sebeple hasar görmüş olabileceği araştırıldığında, özellikle düşey hareketin etkileri üzerinde durulduğu görülmüştür. Bu sebeple, yapılan tez çalışmasında düşey etkilerin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amacın oluşmasına temel teşkil eden kaynaklar şu şekildedir: Bazı araştırmacılar tarafından, düşey uyarımın etkilerinin, depremlerin yüksek yoğunlukta olduğu alanlarda önem taşıdığı belirtilmiştir. (Papazoglou ve Elnashai, 1996; Tanimura ve diğ., 2002; Kunnath ve diğ., 2008). Köprü yapılarının sismik performansı üzerine düşey uyarımın etkileri özellikle köprü yataklarında açığa çıkmaktadır (Ye ve diğ., 2001). Düşey uyarım modeli düşünüldüğünde, taşıyıcılardaki düşey reaksiyon kuvvetinin de değişeceği, dolayısıyla kayma sürtünme yatakları ile sismik olarak izole edilmiş bir köprünün sismik performansını etkileyen kritik kayma kuvveti ve histerik enerji dağılımının da etkileneceği ifade edilmiştir (Wang ve Chen, 2007). Söz konusu düşey etkinin özellikle köprü ve köprüyol (viyadük) türü yapılarda hesaba katılması hayati önem taşımaktadır. Çünkü bu etki oldukça yıkıcı sonuçlar doğurabilmektedir. Özellikle literatürde “Rocking Effect” (sallanma/çarpma) olarak bilinen davranış, yapı bütünlüğünü bozarak yapıda büyük hasarlara ve can kaybına neden olabilmektedir. Buna en büyük örneklerden biri 1989 Loma Prieta depremi sırasında San Francisco–Oakland Körfez Köprüsü’nün (Şekil 1.1) ve Cypress Viyadüğü’nün (Şekil 1.2 - Şekil 1.3) çökmesidir.



Şekil 1.1: Çöken San Francisco–Oakland Körfez Köprüsü’nün görüntüleri (Nakata ve diğ., 1999).



Şekil 1.2: Çöken Cypress Viyadüğü’nün gövdesinden görüntüler (Nakata ve diğ., 1999).



Şekil 1.3: Çöken Cypress Viyadüğü'nün köprü ayaklarından görüntüler (Nakata ve diğ., 1999).

Bazı raporlara göre; hasar gören köprüler için, en yaygın göçme modlarının çarpma etkilerinin yanı sıra taşıyıcıların yukarı kalkarak yırtılması ve bunun sonucunda köprü gövdelerinin yerinden çıkması olduğu belirtilmektedir. Bunlara 1989 Loma Prieta (Priestley, Seible, ve Calvi, 1996), 1994 Northridge (Earthquake Engineering Research Institute [EERI], 1995a), 1995 Kobe (EERI, 1995b), 1999 Chi Chi (EERI, 2001) ve 2011 Tohoku (Akiyama, Frangopol, ve Mizuno, 2014; Buckle, Yen, Marsh, ve Monzon, 2012; EERI, 2011; Kawashima, 2012; Kitahara, Kajita, ve Kitane, 2012) örnek verilebilir. Bu depremler nedeniyle köprülerde oluşan yerinden çıkma ve taşıyıcılarda yukarı kalkma etkisi şartnamelere bakıldığında oldukça belirgindir (California Department of Transportation [CalTrans], 1999; EN1998-2, 2005; JRA, 2002).

Chang, Chang, Tsai, ve Sung (2000) şiddetli depremlerde köprülerde en çok görülen göçme modunun hasar görmüş izolatörler yüzünden olduğunu belirtmiştir. Chu-Chieh, Hung, Liu, ve Chai (2010), Baihwa Köprüsü'nün yıkılmasının temel sebeplerinden birinin taşıyıcılardaki yukarı kalkma olduğunu açıklamıştır. Benzer olarak, Dong Feng köprü kirişleri yine taşıyıcıların göçmesi sonucu yerinden çıkmış ve düşmüştür (Chang ve diğ., 2000).

Button ve diğ. (2003), düşey yer hareketlerinin bir köprü tepkisi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı varsayımının yaygın olduğunu, dolayısıyla mevcut köprü tasarım kodlarının dikey hareketlere verilen tepkiyi açıkça ortaya koymadığını belirtmiştir. Ancak bunun, faydan 20

km'den az uzaklıktaki köprüler için kesinlikle geçerli bir varsayım olmadığına altını çizmişlerdir. Bazı köprüler için, 60 km uzaklıkta dahi düşey harekete bağlı tepkilerinin önemli olacağını açıklamışlardır. Button ve diğ. yaptıkları çalışmada, AASHTO tarafından göz önüne alınacağını düşünerek, düşey yer hareketlerinin şartname formunda yer alması için öneriler getirmişlerdir.

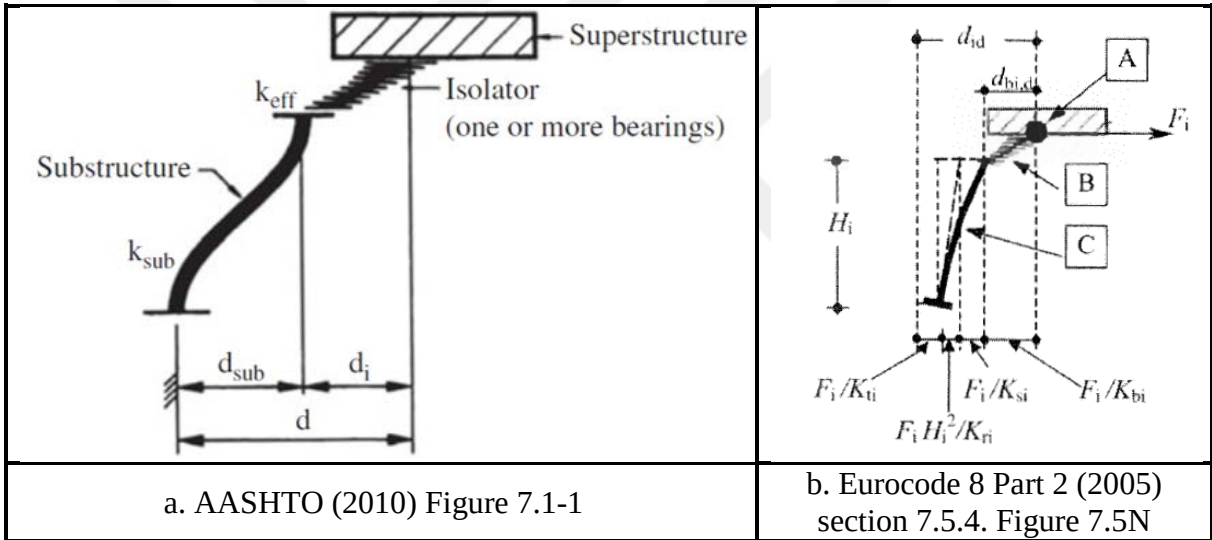
Katsaras, Panagiotakos, ve Kolias (2009), köprülerin transvers ekseninde sismik etkilere maruz kaldığında taşıyıcılarda meydana gelecek yukarı kalkma hareketini incelemişlerdir. Özellikle sabitlenmiş izolatörlerdeki bu yukarı kalkma hareketinin mesnet ayaklardaki izolatörler üzerinde son derece şiddetli olduğunu belirtmişlerdir. İzolatörlerde yırtılmalar Tohoku depreminde de gözlenmiştir. Yaklaşık 200 adet karayolu üst köprüsünün ve birçok raylı köprünün, sismik izolatörlerin yırtılması ve köprü açıklıklarının yerinden çıkması sebebiyle hasar gördüğü açıklanmıştır (EERI, 2011). Sendai-Tohbu Viyadüğü'nde köprü ayaklarındaki dört izolatörde hasar ve yırtılmalar sonucu (Public Works Research Institute [PWRI], 2011) bazı kirişler bu izolatörlerinden ayrılmıştır.

Dorfmann ve Burtcher (2000), yukarı kalkma sonucu monte edilmiş izolatörlerdeki yırtılmanın da bir göçme moduna sebep olabileceğini açıklamıştır. Kawashima (2012) köprülerde görülen hasarları ilk olarak yanlış tasarıma ve elastomer yataklarının hatalı imalatına, ikinci olarak bitişik iki köprü tabliyesinin etkileşimine bağlamıştır. Buckle ve diğ. (2012) çekiş başlı köprü ayaklarının eksenel aksları etrafında dönerek üstyapının da aynı ekseninde burkulmasına sebep olduğunu öne sürmüştür; köprünün transvers eksenindeki sismik hareketler nedeniyle taşıyıcıların yerinden çıkmış olabileceğini belirtmiştir. Eksenel sismik yükleme altında köprülerde bu yukarı kalkma hareketi sonucu oluşacak deplasmanların boyutuna ilişkin soru işaretleri sebebiyle, Mitoulis, Muhr, ve Ahmadi bu konuda araştırmalar yapmıştır (2014).

Kim (2012), içi boş betonarme köprü kolonlarının inelastik davranışını araştırmış, gelişmiş bir nonlinear sonlu elemanlar analiz programını kullanarak değerlendirme sürecinin doğruluğunun ve nesnelliğinin artırılabilirliğini ifade etmiştir. Köprü kolonlarının inelastik davranış özelliklerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için üç boyutlu sonlu elemanlar analizinin ve güvenilir yapısal modellemenin gerekli olduğunun altını çizmiştir. Ancak, güvenilir bir üç boyutlu malzeme modelinin geliştirilmesinde yaşanan zorluklar ve gerçek problemin uygulamasında işlem hacmi fazlalığı nedeniyle çeşitli problemler ortaya çıktığını, dolayısıyla iki boyutlu sonlu elemanlar modelini tercih ettiğini açıklamıştır. Bu tez çalışmasında da Kim'in

bahsettiği gibi modellemede yaşanacak zorluklar ve işlem hacmi fazlalığı nedeniyle nonlinear analiz yapılmamış, doğrusal modelleme tekniğine önem verilmiştir.

Güncel şartnamelere bakıldığında AASHTO (2013) elastomer yatakların A ve B tipi tasarımı için sismik yükler altında taşıyıcılardaki yukarı kalkma etkisinin göz önüne alınmadığı görülmektedir. NCHRP 596’da şartnamelerde bu yukarı kalkma etkisinin dahil edilmemesinin temel sebebi taşıyıcıların içsel yırtılmasını engellemektir (Stanton ve diğ., 2008). Benzer şekilde, Eurocode 8 (Eurocode 8-2 section 6.6.3.2, EN 1998-2, 2005) sismik kombinasyonlar altında tasarım için izolatörlerde bu yukarı kalkma etkisini göz önüne almamaktadır. Şekil 1.4’te çeşitli şartnamelerdeki sadece yatay etkileri içeren izolatör tasarım yöntemleri verilmiştir.



Şekil 1.4: Çeşitli şartnamelerde verilmiş sadece yatay etkileri içeren izolatör tasarımı yöntemleri.

Konunun önemi ve şartnamelerin yetersiz kalması nedeniyle; Reyhanoğulları ve Akyüz’ün (2015) sismik olarak izole edilmiş ve edilmemiş köprüler üzerinde düşey yer hareketi etkisine dair makalesi, Jin ve diğ. (2016)’nin köprüler üzerinde düşey deprem etkilerini araştırdığı çalışması ya da Wang ve diğ. (2016)’nin sismik izolasyonu kayar sürtünmeli yataklarla yapılmış köprülerin sismik performansı üzerine düşey uyarımın etkilerini araştırması gibi, son zamanlarda yeni çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Düşey uyarımın, özellikle kayar sürtünme yatakları ile izole edilmiş bir köprünün sismik performansı üzerinde büyük bir etkisi olduğu ifade edilmiş; bu tür köprüleri tasarlarken baskın olması sebebiyle düşey uyarımın mutlaka hesaba katılması gerektiğinin altı çizilmiştir (Wang ve diğ., 2016). Benzer şekilde Lu ve diğ.

(2016), şiddetli düşey zemin uyarımlarının olduğu durumlarda, çok büyük çekme gerilmelerinin elastomerik taşıyıcıların yırtılmasına ve kaymalı yataklarda yukarı kalkma hareketine neden olacağını belirtmiştir.

Genel amaçlı mevcut yazılımların irdelenen konuda yetersiz kalması, analiz yönteminin alışlagelmiş yöntemlerden farklı olması gibi nedenlerle literatürde uygulanabilir, pratik bir çözüm yöntemin geliştirilemediği saptanmıştır. Ayrıca, dinamik analizlerde diyagonal dışı terimlerin ve bu terimlere karşılık gelen yüklerin hesaba katılması durumunda, bu yüklerin ne oranlarda hesaba katılacağı hususu henüz netliğe kavuşmamıştır. Bununla birlikte, açısallık serbestliklerle ilgili olarak son zamanlarda bazı çalışmalar yapılmış olmasına rağmen (Huang, 2003; Kalkan ve Graizer, 2007; Lee ve Liang, 2008; Bonev ve diğ., 2010, Guidotti, 2012; Kalani Sarokolayı ve diğ., 2012; Lee ve diğ., 2012; Ghaffarzadeh ve Nazeri, 2015; Kalani Sarokolayı ve diğ., 2015; Yin ve diğ., 2016), irdelenen problemlere çözüm getirememektedir. Oysaki perde duvar gibi yapısal sistemlerin analizlerinde açısallık etkilerin büyük önem taşıdığı bilinmektedir (Öztorun ve diğ., 1998).

İlk araştırmalar ve analizler mevcut genel amaçlı yazılımların olanakları ile sınırlı olarak bazı varsayımlarla gerçekleştirilebilmektedir. Bu davranışın gerçekçi olarak matematiksel modelde tanımlanabilmesi için model hazırlama tekniği son derece önemlidir.

Deprem etkisi altında düşey davranışın görülmesi özellikle sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan hazır analiz programlarında oldukça zordur. Sistemin düşey davranışının görülmesi için kullanılan modelde düşey sınır koşullarının serbest bırakılması sonucu rijitlik matrisinde diyagonal üzerindeki terimler negatif çıkmakta, bunun sonucunda rijitlik matrisinin evriği alınamamaktadır. "Ill condition" olarak geçen bu durumda modelin analizi yapılamamaktadır. Sınır şartlarında düşey davranışın gözlemlenemediği durumda ise sistem analizi gerçek davranışı yansıtmamaktadır.

Dinamik analizler tasarıma yönelik olarak geliştirilmiş kısmi üç boyutlu olan paket bilgisayar programlarının çoğunda gerçek davranışı yansıtmayan varsayımlarla gerçekleştirilmektedir. Genel amaçlı bilgisayar programlarında da söz konusu varsayımların bir kısmı yaygın olarak yapılmakta, çoğu zaman bilgisayarların ve/veya programların kapasitelerinin aşılması, ya da programların formülasyonlarının yetersizliği gibi nedenlerle mevcut çalışmada önerilen ve kullanılan yöntem uygulanamamaktadır. Çoğu kez dinamik analizler için muadil bir sistem

rijitlik, kütle ve sönüm matrisi oluşturulmakta, dinamik etkiler bu varsayımlı ve genellikle gerçek davranışı yansıtmayan formülasyonlarla gerçekleştirmekte ve statik analiz sonuçları ile süperpoze edilmektedir. Uygun çözüm, statik ve dinamik analizlerde kullanılan parametrelerin uyumlu olmasıdır. Aksi takdirde varsayımlı analizlerle elde edilen sonuçların hatalı olması riskinin yanı sıra emniyetsiz tarafta olma riski de bulunmaktadır. Bu önerinin uygulanabilir olduğu mevcut çalışmada gösterilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, söz konusu varsayımlara ihtiyaç duyulmadan modelleme yapılabilecek şekilde geliştirilmiş olan GP-DYNA bilgisayar programı kullanılarak çok fazla sayıda analiz gerçekleştirilmiş, program doğrulanmış ve tamamlanmış opsiyonlarla analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları yaygın olarak kullanılan varsayımlarla bulunan sonuçların farklı olabileceğini göstermektedir. Diğer taraftan pratikte analizi mümkün görülmeyen tüm serbestlik bileşenlerinin pratik olarak hesaba katılabileceği gösterilmiştir. Geliştirilmiş olan bilgisayar programının bilinmeyen çözme kapasitesi oldukça yüksektir ve çözümü çift hassaslıklı sayılarla gerçekleştirmektedir. Önerilen yöntem ve analizler çok az sayıda programın dışında yapılamamaktadır. Geliştirilen bilgisayar programı, diyagonal olmayan terimleri yapısal sistem matrislerinde kontrollü bir şekilde kullanma yeteneğine sahiptir. Düşey deprem kayıtlarının kullanılması durumunda, mevcut analiz yöntemlerinin yeterli güvenceyi sağlamayabileceği görülmüştür.

2. GENEL KISIMLAR

Yapılan tez çalışmasında, düşey etkilerin daha net görülebilmesi amaçlı yapısal sistem olarak köprüler üzerinde durulmuştur. Köprülere yönelik geçmişte de çalışmalar yapılmış olmakla beraber; depremler sonucunda çoğu köprü, viyadük vb yapının hasar görmesi nedeniyle yapı davranışının son zamanlarda daha detaylı incelenmeye başladığı göze çarpmaktadır. Literatürdeki çalışmalardan bazıları deneysel, bazıları modelleme teknikleri ve sonlu elemanlar analizlerini içeren araştırmalardır. Yol gösterici olması amaçlı; kullanılmış programlar, modelleme yöntemleri ve analiz detayları özellikle verilmiştir. Ancak kullanılan modellerde genellikle düşey uyarım etkilerini görecektir şekilde serbestliklerin kullanılmadığı, daha detaylı olanların ise pratik, modelin kolayca modifiye edilebildiği bir yöntemi içermediği, ayrıca analiz sırasında tüm ara işlemlerin görülüp müdahale edilemediği görülmüştür.

(A) Köprülerin modellenmesine ilişkin incelenen çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Ferreira ve Simoes (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, sismik yüklemeye maruz kalan üç boyutlu gergi askılı köprüler araştırılmış, eşzamanlı yapısal kontrol tasarım problemini çözmek için bir optimizasyon algoritması sunulmuştur. Optimizasyon algoritması; kontrol cihazlı (viskoz sönümleyici) gergi askılı köprü tasarımını çözmek için, hem statik hem deprem yüklemesi altında üç boyutlu davranış göz önüne alınarak kullanılmıştır. Bu teknik, 350 m uzunluğunda ve yaklaşık 175 m merkezi açıklıklı, iki kuleye sahip köprü üzerinden örneklenmiştir. Bu amaçla; MATLAB rutini kullanılarak, tasarım değişkenleri köprünün 3D-FEM modelini oluşturmak için tanımlanmıştır. Bu üç boyutlu sonlu elemanlar modelini doğrulamak için SAP2000 programı kullanılarak hazırlanmış kabuk model ile karşılaştırma yapılmıştır. Avrupa yönetmelikleri bu tip yapıların plastikleşmesine izin vermediği için nonlinear elastik model kullanılmış ve elastoplastik davranış göz önüne alınmamıştır. Lineerleştirilmiş geometrik rijitliğe sahip Timoshenko kirişleri hem tabliye hem kule elemanlarında kullanılmış olup, rijit bağlantı elemanları kabloları tabliyeye bağlamaktadır. Kablolar, doğrusal kablo rijitliği ve eşdeğer Ernst modülü ile kablo başına bir eleman kullanılarak modellenmiştir. Çalışma, düşey davranışı da içeriyor olması sebebiyle önemli bir adım teşkil etmekte, ancak rijit bağlantı elemanlarının kullanılması sistemde olmayan ilave bir rijitliği sisteme dâhil etmek anlamına geldiğinden gerçek davranıştan uzaklaşılabilceği ihtimalini doğurmaktadır.

Civjan ve diğ. (2016) tarafından, prefabrike katlanmış- plaka kirişleri (FPG) içeren yenilikçi bir köprü, entegre mesnet ayakların prekast - gerilme sonrası alt bölümleri ve prekast T-duvar yerçekimi kanat duvarı sistemi çalışılmıştır. Köprü, ANSYS 14'de FPG köprü kesitinin üç boyutlu 3D sonlu elemanlar (FE) modeli kullanılarak ve mesnet ayaklarda kısıtlar için ankastre sınır şartları kabul edilerek analiz edilmiştir. Veriler inşaat, statik hareketli yük testi ve uzun vadeli izleme sırasında toplanmış ve sonlu elemanlar modellemesi ile karşılaştırılmıştır. FE modellemesinin karşılaştırılabilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

Ferrari ve diğ. (2016), Plastisite ve Limit Analizi Teorisi çerçevesinde, elastoplastik 3D kafes çerçeve yapılarının analizi için bir FEM bilgisayar modelinin yenilikçi bir formülünü geliştirmiştir. Referans uygulaması, tarihi bir demir kemer köprüsüne yapılmıştır. Araştırmada, Paderno d'Adda köprüsünün 3D FEM modeli yaklaşık 5,300 plastik düğüm noktalı sonlu elemanla ve 13,300 serbestlik derecesiyle hazırlanmıştır. Mevcut FEM formülasyonu klasik Euler-Bernoulli kiriş sonlu elemanlar teorisine dayanmaktadır; ortak bağların statik yoğunlaşma ve Gauss eliminasyonu ile iyileştirilmesi, tanjant rijitlik formülasyonunun Gauss eliminasyonu ile belirlenmesi gibi bazı yeni orijinal özelliklerle birlikte kapsamlı bir formülasyon oluşturulmuştur.

Hacıfendioglu (2016), kısa açıklıklı otoyol köprülerinin stokastik dinamik davranışları üzerinde konumsal olarak değişen patlama zemin hareketinin, patlama yük mesafesinin ve patlama yük ağırlığının etkilerini araştırmıştır. Bu amaçla, AASHTO'ya göre ayrıntılı bir otoyol köprüsü seçilmiş ve ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiştir.

Köprülerde patlama yükü etkilerine dair başka bir çalışma Hashemi ve diğ. (2016) tarafından yapılmıştır. Çalışmada, LS-DYNA açık sonlu elemanlar kodunu kullanılarak çelik gergi askılı bir köprünün pylon, tabliye ve kablolar dahil ayrıntılı sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Patlama yüklerinin boyut ve konumunun köprü bileşenlerin global ve lokal tepkisi üzerindeki etkisini belirlemek için, üç farklı boyutta patlayıcı dikkate alınmış ve tabliye seviyesinin yukarısındaki farklı lokasyonlara yerleştirilmiştir. Bilgisayar simülasyonlarının sonuçları; direklerin ve tabliye üzerindeki hasarın türünü ve boyutunu karakterize etmek, ankraj kaybına ilişkin olası kablo kaybı senaryolarını araştırmak ve hatta çeşitli patlama yüklemeleri senaryolarında köprünün olası çökme davranışını incelemeye kullanılmıştır.

Jiang ve Chorzepa (2016), köprü ayağı koruması için yüzer çelik bir tampon sistemi tanıtmış ve açık bir dinamik sonlu elemanlar analiz kodu kullanarak performans değerlendirmesi yapmıştır. Çarpma senaryoları için tampon sistemin performansı LS-DYNA kodu kullanılarak değerlendirilmiş ve 3D nümerik model tali parçaların test sonuçlarıyla (çelik kutu modülün ağırlıklı çarpma deneyi) doğrulanmıştır.

LaFave ve diğ. (2016), Illinois eyaletinde mevsimsel dalgalanmalarla tutarlı sıcaklık değişikliklerine maruz kalmış kompozit çelik I-kirişli yekpare kenar ayaklı köprülerin (Integral Abutment Bridge) davranışlarını değerlendiren sayısal simülasyonları sunmuştur. Kazıklar çerçeve elemanlarla, kazıkların etrafındaki zemin boylamsal ve transvers nonlinear yaylarla, mesnet ve duvar ayaklar kalın shell elemanlarla, çelik kirişler lineer elastik çerçeve elemanlarla ve sabit mesnetler üstyapıyla köprü ayaklarını bağlayan rijit linkler olarak modellenmiştir. Genleşme elastomerik mesnetleri modellenirken dönebilen sınır koşulları gözetilmiştir.

Polanco ve diğ. (2016), belirsiz kayma bağlantıları olan kullanılır durumdaki köprü tabliyelerinin kompozit davranış derecesini belirlemek için hassasiyete dayalı sonlu elemanlar modelinin güncellenmesini önermektedir. Modellerin serbest parametreleri kiriş - döşeme arayüzünün birim uzunluğuna göre rijitliği ve beton döşemenin elastik modülü şeklindedir. Kullanılan ölçüm türleri, yayılma alanındaki çeşitli noktalardaki düşey ivmelerdir. Önerilen metodoloji, boyut ve karmaşıklık bakımından değişen iki modelde (ilk model köprü tabliyesinin takviye kirişinin 2D FEM modeli, diğeri tabliye altyapısının 3D FEM modelidir) sayısal simülasyonlar vasıtasıyla doğrulanmıştır.

Rao ve diğ. (2016a), betonarme köprü ayakları için yapısal bozulma derecesine bağlı kırılma fonksiyonlarını tahmin etmek için bir model geliştirmiştir. İkinci makalelerinde (2016b); ilk makalelerinde sunmuş oldukları bozulma modelini, yapıda zamanla ve farklı çevresel koşullara maruz kalma nedeniyle oluşan değişikliği modellemede kullanmışlardır. Korozyon etkisi yüksek ortamlarda daha eski kolonların daha yüksek zafiyete sahip olduğu; bozulma derecesinin gözardı edilmesinin hasar ve kayıplara neden olabileceği belirtilmiştir. Rao ve diğ. (2016b), bir başka çalışmada periyodik yüklere maruz kalan korozyona uğramış betonarme köprü kolonlarının modellenmesi için basitleştirilmiş bir yaklaşım sunmuş, bu yaklaşımı deneysel sonuçlarla kıyaslayarak doğrulanmıştır. Kolonlar OpenSees programında nonlinear dağılmış plastisiteli, fiber kiriş- kolon elemanlar olarak modellenmiştir.

Terzioğlu ve diğ. (2016), kısa açıklıklı köprüler için yayılı düzende kirişli döşeme kullanımının inşa edilebilirlik ve yapısal performansını araştırmışlardır. Tam ölçekli Riverside yayılı döşeme kiriş köprüsü inşa edilmiş ve daha sonra statik ve dinamik servis yükleri altında test edilmiştir. CSiBridge (Version 15) kullanılarak köprünün sayısal modeli FEM ile geliştirilmiş ve tahmini davranış deneysel ölçümlerle doğrulanmıştır. Jiang, Terzioğlu ve diğ. (2016), ayrıca, bu yeni köprü sistemleri için yeni kriterler geliştirmek amaçlı Denison, Texas şehrinde US 69'da bulunan köprü üzerinde çalışmış, köprünün yük dağılım davranışını araştırmıştır. Abaqus (V6.13) kullanılarak her bir düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahip doğrusal sekiz nodlu bir eleman olan C3D8R elemanı tanımlanmıştır. Deneysel olarak türetilen yük dağılım faktörleri (LDF), rafine edilmiş sonlu elemanlar modeliyle kıyaslanmıştır.

Washeleski ve diğ. (2016), çalışmalarında, bir demiryolu açık yük vagonu (RRFC) köprüsünün laboratuvar test sonuçlarını sunmakta, kompozit beton RRFC köprü tabliyeleri için deneysel veriler ve sonlu elemanlar analizlerini kullanarak önceden önerilmiş yük derecelendirme talimatlarını revize etmektedir. FE modelleri katı kabuk, kiriş elemanları ve bağlayıcı elemanlardan oluşacak şekilde Abaqus programında 3D olarak geliştirilmiştir. RRFC'leri birbirine bağlayan beton tabliye, tam entegrasyonlu 20 nodlu katı elemanlar (C3D20) kullanılarak modellenmiştir.

Zhu ve diğ. (2016), dağıtılan rüzgâr yükleri altında, uzun açıklıklı, ikiz kutu tabliyeli bir köprü için gerilme seviyesi düzensiz osilasyon analizi çerçevesi önermektedir. Çalışmada Stonecutters Köprüsü'nün 3D çoklu ölçekli bir sonlu elemanlar modeli ANSYS yazılımı ile oluşturulmuştur. Analiz için; çelik tabliye kabuk elemanlarla, 224 destek kablunun her biri yalnız çekme gerilmesi taşıyan kiriş elemanlarla, köprü ayakları ve ayakların şaftları, eşdeğer kesit özelliklerine sahip kiriş elemanlarla modellenmiştir. Paslanmaz çelik elemanların serbestlikleri ilgili düğüm noktalarında beton elemanlar ile birleştirilmiştir. Köprü için toplam DOF sayısının 75.000 olduğu belirtilmiştir. Köprü modelinin ayrıntılı bilgileri Zhu ve Xu (2010) tarafından hazırlanmış bir diğer çalışmada verilmiştir.

Ko ve Phung (2014), beton çatlaması, parçalanmaya dayalı dayanım azalması, boylamsal donatıların burkulması ve bu donatılarla beton arasında aderans – sıyrılmayı içerecek hasar mekanizması kombinasyonlarıyla periyodik statik itme analizi altında betonarme kolonun performansını modellemişlerdir. Yapılan çalışmada OpenSees programı kullanılarak

betonarme köprü kolonunun çok ölçekli iki nonlinear sonlu elemanlar modeli aderans – sıyrılmayı içerecek ya da içermeyecek şekilde önerilmiştir.

Masrilayanti (2013), tez çalışmasında; depremlerin farklı sertlikteki zeminler üzerine oturan köprüler üzerindeki etkisini, bu köprülerin bilgisayar simülasyonu ile incelemiştir. Analizler için mevcut yapılardan elde edilmiş simetrik orta uzunluktaki bir entegre köprü kullanmıştır. Düşey etkilerin de hesaba katıldığı çalışmada; köprünün dinamik davranışını simülasyonu için ANSYS programı tercih edilmiş, zaman tanım alanı analizleri yapılmıştır. Sonuçlar; göreceli deplasmanların saf dinamik tepki ile karşılaştırıldığında entegre köprünün genel yapısal tepkisinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Zhang ve diğ. (2011), yakın fay yer hareketi altındaki 24 tam boyutlu kolonun nonlinear zaman tanım alanı analizlerine dayanılarak, inelastik deplasmanları ve sünekliği tahmin etmek için basit fakat güvenilir bir model geliştirmiştir. Analizler yardımıyla, köprü kolonlarının inelastik deplasman tepkileri boyutsuz formda sunulmuştur. Boyutsuz nonlinearlik dizini; kolon mukavemeti, yer hareket genliği ve akma sonrası gevşeme veya sertleşme davranışını dikkate alarak türetilmiştir. ABAQUS programı kullanılarak hazırlanmış histeretik model; nonlinear davranışında eğilme moment- dönme açısı, kayma kuvvet – kayma deplasmanı birincil eğrileriyle ifade edilecek şekilde, eleman seviyesinde eğilme ve kesme yaylarının birleştirilmesiyle oluşturulmuştur.

Literatürde düz ve verrev integral köprüler üzerinde çalışmalar yapılmış olmakla birlikte (Burke, 2009; Franchin ve Pinto, 2014; David ve diğ., 2014; Feldmann ve diğ., 2011); Dicleli (2000, 2005), integral köprüler üzerine çalışmalar yapmış, köprülerin tasarımında termal etkileri ve zemin etkilerini incelemiştir (Dicleli ve Albhaisi, 2003, 2004). Basit mesnetli tek açıklıklı köprü modellerinde temel zemini etkisini lineer yaylarla göz önüne almıştır. (Dicleli ve Erhan, 2008). SAP2000 programı kullanarak hazırladığı sonlu eleman modellerinde döşemeleri shell elemanlarla, kirişleri uzay çatı elemanlarla, mesnet ayakları ise lineer yaylarla geri dolgu olacak şekilde yine shell elemanlarla modellemiştir (Yalcin ve Dicleli, 2013). Yalcin (2017), son zamanlarda basit mesnetli verrev integral köprüler üzerine parametrik bir çalışma yapmış, SAP2000 programını kullanarak üç boyutlu sonlu eleman analizleri gerçekleştirmiştir. Hazırladığı iki boyutlu, basit mesnetli, tek açıklıklı modellerde döşemeler shell elemanlarla, kirişler uzay çatı elemanlarla, mesnet ayaklar lineer yaylarla geri dolgu olacak şekilde yine shell

elemanlarla, kazıklar beam elemanlar ve zemini içerecek şekilde iki lineer ortogonal yayla temsil edilmiştir.

Choi ve diğ. (2004), merkez ve güneydoğu ABD’de yaygın olarak bulunan köprülere yönelik, nonlinear analitik modeller ve sentetik bir yer hareketi paketi kullanarak dört köprü türü için analitik kırılma eğrileri geliştirmiştir. Sunulan kırılma eğrileri, gerçek köprü kırılma eğrilerine göre birinci derece yaklaşımlardır ve köprülerin boylamsal modellenmesi ile analitik olarak üretilmiştir.

Button ve diğ. (2003), düşey hareketlerin tipik otoyol köprülerinin sismik tepkisi üzerine etkilerini incelediği parametrik bir çalışmanın sonuçlarını sunmuştur. Çeşitli türleri ve geometriyi kapsayan altı farklı köprü, hem kaya hem toprak zeminlerde 6,5 ve 7,5 büyüklükleri ile 1, 5, 10, 20 ve 40 km'lik fay uzaklıkları için bir dizi yer hareketine maruz bırakılmıştır. Tüm yer hareketi parametreleri için altı köprü üzerinde tepki spektrumu analizleri gerçekleştirilmiştir. Tepki spektrumlarını doğrulamak için köprülerden üçünün zaman tanım alanı lineer analizi yapılmıştır. Bir köprünün analizi, köprü ayaklarının nonlinear davranışını içerecek şekilde genişletilmiştir.

Chaudhary ve diğ. (2001a), altyapı bileşenlerinin tanımlanmış ve fiziksel rijitliklerini karşılaştırılarak taban izolasyonlu köprülerde zemin-yapı etkileşimi etkilerini incelemiştir. Köprülerin genel davranışının, köprü ayakları, zemin ve temel için basit genelleştirilmiş ve eşdeğer doğrusal modellerle yakalamanın mümkün olduğu belirtilmiştir. İncelenen durumlarda zemin gerilmeleri %0.03’ü geçmediği için temelde nonlinearlik oluşmayacağı, bu sebeple sistemin tanımlanmasında ve fiziksel modelin oluşturulmasında eşdeğer doğrusal modellerin kullanılabileceği söylenmiştir. Zemin yapı etkileşiminin tek başına zemin kayma modülünden ziyade kolon rijitliği ile temel yatay rijitliği oranına bağlı olduğu açıklanmıştır.

Parvin ve Ma (2001), deprem yüklerine maruz kalan köprülerde izolasyon ve enerji dağıtma cihazları olarak sarmal yaylar ve akışkan sönümleyicilerin kombinasyonunu önermiştir. Çalışmada MATLAB programı kullanılarak Northridge ve El Centro depremleri için analizler yapılmıştır. Köprüyü desteklemek ve deprem yüklerinden kaynaklanan hasarları ortadan kaldırmak veya en aza indirmek için, üst yapı ile altyapı arasında izolasyon mekanizması ve taşıyıcı olarak dikey sarmal yaylar yerleştirilmiştir. Sarmal yaylar her yönde rijitlik

sağladığından, dikey yönde izolasyonu içeren çok yönlü bir sismik izolasyon sistemi elde edilmektedir.

Sawada ve diğ. (2000), ekstrem depremlere maruz kalan sismik olarak izole edilmiş köprülerde köprü ayağı ve izolatör arasındaki nonlinear etkileşimi incelemiştir. Betonarme köprü ayakları ve kurşun-kauçuk taşıyıcılara sahip izolasyonlu köprüler, 2-DOF sistemi olarak modellenmiştir. Araştırma, akma mukavemeti oranının hem köprü ayağı hem de izolatörün deplasman sünegliği üzerine etkilesi gibi birincil yapısal parametrelerin etkilerine odaklanmıştır.

Mutobe ve Cooper (1999), Benicia-Martinez Köprüsü'nün FPS sistemi ve ADINA programı ile zaman tanım alanı analizini yapmış ve bunu diğer doğrusal olmayan kodlarla karşılaştırmıştır. ADINA'da kullanılan elemanlar sistemi tarafından tahmin edilen davranış diğer programlarla çok yakından eşleşen sonuçlar üretmiştir.

Savage ve diğ. (1999), köprülerin yenilenmesine ilişkin, Three Mile Slough Köprüsü üzerine analitik bir çalışma yapmıştır. Analizlerde üstyapı elemanları 3 boyutlu çerçeve ve kafes kiriş elemanlarla, zemin-temel etkileşimi nonlinear yaylarla, köprü ayakları ve tepe kirişleri nonlinear davranışı yansıtacak şekilde moment eğrilik elemanlarıyla, izolatör taşıyıcıları elastik kirişlerle, denge ağırlıklarını taşıyan kablolar ise kablo elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Köprünün yapısal olmayan bileşenleri için genelleştirilmiş kütleler kullanılmıştır. Zaman tanım alanı analizleri ADINA programıyla yapılmıştır.

Pagnini ve Solari (1999), köprü ayaklarının dinamik tepkisini sismik olmayan cihazlarla stokastik eşdeğer lineerleştirme tekniği ile incelemiştir. Doğrusallaştırılmış sistemin karmaşık modlarının incelenmesinin, mekanik davranışın yorumlanmasını sağlayarak biçimsel başlangıç çözüme öncülük ettiği söylenmiştir.

Robson ve Harik (1998), eğriliği yüksek, üç açıklıklı, sismik izolasyonlu, ön gerilmeli betonarme kiriş köprü üzerine dinamik testler gerçekleştirmiştir. Testten sonra köprünün üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel olarak belirlenen doğal frekanslara ve mod şekillerine uyacak şekilde modeli geliştirmek veya kalibre etmek için bir optimizasyon programı kullanılmıştır. Model parametrelerinin bu otomatik, sistematik optimizasyonunun; köprünün doğru bir analitik temsilini ürettiği belirtilmiştir.

Pagnini ve diğ. (1998), bir matematiksel model sunmuş ve sismik uyarılara maruz kalmış bir köprü ayağı-cihaz-açıklık sisteminin davranışını tartışmıştır. Durum değişken uzayındaki hareket denklemleri altyapı tekniği, matris yoğunlaştırma ve modal sentez uygulanarak elde edilmiştir.

Turkington ve diğ. (1989a, b) iki ve dört açıklıklı köprülerin gerçek deprem yer hareketi tepkisini üç model kullanarak incelemiştir. Birinci model, rijit temel üzerinde taşıyıcılarla desteklenen bir köprü üstyapısını temsil etmekte ve diğer ucu rijit bir şekilde sabitlenmiş bi-lineer yaya bağlı bir kütleden oluşmaktadır. İkinci model, farklı yükseklikteki köprü ayaklarına sahip elastomerik ve kurşun-kauçuk taşıyıcıların bir kombinasyonunu temsil etmektedir. Köprü ayakları elastik kiriş elemanları ile modellenmiştir. Köprü ayağı ve taşıyıcı modeli, üçüncü modeli oluşturmak üzere birleştirilmiştir. Elastomerik taşıyıcılarla birleştirilmiş kurşun çekirdekli kauçuk taşıyıcıların mesnet ile köprü ayağı arasındaki sismik kuvvetleri dağıtabileceği gösterilmiştir.

Brockenbrough (1986), hareketli yüklerin tipik kompozit kavisli I kiriş köprülerindeki yanal dağılımında rasyonel faktörleri belirlemek için sonlu elemanlar analizi kullanan bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında MSC/NASTRAN sonlu eleman modellerini kullanmış; üç boyutlu modellerde beton tabliyeyi ve kiriş gövdesini membran ve eğilme etkilerini içerecek şekilde QUAD4 shell elemanlarla, kiriş başlıklarını ve çapraz çerçeveleri BAR elemanlarla, başlık tabliye bağlantılarını döşemeyle kompozit davranışı simule edecek rijit linklerden oluşan RBAR elemanlarla modellemiştir. Sınır şartları tüm mesnetlerde düşey deplasman ve merkez mesnetlerde yanal deplasman sıfır olacak şekildedir.

Literatür taramasında yapısal sistemin modellenmesine yönelik incelenen bu araştırmalar, yapılacak çalışma için sadece bir başlangıç noktası teşkil etmekle birlikte; analizlerde uygulanabilecek pratik bir yöntem olmadığı görülmüştür.

(B) Köprülere ilişkin bazı araştırmalar deneysel çalışmaları kapsamaktadır, bu deneysel çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Sun ve Ziang (2016), trafiğe açıldıktan sonra Jiangyin süspansiyon köprüsünün genleşme derzlerinde sıklıkla hasar görüldüğünü, yeni genişleme derzleri ile değiştirildikten ve kiriş bitimlerine viskoz sönümleyici yerleştirilmesinden sonra da sorunun çözülmediğini ifade etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada arazi deneyi (statik test, tesir çizgisi testi ve kamyon geçme

testi) sonuçlarına dayalı olarak genleşme derzlerinin bozulma mekanizmalarının netleştirilmesi ve derzlerin hem global hem lokal davranışının araştırılması amaçlanmaktadır.

Goodnight ve diğ. (2016), sismik tehlikelere maruz betonarme köprü kolonlarında hasarın spesifik seviyelerine ilişkin doğru limit- durum deplasmanlarının tanımlanmasını amaçlayan bir araştırma programını tartışmışlardır. Tamamen kuşatılmış 30 dairesel köprü kolonunun performansını değerlendirmek üzere deneysel bir çalışma yapılmış; 3D konum izleme sistemiyle ölçülen veriler, çekme ve basınç deformasyonu- deplasman tahminlerini iyileştirmeyi amaçlayan yeni eşdeğer eğrilik dağılımını formüle etmek için kullanılmıştır.

Lin ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada kiriş köprülerinin kırılma sonrası tepkilerini beş açıklıklı sürekli bir kiriş köprü için örnek olay incelemesiyle araştırmıştır. Bu amaçla deneysel gözlemlere ve test sonuçlarına dayanarak mevcut kiriş köprüyü temsil edebilen bir 3D sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve doğrusal analizlerde kullanılmıştır. Sayısal sonuçlara dayanarak bu köprüdeki kritik eleman tespit edilmiştir.

Mantawy ve diğ. (2016), prekast bileşenlerin kullanıldığı yeni bir sistemle inşa edilen, çeyrek ölçekli iki aralıklı bir köprünün sarsma tablası performansını; benzer geometriyle 2005 yılında test edilmiş klasik bir yerinde döküm köprüsünün performansıyla karşılaştırmıştır. İki köprü aynı sismik uyarılmalara tabi tutulmuş; testlerin sonucunda klasik köprüde büyük beton çatlakları ve parçalanma oluşurken, yeni sistemde sadece kozmetik hasarlar meydana geldiği belirtilmiştir.

Murcia-Delso ve diğ. (2016), büyük boyda bir köprü ayağı şaftına uzanan köprü kolonunda uzunlamasına takviye için gerekli gömme uzunluğunu belirlemek için deneysel bir inceleme yapmışlardır. Beton çatlaması sonucu donatı sıyrılmasıyla meydana gelen erken ankraj kopmasını engellemek için köprü ayağında gereken transvers donatı miktarı da araştırılmıştır.

Nguyen ve diğ. (2016), aslen gerçek bir köprünün parçası olan ve aşamalı yapay hasara maruz kalmış, öngerilmeli bir beton kiriş üzerinde tekrarlanan statik yükleme testleri gerçekleştirmiş; statik deformasyon deplasman sensörleri ile ölçülmüştür. Çalışmada, değişen dış sıcaklıkların etkisi de ayrıca tartışılmakta ve değerlendirilmektedir.

Khan ve diğ. (2015), 1/4 ölçekli hasarlı ve hasarsız düşük dayanımlı köprü ayakları üzerinde karbon fiber takviyeli polimerle (CFRP) sargı yöntemi ile güçlendirmenin dinamik özelliklere

etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Saeed ve diğ. (2015), karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP) ile mantolamanın dayanım, süneklik ve diğer dinamik özellikleri artırmadaki etkinliğini araştırmak için; 1:4 ölçekli dairesel düşük dayanımlı beton köprü ayağı modellerini CFRP ile sardıktan sonra yarı-durağan periyodik yükleme ve serbest titreşim teslerine tabi tutmuşlardır. CFRP ile harici sargılamanın enerji dağılım kabiliyetlerini, dolayısıyla betonarme köprü ayaklarının mukavemet ve sünekliğini arttırdığı belirtilmiştir. Yakın geçmişte CFRP sargı yöntemiyle başka bir çalışma Parghi ve Alam (2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. Malzeme özellikleri, boylamsal ve transvers çelik miktarı vb. faktörlerin etkileri ve bunların CFRP sarılmış, sismik olarak yetersiz betonarme dairesel köprü ayaklarının limit durumları ile etkileşimi; kesirli çok etkenli deney tasarımı metodu kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, kayma açıklığı- derinlik oranının, akma dayanımı ve boylamsal donatı oranının, eksenel yük ve CFRP sargılamanın; sismik yük altındaki güçlendirilmiş köprü ayaklarının yanal yük kapasitesini, sünekliğini ve göçme modunu önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir.

Sideris ve diğ. (2014), yeni prekast beton segmental köprü sistemi tanıtmış ve bunu deneysel olarak araştırmıştır. Sistem, HSR (hybrid sliding-rocking) düğüm noktaları içeren ve içten bağlanmamış ard çekmeli segmental elemanlardan oluşmaktadır. SD (Slip-dominant) ve RD (Rocking-dominant) olmak üzere iki tip HSR geliştirilmiş; büyük ölçekli bir köprü numunesinde yapılan sarsma tablası testlerine göre, HSR-SD altyapının ve HSR-RD üst yapının, yatay ve düşey sismik uyarılar için başarılı entegre davranışı gösterdiği belirtilmiştir.

Yuan ve diğ. (2014), kısmen beton doldurulmuş çelik boru (PCFST) köprü ayaklarının çift yönlü sismik uyarılar altındaki davranışını araştırmışlardır. Bu amaçla, dairesel kesitli test numuneleri üç farklı beton doldurma oranıyla hazırlanmış ve bir dizi periyodik statik yükleme testi ile tek ve çift yönlü hibrid (pseudo-dinamik) yükleme testlerine tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlar, iki yönlü yükleme testlerinden elde edilen PCFST köprü ayaklarının geri yükleme kuvvetinin, tek yönlü yükleme deneylerinde elde edilenle hemen hemen aynı olduğunu göstermiştir; ancak iki yönlü dinamik yüklemelere tabi tutulduğunda deformasyon kapasitesinin önemli ölçüde bozulduğu belirtilmektedir.

Ou ve diğ. (2013) modern sismik tasarım kodlarına göre tasarlanan eğilme etkisindeki betonarme köprü kolonlarında uzun süreli yer hareketi altında sismik davranışı incelemiştir. Deneysel sonuçlar, bir histeretik parametreler seti altında kolonlar için elde edilen deneysel

verilerle kalibre edilen bir histeretik model oluşturmada kullanılmış; önerilen histeretik model ile R sabiti belirlenip sabit süneklik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yuan ve diğ. (2013) bir başka çalışmada, gerçek deprem koşullarında kısmen betondan doldurulan çelik köprü ayaklarının sismik davranışlarını, 20 kare kesitli numuneyi statik periyodik yükleme testleri ile tek yönlü ve çift yönlü hibrit yükleme deneylerine tabi tutarak araştırmıştır. Dinamik testlerde sert (GT1), orta (GT2) ve yumuşak zeminler (GT3) için 1995 Kobe depreminde elde edilen iki yatay yön bileşeni (kuzey-güney ve doğu-batı) ivme kayıtları kullanılmıştır. Deneysel sonuçlara dayanarak, özellikle GT2 ve GT3 için, gerçek deprem koşullarındaki maksimum ve kalıcı deplasmanların geleneksel tek yönlü yükleme testleri ile doğru olarak tahmin edilemeyeceğini ifade etmişlerdir.

Khaled ve diğ. (2011), Kuzey Amerika'nın doğu ve batı bölgelerinde beklenen depremlere yönelik, tasarımda çift yönlü sismik yüklemenin hesaba katılması gerekliliğini incelemek için, dört adet yarı ölçekli betonarme dikdörtgen köprü kolonu numunesinde çift yönlü periyodik deney yapmıştır. Test sonuçlarına dayanarak; her iki bölge için, tasarımda kullanılan kombinasyon kurallarının kolonların inelastik periyodik tepkisi üzerinde önemli bir etkisi olmadığı ifade edilmiştir.

Seong ve diğ. (2011), yaptıkları çalışmada yüksek dayanımlı betonarme (HSC) köprü kolonlarının sismik performansını sayısal analiz yaklaşımı ile değerlendirmeyi amaçlamıştır. Araştırmanın bir parçası olarak, beş adet büyük ölçekli HSC kolon imalatı yapılmış ve kolonlar simüle edilmiş sismik yüklemeler altında test edilmiştir. Analitik olarak öngörülen histerik davranışta, süneklik düzeyi ve kolonların kırılma modunun deney verileri ile uyum gösterdiği belirtilmiştir.

Marriott ve diğ. (2009), dıştan değiştirilebilir yayıcılara sahip iki hibrid köprü ayağının quasi - statik ve pseudo – dinamik yüklemeler altındaki deneysel davranışlarını sunmuşlar, geleneksel monolitik muadilleriyle ve sadece ard çekmeli çözümle karşılaştırmışlardır.

Chang ve diğ. (2004), proje sonu ve onarılmış betonarme köprü kolonlarının sismik tepkilerini yakın fay zemin hareketleri altında güvenilir şekilde elde etmek için, 2/5 oranında azaltılmış iki köprü kolonu üzerinde pseudodinamik deneyler yapmışlardır. Pseudodinamik test sonuçlarının sayısal çözümlerden daha doğru olduğunu, sonlu elemanlar modelinin geliştirilmesinde referans çözümler olarak düşünülebileceğini ifade etmişlerdir.

Yeh ve diğ. (2002a), dikdörtgen kesitli içi boş köprü kolonlarının iki prototipi ve dört modeliyle sabit bir eksenel yük altında ve bir pseudo-statik, periyodik olarak zıt yatay kuvvet için testler yapmış, süneklik etkisini ve enerji dağılımını araştırmışlardır. Chou ve diğ. (2008), her bir numuneyi iki kez yükledikleri çalışmalarında; bağlanmamış, ard germeli, prekast beton - doldurulmuş boru segmentli köprü kolonlarının, periyodik davranışını araştırmıştır. Otomatik merkezlenen ve rijitlik azaltan davranışlara dayanılarak, sertlik derecesini azaltan flama şeklinde (SDFS: stiffness-degrading flag-shaped) bir histeretik model geliştirmişlerdir. Köprü kolonlarına yönelik bir deneysel başka çalışma Lee ve diğ. (2015) tarafından gerçekleştirilmiştir. Dairesel içi boş betonarme köprü kolonlarının sismik performansını araştırmak için sabit bir eksenel yük ile periyodik yanal yükler altında kolon testi yapılmıştır.

Chaudhary ve diğ. (2001b), köprü sisteminin çeşitli bileşenlerinin performansını, Japonya'da taban izolasyonlu Yama-age Köprüsü'nde yapılan çok sayıda kayıt setinin yardımıyla sistem parametrelerini tanımlayarak incelemiştir. Taban izolasyonun etkinliği ile zemin-yapı etkileşiminin genel performans üzerindeki etkileri, tanımlanmış ve fiziksel parametrelerin kıyaslanması ile araştırılmıştır.

Nakanishi ve diğ. (1999), Hyogo-Ken Nambu depremi şokundan sonra şiddetli depremler altında köprü ayaklarında ciddi hasarlar olmaması için köprü yapılarına yönelik Japonya Sismik Tasarım Metodu'nda yeni revizyonlar yapıldığını belirtmişlerdir. Beton dolgu çelik kutu kolonların kuvvetli depremlerde nihai dayanımını ve sünekliğini araştırmak için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir.

Kelly ve diğ. (1985) ve Buckle ile Kelly (1986) sarsma tablosunu kullanarak deprem yer hareketine maruz bırakılmış, düz ve kurşunla doldurulmuş elastomerik yataklar üzerine monte edilmiş düz ve eğri köprü tabliyelerinin çeyrek ölçekli modellerini incelemiştir. Köprü tabliyesi davranışı, taban izolasyon sistemlerinde mekanik enerji yayıcıların etkinliğini ve taban izolasyonlu köprülerinin göçme modunu belirlemek için karşılaştırılmıştır.

Bu deneysel çalışmaların çoğu, sismik izolasyonlu köprülerin davranışını eleman bazında ya da bahsedilen davranışı içermeyecek şekilde bütünsel olarak incelemektedir. Diğerleri ise, yalnızca belirli elemanların davranışı ya da güçlendirilmesine yönelik olup, çalışma için aranan bilgileri içermediğine kaanat getirilmiştir.

(C) Yapılarda deprem analizlerine ilişkin bazı çalışmalarda ise izolasyon sistemlerinin araştırıldığı görülmüştür. Bu çalışmalar göz önüne alınarak, tez çalışması kapsamında geliştirilmiş GP-DYNA bilgisayar programında izolasyon sistemi için her serbestliği içerecek şekilde oldukça gelişmiş bir modül eklenmiş olup, henüz analizlerde devreye sokulmamıştır. İzolasyon sistemlerine ilişkin çalışmalar şu şekilde verilmektedir:

Alhan ve diğ. (2016), yanal olarak elastik çeşitli izolasyon sistem elemanları arasından yüksek sönümlü kauçuk taşıyıcıların (HDRBs), yapıları temel periyotlarını uzatarak depremlerin zararlı etkilerinden etkili bir biçimde koruduğunu belirtmiştir. Yüksek sönümlü kauçuk taşıyıcılara yönelik, Grant ve diğ. 2004'te, HDR taşıyıcıların deprem şiddetinin tasarım seviyelerine göre etkili olmakla birlikte; yer hareketinin daha yüksek seviyelerinde, köprü ayaklarının inelastik ihtiyacını önemli ölçüde karşılayabileceğini ifade etmiştir.

Pollino ve Bruneau (2007), köprü çelik kiriş ayaklarının temelleri üzerinde yükselme ve kaymalara izin veren bir sismik güçlendirme tekniğini araştırmıştır. Yükselme lokasyonlarına deplasmana dayalı pasif enerji yayıcı mekanizmalar (burkulma kısıtlayıcı mesnetler: BRBs) yerleştirilerek ek enerji dağılımı ve salınma hareketinin kontrolü sağlanmaktadır. Tasarım davranış değerlerini belirlemek üzere önerilmiş metod, nonlinear zaman tanım alanı analizlerine dayanan bir parametrik çalışmayla doğrulanmıştır. Yakın tarihte yapılan ve yine BRB'lere ilişkin bir başka çalışmada; Wang ve diğ. (2016a), düz köprüleri sismik olarak iyileştirmek için BRB kullanmanın potansiyel faydalarını değerlendirmiştir. Bu amaçla, üç boyutlu bir betonarme kutu kiriş köprüsü vaka çalışması olarak kullanılmış, eğilmiş kolonlar arasında BRB'leri dahil etmek için OpenSees programıyla üç boyutlu bir model geliştirilmiştir.

Köprülerde izolasyon sisteminin yaygın olarak kullanılması ve depreme dayanıklı tasarımın bu izolasyon sistemi üzerine kurulu olması sebebiyle, izolasyonlu köprüler için tasarım şartnamelerinde (American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2010; Eurocode 8-2, 2005; Japan Road Association [JRA], 1997, 2002) belirli kıstaslar bulunmaktadır. Köprü tabliyesinin yerinden çıkıp yapı bütünlüğünü bozmaması için kavitasyonu önlemek amaçlı (Imbsen, 2007; National Institute for Standards and Technology [NIST], 1996), EN 1337-3 (2005) section 8.2.1.2.7 ve BS EN 15129 (2009) %100 kayma deformasyonunda G kayma modülü olmak üzere çekme gerilmesinin $2G$ 'den büyük olmaması gerektiği belirtilmiştir.

LRB taban izolasyonlu bir otoyol köprüsünün dinamik özelliklerini araştırmak için bir tanımlama algoritması Tan ve Huang (2000) tarafından geliştirilmiştir. Köprü ayakları için doğrusal model, kurşun-kauçuk taşıyıcılar için bi-linear model kullanılmıştır. Önerilen tanımlama işlemi ile elde edilen fiziksel parametrelerin, izolasyonlu köprülere yönelik çeşitli uyarı sistemlerinin kurulmasına bir temel oluşturabileceği sonucuna varılmıştır.

Kim ve diğ. (2000), deprem durumunda karayolu köprülerinin çökmesini önlemek için genişleme derzlerinde enerji yayılma tutucularının kullanılmasının verimliliğini araştırmışlardır. Bu tutucular nonlinear viskoz sönümleyicilerden ve paralel ya da seri bağlı elastik yaylardan oluşmaktadır. Köprü altyapı düğüm noktaları için bilinear histeretik modeller ve genişleme derzi olarak çalışan nonlinear boşluk elemanları, köprülerde bir ya da iki düğüm noktasıyla temsil edilmiş; iki boyutlu sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir.

Adachi ve diğ. (2000), sismik izolatörün ve betonarme köprü kolon sisteminin nonlinear sismik tepki davranışını incelemek için sarsma tablası testleri gerçekleştirmiştir. Hem sismik izolatörler hem de sütunda nonlinear davranış bulursa da, global sistem tepkisine birincil modun hakim olduğu belirtilmiştir. Gerçek yapının 2 DOF modelinin maksimum köprü tepkilerinin simülasyonunda yeterli olduğunu, global davranışın nonlinear 1 DOF model ile ifade edilebileceğini öne sürmüşlerdir.

Hayashikawa ve diğ. (2000), üç boyutlu büyük deprem yer hareketlerine maruz kalmış olan kablolu köprü çelik kulelerinin nonlinear davranışını incelemiştir. Pasif kontrol cihazı ile çelik kulelerin sismik performansının, kule zemin katlarındaki reaksiyon kuvvetlerini azaltmada etkili olduğu gösterilmiştir.

Saiidi ve diğ. (1999), deprem hareketinin iki ortogonal yatay bileşenine tabi tutulan köprülerin zaman tanım alanı analizi için doğrusal olmayan bir model geliştirmiştir. İzolatörlerin histeretik davranışı için kurşun çekirdeği olan veya bulunmayan elastomer izolatörler kullanılmış ve kolonlar, mesnet köprü ayakları ve deprem takozları dikkate alınmıştır.

Tongaonkar ve Jangid (1998), üstyapı ve altyapı arasında kayar izolasyon sistemi bulunan köprülerin sismik tepkilerini araştırmışlardır. İzolasyonlu köprü sisteminin hem eksenel hem de transvers doğrultudaki sismik tepkisi, nonlinear hareket denklemlerinin (kayma sistemi nedeniyle doğrusal olmayan) Newmark yöntemi kullanılarak artımlı formda çözülmesi ile elde

edilmiştir. Sistem, yatayda her iki doğrultuda da gerçek deprem hareketine tabi tutularak; izolasyon parametrelerinin izolasyonlu köprüdeki pik tepkilere etkisi araştırılmıştır.

Jankowski ve diğ. (1998), yayılan sismik dalga ile indüklenen izolasyonlu yükseltilmiş bir köprünün üstyapı segmentlerinin arasındaki vurma etkisini analiz etmiştir. İzolasyon malzemesi olarak kullanılan yüksek sönümleyici kauçuk taşıyıcılar nonlinear formülasyon önerisiyle modellenmiş ve bu vurma etkisinde taşıyıcı modelinin önemi belirtilmiştir. Çalışma sonuçları göstermiştir ki, bu vurma etkisi üstyapı kısımları arasındaki açıklık miktarına göre köprü ayaklarındaki kuvvetlerde artışa ya da azalmaya neden olmaktadır.

Adachi ve diğ. (1998) sismik izolatör ve RC köprü kolon sisteminin sismik davranışı üzerine analitik bir çalışma yürütmüştür. Eşit enerji prensibi kullanılarak eşdeğer bir 1-DOF önermek için 2-DOF sistemi kullanan parametrik bir çalışma yapılmıştır.

Anderson ve Mahin (1998), basit taban izolatörlü köprüler için, yapısal davranışın uzun ve kısa periyot aralıklarında deplasman ve enerjinin korunmasına dayanan bir ön sismik tasarım yöntemi öne sürmüştür. Çalışmaya göre; yaklaşım, köprü tabliye seviyesinin toplam deplasmanlarının tahmin edilmesi üzerinde durmaktadır, eşdeğer lineer idealleştirme kısıtlamalarının üstesinden gelecek ve izolasyonlu sistemlerde nonlinear inelastik davranışı doğrulayacaktır.

Ando ve diğ. (1998) Ohito Viyadük Köprüsü 2 üzerinde, kurşun çekirdekli kauçuk yataklarla sismik olarak izole edilmiş köprü davranışını incelemek için, zorlanmış ve serbest titreşim testleri gerçekleştirmiştir. Rezonant frekansların eşdeğer rijitlik izolatörünün genlik bağımlılığı nedeniyle uyarma kuvvetine önemli ölçüde bağlı olduğunu bulmuştur.

Iemura ve diğ. (1998) sismik izolasyon sistemleri kurulduğunda makul bir inelastik tasarım yönteminin gerekli olduğunu göstermiştir. Geleneksel inelastik tasarım yöntemi köprü ayaklarını hesaba kattığından, sismik izolatörler ile köprü ayakları arasındaki etkileşimde başa çıkabilecek sismik izolatörler tasarlamamanın zor olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle; izolasyonlu köprüler için, enerji dağılımına göre sismik izolasyon sistemleri ile köprü ayakları arasındaki ilişki kullanılarak bir tasarım prosedürü önerilmiştir.

Li ve Xin (1998), izolasyon taşıyıcılarının histeretik geri yükleme kuvveti modelini tanımlamak için diferansiyel denklem modelini kullanmıştır. Köprüler için izolasyonlu sistemlerin

nonlinear sismik davranış analizini yapacak bir program geliştirmek amaçlı Wilson-theta ve dördüncü sıra Runge-Kutta yöntemlerini birleştirmişlerdir. Çalışmada, taban izolasyonlu üç açıklıklı sürekli bir köprü örneği üzerinde çalışılmış ve izolasyonun etkileri tartışılmıştır.

Braga ve diğ. (1998), elastomerik yataklar ve elasto-plastik elemanlar kullanarak Avrupa ve İtalya'da izolasyonlu köprülerin düzenlenmesine ilişkin resmi talimatları tartışmışlardır. Tasarım felsefesi, iki limit durumu ya da performans seviyelerine göre yeterli korumayı sağlamayı amaçlamaktadır. Bunlardan ilki, tamamiyle elastik davranışın limitinde olması; ikincisi ise izolasyon elemanları nihai deformasyonlarına yakinken yapının hala hasar görmemiş durumudur.

Pinto ve diğ. (1998), ELSA Laboratuvarı'nda sismik izolasyonlu köprülerde yapılan büyük ölçekli pseudo-dinamik testleri anlatmıştır. Testlerde izolasyon / dağıtma (I / D) düzenekleri için iki alternatif yöntem izlenmiştir, ilkinde mesnet ayaklar üzerinde ve tüm köprü ayaklarında, diğeri geleneksel olarak tasarlanan yapı için sadece taleplerin yoğunlaştığı merkezi kısa ayaklarda bulunmaktadır.

Tsai ve Huang (1998), FPS (Friction Pendulum System) izolasyonlu kavisli köprülerin sismik davranışını araştırmak için karmaşık üç boyutlu bir geometri kullanmıştır. Tüm sistemi analiz edebilmek üzere FPS taşıyıcı ve kabuk elemanlar için üç boyutlu sonlu elemanlar formülasyonu geliştirilmiştir. İzolatörlü olmayan köprülere kıyasla FPS izolatörlü köprüler için gerilme davranışında belirgin azalmalar gözlemlenmiştir.

Wang ve diğ. (1998), harmonik ve gerçek deprem hareketi altında kayar sistemli çok açıklıklı sürekli köprülerin analizi için basit ve etkili bir yöntem önermiştir.

Eftekhari ve Zadeh (1996) izolatörlerin ve konumlarının izolasyonlu köprülerin dinamik davranışı üzerindeki etkilerini tartışmışlardır. Davranış; tabliye, köprü ayakları ve elastomerik taşıyıcı rijitliği gibi farklı parametrelerin değişiminin etkisini incelemek üzere malzeme ve izolatörlerin lineer olduğu varsayılarak analiz edilmiştir.

Yapılan bazı çalışmalarda bi-lineer histeretik taşıyıcılı taban izolasyonlu köprülerin sismik analizi için, eşdeğer doğrusal bir model ve tasarım özelliklerinde mühendislerin uygulayabileceği değişiklikler önerilmiştir (Hwang, 1996; Hwang and Chiou, 1996; Hwang ve diğ., 1996a, 1996b).

Monti ve diğ. (1995) deprem hareketinin uzaysal değişiminin etkilerini araştırmak için, çeşitli mesnetlerde sismik girdilere maruz bırakılan sürekli, altı açıklıklı, izolasyonlu köprü analizleri yapmıştır. Senkron hareket için değişik rijitlik ve sünekliğe sahip köprüler, mevcut mühendislik uygulamasında olduğu gibi, izolasyonlu düzenekle veya düzensiz tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, geleneksel köprü yapılarının ayaklarındaki süneklik talebi üzerine senkron olmayan hareket girdisi ile izolasyonlu köprülerde izolatör deplasmanları arasındaki ilişkiyi değerlendirmede kullanılmıştır.

Okamoto ve diğ. (1995), çeyrek ölçekli bir köprü modeli için, kayar yataklar ve kauçuk geri çağırım kuvveti düzeneğinden oluşan kayar tipte izolasyon sistemi ile sarsma tablası testleri yapmıştır. Sonuçlar; izolatörlerin köprü ayaklarına uygulayacağı kesme kuvveti, tasarım ve kayma deplasmanları için kullanılacak malzeme, değişken sürtünme katsayılı kayar malzemenin üzerindeki kalıcı deplasmanların etkileri ve geri yükleme kuvveti düzeneğinin uygun rijitliğinin seçimine bakılmaksızın sunulmuştur.

