

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

**FARKLI ELEMANLARLA RİJİTLEŞTİRİLMİŞ YAPILARIN
DEPREM ETKİSİNDEKİ DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞLARININ
ÜÇ BOYUTLU OLARAK KARŞILAŞTIRMALI İNCELENMESİ**

MEHMET SAFA AYDOĞAN

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

**DANIŞMAN
PROF. DR. YUSUF AYVAZ**

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ELEMANLARLA RİJİTLEŞTİRİLMİŞ
YAPILARIN DEPREM ETKİSİNDEKİ DOĞRUSAL OLMAYAN
DAVRANIŞLARININ ÜÇ BOYUTLU OLARAK
KARŞILAŞTIRMALI İNCELENMESİ**

Mehmet Safa AYDOĞAN tarafından hazırlanan tez çalışması 03.01.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

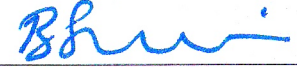
Prof. Dr. Yusuf AYVAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Yusuf AYVAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi



Doç. Dr. Barış SEVİM
Yıldız Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. Abdul HAYIR
İstanbul Teknik Üniversitesi



ÖNSÖZ

Yapılan bu yüksek lisans tezinin hazırlanmasının tüm aşamalarında her türlü destek, bilgi ve tecrübelerini bana sunan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Yusuf AYVAZ'a saygılarımı ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Kıymetli zamanlarını ayırarak tezimi değerlendiren hocalarım Sayın Prof. Dr. Abdul HAYIR ve Sayın Doç. Dr. Barış SEVİM'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamı yaparken kullandığım bilgisayar programının temini konusunda ve bu programı öğrenmem hususunda bana yardımcı olan, ayrıca bu tezin hazırlanması sürecinde benden yardımlarını esirgemeyen hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Fatih ALEMDAR'a çok teşekkür ederim.

Tezimin hazırlanması aşamasında zaman zaman görüşlerine başvurduğum hocalarım Sayın Doç. Dr. Bilge DORAN ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Tezin yazımı sürecindeki desteklerinden dolayı değerli arkadaşım Arş. Gör. Mehmet DEMİRCİ'ye teşekkür ederim.

Bugüne kadarki eğitim hayatım boyunca üzerimde emeği olan tüm hocalarımı saygıyla anar kendilerine müteşekkir olduğumu belirtmek isterim.

Bugünlere gelmem konusunda üzerimde sonsuz emekleri olan, beni daima destekleyen ve haklarını asla ödeyemeyeceğim kıymetli annem Hatice AYDOĞAN'a ve kıymetli babam Seyit AYDOĞAN'a şükranlarımı sunarım.

Ocak, 2017

Mehmet Safa AYDOĞAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT.....	xvii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	14
1.3 Hipotez	15
BÖLÜM 2	
GENEL BİLGİLER	16
2.1 Depreme Dayanıklı Yapı Kavramı	16
2.2 Depreme Dayanıklı Yapı Taşıyıcı Sisteminin Seçiminde Dikkat Edilecek Hususlar	16
2.2.1 Basitlik ve Simetri	16
2.2.2 Düzgünlük ve Süreklilik.....	17
2.2.3 Rijitlik ve Dayanım	17
2.2.4 Süneklik.....	18
2.2.5 Göçme Modu.....	19
2.2.6 Temel Zemin Koşulları	19
2.3 Yapılarda Kullanılan Başlıca Yapı Elemanları.....	20
2.3.1 Çerçeveler.....	20
2.3.2 Perdeler.....	20
2.3.3 Eğik Elemanlar	21
2.3.4 Çekirdekler	21

2.3.5	Tüpler	22
2.3.6	Kompozit Sistemler	22
2.4	Yapılarda Kullanılan Başlıca Taşıyıcı Sistemler	23
2.4.1	Çerçeve Sistemler	23
2.4.2	Betonarme Perde Sistemler	23
2.4.3	Eğik Elemanlı Sistemler	24
2.4.4	Tüp Sistemler	24
2.4.5	Kompozit Sistemler	24
2.4.6	Karışık Sistemler	25
2.4.7	İzolasyonlu ve Enerji Dağıtıcılı Sistemler	25
2.5	Doğrusal Olmayan Davranış	26
2.5.1	Yapı Sistemlerinin Doğrusal Davranış Göstermemelerinin Nedenleri	28
2.5.1.1	Geometrik Bakımdan Doğrusal Olmama Durumu	28
2.5.1.2	Malzeme Bakımından Doğrusal Olmama Durumu	29
2.6	Göçme Kriterleri	32
2.6.1	Hasarlı Beton Plastisitesi (<i>Concrete Damaged Plasticity</i>) Modeli	38
2.6.1.1	Concrete Damaged Plasticity Modelinde Çekme ve Basınç Durumunda Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkilerinin Belirlenmesi	41
2.6.1.2	Malzemede Hasarın Tanımlanması	43
2.6.1.3	Rijitlik İyileşmesi Durumu	47
2.6.1.4	Concrete Damaged Plasticity Modelinin Plasticity Parametrelerinin Belirlenmesi	48
2.7	Beton İçin Önerilen Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri	52
2.8	Sonlu Elemanlar Yöntemi	54
2.9	Doğrusal Olmayan Çözüm Yöntemleri	58
2.9.1	Artımsal Yöntem	58
2.9.2	Newton-Raphson Yöntemi ya da İterasyon Yöntemi	60
2.9.3	Artımsal-İterasyon Yöntemi	62

BÖLÜM 3

YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR ve İRDELEME

3.1	Analizlerde Kullanılacak Malzeme Verilerinin ve Modellerin Oluşturulması	64
3.2	ABAQUS/CAE v6.14 Sonlu Elemanlar Programı ile Modellemelerin Yapılması	72
3.2.1	Model Ağacı	72
3.2.2	Kısım (<i>Parts</i>) Menüsü	73
3.2.3	Malzeme (<i>Materials</i>) Menüsü	75
3.2.4	Kesitler (<i>Sections</i>) Menüsü	76
3.2.5	Birleştirme (<i>Assembly</i>) Menüsü	76
3.2.6	Adımlar (<i>Steps</i>) Menüsü	77
3.2.7	İstenilen Çıktılar (<i>Field Output Requests</i>) Menüsü	82
3.2.8	Ağ (<i>Mesh</i>) Menüsü	84
3.2.9	Analiz (<i>Analysis</i>) Menüsü	86
3.3	Elde Edilen Bulgular ve Bu Bulguların Karşılaştırılması	89
3.3.1	Analizler için Zaman Adımının ve Sonlu Eleman Sayısının Belirlenmesi	89

3.3.2	Analizlerden Elde Edilen Bulgular	93
3.3.2.1	Geleneksel Çerçeve Sisteme Ait Bulgular.....	95
3.3.2.2	Köşegen Eğik Elemanlı Sisteme Ait Bulgular	97
3.3.2.3	X Tipi Eğik Elemanlı Sisteme Ait Bulgular	99
3.3.2.4	Betonarme Perdeli Sisteme Ait Bulgular.....	101
3.3.2.5	Sistemlere Ait Bulguların Karşılaştırılması.....	103
3.3.2.6	Dikkate Alınan Sistemlere Ait Mod Şekilleri.....	106

BÖLÜM 4

SONUÇ ve ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR	113
ÖZGEÇMİŞ	118



SİMGE LİSTESİ

d_c	Basınç etkileri altında oluşan hasar
d_t	Çekme etkileri altında oluşan hasar
E	Elastisite modülü
E_0	Başlangıç elastisite modülü
f	Akma fonksiyonu
F	Toplam yük
f_c	Betonun basınç dayanımı
f_{cd}	Betonun hesap basınç dayanımı
f_{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{cm}	Betonun ortalama basınç dayanımı
f_{ctd}	Betonun hesap çekme dayanımı
f_{ctk}	Betonun karakteristik çekme dayanımı
f_{ctm}	Betonun ortalama çekme dayanımı
G	Akış potansiyeli
k	Doğrusal olmayan çözüm yöntemlerinde kullanılan artım sayısı
p	Hidrostatik eksen
t	Zaman
T	Periyot
u	Yerdeğiştirme
\dot{u}	Hız
\ddot{u}	İvme
Δ	Yerdeğiştirme
ε	Şekil değiştirme
ε_{0c}^{el}	Basınç etkilerinin kaldırılmasıyla başlangıç elastisite modülünün eğimi ile geri dönen elastik şekil değiştirme
ε_c	Basınç şekil değiştirmesi
ε_c^{ln}	Ezilme şekil değiştirmesi
ε_c^{pl}	Basınç eşdeğer plastik şekil değiştirmesi
ε_{c0}	Maksimum gerilme anındaki şekil değiştirme
ε_{cu}	Kopma anındaki şekil değiştirme
ε_{0t}^{el}	Çekme etkilerinin kaldırılmasıyla başlangıç elastisite modülünün eğimi ile geri dönen elastik şekil değiştirme
ε_{p1}	Akma sınırındaki şekil değiştirme
ε_t	Çekme şekil değiştirmesi

ε_t^{ck}	Çatlama şekil değiştirmesi
ε_t^{pl}	Çekme eşdeğer plastik şekil değiştirmesi
ϵ	Eksantrisite
κ	Deviatorik kesitin şeklini belirleyen parametre
μ	Viskozite
ρ	Özkütle
σ	Gerilme
σ_c	Basınç gerilmesi
σ_{c0}	Basınç etkisindeki betonun başlangıç akma değeri
σ_{cu}	Basınç etkisindeki betonun kopma anındaki gerilmesi
σ_t	Çekme gerilmesi
σ_{t0}	Çekme etkileri altında meydana gelen akma gerilmesi
σ_y	Akma gerilmesi
τ	Kayma gerilmesi
ν	Poisson oranı
ψ	Genişleme açısı
ω_c	Basınç rijitlik iyileşmesi
ω_t	Çekme rijitlik iyileşmesi

KISALTMA LİSTESİ

3D	Üç Boyutlu
ASCE	American Society of Civil Engineers
CDP	Concrete Damaged Plasticity
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
FEMA	Federal Emergency Management Agency
NLGEOM	Doğrusal Olmayan Geometri
SAP2000	Structural Analysis Program 2000

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 (a) Planda ani rijitlik değişimi ve (b) planda simetri	17
Şekil 2.2 (a) Süreksiz kolon ve (b) Sürekli kolon	17
Şekil 2.3 (a) Bina kesitinde ani rijitlik değişimi ve (b) rijitlik düzenlemesi.....	18
Şekil 2.4 Sünek ve sünek olmayan gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.....	19
Şekil 2.5 (a) Düzlem çerçeve ve (b) uzay çerçeve.....	20
Şekil 2.6 (a) Boşluksuz perde ve (b) boşluklu perde	21
Şekil 2.7 Eğik elemanlarla rijitleştirilmiş çok katlı çok açıklıklı bir yapı	21
Şekil 2.8 Boşluklu ve boşluksuz perdelerle teşkil edilmiş bir çekirdek örneği	22
Şekil 2.9 Betonarme tüp eleman	22
Şekil 2.10 Kompozit eleman.....	22
Şekil 2.11 Çerçeve sistem	23
Şekil 2.12 Betonarme perde sistem.....	23
Şekil 2.13 Bazı eğik elemanlı sistem örnekleri.....	24
Şekil 2.14 Tüp sistem örneği	24
Şekil 2.15 Bir kompozit sistem örneği.....	25
Şekil 2.16 Perde-çerçeve-çekirdek sistem örneği	25
Şekil 2.17 a) Sismik izolatörün kullanılmadığı bir yapı ve b) sismik izolatöre sahip bir yapı.....	26
Şekil 2.18 Birinci ve ikinci mertebeye teorilerinin karşılaştırılması [46]	29
Şekil 2.19 İdeal malzemelerin gösterimi [25].....	31
Şekil 2.20 Basınç etkisi altındaki beton malzemeye ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi	32
Şekil 2.21 a) İzotropik pekleşme, b) kinematik pekleşme ve c) karma pekleşme [33]	34
Şekil 2.22 Bir parametrelili Von Mises akma kriterine ait a) gerilme meridyenleri ve b) deviatorik kesit.....	35
Şekil 2.23 İki parametrelili Mohr-Coulomb akma kriterine ait a) gerilme meridyenleri ve b) deviatorik kesit.....	36
Şekil 2.24 İki parametrelili Drucker-Prager akma kriterine ait a) gerilme meridyenleri ve b) deviatorik kesit	36
Şekil 2.25 Üç parametrelili Bresler-Pister akma kriterine ait a) gerilme meridyenleri ve b) deviatorik kesit	36
Şekil 2.26 Dört parametrelili Ottosen akma kriterine ait a) gerilme meridyenleri ve b) deviatorik kesit.....	37
Şekil 2.27 Beş parametrelili William-Warnke akma kriterine ait a) gerilme meridyenleri ve b) deviatorik kesit.....	37

Şekil 2.28	Eksenel çekme etkisindeki betona ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi	39
Şekil 2.29	Eksenel basınç etkisindeki betona ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi	40
Şekil 2.30	Çekme gerilmeleri altındaki betonun çatlama şekil değiştirmelerinin elde edilmesi	42
Şekil 2.31	Basınç gerilmeleri altındaki betonun inelastik şekil değiştirmelerinin elde edilmesi	43
Şekil 2.32	Betonun tekrarlı yüklemeler altındaki gerilme – şekil değiştirme eğrisi [29]	44
Şekil 2.33	Tipik Malzeme Modelleri [29]	45
Şekil 2.34	Plastik-hasar modelinde var olan şekil değiştirme tipleri [31]	46
Şekil 2.35	Tipik hasar değişkeni eğrisi	46
Şekil 2.36	Çevrimsel yükleme altında (çekme-basınç-çekme) rijitlik iyileşme faktörleri [49]	48
Şekil 2.37	Meridyen düzlemdeki hiperbolik akış potansiyeli.....	49
Şekil 2.38	Düzlem gerilme durumunda akma yüzeyleri.....	50
Şekil 2.39	K 'nın farklı değerlerine göre deviatorik kesitin şeklinin değişimi	51
Şekil 2.40	Basınç etkisindeki betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi [55]	53
Şekil 2.41	Çekme etkisindeki betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi [30].....	54
Şekil 2.42	ABAQUS/CAE sonlu elemanlar programındaki a) bir boyutlu, b) iki boyutlu ve c) üç boyutlu sonlu eleman tipleri [49].....	56
Şekil 2.43	a) Artımsal yöntem ve b) değiştirilmiş artımsal yöntem [57]	59
Şekil 2.44	a) Tanjant rijitlik yöntemi ve b) başlangıç rijitlik yöntemi [57].....	61
Şekil 2.45	Artımsal-İterasyon Yöntemi [57]	63
Şekil 3.1	Basınç etkisindeki C45 betonuna ait gerilme-inelastik şekil değiştirme.....	66
Şekil 3.2	Çekme etkisindeki C45 betonuna ait gerilme-çatlama şekil değiştirmesi... 66	
Şekil 3.3	Basınç etkisindeki C45 betonuna ait hasar-inelastik şekil değiştirme.....	67
Şekil 3.4	Çekme etkisindeki C45 betonuna ait hasar-çatlama şekil değiştirmesi.....	67
Şekil 3.5	Model 1 – Geleneksel Çerçeve Sistem	68
Şekil 3.6	Model 2 – Köşegen Eğik Elemanlı Sistem	69
Şekil 3.7	Model 3 – X Tipi Eğik Elemanlı Sistem	69
Şekil 3.8	Model 4 – Betonarme Perdeli Sistem	70
Şekil 3.9	Kullanılan deprem ivme kaydının a) tamamı ve b) 9 sn'lik kısmı	70
Şekil 3.10	Grafik olarak adım adım çözümlemenin gösterimi [58]	71
Şekil 3.11	Abaqus programına ait model ağacı	72
Şekil 3.12	Model bilgi girişinin yapılışı	73
Şekil 3.13	Elemanların Tie Constraint ile birbirine bağlanması.....	74
Şekil 3.14	Malzemenin tanımlanması.....	75
Şekil 3.15	Elemanlara kesit atanması işlemi	76
Şekil 3.16	Assembly menüsünün kullanımı	77
Şekil 3.17	Mesnet şartlarının tanımlanması.....	78
Şekil 3.18	Mesnet şartlarının seçilmesi	78
Şekil 3.19	Deprem ivmesine ait kaydın programa girilmesi	79
Şekil 3.20	Zemin kat kolonlarının alt kesitlerine deprem ivmesinin tanımlanması	80
Şekil 3.21	İvmenin doğrultusunun seçilmesi.....	80
Şekil 3.22	Dynamic, Implicit analiz tipinin tanımlanması	81
Şekil 3.23	Deprem ivmesinin atanması	82
Şekil 3.24	Yazdırılması istenen analiz sonuçlarının seçilmesi	83
Şekil 3.25	Mesh işlemi yapılacak olan modelin seçilmesi	84
Şekil 3.26	Element Type seçilmesi.....	84

Şekil 3.27	Sonlu elemana ait özelliklerin seçilmesi	85
Şekil 3.28	Analizlerde kullanılan 10 düğüm noktalı C3D10 tipi eleman [49]	85
Şekil 3.29	Modelin sonlu elemanlara ayrılmış hali	86
Şekil 3.30	Analysis menüsünün görünümü	86
Şekil 3.31	Analizin oluşturulması.....	87
Şekil 3.32	Analizin başlatılması	88
Şekil 3.33	Analiz sonuçları.....	88
Şekil 3.34	İstenilen bir düğüm noktasındaki analiz sonuçlarının gösterimi	89
Şekil 3.35	Betonarme perdeli sisteme ait farklı zaman artımları için C noktasının yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi.....	90
Şekil 3.36	Geleneksel çerçeve sistemin farklı sonlu eleman sayıları için C noktasının yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi	91
Şekil 3.37	Köşegen eğik elemanlı sistemin farklı sonlu eleman sayıları için C noktasının yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi	91
Şekil 3.38	X tipi eğik elemanlı sistemin farklı sonlu eleman sayıları için C noktasının yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi	92
Şekil 3.39	Betonarme perdeli sistemin farklı sonlu eleman sayıları için C noktasının yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi	92
Şekil 3.40	Grafiklerin çiziminde dikkate alınan kolon, kesit ve düğüm noktası.....	94
Şekil 3.41	C noktasına ait doğrusal analizden elde edilen yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi	94
Şekil 3.42	Geleneksel çerçeve sisteme ait maksimum normal gerilmenin yeri ve değeri	95
Şekil 3.43	Geleneksel çerçeve sisteme ait maksimum yatay yerdeğiştirmenin yeri ve değeri.....	95
Şekil 3.44	Geleneksel çerçeve sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi	96
Şekil 3.45	Geleneksel çerçeve sistemin C noktasına ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	96
Şekil 3.46	Köşegen eğik elemanlı sisteme ait maksimum normal gerilmenin yeri ve değeri.....	97
Şekil 3.47	Köşegen eğik elemanlı sisteme ait maksimum yatay yerdeğiştirmenin yeri ve değeri.....	97
Şekil 3.48	Köşegen eğik elemanlı sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi	98
Şekil 3.49	Köşegen eğik elemanlı sistemin C noktasına ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi	98
Şekil 3.50	X tipi eğik elemanlı sisteme ait maksimum normal gerilmenin yeri ve değeri	99
Şekil 3.51	X tipi eğik elemanlı sisteme ait maksimum yatay yerdeğiştirmenin yeri ve değeri.....	99
Şekil 3.52	X tipi eğik elemanlı sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi	100
Şekil 3.53	X tipi eğik elemanlı sistemin C noktasına ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi	100
Şekil 3.54	Betonarme perdeli sisteme ait maksimum normal gerilmenin yeri ve değeri	101
Şekil 3.55	Betonarme perdeli sisteme ait maksimum yatay yerdeğiştirmenin yeri ve değeri.....	101

Şekil 3.56	Betonarme perdeli sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi	102
Şekil 3.57	Betonarme perdeli sistemin C noktasına ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	102
Şekil 3.58	Mutlak değerce maksimum normal gerilmenin sistemlere göre değışimi.	103
Şekil 3.59	Mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmenin sistemlere göre değışimi	104
Şekil 3.60	Mutlak değerce maksimum görel kat ötelemesinin sistemlere göre değışimi	105
Şekil 3.61	Geleneksel çerçeve sisteme ait periyot değerleri ve mod şekilleri	106
Şekil 3.62	Köşegen eğik elemanlı sisteme ait periyot değerleri ve mod şekilleri	107
Şekil 3.63	X tipi eğik elemanlı sisteme ait periyot değerleri ve mod şekilleri	108
Şekil 3.64	Betonarme perdeli sisteme ait periyot değerleri ve mod şekilleri	109



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Yapı sistemlerinin doğrusal olmama nedenleri [46].....	28
Çizelge 3.1 Sistemlere ait periyot değerleri.....	110

FARKLI ELEMANLARLA RİJİTLEŞTİRİLMİŞ YAPILARIN DEPREM ETKİSİNDEKİ DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞLARININ ÜÇ BOYUTLU OLARAK KARŞILAŞTIRMALI İNCELENMESİ

Mehmet Safa AYDOĞAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yusuf AYVAZ

Depremler karakteristiği, yeri ve büyüklüğü kendilerine özgü olan doğa olaylarıdır. Bilindiği gibi yapı mühendislerinin çözüme kavuşturmak zorunda oldukları en önemli problemlerden birisi de yapıların depreme karşı güvenliklerini sağlamaktır. Zira depreme dayanıklı yapı tasarımında taşıyıcı sistem seçiminin önemi oldukça açıktır. Buna ek olarak daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için doğrusal olmayan etkilerden geometrik doğrusal olmama ve malzemenin doğrusal olmaması durumlarını dikkate almak gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı farklı elemanlarla rijitleştirilmiş yapıların deprem etkisindeki malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi ve elde edilen bulguların karşılaştırılmasıdır. Bu inceleme zaman tanım alanında hesap yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışma dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde bu konuda daha önce gerçekleştirilen çalışmalara ve tezin amacına yer verilmektedir. İkinci bölümde çalışma ile ilgili genel teorik bilgilere yer verilmektedir. Üçüncü bölümde yapılan çalışmalar, bulgular ve irdelemeler sunulmaktadır. Dördüncü bölümde ise yapılan çalışmadan çıkarılabilecek bazı sonuçlar ve getirilen öneriler verilmekte olup bu bölümü kaynaklar listesi izlemektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada dikkate alınan tüm rijitleştirici elemanların yatay yerdeğiştirmeleri ve maksimum görelî kat ötelemelerini azalttıkları ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Depreme dayanıklı yapı tasarımı, doğrusal olmayan analiz, taşıyıcı sistem, rijitleştirici elemanlar, karşılaştırmalı çalışma, zaman tanım alanında hesap yöntemi



ABSTRACT

COMPARATIVE STUDY OF NONLINEAR BEHAVIOR OF 3D STRUCTURES WITH DIFFERENT STIFFENING MEMBERS SUBJECTED TO EARTHQUAKE

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Yusuf AYVAZ

Earthquakes are the natural events whose characteristic, location and magnitude are unique. It is known that one of the major problem faced by the structural engineers is to provide the earthquake safety of structures. In the earthquake resistant structural design, it is essential to select the structural form of a structure. In addition, in order to obtain more realistic results, nonlinear effects such as material nonlinearity and geometric nonlinearity must be taken into account.

