

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SARSMA MASASI DENEYİ VE SAYISAL ANALİZLERDE ELDE EDİLEN  
DİNAMİK PARAMETRELERİN GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİĞİ İLE  
KARŞILAŞTIRILMASI**

**NESLİHAN AVCI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YAPI PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
DR. ÖĞR. ÜYESİ FATİH ALEMDAR**

**İSTANBUL, 2019**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SARSMA MASASI DENEYİ VE SAYISAL ANALİZLERDE ELDE EDİLEN  
DİNAMİK PARAMETRELERİN GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİĞİ İLE  
KARŞILAŞTIRILMASI**

Neslihan AVCI tarafından hazırlanan tez çalışması 10.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Dr. Öğr. Üyesi Fatih ALEMDAR  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi Fatih ALEMDAR  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doc. Dr. Serkan BEKİROĞLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Sami And KILIÇ  
Boğaziçi Üniversitesi

## ÖNSÖZ

---

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, danışman hocam Sayın Dr. Fatih ALEMDAR'a, teşekkürlerimi sunarım.

Yapıcı yorumları ve desteği ile tez çalışma sürecime katkılarından dolayı Sayın Dr. Zeynep FIRAT ALEMDAR'a,

Hayatım boyunca hep yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen eşim Kadir AVCI'ya,

Annem Ayşe ÖZKARAASLAN'a, babam Mustafa ÖZKARAASLAN'a ve Hüseyin AVCI'ya, kardeşlerim Hamza ve Adem ÖZKARAASLAN'a ve ablam Berrin YÜCESOY'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma maddi manevi desteğini her zaman hissettiğim aileme ithaf edilmiştir.

Mayıs, 2019

Neslihan AVCI

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>SİMGE LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xviii</b>
<b>BÖLÜM 1</b>	
<b>GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1    Literatür Özeti .....	<b>1</b>
1.1.1    Görüntü İşleme Tekniği .....	<b>1</b>
1.1.2    Sonlu elemanlar yöntemi .....	<b>3</b>
1.2    Tezin Amacı ve Kapsamı .....	<b>5</b>
1.3    Hipotez .....	<b>6</b>
<b>BÖLÜM 2</b>	
<b>SARMSA MASASI DENEYİ</b> .....	<b>7</b>
2.1    Sarsma masası deney düzeniği .....	<b>7</b>
2.2    Çelik Çerçevenin Geometrik Özellikleri .....	<b>10</b>
2.3    Çelik Çerçevenin Mekanik Özellikleri .....	<b>11</b>
<b>BÖLÜM 3</b>	
<b>DENEYSSEL VERİLERİN SAYISAL GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİĞİ İLE ELDE EDİLMESİ</b> .....	<b>13</b>
3.1    Görüntü İşleme Tekniğinde Ön İşlemler .....	<b>13</b>
3.1.1    Video Kaydının Veri Biçiminin Sayısallaştırılması .....	<b>13</b>

3.1.2	Altpiksel ile Görüntü Çözünürlüğünün İyileştirilmesi .....	14
3.1.3	Görüntüden Nokta, Kenar ve Alan Detaylarının Çıkarılması.....	15
3.2	Şablon Eşleştirme Yöntemi.....	16
3.2.1	Akıllı Arama ile Şablon Eşleştirme Yöntemi .....	19
3.2.2	Akıllı arama ile Şablon Eşleştirme Yöntemi Algoritması .....	20
3.2.3	Image Analysis Programının Çalışma Prensibi .....	22

## BÖLÜM 4

SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZ .....	25	
4.1	Katı Elemanlar .....	25
4.1.1	Eleman Ailesi .....	25
4.1.2	Serbestlik dereceleri.....	26
4.1.3	Düğüm sayısı .....	27
4.1.4	Formülasyon.....	28
4.1.5	İntegrasyon yöntemi .....	28
4.2	Etkileşimde Olan Elemanlara Temas Mekanizmasının Tanımlanması .....	31
4.2.1	Eleman Yüzeyleri Arasındaki Etkileşim.....	31
4.2.1.1	Yüzey-Yüzey Etkileşimi .....	31
4.2.1.2	Düğüm Noktası-Yüzey Etkileşimi.....	32
4.2.2	Kayma etkisinin tanımı .....	33
4.2.3	Etkileşimin modelleri.....	33
4.2.3.1	Teğetsel davranış .....	33
4.2.3.2	Normal davranış .....	35
4.3	Çelik Çerçeve Eleman Tanımları .....	36
4.4	Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	36
4.5	Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması.....	38
4.6	Eleman Yüzeyleri Arasındaki Temas Tanımları.....	39
4.7	Analiz Adımları .....	43
4.8	Sonlu Eleman Noktaları Arasında Yer Değiştirmelerin Sınırlandırılması .	43
4.9	Statik yük uygulaması.....	44
4.10	Sonuçların Elde Edilmesi .....	45
4.11	Sonlu Eleman Analizlerinin Sonuçlarının Değerlendirmesi .....	47
4.11.1	Mod Şekilleri .....	47
4.11.2	Northridge %100 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları	48
4.11.3	Northridge %50 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları..	51
4.11.4	Kocaeli %100 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları.....	54

4.11.5 Kocaeli %50 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları.....	57
---	----

## **BÖLÜM 5**

SONUÇLARIN DEĞERLENDİRMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI .....	61
5.1 Sarsma Masası Deneyi ve Görüntü İşleme Tekniği İle Elde Edilen Dinamik Parametrelerin Karşılaştırılması .....	61
5.2 Sayısal Analizlerde Elde Edilen Dinamik Parametrelerin Görüntü İşleme Tekniği İle Karşılaştırılması .....	63
5.2.1 Northridge %50 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları ile Görsel İşleme Tekniğinin Karşılaştırılması.....	63
5.2.2 Northridge %100 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları ile Görsel İşleme Tekniğinin Karşılaştırılması.....	66
5.3 Sayısal Analizlerde Elde Edilen Dinamik Parametrelerin Değerlendirilmesi .....	69
5.3.1 Northridge %100 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları	69
5.3.2 Northridge %50 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları..	73
5.3.3 Kocaeli %100 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları.....	78
5.3.4 Kocaeli %50 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları.....	83
5.3.5 Sonuçların Karşılaştırılması .....	88
5.3.5.1 Yer değiştirme rijitliklerinin karşılaştırılması.....	88
5.3.5.2 Dönme rijitliklerinin karşılaştırılması .....	89

## **BÖLÜM 6**

SONUÇ VE ÖNERİLER .....	91
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>95</b>
<b>EK-A.....</b>	<b>99</b>
GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİĞİNDE ÖN İŞLEMLER.....	99
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>100</b>

## SİMGE LİSTESİ

---

F	Kuvvet
M	Moment
r	Korelasyon katsayısı
I	Görüntü matrisi
$\alpha_{\text{birleşim}}$	Birleşimin dönme değeri
$\alpha_{\text{kiriş}}$	Kirişin dönme değeri
$\alpha_{\text{kolon}}$	Kolonun dönme değeri
$\mu$	Sürtünme katsayısı
$\sigma_s$	Pekleşme sırasındaki gerilme değeri
$\sigma_y$	Akma gerilmesi
$\sigma_k$	Kopma gerilmesi
$\tau_{cr}$	Kritik kayma gerilmesi

## KISALTMA LİSTESİ

---

LVDT	Linear Variable Differential Transformer
PPM	Pixel Per Metric
RMSE	Root Mean Square Error
ROI	Region of Interest
YTÜ	Yıldız Teknik Üniversitesi

## ŞEKİL LİSTESİ

---

	Sayfa
Şekil 2. 1 Sarsma masası deney düzeneği .....	7
Şekil 2. 2 Sarsma masasından alınan yer değiştirme ve ivme parametreleri .....	9
Şekil 2. 3 Çelik çerçeve ölçüleri .....	10
Şekil 2. 4 Çelik çerçeve üst görünüş .....	11
Şekil 2. 5 Yapı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	12
Şekil 3. 1 Dijital görüntünün sayısallaştırılması.....	14
Şekil 3. 2 Altpiksel ile görüntü çözünürlüğünün iyileştirilmesi .....	15
Şekil 3. 3 Görüntüden Nokta, Kenar ve Alan Detaylarının Çıkarılması .....	16
Şekil 3. 3 Şablon eşleştirme yönteminin temel gösterimi.....	17
Şekil 3. 4 Şablon eşleştirme yönteminde ROI yönteminin uygulanışı [28] .....	18
Şekil 3. 5 ROI penceresi yöntemi ile şablon eşleştirme uygulaması .....	18
Şekil 3. 6 ROI penceresi yöntemi ile şablon eşleştirme uygulaması oluşan hatalar ....	18
Şekil 3. 7 Akıllı arama ile şablon eşleştirme yöntemi algoritması .....	20
Şekil 3. 8 Image Analysis programı ile şablon eşleştirme.....	22
Şekil 3. 9 Image analysis programı ile döndürülmüş görüntüde şablon eşleştirme ....	22
Şekil 3. 10 Image Analysis programında şablon seçimi.....	23
Şekil 3. 11 Matlab editor penceresi .....	23
Şekil 3. 12 Northridge %100 deprem kaydı için 2. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması .....	24
Şekil 4. 1 Abaqus eleman tipleri.....	26
Şekil 4. 2 Serbestlik dereceleri .....	26
Şekil 4. 3 ABAQUS katı elemanlardan örnekler .....	27

Şekil 4. 4	C3D20 ve C3D20R katı elemanlarının integrasyon noktaları (a) C3D20 elemanı, (b) C3D20 integrasyon noktaları, (c) C3D20R integrasyon noktaları .....	29
Şekil 4. 5	Tam ve azaltılmış integrasyona sahip elemanların interpolasyon çeşitleri ..	29
Şekil 4. 6	Katı elemanlarda basit eğilme .....	30
Şekil 4. 7	İkinci dereceden (kuadratik) elemanlarda basit eğilme .....	30
Şekil 4. 8	Doğrusal elemanlarda basit eğilme; (a) "Shear locking" davranışı, (b)"Hourglassing" davranışı.....	31
Şekil 4. 9	Yüzey-yüzey etkileşimi .....	32
Şekil 4. 10	Düğüm noktası-yüzey etkileşimi .....	33
Şekil 4. 11	Temas yüzeyinin kayma bileşeni için kabuller .....	34
Şekil 4. 12	Temas yüzeyinin normal bileşeni için kabuller .....	35
Şekil 4. 13	Abaqus çelik çerçeve modeli .....	36
Şekil 4. 14	S235 malzeme çeliğinin yoğunluğu ve elastik malzeme özelliklerinin programa atanması .....	37
Şekil 4. 15	S235 malzeme çeliğinin gerilme-şekil değiştirme grafiği ve plastik malzeme özelliklerinin programa atanması [34] .....	37
Şekil 4. 16	Sonlu elemanlar ağı .....	39
Şekil 4. 17	Korniyerlerin tam bağlı ve serbest temas yüzeylerinin belirlenmesi .....	40
Şekil 4. 18	Birleşim bölgesinde serbest yüzey-yüzey etkileşiminin atanması.....	41
Şekil 4. 19	Birleşim bölgesinde serbest düğüm noktası-yüzey etkileşiminin atanması .	41
Şekil 4. 20	Serbest yüzey etkileşimi için "normal" ve "kayma" davranışının belirlenmesi .....	42
Şekil 4. 21	Birleşimde tam bağlı yüzeylerin atanması.....	42
Şekil 4. 22	Dinamik analiz adımının atanması.....	43
Şekil 4. 23	Modele hareketli mesnet atanması.....	44
Şekil 4. 24	Sisteme yapısal olmayan statik yük atanması .....	45
Şekil 4. 25	Sünek yapı davranışı .....	45
Şekil 4. 26	Sistemin rijitliğinin belirlenmesi .....	46
Şekil 4. 27	Birleşimde oluşan moment ve dönme.....	46
Şekil 4. 28	Moment-dönme grafiği .....	47
Şekil 4. 29	Mod Şekilleri .....	48
Şekil 4. 30	Çelik çerçevede Northridge %100 depremi ile elde edilen Von-Mises gerilme dağılımı .....	49

Şekil 4. 31 Northridge %100 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi Von-Mises gerilme dağılımı .....	50
Şekil 4. 32 Çelik çerçevede Northridge %100 depremi ile elde edilen plastik deformasyonları .....	50
Şekil 4. 33 Çelik çerçevede Northridge %100 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi plastik deformasyonları .....	51
Şekil 4. 34 Çelik çerçevede Northridge %50 depremi ile elde edilen Von-Mises gerilme dağılımı .....	52
Şekil 4. 35 Northridge %50 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi Von-Mises gerilme dağılımı .....	52
Şekil 4. 36 Çelik çerçevede Northridge %50 depremi ile elde edilen plastik deformasyonları .....	53
Şekil 4. 37 Çelik çerçevede Northridge %50 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi plastik deformasyonları .....	53
Şekil 4. 38 Çelik çerçevede Kocaeli %100 depremi ile elde edilen Von-Mises gerilme dağılımı .....	55
Şekil 4. 39 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi Von-Mises gerilme dağılımı .....	55
Şekil 4. 40 Çelik çerçevede Kocaeli %100 depremi ile elde edilen plastik deformasyonları .....	56
Şekil 4. 41 Çelik çerçevede Kocaeli %100 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi plastik deformasyonları .....	56
Şekil 4. 42 Çelik çerçevede Kocaeli %50 depremi ile elde edilen Von-Mises gerilme dağılımı .....	57
Şekil 4. 43 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi Von-Mises gerilme dağılımı .....	58
Şekil 4. 44 Çelik çerçevede Kocaeli %50 depremi ile elde edilen plastik deformasyonları .....	58
Şekil 4. 45 Çelik çerçevede Kocaeli %50 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi plastik deformasyonları .....	59
Şekil 4. 46 Çelik çerçeve ve sayısal model birleşim deformasyonu .....	60
Şekil 5. 1 Northridge %50 deprem kaydı için sarsma tablasının analizi .....	61
Şekil 5. 2 Northridge %100 deprem kaydı için sarsma tablasının analizi .....	62
Şekil 5. 3 Northridge %50 deprem kaydı için 1. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması .....	63
Şekil 5. 4 Northridge %50 deprem kaydı için 2. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması .....	64

Şekil 5. 5	Northridge %50 deprem kaydı için 3. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması .....	64
Şekil 5. 6	Northridge %50 deprem kaydı için tüm sistemin dinamik yer değiştirme parametrelerin karşılaştırılması .....	65
Şekil 5. 7	Northridge %100 deprem kaydı için 1. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması .....	66
Şekil 5. 8	Northridge %100 deprem kaydı için 2. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması .....	67
Şekil 5. 9	Northridge %100 deprem kaydı için 3. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması .....	67
Şekil 5. 10	Northridge %100 deprem kaydı için tüm sistemin dinamik yer değiştirme parametrelerin karşılaştırılması .....	68
Şekil 5. 11	Northridge %100 depremi ile elde edilen zemin ve 3. kat yer değiştirme-zaman grafiği .....	69
Şekil 5. 12	Northridge %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-zaman grafiği .....	70
Şekil 5. 13	Northridge %100 depremi ile elde edilen deformasyon-zaman grafiği .....	70
Şekil 5. 14	Northridge %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (tüm sistem) .....	70
Şekil 5. 15	Northridge %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (1. Kat) .....	71
Şekil 5. 16	Northridge %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (2.kat) .....	71
Şekil 5. 17	Northridge %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (3. Kat) .....	72
Şekil 5. 18	Northridge %100 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (1. Kat) .....	72
Şekil 5. 19	Northridge %100 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (2. Kat) .....	73
Şekil 5. 20	Northridge %100 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (3. Kat) .....	73
Şekil 5. 21	Northridge %50 depremi ile elde edilen zemin ve 3. kat yer değiştirme-zaman grafiği .....	74
Şekil 5. 22	Northridge %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-zaman grafiği .....	74
Şekil 5. 23	Northridge %50 depremi ile elde edilen deformasyon-zaman grafiği .....	74
Şekil 5. 24	Northridge %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (tüm sistem) .....	75

Şekil 5. 25 Northridge %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (1. Kat) .....	75
Şekil 5. 26 Northridge %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (2. Kat) .....	76
Şekil 5. 27 Northridge %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (3. Kat) .....	76
Şekil 5. 28 Northridge %50 depremi ile elde edilen giriş uç momenti-dönme grafiği (1. Kat) .....	77
Şekil 5. 29 Northridge %50 depremi ile elde edilen giriş uç momenti-dönme grafiği (2. Kat) .....	77
Şekil 5. 30 Northridge %50 depremi ile elde edilen giriş uç momenti-dönme grafiği (3. Kat) .....	78
Şekil 5. 31 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen zemin ve 3. kat yerdeğiştirme-zaman grafiği.....	79
Şekil 5. 32 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-zaman grafiği .	79
Şekil 5. 33 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen deformasyon-zaman grafiği .....	79
Şekil 5. 34 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (tüm sistem) .....	80
Şekil 5. 35 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (1. Kat) .....	80
Şekil 5. 36 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (2. Kat) .....	81
Şekil 5. 37 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (3. Kat) .....	81
Şekil 5. 38 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen giriş uç momenti-dönme grafiği (1. Kat) .....	82
Şekil 5. 39 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen giriş uç momenti-dönme grafiği (2. Kat) .....	82
Şekil 5. 40 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen giriş uç momenti-dönme grafiği (3. Kat) .....	83
Şekil 5. 41 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen zemin ve 3. kat yerdeğiştirme-zaman grafiği.....	84
Şekil 5. 42 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-zaman grafiği ...	84
Şekil 5. 43 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen deformasyon-zaman grafiği .....	84
Şekil 5. 44 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (tüm sistem) .....	85
Şekil 5. 45 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (1. Kat) .....	85

Şekil 5. 46 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (2. Kat) .....	86
Şekil 5. 47 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (3. Kat) .....	86
Şekil 5. 48 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (1. Kat) .....	87
Şekil 5. 49 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (2. Kat) .....	87
Şekil 5. 50 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (3. Kat) .....	88



## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 1. 1 Sarsma masasının mekanik özellikleri .....	8
Çizelge 4. 1 Periyotlar .....	47
Çizelge 4. 2 Maksimum gerilme ve şekil değiştirme değerleri .....	54
Çizelge 4. 3 Maksimum gerilme ve şekil değiştirme değerleri .....	59
Çizelge 5. 1 Deprem ivme kayıtları ile elde edilen yer değiştirme rijitlikleri (kN/cm) ....	88
Çizelge 5. 2 Normalize edilmiş değerler.....	89
Çizelge 5. 3 Deprem ivme kayıtları ile elde edilen kiriş dönme rijitlikleri (kN.cm/rad) ..	89
Çizelge 5. 4 Normalize edilmiş değerler.....	90

**SARSMA MASASI DENEYİ VE SAYISAL ANALİZLERDE ELDE EDİLEN  
DİNAMİK PARAMETRELERİN GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİĞİ İLE  
KARŞILAŞTIRILMASI**

Neslihan AVCI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Fatih ALEMDAR

Deprem esnasında oluşan yatay yüklerin yapı ve yapı elemanlarında oluşturduğu zorların ve yapının bu yatay dinamik etki karşındaki davranışının belirlenmesinde birçok deneysel yöntem vardır. Sarsma masası deneyi ile oluşturulan deprem simülasyonu, yapı ve yapı elemanlarının yer değiştirme ve modal parametrelerini elde etmede kullanılan en iyi yöntemlerden birisidir. Bu parametrelerin ölçülmesi için kullanılan birçok ölçüm aleti vardır. Bunlardan bazıları doğrusal değişimli diferansiyel transformatörler(LVDT), lineer potansiyometre, piezoelektrik veya mikro elektromekanik ivmeölçerlerdir. Bu çalışmada olduğu gibi büyük ölçekli bir deneysel numune kullanıldığında birçok noktadan dinamik parametreler elde edilmek istenebilir. Ölçüm aletlerinin numune üzerine yerleştirilmesi, ölçümlerin hassasiyeti, ölçüm alınan noktaların fazlalığı bu dinamik parametrelerin elde edilme maliyetini arttırır. Aynı zamanda bu yöntemler işçilik, zaman ve maliyet açısından dezavantajlara sahiptir. Son zamanlarda, bu dezavantajlara sahip olmayan görüntü işleme yöntemleri ön plana çıkmaktadır. Sadece dijital kamera, bilgisayar ve uygun bir yazılımla tek bir deney yapılarak deney numunesinin birçok noktasından dinamik yer değiştirmeye ait büyüklükler ölçülebilmektedir.

Dinamik parametrelerin ölçümünde şablon eşleştirme yöntemi kullanılmıştır. Şablon eşleştirme yöntemi genel prensibi görüntü içerisinde seçilen bir hedefin video kaydı

boyunca hareketinin takibine dayanmaktadır. Fakat seçilen hedefe benzer başka hedefler olduğunda istatikselsel olarak hatalar oluşmaktadır. Bu sebeple şablon eşleştirme yöntemi akıllı arama tekniği ile geliştirilerek bir algoritma üretilmiştir. Bu algoritma ile birbirine benzer hedeflerin olduğu çalışmalarda sağlıklı sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışmada, 3 boyutlu çelik çerçeve deneysel numunenin, farklı genlik ve frekans içeriğine sahip deprem ivme kayıtları ile sarsma masası deneyini gerçekleştirilmiştir. Sarsma tablası üzerinden ivmeölçer ve LVDT ile elde edilen dinamik parametreler, görüntü işleme tekniği ile istatikselsel olarak hesaplanan dinamik parametreler ile karşılaştırılmıştır. LVDT ile görüntülerden alınan yer değiştirme parametreleri arasındaki korelasyon katsayısı 0.99 üzerinde çıkmıştır. Ayrıca 3 boyutlu çelik çerçeve Abaqus programı ile modellenmiş, çelik çerçeve üzerinden referans alınan noktalardaki dinamik parametreler, görüntü işleme tekniği ile elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda birbiriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışmanın son aşamasında Abaqus'te modellenen çelik çerçevenin farklı depremlerden nasıl etkilendiği, sistem ve kat yer değiştirme rijitlikleri ile kiriş dönme rijitlikleri verilerek karşılaştırılmaya çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sarsma masası deneyi, çelik çerçeve, görsel işleme tekniği, sonlu elemanlar yöntemi.

**COMPARİSON OF THE DYNAMIC PARAMETERS OBTAINED İN THE SHAKİNG TABLE EXPERİMENT AND NUMERICAL ANALYSIS WİTH THE İMAGE PROCESSİNG TECHNIQUE**

Neslihan AVCI

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Dr. Fatih ALEMDAR

There are many experimental methods in determining the behavior of the horizontal loads in the structure and structure elements and the behavior of the structure against this horizontal dynamic effect. The earthquake simulation created by the shaking table experiment is one of the best methods used to obtain the displacement and modal parameters of the structural and structural elements. There are many measuring tools used to measure these parameters. Some of these are linear change differential transformers (LVDT), linear potentiometers, piezoelectric or microelectromechanical accelerometers. When a large-scale experimental sample is used in this study, it is desirable to obtain dynamic parameters from many points. The placement of the measuring instruments on the sample, the accuracy of the measurements, the excess of the measured points, increase the cost of obtaining these dynamic parameters. At the same time, these methods have disadvantages in terms of labor, time and cost. Recently, image processing methods that do not have these disadvantages come to the fore. Only a single experiment can be performed with digital camera, computer and appropriate software.

Template matching method was used to measure dynamic parameters. The general principle of the template matching method is based on the tracking of the movement of a selected target in the image through video recording. However, when there are other targets similar to the selected target, statistical errors occur. For this reason, an algorithm has been developed by developing the template matching method with intelligent search technique. Healthy results were obtained with similar algorithms.

In this study, the earthquake table with different amplitude and frequency content of the 3 dimensional steel frame experimental specimen was applied to the shaking table. The dynamic parameters obtained by the accelerometer and LVDT on the shaking table were compared with the dynamic parameters calculated using image processing technique. The correlation coefficient between the LVDT and the displacement parameters taken from the images was over 0.99. In addition, the 3 dimensional steel frame was modeled with the Abaqus program and the dynamic parameters at the reference points on the steel frame were compared with the data obtained by the image processing technique. As a result of the analysis, the results were consistent.

In the last step of this study, how the steel frame modeled in Abaqus is affected by different earthquakes, system and floor displacement stiffness and beam rotational rigidity are tried to be compared.

**Keywords:** Shaking table test, steel frame, visual processing technique, finite element method.



#### 1.1 Literatür Özeti

##### 1.1.1 Görüntü İşleme Tekniği

Literatür araştırması, son yıllarda görüntü işleme yönteminin mühendislik konularında geniş bir kullanım alanı olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Görüntüden anlamlı veri almaya dayalı erken uygulamalarda mekanik zorlar ve gerilmeler elde edilmeye çalışılmıştır [1], [2].

İki kayıt cihazı tarafından elde edilen görüntülerle 3D yapısal titreşim tepkilerini izlemek için bir yöntem sunmuştur [3]. Doğruluğu arttırmak için geometrik kalibrasyon yöntemleri kullanılmıştır. Tek bir noktanın sinüzoidal hareketi, bir köprü modelinin rüzgâr tüneli testi ve 3 katlı küçük ölçekli bir yapı için deprem titreşimi gibi farklı koşullar altında farklı modeller için üç deney gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, titreşim frekansı arttıkça, ölçüm hatalarının daha yüksek değerlere sahip olduğunu göstermiştir.

Bir köprü yapısının titreşimlerini kaydetmek için yüksek hızlı kameralar kullanmış ve OpenCV tabanlı yazılımı kullanarak dinamik özellikleri araştırmıştır [4]. Bu çalışmada kullanılan yazılım Lukas-Kanade optik akış algoritması kullanılmıştır. Bu çalışmanın temel amacı, hasarın yerini belirlemektir. Ancak, alan testlerinde gürültünün üstesinden gelinmesi gereken önemli bir sorun olduğu görülmüştür.

Choi vd. (2011) 2 katlı tek açıklıklı bir çelik çerçeve numunesinin üzerine çok sayıda etiket ile referans noktalarının sarsma masası deneylerinde yaptığı deplasman değerlerini görüntü

işleme metoduyla elde etmeye çalışmışlardır. Deneysel numunenin büyüklüğü ve referans noktalarının çok olması kamera kadrajının geniş tutulmasını gerektirmektedir. ROI (Resized Region of Interest) adı verilen belirli bir hedefe odaklanan ve bu özel alanı takip eden Dinamik Yer Değiştirme Görüntü Sistemini tanıtmıştır. Sunulan sistem her adımda ROI yeniden boyutlandırma ve katsayı güncelleme algoritması önerilmiştir. Önerilen yöntem, sismik yükleme altında LVDT kullanma yöntemi ile karşılaştırılmıştır [5].

İnce kolonların dinamik davranışını gözlemlemede dijital görüntü elde etme sisteminin performansını araştırmıştır [6]. Analiz sonuçları, teorik hesaplamalar ve deneysel veriler arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermiştir. Ayrıca, geleneksel ölçüm cihazlarının, modelin yapısal davranışında istenmeyen değişiklikler getirdiğini göstermiştir.

Mevcut yüksek katlı yapıların davranışını anlamak için yatay yer değiştirmelerin önemini vurgulamıştır. Bu yapıların büyüklüğü nedeniyle, yer değiştirmelerin ölçümünü temas yöntemleriyle yapmak için çeşitli engeller sunmuştur. Araştırmacılar, test yapısına kurulu iki web kamerasının video kayıtlarını kullanarak esnek bir sütun yapısındaki belirli noktaların yer değiştirmelerini elde etmek için bir sistem başlatmıştır. Bu web kamerası kayıtları farklı açılardan noktaları hedef almıştır. Yatay yer değiştirmeler, kayıtlardan elde edilen konumsal ve konum değerlerinin mekansal varyasyonu kullanılarak elde edilmiştir. Lazer yer değiştirme sensör ölçümleri ile karşılaştırılan sonuçlar ve fark 0,5'ten az bulunmuştur [7].

Fırat Alemdar Z. vd. (2011) farklı yükler altındaki yapısal sistemlerdeki doğrusal olmayan tepkinin yerini incelemiştir. Dört açıklıklı büyük ölçekli bir köprü sisteminin sismik performansını araştırırken, güçlü yer hareketleri altında kolonların plastik bölgelerinden deformasyon verileri elde edilmiştir. Plastik bölgelerdeki deformasyonları kaydetmek ve analiz etmek için kolonların üst ve alt yüzeylerine izgara çizgileri kullanılarak bir fotogrametri yöntemi uygulanmıştır. Betonarme köprü kolonunun dinamik yükleme altındaki deformasyonları ve dönmeleri incelenerek geleneksel test ekipmanlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Fotogrametri yöntemi, referans çizgileri kullanılarak çizilen yüzeydeki noktaların yanal ve düşey yer değiştirmelerinin yanı sıra plastik bölgelerin deforme şeklini takip etmeyi başarmıştır, ancak kolonlardaki dönmeler gibi ikincil hesaplamaların sonuçları sınırlı bir başarıya ulaşmıştır [8].

Görüntü işleme tekniklerinden şablon eşleştirme yöntemi ile asma bir köprünün askı kablolarının titreşim frekanslarının bulunmasında kullanılmakla beraber bir demiryolu köprüsünün tren geçişleri esnasındaki titreşimlerinin ölçülmesinde de kullanılmıştır [9]. Şablon eşleştirme yöntemi ile ise asma köprü kablolarının titreşim ölçümlerinde sabit bir referans hedefe ihtiyaç olmaksızın uygulanmıştır [10], [11].

Jo vd. (2018) yaptıkları çalışmalarda iki farklı görsel işleme tekniğini birleştirerek ölçülebilir alanı genişletmeyi ve yer değiştirme ölçümünün doğruluğunu arttırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla işaretleyiciyi izlemek için NCC işlevini görüntü işleme algoritması olarak kullanarak şablon tabanlı eşleştirmeyi uygulamıştır. Geometrik bozulmayı gidermek için, homografi matris ile düzlemsel bir projeksiyon yöntemi uygulanmıştır. Bu araştırma sayesinde, köprü yer değiştirmelerini kullanıcı dostu bir arayüzle ölçmek için GUI tabanlı bir yazılım geliştirilmiştir. Laboratuvar ölçek testine ek olarak, önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için saha testleri yapılmıştır. Ölçüm hatasını ölçmek için, RMSE'ye dayalı bir hata değerlendirmesi yapılmıştır. Önerilen yöntem, akıllı telefon kamerası ile işaretleyici arasındaki açı arttığında bile yer değiştirme ölçümünün doğruluğunu göstermiştir [12].

İnşaat mühendisliği yapılarında titreşimin hız ve yer değiştirme büyüklüklerinin ölçümünde sıkça kullanılan sayısal görüntü işleme teknikleri incelenmiştir. Görüntü işleme tekniklerinden Kanade-Lucas-Tomasi algoritması, korelasyon tabanlı şablon eşleştirme ve görsel akış yöntemleri kullanmıştır. Bir laboratuvar test yapısı üzerinde yapay ve doğal hedeflerin takibi ile farklı mesafelerden ölçümler yapılmış ve yöntemlerin performansları incelenmiştir. İlk olarak görüntü işleme yöntemlerinden elde edilen yer değiştirmeler, LVDT yardımıyla ölçülen yer değiştirmeler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca yöntemlerin performanslarını frekans alanında incelemek amacıyla görüntü işleme ile elde edilen deneysel modal parametreler alışılagelmiş ivmeölçerler ile alınan kayıtlar ile karşılaştırılmıştır [13].

### **1.1.2 Sonlu elemanlar yöntemi**

Yapı ve yapı elemanlarının inşaat mühendisliği alanındaki davranışlarının dinamik etki altında belirlenmesi yapılarda meydana gelebilecek zararlar hakkında önemli bilgiler vermektedir. Bu amaçla, yapının ivme, hız, yer değiştirme, doğal frekans ve mod şekillerini belirlemek için çeşitli laboratuvar testleri yapılmaktadır [14], [15], [16]. Özellikle, sarsma masası deneylerinde büyük ölçekli örnekler kullanılırken, dinamik parametreler yapının birçok noktasında ölçmek istenir.

Bu zaman alıcı ve pahalı bir yöntemdir. Bununla birlikte, sayısal analizle, dinamik parametreler modelin birçok noktasında çok daha hızlı ve maliyetsiz olarak hesaplanabilir. Literatürde sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve dinamik analiz yapan birçok çalışma bulunmaktadır. Çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Bir bölmeli, iki katlı çelik çerçeve için deprem ivme kaydı altında sarsma masası deneyi yapılmıştır. Deney, deprem yüküne maruz çelik çerçevelerin elastik olmayan davranışlarını açıklamayı ve çelik çerçevelerin ikinci dereceden inelastik dinamik analiz tekniklerinin geçerliliğini doğrulamayı amaçlamaktadır. ABAQUS programının kiriş elemanı modeli kullanılarak yapılan deney ve nümerik analizden elde edilen sonuçların karşılaştırılması kullanılmıştır [17].

H.M.A. Ghafoor (2018), ANSYS programını kullanarak bazı bina tiplerinin üç boyutlu sonlu eleman modellerini incelemiştir. Model ayrıca binaların altında bir sarsma masasını içermektedir. Doğrusal temas elemanları, sarsma tablasının hareketini dikkate almaktadır. Oluşturulan modeller, deplasman kontrollü yükleme olarak harmonik ve deprem yükleri dahil olmak üzere çeşitli dinamik yükler altında analiz etmiştir. Altyapıların ve üst yapıların farklı noktalardaki yer değiştirmeleri, ivmelenmelerini ve toplam kuvvetlerini belirlemek için sonuçlar sağlamaktadır [18].

Zhang ve Li (2012), 1/5 ölçekli üç katlı betonarme çerçeve duvar modelini sarsma masası deneyi ile değerlendirdi. Test sonuçları, sismik analizlerin doğrusal olmayan yapı davranışlarını doğrulamak için kullanılmıştır. Duvarın sonlu elemanlar modeli ABAQUS programında tanımlanmıştır. Modelin kirişleri ve kolonları ve perde duvarı kabuk eleman ile simüle edilmiştir. Sonuçlar test edilen ve hesaplanan sonuçların uygun olduğunu göstermiştir [19].

Üç bağlantı tipine sahip tek katlı, tek açıklıklı çelik bir yapı, çeşitli büyüklükteki deprem kayıtları altında sarsma masası deneyi gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda DRAIN-2D bilgisayar programı kullanılarak basit ve yarı rijit birleşimlere sahip tek katlı tek açıklıklı çerçeve olarak modellenmiştir. Bu çalışmada, basit ve yarı rijit birleşimli yapıların dinamik yükleme altındaki davranışlarını ve yapı üzerindeki tepkisi araştırmıştır [20].

Danesh vd. (2007), kayma kuvvetinin, yapının davranışını etkileyen alt ve üst korniyerlerli yarı-rijit bulonlu birleşimlerin ilk sertliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kesme kuvvetinin bağlantının davranışı üzerindeki etkisi, değişken kesme kuvvetine sahip bazı modeller

tarafından değerlendirildi. Bu bağlamda çeşitli 3D parametrik sonlu eleman modelleri sunulmuş, bağlantıların geometrik ve mekanik özellikleri parametre olarak verilmiştir. Sayısal modelleme sonuçları deneylerin test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, bağlantının başlangıç sertliğinde % 55'e kadar bir azalma olduğunu göstermiştir [21].

Krolo vd. (2007), çelik çerçevenin doğrusal olmayan sismik analizini sunmuşlardır. Yarı rijit birleşimlerin gerçek davranışı, seçilen birleşim tipinin önceden sayısal olarak simüle edilmesiyle dikkate alınmıştır. Mutlak ve göreceli çerçeve yer değiştirmeleri belirlenmiştir ve karşılık gelen sonuçlar rijit bağlantılara sahip çelik çerçeve sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Silva vd. (2018), dinamik yükleme altında yarı-sert bağlantılara sahip çerçevelerin daha gerçekçi bir davranışının öngörülmesi için bir araştırma gerçekleştirmiştir. Yapısal davranış değerlendirmesinde geometrik doğrusal olmama ve bağlantı esnekliğinin etkileri göz önünde bulundurmıştır. Sonlu elemanlar bağlamında, yapısal sistemin doğrusal olmayan geçici tepkisini elde etmek için algoritmik formda önerilen bir sayısal yöntem sunmuştur [22].

## **1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı**

İnşaat mühendisliğinde yapı ve yapı elemanlarının dinamik etkiler karşısındaki davranışını incelemek üzere Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı laboratuvarında sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmektedir. 3 katlı bir çelik çerçeve deneysel numunenin sarsma masası deneyi gerçekleştirilmiştir. Sarsma masası tablası üzerinden ivmeölçer ve LVDT ile yer değiştirme parametreleri kaydedilmiştir. Gerçek ve referans sismik verileri karşılaştırmak ve aynı zamanda dinamik yer değiştirmelerini gözlemlemek için tüm deneyler aynı açıdan video kaydı alınmıştır. Daha sonra bu video kayıtları görsel işleme teknikleri kullanılarak dinamik yer değiştirme parametreleri elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında video kaydından dinamik yer değiştirmelerin doğru bir şekilde alınması için geliştirilen akıllı tarama sistemi ile birlikte şablon eşleştirme yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilen algoritmanın doğruluğu sarsma tablası üzerinden ivmeölçer ve LVDT ile alınan dinamik yer değiştirme parametreleri ile karşılaştırılarak doğruluğu test edilmiştir. Bu iki verinin yer değiştirme-zaman grafikleri karşılaştırıldığında 0.998'e varan bir korelasyon oranı bulunmuştur. Ayrıca 3 katlı çelik çerçeve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde Abaqus paket programı kullanılmıştır. Abaqus programında dinamik analiz gerçekleştirilerek modele ait dinamik parametreler elde edilmiştir. Abaqus programı ile elde edilen dinamik yer değiştirme parametreleri, akıllı tarama

sistemi ile şablon eşleştirme yöntemi kullanılarak elde edilen dinamik yer değiştirme parametreleriyle karşılaştırılmıştır. Bu iki verinin yer değiştirme-zaman grafikleri karşılaştırıldığında 0.98'e varan bir korelasyon oranı bulunmuştur. Bu karşılaştırma sonucunda Abaqus programında modellenen çelik çerçeve sistemi için kabul edilen varsayımlar, beklenti doğrultusunda gerçekleştiği görülmüştür. Bu çalışmanın son aşamasında Abaqus'te modellenen çelik çerçevenin farklı depremlerden nasıl etkilendiği, sistem ve kat yer değiştirme rijitlikleri ile kiriş dönme rijitlikleri verilerek karşılaştırılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmanın asıl amacı görsel işleme tekniğini geliştirerek daha doğru sonuçlar elde etmektir. Ayrıca abaqus programında yapılan bazı varsayımların beklenti doğrultusunda gerçekleşip gerçekleşmediğini görmektir.

### **1.3 Hipotez**

Bu çalışmanın iki hipotezi vardır. Birincisi sarsma masası deneyi dinamik verilerin görsel işleme tekniği geliştirilerek doğru bir şekilde elde edilmesidir. İkincisi ise gerçek çelik çerçevenin deprem anındaki simülasyona yakın sayısal model oluşturmaktır.

### SARSMA MASASI DENEYİ

#### 2.1 Sarsma masası deney düzeneği

Sarsma masası deneyleri, gerçek bir depremi simüle eden yapı ve deprem mühendisliği dallarında deprem kuvvetinin yapı üzerindeki etkilerini araştırmada çokça kullanılan bir yöntemdir. Sarsma masası ile gerçek bir depremin yapı üzerinde simülasyonu gerçekleştirilerek yapı elemanlarına ait iç kuvvet ve şekil değiştirmeler gerçeğe en yakın olarak belirlenebilmektedir. Bu amaçla YTÜ yapı laboratuvarında 3 katlı çelik çerçeve sisteminin (Şekil 2. 1) deneyi 2 farklı deprem için 2 farklı oranda deprem kayıtlarıyla sarsma masası deneyi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. 1 Sarsma masası deney düzeneği

Yapı elemanlarının ve sistemlerinin dinamik etkiler altında davranışlarının belirlenmesinde kullanılan en etkin ve gerçeğe en yakın yöntemlerden biri sarsma masası deneyidir. Sarsma masasının temel çalışma prensibi rijit tablaya bağlanmış yapı modellerini veya yapı elemanlarını, istenilen bir ivme fonksiyonu ile titreştirilmesidir. Uygulanan ivme kaydı, gerçek bir deprem kaydı olabileceği gibi üretilmiş bir kayıt da olabilmektedir. Günümüzde sarsma masaları farklı serbestlik derecelerine sahip olabilmekte, hidrolik ya da daha farklı tahrik sistemleriyle çalıştırılabilmektedir. Masa boyutlarının ve sistem kapasitelerinin sınırlı olması nedeniyle genelde ölçekli numuneler denenmektedir [23].

Dinamik testler, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Laboratuvarındaki tek eksenli deprem simülasyon tesisi üzerinde yapıldı. Sarsma masası, servohidrolik bir aktüatör tarafından hareket ettirilen bir 4x4 m<sup>2</sup> alüminyum platformdan oluşur. Çizelge 1. 1'de sarsma masasının özellikleri listelenmiştir.