Thakkar ve Maheshwari (1995), zemin rijitliği, ankraj derinliği, hidrodinamik basınç ve deprem tepki spektrumu gibi farklı parametreleri değiştirerek taban izolasyonlu bir köprünün sismik tepkisini incelemiştir. Elastomerik taşıyıcının, kayalık sahalarda altyapı sismik tepkisinin azaltılmasında etkili olduğu görülmüştür. Ankraj derinliğindeki artış aynı zamanda altyapıdaki eğilme momentlerinde ve kesme kuvvetlerinde azalmaya neden olmaktadır.

Wang ve Gould (1994), simetrik iki açıklıklı sürekli köprü tabliyeleri için, kayıcı izolatörlü karayolu köprülerinde köprü ayaklarındaki yukarı kalkma etkilerini çalışmıştır. Köprü ayaklarının, yukarı kalkma miktarı çok az olduğu ve izolatörlerin sismik performansının bundan minimum düzeyde etkilendiği durumda elastik davranış gösterebileceğini belirtmiştir.

Maragakis ve Saiidi (1993), taban izolasyonlu köprülerin doğrusal tek yönlü dört analitik modelini karşılaştırmış ve bu yapılar için basitleştirilmiş doğrusal modeller geliştirmiştir. Bunlar taban izolasyonlu köprülerin üç boyutlu nonlinear modelinin geliştirilmesinde ve köprü ayağı süneklik ihtiyacında taban izolasyonunun etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

Mahin (1993), kayıcı sistemlerle izole edilmiş basit köprüler için, yapısal davranışın uzun ve kısa periyotlarında deplasman ve enerjinin korunumuna dayanan bir ön sismik tasarım yöntemi öne sürmüştür. Yaklaşım, köprü tabliye seviyesinin toplam deplasmanlarının tahminine odaklanmaktadır. Bu tasarım yaklaşımının yeterliliğini değerlendirmek ve davranış indislerinin

yer hareketi, izolatör ve yapısal özelliklere göre değişkenlik gösterdiği parametrik bir incelemeyle tanımlamak için, hareket denklemlerinin özel boyutsuzlaştırılmış formu tanıtılmıştır.

Goto ve diğ. (1992) büyük depremler esnasında taban izolasyonlu köprü kirişiyle mesnet ayaklar arasındaki çarpışmaları absorbe edecek düzenekleri tartışmıştır. Yüksek depremsellik ve yoğun karayolu trafiği gibi Japonya'daki koşullarla başa çıkabilecek knock-off tipte mesnet ayaklar deneylerle incelenmiştir. Kırılma tertibatının akma sonrası mekanizmasını ele alan bir tasarım metodu önerilmiş ve gerçek kullanımda geçerli olabileceği nonlinear bir sayısal simülasyon analizi ile doğrulanmıştır.

Wei ve diğ. (1992) tarafından köprülerin depreme dayanıklı tasarımında kurşun çekirdekli kauçuk taşıyıcıların (LRB) etkinliğini değerlendirmek için, bir köprü modelinin deprem simülasyon testi N-Z taşıyıcıları ve LRB mafsal makaralı yataklar kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda yatakların dikey destek, yanıl esneklik ve enerji emme yeteneği nedeniyle LRB'ye kıyasla köprü izolasyonu için daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Briseghella ve diğ. (1989), taban izolasyon teknolojilerini, tipik orta açıklıklı sürekli beton tabliyelı köprülere uygulamak için bir tasarım yaklaşımı sunmuştur. Elastik periyoda bağılı kalmaksızın doğrudan mukavemet- deplasman ilişkisinin elde edildiği, rijit - plastik sistemlerin nonlinear davranış spektrumlarının oluşturulmasında kullanılacak bir yöntem açıklanmaktadır.

Li (1989), izolasyon sistemi kauçuk izolatörler ve boylamsal doğrultudaki histeretik enerji yayıcılarından oluşan üç açıklıklı tipik köprülerin davranışı üzerinde çalışmıştır. Davranışın nonlinear denklemleri titreşimin birinci periyodu için türetilmiş, beyaz gürültü filtrelenmiş yer ivmesi etkisinde stokastik davranış eşdeğer lineerleştirme tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, histeretik damperli köprü izolasyon sisteminin optimum tasarımı için bir prosedür geliştirilmiştir.

Ghobarah (1988), LRB tipi izolatörlerini bilineer yaylarla modellediği tek ve iki açıklıklı köprülerin sismik tepkileri üzerinde çalışmıştır. Bu konuda izolatör rijitliği, köprü ayağı rijitliği, köprü ayaklarının eksantrisitesi ve sismik izolasyonun etkisi gibi parametreler araştırılmıştır.

Ghobarah ve Ali (1988), deprem hareketine maruz bırakılan izolasyonu kurşun-kauçuk yataklarla yapılmış üç aralıklı bir köprünün tepkisini araştırmıştır. Tabliye rijitliğinin sismik

tepkiler üzerine etkisi incelenmiştir. Kesin hassaslık kaybı olmaksızın iki ya da üç açıklıklı karayolu köprülerinin yatay yönde rijit köprü tabliyesi davranışı varsayılarak taban izolasyonuna göre tasarlanabileceği öne sürülmüştür.

(D) Literatür taramasında, köprüler başta olmak üzere yapıların hasar görmesinde büyük öneme sahip olduğu düşünülen ve “uplift effect” olarak geçen yukarı kalkma etkisine ilişkin bazı araştırmalar yapılmıştır. Tez çalışmasında özellikle üzerinde durulan bu etkiye yönelik çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Leitner ve Hao (2016), köprü sisteminde yukarı kalkma hareketinden faydalanılmasıyla yapı elemanı üzerinde süneklik ve mukavemet taleplerinin azaltılabileceğini, hasarın sınırlandırılabilceğini ve sistemin kendiliğinden merkezleme yeteneğinden dolayı yapının kalıcı deplasmanlarının azaltacağını belirtmiştir. Yaptıkları çalışmanın amacı, periyodik yarı statik yüklemeye tabi iki adet üç boyutlu sonlu elemanlar modelinin (klasik monolitik bir betonarme köprü tabliyesi ile yukarı kalkma etkisine izin verebilecek şekilde elyaf destekli polimerle (FRP) sarılmış prekast art çekmeli beton köprü tabliyesi) ANSYS yazılım paketi kullanılarak geliştirilmesi ve geçerliliğinin sağlanmasıdır. Bu iki farklı beton yapısal sistemin sonlu elemanlar modelleri mevcut deneysel verilerle doğrulanmıştır.

Jin ve diğ. (2016), basit mesnetli köprülerde taşıtların raydan çıkmasına dikey zemin hareket bileşeninin katkısına ilişkin sayısal bir araştırma yapmışlardır. Çalışma sonuçları, düşey zemin hareketinin dahil edilmesinin olası raydan çıkma ihtimalini artıracaklarını göstermekte; tedbirli tahminlerin yapılabilmesi için depremden kaynaklanan raydan çıkarma analizinde bu düşey zemin hareket bileşeninin dahil edilmesi önerilmektedir.

Mitoulis (2015), yaptığı çalışmada, köprü ayaklarındaki yukarı kalkma mekanizmasını incelemiş, köprü gövdesi ve mesnet ayaklar arasında bulunan izolatörlerde meydana gelen basınç ve çekme etkilerini araştırmıştır. Yaptığı genişletilmiş parametrik çalışmada özellikle kısa köprü ayaklarında bulunan izolatörler için bu davranışın çok kritik olabileceğini belirtmiştir.

Reyhanoğulları ve Akyüz (2015), yaptıkları çalışmada, sismik olarak izole edilmiş köprülerde yedi farklı yakın fay deprem datası için düşey zemin hareketinin etkilerini araştırmıştır. Özellikle seçilmiş depremler vasıtasıyla düşey deprem uyarımının sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz çelik kirişli kompozit köprülerin (SCB) tepkisi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Analitik hesaplamalar SAP2000 kullanılarak yapılmış ve nonlinear zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiştir. Yatay ve yatay artı düşey deprem yüklerinin etkilerini ele alan karşılaştırmalar ortaya konmuş; düşey zemin hareketinin, kiriş orta açıklık momentini önemli ölçüde etkilediğinin altı çizilmiştir. Bu tez çalışmasında ise, tek bir adet köprü örneği ile sınırlı kalınmamış, birçok yapısal sistem modeli kullanılmıştır. SAP2000 gibi dışarıdan müdahalenin mümkün olmadığı hazır bir programla analizlerin yanında; tüm ara işlemleri, indisli değişkenleri ve yapının dinamik karakteristiklerini gösteren GP-DYNA bilgisayar programı hazırlanmıştır. GP-DYNA ile model hazırlamanın oldukça pratik olmasının yanı sıra; mevcut modelin modifiye edilmesi, her aşamada kontrollere imkân sağlaması, analiz sonucu grafiklerin oldukça detaylı şekilde elde edilmesi ve işlemleri hazır paket programlara nazaran oldukça hızlı gerçekleştirmesi gibi avantajları da mevcuttur.

Kalkan ve Graizer (2007), dönel uyarım kırılma fayı yakınında birkaç dereceye ulaşabilirken, düşey hareketin yatayın iki katından fazla olabildiği ve 2g seviyesini aşabileceği gerçeğine rağmen, yer hareketinin dönel ve düşey bileşenlerinin yapıların tasarımında veya değerlendirilmesinde neredeyse her zaman göz ardı edildiğinin altını çizmiştir. Yapılan çalışmada, çok bileşenli bir uyarım altında bir SDOF osilatörünün yanıtını hesaplamak için bir hareket denklemi öngörülmüştür. Önerilen çok bileşenli davranış spektrumu, yüksek yoğunluklu düşey sarsma ve dönel uyarım olması muhtemel yakın fay bölgeleri için geleneksel spektrumla tanımlanamayan yer hareketinin kinematik karakteristiklerini yansıtmaktadır. Çalışmanın sonuçlarında; düşey bileşenle karşılaştırıldığında, hareketin eğme bileşeninin sistemin öteleme davranışı üzerinde daha fazla etkisinin olduğu, birkaç derecelik dinamik yer dönmesinin (ground tilting) tüm sistemin davranışını kolayca ikiye katlayabileceği açıklanmıştır. Bu farkın açısız ivmeye bağlı atalet kuvveti etkili yükseklik ile doğru orantılı olduğundan yüksek yapılar için çok daha belirgin olacağı söylenmiştir.

Mergos ve Kawashima (2005), doğrudan temelle desteklenen standart bir köprüde temelde yukarı kalkma hareketi göz önüne alındığında oluşacak tepkideki ana farklılıkları araştırmışlardır. Tek eksenli uyarıma göre iki ve üç eksenli uyarımda salınım tepkisindeki modifikasyonlara önem verilmiştir. Bu etkinin çift eksenli uyarım altında arttığı, depremin düşey bileşenine daha az duyarlı olduğu ifade edilmektedir.

Loh ve Lee (1997), köprünün sismik tepki özelliklerini değerlendirmek için, kuvvetli yer hareketi ölçümleri dizisine doğrusal kesikli zaman sistemleri tanımlama metodolojisinin

uygulanmasını anlatmışlardır. Çalışma sonuçlarında, zayıf ve kuvvetli zemin uyarımının köprülerin dinamik tepkileri üzerinde önemli farklılıklar yarattığı, kuvvetli sarsıntıda köprü ayaklarının rijit cisim salınımının sistem tanımlamasında göz ardı edilmemesi gerektiğinin altı çizilmiştir. Köprünün orta açıklıktaki transvers hareketinin, sınır sistemden gelen yarı statik tepki ile kontrol edileceğini ve bu olgunun, kuvvetli yer hareketinde oldukça önem taşıdığı belirtilmiştir.

(E) Köprülerin hasar görmesinde, literatürde “uplift effect” olarak geçen yukarı kalkma davranışı kadar açısall etkilerin de önemli olduğu belirtilmektedir. Ancak açısall bileşenlere karşılık gelen kütleler, yük fonksiyonları ve yükler henüz yeteri kadar araştırılmamıştır ve bu nedenle göz önüne alınamamaktadır. Tez çalışması kapsamında açısall etkilerin göz önüne alınmasına imkân sağlayacak şekilde GP-DYNA bilgisayar programı geliştirilmiştir. Henüz literatürde açısall deprem ivmesinin doğrudan temin edildiği bir kayıt olmaması sebebiyle bu seçenek araştırmaların başlangıcı aşamasındadır.

Açısall serbestliklerle ilgili olarak son zamanlarda bazı çalışmalar yapılmıştır (Huang, 2003; Kalkan ve Graizer, 2007; Lee ve Liang, 2008; Bonev ve diğ., 2010; Kalani Sarokolayı ve diğ., 2012; Lee ve diğ., 2012; Ghaffarzadeh ve Nazeri, 2015; Kalani Sarokolayı ve diğ., 2015; Yin ve diğ., 2016). Bu araştırmaların bir kısmı, yer hareketi fonksiyonlarından yatay ve düşey bileşenlerinin biliniyor olması durumunda; üçüncü, yani açısall bileşenin ilk ikisine bağlı olarak hesabı üzerine çalışmalardır. Bir kısmı ise, zemine dik üç serbestlikli bir konsol kirişte üçüncü serbestliğe karşılık gelen açısall etkiler ile ilgilidir. En fazla, konsol sistemin tek elemanla değil; fazla sayıda elemanlarla tanımlanması üzerine yapılan çalışmalardır. Ancak bu çalışmaların her biri çok değerli adımlar teşkil etmekle birlikte, mevcut çalışmada tartışmaya açılan probleme bir çözüm getirememektedir.

Dahmardeh ve diğ. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada; burulma bileşeninin, yapıların davranışları ve rastgele eksantrisitenin yeterliliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, seçilen bazı yer hareketlerinin burulma bileşeni tek istasyon prosedürü kullanılarak oluşturulmuştur. Daha sonra, farklı dönme ve öteleme frekansları oranlarına sahip 5, 10 ve 15 katlı binalar ilk olarak, sadece öteleme bileşenleriyle; ikinci olarak, öteleme ve burulma bileşenlerinin eşzamanlı uygulanmasıyla analiz edilmiştir. Sonuçlar; burulma bileşeninin yapıların davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, deplasmanlarda %36 ve ötelenme oranında %41'e kadar artışa sebep olabildiğini göstermiştir.

Yin ve diğ. (2016), açılal deprem yer hareketi karakteristiklerinin ve yapısal davranış üzerine etkilerinin henüz iyi tanımlanmamış olduğunu, dönel yer hareketlerinin serbest alanda doğrudan kaydedilmesinin başlangıç aşamasında olduğunu, aynı anda altı bileşenli deprem ölçümlerinin yavaş yavaş biriktiğini belirtmiştir. Yapılan çalışmada, 74 deprem olayından çok çeşitli içmerkez uzaklıkları ve büyüklüklerde iyi sinyal kalitesine sahip 6DOF serbest alanlı yer hareketi tanımlanmıştır. Bu deneysel 6DOF veri seti, serbest alanlı dönel yer hareketlerinin mühendislik karakteristiklerini araştırmak üzere analiz edilmiştir.

Sarokolayı ve diğ. (2015), baraj gölü etkileşimi de dâhil olmak üzere yer hareketlerinin dönel ve öteleme bileşenlerine maruz kalan bir beton-ağırlık barajının doğrusal olmayan sismik davranışına ilişkin çalışma yapmıştır. Bu amaçla, yer hareketinin dönel bileşenleri, karşılık gelen mevcut öteleme bileşenlerine dayanan Hong Non Lee geliştirilmiş yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Sunulan formülasyona dayanarak, Pine Flat beton-ağırlık barajı farklı durumlar için analiz edilmiş ve sonuçlar; yer hareketinin dönme bileşeninin, baraj kretinin maksimum yatay ve düşey yer değiştirmelerini arttırabileceğini veya azaltabildiğini göstermiştir. Sonuçların, baraj rezervuar sisteminin frekansına ve yer hareketinin öteleme ile dönel bileşenlerinin baskın frekanslarına bağlı olduğu belirtilmiştir.

Sarokolayı ve diğ. (2012), bir düğüm noktasının hareketinin 3 öteleme, 3 rotasyon olmak üzere 6 bileşenle tanımlanabileceğini; yer hareketinin üç dönel bileşeninin ise, iki sallama bileşeni (rocking components) ve bir burulma bileşeni (torsional component) içerdiğini belirtmiştir. Yer hareketinin öteleme bileşenlerinin standart tekniklerle kolayca ölçülebilirken, dönel bileşenlerin doğrudan erişebilir olmadığından bahsetmiştir. Yaptıkları çalışmada; deprem ivmesinin dönel bileşenleri, karşılık gelen mevcut translasyonel bileşenlere dayalı enine izotropik elastik dalga yayılımından ve klasik elastisite teorilerinden geliştirilmiş bir yöntem kullanılarak elde edilmiştir. Bu amaçla; ilgili dönel bileşenlerin SV ve SH dalgası tekrar oranına göre Hızlı Fourier dönüşümü kullanılarak oluşturulması için, altı depremin üç öteleme bileşeni seçilmiştir. Bu geliştirilmiş yaklaşımdan elde edilen dönel ivmeler, diğer metotlarla karşılaştırılmış ve sonuçların, dönel ivmelenmenin pik yer ivmesinin diğer teorik metotlara göre gerçek kaydedilmiş verilere yakın olduğunu gösterdiği açıklanmıştır.

Guidotti (2012), doktora çalışmasında, 22 Şubat 2011 tarihli MW 6.3 Christchurch depreminde olduğu gibi gerçekçi bir deprem senaryosunu kaynak göstererek, yakın alandaki dönel yer hareketinin araştırılmasına katkıda bulunmayı hedeflemiştir. Dönel dalga alanının ve bunun

ötelenme dalga alanıyla ilişkisinin daha iyi anlaşılmasını amaçlayan dönel yer hareketleri değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, özellikle, binalarda dönel etkiyi göz ardı etmenin, dikkate alınan modellere göre, katlar arası ötelenmenin %15'e varan oranlarda eksik tahmin edilmesine ve sonuç olarak beklenenden daha yüksek hasar seviyesine neden olabileceği söylenmiştir.

Lee ve diğ. (2012), sismolojik uygulamada dönel yer hareketlerinin ölçülmesine ilişkin bilgiler vermiş; sismolojinin, klasik elastisite teorisinin büyük mesafelerde anakayanın kayıtlı öteleme hareketlerini yorumlamak için çok iyi çalışması sebebiyle uzak alanlardaki mahzenlerde oldukça başarılı olduğunu öne sürmüştür. Öte yandan; yıkıcı deprem anlayışını geliştirmek için, mutlaka, potansiyel yıkıcı depremlerin (büyüklük > 6,5) seyrek olarak meydana geldiği aktif fayların yakınında da rotasyon ve ötelenme cihazlarının kullanılması gerektiğini belirtmiştir.

Bonev ve diğ. (2010), dönel yer ivmesi bileşenlerinin tatbik edilmesinin sismik hareketin özel değişkenliğini hesaba katmak için etkili bir yöntem olduğunu belirtmiştir. Uzun ve narin yapılar için dönel bileşenin etkisinin esas olduğunun ve ihmal edilemeyeceğinin, aksi takdirde tasarım davranışın etkilerinin göz ardı edileceğinin altını çizmiştir. Çalışma sonuçlarına göre; dönel bileşenin etkisi, yapının yüksekliği artırıldığında daha büyük olmaktadır. Her bir durumda, daha yüksek mod tepkisinin katkısı hareketin dönel tipini dikkate alarak dikkatle incelenmelidir. Tepki spektrum metodu, dönel tepki spektrası kullanılarak genişletilebilir ve geliştirilebilir.

Lee ve Liang (2008), mühendislik yapılarının davranış analizinde ve yarı uzay davranışının hesaplanmasında, elastik ve poro-elastik yarı uzayın dinamik davranışıyla ilişkili dönel bileşenlerin, mevcut deformasyonlar kadar önemli olduğunu ve mutlaka analizlerde hesaba katılması gerektiğini belirtmiştir. Çalışmada, karşılık gelen ötelenme hareketlerinden dönel hareketlerin oluşturulması için teoriler ve algoritmalar geliştirilmesi ve bunların çeşitli mevcut dönel kayıtlar ile geçerliliğinin kontrol edilmesi üzerinde durulmuştur.

Huang (2003), 1999'da Chi-Chi, Taiwan depremi sırasında, kırılma fayının fay boyunca büyük yüzey kaymalarının gözlemlendiği kuzey ucunda yoğun ivme dizisinden büyük dönel hareketlerin oluştuğunu söylemiştir. Yapılan analizlerin, Chi-Chi depremi sırasında deprem fayının kuzey ucundan dönel sismik enerjinin yayıldığını gösterdiğini; rotasyonel yer hareketlerinin daha fazla analizinin, kopma mekanizmaları için yararlı sınırlamalar sağlayabileceğini belirtmiştir.

(F) Yapıların deprem analizlerine ilişkin bilgisayar programları geliştirilmesini içeren araştırmalar incelendiğinde; tez çalışmasına temel teşkil edebilecek, analizleri pratik bir biçimde gerçekleştirebilecek amaca yönelik bir programa ulaşılamamıştır. İncelenen çalışmalar şu şekildedir:

Hasan ve diğ. (2019), bina bilgi modellemesi (BIM) bağlamında analitik modellerin anlambilimindeki mevcut eksikliklerini ele almakta ve iyileştirmeler önermektedir. Düşey ve yatay elemanlar için sonlu elemanların, döşeme ve temeller için sınır elemanların eşleştirilmesi üzerinden BIM merkezli bir yapısal analiz sisteminin açıklaması verilmiştir. Hibrid analiz sistemi geometrik olarak daha hassas bir BIM modeli gerektirmektedir. İhtiyacı açıklamak ve orta düzeyli bir çözüm sunmak için, bir eklenti yazılımı geliştirilmiş ve BIM platformuna (Revit) entegre edilmiştir. Eklenti yazılım, BIM analitik modellerinde iyileştirme ihtiyacını karşılamak için pratik problemlerle doğrulanmıştır.

Patsios ve Spiliopoulos (2018), yaptıkları çalışmada, elastik-sertleşen plastik malzemeden yapılmış düzlemsel ve üç boyutlu yapısal çerçevelerin analizi için tam otomatik, adım adım, 1. dereceden matris kuvvet yöntemi geliştirmiştir. Plastisite, sıfır uzunlukta plastik menteşeler kullanılarak modellenmiştir. Önceden tanımlanmış herhangi bir yükleme senaryosu analizi için uygun bir yük kontrollü nümerik strateji önerilmektedir. Etkinliği, literatürden elde edilen mevcut sonuçlarla veya SAP2000 programından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılan bir dizi örnekle gösterilmiştir. Formülasyona bir dizi farklı ve karmaşık akma fonksiyonu dâhil edilmiş olmasının yanında, önerilen sayısal yöntemin, ayarlama için sadece birkaç parametre gerektirdiği; iyi yakınsama özelliklerine sahip olduğu ve büyük ölçekli problemler için bile iyi sonuçlar verdiği öne sürülmüştür. Öte yandan; optimizasyon algoritmasının süper - doğrusal yakınsama oranının Newton-Raphson yönteminin ikinci dereceden oranı ile rekabet edemeyeceği belirtilmiştir. Ayrıca; büyük ölçekli örneklerde, holonomik olmayan malzeme davranışını uygun şekilde adapte etmek için gerekli olan optimizasyon algoritmalarının aktif küme üzerinden döngüsünün, hesaplama sürelerinin artmasına neden olduğu bulunmuştur.

Morales-Rodriguez ve Lopez-Perales (2017), matris rijitlik yönteminin esas olarak hiperstatik de dâhil olmak üzere karmaşık yapıların bilgisayar-otomatik analizi için uygun olduğunu, sonlu elemanlar yönteminin (FEM) en yaygın uygulaması olduğunu belirtmiştir.

Aguiar ve diğ. (2016), CEINCI-LAB isimli, statik veya dinamik yapısal analiz için, MATLAB kullanılarak, kullanıcıya dost ve yapısal bilgiyi güçlendirmek için hizmet veren bir bilgisayar yazılımını tanıtmışlardır. Yapılan çalışmada statik itme analizi tekniği kullanılarak, Chevron kuşaklar üzerindeki ADAS (ilave sönüm ve rijitlik) veya TADAS (üçgen plaka ilaveli sönüm ve rijitlik) enerji yayma sistemlerinin bulunduğu betonarme veya çelik düzlem çerçevelerin dayanımlı sismik kapasite eğrisi incelenmiştir. Üç katında enerji yayma cihazı bulunan dört katlı, tek açıklıklı betonarme bir yapının ve orta açıklığında her katta enerji yayma cihazı bulunan üç açıklıklı, altı katlı bir çelik yapının analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları SAP2000 ve ETABS v15 programlarıyla karşılaştırmalı olarak verilmiş ve yakın sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir.

Akesson ve Lindemann (2016), gelişmiş yapısal analiz araçlarının erken kullanımının kavramsal anlayışı ve kavramsal tasarımın kalitesini olumsuz yönde etkileyebileceğini belirtmiştir. Günümüzün tablet bilgisayarlarının çoklu dokunmatik arayüzlerinin, kullanıcıya ekrandaki nesnelerin doğrudan değiştirilmesi konusunda güçlü bir his verdiğini; yapısal modelin ekranda doğrudan yönetilmesinin, yapısal davranışın daha iyi anlaşılması ve hissedilmesini sağlayacağını ileri sürmüştür. Bu sebeple; kavramsal tasarım aşamasında bu şekilde doğrudan değiştirmeyi sağlayan bir arayüz geliştirdiklerini söylemiştir.

Ghaffarzadeh ve Nazeri (2015), yaptıkları çalışmada düşey uyarımın yapıların yatay davranışı üzerindeki etkisini, düşey ve yatay davranışı birleştirerek değerlendirmiştir. Çalışmada, birleştirilmiş davranışın türetilmiş ana denklemlerine dayalı dinamik doğrusal olmayan (nonlinear) analiz gerçekleştirmek üzere bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Sonuçlar, eşzamanlı uyarım durumunda, bazı titreşim periyotlarında sadece yatay olarak uyarılmış sistemlere kıyasla spektral yer değiştirmede önemli artışlar göstermiştir. Ayrıca, dikey pik yer ivmesinin yatay olana oranının büyük olması durumunda, yatay spektral yer değiştirmelerde önemli artış gözlemlendiği söylenmiştir. Çalışmada yalnızca sabit mesnetli olduğu belirtilen bir adet köprü ayağının; iki serbestlikli konsantre bir kütle ile modellenerek nonlinear analizi yapılmıştır. Bu tez çalışmasında ise; sistemlerin, gerçek davranışını yansıtabilecek ve tüm yapısal elemanların birbiriyle etkileşiminin de göz önüne alındığı detaylı modellerle analiz edilmesine önem verilmiştir. Hatta istendiğinde yatay etkilerin düşey serbestlikler, düşey etkilerin yatay serbestlikler üzerinde etkisini de göz önüne alabilen bir program geliştirilmiştir.

Calvo ve diğ. (2014), çalışmalarında yapısal analiz web uygulamasının mimarisini sunmuşlardır. Hizmet olarak yazılım (SaaS) web servisleri için paket olacak bu uygulama bir 3D modelleyici, bir yapısal analiz çözücü, bir yapısal tasarım çözücü ve bir grafik dokümantasyon işleyici olmak üzere 4 modülden oluşmaktadır. Ayrıca bu hizmeti bulut uygulaması olarak geliştirmeye yönelik mevcut araçlar sunulmaktadır. Çalışma kapsamında, DXF formatı olarak grafiksel çıktı üreten CAD modülünün bir ön versiyonu geliştirilmiştir.

Mansilla ve diğ. (2014), yaptıkları çalışmada, “Parametrik kafes kirişler” uygulamasının birden fazla faktörün çeşitli düz kafes kirişlerin yapısal davranışı üzerindeki etkisinin analizini gerçekleştirdiğinden bahsetmiştir. Kafesler, düğümlerinin koordinatları ve çubukların bağlantılarıyla değil, küresel geometrik parametrelerle tanımlanmaktadır. Böylece, öğrencilerin bu parametrelerden herhangi birini değiştirmelerine ve bilgisayar veya belirli bir yazılıma ihtiyaç duymadan ortaya çıkan etkiyi hemen görmelerine olanak sağlanmaktadır. Kesit ve malzemelerin özellikleri, mesnetler ve yükler de parametrelendirilmektedir. Öğrenci herhangi bir parametrenin değerini değiştirdiğinde, kafes kiriş güncellenmekte, sistem sonuçları otomatik olarak yeniden hesaplanmakta ve dinamik olarak sunulmaktadır. Bu; yapının minimum kuvvetlerini, gerilmelerini, eğilmelerini ve yapıların kendi ağırlığını üreten değerleri belirleyerek yapısal tasarımın optimizasyonunu sağlamaktadır. Google Play üzerinden ücretsiz olarak indirilebilen yazılımın, sadece ekran bilgilerini göstermekle kalmayacağı; mevcut analiz sonuçlarını herhangi bir zamanda grafik oluşturma için DXF formatında ve kafesin eksiksiz bir yapısal analiz belgesi için TXT formatında olmak üzere iki olası dosya türünde dışa aktarabileceği belirtilmiştir.

Gracia ve Bayo (2013), çalışmalarında, yapısal analiz hizmet olarak yazılım şeklinde bilinen, üç boyutlu kafes kiriş yapılarının yapısal analizi için 3 boyutlu web uygulamasını sunmaktadır. Yapısal analiz yazılımlarının tabiatında var olan görselleştirme, etkileşim ve yapının analizi gibi temel konularda en yeni teknolojilerin kullanıldığı öne sürülmektedir. Özellikle, yeni HTML5 standardının bir parçası olan WebGL API, önerilen uygulamanın görselleştirme ve etkileşim sorunlarını çözmek için kullanılmıştır. Bu prototip yalnızca internet bağlantısı ve bu yeni standartları destekleyen güncellenmiş bir tarayıcı gerektirmektedir. HTML5, CSS3, XHR ve JavaScript, istemci tarafında etkileşim, görselleştirme ve iletişim amacıyla kullanılmışken; PHP sunucu tarafında analiz için kullanılmıştır. İlave bir eklenti veya sanal makine yorumlayıcısına gerek olmaması sebebiyle platformun bağımsızlığı garanti edilmektedir.

Lee ve Ahn (2011), yapısal analizin bilgisayar destekli eğitimi için öğretim araçlarını, VisualFEA sonlu eleman analiz programının bir uzantısı olarak uygulamıştır. Yapısal analizde anlayışı, kavramsal ilkeleri kanıtlayarak ve etkileşimli bilgisayar grafikleri yardımıyla karmaşık hesaplama işlemlerini görsel olarak sergileyerek konuya ilgiyi teşvik etmek için tasarlanmıştır. Önceden tedarik edilen koşullar veya varsayılan verilerin girişi yerine; öğretim araçları, modelleme verilerinin oluşturulmasından çözüm sonuçlarının sunulmasına kadar gerçek ve pratik bir yapısal analiz süreci aracılığıyla işletilmektedir. Sonlu eleman teknolojisi bazında öğretim amaçları için yapısal mekaniğin temel prensipleri, hesaplama formülleri ve analiz yöntemleri simüle edilmiştir. VisualFEA'nin, yapısal analizin öğretilmesi ve öğrenilmesinde kullanılacak bir dizi eğitim fonksiyonuna sahip olduğu belirtilmiş, çerçeve analizi için pek çok program olmasına karşın, çalışmada belirtilen eğitimsel niteliklerin benzer amaçlı programlarda yaygın olmadığı belirtilmiştir. Eğitim amaçları ön plana çıkarılarak yapılan çalışmada çerçeve sistemler üzerinde durulmuş ve ders kitaplarından örnekler verilmiştir.

Programlama konusunda yapılan araştırmalardan yola çıkılarak, yapısal analiz için program geliştirilmesinin günümüze dek oldukça ilgi ve talep gördüğü aşikârdır. Yapılan çalışmaların bir kısmı öğrencilere konuların daha etkili bir şekilde aktarılmasını hedefleyen eğitim amaçlı yazılımları içermektedir. Bunun yanında; çalışmaların çoğunlukla, yüksek serbestlikli yapıların genel amaçlı analizlerini gerçekleştirebilecek gelişmiş ve kapsamlı programlar yerine; eklentiler, belirli eleman tiplerinin analizine yönelik aplikasyonlar ve mini kod dizinleri kullanılarak hazırlanmış modülleri kapsadığı ve tez kapsamında araştırılan konularda yetersiz kaldığı görülmektedir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Yapısal sistemlerin deprem analizlerinde genellikle eşdeğer statik yük, mod süperpozisyonu, zaman tanım alanında nümerik integrasyon yöntemi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu analizleri gerçekleştirebilmek için özellikle bina türü yapılarda genellikle varsayımli formülasyonlar kullanılarak geliştirilmiş kısmi üç boyutlu bilgisayar programları tercih edilmektedir. Bu programların en önemli varsayımı, bilinmeyen serbestliklerin düğüm noktalarında değil, katlarda tanımlanmış olmasıdır. Genel amaçlı olarak tanımlanan bilgisayar programlarında ise bilinmeyen serbestlikler her düğüm noktasında, uzay sistemlerde altı, düzlemsel sistemlerde ise üç adet olarak tanımlanabilmektedir. Bazı genel amaçlı bilgisayar programlarında düzleme dik açısai serbestlik (drilling degree of freedom) hala tartışma konusu olup, komşu kenar şekil değiştirmelerinin bir fonksiyonu olarak formülize edilebilmektedir (Öztorun ve diğ., 1994; Öztorun ve diğ., 1998; Öztorun, 1997a-b-c, Öztorun 1998, Öztorun ve Anıl 1999). Daha da öteye, perde-çerçeve sistemlerde enkesiti U, L, T, H, I ve benzeri bir geometriye sahip perde duvarların formülasyonlarında, statik analizlerde dahi önemli sorunlar yaşanmaktadır. Söz konusu varsayımlar kayma çerçevesi türündeki, yani rijit yatay elemanlar ve kayma davranışı gösteren kolonlardan oluşan yapısal sistemlerde genellikle makul sonuçlar vermektedir. Ancak çoğu zaman yukarıda bahsedilen yöntemlerin her birinin farklı sonuçlar verdiği de bilinmektedir. Örneğin SAP2000 (Wilson, 2005) programında, dinamik yük fonksiyonları yalnızca yatay, düşey ve açısai serbestliklere belli katsayılarla etki ettirilmektedir. Bu durum yatay-düşey-açısai serbestlikler arasındaki etkileşimin sistem genelinde gerektiği gibi göz önüne alınamadığı anlamına gelmektedir. Yani kütle matrisi diyagonal bir matris olarak oluşmakta, diğer kütle matrisi elemanları hesaplara dahil edilmemektedir.

Takip eden kısımlarda; bina türü olmayan yapısal sistemler için iki boyutlu analizlerde yatay, düşey ve açısai serbestlikleri içeren en genel durum, tek katlı ve üç açıklıklı bir düzlemsel çerçeve sistem örneği üzerinden açıklanmıştır. Konsantre kat kütlesi ve kayma çerçevesi varsayımı, konsantre düğüm noktası kütleleri ve kayma çerçevesi varsayımı, tüm bileşenleri içeren konsantre düğüm noktası kütleleri ve son olarak da tüm bileşenleri içeren yayılı yükler ve ilgili yayılı kütleleri içeren en genel hal için sistem matrisleri verilmiş, varsayımların analizleri nasıl etkileyebileceği anlatılmıştır. Bu analiz yöntemlerinin incelenmesi sonucunda; mevcut tez çalışmasında, davranışı en gerçekçi şekilde yansıtacağı için tüm bileşenleri içeren

yayılı yükler ve ilgili yayılı kütlelerin de hesaba katıldığı modelin kullanılmasına karar verilmiş ve izlenen yöntem tarif edilmiştir.

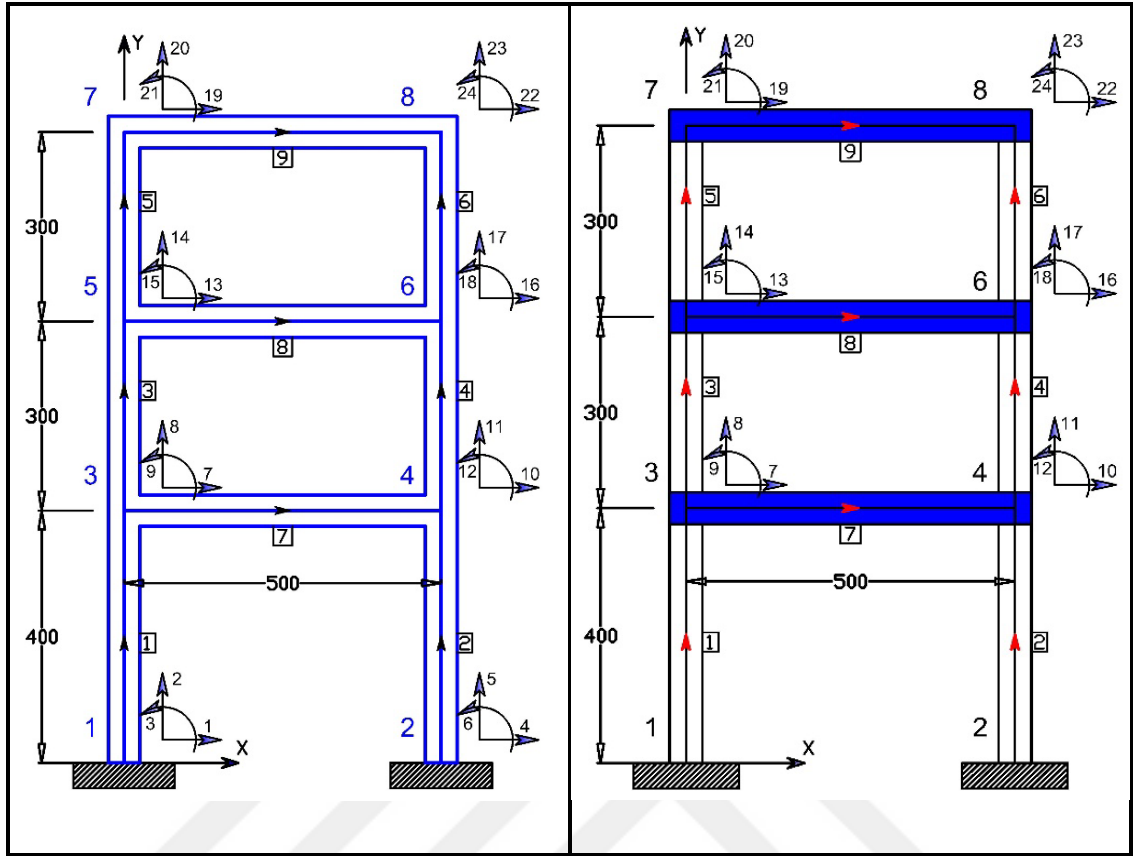
3.1. YAYGIN ANALİZ YÖNTEMLERİNİN ETKİSİ

Aşağıda yapısal sistemlerin dinamik analizinde kullanılan genel eşitlik görülmektedir.

$$[M]_{N,N} \cdot [A_t]_N + [C]_{N,N} \cdot [V_t]_N + [K]_{N,N} \cdot [U_t]_N = [P_t]_N \quad (1)$$

Verilen hareket denkleminin parametreleri $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ her biri $N \times N$ ebatlarında olan, sırasıyla sistem kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. N ise toplam serbestlik sayısıdır. Sistem kütle ve rijitlik matrisleri sistem geometrisi, kesit ve malzeme özellikleri, sınır şartları gibi bilgilere bağlı olarak elde edilmekte, sönüm matrisi de dolaylı olarak elde edilmektedir. Yük fonksiyonu ise genellikle yer ivmesi olarak ölçümler sonucunda elde edilmekte olup, zamanın bir fonksiyonu olarak eşitliğin bilinen kısmını oluşturmaktadır. $[A]$, $[V]$, $[U]$ matrisleri her bir serbestlik için t anındaki ivme, hız ve yer değiştirme matrisleridir. Hareket denkleminin çözülebilmesi için $[K]$ ve $[M]$ matrisleri mutlaka pozitif diyagonal ve simetrik kare matris olmalıdır. Her ikisi de aynı boyutta (N satır, N sütun) olmalıdır. $[C]$ matrisi de doğal olarak aynı özelliklerde olacaktır.

Kütlelerin konsantre kütleler olarak düğüm noktalarında tanımlanması durumunda $[M]$ matrisi diyagonal matris olacaktır. Bu durumda evriğinin hesaplanması kolaydır, hatta matris operasyonlarına da gerek yoktur; vektör olarak tanımlanabilir. Ancak çalışma kapsamında görüleceği üzere yalnızca varsayımlara uygun yapısal sistemler için makul sonuçlar verebilir. Gerçekte kütle matrisi diyagonal bir matris değildir. Bina dışı yapılarda baskın olarak görülmektedir. İlk açıklamalar basit bir çerçeve örneği üzerinde gösterilmiştir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de örnek bir sistemin geometrisi, yayılı kütleler ve kütle matrisi görüntüsü sunulmaktadır. Rijitlik matrisinde de aynı indislere tekabül eden elemanlar değer almaktadır. Her iki matris de pozitif diyagonal, kare bant matrislerdir. Numaralama sisteminden görüleceği üzere matrislerin bant genişliği optimize edilmiştir.



Şekil 3.1: Sistem geometrisi, genel serbestlikler ve kirişlerde yayılı kütleler.

I/J	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
7	$M_{7,7}$	0	$M_{7,9}$	$M_{7,10}$	0	0	$M_{7,13}$	0	$M_{7,15}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	$M_{8,8}$	$M_{8,9}$	0	$M_{8,11}$	$M_{8,12}$	0	$M_{8,14}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	$M_{9,7}$	$M_{9,8}$	$M_{9,9}$	0	$M_{9,11}$	$M_{9,12}$	$M_{9,13}$	0	$M_{9,15}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	$M_{10,7}$	0	0	$M_{10,10}$	0	$M_{10,12}$	0	0	0	$M_{10,16}$	0	$M_{9,18}$	0	0	0	0	0	0
11	0	$M_{11,8}$	$M_{11,9}$	0	$M_{11,11}$	$M_{11,12}$	0	0	0	0	$M_{11,17}$	0	0	0	0	0	0	0
12	0	$M_{12,8}$	$M_{12,9}$	$M_{12,10}$	$M_{12,11}$	$M_{12,12}$	0	0	0	$M_{12,16}$	0	$M_{12,18}$	0	0	0	0	0	0
13	$M_{13,7}$	0	$M_{13,9}$	0	0	0	$M_{13,13}$	0	0	0	0	0	$M_{13,19}$	0	$M_{13,21}$	0	0	0
14	0	$M_{14,8}$	0	0	0	0	0	$M_{14,14}$	0	0	0	0	0	$M_{14,20}$	0	0	0	0
15	$M_{15,7}$	0	$M_{15,9}$	0	0	0	0	0	$M_{15,15}$	0	0	0	$M_{15,19}$	0	$M_{15,21}$	0	0	0
16	0	0	0	$M_{16,10}$	0	$M_{16,12}$	0	0	0	$M_{16,16}$	0	0	0	0	0	$M_{16,22}$	0	$M_{16,24}$
17	0	0	0	0	$M_{17,11}$	0	0	0	0	0	$M_{17,17}$	0	0	0	0	0	$M_{17,23}$	0
18	0	0	0	$M_{18,10}$	0	$M_{18,12}$	0	0	0	0	0	$M_{18,18}$	0	0	0	$M_{18,22}$	0	$M_{18,24}$
19	0	0	0	0	0	0	$M_{19,13}$	0	$M_{19,15}$	0	0	0	$M_{19,19}$	0	$M_{19,21}$	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	$M_{19,14}$	0	0	0	0	0	$M_{20,20}$	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	$M_{21,13}$	0	$M_{21,15}$	0	0	0	$M_{21,19}$	0	$M_{21,21}$	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$M_{22,16}$	0	$M_{22,18}$	0	0	0	$M_{22,22}$	0	$M_{22,24}$
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$M_{23,17}$	0	0	0	0	0	$M_{23,23}$	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$M_{24,16}$	0	$M_{24,18}$	0	0	0	$M_{24,22}$	0	$M_{24,24}$

Şekil 3.2: Sistem kütle matrisi (değer alan elemanlar).

Sistemdeki yatay serbestlikler 7, 10, 13, 16, 19 ve 22 numaralı serbestliklerdir. Yalnızca bu serbestliklerin hesaba katılması dahi kayma çerçevesi (shear building) analojisinden daha gerçekçi olmasına rağmen şu sorunlarla karşılaşılır:

Analizlerin bu şekilde yapılabilmesi için yalnızca diyagonal terimlerde olan ve $M_{i,i}$ olmak üzere fonksiyonun etki ettirildiği bir kütle matrisinde diğer tüm terimler sıfır değerini alacağı için matris pozitif diyagonal değildir. Determinantı sıfırdır, çözüm yoktur. Tek çözüm kütle matrisinin sıkıştırılması ve gereksiz terimlerin atılmasıdır. Bu durumda hareket denklemindeki kütle matrisi ile rijitlik matrisinin eşleştirilmesi gerekir ki aynı işlemlerin rijitlik matrisinde de yapılması zorunluluğu ortaya çıkar. Bu ise sistem özelliklerinin varsayımlara uygunluğuna bağlı olarak bazen makul sonuçlar verse de esasen başka bir sistemin analizi olması nedeniyle kabul edilemez hatalara da neden olabilir.

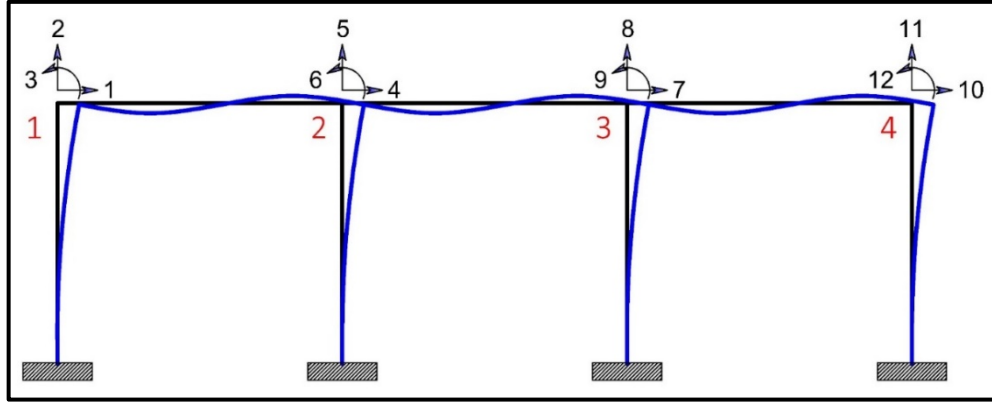
Matematiksel modelde ve numaralandırma sisteminde görüldüğü gibi düşey bileşenler 8, 11, 14, 17, 20 ve 23 numaralı bileşenlerdir. Diyagonal terimler üzerinde düşey yük fonksiyonunun etki ettirilmesi durumunda daha az sıkıştırılmış kütle matrisi, buna bağlı olarak daha gerçekçi bir rijitlik matrisi, dolayısıyla sönüm matrisi elde edilmekte ve deprem yük fonksiyonları daha gerçekçi olarak dikkate alınmaktadır. Ancak tam sonucu veren bir yöntem olduğu iddia edilemez. Çünkü henüz açılmal bileşenler hesaba katılmamıştır. Diyagonal terimlerde pozitif olmayan değerler vardır ve çözüm ancak matrislerin sıkıştırılmasıyla elde edilebilir fakat bu sonuçların doğruluğu da tartışma konusudur. Yalnızca bir önceki yöntemle kıyasla biraz daha gerçekçi olduğu söylenebilir.

3.1.1. Bina Türü Olmayan Yapısal Sistemler

Yalnızca bina türü yapılar için varsayımlı olarak geliştirilmiş kısmi üç boyutlu programların farklı türdeki yapısal sistemlerde kullanılamaması sonucunda genel amaçlı programlara ihtiyaç duyulmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan genel amaçlı bilgisayar programlarının kullandığı formülasyonlar kütüphanelerindeki eleman türlerine göre farklı formüller kullanılarak geliştirilmiştir. Her eleman türü için öncelikle rijitlik terimlerini içeren rijitlik matrisleri, daha sonra kütle matrisleri ve sönüm formülasyonları vardır. Bu formülasyonlar kullanmış oldukları şekil değiştirme fonksiyonlarına ve enterpolasyon fonksiyonlarına bağlı olarak her programda farklılıklar gösterebilir. Benzeri nedenlerle; birçok genel amaçlı program, dinamik analizleri, statik analizler için hazırlanmış modeli sınırlandırarak gerçekleştirir.

Bilgisayarların ve programların sınırlarını zorlayabilen matematiksel modellerde bu kaçınılmaz olarak görülmektedir. Yaygın bir yöntem olarak, bileşenleri hesaplanamadığı için sıkıştırılmış kütle matrisi esas alınıp; dinamik denklemde sorun çıkarmaması için rijitlik ve sönüm matrisleri kütle matrisine uyarlanır.

Şekil 3.3'te tek katlı, üç açıklıklı bir düzlemsel çerçeve sistemi ve sisteme ait düğüm noktası serbestlikleri görülmektedir. Söz konusu sistemin gerçekçi analizlerinin yapılabilmesi için gerekli minimum serbestlik sayısı 12 dir. Statik analiz için sistem pozitif diyagonal, simetrik, kare bant matris olan rijitlik matrisi görüntüsü Şekil 3.4'te sunulmuştur. Sistem matrislerinin bant genişliği, modelleme ve numaralandırmaya bağlıdır. Dinamik analiz yapılması durumunda, kütle ve sönüm matrislerinin de denklemdeki yerini doğru olarak alabilmesi için aynı ebatlarda olması gerekmektedir.



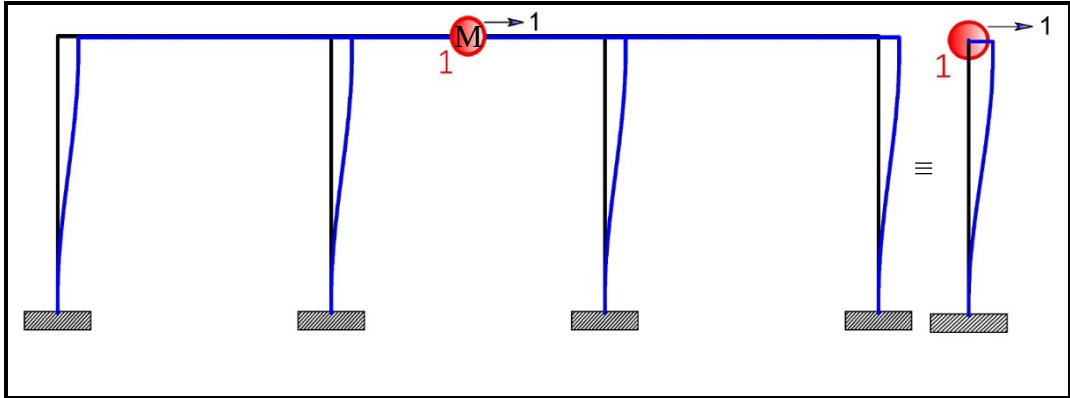
Şekil 3.3: Statik analizde serbestlikler ve düğüm noktası yer değiştirme bileşenleri.

$K_{1,1}$	$K_{1,2}$	$K_{1,3}$	$K_{1,4}$								
	$K_{2,2}$	$K_{2,3}$	$K_{2,4}$	$K_{2,5}$							
		$K_{3,3}$	$K_{3,4}$	$K_{3,5}$	$K_{3,6}$						
			$K_{4,4}$	$K_{4,6}$	$K_{4,6}$	$K_{4,7}$					
				$K_{5,5}$	$K_{5,6}$	$K_{5,7}$	$K_{5,8}$				
					$K_{6,6}$	$K_{6,7}$	$K_{6,8}$	$K_{6,9}$			
						$K_{7,7}$	$K_{7,8}$	$K_{7,9}$	$K_{7,10}$		
							$K_{8,8}$	$K_{8,9}$	$K_{8,10}$	$K_{8,11}$	
								$K_{9,9}$	$K_{9,10}$	$K_{9,11}$	$K_{9,12}$
									$K_{10,10}$	$K_{10,11}$	$K_{10,12}$
										$K_{11,11}$	$K_{11,12}$
											$K_{12,12}$

Şekil 3.4: Statik analizde sistem rijitlik matrisi görüntüsü.

3.1.2. Konsantre Kat Kütlesi ve Kayma Çerçevesi Varsayımı

Konsantre kat kütlesi ve kayma çerçevesi varsayımı ile analiz yapılması durumunda, söz konusu statik modele karşılık gelen kütle matrisi ile dinamik denklemin genel çözümü imkansızdır. Serbestlik bileşenlerinin etkileşiminin hesaba katılmamış olması nedeniyle sistem kütle matrisi diagonal bir matris olmaktadır. Ancak tüm serbestlikler hesaba katıldığında pozitif diagonal bir matris olmadığı için determinantı sıfırdır. Şekil 3.5'te, Şekil 3.3'te verilen örneğin konsantre kat kütlesi ve kayma çerçevesi varsayımı ile eşdeğer modeli gösterilmektedir. Şekil 3.6'da ise 12×12 elemanlı ve mevcut varsayımla elde edilebilen sistem kütle matrisinin görüntüsü (sistem rijitlik matrisine karşılık gelen terimlerle) sunulmaktadır. Tek kütle bileşeni yatay serbestliklere paylaştırılmaktadır. Düşey ve açısal serbestliklere karşılık herhangi bir terim bulunmamaktadır. Çözümeyen bu denklem genellikle konsantre kat kütlesi ve kayma çerçevesi varsayımına uymak için tek serbestlikli bir sistemmiş gibi tanımlanmaktadır. Çözümü gerçekleştirebilmek amacıyla, kütle matrisindeki belirsiz terimlere tekabül eden satır ve sütunlar yok edilmekte, rijitlik matrisi zorunlu olarak bu varsayıma uyarlanmaktadır. Sistem yaygın olarak kullanılan konsantre kat kütlesi, kayma çerçevesi ve benzeri varsayımlarla analiz edildiğinde, tek katlı olması nedeniyle yalnızca bir kütle ve bir rijitlik bileşenine sahip olmaktadır. Bu durumda dinamik analiz modeli ve kütle matrisi görüntüsü Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da görüldüğü gibi olmaktadır.



Şekil 3.5: Konsantre kat kütlesi ve kayma çerçevesi eşdeğer modeli.

M/4												
	0											
		0										
			M/4									
				0								
					0							
						M/4						
			SİMETRİK				0					
								0				
									M/4			
										0		
											0	

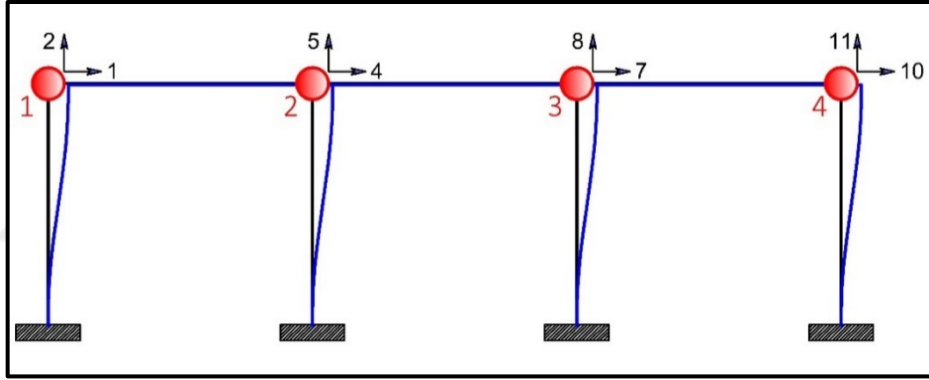
Şekil 3.6: Konsantre kat kütlesi ve kayma çerçevesi varsayımında sistem kütle matrisi görüntüsü.

Çözümü gerçekleştirebilmek için rijitlik matrisinin kütle matrisine göre uyarlanması durumunda, yatay elemanların en azından eğilme rijitlikleri zorunlu olarak göz ardı edilmiş olur. Eğilme ve eksenel rijitlikleri sonsuz olan elemanlar olarak işleme dahil edilirler. Düşey elemanlar için ise, özellikle eğilme rijitlikleri yatay elemanlara kıyasla daha büyük olan yapısal sistemlerde eğilme etkisi belirleyici olmakta ve gerçek durum yansıtamamaktadır. Diğer bir yaklaşım, yatay eleman (kiriş) kesit tesirleri ve dağılımları kolon uç kuvvetlerinden elde edilmiş sonuçlar kullanılarak geriye dönük çözümle elde edilmesidir. Bu durumda etkileşim göz önüne alınmadan elde edilmiş olan kolon uç kuvvetlerinden elde edilen dağılım da yanlış olacaktır. Tüm bu etkilere ilave olarak deprem etkisinin düşey ve açılmal bileşenlerinin hesaba katılmamış olması, analizi ve tasarımı gerçekte ilgisi olmayan sonuçlara yönlendirebilmektedir. Düşey elemanlardaki eksenel etkiler de gerçekçi olmayıp, düşey deprem etkisinin bu modelde hesaba katılması mümkün değildir.

Bu varsayımlar altında dinamik çözüm mümkün ve hatta son derece pratiktir, ama gerçekçi sonuçlar vermez. Söz konusu varsayımlarla, sistem rijitlik ve kütle matrislerinin bileşenleri $K_{1,1}$ ve $M_{1,1}$ olarak hesaba katılmaktadır. Sistem matrisleri pozitif diyagonal olma şartını sağlamaktadır. Daha da öteye kütle matrisinin diyagonal matris olması nedeniyle Eigen gibi bir yöntemle dinamik denklemi çözmek kolaydır, sadece diyagonal üzerindeki terimlerden oluşan matrisin evriği, bu sıfırdan farklı terimlerin bire bölünmesiyle elde edilebilmektedir (Chopra, 1995; Topçu, 2014). Bazı durumlarda, daha iyi bir varsayım olarak, tüm sistem kütleleri düğüm noktalarında, ancak yalnızca doğrusal bileşenleri ile ve konsantre kütleler olarak tanımlanmaktadır.

3.1.3. Konsantre Düğüm Noktası Kütleleri ve Kayma Çerçevesi Varsayımı

Bu varsayımda sistem kütlelerinin düğüm noktalarında tanımlanmış olması nedeniyle Şekil 3.7’de görüldüğü gibi yatay elemanlardaki eksenel davranışın yanı sıra düşey elemanlardaki rijitlikler oranındaki paylaşım kısmen de olsa göz önüne alınabilmektedir. Bir önceki varsayıma kıyasla daha iyi olmasına rağmen farklı sorunlar vardır. Örneğin yatay elemanların eğilme rijitlikleri formülasyonda hala sonsuz olarak hesaba katılmaktadır. Bu nedenle yatay elemanlardaki eğilme ve kayma davranışın yanı sıra düşey elemanlardaki eksenel davranış da doğru değildir. Diğer taraftan kütlelerin açısıl bileşenlerinin formülasyonda olmaması nedeniyle, rijitlik ve kütle bileşenleri hala uyumsuzdur ve genel çözüm mümkün değildir. 12×12 ebatlarındaki sistem rijitlik matrisi ile 8×8 ebatlarındaki sistem kütle matrisinin dinamik denklemde kullanılması mümkün değildir.



Şekil 3.7: Konsantre düğüm noktası kütleleri ve doğrusal bileşenler.

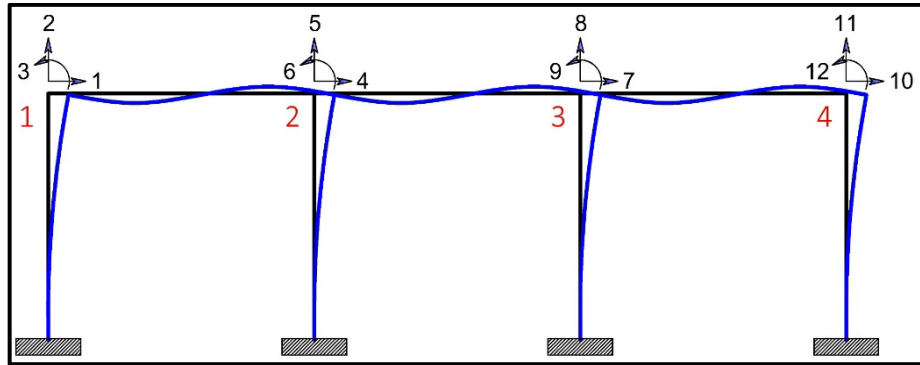
Çözüm olarak yine rijitlik matrisinin uyarlanması düşünülebilir. Yalnızca 8 serbestliğin, yani yalnızca doğrusal serbestliklerin hesaba katılması durumunda; kiriş eğilme rijitlikleri sonsuz olarak hesaba katılacağı için bu varsayım da gerçek davranışı yansıtmayacaktır. Ayrıca kirişte eğilme olmaması nedeniyle 2, 5, 8, 11 numaralı düşey serbestliklerin yük ve kütle değerleri de formülasyonda doğru dağılımı gösterecek şekilde hesaba dahil olmayacaktır. Kütle matrisinin rijitlik matrisine uyarlanması durumunda ise çözüm imkânsızdır. Bu durumda kütle matrisi Şekil 3.8’de görüldüğü üzere pozitif diyagonal şartını sağlamamaktadır. Determinantı sıfırdır (Ill Condition) ve dinamik denklemin çözümü yapılamaz.

$M_{1,1}$											
	$M_{2,2}$										
		0									
			$M_{4,4}$								
				$M_{5,5}$							
					0						
						$M_{7,7}$					
			SİMETRİK				$M_{8,8}$				
								0			
									$M_{10,10}$		
										$M_{11,11}$	
											0

Şekil 3.8: Konsantre düğüm noktası kütleleri (yalnızca doğrusal bileşenler) varsayımında sistem kütle matrisi görüntüsü.

3.1.4. Konsantre Düğüm Noktası Kütleleri (Tüm Bileşenler)

Bu varsayımda, gerek sistem rijitlik matrisi, gerekse sistem kütle matrisi ve sönüm matrisi uyumludur. Gerekli minimum serbestlikler Şekil 3.9’da görüldüğü üzere hesaba katılmıştır. Matrisler, simetrik ve pozitif diagonal matrislerdir (Şekil 3.10).



Şekil 3.9: Konsantre düğüm noktası kütleleri (tüm bileşenler).

Rijitlik matrisi modellemeye bağlı olarak değişen bir bant genişliğine sahiptir. Sistem kütle matrisi ise diagonal matristir. Dinamik denklemin makul sonuçlar verebilecek çözümü mümkündür. Ancak iki ayrı problem gündeme gelmektedir. Bunlardan ilki, açısıl bileşenlere karşılık gelen deprem etkisidir. Diğeri ise; dinamik analizde, yapısal elemanlardaki gerek kesit tesirleri dağılımlarının, gerekse şekil değiştirme formülasyonlarında eğilme etkileri ile eksenel etkilerin ilişkilendirilememesidir. Bir başka anlatım tarzıyla; sistem rijitlik matrisinde yalnızca diagonal terimlerin, yani $M_{i,i}$ terimlerinin olması, herhangi bir $M_{i,j}$ teriminin bulunmamasıdır.

$M_{1,1}$											
	$M_{2,2}$										
		$M_{3,3}$									
			$M_{4,4}$								
				$M_{5,5}$							
					$M_{6,6}$						
						$M_{7,7}$					
			SİMETRİK				$M_{8,8}$				
								$M_{9,9}$			
									$M_{10,10}$		
										$M_{11,11}$	
											$M_{12,12}$

Şekil 3.10: Konsantre düğüm noktası kütleleri (tüm bileşenler) ve sistem kütle matrisi görüntüsü.

3.1.5. Yayılı Yükler ve İlgili Yayılı Kütleler (Tüm Bileşenler)

Mevcut çalışmada bu yöntem kullanılmakta ve önerilmektedir. Statik analiz sistem rijitlik matrisi ile dinamik analizde kullanılacak sistem kütle matrisi tamamen uyum içerisinde. Bir başka deyişle gerek statik, gerekse dinamik analizlerde aynı rijitlik matrisi kullanılmaktadır. Konsantre yüklere karşılık konsantre kütleler, yayılı yüklere karşılık yayılı kütleler bulunmaktadır.

$M_{1,1}$	$M_{1,2}$	$M_{1,3}$	$M_{1,4}$								
	$M_{2,2}$	$M_{2,3}$	$M_{2,4}$	$M_{2,5}$							
		$M_{3,3}$	$M_{3,4}$	$M_{3,5}$	$M_{3,6}$						
			$M_{4,4}$	$M_{4,6}$	$M_{4,6}$	$M_{4,7}$					
				$M_{5,5}$	$M_{5,6}$	$M_{5,7}$	$M_{5,8}$				
					$M_{6,6}$	$M_{6,7}$	$M_{6,8}$	$M_{6,9}$			
						$M_{7,7}$	$M_{7,8}$	$M_{7,9}$	$M_{7,10}$		
			SİMETRİK				$M_{8,8}$	$M_{8,9}$	$M_{8,10}$	$M_{8,11}$	
								$M_{9,9}$	$M_{9,10}$	$M_{9,11}$	$M_{9,12}$
									$M_{10,10}$	$M_{10,11}$	$M_{10,12}$
										$M_{11,11}$	$M_{11,12}$
											$M_{12,12}$

Şekil 3.11: Yayılı yükler, ilgili yayılı kütleler (tüm bileşenler): önerilen ve çalışmada kullanılan yönteme göre sistem kütle matrisi görüntüsü.

Dinamik analizlerde, özellikle kolonlara ait zati yüklere yayılı kütleler hem doğrusal hem de açısal bileşenlerle devreye girmektedir. Bu durumda sistem kütle matrisi de rijitlik matrisinde

olduğu gibi pozitif diyagonal, simetrik bant matristir ve boyutları rijitlik matrisiyle aynıdır (Şekil 3.11).

Bu bilgilerden yola çıkılarak; çalışmada iki adet yöntem izlenmiştir, bu yöntemler A ve B olarak gruplandırılmış ve aşağıda ayrı kısımlarda tarif edilmiştir.