The objective of this study is to investigate materially nonlinear behaviors of structures with different stiffening members when it is subjected to earthquakes and to compare the results obtained. In the analyses, the time history analysis is used. This study has four main chapters. In the first chapter, previous studies and the purpose of this study are presented. In the second chapter, the general theoretical information about the study and the purpose of the study are given. In the third chapter, the studies made and the results are presented. In the fourth chapter, the conclusions drawn from the study and some suggestion are presented and this chapter is followed by a list of references.

It is concluded that all of the stiffening members considered reduce the lateral displacement of the structures and maximum relative storey displacement.

Keywords: Earthquake resistant structural design; nonlinear analysis; structural forms; stiffening members; comparative study; time history analysis



1.1 Literatür Özeti

Dünyanın en büyük ve en şiddetli depremlerinin yaşandığı Alp – Himalaya deprem kuşağında bulunan Türkiye’de, bu depremlere karşı koyabilecek nitelikte yapılar inşaa etmenin önemi yadsınamaz. Türkiye’de ve tüm dünyada araştırmacılar ve bilim insanları tarafından depreme dayanıklı yapı tasarımı konusunda sürekli olarak bir gelişme kaydedilmektedir. Yapılan tüm bu çalışmalardan elde edilen bulgulardan biri de deprem, rüzgar gibi yatay kuvvet oluşturan etkilere karşı yapının rijitliğini artırmak amacıyla çeşitli kombinasyonlar halinde çeşitli rijitleştirici elemanların kullanılabilceğidir. Bahsi geçen konularla ilgili literatürde sayısız çalışmanın yapılmış olduğu söylenebilir. Bu bölümde yapıların deprem etkilerine karşı farklı yöntemlerle rijitleştirilmesi, doğrusal olmayan malzeme ve yapı davranışı, doğrusal olmayan analiz yöntemleri, sonlu elemanlar yöntemi, depreme dayanıklı yapı tasarımı gibi konularda bugüne kadar yapılmış olan çalışmalardan bazıları üzerinde durulmuştur.

Bazaez ve Dusicka [1], burkulması önlenmiş eğik güçlendirme elemanları vasıtasıyla betonarme köprü bentlerinin çevrimsel davranışını araştırmışlardır. Bu araştırmalar büyük ölçekli deneylerle quasi-statik çevrimsel yüklemeler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Güçlendirilen bentler elastik davranacak veya çok küçük hasarlar alacak şekilde tasarlanmıştır. Araştırmacılar, eğik güçlendirme elemanlarını farklı iki tipte düzenleyerek, bu düzenlemenin sonuçlara olan etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak burkulması önlenmiş güçlendirme elemanları kullanmanın, yapıların yüksek oranda sünek yerdeğiştirme yapabilmesini sağladığı ve betonarme bentlerin zayıf bölgelerindeki mevcut hasarların kontrolü açısından bir avantaj sağladığı bulgusuna ulaşılmıştır.

Güçlendirme elemanlarının yapıyla birleştiği bölgelerde hiç hasarın gözlenmediği belirtilmiştir.

Wang, Ibarra ve Pantelides [2], yaptıkları çalışmada burkulması önlenmiş eğik güçlendirme elemanları kullanarak, bu elemanların düz köprülerin sismik açıdan iyileştirilmelerine faydalarını araştırmışlardır. Bu amaçla üç açıklıklı betonarme kutu kiriş bir köprü, çalışma konusu olarak belirlenmiştir. Bu eğik elemanların inelastik davranışları, onların izotropik ve pekleşme özelliklerini yeniden belirlemek için Menegetto – Pinto modeli kullanılarak temsil edilmiştir. Mevcut betonarme köprünün ve eğik elemanlar ile rijitleştirilmiş köprünün sismik davranışlarını değerlendirmek amacıyla doğrusal olmayan time – history analizleri yapılmıştır. Yapı, bazı performans seviyeleri altında uzak alan kayıtları kullanılarak değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, eğik elemanların bentlerdeki ötelemeleri azaltarak ve orijinal betonarme kolonlardaki çelik ve betonun şekil değiştirmelerini azaltarak, köprünün işletilebilirlik ve nihai sınır durumlar altında sismik performansını iyileştirdiği sonucunu göstermiştir. Bu eğik elemanların köprünün enine doğrultusundaki enerjinin dağıtılmasında ve sönmülmesinde ve beton kolonların olası göçme ihtimallerinin azaltılmasında büyük yarar sağladığı belirtilmiştir.

Fu [3] tarafından ABAQUS sonlu elemanlar programı ile yapılan çalışmada yapının herhangi bir katında meydana gelen lokal bir kolon göçmesinin aşamalı bir şekilde ilerlemek suretiyle yani yeniden dağılım olayı gerçekleştikten sonra diğer kolonların da birinin veya birkaçının göçmesi neticesinde genel bir yapı göçmesine sebebiyet verip vermeyeceği ve ele aldığı geleneksel karkas bir yapıyı çapraz elemanlarla dayanıklı hale getirerek bu tümünden yapı göçmesi olayının ne derecede önüne geçilebileceği durumu ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır.

Jain [4], şiddetli yer hareketleri esnasında yapıda oluşacak olan yatay yerdeğiştirmelerin azaltılması ve yapıda oluşacak enerjinin sönmülmesi amacıyla çelik ve beton malzemeden üretilmiş rijitleştirici elemanlar kullanarak bazı çalışmalar yapmıştır. K tipi ve X tipi rijitleştirici elemanlarla betonarme çerçeveler güçlendirilerek inelastik sismik tepkiler elde edilmiştir. Limit tasarım prosedürüne göre iki açıklıklı altı katlı bir çerçeve modellenmiş ve bu yapı 1940 El Centro depreminin kuzey-güney bileşeninin 1,25 katına ve yapay olarak üretilen bir başka deprem kaydına maruz bırakılmıştır. Hem K tipi hem de X tipi rijitleştirici elemanların inelastik davranışları, modifiye edilen El Centro depremi altında memnun edici sonuçlar vermiştir. Diğer yapay deprem kaydı altında

analiz edilen X tipi elemanlarla güçlendirilen çerçevelerin tepkisi ise K tipi elemanlarla güçlendirilen çerçevelere kıyasla daha olumlu sonuçlar vermiştir. Araştırmacı ayrıca bu rijitleştirici elemanların kullanımının normal çerçevelere göre kolonlarda oluşan aksenal kuvvetleri oldukça artırdığı sonucuna ulaşmıştır. Bunların dışında yazar malzeme karakteristiklerinin farklılığından ötürü beton malzemeden üretilen rijitleştirici elemanların kullanıldığı çerçevelerin inelastik tepkisinin çelik malzemeden üretilen rijitleştirici elemanların kullanıldığı çerçevelere kıyasla oldukça farklı olmasının beklendiği sonucuna ulaşmıştır.

Sinabadi [5] tarafından yapılan araştırmada burkulması önlenmiş çelik çaprazlı çerçevelerin deprem performansları araştırılmıştır. Üç farklı konfigürasyon şeklinde, yanal yük etkisindeki binaların davranışları merkezi kısa bağlantılı, dış merkezi ve uzun bağlantılı dış merkezi çaprazlı sistemler olarak incelenmiştir. Yapıların davranışını daha iyi yorumlayabilmek amacıyla FEMA 356'ya göre doğrusal olmayan statik ve doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmıştır. Elde edilen bulgularda en temel kriterler olarak kalıcı maksimum deplasman ve katlar arasında kayma durumlarının olduğu belirtilmiştir. Çelik çapraz çerçevelerin en önemli vasıflarından birinin deprem sırasında yapıdaki kolon, kiriş gibi temel elemanların doğrusal kalmaları olduğuna ulaşılmıştır. Araştırmacı buradan hareketle çevrimsel yük altında oluşan en büyük deprem enerjisini, akma yoluyla çapraz elemanların karşılaşmasının beklendiği çıkarımında bulunmuştur.

Callister ve Pekelnicky [6], 1980'lerde California'da inşa edilmiş, rijitleştirilmiş çerçevelerden oluşan iki katlı bir yapının sismik değerlendirmesini yapmışlardır. Araştırmacılar bu yapının doğrusal olmayan statik analizini *ASCE 41-06 Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*'e göre yapmışlardır. Analiz sonuçlarında yatay etkilere karşı güçlendirme sağlayan elemanların birleşim yerlerinde kırılma gerçekleşinceye kadar binanın çok rijit bir davranış sergilediği elde edilmiştir. Kırılma gerçekleştikten sonra ise binanın daha esnek bir hale geldiğine değinilmiş, öte yandan ağırlık çerçevelerinin, binanın stabilitesinden ödün vermeksizin, depremin sebebiyet verdiği ötelemelere uyum sağlamak için yeterli esnekliğe sahip olduğu belirtilmiştir. Bu analizler neticesinde mevcut binanın can güvenliği performans seviyesi koşullarını sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Taşkın [7], yaptığı çalışmada ele aldığı yapılarda malzemenin doğrusal olmayan davranışını dikkate almış, binalarda köşelere yakın yerlere yerleştirilen çaprazlarla kontrollü bir şekilde plastik şekil değiştirme yapabilen ve bu sayede enerji yutabilen bir

güçlendirme yolunu teorik ve deneysel olarak gerçekleştirmiştir. Maliyeti artırmadan enerji yutma kapasitesini yükseltmek amacıyla, seçilen farklı rijitleştirme biçimleri arasında karşılaştırma yapan araştırmacı bu güçlendirme yolunu izlerken köşelere eklenen çaprazların ve bu çaprazların birbirleriyle olan bağlantılarının yapının serbest titreşim karakteristikleri ve yatay rijitliği üzerinde sınırlı etkileri olduğu sonucuna ulaşmıştır. Bunun yanında, uygulanan bütün köşe çaprazlı sisemlerde görelî kat ötelemelerinin azaldığını belirten araştırmacı, serbest titreşim karakteristikleri fazla değişmediğinden dolayı yapıya aktarılan deprem yüklerinde ciddi bir artış olmadan yapının yatay yük taşıma kapasitesini de artırdıkları sonucuna ulaşmıştır.

Ghowsi ve Sahoo [8] tarafından kolon-kiriş birleşimlerinin ve eğik elemanların düzenlenme biçiminin orta katlı burkulması önlenmiş eğik elemanlı çerçevelerin sismik tepkisi üzerine etkileri analitik olarak değerlendirilmiştir. V tipi ve X tipi eğik eleman düzenlemeleri ve moment aktaran ve moment aktarmayan kolon-kiriş birleşimlerinin kombinasyonu dikkate alınmıştır. Tepki azaltım faktörü (R) tasarımda 8 olarak dikkate alınmış ve nonlinear dinamik analizler yapılmıştır. Hasar parametreleri olarak görelî kat öteleme oranı ve artık öteleme oranı gözönüne alınarak tüm çerçeveler için narinlik eğrileri geliştirilmiştir. Sonuçlar daha büyük tepki azaltma faktörü kullanmanın burkulması önlenmiş eğik elemanlı çerçevelerin tasarımında rijit kolon-kiriş birleşimleri için kabul edilmesi gerektiğini göstermiştir. Ayrıca arzulanan sismik performansı yakalamak için X tipi eğik eleman düzenlemelerinin ve rijit kolon-kiriş birleşimlerinin birbiri ardına gelen kat seviyelerinde kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Corte, D'Aniello ve Landolfo [9] tarafından mevcut hasarlı bir betonarme yapının burkulması önlenmiş, çelik malzemeden yapılmış, sökülüp takılabilir eğik güçlendirme elemanları ile rijitleştirilmesi sonucu elde edilen yapıya tam ölçekli inelastik çevrimsel statik testler yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Betonarme yapının kolon – kiriş birleşim yerlerine bulonlarla sabitlenen bu eğik elemanların birleşim bölgelerinin dayanımının, büyük inelastik deformasyonlara izin verilmesi için yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Ameen [10] tarafından yakın alan yer hareketlerine maruz bırakılan farklı tipteki geleneksel sistem biçimindeki binalar ile burkulması önlenmiş çaprazlarla güçlendirilmiş moment aktarabilen çerçevelere sahip binaların yapısal tepkilerini karşılaştırmak amacıyla doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Çaprazlı

çerçeve yapılar da üç farklı tipte diyagonaller kullanan araştırmacı burkulması önlenmiş sistemlerin deprem performansında ciddi manada iyileşmeler olduğunu görmüştür.

Tan, Huang, Yan, Yi, Lu ve Bai [11] tarafından çapraz şeklindeki betonarme eğik elemanlar kullanılarak betonarme uzay çerçevelerin sismik performansı araştırılmıştır. Bu amaçla çevrimsel yükleme altındaki ¼ oranlı, iki katlı ve üç açıklıklı betonarme uzay çerçeve sistem ile çapraz şeklindeki eğik elemanlarla güçlendirilen bir başka betonarme uzay çerçeve sisteme ait deneysel sonuçlar üzerinden bir karşılaştırma yapılmıştır. Sonuç olarak çapraz şeklindeki eğik elemanlarla güçlendirilen sistemin yatay dayanım, rijitlik ve enerji sönüm kapasitesi açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bunların dışında bu dayanıklı hale getirilen sistemin, betonarme eğik elemanlarda kopma gerçekleşikten sonra bile yük taşımaya devam ettiği sonucuna ulaşılmıştır.

Badoux ve Jirsa [12], sismik açıdan yetersiz kalan betonarme çerçeve yapıların çelikten yapılmış eğik güçlendirme elemanları ile dayanıklı hale getirilmesini araştırmışlardır. Diyagonal eğik elemanların kullanımının mevcut binanın yatay kuvvetlere karşı dayanımı ve rijitliği açısından en iyi yaklaşım olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ötelemenin kontrolünden göçmenin önlenmesine kadar çeşitli kriterler dikkate almışlardır. Güçlendirilen çerçevelerin, çevrimsel yatay yüklemeler altındaki davranışını anlamak için analitik bir çalışma yapmışlardır. Eğik elemanların inelastik burkulmalarının, güçlendirilen çerçevenin inelastik çevrimsel davranışına kötü bir biçimde etki ettiği sonucuna ulaşmışlardır.

Ayvaz, Doğangün ve Durmuş [13] tarafından farklı eğik elemanlar ve betonarme perde kullanılarak daha rijit hale getirilen çerçeve sistem yapıların deprem etkisi altındaki davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Araştırmacılar, kullandıkları tüm rijitleştirici elemanların, gelen yatay yükleri normal kuvvete aktarmak suretiyle taşıdıkları için eğilme momentini azalttıkları sonucuna ulaşmışlardır. Bu durumun şayet önlem alınmazsa kolonların taşıma güçlerini basınç kırılması şeklinde kaybedebileceği anlamına geldiği vurgulanmıştır.

Pincheira ve Jirsa [14] tarafından üç prototip binanın inelastik statik ve dinamik tepki analizleri kullanılarak sünek olmayan betonarme çerçeveler üzerinde yapılan güçlendirme uygulamalarının sismik performansları araştırılmıştır. Güçlendirme uygulamalarında ardgermeli elemanlar, yapısal çelik elemanları ve betonarme için dolgu duvarlar kullanılmıştır. Sert ve yumuşak zemin şartlarında, büyük depremleri temsil eden

beş adet zemin hareketi kullanılarak dinamik analizler yapılmıştır. Orijinal ve güçlendirilen yapıların tepkileri maksimum yerdeğiştirme ve görelî kat ötelemeleri açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar tek bir çözümün olmadığını ve yeterli performansı sağlamak için birtakım farklı güçlendirme uygulamalarının yapılabileceğini göstermiştir.

Ağar [15] tarafından yapılan çalışmada farklı yükseklikteki betonarme çerçeve sistemlerin çelik çapraz elemanlar kullanılarak güçlendirilmesinin yolları analitik olarak araştırılmıştır. Güçlendirilen çerçevelerin yatay yük taşıma kapasitelerini yük kontrollü statik itme analizi yöntemiyle belirleyen araştırmacı tarafından ön yüklemenin art-germe etkisi de ayrıca incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre çapraz elemanlar kullanmanın sistemin yatay yük taşıma kapasitesini ciddi manada artırdığı belirlenmiştir. Bunun yanında beton kalitesinin değişiminin güçlendirmeye hangi oranlarda etki edeceği de araştırılmıştır.

Abdallah [16], yanal yüklemeye maruz kalan yapıların korunması ve tepkilerin azaltılması amacıyla burkulması önlenmiş çapraz elemanlar kullanarak bu durumun etkilerini araştırmıştır. Bu konu ile ilgili analitik bir araştırma sunan araştırmacı geleneksel tipteki ve burkulması önlenmiş çapraz elemanların kullanıldığı sistemlerin deprem etkisindeki davranışlarını doğrusal olmayan statik analiz yöntemiyle incelemiştir. Araştırmacı, burkulması önlenmiş eğik elemanların görelî kat ötelemelerini çok önemli ölçüde azalttığı sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca bina yüksekliğine bakılmaksızın diyagonal ve zikzak şeklinde kullanılan eğik elemanların çapraz ve v tipi eğik elemanlara nazaran daha uygun ve güvenli plastikleşme mekanizması oluşturduğu neticesine varmıştır.

Üzer [17] tarafından yapılan araştırmada çelik bir endüstri yapısı ele alınarak asma germe sistemlerin endüstriyel yapılarda kullanımı SAP2000 sonlu elemanlar programı yardımıyla araştırılmıştır. Farklı tiplerde düzenlenmek suretiyle ele alınan çaprazsız, çelik çaprazlı, halatlı ve dolgu duvarlı modellerin zaman tanım alanında hesap yöntemiyle analizleri ve statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre çelik çaprazlı modelin diğer modellerden daha rijit olduğu ve yerdeğiştirmeleri önemli ölçüde sınırladığı bulgularına ulaşılmıştır.

Xie [18], sismik etkilere karşı yapıların dayanımını artırma amaçlı kullanılan çapraz elemanların, sadece basınç ya da çevrimsel yüklemeler altında ciddi anlamda burkulma riski taşıdığı için bu elemanların burkulmalarını engellemek amacıyla bazı çalışmalar

yapmıştır. Çalışmasında çeşitli tipteki burkulması önlenmiş elemanların Asya'da özellikle Japonya'daki farklı düzenleme biçimlerinin araştırılması ve geliştirilmesine değinmiştir. Burkulmayı önleme amaçlı çeşitli teorik ve deneysel çalışmalarda bulunmuştur. Araştırma sonucunda burkulması önlenmiş elemanlar sayesinde hem çok katlı çelik binalarda hem de mevcut binalarda yapılan analizlerde, yapıların dayanım açısından oldukça iyi bir performans sergilediği belirtilmektedir.

Gürsoy [19] tarafından yapılan çalışmada deprem durumunda geleneksel betonarme çerçeve sistem ve farklı elemanlarla rijitleştirilen çerçeve sistemlerin deprem performansları ve kaba inşaat maliyetleri 2007 DBYBHY 'de önerilen farklı zemin türleri de dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Buradan hareketle farklı elemanlarla rijitleştirilen yapıların maliyetleri ve deprem performansları Sta4-CAD programı ile elde edilmiştir. Elde edilen bulgular irdelendiğinde beklenilenin aksine farklı elemanlarla rijitleştirilen yapıların geleneksel çerçeve sistem yapılarına göre kaba inşaat maliyetlerinin daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Kılıç [20] tarafından 2007 DBYBHY 'ye göre tarihi betonarme bir yapının doğrusal olmayan analizi yapılmış ve söz konusu binanın güçlendirilmesi konusyla ilgili çalışmalarda bulunulmuştur. Yönetmelikte belirtilen hemen kullanım performans düzeyini ve can güvenliği performans düzeyini sağlamayan binanın mevcut haliyle göçme durumunda olduğunu belirten araştırmacı, bu binanın hem perdelerle hem de çelik çaprazlarla güçlendirilmesi sonucunda sistemin yanal kapasitesinin ve rijitliğinin önemli ölçüde arttığı ve binanın istenen performans seviyesine geldiği sonucuna ulaşmıştır.

Akın [21] tarafından betonarme çerçeve sistemlerin çapraz elemanlar yardımıyla güçlendirilmesi konusu araştırılmıştır. Yanal ötelenmelerin azaltılması, yatay yük taşıma kapasitesinin artırılması, rijitliğin süneklikten ödün verilmeden artırılması için bir model öneren araştırmacı, önerdiği bu modelde kolon kiriş birleşim bölgesine epoksi yardımıyla ankraj yapılan, burkulma durumunun önem arz etmediği, çekmeye çalışan çapraz elemanlar kullanmıştır. Yapılan bu çalışmada çapraz elemanların kolon-kiriş birleşim bölgelerine ankrajlanması ile güçlendirilen betonarme çerçeve sistemlerin, deprem etkisini yansıtan tersinir-tekrarlanır yatay yükler altında deneysel ve analitik olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Araştırmacı tarafından ayrıca dolgu duvarların deprem durumundaki etkisi de araştırılmıştır. Buradan hareketle deneysel kısımda, 1/5 ölçekle modellenmiş farklı yapısal özellikteki betonarme çerçeve sistemler depremi benzeştiren tersinir-tekrarlanır yatay yükler altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda

hesaplamalara dahil edilmemelerine karşın dolgu duvarların, yapının deprem dayanımına katkısının önemsenmesi gereken boyutlarda olduğu görülmüştür. Ayrıca çapraz çubuk ve dolgu duvar kullanmanın, çerçeve sistemlerin rijitliğini, taşıma gücünü, dayanımını ve enerji tüketme kapasitesini hangi yönlerde değiştirdiğine ilişkin bulgulara ulaşılmıştır.

El-Sokkary ve Galal [22] tarafından sünek davranış sergilemeyen mevcut betonarme çerçeve sistem yapıların sismik performansını artırmak amacıyla farklı rehabilitasyon teknikleri kullanılmak suretiyle analitik olarak bu tekniklerin etkinliklerini araştırılmıştır. Bu amaçla az katlı ve çok katlı çerçeve sistemler seçilmiştir. İyileştirme teknikleri olarak betonarme perde duvarlar, çelik çapraz elemanlar, polimer lifli diyagonal elemanlar ve çerçevelere ait kolon ve kiriş elemanların kısmi ya da tamamen polimer lifli kompozitlerle kaplanması yöntemleri kullanılmıştır. Üç farklı deprem ivme kaydı altında mevcut ve iyileştirilen çerçeve sistemler için doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmıştır. İvme kayıtları düşük, orta ve yüksek frekansa sahip depremler arasından seçilmiştir. Elde edilen sonuçlardan düşük katlı çerçeveler için perde duvar kullanmanın pik zemin ivmesini, kat kesme talebini ve enerji sönümlenme kapasitesini artırdığı, polimer lifli kompozitlerle kolon ve kirişlerin sarılmasının ise görelî kat öteleme oranını artırdığı görülmüştür. Yüksek katlı çerçevelerde ise perde duvar kullanmanın kat kesme talebini artırdığı, polimer lifli kompozitlerle kolon ve kirişlerin sarılmasının pik zemin ivmesini, görelî kat öteleme oranını ve enerji sönümlenme kapasitesini artırdığı ifade edilmiştir. Diğer rehabilitasyon tekniklerinde ise sınırlı sayıda çerçevenin istenilen düzeyde etkin davranış sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Araştırmacılar en uygun rehabilitasyon tekniğinin yapısal özelliklere, sismik tehlikeye ve geliştirilmesi hedeflenen performans parametresine göre belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadırlar.