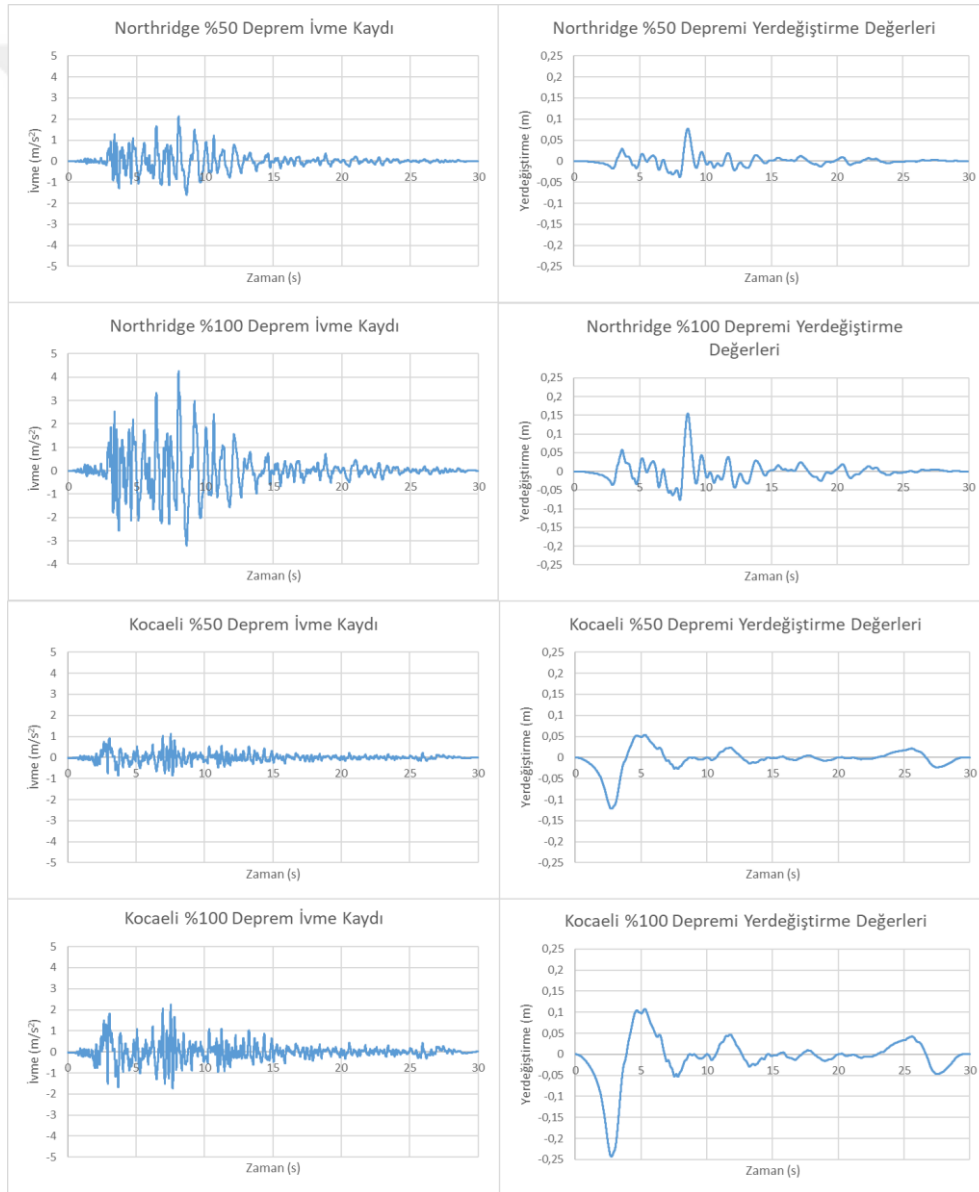
Çizelge 1. 1 Sarsma masasının mekanik özellikleri

Ölçüler	4 x 4	m <sup>2</sup>
Ağırlık	6,0	Ton
Taşıma Kapasitesi	50	Ton
Maksimum Yerdeğiştirme	+0,50	M
Maksimum Hız	1,0	m/s
Maksimum İvme	1,0	g
Frekans Aralığı	0-70	Hz
Devirme Moment Kapasitesi	225	kN.m

Sarsma tablasının üzerinden ivmeölçer ve LVDT yardımıyla referans sismik veriler kaydedilmiştir. Gerçek ve referans sismik verileri karşılaştırmak ve aynı zamanda dinamik yer değiştirmelerini gözlemlmek için tüm deneyler aynı açıdan video kaydı alınmıştır.

Denyde uygulanan deprem kayıtları:

- Northridge Depremi %50 oranında (Northridge/Mulhol009)
- Northridge Depremi %100 oranında (Northridge/Mulhol009)
- Kocaeli Depremi %50 oranında (Kocaeli/IZT090)
- Kocaeli Depremi %100 oranında (Kocaeli/IZT090)



Şekil 2. 2 Sarsma masasından alınan yer değiştirme ve ivme parametreleri

## 2.2 Çelik Çerçevenin Geometrik Özellikleri



Şekil 2. 3 Çelik çerçeve ölçüleri

3 katlı çelik çerçevenin iki kolonun merkezleri arasındaki mesafe 130 cm olup, katlar arası yükseklik 75 cm'dir. Çelik çerçevenin kolon ve kirişlerinde IPN 100 profili kullanılmıştır. Birleşim bölgelerinde L40x40x4 profili kullanılmıştır. Ayrıca profilin her iki yönünde 2'şer adet M12 bulonları kullanılarak 1450 Nm tork uygulayabilen havalı somun sıkma (Gav 2212) aleti kullanılarak bağlantı gerçekleştirilmiştir. Çerçevenin güçlü eksen kiriş-kolon birleşimi yarı rijit birleşim tipi iken zayıf eksen kolon-kiriş birleşimi mafsallı tip birleşimdir. Kolon-kolon birleşimi 4 mm levha ile 8 adet M12-8.8 bulonları ile gerçekleştirilmiştir. Her kat tek doğrultuda çalışan ahşap kalaslar üzerinde 750 kg statik yüke sahip yaklaşık 225 adet her biri 20x10x10 boyutlarına sahip parke taşı konulmuştur(Şekil 2. 4).



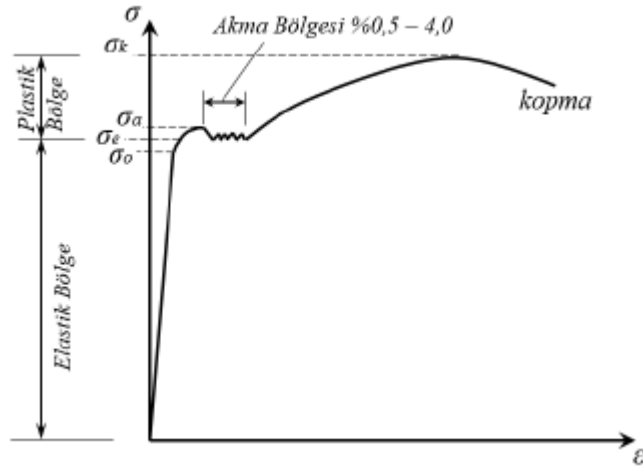
Şekil 2. 4 Çelik çerçeve üst görünüş

### 2.3 Çelik Çerçevenin Mekanik Özellikleri

Tüm profillerde malzeme olarak S235 çeliği kullanılmıştır. Tüm bağlantılarda 8.8 kalitesindeki bulonlar kullanılmıştır.

Çelik malzeme izotrop ve homojen malzeme özelliğine sahiptir. Her yer ve her doğrultuda aynı fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir. Yapı çeliklerinin mekanik özellikleri çekme deneyi ile tespit edilir. Bir yapı çeliği çekme deneyine tabi tutulduğunda Şekil 2. 5’de görülen gerilme – şekil değiştirme eğrisi elde edilir. Çubuğa etkilene kuvvet arttırıldığında, çelik malzeme orantılı sınır gerilmesine ( $\sigma_0$ ) kadar malzeme lineer elastik bir davranış gösterir yani Hooke kanunu geçerlidir. Elastik sınıra kadar ( $\sigma_e$ ) malzeme yine elastiktir fakat bu bölgede Hooke kanunu geçerli değildir. Elastik sınır aşıldığında malzeme artık plastikleşir, akma sınırına ( $\sigma_a$ ) geldiğinde

malzemede akma görülür ve büyük plastik deformasyona uğrar. Sonrasında malzeme kopma gerilmesine ( $\sigma_k$ ) ulaşınca kopar [24].



Şekil 2. 5 Yapı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi

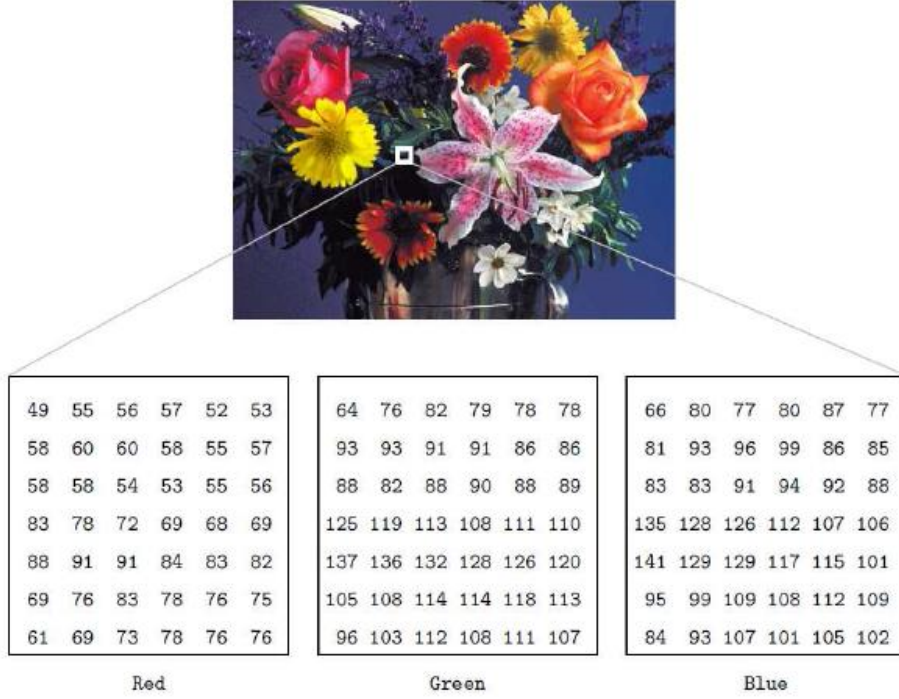
### **DENEYSEL VERİLERİN SAYISAL GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİĞİ İLE ELDE EDİLMESİ**

Deneysel verilerin video kayıt cihazı ile elde edilmesi konusu son yıllarda çok popüler bir konudur. Bu konuya ilgili çalışmalardan bazıları literatür özetlerinde verilmiştir. Bir video kaydından hareketli nesnelerin takibi ile ilgili birçok yöntem vardır [25]. Bunlardan bazıları KLT algoritması, görsel akış algoritması, şablon eşleştirme yöntemi ve arka plan çıkarımı gibi yöntemleridir. Bu çalışmada sadece şablon eşleştirme yöntemi kullanılmakla birlikte bu yöntem akıllı arama tekniği ile geliştirilmiştir.

#### **3.1 Görüntü İşleme Tekniğinde Ön İşlemler**

##### **3.1.1 Video Kaydının Veri Biçiminin Sayısallaştırılması**

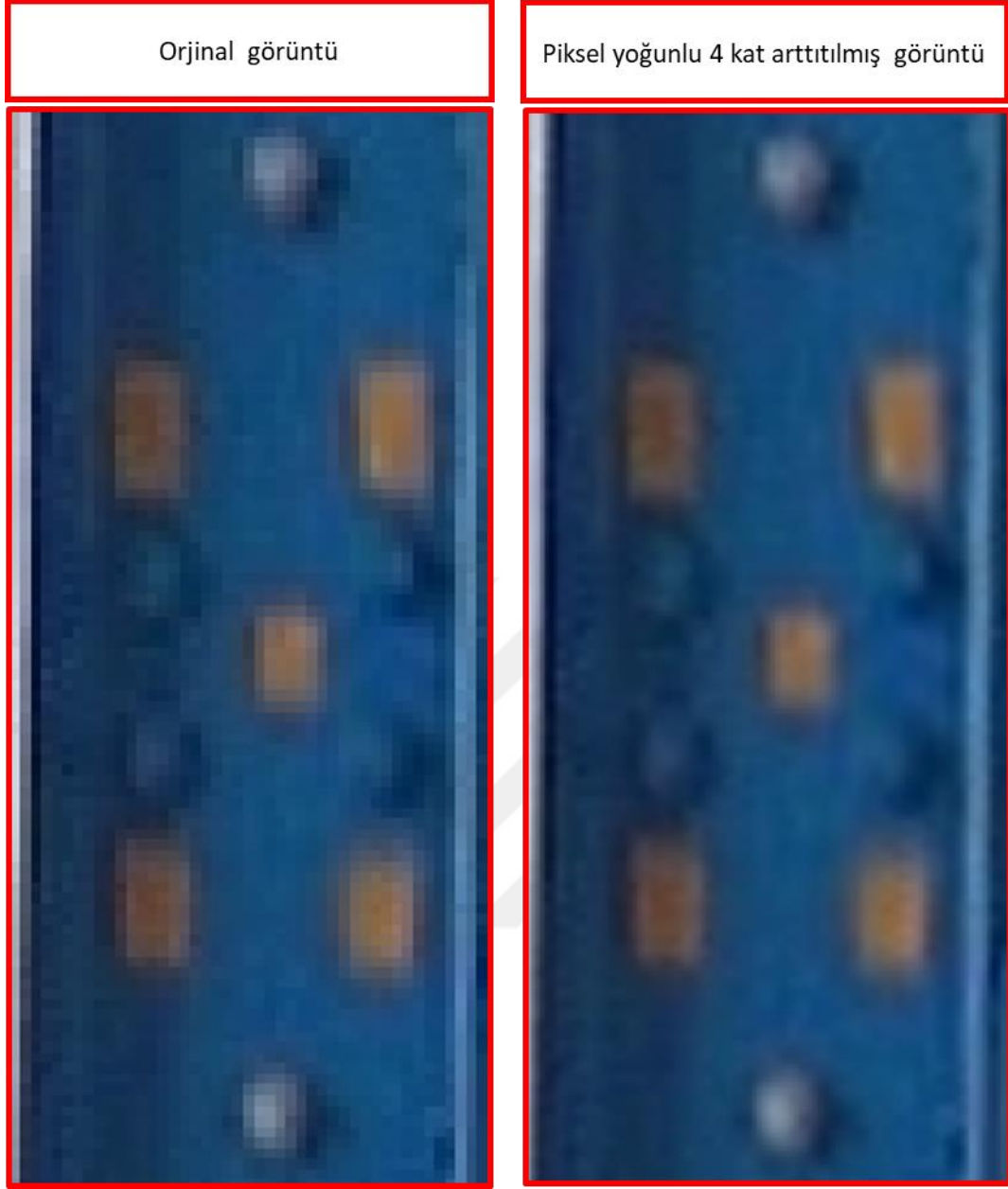
Görüntü işleme tekniğinde, ilk olarak dijital videodan alınan görüntüler bilgisayar ortamında veri biçimleri sayısallaştırılır. Matlab programının Toolbox görüntü işleme kütüphanesinden “imread” fonksiyonu ile kullanılmaktadır. Her görüntü içinde RGB renk uzayına sahip sayısal matrislerden oluşmaktadır. Bu matrislerin her bir elemanı bir piksele denk gelir.



Şekil 3. 1 Dijital görüntünün sayısallaştırılması

### 3.1.2 Altpiksel ile Görüntü Çözünürlüğünün İyileştirilmesi

Piksel yoğunluğu, bir görüntüdeki bir inç başına düşen piksel sayısı olarak tanımlanır. Bir video kaydının piksel yoğunluğunun az olması, hedefin kameraya uzaklığının artmasıyla piksel yoğunluğunun azalması veya hedefin yer değiştirmesinin piksel yoğunluğundan az olması durumunda altpiksel uygulaması kullanılır. Bir görüntünün piksel yoğunluğu çift doğrusal veya kübik interpolasyon ile arttırılmaktadır. Piksel yoğunluğu Matlab programının Toolbox görüntü işleme kütüphanesinden "imresize" fonksiyonu ile arttırılmaktadır(Şekil 3. 2). Görüntü çözünürlüğünün arttırılması ile yer değiştirmeler daha hassas hesaplanmaktadır.



Şekil 3. 2 Altpiksel ile görüntü çözünürlüğünün iyileştirilmesi

### 3.1.3 Görüntüden Nokta, Kenar ve Alan Detaylarının Çıkarılması

Görüntü işleme tekniğinin ilgi alanları; görüntü iyileştirme (renk, keskinlik ve parlaklık ayarlama, gürültü giderme), görüntü bölümlenme (kenar belirleme, alan yakalama), görüntü dönüşümleri (büyütme/küçültme/döndürme), görüntü onarma, sıkıştırma, algılama, görüntüleri birleştirme, görüntüleri çıkarma vb. uygulamalardır. Görüntüden nokta detaylar, kenarlar ya da alanlar çıkarılarak bu ayrıntılara dayalı eşleme gerçekleştirilebilir [26].

Detaylı bilgi ve örnek işlem için Ek-A bölümüne bakınız.



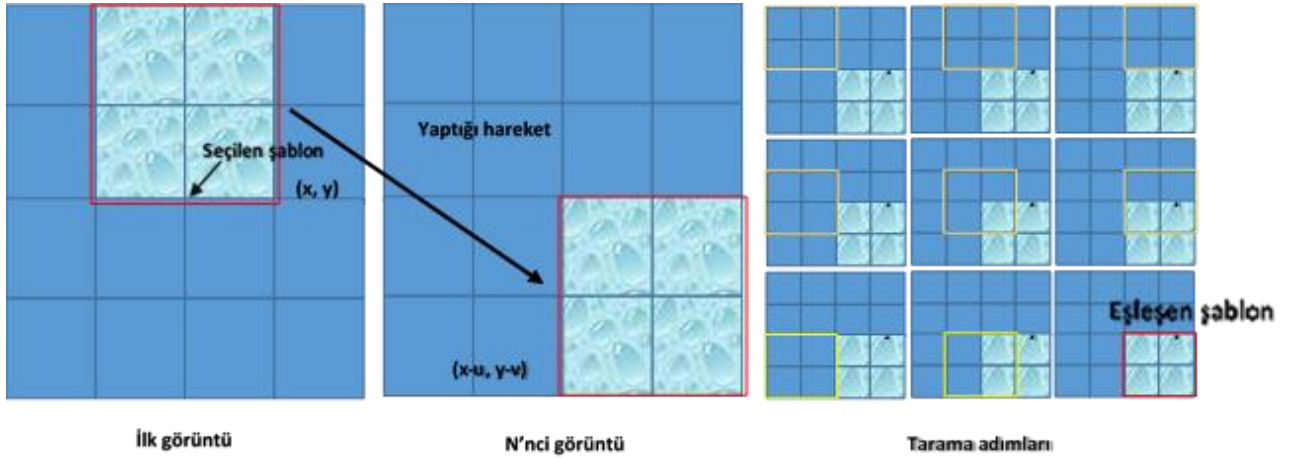
Şekil 3. 3 Görüntüden Nokta, Kenar ve Alan Detaylarının Çıkarılması

### 3.2 Şablon Eşleştirme Yöntemi

Şablon eşleştirme yöntemi en genel tanımıyla, bir video kaydının ilk veya herhangi bir zamansal noktasındaki görüntüde seçilen bir bölgenin sonraki zamansal noktalarda bu görüntü ile eşleşen bölgeyi bulma tekniğidir. Herhangi iki farklı zamansal noktadaki görüntü arasındaki ilişki istatistik hesaplamaları ile belirlenmektedir. Şekil 3. 9 ve Şekil 3. 10'da şablon eşleştirme örnekleri verilmiştir.

Sarsma masası deneyinden görüntü işleme tekniği ile dinamik yer değiştirmelerin ölçülebilmesi için, numunenin üzerinde ayırt edici şekil ve renkte olan etiketler bulunmalıdır. Bu etiketler, dinamik yer değiştirmelerin tespitinde kolaylık sağlamaktadır.

Korelasyon tabanlı şablon eşleştirme yönteminde, ilk görüntüden herhangi bir etiket şablon içine alınır, şablonun piksel bazlı koordinatları kaydedilir. İlk görüntülerde seçilen şablon ile sonraki görüntülerde en yüksek benzerliğe sahip bölge tespit edilir. Şekil 3. 4'de görüldüğü gibi seçilen şablon referans görüntüde x ve y yönünde taranır. Fakat bu durum maliyetlidir. Bu sebeple akıllı arama sistemleri bu maliyeti en aza indirir.

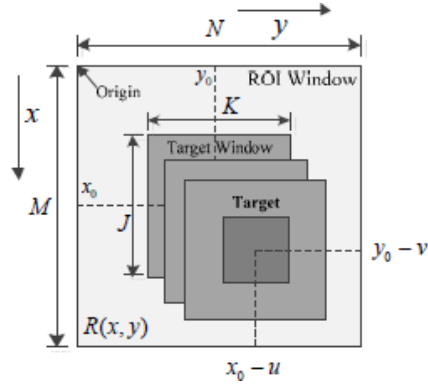


Şekil 3. 4 Şablon eşleştirme yönteminin temel gösterimi

İki görüntü arasındaki benzerlik birçok yöntem ile belirlenebilir. Bu çalışmada normalize edilmiş korelasyon katsayısı kullanılmaktadır. Fakat bu yöntem ile şablonun tespitinde hatalar oluşabilmektedir. Bunun başlıca sebepleri,

- Referans bölgesinin dönme durumu
- Referans bölgesinde oluşan şekil değiştirme
- Referans bölgesi ile aynı şekle sahip objelerin olmasıdır.

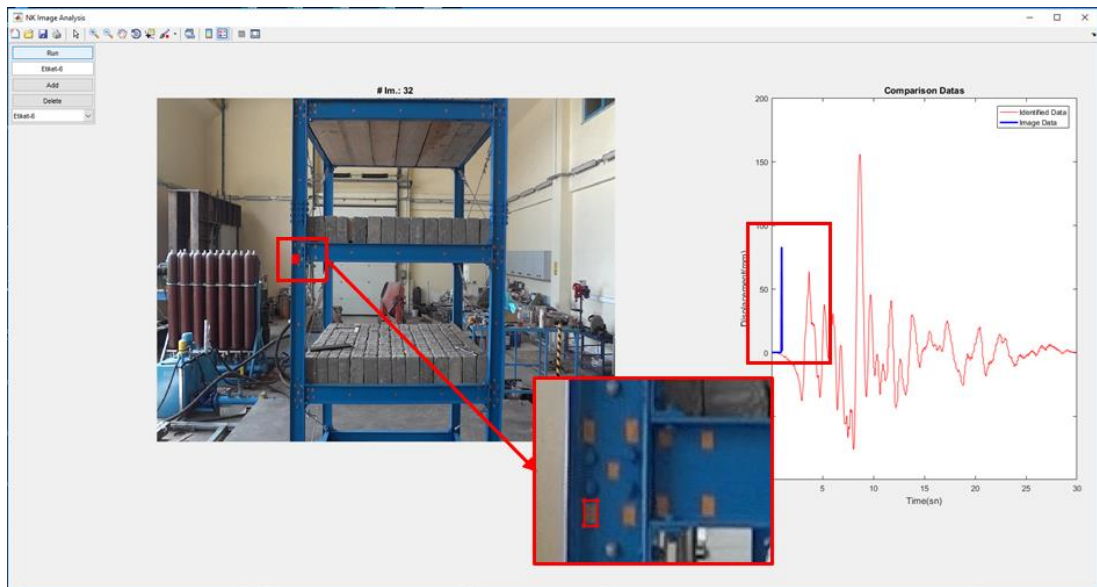
Literatürde bu durumun oluşturduğu olumsuzluklar için yapılan çalışmalara bakıldığında ilk görüntüde bazı varsayımlar yapıldığı görülmektedir. ROI (Resized Region of Interest) penceresi yöntemine göre iki şablon seçimi bulunmaktadır. Birinci şablon, ROI (Resized Region of Interest) penceresi adını verdikleri alanı, referans bölgesinin hareket alanını içine alacak şekilde belirlenmektedir. İkinci şablon ise hedefi(etiketi) içine alan bir alandır. Birincisi ROI penceresinin içinde seçilen herhangi hedef bölgesi sonraki zamansal alanlarda normalize edilmiş korelasyon katsayısı [27] ile en yüksek değere sahip bölge tespit edilmektedir. Fakat Şekil 3. 7'de görüldüğü üzere ROI penceresinin içerisinde seçilen hedef alan ile benzerliğe sahip bir başka alan varsa bu durumda hatalar oluşmaktadır.



Şekil 3. 5 Şablon eşleştirme yönteminde ROI yönteminin uygulanışı [28]



Şekil 3. 6 ROI penceresi yöntemi ile şablon eşleştirme uygulaması



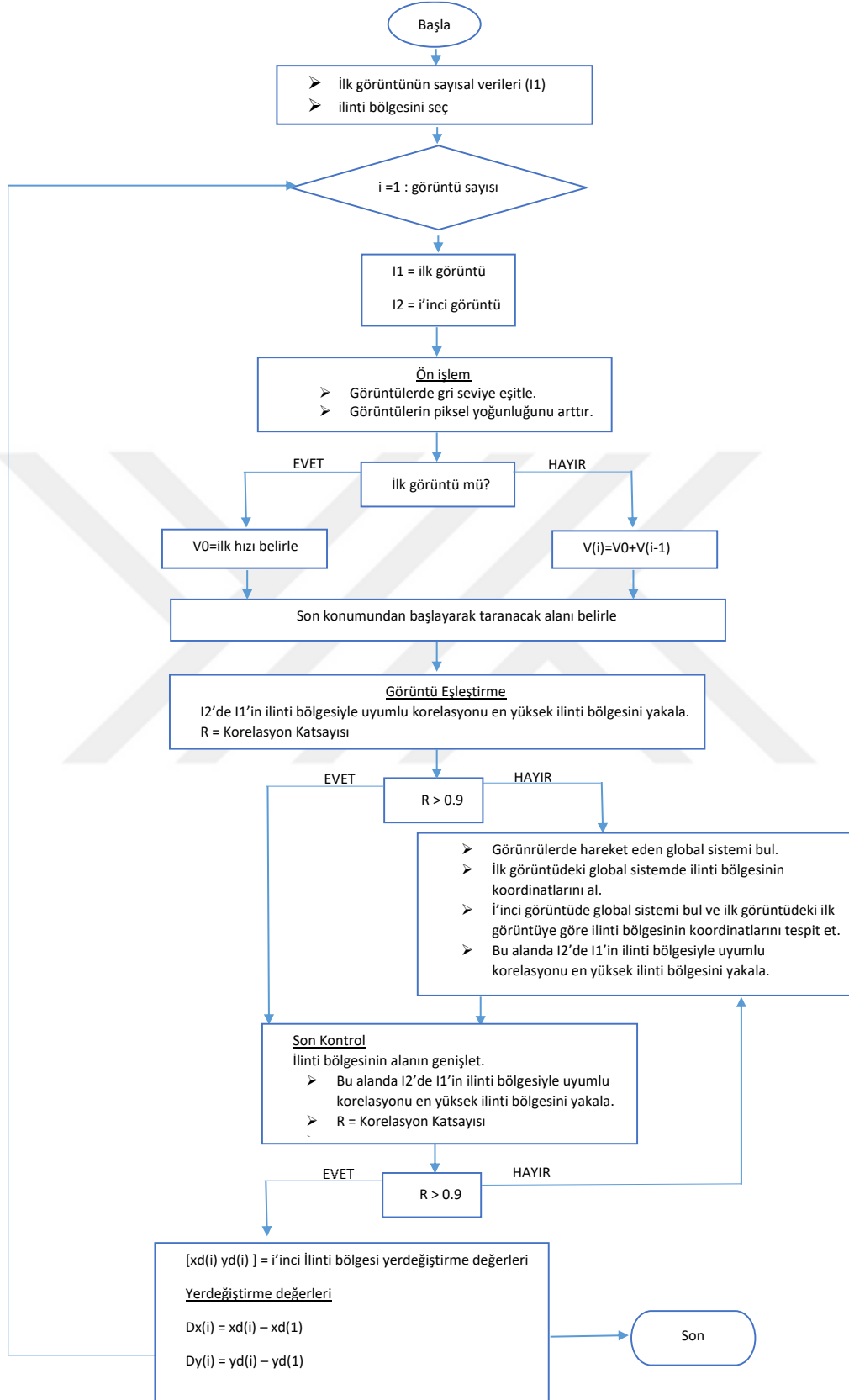
Şekil 3. 7 ROI penceresi yöntemi ile şablon eşleştirme uygulaması oluşan hatalar

Dinamik yer değiştirmeler, normalize edilmiş çapraz korelasyon katsayısı kullanılarak elde edilen algoritma kodları Matlab programının Toolbox görüntü işleme kütüphanesinden elde edilmiştir. İstatistiksel olarak iki görüntü arasındaki hareketli objenin tespiti, Matlab programında hazır olarak bulunan normxcorr2 ve cpcorr kodları ile yapılmaktadır. Fakat tek başına bu kodların kullanılması durumunda hesaplamalarda hataların oluşabileceği görülmüştür. Referans alınan bölge yer değiştirirken piksel derinliği, yer değiştirme ve Şekil değiştirmeye bağlı olarak değişebilmektedir. Bu durumda istatistiksel olarak yapılan hesaplamalarda hatalar oluşabilmektedir. Diğer yandan referans bölgesi ile aynı Şekle sahip başka bölgeler olduğunda yine istatistiksel olarak hatalar oluşmakta benzer olan diğer bölgeyi seçebilmektedir. Bu algorithmada oluşan bu hatalardan dolayı farklı bir algoritma geliştirme gereği duyulmuştur. Geliştirilen algorithmada benzerlik ilişkisi, Matlab programının Toolbox görüntü işleme kütüphanesinden Corr2 kodu olan, çapraz korelasyon katsayısı kullanılmıştır. Fakat burada ilave olarak akıllı arama sistemi geliştirilmiştir.

### **3.2.1 Akıllı Arama ile Şablon Eşleştirme Yöntemi**

Bu çalışmada, 3 katlı elik ereve sistemi sarsma masası yardımıyla %50 ve %100 oranında leklendirilmiş Northridge depremi ivme kaydı altında test edilmiş ve dinamik yer değiştirme verileri kamera ile kaydedilmiştir. Video kayıt cihazı olarak akıllı telefon kullanılmıştır. Akıllı telefon kamerasının çözünürlüğü 1080x1440 piksel, hızı ise 30 fps'dir. Bu görüntülerden dinamik yer değiştirme verilerinin alınabilmesi için görüntü işleme yöntemi, Matlab yazılım programı dilinde bir algoritma geliştirilmiştir.

### 3.2.2 Akıllı arama ile Şablon Eşleştirme Yöntemi Algoritması

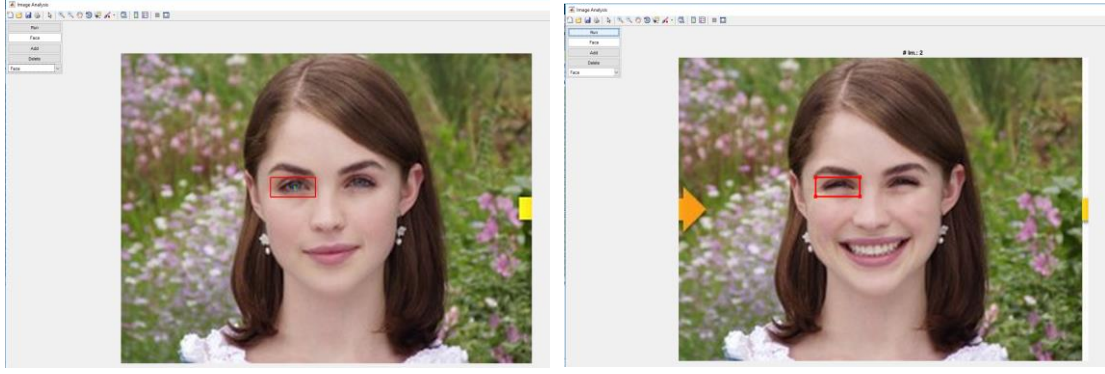


Seçilen hedef başka benzer bölgelere sapmaması ve gerekenden fazla işlem yapmaması için seçilen şablonun zamansal alanda yer değiştirmesi ile elde edilen hızına standart sapmalar eklenerek referans alınan şablonun hareket alanı program tarafından hesaplanır. Hareket alanında arama işleminin sonucunda en yüksek korelasyon değeri verilen bölge belirlenir. Bu korelasyon değeri (Denklem 3.1) Matlab programının toolbox görüntü işleme kütüphanesinin Corr2 fonksiyonundan yararlanılmıştır.

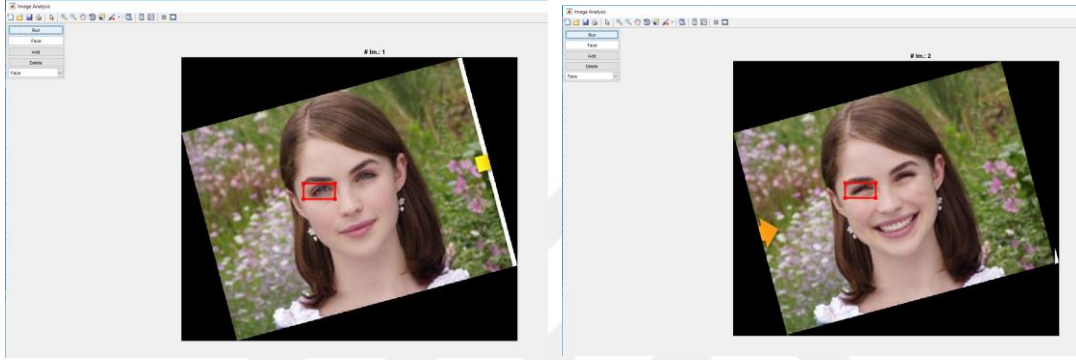
$$r_{u,v} = \frac{\sum_{x,y}(I1_{(x,y)} - \bar{I1}) \cdot (I2_{(x-u,y-v)} - \bar{I2})}{\sqrt{\sum_{x,y}(I1_{(x,y)} - \bar{I1})^2 \cdot \sum_{x,y}(I2_{(x-u,y-v)} - \bar{I2})^2}} \quad (3.1)$$

Korelasyon ilişkisinin daha güçlü sağlanması ve daha hassas hareketleri bulabilmek için görüntüyü piksel yoğunluğu arttırılmıştır(Matlab/Toolbox/Image/Resize). Bir görüntünün piksel yoğunluğu çift doğrusal veya kübik interpolasyon ile arttırılmaktadır.

Seçilen bölgenin korelasyon ilişkisi istenilen seviyede değilse, ilinti alanı belirli seviyede artırılıp global sistemdeki hareket kontrol edilir. Program global sistem hareketi ile ilinti bölgesinin taranması gereken alanı belirleyip, ilinti bölgesinin doğru tespit edilip edilmediğinin kontrolünü yapmaktadır. Genel olarak, bölgenin şekli değişmişse ve/veya dönme yapmışsa bu durum ortaya çıkmaktadır. Kontrol aşamasında, ilinti bölgesinin alanı artırılır. İlinti bölgesinin doğru tespit edilip edilmediği belirlenmektedir. Örneğin, bir insan yüzü görüntüsünde (Şekil 3. 9 ve Şekil 3. 10), ilk görüntüde gözler açık, ikinci görüntüde gözler kapalı olsun. İlk görüntüde açık olan göz bölgesi seçilsin ve diğer görüntüde bu bölge tespit edilmeye çalışılsın. Bu durumda iki görüntü arasında korelasyon ilişkisi zayıf olacaktır. Bu sebeple ilinti bölgesi artırılarak, örneğin kaşlarda ilinti bölgesine dahil olduğunda bu benzerlik ilişkisi artacaktır. Aynı şekilde görüntü 0-20 derece arasında döndürüldüğünde benzerlik ilişkisi kurulabilmektedir. Daha yüksek derecedeki dönme açılarında benzerlik ilişkisi sağlanamamaktadır. Sarsma masası deneyi için 0-20 dönme açısı yeterli olmaktadır.



Şekil 3. 9 Image Analysis programı ile şablon eşleştirme



Şekil 3. 10 Image analysis programı ile döndürülmüş görüntüde şablon eşleştirme

### 3.2.3 Image Analysis Programının Çalışma Prensibi

İlk görüntüden (hareketsiz objenin görüntüsü) dinamik yer değiştirme değerleri alınmak istenilen bölge şablon içine alınır ve bu bölgenin koordinatları kaydedilir. Dinamik verileri kaydetmek için Run tuşunun altındaki alana bir isim eklenir. Sonraki görüntülerde hareket eden bu bölgenin bulunması için tarama Run tuşu ile başlatılır.

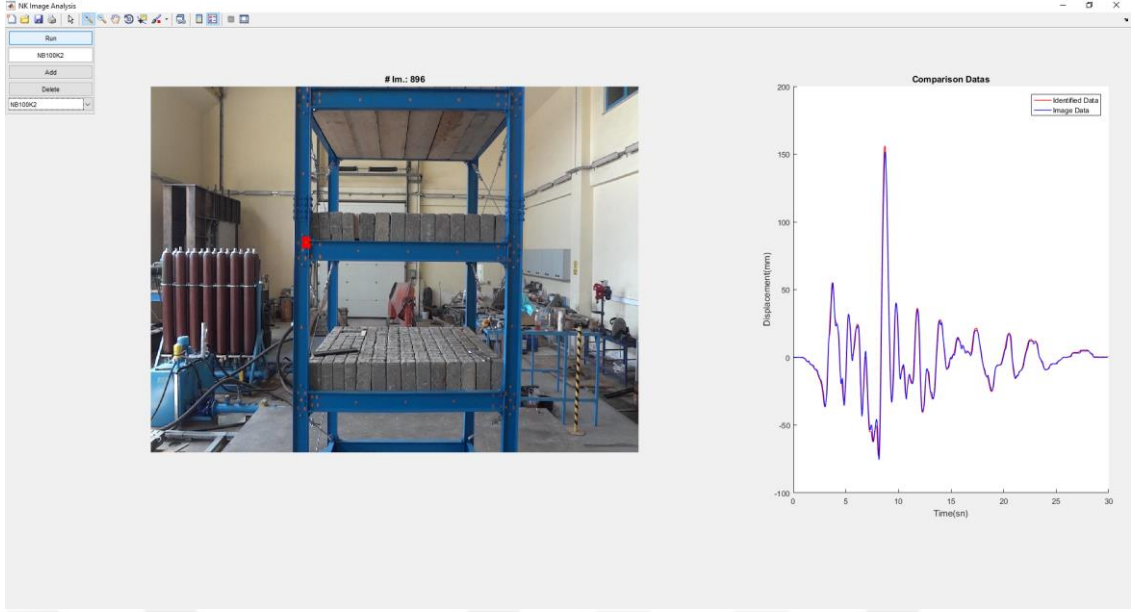


Şekil 3. 11 Image Analysis programında şablon seçimi

Programa analizi başlatmadan önce deney esnasında sarma masasından alınan yer değiştirme verileri veya herhangi bir SEY programlarıyla elde edilen veriler programın ilgili yerine okutulabilir. Bu sayede Run butonuna basıldığında ekranın sol kısmında seçilen bölgenin hareket eden objede olması gereken konumda olup olmadığını gözlemlerken, ekranın sağ kısmında görüntüden alınan yer değiştirme değerleri ile önceden programa okutulmuş olan değerlerin karşılaştırması yapılabilir. Ayrıca karşılaştırmaların yapılabilmesi için metrik/piksel (m/piksel, cm/piksel, mm/piksel vb.) cinsinden PPM katsayısı belirlenmelidir. Bu şekilde piksel cinsinden tanımlanan boyut metrik sisteme çevrilmiş olur. Piksel sayısının metrik birim sistemine çevrilmesi kameranın uzaklığına ve açısına göre değişir. Piksel sayısının metrik birime çevirimi ile ilgili ayrıntılı bilgi için [29], [30], [31]'ye bakılabilir.

```
Editor - C:\Users\Neslihan\Desktop\TEZ_2\VideoAnalysis-NB50\NK_Automate_Image.m
NK_Automate_Image.m x NK_Function_automate_image.m x +
1 function NK_Automate_Image ()
2 - load('ABAQS.mat') % Karşılaştırma verisi
3 - load('filenamelist.mat');
4 - Ratio = 8 ; %Yeniden boyutlandırma katsayısı
5 - PPM = 2.2; % mm/piksel oranı
6
```

Şekil 3. 12 Matlab editor penceresi



Şekil 3. 13 Northridge %100 deprem kaydı için 2. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması

### SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZ

Bu çalışmada sonlu eleman yöntemi ile dinamik analiz için Abaqus CAE programı kullanılmıştır. Abaqus, birçok farklı problemi çözmek için güçlü bir araç seti sağlamak için kapsamlı bir eleman kütüphanesine sahiptir [32].