3.2. GEREÇLER

3.2.1. Yöntem A

Bu adımda bir köprü modeli SAP2000 programı kullanılarak hazırlanmıştır. Ancak bilgisayar kapasitesinin sınırlı oluşu, program işletim sistemi uyumsuzluğu vb. nedenlerle bu analizin bütün hatalardan arındırıldığı iddia edilemez. Mekanizma sistem problemiyle karşılaşılması durumunda denenmiş tüm varyasyonlarda her an sorun çıkabilir. Programın kapalı bir kutu olması ve yazılımın ticari amaçlı bir program olması sebebiyle program koduna müdahale edilememektedir. SAP2000'in bilinmeyen çözme kapasitesinin sınırlı oluşu, formülasyonlarında varsayımların bulunması gibi olumsuzluklar da mevcuttur. Dolayısıyla yapılan çalışmada tek bir programa bağlı kalınmak yerine Yöntem B'nin kullanılması tercih edilmiştir.

3.2.2. Yöntem B

Bu yöntemde program sıfırdan oluşturulmuştur. Yüksek sayıda (modele göre bazen birkaç milyon) bilinmeyen çözme kapasitesine sahip, algoritması gereği çok hızlı ve çift hassaslıklı sayılarla çalışan programın eleman kütüphanesi, denklem çözme opsiyonları, statik analiz modülleri gibi bazı modüller daha önce farklı amaçlar için geliştirilmiş olan TUNAL, NK, FEM gibi programların modüllerini bazı uyarlamalarla paylaşmaktadır. Karşılaştırmalarda kullanılan SAP2000 programında 7 haneye kadar işlem yapılabilirken, hazırlanan programda 24 haneye çıkılabilmektedir. Rijitlik ve kütle matrislerinin inverse=evriğinin alınması durumunda rijitlik ve kütle matrislerinin bozulup bozulmadığı kontrol edilmektedir. Programlar hususunda yurt dışına olan bağımlılığı ortadan kaldırma, tez kapsamında geliştirildiği için tam kontrolün sağlanması, programın geliştirilebilir, değiştirilebilir, amaca uygun hale getirilebilir olması, yüksek hassaslıktaki sayılarla işlem gerçekleştirebilmesi mekanizma bir sistemde SAP2000'in kontrolsüz olarak koyduğu fiktif rijitliklerin, tez kapsamında geliştirilen programda kontrollü olarak ve gerektiği durumlarda kullanılabilmesi gibi avantajlar da mevcuttur.

Bu fiktif rijitlikler şu şekilde açıklanabilir; statik olarak dengede olan sistemlerin rijitlik matrisinin boyutları serbestlik derecesi = degree of freedom (D.O.F.) kadardır. Bu sayı zaman zaman milyonları bulabilmektedir. Rijitlik matrisinin özellikleri; kare matris olması, simetrik olması, pozitif diyagonale sahip olması ve bant matris olması şeklinde sıralanabilir.

$K_{i,i}$ = i vektörüne uygulanan birim deplasmana karşılık, i vektörüne karşılık gelen kuvvettir. Bu değerın sıfır veya negatif olması mümkün değildir. Diyagonal terimlere tekabül eden $K_{i,i}$ terimlerinin statik açıdan belirli ve dengede olan sistemlerde mutlaka pozitif olması gereklidir. Herhangi bir terimin bu şartı sağlamaması durumunda matris “ill condition” bir matristir. Bu matrisin determinantı sıfırdır. Böyle bir matrisin inverse = evriği matematiksel olarak alınamaz. Bu durum mekanizma = labil olarak adlandırılır, dengede olmayan sistemlerde mutlaka oluşur ve araştırılması gereken konu da bu mekanizma sistemler üzerine kurulmaktadır.

Statik yükler altında dahi mekanizma (labil) olan sistemlerin günümüz teknolojisinde çözüm imkânı bulunmamaktadır ve çözümün neredeyse pratik olarak imkânsız olduğu bile söylenebilir. Bu nedenledir ki, düşey etki altında bu tür davranışlar ne dinamik kitaplarında ne de yönetmeliklerde yeterince ele alınmamıştır. Araştırmanın kaçınılmaz olması ve viyadüklerdeki bu hareketin neredeyse tamamının bu etkiye bağlı olması nedeniyle son zamanlarda bu konu üzerinde çalışmalar başlamıştır. Tüm bu çalışmalar sınırlı, genellikle hazır programların varsayımlı olarak kullanıldığı, başlangıç aşamasındaki çalışmalardır.

Mekanizma oluşması halinde fiktif yayların kullanılması ve iteratif analizler kaçınılmazdır. Düşey yükler ve atalet kuvvetlerine rağmen yukarı (yer çekimine ters yönde) bir modun araştırılması karmaşık ve işlem hacmi oldukça fazla iteratif çalışma gerektirmektedir, bu nedenle nonlinear analiz yapılmamıştır. Nonlinear analiz yapılması durumunda tarafsız eksenin yer değiştirmesi simetrik olmayan kesitlerde davranış kontrolünün ve özellikle betonarme sistemlerde detay etkilerin çalışmayı çözümsüz hale getirme ihtimali bulunmaktadır.

Mevcut tez kapsamında, gerek A planında bahsedildiği gibi hazır programlar devreye sokularak, gerekse B planındaki amaca uygun programlar genişletilip devreye sokularak bu davranışın etkileri araştırılmaya çalışılmıştır.

B planında geliştirilen bilgisayar programının aşamaları:

- ✓ Girdi verisinde jenerasyon opsiyonları oluşturularak kullanıcıya kolaylık sağlanmıştır. Kullanıcı, minimum bilgiyi girdi verisinden alarak sonlu eleman analizi için gerekli olan veriyi kendi oluşturabilmektedir.
- ✓ Bu verilerin kontrol kısmı tüm diğer programlarda olduğu gibi zordur, bu nedenle veriler görsel ortam oluşturabilmek amacıyla programdan AutoCAD'e aktarılabilmekte, hazırlanan program AutoCAD ile entegre çalışabilmektedir.
- ✓ Programın dinamik analiz opsiyonları bulunmaktadır ve bu dinamik analiz opsiyonları son derece kapsamlıdır.

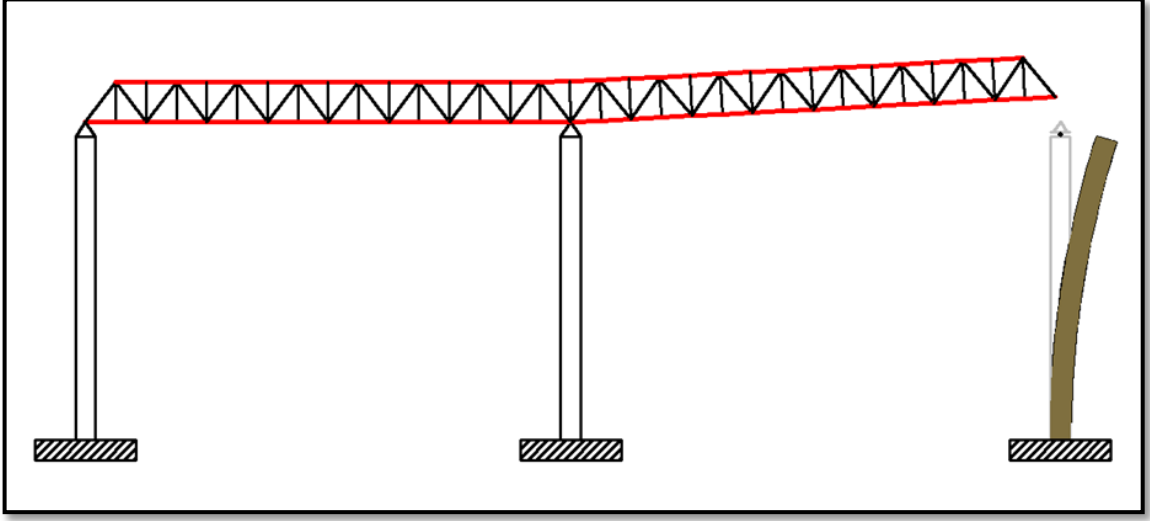
3.3. YÖNTEMLER

Çalışma yöntemi parametre etkisini ön plana çıkartan bir yöntem değildir. Davranış ve sebep-sonuç ilişkilerinin araştırıldığı bir yöntemdir, sabit bir sistem geometrisi ve/veya veya malzeme özellikleri ile sınırlandırılmamıştır. Düşey etkilerin en belirgin görülebileceği yapı türü olması sebebiyle inceleme yapısı türü olarak köprüler tercih edilmiştir. İkinci etkilerin göz önünde bulundurulacağı şekilde lineer statik analizi yapılmıştır.

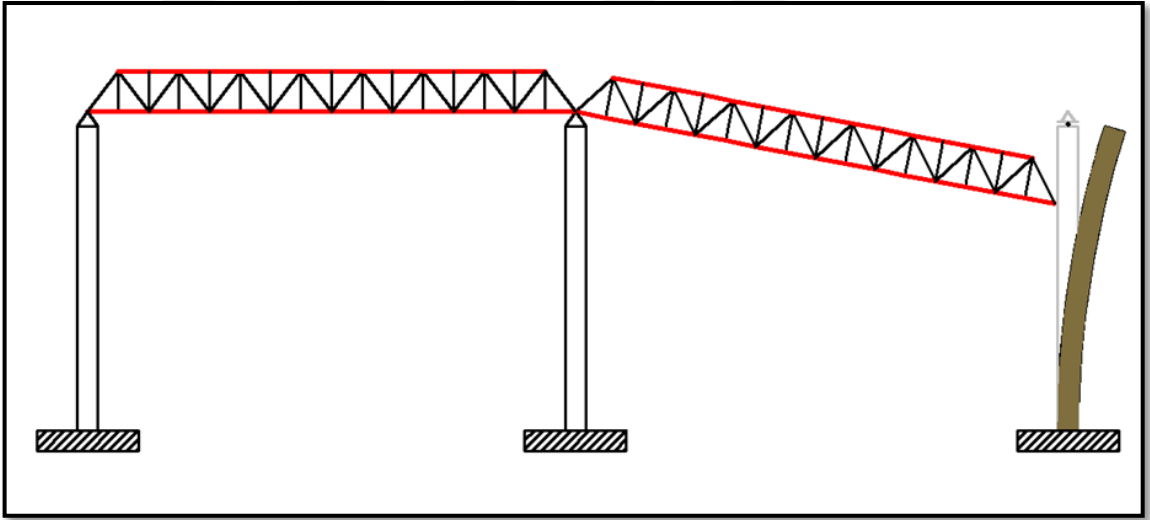
Benzer şekilde; mevcut deprem kayıtları kullanılarak yapılan analizlerle yapının davranışını araştırmak, yalnızca belirlenmiş bir yapının belirlenmiş bir deprem altındaki davranışı için sınırlı bir fikir verebilir. Bu nedenle göçme koşullarının oluşması için gerekli şartlar ve bu şartlara neden olabilecek deprem parametrelerinin araştırılması çok daha gerçekçi bir fikir verecektir. Kullanılan deprem kayıtları, köprü analizi yapıldıktan sonra en fazla tehlike arz eden periyoda karşılık gelen uygun depremler arasından seçilmiştir.

3.3.1. Düşey Deprem Etkisi

Düşey deprem etkisi altında gövdenin ayrı, ayakların ayrı 1. moda girmesi ihtimali bulunmaktadır. Uçtaki köprü ayağının 1 mod etkisinde pozitif yatay eksende hareket etmesi, gövdenin ise düşey eksende pozitif eksende hareket etmesi sonucu gövde yerinden çıkabilmekte, tersinir harekette ise tekrar yerine oturamamaktadır. Bu durumun da etkenlerden biri olabileceği düşünülmektedir. Düşey depremin dengedeki sistem üzerinde etkisi Şekil 3.12'de, mekanizma sistem üzerinde etkisi Şekil 3.13'te görülmektedir.



Şekil 3.12: Düşey deprem etkisi (sistem dengede).



Şekil 3.13: Düşey deprem etkisi (sistem mekanizma).

Mekanizma olan sistem 3.2. GEREÇLER başlığında açıklandığı üzere gerek fiktif küçük rijitlikler tanımlanarak ve/veya gerekse iteratif analizlerle incelenmeye çalışılmıştır. Yapısal eleman modellerinin farklı davranışları ve farklı modları araştırılmıştır.

Gerçekte analizi yapılacak yapısal sistemin çok fazla sayıda kütle ve deplasman bileşenleri vardır. Özellikle açısal kütle bileşenleri standart analizlerde göz önüne alınmamaktadır. Yalnızca doğrusal kütle bileşenlerinin alınması durumunda gerçek davranış yansıtılmamakta, kütle matrisi son derece basit bir şekilde yalnızca diyagonal terimlerin değer aldığı basit bir

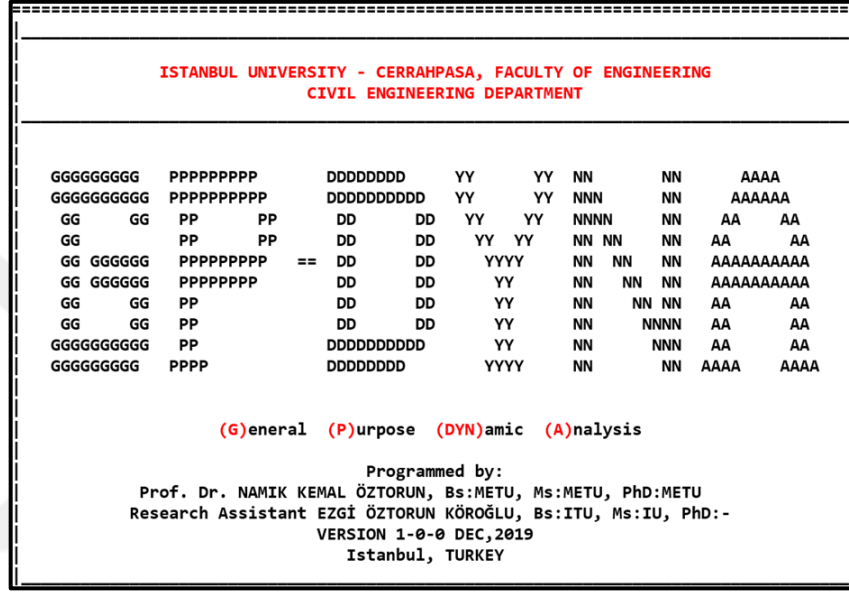
matrise dönüşmektedir. Geliştirilen bilgisayar programında her düğüm noktasında 3 doğrusal, 3 açılal kütle bileşeni; yani her düğüm noktasında 6 kütle bileşeni göz önüne alınacaktır. Bu durumda, kütle matrisinin yalnızca diyagonal elemanlarda değer almış bir matris veya eşdeğer bir vektörle tanımlanması doğru değildir. Böyle bir matrisin inverse = evriğinin alınması da diyagonal matrise göre çok daha kapsamlıdır. Diyagonal matriste evriği diyagonaldeki terimlerin 1'e bölünmesi, bunda ise matematiksel hesaplamayla elde edilmektedir. Bu nedenle davranışın çok daha gerçekçi ve kapsamlı bir şekilde analizi mümkün olacaktır.

3.4. GP-DYNA PROGRAMI

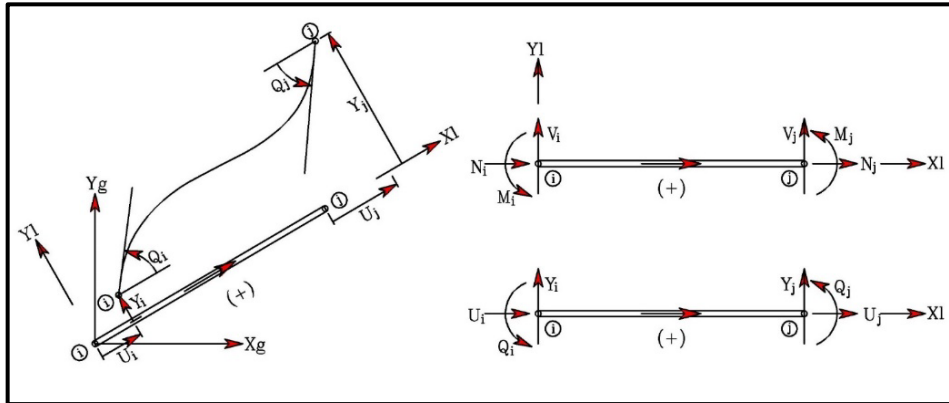
GP-DYNA programında iki ayrı denklem çözüm opsiyonu ve zaman tanım alanında nümerik integrasyonları gerçekleştirebilmek amacıyla iki ayrı yöntem kullanılmıştır. İlave olarak izolatör ve benzeri elemanların gerek eksenel, gerek kayma gerekse eğilme etkilerindeki değişimlerin sisteme etkilerini araştırabilmek amacıyla otomatik olarak seri çözümleri gerçekleştirebilen opsiyonlarla donatılmıştır. Yayılı kütlelerin etkisiyle elde edilebilen ve diyagonal dışı elemanları da içeren kütle matrisinin her terimine yük fonksiyonu ve katsayısı tanımlama opsiyonları kodlanmıştır. Tüm sistem parametreleri, sistem ve eleman bazında tüm matrisler gerek lokal gerekse global koordinatlarda dönüşüm matrisleri ile birlikte görülebilmekte ve gerektiğinde müdahale edilebilmektedir. Yani, yalnızca giriş verilerini alıp karşılığında çözüm sonuçlarını veren kapalı bir program değildir. Analiz esnasında tüm ara işlemler görülebilmekte ve gerektiğinde müdahale edilebilmektedir. Program FORTRAN Power Station Derleyicisi kullanılarak geliştirilmiş, öz değer, öz vektör, matris operasyonları ve benzeri modüllerin hazırlanmasında hiçbir hazır kütüphane fonksiyonu kullanılmamış, tamamen kontrol altında bağımsız modüller geliştirilmiştir. İki ayrı denklem çözüm opsiyonunun kullanılmasının amacı; hem milyonlara varan bilinmeyen çözme kapasitesini, hem de bu matrislerin görülebilirliğini sağlamaktır.

Birinci opsiyon "Geliştirilmiş Cholesky" olarak adlandırılmış olan ve sistem matrislerinin yalnızca sıfır olmayan değerlerinin simetri de göz önüne alınarak bir vektöre depolandığı ve işlemlerin bu vektör üzerinde gerçekleştirildiği bir yöntemdir. Yöntem daha önce farklı amaçlar için geliştirilmiş olan TUNAL, NK, FEM gibi programlarının tanıtımında anlatılmıştır. İkinci denklem çözüm yöntemi ise yalnızca ara işlemleri gösterebilmek amacıyla kodlanmış olan klasik kare matris operasyonlarını içermektedir. 500 bilinmeyene kadar olan sistemlerde tercihe bağlı olarak kullanılmakta ve tüm sistem matrislerini verebilmektedir. Şekil 3.14'te başlangıç

görüntüsü ve Şekil 3.15'te çubuk elemanı uç kuvvetleri ve yer değiştirmeler için kullanılan pozitif işaret notasyonu verilmiştir. Dinamik integrasyon yöntemi olarak iki ayrı yöntem kullanılmıştır. Birinci yöntem Newmark yöntemi olarak bilinen iki parametrelili yöntemdir (Chopra, 1995) İkinci yöntem ise Wilson yöntemi olarak bilinen üç parametrelili yöntemdir (Chopra, 1995; SAP2000). Birincisinden tamamen bağımsız ve programa özel opsiyonlarla desteklendiği için akış şeması yeniden düzenlenmiştir.



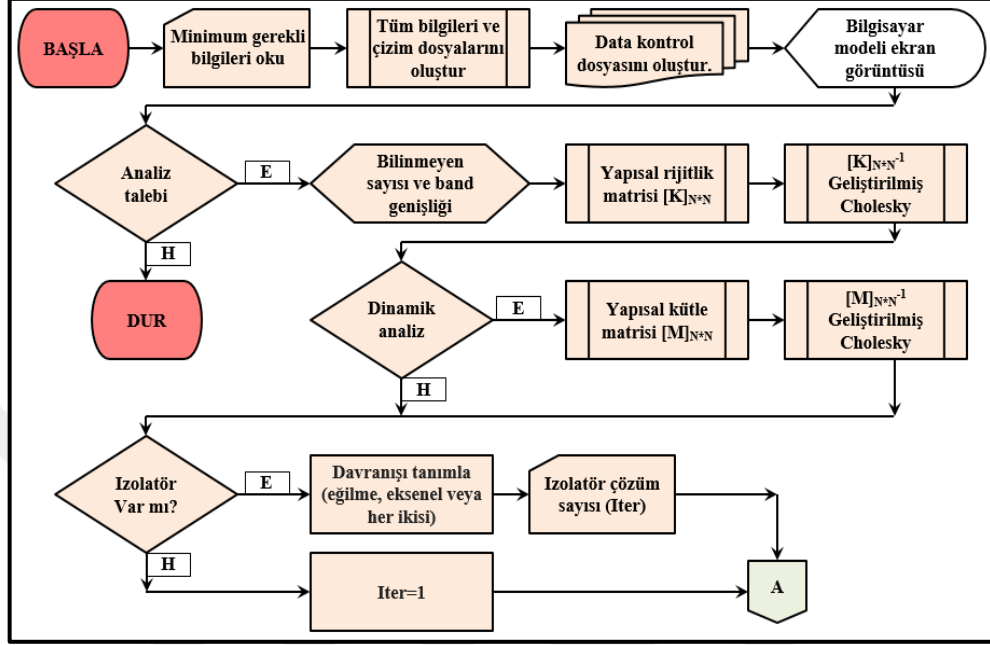
Şekil 3.14: GP-DYNA başlangıç görüntüsü.



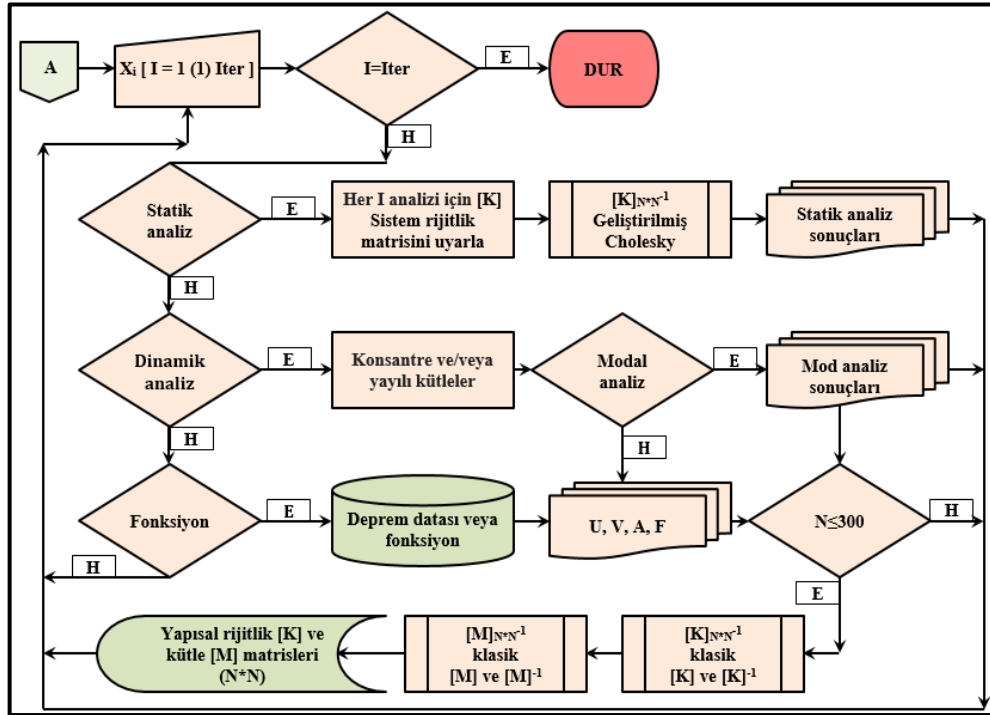
Şekil 3.15: Çubuk elemanı uç kuvvetleri ve yer değiştirmeler için pozitif işaret notasyonu.

Geliştirilen GP-DYNA bilgisayar programının makro akış şeması Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de görülmektedir. Mevcut çalışmada ikinci yöntem olarak bahsedilen üç katsayılı adım adım integrasyon yönteminin akış şeması ise Şekil 3.18 - Şekil 3.19 - Şekil 3.20' de sunulmuştur ve

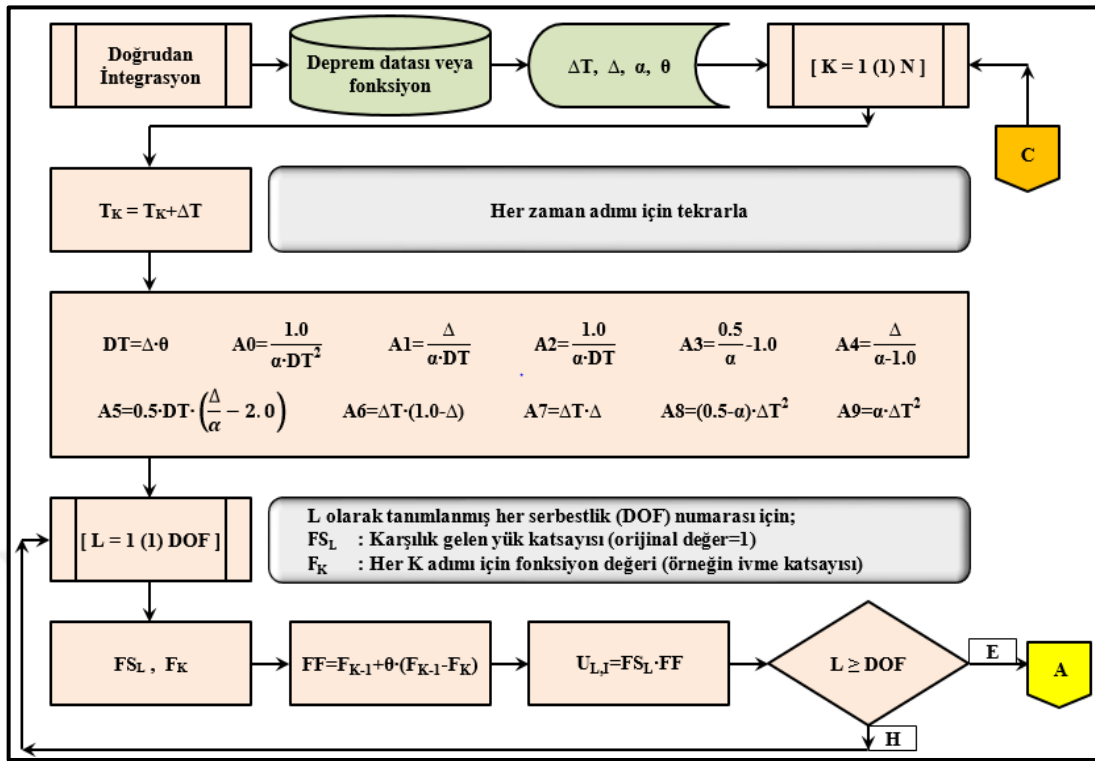
Wilson Yöntemi olarak kullanılmaktadır. İki katsayılı birinci yönteme ait bilgiler (Newmark Yöntemi) Chopra (1995)'da mevcut olup, akış şeması gösterilmemiştir.



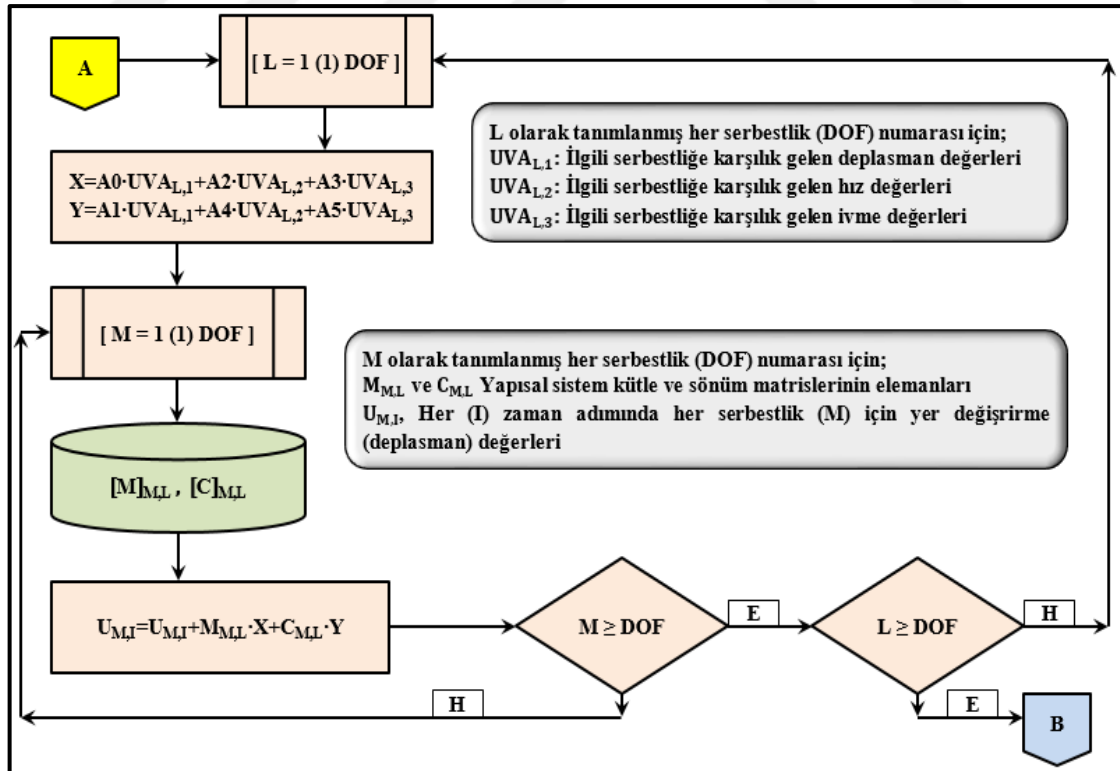
Şekil 3.16: GP-DYNA Bilgisayar programının makro akış şeması (a).



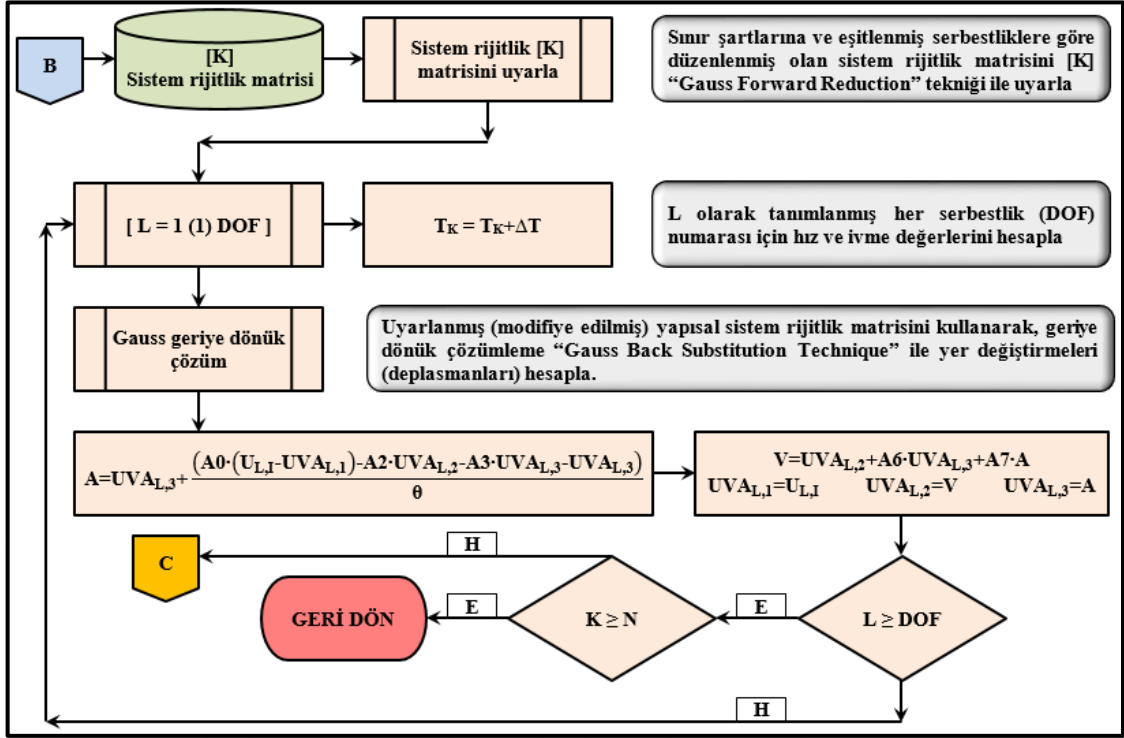
Şekil 3.17: GP-DYNA Bilgisayar programının makro akış şeması (b).



Şekil 3.18: GP-DYNA ikinci integrasyon modülünün akış şeması (a).



Şekil 3.19: GP-DYNA ikinci integrasyon modülünün akış şeması (b).



Şekil 3.20 GP-DYNA ikinci integrasyon modülünün akış şeması (c).

GP-DYNA programı analizleri üç ayrı denklem çözücü (solver) kullanarak gerçekleştirmektedir. Çözücülerin bir veya daha fazlası analizde kullanılan opsiyonlara göre devreye girmektedir:

1. Geliştirilmiş Cholesky:

Profesyonel ve standart çözücüdür. Statik analizlerde mutlaka kullanılmaktadır. Problem konusu dinamik analiz olsa dahi statik analizler mutlaka gerçekleştirilmektedir. Problemin konusunun dinamik analizle ilgili olması durumunda, bütün kütle değerleri zati ve/veya tanımlı diğer yüklerden otomatik olarak elde edilmektedir. Ayrıca ilave kütle tanımlanabilir. Söz konusu otomatik opsiyon kütle, rijitlik ve sönüm matrislerindeki olası uyumsuzlukları ortadan kaldırmaktadır. Bilinen Cholesky yöntemine ilave olarak; rijitlik matrisinin diyagonal terimlerinin yanı sıra simetrik yarıdaki tüm terimlerin sıfırdan farklı değerde olan elemanları çift hassaslıklı (double precision) bir reel sayı vektörüne depolanmaktadır. Bu elemanların orijinal matristeki konumları bir başka deyişle adresleri (yani indisleri) ise bir tamsayı vektöründe depolanmaktadır. Bu durumda bilinmeyen çözme kapasitesi çok büyük sayılara ulaşmaktadır. Sabit diskin devreye girmesi ile bu sayı, bilgisayarın kapasitesiyle sınırlı olmakta ve milyonlara ulaşmaktadır. 32 Bit bilgisayarlarda dahi hassaslık en az 16 hane ve üç sayılı

eksponentle sınırlıdır. Bu nedenle matematiksel işlemlerde yuvarlama hataları (round-off error) minimuma indirilmiştir.

2. Klasik ters (invers) alma yöntemi:

Matrislere müdahale edilmesinin gerekli olduğu durumlarda ya da tüm ara işlemlerin kontrol edilebilir ve görülebilir olmasının gerekli olduğu durumlarda devreye girmektedir. Gerek eleman, gerekse sistem bazında tüm rijitlik, sönüm, kütle matrisleri, yer değiştirmeler vs. global ve lokal koordinat sistemlerinde görülebilmekte ve müdahale edilebilmektedir. Ancak bu seçenek için bir sınırlama getirilmiştir. Programın mevcut hali ile bu sayı 350 bilinmeyenle sınırlıdır. Zaten bu matrislerin dosyada görülmesi veya yazdırılması çok fazla sayıda sayfa gerektireceği için 350 sayısı bile çok fazladır. Ancak ileride bu sayıyı artırmak gerekirse programın yeniden “compile” edilmesi kaydıyla son derece pratiktir.

3. Dinamik analizlerde adım adım integrasyon seçeneği için uyarlanmış matrisler.

Dinamik denklemlerin her adımda hızlı analizi için özellikle sistem rijitlik matrisi uyarlanarak yalnızca her adımda kullanılacak katsayılarla dönüştürülmekte ve bir vektöre depolanmaktadır. Gauss üst üçgen “upper triangle” yöntemine benzer bir operasyonla ön hazırlık aşamasından sonra her adıma ait işlemler son derece hızlı ve hassas bir biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Jacobi analizlerinde denklemlerin çözümünde Invers uygulaması rijitlik ve kütle matrislerinin bant genişliğine bağlıdır. Herhangi bir elemanın kesit ve/veya malzeme özelliklerinin değiştirilmesi durumunda, sistem matrisleri tekrar hesaplanmayıp, matrislerin yalnızca etkilenen elemanları düzenlenmektedir. Özellikle modal analizlerde kullanılabilecek izolatör türü elemanlarda optimum özelliklerin belirlenebilmesi için kullanılan yöntem son derece hızlı ve hassas analizlerle sonuca ulaşmaktadır. Söz konusu elemanlar eğilme, eksenel ve kompozit etkiler için tanımlanabilmektedir.

3.4.1. Çalışma Şekli Hakkında Genel Bilgi

3.4.2. Modüller

Genel amaçlı bir sonlu elemanlar programının alt yapısını oluşturmak üzere ilk olarak iki ayrı modül geliştirilmiştir.

1. Minimum bilgi girişi ile ana program için gerekli tüm bilgileri oluşturan bir data oluşturma “Generation” programı
2. Oluşturulan bilgilerin kontrolünü görsel olarak sağlamak amacıyla AutoCAD programına bilgi aktaran modül.

Birinci modülün amacı kullanıcıya kolaylık sağlayan, minimum bilgi girişi ile büyük dataların oluşturulmasını gerçekleştiren bir modüldür. Ana programın (analizleri gerçekleştiren sonlu elemanlar programı) hazırlanması aşamasında bu modülün ana programla entegre olarak çalışması sağlanacaktır. Herhangi bir sonlu elemanlar bilgisayar programı için verilmesi gereken bilgiler özetlenmiştir.

Yapısal sistemin geometrisi

Yapısal sistemin geometrisi, makul çözüm sonuçları verebilecek ve gerek analize gerekse programın yapısına uygun minimum sayıda düğüm noktasının ve bu noktaların koordinatlarının global bir koordinat sistemine göre tanımlanması ile gerçekleştirilebilir. Söz konusu noktaların sayısı analiz edilecek yapısal sisteme bağlı olarak büyük rakamlara (binlerce) ulaşabilir. Tüm bu bilgilerin teker teker tanımlanması son derece zaman alıcı, değiştirilmesi ve güncellenmesi zor ve hata yapma olasılığı yüksektir. Belli bir sistematığe sahip olan nokta bilgilerinin minimum bilgi ile örneğin sistematığı olan noktaların ilk ve son nokta tanımlanması ile tamamı oluşturulabilir. Bu durumda çok sayıda noktanın (binlerce) tanımlanması yerine iki noktaya ve nokta sistematığına ait bilgilerin verilmesi ile veri hazırlamak daha kolay ve hata yapma riskini minimuma indirmek mümkün olacaktır. Ayrıca düzeltme, değiştirme, güncelleme gibi işlemler son derece pratik bir biçimde gerçekleştirilebilmektedir.

Sonlu Eleman bilgileri

Sonlu eleman kütüphanesinde çok sayıda eleman türü bulunur (örneğin iki ve/veya üç boyutlu kafes, kafes kiriş, ereve, düzlem gerilme, düzlem deformasyon, eğilme plağı, kabuk eleman, kübik eleman, sınır şartı elemanları ve benzeri). Elemanlara ait bilgiler genellikle geometrik bilgileri yanı sıra kesit ve malzeme özellikleri ile tanımlanır. Sonlu elemanlar modelini oluşturan elemanların konumları “member connectivity” olarak tanımlanan, elemanların ilgili düğüm noktalarına bağlantılarını tanımlayan bilgilerdir. Ayrıca elemanların kesit ve malzeme özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu işlemler farklı her eleman türü için ayrı ayrı

yapılmalıdır. Çok sayıda (binlerce) elemanın söz konusu olabileceği göz önüne alındığında, yukarıda bahsedilmiş olan yapısal sistem bilgilerine ilave olarak oldukça yoğun ilave bir bilgi girişi söz konusu olmaktadır. Bu nedenle elemanların konumlarının belirtilmesi aşamasında, belli bir sistematığı olan tüm elemanların tek tek tanımlanması yerine yine bir oluşturma (generation) opsiyonu ile tanımlanmasında büyük yarar vardır. Daha da öteye elemanların kesit ve malzeme özellikleri farklı olsa dahi bu işlem gerçekleştirilebilir. Bu durumda sistematığı olan eleman grubu içerisinde ilk ve son elemanın numaraları, bu elemanların bağlanacakları düğüm noktalarının numaraları ve gruba ait kesit ve malzeme özelliklerinin tip numaralarının tanımlanması yeterli olacaktır. Bu durumda malzeme özellikleri ve kesit özelliklerinin de her eleman için tanımlanmasına gerek kalmayacaktır. Ancak tip numaralarına ait kesit ve malzeme özelliklerinin (enkesit geometrik bilgileri, Elastik modülü Poisson oranı vs.) ayrı bir grupta numara verilerek tanımlanması gerekmektedir.

Sınır şartı bilgileri

Yapısal sistemin “BC” Boundary Conditions olarak adlandırılan sınır şartı bilgilerinin ve mesnetlenme koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Sınır şartı bilgileri hareketi tamamen ya da kısmen engellenmiş düğüm noktaları olarak tanımlanabildiği gibi, zorlanmış deplasmanlara (yer değiştirmelere) maruz bırakılmış düğüm noktaları da olabilir. Bu noktaların sayısı genellikle fazla olmaz. Ancak sayının yüksek rakamlara ulaşmasının da mümkün olabileceği göz önünde bulundurularak, bu grup için de otomatik oluşturma “generation” opsiyonunun bulunmasında yarar vardır.

Yükler

Yapısal sisteme etki eden yükler düğüm noktalarında konsantre (noktasal) yükler olarak etki edebildiği gibi, yapısal elemanların açıklığı boyunca belli nokta ve/veya bölgelerde de etki edebilir. Açıklık yükleri de ilk etapta düğüm noktalarına formülasyona uygun olarak taşınır. Söz konusu yükler kütsel yükler, merkezkaç etkisi, yüzey yükleri vs. olabilir. Elemana ait yükler (yayılı ve/veya konsantre yükler) elemanlarla birlikte, düğüm noktası yükleri ise ilgili noktalarda tanımlanır. Farklı yük bilgilerine ait sayının az olması durumunda bu bilgiler tek tek verilebilir. Ancak sayının yüksek rakamlara ulaşmasının da mümkün olabileceği göz önünde bulundurularak, bu grup için de otomatik oluşturma “generation” opsiyonunun bulunmasında yarar vardır.

Kesit ve malzeme özellik bilgileri

Farklı her eleman türü için analizde gerek duyulan bilgiler farklıdır. Bu nedenle her eleman türü için olası kesit ve malzeme özelliklerin gruplandırılmasında ve numaralandırılmasında yarar vardır. Yukarıdaki bilgiler bir sonlu eleman analizi için mutlaka gerekli olan bilgilerdir. Bu bilgilerin programa aktarılması oldukça zaman alıcıdır. Otomatik oluşturma “generation” opsiyonları bu işlemi büyük ölçüde pratikleştirecektir. Birinci program olan “GENERATION” programı bu amaçla aşağıdaki işlemleri gerçekleştirmek üzere hazırlanmıştır. Programın kullanımı sunulmaktadır.

3.4.2.1. “GENERATION” OTOMATİK DATA OLUŞTURMA PROGRAMININ YAPISI ve KULLANIMI

Söz konusu program bir adet bilgi giriş dosyası (input data file) ve çok sayıda bilgi çıkış (output data file) dosyası açmaktadır. Bilgi giriş dosyası genel amaçlı bir sonlu elemanlar programı için gerekli olan bilgileri, modüler bir bilgi giriş yapısı ile okumaktadır. Bilgi giriş dosyasındaki bilgi gruplarından (bloklardan) oluşan grupların önceliği veya sıralaması yoktur. Tüm bilgiler serbest formatlı olarak ve gerekirse otomatik oluşturma “generation” opsiyonları ile birlikte kullanılabilir. Programın ilk modülü “GENERATE” öncül çalışmayı gerçekleştiren ve minimum veriyi kullanarak detaylı verileri oluşturan modül hakkında bilgi verilmişti. Analizler esnasında birden fazla kez kullanılacak olan detaylı verileri ilgili dosyalara sıralı bir biçimde oluşturarak yazmaktadır. Ayrıca AutoCAD gibi yazılımlarla da etkileşimli olarak çalışacak şekilde gerekli verileri hazırlayarak görsel kontrolleri sağlamaktadır. Oluşturulan dosyalar geçici dosyalar olup analizler gerçekleştikten sonra (isteğe bağlı olarak) silinmektedir. Dosya isimleri problemin adı ile ilişkilendirilmiş olup uzantıları sabittir. Dosyalar probleme ve kullanılan sonlu elemanlar türlerine göre açılmaktadır. “DATA” adlı örnek bir problem için oluşturulan geçici dosyalar Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: “GENERATE” modülü “DATA” adlı örnek bir problem için geçici dosyalar.

DATA-1-NODES	Genelleştirilmiş ve sıralanmış düğüm noktaları, koordinatlar. Noktalar arasında eşleştirilmiş serbestlik bileşenleri (köle bileşenler)
DATA-2-BOUND	Sınır koşulları, mesnet, elastik mesnet, zorlanmış yer değiştirme bilgileri
DATA-3-LOADS	Düğüm noktası yükleri ve ek kütleler (konsantre)
DATA-4-FRAME	Çerçeve elemanlarının bağlantıları, özellik grupları, yayılı kütleler
DATA-5-FRPRO	Çerçeve elemanlarının kesit ve malzeme özellik bilgileri
DATA-6-TRUSS	Kafes kiriş elemanlarının bağlantıları, özellik grupları, yayılı kütleler
DATA-7-TRPRO	Kafes kiriş elemanlarının kesit ve malzeme özellik bilgileri
DATA-8-MODEL	Bilgisayar modelini görsel olarak sunan dosyalar

Geçici dosyaları oluşturan “GENERATE” adlı modül, ana modül olan ve analizleri gerçekleştirmek- sonuçları sunmak üzere birçok alt modülden oluşan “DYNA” yı çalıştırmaktadır. Program geliştirildikçe yeni sonlu eleman türleri ve yeni modüller ilave edilebilmektedir. “DYNA” iki ve üç boyutlu analizleri gerçekleştirebilmek amacıyla genel amaçlı olarak başlatılmıştır ve mevcut hali ile 60’a yakın alt modülden oluşmaktadır. Söz konusu modüller farklı parametrelerle yüzlerce kez devreye girebilmekte, iteratif analizlerle bu sayı katlanmaktadır. Programa özel Geliştirilmiş Cholesky Yöntemi kullanılmakta ve yapısal sistem rijitlik ve/veya kütle matrisinin evriği (invers) hesaplanırken, matrisin simetrik yarısındaki terimlerin ve diyagonal terimlerin yalnızca sıfırdan farklı olan değerleri çift hassaslıklı bir reel sayı vektöründe oluşturulmaktadır. Adres bilgileri ise aynı sayıda elemana sahip bir tam sayı vektöründe tutulmaktadır. Evrik işlemleri bu iki vektör üzerinde gerçekleştirilmekte ve çözülebilecek denklem sayısı milyonlarla ifade edilebilmektedir. Yöntem, daha önce farklı amaçlar için geliştirilmiş olan NK, FEM, TUNAL, gibi programların tanıtımında anlatılmıştır. Her iki matrise de analiz esnasında müdahale etmek mümkündür. İsteğe bağlı olarak 500 bilinmeyene kadar olan problemlerde gerek sistem rijitlik matrisi gerekse sistem kütle matrisi, kare matris biçiminde ve onar kolonluk bloklar halinde yazdırılabilmektedir. Çözüm esnasında gerekli tüm indisli değişkenler (lokal ve global koordinatlarda eleman kütle ve rijitlik matrisleri, yük ve deplasman vektörleri) görülebilmekte,

müdahale edilebilmekte ve yazdırılabilmektedir. “DYNA” modülü “DATA” adlı örnek bir problem için dosyalar Tablo 3.2’deki gibidir.

Tablo 3.2: “DYNA” modülü “DATA” adlı örnek bir problem için dosyalar.

DATA-ANALIZ	Verilerin kontrol amaçlı geri sunumu (Eco Check) ve düğüm noktası yer değiştirmeleri, eleman bazında kesit tesiri dağılımları gibi standart analiz sonuçları
DATA-MATRIX	Sistemi oluşturan tüm yapısal elemanların gerek lokal, gerekse global koordinat sisteminde kütle ve rijitlik matrisleri, yer değiştirme ve uç kesit tesiri (yük) vektörleri, ilgili düğüm noktaları ve serbestlik numaraları (dof)
DATA-SYSTEM	Yapısal sisteme ait gerek lokal, gerekse global koordinat sisteminde kütle ve rijitlik matrisleri, bu matrislerin tersi, ilgili serbestlik numaraları, Öz-vektörler, Öz-değerler, ilgili mod şekilleri, frekans ve periodlar
DATA-DISP	Statik analizlerde deformasyonlar
DATA-SHAPE	Dinamik analiz mod şekilleri

Aşağıda bilgi giriş data dosyası ve yapısı anlatılmaktadır. Her bilgi grubu ilk üç harfi sabit olan bilgi grubu tanımlama blokları ile çalışmaktadır. Program bilgi grubunun içeriğini başlıktaki ilk üç karakter sayesinde belirlemektedir. Blokların isimleri aşağıda sunulmaktadır.

“**NOD**” düğüm noktası bilgileri ve otomatik data oluşturma opsiyonu “**GEN**”

“**TRU**” kafes kiriş “truss” elemanı bilgileri ve otomatik data oluşturma opsiyonu “**GEN**”

“**FRA**” çerçeve “frame” elemanı bilgileri ve otomatik data oluşturma opsiyonu “**GEN**”

“**FRP**” çerçeve “frame” elemanı kesit-malzeme özelliği bilgileri

“**TRP**” kafes kiriş “truss” elemanı kesit-malzeme özelliği bilgileri

“**LOA**” düğüm noktası konsantre yük bilgileri ve otomatik data oluşturma opsiyonu “**GEN**”

“**BOU**” sınır şartı bilgileri ve otomatik data oluşturma opsiyonu “**GEN**”

“**END**” Bilgi girişini sonlandıran komut

Yapısal sistemlerin tanımlandığı bilgi giriş bloklarını açıklamak üzere, örnek sistemlerden biri olarak seçilen ve 3.5.4 başlığında anlatılan Karakaya Demiryolu Köprüsü’nün bir adet açıklığı kullanılmıştır. Düğüm noktaları, kafes kiriş ile çerçeve elemanlar, konsantre yük, sınır şartları

gibi bilgiler; bu 21 düğüm noktası, 20 kafes kiriş elemanı ve 19 çerçeve elemana sahip tek açıklık üzerinden anlatılmış olup, analizlerde köprüye ait üç açıklık kullanılmıştır. Mevcut analizde 5 farklı özellikte 74 çerçeve elemanı, 2 farklı özellikte 57 kafes kiriş elemanı kullanılmıştır. Tüm sistemin matematiksel modeli 78 düğüm noktasından oluşmaktadır.



Şekil 3.21: GP-DYNA bilgi giriş modüllerinde kullanılan Karakaya Köprüsü'ne ait görüntü (Sarıcı ve diğ., 2011).

“NOD” DÜĞÜM NOKTASI BİLGİ GİRİŞ BLOĞU

Blok data adını tanımlayan açıklamada ilk üç karakterin “**NOD**” olması gerekmektedir. Opsiyonel olarak herhangi bir otomatik oluşturma işlemine gereksinim duyulması durumunda, gerekli oluşturma bilgileri “GEN” karakterleri ile başlayan bir ilave başlık altında tanımlanmaktadır. Aşağıda bir örnek bölüm sunulmuştur.

NODAL POINTS

1, 0 ,10 :1 numaralı nokta ve bu noktanın yatay ve düşey eksenlerdeki koordinatları
 11,100,10 :11 numaralı nokta ve bu noktanın yatay ve düşey eksenlerdeki koordinatları
 12,5 ,18 :12 numaralı nokta ve bu noktanın yatay ve düşey eksenlerdeki koordinatları
 21,95 ,18 :21 numaralı nokta ve bu noktanın yatay ve düşey eksenlerdeki koordinatları

GENERATE ADDITIONAL POINTS

1 ,11,1 :Başlangıç noktası Bitiş noktası ve Nokta numarası artış sayısı
 12,21,1

Yukarıdaki blokta “**NOD**” karakterleri, bir düğüm noktası veri grubunun başladığını göstermektedir. Satırdaki diğer karakterlerin herhangi bir işlevi yoktur.

Bu başlıktan sonra ve başlığın hemen altında gerekli noktalar numaraları yanı sıra koordinatları verilecek şekilde ve her satırda bir noktaya ait bilgi olacak şekilde serbest formatla

yazılmaktadır. Her satırda üç sayı vardır. Birinci sayı düğüm noktası numarasını belirtir ve “INTEGER” yani TAM SAYI’ dır. Diğer iki sayı ise koordinatları tanımlamaktadır ve “REAL” yani REEL SAYI ‘dır. Program reel sayılarda nokta olmaması durumunu da kabul etmektedir. Her ne kadar örnekte tam sayı olarak yazılmış olsa da bu sayılar ondalıklı yani reel sayı olarak işlem görür. Nokta bilgilerinin verilmesinde herhangi bir öncelik veya sıralama yoktur. Bu satırlarda gerekli bilgi yazıldıktan sonra en az bir boşluk bırakılarak ihtiyaç duyulan (hatırlatma amaçlı) bazı notlar yazılabilir. Bu notların herhangi bir işlevi olmayacaktır. Bu veri bloğun içerisinde bütün noktalar tanımlanabilir. Ancak opsiyonel olarak yalnızca belirleyici noktalar tanımlandıktan sonra otomatik oluşturma opsiyonu kullanılabilir.

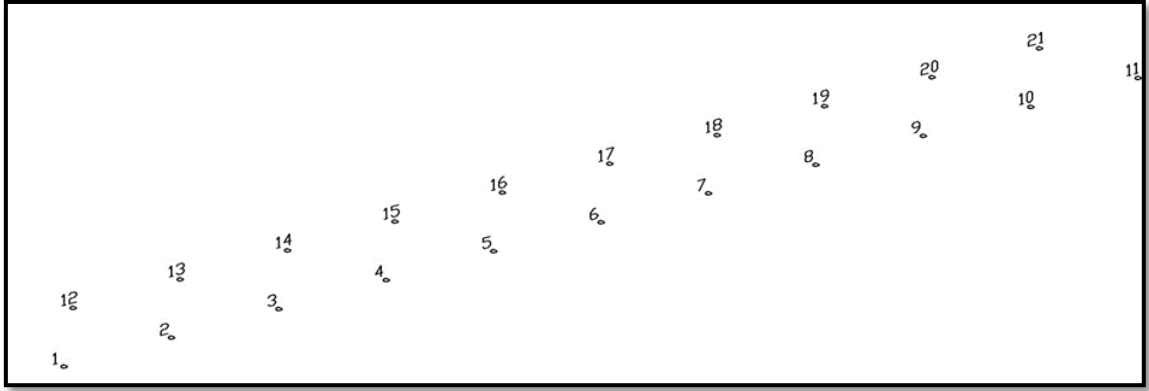
Otomatik oluşturma opsiyonunun kullanılması durumunda gerekli bilgiler, bu opsiyonun kullanılacağını belirten ve “**GEN**” karakterleri ile başlayan bir ilave başlık altında tanımlanmaktadır. Bu başlıktan sonra ve başlığın hemen altında, otomatik oluşturmaya esas teşkil edecek olan birinci noktanın numarası, bitiş noktasının numarası ve bu iki nokta arasında otomatik olarak oluşturulacak olan noktaların numaralarındaki artış sayısı verilecek şekilde ve her satırda bir “generation” için bilgi olacak şekilde serbest formatla yazılmaktadır. Her satırda üç adet “INTEGER” yani TAM SAYI vardır. Örneğin “**GEN**” karakterleri ile başlayan başlığın hemen altındaki satırda;

1 ,11,1

Başlangıç noktası 1, bitiş noktası 11 olmak üzere aradaki noktalar, nokta numaralarındaki artış 1 olmak kaydı ile (yani 2 - 10 numaralı noktalar) ve bu noktaların koordinatları otomatik olarak oluşturulmaktadır. Otomatik oluşturma bilgilerinin verilmesinde herhangi bir öncelik veya sıralama yoktur. Bu satırlarda gerekli bilgi yazıldıktan sonra en az bir boşluk bırakılarak ihtiyaç duyulan (hatırlatma amaçlı) bazı notlar yazılabilir. Bu notların herhangi bir işlevi olmayacaktır.



Şekil 3.22: Tanımlanan düğüm noktaları.



Şekil 3.23: Otomatik oluşturulan düğüm noktaları.

“TRU” KAFES KİRİŞ “TRUSS” ELEMANI BİLGİ GİRİŞ BLOĞU

Blok data adını tanımlayan açıklamada ilk üç karakterin “**TRU**” olması gerekmektedir. Opsiyonel olarak herhangi bir otomatik oluşturma işlemine gereksinim duyulması durumunda, gerekli oluşturma bilgileri “**GEN**” karakterleri ile başlayan bir ilave başlık altında tanımlanmaktadır. Aşağıda bir örnek bölüm sunulmuştur.

TRUSS MEMBERS WITH CONNECTIVITIES

1,1,12,1 :Sırasıyla eleman, 1. nokta, 2. nokta ve kesit-malzeme türü numaraları.

2,2,12,2

GENERATE ADDITIONAL TRUSS MEMBERS

1,2,1,1,10 :Eleman no, eleman artış, 1. nokta artış, 2. nokta artış, toplam eleman sayısı

2,2,1,1,10

Yukarıdaki blokta “**TRU**” karakterleri, kafes kiriş “TRUSS” elemanlarından oluşan bir veri grubunun başladığını göstermektedir. Satırdaki diğer karakterlerin herhangi bir işlevi yoktur.

Bu başlıktan sonra ve başlığın hemen altında, kafes giriş elemanlarının numaraları yanı sıra elemanın başlangıç ve bitiş düğüm noktalarının numaraları, kesit-malzeme türü numarası verilecek şekilde ve her satırda bir elemana ait bilgi olacak şekilde serbest formatla yazılmaktadır. Her satırda dört “INTEGER” yani TAM SAYI vardır. Birinci sayı eleman numarasını, ikinci sayı elemanın ilk düğüm noktası numarasını, üçüncü sayı elemanın son düğüm noktası numarasını, dördüncü sayı ise elemana atanacak olan kesit ve malzeme özelliklerine ait bilgilerin grup numarasını belirtir. Eleman bilgilerinin verilmesinde herhangi bir öncelik veya sıralama yoktur. Bu satırlarda gerekli bilgi yazıldıktan sonra en az bir boşluk bırakılarak ihtiyaç duyulan (hatırlatma amaçlı) bazı notlar yazılabilir. Bu notların herhangi bir işlevi olmayacaktır. Bu veri bloğun içerisinde bütün elemanlar tanımlanabilir. Ancak opsiyonel olarak yalnızca belirleyici elemanlar tanımlandıktan sonra otomatik oluşturma opsiyonu kullanılabilir.

Otomatik oluşturma opsiyonunun kullanılması durumunda gerekli bilgiler, bu opsiyonun kullanılacağını belirten ve “**GEN**” karakterleri ile başlayan bir ilave başlık altında tanımlanmaktadır. Bu başlıktan sonra ve başlığın hemen altında; otomatik oluşturmaya esas teşkil edecek olan kafes giriş elemanının numarası, oluşturulacak elemanların artış sayısı, oluşturulacak elemanların ilk noktalarının artış sayısı, son noktalarının artış sayısı, mevcut satır kapsamında toplam eleman sayısı verilecek ve her satırda bir “generation” için bilgi olacak şekilde serbest formatla yazılmaktadır. Her satırda beş adet “INTEGER” yani TAM SAYI vardır. Otomatik oluşturmaya esas teşkil edecek olan grubun ilk elemanına ait bilgiler “**TRU**” başlığı altındaki eleman listesinde mevcuttur. Örneğin “**GEN**” karakterleri ile başlayan başlığın hemen altındaki satırda

1,2,1,1,10 bilgisi ışığında;

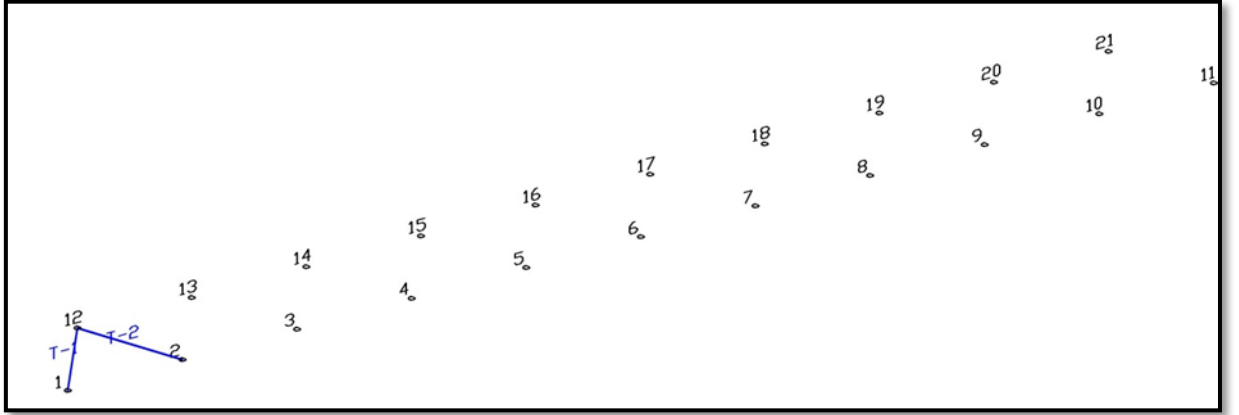
- Oluşturulacak kafes giriş elemanlarına ait ilk eleman numarası: 1
- Eleman artış sayısı: 2
- Birinci nokta (eleman başlangıç düğüm noktası) numarası artış sayısı: 1
- İkinci nokta (eleman bitiş düğüm noktası) numarası artış sayısı: 1
- Toplam eleman sayısı: 10

olduğu belirtilmiştir. Bu durumda aşağıdaki elemanlar ve bu elemanlara ait bilgiler aşağıda görüldüğü gibi otomatik olarak oluşturulacaktır.

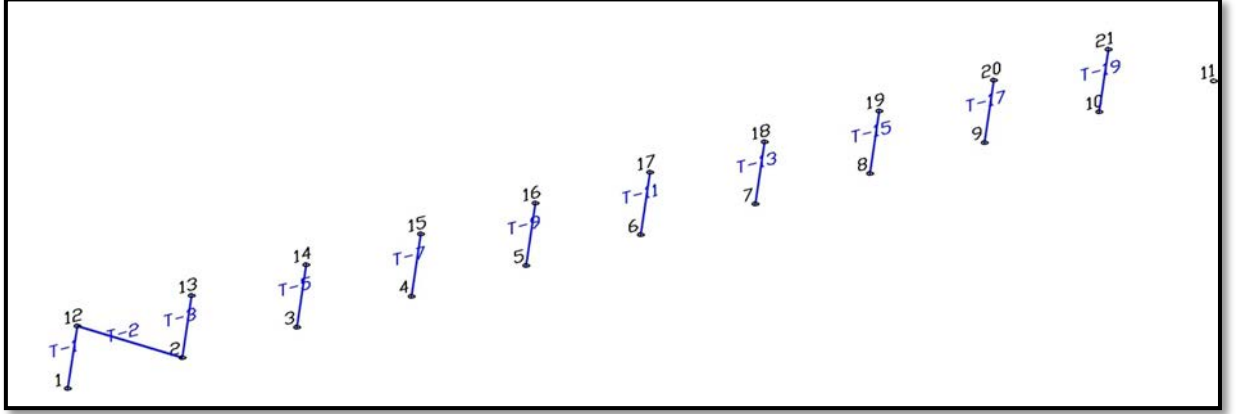
1 1 12 1 (mevcut bilgi)

3	2	13	1
5	3	14	1
7	4	15	1
9	5	16	1
11	6	17	1
13	7	18	1
15	8	19	1
17	9	20	1
19	10	21	1

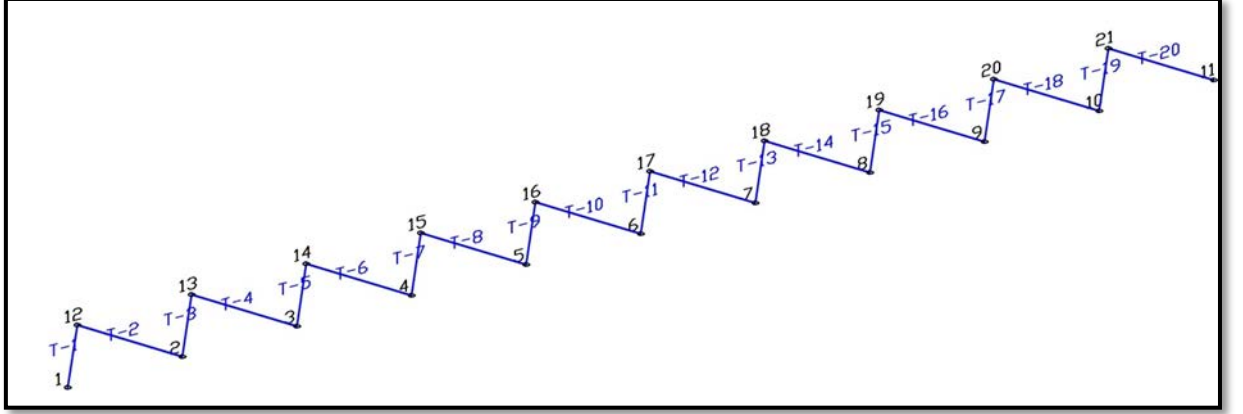
Otomatik oluşturma bilgilerinin verilmesinde herhangi bir öncelik veya sıralama yoktur. Bu satırlarda gerekli bilgi yazıldıktan sonra en az bir boşluk bırakılarak ihtiyaç duyulan (hatırlatma amaçlı) bazı notlar yazılabilir. Bu notların herhangi bir işlevi olmayacaktır.



Şekil 3.24: Tanımlanan kafes giriş elemanları.



Şekil 3.25: Otomatik oluşturulan kafes kiriş elemanları (ilk satır).