Baş [23] tarafından yapılan çalışmada, burkulması önlenmiş çaprazlı çelik çerçeveli farklı yükseklikteki sistemlerin büyütme katsayısı incelenmiştir. Büyütme katsayısını, doğrusal olmayan statik itme analizi sonucu çizilen kuvvet – yerdeğiştirme eğrisi üzerinden elde edilen gerçek dayanımın tasarım dayanımına oranı olarak tanımlayan araştırmacı bu amaçla deprem yüklerini burkulması önlenmiş çaprazlarla karşılayan farklı kat sayılarına sahip sistemler tasarlamıştır. Çalışma sonucunda çapraz elemanların akmaya başlaması durumunda, kolonların aksenal kuvvet taşıma kapasitelerinin aşılmadığı bulgusu elde edilmiştir.

Düzel [24] tarafından düşey doğrultuda rijitlik düzensizliği bulunan düzlem çerçeveler ilk olarak çelik çapraz elemanlarla güçlendirilmiş ardından aynı yapılar doğrusal viskoz

sönüm elemanları ile de güçlendirilerek bu iki yöntem yapısal davranış etkileri açısından karşılaştırılmıştır. SAP2000 sonlu elemanlar programı ile yumuşak katlı modeller kurularak analizler gerçekleştirilmiştir. Malzemeler doğrusal elastik kabul edilerek zaman tanım alanında hesap yöntemiyle, Marmara ve El Centro NS deprem ivme kayıtları ile analizler yapılarak kat ivmeleri, kat deplasmanları ve görelî kat deplasmanları elde edilmiştir. Bunun yanında sönümleyicilerin ve çelik çaprazların farklı yerleşim şekillerine göre oluşacak değişimlerin davranış üzerindeki etkileri araştırılmış ve buradan hareketle farklı davranış parametrelerine göre en uygun yerleşimler belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hem çelik çaprazlar ile hem de viskoz sönümleyiciler ile yapılan güçlendirmeler sayesinde yapının tepe deplasmanının azaldığı görülmüştür. Edinilen en önemli bulgulardan biri de viskoz sönüm elemanlarının hem deplasmanları hem de kat ivmelerini azaltmasına rağmen çelik çapraz elemanların deplasmanları azaltması ancak kat ivmelerini artırmasıdır.

Toksoy [25] tarafından yapılan çalışmada geleneksel sistem ile farklı eğik elemanlarla ve betonarme perde sistemlerle daha rijit hale getirilen yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışları statik analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Araştırmacı tarafından farklı kat sayıları kullanılarak yük faktörü, eşdeğer gerilme ve eşdeğer yerdeğiştirme açısından incelemeler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, doğrusal olmayan analiz yapmanın yapının davranışını daha güvenli ve gerçekçi bir şekilde ifade ettiği ve rijitleştirilen sistemlerin dikkate alınan unsurlar açısından daha iyi davranış gösterdiği belirtilmiştir.

Sivritepe [26] tarafından yapılan çalışmada, çelik çaprazlı ve betonarme perde sistemlerle daha rijit hale getirilen yapıların yatay yükler altındaki davranışları incelenmiştir. Tasarlanan bu yapılarda deprem etkisinde oluşan deplasman değerlerine bakılmıştır. Çelik çaprazlı sistemlerin kesitleri büyütülerek sistemlerde değişen deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. Öte yandan mevcut olan dokuz katlı betonarme perdeli bir yapının perdelerinin kaldırılıp yerine farklı şekillerde çelik çapraz elemanlar eklenmesiyle elde edilen yapılarda analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre çelik çaprazlarla rijitleştirilen yapıların perdelerle rijitleştirilen yapılara göre daha rijit davranış sergiledikleri belirlenmiştir. Yerdeğiştirme açısından da çaprazlı sistemlerin perdeli sistemlere nazaran daha pozitif sonuçlar verdiği ulaşılmıştır. Ayrıca çapraz elemanlar sayesinde kolon boyutlarında küçültme yoluna gidilebileceği çıkarımında bulunularak, bu durumun yapılardaki kullanılabilir hacmi de artıracakı belirtilmiştir.

Lee ve Fenves [27] tarafından yapılan çalışmada çevrimsel yüklemelere maruz kalan beton için yeni bir plastik-hasar modeli geliştirildi. Bu modelde sürekli ortam hasar mekaniğindeki kırılma enerjisi tabanlı hasar ve rijitlik azalması kavramları kullanıldı. Farklı hasar durumlarını dikkate almak amacıyla çekme ve basınç durumları için iki adet hasar değişkeni ve çoklu pekleşme değişkenleriyle geliştirilen akma fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu çalışmada, deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar elde edebilmek amacıyla akma yüzeyinin gelişimini kontrol etmek adına efektif gerilmeler için dayanım fonksiyonu kullanılmıştır. Önerilen model monotonik veya çevrimsel yükler altındaki betonların davranışını çok iyi bir şekilde temsil etmiş, ayrıca deneysel sonuçlarla da uyumlu sonuçlar vermiştir. Çatlakların açılması ve kapanmasının neden olduğu rijitlik azalması ve rijitlik iyileşmesi kavramları iyi bir şekilde tasvir edilmiştir.

Phuvoravan [28], yaptığı çalışmada betonarme döşemeler için yeni bir sonlu eleman önermiştir. Bu sonlu eleman, betonu dört düğüm noktalı Kirchoff kabuk eleman, donatıyı ise iki düğüm noktalı Euler kiriş eleman olarak gözönüne alan beton ve donatı arasındaki etkileşimi ise rijit bağlarla sağlayan bir özelliğe sahiptir. Rijit bağlar için transformasyon yöntemi kullanılarak nihai olarak elde edilen sonlu eleman ağında donatıya ait düğüm noktaları çıkarılmıştır. Önerilen sonlu eleman donatıların bulunduğu yerleri de göz önüne alabilmektedir. Bu sayede betonarme döşemelerin davranışlarını çok iyi bir şekilde dikkate alabilmektedir. Ayrıca bu sonlu eleman beton ve donatı arasındaki bond-slip etkisini de dikkate alabilmek için genişletilebilir özelliğine sahiptir. Önerilen sonlu eleman ile yapılan analizlerde deneysel sonuçlarla çok iyi bir uyum elde edilmiştir.

Lale [29] tarafından davranışı oldukça karmaşık olan betonda küçük çekme gerilmelerinde bile çatlaklar oluşması, basınç gerilmeleri altında kalıcı şekil değiştirmeler gözlenmesi ve bunlara ek olarak yanal basınç gerilmelerinin etkimesi durumunda betonun hem şekil değiştirme kapasitesinde hem de dayanımında bir yükselme gözlenmesinden dolayı plastisite ve sürekli ortam hasar mekaniği teorileri temel alınarak beton için yanal basınca duyarlı bir malzeme modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modelde bünye bağıntıları fortran dilinde yazılmıştır. Betondaki hasarın izotropik kabul edildiği bu modelde hasar, plastik şekil değiştirmelerin bir fonksiyonu olarak kabul edilmiştir. Bu malzeme modeli kullanılarak literatürdeki monotonik biçimde artan tek eksenli çekme, tek eksenli basınç ve üç eksenli basınç deneyleri ile oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca betonun tekrarlı çekme ve basınç etkilerindeki davranışının gerek önerilen modelin hasar mekaniği kısmının rijitlik azalmasını gerekse de plastisite teorisi

kısının kalıcı şekil değiştirmeleri iyi bir biçimde yansıtması sayesinde oldukça gerçekçi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Wang ve Hsu [30], genel amaçlı program olan FEAP 'ı modifiye ederek betonarme yapılarda kullanılmak üzere FEAPRC adını verdikleri bir sonlu elemanlar programı geliştirmişlerdir. Bu program çatlama betonarme elemanın dört önemli karakteristiğini hesaba katmaktadır. Bunlar basınç etkisindeki betonun yumuşama etkisi, çekme etkilerine maruz kalan beton için çekme rijitleşmesi etkisi, beton içine gömülen çelik donatıların ortalama gerilme-şekil değiştirme eğrileri ve beton için yeni ve makul bir kayma modülüdür. Geliştirilen programın kirişlerde, panellerde ve çerçevesiz-perde duvarlı sistemlerde deneysel sonuçlarla çok iyi bir uyum sağlayan sonuçlar verdiği bulgusuna ulaşılmıştır.

Tezer [31], araştırmasında iki temel inelastik davranış mekanizması olan plastisite ve hasarı dikkate alarak bir yapısal malzeme modeli geliştirmiştir. Geliştirilen bu modelin amacı tekrarlı yüklemeler altındaki davranışın incelenmesidir. Bu sayede hem izotropik hem de doğrusal kinematik pekleşme etkilerinin gözönüne alınması amaçlanmıştır. Elastik olmayan mekanizmaları tariflerken plastikleşme davranışına karşı hasar ölçütlerinin bağımsız olarak kullanılması geliştirilen modelin en büyük artısıdır. Plastik ve hasar bölgelerinde eğilme ve kesme etkilerini düşünerek bozulan ve bozulmayan sonlu eleman şekilleri gözlenmiştir. Geliştirilen modelde histeretik döngüler plastik-hasar davranışı gözönüne alınarak çok iyi bir şekilde temsil edilmiştir. Ayrıca baskın bir şekilde eğilme davranışının gözlendiği problemleri çözmek için Pian-Simuhara gerilme enterpolasyon fonksiyonunun çok iyi performans sergilediği sonucuna ulaşılmıştır.

Lubliner, Oliver, Oller ve Onate [32] tarafından betonun doğrusal olmayan analizi için yeni bir yapısal model sunulmuştur. Bu modelde, deneysel sonuçlarla çok iyi uyum sağlayan ve hem elastik hem de plastik rijitlik azalmasını dikkate alan yeni bir akma kriteri kullanılmıştır. Model sayesinde betonda oluşan çatlama başlangıcı ve miktarı sonlu eleman plastisite çözümlemesiyle incelenebilmektedir. Beton bir yapıda çatlama davranışının, hasarın en önemli göstergesi olduğu belirtilen bu çalışmada deneysel sonuçları mevcut olan bazı numunelerin, önerilen modelle sonlu eleman analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan plastisite teorisinin kırılma mekaniği ve sürekli ortam hasar mekaniği yaklaşımlarına kıyasla oldukça basit bir model olduğu bulgusuna ulaşılmıştır. Ayrıca modelin uygunluğunu test etmek için karmaşık ve zor örnekler üzerinde çalışmalar yapan araştırmacılar deney sonuçlarıyla çok iyi uyum gösteren

bulgular sayesinde önerdikleri modelin çok iyi sonuçlar vermekte olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacıların üç boyutlu gerilme uzayında betonun göçmesini tanımlamayı amaçladıkları bu çalışma, plastik-hasar modelinin diğer araştırmacılar tarafından geliştirilmesi ve sıkça kullanılması adına öncü bir niteliğe sahip olmuştur.

Dede [33] tarafından literatürde beton için önerilmesine rağmen çok fazla kullanılmayan akma kriterleri ve basınç ve çekme etkilerinde farklı gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılarak betonarme kirişlerin malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışları incelenmiştir. Buradan hareketle MATLAB programlama dilinde bir bilgisayar programı geliştiren araştırmacı bu programa çok fazla kullanılan akma kriterlerinin yanısıra Bresler-Pister ve Hsieh-Ting-Chen gibi neredeyse hiç kullanılmayan akma kriterlerini entegre etmiştir. Ayrıca programa farklı gerilme-şekil değiştirme eğrileri de entegre edilerek bunların etkinliği de literatürde verilen deneysel ve analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre betonarme kirişler için geliştirilen bilgisayar programının literatürde verilen sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu ve kullanılan bu göçme kriterlerinin betonarme kirişlerin doğrusal olmayan analizinde kullanılmasına elverişli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Alinoori [34] tarafından yüksek deprem riskinin olduğu bir fay hattı üzerinde 1970 yılında inşa edilen bir betonarme okul binasının farklı yöntemler kullanılarak onarım ve güçlendirilmesi konusu incelenmiştir. Bahsi geçen binanın taşıyıcı sistemi düşey ve yatay yükler altında incelenmiş olup binada kullanılan betonun mukavemetinin belirlenmesi için deney yapılmıştır. Ardından araştırmacı tarafından, modellemesi yapılan binanın FEMA-356 kuralları çerçevesinde SAP2000 sonlu elemanlar programı ile doğrusal olmayan itme analizleri yapılmıştır. Analizler neticesinde binanın güçlendirilmeye ihtiyacı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Binanın tasarım depremi altında hemen kullanım performans seviyesini sağlaması, maksimum depremde ise can güvenliği performans seviyesini sağlaması amaçlanan bu çalışmada güçlendirme yöntemleri olarak mevcut çerçevelere perde duvarlar eklemek, çelik diyagonal elemanlar eklemek ve kolonların mantolanması uygulamalarına başvurulmuştur. Elde edilen bulgulardan, çapraz elemanlar kullanmanın yapının rijitliğini ve yatay dayanımını artırmasına rağmen sünekliğini azalttığı, mantolamanın da benzer şekilde yapının dayanımını artırdığı ancak maliyetli bir tercih olduğu, perde duvar eklemenin ise hem en az maliyetli hem de rijitliği ve yatay dayanımı en çok artıran yöntem olmasından dolayı tercih edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Çoşgun [35] tarafından yapı sistemlerinin, artan yükler altında ortaya çıkan malzeme ve geometrik doğrusal olmama durumunu dikkate alarak analiz edilmesi ve göçme yüklerinin bulunması amacıyla bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu program, stabilite fonksiyonlarını kullanarak normal kuvvetlerin eleman rijitliği üzerindeki etkisini dikkate alan öte yandan her plastik mafsalin meydana geldiği anda rijitlik matrisini sistematik olarak güncelleyerek plastik mafsal oluşumunu göz önüne alan bir matris yer değiştirme yöntemidir. Araştırmacı tarafından, yapı sistemlerine ait ikinci mertebeye çözüm sonuçları, yüksek katlı binaların boyutlandırılmasında geometrik doğrusal olmama durumunun mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Obaidat [36] tarafından polimer liflerle güçlendirilen kirişlerin davranışını incelemek için doğrusal olmayan 3D sonlu eleman analizi yapılmıştır. Bu amaçla ABAQUS sonlu elemanlar programından yararlanılmıştır. Doğrusal olmayan çözümleme Newton Yöntemi 'ne ait iterasyonlar ile yapılmıştır. Beton plastik-hasar malzeme modeliyle, çelik lifler ise elasto-plastik malzeme modeliyle modellenmiştir. Beton ve lifler arasında çok iyi bir bağ olması sağlanmıştır. Polimer lifli betonun arayüzünü modellemek için bir kohezif model kullanılmıştır. Güçlendirilen kirişlerin davranışını araştırmak için deneysel testler de yapılmıştır. Model, göçme modu ve yük-yerdeğiştirme davranışı ile ilgili deneysel verilerle kıyaslanmak suretiyle doğrulanmıştır. Polimer liflerin boy, genişlik ve yapışma gibi birçok özelliğinin etkinliği araştırılmıştır. Sonuçlar polimer liflerin boylarının artmasının kirişlerin hem kesme hem de eğilme dayanımı kapasitesini artırdığını göstermiştir. Genel olarak bakıldığında ise sonlu eleman analiz sonuçları ve deney sonuçlarının polimer lif kullanmanın hem yük taşıma kapasitesini hem de rijitliği önemli oranda artırdığını göstermektedir. Ayrıca lif kullanmanın kesme dayanımına nazaran eğilme dayanımına daha belirgin bir şekilde katkıda bulunduğu görülmüştür. Bunlara ek olarak, yapılan bu çalışma polimer liflerin geometri ve rijitlik özelliklerine bağlı olarak birçok farklı göçme modlarının oluşabileceğini göstermiştir.

Polat, Doran ve Köksal [37] tarafından yarı gevrek bir malzeme olan betonun doğrusal olmayan davranışı, plastisite teorisi ile Drucker-Prager kriterinin akma yüzeyinin, Mohr-Coulomb kriterinin sürekli eğrisel bir ifadesi olmasından yararlanmak suretiyle, doğrusal olmayan davranışa neden olan en önemli etkenlerden biri olan basınç gerilmeleri altındaki çatlaklarda bulunan sürtünme etkisi dikkate alınmış ve ANSYS sonlu elemanlar programı ile betonun davranışı incelenmiştir. Araştırmacıların betonun çekme dayanımını dikkate

almadıkları bu çalışmada basınç elemanında yapılan uygulamalarda tatminkar sonuçlar elde edilmiştir.

Grassl, Lundgren ve Gylltoft [38], plastisite teorisini kullanarak betonun basınç gerilmeleri altındaki davranışını modellemeye çalışmışlardır. Bu çalışmanın esas amacı betonun tek, iki ve üç eksenli basınç altındaki yük taşıma kapasitesinin ve şekil değiştirme kapasitesinin mümkün olduğunca az parametre ile kolayca belirlenmeye çalışılmasıdır. Önerilen modelde, non-associated akış kuralına dayanan özgün bir pekleşme kuralı ve pekleşme parametresi olarak hacimsel plastik şekil değiştirme literatürde önerilen bir akma yüzeyi ile kombine edilmiştir. Özgün bir pekleşme ve yumuşama kuralı elde edilmiştir. Bu yüzden şekil değiştirme kapasitesi üzerine çok eksenli basıncın etkisini tanımlamak için doğrusal olmayan plastik potansiyelden yararlanılmıştır. Ardından araştırmacılar tarafından tek eksenli, iki eksenli ve üç eksenli basınç testleri yapılmıştır. Önerilen modelin, deneysel sonuçlarla dayanım ve şekil değiştirme davranışı açısından çok iyi bir uyum içerisinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bilindiği gibi yapı mühendisliğinin karşılaştığı en önemli problemlerden biri depremlerdir. Zira depremler karakteristiği, yeri ve büyüklüğü kendilerine özgü olan doğa olaylarıdır. Yapı mühendisliğinin de en önemli araştırma alanlarından birisi depremlerdir. Mühendisler deprem etkilerine göre tasarım yaparken, elde ettikleri çözümün gerçeğe mümkün olduğunca yakın sonuçlar vermesini amaçlamaktadırlar. Dolayısıyla gerçeğe yakın çözümler yapabilmeyen yolunun da doğrusal olmayan analizlerden geçtiğinin vurgulanması gerekir.

Buradan hareketle bu çalışma kapsamında deprem etkilerine karşı betonarme yapıların güvenliğinin sağlanabilmesi için farklı elemanlar kullanılarak rijitliği artırılan bu yapıların deprem etkisi altındaki doğrusal olmayan davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Gerçeğe olabildiğince yakın analizler yapabilmek için doğrusal olmayan davranışı etkileyen faktörlerden malzemenin doğrusal olmaması durumu dikkate alınmıştır. Beton malzemenin davranışını iyi bir şekilde yansıtabilmek için de ABAQUS/CAE sonlu elemanlar programı bünyesinde bulunan plastisite ve hasar mekaniği tabanlı bir malzeme modeli olan Concrete Damaged Plasticity modeli kullanılmıştır. Bu modelde kalıcı plastik şekil değiştirmelerin yanısıra, hasar parametreleri tanımlanmak suretiyle malzemedeki rijitlik azalması durumu da dikkate

alınabilmektedir. Mevcut çalışmada, gerçeğe yakın çözümler elde edebilmek için yapılan şeylerden birisi de kullanılması gereken sonlu eleman sayısını belirleyebilmek adına yapılan yakınsama analizleridir. Bunlara ek olarak sonlu elemanlara ait şekil fonksiyonlarının kuadratik olarak seçilmesi de daha gerçekçi bir analiz için dikkate alınmış argümanlardandır. Literatüre bakıldığında ise çoğunlukla, çubuk elemanlar kullanılarak iki boyutlu çerçevelerin analizleri yapılarak, yapıların deprem davranışları elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada ise solid elemanlar kullanılarak, üç boyutlu uzayda, kolon, kiriş, döşeme ve rijitleştirici elemanları dahil olmak üzere tüm elemanlarıyla modellenmiş yapılar analiz edilerek gerçek bir yapının deprem etkisi altındaki davranışı modellenmeye çalışılmıştır.

1.3 Hipotez

Deprem etkisindeki yapıların davranışlarının gerçeğe en yakın şekilde belirlenebilmesi için yapı tüm hatlarıyla modellenmeli ve doğrusal olmayan malzeme özellikleri dikkate alınarak analizler yapılmalıdır.

BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

2.1 Depreme Dayanıklı Yapı Kavramı

Depreme dayanıklı yapı kavramı, seyrek aralıklarla gerçekleşen şiddetli depremlere maruz kalan yapıların enerji yutma kapasitelerinin istenilen biçimde düzenlenebileceği yaklaşımından yola çıkılarak geliştirilmiş bir kavramdır. Buradaki esas amaç hafif şiddetteki depremlerde hasar görmeyen, orta şiddetteki depremlerde onarılabilir düzeylerde hasarlar görmesine izin verilen, şiddetli depremlerde ise yapının, taşıyıcı olmayan elemanlarında hasar oluşmasına izin verilmesine karşın taşıyıcı olan elemanlarında yapının toptan göçmesine ve ciddi can ve mal kayıplarına neden olacak türden hasarlar görmesine asla izin verilmeyen yapılar tasarlamaktır.

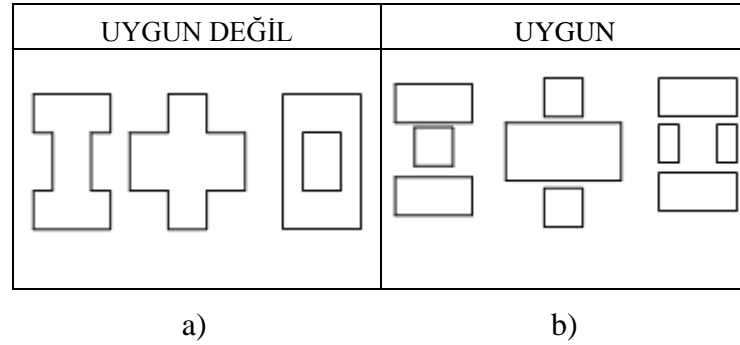
2.2 Depreme Dayanıklı Yapı Taşıyıcı Sisteminin Seçiminde Dikkat Edilecek Hususlar

2.2.1 Basitlik ve Simetri

Bugüne kadar yapılan araştırmalardan, yapının ne kadar basit düzenlenmişse deprem dayanımının da o kadar yüksek olduğu belirlenmiştir. Zira basit yapıların inşası daha kolaydır ve yapım aşamasında hatalı üretim ihtimali oldukça düşüktür. Böyle tasarlanan yapıların deprem davranışlarını tahmin etmek de daha kolaydır. Yapı daha karmaşık ve düzensiz bir hal aldıkça gerek modellemede ortaya ciddi zorluklar çıkabilmekte gerekse ortaya çıkan burulma etkisini göz önüne almak için oldukça uzun işlemler yapmak gerekmektedir [39].