#### 4.1 Katı Elemanlar

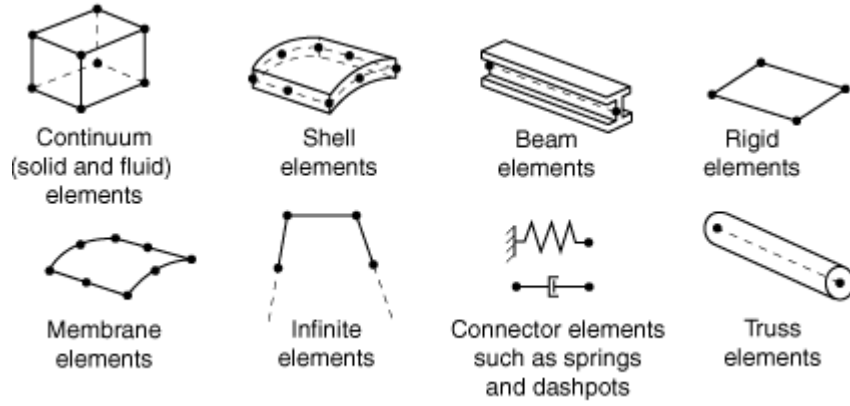
ABAQUS'te katı eleman olarak birçok eleman tanımı bulunmaktadır. Katı elemanlar plastisite, bağlantı(birleşim) ve büyük deformasyonları içeren doğrusal analiz ve doğrusal olmayan analizler için kullanılabilir. Elektromanyetik analizler, termal analizler, statik analizler, dinamik analizler, burkulma analizleri için kullanılabilirler.

Abaqus bir elemanın beş açıdan davranışını karakterize eder:

- Eleman ailesi
- Serbestlik dereceleri
- Düğüm sayısı
- Formülasyon
- İntegrasyon yöntemi

##### 4.1.1 Eleman Ailesi

En çok kullanılan eleman aileleri Şekil 4. 1'de verilmiştir.

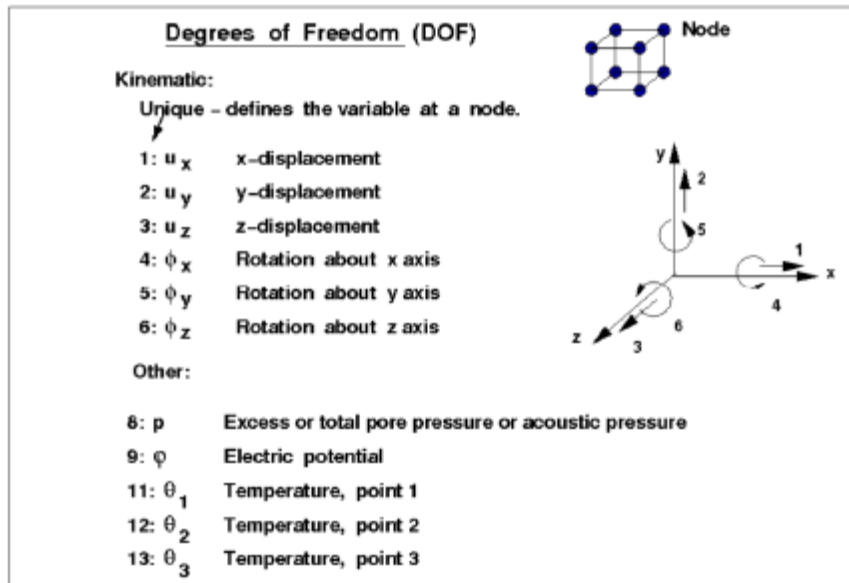


Şekil 4. 1 Abaqus eleman tipleri

Abaqus'taki her bir eleman, T2D2, S4R, C3D8I veya C3D8R gibi farklı bir isme sahiptir. Öğe adı, bir öğenin beş yönünün her birini tanımlar.

#### 4.1.2 Serbestlik dereceleri

Serbestlik dereceleri elemanın niteliğine göre değişir. Serbestlik dereceleri analiz sırasında hesaplanan temel değişkenlerdir. Gerilme/yer değiştirme simülasyonu için serbestlik dereceleri her bir düğümdeki öteleme ve dönmelerdir(Şekil 4. 2). Bir ısı transferi simülasyonu için her düğüm noktasındaki öteleme ve dönme serbestlik derecelerine ilave olarak her bir düğümdeki sıcaklıklardır.

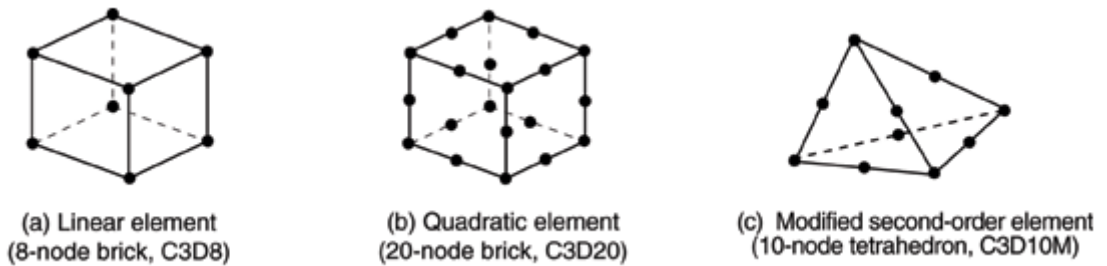


Şekil 4. 2 Serbestlik dereceleri

#### 4.1.3 Düğüm sayısı

Yer değiştirmeler veya diğer serbestlik dereceleri elemanın düğümlelerinde hesaplanır. Elemanın herhangi bir başka noktasında, yer değiştirmeler, düğüm yer değiştirmelerinden enterpolasyon ile elde edilir. Genellikle enterpolasyon sayısı, elemenda kullanılan düğüm sayısı ile belirlenir.

ABAQUS / Standart katı eleman kütüphanesi, bir, iki veya üç boyutta birinci dereceden (doğrusal) enterpolasyon elemanları ve ikinci dereceden (kuadratik) enterpolasyon elemanları içerir. Yalnız köşelerinde düğüm noktaları bulunan ve her bir yönde doğrusal enterpolasyon yöntemini kullanan elemanlar doğrusal elemanlar veya birinci derece elemanlar olarak tanımlanırlar. Elemanlar üçgen ve dörtgen şeklinde iki boyutta olmakla birlikte üçgen prizmalar, dört yüzlü(tetrahedra) ve altı yüzlü (hexahedra ("bricks")) olarak üç boyutta sağlanmıştırlar. Köşelerde ve orta kısımlarda da düğüm noktalarının bulunduğu, kuadratik enterpolasyon yöntemini kullanan elemanlar kuadratik veya ikinci derece eleman olarak tanımlanırlar. Modifiye edilmiş ikinci dereceden üçgen ve dörtgen prizma elemanlar da mevcuttur. Ek olarak, azaltılmış integrasyon, hibrit ve uyumsuz mod elemanları mevcuttur. Katı elemanlar için özellikle dörtgenler ve dörtgen prizma elemanlar için süreklilik bozulmadığı takdirde daha doğru sonuçlar vermektedir. Üçgen ve üçgen prizma elemanlar bozulmaya karşı daha az hassastır. Ayrıca kuadratik elemanlar doğrusal elemanlara göre daha fazla integrasyon noktasına sahip olduğundan, analiz süresi daha uzun olması ile birlikte, gerçeğe daha yakın sonuç elde edilmektedir. Analiz süresi doğrusal elemanlarda daha kısa olması zamandan tasarruf sağlamaktadır.



şekil 4. 3 ABAQUS katı elemanlardan örnekler

#### 4.1.4 Formülasyon

Bir elemanın formülasyonu, elemanın davranışını tanımlamak için kullanılan matematiksel teoriyi ifade eder. Genel olarak Lagrange ve Euler metodu kullanılmaktadır. Lagrange metodunda, her bir parçacığının konumunun ve hızının izinin sürülmesi gerekmektedir. Euler tanımlamasında; sabit kütleli akışkan parçacıklarının konum ve hızlarının izlenmesi yerine kontrol hacmi içerisinde konumun ve zamanın fonksiyonu olan alan değişkenleri tanımlanır. Euler tanımlamasında, her bir akışkan parçacığına gerçekte ne olduğuyla değil, gözönüne alınan zamanda ve gözönüne alınan konumdaki bir parçacığın basıncının, hızının, ivmesinin vb. ne olduğu ile ilgilenilir. Euler yöntemi akışkanlar mekaniği simülasyonlarında yaygın olarak kullanılırken diğer tüm gerilme ve yer değiştirme elemanları Lagrange formülasyonuna dayanmaktadır.

Bir elemanın davranışını tanımlamak için kullanılan matematiksel formülasyon, elemanları sınıflandırmak için kullanılan başka bir geniş kategoridir.

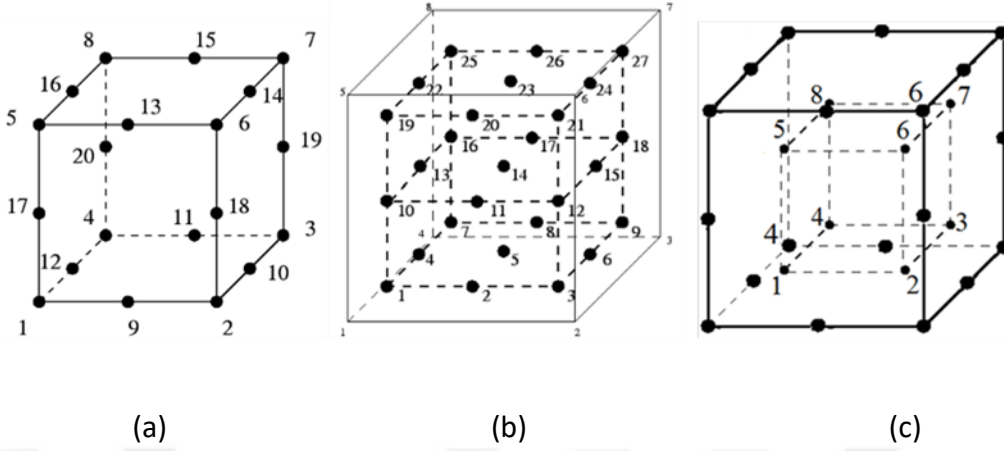
Farklı eleman formülasyonlarının örnekleri:

- Düzlem gerilme
- Düzlem şekil değiştirme
- İnce plaklar
- Kalın plaklar
- Kafes sistemler
- Çerçeve sistemler

#### 4.1.5 İntegrasyon yöntemi

ABAQUS programında iki tip integrasyon yöntemi vardır. Bunlardan birisi tam integrasyon (full integration) yöntemi, diğeri ise azaltılmış integrasyon (reduced integration) yöntemidir. Azaltılmış integrasyon, eleman rijitliğini oluşturmak için daha düşük dereceli bir integrasyon kullanır. Kütle matrisi ve dağıtılmış yükler tam integrasyon kullanır. Azaltılmış integrasyon, özellikle üç boyutta çalışma süresini azaltır. Örneğin,

C3D20 eleman tipi 27 integrasyon noktasına sahipken C3D20R sadece 8 adettir; bu nedenle, C3D20 için C3D20R'den 3.5 kat daha maliyetlidir.

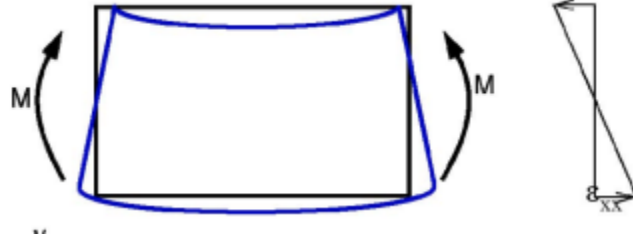


Şekil 4. 4 C3D20 ve C3D20R katı elemanlarının integrasyon noktaları (a) C3D20 elemanı, (b) C3D20 integrasyon noktaları, (c) C3D20R integrasyon noktaları

	Tam İntegrasyon	Azaltılmış İntegrasyon
Birinci dereceden interpolasyon		
İkinci dereceden interpolasyon		

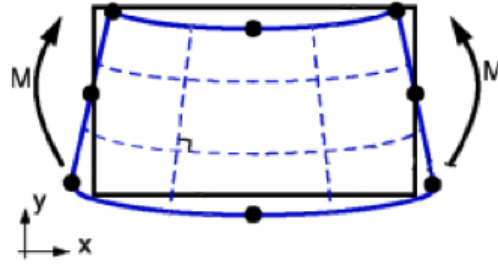
Şekil 4. 5 Tam ve azaltılmış integrasyona sahip elemanların interpolasyon çeşitleri

Ancak tam integrasyon ile azaltılmış integrasyon yöntemleri eleman deformasyon davranışını büyük ölçüde etkiler. Örneğin bir yapısal elemanın (kiriş, kabuk) eğilme davranışı Şekil 4. 6'daki gibi olmalıdır. Elemanın enkesiti düzlem boyunca sabit kalmalıdır. Aksenal birim şekil değiştirme  $\epsilon_{xx}$  değeri kalınlığa göre doğrusal olarak değişmelidir. Kayma gerilmesi oluşmamalıdır.



Şekil 4. 6 Katı elemanlarda basit eğilme

Abaqus programında ikinci dereceden (kuadratik) elemanlarda tam integrasyon ve azaltılmış integrasyon yönteminde eleman davranışı Şekil 4. 7’de verilmiştir. Gerçeğe yakın bir davranış göstermektedir. Kuadratik azaltılmış integrasyon elemanları genellikle tam integrasyon elemanlardan daha doğru sonuçlar vermektedir.

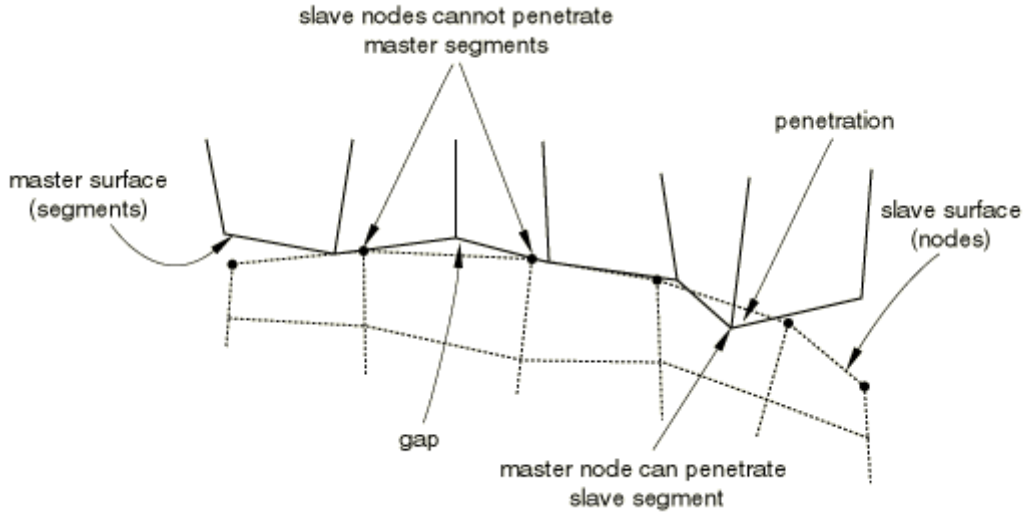


Şekil 4. 7 İkinci dereceden (kuadratik) elemanlarda basit eğilme

Birinci dereceden elemanlar(doğrusal) için, tam ve azaltılmış integrasyonla elde edilen doğruluk büyük oranda problemin yapısına bağlıdır. Eğer doğrusal elemanlarda eğilme davranışı belirleyici ise “shear locking” yani hayali kayma deformasyon etkisi ile çok rijit bir davranışa sebep olabilmektedir. Gerçek bir elemanın eğilme davranışına bakıldığında, elemanın düşey liflerinin boyu sabit kalırken, elemanın yatay liflerinin boyları çekme kuvveti altında uzayıp, basınç kuvveti altında kısılması gerekir. Ancak tam integrasyon yönteminde, düşey liflerin boyları sabit kalmayıp, yatay liflerle arasında dik açı yapmamaktadır. Bunun sonucunda yapısal olmayan kayma gerilmeleri ve kayma şekil değiştirmeleri meydana gelmektedir. Azaltılmış integrasyon yönteminin kullanıldığı doğrusal eleman tiplerinde eleman merkezinde bir adet integrasyon noktasına sahiptir. Deformasyonlarda bu integrasyon noktasında düşey lif ile yatay lif arasında 90 derecelik bir açı bulunur. Bu nedenle elemanda şekil değiştirme enerjisi ortaya çıkmaz. Bu duruma sıfır enerjili deformasyon moduna “hourglassing” olarak adlandırılmaktadır. Bu tip integrasyon yönteminin kullanıldığı doğrusal elemanlar çok esnek olma eğilimindedir.



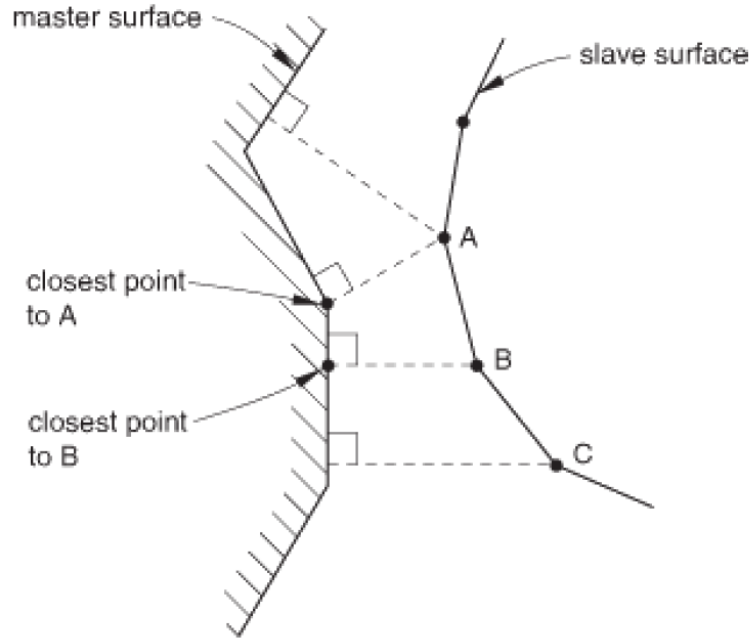
engellenebilir. Aynı zamanda yüzeyler arası gerilmelerin doğru aktarılması için etkileşimde olan yüzey alanlarının doğru tanımlanması ve zengin bir ağ sistemine sahip olması gerekmektedir.



Şekil 4. 9 Yüzey-yüzey etkileşimi

#### 4.2.1.2 Düğüm Noktası-Yüzey Etkileşimi

Düğüm noktası - kenar temas elemanı, temas yüzeyinde seçilen bir düğüm noktasının hedef yüzeydeki izdüşümü kenar elemanına temas gerilmesi aktaran elemandır [33]. Temas doğrultusu hedef yüzeyin normal doğrultusunda gerçekleşir. Temas yüzeyi hedef yüzeye nüfus etmeyecek şekilde sınırlandırılmıştır. Bununla birlikte prensip olarak hedef yüzey temas yüzeyine temas edebilir. Ayrıca her ne kadar yüzey-yüzey temas mekaniği tanımlanmış olsa da bazen cisimlerin köşe düğüm noktalarında temas ettikleri yüzeye nüfus etme eğiliminde olabilmektedir. Bu noktalarda düğüm noktası- yüzey temas mekaniği tanımlanmış olması gerekmektedir(Şekil 4. 10).



Şekil 4. 10 Düğüm noktası-yüzey etkileşimi

#### 4.2.2 Kayma etkisinin tanımı

Temas simülasyonlarında iki etkileşimli yüzeyin göreceli hareketini hesaba katan iki yaklaşım vardır. Bunlar sonlu kayma etkileşimi (finite-sliding contact) ve küçük kayma etkisi (small sliding)'dir. Sonlu kayma etkileşimi, en genel takip yaklaşımıdır. Bu kayma etkileşimi temas yüzeyinin duruma göre ayrılmasına, kaymasına ve dönmesine izin verirken küçük kayma etkisi, hedef yüzeyin üzerindeki herhangi bir dönme ve şekil değiştirmeye göre kayma etkisini yaklaşık olarak doğrusallaştırarak günceller.

#### 4.2.3 Etkileşimin modelleri

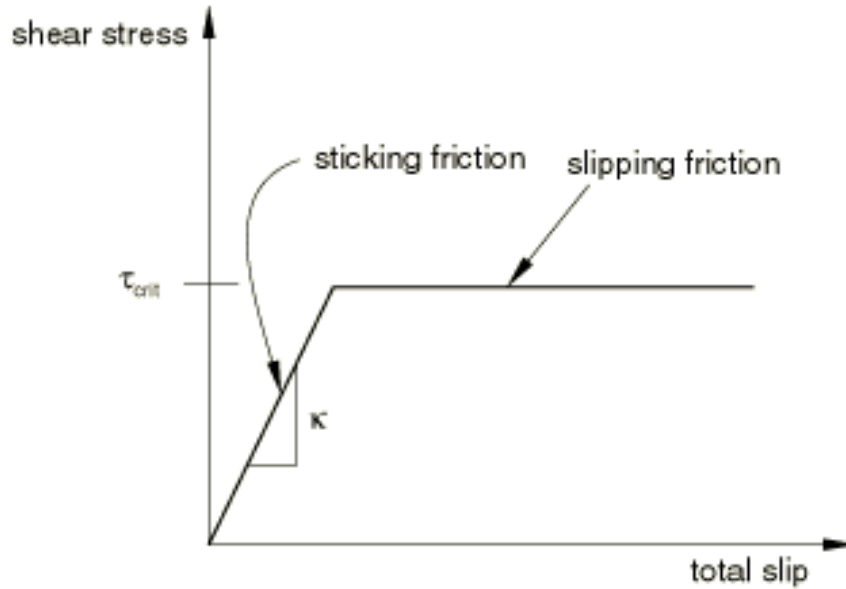
Temas yüzeylerinde, mekanik olarak birçok özellik atanabilmektedir. Bu çalışmada sadece teğetsel davranış ve normal davranış tanımı kullanılmıştır.

##### 4.2.3.1 Teğetsel davranış

Abaqus, teğetsel davranış için temas yüzeyleri arasında sürtünme yoksa "frictionless" seçeneğini sürtünme varsa "penalth" seçeneğini sunar.

Sürtünmesiz temas (Frictionless): Bu temas türünde etkileşim içerisinde olan parçalar birbirlerinin hem teğeti doğrultusunda sürtünmesiz olarak hem de normal doğrultusunda ayrılacak şekilde dikkate alınmaktadır.

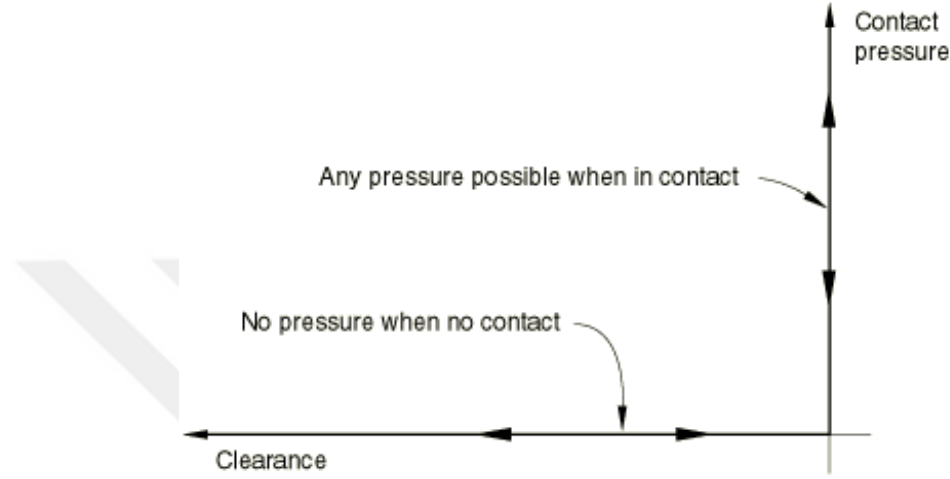
Sürtüneli temas (Frictional): Bu temas türünde etkileşim içerisinde olan parçalar birbirlerinin normali doğrultusunda ayrılabilir, teğeti doğrultusunda ise belirlenen bir sürtünme katsayısına bağlı olarak hareket edebilecek şekilde dikkate alınmaktadır. Abaqus, teğetsel davranış olarak Coulomb sürtünme modelini kullanmaktadır. Temas yüzeyleri arasında meydana gelecek olan sürtünmenin formülasyonu "Penalty" olarak seçilip elemanlar arası sürtünme katsayısı değeri programa girilerek teğetsel davranış tanımlanır Coulomb sürtünme modelinin temel konsepti, bir arayüz boyunca izin verilen maksimum sürtünme (kayma) gerilmesi ile temas eden cisimler arasındaki temas basıncını ilişkilendirmektir. Sürtünme katsayısı "0" olarak girildiğinde sürtünmesiz temas olarak dikkate alınmaktadır. Coulomb sürtünme modelinde, iki temas eden yüzey, birbirlerine göre kaymaya başlamadan önce ara yüzeyleri boyunca belirli bir büyüklüğe kadar kayma gerilmelerini taşıyabilir; bu duruma yapışma denir. Temas eden yüzeylerde kayma gerilmesi, kritik kayma gerilmesini ( $\tau_{cr} = \mu p$ ) aştığında ise yüzeyler arasında kayma gerçekleşir (Şekil 4. 11).



Şekil 4. 11 Temas yüzeyinin kayma bileşeni için kabuller

#### 4.2.3.2 Normal davranış

Normal davranış olarak bu çalışmada Abaqus'un "Hard Contact" seçeneği kullanılmıştır. Hard Contact, yüzeyler temas ettiğinde, aralarında temas basıncı iletirken aynı zamanda temas basıncı sıfıra düşerse yüzeyler ayrılmaktadır. Ayrılmış yüzeyler, aralarındaki boşluk sıfıra düştüğünde temas etmektedir(Şekil 4. 12).



Şekil 4. 12 Temas yüzeyinin normal bileşeni için kabuller

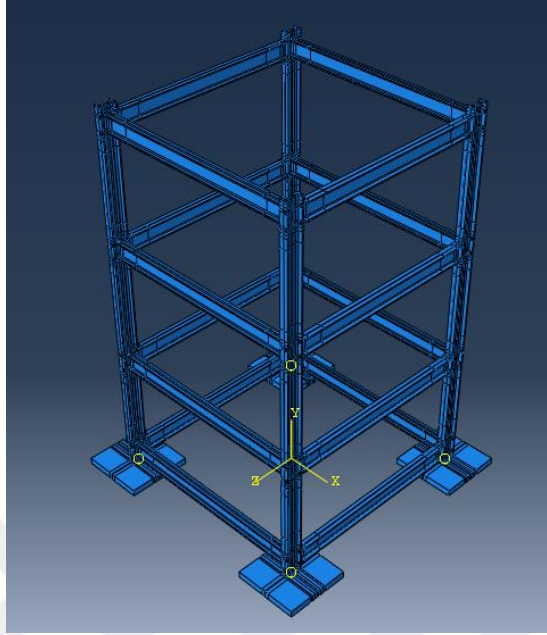
#### Sınırlandırmalar

Abaqus programında "Constraint" başlığı altında isteğe bağlı sınırlandırmalar atanabilen bir seçenek sunmaktadır. Sınırlandırmalarda birçok seçenek sunmaktadır. Bu çalışmada "Tie" ile tam bağlı temas ve "MPC Constraint" ile çoklu nokta kısıtlama seçenekleri kullanılmaktadır.

Tam bağlı temas(Tie Constraint): Bu sınırlandırma türünde etkileşim içerisinde olan parçalar birbirlerinin normal ve teğet doğrultularında hareket etmeyecek şekilde yani tam bağlı olarak dikkate alınmaktadır.

Çoklu nokta kısıtlama (MPC Constraint) : Bu sınırlandırma türünde tek bir kontrol noktası ile herhangi bir yüzeyin farklı serbestlik dereceleri arasında sınırlama getirilmesine izin vermektedir. Birçok çoklu nokta kısıtlama seçenekleri bulunmaktadır. Bu çalışma için "tie" bağlantısı kullanılmıştır. "Tie" seçeneği ile temas yüzeyindeki tüm noktaların serbestlik derecelerini kontrol noktasındaki tüm serbestlik derecelerine sabitler.

### 4.3 Çelik Çerçeve Eleman Tanımları



Şekil 4. 13 Abaqus çelik çerçeve modeli

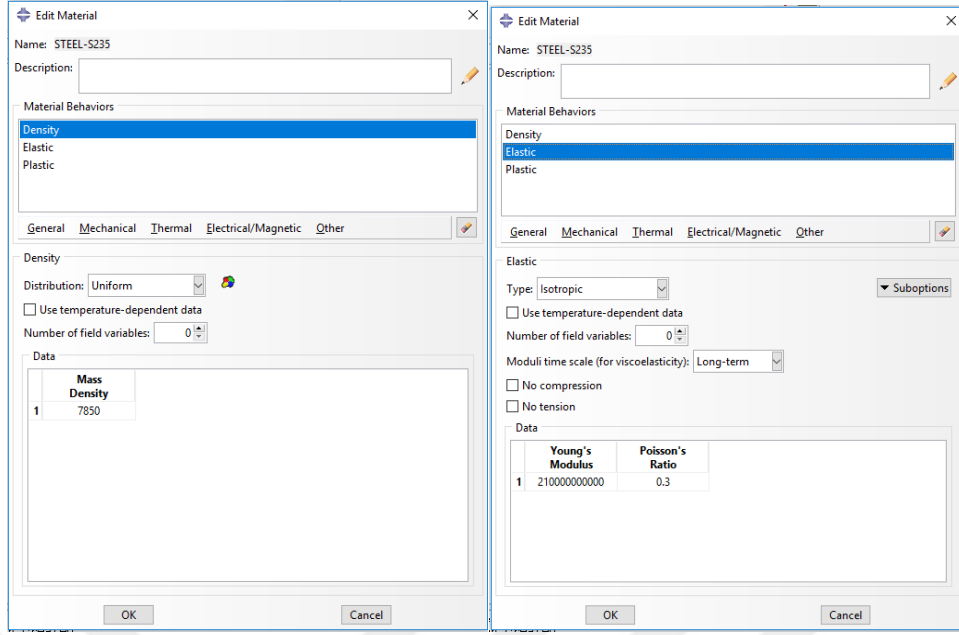
Çelik Çerçeve modelinde 6 adet elemandan oluşmaktadır.

- Kiriş ve Kolonlar - IPN 100
- Z- doğrultusundaki korniyer- L40x40x4
- X- doğrultusundaki korniyer- L80x80x4
- Plaka-300x300x40

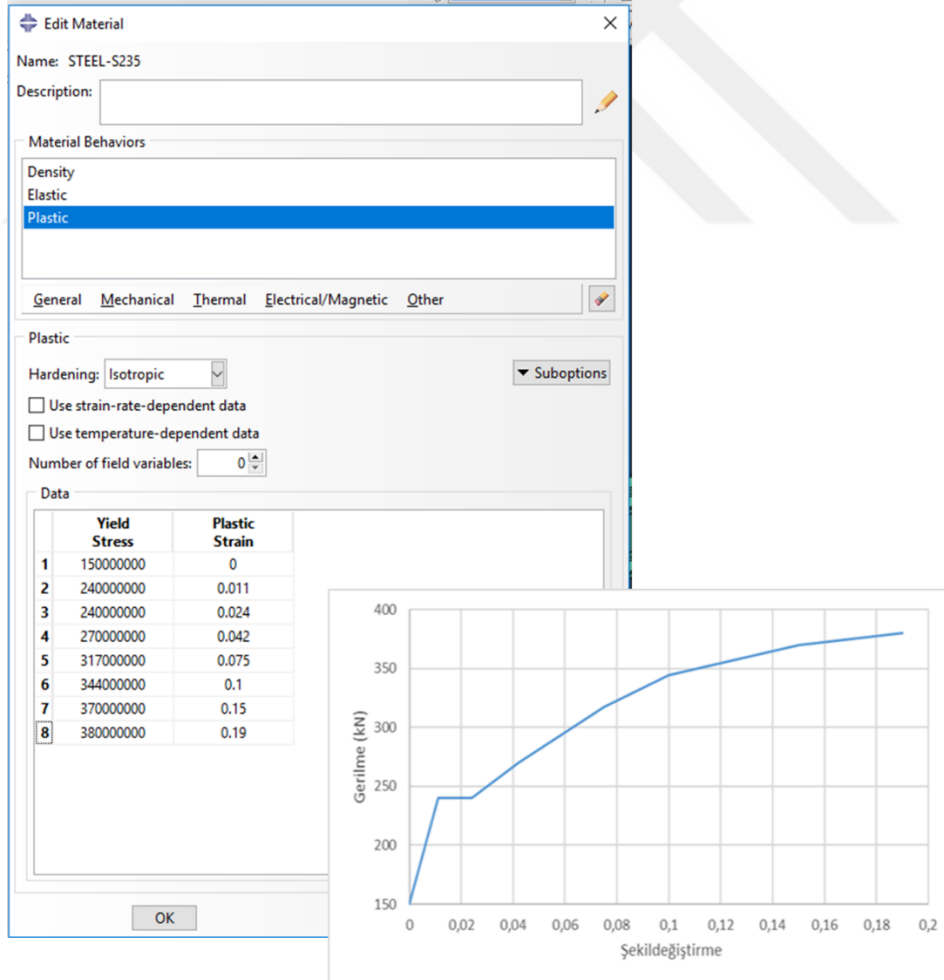
Her bir elemanın, doğrusal azaltılmış integrasyon yöntemi ile 8 düğüm noktalı, tek integrasyon noktalı C3D8R katı eleman olarak seçilmiştir.

### 4.4 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Tüm elemanlarda malzeme olarak S235 çeliği kullanılmıştır. Elastisite modülü 210.109 N/m<sup>2</sup>, poisson oranı 0.3 olarak alınmıştır(Şekil 4. 14). Non-lineer çözüm yapabilmek için S235 malzemelerin gerilme şekil değiştirme diyagramları, sonlu elemanlar modelinde tanımlanmıştır ve çeliğin pekleşmesi malzeme tanımında göz önünde bulundurulmuştur(Şekil 4. 15).



Şekil 4. 14 S235 malzeme çeliğinin yoğunluğu ve elastik malzeme özelliklerinin programa atanması



Şekil 4. 15 S235 malzeme çeliğinin gerilme-şekil değiştirme grafiği ve plastik malzeme özelliklerinin programa atanması [34]

#### 4.5 Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması

Elemanları sonlu elemanlar ağına ayırmak gerçek yapı davranışına yakınsamak için en önemli adımlardan birisidir. Analiz edilen modeller zengin sonlu elemanlar ağına sahip olmaları gerekir. Bununla birlikte analiz süreside uzayacağı için optimum sonlu elemanlar ağı belirlenmesi gerekir. Oluşturulan sonlu eleman ağı Şekil 4. 16'de gösterilmektedir. Optimum sonlu eleman ağını belirlerken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Bu hususlar aşağıda açıklanmaktadır.

- **Geometrideki Süreksizlikler**

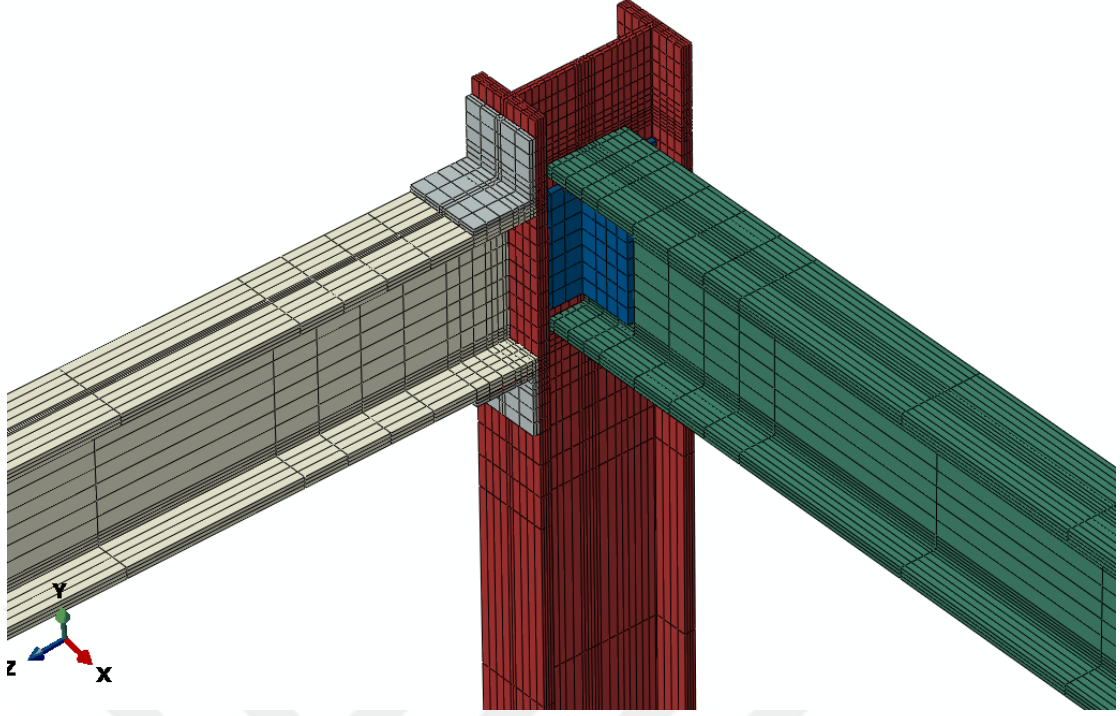
Geometrik süreksizliklerin olduğu yerlerde sonlu eleman ağları daha zengin olmalıdır. Bu bölgelerde oluşan gerilme yığılmalarının oluşacağı için analiz sonuçlarını doğrudan etkileyecektir.

- **Temas Etkileşimi**

Etkileşimde olan elemanlara temas mekaniğinin tanımlanması halinde bu bölgelerde hassas bir hesap gerektirdiğinden sonlu eleman ağları arttırılmalıdır. Bu bölgelerdeki zayıf sonlu eleman ağlarının bulunması, analiz sonuçlarını etkileyebileceği gibi çözümü zorlaştırabilir, analiz kesilebilir ve sonuç alınamayabilir.

- **İlgili Alanlar**

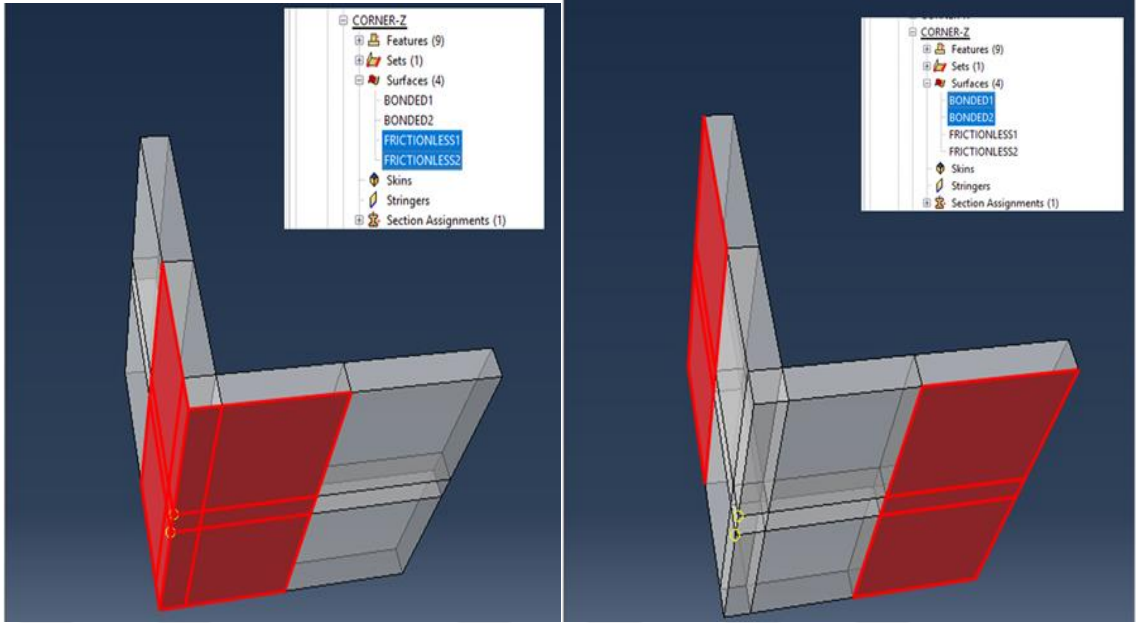
Yapılan analize göre örneğin bir kirişte basit eğilme, burkulma veya burulmalı burkulma analizlerinde eleman davranışını öngörerek özellikle şekil değiştirdiği bölgelerde daha zengin sonlu eleman ağına sahip olması gerekir.