Şekil 3.26: Otomatik oluşturulan kafes kiriş elemanları (ikinci satır).

“FRA” ÇERÇEVE “FRAME” ELEMANI BİLGİ GİRİŞ BLOĞU

Blok data adını tanımlayan açıklamada ilk üç karakterin **“FRA”** olması gerekmektedir. Opsiyonel olarak herhangi bir otomatik oluşturma işlemine gereksinim duyulması durumunda, gerekli oluşturma bilgileri **“GEN”** karakterleri ile başlayan bir ilave başlık altında tanımlanmaktadır. Aşağıda bir örnek bölüm sunulmuştur.

FRAME MEMBERS WITH CONNECTIVITIES

1,1,2,1:Sırasıyla eleman, 1. nokta, 2. nokta ve kesit-malzeme türü numaraları.
11,12,13,2

GENERATE ADDITIONAL FRAME MEMBERS

1,1,1,1,10 :Eleman no, eleman artış, 1. nokta artış, 2. nokta artış, toplam eleman sayısı
11,1,1,1,9

Blokta “**FRA**” karakterleri, çerçeve “FRAME” elemanlarından oluşan bir veri grubunun başladığını göstermektedir. Satırdaki diğer karakterlerin herhangi bir işlevi yoktur. Bu başlıktan sonra ve başlığın hemen altında, çerçeve elemanlarının numaraları yanı sıra elemanın başlangıç ve bitiş düğüm noktalarının numaraları, kesit-malzeme türü numarası verilecek şekilde ve her satırda bir elemana ait bilgi olacak şekilde serbest formatla yazılmaktadır. Her satırda dört “INTEGER” yani TAM SAYI vardır. Birinci sayı eleman numarasını, ikinci sayı elemanın ilk düğüm noktası numarasını, üçüncü sayı elemanın son düğüm noktası numarasını, dördüncü sayı ise elemana atanacak olan kesit ve malzeme özelliklerine ait bilgilerin grup numarasını belirtir. Eleman bilgilerinin verilmesinde herhangi bir öncelik veya sıralama yoktur. Bu satırlarda gerekli bilgi yazıldıktan sonra en az bir boşluk bırakılarak ihtiyaç duyulan (hatırlatma amaçlı) bazı notlar yazılabilir. Bu notların herhangi bir işlevi olmayacaktır. Bu veri bloğun içerisinde bütün elemanlar tanımlanabilir. Ancak opsiyonel olarak yalnızca belirleyici elemanlar tanımlandıktan sonra otomatik oluşturma opsiyonu kullanılabilir. Otomatik oluşturma opsiyonunun kullanılması durumunda gerekli bilgiler, bu opsiyonun kullanılacağını belirten ve “**GEN**” karakterleri ile başlayan bir ilave başlık altında tanımlanmaktadır. Bu başlıktan sonra ve başlığın hemen altında; otomatik oluşturmaya esas teşkil edecek olan kafes giriş elemanının numarası, oluşturulacak elemanların artış sayısı, oluşturulacak elemanların ilk noktalarının artış sayısı, son noktalarının artış sayısı, mevcut satır kapsamında toplam eleman sayısı verilecek ve her satırda bir “generation” için bilgi olacak şekilde serbest formatla yazılmaktadır. Her satırda beş adet “INTEGER” yani TAM SAYI vardır. Otomatik oluşturmaya esas teşkil edecek olan grubun ilk elemanına ait bilgiler “**FRA**” başlığı altındaki eleman listesinde mevcuttur. Örneğin “**GEN**” karakterleri ile başlayan başlığın hemen altındaki satırda

1 ,1,1,1,10 bilgisi ışığında;

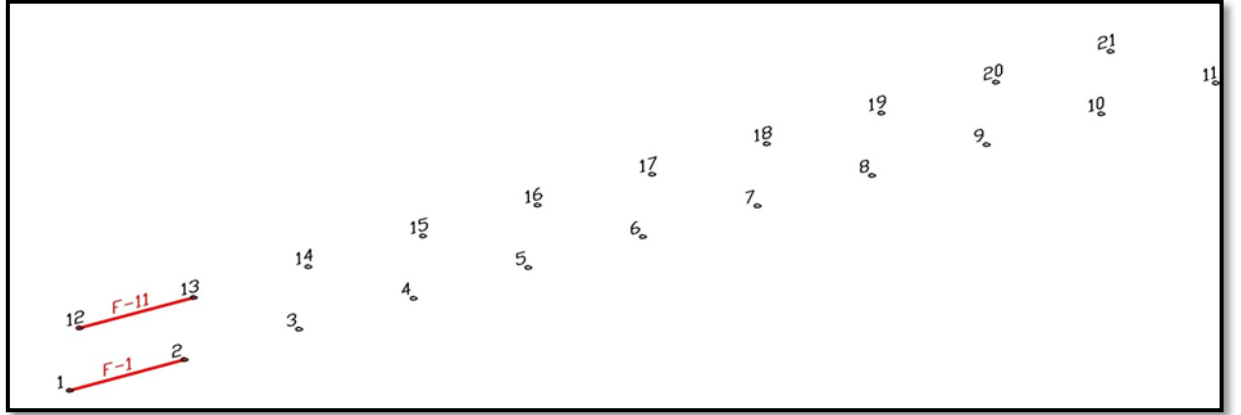
- Oluşturulacak kafes giriş elemanlarına ait ilk eleman numarası: 1
- Eleman artış sayısı: 1
- Birinci nokta (eleman başlangıç düğüm noktası) numarası artış sayısı: 1
- İkinci nokta (eleman bitiş düğüm noktası) numarası artış sayısı: 1
- Toplam eleman sayısı: 10

olduğu belirtilmiştir. Bu durumda aşağıdaki elemanlar ve bu elemanlara ait bilgiler otomatik olarak oluşturulacaktır.

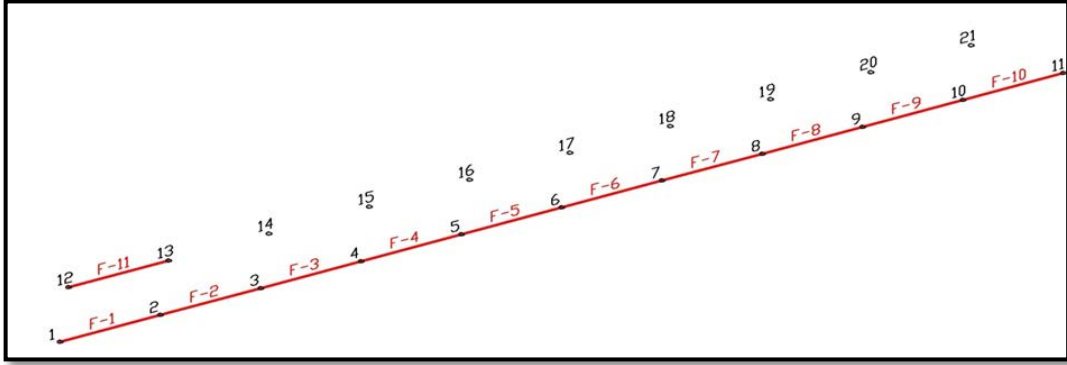
1 1 2 1 (mevcut bilgi)

2	2	3	1
3	3	4	1
4	4	5	1
5	5	6	1
6	6	7	1
7	7	8	1
8	8	9	1
9	9	10	1
10	10	11	1

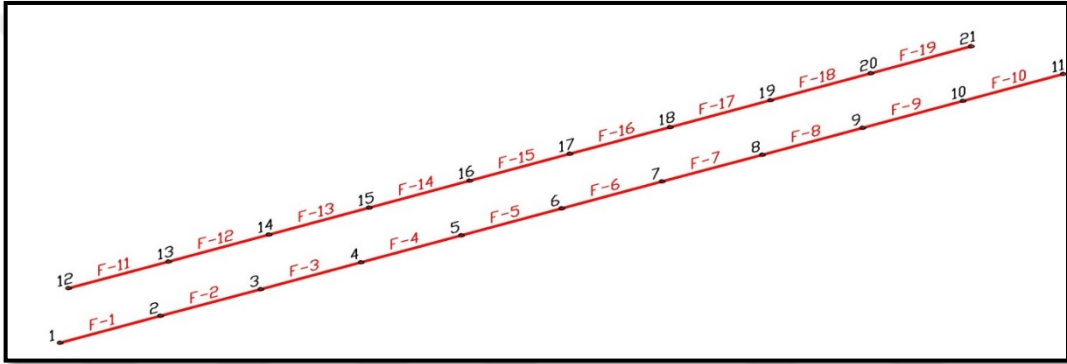
Otomatik oluşturma bilgilerinin verilmesinde herhangi bir öncelik veya sıralama yoktur. Bu satırlarda gerekli bilgi yazıldıktan sonra en az bir boşluk bırakılarak ihtiyaç duyulan (hatırlatma amaçlı) bazı notlar yazılabilir. Bu notların herhangi bir işlevi olmayacaktır.



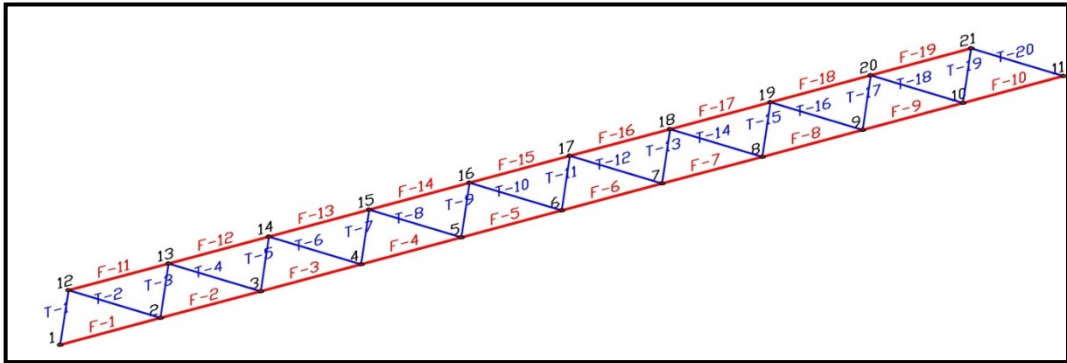
Şekil 3.27: Tanımlanan çerçeve elemanları.



Şekil 3.28: Otomatik oluşturulan çerçeve elemanları (ilk satır).



Şekil 3.29: Otomatik oluşturulan kafes kiriş elemanları (ikinci satır).



Şekil 3.30: Bilgisayar modelinin nokta ve elemanları.

“FRP” ÇERÇEVE “FRAME” ELEMANI KESİT-MALZEME ÖZELLİĞİ BİLGİ GİRİŞ BLOĞU

Blok data adını tanımlayan açıklamada ilk üç karakterin “**FRP**” olması gerekmektedir. Aşağıda bir örnek bölüm sunulmuştur.

FRP (FRAME MEMBER PROPERTIES)

1 0.01 0.00011, 200001 0.15,2.50 : N, A, I, E, ν , W
2 0.02 0.00021, 200002 0.25,7.85

Yukarıdaki blokta “**FRP**” karakterleri, çerçeve “FRAME” elemanlarında kullanılabilecek (mutlaka kullanılması gerekmez) kesit ve malzeme özelliklerine ait bilgileri içeren bir veri grubunun başladığını göstermektedir. Satırdaki diğer karakterlerin herhangi bir işlevi yoktur.

Bu başlıktan sonra ve başlığın hemen altında, her satırda bir adet çerçeve kesit ve malzeme özelliği grubunun numarasını takip edecek şekilde, enkesit alanı, enkesit atalet momenti, malzeme Elastisite Modülü, malzeme Poisson Oranı, çerçeve elemanı üzerindeki açıklık yükü (yük ve kütle için) bilgileri serbest formatla yazılmaktadır. Her satırda bir adet “INTEGER” yani TAM SAYI ve beş adet “REAL” yani REEL SAYI vardır. Program reel sayılarda nokta olmaması durumunu da kabul etmektedir. Satırdaki beş adet reel olması gereken sayının birimlerine uygun olarak tam sayı ile tanımlanması durumunda da bu sayılar ondalıklı reel sayı olarak işlem görür. Grup bilgilerinin verilmesinde herhangi bir öncelik veya sıralama yoktur. Bu satırlarda gerekli bilgi yazıldıktan sonra en az bir boşluk bırakılarak ihtiyaç duyulan (hatırlatma amaçlı) bazı notlar yazılabilir.

Çerçeve elemana ait bilgiler: kesit ve malzeme özelliği grubunun numarası (Integer) N, enkesit alanı (Real) A, enkesit atalet momenti (Real) I, malzeme Elastisite Modülü (Real) E, malzeme Poisson Oranı (Real) ν , çerçeve elemanı üzerindeki açıklık yükü (yük ve kütle için) (Real) W şeklindedir.

“TRP” KAFES KİRİŞ “TRUSS” ELEMANI KESİT-MALZEME ÖZELLİĞİ BİLGİ GİRİŞ BLOĞU

Blok data adını tanımlayan açıklamada ilk üç karakterin “**TRP**” olması gerekmektedir. Örnek bölüm sunulmuştur:

TRP (TRUSS MEMBER PROPERTIES)1 0.01 ,200001 0.15,2.50 : N, A, E, ν , W

2 0.02 ,200002 0.25,7.85

Yukarıdaki blokta “**TRP**” karakterleri, kafes kiriş “TRUSS” elemanlarında kullanılabilecek (mutlaka kullanılması gerekmez) kesit ve malzeme özelliklerine ait bilgileri içeren bir veri grubunun başladığını göstermektedir. Satırdaki diğer karakterlerin herhangi bir işlevi yoktur.

Bu başlıktan sonra ve başlığın hemen altında, her satırda bir adet kafes kiriş elemanı kesit ve malzeme özelliği grubunun numarasını takip edecek şekilde, enkesit alanı, malzeme Elastisite Modülü, malzeme Poisson Oranı, kafes kiriş elemanı üzerindeki yayılı yük (yük ve kütle için) bilgileri serbest formatla yazılmaktadır. Her satırda bir adet “INTEGER” yani TAM SAYI ve dört adet “REAL” yani REEL SAYI vardır. Program reel sayılarda nokta olmaması durumunu da kabul etmektedir. Satırdaki dört adet reel olması gereken sayının birimlerine uygun olarak tam sayı ile tanımlanması durumunda da bu sayılar ondalıklı reel sayı olarak işlem görür. Grup bilgilerinin verilmesinde herhangi bir öncelik veya sıralama yoktur. Bu satırlarda gerekli bilgi yazıldıktan sonra en az bir boşluk bırakılarak ihtiyaç duyulan (hatırlatma amaçlı) bazı notlar yazılabilir.

Kafes kiriş elemana ait bilgiler: kesit ve malzeme özelliği grubunun numarası (Integer) N, enkesit alanı (Real) A, malzeme Elastisite Modülü (Real) E, malzeme Poisson Oranı (Real) ν , kafes kiriş elemanı üzerindeki açıklık yükü (yük ve kütle için) (Real) W şeklindedir.

“LOA” DÜĞÜM NOKTASI KONSATRE YÜK BİLGİ GİRİŞ BLOĞU

Blok data adını tanımlayan açıklamada ilk üç karakterin “**LOA**” olması gerekmektedir. Opsiyonel olarak herhangi bir otomatik oluşturma işlemine gereksinim duyulması durumunda, gerekli oluşturma bilgileri “**GEN**” karakterleri ile başlayan bir ilave başlık altında tanımlanmaktadır. Aşağıda bir örnek bölüm sunulmuştur.

LOADS (NODAL LOADS AND ADDITIONAL MASS)12 0 -2.0 0 9.81 :N, F₁ 1. ekseninde yük, F₂ 2. ekseninde yük, M₃ 3. eksen etrafında moment, g
2 0 -0.9 0 9.81**GENERATE ADDITIONAL NODAL LOADS**12,21,1 :İlk nokta numarası, Son nokta numarası, Nokta artış sayısı
2,10,1

Verilen blokta “**LOA**” karakterleri, yapısal sisteme ait düğüm noktalarında tanımlanmak üzere konsantre (noktasal, tekil) yüklerden oluşan oluşan bir veri grubunun başladığını göstermektedir. Satırdaki diğer karakterlerin herhangi bir işlevi yoktur.

Bu başlıktan sonra ve başlığın hemen altında, her satırda bir düğüm noktasına ait yük (veya kütle) olmak üzere, düğüm noktasının numarası, yatay eksen yönünde doğrusal yük, düşey eksen yönünde doğrusal yük, düzleme dik eksen etrafında açısall yük (moment) ve son olarak yer çekimi ivmesi yada ivme tanımlanmaktadır. İvme parametresinin gerekirse tezin ileri aşamalarında farklı bileşenlerle tanımlanması planlanmaktadır. Bu aşamada her satırda bir adet “INTEGER” yani TAM SAYI ve üç adet “REAL” yani REEL SAYI vardır. Program reel sayılarda nokta olmaması durumunu da kabul etmektedir. Satırdaki üç adet reel olması gereken sayının birimlerine uygun olarak tam sayı ile tanımlanması durumunda da bu sayılar ondalıklı reel sayı olarak işlem görür. Düğüm noktalarına ait bilgilerinin verilmesinde herhangi bir öncelik veya sıralama yoktur. Bu satırlarda gerekli bilgi yazıldıktan sonra en az bir boşluk bırakılarak ihtiyaç duyulan (hatırlatma amaçlı) bazı notlar yazılabilir.

Burada; üzerinde yük ve/veya kütle tanımlanacak olan düğüm noktası numarası (Integer) N, yatay eksen yönünde doğrusal yük (Real) F_1 , düşey eksen yönünde doğrusal yük (Real) F_2 , düzleme dik eksen etrafında açısall yük (moment) (Real) M_3 , yer çekimi ivmesi yada ivme (Real) g olarak verilmiştir.

Bu veri bloğun içerisinde noktasal yükler tek tek tanımlanabilir. Ancak opsiyonel olarak yalnızca belirleyici noktalar tanımlandıktan sonra otomatik oluşturma opsiyonu kullanılabilir.

Otomatik oluşturma opsiyonunun kullanılması durumunda gerekli bilgiler, bu opsiyonun kullanılacağını belirten ve “**GEN**” karakterleri ile başlayan bir ilave başlık altında tanımlanmaktadır. Bu başlıktan sonra ve başlığın hemen altında, sırasıyla, otomatik oluşturmaya esas teşkil edecek olan ilk düğüm noktasının numarası, son düğüm noktasının numarası ve oluşturulacak noktalar için nokta numarası artış sayısı verilecek şekilde ve her satırda bir “generation” için bilgi olacak şekilde serbest formatla yazılmaktadır. Her satırda üç adet “INTEGER” yani TAM SAYI vardır.

Örneğin “**GEN**” karakterleri ile başlayan başlığın hemen altındaki satırda

12,21,1 bilgisi ışığında;

- İlk düğüm noktası numarası: 12
- Son düğüm noktası numarası: 21
- Nokta artış numarası: 1

olduğu belirtilmiştir. Bu durumda aşağıdaki elemanlar ve bu elemanlara ait bilgiler aşağıda görüldüğü gibi otomatik olarak oluşturulacaktır.

12 0 -2.0 0 9.81 (mevcut bilgi)

13	0.0000E+00	-2.0000E+00	0.0000E+00	9.8100E+00
14	0.0000E+00	-2.0000E+00	0.0000E+00	9.8100E+00
15	0.0000E+00	-2.0000E+00	0.0000E+00	9.8100E+00
16	0.0000E+00	-2.0000E+00	0.0000E+00	9.8100E+00
17	0.0000E+00	-2.0000E+00	0.0000E+00	9.8100E+00
18	0.0000E+00	-2.0000E+00	0.0000E+00	9.8100E+00
19	0.0000E+00	-2.0000E+00	0.0000E+00	9.8100E+00
20	0.0000E+00	-2.0000E+00	0.0000E+00	9.8100E+00
21	0.0000E+00	-2.0000E+00	0.0000E+00	9.8100E+00

Otomatik oluşturma bilgilerinin verilmesinde herhangi bir öncelik veya sıralama yoktur. Bu satırlarda gerekli bilgi yazıldıktan sonra en az bir boşluk bırakılarak ihtiyaç duyulan (hatırlatma amaçlı) bazı notlar yazılabilir. Bu notların herhangi bir işlevi olmayacaktır.

“BOU” SINIR ŞARTI BİLGİ GİRİŞ BLOĞU

Blok data adını tanımlayan açıklamada ilk üç karakterin “**BOU**” olması gerekmektedir. Opsiyonel olarak herhangi bir otomatik oluşturma işlemine gereksinim duyulması durumunda, gerekli oluşturma bilgileri “**GEN**” karakterleri ile başlayan bir ilave başlık altında tanımlanmaktadır. Aşağıda bir örnek bölüm sunulmuştur.

BOUNDARY CONDITIONS

1 1 1 1 0 0 0 0 0 0

11 1 1 1 0 0 0 0 0 0

GENERATE BOUNDARY CONDITIONS

1,11,3

Yukarıdaki blokta “**BOU**” karakterleri, yapısal sisteme ait düğüm noktalarında tanımlanmak üzere sınır şartı, elastik mesnet, zorlanmış yer değiştirme ve benzeri oluşan oluşan bir veri grubunun başladığını göstermektedir. Satırdaki diğer karakterlerin herhangi bir işlevi yoktur.

Bu başlıktan sonra ve başlığın hemen altında, her satırda bir düğüm noktasına ait sınır şartı bilgileri tanımlanmaktadır. Her satırda olması gereken bilgiler aşağıda özetlenmektedir.

1 1 1 1 0 0 0 0 0 :N, K_x, K_y, K_z, U_x, U_y, U_z, R_x, R_y, R_z

N, sınır şartı tanımlanacak olan düğüm noktası numarası (Integer) olmak üzere, K_x, K_y ve K_z sırasıyla yatay eksen yönünde, düşey eksen yönünde ve düzleme dik eksen etrafındaki serbestlikleri (1=deplasman tanımlı, 0=serbest) (Integer) ifade etmektedir. U_x ve U_y sırayla yatay ve düşey eksen yönünde doğrusal deplasmanları (yer değiştirme) (Real), U_z ise düzleme dik eksen etrafındaki açısız deplasmanı (yer değiştirme) (Real) belirtmektedir. R_x ve R_y sırayla yatay ve düşey eksen yönünde doğrusal rijitlikler (yay katsayısı) (Real), R_z ise düzleme dik eksen etrafında açısız rijitliktir (yay katsayısı) (Real).

Bu veri bloğun içerisinde noktasal yükler tek tek tanımlanabilir. Ancak opsiyonel olarak yalnızca belirleyici noktalar tanımlandıktan sonra otomatik oluşturma opsiyonu kullanılabilir.

Otomatik oluşturma opsiyonunun kullanılması durumunda gerekli bilgiler, bu opsiyonun kullanılacağını belirten ve “**GEN**” karakterleri ile başlayan bir ilave başlık altında tanımlanmaktadır. Bu başlıktan sonra ve başlığın hemen altında, sırasıyla, otomatik oluşturmaya esas teşkil edecek olan ilk düğüm noktasının numarası, son düğüm noktasının numarası ve oluşturulacak noktalar için nokta numarası artış sayısı verilecek şekilde ve her satırda bir “generation” için bilgi olacak şekilde serbest formatla yazılmaktadır. Her satırda üç adet “INTEGER” yani TAM SAYI vardır.

Örneğin “**GEN**” karakterleri ile başlayan başlığın hemen altındaki satırda

1,11,3 bilgisi ışığında;

- İlk düğüm noktası numarası: 1
- Son düğüm noktası numarası: 11
- Nokta artış numarası: 3

Olduğu belirtilmiştir. Bu durumda aşağıdaki elemanlar ve bu elemanlara ait bilgiler aşağıda görüldüğü gibi otomatik olarak oluşturulacaktır.

1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 (mevcut bilgi)

```

4 1 1 1 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
7 1 1 1 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
11 1 1 1 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00

```

Otomatik oluşturma bilgilerinin verilmesinde herhangi bir öncelik veya sıralama yoktur. Bu satırlarda gerekli bilgi yazıldıktan sonra en az bir boşluk bırakılarak ihtiyaç duyulan (hatırlatma amaçlı) bazı notlar yazılabilir. Bu notların herhangi bir işlevi olmayacaktır.

“END” Bilgi girişini sonlandıran komut

“**GENERATION**” otomatik data oluşturma programı çalıştıktan sonra birden fazla sayıda dosya oluşturmaktadır. Bu dosyaların bir tanesi kalıcı “Eco Check” kontrol dosyasıdır. Programa veri girişi sağlayan ve minimum sayıda bilgi içeren dosyadan okunan bilgiler, bu dosyaya detaylı olarak yazılır. Sırasız, gelişigüzel ve serbest formatla verilmiş olan bilgiler otomatik oluşturma işlemleri tamamlandıktan sonra, gerek data blokları gerekse bloklar içerisindeki data satırları sıraya dizilerek makul bir foröatla yazılmaktadır. Söz konusu dosya yalnızca hızlı bir kontrol için hazırlanmıştır. Ana program modülünün hazırlanması esnasında daha detaylı ve açıklamalı bir analiz dosyasının ilk bölümünde matematiksel model bilgileri açıklamalı olarak hazırlanacaktır. Bu bilgileri analiz sonuçları takip edecektir. “Eco Check” dosyasındaki bilgiler ana program modülünün pratik olarak kullanabileceği bilgiler değildir. Bu nedenle tüm data blokları birden fazla kullanıma açık olacak şekilde “STRACH” dosyalara ayrıca yazılmaktadır. Bu dosyaların her birinde ilk satırda, dosyadaki sistematik bilgi satır sayısı yer almaktadır. Bu dosyalar program tarafından ve işlevleri tamamlandıktan sonra otomatik olarak silinecektir.

3.4.2.2. ADIM ADIM INTEGRASYON (STEP BY STEP INTEGRATION)

Söz konusu opsiyon, dinamik denge denklemlerinin $M \cdot a(t) + C \cdot v(t) + K \cdot u(t) = P \cdot F(t)$ formunda tanımlandığı bir yapısal sisteme ait ivme, hız ve deplasmanları zaman aralıklarında elde eder. Geriye dönük çözümle yükleri hesaplar. GP-DYNA bilgisayar programında tüm serbestliklere karşılık gelen u , v , a ve F değerlerini zamanın fonksiyonu olarak elde etmek mümkündür. Ancak zaman adımlarının ve serbestlik sayısının fazla olması durumunda tüm analiz sonuçlarını bir analizde elde ederek kontrol etmek pratik açıdan kolay değildir. Bu nedenle GP-DYNA programı analiz sonuçları için seçenekler sunar. Söz konusu seçeneklerin uygun olarak

kullanılması durumunda; herhangi bir serbestliğe karşılık gelen u , v , a , veya F vektörlerinden herhangi biri, herhangi bir mod için talep edilebilir. Ayrıca her mod için ekstrem değerlerin bulunduğu moda ait değerler istenebilir. Söz konusu serbestliğe karşılık gelen vektörün grafiği (son derece detaylı bilgi sunan) hızlı ekran grafiği opsiyonu ile değerlendirilebilir.

Hızlı grafik opsiyonunda her iki vektörün zaman artışlarındaki değerleri, ölçek, ekstrem değerler, ekstrem değerlerin ait oldukları zaman dilimi, serbestlikler, düğüm noktaları, sınır şartlarına ve/veya köle serbestliklere uygun olarak sıkıştırılmış (condensed) M , C , ve K matrislerindeki serbestlikler gibi oldukça detaylı bilgiler sunulmaktadır. Alternatif olarak ACAD, MATLAB, Excel ve benzeri birçok programa uygun olarak grafik datası üretebilmektedir. Ancak bu durumda grafikler daha sade olacak, GP-DYNA hızlı grafiklerindeki detaylar görülemeyecektir.

Adım adım integrasyon için hazırlanan komut bloğu şu şekilde verilmiştir:

STEP BY STEP

PARAMETRELER

$K_{N,N}$, $M_{N,N}$, $C_{N,N}$, $UVA_{N,3}$, $U_{N,N2}$, P_N , $F(t)$, DT

$L=L_i$, L_{max}

delta, alpha, theta.

Bu komut, dinamik denge denklemlerinin aşağıdaki formda tanımlandığı bir yapısal sisteme ait u deplasmanlarını eşit zaman aralıklarında elde eder.

$$M \cdot a(t) + C \cdot v(t) + K \cdot u(t) = P \cdot F(t)$$

Burada; $a(t)$, $v(t)$ ve $u(t)$ sırasıyla zamana bağlı ivme, hız ve deplasman vektörleridir. K , M , C ise sırasıyla N,N boyutlu rijitlik matrisi K , kütle matrisi M ve sönüm matrisi C 'yi belirtir. UVA ilk haldeki $N,3$ dizininin adıdır. İlk halde; 1.sütun başlangıç $u(0)$ deplasmanlarının vektörü, 2.sütun başlangıç $v(0)$ hızlarının vektörü, 3.sütun başlangıç $a(0)$ ivmelerinin vektörüdür.

Bu dizin **STE** komut bloğu gerçekleştirildikten sonra, son zaman adımında deplasmanlar, hızlar ve ivmeleri kapsar. U , N , L_{max} dizininde depolanan deplasmanların adıdır. Adım adım

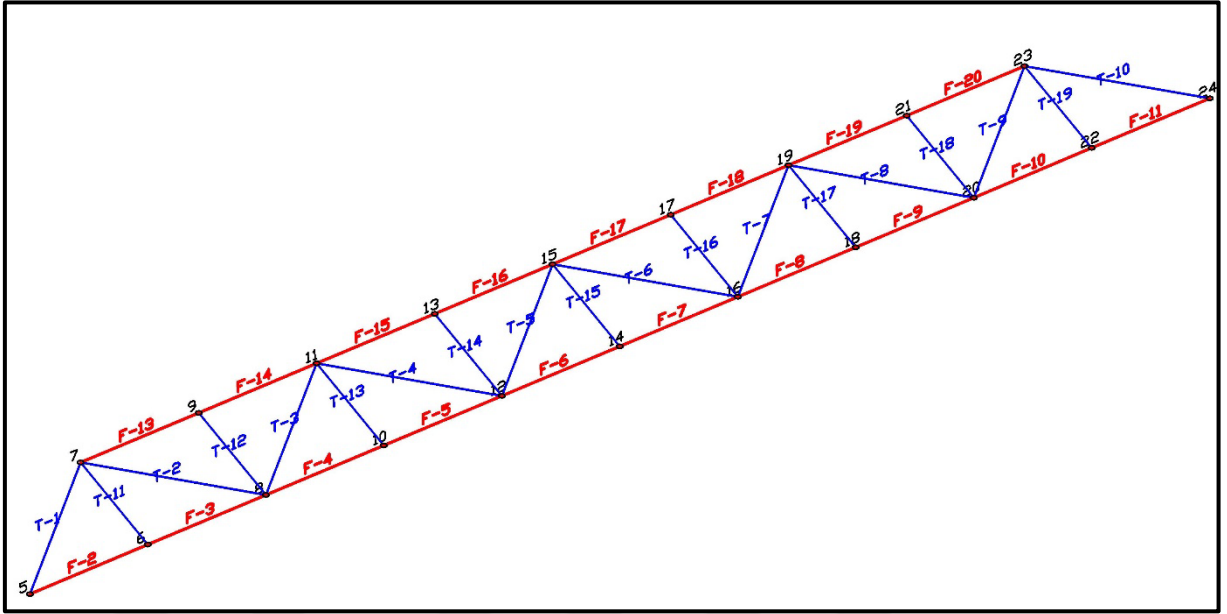
integrasyon “DT” zaman artışıyla yönetilir; Bununla birlikte bu deplasmanlar L_i zaman adımlarında kaydedilir. (veya “ L_i,DT ” zaman aralıklarında), Bundan dolayı belirtilen J yük numaraları “ L_i, L_{max} ” dan büyük olmalıdır. Newmark adım adım integrasyon metodunda, delta, alpha ve theta ile belirtilen parametreler kullanılır. Tablo 3.3’te olası değerler listesi verilmiştir (CAL91, 1991). Eğer parametreler belirtilmezse, Newmark doğrusal ivme değerleri kullanılacaktır.

Tablo 3.3: Newmark parametreleri.

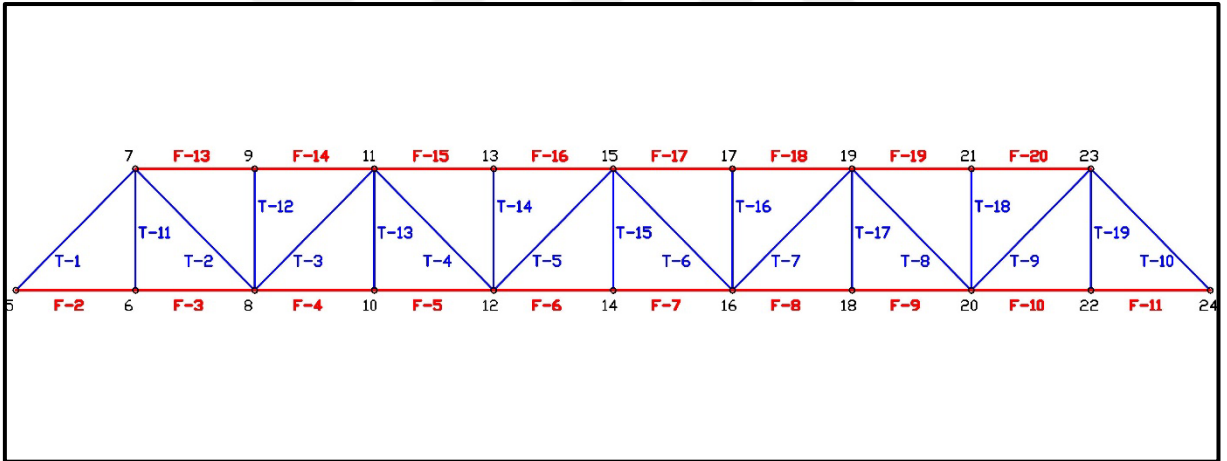
Method	delta	alpha	theta
Newmark Ortalama İvmesi	1/2	1/4	1.00
Newmark Doğrusal İvmesi	1/2	1/6	1.00
Theta Metodu – Düşük Sönüm	1/2	1/6	1.42
Theta Metodu – Yüksek Sönüm	1/2	1/6	2.00

3.4.2.3. DXF” ACAD PROGRAMINA DXF DOSYASI HAZIRLAYAN PROGRAM MODÜLÜ

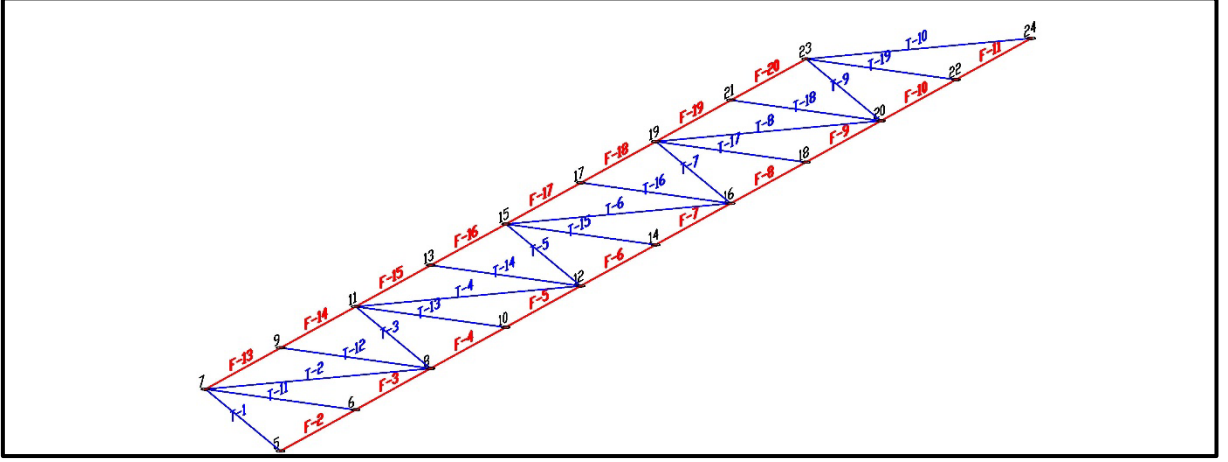
Yukarıdaki geçici dosyalardaki bilgiler kullanılarak AutoCAD Programına bilgi aktarmaktadır. Bu aşamada aktarılan bilgiler görsel olarak data kontrolü amaçlıdır. Şekil 3.31 - Şekil 3.35’de, GENERATION otomatik data oluşturma bloğu başlığında tanıtılan, çerçeve ve kafes elemanlar tanımlanarak oluşturulmuş ve Karakaya Köprüsü’ne ait bilgilerden yorumlanarak hazırlanan örnek modele ait görsel AutoCAD çizimleri görülmektedir.



Şekil 3.31: Örnek modelin tek açıklığını gösteren 3 boyutlu AutoCAD çizimi.



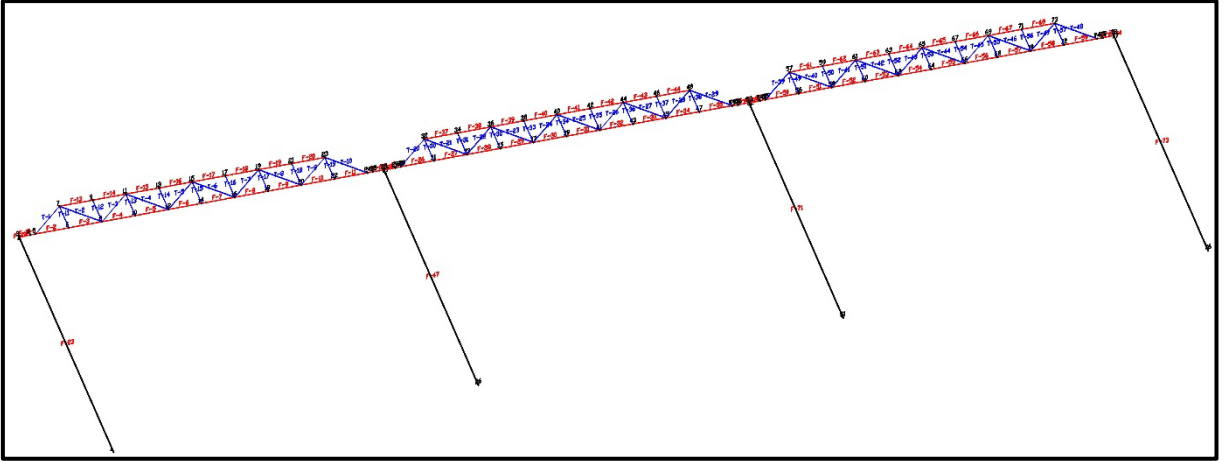
Şekil 3.32: Örnek modelin tek açıklığını gösteren AutoCAD çiziminin 2 boyutlu görünüşü.



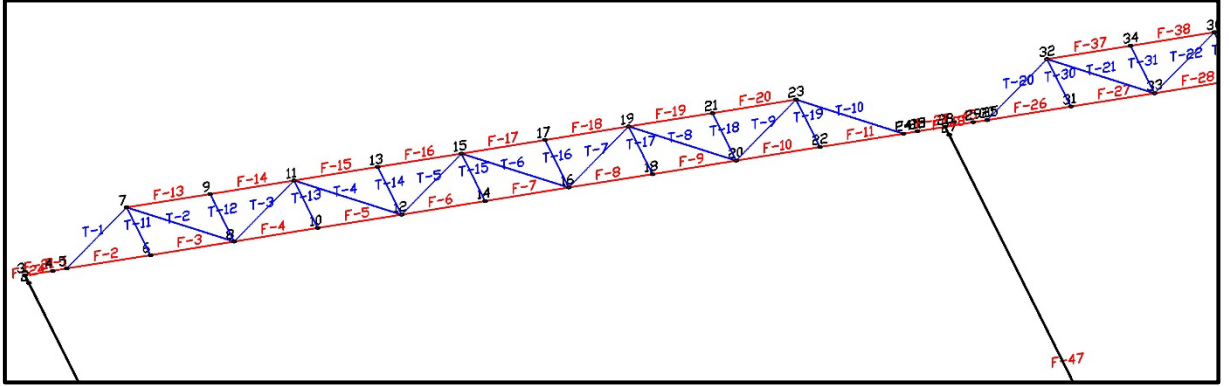
Şekil 3.33: Örnek modelin tek açıklığını gösteren AutoCAD çiziminin 3 boyutlu görünüşü.

Hazırlanan bilgisayar programında 3 açıklıklı 2D modelin oluşturulması

Karakaya Köprüsü'nün aynı geometri için datası, hazırlanmış olan programda tanımlanmış ve sistem 3 açıklıklı 2 boyutlu olarak oluşturulmuştur. Generation için hazırlanmış sisteme ait "DATA.TXT" input dosyası ve generation sonrasında "DXF" modülüyle elde edilen AutoCAD çizimi aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.34: Bilgisayar programıyla oluşturulan AutoCAD dosyası.



Şekil 3.35: Bilgisayar modelinde sisteme ait elemanların görünüşü.

3.5. GP-DYNA PROGRAMININ DOĞRULANMASI

Programın doğrulanması aşamasında çok fazla sayıda örnek hazırlanmış, bu örnekler statik, dinamik ve karma opsiyonları test edecek şekilde seçilmiştir. Dinamik opsiyonları test etmek amacıyla, programın dinamik analiz opsiyonları içerisinde olan öz değer, öz vektör ve modal analiz bölümleri, Eigen ve Jacobi alt modülleri, eleman rijitlik değişimi tarama opsiyonları, adım adım integrasyon modülleri, sınır şartı, tanımlı yay rijitlikleri, köle serbestlikler ve zorlanmış yer değiştirmeler gibi opsiyonlar için rijitlik, kütle ve sönüm matrislerini uyarlayan alt modüller, yuvarlama hatalarının etkisi gibi önemli bölümlerini tarayacak şekilde hazırlanmıştır.

Doğrulama aşamasında seçilen örnekleri kıyaslamak amacıyla detaylı ve kesin çözüm yöntemleri ile el hesapları ile hazırlanmış olan örneklerin yanı sıra; SAP2000, CAL80, TIM88, CAL90, CAL91, MATLAB, Excel gibi programlar kullanılmıştır. El hesapları genellikle statik opsiyonların doğrulanmasında kullanılmıştır.

Bahsedilen programlar içerisinde; SAP2000 programı Wilson (2005) tarafından geliştirilmiş olan genel amaçlı bir yapı analiz programıdır. Statik ve dinamik analizleri gerçekleştirebilmektedir. Yapısal sistemlerin çerçeve (özellikle kayma çerçevesi) olarak analizleri pratik olarak yapılabilir ancak açıl serbestlikler ve eksenel serbestlikler gibi diğer serbestlikleri göz önüne almak çok pratik olmayabilir.

CAL80, CAL90 ve CAL91 programları ise yine Wilson tarafından geliştirilmiştir. Her iki program da gerek veri dosyaları eşliğinde gerekse kullanıcı ekranından verilen bilgilerle kullanılabilir. Uygun kopyalama (SAVE) opsiyonları ile her iki bilgi girişi opsiyonunun

birlikte kullanılması da mümkündür. Söz konusu programlar yine Wilson tarafından geliştirilmiş çok kullanıcı ve çok işlemli (multi-user, multi tasking) özellikleri olan (main-frame) bilgisayarlar için geliştirilmiş olan SMISS2 programının 1980, 1990 ve 1991 yıllarında PC'lere uyarlanmış olan versiyonlarıdır. SMISS2 programı ve CAL serisi programları gerek statik gerek dinamik (ya da her ikisi) analizlerde, tüm ara işlemleri kullanıcının verdiği komutlarla gerçekleştirerek sonuçlarını gerek ekrandan gerek yazıcıdan, gerekse manyetik bir dosyaya kaydederek sunabilmektedir. Analiz komutları etkileşimli olarak kullanıcı tarafından tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle söz konusu programlar esasen eğitim amaçlı olarak kullanılabilir. Verilerin ve operasyonların doğru tanımlanması durumunda tüm ara işlemler pratik bir şekilde gerçekleştirilmekte ve sonuçlar alınabilmektedir. Ancak bu programların analiz kapasitesi sınırlıdır (yaklaşık 14 serbestliğe kadar olan analizler). Profesyonel kullanım için SAP serisi programlar önerilmektedir (orijinal SAP4). Fakat PC'lere uyarlanmış olan SAP versiyonları birçok opsiyonu yitirmiştir.

TIM88 programı ise Wilson tarafından geliştirilmiş olan CAL serisi programlardan 1980 versiyonu olan CAL80 programının, Çakıcı (1988) tarafından ilave opsiyonlar eklenmiş versiyonudur. Söz konusu versiyon her dosyada aşağıdaki görüntüyü vermektedir.

* * * * T I M - 8 8 * * * *

VERSION 88-1 JAN. 16, 1988

Originally Developed by E. L. Wilson

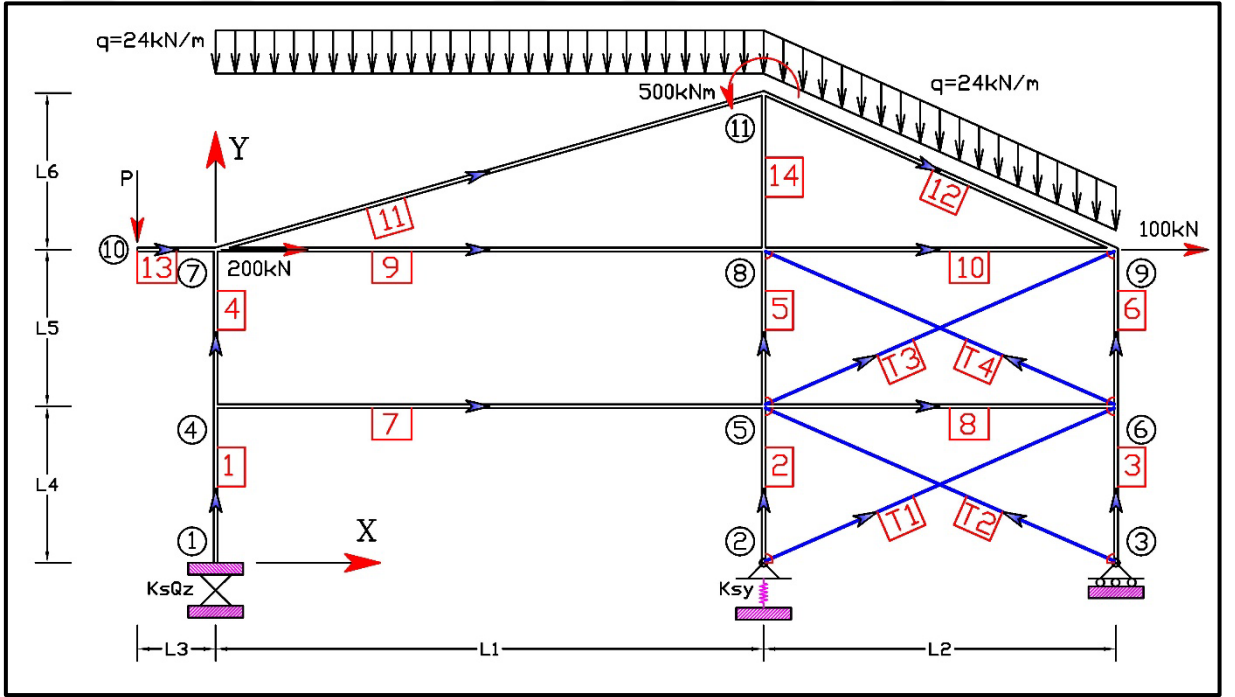
This version by

Timur ÇAKICI

Çakıcı (1988) programa ilave etmiş olduğu opsiyonları test ederken genellikle Fundamentals of Structural Dynamics (Craig ve Kurdila, 2006) ile Structural Dynamics (Paz, 1991) kaynaklarındaki örneklerden yararlanmıştır. Kullanılan örnekler yapısal sistemlerin dinamik analizinde son derece yararlı opsiyonları gösterebilmektedir. Serbestliklerle ilgili olarak varsayimsız örneklerdir. Bu nedenle GP-DYNA programının geliştirilmesinde de bu örneklerin tamamı GP-DYNA programının doğrulama örnekleri listesindedir. Söz konusu örneklerin yanı sıra Chopra (1995), Öztoran (2003), Topçu (2014) ve birçok çalışmadan örnekler alınmıştır.

GP-DYNA doğrulama datalarının sayısı çok fazladır. Gerek bilgi giriş dataları gerekse analiz sonuçları oldukça kapsamlıdır. GP-DYNA programının analiz sonuçları hem farklı formülasyonlara sahip kendi kütüphanesindeki farklı prosedürlerle hem de analitik çözümü olan örneklerle veya nümerik çözümü olan örneklerle, ya da farklı bilgisayar programları ile (SAP2000, CAL91, MATLAB SeismoSignal vb.) karşılaştırılmıştır. Aşağıda, gerçekleştirilen doğrulama modelinden örnekler sunulmuştur. Karmaşık örnekler çoğunlukla genel amaçlı sonlu elemanlar programlarıyla gerçekleştirilmiştir. GP-DYNA programının doğrulama çalışmaları ile ilgili sonuç ve bulgular aşağıda özetlenmektedir.

3.5.1. Statik Örnek GP-DYNA ile SAP2000 Karşılaştırması



Şekil 3.36: Statik analiz karşılaştırması için örnek yapısal sistem.

Şekil 3.36’da görülen örnek sistem GP-DYNA programının statik analiz opsiyonlarının doğrulama çalışmaları için kullanılan örneklerden biridir. Sistem iki boyutlu kompozit bir sistemdir. Açısal ve doğrusal yayların (sınır şartı elemanları) yanı sıra çerçeve ve kafes kiriş elemanlarını kapsamaktadır. L1-L6 boyutları, K_{SY} doğrusal, $K_{S\theta Z}$ açısal yay rijitlikleri Δ_{10X} , doğrusal, Δ_{10Z} açısal zorlanmış deplasmanlar yanı sıra kesit ve malzeme özellikleri ve yükler değişken parametreler olarak tanımlanmıştır. Sistem rijitlik matrisinin bozulmasına neden olabilecek en uç değerlerle sistem zorlanmıştır. Sistem rijitlik matrisinin evriğinin hesaplanması

esnasında olası yuvarlama hatalarını kontrol etmenin çeşitli yöntemleri vardır, bu yöntemlerden biri sistem genelinde denge kontrolüdür. Örneğin dış yüklerle reaksiyon kuvvetlerinin denge koşullarını sağlanması gibi. Denge koşulları; herhangi sistemin bir serbest cisim olarak tanımlanan, sistemden izole edilmiş bir kısmı üzerinde de gerçekleştirilebilir. 13 numaralı çerçeve elemanı söz konusu etkiyi kolayca görebilmek için tanımlanmıştır. Parametrik olarak çok sayıda analiz gerçekleştirilerek, sonuçlar SAP2000 bilgisayar programı ile karşılaştırılmıştır. Aşağıda bu çalışmalardan bir tanesi için GP-DYNA ve SAP2000 programlarının analiz sonuçları sunulmaktadır.

Her iki programda kullanılan parametreler;

$$K_{SY}=500,000. \text{ kN/m}, \quad K_{S\theta Z}=80,000. \text{ kN/m}$$

$$\Delta_{10X}=0.01 \text{ m}, \quad \theta_{10Z}=-6E-04 \text{ rad}$$

Çerçeve elemanlarında elastisite modülü $E=2E7 \text{ kN/m}^2$,

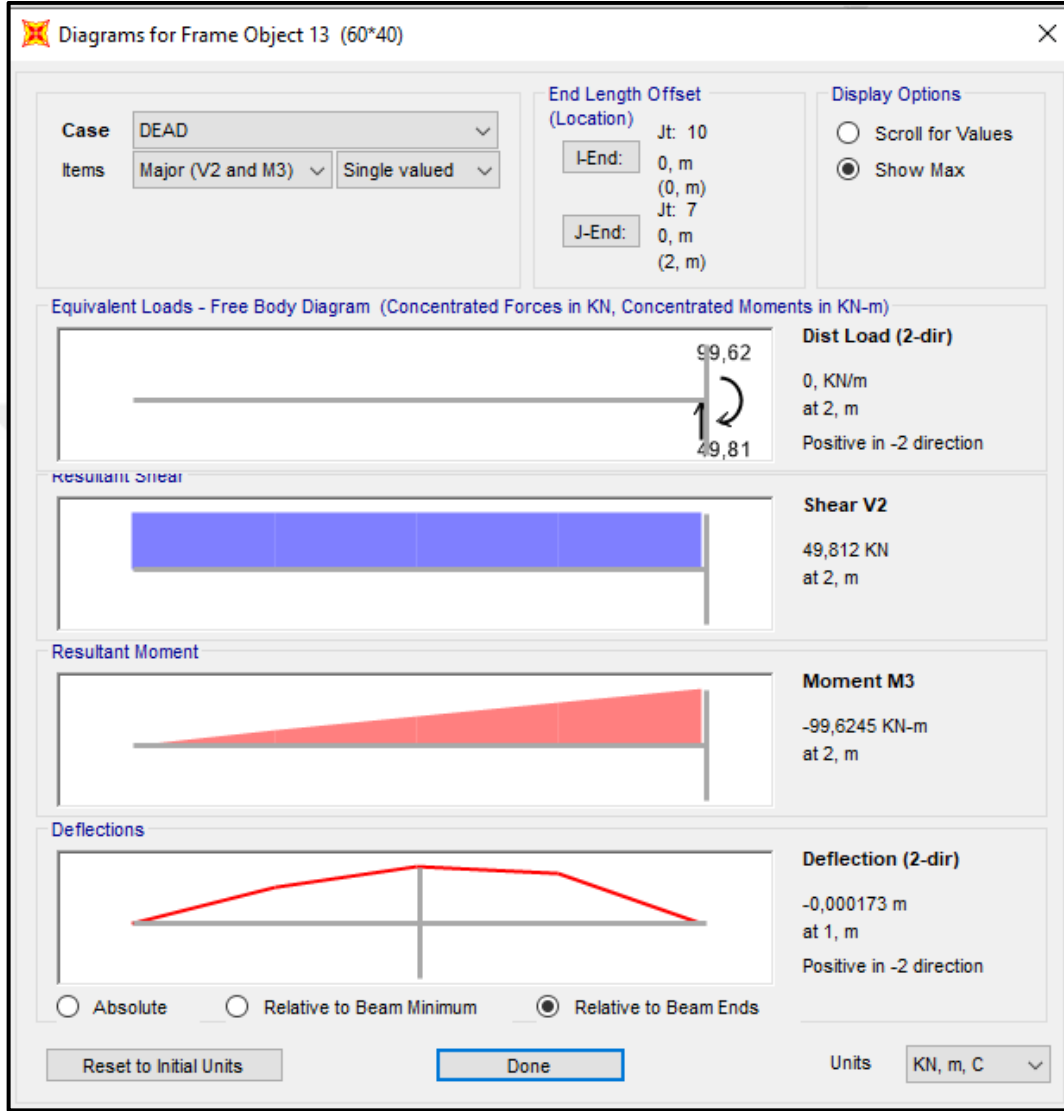
1 - 3 numaralı elemanlar 0.8 m x 0.4 m dikdörtgen kesit, 4 - 13 numaralı elemanlar 0.6 m x 0.4 m dikdörtgen kesit, T1 – T4 numaralı kafes kiriş elemanlarında elastisite modülü $E=2E8 \text{ kN/m}^2$, dış çapı 100 mm, et kalınlığı 15 mm olan boru profil. 10 numaralı düğüm noktasındaki düşey P yükü -49.812229 kN olarak tanımlanmıştır. Sistem geometrisi $L1=12 \text{ m.}$, $L2=8 \text{ m.}$, $L3=2 \text{ m.}$, $L4=4 \text{ m.}$, $L5=4 \text{ m.}$, $L6=6 \text{ m.}$ değerleri ile belirlenmiştir.

GP-DYNA programı kesit tesirlerini $\pm X.XXXXXXXE\pm XX$ formatı ile noktadan sonra 6 karakter olacak şekilde sunmaktadır. SAP2000 programı ise, değişken formatlar kullanmakla birlikte mevcut örnek için kesme kuvvetlerinde $XX.XXX$ formatını kullanmaktadır. Bu durumda 13 numaralı elemanda kesme kuvveti; GP-DYNA programında $-4.981223E+01 \text{ kN}$ olmalıdır. Programın vermiş olduğu analiz sonuçları aşağıda görülmektedir.

ÇERÇEVE ELEMANLARININ KESİT TESİRLERİ:

ÇUBUK	NOKTA	UZUNLUK	EKSENEL KUV.	KESME KUV.	MOMENT
13	10	2.0000	0.000000E+00	-4.981223E+01	0.000000E+00
13	7	2.0000	0.000000E+00	4.981223E+01	-9.962446E+01

SAP2000 programında ise söz konusu analiz sonuçları 49.813 kN olmalıdır. Programın vermiş olduğu analiz sonuçları Şekil 3.37’de görülmektedir.



Şekil 3.37: SAP2000 statik örnek için analiz sonuçları.

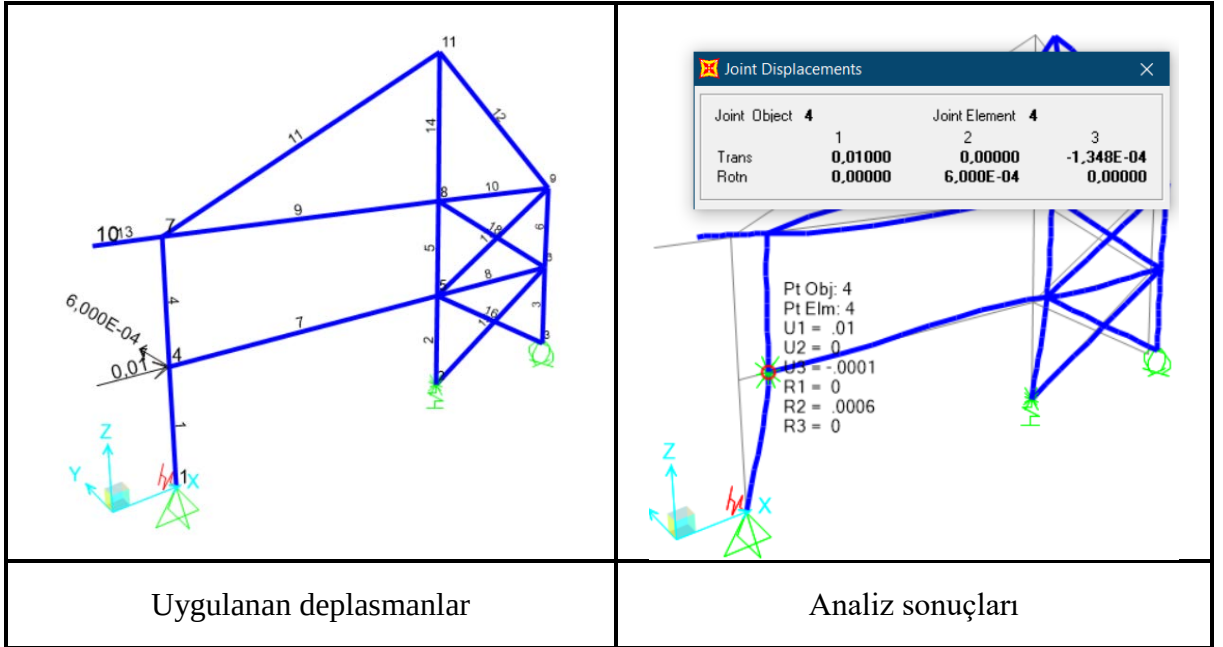
Tablo 3.4: Statik örnek analizi GP-DYNA ile SAP2000 karşılaştırması.

	Yatay yer değiştirme (m)	Düşey yer değiştirme (m)
GP-DYNA	0.00612060	0.00168725
SAP2000	0.00621	0.00174

Yuvarlama hatalarından kaynaklı olarak sonuçlarda farklılıklar olabilmektedir. Aşağıda 10 numaralı düğüm noktasında (konsol kirişin serbest ucu) her iki programın vermiş olduğu yer değiştirme değerleri görülmektedir. GP-DYNA programında düğüm noktalarının belli bir yer değiştirme hareketi yapabilme opsiyonu vardır (örneğin mesnet çökmesi gibi). Her iki programda da 10 numaralı nokta $\Delta_{10X}=0.01$ m, $\Theta_{10Z}=-6E-04$ rad olacak şekilde yatay ve açılal yer değiştirmelere zorlandığında, programların verdiği sonuçlar aşağıda görülmektedir.

HESAPLANAN NOKTA DEFORMASYONLARI: (GP-DYNA)

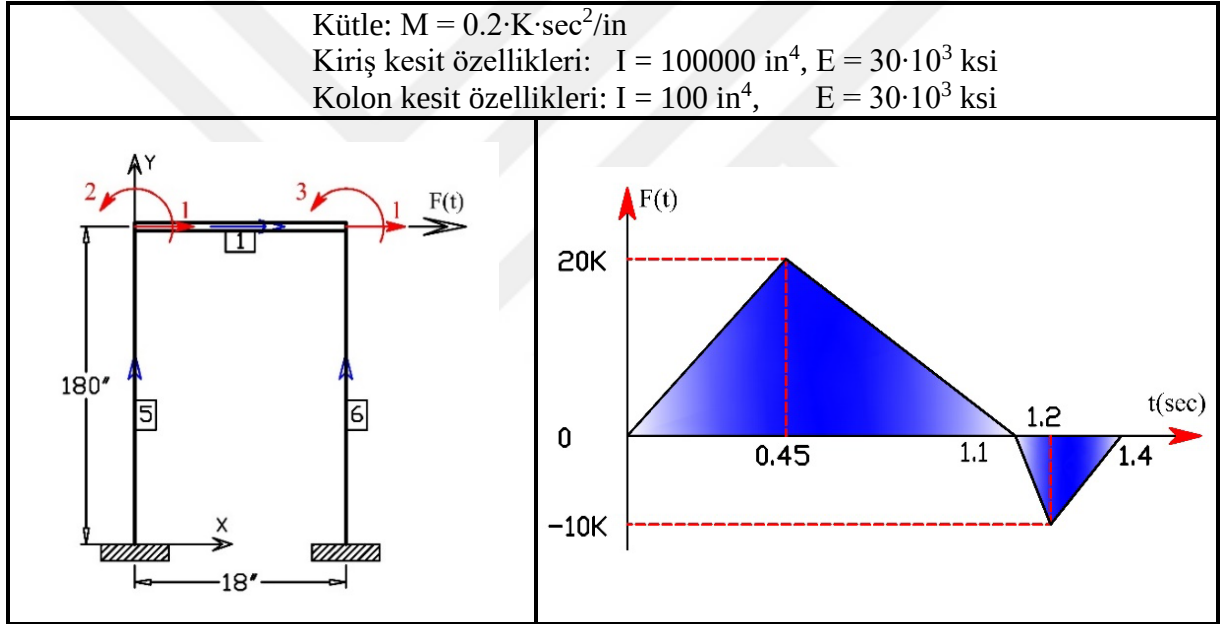
NOKTA	DX-HAREKETİ	DY-HAREKETİ	QZ-HAREKETİ
1	0.00000E+00	0.00000E+00	-2.79494E-03
2	0.00000E+00	4.17772E-04	-2.81358E-03
3	8.82411E-03	0.00000E+00	1.59489E-04
4	1.00000E-02	-1.34211E-04	-6.00000E-04
5	9.22290E-03	3.62750E-04	-1.29001E-03
6	8.67297E-03	-3.52725E-04	-2.05629E-04
7	1.20552E-02	-3.23023E-04	-1.31660E-03
8	1.16039E-02	2.23884E-04	-4.57097E-04
9	1.14560E-02	-4.81880E-04	-9.41003E-05
10	1.20552E-02	1.38425E-03	-6.22156E-04



Şekil 3.38: Statik örnek için SAP2000 ile hesaplanan nokta deformasyonları.

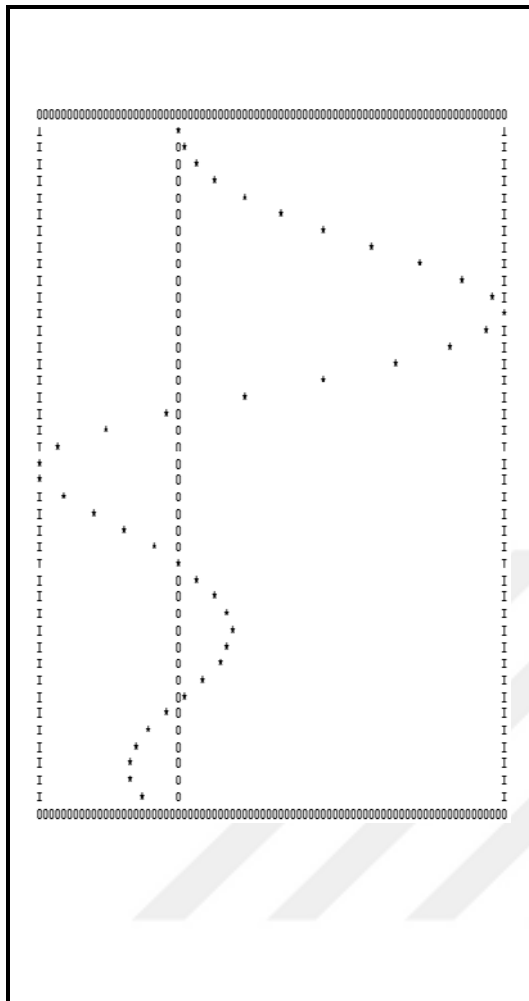
3.5.2. Üç Serbestlik Dereceli Sistem GP-DYNA ile CAL91 Karşılaştırması

CAL91 alışlagelmiş grafik programlarına veri aktaramamakta, sayısal değerleri grafiklere ve uygun verilere dönüştürmek için ek bir ara program yazılması gerekmektedir. Dolayısıyla analiz sonuçları ancak nümerik olarak karşılaştırılabilmektedir ve CAL91 programı kullanılarak elde edilen sonuçlar çok sayıda sayfadan oluşmaktadır. Yer ivmesi datası da CAL91 programının veri giriş kapasitesinin kısıtlı oluşu nedeniyle, sınırlı tek bir fonksiyon olarak verilebilmektedir. Bu sebeplerle GP-DYNA ve CAL91 karşılaştırması; küçük bir örnek (Çakıcı, 1988) üzerinden, zamana bağlı yer değiştirme sonuçları (Şekil 3.39) kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.39: Örnek sistem ve yükleme fonksiyonu.