Benzer şekilde mümkün olduğunca yapının her iki doğrultuda da simetrik olarak tasarlanması istenmektedir (Şekil 2.1). Simetrik yapılarda kütle merkezi ve rijitlik

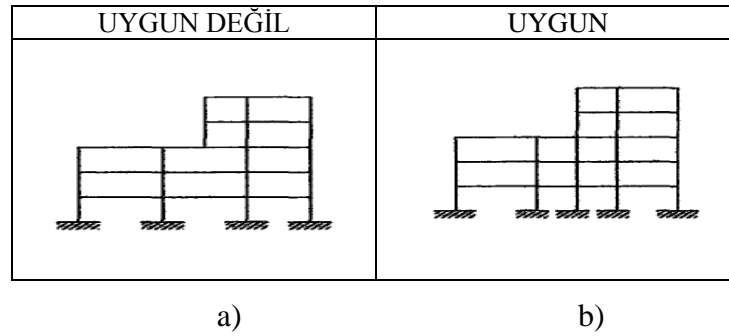
merkezi çakışacağı için ve deprem kuvvetlerinin de rijitlik merkezinden etkidiği göz önünde bulundurulursa, yapının maruz kalacağı burulma etkisinden de kurtulabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2.1 (a) Planda ani rijitlik değişimi ve (b) planda simetri

2.2.2 Düzgünlük ve Süreklilik

Yapıdaki bazı bölgelerin aşırı zorlanmalarını engellemek amacıyla kolon, kiriş ve perde gibi yapı elemanları planda ve düşey doğrultuda düzgün olarak dağıtılmalıdır (Şekil 2.2). Taşıyıcı elemanların temelden çatıya kadar sürekli olmalarına dikkat edilmeli ve elemanların birbirlerine dışmerkez mesnetlenmelerinden kaçınılmalıdır. Taşıyıcı sistemi süreklilik arz eden yapılarda elastik ötesi yük taşıma kapasitesi de artırılmış olmaktadır. Bunun yanında ortaya çıkan plastik mafsalların sayısı yapının enerji yutma kapasitesini artırmış olacaktır [40].



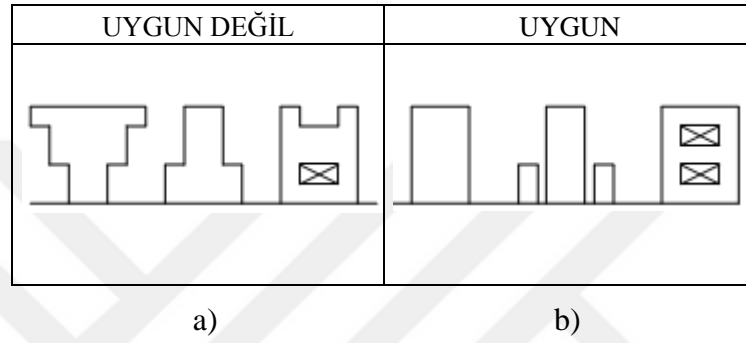
Şekil 2.2 (a) Süreksiz kolon ve (b) Süreklili kolon [44]

2.2.3 Rijitlik ve Dayanım

Yapılarda sürekliliğin sağlanmamasının doğuracağı olumsuz durumlara benzer şekilde rijitlikte de ani değişimlerin oluşması ciddi sorunlara yol açabilmektedir (Şekil 2.3). Cephe süreksizlikleri ya da cephedeki ani rijitlik değişimleri, büyük gerilme yığılmalarına ve depremde katlar arası farklı davranışa sebep olacaktır. Yani deprem etkisi altında

büyük yerdeğiştirmeler yapabilen yapılarda katlar arasındaki görelü yerdeğiştirmelerin de sınırlanabilmesi için yapıya gerekli ölçüde rijitliğin kazandırılmış olması gerekmektedir. Yapı, gereken miktarda ve tüm plan ve kesit boyunca düzgün bir şekilde dağıtılmış rijitlik sayesinde hem statik hem de dinamik dış etkilere karşı yeterli direnci gösterebilecektir.

Yapılarda yeterli ölçüde dayanımın sağlanabilmesi için kesitte gerekli donatının bulunması, aderansın sağlanması, gerekli kenetlenme boyu ve betonun yerleştirilmesini zorlaştıracak donatı düzeninden kaçınılması gibi birçok şartın sağlanması gerekmektedir [25].

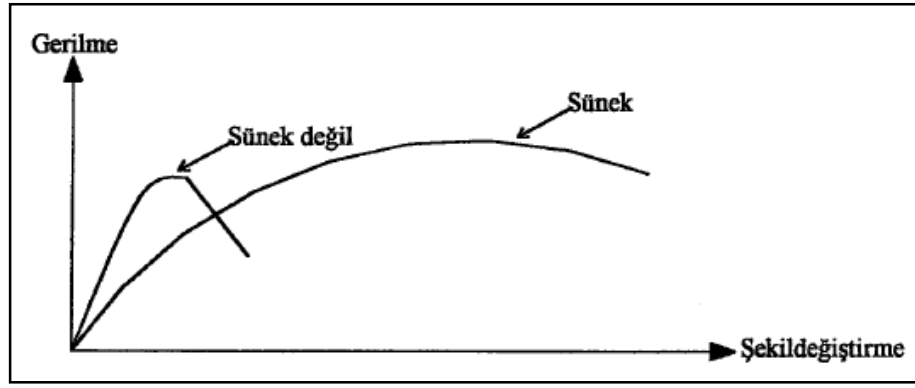


şekil 2.3 (a) Bina kesitinde ani rijitlik değişimi ve (b) rijitlik düzenlemesi

2.2.4 Süneklik

Deprem esnasında ortaya çıkan enerjinin büyük bir bölümünü, yapı ve elemanlarının, mukavemetlerinde önemli kayıplarla, kararsız denge hali olmaksızın büyük şekil değiştirme ve elastik olmayan davranışlarla yutma yeteneğine süneklik denir.

Yüklemenin aşırı artmasıyla akma durumuna ulaşan kesitlerde, süneklik sayesinde plastik şekil değiştirmelerle enerji sönümlenirken, iç kuvvetlerin daha az zorlanan kesitlere dağılması sağlanır. Sünek olmayan bir yapıda meydana gelen deformasyonlar elastik şekil değiştirmelerle sınırlı kalırken, sünek bir yapıda plastik şekil değiştirmeler meydana gelerek oldukça büyük miktarlarda enerji sönümlenmesi gerçekeşebilmektedir (şekil 2.4). Süneklik, yapının güvenliği ile doğrudan ilişkili olduğu için inşaası düşünölen yapıların projelendirme aşamalarında çok önem arz etmektedir [41].



Şekil 2.4 Sünek ve sünek olmayan gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [40]

2.2.5 Göçme Modu

Şiddetli bir deprem durumunda yapının elastik ötesi davranışı gözönüne alınarak göçme durumunun incelenmesi gerekmektedir. Düşey taşıyıcı elemanların, dayanımlarını kaybetmeleri suretiyle ya da burkulma gibi ani bir şekilde gerçekleşen stabilite kaybına uğrayarak göçme durumuna ulaşmaları asla istenmemektedir. Halihazırda kullanılan deprem yönetmeliğinin bu konuda güçlü kolon-zayıf kiriş prensibi vardır. Bu prensibe göre taşıyıcı sistemde belirli bir deprem doğrultusu için her bir kolon-kiriş düğüm noktasında birleşen kolonların taşıma gücü momentlerinin toplamı, o düğüm noktasında birleşen kirişlerin taşıma gücü momentleri toplamından daha büyük olmalıdır. Bu ilkeye uygun olmayan tasarımlarda plastik mafsallar, ilk olarak zayıf olan kolon kesitinde oluşmaya zorlanır ve deprem enerjisini kolonlardaki plastik mafsallar harcamaya zorlanırken sistem istenmeyen bir şekilde aniden göçer. Kat mekanizması biçiminde ortaya çıkan bu tür göçme hallerinde ciddi manada can ve mal kaybının olması olasılığından dolayı bu durumun oluşmasından daima kaçınılmalıdır. Oysa güçlü kolon-zayıf kiriş ilkesi ile yapılan tasarımlarda öncelikle kiriş uçlarında plastik mafsallarda beklenir ve deprem enerjisinin önemli bir kısmı bu kirişlerde oluşan plastik mafsallarda tüketilir. Plastik mafsalların ilk olarak kiriş uçlarında oluşması sistemi sünek davranışa götürür [42].

2.2.6 Temel Zemini Koşulları

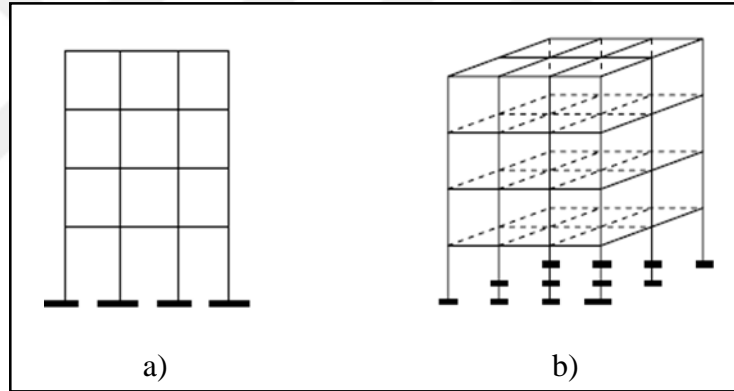
Yapının, uzun yıllar boyunca düzgün bir şekilde hizmet verebilmesi için statik, dinamik, sıcaklık, sünme-rötre gibi dış etkilere karşı rijit ve dayanıklı olmasının yanında sağlam bir zemine oturması da gerekmektedir. Projelendirme aşamasında yapının oturacağı zeminle ilgili detaylı araştırmalar yapılmalıdır. Zemin dayanımı düşük, aşırı oturma yapan veya izin verilenden daha fazla farklı oturma yapan zeminler kesinlikle tercih

edilmemeli şayet mümkünse ekonomik kriterler de düşünülerek zemin iyileştirme çalışmaları yapılmalıdır. Mümkün olduğunca kaya zeminlere inşaa edilen yapıların tercih edilmesine özen gösterilmelidir.

2.3 Yapılarda Kullanılan Başlıca Yapı Elemanları

2.3.1 Çerçeveler

Daha çok düşey yük taşıyan, kolon ve kirişlerin birleşmesi ile meydana gelen yapı elemanlarıdır. Şayet donatıları iyi düzenlenirse yükseklikleri belli bir değeri aşmayan yapılarda aynı zamanda yatay yüklere karşı da emniyet sağladığı söylenebilir. Çünkü çerçeveler yüksek süneklik oranlarına sahip oldukları için yatay yükler altında önemli miktarlarda enerji yutma kapasitesine sahiptirler. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi bunlardan kolon ve kirişleri aynı düzlem içinde olanlar düzlem çerçeve olarak adlandırılırken farklı düzlem içinde olanlar uzay çerçeve olarak adlandırılırlar [39].



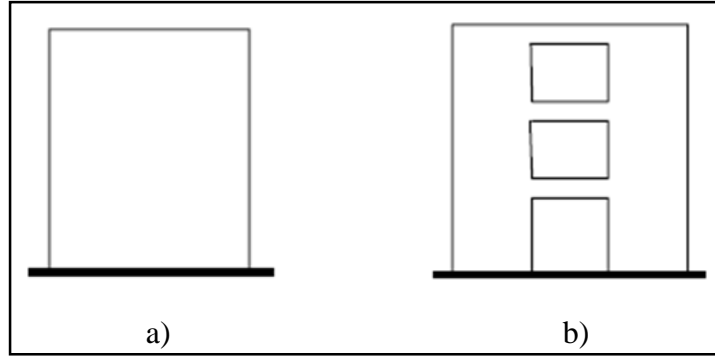
Şekil 2.5 (a) Düzlem çerçeve ve (b) uzay çerçeve [25]

2.3.2 Perdeler

Yatay yüklerin taşınmasında etkili olarak kullanılan perdeler, plandaki uzun kenarının kısa kalınlığa oranı en az yedi olan, düşey taşıyıcı sistem elemanlarıdır. Bir yapıda tek başına da olabilen perdeler, çerçeve sistemiyle birlikte kullanıldığında, rijitlikleri fazla olduğundan, deprem veya rüzgardan oluşan yatay yüklerin büyük bir kısmını karşılayabilirler.

Yüksek yapılarda, yatay yükler etkisinde kat yerdeğıştirmelerinin sınırlandırılması amacıyla perdelerin kullanılması önem arz etmektedir. Döşemeler, kendi düzlemleri içerisinde çok rijit olduklarından dolayı perdelerin rölatif hareketlerini engellerler. Perdelerin, yapının güvenliğini sağlaması ve kat yerdeğıştirmelerini sınırlandırarak

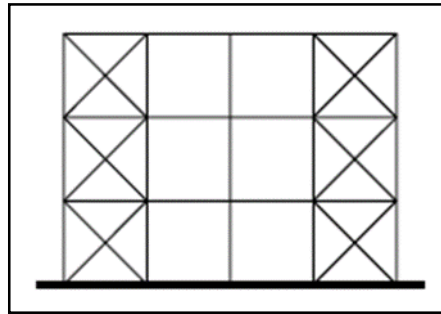
yapısal hasarları önlemeleri açısından etkili davrandıkları belirlenmiştir [43]. Perdeler boşluklu ve boşluksuz olmak üzere iki tiptedir (Şekil 2.6). Boşluklu perdeler, belirli bölümlerde kapı ve pencere gibi boşlukların bırakıldığı perde tipidir.



Şekil 2.6 (a) Boşluksuz perde ve (b) boşluklu perde [25]

2.3.3 Eğik Elemanlar

Yapıların rijitliğini önemli ölçüde artıran, kolon ve kirişlere 90 dereceden farklı açılarla bağlanarak yapının yatay yerdeğiştirmesini azaltan yapı elemanlarıdır (Şekil 2.7). Çoğunlukla yapının içinden ziyade dışında inşa edilirler. Eğik elemanların, yapının kütlelerini ciddi manada artırmadan rijitliğini artırmaları önemli bir özellikleridir. Zira kütlelerin artması demek yapıya etkiyecek olan deprem kuvvetlerinin artması anlamına gelmektedir. Tasarıma göre farklı şekillerde düzenlenerek yapıya rijitlik kazandırılması sağlanabilir.

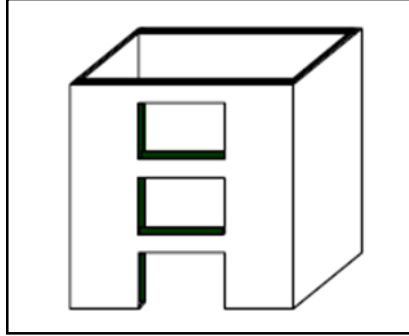


Şekil 2.7 Eğik elemanlarla rijitleştirilmiş çok katlı çok açıklıklı bir yapı [25]

2.3.4 Çekirdekler

Bina yükseklikleri arttıkça çerçeveler tek başlarına yatay yerdeğiştirmenin belli sınırları aşmasını önlemede ve yapının ihtiyacı olan rijitliği sağlamada yetersiz kalmakta ve bu durumda betonarme perdeler kullanmak ihtiyaç haline gelmektedir. Bu perdelerin kapalı bir kutu oluşturmak suretiyle oluşturdukları yeni yapı elemanına ise çekirdek denir (Şekil

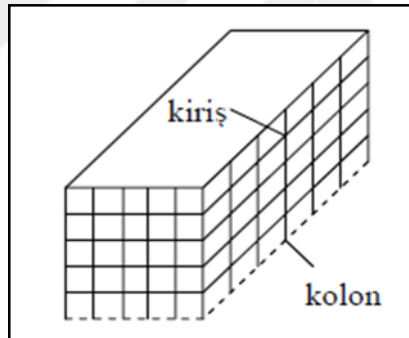
2.8). Çekirdekler, çoğunlukla çok katlı binaların asansör boşluklarında ve merdiven boşluklarında kullanılır.



Şekil 2.8 Boşluklu ve boşluksuz perdelerle teşkil edilmiş bir çekirdek örneği [25]

2.3.5 Tüpler

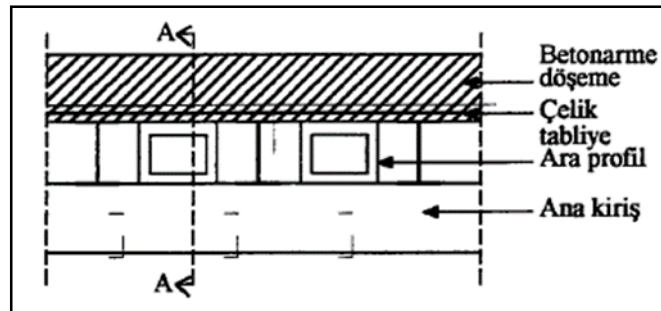
Tüpler, çok katlı binaların inşasına imkan veren, Şekil 2.9’da görüldüğü gibi kolonların ve kirişlerin çok sık bir şekilde kullanılmaları ile oluşturulan, süneklikleri ve burulma rijitlikleri yüksek, deprem, rüzgar gibi büyük yatay kuvvetler oluşturabilen dış etkilere karşı yeterli direnci gösterebilen yapı elemanlarıdır [40].



Şekil 2.9 Betonarme tüp eleman [25]

2.3.6 Kompozit Sistemler

En az iki malzemeden oluşan ve bu malzemelerin farklı özelliklerinden faydalanılarak kullanılmaları suretiyle oluşturulan yapı elemanlarıdır (Şekil 2.10).

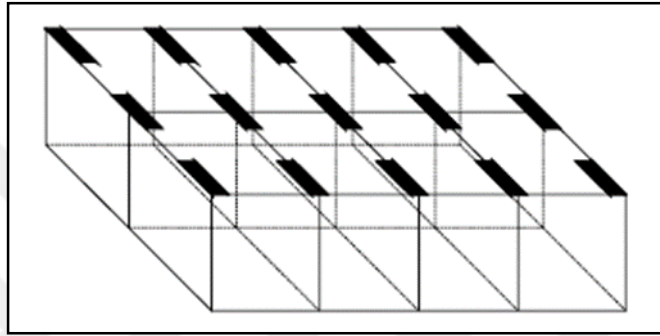


Şekil 2.10 Kompozit eleman [40]

2.4 Yapılarda Kullanılan Başlıca Taşıyıcı Sistemler

2.4.1 Çerçeve Sistemler

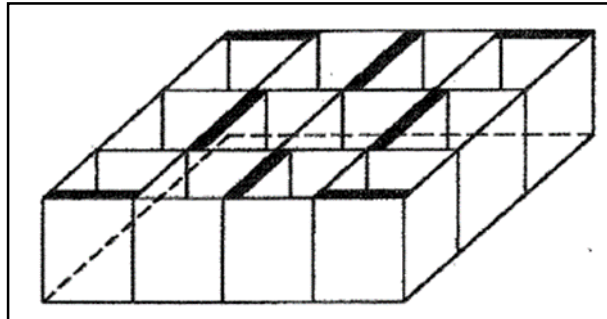
Kolonlarla ve kirişlerle oluşturulan çerçevelerin kullanılmasıyla meydana gelen sistemlerdir (Şekil 2.11). Sünek bir yapıya sahip olan bu sistemler bu özellikleri sayesinde yatay kuvvetler altında fazlaca yerdeğiştirme yapabilmektedirler. Ekonomik olarak avantaj sağladığından ötürü az katlı binalarda oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Fakat çok katlı binalarda yeterli rijitliği sağlayamadıklarından ötürü tek başlarına kullanılmaları oldukça sakıncalıdır.



Şekil 2.11 Çerçeve sistem [25]

2.4.2 Betonarme Perde Sistemler

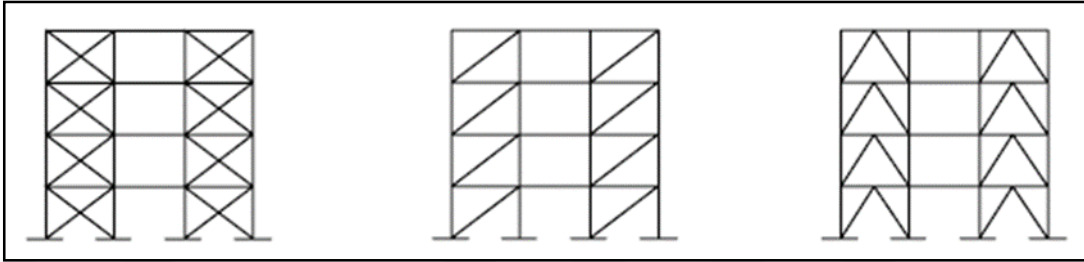
Boşluklu veya boşluksuz perde elemanların kullanılmasıyla oluşturulan sistemlerdir (Şekil 2.12). Çerçeve sistemlere nazaran daha maliyetli oldukları için onlar kadar çok tercih edilmezler. En önemli avantajı rijitliklerinin çok yüksek olmasından dolayı yapılardaki yatay yerdeğiştirmeleri azaltmalarındadır. Dezavantajı ise sünekliklerinin çerçevelere göre düşük olmasıdır. Bundan dolayı bu tür sistemlerde gevrek kesme kırılmaları oluşabilir.



Şekil 2.12 Betonarme perde sistem [44]

2.4.3 Eğik Elemanlı Sistemler

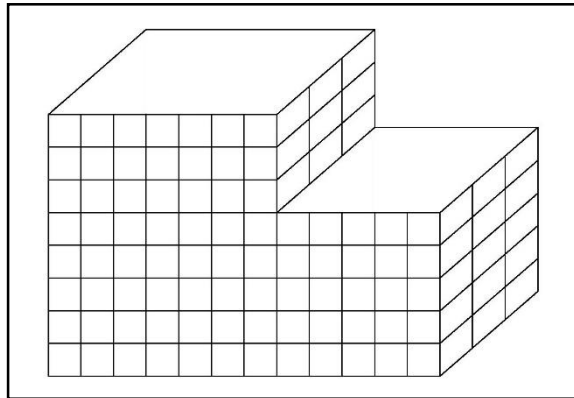
Çerçeve sistemlerin yatay yerdeğiştirmelerini sınırlandırmak amacıyla eğik yapı elemanlarının kullanılmasıyla oluşturulan sistemlerdir. Eğik yapı elemanlarının farklı şekillerde düzenlenmeleriyle oluşturulabilirler (Şekil 2.13). Eğik elemanlar kolon-kiriş birleşim bölgelerine mesnetlenebileceği gibi dışmerkezlik durumu oluşturularak kiriş üzerine de oturtulabilirler [25].