Şekil 4. 16 Sonlu elemanlar ağı

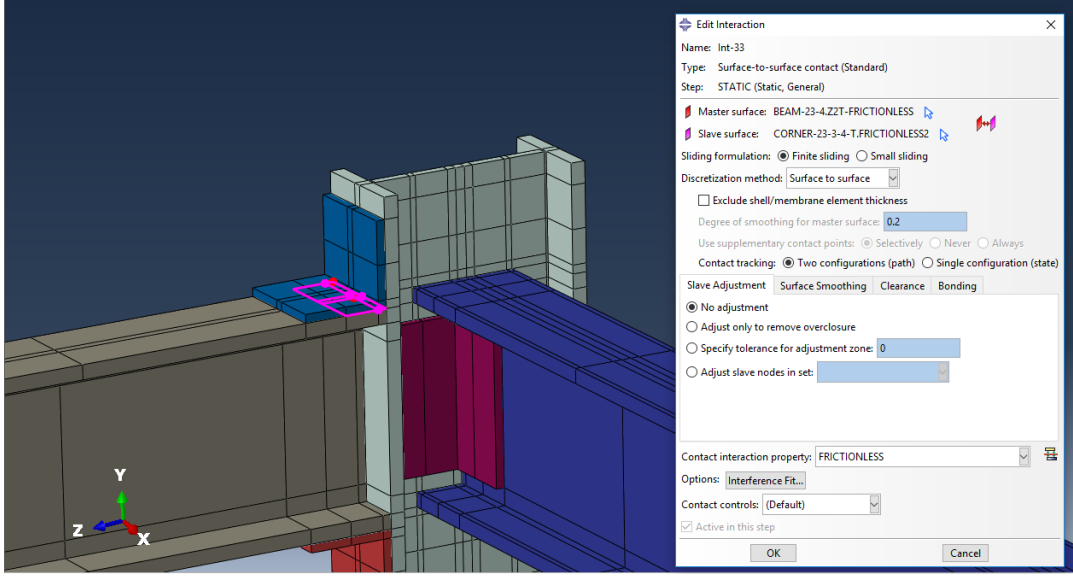
#### 4.6 Eleman Yüzeyleri Arasındaki Temas Tanımları

Eleman yüzeyleri arasında temas sonucu oluşan etkileşimi tanımlamak, analiz sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada çelik çerçeve birleşimini oluşturulurken mümkün olduğu sürece basitleştirmeler yapıldı. Yapılan bu basitleştirmeler çözüm süresinin kılmasına katkı sağlamak amacıyla yapıldı. Örneğin gerçek birleşimde, kolon-kiriş birleşimi L40x40x4 profili kullanılmıştır ve profilin her iki yönünde 2'şer adet M12 bulonları kullanılarak 1450 Nm tork uygulayabilen havalı somun sıkma (Gav 2212) aleti kullanılarak bağlantı gerçekleştirilmiştir. Abaqus modelinde ise bu birleşim bölgelerindeki L40x40x4 profil kollarının dış yüzeyleri iki eşit alana bölünmüştür. Dış yüzeylerin uç kısımları tam bağlantılı (tie contact) seçilirken, diğer kısımları sürtünmesiz temas (frictionless) olarak atanmıştır. Bu şekilde tanımlama ile gerçek duruma yakın sonuçlar elde edilebileceği düşünülmüştür.

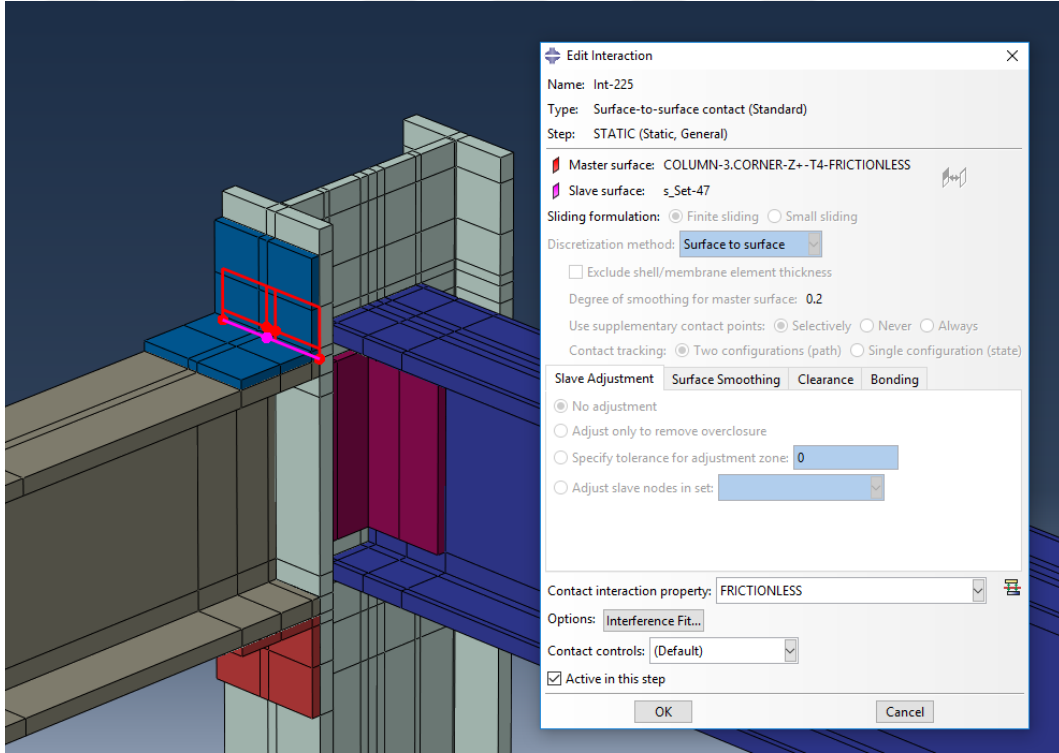


Şekil 4. 17 Korniyerlerin tam bağlı ve serbest temas yüzeylerinin belirlenmesi

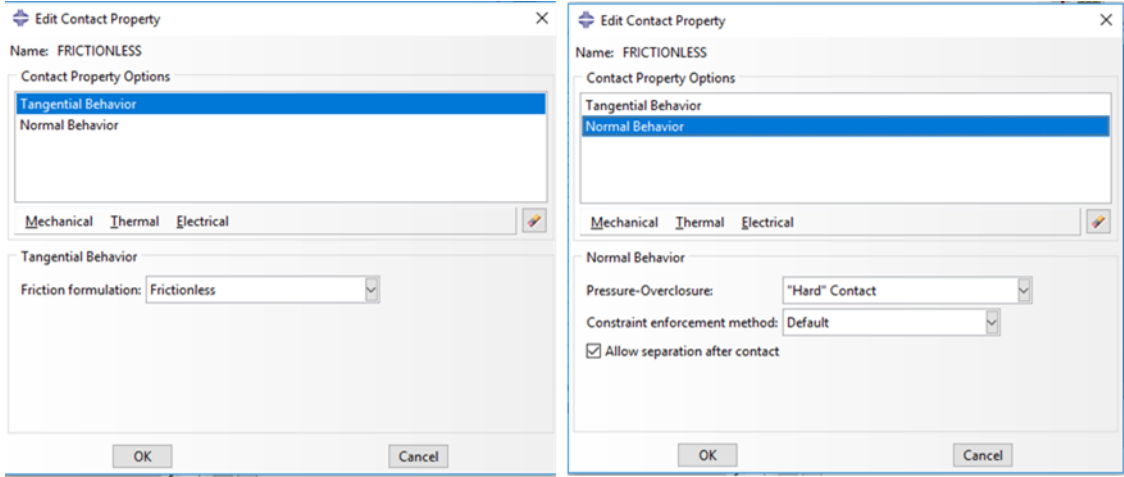
Çelik çerçeve modelinde z ve x yönündeki birleşimler ile kolon-kiriş yüzeyleri dahil 160 adet frictionless tanımı yapıldı(Şekil 4. 18). İki yüzeyin temasında normal davranış ve teğetsel davranış biçimleri tanımlanarak özellikle dinamik analiz sırasında yüzeylerin iç içe geçmesi engellenmiştir(Şekil 4. 20). Ancak sadece yüzey-yüzey etkileşiminin tanımlanmasının yeterli olmadığı analizler sonucunda fark edilmiştir. Korniyerlerin köşe çizgisi yüzey etkileşiminde iç içe geçtiği görülmüştür. Bu sebeple düğüm noktası- yüzey etkileşimi de tanımlanmıştır. Bu düğüm noktası- yüzey etkileşimi ile birlikte toplam 224 adet frictionless tanımı yapıldı(Şekil 4. 19).



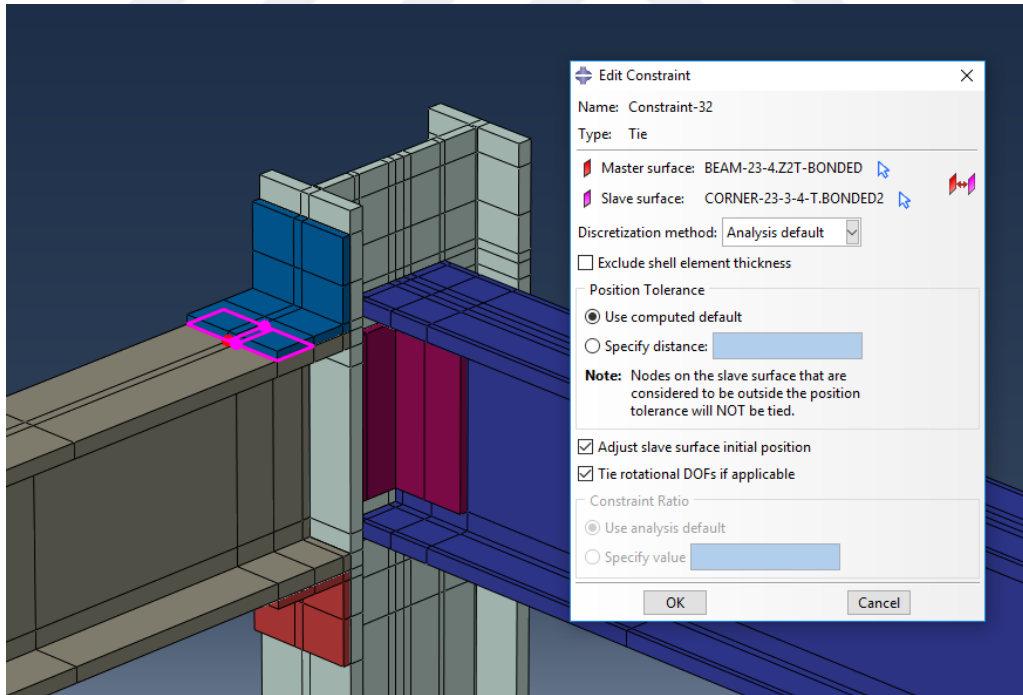
Şekil 4. 18 Birleşim bölgesinde serbest yüzey-yüzey etkileşiminin atanması



Şekil 4. 19 Birleşim bölgesinde serbest düğüm noktası-yüzey etkileşiminin atanması



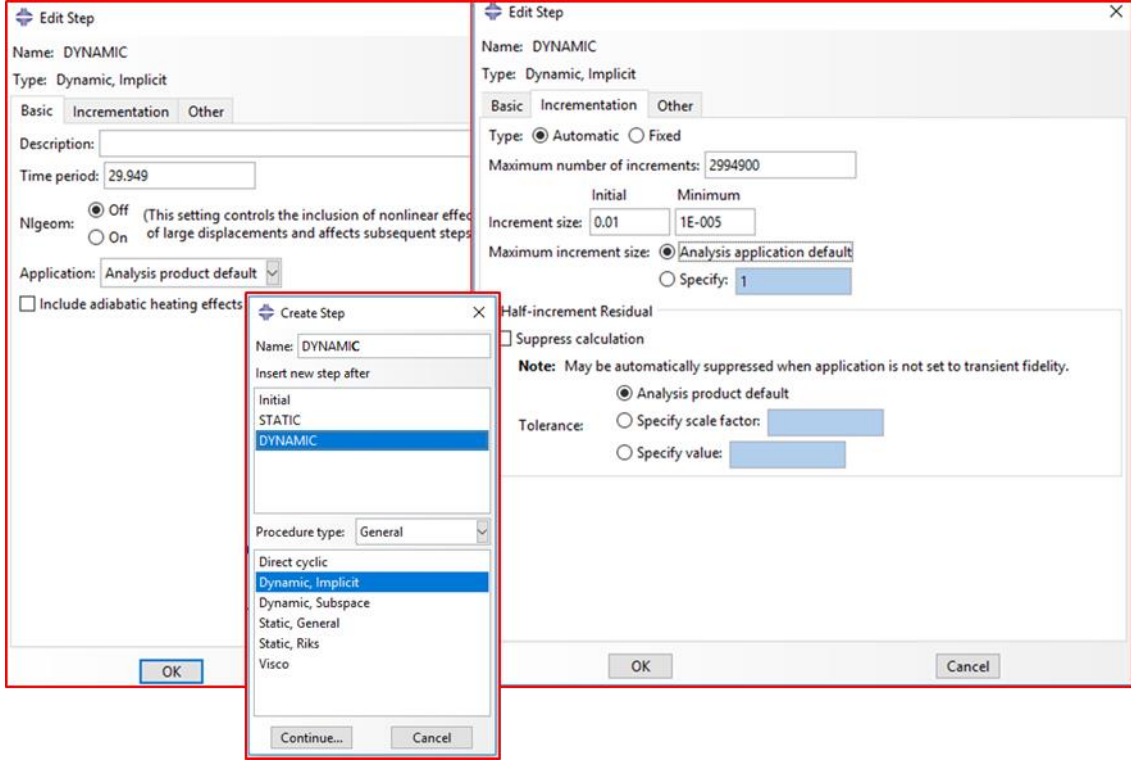
Şekil 4. 20 Serbest yüzey etkileşimi için "normal" ve "kayma" davranışının belirlenmesi Aynı şekilde L40x40x4 profilinin bir kısmı da ayrılmayacak şekilde birleştirilmiştir. Birleşim Abaqus programındaki Constraint/Tie seçeneği ile gerçekleştirilmiştir(Şekil 4. 21). Çelik çerçeve modelinde z ve x yönündeki birleşimler ile kolon-plaka yüzeyleri dahil 136 adet tam bağlı temas tanımı yapıldı.



Şekil 4. 21 Birleşimde tam bağlı yüzeylerin atanması

#### 4.7 Analiz Adımları

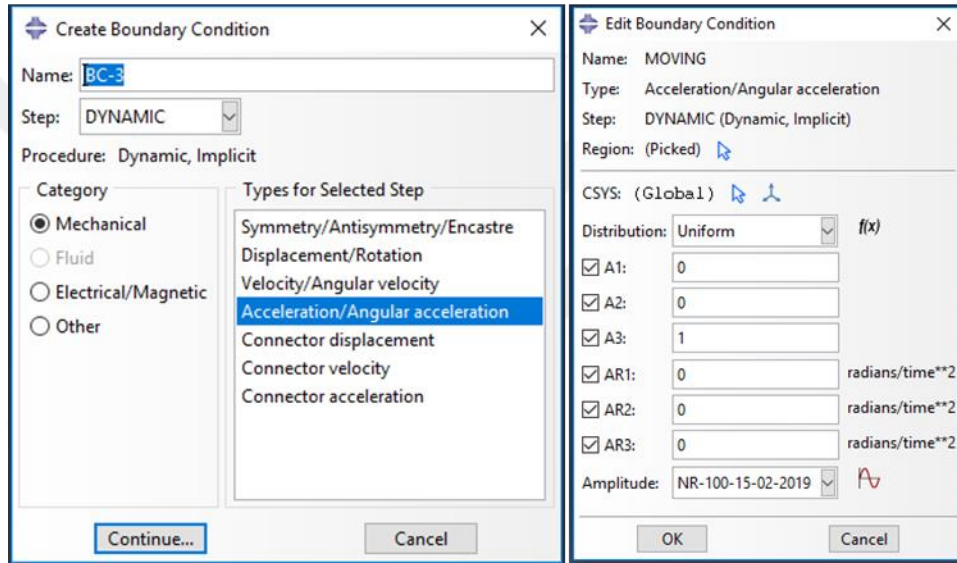
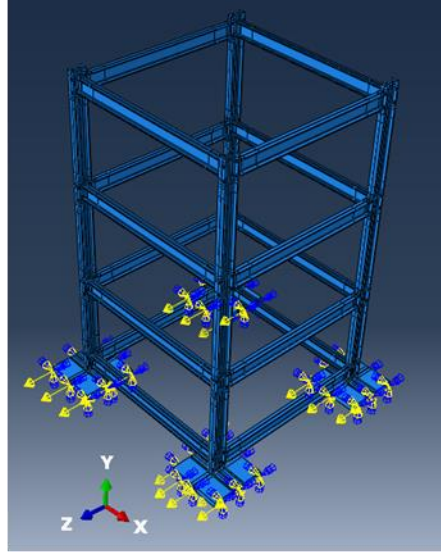
Abaqus programında malzeme tanımları, yüzey etkileşimleri ve sınır koşulları gibi tanımlar başlangıç adımında (initial step) tanımlanır. İlk adım olarak çelik çerçeve üzerindeki statik yük ile analiz gerçekleştirilmiştir. İkinci adımda ise dinamik yük altında analiz gerçekleştirilmiştir. Statik analizde, genel statik analiz tercih edilirken, dinamik analizde implicit dinamik analiz tercih edilmiştir.



Şekil 4. 22 Dinamik analiz adımının atanması

#### 4.8 Sonlu Eleman Noktaları Arasında Yer Değiştirmelerin Sınırlandırılması

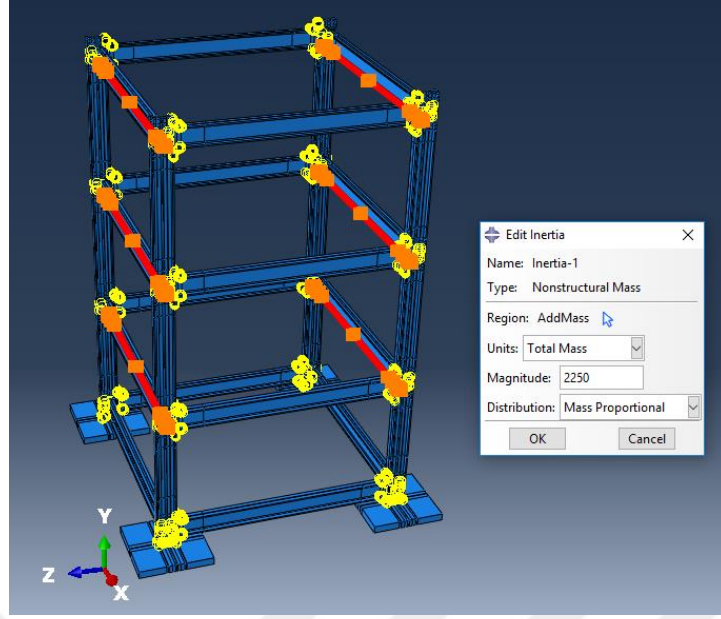
Abaqus çelik çerçeve modelinde statik analizde plaka tabanları sabit mesnet olarak atanmıştır. Dinamik analizde z doğrultusunda deprem ivme kaydı ile yer değiştirme parametreleri elde etmek için sınır koşulları atanmıştır. Abaqus programında bir doğrultuda deprem ivme kaydının mesnetlere atması için A3 serbeslik derecesi 1 olarak alınmıştır.



Şekil 4. 23 Modele hareketli mesnet ataması

#### 4.9 Statik yük uygulaması

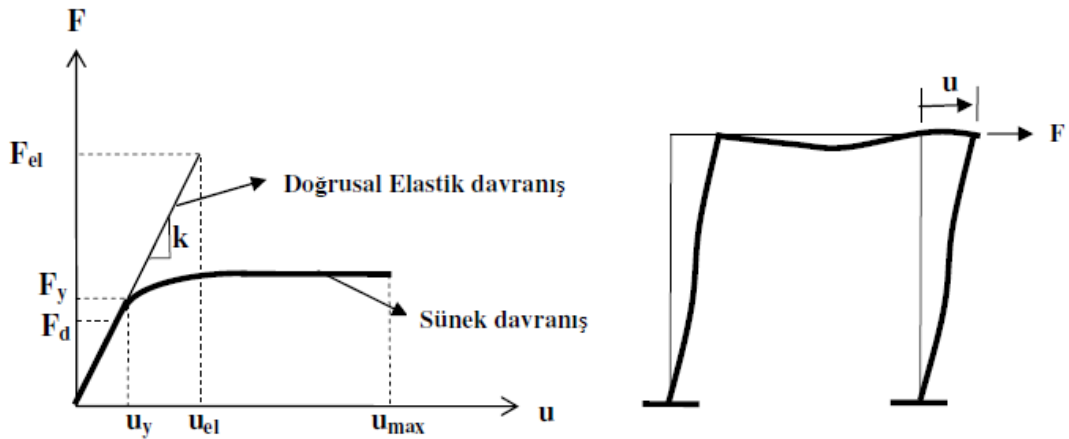
Çelik çerçeve numunesinin üzerindeki parke taşının oluşturduğu statik yük etkisi, Abaqus programında yapısal olmayan ağırlık olarak kiriş başlığının iç kısmına uygulanmıştır (Şekil 4. 24).



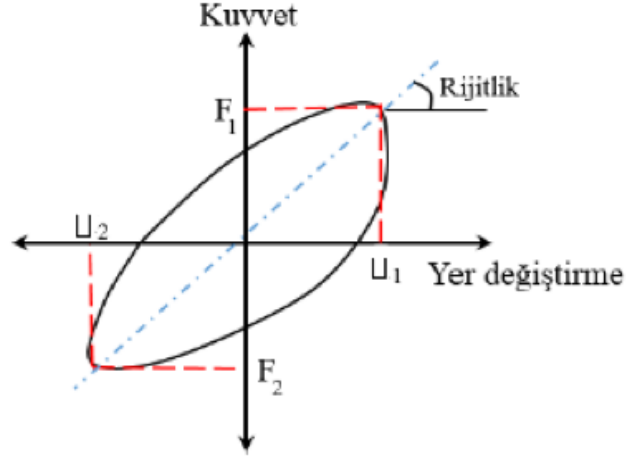
Şekil 4. 24 Sisteme yapısal olmayan statik yük ataması

#### 4.10 Sonuçların Elde Edilmesi

Çelik çerçeve sisteminin şekil değiştirme rijitliğini bulmak için deprem ivme kaydı altında yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen taban yerdeğiştirme kuvveti ile tepe noktasının zemine göre yaptığı göreceli ötelemesinin grafiği çizilmektedir. Bu grafikte maksimum noktaların kesiştirilmesiyle elde edilen doğrunun eğimi yapının şekil değiştirme rijitliğini vermektedir(Şekil 4. 25). Aynı zamanda her kat için kolon taban kesme kuvvetleri ile göreceli kat ötelemesi grafiği(Şekil 4. 26) çizilerek kat rijitlikleri denklem 4.1'e göre hesaplanmıştır.



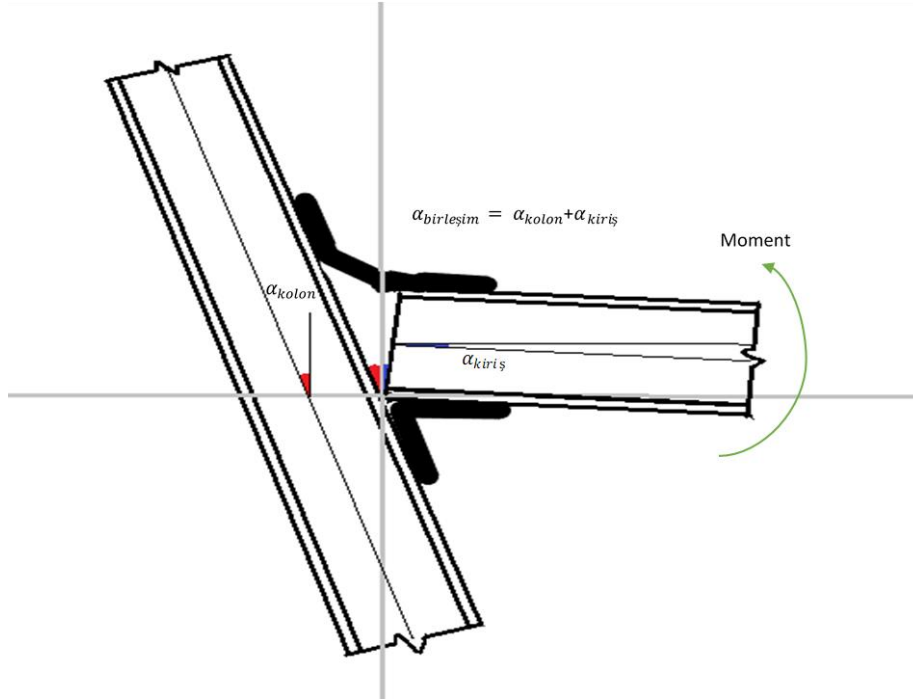
Şekil 4. 25 Sünek yapı davranışı



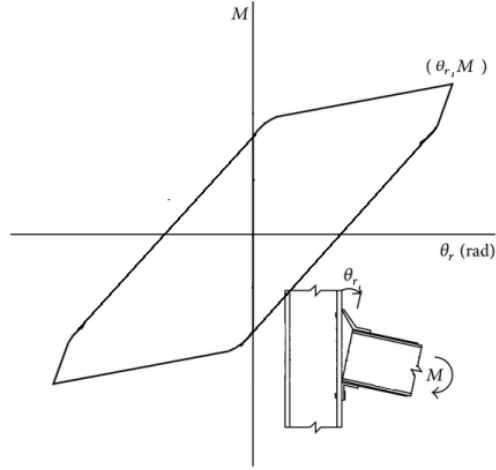
şekil 4. 26 Sistemin rijitliğinin belirlenmesi

$$Rijitlik = \frac{|F_1|+|F_2|}{|U_1|+|U_2|} \quad (4.1)$$

Moment ve dönme değerlerini hesaplama yöntemi şekil 4. 27'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Kirişin kolon başlığına göre dönme değeri ( $\alpha_{birleşim}$ ) kirişin dönme değeri ( $\alpha_{kiriş}$ ) ile kolonun dönme değerinin ( $\alpha_{kolon}$ ) toplanması ile elde edildi. Daha sonra kirişlerin dönme kapasitelerinin elde edilmesi için her kat için moment-dönme grafikleri çizildi(şekil 4. 28).



şekil 4. 27 Birleşimde oluşan moment ve dönme



Şekil 4. 28 Moment-dönme grafiği

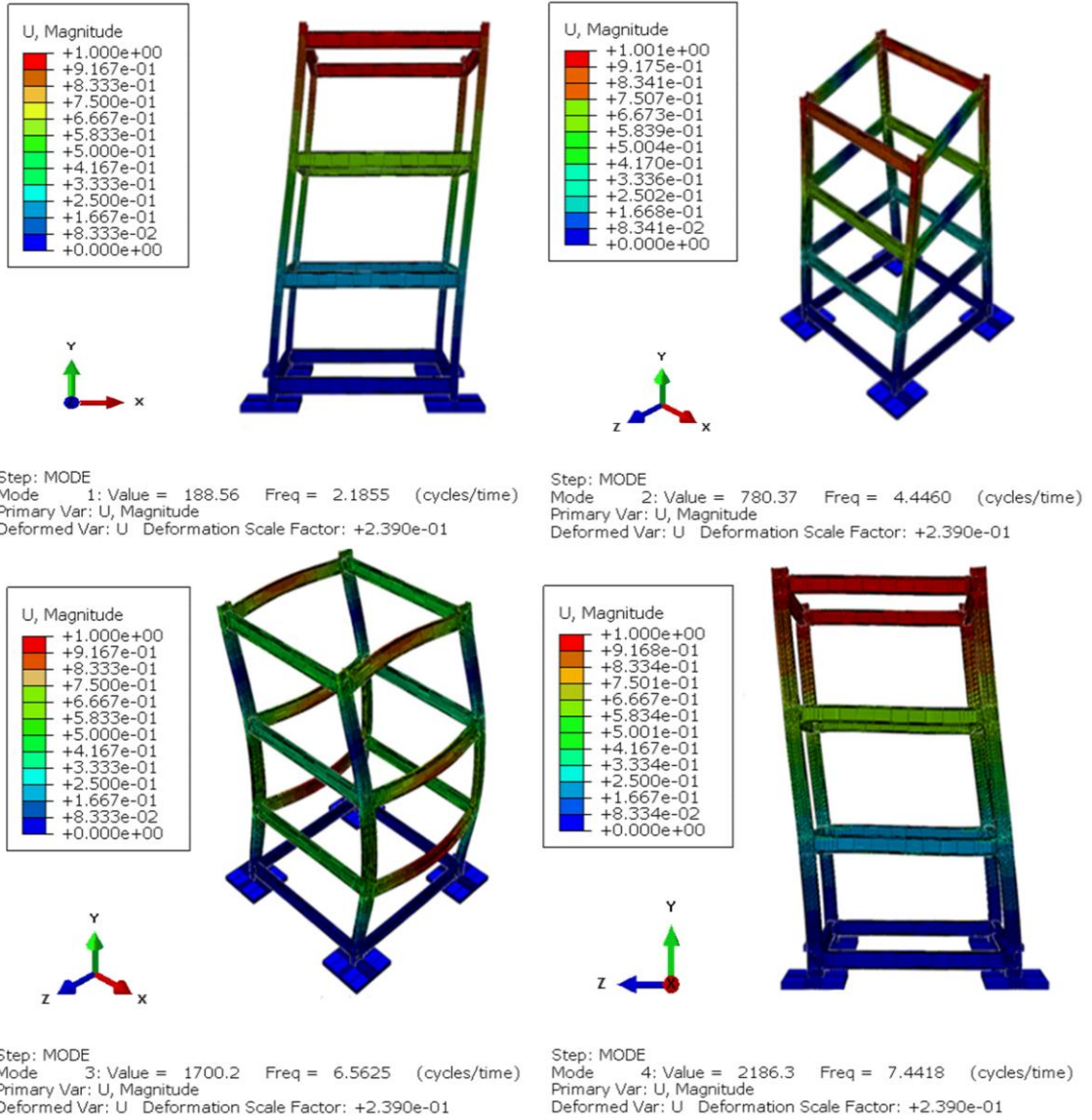
#### 4.11 Sonlu Eleman Analizlerinin Sonuçlarının Değerlendirmesi

##### 4.11.1 Mod Şekilleri

Çelik çerçeve sistemine ait 4 adet mod şekli Şekil 4. 29'de gösterilmektedir. Yapının sırasıyla periyotları aşağıda listelenmiştir. Gerçek çelik çerçeve sisteminde mafsallı birleşime sahip zayıf eksen merkezi çaprazlarla güçlendirilmiştir. Fakat sayısal analizde bu eksen deprem kuvveti verilmediği için çaprazlar ihmal edilmiştir.

Çizelge 4. 1 Periyotlar

Mod	Periyot (sn)	
1. Mod	0,45756	Zayıf eksen de 1. öteleme modu
2. Mod	0,22492	Zayıf eksen de 1. burulma modu
3. Mod	0,15238	Zayıf eksen de 2. burulma modu
<u>4. Mod</u>	<u>0,13438</u>	<u>Güçlü eksen de 1. öteleme modu</u>



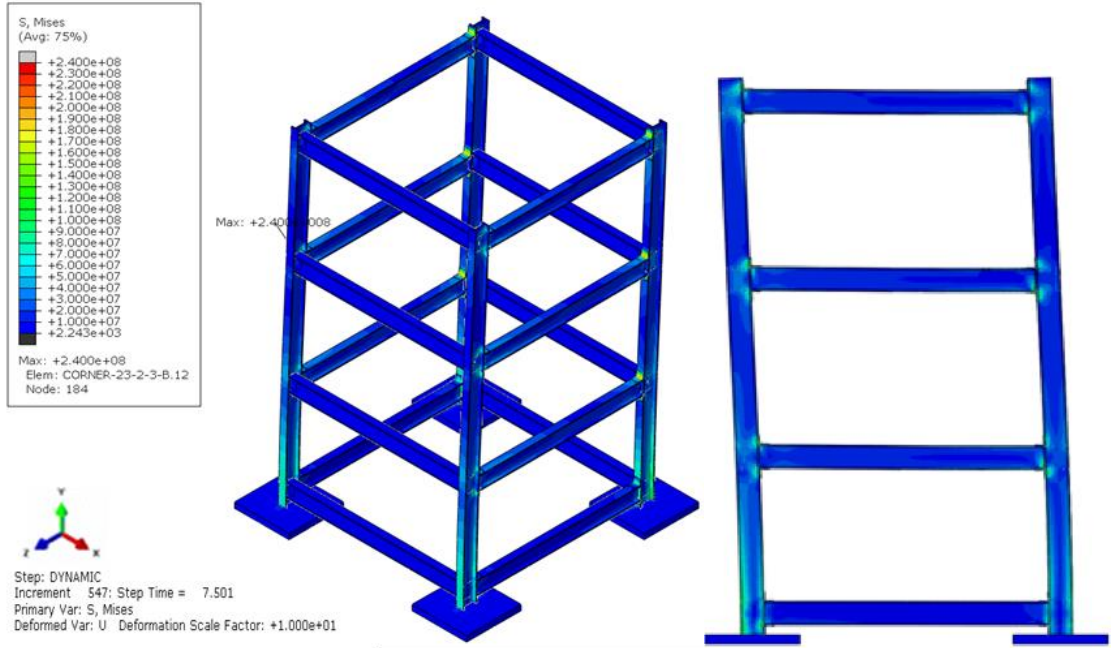
Şekil 4. 29 Mod Şekilleri

#### 4.11.2 Northridge %100 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları

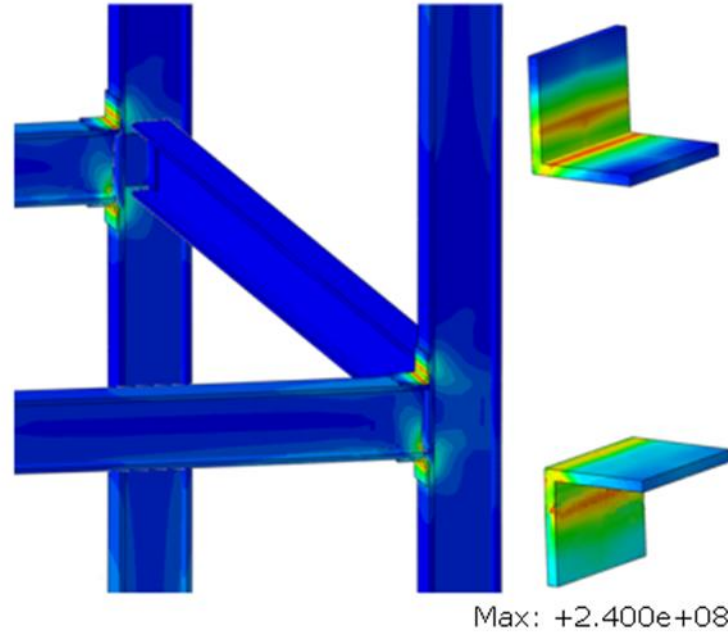
Northridge %100 deprem ivme kaydı ile dinamik analiz gerçekleştirildi. Northridge %100 deprem ivme kaydının 3.018 saniyesinde 1. Kat z doğrultusundaki birleşimin üst korniyer elemanında akma durumu başladı ve 3.141 saniyesine kadar bu bölgede gerçekleşti. Daha sonraki aşamalarda 2. Kat z doğrultusundaki birleşimin üst korniyer elemanında maksimum akma gerçekleşti ve analiz boyunca maksimum akma durumu bu bölgede gözlemlendi(Şekil 4. 30 ve Şekil 4. 32).

Çelik çerçeve numunesinde maksimum görelî kat ötelemeleri depremin 7.501 saniyesinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu saniye için Von-Mises gerilme dağılımları ve plastik deformasyon dağılımları maksimum değerlere çıktığı görülmektedir.

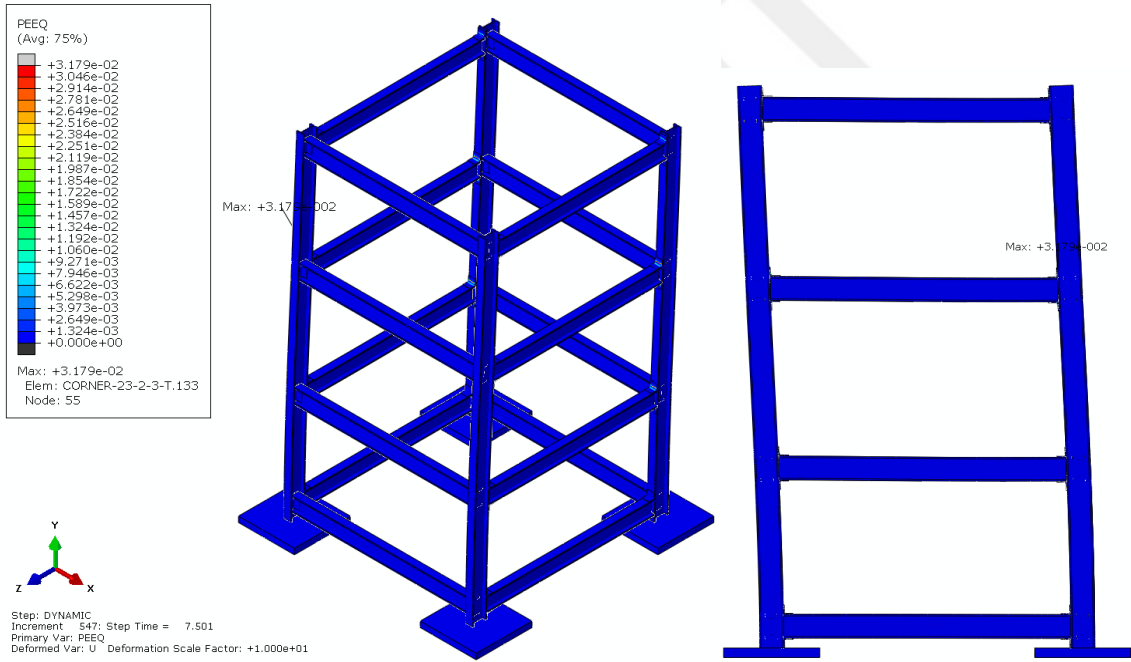
Şekil 4. 30 ve Şekil 4. 31’de görüldüğü üzere Von-Mises gerilme dağılımlarının maksimum değerleri kolon-plaka birleşimi ile kiriş-kolon birleşiminde yoğunlaşmaktadır. Plastik deformasyonların da kolon kiriş birleşiminde kullanılan korniyer elemanında oluştuğu görülmektedir (Şekil 4. 32 ve Şekil 4. 33). Üst korniyerde alt korniyere göre daha büyük plastik deformasyon oluşmuştur.