Şekil 3.40 ve Şekil 3.41 incelendiğinde; GP-DYNA ile CAL91 programının bire bir aynı sonuçları verdiği, GP-DYNA hızlı ekran grafik seçeneğinin CAL91 ploth graph seçeneğine göre çok daha detaylı bilgi içerdiği görülmektedir.

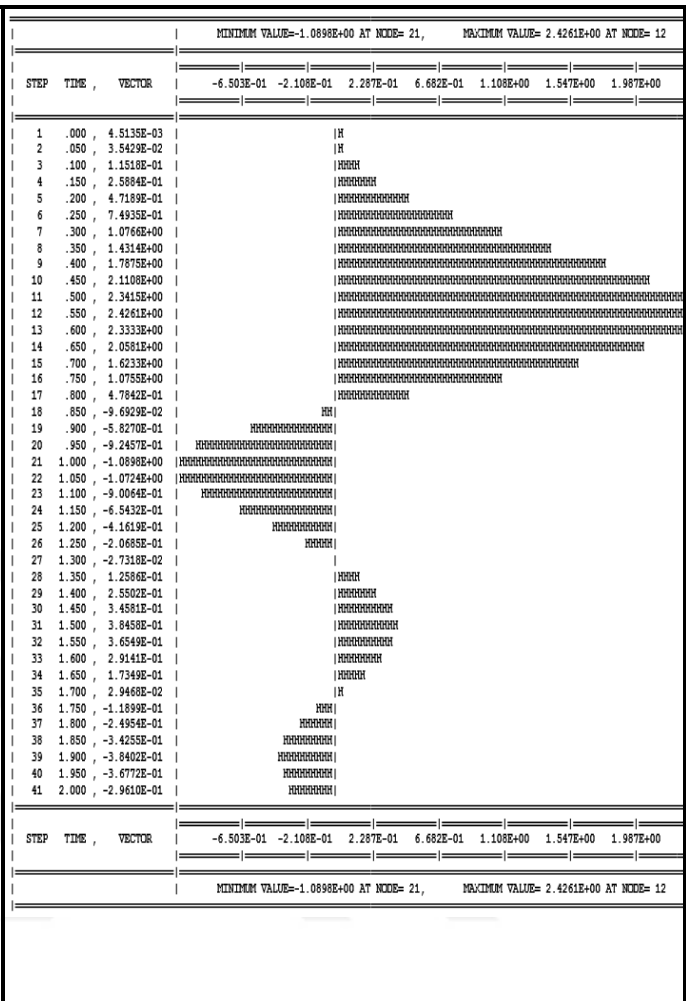


Şekil 3.40: CAL91 plot graph seçeneği zaman (sec)-yer değiştirme (in) grafiği.

```

MINIMUM=  -.108989E+01
MAXIMUM=   .242622E+01

```



Şekil 3.41: GP-DYNA hızlı ekran grafik seçeneği zaman (sec)-yer değiştirme (in) grafiği.

MINIMUM=-1.0898E+00 ADIM NO= 21
MAXIMUM= 2.4261E+00 ADIM NO= 12

3.5.3. Tek Serbestlik Dereceli Sistem GP-DYNA ile SAP2000 Karşılaştırması

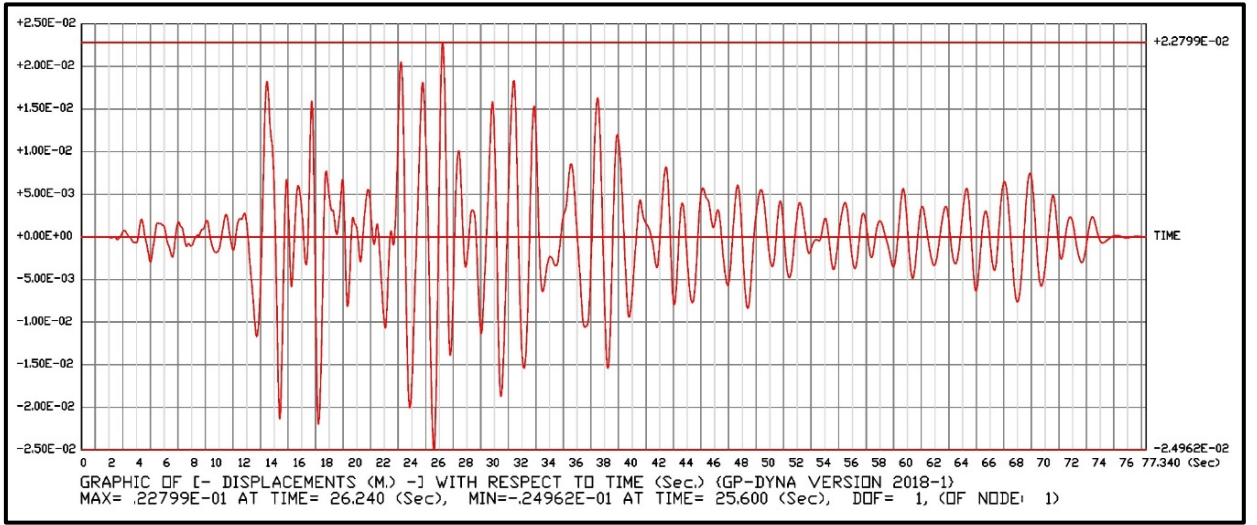
Kern Country depremi 21/07/1952 tarihinde San Joaquin Vadisi'nin güney taraflarında meydana gelmiştir. Sabaha karşı 4:52 saatlerinde başlayan deprem 1,5 dakikaya yakın sürmüştür. 7.36 Mw büyüklüğündeki depremin 16 km derinlikte meydana geldiği ve 70 milyon dolar zarara sebep olduğu belirtilmiştir. 1906'dan sonra California'da meydana gelen en büyük deprem olduğu söylenmektedir. PEER Ground Motion Data Base'inden alınan bilgiye göre Pasadena - CIT Athenaeum İstasyonu'nda 270° açıyla g biriminde depreme ait ivme kaydı alınmıştır. Zaman aralığı $\Delta t(DT) = 0.01$ s olan depreme ait 7735 adet ölçüm (NPTS)

bulunmaktadır. Kayıta 12.100 HZ frekans için filtreleme bulunmaktadır. Kayıt no: RSN13_KERN_PAS270.AT2.

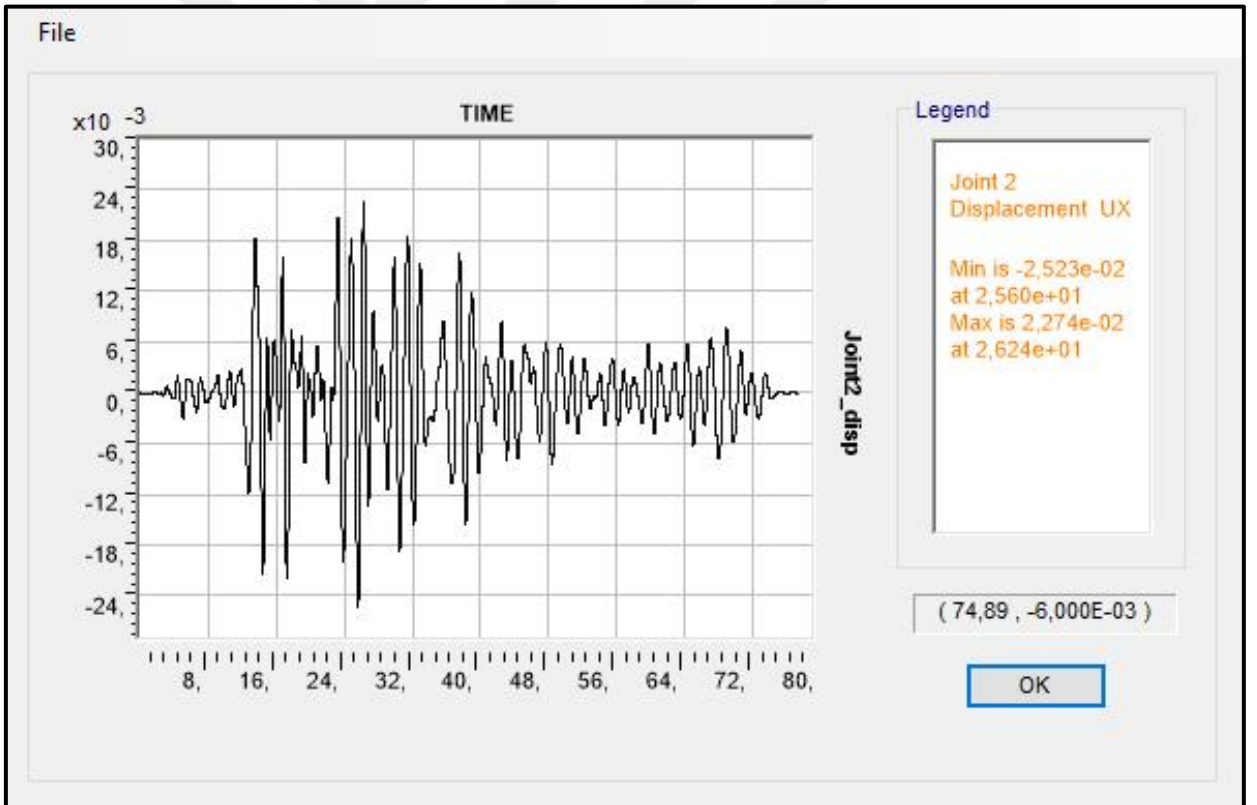
SAP2000 programında, doğal periyodu $T_n=1.5$ sn, viskoz sönüm oranı $\zeta=0.15$ olacak şekilde modellenen örnek bir TSD sistem, i düğüm noktasında tüm serbestlikler engellenerek, j düğüm noktasında sadece x doğrultusunda yer değiştirme serbestliği tanınarak ve j düğüm noktasına global x ekseninde 0.2 kg genelleştirilmiş kütle eklenerek oluşturulmuştur. TSD sistem için “NEWM” adlı yeni bir malzeme tanımlanmış ve elastisite modülü $1,961E + 08$ N/m² olarak verilmiştir. Poisson oranı değiştirilmemiş, ısı analizi yapılmayacağından genleşme katsayısı 0 kabul edilmiştir.

Daha sonra TSD sistem için “NEWM” adlı yeni bir kesit tanımlanmış ve alanı $A = 0.01$ m², atalet momenti $I = 0.002$ m⁴ verilmiştir. Bu veriler sonucunda oluşturulan sistemin modal analiziyle periyodu 1.50770 s olarak hesaplatılmıştır. Oluşturulan sisteme SAP2000 programında Define -> Functions -> Time History -> From File -> Add New Function şeklinde Kern Country depremi tanımlanmıştır. Deprem tanıtılırken “all files” tipinde dosya seçilip yüklendikten sonra PEER kaydındaki ilk 4 bilgi satırı atlatılmış, her satırda 5 okuma 0.01 s aralıklarla yaptırılmıştır. Deprem kaydının doğruluğu “Display Graph” seçeneğiyle çizdirilerek kontrol edilmiştir. Daha sonra SAP2000 programının tüm bilgisayarlarda deprem kaydı istemeden çalışabilmesi için “Convert to User Defined” seçeneğiyle deprem ivme datası programa kaydedilmiştir. Deprem kaydı oluşturulduktan sonra Define -> Load Cases -> Add New Load Case şeklinde Load Case KERNC_270 adıyla tanımlanmış, Load Case Type -> Time History, Analysis Type -> Linear, Solution Type -> Direct Integration, Load Type -> Accel olmak üzere daha önce yüklenmiş olan KERN isimli deprem fonksiyonu seçilmiş ve ivme kaydı g biriminde olduğu için m/s² birimine çevrilmek üzere 9.81 katsayısıyla çarpılmıştır. PEER deprem kaydına uygun olarak 7735 nokta 0.01 s aralıkla girilmiştir. Time Integration metodu Newmark seçilerek Chopra’dan alınan katsayılarla Gamma katsayısı $1/2=0.5$, Beta katsayısı $1/6=0.166666667 \approx 0.1667$ girilmiştir. Sönümlenme için Damping -> Proportional Damping seçilerek Damping Coefficient Direct Spesification ile kütle katsayısı olan a_0 seçilerek:

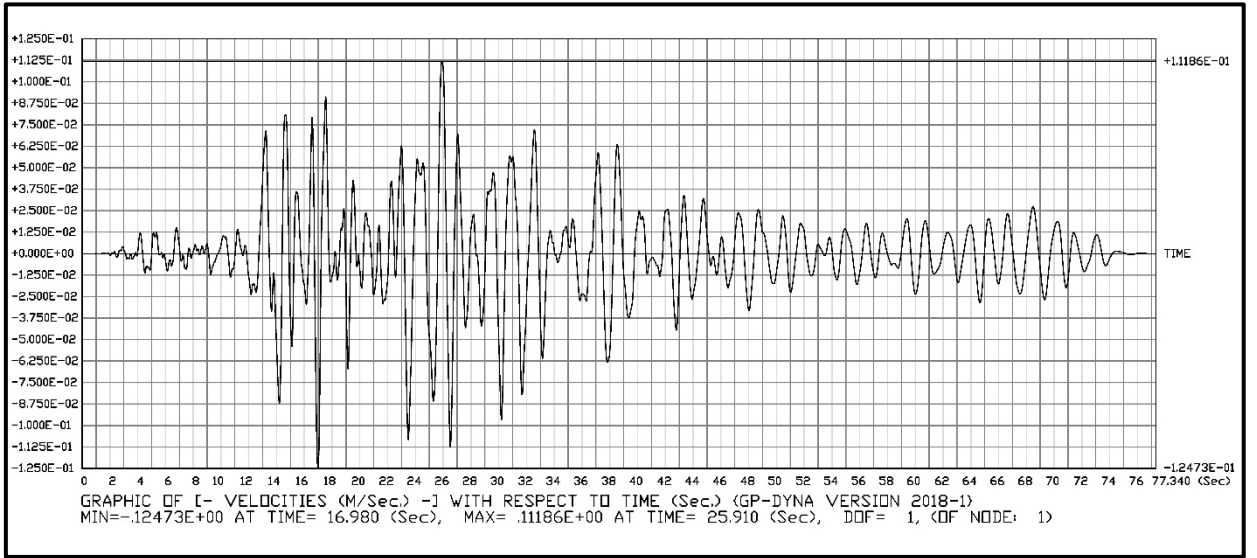
$$a_0 = 2\xi_i\omega_i = 2\xi * \frac{2\pi}{T} = 2 * 0.15 * \frac{2\pi}{1.5} = 1.256637061 \approx 1.2566 \text{ girilmiştir.}$$



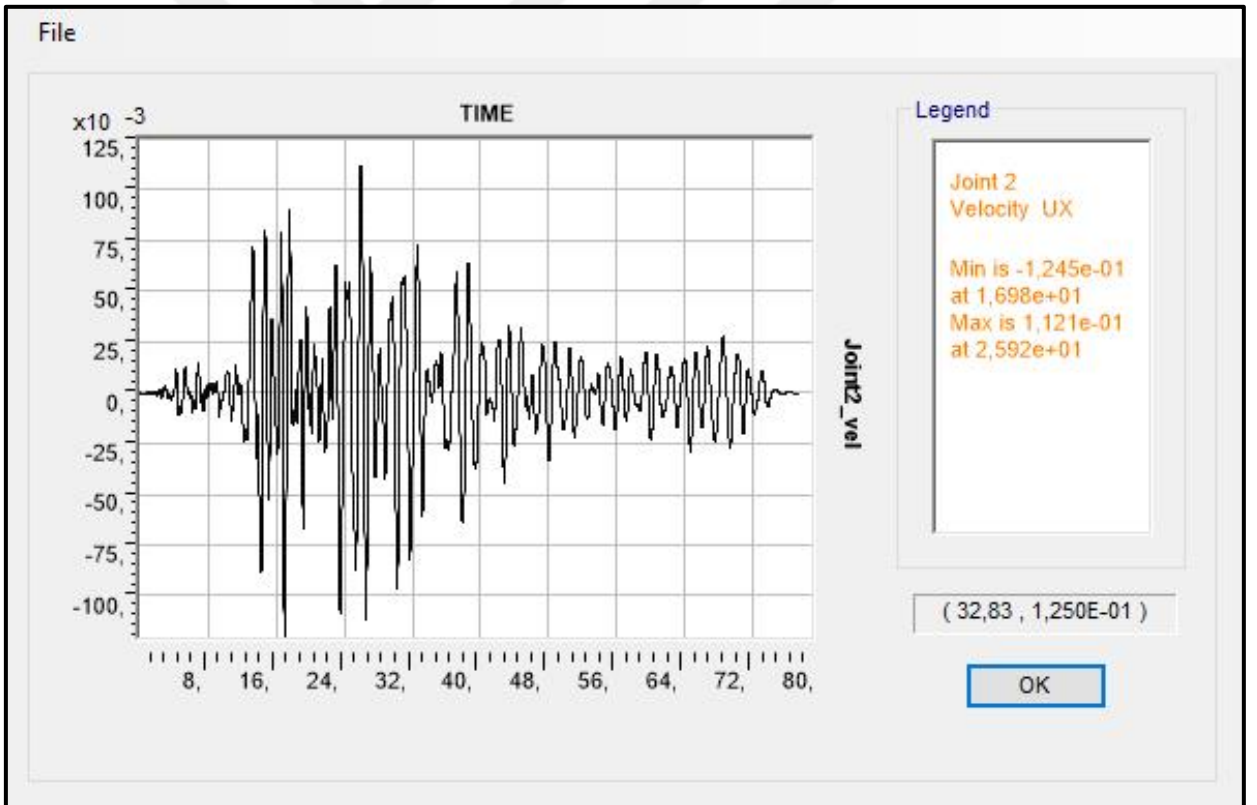
Şekil 3.42: TSD sistemin GP-DYNA ile analizi sonucu görelî deplasman (m)-zaman (s) grafiğı.



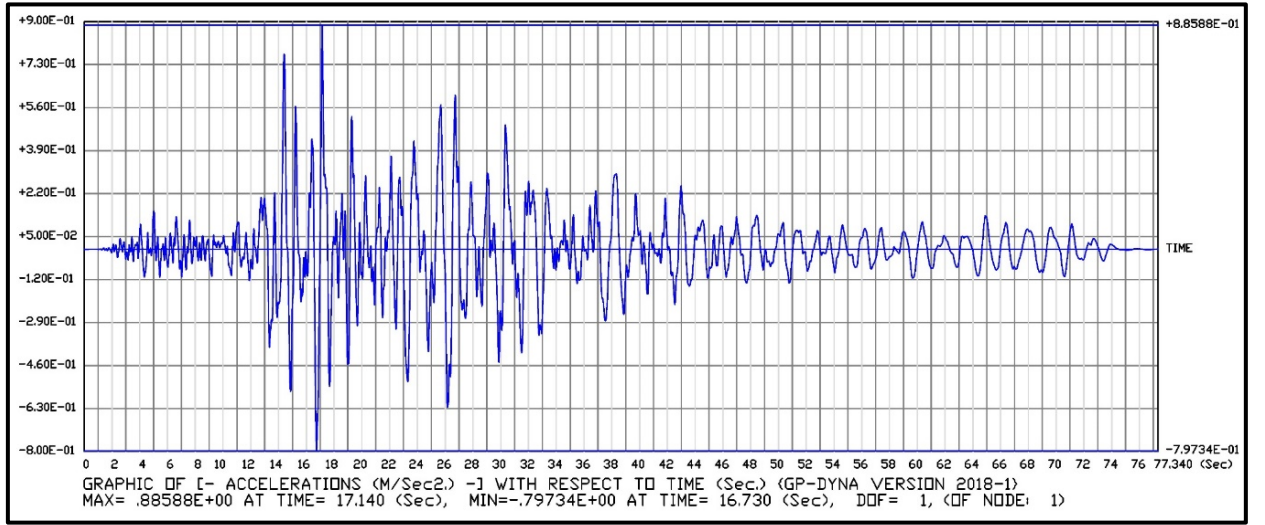
Şekil 3.43: TSD sistemin SAP2000 ile analizi sonucu görelî deplasman (m)-zaman (s) grafiğı.



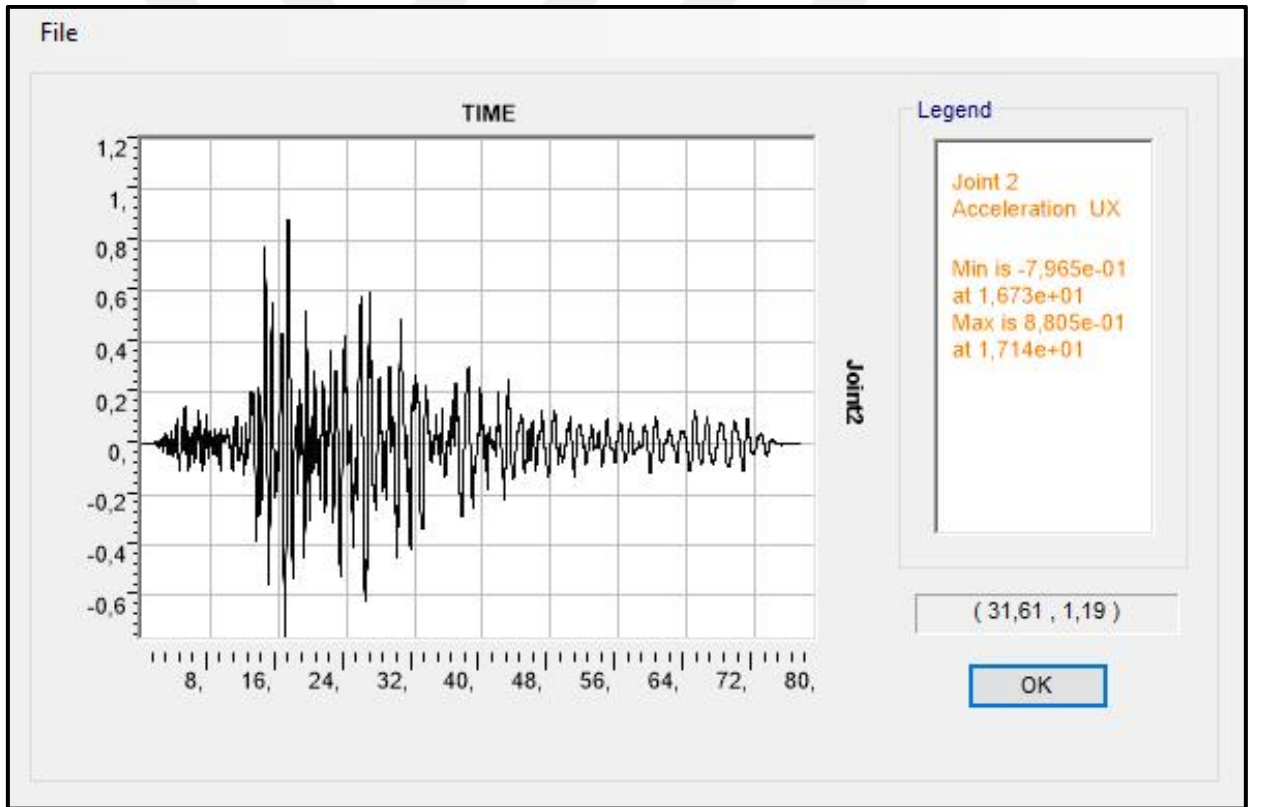
Şekil 3.44: TSD sistemin GP-DYNA ile analizi sonucu görelî hız (m/s)-zaman (s) grafiğı.



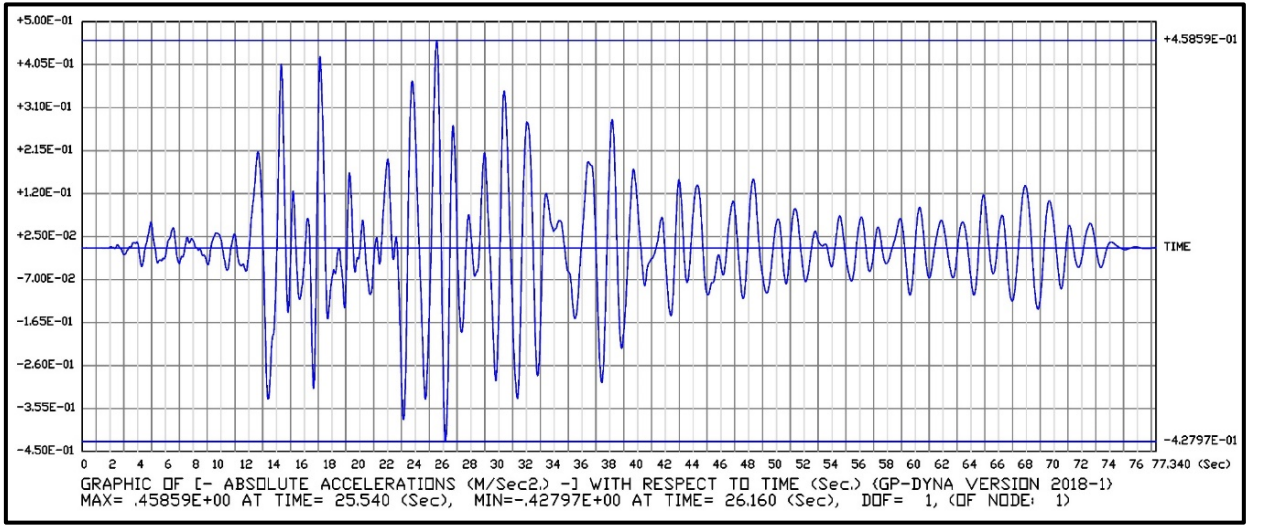
Şekil 3.45: TSD sistemin SAP2000 ile analizi sonucu görelî hız (m/s)-zaman (s) grafiğı.



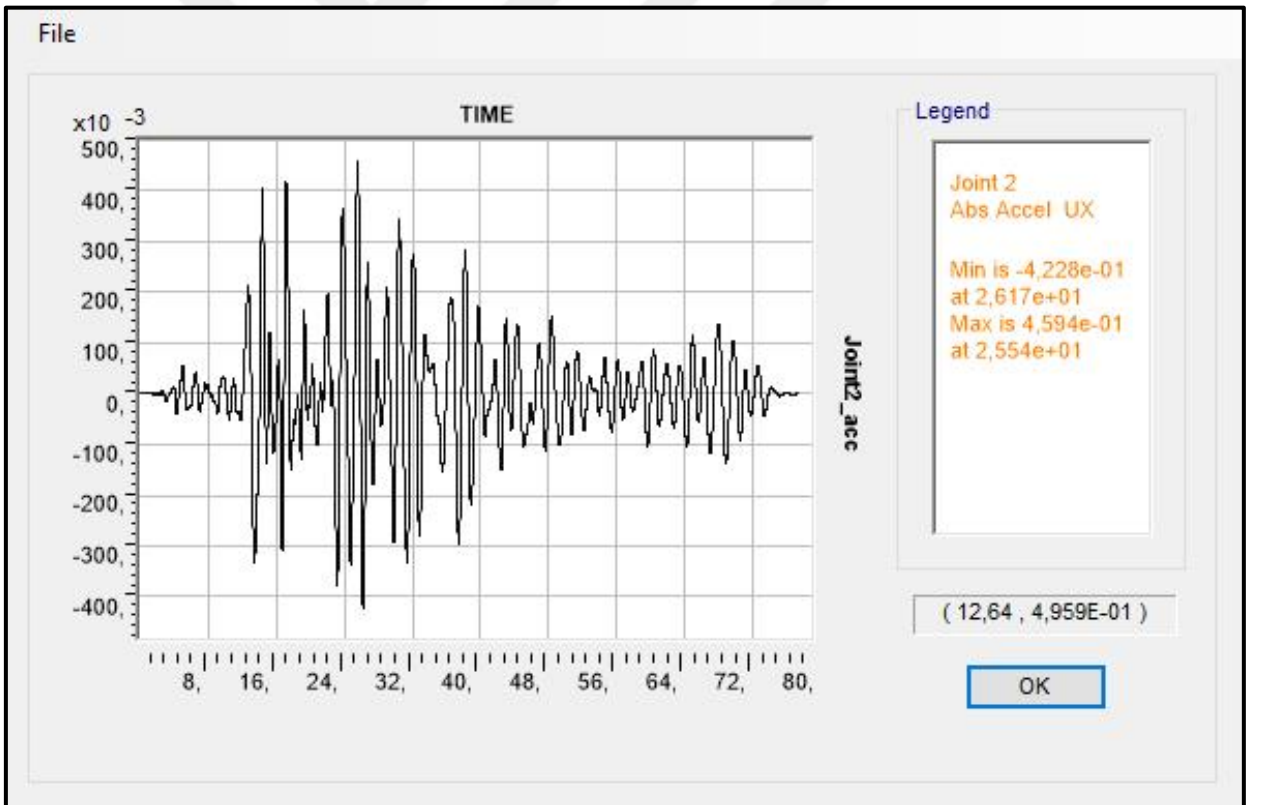
Şekil 3.46: TSD sistemin GP-DYNA ile analizi sonucu görel ivme (m/s^2)-zaman (s) grafiği.



Şekil 3.47: TSD sistemin SAP2000 ile analizi sonucu görel ivme (m/s^2)-zaman (s) grafiği.



Şekil 3.48: TSD sistemin GP-DYNA ile analizi sonucu toplam ivme (m/s^2)-zaman (s) grafiği.

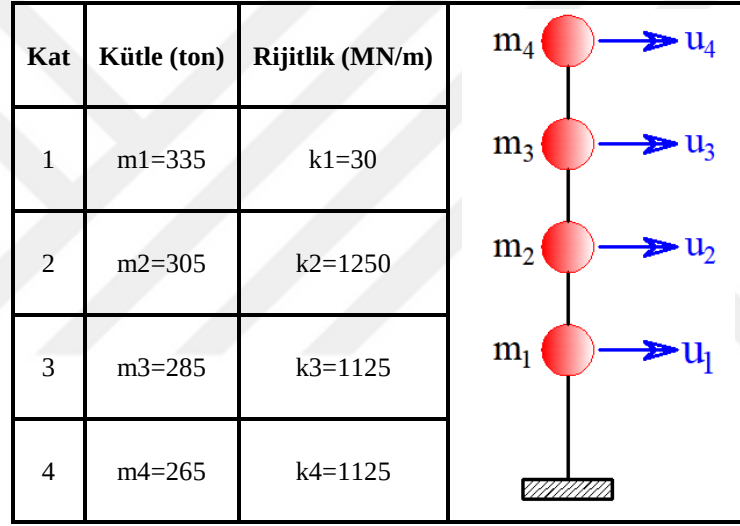


Şekil 3.49: TSD sistemin GP-DYNA ile analizi sonucu toplam ivme (m/s^2)-zaman (s) grafiği.

Şekil 3.42 - Şekil 3.49'de görüleceği üzere GP-DYNA ve SAP2000'de TSD sistemin aynı deprem altında analizi için aynı deplasman, hız, ivme grafikleri elde edilmiştir.

3.5.4. Dört Katlı Kayma Yapısı GP-DYNA ile Matlab Kodu Karşılaştırması

Alaska depremi 11.03.2002 tarihinde Denali National Park, Amerika Birleşik Devletleri'nde meydana gelmiştir. 7.9 Mw büyüklüğündeki depremin 5 km derinlikte meydana geldiği ve son 150 yılda ABD'de meydana gelen en büyük deprem olduğu belirtilmiştir. Yerleşime uzak konumu sebebiyle ölüm olmamış yalnızca birkaç yaralanma meydana gelmiştir. PEER Ground Motion Data Base'den alınan bilgiye göre Anchorage - DOI Off. of Aircraft İstasyonu'nda 90° açıyla g biriminde depreme ait ivme kaydı alınmıştır. $\Delta t(DT)= 0.005$ s olan depreme ait 34400 adet ölçüm (NPTS) bulunmaktadır. Kayıta filtreleme yapılmamıştır. Kayıt no: [RSN2095_DENALI_DOI-90.AT2](#)



Şekil 3.50: 4 katlı kayma yapısı modeli.

MATLAB programında daha önce verilen deprem kaydı kullanılarak Şekil 3.50'deki MDOF sistemin Newmark Yöntemi ile zaman tanım alanı analizi yapan (direct integration) program yazılmıştır. Sönüm oranı $\zeta=0.07$, kat kütleleri sırasıyla $m_1=335$, $m_2=305$, $m_3=285$ ve $m_4=265$ ton olacak şekilde sistem kütle matrisi oluşturulmuştur. Rijitlik matrisi için mN/m birimindeki rijitlikler kN/m birimine çevrilmiş; $k_1=30.000$, $k_2=1250.000$, $k_3=1125.000$, $k_4=1125.000$ kN/m alınarak sistem rijitlik matrisi oluşturulmuştur. Tüm katlar için görelî deplasman, görelî hız ve toplam ivmenin pik değerleri istendiği için programa maksimum mutlak değerleri gösterecek kısım konulmuştur.

GP-DYNA programı ve MATLAB kodu kullanılarak Denali Alaska depremi altında 4. kat için görelî deplasman, görelî hız, toplam ivme grafikleri çizdirilmiş ve sonuçların aynı olduğu gözlenmiştir.

Kayıt adedi: 34400
 Toplam kayıt süresi: 171.995 saniye
 Kayıt süresi aralığı: DT=0.005

GP-DYNA Analiz sonuçları

MASS MATRIX

I/J-----	1	2	3	4
1	3.350E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	3.050E+02	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00	2.850E+02	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.650E+02

INVERS OF THE MASS MATRIX

I/J-----	1	2	3	4
1	2.985E-03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	3.279E-03	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00	3.509E-03	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.774E-03

STIFFNESS MATRIX

I/J-----	1	2	3	4
1	1.280E+06	-1.250E+06	0.000E+00	0.000E+00
2	-1.250E+06	2.375E+06	-1.125E+06	0.000E+00
3	0.000E+00	-1.125E+06	2.250E+06	-1.125E+06
4	0.000E+00	0.000E+00	-1.125E+06	1.125E+06

EIGEN VECTORS

I/J-----	1	2	3	4
1	2.843E-02	-3.543E-02	-2.684E-02	-1.419E-02
2	2.892E-02	-1.429E-02	3.027E-02	3.635E-02
3	2.928E-02	1.816E-02	2.783E-02	-3.933E-02
4	2.945E-02	3.996E-02	-3.122E-02	1.828E-02

NORMALIZED EIGEN VECTORS

I/J-----	1	2	3	4
1	9.654E-01	-8.864E-01	8.596E-01	3.608E-01
2	9.821E-01	-3.576E-01	-9.696E-01	-9.242E-01
3	9.942E-01	4.545E-01	-8.914E-01	1.000E+00
4	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	-4.648E-01

NUMBER OF MODES = 4

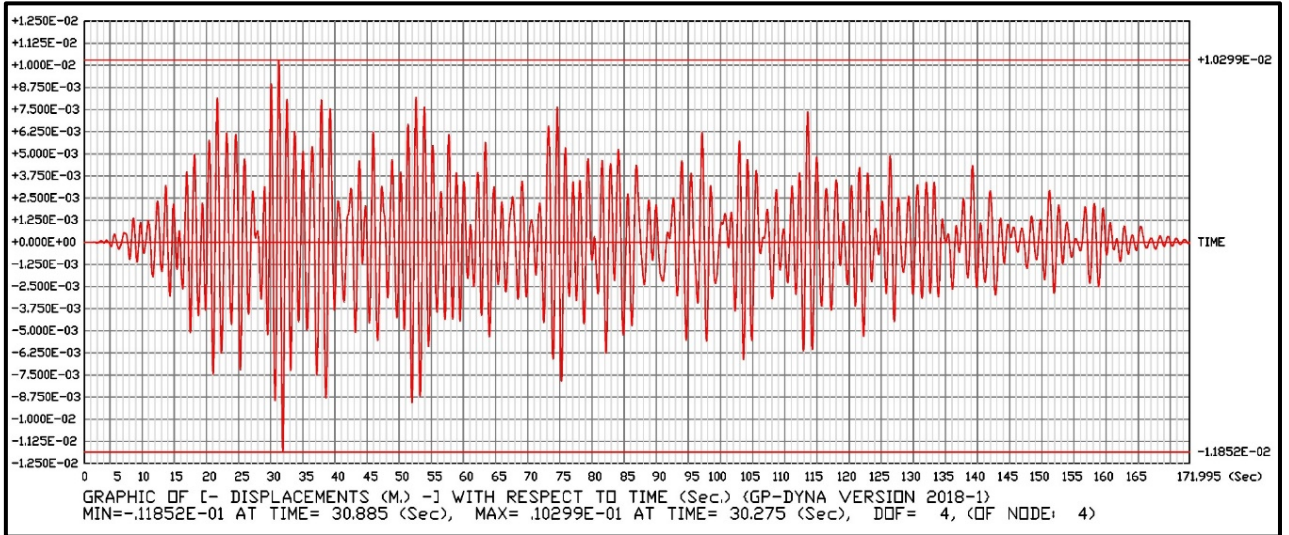
MODE NO	NODE NO	AXIS NO	ASSOCIATED DOF	EIGENVALUES W(RADIAN/S)	ANGULAR FREQ. (SECOND)	PERIODS (HERTZ)	FREQUENCY
=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
1	1	1	1	2.47255573E+01	4.97248000E+00	1.26359191E+00	7.91394749E-01
2	2	2	2	2.31568549E+03	4.81215699E+01	1.30569005E-01	7.65878550E+00
3	3	3	3	8.02946114E+03	8.96072605E+01	7.01191560E-02	1.42614381E+01
4	4	4	4	1.33779285E+04	1.15662995E+02	5.43232126E-02	1.84083369E+01

NUMBER OF RECORDS.....[NOK]=34400
 GRAVITATIONAL ACCELERATION.....[GY]=9.806650E+00
 TIME INCREMENTATION.....[DT]=5.000000E-03
 DAMPING COEFFICIENT.....[ZETA]=7.000000E-02
 INTEGRATION COEFFICIENT.....[GAMA]=5.000000E-01
 INTEGRATION COEFFICIENT.....[BETA]=1.666667E-01
 FIRST FREQUENCY.....[WI]=4.972480E+00
 LAST FREQUENCY.....[WJ]=1.156630E+02
 DAMPING COEFFICIENT FOR MASS.....[A0]=6.961472E-01

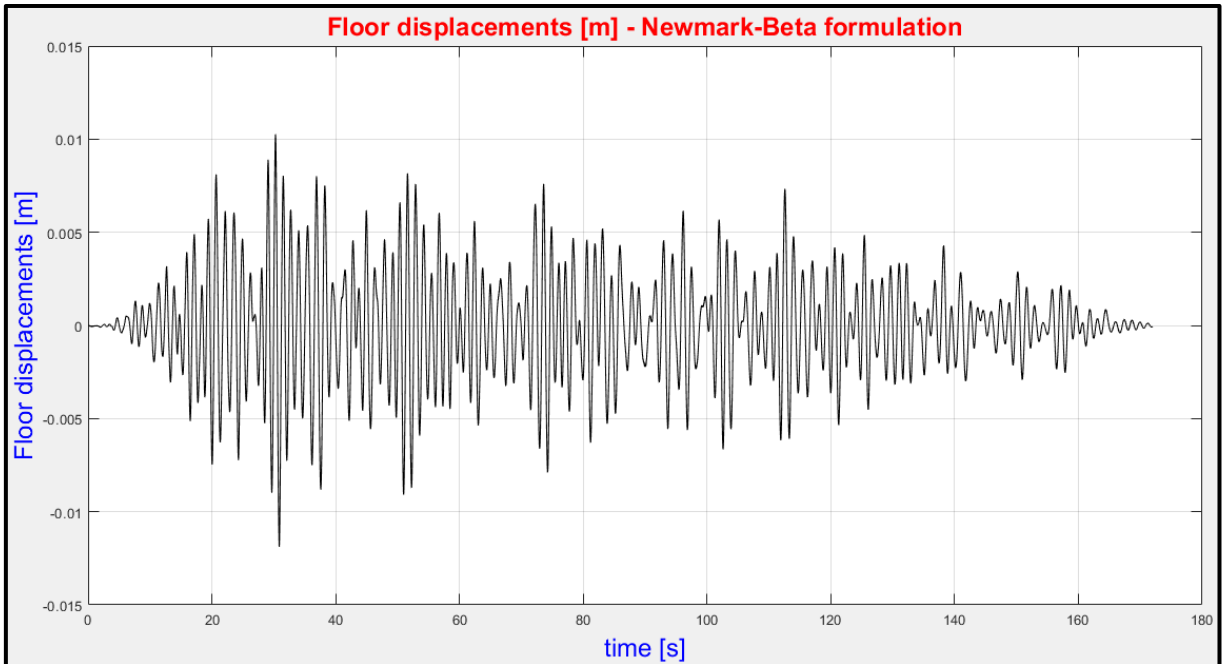
DAMPING COEFFICIENT FOR STIFFNESS... [A1]=1.210413E-03

DAMPING MATRIX

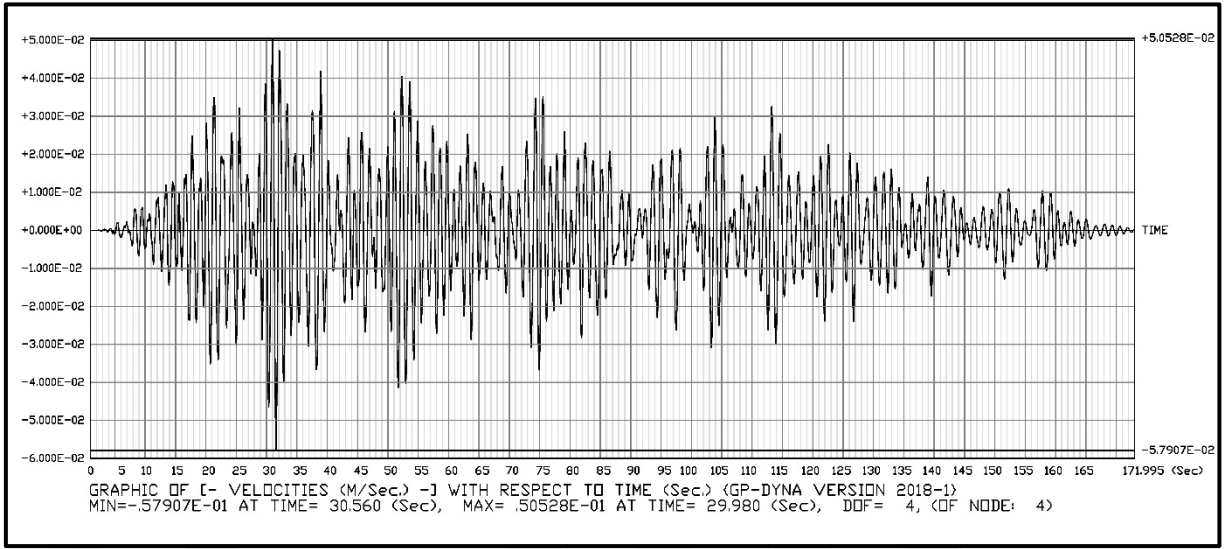
I/J	1	2	3	4
1	1.783E+03	-1.513E+03	0.000E+00	0.000E+00
2	-1.513E+03	3.087E+03	-1.362E+03	0.000E+00
3	0.000E+00	-1.362E+03	2.922E+03	-1.362E+03
4	0.000E+00	0.000E+00	-1.362E+03	1.546E+03



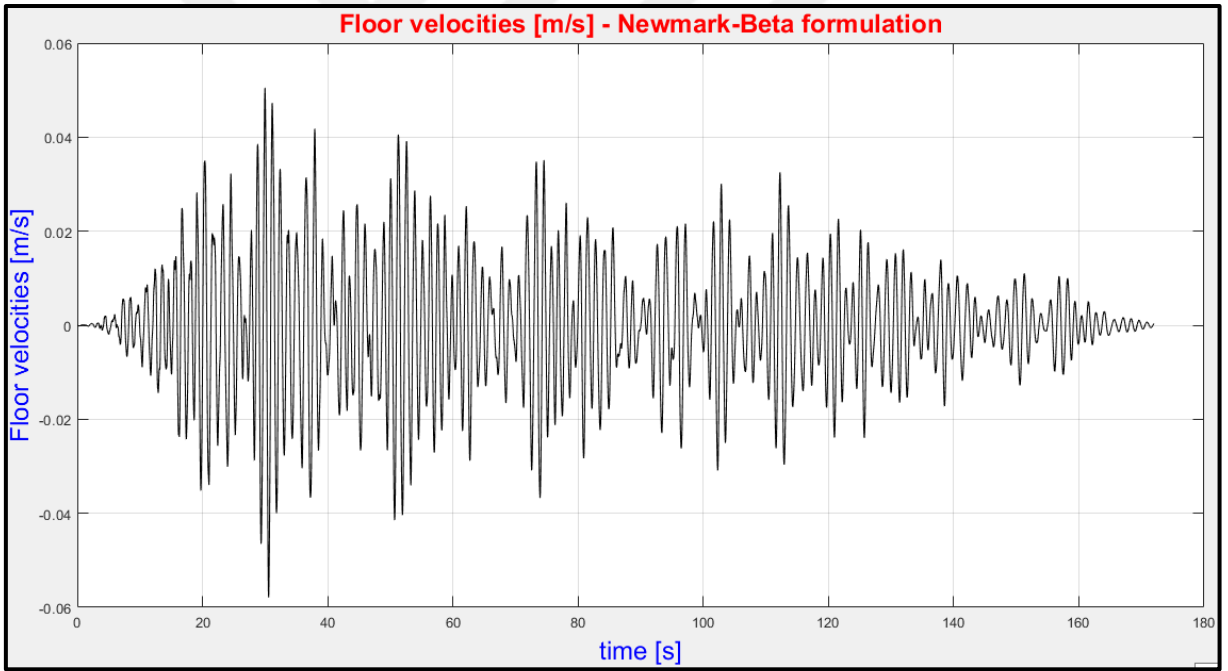
Şekil 3.51: GP-DYNA MDOF sistem 4. kat için görelî deplasman (m)-zaman (s) grafiği.



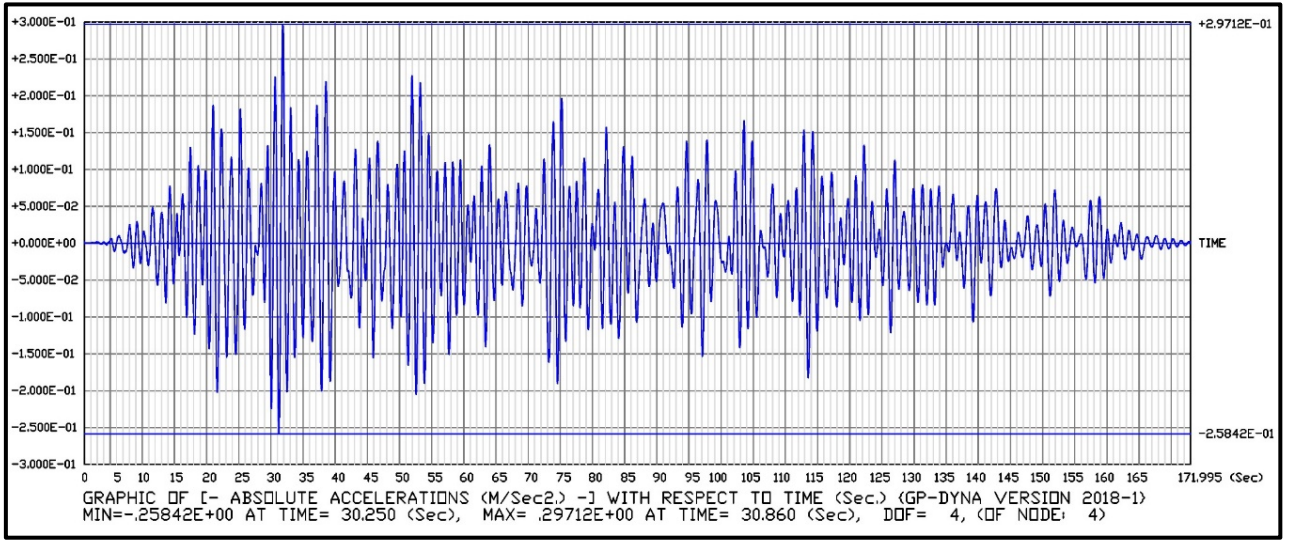
Şekil 3.52: MATLAB MDOF sistemin 4. katı için görelî deplasman (m) –zaman (s) grafiği.



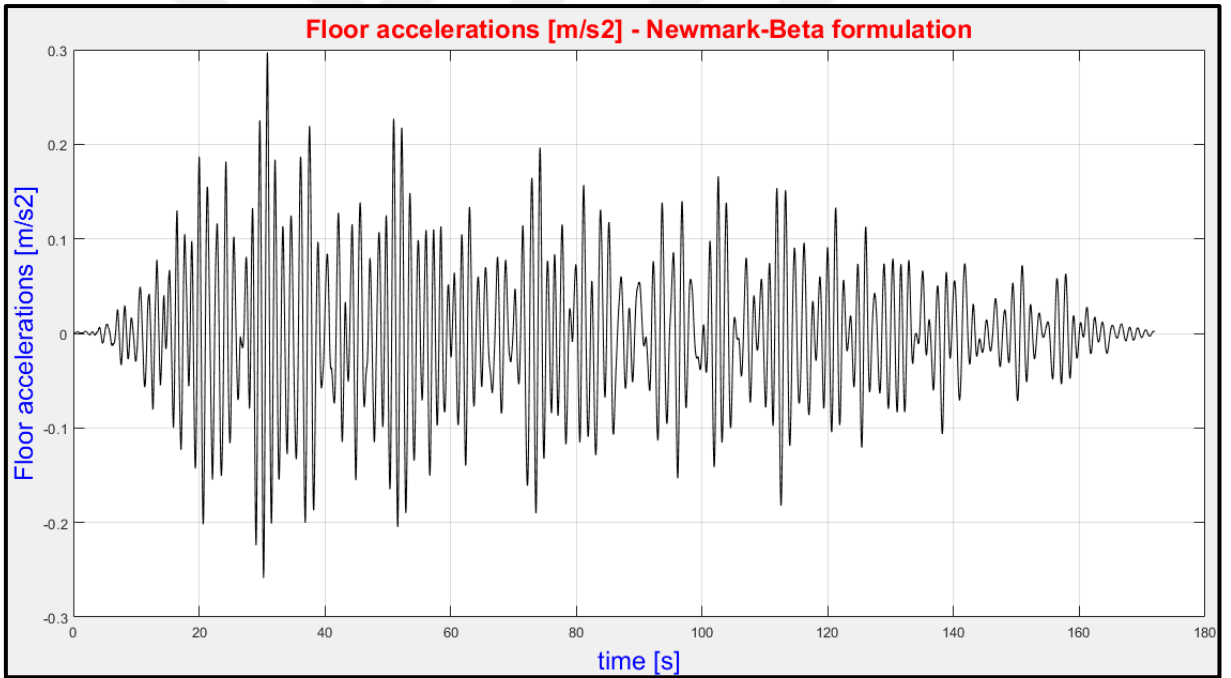
Şekil 3.53: GP-DYNA MDOF sistem 4. kat için görel hız (m/s)-zaman (s) grafiği.



Şekil 3.54: MATLAB sistemin 4. katı için görel hız (m/s)-zaman (s) grafiği.



Şekil 3.55: GP-DYNA MDOF sistem 4. kat için toplam ivme (m/s^2)-zaman (s) grafiği.



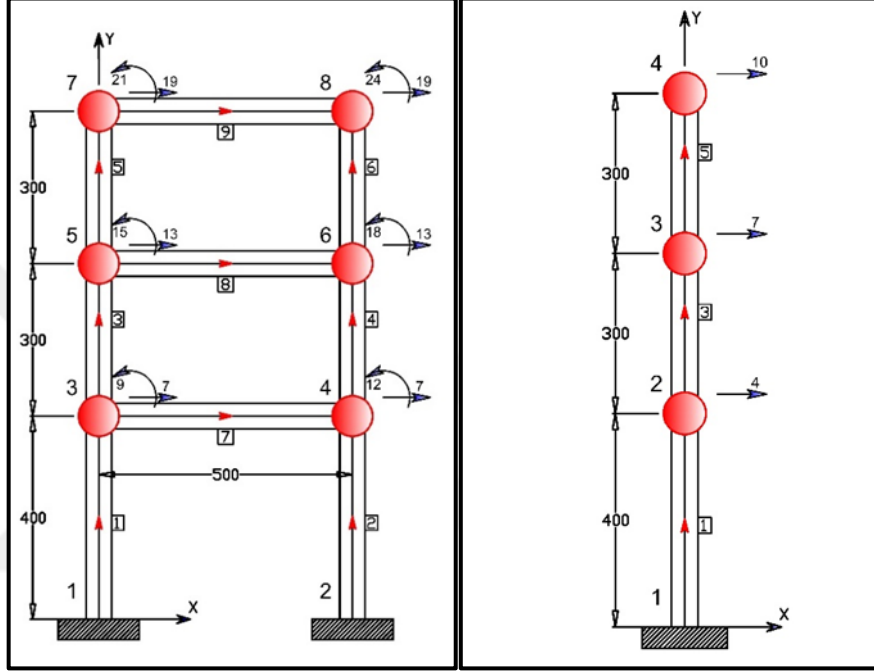
Şekil 3.56: MATLAB MDOF sistem 4. kat için toplam ivme (m/s^2)-zaman (s) grafiği.

Tablo 3.5: MDOF sistem 4. kat için GP-DYNA ile MATLAB karşılaştırması.

	Minimum Değerler		Maksimum Değerler	
	GP-DYNA	MATLAB	GP-DYNA	MATLAB
Deplasman (m)	-0.011852	-0.011887	0.010299	0.010264
Hız (m/s)	-0.057907	-0.057907	0.050528	0.050528
İvme (m/s^2)	-0.25842	-0.31174	0.29712	0.35084

3.5.5. Üç Katlı Kayma Yapısı GP-DYNA ile SAP2000 Karşılaştırması

Topçu (2014) ders notları, sayfa 206'dan alınan ve notlarda sayısal örnek 1'de verilmiş ve Şekil 3.57'de görülen çerçeve sistem; SAP2000 programında Newmark Yöntemi (Linear Acceleration) ile analiz edildikten sonra GP-DYNA ile karşılaştırılmıştır. Çerçeve açıklığı örnekte verilmediği için 5 m olarak kabul edilmiştir.



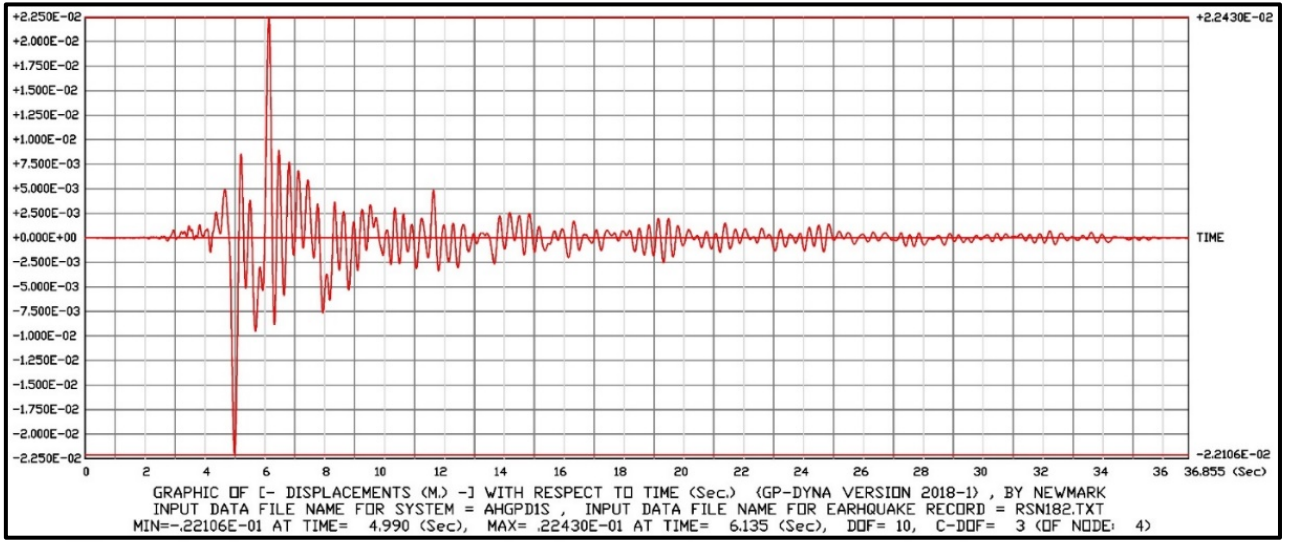
Şekil 3.57: Topçu (2014) ders notlarından alınan üç katlı kayma yapısı örneği.

Verilen örnek için SAP2000 programında iki adet model hazırlanmıştır: 1) 3DOF model 2) Kayma çerçevesi modeli. İki model için de örneğe uygun olarak “C30/37” adlı yeni bir malzeme tanımlanmış ve elastisite modülü $E = 31800 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$ olarak verilmiştir. Poisson oranı değiştirilmemiş, ısı analizi yapılmayacağından genleşme katsayısı 0 kabul edilmiştir. Kesit tanımlanırken 3DOF model kesiti için Rectangular section $\rightarrow$ 1 m Depth (t3) ve 0.6 m Width (t2) girilmiş, Material C30/37 seçilmiştir. Dolayısıyla atalet momenti değeri $I = 6.250 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$ olmaktadır. Diğer model için ise sayısal örnekteki kesit ebatları kullanılarak Rectangular section $\rightarrow$ 0.5 m Depth (t3) ve 0.3 m Width (t2) girilmiş, Material C30/37 seçilmiştir, atalet momenti değeri $I = 3.125 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$. Kat kütleleri 3DOF için U1 doğrultusunda 1. katta 40 t, 2. katta 25 t, 3. katta 20 t olarak etkililmiş, diğer modellerde her kat için yarısı alınarak döğüm noktalarına paylaştırılmıştır. Örneğin sayısal örnekte 1. kat için verilen 40 ton’luk kütle 2 ve 6 numaralı döğüm noktalarına yatayda 20 ton olarak etkililmiştir.

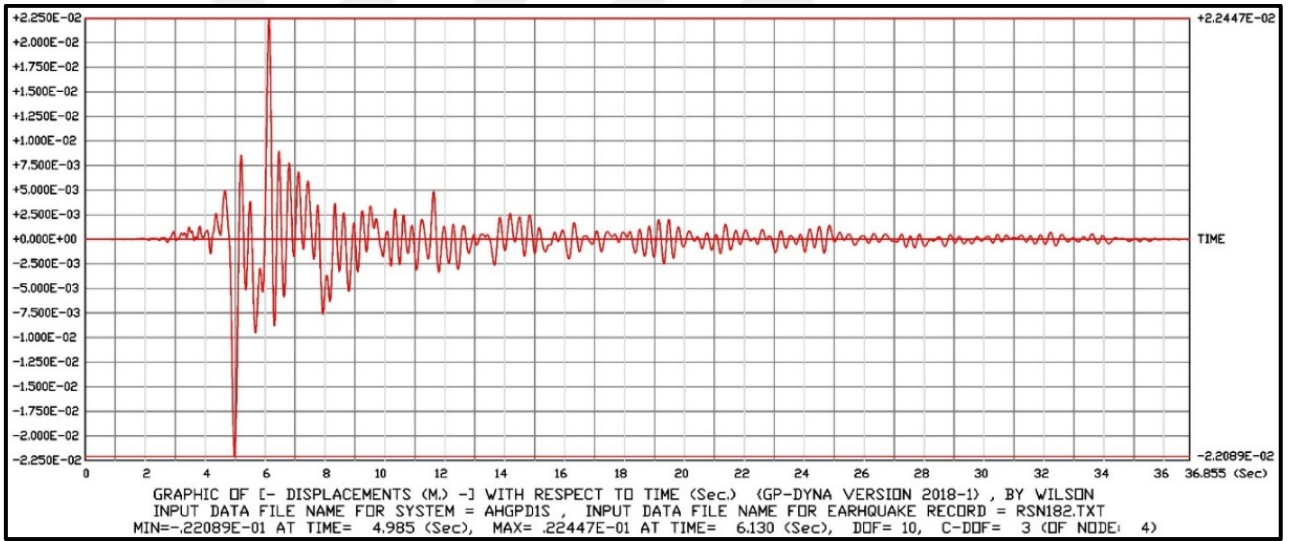
3DOF sistem için düğüm noktalarına U1 eksenini hariç “restraint”; kayma çerçevesinde R1, R2, R3 için “restraint” ve her katta “diaphragm” tipi “constraint” atanmıştır. SAP2000 programında Define -> Functions -> Time History -> From File -> Add New Function şeklinde [RSN182_IMPVAL.L.H_H-E07230](#) yatay ivme kaydı kullanılarak IMPVALL_H tanımlanmıştır. Bu işlem yapılırken, PEER deprem kaydına uygun olarak 7372 nokta tanımlanmıştır. Deprem tanıtılırken “all files” tipinde dosya seçilip yüklendikten sonra PEER kaydındaki ilk 4 bilgi satırı atlatılmış, her satırda 5 okuma 0.005 s aralıklarla yaptırılmıştır. Deprem kaydının doğruluğu “Display Graph” seçeneğiyle çizdirilerek ve SeismoSignal (2018) ile karşılaştırılarak kontrol edilmiştir.

Daha sonra SAP2000 programının tüm bilgisayarlarda deprem kaydı istemeden çalışabilmesi için “Convert to User Defined” seçeneğiyle deprem ivme datası dosyaya işlenmiştir. Deprem kaydı oluşturulduktan sonra Define -> Load Cases -> Add New Load Case şeklinde Load Case IMPVALL adıyla tanımlanmış, Load Case Type -> Time History, Analysis Type -> Linear, Solution Type -> Direct Integration, Load Type -> Accel olmak üzere daha önce yüklenmiş olan IMPVALL_H isimli deprem fonksiyonu seçilmiştir. İvme kaydı g biriminde olduğu için ivme kayıtları m/s^2 birimine çevrilmek üzere 9,8067 katsayısıyla çarpılmıştır. IMPVALL_H U1 doğrultusunda etkilmiştir. Time Integration metodu Newmark seçilmiş, otomatik çıkan $\gamma=0.5$ ve $\beta=0.25$ katsayıları değiştirilmemiştir. Sönüm için Specify Damping by Period -> sönüm oranı %5 sönüm girilmiştir. Daha sonra tanımlanmış IMPVALL Load Case’i altında analiz yaptırılarak Display -> Show Plot Functions şeklinde düğüm noktaları için yatay eksenlerde “displacement”, “velocity”, “acceleration” ve “absolute acceleration” grafikleri çizdirilmiştir. 3DOF ve kayma çerçevesi için elde edilen değerler ile GP-DYNA Wilson ve Newmark yöntemleriyle elde edilen değerler Tablo 3.6’da verilmiştir. GP-DYNA ile analizde hangi yöntem seçilirse seçilsin; 3DOF sistem için de, kayma çerçevesi modeli için de kütle matrisleri aynı oluşturulduğu ve dummy serbestlikler program tarafından bilgisayar kapasitesinin optimum kullanılması amaçlı analize dahil edilmediğinden bire bir aynı sonuçlar elde edilmektedir.

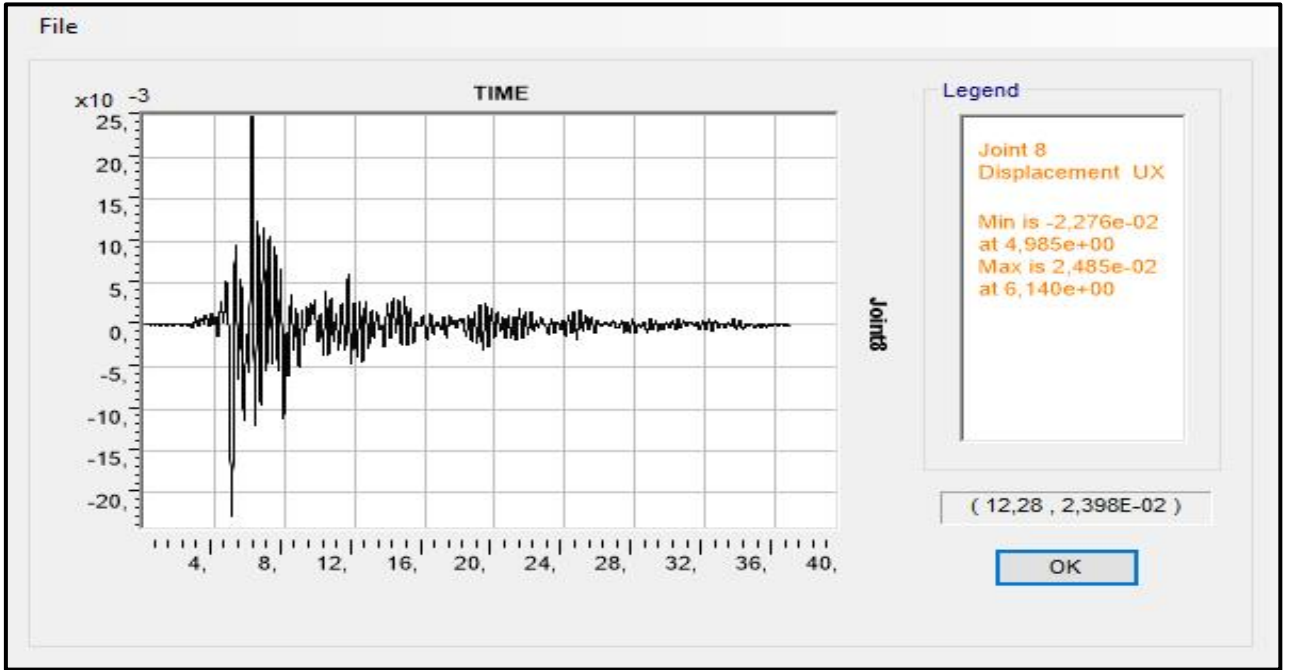
Kayıt adedi: 7372 Toplam kayıt süresi: 36.855 saniye Kayıt süresi aralığı: DT=0.005



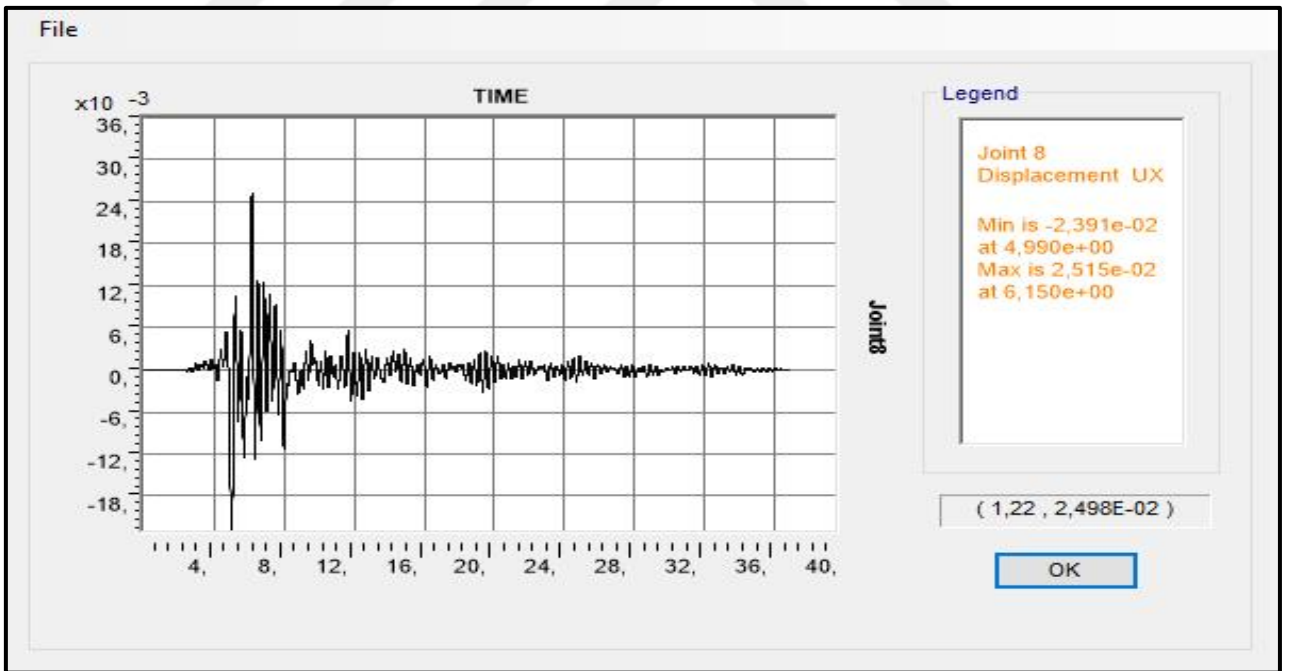
Şekil 3.58: GP-DYNA Newmark yöntemi ile analiz 3. kat için görelî deplasman (m)-zaman (s) grafiğı.