Şekil 2.13 Bazı eğik elemanlı sistem örnekleri [25]

2.4.4 Tüp Sistemler

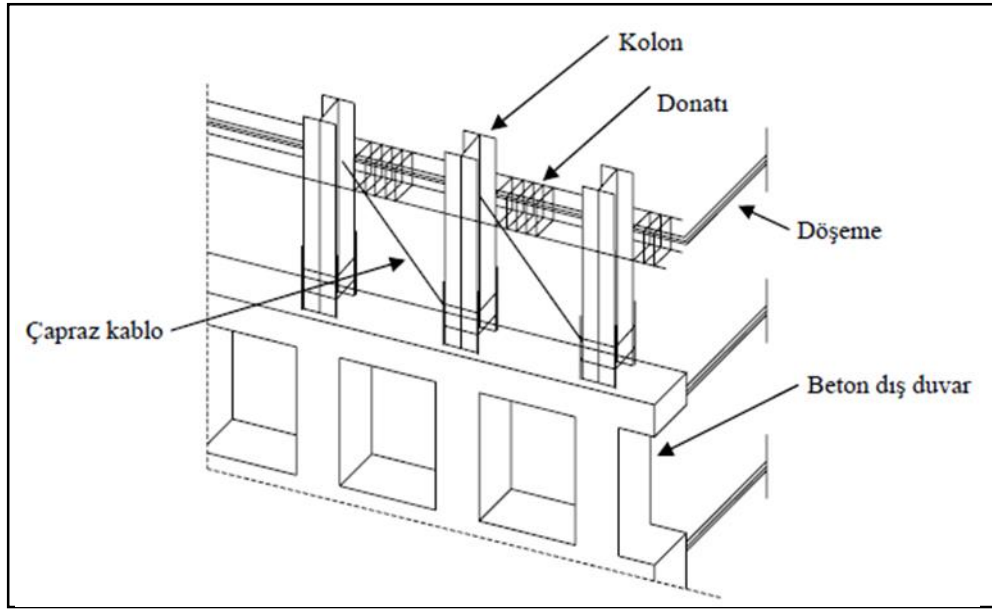
Oldukça sık olarak inşa edilen kolon ve kirişlerden ibaret olan ya da çerçeve sistem ile perdelerin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan sistemlere denir (Şekil 2.14). Bu nedenlerden dolayı bu sistemler çerçeve sistemler ile betonarme perde sistemler arasında kalan sistemler olarak dikkate alınmaktadırlar [39].



Şekil 2.14 Tüp sistem örneği

2.4.5 Kompozit Sistemler

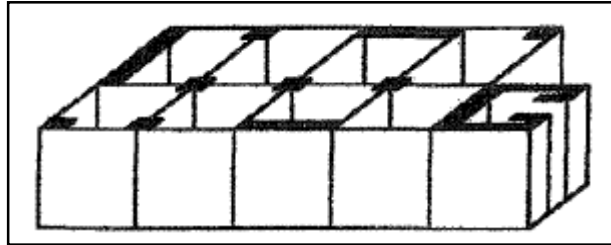
Bu sistemler, Şekil 2.15'te de görüldüğü gibi kompozit ya da betonarme ve çelik elemanların beraber kullanılmasıyla oluşturulan sistemlerdir [39].



Şekil 2.15 Bir kompozit sistem örneği [40]

2.4.6 Karışık Sistemler

Bu sistemler yukarıda bahsi geçen sistemlerden iki ya da daha fazlasının kullanılmasıyla elde edilen sistemlerdir (Şekil 2.16). Yaygın olarak kullanılan karışık sistemlere betonarme perde-çerçeve sistemler ve betonarme perde-çerçeve-çekirdek sistemler örnek olarak verilebilir [44].

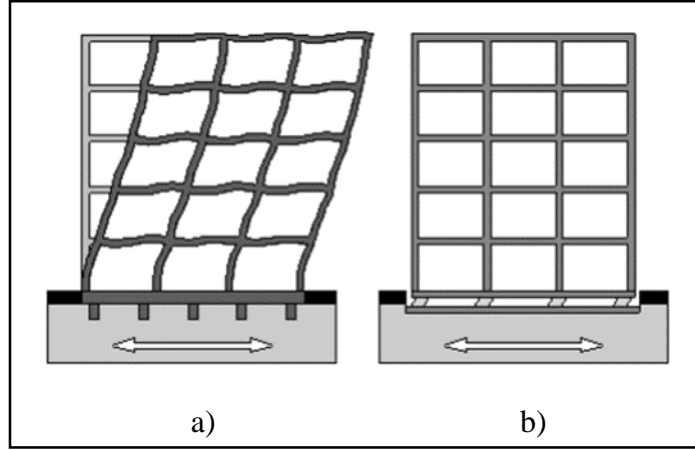


Şekil 2.16 Perde-çerçeve-çekirdek sistem örneği [44]

2.4.7 İzolasyonlu ve Enerji Dağıtıcılı Sistemler

Bilimin gelişmesiyle paralel olarak ortaya çıkan ve son dönemlerde giderek aşama kaydedilen ve git gide daha da çok kullanılmaya başlanan sistemlerdir. Bu sistemleri kullanmadaki esas amaç binaya gelen rüzgar ve deprem gibi yatay kuvvetlerden doğan büyük miktardaki enerjiyi sönmülemektir. Bunlara örnek olarak binanın temel kısmına yerleştirilen sismik izolatörler verilebilir (Şekil 2.17). Bu izolatörler binaya gelen deprem kuvvetlerinin sönmülenmesinde görev almaktadır. Ayrıca gökdelenlerin iç kısmında kullanılan damperler de özellikle rüzgardan fazlasıyla etkilenen bu tür yapıların son

katlarındaki salınımı azaltmada yani gelen enerjiyi sönümlemede oldukça işe yaramaktadırlar.



Şekil 2.17 a) Sismik izolatörün kullanılmadığı bir yapı ve b) sismik izolatöre sahip bir yapı

2.5 Doğrusal Olmayan Davranış

Bilindiği gibi doğrusal olmayan davranış yerdeğiştirmelerin büyük olması, şekil değiştirmelerin büyük olması, malzemenin doğrusal davranış göstermemesi olmak üzere üç durumda ortaya çıkmaktadır. Bunlardan ilk ikisinde, denge denklemlerinin, cismin şekil değiştirmiş konumu üzerinde yazılması ihtiyacı duyulur. Bu duruma en iyi örnek olarak stabilite problemleri verilebilir.

Diğer bir durum ise, malzeme davranışını ifade eden gerilme-şekil değiştirme bağıntısının doğrusal olmamasıdır [45]. Mevcut tez çalışması kapsamında üçüncü durum yani malzemenin doğrusal olmayan davranış göstermesi durumu dikkate alınmış olup geometrik doğrusal olmama durumu dikkate alınmamıştır.

Bazı özel durumlar hariç tutulursa, işletme yükleri altında yapı sistemleri genellikle doğrusal davranış sergilerler. Bu özel durumlara örnek olarak ise narin yapılar, elastik zemine oturan sistemler ile bölgesel zayıflıklar ve stabilite yetersizlikleri verilebilir [46].

Doğrusal davranışı temel alan analiz yöntemlerinde, malzemeye ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi doğrusal olarak dikkate alınmakta ve sistemdeki yerdeğiştirmelerin ihmal edilebilecek kadar küçük mertebelerde olduğu varsayılmaktadır. Buna karşılık, dış etisler malzemenin doğrusal-elastik davrandığı sınırı aşarsa veya yerdeğiştirmeler artık ihmal edilemeyecek boyutlara ulaşmışsa doğrusal olmayan analiz yöntemlerini kullanmak bir ihtiyaç haline gelmiş olacaktır [46].

Betonarme yapı sistemleri oldukça karmaşık bir doğrusal olmayan davranış sergilemektedir. Yüklemeye bağlı olarak hem beton hem de donatı doğrusal olmayan davranış gösterebilir. Betonun çatlaması malzeme nonlineerliğinin esas nedenidir ve bunun nedeni ise betonun çekme dayanımının oldukça düşük olmasıdır. Sonuç olarak betonarme yapıların gerçek davranışlarının belirlenebilmesi için doğrusal olmayan modellerin kullanılması gerekmektedir [28].

Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan teoriye göre hesabı alanında meydana gelen gelişmelere ek olarak, yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışlarını inceleyen teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen önemli bulgular, yapıların dış etkiler altındaki gerçek davranışlarının daha yakından izlenmesine imkan vermektedir. Buradan hareketle yapıların gerçek göçme güvenliklerinin belirlenmesi ve göçme yükü esasına göre boyutlandırılmaları, malzemenin ve geometri değişimlerinin doğrusal olmayan etkilerini birlikte gözönüne alan hesap yöntemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır [47].

Günümüzde doğrusal teoriye göre analiz uygulamaları çok yaygın bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Doğrusal hesabın getirdiği dezavantajları giderebilmek için ise doğrusal olmayan davranış çeşitli uygulamalarla dikkate alınmaya çalışılmıştır. Bunlara, ikinci mertebe etkilerini dikkate almak için moment katsayıları kullanmak ve deprem hesabında malzemenin doğrusal-elastik sınır ötesindeki davranışını ve sünekliğini hesaba katmak için taşıyıcı sistem davranış katsayısını tanımlamak örnek olarak verilebilir [46].

Yapı sistemlerinin doğrusal-elastik sınır ötesindeki taşıma kapasitesi dikkate alınarak, yapının dış tesirler altındaki davranışı daha yakından izlenebilir ve nihayetinde gerçeğe daha yakın ve ekonomik sonuçlar elde edilebilir [46].

“Bir yapı sisteminin dış etkiler altında hesabı (analizi) ile elde edilen iç kuvvet, şekil değiştirme ve yerdeğiştirmelerin çözüm olabilmeleri için aşağıdaki üç koşulu biradada sağlamaları gerekmektedir.

- 1- Bünye denklemleri: Malzemenin cinsine ve özelliklerine bağlı olan gerilme-şekil değiştirme bağıntılarına bünye denklemleri denilmektedir.
- 2- Denge koşulları: Sistemi oluşturan elemanların ve bu elemanların birleştiği düğüm noktalarının denge denklemlerinden oluşmaktadır.
- 3- Geometrik uygunluk (süreklilik) koşulları: Elemanların ve düğüm noktalarının süreklilik denklemleri ile mesnetlerdeki geometrik koşullardır” [46].

Lineer analiz, yapıların gerçek davranışını genellikle iyi temsil etmediği için yapıların gerçekçi sonuçlarını ifade etmekte yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek amacıyla özellikle deprem analizlerinde lineer olmayan analiz yöntemlerini kullanmak daha uygun olmaktadır [39].

2.5.1 Yapı Sistemlerinin Doğrusal Davranış Göstermemelerinin Nedenleri

“Bir yapı sisteminin dış etkiler altındaki davranışının doğrusal olmaması genel olarak iki nedenden kaynaklanmaktadır.

1- Malzemenin doğrusal-elastik olmaması nedeniyle gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının (bünye denklemlerinin) doğrusal olmaması.

2- Geometri değişimleri nedeniyle denge denklemlerinin (ve bazı hallerde geometrik süreklilik denklemlerinin) doğrusal olmaması” [46].

Çizelge 2.1 de yapı sistemlerinin doğrusal olmamasına neden olan etkenler ve bu etkenleri gözönüne alan teoriler toplu olarak özetlenmiştir.

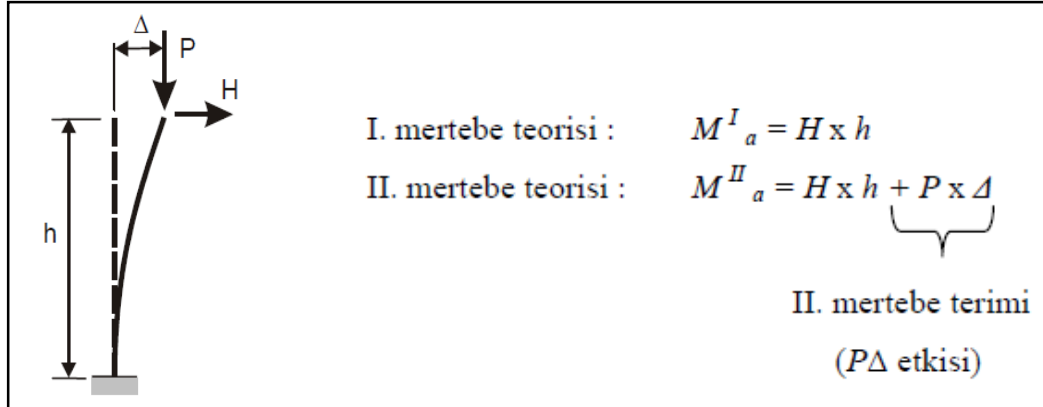
Çizelge 2.1 Yapı sistemlerinin doğrusal olmama nedenleri [46]

Çözümün Sağlaması Gereken Koşullar	Doğrusal Sistemler	Doğrusal Olmayan Sistemler				
		Malzeme Bakımından	Geometri Değişimleri Bakımından		Her İki Bakımdan	
			İkinci Mertebe Teorisi	Sonlu Deplasman Teorisi	İkinci Mertebe Teorisi	Sonlu Deplasman Teorisi
Bünye Denklemleri (Gerilme - Şekil Değişirme Bağıntıları)	Doğrusal - elastik	Doğrusal - elastik Değil	Doğrusal - elastik	Doğrusal - elastik	Doğrusal - elastik Değil	Doğrusal - elastik Değil
Denge Denklemlerinde Yer Değişirmeler	küçük	küçük	küçük Değil	küçük Değil	küçük Değil	küçük Değil
Geometrik Uygunluk Koşullarında Yer Değişirmeler	küçük	küçük	küçük	küçük Değil	küçük	küçük Değil

2.5.1.1 Geometrik Bakımdan Doğrusal Olmama Durumu

Dış etkiler altındaki bir sistemde meydana gelen yerdeğişirmeler ve şekil değişirmeler ihmal edilemeyecek boyutlara ulaşmışsa yani sistemin geometrisinde ciddi bir değişim söz konusu ise artık denge denklemleri şekil değiştirmemiş sistem üzerinde yazılamaz. Şayet yazılırsa, yapılmış olan çözümle gerçek çözümden bir hayli uzaklaşmış olur. Böyle bir durumda artık denge denklemleri şekil değiştirmiş sistem üzerinde yazılmak

zorundadır. İkinci merteye teorisi denen bu teorinin kullanılmasıyla da geometrik doğrusal olmama durumu dikkate alınmış olur.



Şekil 2.18 Birinci ve ikinci merteye teorilerinin karşılaştırılması [46]

Şekil 2.18’de de görüldüğü gibi Δ yerdeğiştirmesi önemli bir boyuta ulaşmışsa sistem artık sadece H kuvvetinden doğan momentten dolayı değil buna ek olarak P kuvvetinden doğan momentten dolayı da zorlanmaya başlayacaktır. Burada ikinci merteye etkilerin dikkate alınmaması durumu, yukarıda da değinildiği gibi gerçek sonuca ulaşmada analizi yapan kişiyi ciddi bir yanılgıya sevkedecektir.

Daha önce de belirtildiği gibi bu tez çalışması kapsamında geometrik doğrusal olmama durumu dikkate alınmamış olup, malzemenin doğrusal olmama durumu incelenmiştir.

2.5.1.2 Malzeme Bakımından Doğrusal Olmama Durumu

Doğadaki tüm malzemeler, dış kuvvetler, sıcaklık, sünme-rötre gibi dış etkiler altında belli noktadan sonra doğrusal bir şekilde davranmamaya başlar. Bu noktadan itibaren malzeme, elastik özelliklerini kaybederek plastik şekil değiştirmelerin oluşturduğu kalıcı deformasyonlara uğramaya başlar.

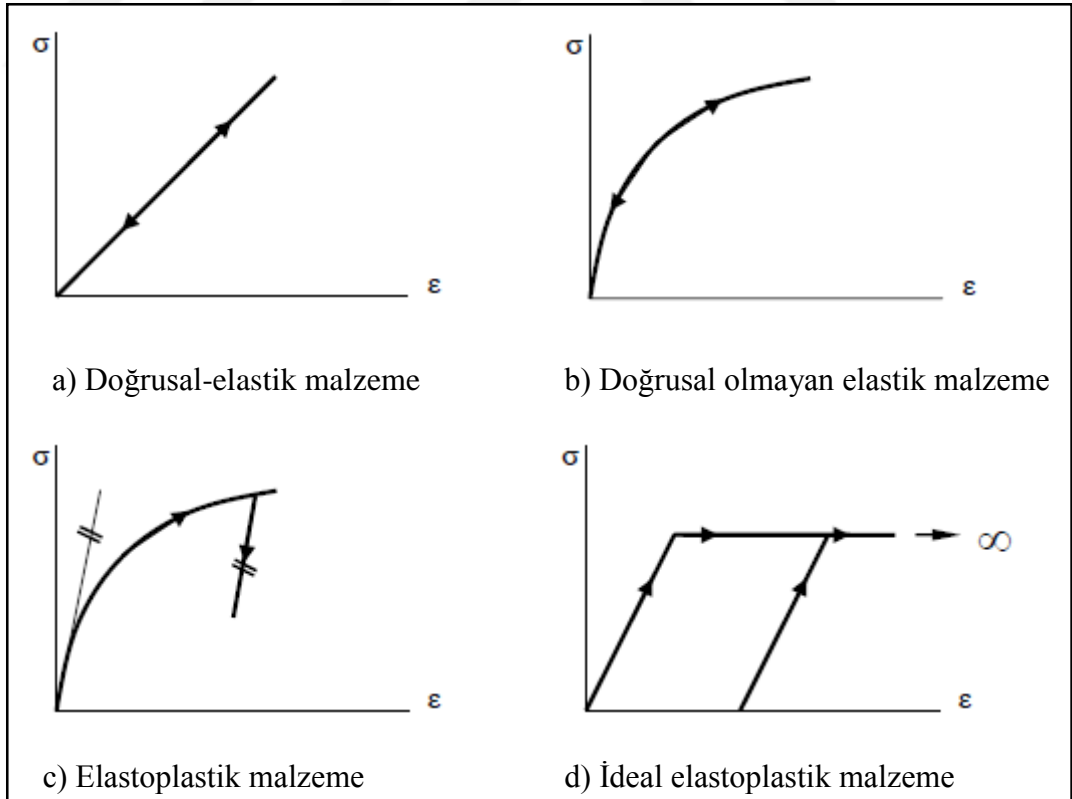
Malzeme davranışının doğrusal olmamasından kasıt gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisinin doğrusal olmamasıdır. Bu ilişki tüm malzemeler için kendilerine özgü bir karakteristiğe sahiptir.

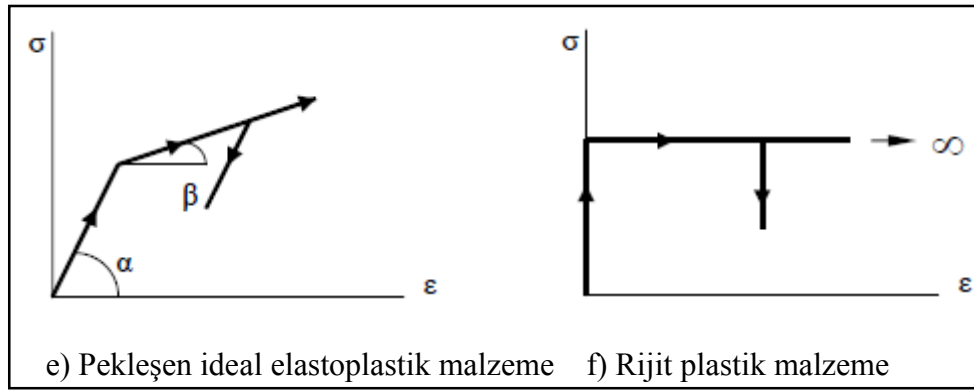
Yük geçmişi, yükleme süresi, çevre ve sınır şartları gibi birçok neden malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisini etkileyen faktörlerdir. Malzeme açısından doğrusal olmayan davranışın anlamı, yapı sisteminin rijitliğinin değişkenlik arz etmesidir. Bunların dışında şayet malzeme homojen değilse, malzeme bileşenlerinin (kristaller, dane, molekül v.b.) gelişigüzel dağıldığı kabul edilir. Zaten doğada tam anlamıyla homojen bir malzeme bulmak çok kolay değildir. Birçok mühendislik uygulamasında

işlemleri basitleştirmek adına malzemenin homojen olduğu kabul edilir. Plastisite, hiperelastisite, sünme, viskoelastisite malzeme açısından doğrusal olmayan davranış tipleri olarak sıralanabilir [45].

Betonarme iki malzemedен oluşur. Bu iki malzemedен betonun doğrusal olmayan davranışı, artan gerilmeler sayesinde elastik davranıştan git gide uzaklaşarak yavaş yavaş belirgin duruma gelmeye başlar. Bir taraftan eğilme momenti artmak suretiyle beton basınç gerilmelerinin dağılışı doğrusal olmayan bir değişimle oluşurken diğer taraftan donatı akma gerilmesine ulaşır. Momentin bu değerine akma momenti denir. Momentin artmasıyla donatıda plastik uzama gözlenirken betonda da doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme değişimi çok daha belirgin bir hal alır. Genellikle, donatının uzama kapasitesi betondan daha büyük olduğu için, güç tükenmesi betonun en büyük kısalma kapasitesine ulaşmasıyla ortaya çıkar ve kesit taşıma gücüne erişmiş olur [48].

Yapı sistemlerinde kullanılan gerçek malzemelere ait şekil değiştirme özellikleri üzerinde, hesaplarda kullanırken bazı idealleştirmeler yapılarak ideal malzemeler tanımlanır. Bu ideal malzemelere ait gerilme-şekil değiştirme özellikleri Şekil 2.19'da görülmektedir.



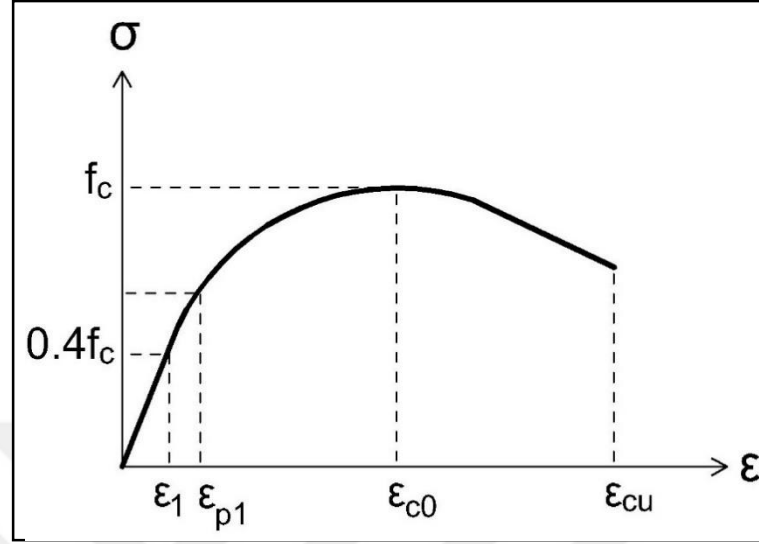


Şekil 2.19 İdeal malzemelerin gösterimi [25]

Şekil 2.19’da gösterilen ideal malzemelere bakılırsa şekil değiştirmelerin gerilmelerle doğru orantılı bir biçimde artması malzemenin doğrusal davranış sergilediği anlamına gelmektedir. Bunun yanında şayet malzeme üzerindeki gerilmeler kalktıktan sonra şekil değiştirmeler tamamen yok oluyorsa bu malzemelere de elastik malzemeler denmektedir. Aynı zamanda üzerindeki şekil değiştirmelerin tamamen geri döndüğü bu tip malzemelere tersinir malzemeler denir. Diğer elastoplastik ve plastik malzemelere bakılırsa, malzeme üzerine uygulanan gerilme kalktıktan sonra yalnızca elastik şekil değiştirmelerin geri dönebildiği ve malzeme üzerinde kalıcı plastik şekil değiştirmelerin olduğu sonucu çıkarılabilir. Ayrıca plastisite teorisi gereği plastik şekil değiştirmelerin gerilme oluşturmadığı, bundan dolayı gerilmelerin sadece elastik şekil değiştirmelere bağlı olduğu da belirtilmelidir.