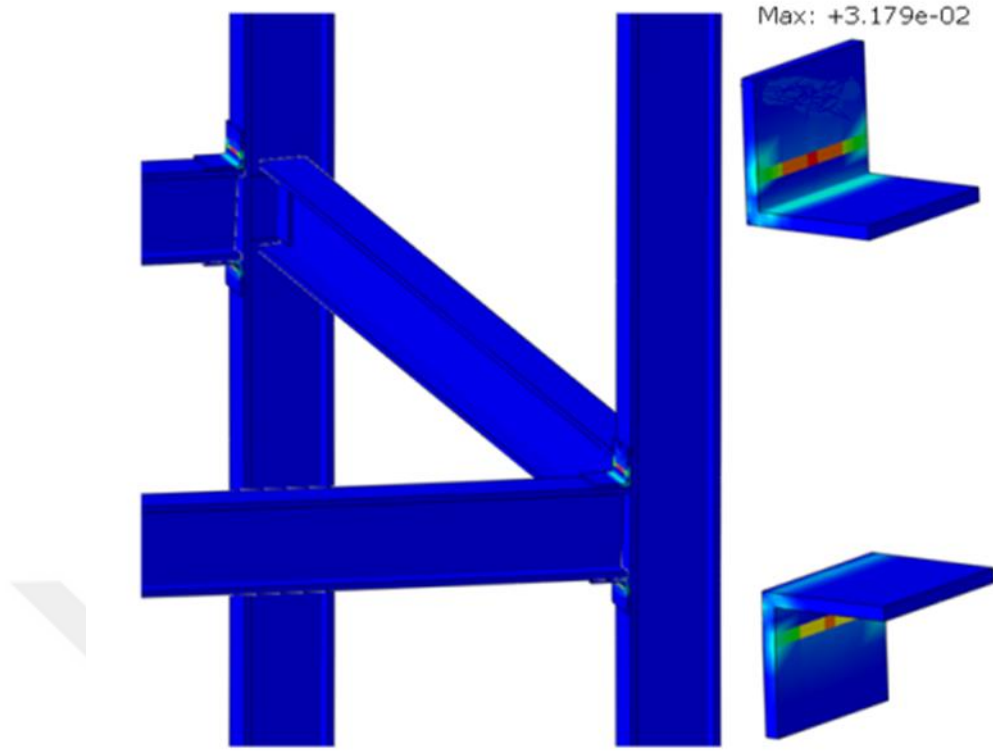
Şekil 4. 30 Çelik çerçevede Northridge %100 depremi ile elde edilen Von-Mises gerilme dağılımı



Şekil 4. 31 Northridge %100 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi Von-Mises gerilme dağılımı



Şekil 4. 32 Çelik çerçevede Northridge %100 depremi ile elde edilen plastik deformasyonları



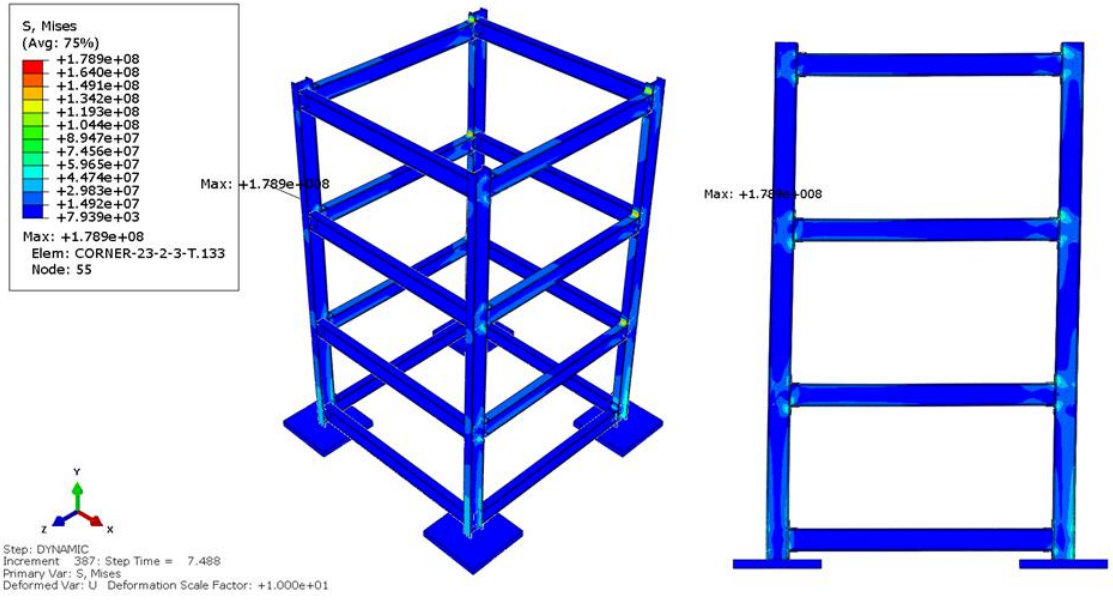
Şekil 4. 33 Çelik çerçevede Northridge %100 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi plastik deformasyonları

#### 4.11.3 Northridge %50 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları

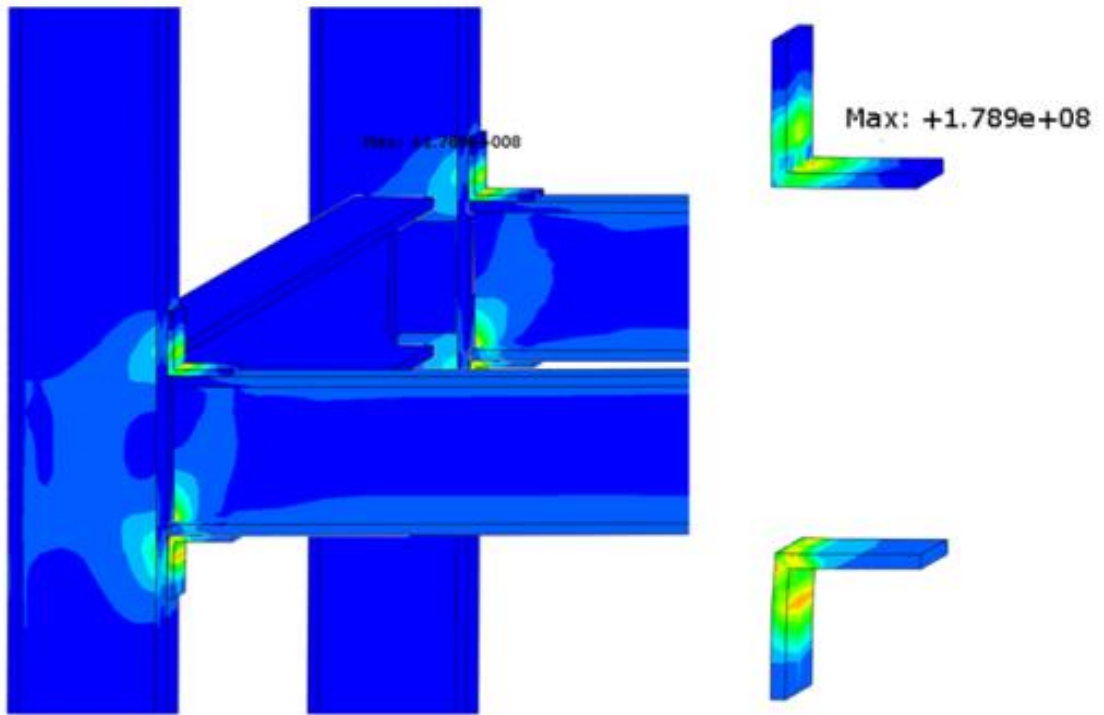
Northridge %50 deprem ivme kaydı ile dinamik analiz gerçekleştirildi. Northridge %50 deprem ivme kaydının 3.17 saniyesinde 2. Kat z doğrultusundaki birleşimin üst korniyer elemanında akma durumu başladı. Daha sonraki aşamalarda 2. Kat z doğrultusundaki birleşimlerde maksimum akma durumu gözlemlendi(Şekil 4. 34 ve Şekil 4. 36).

Çelik çerçeve numunesinde maksimum görelî kat ötelemeleri depremin 7.488 saniyesinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu saniye için Von-Mises gerilme dağılımları ve plastik deformasyon dağılımları maksimum değerlere çıktığı görülmektedir.

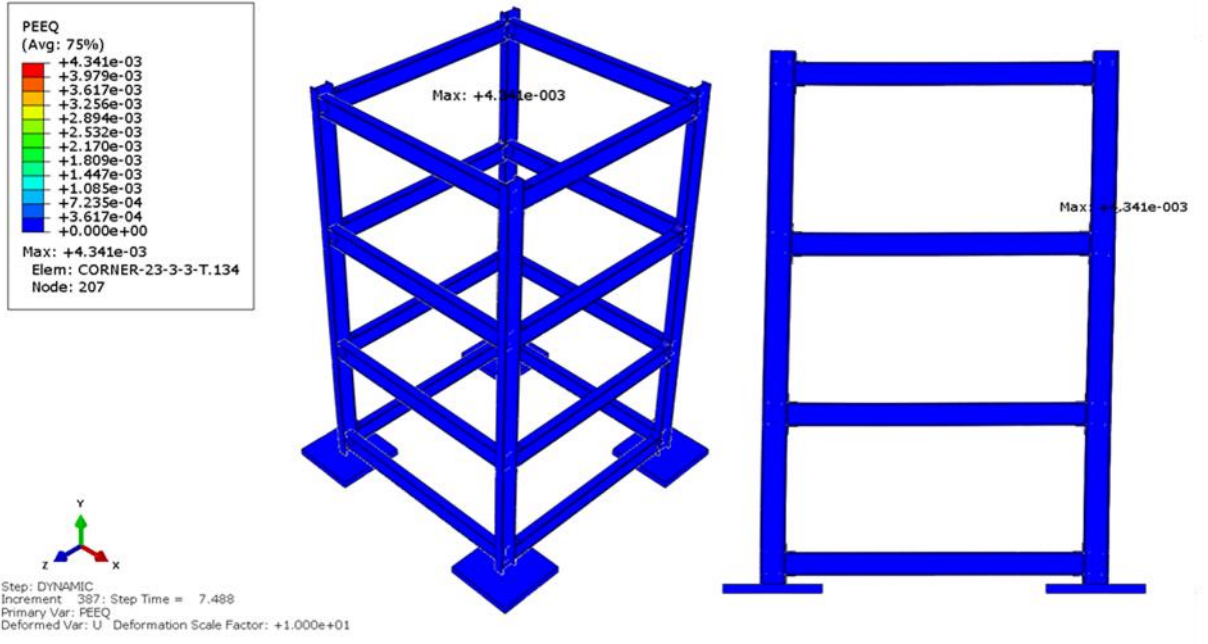
Şekil 4. 34 ve Şekil 4. 35’de görüldüğü üzere Von-Mises gerilme dağılımlarının maksimum değerleri kolon-plaka birleşimi ile kiriş-kolon birleşiminde yoğunlaşmaktadır. Plastik deformasyonların da birleşim bölgesinde olduğu görülmektedir (Şekil 4. 36 ve Şekil 4. 37).



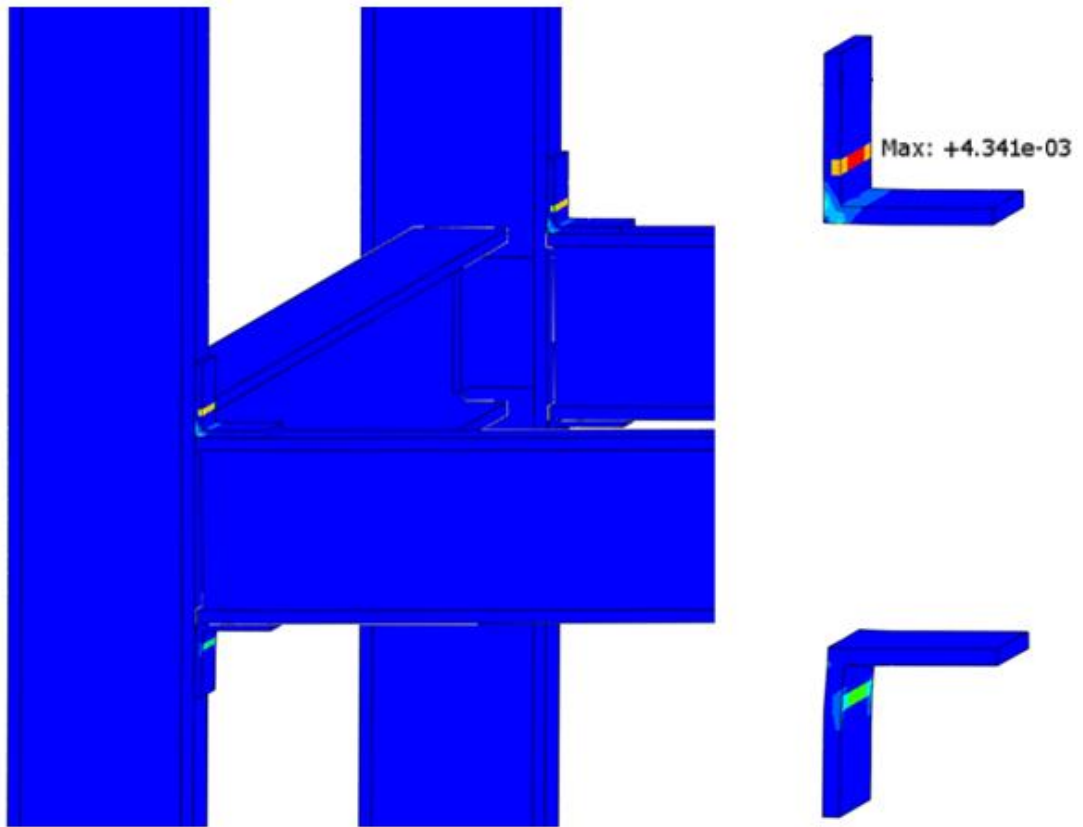
Şekil 4. 34 Çelik çerçevede Northridge %50 depremi ile elde edilen Von-Mises gerilme dağılımı



Şekil 4. 35 Northridge %50 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi Von-Mises gerilme dağılımı



Şekil 4. 36 Çelik çerçevede Northridge %50 depremi ile elde edilen plastik deformasyonları



Şekil 4. 37 Çelik çerçevede Northridge %50 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi plastik deformasyonları

Çizelge 4. 2 Maksimum gerilme ve şekil değiştirme değerleri

Northridge %100		Northridge %50	
Maksimum Gerilme (Mpa)	Maksimum Plastik Şekil Değişirme	Maksimum Gerilme (Mpa)	Maksimum Plastik Şekil Değişirme
240	0,03179	170,9	0,004341

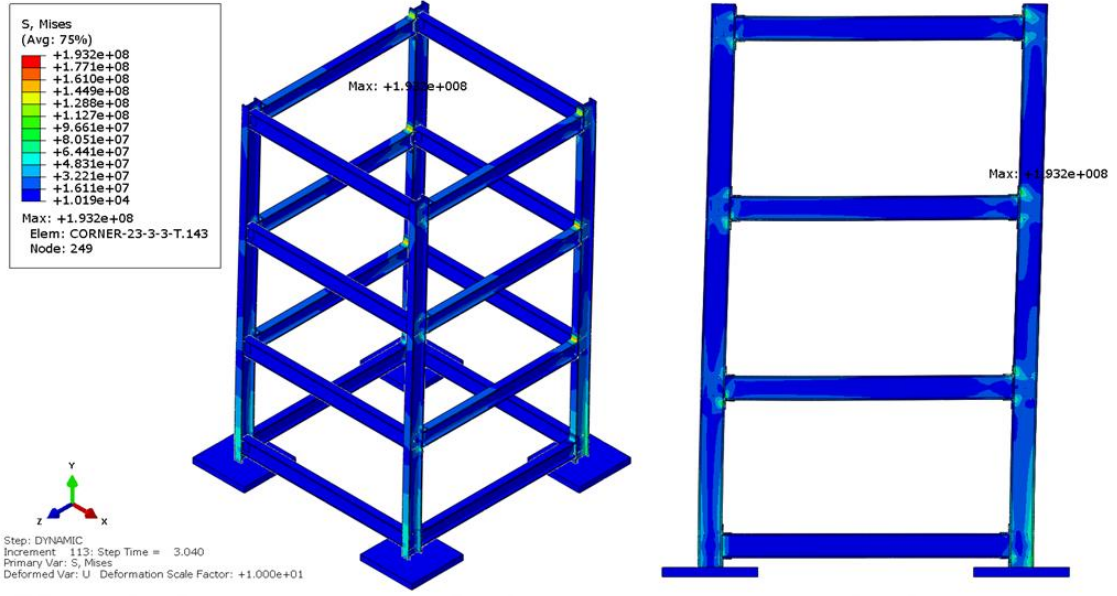
Northridge %100 deprem ivme kaydı ile elde edilen maksimum gerilme 240 Mpa ve 0,03179 şekil değiştirme değeri iken Northridge %50 deprem ivme kaydı ile elde edilen maksimum gerilme 170,9 Mpa ve 0,004341 şekil değiştirme değeri elde edilmiştir.

#### 4.11.4 Kocaeli %100 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları

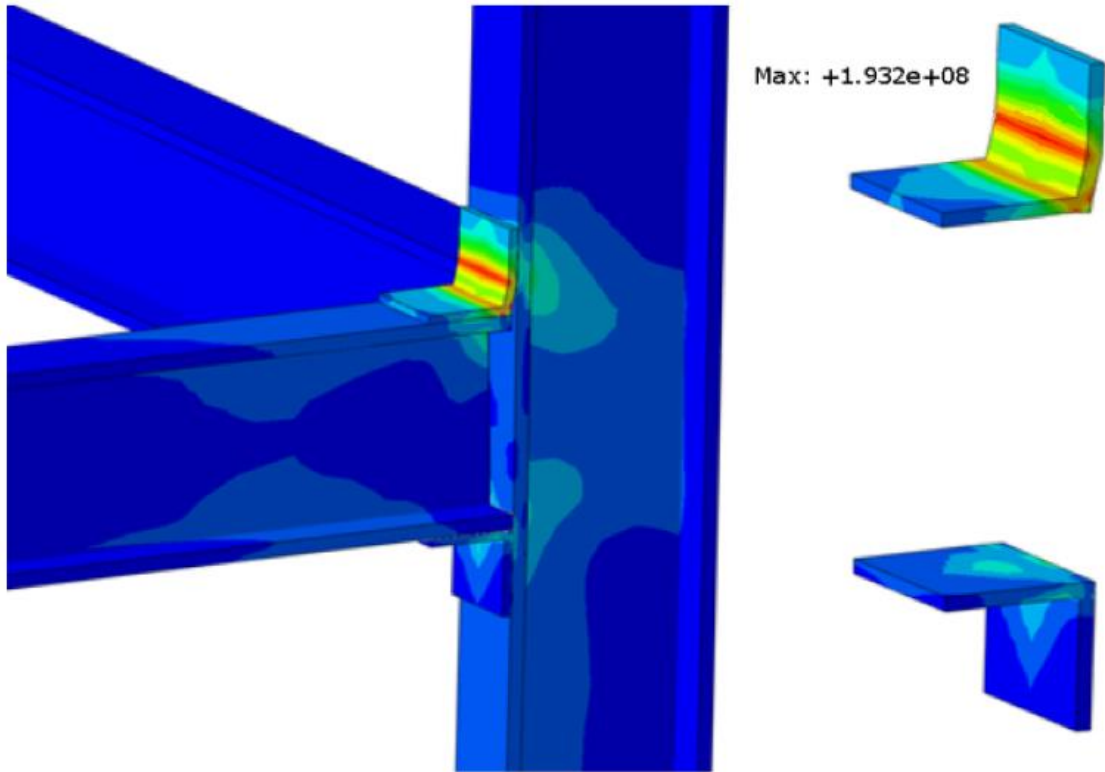
Kocaeli %100 deprem ivme kaydı ile dinamik analiz gerçekleştirildi. Kocaeli %100 deprem ivme kaydının 2,201 saniyesinde 2. Kat z doğrultusundaki birleşimin üst korniyer elemanında akma durumu başladı. Daha sonraki aşamalarda 1. Kat z doğrultusundaki birleşimlerde maksimum akma durumu gözlemlendi(Şekil 4. 34 ve Şekil 4. 36).

Çelik çerçeve numunesinde maksimum görelî kat ötelemeleri depremin 7.488 saniyesinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu saniye için Von-Mises gerilme dağılımları ve plastik deformasyon dağılımları maksimum değerlere çıktığı görülmektedir.

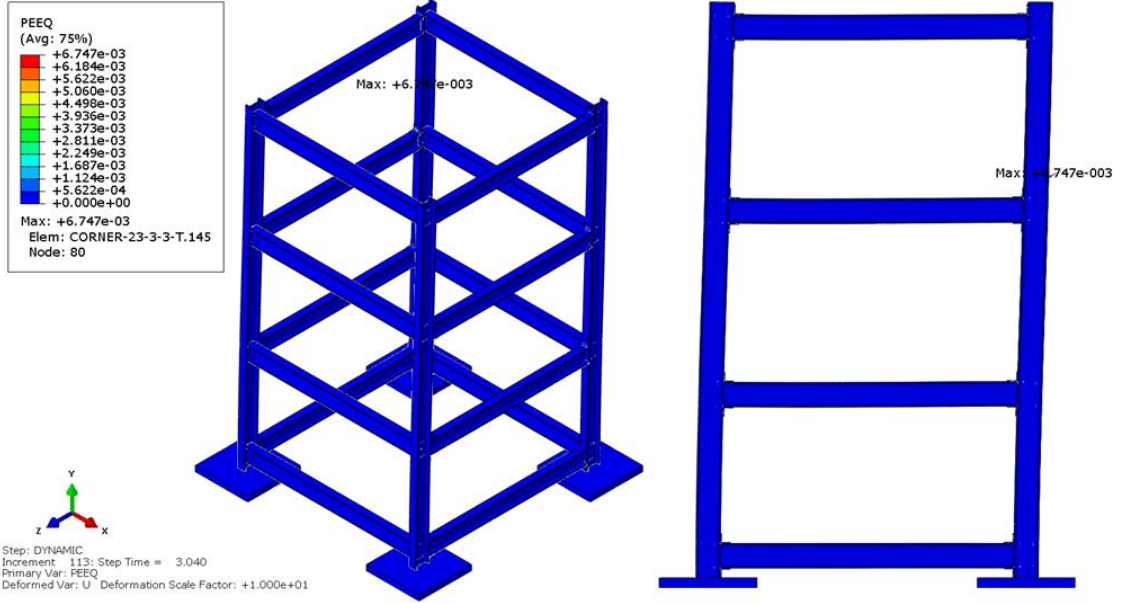
Şekil 4. 34 ve Şekil 4. 35’de görüldüğü üzere Von-Mises gerilme dağılımlarının maksimum değerleri kolon-plaka birleşimi ile kiriş-kolon birleşiminde yoğunlaşmaktadır. Plastik deformasyonların da birleşim bölgesinde olduğu görülmektedir (Şekil 4. 36 ve Şekil 4. 37).



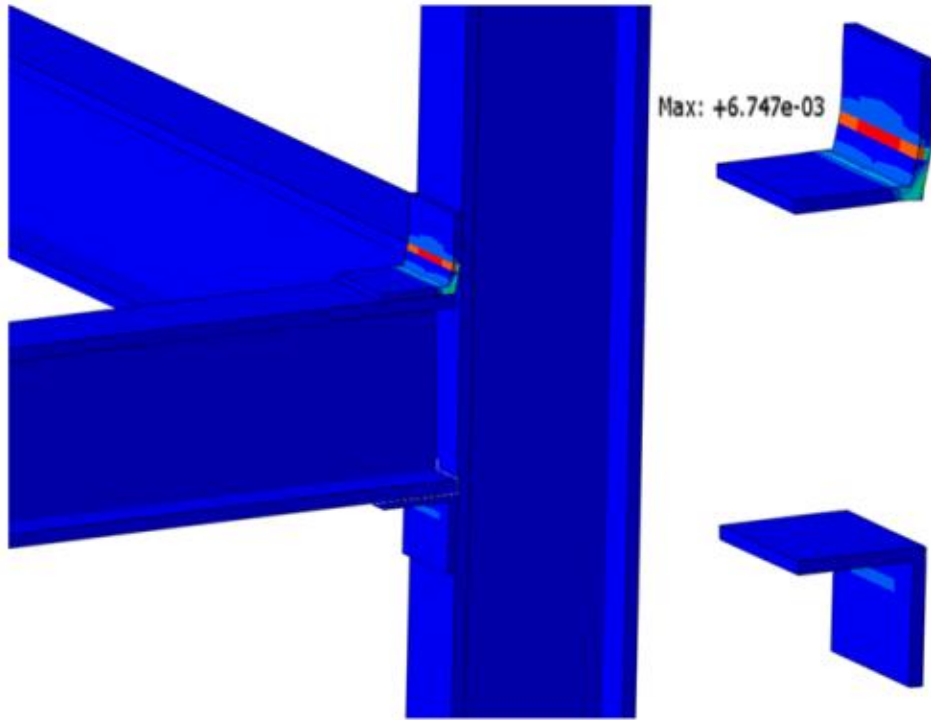
Şekil 4. 38 Çelik çerçevede Kocaeli %100 depremi ile elde edilen Von-Mises gerilme dağılımı



Şekil 4. 39 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi Von-Mises gerilme dağılımı



Şekil 4. 40 Çelik çerçevede Kocaeli %100 depremi ile elde edilen plastik deformasyonları



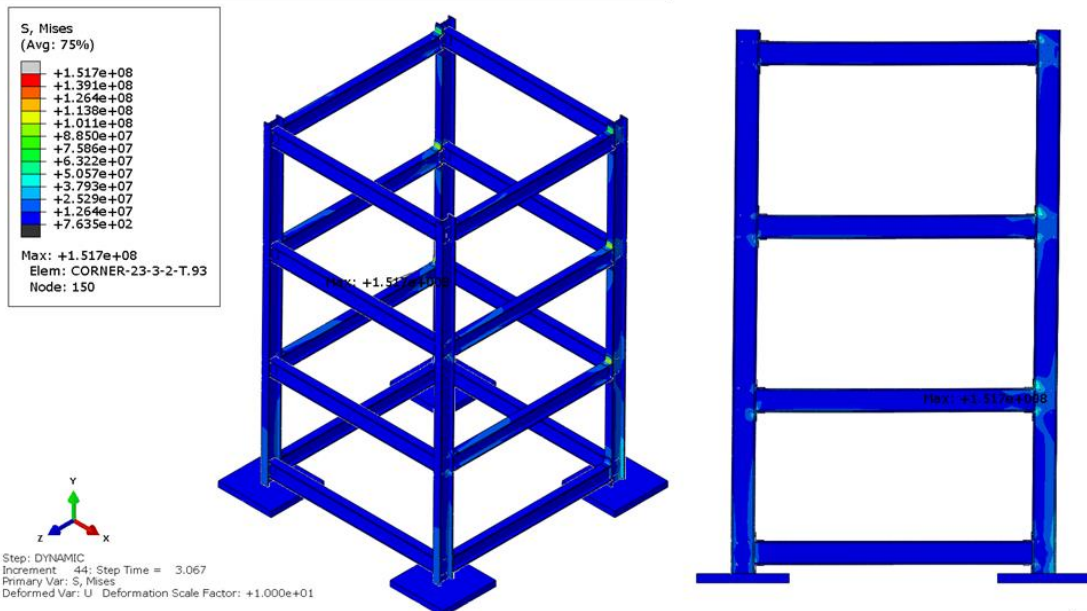
Şekil 4. 41 Çelik çerçevede Kocaeli %100 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi plastik deformasyonları

#### 4.11.5 Kocaeli %50 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları

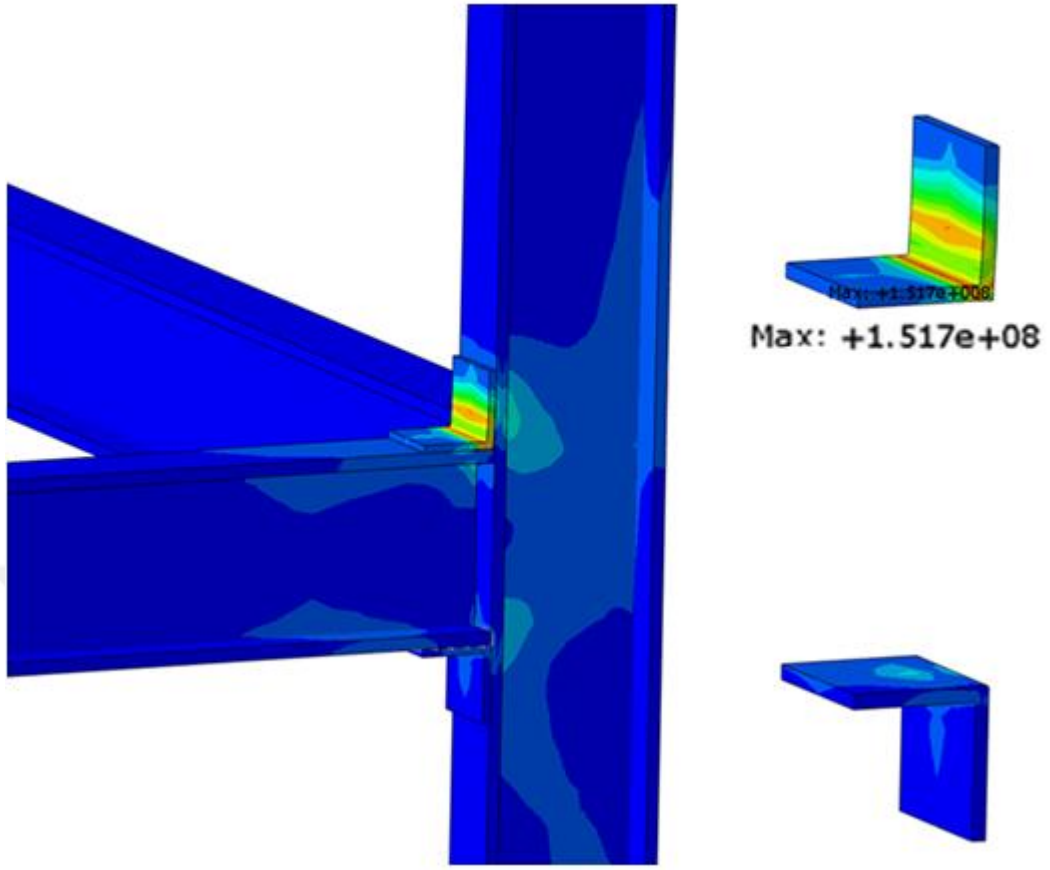
Kocaeli %50 deprem ivme kaydı ile dinamik analiz gerçekleştirildi. Kocaeli %50 deprem ivme kaydının 3.059 saniyesinde 2. Kat z doğrultusundaki birleşimin üst korniyer elemanında akma durumu başladı. Daha sonraki aşamalarda 1. Kat z doğrultusundaki birleşimlerde maksimum akma durumu gözlemlendi.

Çelik çerçeve numunesinde maksimum görelî kat ötelemeleri depremin 3,067 saniyesinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu saniye için Von-Mises gerilme dağılımları ve plastik deformasyon dağılımları maksimum değerlere çıktığı görülmektedir.

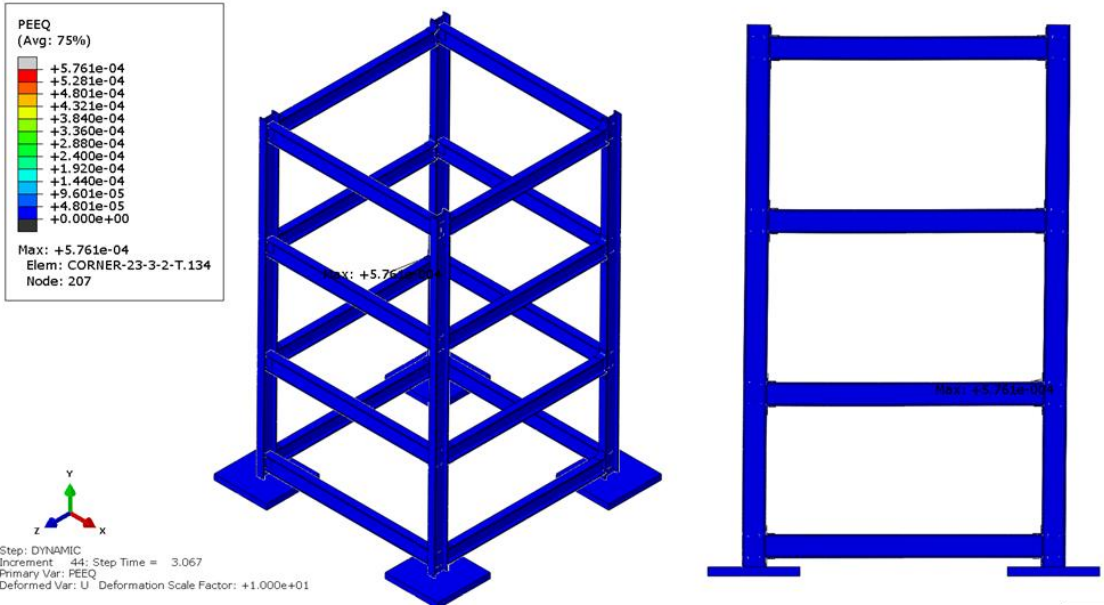
Şekil 4. 42 ve Şekil 4. 43’de görüldüğü üzere Von-Mises gerilme dağılımlarının maksimum değerleri kolon-plaka birleşimi ile kiriş-kolon birleşiminde yoğunlaşmaktadır. Plastik deformasyonların da birleşim bölgesinde oluştuğu görülmektedir (Şekil 4. 44 ve Şekil 4. 45).



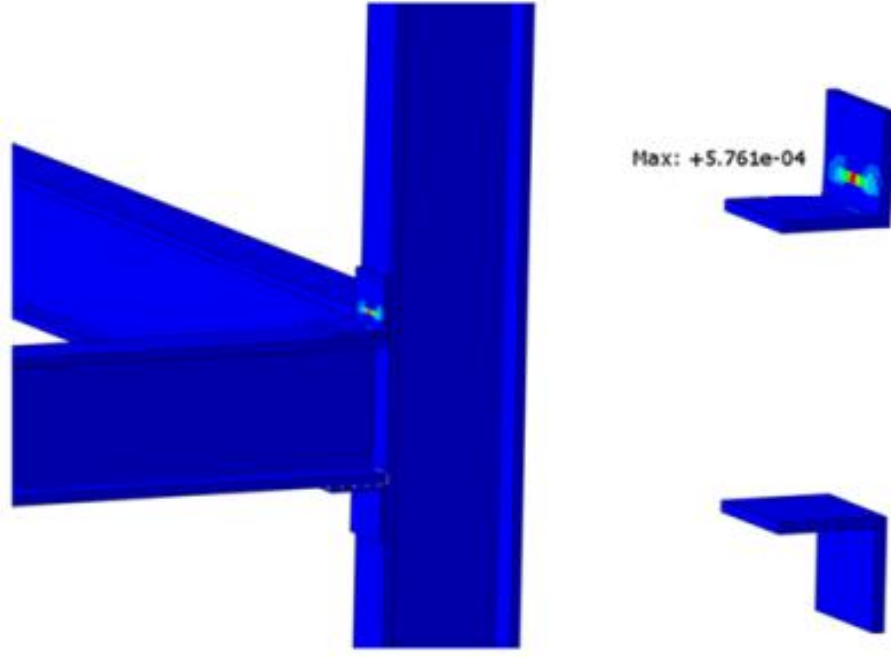
Şekil 4. 42 Çelik çerçevede Kocaeli %50 depremi ile elde edilen Von-Mises gerilme dağılımı



Şekil 4. 43 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi Von-Mises gerilme dağılımı



Şekil 4. 44 Çelik çerçevede Kocaeli %50 depremi ile elde edilen plastik deformasyonları



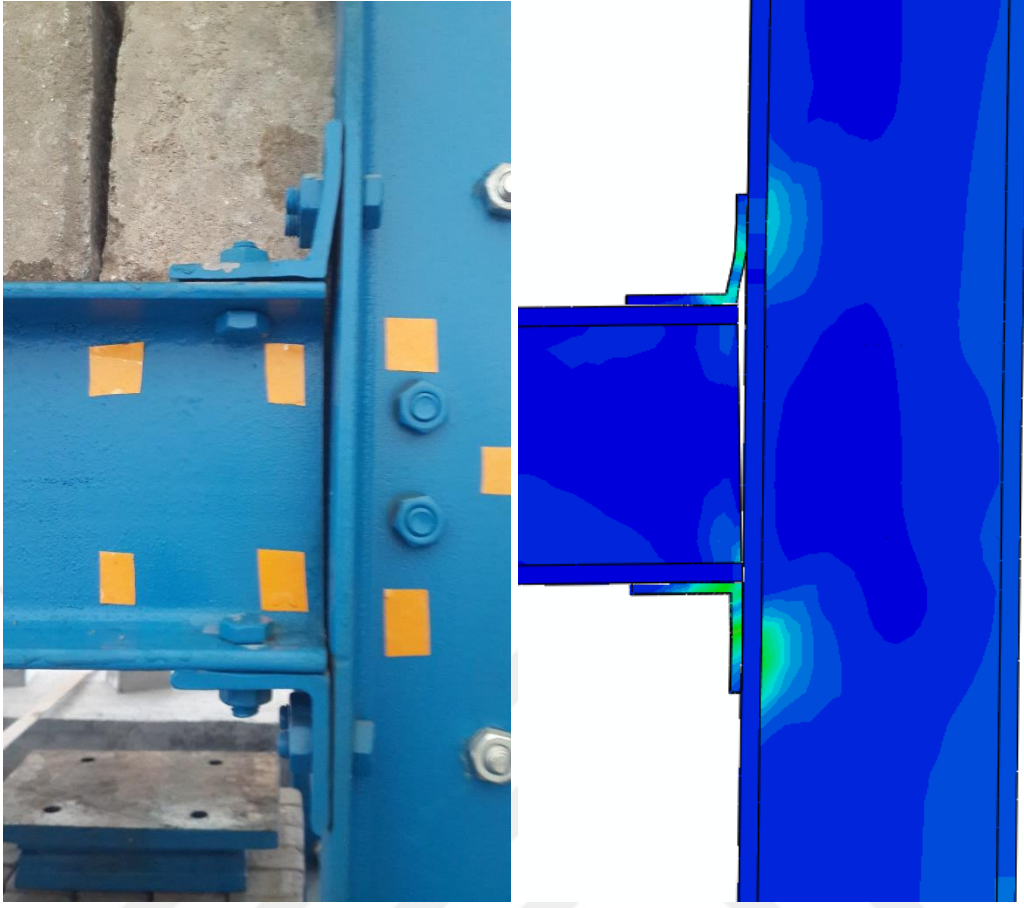
Şekil 4. 45 Çelik çerçevede Kocaeli %50 depremi ile elde edilen birleşim bölgesi plastik deformasyonları

Çizelge 4. 3 Maksimum gerilme ve şekil değiştirme değerleri

Kocaeli %100		Kocaeli %50	
Maksimum Gerilme (Mpa)	Maksimum Plastik Şekil değiştirme	Maksimum Gerilme (Mpa)	Maksimum Plastik Şekil değiştirme
193,2	0,006747	151,7	0,0005761

Kocaeli %100 deprem ivme kaydı ile elde edilen maksimum gerilme 193,2 Mpa ve 0,006747 şekil değiştirme değeri iken Kocaeli %50 deprem ivme kaydı ile elde edilen maksimum gerilme 151,7 Mpa ve 0,0005761 şekil değiştirme değeri elde edilmiştir.

Şekil 4. 46'da görüldüğü üzere çelik çerçeve ve sayısal model birleşim deformasyonu birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

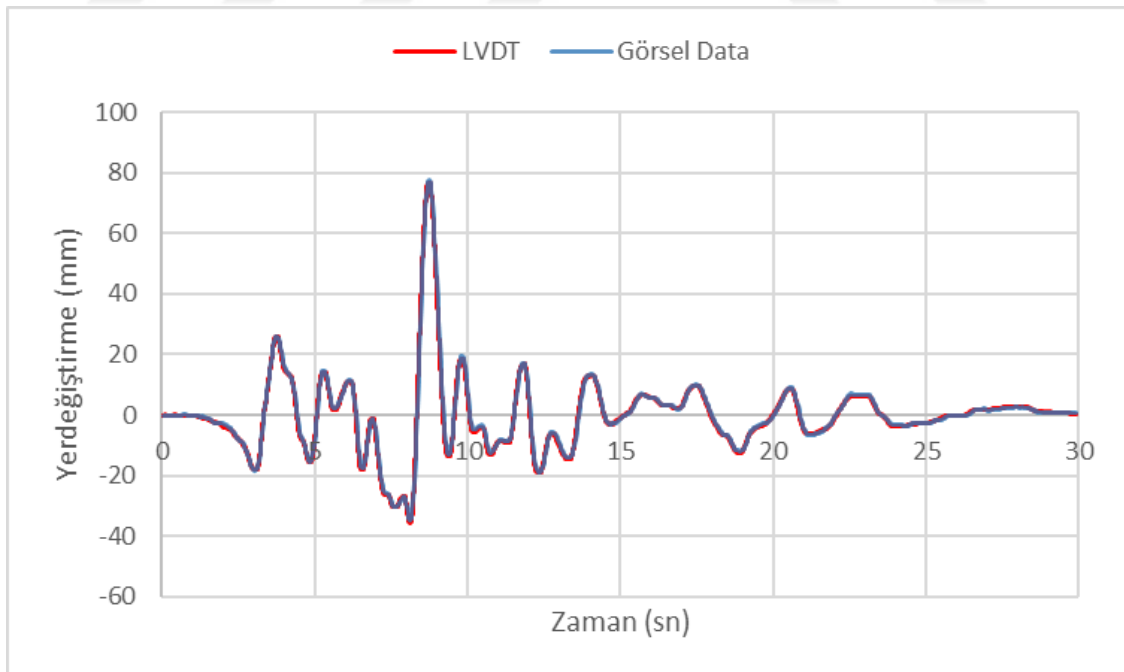


Şekil 4. 46 Çelik çerçeve ve sayısal model birleşim deformasyonu

## SONUÇLARIN DEĞERLENDİRMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

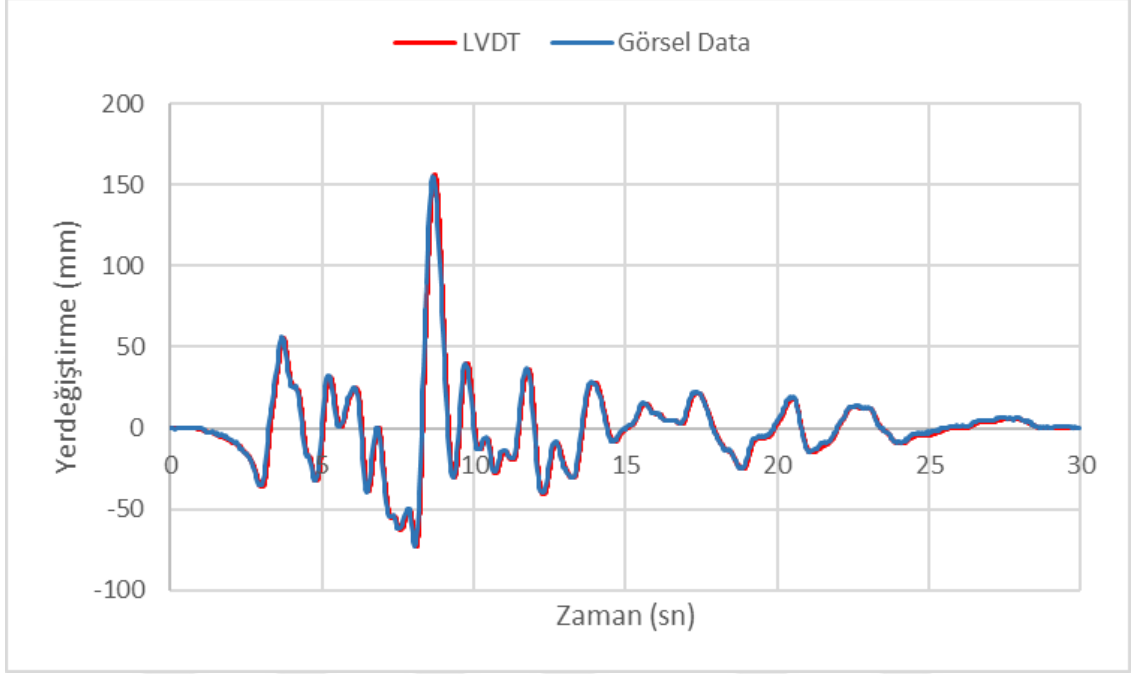
## 5.1 Sarsma Masası Deneyi ve Görüntü İşleme Tekniği İle Elde Edilen Dinamik Parametrelerin Karşılaştırılması

Sarma masası üzerindeki ölçümlerde piksel/mm oranı (PPM), sarsma masası üzerindeki herhangi iki montaj deliğinin arası piksel cinsinden görüntüden belirlenip, mm cinsinden karşılığı ile oranlanarak bulunmuştur.