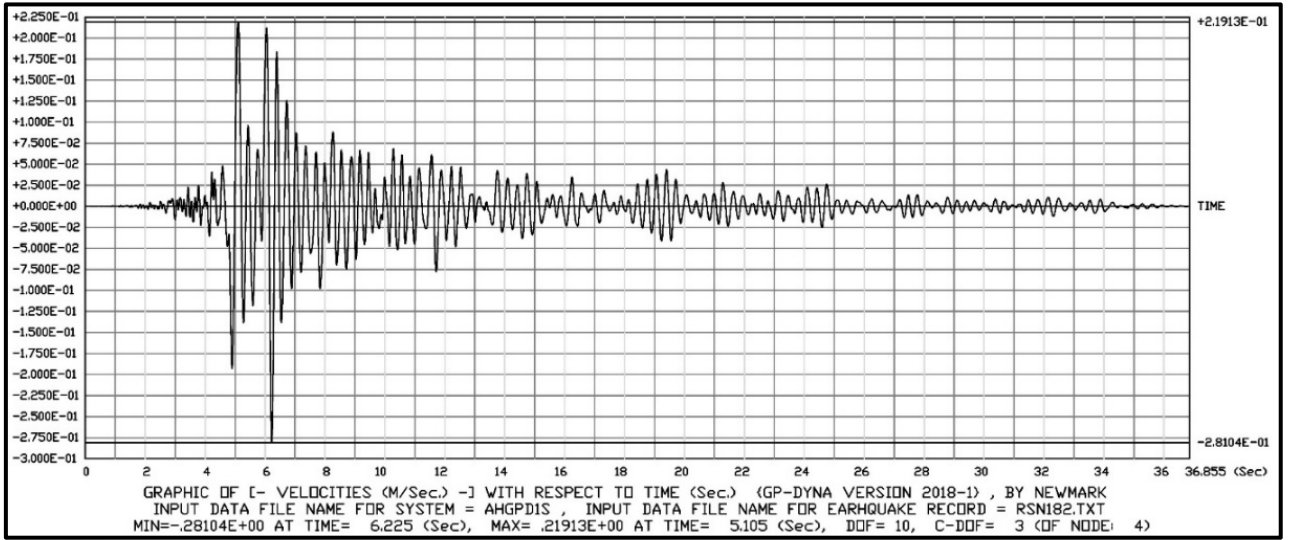
Şekil 3.59: GP-DYNA Wilson yöntemi ile analiz 3. kat için görelî deplasman (m)-zaman (s) grafiğı.



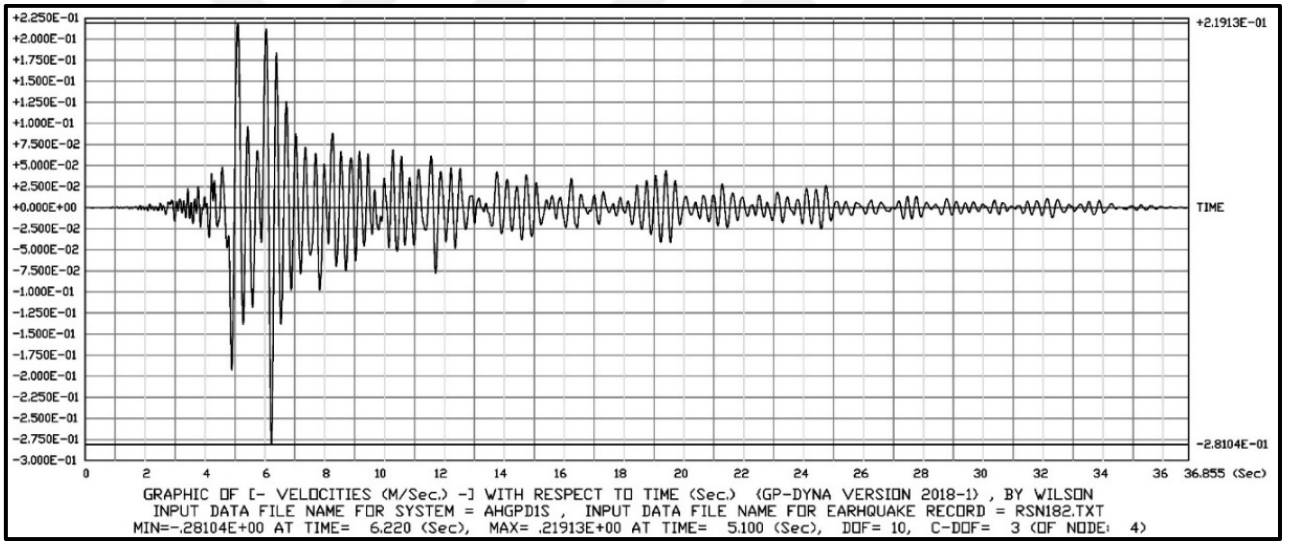
Şekil 3.60: SAP2000 ile analiz 3DOF sistem 3. kat için görelî deplasman (m)-zaman (s) grafiğı.



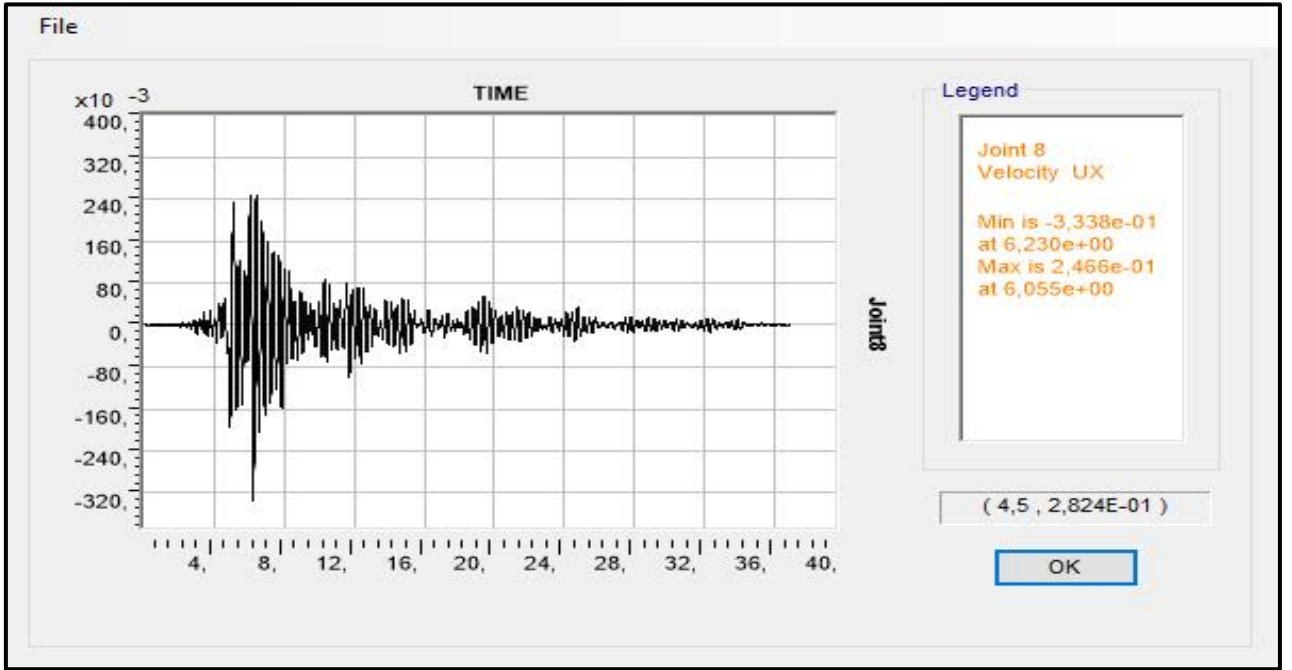
Şekil 3.61: SAP2000 ile analiz kayma çerçevesi 3. kat için görelî deplasman (m)-zaman (s) grafiğı.



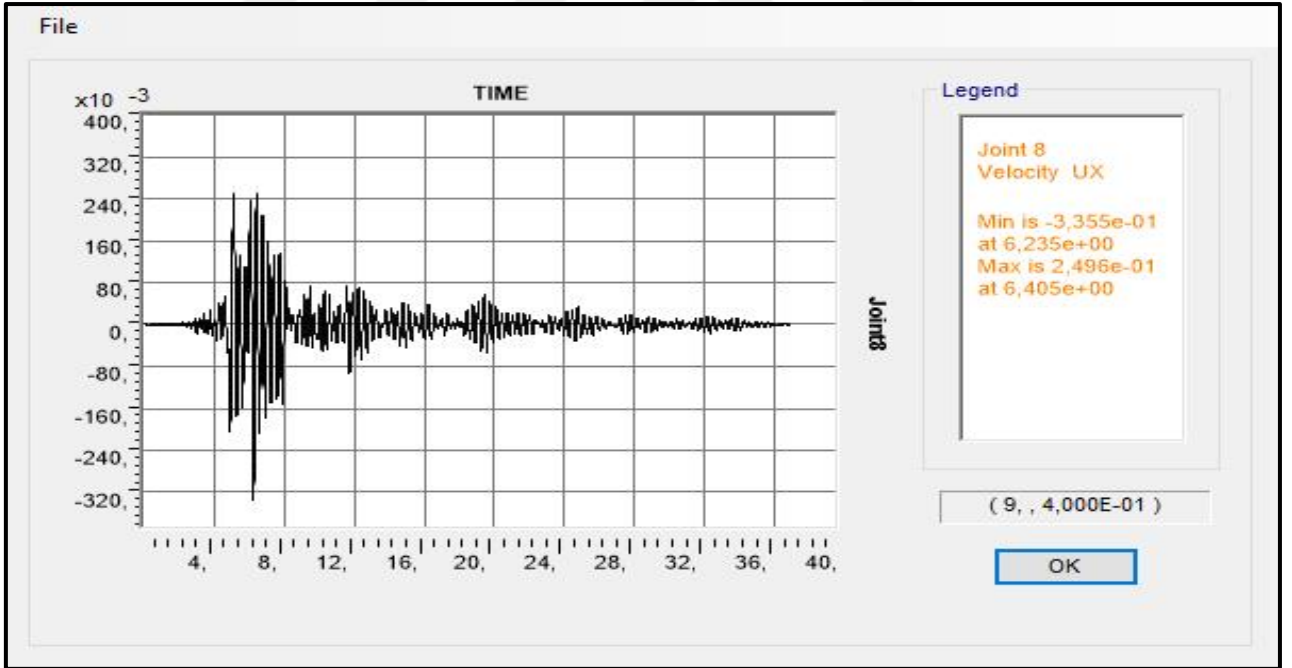
Şekil 3.62: GP-DYNA Newmark yöntemi ile analiz 3. kat için görelî hız (m/s)-zaman (s) grafiğı.



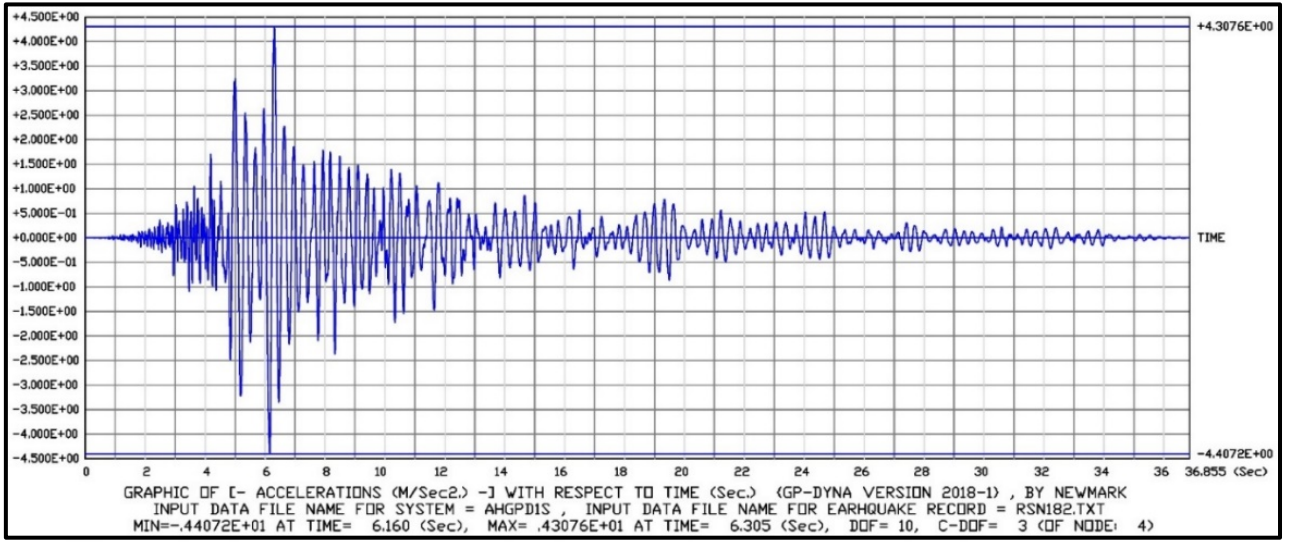
Şekil 3.63: GP-DYNA Wilson yöntemi ile analiz 3. kat için görelî hız (m/s)-zaman (s) grafiğı.



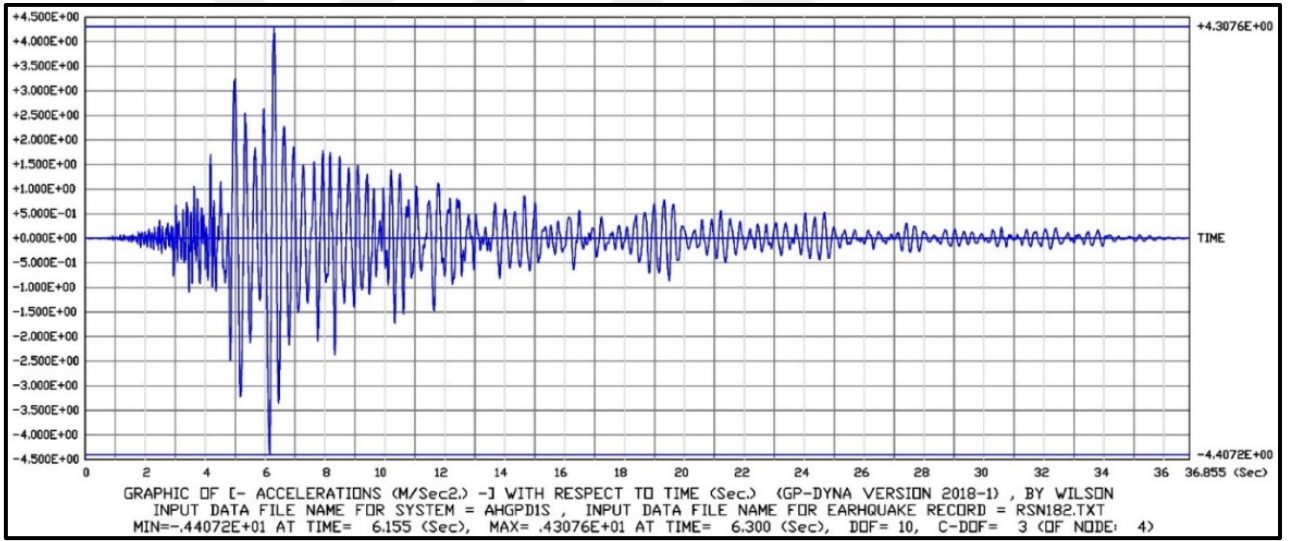
Şekil 3.64: SAP2000 ile analiz 3DOF sistem 3. kat için görelî hız (m/s)-zaman (s) grafiğı.



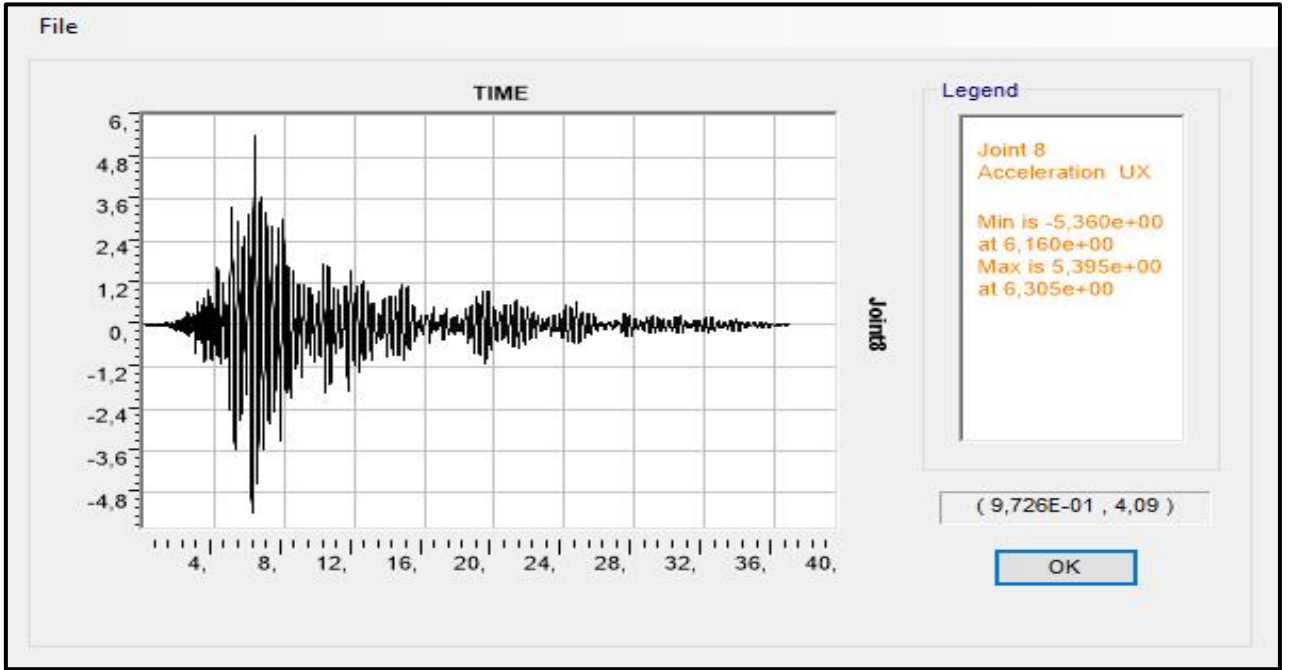
Şekil 3.65: SAP2000 ile analiz kayma çerçevesi 3. kat için görelî hız (m/s)-zaman (s) grafiğı.



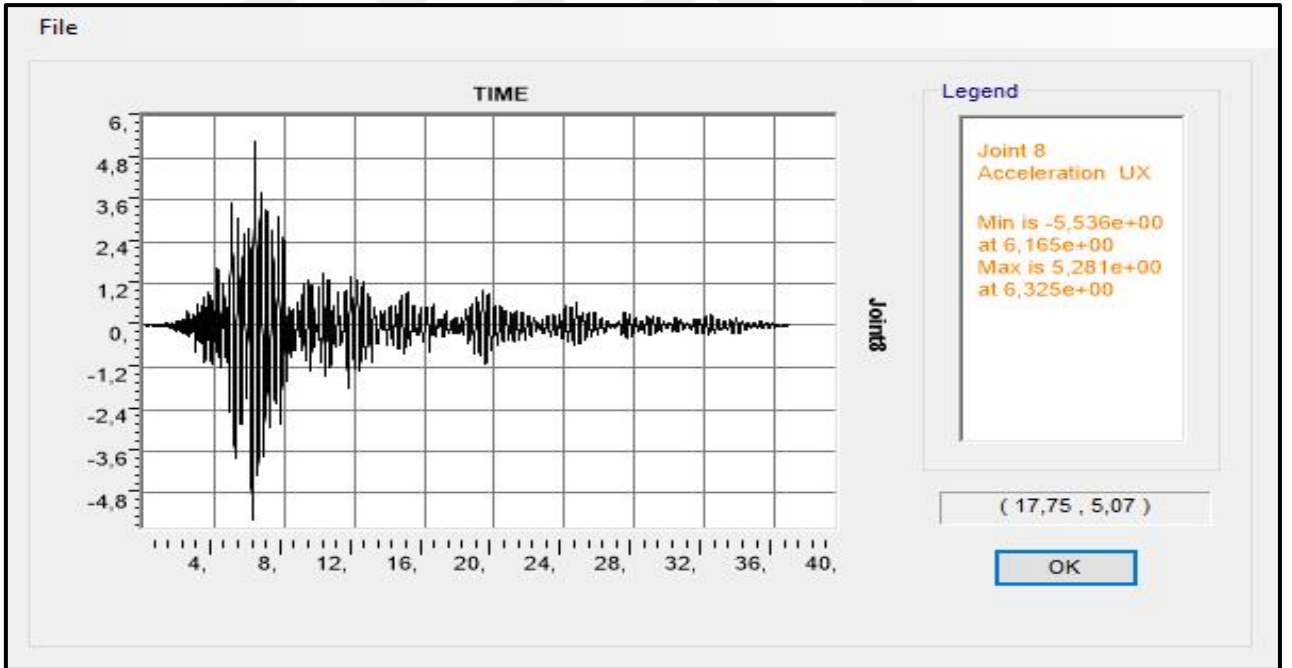
Şekil 3.66: GP-DYNA Newmark yöntemi ile analiz 3. kat için görel ivme (m/s^2)-zaman (s) grafiği.



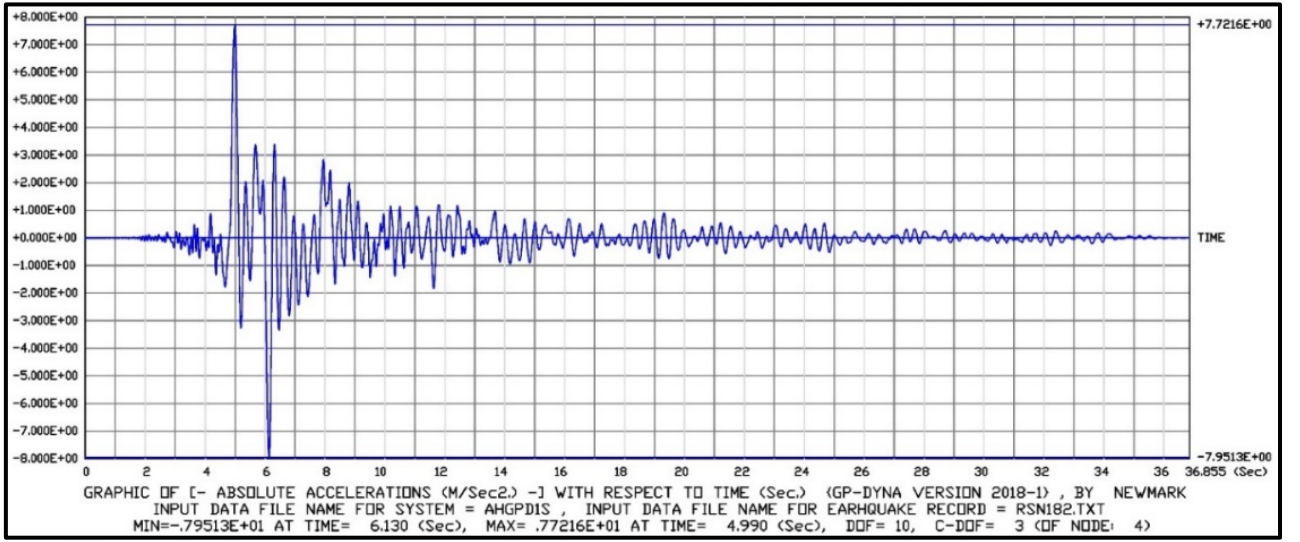
Şekil 3.67: GP-DYNA Wilson yöntemi ile analiz 3. kat için görel ivme (m/s^2)-zaman (s) grafiği.



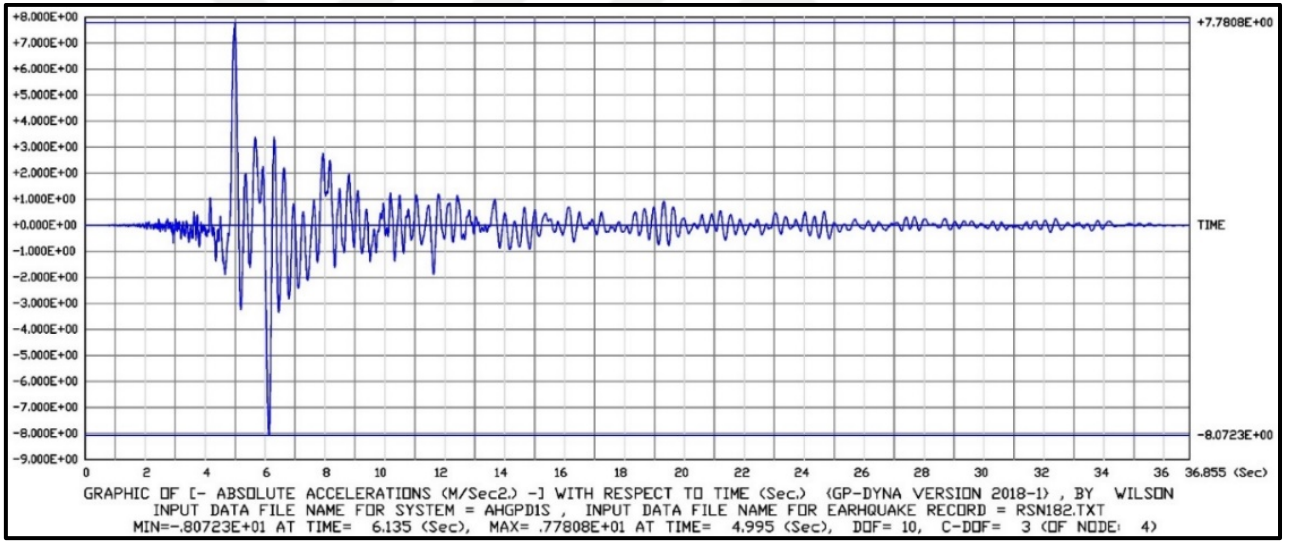
Şekil 3.68: SAP2000 ile analiz 3DOF sistem 3. kat için görel ivme (m/s^2)-zaman (s) grafiği.



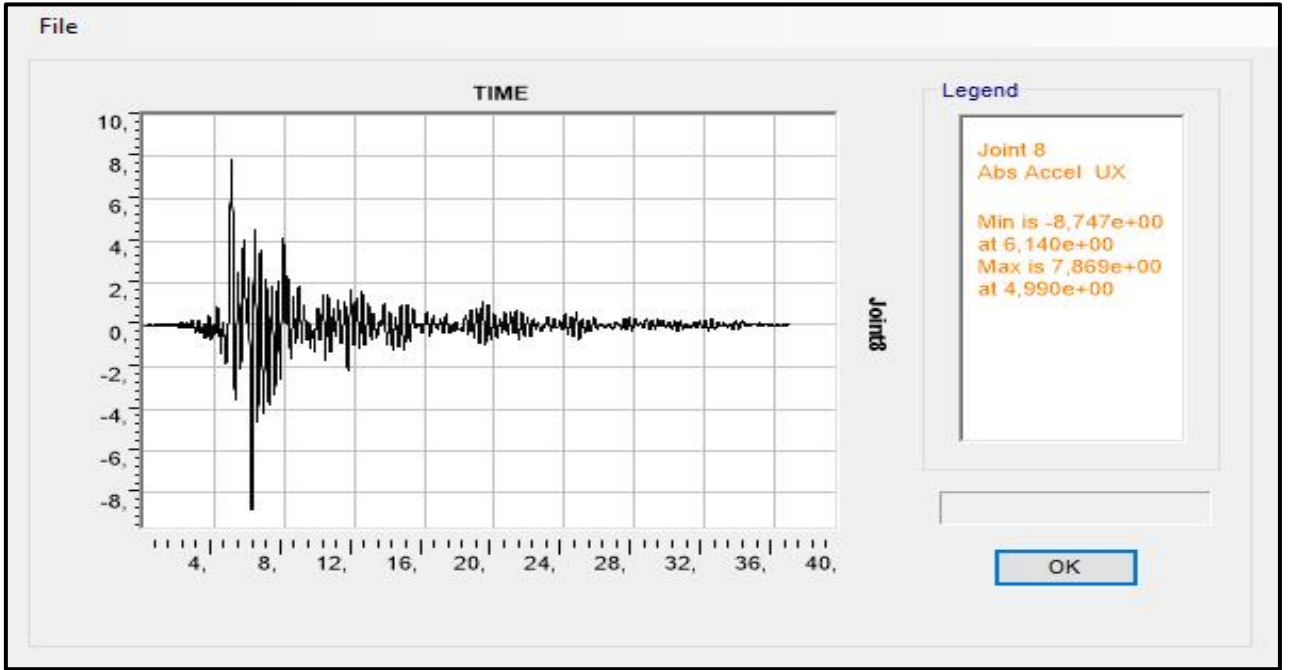
Şekil 3.69: SAP2000 ile analiz kayma çerçevesi 3. kat için görel ivme (m/s^2)-zaman (s) grafiği.



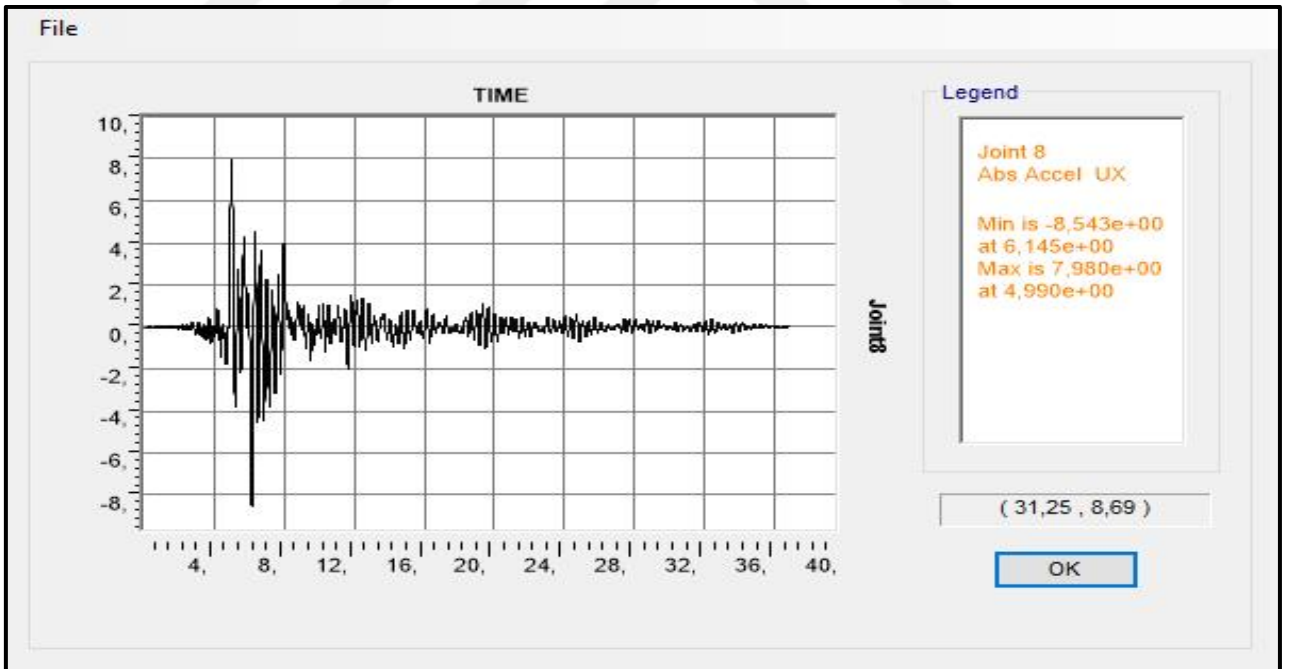
Şekil 3.70: GP-DYNA Newmark yöntemi ile analiz 3. kat için toplam ivme (m/s^2)-zaman (s) grafiği.



Şekil 3.71: GP-DYNA Wilson yöntemi ile analiz 3. kat için toplam ivme (m/s^2)-zaman (s) grafiği.



Şekil 3.72: SAP2000 ile analiz 3DOF sistem 3. kat için toplam ivme (m/s^2)-zaman (s) grafiği.



Şekil 3.73: SAP2000 ile analiz kayma çerçevesi 3. kat için toplam ivme (m/s^2)-zaman (s) grafiği.

Tablo 3.6: GP-DYNA Newmark – Wilson yöntemleri ile SAP2000 3DOF sistem ve kayma çerçevesi karşılaştırması.

		DEPLASMAN (m)	ZAMAN (s)	HIZ (m/s)	ZAMAN (s)	GÖRELİ İVME (m/s ²)	ZAMAN (s)	TOPLAM İVME (m/s ²)	ZAMAN (s)
GP-DYNA (NEWMARK)	MIN	-0.22106 E-01	4.990	-0.28104E+00	6.225	-0.44072E+01	6.160	-0.79513E+01	6.130
	MAX	0.22430E-01	6.135	0.21913E+00	5.105	0.43076E+01	6.305	0.77216E+01	4.990
GP-DYNA (WILSON)	MIN	-0.22089E-01	4.985	-0.28104E+00	6.220	-0.44072E+01	6.155	-0.807723E+01	6.135
	MAX	0.22447E-01	6.130	0.21913E+00	5.100	0.43076E+01	6.300	0.77808E+01	4.995
SAP2000 (3DOF)	MIN	-2.276e-02	4.985	-3.338E-01	6.230	-5.360e+00	6.160	-8.747e+00	6.140
	MAX	2.485e-02	6.140	2.466E-01	6.055	5.395e+00	6.305	7.869e+00	4.990
SAP2000 (KAYMA Ç.)	MIN	-2.391e-02	4.990	-3.355E-01	6.235	-5.536e+00	6.165	-8.543e+00	6.145
	MAX	2.515e-02	6.150	2.496E-01	6.405	5.281e+00	6.325	7.980e+00	4.990

Tablo 3.6’da verildiği üzere, GP-DYNA Newmark ve Wilson yöntemleri neredeyse aynı sonucu vermektedir, SAP2000 programıyla karşılaştırıldığında ise kütle matrisinde diyagonal harici terimler sıfırlandığı için oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Görelî deplasmanlarda farklar 10^{-3} mertebesinde olup; Intel® Core(TM) i3-5005 CPU @2.00GHz 2.00 işlemci, 4.00 GB Installed RAM ve 64-bit işletim sistemine sahip bir dizüstü bilgisayarda GP-DYNA ile analiz 2 saniyede tamamlanırken, SAP2000 programı ile analiz 12 dakika sürmüştür.

3.5.6. Örnek Köprü Modeli

Bu tez kapsamında incelenmek üzere mevcut köprülere ilişkin örnekler incelenmiş ve çalışmaya yönelik geometrileri araştırılmıştır. Bunlardan biri; Karakaya Baraj Gölü üzerinde inşa edilen ve 16 Haziran 1986 tarihinde hizmete açılmış, Türkiye’nin en uzun demir yolu köprüsü ünvanını taşıyan Karakaya Demiryolu Köprüsü’dür. 2.030 m uzunluğundaki köprü, yaklaşık olarak 60 m yüksekliğinde olup, 30 adet betonarme ayağın üzerine, her biri 366 ton ağırlığında ve 65 m boyundaki 29 adet çelik kirişten oluşturulmuştur. 70 cm çapında 420 m kaya ankaraj kazığı kullanılmıştır. Ayrıca ayaklar altında $\phi 120$ ve $\phi 200$ cm çaplı kazıklar da bulunmaktadır (Sarıcı ve diğ., 2011).

Araştırma, söz konusu köprünün olanaklar dâhilinde elde edilebilen geometrik bilgileri kullanılarak ve üç açıklık hesaba katılarak gerçekleştirilmiştir. Söz konusu köprünün örnek olarak alınmasındaki ana etkenler, kısmen de olsa bazı bilgilerin bulunması, servis ömrü esnasında güçlendirilmeye ihtiyaç duyulmuş olması gibi nedenlerdir. Profil bilgileri elde edilemediğinden; taşıyıcı sistemi oluşturan çelik profillerin kesit ve malzeme özellikleri, görüntüler üzerinden yaklaşık ölçekli elde edilen bilgilere dayanmaktadır.

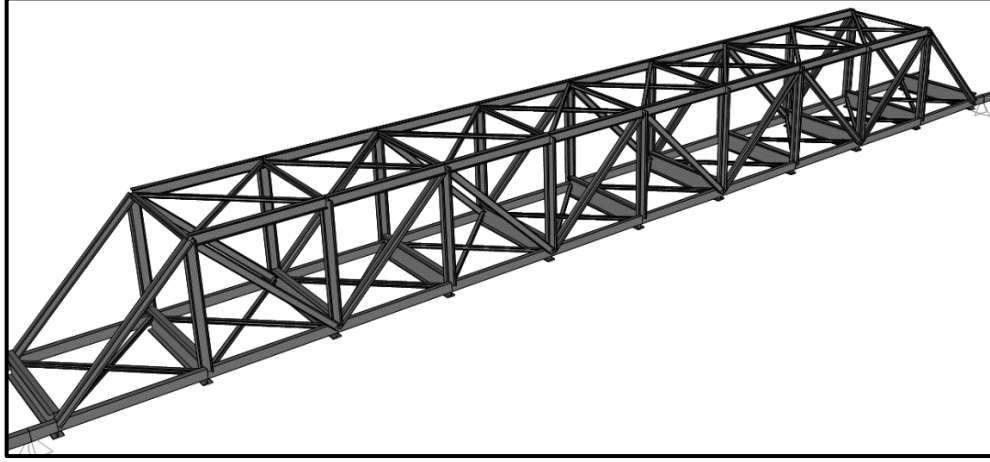


Şekil 3.74: Karakaya Köprüsü Malatya Kenarı (Sarıcı ve diğ., 2011).

Söz konusu yayından elde edilebilen geometri bilgileri eşliğinde; Karakaya Köprüsü'nün üç açıklığı, SAP2000 programında 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Mevcut bilgiler arasında profil bilgilerinin bulunmaması sebebiyle; taşıyıcı sistemi oluşturan çelik profiller için görüntüler üzerinden yaklaşık bir oran belirlenip, denemeler ve doğrulama (verification) yapılmıştır. Veriler Karakaya Demiryolu Köprüsü'ne ait yayınlardan (Sarıcı ve diğ., 2011) elde edilen bilgiler ışığında yorumlanarak hazırlanmıştır. Bu nedenle analiz sonuçları köprü ile doğrudan ilişkilendirilmemelidir. Köprü platformunun köprü ayağına oturduğu bir bölgede hayali bir zafiyet (elastik bağlantı) oluşturulmuştur. Bu durumda sabit titreşim altında davranış araştırılmıştır.

Statik analizlerin doğrulaması için SAP2000 ve GP-DYNA programları birlikte kullanılmıştır. Her iki bilgisayar programının statik analiz sonuçları uyumludur. Dinamik analizler ise yalnızca GP-DYNA programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

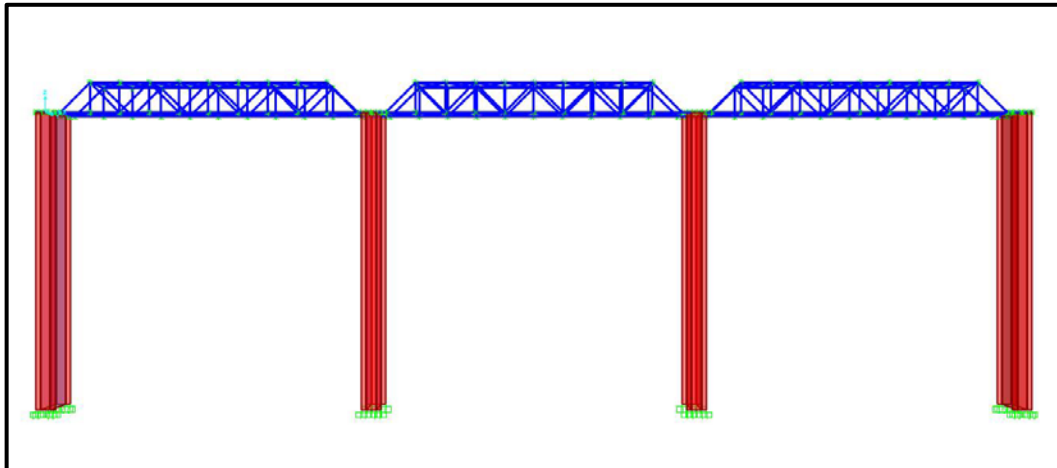
Şekil 3.75'de sistemin statik analizlerde kullanılan SAP2000 modelindeki kompozit kiriş görüntüsü sunulmaktadır.



Şekil 3.75: SAP2000 statik analiz modeli.

SAP2000 ile analizlerde izlenen adımlar:

- 1) Köprünün 3 açıklıklı 3 boyutlu (3D) modelinin hazırlanması
- 2) 3 boyutlu (3D), tek açıklıklı, sabit mesnetli, basitleştirilmiş modeli üzerinden (Şekil 3.76) eleman enkesit ve atalet momentlerinin belirlenmesi
- 3) Basitleştirilmiş model üzerinden belirlenen enkesit ve atalet momentlerinin 3 açıklıklı 3D sisteme aktarılması
- 4) 3 açıklıklı 3D modeli temsil edecek, 3 açıklıklı 2 boyutlu (2D) modelinin hazırlanması ve 3 açıklıklı 3D model ile karşılaştırılması.



Şekil 3.76: Karakaya Köprüsü 3 açıklıklı 3D SAP2000 modeli.

Basitleştirilmiş model üzerinde analizler

AASHTO 9.11.3.1’de; hareketli yükler ve bu yüklerin neden olduğu dinamik etki altında, köprü üstyapısında oluşan maksimum sehîm miktarının, açıklığın 1/800’ünden küçük olması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca şehir merkezinde bulunan ve kısmen yayalar tarafından kullanılan köprüler için ise; sehîm değeri, açıklığın 1/1000’ünden küçük olmalıdır (AASHTO, 2002).

Tren yükü hesabı için TCDD’nin (2011) yayınladığı Yük Vagon Rehberi’ne bakıldığında yükleme sınırı / vagon boyunun 7 t/m’yi geçmediği görülmüştür. Dolayısıyla emniyetli tarafta kalınması amaçlı tren yükü 8 t/m alınarak, 3 boyutlu SAP2000 modelinde çerçeve elemanlar üzerine 4 t/m yayılı hareketli yük olarak paylaştırılmıştır. COMB1 yük kombinasyonu TS 500 (2000)’e uygun olarak $1.4 * \text{ölü yükler} + 1.6 * 1.3 * \text{hareketli tren yükü}$ olarak verilmiştir.

Bu bilgiler ışığında köprüde tek açıklık için ağırlık 3590.46 kN’ a denk gelecek ve sehîm miktarı açıklığın 1000’de 1’i olan 65 mm’yi geçmeyecek şekilde enkesitler ve atalet momentleri denenmiştir. Basitleştirilmiş üç boyutlu SAP2000 modelinde, zati yükler altında analizde mesnetlere bağlı çerçeve elemanlarda kesme kuvveti 898.20 t olarak bulunmuş, $898.20 * 4 = 3592.8$ kN ağırlık elde edilmiştir. COMB1 yük kombinasyonu altında yapılan analizde ise maksimum sehîm miktarının 64.91 mm olduğu görülmüştür. Mesnet reaksiyonu yerine elemanlardaki kesme kuvvetinin alınma sebebi, hazırlanan basitleştirilmiş modelde çerçeve elemanların mesnetten sonra da devam ediyor oluşudur.

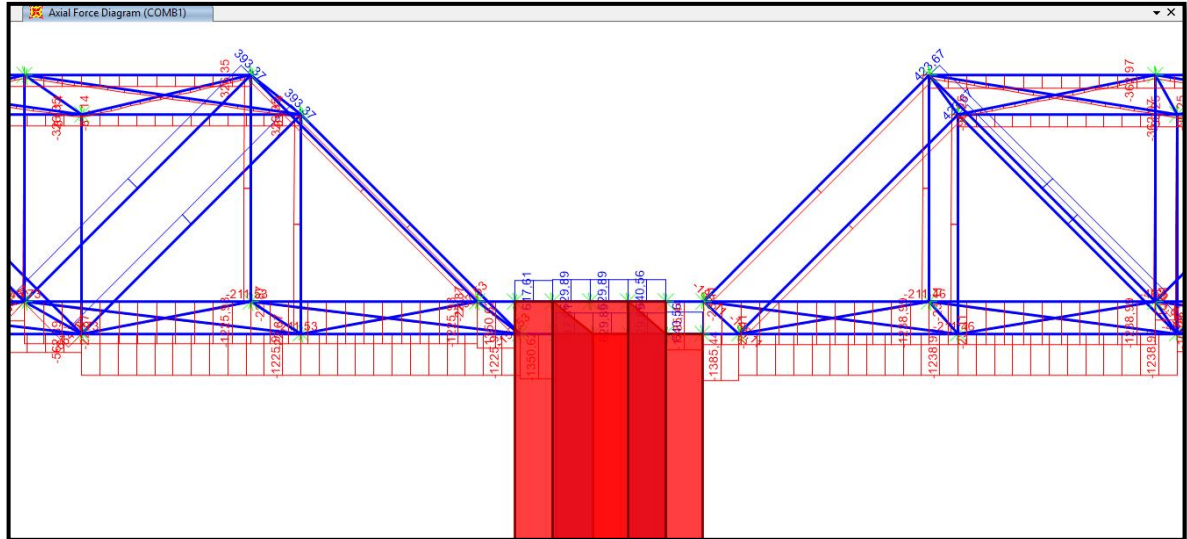
3 açıklıklı 3D model üzerinde analizler

Basitleştirilmiş model üzerinde profil denemeleri sonucu elemanlar için belirlenen enkesit ve atalet momenti değeri, 3 açıklıklı 3D SAP2000 modeline aktarılmış ve COMB1 yük kombinasyonu altında analiz yapılmıştır.

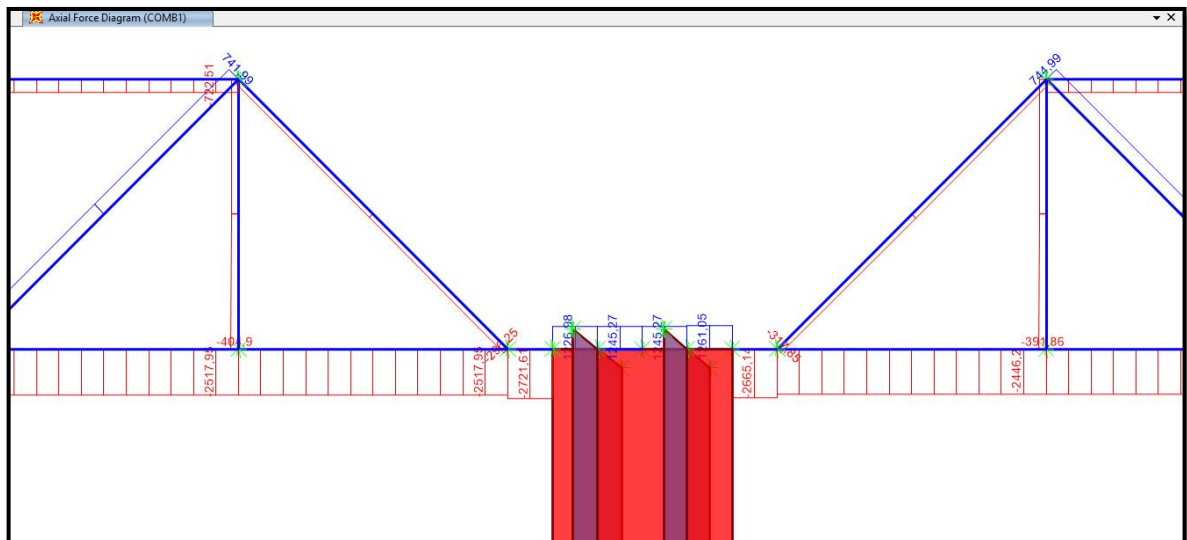
3 açıklıklı 2D model üzerinde analizler

3 açıklıklı 3D sistem, geometrisinin ve yüklerin simetrik olmasından faydalanılarak kesitler, atalet momentleri ve yüklerin iki katı alınarak 2D hale getirilmiştir. 2D hale getirilirken arada bulunan X-Y düzlemindeki elemanları temsil etmesi için düğüm noktalarına Z eksenî doğrultusunda ilave tekil yükler etkilmiştir. Köprü ayaklarının enkesit alanları ve atalet momentleri hesaplanarak, ayakların alan ve atalet momentini temsil edecek şekilde çubuk ve

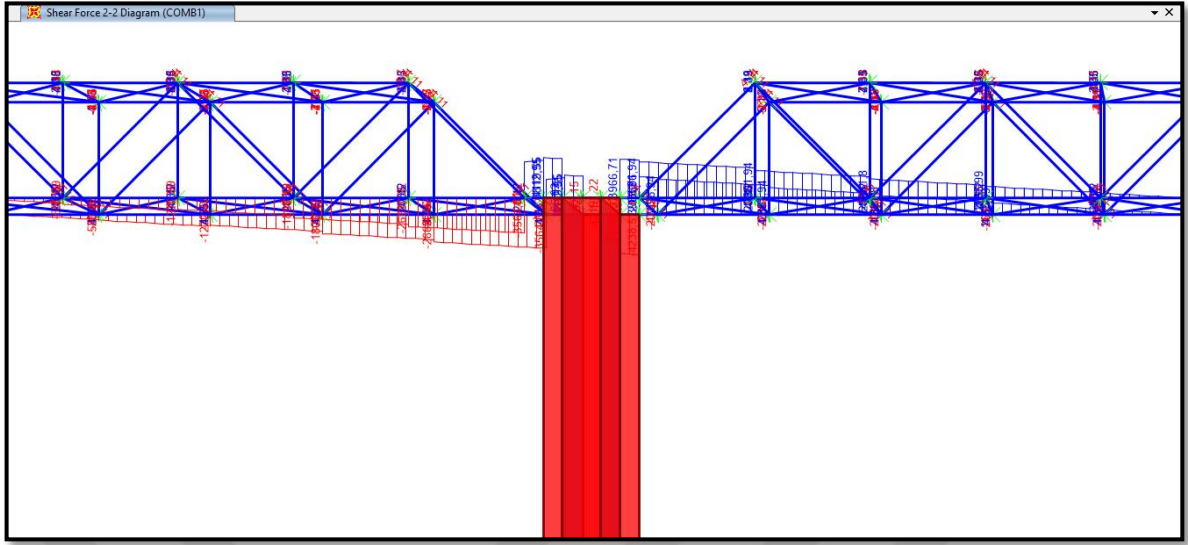
shell elemanlar kullanılmıştır. Daha sonra 2 boyutlu sistemin aynı COMB1 yük kombinasyonu altında analizi yapılmıştır.



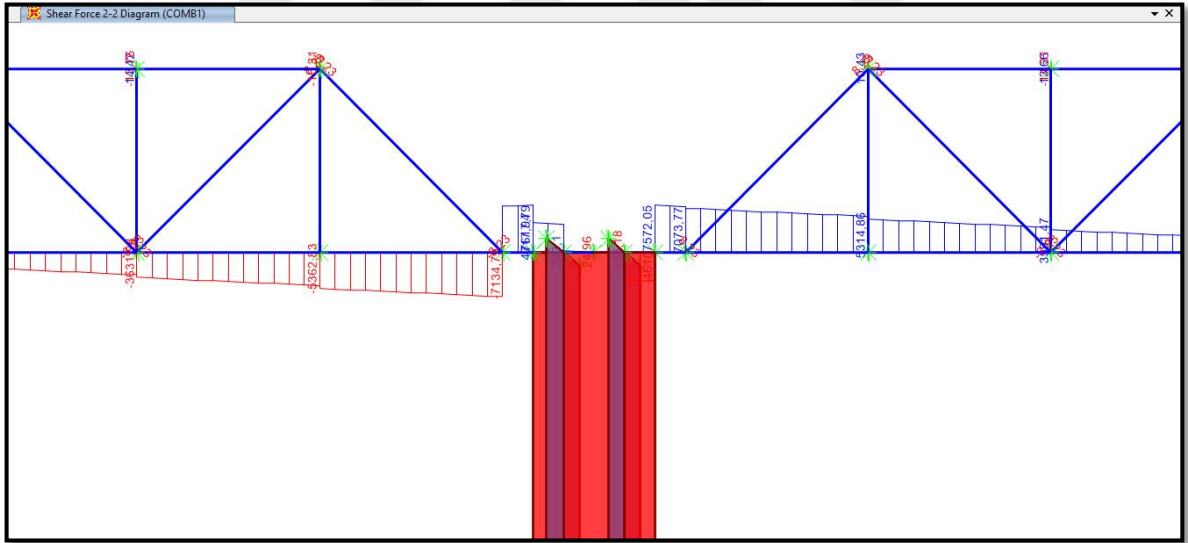
Şekil 3.77: 3 açıklıklı 3D SAP2000 modeli eksenel kuvvet dağılımı.



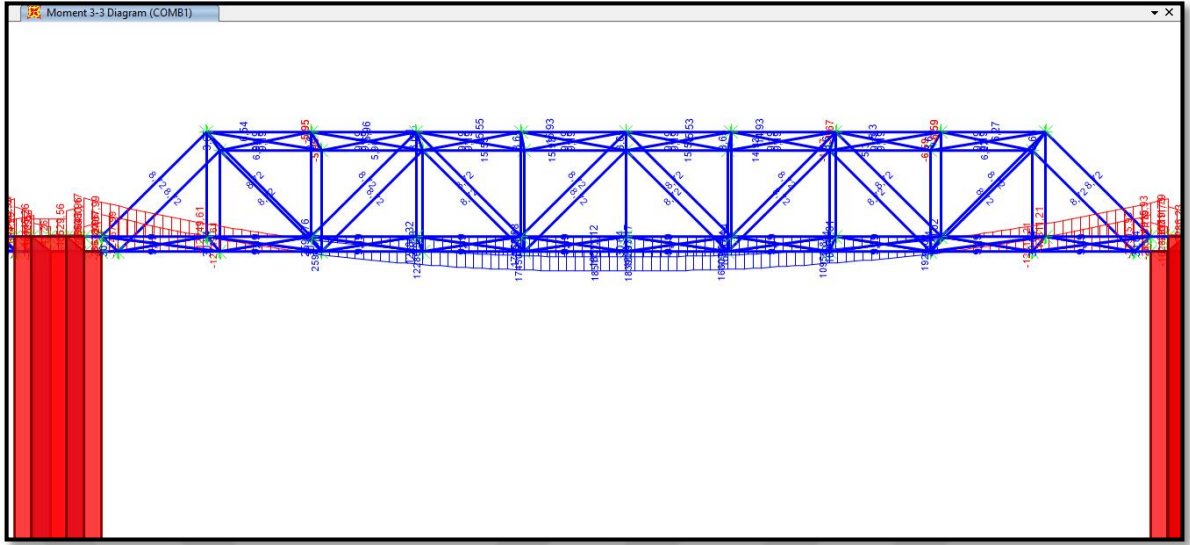
Şekil 3.78: 3 açıklıklı 2D SAP2000 modeli eksenel kuvvet dağılımı.



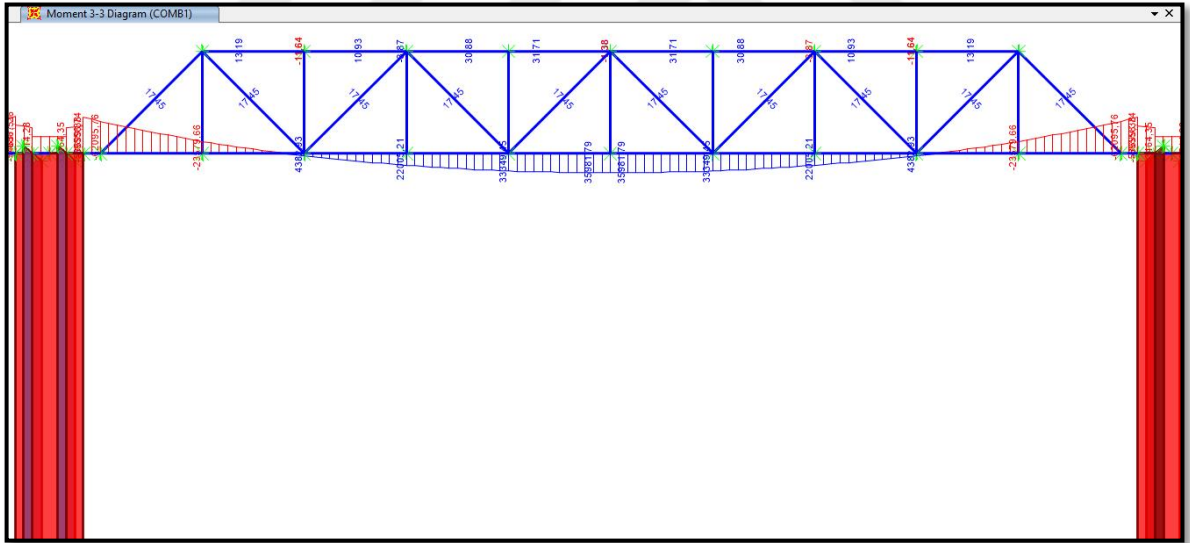
Şekil 3.79: 3 açıklıklı 3D SAP2000 modeli kesme kuvveti dağılımı.



Şekil 3.80: 3 açıklıklı 2D SAP2000 modeli kesme kuvveti dağılımı.

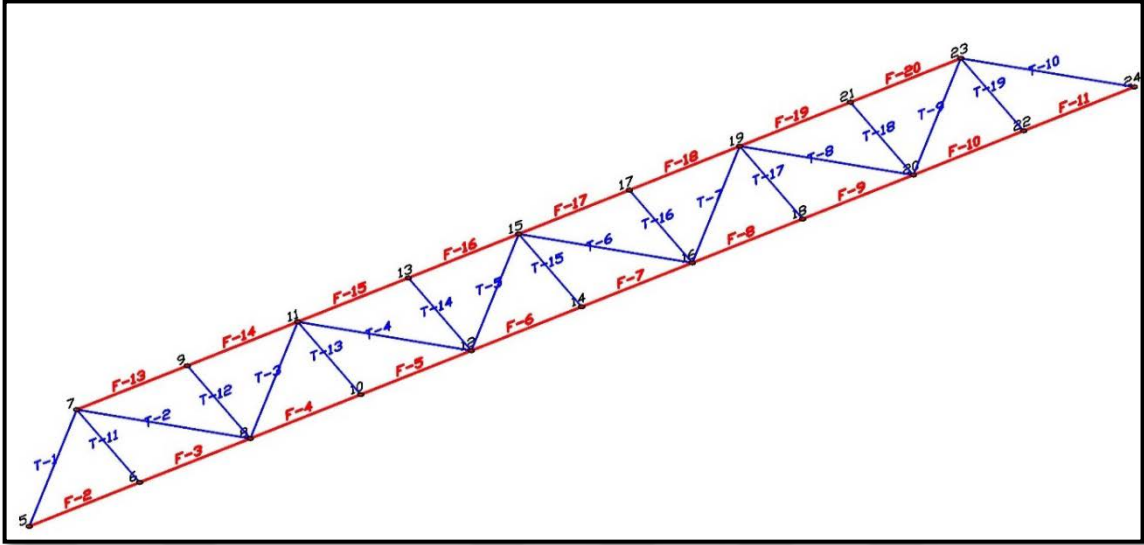


Şekil 3.81: 3 açıklıklı 3D SAP2000 modeli moment dağılımı.

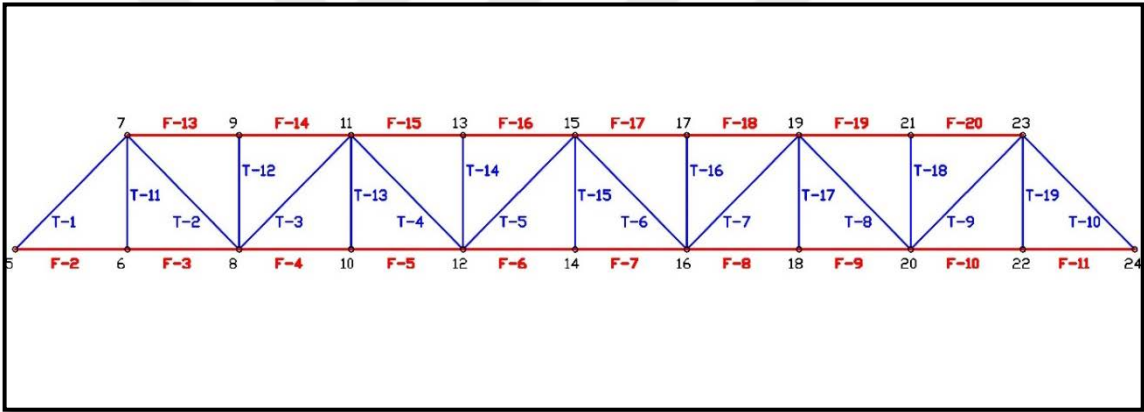


Şekil 3.82: 3 açıklıklı 2D SAP2000 modeli moment dağılımı.

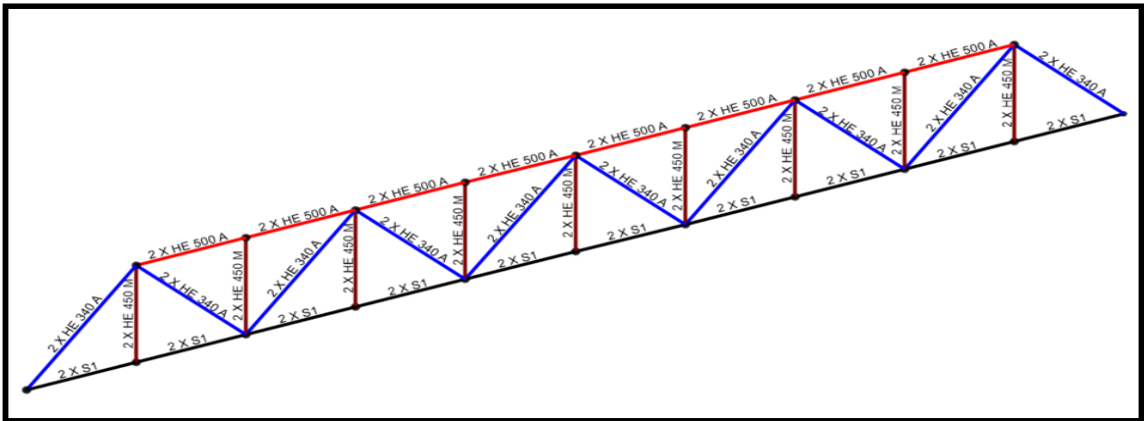
Şekil 3.77 - Şekil 3.82'deki grafiklerden anlaşılacağı ve BULGULAR başlığında Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de de görülebileceği üzere, düzlemsel yükler altında aynı sonuçları vermesi sebebiyle, daha sonraki analizlerde köprülerin tamamının modellenmesi yerine, 2 boyutlu SAP2000 modelleri gerçek sistemi temsil etmek üzere kullanılmıştır.



Şekil 3.83: Programın oluşturduğu data modeli (a).