Şekil 2.20’de görülen betona ait gerilme-şekil değiştirme eğrisinde ϵ_1 olarak ifade edilen ve gerilmenin yaklaşık olarak basınç dayanımının %40’ı mertebesine kadar olduğu bölgede malzemenin doğrusal davranış gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu sınıra orantılılık sınırı denmektedir. Gerilmelerin bu sınırın altında kalması durumunda gerilme-şekil değiştirme eğrisinin doğrusal olduğu kabul edilebilir. Bunun yanında betona ait bu eğride görüldüğü gibi gerilmenin belirli bir seviyenin altında kalması durumunda, malzemenin doğrusal olmayan elastik davranış sergilediği görülebilir. Şekil değiştirmenin ϵ_{p1} olarak ifade edildiği bu sınıra da akma sınırı veya akma noktası denir. Elastik bölge ile plastik bölge arasında tanımlanmış olan bu sınır çoğunlukla tek bir sınır olarak ele alınır. Şayet malzeme üzerindeki gerilmeler artmaya devam ederse önce ϵ_{c0} olarak anılan maksimum gerilmeye ait şekil değiştirme seviyesine ulaşılacak ardından ise şekil değiştirmeler ϵ_{cu} seviyesine erişerek beton malzeme yük taşıyamaz hale gelerek taşıma gücüne ulaşmış olacaktır. Betonun çekme etkileri altındaki davranışında ise şekil değiştirmelerin çatlama gerilmesine kadar doğrusal-elastik bir biçimde arttığı, bu noktadan sonra parabolik olarak

gerilmenin hızlı bir şekilde azalması ve şekil değiştirmelerin de hızlı bir biçimde artması ile malzemenin taşıma gücüne ulaştığı yapılan deneysel ve akademik çalışmalar sayesinde belirlenmiştir.



Şekil 2.20 Basınç etkisi altındaki beton malzemeye ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Bunların dışında, betonun basınç ve çekme etkileri altındaki davranışlarına ait pekleşme ve yumuşama denilen kavramlar da söz konusudur. Pekleşme, artan plastik şekil değiştirmelerle birlikte akma gerilmesinin de artmasıdır. Yumuşama ise şekil değiştirmelerin artmasıyla birlikte gerilmelerin azalmaya başlaması olayıdır.

2.6 Göçme Kriterleri

Plastisite teorisi kısaca, uygulanan yükler altında malzemenin sürekli şekil değiştirdiği bir malzeme davranışı olarak tanımlanabilir [45]. Bu teori esas olarak metallerin davranışını modellemek için geliştirilmiştir. Fakat mekanizması farklı da olsa betonun basınç gerilmeleri altında kalıcı şekil değiştirmelere uğramasından dolayı plastisite teorisi beton için geliştirilecek malzeme modellerinde kullanılmış ve kullanılmaya da devam etmektedir [29]. Plastisite teorisinin beton, kaya ve toprak gibi sürtünmeli malzemelere uygulanabilmesi için akma yüzeyi, pekleşme kuralı, akış kuralı ve göçme kriteri varsayımlarının yapılması gerekmektedir [25].

Malzemeye ait plastik davranışın modellenmesi için artımsal ya da akış teorisi olarak bilinen teori yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Akış teorisi, gerilme artımına karşılık plastik şekil değiştirme artımına dayanarak yüklemeye bağlı davranışı dikkate almaktadır.

Plastik şekil değiştirme artımı akma yüzeyi, pekleşme kuralı ve akış kuralı olarak adlandırılan üç temel kural sayesinde hesaplanmaktadır [33].

Akma kavramı daha çok sünek malzemelerin, göçme kavramı ise daha çok gevrek malzemelerin nihai dayanıma ulaşmalarını ifade etmektedir. Akma (göçme) kriteri, gerilmelere ve malzeme parametrelerine bağlı olarak belirlenen bir fonksiyon olup, malzemedeki göçme davranışının modellenmesi konusunda kullanılmaktadır. Akma yüzeyi, malzemedeki plastik şekil değiştirmelerin oluşup oluşmayacağını belirlemeye yarayan başka bir ifadeyle mevcut gerilme durumunun elastik aşamada mı yoksa plastik aşamada mı olduğunu bildiren bir kavramdır. Akma yüzeyi, akma kriterinin asal gerilmeler düzleminde belirlemiş olduğu bir yüzeydir [33]. Akma yüzeyinin sınırını akma fonksiyonu belirler. Herhangi bir gerilme durumu akma fonksiyonunu sağlamak zorundadır. Yani ya akma yüzeyi içerisinde kalır ya da akma yüzeyi üzerinde bulunabilir, akma yüzeyinin dışına asla çıkamaz [29]. Bu durum, f akma fonksiyonunu göstermek üzere matematiksel olarak şöyle ifade edilebilir:

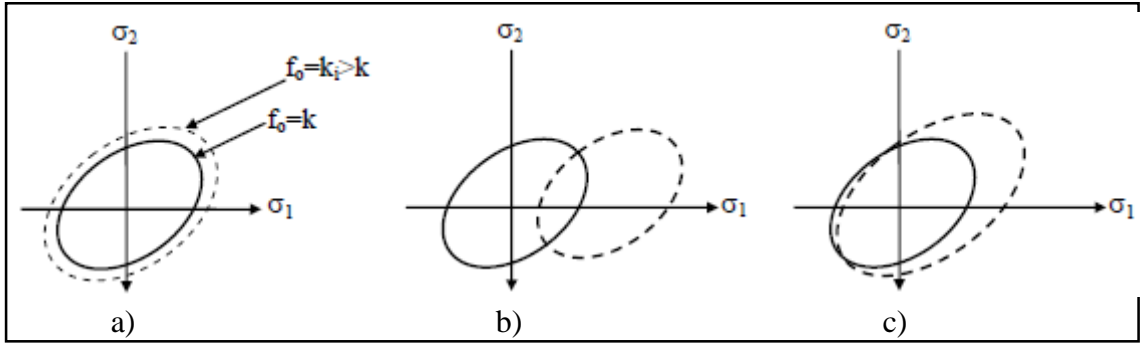
$$f(\sigma, \sigma_y) \leq 0 \quad (2.1)$$

Buradaki σ_y ifadesi akma gerilmesini göstermektedir. Şayet gerilme durumu akma yüzeyi içinde bulunuyorsa ($f < 0$) yükleme elastik sınırlar içerisinde ve bu nedenden dolayı plastik şekil değiştirmeler oluşmaz. Diğer taraftan yükleme durumu akma yüzeyi üzerinde ($f = 0$) ise ve bu esnada yük artışı da devam ediyorsa plastik şekil değiştirmeler oluşur [29].

Eğer şekil değiştirmelerin artmasına rağmen akma yüzeyinin değişmediği kabul edilirse Şekil 2. 19 (d)' de de gösterilen ideal elasto-plastik malzeme davranışı elde edilir. Fakat gerçekte ise büyük bir çoğunlukla malzemelerin plastik şekil değiştirmelerin artmasıyla birlikte akma sınırları değişmektedir. Bu duruma pekleşme-yumuşama denmektedir. Sonuç olarak plastik şekil değiştirme söz konusu ise akma gerilmesinin nasıl değiştiğinin tanımlanması, başlangıç akma yüzeylerinden sonra oluşacak olan akma yüzeylerinin şekillerinin nasıl olacağı hususunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu husus, yani ardışık akma yüzeylerinin değişimi pekleşme kuralı tarafından gerçekleştirilebilmektedir [29].

İzotropik, kinematik ve karma olmak üzere üç pekleşme tipinden söz edilebilir (Şekil 2.21). İzotropik pekleşmede akma yüzeyinin merkezi sabit kalarak akma yüzeyi genişler veya küçülürken, kinematik pekleşmede akma yüzeyinin yüzey alanı sabit kalmak

suretiyle merkezi ötelenerek gerilme uzayında yerdeğiştirmektedir. Karma pekleşmede ise hem ötelenme hem de yüzey alanında değişme olmaktadır [33].



Şekil 2.21 a) İztropik pekleşme, b) kinematik pekleşme ve c) karma pekleşme [33]

Beton ile ilgili yapılan deneysel çalışmalarda plastik Şekil değiştirme doğrultusunun yüklemeye birlikte değiştiği görölmektedir. Bu çalışmalar plastik Şekil değiştirme artımı ile gerilme artımının aynı doğrultuda olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuyu tanımlayan kavrama akış kuralı denmektedir. Akış kuralı sayesinde, başlangıç akma fonksiyonundan sonra oluşacak olan artımsal gerilme-Şekil değiştirme ilişkisi tanımlanabilmektedir.

Uygun akma kriterinin sečilmesi malzeme ve mevcut gerilme durumu dikkate alınarak yapılmalıdır. Literatüre bakıldığında bugüne kadar beton için birçok akma kriterinin önerildiği görölmektedir. Bu akma kriterlerinden bazıları kullandıkları parametre sayısına göre Őu Őekilde sınıflandırılabilir:

(1) Tek parametreliler

- * Rankine
- * Tresca
- * Von Mises

(2) İki parametreliler

- * Mohr-Coulomb
- * Drucker-Prager

(3) Üç parametreliler

- * Bresler-Pister
- * William-Warnke

(4) Dört parametrelı kriterler

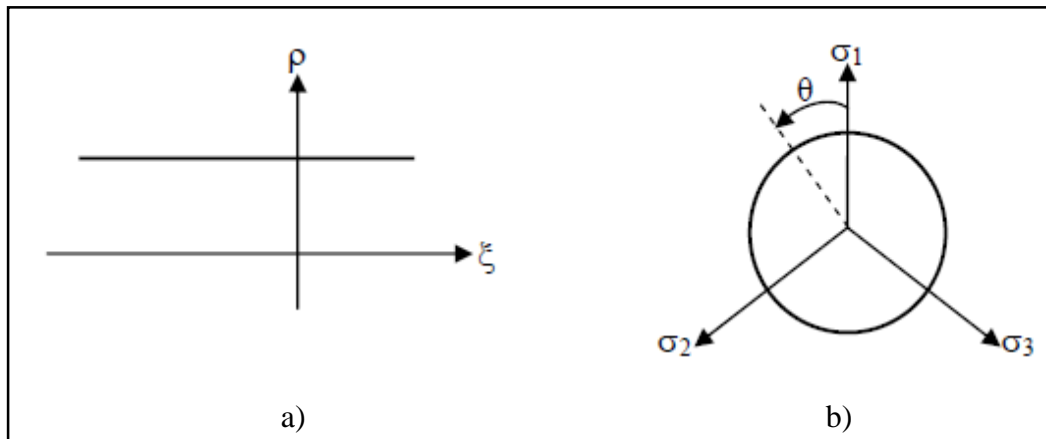
* Ottosen

* Hsieh-Ting-Chen

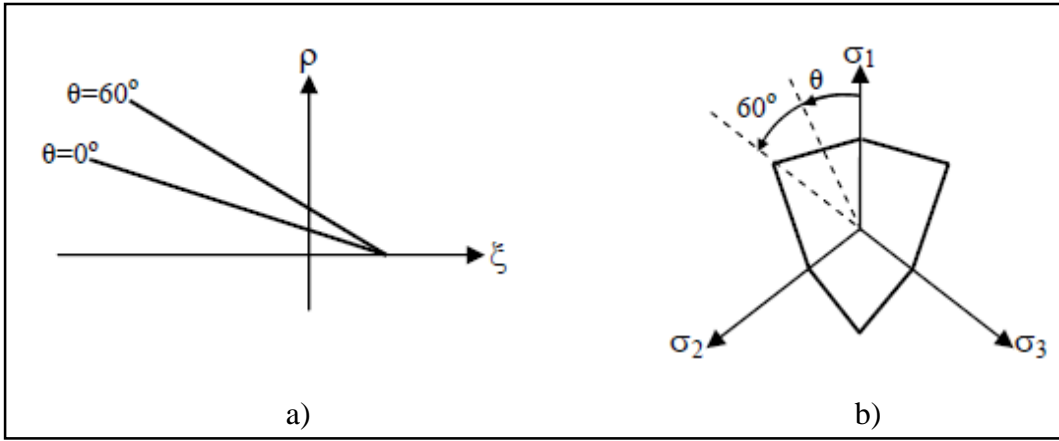
(5) Beş parametrelı kriterler

* William-Warnke

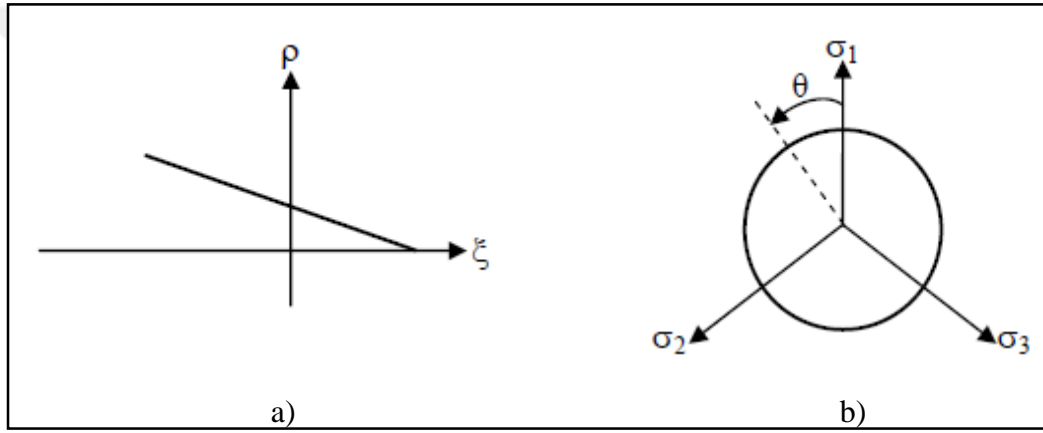
Bu kriterleri tanımlama işlemine geçmeden önce bazı kavramların açıklanmasında fayda vardır. Bilindiği gibi göçme konusu irdelenirken çoğunlukla üç boyutlu gerilme durumu dikkate alınır. Hidrostatik gerilme ve deviyatorik gerilme olmak üzere ikiye ayrılabilen bu üç boyutlu gerilme durumundaki hidrostatik kısım uniform basınca eşittir. Burada üç normal gerilmenin birbirine eşit olduğu ve kayma gerilmelerinin de sıfır olduğu söylenebilir. Deviyatorik gerilmeler ise hem normal hem de kayma gerilmelerinden oluşur. Deviyatorik gerilmelerin aksine hidrostatik gerilmeler sadece ya çekme etkisinde genişlemeye ya da basınç etkisinde büzölmeye neden olurlar. Hidrostatik eksen orijinden geçen ve mümkün olan bütün hidrostatik gerilme durumlarını temsil eden bir doğrudur ve üç asal gerilme ekseninden de eşit uzaklıkta bulunmaktadır. Deviyatörük düzlem ise hidrostatik eksene dik olan bir düzlemdir. Hidrostatik eksenleri içeren düzleme de meridyen düzlemi denmektedir [25] . Bahsi geçen akma kriterlerinden bazılarına ait gerilme meridyenleri ve deviatorik kesitler Şekil 2. 22, Şekil 2. 23, Şekil 2. 24, Şekil 2. 25, Şekil 2. 26 ve Şekil 2. 27 'de verilmiştir [33].



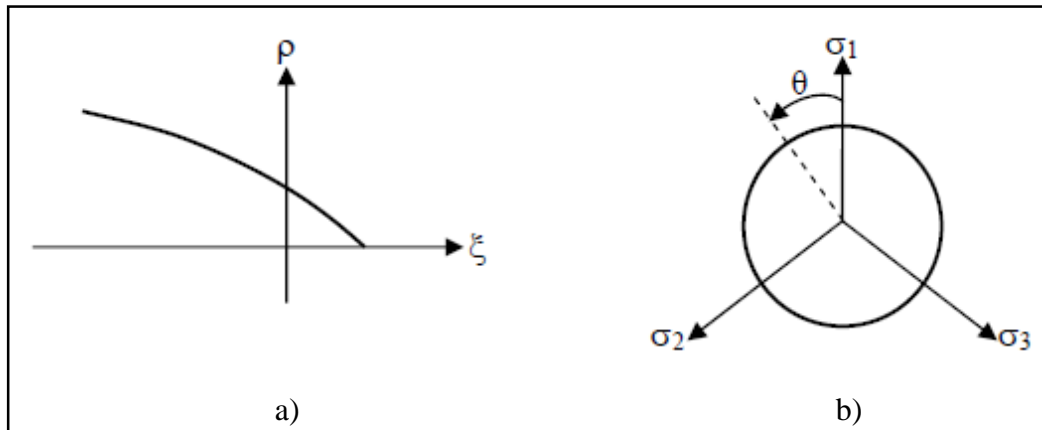
Şekil 2.22 Bir parametrelı Von Mises akma kriterine ait a) gerilme meridyenleri ve b) deviatorik kesit



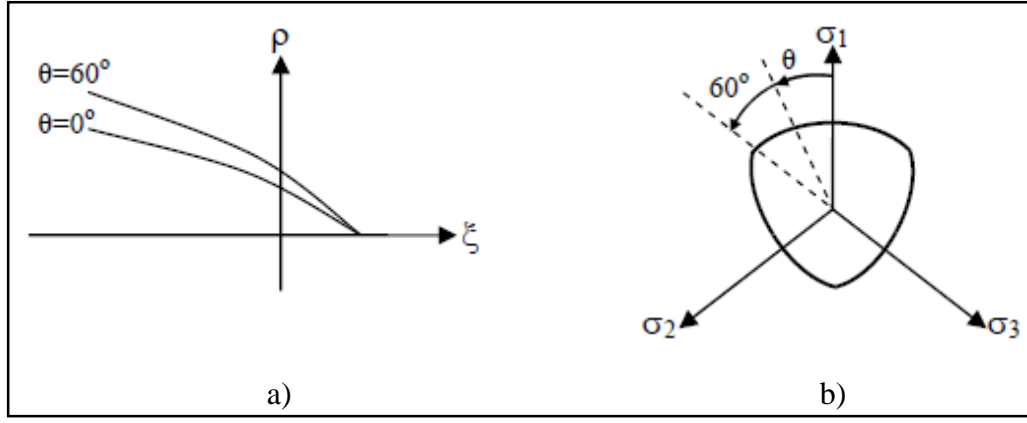
Şekil 2.23 İki parametrelı Mohr-Coulomb akma kriterine ait a) gerilme meridyenleri ve b) deviatorik kesit



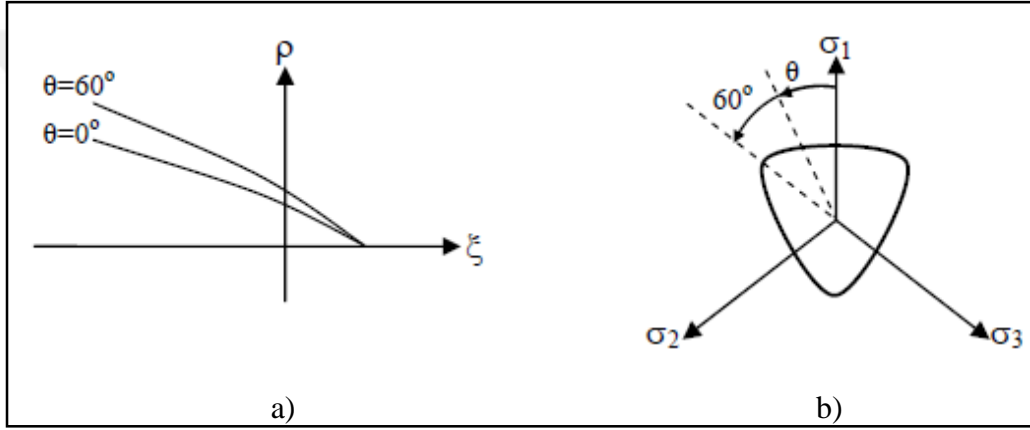
Şekil 2.24 İki parametrelı Drucker-Prager akma kriterine ait a) gerilme meridyenleri ve b) deviatorik kesit



Şekil 2.25 Üç parametrelı Bresler-Pister akma kriterine ait a) gerilme meridyenleri ve b) deviatorik kesit



Şekil 2.26 Dört parametrelili Ottosen akma kriterine ait a) gerilme meridyenleri ve b) deviatorik kesit



Şekil 2.27 Beş parametrelili William-Warnke akma kriterine ait a) gerilme meridyenleri ve b) deviatorik kesit

Beton malzemesi için burada belirtilen akma kriterlerinden en çok kullanılanları iki parametrelili akma kriterleri olan Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager'dır. Her ikisinde de malzeme parametreleri olarak içsel sürtünme açısı ve kohezyon kullanılır. Bu kriterler betonun çekme etkisinde çatlaması, basınç etkisinde ise ezilmesiyle ilgili olan plastik davranışlarını dikkate alırlar. Fakat bu kriterlerin, çatlama durumu söz konusu olduğunda oldukça yetersiz kaldığı belirtilmektedir [33].

Mohr-Coulomb kriterinin deviatorik kesitinin altıgen şeklinin dezavantajlarını gidermek amacıyla Drucker ve Prager adlı araştırmacılar bu kriteri kendilerine göre revize ederek yine kendi isimleri ile anılan akma kriterini önermişlerdir. Ayrıca Drucker-Prager kriteri önerilirken tek parametrelili Von Mises kriterinden de faydalanılmıştır. Yukarıda da belirtildiği gibi üç boyutlu gerilme durumu hidrostatik gerilme ve deviatorik gerilme bileşenlerinden oluşmaktadır. Yapılan araştırmalar hem Mohr-Coulomb hem de Drucker-Prager kriterinin hidrostatik gerilmeye karşı duyarlı olduklarını ortaya koymuştur. Fakat

Von Mises kriteri hidrostatik gerilmeye duyarlı değildir. Yani Von Mises kriteri hidrostatik gerilme durumunda meydana gelen plastik şekil değiştirmeleri dikkate alamaz. Von Mises'in bir diğer dezavantajı da hem basınç hem de çekme etkilerine karşı aynı davranışı sergilemesidir [29]. Drucker ve Prager, Von Mises'in bu dezavantajını gidererek hidrostatik gerilme etkisini ek bir terim ile dikkate almak suretiyle kendi kriterlerini önermişlerdir [37]. Sonuç olarak Drucker-Prager kriteri, gerilme meridyenleri Von Mises akma kriterinin revize edilmesiyle, deviatorik kesiti ise Mohr-Coulomb akma kriterinin revize edilmesiyle geliştirilmiş bir modeldir.