Şekil 5. 1 Northridge %50 deprem kaydı için sarsma tablasının analizi

Şekil 5. 1'de %50 ölçekli Northridge deprem hareketi altında sarsma tablasına uygulanan yer değiştirme verileri ile Image Analysis programından hesaplanan yer değiştirme değerleri zamana bağlı olarak karşılaştırılmıştır. İki grafiğin korelasyon katsayısı 0.9971 olarak bulunmuştur.



Şekil 5. 2 Northridge %100 deprem kaydı için sarsma tablasının analizi

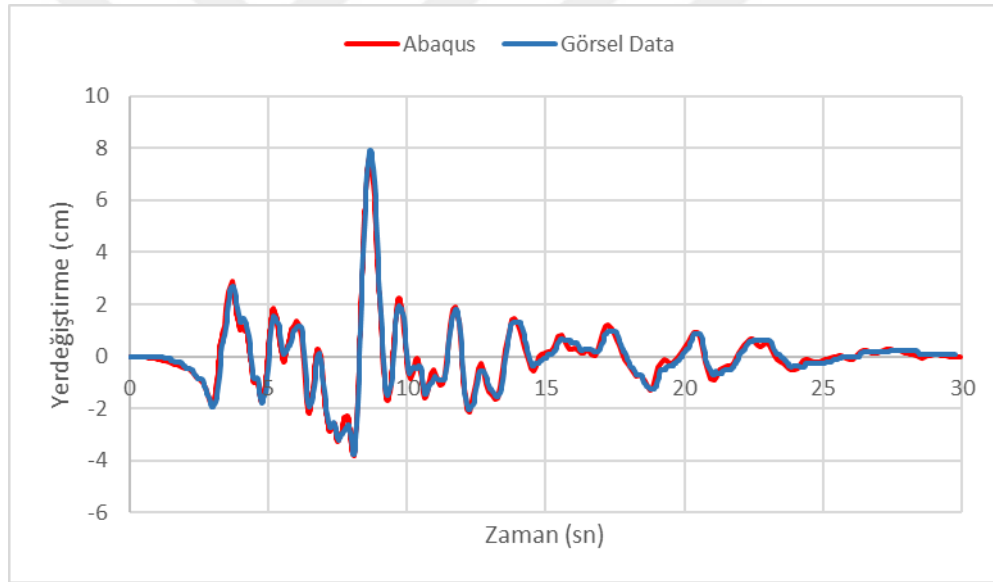
Şekil 5. 2'da görüldüğü üzere %100 ölçekli Northridge deprem kaydının sarsma tablasına uyguladığı yer değiştirme verileri ile Image Analysis programından elde edilen verilerin yer değiştirme-zaman grafikleri karşılaştırılmıştır. İki grafiğin korelasyon katsayısı 0.9982 olarak bulunmuştur.

Görüldüğü üzere sarsma masası üzerinden alınan yer değiştirmeler ile görüntüden hesaplanan yer değiştirmeler arasında %0.1'in altında bir hata oranı bulunmuştur. Görüntü işleme tekniği ile istatistiksel olarak hesaplanan dinamik parametrelerin doğruluğu bu şekilde kanıtlanmıştır. Bundan sonraki aşamada çelik çerçeve numunesi Abaqus programında modellenmiş ve buradan alınan veriler ile görüntü işleme tekniği ile elde edilen yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır.

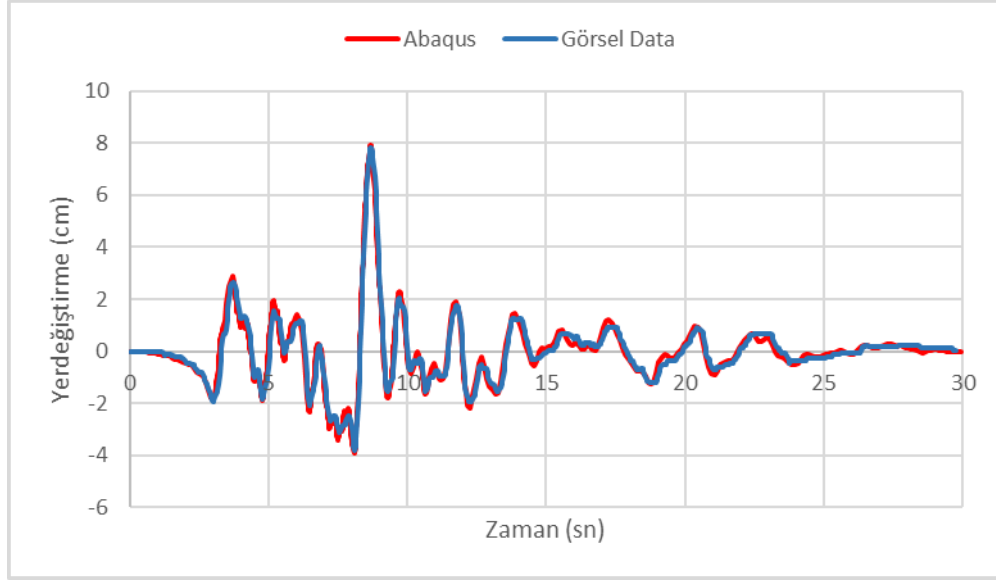
## 5.2 Sayısal Analizlerde Elde Edilen Dinamik Parametrelerin Görüntü İşleme Tekniği İle Karşılaştırılması

### 5.2.1 Northridge %50 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları ile Görsel İşleme Tekniğinin Karşılaştırılması

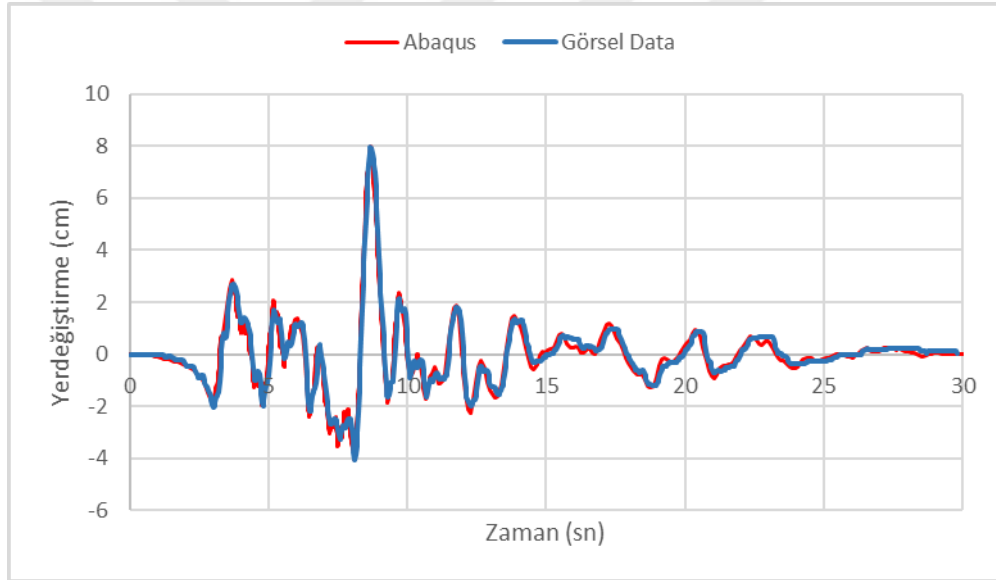
Tüm ölçümlerde piksel/mm oranı (PPM), bulonlar arası mesafe piksel cinsinden görüntüden belirlenip, mm cinsinden karşılığı ile oranlanarak bulunmuştur. Referans şablonun kameranın merkez noktasından uzaklığı ve açısı ile PPM değeri de değişeceği için hesaplamalarda en yakın bulonlar arası mesafe ile PPM değeri bulunmuştur. PPM değeri 2.1 mm/piksel olarak belirlenmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere Northridge %50 depremi için 1'den 3'üncü kata kadar elde edilen Abaqus ve görsel data grafiklerinin korelasyon katsayısı sırasıyla 0,9978, 0,9942 ve 0,9855 olarak bulunmuştur.



Şekil 5. 3 Northridge %50 deprem kaydı için 1. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması



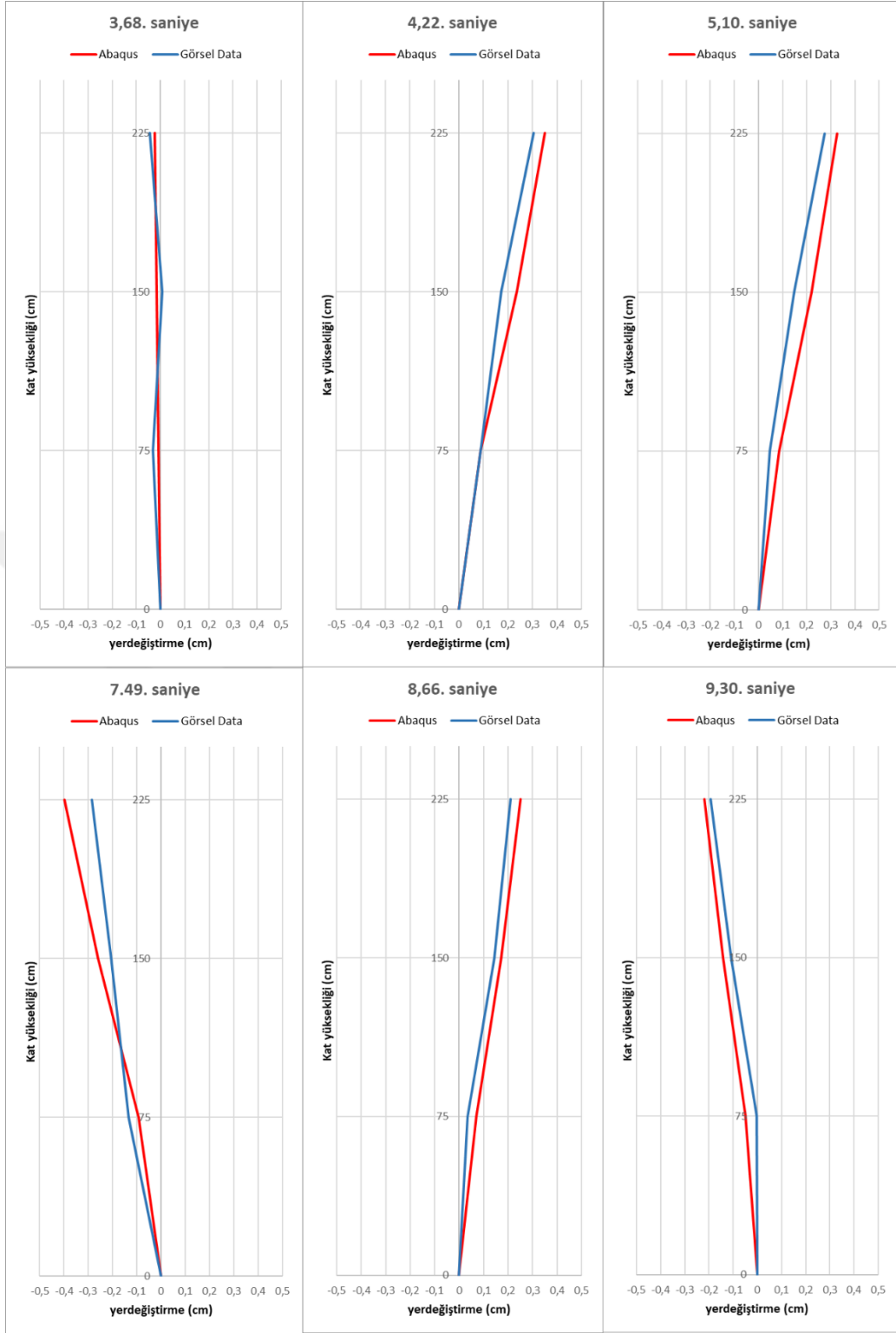
Şekil 5. 4 Northridge %50 deprem kaydı için 2. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması



Şekil 5. 5 Northridge %50 deprem kaydı için 3. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması

Şekil 5. 6'da tüm sistemin taban yer değiştirmesine göre yaptığı görelî ötelemeler verilmiştir. Özellikle maksimum görelî ötelemenin olduğu zamanlar seçilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere 3.68. saniyede Abaqus modeli ile görüntüden alınan görelî kat ötelemeleri birbirinden farklıdır. Deprem ilerleyen zamanlarında Abaqus modeli ile görsel datalar daha uyumlu hale gelmiştir.

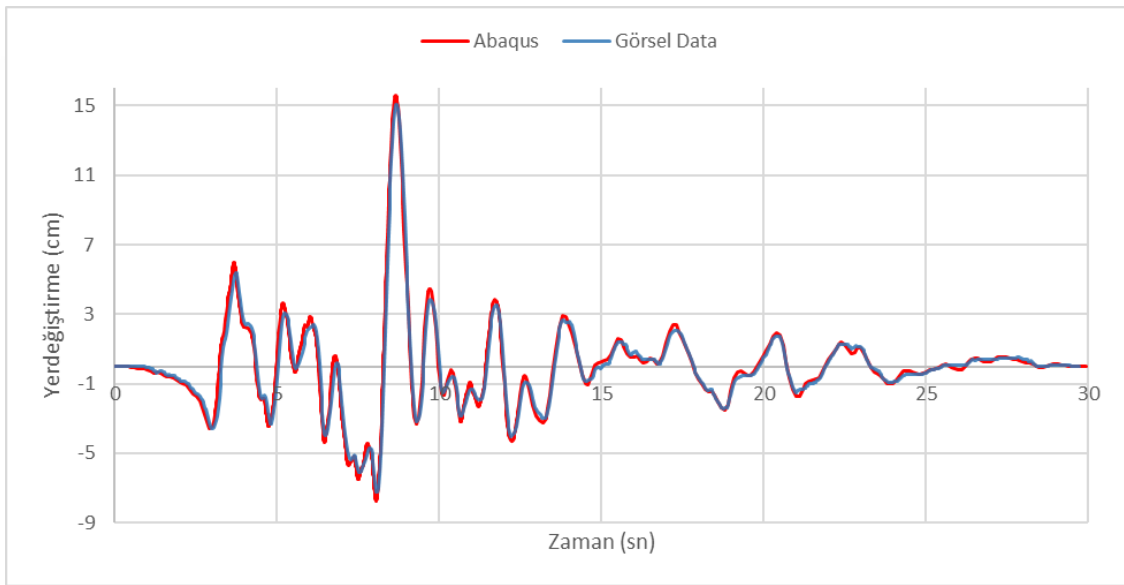
Şekil 5. 6'daki tabana göre kat ötelemeleri 1. katın diğer katlara göre daha rijit olduğu görülmektedir. 2. ve 3. katta görelî kat ötelemeleri hemen hemen aynıdır.



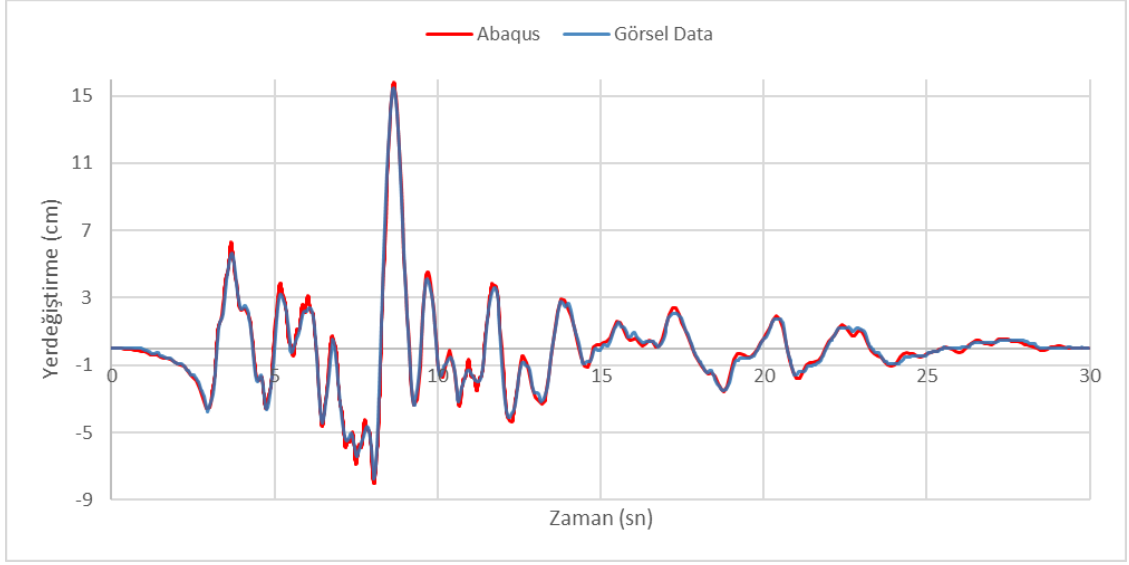
Şekil 5. 6 Northridge %50 deprem kaydı için tüm sistemin dinamik yer değıştirme parametrelerinin karşılaştırılması

### 5.2.2 Northridge %100 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları ile Görsel İşleme Tekniğinin Karşılaştırılması

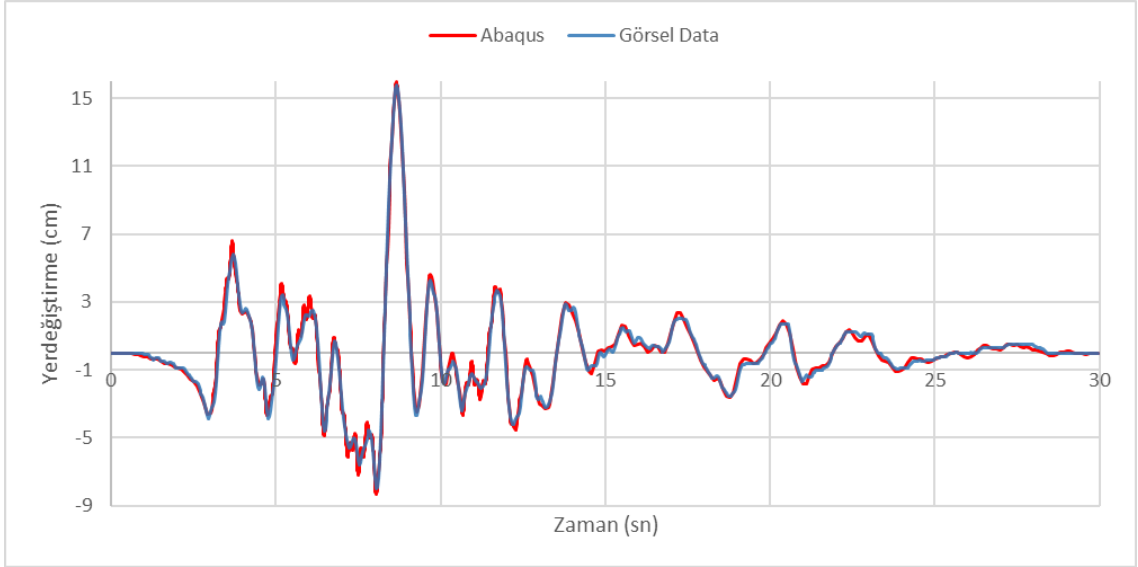
Tüm ölçümlerde piksel/mm oranı (PPM), bulonlar arası mesafe piksel cinsinden görüntüden belirlenip, mm cinsinden karşılığı ile oranlanarak bulunmuştur. Referans şablonun kameranin merkez noktasından uzaklığı ve açısı ile PPM değeri de değişeceği için hesaplamalarda en yakın bulonlar arası mesafe ile PPM değeri bulunmuştur. PPM değeri 2.1 mm/piksel olarak belirlenmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere Northridge %100 depremi için 1'den 3'üncü kata kadar elde edilen Abaqus ve görsel data grafiklerinin korelasyon katsayısı sırasıyla 0,9955, 0,9915 ve 0,9852 olarak bulunmuştur.



Şekil 5. 7 Northridge %100 deprem kaydı için 1. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması

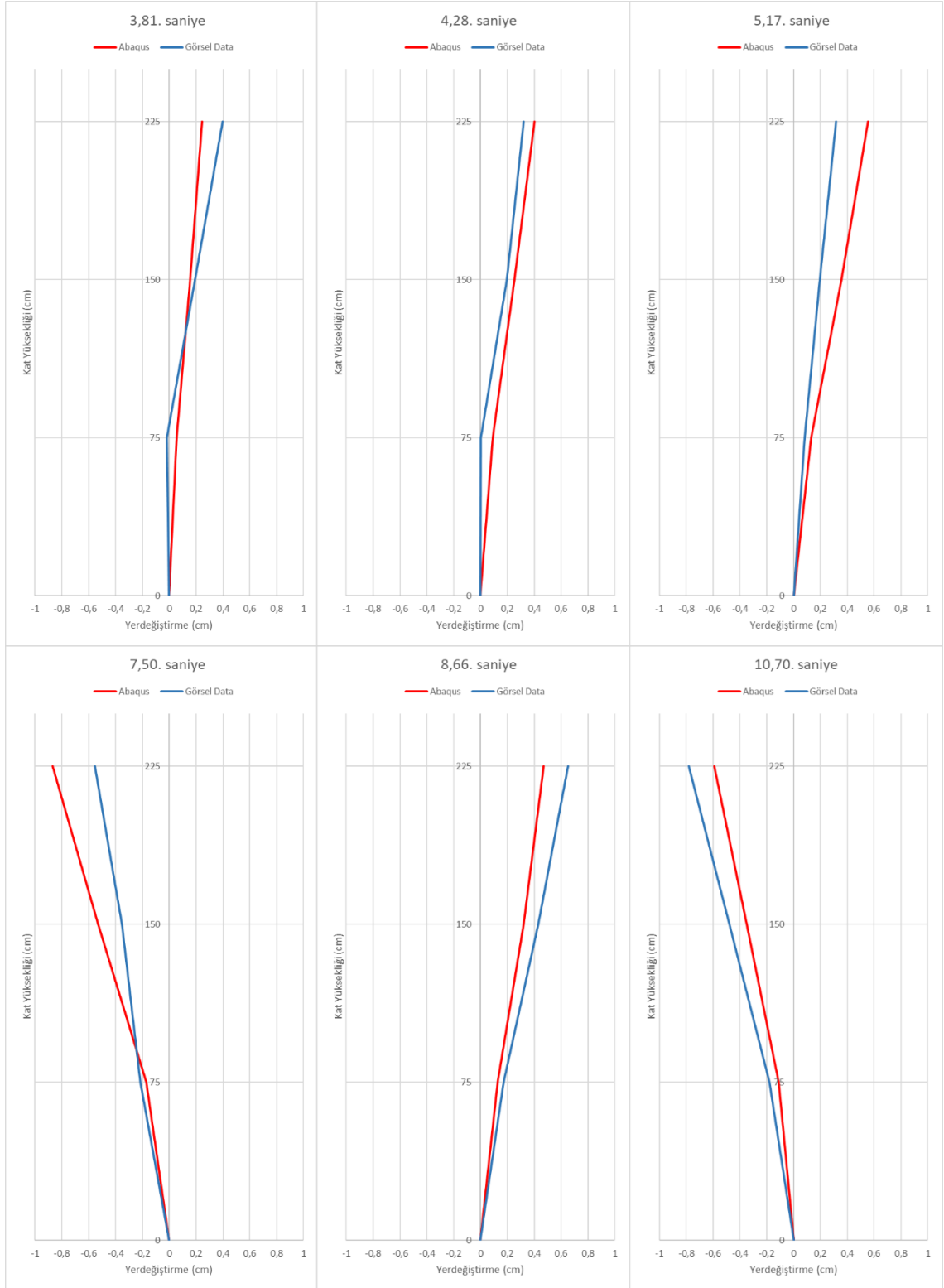


Şekil 5. 8 Northridge %100 deprem kaydı için 2. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması



Şekil 5. 9 Northridge %100 deprem kaydı için 3. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması

Şekil 5. 10'da tüm sistemin taban yer değiştirmesine göre yaptığı görelî ötelemeler verilmiştir. Özellikle maksimum görelî ötelemenin olduğu zamanlarda seçilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere genel olarak tabana göre görelî kat ötelemeleri uyumlu olmakla birlikte sayısal model ile deneysel model arasında Northridge %50 depremine göre görelî ötelemelerdeki fark daha fazladır.

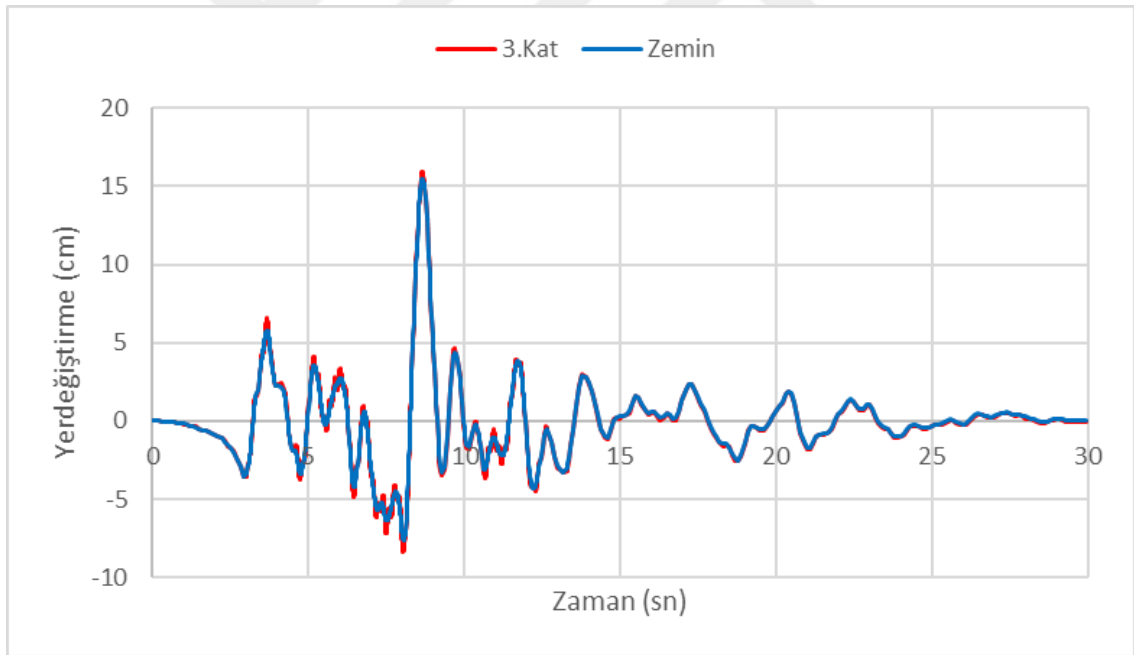


Şekil 5. 10 Northridge %100 deprem kaydı için tüm sistemin dinamik yer değiştirme parametrelerinin karşılaştırılması

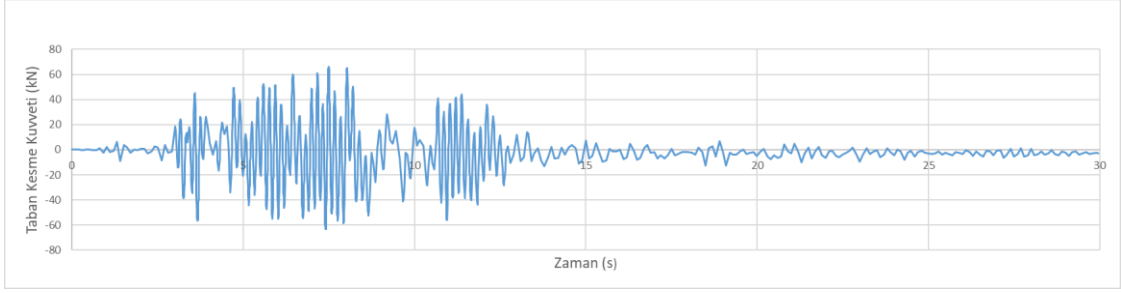
### 5.3 Sayısal Analizlerde Elde Edilen Dinamik Parametrelerin Değerlendirilmesi

#### 5.3.1 Northridge %100 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları

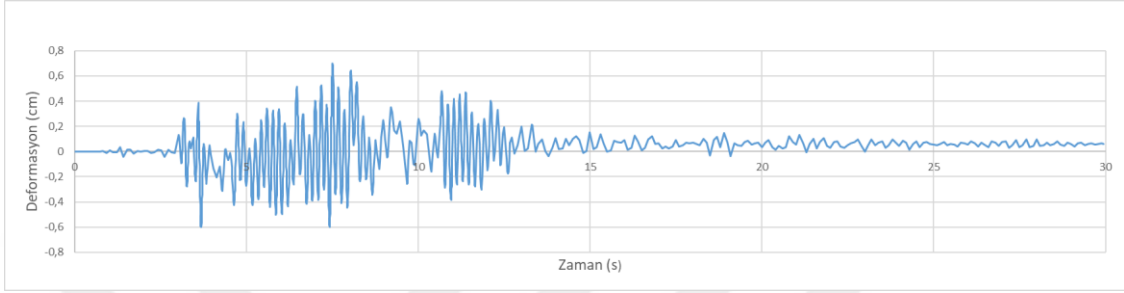
Şekil 5. 11’da görüldüğü üzere çelik çerçeve tepe yer değiştirme ile zemin yer değiştirme grafiği verilmiştir. Aynı zamanda tepe yer değiştirmesinden taban yer değiştirmesi çıkarılarak elde edilen deformasyonun grafiği Şekil 5. 13’de verilmiştir. Northridge %100 depremi ile taban da oluşan taban kesme kuvveti Şekil 5. 12’de verilmiştir. Çelik çerçeve sisteminin yatay rijitliğini hesaplamak için taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği Şekil 5. 14’de sunulmuştur. Kat rijitliklerini hesaplamak amacıyla her kat için kat kolonun tabanında oluşan kesme kuvveti-görelî kat ötelemesi grafiği çizilmiştir(Şekil 5. 15, Şekil 5. 16 ve Şekil 5. 17). Ayrıca kirişlerin dönme kapasitesini değerlendirebilmek için moment-dönme grafikleri çizilmiştir (Şekil 5. 18, Şekil 5. 19 ve Şekil 5. 20).



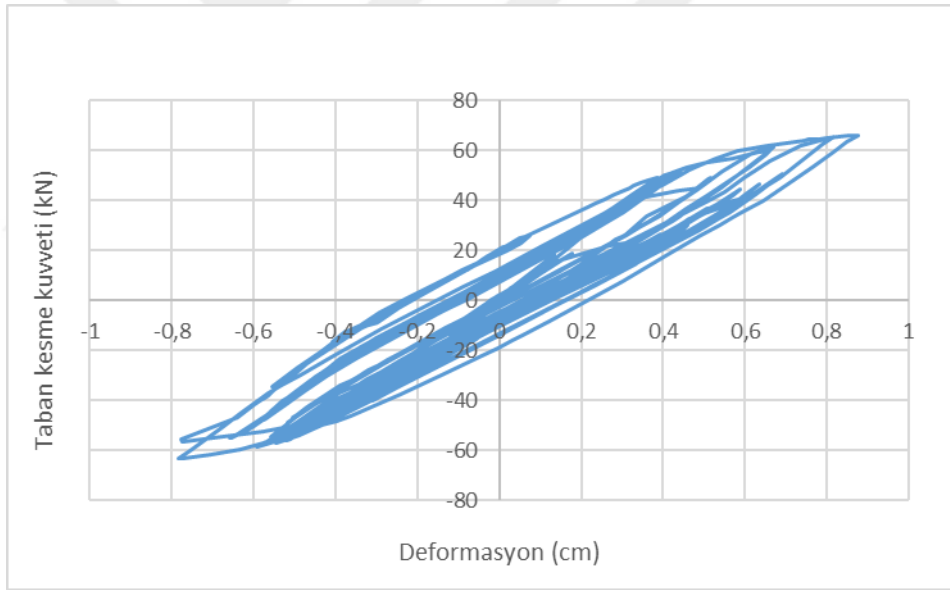
Şekil 5. 11 Northridge %100 depremi ile elde edilen zemin ve 3. kat yer değiştirme-zaman grafiği



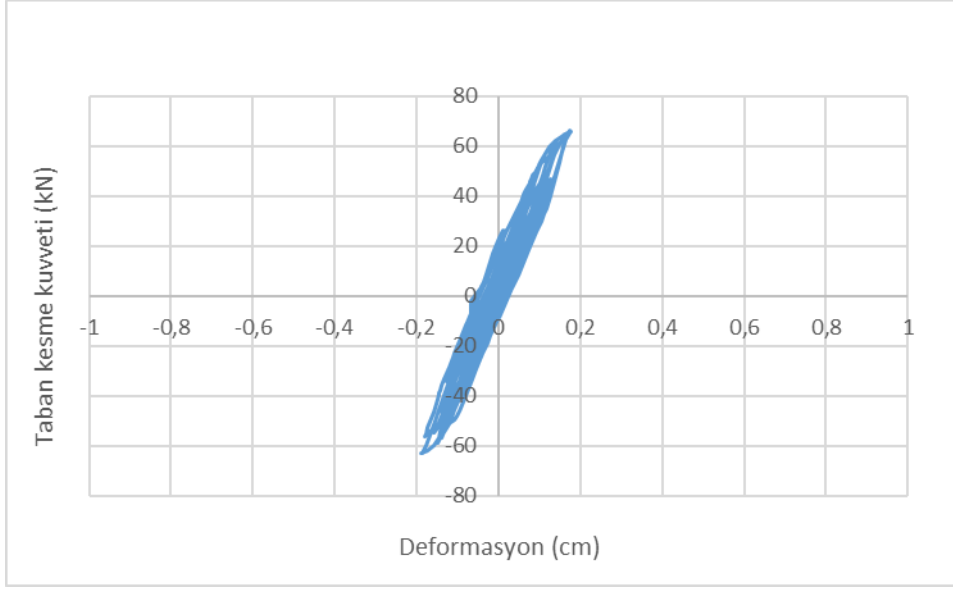
Şekil 5. 12 Northridge %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-zaman grafiği



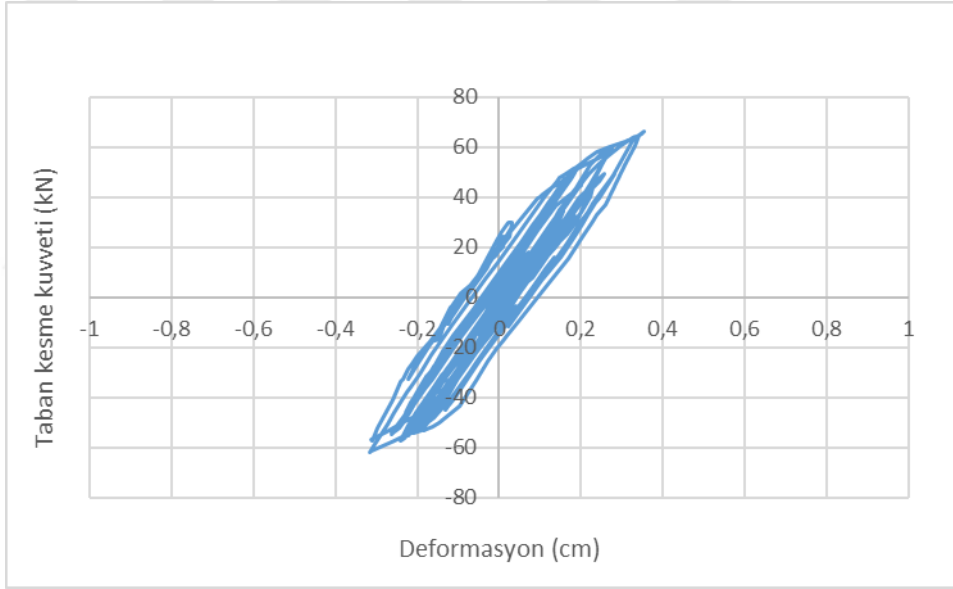
Şekil 5. 13 Northridge %100 depremi ile elde edilen deformasyon-zaman grafiği



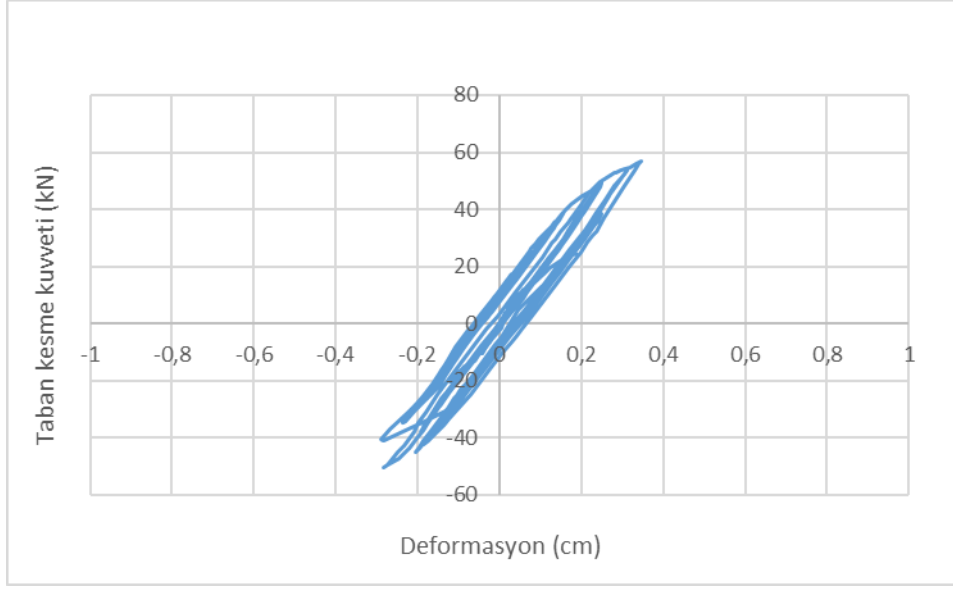
Şekil 5. 14 Northridge %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (tüm sistem)



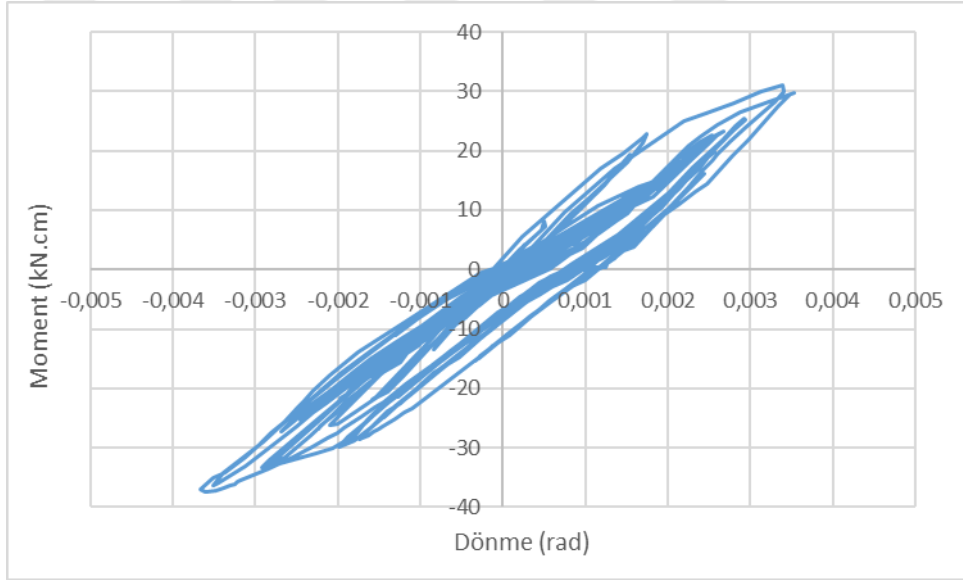
Şekil 5. 15 Northridge %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (1. Kat)