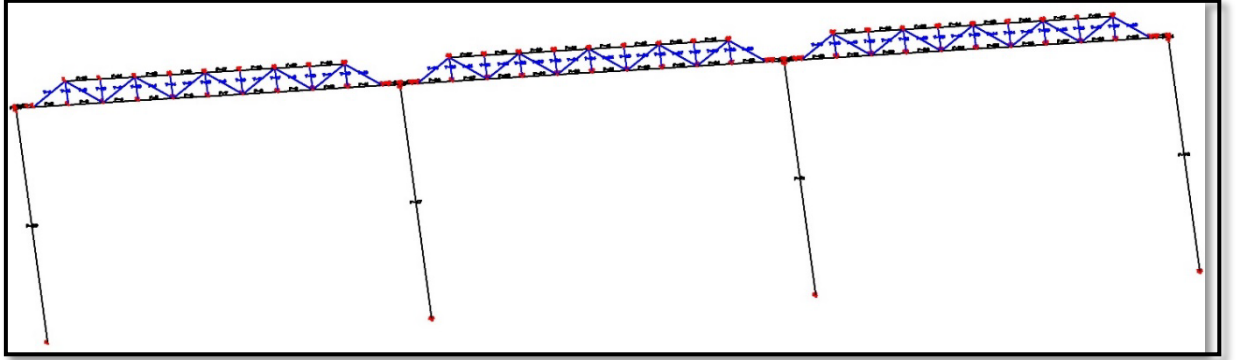
Şekil 3.84: Programın oluşturduğu data modeli (b).



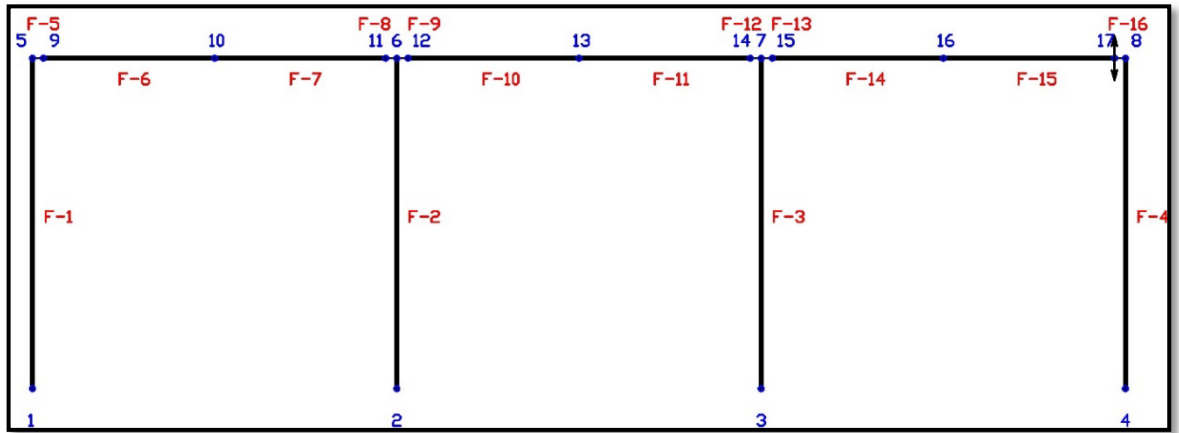
Şekil 3.85: SAP2000 programına aktarılmış geometrik bilgiler.

GP-DYNA program modüllerinden elde edilen otomatik oluşturulmuş veriler genel amaçlı yapı analiz programı SAP2000'e aktarılabilir. SAP2000 sonlu elemanlar programı ile AutoCAD programı arasında bilgi aktarımı mümkündür. Ancak yalnızca yapısal sistemin geometrisi aktarılabilir. Diğer bilgilerin SAP2000 programında manuel olarak yeniden oluşturulması gerekmektedir.

GP-DYNA programı için; dinamik analizlerde kullanılmak üzere, mikro (Şekil 3.86) ve makro modeller hazırlanmıştır (Şekil 3.87). Mikro modelde tüm elemanlar tanımlanmıştır. Makro model ise köprü kirişlerinin her biri 6 serbestlik bileşenine sahip 4 çerçeve elemanı ile tanımlandığı eşdeğer modeldir. Eşdeğer makro modelde, eleman kesit özellikleri statik analiz sonuçları vasıtasıyla kalibre edilerek belirlenmiştir. Bu nedenle GP-DYNA bilgisayar programı için hazırlanmış olan her iki model de uyumlu sonuçlar vermektedir.



Şekil 3.86: GP-DYNA bilgisayar modeli.



Şekil 3.87: GP-DYNA makro bilgisayar modeli ve numaralandırma sistemi.

Mevcut analizde 5 farklı özellikte 74 çerçeve elemanı, 2 farklı özellikte 57 kafes kiriş elemanı kullanılmıştır. Şekil 3.86’da görülen matematiksel model 78 düğüm noktasından oluşmaktadır. İki boyutlu olarak oluşturulan modelde gerekli test ve analizler eşliğinde eşdeğer parametreler elde edilmiş, üçüncü boyuta ait yük ve kütleler hesaba katılmıştır. Genel amaçlı analizde 234 bilinmeyen ve 222 mod söz konusudur. Köprü modeli BULGULAR başlığında, Şekil 4.4 - Şekil 4.12’de görüldüğü gibi yatay ve düşey modlara sahiptir. Modal frekanslar geometri, kesit ve malzeme özelliklerine göre birbirlerine yaklaşabilmektedir. Yatay salınımlar köprü ayaklarını, düşey salınımlar ise köprü platformu ile köprü ayakları arasındaki bağlantıları zorlamaktadır. Söz konusu hayali zafiyetin gerçek olması durumunda göçme söz konusu olabilirdi. Ancak gerçek köprüde böyle bir zafiyetin olmadığı görülmekte ve hatta yakın tarihlerde köprüye müdahale edildikten sonra üzerine bir karayolu platformunun ilave edildiği bilinmektedir (Sarıcı ve diğ., 2011). Analizlerde kullanılan eleman özelliklerine ilişkin örnekler ve analiz sonuçlarıyla ilgili bilgiler kısmen Tablo 3.7-Tablo 3.14’da sunulmuştur, detaylı analiz sonuçları BULGULAR başlığında verilmiştir.

Tablo 3.7: Kafes kiriş elemanlarında kesit ve malzeme özellikleri.

NUMBER OF TRUSS MEMBER PROPERTIES (MATERIAL AND SECTIONAL)= 2						
PROPERTY-NO	SECTIONAL-AREA	ELASTICITY-MOD	POISSONS-RATIO	WEIGHT-DENSITY	WEIGHT/LENGTH	MASS / LENGTH
1	2.54000000E-02	2.00000000E+08	3.00000000E-01	7.85000000E+00	1.99390000E-01	2.03251775E-02
2	6.58000000E-02	2.00000000E+08	3.00000000E-01	7.85000000E+00	5.16530000E-01	5.26534126E-02

Tablo 3.8: Kafes kiriş elemanlarının matrisleri ile ilgili örnek.

TRUSS MEMBER 1 LENGTH= 8.5 Q= 45.0 COS(Q)= .7 SIN(Q)= .7				
STIFFNESS MATRIX IN GLOBAL COORDINATES				
=====				
	(13)	(14)	(19)	(20)
13-) 2.9934187E+05	2.9934187E+05	-2.9934187E+05	-2.9934187E+05	
14-) 2.9934187E+05	2.9934187E+05	-2.9934187E+05	-2.9934187E+05	
19-) -2.9934187E+05	-2.9934187E+05	2.9934187E+05	2.9934187E+05	
20-) -2.9934187E+05	-2.9934187E+05	2.9934187E+05	2.9934187E+05	
MASS MATRIX				
=====				
	(13)	(14)	(19)	(20)
13-) 2.1903036E-03	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	
14-) 0.0000000E+00	2.1903036E-03	0.0000000E+00	0.0000000E+00	
19-) 0.0000000E+00	0.0000000E+00	2.1903036E-03	0.0000000E+00	
20-) 0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	2.1903036E-03	
A-) TRANSFORMATION MATRIX				
=====				
	(13)	(14)	(15)	(19)
13-) 7.0710678E-01	7.0710678E-01	0.0000000E+00	0.0000000E+00	-7.8816713E-04
14-) -7.0710678E-01	7.0710678E-01	0.0000000E+00	0.0000000E+00	-1.8159261E-03
15-) 0.0000000E+00	0.0000000E+00	7.0710678E-01	7.0710678E-01	-1.1232191E-03
19-) 0.0000000E+00	0.0000000E+00	-7.0710678E-01	7.0710678E-01	2.9166518E-03
B-) STIFFNESS MATRIX IN LOCAL COORDINATES				
=====				
	(13)	(14)	(15)	(19)
13-) 5.9868374E+05	0.0000000E+00	-5.9868374E+05	0.0000000E+00	-1.8413720E-03
14-) 0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	-7.2673534E-04
15-) -5.9868374E+05	0.0000000E+00	5.9868374E+05	0.0000000E+00	1.2681484E-03
19-) 0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	2.8566201E-03

Tablo 3.9: Çerçeve elemanlarının matrisleri ile ilgili örnek.

FRAME MEMBER 3						
STIFFNESS MATRIX IN GLOBAL COORDINATES						
	(16)	(17)	(18)	(22)	(23)	(24)
16-)	1.7000000E+07	0.0000000E+00	0.0000000E+00	-1.7000000E+07	0.0000000E+00	0.0000000E+00
17-)	0.0000000E+00	1.6777778E+04	5.0333333E+04	0.0000000E+00	-1.6777778E+04	5.0333333E+04
18-)	0.0000000E+00	5.0333333E+04	2.0133333E+05	0.0000000E+00	-5.0333333E+04	1.0066667E+05
22-)	-1.7000000E+07	0.0000000E+00	0.0000000E+00	1.7000000E+07	0.0000000E+00	0.0000000E+00
23-)	0.0000000E+00	-1.6777778E+04	-5.0333333E+04	0.0000000E+00	1.6777778E+04	-5.0333333E+04
24-)	0.0000000E+00	5.0333333E+04	1.0066667E+05	0.0000000E+00	-5.0333333E+04	2.0133333E+05
MASS MATRIX						
	(16)	(17)	(18)	(22)	(23)	(24)
16-)	1.2480703E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	6.2403514E-01	0.0000000E+00	0.0000000E+00
17-)	0.0000000E+00	1.3907069E+00	1.1767520E+00	0.0000000E+00	4.8139854E-01	-6.9535344E-01
18-)	0.0000000E+00	1.1767520E+00	1.2837294E+00	0.0000000E+00	6.9535344E-01	-9.6279708E-01
22-)	6.2403514E-01	0.0000000E+00	0.0000000E+00	1.2480703E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
23-)	0.0000000E+00	4.8139854E-01	6.9535344E-01	0.0000000E+00	1.3907069E+00	-1.1767520E+00
24-)	0.0000000E+00	-6.9535344E-01	-9.6279708E-01	0.0000000E+00	-1.1767520E+00	1.2837294E+00
A-) TRANSFORMATION MATRIX						
	(16)	(17)	(18)	(22)	(23)	(24)
16-)	1.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
17-)	0.0000000E+00	1.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
18-)	0.0000000E+00	0.0000000E+00	1.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
22-)	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	1.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
23-)	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	1.0000000E+00	0.0000000E+00
24-)	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	1.0000000E+00
GLOBAL DISPLACEMENTS						
16-)						-7.6133209E-04
17-)						-7.2470030E-03
18-)						-8.3648378E-04
22-)						-7.3449704E-04
23-)						-1.2116118E-02
24-)						-6.8094193E-04
B-) STIFFNESS MATRIX IN LOCAL COORDINATES						
	(16)	(17)	(18)	(22)	(23)	(24)
16-)	1.2835000E-04	0.0000000E+00	0.0000000E+00	-1.2835000E-04	0.0000000E+00	0.0000000E+00
17-)	0.0000000E+00	5.6666667E+06	1.7000000E+07	0.0000000E+00	-5.6666667E+06	1.7000000E+07
18-)	0.0000000E+00	1.7000000E+07	6.8000000E+07	0.0000000E+00	-1.7000000E+07	3.4000000E+07
22-)	-1.2835000E-04	0.0000000E+00	0.0000000E+00	1.2835000E-04	0.0000000E+00	0.0000000E+00
23-)	0.0000000E+00	-5.6666667E+06	-1.7000000E+07	0.0000000E+00	5.6666667E+06	-1.7000000E+07
24-)	0.0000000E+00	1.7000000E+07	3.4000000E+07	0.0000000E+00	-1.7000000E+07	6.8000000E+07
LOCAL DISPLACEMENTS						
16-)						-7.6133209E-04
17-)						-7.2470030E-03
18-)						-8.3648378E-04
22-)						-7.3449704E-04
23-)						-1.2116118E-02
24-)						-6.8094193E-04

Tablo 3.10: Sistem rijitlik matrisi (10 kolondan oluşan bloklar halinde yazılmaktadır).

STRUCTURAL STIFFNESS MATRIX												
I/J----	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
4	1.625E+09	0.000E+00	-8.125E+08	-1.625E+09	0.000E+00	-8.127E+08	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00		
5	0.000E+00	1.208E+08	0.000E+00	0.000E+00	-1.188E+08	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00		
6	-8.125E+08	0.000E+00	5.510E+08	8.127E+08	0.000E+00	2.709E+08	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00		
7	-1.625E+09	0.000E+00	8.127E+08	1.725E+09	0.000E+00	8.127E+08	-1.000E+08	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00		
8	0.000E+00	-1.188E+08	0.000E+00	0.000E+00	3.119E+09	3.000E+09	0.000E+00	-3.000E+09	3.000E+09	0.000E+00		
9	-8.127E+08	0.000E+00	2.709E+08	8.127E+08	3.000E+09	4.542E+09	0.000E+00	-3.000E+09	2.000E+09	0.000E+00		
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-1.000E+08	0.000E+00	0.000E+00	2.020E+08	0.000E+00	0.000E+00	-1.020E+08		

Tablo 3.11: Sistem rijitlik matrisinin evriği (10 kolondan oluşan bloklar halinde yazılmaktadır).

INVERSE OF THE STRUCTURAL STIFFNESS MATRIX												
I/J----	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
4	1.196E-04	5.727E-09	-2.918E-06	1.225E-04	5.824E-09	-2.912E-06	1.225E-04	-5.819E-06	-2.912E-06	1.225E-04		
5	5.727E-09	4.968E-07	-2.468E-10	5.977E-09	4.968E-07	-2.537E-10	5.977E-09	4.963E-07	-2.546E-10	5.977E-09		
6	-2.918E-06	-2.468E-10	1.787E-07	-3.096E-06	-2.509E-10	1.784E-07	-3.096E-06	3.566E-07	1.784E-07	-3.096E-06		
7	1.225E-04	5.977E-09	-3.096E-06	1.256E-04	6.078E-09	-3.094E-06	1.256E-04	-6.182E-06	-3.094E-06	1.256E-04		
8	5.824E-09	4.968E-07	-2.509E-10	6.078E-09	5.052E-07	-2.580E-10	6.078E-09	5.047E-07	-2.589E-10	6.078E-09		
9	-2.912E-06	-2.537E-10	1.784E-07	-3.094E-06	-2.580E-10	1.856E-07	-3.094E-06	3.709E-07	1.855E-07	-3.094E-06		
10	1.225E-04	5.977E-09	-3.096E-06	1.256E-04	6.078E-09	-3.094E-06	1.256E-04	-6.182E-06	-3.094E-06	1.256E-04		
11	-5.819E-06	4.963E-07	3.566E-07	-6.182E-06	5.047E-07	3.709E-07	-6.182E-06	1.248E-06	3.718E-07	-6.182E-06		

Tablo 3.12: Öz vektörler (10 kolondan oluşan bloklar halinde yazılmaktadır).

EIGEN VECTORS												
I/J-----	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
4	4.399E-02	9.429E-03	8.561E-04	-4.947E-03	3.341E-02	-3.367E-03	1.611E-03	1.554E-04	2.594E-04	9.755E-03		
5	1.844E-06	1.327E-04	1.191E-04	-1.776E-04	-1.293E-04	-1.432E-03	2.107E-03	1.543E-03	1.254E-02	-2.361E-02		
6	-1.046E-03	5.540E-03	1.240E-03	-4.182E-03	-6.619E-03	1.137E-03	-1.122E-03	-6.399E-04	-1.997E-04	-7.139E-04		
7	4.504E-02	3.880E-03	-3.877E-04	-7.561E-04	4.004E-02	-4.478E-03	2.693E-03	7.669E-04	3.792E-04	1.059E-02		
8	1.875E-06	1.349E-04	1.210E-04	-1.805E-04	-1.313E-04	-1.454E-03	2.139E-03	1.566E-03	1.262E-02	-2.372E-02		
9	-1.045E-03	5.554E-03	1.247E-03	-4.196E-03	-6.626E-03	1.083E-03	-1.042E-03	-5.817E-04	-3.744E-05	-9.664E-04		
10	4.504E-02	3.845E-03	-3.945E-04	-7.312E-04	4.006E-02	-4.489E-03	2.708E-03	7.776E-04	3.989E-04	1.052E-02		

Tablo 3.13: Normalleştirilmiş öz vektörler (10 kolondan oluşan bloklar halinde yazılmaktadır).

NORMALIZED EIGEN VECTORS												
I/J-----	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
4	9.765E-01	4.992E-01	2.492E-02	-1.910E-01	8.206E-01	-2.297E-02	1.111E-02	1.085E-03	2.218E-03	8.314E-02		
5	4.092E-05	7.026E-03	3.466E-03	-6.860E-03	-3.174E-03	-9.772E-03	1.453E-02	1.077E-02	1.073E-01	-2.012E-01		
6	-2.321E-02	2.933E-01	3.609E-02	-1.615E-01	-1.626E-01	7.758E-03	-7.736E-03	-4.467E-03	-1.708E-03	-6.084E-03		
7	9.997E-01	2.054E-01	-1.128E-02	-2.920E-02	9.833E-01	-3.055E-02	1.858E-02	5.353E-03	3.243E-03	9.026E-02		
8	4.162E-05	7.141E-03	3.522E-03	-6.971E-03	-3.224E-03	-9.921E-03	1.475E-02	1.093E-02	1.079E-01	-2.022E-01		
9	-2.319E-02	2.940E-01	3.629E-02	-1.620E-01	-1.627E-01	7.385E-03	-7.185E-03	-4.060E-03	-3.201E-04	-8.236E-03		
10	9.998E-01	2.036E-01	-1.148E-02	-2.824E-02	9.837E-01	-3.062E-02	1.868E-02	5.427E-03	3.411E-03	8.968E-02		

Tablo 3.14: Öz değerler, frekans ve periyotlar (örnek problemde 222 adet).

NUMBER OF MODES =222							
MODE NO	NODE NO	AXIS NO	ASSOCIATED DOF	EIGENVALUES W(RADIAN/S)	ANGULAR FREQ. (SECOND)	PERIODS (SECOND)	FREQUENCY (HERTZ)
1	2	1	4	1.63930992E+01	4.04883924E+00	1.55184859E+00	6.44392761E-01
2	2	2	5	6.85451253E+02	2.61811240E+01	2.39989142E-01	4.16685518E+00
3	2	3	6	6.94983582E+02	2.63625413E+01	2.38337625E-01	4.19572864E+00
4	3	1	7	6.98547907E+02	2.64300569E+01	2.37728791E-01	4.20647408E+00
5	3	2	8	1.29297380E+03	3.59579449E+01	1.74737057E-01	5.72288452E+00
6	3	3	9	1.78167782E+03	4.22099256E+01	1.48855640E-01	6.71791811E+00
7	4	1	10	1.82868074E+03	4.27630768E+01	1.46930154E-01	6.80595487E+00
8	4	2	11	1.87481453E+03	4.32991285E+01	1.45111130E-01	6.89127015E+00
9	4	3	12	1.15297038E+04	1.07376458E+02	5.85154846E-02	1.70894936E+01
10	5	1	13	1.22009129E+04	1.10457743E+02	5.68831603E-02	1.75798953E+01

3.6. DEPREM KAYITLARI

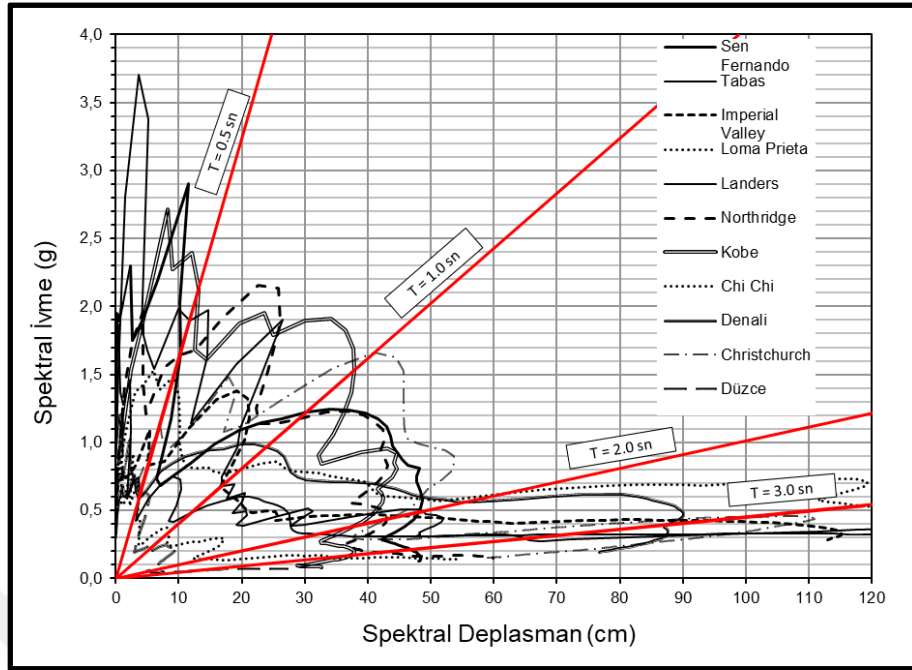
Analizlerde Berkeley Üniversitesi'nin PEER-NGA Ground Motion data bankasından 11 adet yakın, 11 adet uzak deprem ivme kaydı kullanılmıştır. Yakın deprem kayıtları için Fault Type: All Types, Magnitude: 6.8 Mw, R_rup: 0,10 km, Pulse: ONLY Pulse-like Records seçilmiştir. Uzak deprem kayıtları için ise Fault Type: All Types, Magnitude: 6.8 Mw, R_rup: 0.40 km, Pulse: NO Pulse-like Records seçilmiş ve R_rup $\geq$ 10 km olan ivme kayıtları kullanılmıştır. Bu özellikleri sağlayan deprem kayıtları arasından mevcut yapısal sistemi zorlaması amaçlı düşey pik ivmesi daha büyük olanlar tercih edilmiştir. Söz konusu deprem kayıtlarına ait bilgiler yakın deprem kayıtları için Tablo 3.15, uzak deprem kayıtları için Tablo 3.16'da; %5 sönüm için yatay deplasman ve ivme spektrumları yakın depremler için Şekil 3.88 ve Şekil 3.89'da; uzak depremler için Şekil 3.90 ve Şekil 3.91'de verilmiştir.

Tablo 3.15: Yakın Deprem Kayıtlarının Özellikleri.

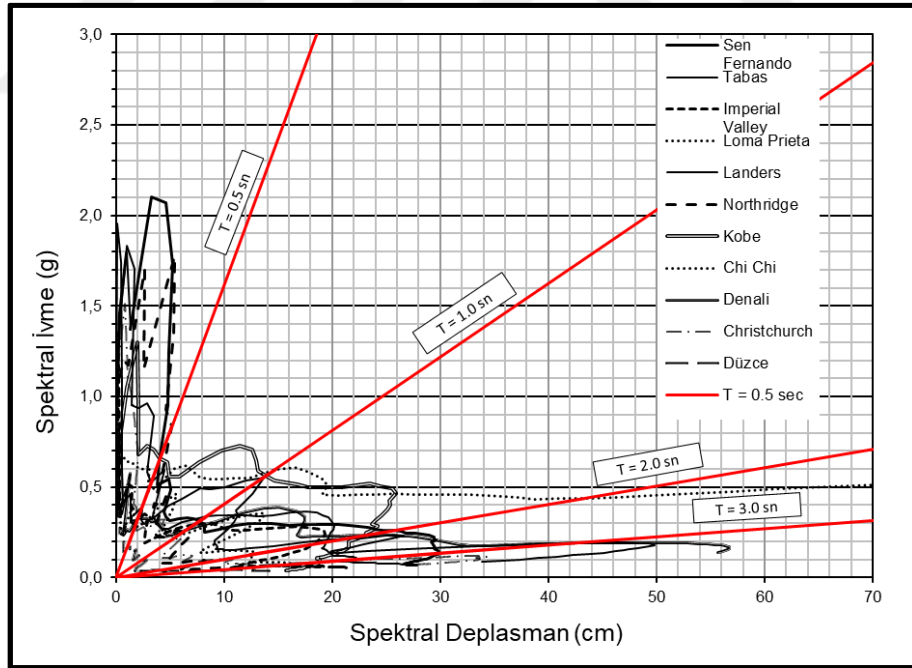
Deprem ve Tarihi	İstasyon ve Kayıt Adı	Yer Hareketi Kodu	Deprem Büyüklüğü (Mag Mw)	Faya olan en yakın uzaklık (Rrup km)	Pik Yer İvmesi (g)	Pik Yer Hızı (cm/sec)	Pulse Periyodu Tp(s)
Sen Fernando - California 1971	Pacoima Dam (upper left abut)	SFERN_PUL164	6.61	1.81	1.21	114.47	1.638
		SFERN_PULDWN			0.68	59.23	
Tabas – İran 1978	Tabas	TABAS_TAB-T1	7.35	2.05	0.86	123.40	6.188
		TABAS_TAB-V1			0.64	40.91	
Imperial Valley – El Centro 1979	El Centro Array #7	RSN182_IMPVALL.H_H-E07230	6.53	0.56	0.46	113.13	4.375
		RSN182_IMPVALL.H_H-E07-UP			0.57	27.07	
Loma Prieta – California 1989	Saratoga - Aloha Ave	LOMAP_STG090	6.93	8.5	0.32	45.97	4.571
		LOMAP_STG-UP			0.39	28.00	
Landers – California 1992	Lucerne	LANDERS_LCN260	7.28	2.19	0.72	133,40	5.124
		LANDERS_LCN-UP			0.82	41.08	
Northridge – California	Newhall - Fire Sta	NORTHR_NWH360	6.69	5.92	0.59	96.59	1.372
		NORTHR_NWH-UP			0.54	30.97	
Kobe – Japonya 1995	KJMA	KOBE_KJM000	6.9	0.96	0.83	91.10	1.092
		KOBE_KJM-UP			0.33	40.37	
Chi Chi – Taiwan 1999	TCU068	CHICHI_TCU068-E	7.62	0.32	0.51	249.59	12.285
		CHICHI_TCU068-V			0.52	213.12	
Düzce – Türkiye 1999	IRIGM 487	DUZCE_487-NS	7.14	2.65	0.30	38.94	10.052
		DUZCE_487-UP			0.22	14.72	
Denali Alaska 2002	TAPS Pump Station #10	DENALI_PS10-047	7.9	2.74	0.33	115.71	3.157
		DENALI_PS10-UP			0.23	51.10	
Christchurch – Yeni Zelanda 2011	Christchurch Resthaven	CCHURCH_REHSS88E	6.2	5.13	0.71	86.57	1.554
		CCHURCH_REHSUP			0.52	20.99	

Tablo 3.16: Uzak Deprem Kayıtlarının Özellikleri.

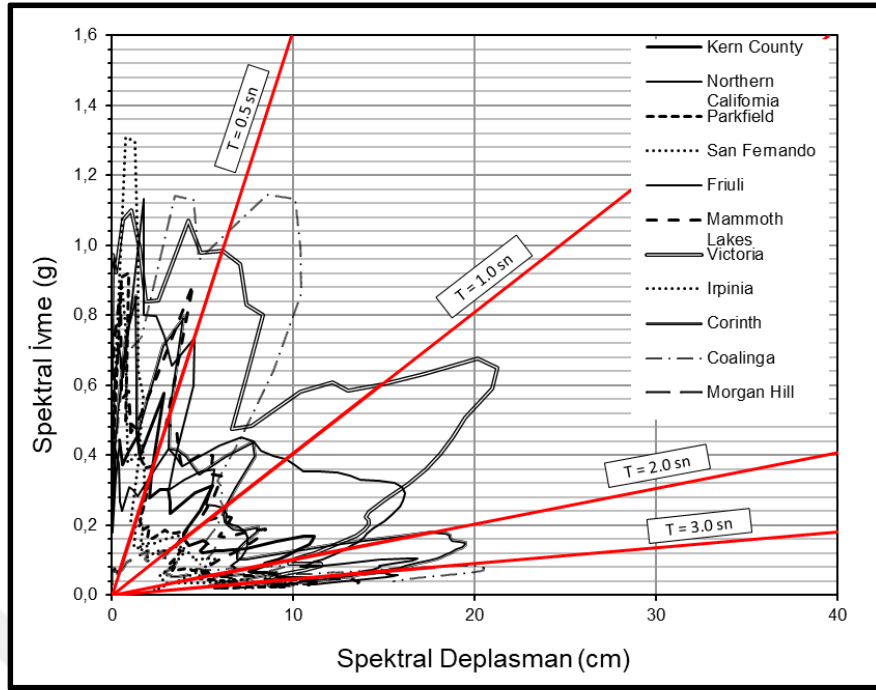
Deprem ve Tarihi	İstasyon ve Kayıt Adı	Yer Hareketi Kodu	Deprem Büyüklüğü (Mag Mw)	Faya olan en yakın uzaklık (Rrup km)	Pik Yer İvmesi (g)	Pik Yer Hızı (cm/sec)
Kern County 1952	Taft Lincoln School	KERN_TAF111	7.36	38.89	0.18	18,62
		KERN_TAF-UP			0.11	6,81
Northern Calif-03 1954	Ferndale City Hall	NCALIF.FH_H-FRN314	6.5	27.02	0.20	26.20
		NCALIF.FH_H-FRN-UP			0.042-	8.34
Parkfield 1966	Cholame - Shandon Array #8	PARKF_C08320	6.19	12.9	0.27	11.36
		PARKF_C08DWN			0.12	4.30
San Fernando 1971	Lake Hughes #12	SFERN_L12021	6.61	19.3	0.38	16.36
		SFERN_L12DWN			0.19	4.46
Friuli, Italy-01 1976	Tolmezzo	FRIULIA_A-TMZ000	6.5	15.82	0.35	22.84
		FRIULIA_A-TMZ-UP			0.27	10.50
Mammoth Lakes-01 1980	Long Valley Dam (Upr L Abut)	MAMMOTH.I_I-LUL000	6.06	15.46	0.43	23.73
		MAMMOTH.I_I-LUL-UP			0.12	8.41
Victoria, Mexico 1980	Cerro Prieto	VICT_CPE045	6.33	14.37	0.64	33.59
		VICT_CPE-UP			0.29	11.80
Irpinia, Italy-01 1980	Brienza	ITALY_A-BRZ000	6.9	22.56	0.21	13.09
		ITALY_A-BRZ-UP			0.20	4.56
Corinth, Greece 1981	Corinth	CORINTH_COR—T	6.6	10.27	0.29	23.81
		CORINTH_COR-UP			0.11	7.21
Coalinga-01 1983	Cantua Creek School	COALINGA.H_H-CAK360	6.36	24.02	0.28	26.25
		COALINGA.H_H-CAK-UP			0.09	5.05
Morgan Hill 1984	Agnews State Hospital	MORGAN_AGW330	6.19	24.49	0.03	5.63
		MORGAN_AGW-UP			0.01	2.93



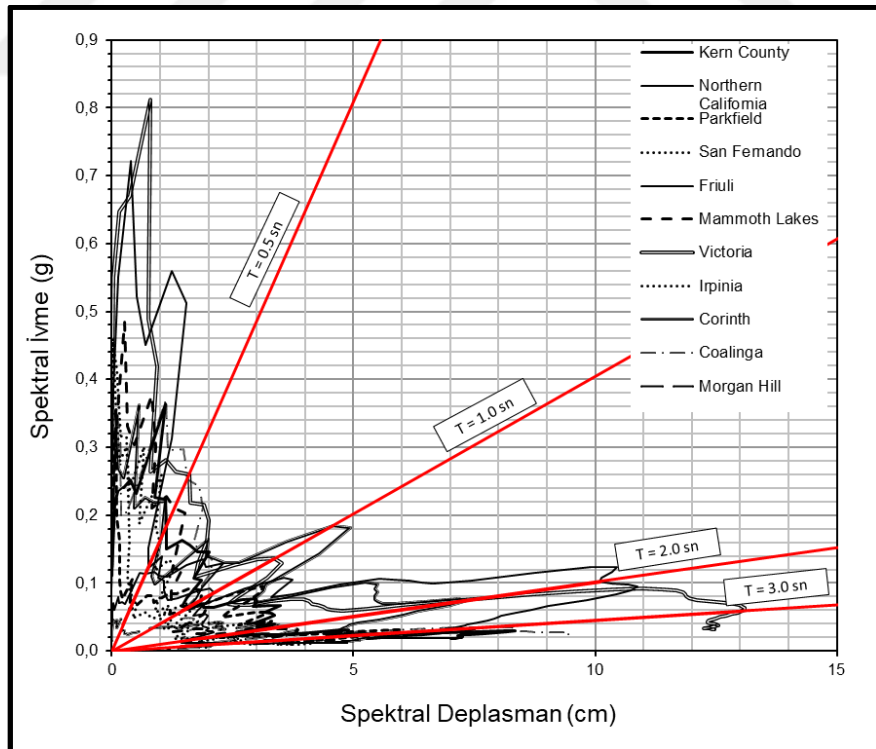
Şekil 3.88: Yakın depremlere ait yatay kayıtların %5 sönüm oranı için deplasman – ivme spektrumu.



Şekil 3.89: Yakın depremlere ait düşey kayıtların %5 sönüm oranı için deplasman – ivme spektrumu.



Şekil 3.90: Uzak depremlere ait yatay kayıtların %5 sönüm oranı için deplasman – ivme spektrumu.

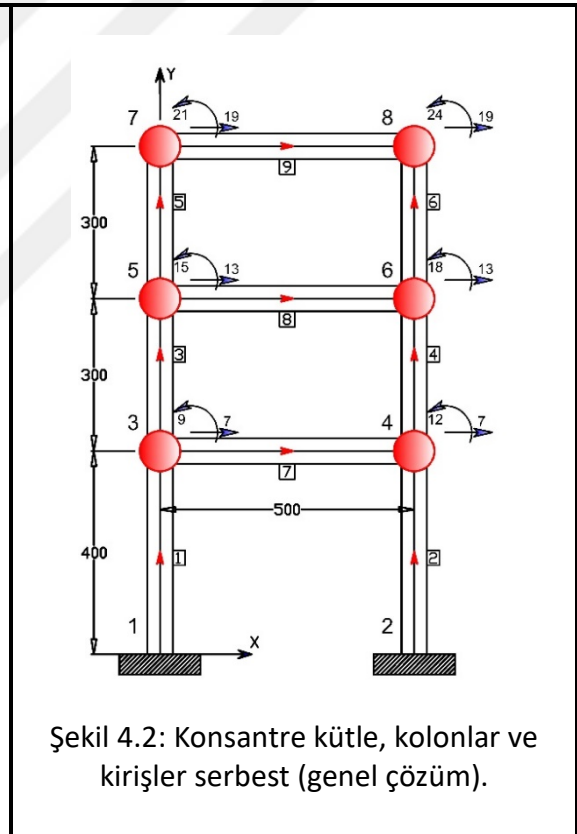
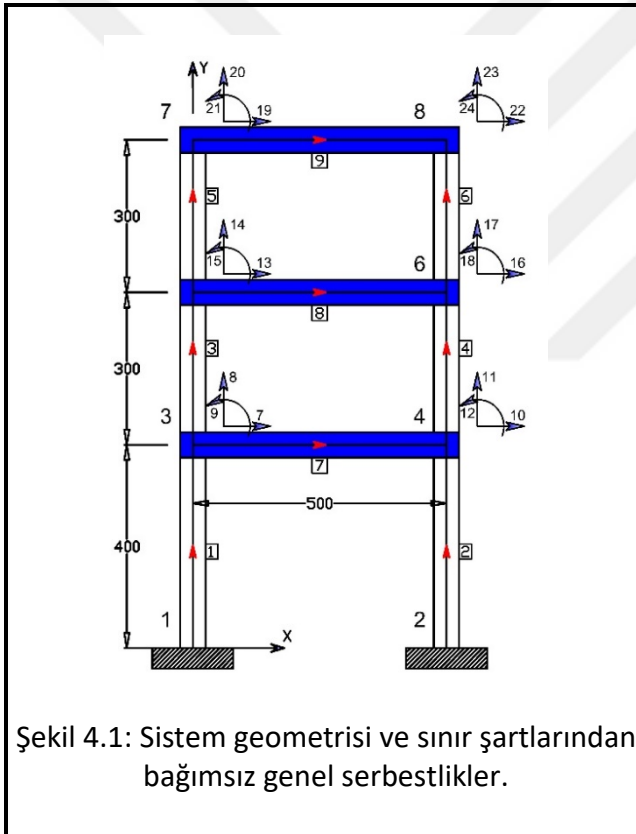


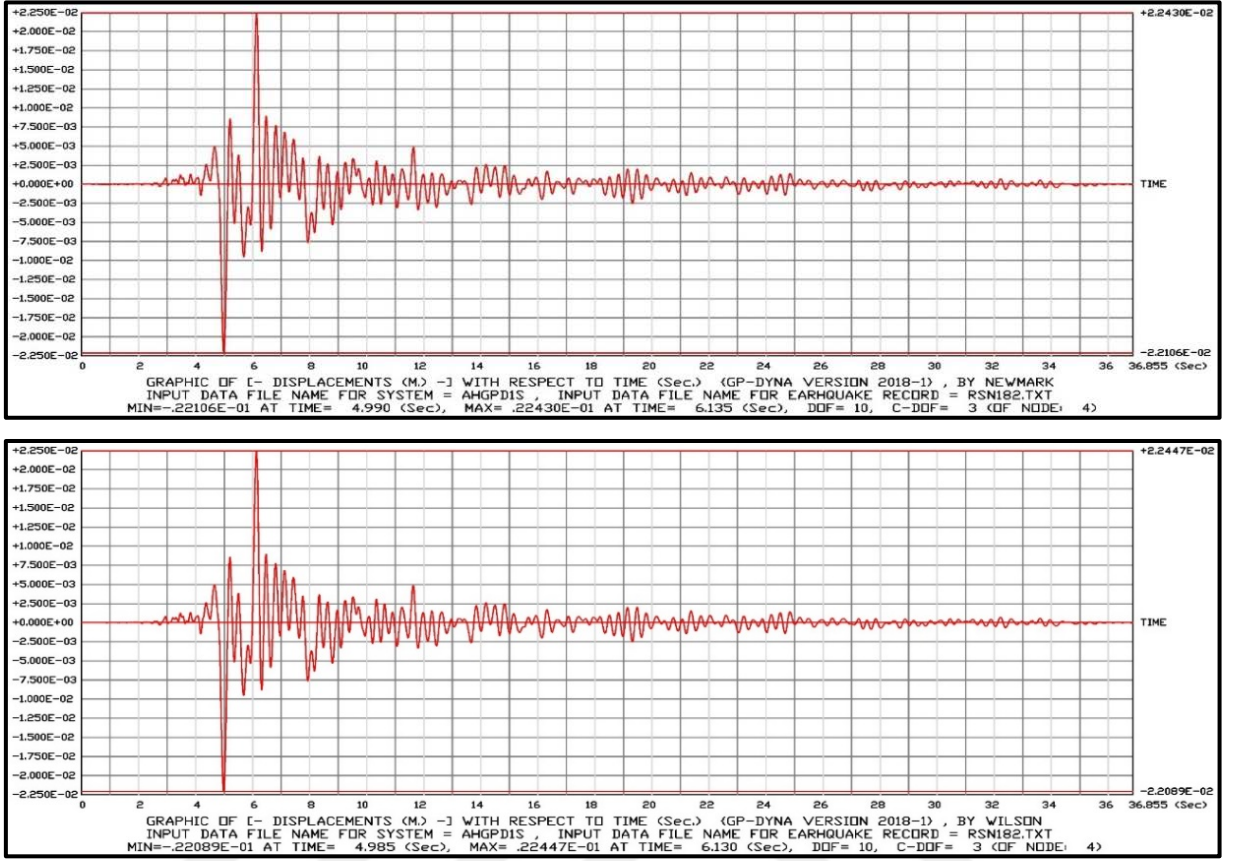
Şekil 3.91: Uzak depremlere ait düşey kayıtların %5 sönüm oranı için deplasman – ivme spektrumu.

4. BULGULAR

4.1. ÇERÇEVE SİSTEM ANALİZİ

Şekil 4.3'te, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiş örnek sistemin, PEER veri tabanından elde edilen, toplam kayıt süresi: 36.855 saniye ve kayıt süresi aralığı 0.005 saniye olan 1979 Imperial Valley depremine ait El Centro Array #7 yatay (RSN182_IMPVAL.L.H_H-E07230) ve düşey (RSN182_IMPVAL.L.H_H-E07-UP) kayıtları (Tablo 3.15) kullanılarak elde edilmiş olan analiz sonuçları GP-DYNA'nın iki farklı integrasyon modülü için karşılaştırmalı olarak görülmektedir.





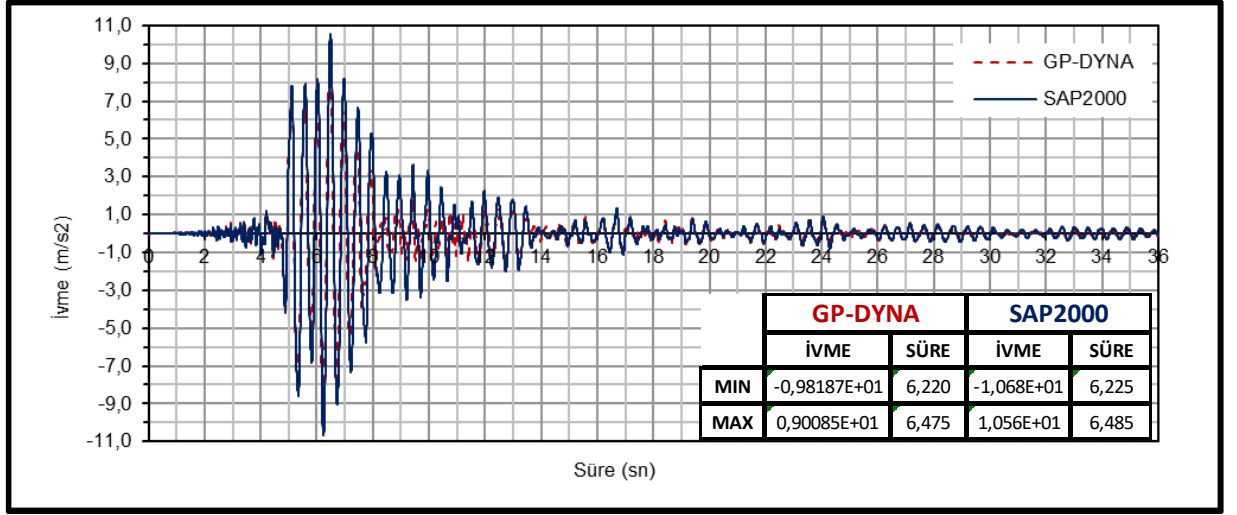
Şekil 4.3: GP-DYNA programının 8 no'lu düğüm noktasındaki yatay serbestlik için iki ayrı integrasyon modülü deplasman sonuçlarının karşılaştırılması.

Kayma çerçevesi varsayımında CAL91, SAP2000 ve GP-DYNA programının gerek Newmark gerekse Wilson olarak adlandırılan yöntemleri tamamen aynı sonuçları vermektedir. Genel serbestliklerle ve hem yatay hem de düşey fonksiyonlar hesaba katıldığında ise GP-DYNA (her iki yöntem) ve CAL91 aynı sonuçları vermektedir. Her iki program da kullanıcı kontrolünde olduğu için parametreler birebir tanımlanabilmektedir, ancak CAL91 programında gerek indisli değişkenlerin boyutları gerekse veri giriş datasında müsaade edilebilir kayıt uzunluğu ve benzeri nedenlerle tanımlı sınırlar söz konusudur. CAL91 programının bu sınırları zorlanarak tüm kapasitesi kullanılmıştır.

Şekil 4.4'te görüleceği üzere, SAP2000 programı ile makul sonuçlar alınmakla birlikte bu sonuçların tamamen aynı olduğu söylenemez. GP-DYNA ve SAP2000 programlarında, özellikle düşey etkiler diyagonalde de olsa hesaba katıldığında 12% oranına varan farklar görülmüştür. Diğer taraftan SAP2000 programının farklı versiyonlarında da (aynı data

kullanılmasına rağmen) 8% oranlarına varan farklılıklar görülmektedir. Bu farkın başlıca nedenlerinin;

- SAP2000 programında diyagonal dışı terimlerin hesaba katılmaması,
- Diyagonalde açılmal bileşenlere yük tanımlanmadığı takdirde sistemin sıkıştırılarak analize sokulması,
- Öz-değer analizlerinde yakınsama oranı, sönüm matrisinin hesabındaki formülasyon, yuvarlama hataları gibi nedenler olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.4: Genel serbestlikler ve hem yatay hem de düşey deprem fonksiyonlarının hesaba katılması durumunda 8 no'lu düğüm noktasındaki yatay serbestlik için GP-DYNA ve SAP2000 göreceli ivme karşılaştırılması.

4.2. KÖPRÜ ÖRNEĞİ ANALİZİ

Karakaya Köprüsü örneğinin 3 boyutlu (3D) ve 2 boyutlu (2D) SAP2000 modellerinin statik analizlerinin neredeyse bire bir aynı sonucu verdiği görülmüştür. Aradaki %2'lik fark; köprü ayakları ve temsil eden elemanlar aynı mukavemet özelliklerine sahip olsalar da, ikinci mertebe etkiler devreye girdiğinde ortaya çıkmaktadır. Eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve moment dağılımlarının sistem üzerinde aynı noktalardan okunan (sistem simetriden yararlanılarak 2 boyutlu düzleme indirgenmiş olduğundan 2D modelden okunan kesit tesiri değerlerinin yarısı alınmıştır) pik değerleri Tablo 4.1'de sunulmuştur.

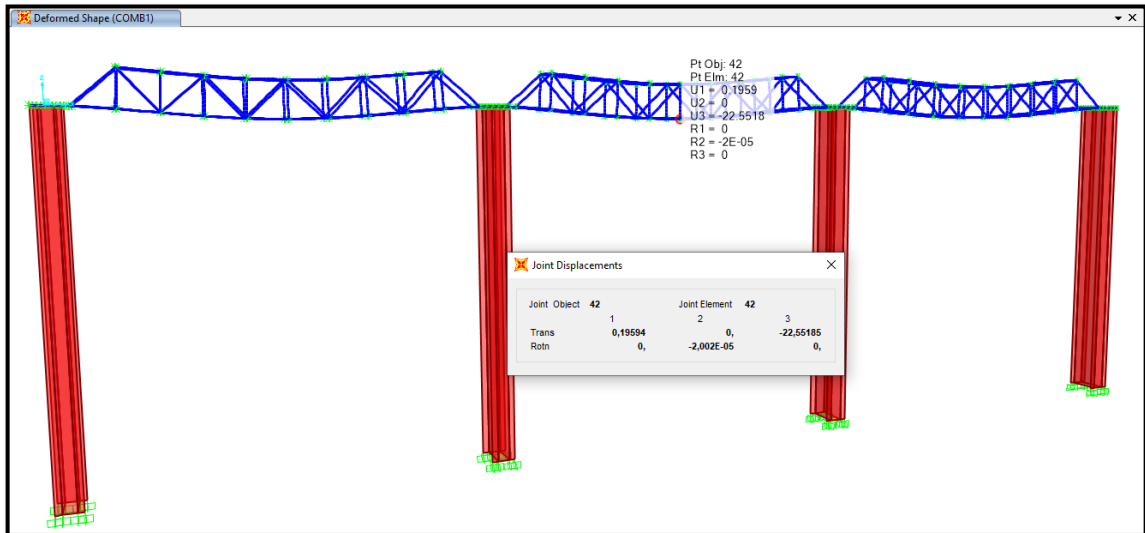
Tablo 4.1: 3D ve 2D modelin kesit tesirlerinin karşılaştırılması.

Eksenel Kuvvet (kN)		Kesme Kuvveti (kN)		Moment (kN-m)	
3D	2D	3D	2D	3D	2D
1385.44	1332.57	3638.17	3786.03	18511.12	17990.89

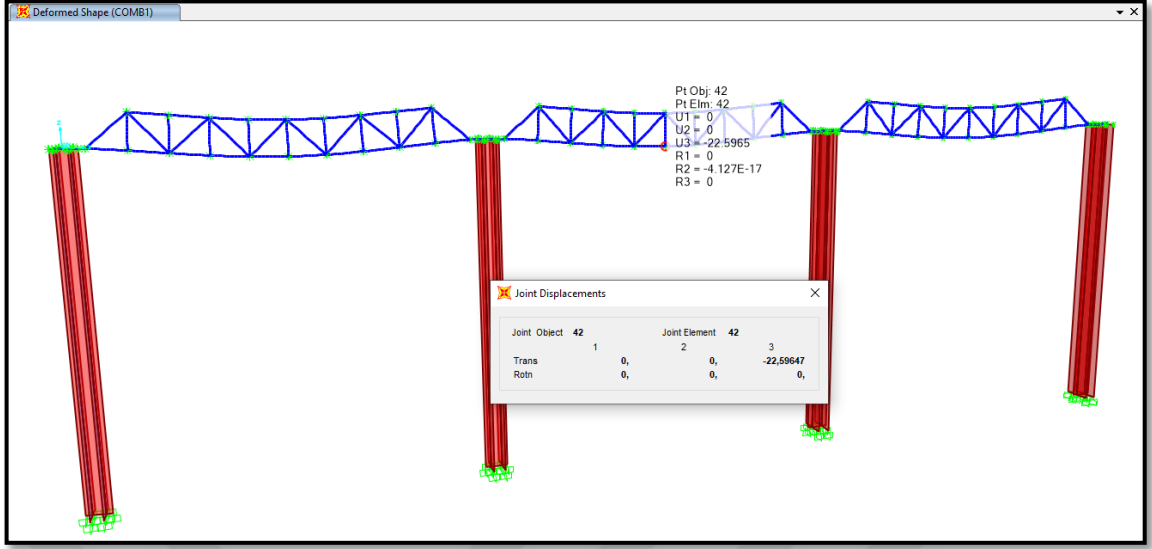
Sehim değerlerine bakıldığında da aynı kesit tesiri değerleri gibi 3D ve 2D modeller aynı sonucu vermektedir. Sistemin sehimini için orta açıklıkta meydana gelen deplasman ile köprü ayaklarında meydana gelen deplasmanın farkı alınmıştır. Dead load (ölü yük) ve COMB1 yük kombinasyonu altında deplasman ve sehim değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: 3D ve 2D modelin sehim ve deplasman miktarlarının karşılaştırılması.

Deplasman Miktarı (mm)			
DEAD LOAD (Ölü Yük)		COMB1	
3D	2D	3D	2D
5.7	5.9	23	23
Sehim Miktarı (mm)			
3D	2D	3D	2D
4.8	4.9	20	20

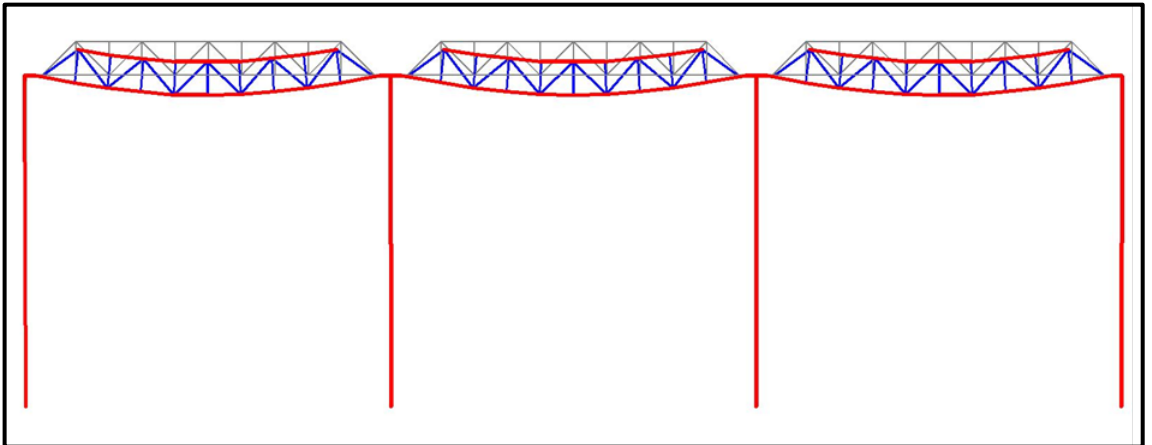


Şekil 4.5: 3 açıklıklı 3D SAP2000 modeli orta açıklıkta deplasman.

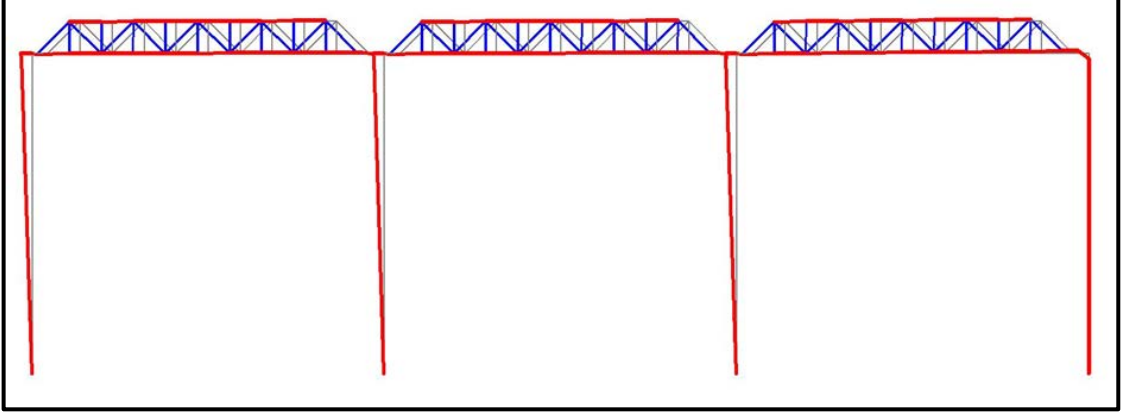


Şekil 4.6: 3 açıklıklı 2D SAP2000 modeli orta açıklıkta deplasman.

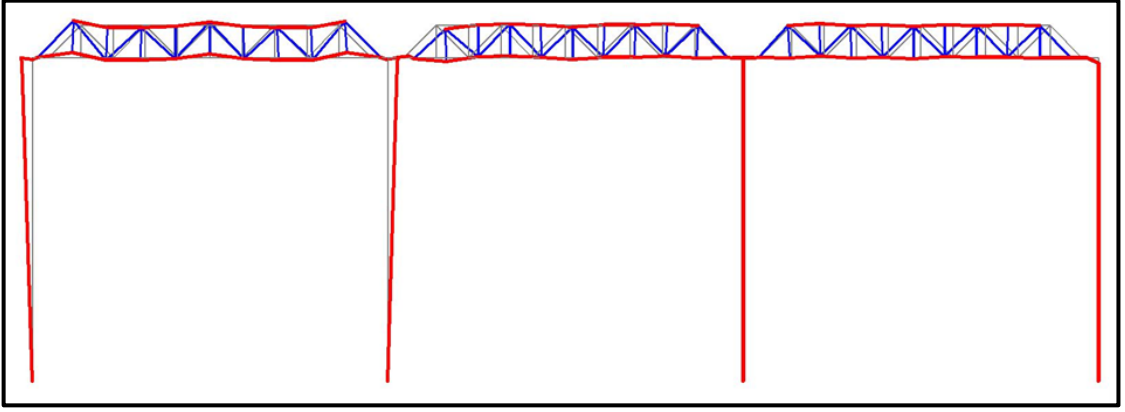
Program formülasyonunda, sistem rijitlik matrisi ve kütle matrislerinin boyutları aynıdır ve bu boyutlar kullanılan bilgisayarın kapasitesine göre milyonlar mertebesine ulaşabilmektedir. Sistem kütle ve rijitlik matrislerinin boyutlarının aynı olması nedeniyle, açısız bileşenler dahil her serbestliğe karşılık gelen bir kütle bileşeni mevcuttur. Yayıllı kütleler hesaba katılabilmekte ve açısız bileşenler göz önüne alınabilmektedir. Köprü ayaklarının yatay deprem etkileri altında zorlandığı, köprü ayaklarının yatay salınımlarına sebep olan frekanslara yakın frekanslarda, tabliyelerin ve yatay elemanların düşey etkiler altında zorlanabildiği görülmüştür.



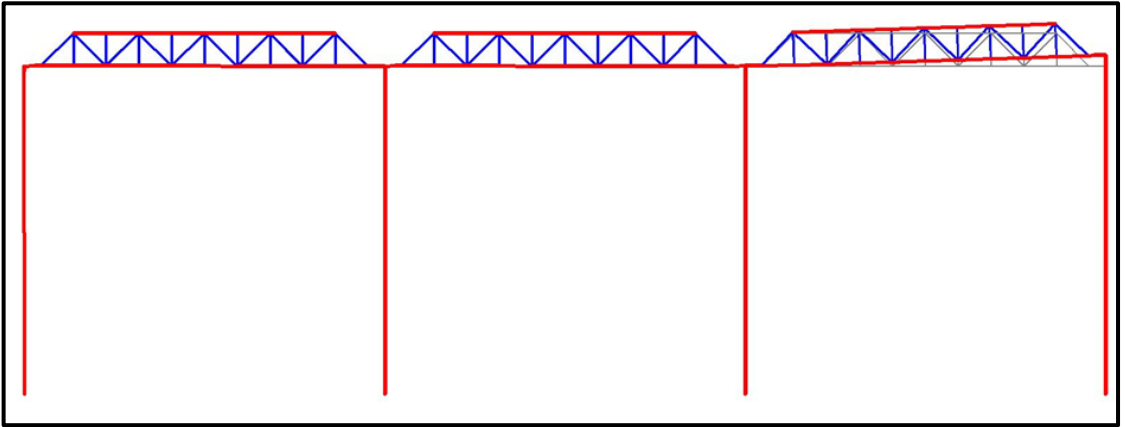
Şekil 4.7: Statik deformasyonlar (simetrik yükleme).



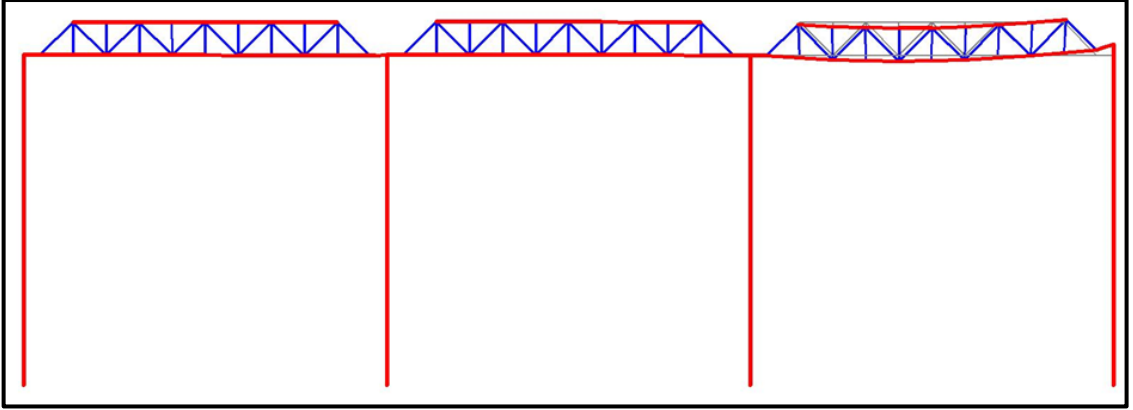
Şekil 4.8: Mod şekli 1 (yatay hareket).



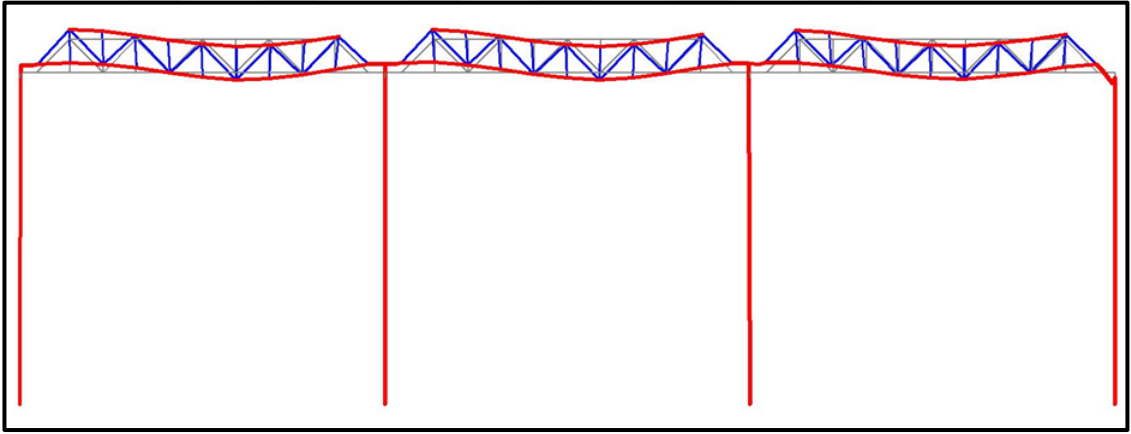
Şekil 4.9: Mod şekli 2 (yatay ve düşey hareket).



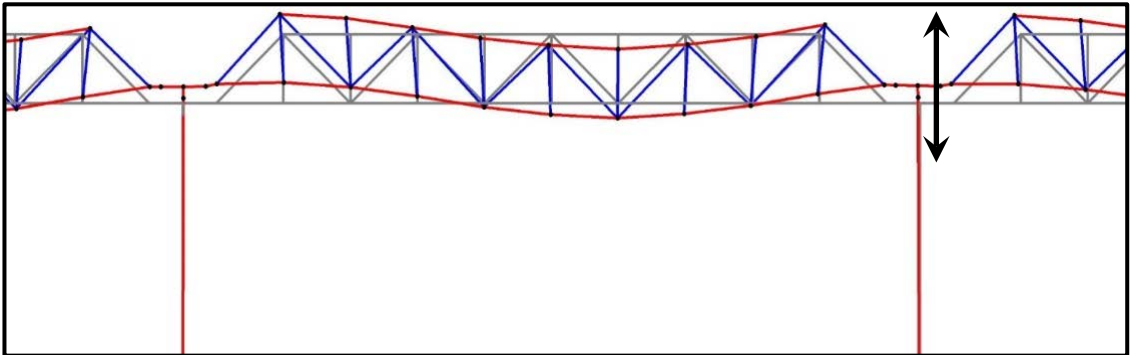
Şekil 4.10: Mod şekli 3 (sağ kolon üzerinde düşey hareket).



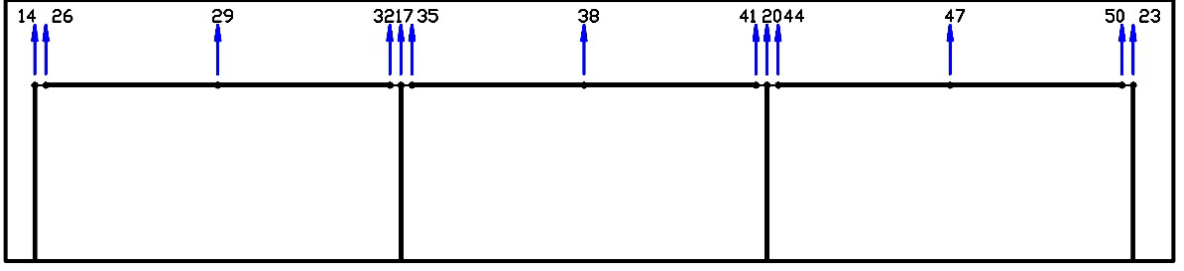
Şekil 4.11: Mod şekli 4 (sağ kolon üzerinde düşey hareket).



Şekil 4.12: Mod şekli 5 (düşey hareket).



Şekil 4.13: GP-DYNA modeli araştırılan kesit tesirleri.



Şekil 4.14: GP-DYNA makro modelde dinamik yüklerin hesaplandığı serbestlikler ve serbestlik numaraları.

Dinamik analizlerde ise; köprü örneğine ait makro ve mikro modeller üzerinde dinamik tepkiler ve kesit tesiri dağılımları araştırıldığında gerek makro gerekse mikro modellerde neredeyse aynı sonuçlar elde edilmiştir. Makro model kullanılmasının sebeplerinden biri, daha az elemanla daha çok serbestlik kullanılarak, daha detaylı analizlerin yapılabilmesidir. Bir diğer sebep ise; GP-DYNA ile karşılaştırılmak üzere kullanılan hazır paket programların kapasitesinin mikro model analizinde zorlanmasıdır. Sistemin frekans, periyot, dinamik modlar ve düşey etkiler gibi dinamik bazı deprem parametreleri GP-DYNA ile elde edilmiş olup, mod şekilleri Şekil 4.8 - Şekil 4.12’de sunulmuştur. Dinamik analizler sonucunda yükler elde edilerek statik yüklerle karşılaştırılabilmektedir. En önemlisi, dinamik analizlerde diyagonal dışı terimler ve bu terimlere karşılık gelen yükler hesaba katılabilmektedir. Ancak bu yüklerin ne oranlarda hesaba katılacağı hususu henüz netliğe kavuşmamıştır. Bu çalışma kapsamındaki yapısal sistem iki etapta ele alınmıştır.

(1) İlk etapta yalnızca yatay deprem yükleri altında incelenmiş ve yatay yükler altında ortaya çıkan düşey etkiler araştırılmış (Şekil 4.13 - Şekil 4.14) ve açılal bileşenlere gelen etkiler sifıra yakın değerlerle tanımlanmıştır.