Hem Mohr-Coulomb hem de Drucker-Prager kriterinin en sakıncalı tarafı deneysel çalışmaların parabolik meridyenleri göstermesine rağmen, meridyen düzlemindeki izdüşümlerinin doğru olmasıdır. Buna ek olarak Drucker-Prager kriterinin bir diğer olumsuz tarafı ise deviatorik şeklin değişimini belirleyen lode açısından bağımsız olmasıdır. Mohr-Coulomb kriterinin böyle bir dezavantajı yoktur fakat bu kriterin deviatorik kesitinin köşeli olması sayısal sorunlara yol açabilmektedir. Zira matematiksel açıdan, seçilen akma kriterine ait deviatorik kesitin kırıklı ve köşeli olmaması daha uygun olmaktadır [29]. Daha önce de belirtildiği gibi bu kriterler çatlama durumu söz konusu olduğunda oldukça zayıf bir performans göstermektedir.

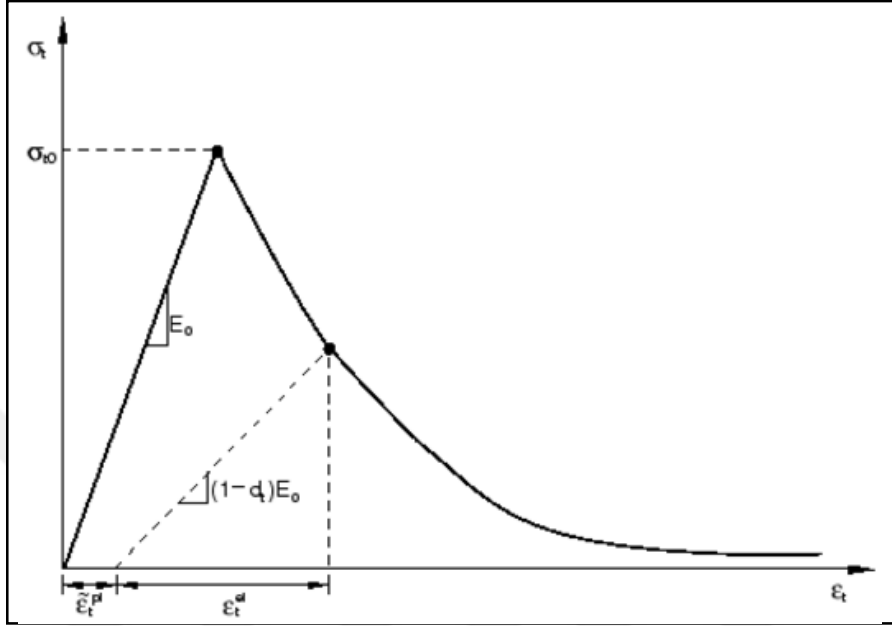
Tüm bu durumlar gözönünde bulundurularak bu tez çalışması kapsamında ABAQUS/CAE v6.14 sonlu elemanlar programı bünyesinde bulunan Concrete Damaged Plasticity plastisite modeli kullanılmıştır. Zira bu model, Drucker-Prager akma kriterinin belirli ölçülerde iyileştirilmesi ve plastisite ve hasar teorilerinin birlikte kullanılması ile geliştirilmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu modelle yapılan analiz sonuçlarına bakıldığında deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Concrete Damaged Plasticity modeli daha önce bahsi geçen modellerin çekme etkisi altındaki betonun davranışındaki yetersizliklerini iyileştirmiştir. Aşağıda bu plastisite modeli ile ilgili detaylar açıklanmıştır.

2.6.1 Hasarlı Beton Plastisitesi (*Concrete Damaged Plasticity*) Modeli

Bu plastisite modeli ile sadece beton bir yapı ya da yapı elemanı modellenemediği gibi betonarme bir yapı da modellenebilir. Monotonik, çevrimsel ya da dinamik yüklemelere maruz kalan betonlar için geliştirilmiş bir modeldir [49].

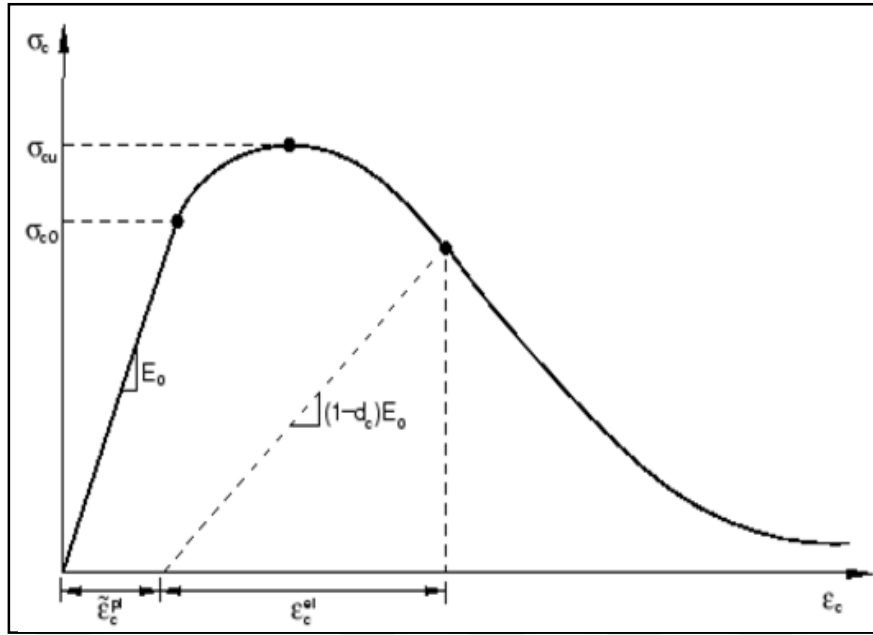
Concrete Damaged Plasticity modeli beton için geliştirilmiş sürekli, plastisite tabanlı bir hasar modelidir. Beton için çekme etkisinde çatlama, basınç etkisinde ise ezilme olmak

üzere iki temel göçme mekanizması olduğunu varsayar. Göçme yüzeyinin gelişimi $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ ve $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ olmak üzere iki pekleşme parametresi tarafından kontrol edilmektedir. Bunlar sırasıyla çekme ve basınç eşdeğer plastik şekil değiştirmelerini ifade etmektedir. Bu iki terim ilerleyen aşamalarda daha detaylı olarak açıklanacaktır.



Şekil 2.28 Eksenel çekme etkisindeki betona ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi [49]

Şekil 2. 28 ‘den görüldüğü gibi tek eksenli çekme etkisi altında gerilme-şekil değiştirme ilişkisi göçme gerilmesi yani σ_{t0} anına kadar doğrusal-elastik bir yörünge takip eder. Göçme gerilmesi betondaki mikro çatlakların başladığı ana tekabül eder. Göçme gerilmesinin ötesinde, beton yapıda şekil değiştirmelerin yerelleşmesine sebebiyet veren, yumuşama bölgesine ait gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ile mikro çatlaklar gözle görülebilecek boyutlara ulaşır.



Şekil 2.29 Eksenel basınç etkisindeki betona ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi [49]

Tek eksenli basınç etkisi altındaki betona ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi başlangıç akma değeri olan σ_{c0} 'a kadar doğrusal bir yörünge izler. Plastik bölgede bu ilişki pekleşme ve bunu takiben yumuşama bölgesiyle betimlenir.

Bu model gereğince gerilme-şekil değiştirme eğrisi, gerilmeye karşı plastik şekil değiştirme eğrisine dönüştürülür. Bu dönüştürmeyi ABAQUS/CAE programı gerilmeye karşılık inelastik şekil değiştirme değerleri girildiği takdirde otomatik olarak yapmaktadır. Bu konuya ilerleyen kısımlarda değinilecektir.

Şekil 2.28 ve Şekil 2.29 'da görüldüğü gibi beton numune üzerindeki yükleme, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin pik gerilme değerinden sonra gelen bölgesindeki herhangi bir anda boşaltılmaya başladığı zaman, numune bu boşalmaya karşı zayıf bir tepki verecektir. Zira malzemenin elastik rijitliği azalmıştır. Bu elastik rijitliğin azalması d_t ve d_c olmak üzere iki hasar değişkeni ile betimlenir. Bunlar sırasıyla çekmede ve basınçta hasarı ifade etmektedirler ve bu hasar parametreleri eşdeğer plastik şekil değiştirmelerin bir fonksiyonudur. Burada her iki parametre de sıfır ile bir arasında değerler alabilmektedir. Bir değerinin anlamı malzemenin tamamen hasar gördüğü yani elastik rijitliğini tamamen kaybetmek suretiyle yük taşıyamaz hale geldiği, sıfır değerinin anlamı ise hiçbir şekilde hasar görmediği yani mevcut elastik rijitliğini tamamen koruduğudur.

Malzemenin başlangıç yani hasarsız elastik rijitliği E_0 olarak kabul edilirse gerilme-şekil değiştirme ilişkisi tek eksenli durumda çekme ve basınç yükleri altında sırasıyla,

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (2.2)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (2.3)$$

bağıntılarıyla ifade edilir.

Tek eksenli çevrimsel yükleme şartları altında hasar mekanizması daha kompleks bir hal alır. Deneysel olarak, çevrimsel yükleme testlerinde yükleme tipi değiştikçe elastik rijitlikte bir iyileşmenin olduğu görülmüştür. Literatürde *stiffness recovery* olarak karşımıza çıkan bu durum çevrimsel yükleme altındaki betonun davranışı için oldukça önemli bir durum arz etmektedir. Bu duruma ilerleyen aşamalarda tekrar değinilecektir. Concrete Damaged Plasticity modeli elastisite modülünün azalmasını d sembolü ile ifade edilen rijitlik azalma değişkeni ile dikkate alır. Rijitliğin azalmış olduğu herhangi bir andaki elastisite modülünün değeri,

$$E = (1 - d)E_0 \quad (2.4)$$

ile hesaplanır. Bu rijitlik azalma faktörü gerilme durumunun ve hasar parametrelerinin bir fonksiyonudur. (Daha ayrıntılı bilgi için [49] 'a bakılabilir).

2.6.1.1 Concrete Damaged Plasticity Modelinde Çekme ve Basınç Durumunda Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkilerinin Belirlenmesi

Bu modelde çekme gerilmelerine karşı çatlama şekil değiştirmelerinin tanımlanması istenmektedir. Çatlama şekil değiştirmesi, yumuşama kuralını ve rijitlik azalma değişkeninin gelişimini kontrol eder [50]. Bu şekil değiştirme, toplam şekil değiştirmelerden hasarsız malzemeye tekabül eden elastik şekil değiştirmelerin çıkarılması ile elde edilir. Şekil 2. 30'da da görüldüğü gibi $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$ ile sembolize edilen bu şekil değiştirme değerleri,

$$\varepsilon_{0t}^{el} = \sigma_t / E_0 \quad (2.5)$$

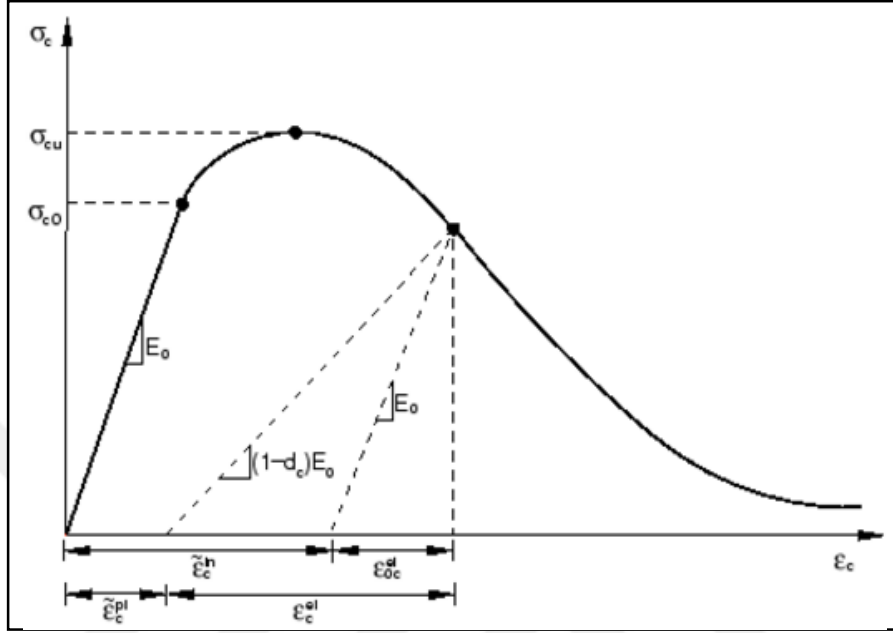
$$\tilde{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el} \quad (2.6)$$

bağıntıları ile elde edilir.

$$\varepsilon_{0c}^{el} = \sigma_c / E_0 \quad (2.8)$$

$$\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el} \quad (2.9)$$

bağıntıları ile elde edilir.



Şekil 2.31 Basınç gerilmeleri altındaki betonun inelastik şekil değiştirmelerinin elde edilmesi [49]

Şekil 2. 30 ve Şekil 2. 31 ‘deki gerilme-şekil değiştirme eğrileri ve (2.5), (2.8) bağıntıları birlikte düşünülürse, ε_{0t}^{el} ve ε_{0c}^{el} şekil değiştirme değerlerinin sabit birer değer olmadıkları ve gerilmenin değiştiği her nokta için bu şekil değiştirme değerlerinin de değiştiği sonucu çıkarılır.

Pekleşme bölgesindeyken yükün boşalması durumunda geriye kalacak olan şekil değiştirme değerleri Abaqus programı tarafından $d_c - \tilde{\varepsilon}_c^{in}$ basınç hasar eğrisi vasıtasıyla otomatik olarak hesaplanır. Yani ezilme şekil değiştirme değerleri, plastik şekil değiştirme değerlerine dönüştürülmektedir. Şekil 2. 31 ‘de de görülen bu ilişki şöyle tariflenir:

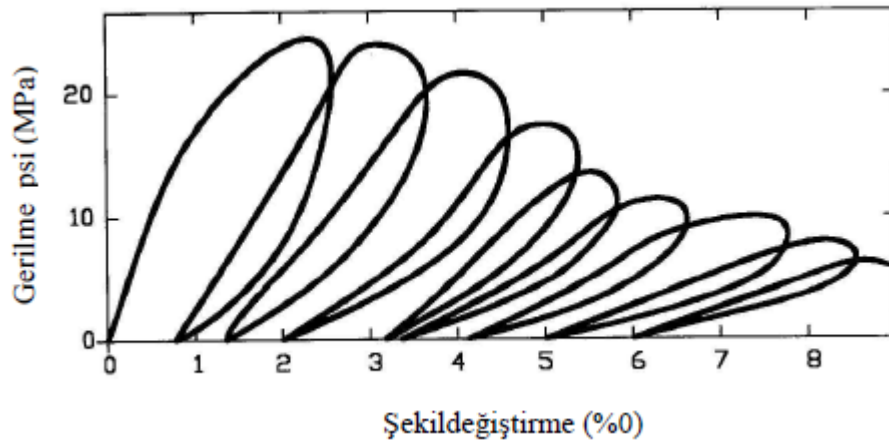
$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (2.10)$$

2.6.1.2 Malzemede Hasarın Tanımlanması

Hasar, bir elemanın rijitliğinde ve dayanımında meydana gelen azalma olarak ifade edilmektedir [29]. Elastik rijitliğin azalması olarak da tanımlanabilir. Yani hasar

parametresi, rijitliği azaltma parametresidir. Concrete damaged plasticity modeli, çekme ve basınçta oluşan plastik şekil değiştirmelerin sebebiyet verdiği hasarın oluşturduğu elastik rijitlik azalmasını dikkate alır. Zaten daha önceki kısımlarda hasarın, plastik şekil değiştirmelerin bir fonksiyonu olduğuna değinilmişti.

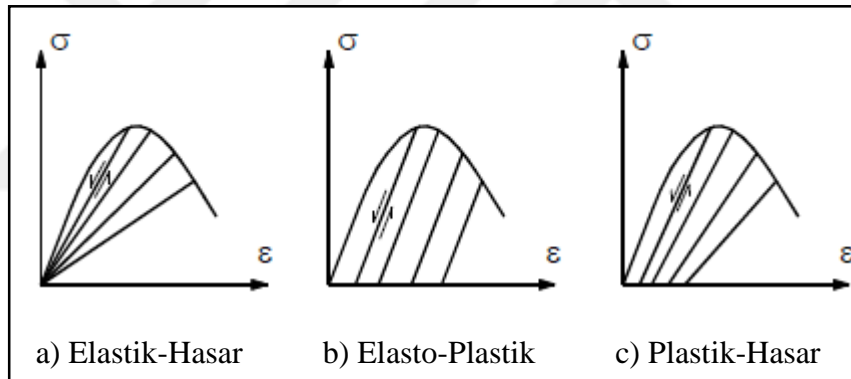
Yüklemeye başlamadan önce bile beton içerisinde bulunan birçok boşluk ve mikro-çatlak vardır. Yüklemeden sonra bu çatlaklar yayılıp birleşerek makro çatlak haline gelir. Bu durumun neticesinde makroskopik ölçekte betona ait gerilme – şekil değiştirme ilişkisi değişmeye başlar. Sürekli ortam hasar mekaniği de küçük çatlakların büyüyerek oluşturdukları makro boyutlardaki çatlakların sonucunda malzemenin mekanik özelliklerinin bozulması sürecini incelemektedir. Betona ait tekrarlı yükleme sonucunda elde edilen tipik gerilme – şekil değiştirme ilişkisi Şekil 2. 32 'de verilmiştir. Şekle bakıldığında malzeme rijitliğinde tekrar sayısının artmasıyla birlikte bir azalma olduğu görülmektedir. Hasar mekaniği sayesinde rijitlikteki bu azalma modellenebilmektedir. Bunun için bir hasar değişkeninin çeşitli parametrelere bağlı olarak tanımlanması gerekmektedir. Hasar parametresi skaler olabildiği gibi vektörel veya tensörel bir büyüklük de olabilir. Gerçekte hasar doğrultuya bağlı olarak değişmektedir. Fakat hasarın doğrultudan bağımsız olduğu kabulüyle bir basitleştirme yoluna gidilebilir. Bu sayede izotropik hasar teorisine ulaşılmış olur. İzotropik hasarın formülüze edilmesi ve uygulanması daha pratik olduğu için araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir [29]. Concrete Damaged Plasticity modeli, betonun inelastik davranışını temsil etmek amacıyla yapılan izotropik çekme ve basınç plastisitesine ek olarak izotropik hasar kabulü de yapılarak geliştirilmiş bir modeldir [49].



Şekil 2.32 Betonun tekrarlı yüklemeler altındaki gerilme – şekil değiştirme eğrisi [29]

Yapısal analiz aşamalarının en önemli safhalarından biri de malzeme davranışını gerçeğe en yakın bir şekilde yansıtabilmek amacıyla uygun bünye denklemlerini elde edebilmektir. Bu denklemlerin kurulmasında plastisite teorisi ve hasar mekaniği tabanlı malzeme modelleri sıkça kullanılmaktadır.

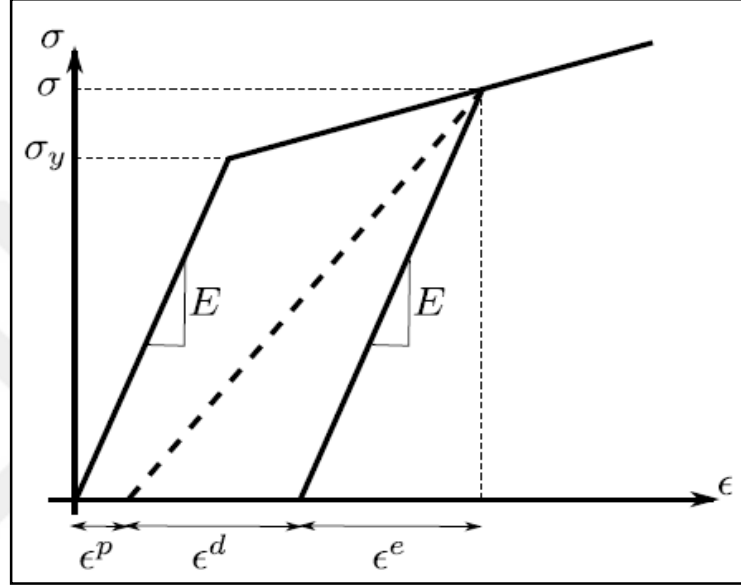
Beton için sıkça kullanılan plastisite modeli ile kalıcı-plastik şekil değiştirmeler iyi bir şekilde modellenebilirken hasar mekaniği sayesinde de malzemedeki rijitliğin azalması iyi bir şekilde dikkate alınabilmektedir [51]. Fakat hasar mekaniği ve plastisite teorilerinin tek başına kullanılması betonun gerçek davranışının modellenmesi noktasında yetersiz kalmaktadırlar [29]. Şekil 2.33'ten de görüldüğü gibi elastik hasar modelleri rijitliğin azalmasını dikkate alıp kalıcı şekil değiştirmeleri dikkate almadıkları için, elasto-plastik modeller ise kalıcı şekil değiştirmeleri dikkate alıp rijitliğin azalmasını dikkate almadıkları için yetersiz kalmaktadırlar. Bunlar tek başlarına kullanıldıkları durumda çevrimsel yüklemeler altında, hasar olarak tanımlanan davranışı gerçekçi bir şekilde dikkate alamamaktadırlar.



Şekil 2.33 Tipik Malzeme Modelleri [29]

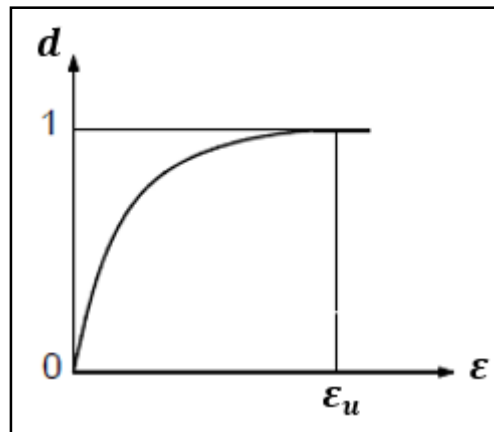
Elastik-hasar modelleri malzemede hiçbir durumda plastik şekil değiştirme öngörmezken malzemede olması gerekenden daha fazla bir hasar oluşacağı tahmininde bulunurlar. Elasto-plastik modeller ise malzemede hasarı yani rijitlik kaybını hiçbir zaman dikkate almazlarken oluşacak olan plastik şekil değiştirmeleri de gerçekte olandan daha fazla hesap ederler [51]. Dolayısıyla betonun gerçeğe en yakın davranışını dikkate alabilmek amacıyla plastik-hasar modelleri kullanılmalıdır. Bu modelde rijitliğin azalması dikkate alınır ayrıca hesaplanan plastik şekil değiştirme değerleri de elasto-plastik modellerdeki kadar büyük olmayıp daha gerçekçi seviyelerdedir. Zira bu tez çalışması kapsamında kullanılan Concrete Damaged Plasticity malzeme modeli de plastik-hasar durumunu dikkate almaktadır.

Plastik-hasar modelinin kullanıldığı benzer bir çalışmada Şekil 2.34 'te görüldüğü gibi toplam şekil değiştirmeler $\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^d$ olarak tariflenmiştir. Burada ϵ^p 'nin geri dönmesi mümkün olmayan şekil değiştirmeleri ifade ettiği, ϵ^e 'nin yük kalktıktan sonra elastik bölgedeki eğimle yani başlangıç elastisite modülü ile paralel olacak şekilde geri dönen elastik şekil değiştirmeleri ifade ettiği, ϵ^d 'nin ise hasar sırasında elastisite modülünün değişiminden dolayı yani rijitlik azalmasının beraberinde getirdiği, ek olarak geri dönen şekil değiştirmeleri ifade ettiği belirtilmektedir [31].