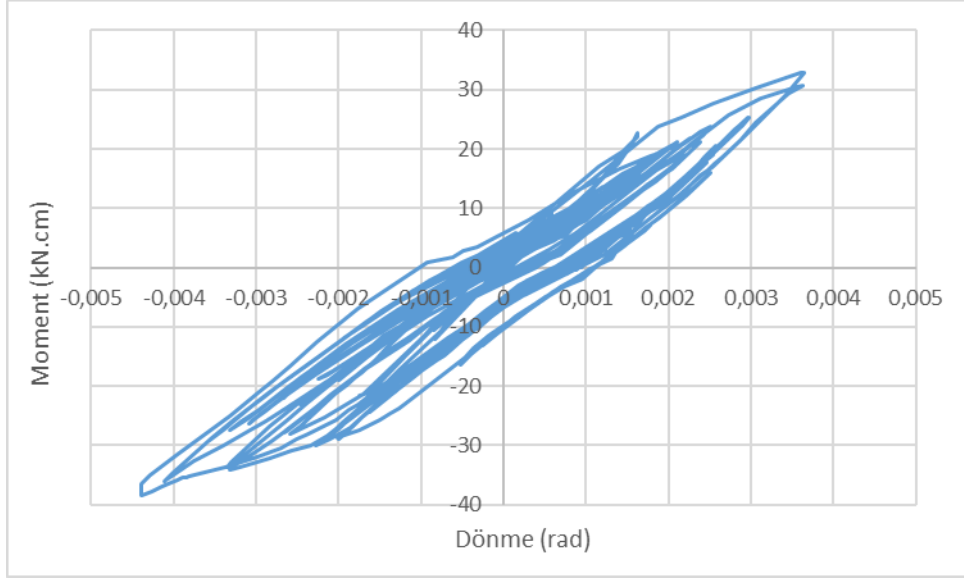
Şekil 5. 16 Northridge %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (2.kat)



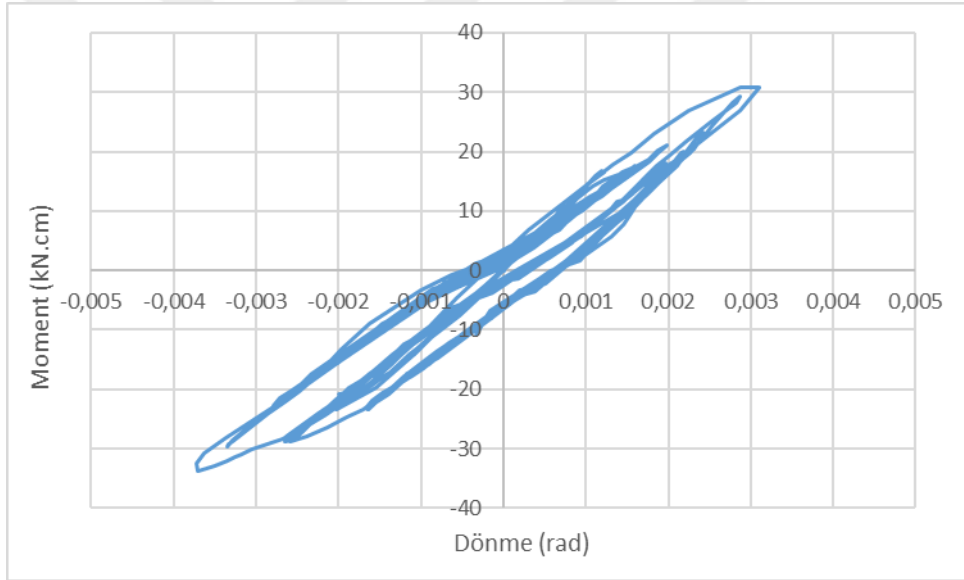
Şekil 5. 17 Northridge %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (3. Kat)



Şekil 5. 18 Northridge %100 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (1. Kat)



Şekil 5. 19 Northridge %100 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (2. Kat)

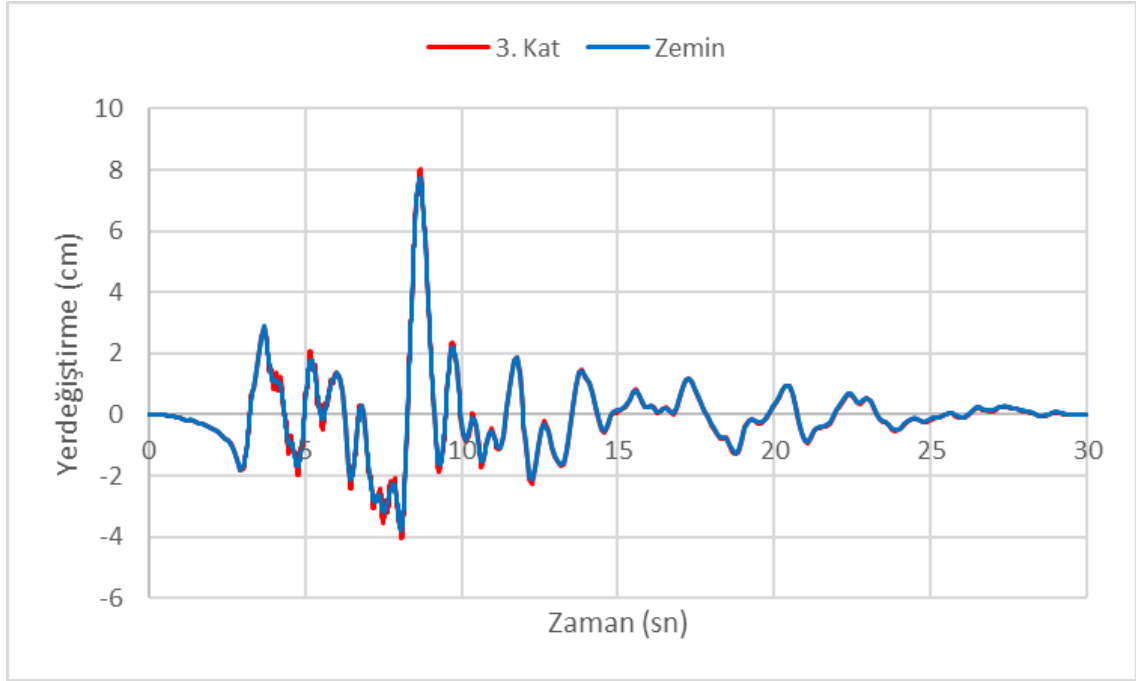


Şekil 5. 20 Northridge %100 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (3. Kat)

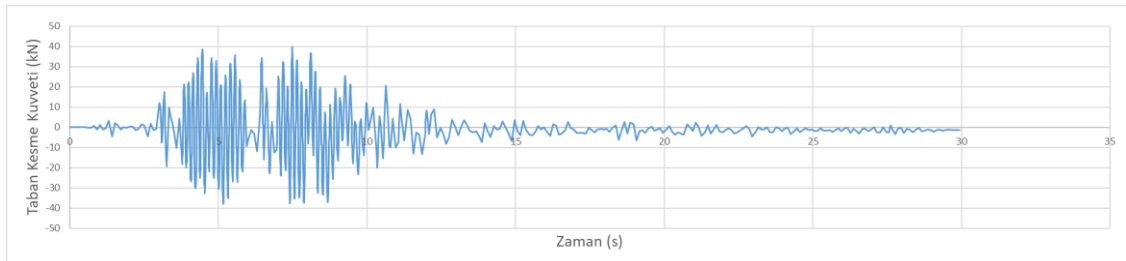
### 5.3.2 Northridge %50 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları

Şekil 5. 21’de görüldüğü üzere çelik çerçeve tepe yer değiştirme ile zemin yer değiştirme grafiği verilmiştir. Aynı zamanda tepe yer değiştirmesinden taban yer değiştirmesi çıkarılarak elde edilen deformasyonun grafiği Şekil 5. 23’de verilmiştir. Northridge %50 depremi ile taban da oluşan taban kesme kuvveti Şekil 5. 22’de verilmiştir. Çelik çerçeve sisteminin yer değiştirme rijitliğini hesaplamak için taban kesme kuvveti- deformasyon grafiği Şekil 5. 24’da sunulmuştur. Kat rijitliklerini hesaplamak amacıyla her kat için kat

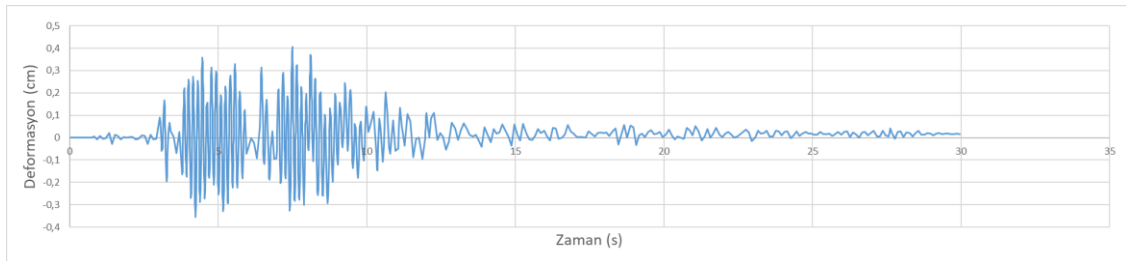
kolonun tabanında oluşan kesme kuvveti-görelî kat ötelemesi grafiği çizilmiştir. Ayrıca kirişlerin dönme kapasitesini değerlendirebilmek için moment-dönme grafikleri çizilmiştir (Şekil 5. 28, Şekil 5. 29 ve Şekil 5. 30).



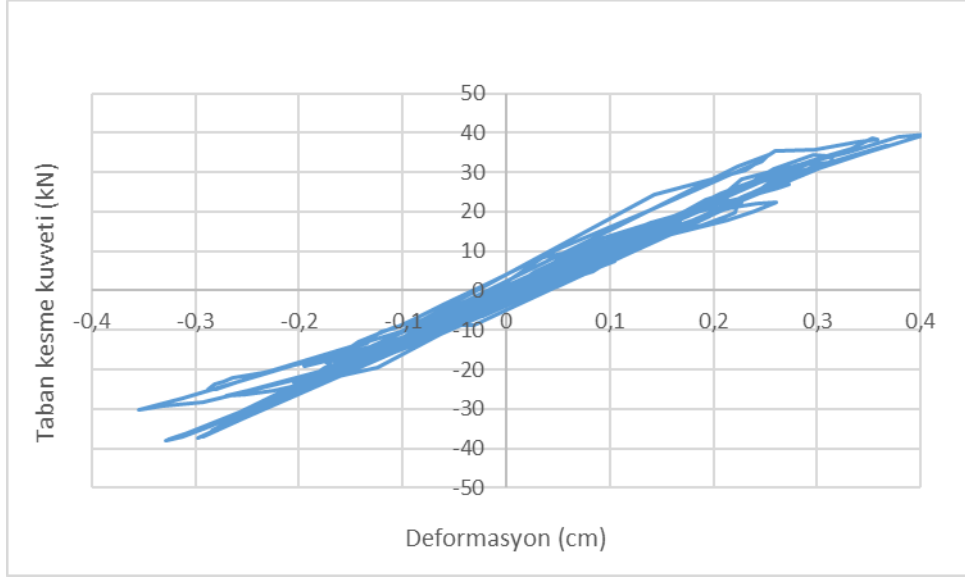
Şekil 5. 21 Northridge %50 depremi ile elde edilen zemin ve 3. kat yer değıştirme-zaman grafiği



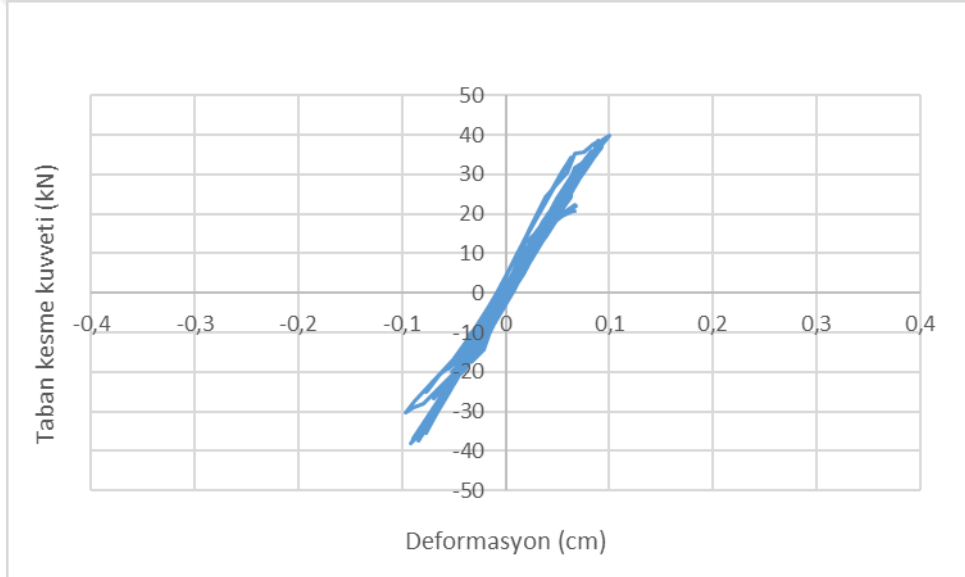
Şekil 5. 22 Northridge %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-zaman grafiği



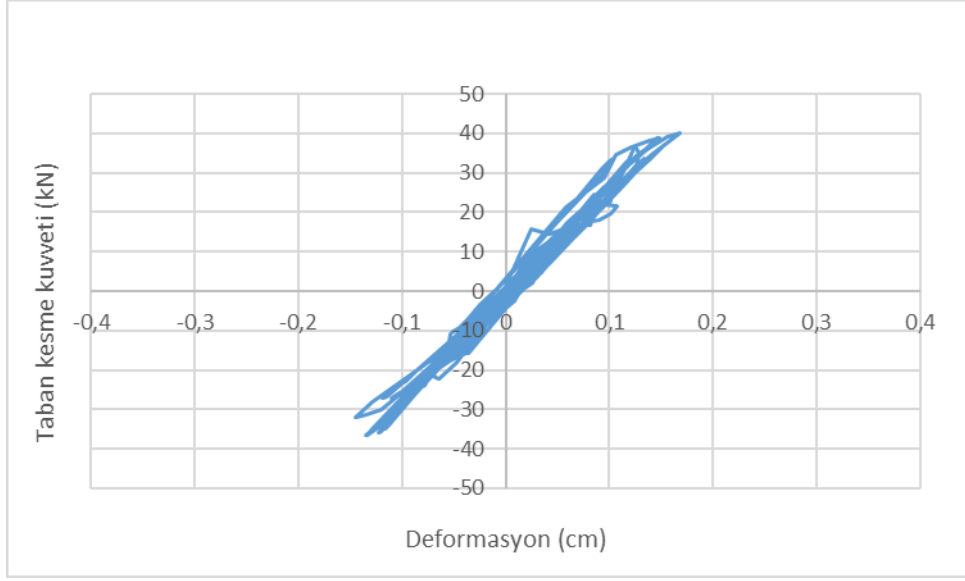
Şekil 5. 23 Northridge %50 depremi ile elde edilen deformasyon-zaman grafiği



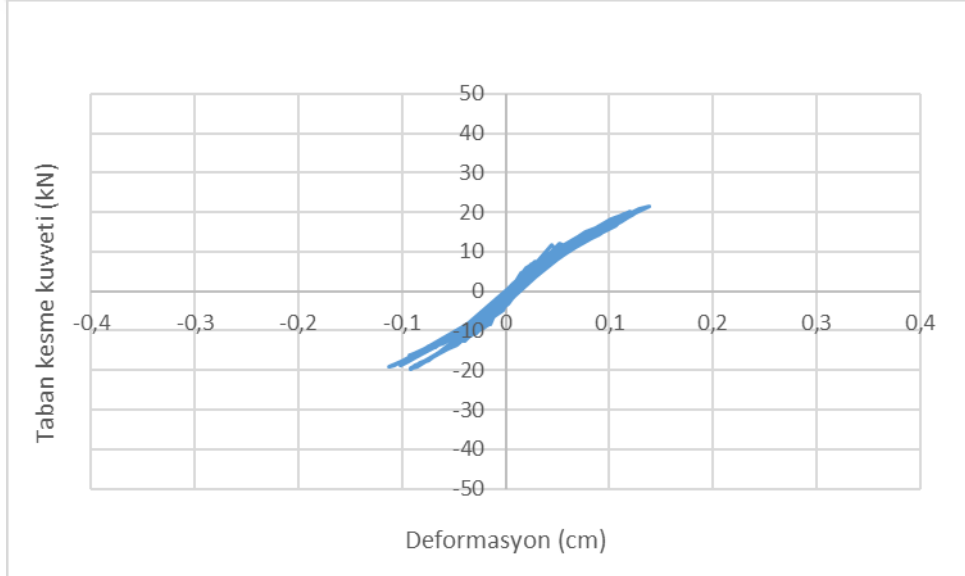
Şekil 5. 24 Northridge %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (tüm sistem)



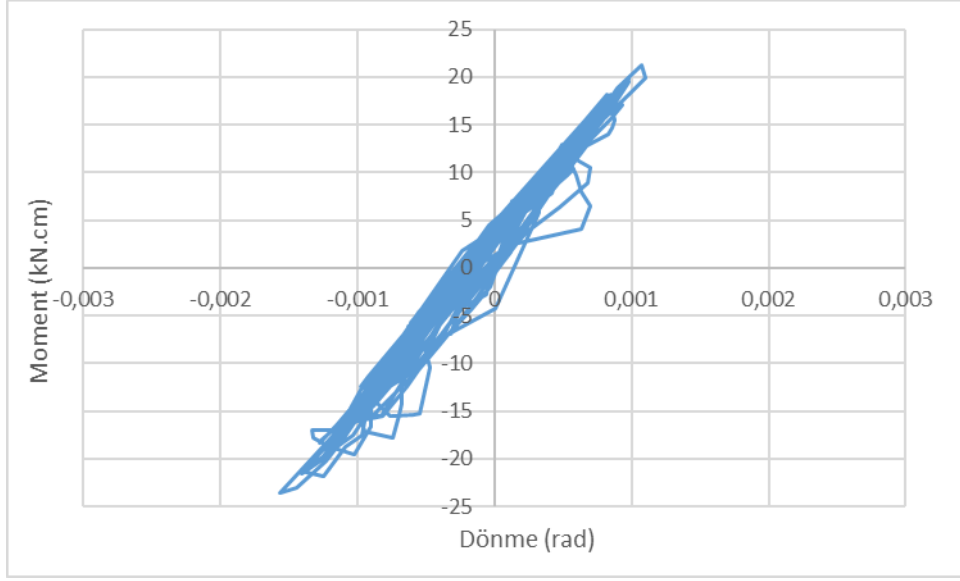
Şekil 5. 25 Northridge %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (1. Kat)



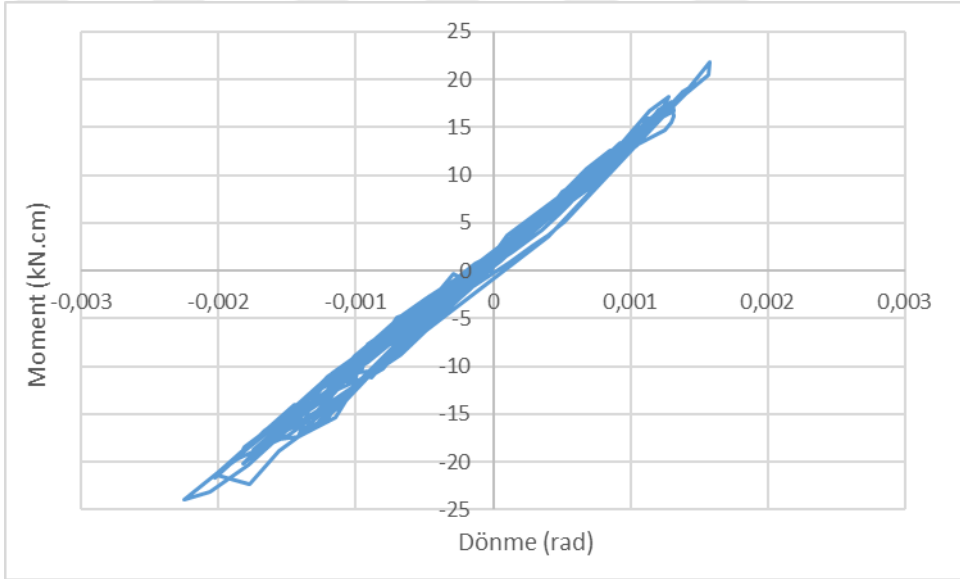
Şekil 5. 26 Northridge %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (2. Kat)



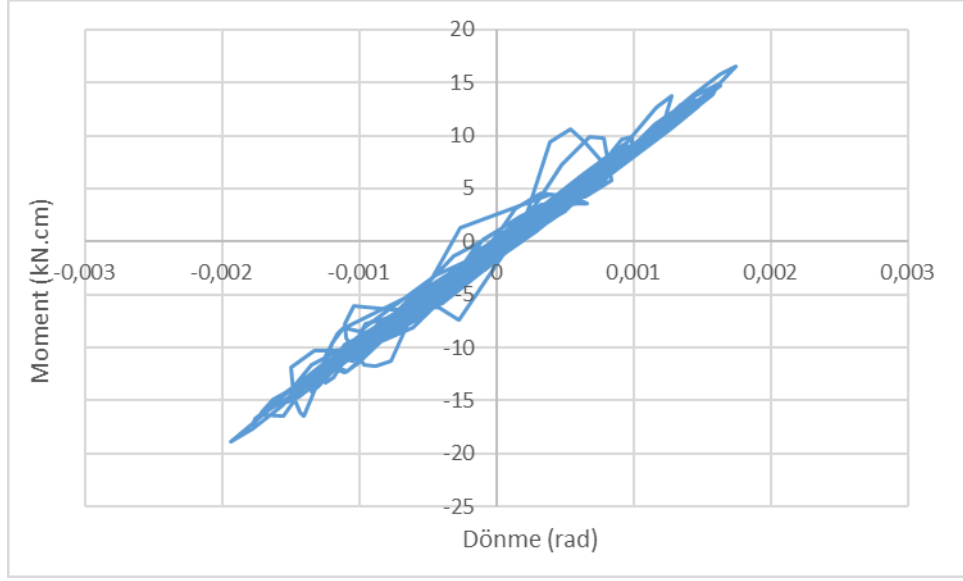
Şekil 5. 27 Northridge %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (3. Kat)



Şekil 5. 28 Northridge %50 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (1. Kat)



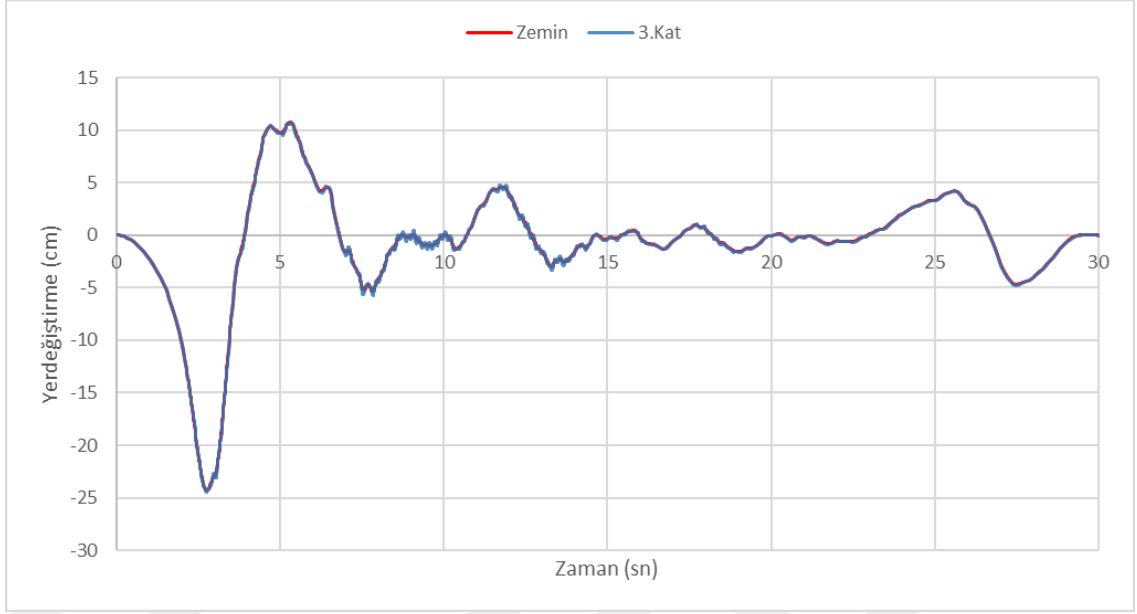
Şekil 5. 29 Northridge %50 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (2. Kat)



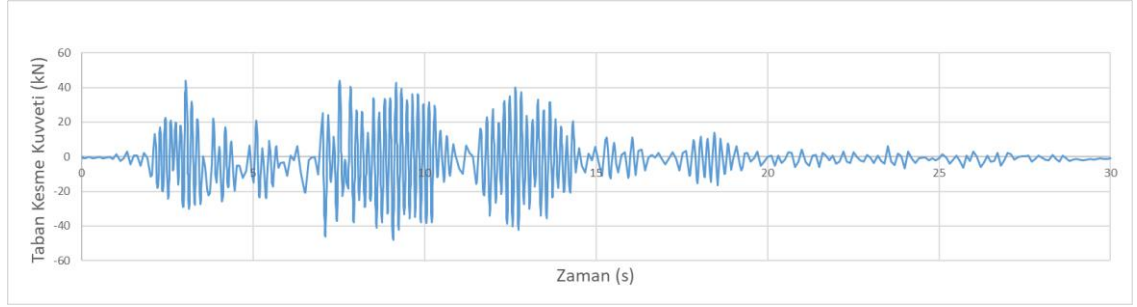
Şekil 5. 30 Northridge %50 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (3. Kat)

### 5.3.3 Kocaeli %100 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları

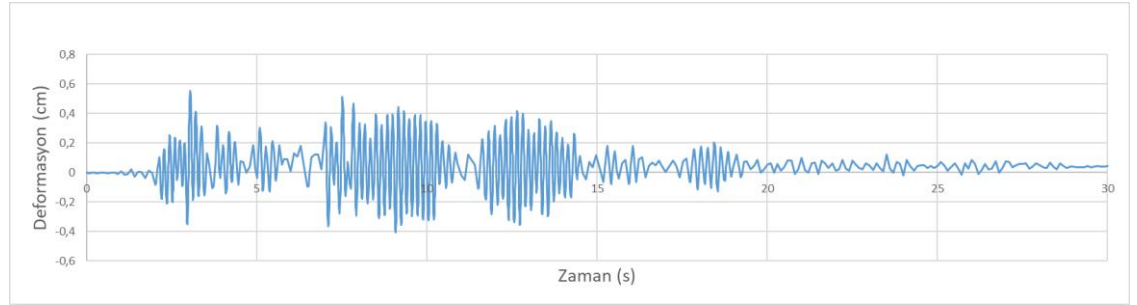
Şekil 5. 31’de görüldüğü üzere çelik çerçeve tepe yer değiştirme ile zemin yer değiştirme grafiği verilmiştir. Aynı zamanda tepe yer değiştirmesinden taban yer değiştirmesi çıkarılarak elde edilen deformasyonun grafiği Şekil 5. 33’de verilmiştir. Kocaeli %100 depremi ile taban da oluşan taban kesme kuvveti Şekil 5. 32’de verilmiştir. Çelik çerçeve sisteminin yatay rijitliğini hesaplamak için taban kesme kuvveti- deformasyon grafiği Şekil 5. 34’da sunulmuştur. Kat rijitliklerini hesaplamak amacıyla her kat için kat kolonun tabanında oluşan kesme kuvveti-görelî kat ötelemesi grafiği çizilmiştir. Ayrıca kirişlerin dönme kapasitesini değerlendirebilmek için moment-dönme grafikleri çizilmiştir (Şekil 5. 28, Şekil 5. 29 ve Şekil 5. 30).



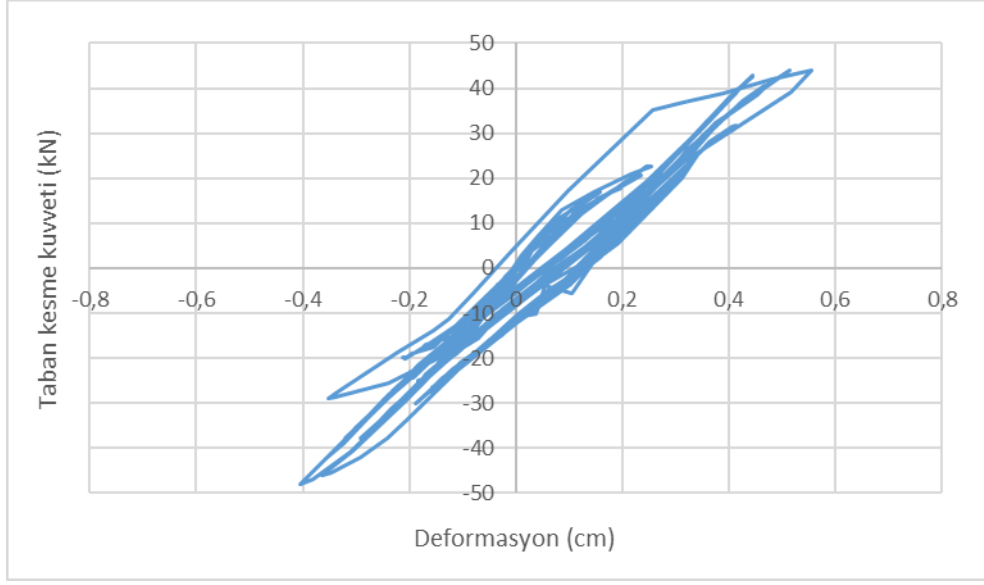
Şekil 5. 31 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen zemin ve 3. kat yerdeğiştirme-zaman grafiği



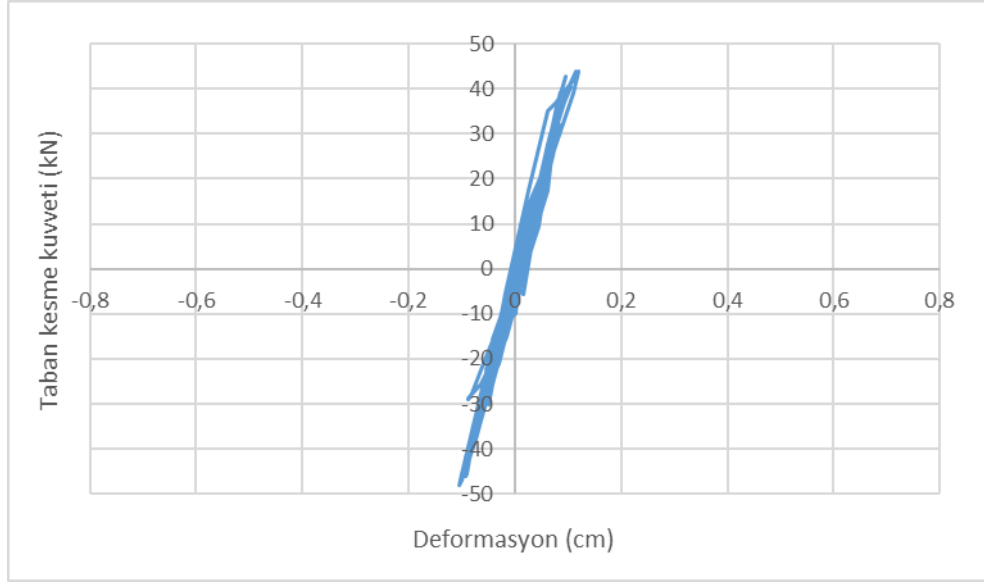
Şekil 5. 32 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-zaman grafiği



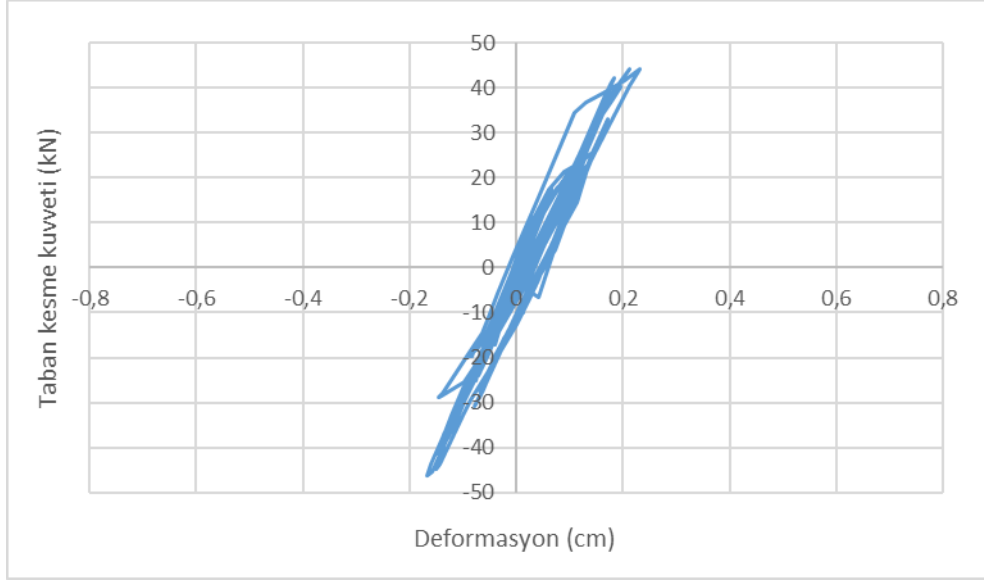
Şekil 5. 33 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen deformasyon-zaman grafiği



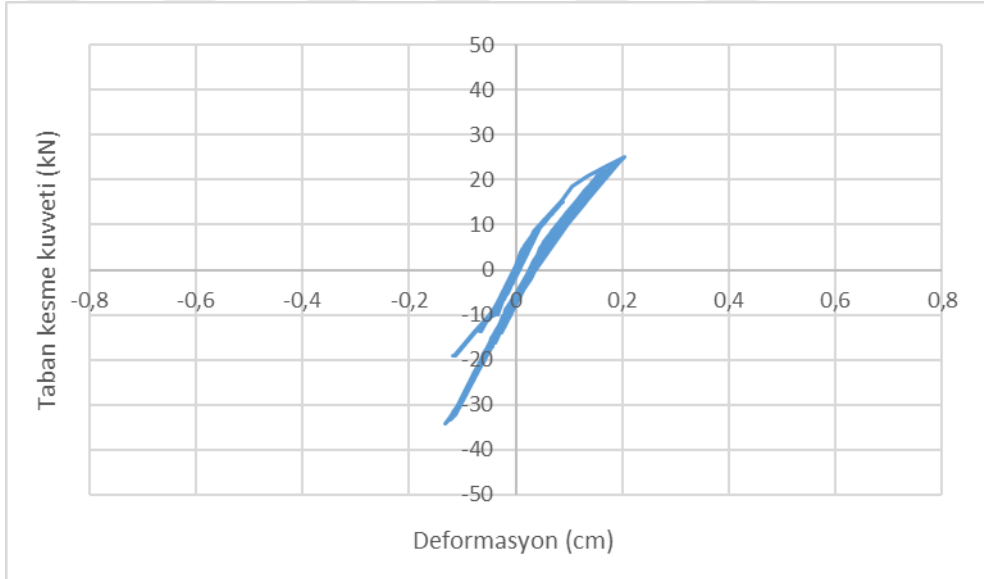
Şekil 5. 34 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (tüm sistem)



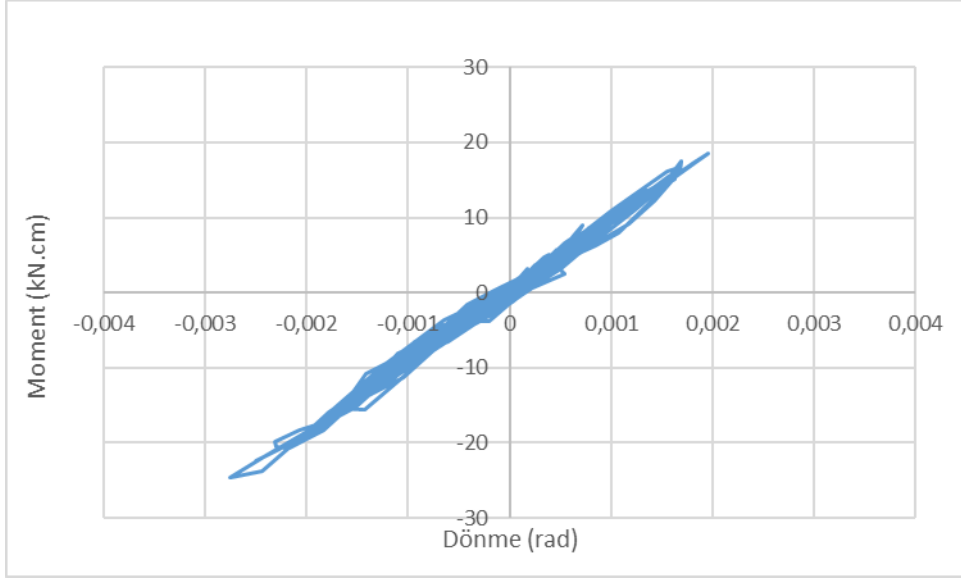
Şekil 5. 35 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (1. Kat)



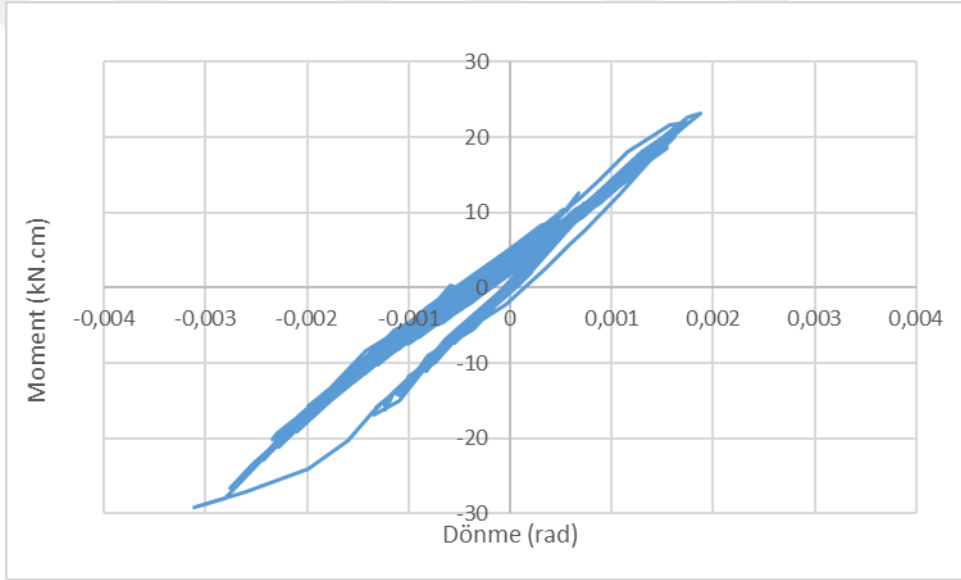
Şekil 5. 36 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (2. Kat)



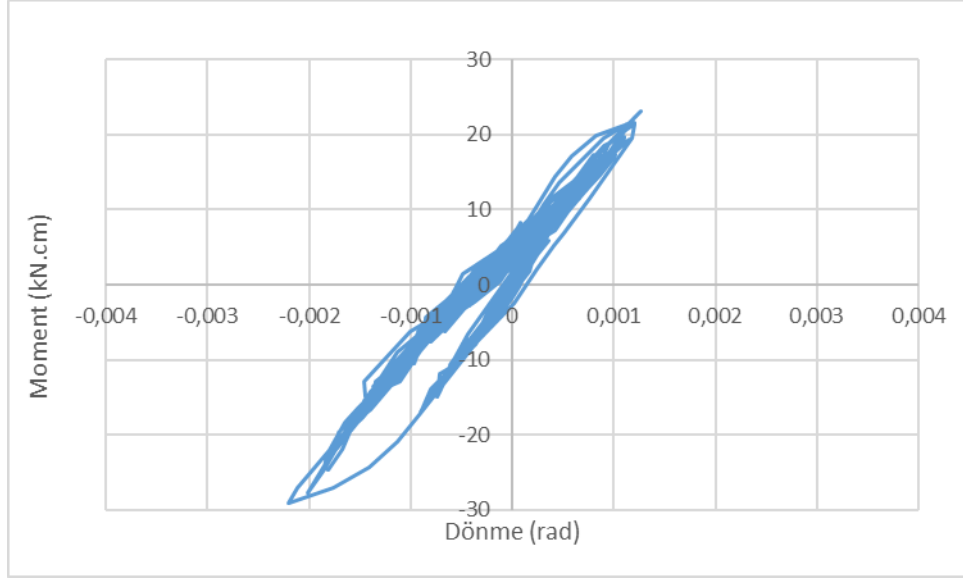
Şekil 5. 37 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (3. Kat)