Bu etapta, 11.03.2002 tarihinde oluşan Alaska Earthquake, Denali National Park yatay deprem kaydı kullanılmıştır. $M_w=7.9$ büyüklüğünde ve merkezi 5 km derinlikte olan deprem, A.B.D. için son 150 yılın en büyük depremi olarak kaydedilmiştir. Kayıt istasyonu ve özellikleri PEER veri bankasından alınmıştır: Aircraft Station, RSN2095 kaydı ölçüm zaman adımı $\Delta t=0.005$ saniye, ölçüm sayısı 34400 ve toplam kayıt süresi 171.995 saniye. Kullanılan dosya yalnızca yatay doğrultudaki fonksiyonu içermektedir. GP-DYNA programında bu yatay yükleme altında elde edilen toplam düşey (dinamik yük)/(statik yük) %34-35 civarında görülmektedir. Nümerik integrasyon ve sönüm oranı katsayısı gibi

parametreler değiştirilerek sonuçlar alındığında oran %10-%42 arasında değer almaktadır. Bu değerler yalnızca yatay deprem bileşeni etkisi altında oluşan sistemde oluşan toplam düşey yük (joint load) oranıdır. Sonuçlar %42 gibi ekstrem değerlere çıkabilmektedir. Düşey deprem etkisinin de hesaba katılması ve yayılı kütleler kullanılarak etki ettirilmesi durumunda sonuçlar kabul edilebilir sınırları aşabilmektedir ve tartışılmasında yarar vardır.

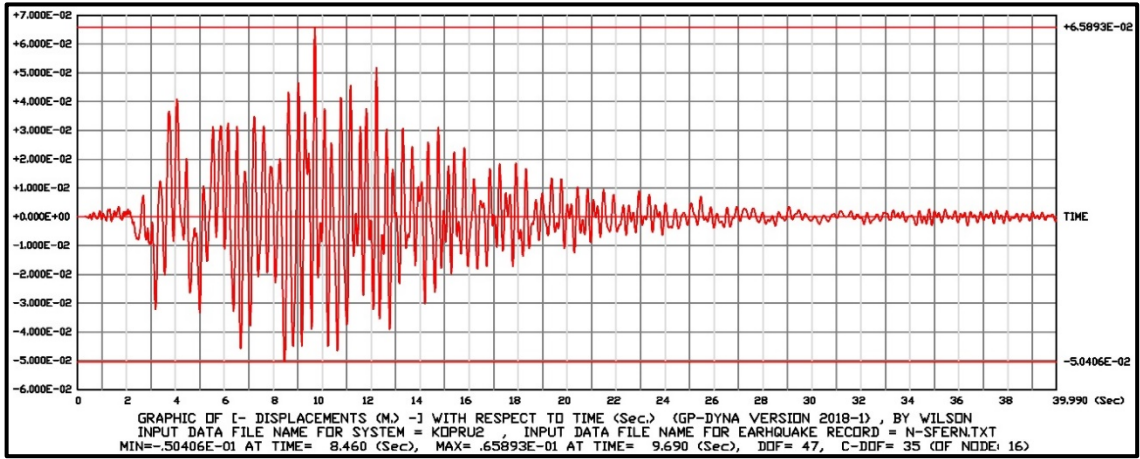
(2) İkinci etapta hem yatay hem de düşey deprem yükleri yatay ve düşey deprem kayıtları olan 11 uzak-fay, 11 yakın-fay deprem datası belirlenerek (Tablo 3.15 ve Tablo 3.16) birlikte etki ettirilmiştir. Açısal bileşenler bu aşamada da devre dışı bırakılmıştır. Böylece, yatay ve düşey yükler altında ortaya çıkan etkiler incelenmiştir.

Bu etapta, hem yatay hem de düşey deprem yükleri, yatay ve düşey deprem kayıtları olan 11 uzak-fay, 11 yakın-fay deprem datası belirlenerek birlikte etki ettirilmiştir. Açısal bileşenler bu aşamada da devre dışı bırakılmıştır. Kütleler yayılı kütle olarak tanımlanmıştır. Üç açıklık için toplam statik düşey yük en fazla 15000 kN olmaktadır. Bu yük zati ve hareketli yüklerin yük katsayılarla çarpılmamış değeridir. Dinamik analizlerden elde edilen sonuçlar bu değere bölünerek karşılaştırılmaktadır. Çizelge 1’de 11 uzak, 11 yakın depreme ait yatay ve düşey kayıtların birlikte kullanılması durumunda (toplam dinamik düşey yük)/(toplam statik düşey yük) oranları görülmektedir. DENALI depremine ait oran da artmıştır. Sonuçlar düşündürücüdür; köprü kiriş (deck) kesme kuvvetleri araştırıldığında, Tablo 4.3’te görüldüğü gibi köprü ayaklarına yakın kısımlarda dinamik sonuçların statik sonuçlara kıyasla büyük değerler alabildiği görülmüştür. Açısal etkilerin de hesaba katılması durumunda bu değerlerin daha da artabileceği düşünülmektedir. Alışıl gelmiş bir öneri olan düşey yüklerin %30 artırılarak tasarım yapılması yönteminin gerçekçi olmayabileceği durumlar olduğu görülmektedir.

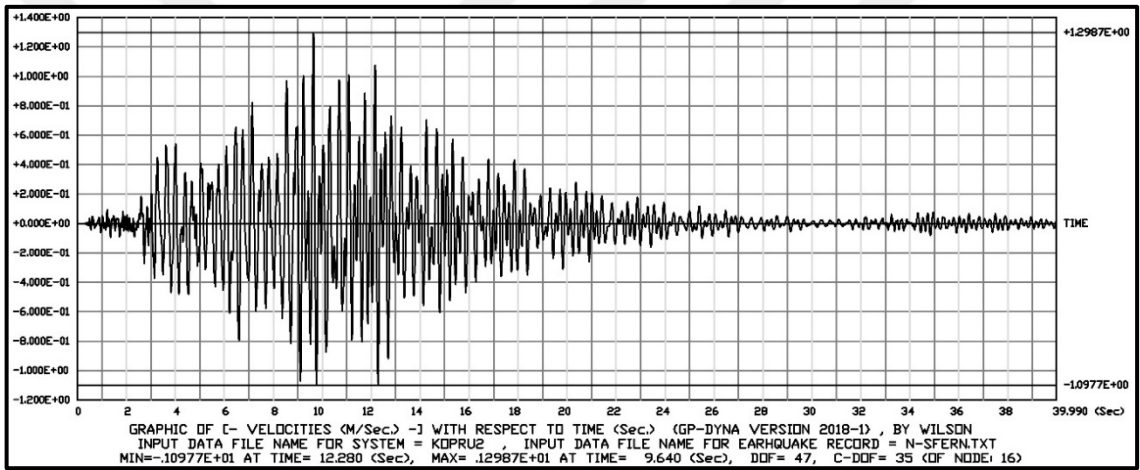
Tablo 4.3: Uzak-fay ve yakın-fay depremlerine ait sonuçlar, oran: (toplam dinamik düşey yük)/(toplam statik düşey yük).

	DATA ADI	UZAK-FAY DEPREMLERİ	%Oran
1	F-COALINGA	Coalinga-01, 1983	49
2	F-CORINTH	Corinth, Greece, 1981	40
3	F-FRIULI	Friuli, Italy-01, 1976	93
4	F-ITALY	Irpinia, Italy-01, 1980	69
5	F-KERN	Kern County, 1952	25
6	F-MAMMOTH	Mammoth Lakes-01, 1980	57
7	F-MORGAN	Morgan Hill, 1984	4
8	F-NCALIF	Northern Calif-03, 1954	13
9	F-PARKF	Parkfield, 1966	32
10	F-SFERN	San Fernando, 1971	105
11	F-VICT	Victoria, Mexico, 1980	68
	DATA ADI	YAKIN-FAY DEPREMLERİ	%Oran
1	N-CCHURCH	Christchurch – Yeni Zelanda, 2011	118
2	N-CHICHI	Chi Chi – Taiwan, 1999	92
3	N-DENALI	Denali Alaska, 2002	63
4	N-DUZCE	Düzce – Türkiye, 1999	112
5	N-IMPVALL	Imperial Valley – El Centro, 1979	219
6	N-KOBE	Kobe – Japonya, 1995	106
7	N-LANDERS	Landers – California, 1992	530
8	N-LOMAP	Loma Prieta – California, 1989	205
9	N-NORTHR	Northridge – California, 1994	182
10	N-SFERN	San Fernando – California, 1971	538
11	N-TABAS	Tabas – İran, 1978	262

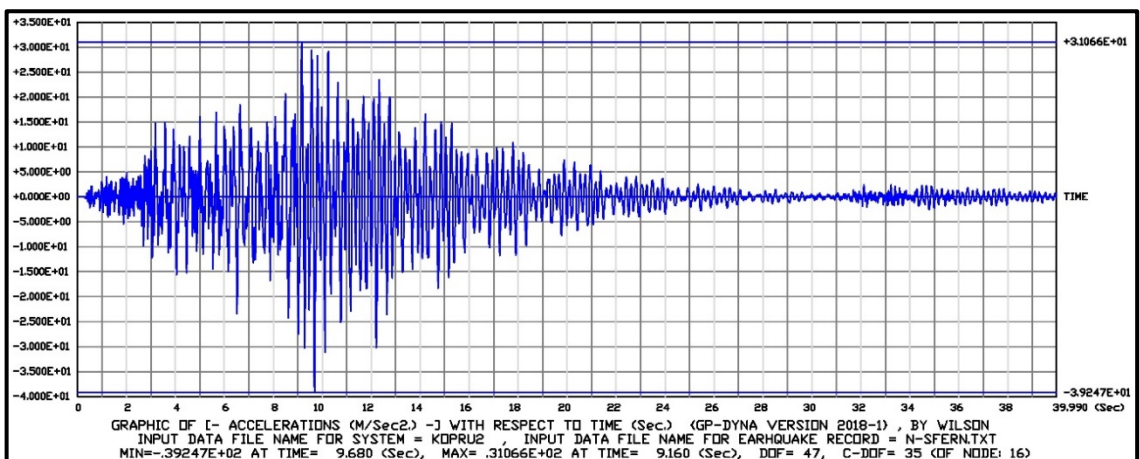
Tablo 4.3'te en yüksek (toplam dinamik düşey yük)/(toplam statik düşey yük) oranına sahip deprem olan 02.09.1971 tarihli San Fernando Depremi, Pacoima Dam, RSN77 kaydı detayları şöyledir: ölçüm zaman adımı $\Delta t=0.01$ saniye, ölçüm sayısı 4172. Şekil 4.15' de San Fernando yatay ve düşey deprem kayıtları altında 16 numaralı düğüm noktasına ait 47 numaralı düşey serbestlikte oluşan deplasman, hız ve ivme grafikleri görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.15: San Fernando yatay ve düşey deprem kayıtları altında 47 numaralı serbestlikte oluşan (a) deplasman, (b) hız ve (c) ivme grafikleri.

GP-DYNA, belirtilen düğüm noktasında istenen grafikleri; analiz yöntemi, kullanılan deprem kaydı ve ekstremum değerleri gibi detaylı bilgileri içerecek şekilde hazırlamaktadır. Birbirinin fonksiyonu olan yer değiştirme, hız ve ivme sonuçları birbiriyle uyumludur. 3. saniyeden itibaren git gide artmaya başlayan yer değiştirme, hız ve ivme değerlerinin; deprem ivme datasına uygun olarak 9-10 saniye arasında pik yaptığı görülmektedir. Maksimum değerler yer değiştirme için 0.065 m, hız için 1.29 m/s ve ivme için 31.06 m/s^2 şeklinde elde edilmiştir. Minimum değerler ise yer değiştirme için -0.05 m, hız için -1.09 m/s, ivme için -39.24 m/s^2 olmaktadır. Bu veriler sonucunda, köprülerin hasar görmesinde ve hatta yıkılmasında analiz yönteminin büyük önem taşıdığı düşünülmektedir.

4.3. BİLGİSAYAR PROGRAMININ AVANTAJLARI

Yüksek sayıda (modele göre bazen birkaç milyon) bilinmeyen çözme kapasitesine sahip, algoritması gereği çok hızlı ve çift hassaslıklı sayılarla çalışan GP-DYNA (General Purpose Dynamic Analysis) adlı bir program geliştirilmiştir. Söz konusu programın eleman kütüphanesi, denklem çözme opsiyonları, statik analiz modülleri gibi bazı modüller daha önce farklı amaçlar için geliştirilmiş olan TUNAL, NK, FEM gibi programların modüllerini bazı uyarlamalarla paylaşmaktadır. Bu programların formülasyonları ve doğrulanması, yerli ve yabancı yayınlarda tanıtılmıştır (Öztorun ve diğ., 1994; Öztorun ve diğ., 1998; Öztorun, 1997a-b-c, Öztorun 1998, Öztorun ve Anıl 1999). GP-DYNA programında dinamik analizler için ilave modüller geliştirilmiştir. Mevcut versiyon, köprülerin dinamik analizlerini gerçekleştirmek amacıyla, yatay etkilerin yanı sıra düşey ve açısıl etkilerin de göz önüne alınabildiği, kütlelerin gereğinde yayılı kütleler olarak hesaba katılabildiği, statik ve dinamik analiz modellerinin tamamen uyumlu ve rijitlik matrisine uygun kütle matrisinin (ve sönüm matrisinin) oluşturulabildiği bir versiyon olarak güncellenmiştir. Her serbestliğe karşılık bir kütle bileşeni oluşturulabilmekte, en önemlisi $M_{i,j}$ terimleri sistem genelinde etkileştirilebilmektedir. Kütle matrisi diyagonal bir matris olmak zorunda değildir.

Genel amaçlı hazır paket programlarda karşılaşılan bilinmeyen çözme kapasitesinin sınırlı oluşu, formülasyonlarında varsayımların bulunması, yuvarlama hatalarının oluşması durumunda programa müdahale etmenin mümkün olmaması, amaca uygun olmayan opsiyonlarda programa müdahale etmenin mümkün olmayışı gibi sorunlar GP-DYNA ile ortadan kaldırılmaktadır. GP-DYNA, bu tez kapsamında geliştirildiği için tam kontrolün sağlanması söz konusudur. Programın geliştirilebilir, değiştirilebilir, amaca uygun hale

getirilebilir olması, yüksek hassaslıktaki sayılarla işlem gerçekleştirebilmesi önemli avantajları arasındadır. Karşılaştırmalarda kullanılan SAP2000 programında 7 haneye kadar işlem yapılabilirken, hazırlanacak programda 24 haneye çıkılabilmektedir. Rijitlik ve kütle matrislerinin inverse=evriğinin alınması durumunda rijitlik ve kütle matrislerinin bozulup bozulmadığı kontrol edilmektedir. Ayrıca mekanizma bir sistemde SAP2000'in kontrolsüz olarak koyduğu fiktif rijitlikler, geliştirilen programda kontrollü olarak ve gerektiği durumlarda kullanılabilir. GP-DYNA kullanılarak pratikte analizi mümkün görülmeyen tüm serbestlik bileşenlerinin kolaylıkla hesaba katılabileceği gösterilmiştir. Geliştirilmiş olan bilgisayar programının bilinmeyen çözme kapasitesi oldukça yüksektir ve çözümü çift hassaslıklı sayılarla gerçekleştirmektedir.

Diğer taraftan GP-DYNA programı son derece hızlı çalışmaktadır. Örneğin, 3.5.5. numaralı başlıkta bahsedilen üç katlı kayma yapısının analizlerinin grafikler dahil hazırlanması Intel® Core(TM) i3-5005 CPU @2.00GHz 2.00 işlemci, 4.00 GB Installed RAM ve 64-bit işletim sistemine sahip bir dizüstü bilgisayarda 1 saniye kadar zaman alırken; aynı bilgisayarda yaygın olarak kullanılan SAP2000 programı ile analiz 12 dakika sürmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapısal sistemlerin deprem analizlerinde eşdeğer statik yük, mod süper pozisyonu, zaman tanım alanında nümerik integrasyon gibi yöntemler ve bu yöntemlerin formülasyonları üzerine geliştirilmiş genellikle özel, bazen de genel amaçlı bilgisayar programları kullanılmaktadır. Ancak tüm yöntemlerde gerek parametrelerin formülasyonları gerekse henüz yeteri kadar tartışılmamış etkileşimleri nedeniyle görülemeyen bazı olumsuzluklar vardır. Kayma çerçevesi türündeki yapısal sistemlerin analizlerinde bazen makul sonuçlar alınsa da yukarıda bahsedilen yöntemlerin farklı sonuçlar verdiği görülmektedir.

Dinamik analizler tasarıma yönelik olarak geliştirilmiş kısmi üç boyutlu olan paket bilgisayar programlarının çoğunda gerçek davranışı yansıtmayan varsayımlarla gerçekleştirilmektedir. Genel amaçlı bilgisayar programlarında da söz konusu varsayımların bir kısmı yaygın olarak yapılmakta, çoğu zaman bilgisayarların ve/veya programların kapasitelerinin aşılması, ya da programların formülasyonlarının yetersizliği gibi nedenlerle mevcut çalışmada önerilen ve kullanılan yöntem uygulanamamaktadır. Çoğu kez dinamik analizler için muadil bir sistem rijitlik, kütle ve sönüm matrisi oluşturulmakta, dinamik etkiler bu varsayımlı ve genellikle gerçek davranışı yansıtmayan formülasyonlarla gerçekleştirmekte ve statik analiz sonuçları ile süperpoze edilmektedir. Uygun çözüm, statik ve dinamik analizlerde kullanılan parametrelerin uyumlu olmasıdır. Bu önerinin uygulanabilir olduğu mevcut tez çalışmasında gösterilmektedir. Aksi takdirde, varsayımlı analizlerle elde edilen sonuçların hatalı olması riskinin yanı sıra emniyetsiz tarafta olma riski de bulunmaktadır.

Yapıların deprem etkileri altında davranışını araştırmak amacıyla yapılan çalışmalarda, yaygın olarak bilinen ve kullanılmakta olan mevcut bilgisayar programları ile sorunlar yaşanmaktadır. Yaygın olarak yapılan varsayımlarla veya bazı deprem yönetmeliklerinde kabul edilebilen yöntem ve kabullere göre yapılan analizlerde zaman zaman görülemeyen tesirlerin tasarımı büyük ölçüde etkileyebilecek değerlere ulaştığı görülebilmektedir. Kayma çerçevesi varsayımı ile yapılan analizlerde görülemeyen yatay elemanlardaki eksenel kuvvet dağılımları, tüm sisteme etkisi ve benzeri çok sayıda etki buna örnektir.

Bu sebeple, söz konusu araştırmaları gerçekleştirebilmek amacıyla genel amaçlı bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan bilgisayar programı yapıların yatay, düşey veya açısal etkiler ya da bunların kombinasyonundan oluşan etkiler altındaki davranışlarını

araştıracabilecek opsiyonlarla donatılmıştır. Açısız deprem kayıtları henüz kolaylıkla elde edilemediği için; bu çalışmada yalnızca yatay ve düşey kayıtlar kullanılmasına rağmen, oldukça önemli bulgular elde edilmiştir.

Bu tez kapsamında, söz konusu varsayımlara ihtiyaç duyulmadan modelleme yapılabilecek şekilde geliştirilmiş olan GP-DYNA (General Purpose Dynamic Analysis) bilgisayar programı tanıtılmış ve bu program kullanılarak çok fazla sayıda analiz gerçekleştirilmiş, program doğrulanmış ve tamamlanmış opsiyonlarla analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları yaygın olarak kullanılan varsayımlarla bulunan sonuçların farklı olabileceğini göstermektedir. Diğer taraftan pratikte analizi mümkün görülmeyen tüm serbestlik bileşenlerinin pratik olarak hesaba katılabileceği gösterilmiştir. Geliştirilmiş olan bilgisayar programının bilinmeyen çözme kapasitesi oldukça yüksektir ve çözümü çift hassaslıklı sayılarla gerçekleştirmektedir. Bu tür programların geliştirilmesinin son derece gerekli ve yararlı olduğu vurgulanmakta ve yapılabirliği gösterilmektedir. Zira önerilen yöntem ve analizler çok az sayıda programın dışında yapılamamaktadır. Diğer taraftan GP-DYNA programı son derece hızlı çalışmaktadır.

Yüksek sayıda (modele göre bazen birkaç milyon) bilinmeyen çözme kapasitesine sahip, algoritması gereği çok hızlı ve çift hassaslıklı sayılarla çalışan GP-DYNA programının eleman kütüphanesi, denklem çözme opsiyonları, statik analiz modülleri gibi bazı modüller daha önce farklı amaçlar için geliştirilmiş olan TUNAL, NK, FEM gibi programların modüllerini (bazı uyarlamalarla) paylaşmaktadır. GP-DYNA programında dinamik analizler için ilave modüller geliştirilmiştir. Mevcut versiyon, köprülerin dinamik analizlerini gerçekleştirmek amacıyla, yatay etkilerin yanı sıra düşey ve açısız etkilerin de göz önüne alınabildiği, kütlelerin gereğinde yayılı kütleler olarak hesaba katılabildiği, statik ve dinamik analiz modellerinin tamamen uyumlu ve rijitlik matrisine uygun kütle matrisinin (ve sönüm matrisinin) oluşturulabildiği bir versiyon olarak güncellenmiştir. Her serbestliğe karşılık bir kütle bileşeni oluşturulabilmekte, en önemlisi $M_{i,j}$ terimleri sistem genelinde etkileştirilebilmektedir. Kütle matrisi diyagonal bir matris olmak zorunda değildir. GP-DYNA programı kullanılarak bir köprü modeli üzerinde statik ve dinamik analizler yapılmış, sistem davranışı araştırılmıştır. Çalışmanın köprüler üzerine yoğunlaştırılmış olmasının nedeni, birçok köprü, viyadük ve benzeri yapıların gerek ülkemizde gerekse yurt dışında deprem hasarı olarak servis dışı kalması, maddi kayıplara ve can kayıplarına neden olması, bu nedenlerin net olarak açıklanamaması, bina türü yapılarda

yaygın olarak kullanılan varsayımların bu tür yapılarda kullanılamaması ve daha uygun analiz yöntemlerine ihtiyaç duyulması gibi nedenlerdir.

Mevcut tez çalışmasında, özellikle depremin oluşturacağı düşey etkiler de göz önüne alındığında, varsayımlara uygun yapılan bazı yapısal sistemler dışında bu yöntemlerin gerçekçi sonuçlar veremeyeceği, hata oranlarının kabul edilebilir sınırları aşabileceği, göz ardı edilen etkilerin ortaya çıkan yıkıcı sonuçların ana nedeni olabileceği görülmüştür. GP-DYNA programı, ilave edilen modüllerle (sönüm matrisi modülü, zaman tanım alanında integrasyon amaçlı iki ayrı modül, düğüm noktası dinamik yüklerini hesaplayan modül, grafik opsiyonları ve benzeri alt programlar) güçlendirilmiştir. Dinamik analizler sonucunda yükler elde edilerek statik yüklerle karşılaştırılabilmektedir. En önemlisi, dinamik analizlerde diyagonal dışı terimler ve bu terimlere karşılık gelen yükler hesaba katılabilmektedir. Bu yüklerin ne oranlarda hesaba katılacağı hususu henüz netliğe kavuşmamıştır. Yalnızca yatay deprem kayıtları kullanılarak yapılan analizlerle emniyetli sonuçlar elde edilememektedir, düşey deprem etkileri de mutlaka hesaba katılmalıdır. Sistem matrislerinde (özellikle kütle matrisinde) diyagonal dışındaki terimler formülasyonda göz önüne alınmalıdır. Bu terimlere karşılık gelen yük fonksiyonları ve yükler hesaba katılmalıdır. Kütleler düğüm noktası konsantre kütleleri olarak basitleştirilmemeli, yayılı kütleler olarak hesaba katılmalıdır. Statik ve dinamik analizlerde modeller ve bilinmeyen serbestlikler (dof) eşit olmalıdır. Köprü kiriş kesme kuvvetleri incelendiğinde, deprem yüklerinin statik yüklere kıyasla oldukça yüksek değerler alabildiği görülmüştür. Alışlagelmiş bir öneri olan düşey yüklerin %30 artırılarak tasarım yapılması yönteminin gerçekçi olmayabileceği durumlar olduğu görülmüştür. Açısal bileşenlere karşılık gelen kütleler, yük fonksiyonları ve yükler henüz yeteri kadar araştırılmamıştır ve bu nedenle göz önüne alınamamaktadır. Açısal etkilerin de hesaba katılması durumunda bu değerlerin daha da artabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- AASHTO, 2002. Standart Specifications for Highway Bridges, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington D.C.
- Adachi, Y., Unjoh S. and Koshitoge, M., 1998, Analytical study on non-linear seismic response behaviour of seismic isolator and bridge column system, *Proc. of the Second World Conference on Structural Control*, Vol. 2, pp. 903-911.
- Adachi, Y., Kagayama, T., Unjoh, S. and Kondoh, M., 2000,. Non-linear seismic response characteristics study of a RC bridge column with seismic isolators by a shaking table test, *Proc. of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No 0311.
- Aguiar, R., Mora, D and Rodriguez, M., 2016, CEINCI-LAB. A free software to find the seismic capacity curve of frames with ADAS or TADAS dissipators, *Revista Ingenieria de Construcccion*, Vol. 31, No 1, pp. 37-53.
- Akiyama, M., Frangopol, D.M., and Mizuno, K., 2014, Performance analysis of Tohoku-Shinkansen viaducts affected by the 2011 Great East Japan earthquake, *Structure and Infrastructure Engineering*, 10:9, 1228-1247. doi: 10.1080/15732479.2013.806559.
- Akesson, D. and Lindemann, J., 2016, A tablet computer application for conceptual design, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering and Computational Mechanics*, Vol. 169, Issue: 2, pp. 45-52, Article Number: 1400020, DOI: 10.1680/eacm.14.00020.
- Alhan C., Gazi H., Kurtuluş H., 2016, Significance of stiffening of high damping rubber bearings on the response of base-isolated buildings under near-fault earthquakes, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.79, pp. 297-313 DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.02.029.
- American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2010, *Guide specifications for seismic isolation design* (3rd ed.), Washington, DC: Author.
- American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2013, *LRFD bridge design specifications*, Customary U.S. units, 6th ed., with 2013 interim revisions, Washington, DC: Author.
- Anderson, E. and Mahin, S.A., 1998, Displacement-based design of seismically isolated bridges, *Proc. of 6th US National Conf. on Earthquake Engineering*, EERI, Oakland, California.
- Ando, Y., Sakakibara, M., Yamandoe, S.-I. and Ohbo, N., 1998, Seismic evaluation of actual bridge with isolators by vibration tests, *Proc. of the Second World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, Vol. 1, pp. 913-922.
- AutoCAD, Autodesk Inc. 2016, *CAD (Computer-Aided Design) Software*, California, USA.

- Bonev, Z., Vaseva, E., Blagov, D. and Mladenov, K., 2010, Seismic Design of Slender Structures Including Rotational Components of the Ground Acceleration – Eurocode 8 Approach, *14th European Conference on Earthquake Engineering 2010*: Ohrid, Republic of Macedonia.
- Braga, F., Calvi, G.M. and Pinto, P.E., 1998, Italian and European guidelines for seismic design of isolated bridges, *Proc. of the US-Italy Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges*, Buffalo, pp. 3-12.
- Briseghella, L., Gori, R. and Negro, P., 1989, Seismic isolation of pier bridges, *Proc. of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. V, pp. 621-626.
- Brockenbrough, R. L., 1986, Distribution factors for curved I-girder bridges, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 112, pp. 2200-15, DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1986)112:10(2200).
- Buckle, I.G. and Kelly, J.M., 1986, Shake table studies of base isolated bridge superstructures with energy dissipators, *Proc. of the 8th European Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 5, pp. 55-61.
- Buckle, I., Yen, W.-H.(P.), Marsh, L., and Monzon, E., Implications of bridge performance during Great East Japan Earthquake for U.S. Seismic Design Practice, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, March 1–4, 2012, Tokyo, Japan, pp. 1363–1374.
- Burke, M .P. Jr. 2009, *Integral and Semi-Integral Bridges*, John Wiley and Sons: West Sussex, UK.
- Button, M.R., Cronin, C.J. and Mayes, R.L., 2002, Effect of Vertical Motions on Seismic Response of Highway Bridges, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, Issue 12, pp. 1551-1564, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:12(1551).
- CAL91, 1991, *Computer Assisted Learning of Static and Dynamic Analysis of Structural Systems users manual*, Wilson, E. L., Department of Civil and Environmental Engineering, University of California.
- California Department of Transportation [CalTrans], 1999, *Bridge memo to designers (20-1) – Seismic design methodology*, Sacramento, CA: Author.
- Calvo, J., Gracia, J. and Bayo, E., 2014, Web application for the analysis and design of structures, *Informes De La Construcción*, Vol. 66, Nº. Extra 1, ISSN 0020-0883.
- Chang, K.-C., Chang, D.-W., Tsai, M.-H., and Sung, Y.-C., 2000, Seismic performance of highway bridges, *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 2, pp. 55–77.
- Chang, S.-Y., Li, Y.-F., Loh, C.-H., Experimental Study of Seismic Behaviors of As-Built and Carbon Fiber Reinforced Plastics Repaired Reinforced Concrete Bridge Columns, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 9, Issue 4, pp. 391-402, DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2004)9:4(391).

- Chaudhary, M.T.A., Abe, M. and Fujino, Y., 2001a, Identification of soil-structure interaction effect in base-isolated bridges from earthquake records, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 21, 713-725.
- Chaudhary, M.T.A., Abe, M., Fujino, Y. and Yoshida, J., 2001b, Performance evaluation of base-isolated Yama-age Bridge with high damping rubber bearings using recorded seismic data, *Engineering Structures*, Vol. 23, pp. 902-910.
- Choi, E., DesRoches, R. and Nielson, B., 2004, Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones, *Engineering Structures*, Vol. 26, Issue 2, pp. 187–199, DOI: 10.1016/j.engstruct.2003.09.006.
- Chopra, A.K., 1995, *Dynamics of Structures: Theory And Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, ISBN: 0-13-855214-2.
- Chou, C.-C. and Hsu, C.-P., 2008, Hysteretic model development and seismic response of unbonded post-tensioned precast CFT segmental bridge columns, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37:919–934, DOI: 10.1002/eqe.796.
- Chu-Chieh, L., Hung, J.H.-H., Liu, K.-Y., and Chai, J.-F., 2010, Reconnaissance observation on bridge damage caused by the 2008 Wenchuan (China) earthquake Chu-Chieh, *Earthquake Spectra*, 26, pp. 1057–1083.
- Civjan, S., Sit, M., and Breña, S., 2016, Field and Analytical Studies of the First Folded-Plate Girder Bridge, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 21, Issue 11, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000918, 04016074.
- Craig Jr, R.R., and Kurdila, A.J., 2006, *Fundamentals of Structural Dynamics*, Wiley; 2 edition.
- Çakıcı, T., 1988, *User's Manual for TIM 88*, Middle East Technical University Structural Mechanics Laboratory, Ankara.
- Dahmardeh, D.R., Motamedi, M. and Aziminejad, A., 2019, A study on the effects of torsional component of ground motions on seismic response of low- and mid-rise buildings, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 29, Issue 4, DOI: 10.1002/tal.1699.
- David, T. K., Forth, J. P., and Ye, J., 2014, Superstructure behavior of a stub-type integral abutment bridge, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 19, 04014012, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000583.
- Dicleli, M., 2000, A rational design approach for prestressed-concrete girder integral bridges. *Engineering Structures*, 22(3), 230–245.
- Dicleli, M., 2005, Integral abutment-backfill behavior on sand soil—Pushover analysis approach. *Journal of Bridge Engineering*, 10(3), 354–364.

- Dicleli, M., and Albhaisi, S. M., 2003, Maximum length of integral abutment bridges supported on steel H-piles driven in sand, *Eng. Struct.*, 25(12), 1491–1504.
- Dicleli, M., and Albhaisi, S. M., 2004, Effect of cyclic thermal loading on the performance of steel H-piles in integral bridges with stubabutments, *J. Constr. Steel Res.*, 60(2), 161–182.
- Dicleli, M. and Erhan, S., 2008, Effect of soil and substructure properties on live load distribution in integral abutment bridges, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 13, pp. 527–539, DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:5(527).
- Dorfmann, A., and Burtscher, S.L., 2000, Aspects of cavitation damage in seismic bearings, *Journal of Structural Engineering*, 126, pp. 573–579.
- Earthquake Engineering Research Institute [EERI], 1995a, *Northridge earthquake reconnaissance report*, Oakland, CA: Author.
- Earthquake Engineering Research Institute [EERI], 1995b, *The Hyogo-Ken Nanbu earthquake reconnaissance report*, Oakland, CA: Author.
- Earthquake Engineering Research Institute [EERI], 2001, *1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake reconnaissance report*, Oakland, CA: Author.
- Earthquake Engineering Research Institute [EERI], 2011, *Learning from earthquakes bridge performance in the Mw 9.0 Tohoku, Japan, earthquake of March 11, 2011*, Oakland, CA: Author.
- Eftekhari, M. and Zadeh, M.T., 1996, Effect of seismic isolation systems on dynamic behaviour of bridges under earthquake loading, *Proc. of 11th World Conf. On Earthquake Engineering*, Paper No. 1347.
- EN 1337-3, 2005, *Structural bearings – Part 3: Elastomeric bearings*, Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 1992-1-1, 2004, *Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 1998-1, 2005, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 1998-2, 2005, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 2: Bridges*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Erdem S., Saifullah K., Gürbüz E., Blankson M.A., 2016, The influence of different concrete classes on the seismic response of a seismically isolated building, *Challenge Journal of Structural Mechanics*, Vol.2, pp. 169-178 DOI: 10.20528/cjsmec.2016.09.022.

- Feldmann, M., Pak, D., Hechler, O., and Martin, P. O, 2011, A methodology for modelling the integral abutment behaviour of nonsymmetrically loaded bridges, *Structural Engineering International*, Vol. 21, pp. 311-319, DOI: 10.2749/101686611X13049248219962.
- FEM, 2005, Program for Analysis of Structural Systems by Using Finite Element Method by Prof. Dr. Namık Kemal ÖZTORUN, İstanbul, Türkiye.
- Ferrari, R., Cocchetti G. and Rizzi, E., 2016, Limit Analysis of a historical iron arch bridge. Formulation and computational implementation, *Computers and Structures*, Vol. 175, pp. 184–196, DOI: 10.1016/j.compstruc.2016.05.007.
- Ferreira, F. and Simoes, L., 2020, Synthesis of three dimensional controlled cable-stayed bridges subjectto seismic loading, *Computers and Structures*, Vol. 226, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2019.106137>.
- FORTRAN90, IBM Inc. 1990, (*Formula Translation*) general-purpose, imperative programming language for numeric computation and scientific computing, New York, USA.
- Franchin, P. and Pinto, P. E., 2014, Performance-based seismic design of integral abutment bridges. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 12, pp. 939-960, DOI: 10.1007/s10518-013-9552-2.
- Ghaffarzadeh, H. and Nazeri, A., 2015, The effect of the vertical excitation on horizontal response of structures, *Earthquakes and Structures*, Vol. 9, No. 3 (2015) 625-637, DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2015.9.3.000>.
- Ghobarah, A., 1988, Seismic behaviour of highway bridges with base isolation, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, pp. 72-78.
- Ghobarah, A. and Ali, H.M., 1988, Seismic performance of highway bridges, *Engineering Structures*, Vol. 10, pp. 157-166.
- Goodnight, J., Kowalsky, M., and Nau, J., 2016, Modified Plastic-Hinge Method for Circular RC Bridge Columns, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 142, Issue 11, DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001570, 04016103.
- Goto, Y., Kikuchi, T. and Ina, Y., 1992, Development of knock-off abutment for base isolated bridges, *Proc. of the Tenth World Conf. on Earthquake Engng*, Rotterdam, Vol. 4, pp. 2221-2226.
- Gracia, J. amd Bayo, E., 2013, Integrated 3D Web Application for Structural Analysis Software as a Service, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 27 Issue 2 - March 2013, pp. 159-166, DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000217.
- Grant, D.N., Fenves, G.L. and Auricchio, F., 2004, Bridge Isolation with High-Damping Rubber Bearings – Analytical Modelling and System Response, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 1002.

- Guidotti, R., 2012, *Near-Field Earthquake Ground Motion Rotations and Relevance on Civil Engineering Structures*, Thesis (PhD), Politecnico di Milano.
- Hacıfendioğlu, K., 2016, Stochastic dynamic response of short-span highway bridges to spatial variation of blasting ground vibration, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 292, pp. 194–209, DOI: 10.1016/j.amc.2016.07.039.
- Hasan, A.M. M., Torky, A.A. and Rashed, Y.F., 2019, Geometrically accurate structural analysis models in BIM-centered software, *Automation in Construction*, Vol. 109, 299–321, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.04.022>.
- Hashemi, S.K., Bradford, M.A. and Valipour, H.R., 2016, Dynamic response of cable-stayed bridge under blast load, *Engineering Structures*, Vol. 127, pp. 719–736, DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.08.038.
- Hayashikawa, T., Matsui, Y. and Kaneko, T., 2000, Non-linear dynamic behaviour and seismic isolation of steel towers of cable-stayed bridges under great earthquake ground motion, *Proc. of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, Paper No. 0469.
- Huang, B.S., 2003, Ground rotational motions of the 1999 Chi Chi, Taiwan earthquake as inferred from dense array observations, *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, NO. 6, 1307, doi:10.1029/2002GL015157.
- Hwang, J.S., 1996, Evaluation of equivalent linear analysis methods of bridge isolation, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 122, pp. 972–976.
- Hwang, J.S. and Chiou, J.M., 1996, An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings, *Engineering Structures*, Vol. 18, pp. 528–536.
- Hwang, J.S. Chang K.C. and Tsai M.H., 1996a, Composite damping ratio of seismically isolated regular bridges, *Engineering Structures*, Vol. pp. 19, 55–62.
- Hwang, J.S., Chiou, J.M., Sheng, L.H. and Gates, J.H., 1996b, A refined model for base isolated bridges with bi-linear hysteretic bearings, *Earthquake Spectra*, Vol. 12, pp. 245–273.
- Iemura, H., Takahashi, Y. and Chen, Y., 1998, Control of seismic energy partitioning of bridge piers with sliding rubber bearing, *Proc. of the 2nd World Conf. on Structure Control*, NY, Vol. 2, pp. 941–948.
- Imbsen, R.A., 2007, *Proposed AASHTO guide specifications for LRFD Seismic Bridge Design-Subcommittee for seismic effects on bridges, T-3*, Imbsen Consulting.
- Jankowski, R., Wilde, K. and Fujino, Y., 1998, Pounding of superstructure segments in isolated elevated bridge during earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, pp. 487–502.

- Japan Road Association [JRA], 1997, *Manual for seismic design of highway bridges*, Tokyo: Author.
- Japan Road Association [JRA], 2002, *Chapter 1: Seismic design specifications for highway bridges*, Tokyo: International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Japan Road Association.
- Jiang D., Terzioglu, T., Hueste M.B.D., Mander J.B. and Fry, G.T., 2016, Experimental study of an in-service spread slab beam bridge, *Engineering Structures*, Vol. 127, pp. 525–535, DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.08.046.
- Jiang, H. and Chorzepa, M., 2016, Case Study: Evaluation of a Floating Steel Fender System for Bridge Pier Protection against Vessel Collision, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 21, Issue 11, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000947, 05016008.
- Jin, Z., Pei, S., Li, X., Liu, H., Qiang, S., 2016, Effect of vertical ground motion on earthquake-induced derailment of railway vehicles over simply-supported bridges, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 383, pp 277-294, DOI: 10.1016/j.jsv.2016.06.048.
- Kalani Sarokolayi, L., Navayi Neya, B. and Tavakoli, H.R., 2012, Rotational Components Generation of Earthquake Ground Motion Using Translational Components, *Proceedings of the 15th WCEE-World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, International Association for Earthquake Engineering.
- Kalani Sarokolayi, L., Navayi Neya, B. and Vaseghi Amiri, J., 2015, Nonlinear dynamic analysis of concrete gravity dams considering rotational component of ground motion, *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 13, No. 1, Transaction A: Civil Engineering: 16-29, DOI: 10.22068/IJCE.13.1.16.
- Kalkan, E. and Graizer, V., 2007, Multi-Component Ground Motion Response Spectra For Coupled Horizontal, Vertical, Angular Accelerations, And Tilt, *ISET Journal of Earthquake Technology - Special Issue on "Response Spectra"*, Vol. 44, No. 22.
- Katsaras, C.P., Panagiotakos, T.B., and Kolias, B., 2009, Effect of torsional stiffness of prestressed concrete box girders and uplift of abutment bearings on seismic performance of bridges, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7, pp. 363–375.
- Kawashima, K., 2012, Damage of Bridges due to the 2011 Great East Japan Earthquake, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, March 1–4, 2012, Tokyo, Japan, pp. 82–101.
- Kelly, J.M., Buckle, I. G. and Tsai, H.C., 1985, *Earthquake simulator testing of a baseisolated bridge deck*, Report No. UCB/EERC-85/09.

- Khan, Q.U.Z., Tahir, M.F., Ahmad, A. and Iqbal, M., 2015, Seismic Evaluation of Repaired and Retrofitted Circular Bridge Piers of Low-Strength Concrete, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 40, Issue 11, pp. 3057–3066., DOI: 10.1007/s13369-015-1769-8.
- Kim, J.-M., Feng, M.Q. and Shinozuka, M., 2000, Energy dissipating restrainers for highway bridges, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 19, pp. 65-69.
- Kim, T.-H., 2012, Inelastic Behavior of Hollow Reinforced Concrete Bridge Columns, *Proceedings of the 15th WCEE – World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal.
- Khaled, A., Massicotte, B., and Tremblay, R., 2011, Cyclic Testing of Large-Scale Rectangular Bridge Columns under Bidirectional Earthquake Components, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 16, Issue 3, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000162, pp. 351-363.
- Kitahara, T., Kajita, Y., and Kitane, Y., 2012, Investigation on the damage cause of the bridge rubber bearings in the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Proceedings of the 15th WCEE – World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, paper No. 2815, International Association for Earthquake Engineering.
- Ko, Y.-F. and Phung, 2014, Nonlinear static cyclic pushover analysis for flexural failure of reinforced concrete bridge columns with combined damage mechanisms, *Acta Mechanica*, Vol. 225, Issue 2, pp. 477–492, DOI: 10.1007/s00707-013-0970-7.
- Kunnath, S.K., Erduran, E., Chai, Y.H., and Yashinsky, M., 2008, Effect of Near-Fault Vertical Ground Motions on Seismic Response of Highway Overcrossings, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 13, Issue 3, pp. 282-290, DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:3(282).
- LaFave, J., Riddle, J., Jarrett, M., Wright, B., Svatora, J., An, H., and Fahnestock, L., 2016, Numerical Simulations of Steel Integral Abutment Bridges under Thermal Loading, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 21, Issue 10, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000919, 04016061.
- Lee, V.W. and Liang, J., 2008, Rotational Components of Strong-motion Earthquakes, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Lee, J.Y. and Ahn, S.Y., 2011, Finite Element Implementation for Computer-Aided Education of Structural Mechanics:Frame Analysis, *Computer Applications in Engineering Education*, Vol. 22, Issue: 3, pp. 387-409, DOI: 10.1002/cae.20563.
- Lee, W.H.K., Evans, J.R., Huang, B.-S., Hutt, C.R., Lin, C.-J., Liu, C.-C., and Nigbor, R.L., 2012, Measuring rotational ground motions in seismological practice. - In: Bormann, P.

- (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, pp. 1—27. DOI: http://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_5.3.
- Lee, J.-H., Choi, J.-H., Hwang, D.-K. and Kwahk, I.-J., 2015, Seismic performance of circular hollow RC bridge columns, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, Issue 5, pp 1456–1467, DOI: 10.1007/s12205-014-1173-z.
- Leitner, E.J. and Hao, H., 2016, Three-dimensional finite element modelling of rocking bridge piers under cyclic loading and exploration of options for increased energy dissipation, *Engineering Structures*, Vol. 118, pp. 74-88, DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.03.042.
- Li, J. and Xin, X., 1998, Non-linear seismic response analyses of isolation systems for continuous bridges (in Chinese), *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 18, pp. 67-73.
- Li, X.-M., 1989, Optimisation of the stochastic response of a bridge isolation system with hysteretic dampers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18, pp. 951-964.
- Lin, W., Lam, H., Yoda, T., Ge, H., Xu, Y., Kasano, H., Nogami, K., and Murakoshi, J., 2016, After-fracture redundancy analysis of an aged truss bridge in Japan, *Structure and Infrastructure Engineering*, 13:1, pp. 107-117, DOI: 10.1080/15732479.2016.1198393.
- Loh., C.-H. and Lee, Z.-K., 1997, Seismic Monitoring of a Bridge: Assessing Dynamic Characteristics from Both Weak and Strong Ground Excitations, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, 269-88, DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(199702)26:2<269::AID-EQE644>3.0.CO;2-H.
- Lu, X., Wang, D. and Wang, S., 2016, Investigation of the seismic response of high-rise buildings supported on tension-resistant elastomeric isolation bearings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 45, Issue 13, pp. 2207–2228, DOI: 10.1002/eqe.2755.
- Mahin, S.A., 1993, A simplified preliminary design approach for base isolated bridges, *Proc. of Second U.S.–Japan Workshop on Earthquake protective systems for bridges*, Public Works Research Institute, Japan, pp. 311-320.
- Mansilla, F.H., Iniesta, M.M., Pulido, M.D.G., Gordejuela, F.I., Heredia, M.I.C., 2014, “Parametric Trusses”, an Android App to Understand Structural Design, *INTED2014 8th International Technology, Education and Development Conference Proceedings*, Valencia (Spain), pp. 4347-4356.
- Mantawy, I., Thonstad, T., Sanders, D., Stanton, J., and Eberhard, M., 2016, Seismic Performance of Precast, Pretensioned, and Cast-in-Place Bridges: Shake Table Test Comparison, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 21, Issue 10, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000934, 04016071.

- Maragakis, E. and Saiidi, M., 1993, Development and application of simple analytical models of lead-rubber base isolated bridge, *Proc. of the Second U.S.-Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges*, Public Works Research Institute, Tsukuba Science City, Japan, pp. 275-284.
- Marriott, D., Pampanin, S. and Palermo, A., 2009, Quasi-static and pseudo-dynamic testing of unbonded post-tensioned rocking bridge piers with external replaceable dissipaters, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 38, Issue 3, pp. 331–354, DOI: 10.1002/eqe.857.
- Masrilayanti, 2013, *The Behaviour of Integral Bridges under Vertical and Horizontal Earthquake Ground Motion*, PhD thesis, University of Salford, United Kingdom.
- MATLAB and Statistics Toolbox Release 2017b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- Mergos, P.E. and Kawashima, K., 2005, Rocking Isolation of a Typical Bridge Pier on Spread Foundation, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 9:sup2, pp. 395-414, DOI: 10.1142/S1363246905002456.
- Microsoft Excel, 2016, Redmond, Washington, US.
- Mitoulis, S.A., Muhr, A., and Ahmadi, H., 2014, Uplift of elastomeric bearings in isolated bridges – A possible mechanism: Effects and remediation, *Proceedings of the 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (2ECEES)*, Istanbul, Turkey, paper 686.
- Mitoulis, S.A., 2015, Uplift of elastomeric bearings in isolated bridges subjected to longitudinal seismic excitations, *Structure and Infrastructure Engineering*, 11:12, 1600-1615, DOI: 10.1080/15732479.2014.983527.
- Morales-Rodriguez, P.A. and Lopez-Perales, J.A., 2017, Implementation of a Personalized Assessment Tool for the Course in Matrix Calculation of Structures, *10th annual International Conference of Education, Research and Innovation*, DOI: 10.21125/iceri.2017.1245.
- Murcia-Delso, J., Liu, Y., and Shing, P., 2016, Development of Bridge Column Longitudinal Reinforcement in Oversized Pile Shafts, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 142, Issue 11 DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001591, 04016114.
- Mutobe, R.M. and Cooper, T.R., 1999, Non-linear analysis of large bridge with isolation bearings, *Computers and Structures*, Vol. 72, pp. 279-292.
- Nakanashi, K., Kitada, T. and Nakai, H., 1999, Experimental study on ultimate strength and ductility of concrete filled steel columns under strong earthquake, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 51, Issue 3, pp. 297–319, DOI: 10.1016/S0143-974X(99)00006-1.

- Nakata, J.K., Meyer, C.E., Wilshire, H.G., Tinsley, J.C., Updegrove, W.S., Peterson, D.M., Ellen, S.D., Haugerud, R.A., McLaughlin, R.J., Fisher, G.R., and Diggles M.F., 1999, The October 17, 1989, Loma Prieta, California, Earthquake—Selected Photographs, *U.S. Geological Survey, Digital Data Series DDS-29, Version 1.2.*, pp. 16-27.
- Nguyen, V.H., Schommer, S., Maas, S. and Zürbes, A., 2016, Static load testing with temperature compensation for structural health monitoring of bridges, *Engineering Structures*, Vol. 127, pp. 700–718, DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.09.018.
- NK, 1998, Program for Analysis of Structural Systems by Prof. Dr. Namık Kemal ÖZTORUN, İstanbul, Türkiye.
- Okamoto, S., Fujii, S., Ozaki, D., Constantinou, M.C. and Tsopelas, P., 1995, Shaking table test of a model bridge with sliding type base isolation system (in Japanese), *Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, JSCE, Vol. 30, pp. 167-177.
- Ou, Y.-C., Song, J., Wang, P.-H., Adidharma, L., Chang, K.-C., and Lee, G.C., 2013, Ground Motion Duration Effects on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Bridge Columns, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 140, Issue 3, DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000856, 04013065.
- Öztorun, N. K., Çitipitioglu E., and Akkaş, N., 1994, Computerized Investigation of the Common Assumptions for the Analysis of Shear Wall Buildings, *Proc. of the International Conference on Computational Methods in Structural and Geotechnical Engineering*, V.1, 170-175 Hong Kong.
- Öztorun, N.K., Citipitioglu, E., and Akkas, N., 1998, Three-Dimensional Finite Element Analysis of Shear Wall Buildings, *Computers and Structures*, 68, 41-55, Edinburgh, UK.
- Öztorun, N.K., 1997a, Düzleminde Rijit Döşeme Varsayımı ile Yapılan Analizlerde, Döşemelerde Oluşan Düzlemsel Gerilmelerin Hesabı, *X. Ulusal Mekanik Kongresi*, İTÜ, Maslak, İstanbul.
- Öztorun, N.K., 1997b, Tünel Kalıpla Yapılan Binalarda Döşeme ve Zemin Rijitliğinin Perde Duvarlara Etkisi, *X. Ulusal Mekanik Kongresi*, İTÜ, Maslak, İstanbul.
- Öztorun, N.K., 1997c, Perde Duvarlı Yüksek Yapıların Bilgisayarla Analizi İçin Üç Boyutlu Bir Yöntem, *Gazi Üniversitesi, M.M.F. Dergisi*, Cilt:12, Sayı:1-2, Sayfa:167-181, Ankara.
- Öztorun, N.K., 1998, Tünel Kalıpla İnşa Edilen Binalarda Döşeme ve Zemin Rijitliğinin Perde Duvarlar Üzerindeki Etkisi, *Gazi Üniversitesi, M.M.F. Dergisi*, Cilt:13, Sayı:1-2, Sayfa:1-16, Ankara.
- Öztorun, N.K., Anıl, Ö., 1999, Çok Katlı Yapılarda Merdivenlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi, *TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası, Teknik Dergi*, Cilt 10, Sayfa 587-589.
- Öztorun, N.K., 2003, *Yapı Statiği II*, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi.

- Pagnini, L.C. , Ballio, G. and Solari, G., 1998, Modelling and non-linear seismic analysis of bridges with aseismic devices, *European Earthquake Engineering*, Vol. XII, pp. 19-29.
- Pagnini, L.C. and Solari, G., 1999, Stochastic analysis of the linear equivalent response of bridge piers with aseismic devices, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, pp. 543-560.
- Papazoglou, A.J. and Elnashai, A.S., 1996, Analytical and Field Evidence of the Damaging Effect of Vertical Earthquake Ground Motion, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25(10): pp. 1109–1137.
- Parghi, A. and Alam, M.S., 2016, Seismic behavior of deficient reinforced concrete bridge piers confined with FRP – A fractional factorial analysis, *Engineering Structures*, Vol. 126, pp. 531–546, DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.08.011.
- Parvin, A. and Ma, Z., 2001, The use of helical spring and fluid damper isolation systems for bridge structures subjected to vertical ground acceleration, *Electronic Journal of Structural Engineering*, Vol. 2, 98-110.
- Patsios, T.N. and Spiliopoulos, K.V., 2018, A force-based mathematical programming method for the incremental analysis of 3D frames with non-holonomic hardening plastic hinges, *Computers and Structures*, Vol. 208, 51-74, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2018.05.011>.
- Paz, M., 1991, *Structural Dynamics: Theory and Computation*, 3rd edition, Springer US, Van Nostrand Reinhold.
- PEER, 2013, Pacific Earthquake Engineering Research Center Ground Motion Database, University of California, Berkeley, CA, <http://ngawest2.berkeley.edu>.
- Pinto, A.V., Negro, P. and Taucer, F., 1998, Testing of bridges with isolation/dissipation devices at the ELSA Laboratory, *Proc. of the U.S.-Italy Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges*, MCEER, NY, pp. 257-279.
- Polanco, N.R., May, G. and Hernandez, E.M., 2016, Finite element model updating of semi-composite bridge decks using operational acceleration measurements, *Engineering Structures*, Vol. 126, pp. 264-277, DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.07.057.
- Pollino, M. and Bruneau, M., 2007, Seismic Retrofit of Bridge Steel Truss Piers Using a Controlled Rocking Approach, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 12, Issue 5, DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:5(600), 600-610.
- Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi, G.M., 1996, *Seismic design and retrofit of bridges*, New York, NY: Wiley. ISBN: 978-0-471-57998-4.

- Public Works Research Institute [PWRI], 2011, Technical note of PWRI no. 4217, *Proceedings of the 43rd Joint Meeting of U.S.-Japan panel on wind and seismic effects (UJNR)*, Tsukuba, August 29–30, pp. 154–163, Tsukuba: Author.
- Rao, A.S., Lepech, M.D. and Kiremidjian, A., 2016a, Development of time-dependent fragility functions for deteriorating reinforced concrete bridge piers, *Structure and Infrastructure Engineering*, 13:1, pp. 67-83, DOI: 10.1080/15732479.2016.1198401.
- Rao, A.S., Lepech, M.D., Kiremidjian A.S., and Sun, X.-Y., 2016b, Simplified structural deterioration model for reinforced concrete bridge piers under cyclic loading, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol 13:1, pp. 55-66, DOI: 10.1080/15732479.2016.1198402.
- Reyhanoğulları, N.E. and Akyüz, U., 2015, Vertical Ground Motion Influence on Seismically Isolated and Unisolated Bridges, *Challenge Journal Of Structural Mechanics*, 1 (3) (2015) pp. 117–123, DOI: 10.20528/cjsmec.2015.07.022.
- Robson, B.N. and Harik, I.E., 1998, Pullback testing of seismically isolated P/C I girder bridge, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124, pp. 930-937.
- Saeed, H.Z., Khan, Q.Z., Ahmed, A., Ali, S.M. and Iqbal, M., 2015, Experimental and finite element investigation of strengthened LSC bridge piers under Quasi-Static Cyclic Load Test, *Composite Structures*, Vol. 131, pp. 556–564, DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.06.013.
- Saiidi, M., Maragakis, E. and Griffin, G., 1999, Effect of base isolation on the seismic response of multi-column bridges, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 8, pp. 411-419.
- SAP2000, Computers and Structures Inc. 2005, *Linear And Nonlinear Static And Dynamic Finite Element Analysis And Design Of Three-Dimensional Structures*, Berkeley, USA.
- Sarıcı, B., Marionos, N., and Caner, A., 2011, Karakaya Demiryolu Köprüsünün Deprem Güçlendirme Ve Karayolu Eklentisi İle Kapasite Artırımı Çalışması, 1. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, pp. 1-2, 11-14 Ekim 2011, ODTÜ – Ankara.
- Savage, I., Eddy, J.C. and Orsolini, G.I., 1999, Seismic analysis and base isolation retrofit design of a steel truss vertical lift bridge, *Computers and Structures*, Vol. 72, pp. 317-327.
- Sawada, T., Nariyuki, Y., Hirao, K. and Kondo, K., 2000, Interaction of non-linear response between pier and isolator in seismically isolated bridges, *Proc. of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 2100.
- SeismoSignal, Seismosoft Ltd., 2018, A computer program for signal processing of time-histories, Available from URL: www.seismosoft.com.
- Seong, D.-J., Kim, T.-H., Oh, M.-S. and Shin, H.-M., 2011, Inelastic Performance of High-Strength Concrete Bridge Columns under Earthquake Loads, *Journal of Advanced*

Concrete Technology, Vol. 9, No.2 pp. 205-220, DOI: 10.3151/jact.9.205, Japan Concrete Institute.

Sideris, P., Aref, A., and Filiatrault, A., 2014, Large-Scale Seismic Testing of a Hybrid Sliding-Rocking Posttensioned Segmental Bridge System, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 140, Issue 6, DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000961, 04014025.

Stanton, J.F., Roeder, C.W., Mackenzie-Helnwein, P., White, C., Kuester, C., and Craig, B., 2008, *Rotation limits for elastomeric bearing (NCHRP Report 596)*, Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council.

Sun, Z. and Zhang, Y., 2016, Failure Mechanism of Expansion Joints in a Suspension Bridge, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 21, Issue 10, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000942, 05016005.

Tan, R.Y. and Huang, M.C., 2000, System identification of a bridge with lead-rubber bearings, *Computers and Structures*, Vol. 74, pp. 267-280.

Tanimura, S., Sato, T., Umeda, T., Mimura, K. and Yoshikawa, O., 2002, A note on dynamic fracture of the bridge bearing due to the great Hanshin-Awaji earthquake, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, Issue 2, pp. 153–160, DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00037-9.

TCDD İşletmesi Yük Dairesi Başkanlığı, 2011, *Yük Vagon Rehberi*, Ankara.

Terzioglu, T., Jiang, D., Hueste, M., Mander, J., and Fry, G., 2016, Experimental Investigation of a Full-Scale Spread Slab Beam Bridge, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 21, Issue 11, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000957, 04016082.

Thakkar, S. K. and Maheshwari R., 1995, Study of seismic base isolation of bridge considering soil structure interaction, *Third Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Univ. of Missouri-Rolla, Rolla, Missouri, Vol. 1, pp. 397-400.

TİM88: Educational Computer Analysis Program Developed by Çakıcı, T., Türkiye.

Tongaonkar, N.P. and Jangid, R.S., 1998, Seismic response of bridges with sliding isolation devices, *ISSET Journal of Earthquake Technology*, Vol. 35, pp. 9-27.

Topçu, A., 2014, *Bilgisayar Destekli Nümerik Analiz*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, <http://mmf2.ogu.edu.tr/atopcu/>, pp. 210-214.

TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

- Tsai, C.S. and Huang, C.J., 1998, Seismic behaviour of isolated curved bridges with FPS isolators, *Proc. of the 2nd World Conf. on Structural Control*, Kyoto, Japan, Vol. 2, pp. 103-112.
- Tunal, 1992-2016, Program for Analysis of 3 Dimensional Structures, Türkiye.
- Turkington, D.H. Carr, A.J. Cooke, N. and Moss, P.J., 1989a, Seismic design of bridges on Lead-rubber bearings, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115, pp. 3000-3016.
- Turkington, D.H., Carr, A.J. Cooke, N. and Moss, P.J., 1989b, Design methods for bridges on lead-rubber bearings, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115, pp. 3017-3030.
- Wang, C., and Chen, X., 2007, Effect of Vertical Excitation on Seismic Performance of Continuous Bridge, *Journal of Vibration and Shock*, 26(6): pp. 31–35.
- Wang, C., Zhao, J., Zhu, L. and Bao, Y., 2016, Effects of vertical excitation on the seismic performance of a seismically isolated bridge with sliding friction bearings, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol.15, No.1, pp. 187-196, DOI: 10.1007/s11803-016-0315-3.
- Wang, X-F., and Gould, P.L., 1994, Effects of pier uplift and sliding isolation on seismic performance of highway bridges, *Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Proceedings, EERI, California, Vol. 1, pp. 871-880.
- Wang, Y.P., Chung, L. and Wei, H.L., 1998, Seismic response analysis of bridges isolated with friction pendulum bearings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, pp. 1069-1093.
- Wang, Y., Ibarra, L., and Pantelides, C., 2016a, Seismic Retrofit of a Three-Span RC Bridge with Buckling-Restrained Braces, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 21, Issue 11, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000937, 04016073.
- Washeleski, T., Sener, K., Connor, R., and Varma, A., 2016, Load-Rating Procedures for Railroad Flatcars Repurposed as Sustainable Highway Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 21, Issue 11, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000945, 04016078.
- Wei, Z., Kai, Q., Weihua, Z. and Zhengxin, F., 1992, Test and analysis of bridge vibration isolation, *10th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 4, pp. 739-752.
- Wilson, E.L., 2005, CAL80, CAL88, CAL90, CAL91, SMIS2, Educational Computer Analysis Programs, İstanbul, Türkiye.
- Yalcin, O. F., 2017, A Comparative Study of Live Load Distribution in Skewed Integral and Simply Supported Bridges, *Journal of Civil Engineering*, Vol. 21, Issue 3, pp 937–949, DOI: 10.1007/s12205-016-0871-0.

- Yalcin, O. F. and Dicleli, M., 2013, Comparative study on the effect of number of girders on live load distribution in integral abutment and simply supported bridge girders, *Advances in Structural Engineering*, Vol. 16, pp. 1011-1034, DOI: 10.1260/1369-4332.16.6.1011.
- Ye, A.-J, Hu, S.-D. and Fan, L.-C, 2001, Simulation of Seismic Behavior for Bridge Bearings, *Journal of Tongji University*, 29(1): 6–9.
- Yeh, Y., Mo, Y., and Yang, C., 2002a, Seismic Performance of Rectangular Hollow Bridge Columns, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, Issue 1, pp. 60-68, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:1(60).
- Yin, J., Nigbor, R.L., Chen, Q. and Steidl, J., 2016, Engineering analysis of measured rotational ground motions at GVDA, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 87(2016)125–137, ISSN: 0267-7261.
- Yuan, H., Dang, J. and Aoki, T., 2013, Experimental study of the seismic behavior of partially concretefilled steel bridge piers under bidirectional dynamic loading, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42:2197–2216, DOI: 10.1002/eqe.2320.
- Yuan, H., Dang, J. and Aoki, T., 2014, Behavior of partially concrete-filled steel tube bridge piers under bi-directional seismic excitations, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 93, pp. 44-54, DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.10.022.
- Zhang, J., Xu, S.-Y. and Tang, Y., 2011, Inelastic displacement demand of bridge columns considering shear–flexure interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40:731–748, DOI: 10.1002/eqe.1056.
- Zhu, Q., and Xu, Y.L., Characteristics of distributed aerodynamic forces on a twin-box bridge deck, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 131, pp. 31–45, DOI: 10.1016/j.jweia.2014.05.003.
- Zhu, Q., Xu, Y.L. and Shum, K.M., 2016, Stress-level buffeting analysis of a long-span cable-stayed bridge with a twin-box deck under distributed wind loads, *Engineering Structures*, Vol. 127, pp. 416–433, DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.08.050.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Ezgi ÖZTORUN KÖROĞLU
Doğum Yeri	İstanbul
Doğum Tarihi	15.08.1988
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	530 433 40 12
E-Posta Adresi	ezgi.oztorun@istanbul.edu.tr
Web Adresi	http://avesis.istanbulc.edu.tr/ezgi.oztorun/



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Teknik Üniversitesi
Fakülte	İnşaat Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği Bölümü
Mezuniyet Yılı	09.02.2011

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği Programı
Mezuniyet Yılı	16.06.2014

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği Programı

Makale ve Bildiriler	
Öztorun E., Damci E., Öztorun N.K., "Analysis of Axially Symmetric Shell Structures", <i>Sigma Journal Of Engineering and Natural Sciences-Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi</i> , vol.9, pp.235-242, 2018.	
Öztorun E., Damci E., Öztorun N.K., "Eksenel Simetrik Yapıların Sonlu Elemanlar İle Analizinde Model Hazırlama Teknikleri", <i>Yapı Dünyası</i> , ss.17-22, 2014.	
Öztorun Köroğlu E., Öztorun N.K., Alhan C., "Yapıların Düşey Deprem Etkisi Altındaki Davranışları: Bir Köprü Örneği", <i>21. Ulusal Mekanik Kongresi</i> , Niğde, Türkiye, 2-6 Eylül 2019, ss.57-66	
Öztorun Köroğlu E., Öztorun N.K., Alhan C., "Yatay ve Düşey Deprem Etkisindeki Yapıların Dinamik Analizi İçin Bir Yöntem ve Bilgisayar Programı GP-	

DYNA'nın Geliştirilmesi", 21. *Ulusal Mekanik Kongresi*, Niğde, Türkiye, 2-6 Eylül 2019, ss.46-56

Öztorun Köroğlu E., Öztorun N.K., Alhan C., "Yapıların Deprem Analizi Modellemesinde Yaygın Olarak Kullanılan Teknikler ve Varsayımlar Üzerine Tartışma", 21. *Ulusal Mekanik Kongresi*, Niğde, Türkiye, 2-6 Eylül 2019, ss.34-45

Öztorun E., Öztorun N.K., "An Algorithm for Analysis Of Axially Symmetric Shell Structures", *International Conference on Research in Education and Science (ICRES)*, Muğla, Türkiye, 28 Nisan - 1 Mayıs 2018, pp.224-224

Öztorun E., Damci E., Öztorun N.K., "Eksenel Simetrik Kabuk Yapıların Analizi", XX. *Ulusal Mekanik Kongresi*, Bursa, Türkiye, 5-9 Eylül 2017, ss.909-916

Öztorun E., Öztorun N.K., Alhan C., "Software for the Analysis of Bridges Including Vertical and Angular Deformations by Utilizing Direct Integration Techniques", 3. *International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE)*, İzmir, Türkiye, 24-27 Nisan 2018, pp.511-511

Öztorun E., Alhan C., Erdem S., Öztorun N.K., "Köprülerin Deprem Etkileri Altındaki Davranışları", XX. *Ulusal Mekanik Kongresi*, Bursa, Türkiye, 5-9 Eylül 2017, ss.938-947