Şekil 5. 38 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (1. Kat)



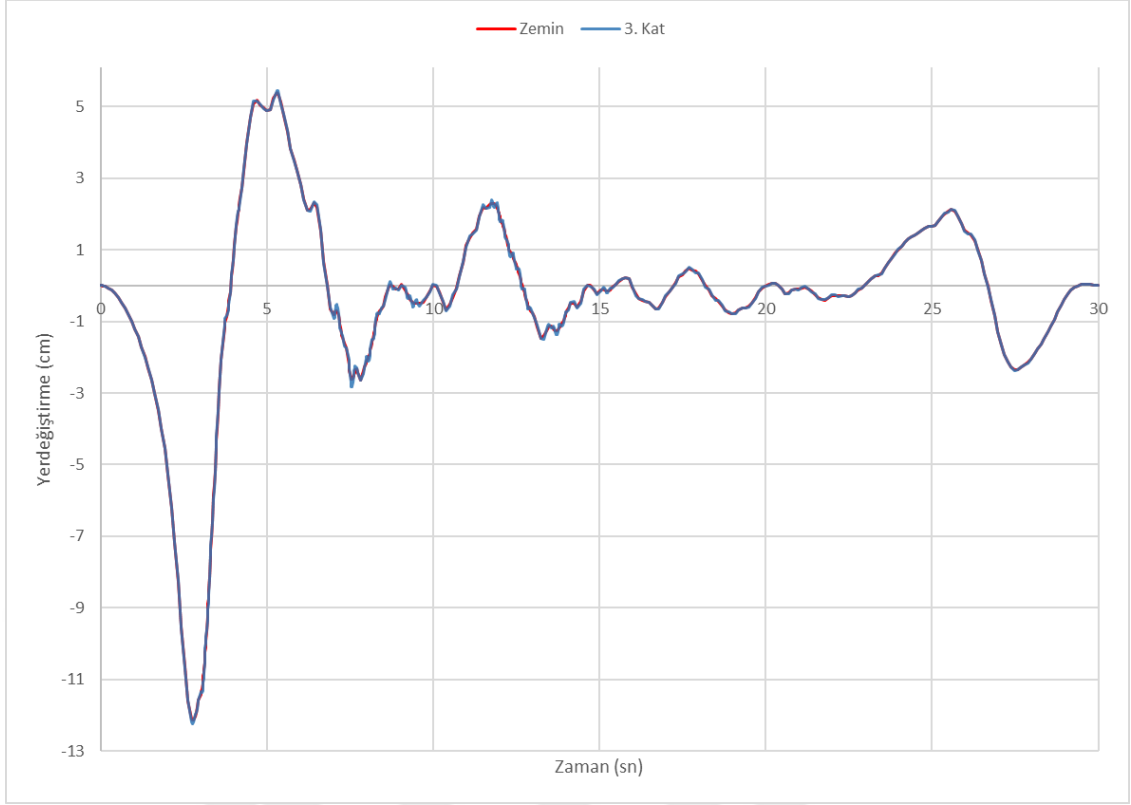
Şekil 5. 39 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (2. Kat)



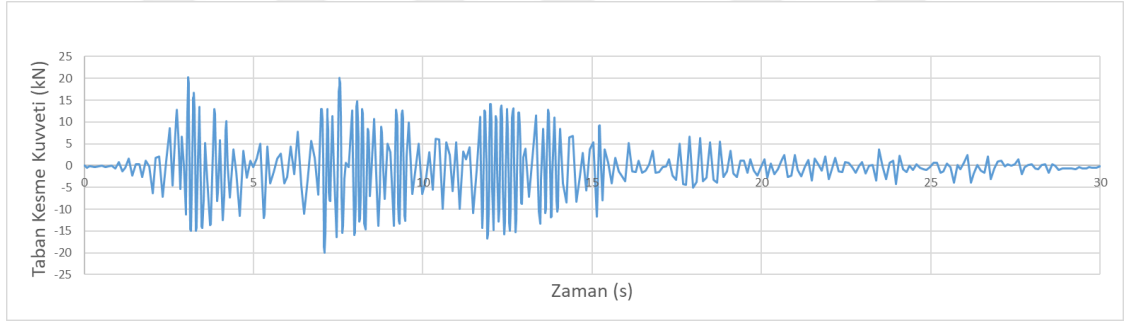
Şekil 5. 40 Kocaeli %100 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (3. Kat)

#### 5.3.4 Kocaeli %50 Deprem İvme Kaydının Dinamik Analiz Sonuçları

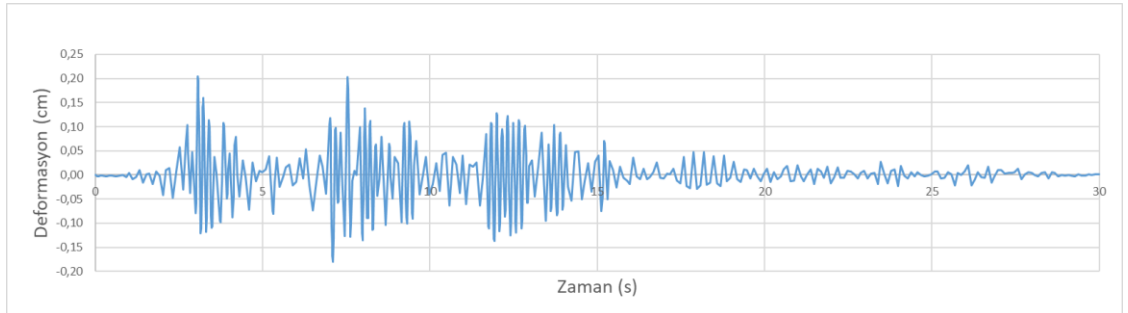
Şekil 5. 41’da görüldüğü üzere çelik çerçeve tepe yer değiştirme ile zemin yer değiştirme grafiği verilmiştir. Aynı zamanda tepe yer değiştirmesinden taban yer değiştirmesi çıkarılarak elde edilen deformasyonun grafiği Şekil 5. 43’de verilmiştir. Kocaeli %50 depremi ile taban da oluşan taban kesme kuvveti Şekil 5. 42’de verilmiştir. Çelik çerçeve sisteminin yatay rijitliğini hesaplamak için taban kesme kuvveti- deformasyon grafiği Şekil 5. 44’de sunulmuştur. Kat rijitliklerini hesaplamak amacıyla her kat için kat kolonun tabanında oluşan kesme kuvveti-görelî kat ötelemesi grafiği çizilmiştir. Ayrıca kirişlerin dönme kapasitesini değerlendirebilmek için moment-dönme grafikleri çizilmiştir (Şekil 5. 48, Şekil 5. 49 ve Şekil 5. 50).



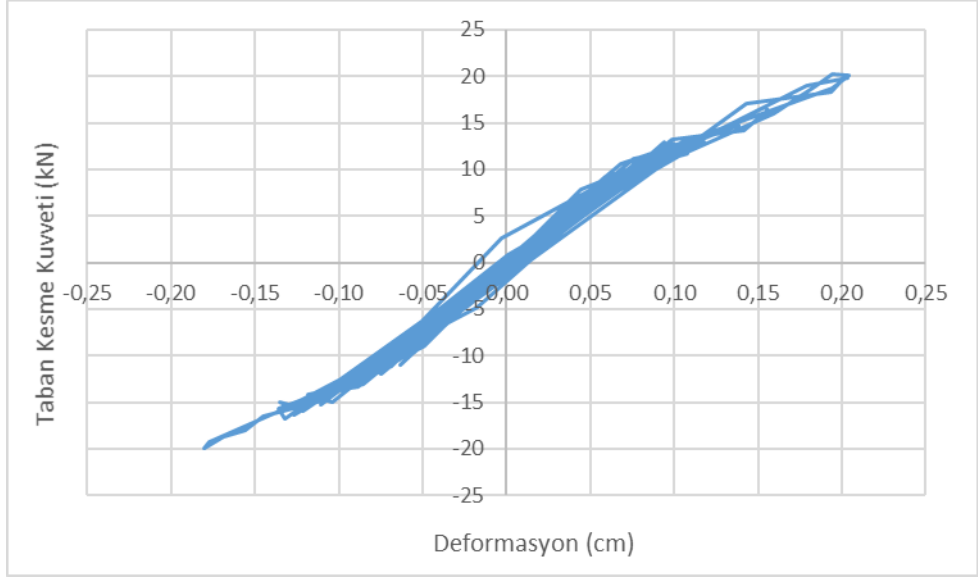
Şekil 5. 41 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen zemin ve 3. kat yerdeğiştirme-zaman grafiği



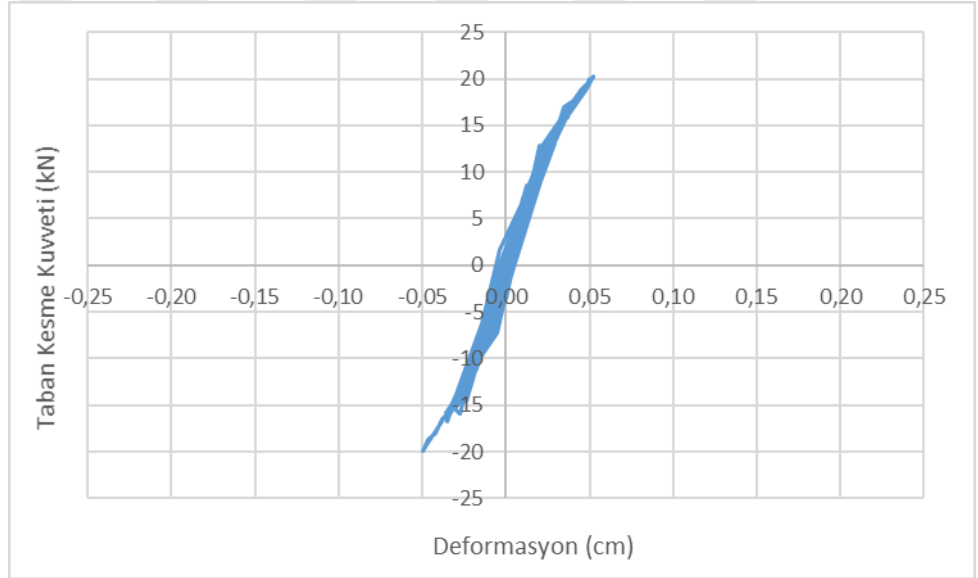
Şekil 5. 42 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-zaman grafiği



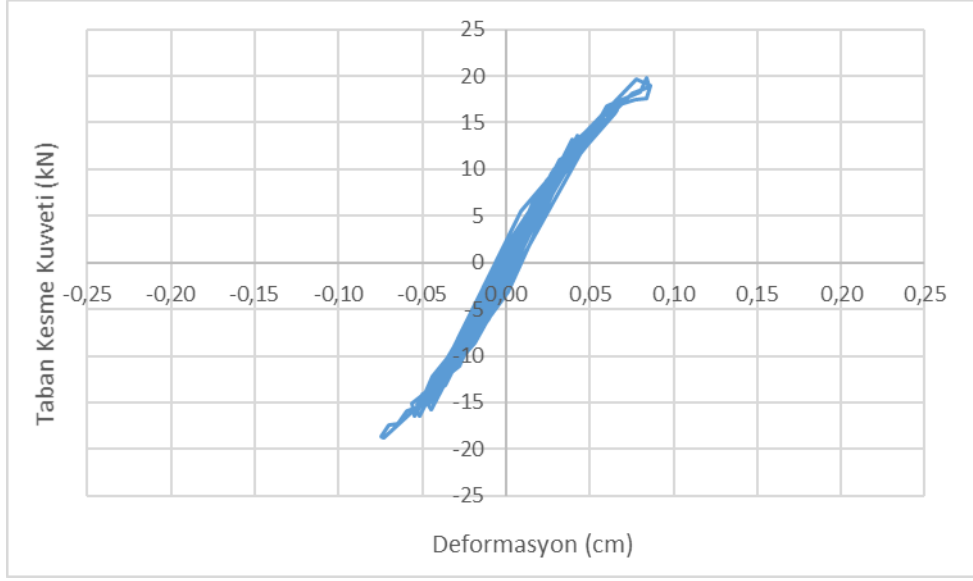
Şekil 5. 43 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen deformasyon-zaman grafiği



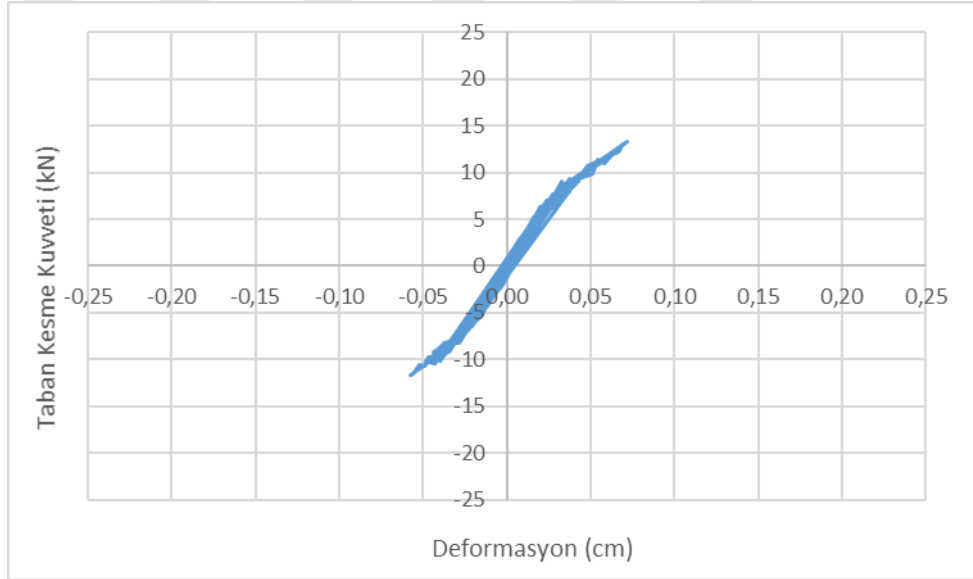
Şekil 5. 44 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (tüm sistem)



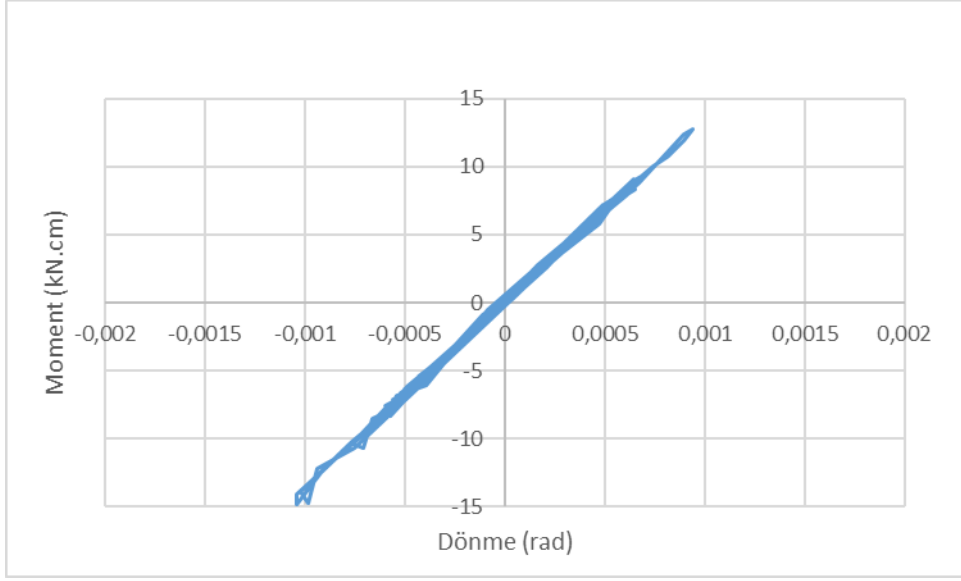
Şekil 5. 45 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (1. Kat)



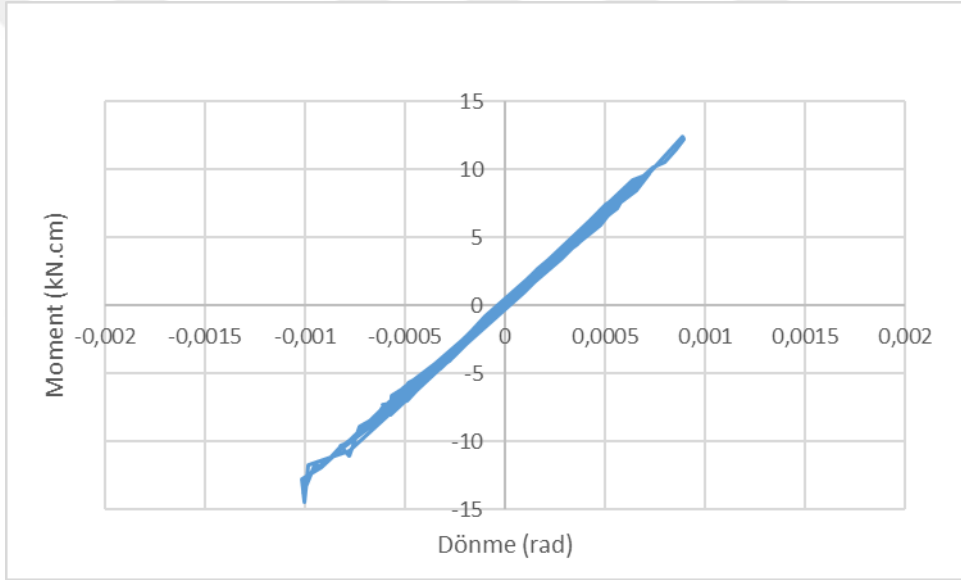
Şekil 5. 46 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (2. Kat)



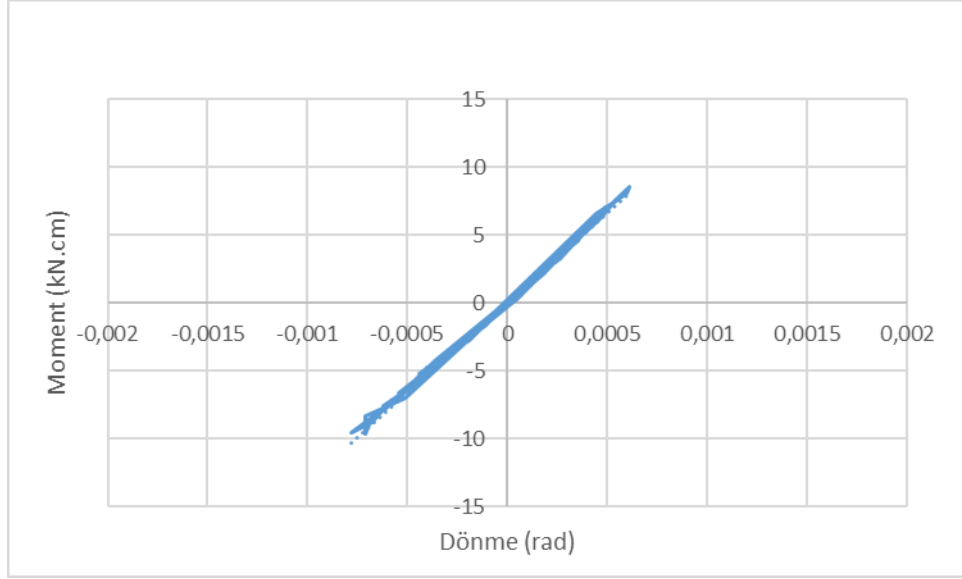
Şekil 5. 47 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen taban kesme kuvveti-deformasyon grafiği (3. Kat)



Şekil 5. 48 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (1. Kat)



Şekil 5. 49 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (2. Kat)



Şekil 5. 50 Kocaeli %50 depremi ile elde edilen kiriş uç momenti-dönme grafiği (3. Kat)

### 5.3.5 Sonuçların Karşılaştırılması

#### 5.3.5.1 Yer değiştirme rijitliklerinin karşılaştırılması

Farklı genlik ve frekans içeriğine sahip 4 deprem kaydı ile yapılan dinamik analiz sonucunda, kesme kuvveti-deformasyon grafiklerinden elde edilen yer değiştirme rijitlikleri Çizelge 5. 1’de verilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere her deprem ivme kaydı için yapının yer değiştirme rijitliklerinde farklılıklar görülmektedir. Örneğin, Northridge %100 deprem kaydı ile elde edilen değerlere bakıldığında kat rijitlikleri 1. Katta 372,59 kN/cm, 2. Katta 208,81 kN/cm ve 3. Katta 169,82 kN/cm değerindedir. Kat rijitliklerinin 1. kattan 3 kata doğru azalmaktadır.

Çizelge 5. 1 Deprem ivme kayıtları ile elde edilen yer değiştirme rijitlikleri (kN/cm)

Depremler	Tüm Sistem	1. Kat	2. Kat	3. Kat
KO50	123,79	493,02	293,34	235,43
NR50	110,14	426,45	262,69	189,92
KO100	92,2	430,35	226,46	160,96
NR100	82,46	372,59	208,81	169,82

Çizelge 5. 2’de deprem ivme kayıtlarıyla elde edilen sistem ve kat rijitlikleri Kocaeli %50 depremine göre normalize edilmiştir. Normalize edilen değerler, farklı genlik ve frekans içeriğine sahip depremlerde yapının yer değiştirme rijitliklerinin nasıl değiştiğini göstermektedir. Çizelge 5. 2 incelendiğinde tüm sistem, 1. ve 2. kat için yer değiştirme rijitliği deprem ivme kaydının genliği arttıkça azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte 3. kat yer değiştirme rijitliği en çok Kocaeli %100 depreminde azaldığı görülmektedir.

Çizelge 5. 2 Normalize edilmiş değerler

Deprem	Tüm Sistem	1. Kat	2. Kat	3. Kat
KO50	1,000	1,000	1,000	1,000
NR50	0,890	0,865	0,896	0,807
KO100	0,745	0,873	0,772	0,684
NR100	0,666	0,756	0,712	0,721

#### 5.3.5.2 Dönme rijitliklerinin karşılaştırılması

4 deprem kaydı ile yapılan dinamik analiz sonucunda, moment-dönme grafiklerinden elde edilen kirişlerin dönme rijitlikleri Çizelge 5. 3’te verilmiştir. Çizelge 5. 3’te görüldüğü üzere her deprem ivme kaydı için elde edilen kiriş dönme kapasitelerinde farklılıklar vardır. En büyük kiriş dönme rijitliği Northridge %50 depremi ile 1. katta iken en küçük dönme rijitliği Northridge %100 depremi ile 2. kattadır. Genel olarak Kocaeli %50 depreminde kiriş dönme rijitlikleri diğer depremlere göre daha büyük değerlere sahipken Northridge %100 depreminde kiriş dönme rijitlikleri diğer depremlere göre daha küçük değerlere sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 5. 3 Deprem ivme kayıtları ile elde edilen kiriş dönme rijitlikleri (kN.cm/rad)

Deprem	1. Kat	2. Kat	3. Kat
KO50	13662,000	13297,000	13264,000
NR50	14864,000	9492,700	10999,000
KO100	9399,100	8871,100	11322,000
NR100	9230,300	8648,200	8864,100

Çizelge 5. 4'te deprem ivme kayıtlarıyla elde edilen kiriş dönme rijitlikleri Kocaeli %50 depremine göre normalize edilmiştir. Normalize edilen değerler, farklı genlik ve frekans içeriğine sahip depremlerde kiriş dönme rijitliklerinin nasıl değiştiğini göstermektedir. Çizelge 5. 4 incelendiğinde, genel olarak deprem ivme kaydının genliği arttıkça dönme rijitliklerinde azalmaktadır. Aynı zamanda kiriş dönme rijitliklerindeki azalma en çok 2. katta gerçekleştiği görülmektedir.

Çizelge 5. 4 Normalize edilmiş değerler

Deprem	1. Kat	2. Kat	3. Kat
KO50	1,000	1,000	1,000
NR50	1,088	0,714	0,829
KO100	0,688	0,667	0,854
NR100	0,676	0,650	0,668

### SONUÇ VE ÖNERİLER

- Bu çalışmada, bir video kaydında, şablon eşleştirme yöntemi ile hareketli nesnelerin takibi için literatürde çokça kullanılan ROI penceresi yöntemi ele alınmıştır. Bu yöntemle göre hedefin hareket alanının önceden belirlenmesi gerekmektedir. Fakat hareket alanının içerisinde birbirine benzer birden fazla hedef olduğunda hatalar oluşmaktadır. Bu sebeple akıllı arama tekniği ile şablon eşleştirme algoritması geliştirilmiştir.
- Akıllı arama tekniği, seçilen hedefin hızına bağlı olarak hareket alanını belirlemektedir. Hareket alanı hedef hareket ettikçe onunla birlikte hareket etmektedir. Ayrıca bazı durumlarda program hedefin istatistiksel benzerliğini baz alarak hareket alanını genişleterek benzerlik ilişkisini pekiştirmektedir.
- Sarsma masası deneyinde 3 boyutlu çelik çerçeve deneysel numunenin, rijit tabla üzerinden LVDT ve ivmeölçer ile edilen dinamik yer değiştirme değerleri, görüntü işleme tekniği ile istatistiksel olarak hesaplanan dinamik yer değiştirme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Görsel işleme tekniğinde hareketli nesnelerin takibinde kullanılan şablon eşleştirme yöntemi akıllı arama yöntemi ile geliştirilerek birbirine çok yakın benzer nesnelerin takibinde doğru sonuçlar alınmıştır. LVDT ve görsel data ile elde edilen yer değiştirme grafiklerinin arasındaki korelasyon katsayısı 0,99'un üstünde çıkmıştır.
- 3 boyutlu çelik çerçeve sistemi Abaqus SE programı ile modellenmiş olup, çelik çerçeve üzerinde referans alınan noktalardaki yatay dinamik yer değiştirmeler, Northridge %50 ve Northridge %100 depremleri için yapılan deneylerdeki görüntü kayıtlarından görüntü işleme tekniği ile elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Çelik

çerçeve numunesinde referans alınan noktalarda sadece yatay yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır. Düşey yer değiştirme değerlerinin küçük olması, görüntü çözünürlüğünün ve hızının az olması sebebiyle net bir değer elde edilememiştir. Northridge %50 ve Northridge %100 depremleri için video kaydından ve sayısal modelden elde edilen yer değiştirme grafikleri arasındaki kolerasyon katsayısı 0,98'in üstünde kalmıştır. Bununla birlikte video kaydından ve sayısal modelden alınan tabana göre kat ötelemeleri mod olarak aynı çıkmış fakat küçük farklılıklar oluşmuştur. Bunun nedeni seçilen malzeme modeli ve/veya kiriş kolon birleşiminde kullanılan korniyerlerin gerçekte bulonlu birleşim iken sayısal modelde korniyer kollarının yarısının tam bağlantılı olarak seçilmesi olabilir. Görüntü çözünürlüğünün az olması piksel başına düşen mm miktarının belirlenmesinde hata oranını artırmaktadır. Bu sebeple sayısal model ve video kaydındaki kat ötelemelerinin arasındaki farkı arttırabilir.

- Video kaydından ve sayısal modelden elde edilen tabana göre kat ötelemelerindeki fark her zaman aralığında farklı çıkmaktadır. Örneğin %50 Northridge depremi için kat ötelemeleri arasındaki fark çoğu zaman 0.05 cm'nin altında kalsa da en büyük fark 7,488. saniyede 0,11 cm'ye çıkmıştır. Bununla birlikte Northridge %100 depremi için kat ötelemeleri arasındaki fark çoğu zaman 0.1 cm'nin altında kalsa da en büyük fark 7.50. saniyesinde 0,31 cm'ye çıkmıştır.
- Deney esnasındaki video kaydı yapan kameranın çözünürlüğü ve hızı arttıka elde edilen veriler daha sağlıklı olmaktadır. Çözünürlüğü az olan bir kamera görüntüsünün boyutu değiştirilerek (Matlab programının Toolbox görüntü işleme kütüphanesinden resize kodu ile görüntünün boyutu değiştirilmiştir) mm/piksel oranı arttırılabilir. Bu işlem çözünürlük sorunu sınırlı oranda çözebilmektedir. Fakat yüksek hızlı yer değiştirmelerde kameranın kaydetme hızının önemi ortaya çıkmaktadır.
- Kameranın dinamik parametreleri alınmak istenilen hedefe olan uzaklığı ve açısının artması yine görüntü işleme tekniğinde maliyetli bir durumdur. Burada önem arz eden husus elde edilen verilerin hata oranını kabul edilebilir seviyede tutacak kamera uzaklığı ve açısı belirlemektir. Ayrıca deney numunesinin ve referans noktalarının birbirine zıt iki renk seçilmesi görüntü işleme analizini kolaylaştırmaktadır.

- Bu çalışmada olduğu gibi sarsma masası deneyinde, büyük ölçekli bir deneysel numune kullanıldığında birçok noktadan dinamik parametreler elde edilmek istenebilir. Ölçüm aletlerinin numune üzerine yerleştirilmesi, ölçümlerin hassasiyeti, ölçüm alınan noktaların fazlalığı bu dinamik parametrelerin elde edilme maliyetini arttırır. Fakat görüntü işleme tekniği kullanılarak dinamik parametreler daha ekonomik olarak elde edilebilir. Ayrıca görüntü işleme tekniği ile yer değiştirme parametreleri tayininde çok iyi sonuçlar elde edilmiştir. Anlaşılacağı üzere birçok yöntemle göre görüntü işleme tekniği çok daha pratik ve ekonomik çözümler sunmaktadır.

- Abaqus SE programı ile modellenen 3 boyutlu çelik çerçeve sistemi için Northridge %100, Northridge %50, Kocaeli %100 ve Kocaeli %50 deprem ivme kayıtlarıyla dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir deprem kaydı için sistemin toplam yer değiştirme rijitliği, katların yer değiştirme rijitlikleri ile kirişlerin dönme rijitlikleri elde edilmiştir.

- Sayısal model ile elde edilen dinamik analiz sonuçları karşılaştırıldığında taban kesme kuvveti Kocaeli depremi %100 kaydında 40 kN civarı çıkarken Kocaeli depremi %50 kaydında 20 kN civarı çıkmıştır. Aynı şekilde Northridge depremi %100 kaydında 66 kN civarı çıkarken şekilde Northridge depremi %50 kaydında 40 kN civarı çıkmıştır.

- Çelik çerçeve sisteminin kolon ayakları dinamik analizinde ankastre mesnet olarak çalışabilmesi için 1. kat kolonun alt kısmı IPN100 profili ile yer değiştirmesi sınırlandırılmıştır. Bu durumun sonucunda 1. kat diğer katlara göre daha rijit duruma gelmiştir. Buna göre taban kesme kuvveti-deformasyon grafiklerine bakıldığında 1. kat deformasyonları, 2. ve 3. kata göre daha az olmaktadır. Aynı şekilde Moment dönme grafiklerine bakıldığında, 2. kat kiriş dönmeleri diğer katlara göre daha fazla olduğu görülmüştür.

- Çizelge 5. 2 ve Çizelge 5. 4'de dinamik analiz sonucunda elde edilen yer değiştirme ve dönme rijitlikleri Kocaeli %50 depremine göre normalize edilmiştir. Normalize edilen değerler, farklı genlik ve frekans içeriğine sahip depremlerde yapının yer değiştirme rijitliklerinin nasıl değiştiğini göstermektedir.

Sonuç olarak görsel işleme tekniği ile sarsma masası deneyinden dinamik parametreler başarıyla elde edilmiştir. Abaqus programında oluşturulan sayısal model ile sarsma masası parametreleri karşılaştırılmış ve iyi sonuçlar alınmıştır. Daha sonrasında çelik

çerçeve numunesinin farklı deprem ivme kayıtlarından nasıl etkilendiği ortaya koyulmuştur. Çizelge 5. 2 incelendiğinde tüm sistem, 1. ve 2. kat için yer değiştirme rijitliği deprem ivme kaydının genliği arttıkça azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte 3. kat yer değiştirme rijitliği en çok Kocaeli %100 depreminde azaldığı görülmektedir. Çizelge 5. 4 incelendiğinde, genel olarak deprem ivme kaydının genliği arttıkça dönme rijitliklerinde azalmaktadır. Aynı zamanda kiriş dönme rijitliklerindeki azalma en çok 2. katta gerçekleştiği görülmektedir.

- İleride yapılacak sarsma masası deneyleri ile deprem esnasında oluşan yapı davranışları kullanılan bu yöntemler ile çok daha iyi anlaşılacaktır.



## KAYNAKLAR

---

- [1] Peters, W. H. ve Ranson, W. F.,( 1982). "Digital Image Techniques In Experimental Stress Analysis", Optical Engineering, 21(3): 213-427.
- [2] Chu, T. C., Ranson, W. F., Sutton, M. A. ve Peters, W. H.,(1985). "Application of Digital Image Correlation Techniques to Experimental Mechanics", Experimental Mechanics, 25(3):232-245.
- [3] Chang, C. C. ve Ji, Y. F.,(2007). "Flexible Videogrammetric Technique for Three-Dimensional", Journal of Engineering Mechanics,133( 6):656-664.
- [4] Morlier, J., Salom, P. ve Bos, F.,(2007). "New Image Processing Tools for Structural Dynamic Monitoring, Key Engineering Materials.
- [5] Choi, H.-S., Cheung, J.-H., Kim, S.-H. ve Ahn, J.-H.,(2011). "Structural dynamic displacement vision system using digital image processing", NDT & E International, 44(7):597-608.
- [6] Jurjo, D., Magluta, C., Roitman, N. ve Gonçalves, P. B.,(2010). "Experimental Methodology For The Dynamic Analysis Of Slender Structures Based On Digital Image Processing Techniques",Mechanical Systems and Signal Processing, 24( 5):1369-1382.
- [7] Park, J.-W., Lee J.-J., Jung, H.-J. ve Myung, H.,(2010). "Vision-Based Displacement Measurement Method For High-Rise Building Structures Using Partitioning Approach", NDT & E International, 43(7):642-647.
- [8] Firat Alemdar, Z., Browning, J. ve Matamoros, A.,(2011). "Photogrammetric Measurements of RC Bridge Column Deformations", Journal of Engineering Structures, 33(8):2407-2415.

- [9] Freng, M. Q., Fukuda, Y., Feng, D. ve Mizuta, M., (2015). "Nontarget Vision Sensor for Remote Measurement of Bridge Dynamic Response", *Journal of Bridge Engineering*, 20:1-11.
- [10] Kim, S. W. ve Kim, N. S., (2013). "Dynamic characteristics of suspension bridge hanger cables using digital image processing", *NDT&E International*, 59:25-33.
- [11] Ji, Y. F. ve Chang, C. C., (2008). "Nontarget image-based technique for small cable vibration measurement", *Journal of Bridge Engineering*, 13:34-42.
- [12] Jo, B.-W., Lee, Y.-S., Jo, J. H. ve Khan, R. M. A.,(2018). "Computer Vision-Based Bridge Displacement Measurements Using Rotation-Invariant Image Processing Technique", *Sustainability*, 10:1-16.
- [13] Erdoğan Y. S., (2018). "Sayısal Görüntü İşleme ile Titreşim Yer Değiştirmelerinin Ölçümü ve Modal Parametre Tayini", *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(59): 401-415.
- [14] Iwashita, K., Kimura, H., Kasuga, Y., Suzuki, N., (2002). "Shaking table test of a steel frame allowing uplift", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 561:47–54.
- [15] Midorikawa, M., Azuhata, T., Ishihara, T., Wada A., (2006). "Shaking table tests on seismic response of steel braced frames with column uplift", *Earthquake Engng Struct.*, 35:1767–1785.
- [16] Li, S., Zuo, Z., Zhai, C., Xu, S., Xie, L., (2016). "Shaking table test on the collapse process of a three-story reinforced concrete frame structure", *Engineering Structures*, 118:156–166.
- [17] Kim, S.-E., Lee, D.-H., Ngo, C., (2007). "Shaking table tests of a two-story unbraced steel frame", *Journal of Constructional Steel Research*, 63:412–421.
- [18] Ghafoor, H., M., A., (2018). Numerical simulation for investigation dynamic behaviour of buildings with a shaking table, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] Zhang, H., Li, H., N., (2012). "Shaking table test and dynamic response analysis of reinforced concrete structure", 15 WCEE Lisboa, P.R.China.
- [20] Nader, M., Astaneh-Asl, A., (1996). "Shaking table tests of rigid, semirigid, and flexible steel frames", *Journal of Structural Engineering*, 122(6):589-596 .

- [21] Danesh, F., Pirmoz, A., Saedi, Daryan, A. (2007). "Effect of shear force on the initial stiffness of top and seat angle connections with double web angles", *Journal of Constructional Steel Research*, 63:1208–1218.
- [22] Silva, A., R., D., Batelo, E., A., P., Silveira, R., A., M., Neves, F., A., Gonçalves, P., B., (2018). "On the nonlinear transient analysis of planar steel frames with semi-rigid connections: from fundamentals to algorithms and numerical studies" *Latin American Journal of Solids and Structures*, 15(3), e28.
- [23] M. Mahdavi, (2014). Arı-I Sarsma Masası Performans Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [24] Öztürk, Z., (2009). Çelik Yapılar Kısa Bilgi ve Çözülmüş Problemler, 5. Baskı,.
- [25] Karameşe, G., (2018). Yapı sistemlerinde yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme büyüklüklerinin özel bir görüntü işleme yöntemiyle belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] Karakoç, M., Kavaklıoğlu K., (2015). "Görüntü Eşleme Ve Genetik Algoritmalar Kullanarak Görüntü İçinde Görüntü Arama", *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 21(5):182-193.
- [27] Lewis, J.P. (1995). "Fast Normalized Cross-Correlation." *Vision Interface*, 120-123.
- [28] Kim, S.-W., ve Kim, N.-S., (2014). "Multi-point Dynamic Response Measurements Using Digital Image, %1 içinde The 2014 World Congress on Advances in Civil", *Environmental, and Materials Research (ACEM14)*, Busan, Korea.
- [29] Choi, I., Kim, J., ve Kim D., (2016). "A Target-Less Vision-Based Displacement Sensor Based on Image Convex Hull Optimization for Measuring the Dynamic Response of Building Structures", *Sensors*, 16:1-17.
- [30] Khuc T., Catbas, F., N., (2017). "Completely contactless structural health monitoring of real-life structures using cameras and computer vision", *Structural Control and Health Monitoring*, 24(1).
- [31] D. Feng ve M. Q. Feng, (2017). "Experimental validation of cost-effective vision-based structural health monitoring", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 88:199-211.
- [32] ABAQUS. Analysis User's Guide, Hibbit, Karlsson, and Sorenson, Inc, Pawtucket, RI.
- [33] Pınar, O., (2018). Elastik Cisimlerde İki Boyutlu Doğrusal Sürtünmesiz Temas Probleminin Sonlu Elemanlar Metodu İle Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [34] Salmon, C., Johnson, J., (1980). Steel Structures Design and Behavior, Harper and Row Publishers, New York.
- [35] Feng, D., Feng, M. Q., (2017). "Experimental validation of cost-effective vision-based structural health monitoring", Mechanical Systems and Signal Processing, 88:199-211.
- [36] SOLLOGOUB, P., (2006). "Seismic Testing. Advanced Course on Advanced Earthquake Engineering Analysis", CISM, Udine, Italy.



---

## GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİĞİNDE ÖN İŞLEMLER

```
Ratio =4;
load('filenamelist.mat');
I= imread(filenamelist(1,:));
IW=I(450:520,430:464,1);
IR= imresize(IW,Ratio,'bilinear'); %Piksel yoğunluğunu arttır.
IA= imadjust(IR); %Kontrastı ve parlaklığı ayarla.
IG = imgaussfilt(IA,2); %Gürültüyü azalt.
IB=imbinarize(IG); %Görüntü eşikle.
BW1 = edge(IB,'canny'); %Kenar detaylarını çıkar.
IO=imresize(I(450:520,430:464,:),Ratio);
for i=1:size(BW1,1)
    for j=1:size(BW1,2)
        if BW1(i,j)==1
            IO(i,j,:)=0;
            IO(i+1,j+1,:)=0;
            IO(i-1,j-1,:)=0;
            IO(i+1,j-1,:)=0;
            IO(i-1,j+1,:)=0;
        end
    end
end
imshow(IO)
stats = regionprops('table',IB,'Centroid', 'Area','MajorAxisLength','MinorAxisLength');
centers = stats.Centroid; % Merkezleri bul.
area =stats.Area; % Alanları hesapla
hold on
plot(centers(:,1),centers(:,2),'r*')
hold off
```

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** :Neslihan AVCI  
**Doğum Tarihi ve Yeri** :15.06.1989/ Kocaeli  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** :neslihanavci.tr@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2014
Lise	Fen	Özel Kokpit Anadolu Lisesi	2008

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2014	Saroğlu İnşaat Tasarım Ltd. Şti	İnşaat Mühendisi

## **YAYINLARI**

### **Makale**

1. N. Avcı, F. Alemdar, " Sarsma masası testlerindeki dinamik parametrelerin görüntü işleme yöntemi ile ölçülmesi" Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi,2019. (yayın aşamasında)