Şekil 2.34 Plastik-hasar modelinde var olan şekil değiştirme tipleri [31]

Başka bir bilimsel çalışmada ise betonun çevrimsel yüklemeler altında hem çekme hem de basınç etkilerine maruz kalmasından dolayı betonun hasar durumunu etkin bir şekilde dikkate alabilmenin tek bir hasar değişkeni ile mümkün olmayacağı ifade edilmektedir. Bu iki durum için ayrı ayrı hasar değişkenlerinin tanımlanması gerektiği belirtilmektedir [52].



Şekil 2.35 Tipik hasar değişkeni eğrisi

Malzemede hasar durumu tanımlanırken gerek basınç gerekse çekme durumları için hasar-plastik şekil değiştirme eğrisinin tanımlanması gerekmektedir (Şekil 2.35). Bu eğri esas anlamda tekrarlı yükleme deneyleri yapılarak tekrarlı yükleme eğrisinden, artan plastik şekil değiştirmeler sonucu elastisite modülündeki azalmalar okunarak elde edilebilir. Tipik bir hasar eğrisi Şekil 2.35 ‘teki gibi olmaktadır [29]. Daima tekrarlı yükleme deneyleri yapılamayabileceği için [50] ‘da önerildiği gibi yumuşama bölgesinden itibaren oluşacak olan bu hasarların gerilmelerle orantılı bir şekilde meydana geleceği düşünülebilir. Buna göre σ_{cu} maksimum gerilme ve σ_c yumuşama bölgesinin herhangi bir anındaki gerilme değeri olmak üzere,

$$1 - \sigma_c / \sigma_{cu} \quad (2.11)$$

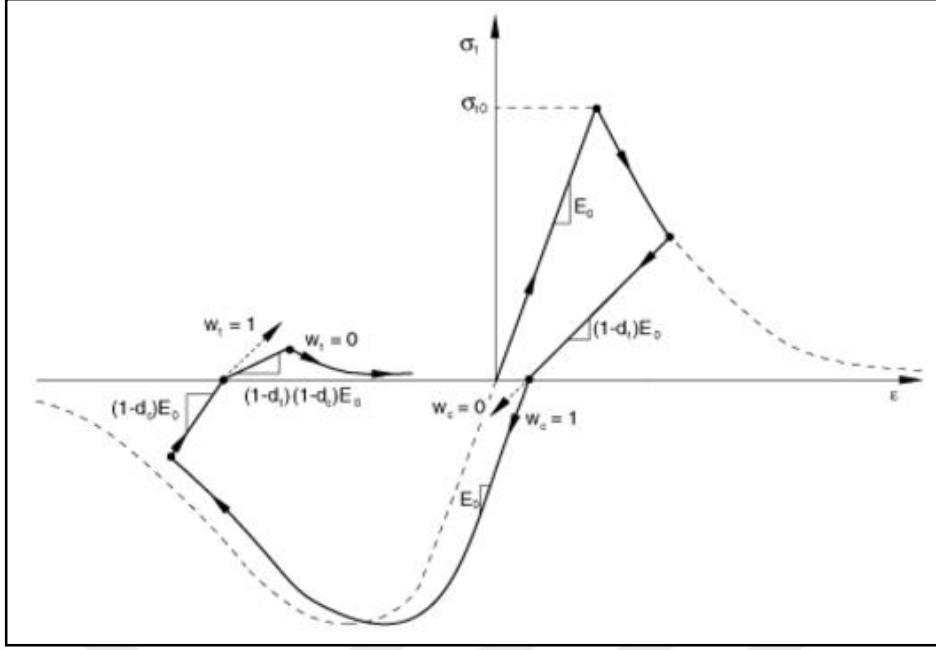
bağıntısı ile, oluşacak olan hasarlar belirlenerek hasar eğrisi çizilebilir.

Daha önce, d_t ve d_c olarak sembolize edilen bu hasar parametrelerinin en fazla 1 değerini alabileceğinden, bunun anlamının da malzemenin tamamen hasar görerek rijitliğini kaybetmesi olduğundan bahsedilmişti. Abaqus sonlu elamanlar programının, yakınsama problemleri doğabileceğinden dolayı bu değer en fazla 0.99 alınmasının iyi olacağı [49] ‘da belirtilmektedir.

2.6.1.3 Rijitlik İyileşmesi Durumu

Literatürde ve [49] ‘da *stiffness recovery* olarak karşılaşılan bu durum, çevrimsel yükleme altındaki betonun mekanik davranışı için oldukça önem arz etmektedir.

Deneysel araştırmalar betonun da içinde bulunduğu birçok yarı gevrek malzemenin basınç rijitliğinin, yük çekmeden basınca döndüğü esnada çatlakların kapanmasından dolayı bir iyileşmeye yöneldiğini göstermektedir. Öte yandan tam tersi bir durum var olduğunda yani yük basınçtan çekmeye döndüğünde böyle bir durum söz konusu olmadığı için çekme rijitliğinde de bir iyileşme gözlenmemektedir [49]. Fakat burada, basınçtaki iyileşmenin tam anlamıyla %100 bir iyileşme olmayabileceği, çekmedeki iyileşmenin de tamamen sıfır olduğunu söylemenin yanlış olduğu belirtilmelidir. Abaqus User’s Guide tarafından ise ω_c olarak adlandırılan basınç rijitlik iyileşmesinin 1 olarak, ω_t çekme rijitlik iyileşmesinin de 0 olarak alınabileceği önerilmektedir. Şekil 2. 36 ‘da da bu durum ifade edilmektedir.



Şekil 2.36 Çevrimsel yükleme altında (çekme-basınç-çekme) rijitlik iyileşme faktörleri [49]

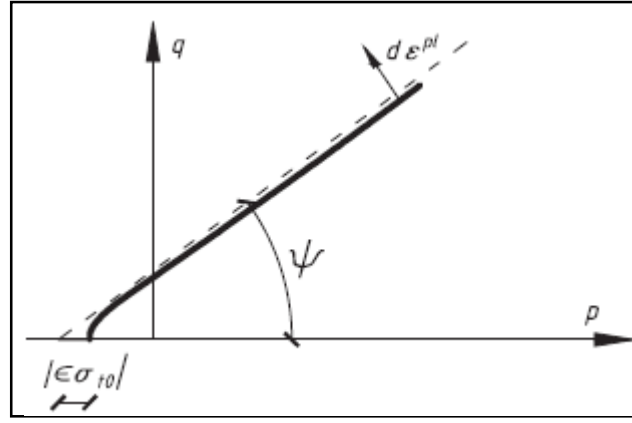
2.6.1.4 Concrete Damaged Plasticity Modelinin Plasticity Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu modelin tanımlanabilmesi için çekmede ve basınçta çatlama şekil değiştirmesi ve inelastik şekil değiştirmeye ek olarak hasar parametrelerinin de belirlenmesi gerektiği üzerinde durulmuştur. Tüm bunlara ek olarak bu modelde plasticity olarak bilinen değişkenlerin de tanımlanması gerekmektedir. Bu parametreler, bir göçme kriteri olarak concrete damaged plasticity modelinin akma yüzeyinin ve deviatorik kesitinin şeklini belirler, akış potansiyelini ve visko-plastik düzenlemeyi tanımlar [53].

Daha önce de bahsedildiği gibi Concrete Damaged Plasticity modeli Drucker-Prager kriterinin geliştirilmesiyle elde edilmiştir. Drucker-Prager modelinin, Şekil 2. 24-a 'da görüldüğü gibi, akma yüzeyine ait meridyen düzleminin doğrusal olup bu durumun deneysel verilerle uyuşmadığı zira deneysel verilerin eğrisel meridyenlere işaret ettiği de vurgulanmıştır. Concrete Damaged Plasticity modelinde de deneysel verilerin işaret ettiği bu durum gözardı edilmemiş olup,

$$G = \sqrt{(\epsilon\sigma_{t0}\tan\psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p}\tan\psi \quad (2.12)$$

akış potansiyeli bağıntısıyla Şekil 2. 37 'de görüldüğü gibi bu eğrisel durum dikkate alınmıştır.



Şekil 2.37 Meridyen düzlemdeki hiperbolik akış potansiyeli [53]

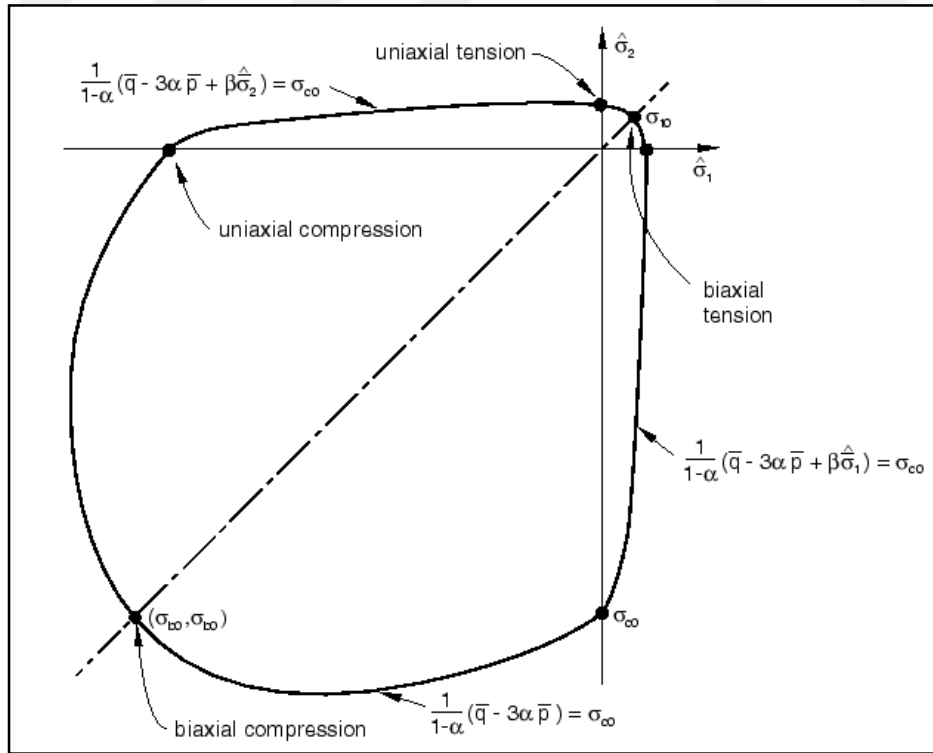
Akış kuralı, başlangıç akma fonksiyonundan sonra oluşacak olan artımsal gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin nasıl olacağını belirlemektedir. Akış kuralının uygulanması bir fonksiyon seçilmesi ile gerçekleşir. Şayet bu fonksiyon akma yüzeyi ile aynı alınırsa literatürde plastik şekil değiştirmelerin diklik koşulu olarak adlandırılan *associated plasticity* durumu sağlanmış olur. Bu fonksiyon akma yüzeyinden farklı seçilirse *non-associated plasticity* durumu sağlanmış olur. Yani bu durumda diklik koşulu geçerli değildir. Yapılan deneysel çalışmalar betonda diklik koşulunun geçerli olmadığını ortaya koyduğu için betona ait bir akış kuralının akma yüzeyinden farklı seçilmesi gerekir. Diklik koşulu beton gibi granüler malzemelerde geçerli olmayıp metallerde geçerlidir. Şayet plastik potansiyel olarak akma yüzeyi seçilirse betondaki hacimsel şekil değiştirmelerin olması gerekenden daha yüksek hesaplandığı ve betonda aşırı yanal şekil değiştirmelerin oluştuğu görülmektedir [29]. Drucker-Prager kriterinde *associated plasticity* durumu geçerli olup bahsi geçen dezavantajlar bu akma kriteri için de geçerlidir. Concrete Damaged Plasticity modelinde ise Şekil 2. 37 'de görüldüğü gibi bu olumsuz durum giderilerek plastik potansiyel fonksiyon şekil üzerinde çizgi çizgi olarak gösterilen akma yüzeyinden farklı seçilmiştir.

Concrete Damaged Plasticity modelinin, tanımlanması gereken beş adet plasticity parametresi vardır. Bunlardan ψ ile sembolize edilen terim *dilation angle* yani genişleme açısı olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2. 37 'de görüldüğü gibi bu parametre akma yüzeyi ile hidrostatik eksen (p) arasında kalan açıdır. Fiziksel anlamda bu açı betonun içsel sürtünme açısına müdahale eder ve 36° ile 40° arasında alınması uygundur [54]. Genişleme açısının sıfır olması, malzemenin hiçbir şekilde sıkışmadığı ve dolayısıyla malzemede inelastik şekil değiştirmelerin de oluşmadığı anlamını taşımaktadır. Bu açının betonun içsel sürtünme açısına eşit alınması durumunda ise *associated plasticity* durumu

geçerli olacağı için model Drucker-Prager modeline benzeyecektir [49]. Bu tez çalışması kapsamında bu açı [54] 'de de kullanıldığı gibi 36° olarak dikkate alınmıştır.

İkinci plasticity parametresi ϵ ile sembolize edilen *eccentricity* parametresidir. Bu parametre Şekil 2. 37 'de görüldüğü gibi hiperbolik potansiyel fonksiyonun tepe noktası ile hiperbolün merkezi arasında kalan mesafedir. Bu değerın sıfıra yaklaşması durumunda akma yüzeyi ile akış potansiyeli aynı hale geleceği için model Drucker-Prager modeline benzeyecektir. Eccentricity parametresi dilation angle parametresi ile birlikte Şekil 2. 37 'de görüldüğü gibi non-associated akış potansiyelini belirler [53]. [54] 'te belirtildiğine göre eccentricity parametresinin değeri betonun çekme dayanımının basınç dayanımına oranı olarak alınabilmektedir. Buradan hareketle bu çalışmada seçilen beton sınıfına bağlı olarak bu değer 0.059 olarak belirlenmiştir.

Bir diğer plasticity parametresi σ_{b0}/σ_{c0} olarak dikkate alınan, iki eksenli basınç dayanımının tek eksenli basınç dayanımına oranıdır. Akma yüzeyinin belirlenmesinde rol alır (Şekil 2.38). [32] 'de, yapılan deneysel çalışmalara göre bu değerın 1,10 ile 1,16 arasında alınabileceği belirtilmektedir. Abaqus User's Guide tarafından bu değerın 1,16 alınabileceği tavsiye edilmektedir. Buradan yola çıkarak bu çalışma kapsamında bu parametre 1,16 olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 2.38 Düzlem gerilme durumunda akma yüzeyleri [49]

2.7 Beton İçin Önerilen Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri

Literatüre bakıldığında gerek basınç etkisi altındaki gerekse çekme etkisi altındaki betona ait birçok gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin önerildiği görülmektedir.

Basınç etkisi altındaki beton için Hognestad, Kent ve Park, Popovics, Eurocode 2, CEB-FIB, Park ve Paulay, Desayi ve Krishnan, Saenz, Hoshikuma gibi gerilme-şekil değiştirme ilişkileri literatürde rastlanılan modellerden sadece bazılarıdır. Bu eğrilere bakıldığında, genellikle pik gerilme değerine kadar ilk kısımları doğrusal-elastik olan diğer kısmı doğrusal olmayan, pik gerilme değerinden sonra ise azalan gerilmelerle tariflenen bir ilişkiden söz edilebilir. Adı geçen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin pik gerilmeden önceki kısımları çoğunlukla birbirine oldukça benzer matematiksel ifadelerle tanımlanırken pik değerden sonraki kısımlarda ise ya azalan doğru ya da azalan parabol şeklinde tanımlamalar görülmektedir.

Çekme etkisi altındaki beton için ise Collins ve Mitchell 1987, Wang ve Hsu, Vecchio 1982, Izumo vd. 1992, Bentz 1999 gerilme-şekil değiştirme eğrilerine literatürde rastlanılmaktadır. Bu eğrilere bakıldığında, genellikle pik gerilme değeri olan çatlama gerilmesine kadar doğrusal-elastik bir ilişki söz konusudur. Beton çatladıktan sonra ise parabolik olarak azalan bir ilişki olduğu söylenebilir.

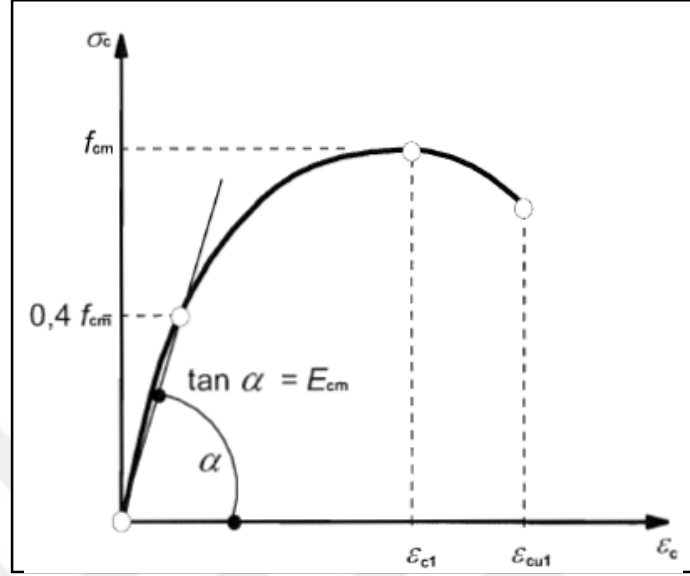
Bu tez çalışması kapsamında basınç etkisi altındaki beton için Eurocode 2 'de doğrusal olmayan yapısal analizlerde kullanılması önerilen gerilme-şekil değiştirme eğrisi kullanılmıştır. Bu standart aynı zamanda ülkemizde TS EN 1992-1-1 standardı olarak kullanılmaktadır. Çekme etkisindeki beton için ise literatürde sıkça kullanılan Wang ve Hsu gerilme-şekil değiştirme eğrisi tercih edilmiştir.

Eurocode 2 tarafından önerilen ve Şekil 2. 40 'ta görülen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi,

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \quad (2.13)$$

bağıntısı ile tarif edilmektedir. Burada ϵ_{c1} maksimum gerilme anındaki şekil değiştirme değeridir. Seçilen beton sınıfına bağlı olarak bu değer Eurocode 2 'den 0,0024 olarak alınmıştır. Öte yandan kopma şekil değiştirmesi olarak adlandırılan ϵ_{cu1} ise yine aynı standarttan 0,0035 olarak alınmıştır. Ayrıca (2.13) 'te,

$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$ ve $k = 1,05E_{cm}\varepsilon_{c1}/f_{cm}$ olarak ifade edilmektedir. Ayrıca Şekil 2. 40 'ta betonun, maksimum basınç dayanımının yaklaşık olarak %40 'ına kadar olan kısımda elastik davrandığı belirtilmektedir.



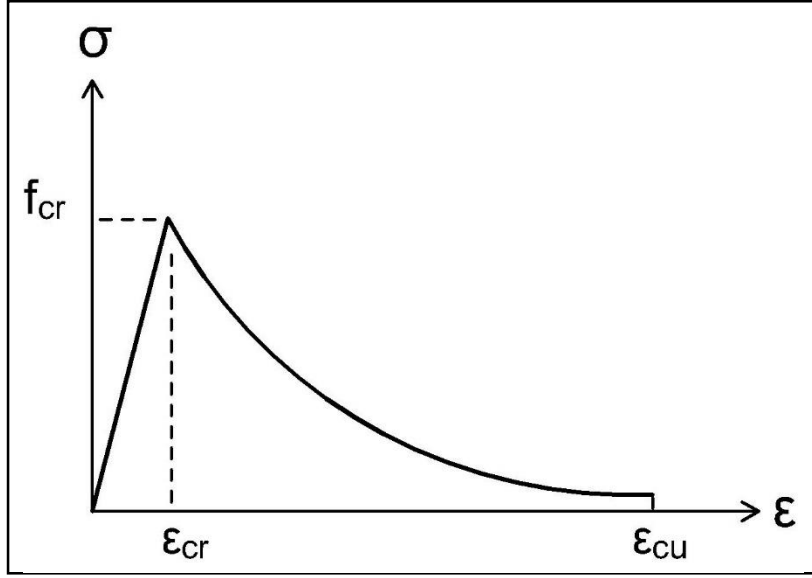
Şekil 2.40 Basınç etkisindeki betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi [55]

Wang ve Hsu tarafından önerilen ve Şekil 2. 41 'de görülen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi,

$$\sigma_1 = E_c \varepsilon_1 \quad \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cr} \quad (2.14)$$

$$\sigma_1 = f_{cr} \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_1} \right)^{0.4} \quad \varepsilon_1 > \varepsilon_{cr} \quad (2.15)$$

bağıntıları yardımıyla belirlenmektedir [30]. Buradaki terimlerden f_{cr} çatlama gerilmesini, ε_{cr} çatlama anındaki şekil değiştirmeyi, ε_1 ise grafik boyunca herhangi bir andaki şekil değiştirme değerini ifade etmektedir.



Şekil 2.41 Çekme etkisindeki betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Betonun çekme etkisi altında koptuğu andaki şekil değiştirme değerinin 0,001 alınabileceği Abaqus User's Guide tarafından belirtilmektedir.

Betonun gerek basınç gerekse çekme dayanımı Eurocode 2 tarafından önerilen ve değeri 1,5 olan malzeme katsayısına bölünmüş ve analizlerde bu değerler kullanılmıştır.

2.8 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), yapı mühendisliği, nükleer mühendislik, akışkanlar mekaniği, zemin mekaniği, kaya mekaniği, uçak mühendisliği, elektromanyetik alanlar, termal analiz ve daha sayılabilecek birçok mühendislik ve fizik problemlerinin çözümünde araç olarak kullanılabilen, temel felsefesi mevcut probleme ait sistemin alt parçalara bölünmesi ve nihayetinde bu alt parçaların matematiksel modelinin problemi temsil etmesi esasına dayanır.

Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki hızlı ilerleme sayesinde gelişen hesap yöntemleri arasında çok önemli bir yer edinen sonlu elemanlar yöntemi, oldukça güçlü ve çağdaş bir sayısal hesaplama yöntemidir. Gerçek çözüm anlamına gelen analitik çözümün kullanılmasıyla doğada karşılaşılabilen birçok mühendislik probleminin son derece az bir kısmı çözülebilir. Zira analitik çözüm ile, çözüm aranan bölgedeki matematiksel ifadelerin bulunabilmesi, yani sonsuz noktada çözümün gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Analitik çözümün yapılması doğrusal olmayan malzeme davranışı, karışık sınır koşulları, üniform olmayan yüklemeler, düzgün olmayan geometri gibi nedenlerle çok daha güçleşmekte hatta olanaksız hale gelebilmektedir. Bazı varsayımlar

ve basitleştirmeler de yapılarak sonlu elemanlar yöntemi sayesinde bu olumsuzluklar bertaraf edilmek suretiyle gerçek çözüme kabul edilebilir bir yakınlıktaki yaklaşık çözüm elde edilebilir [56].

Yapı mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılırken, çözümü aranan yapı ya da yapı elemanı, mevcut problemi en iyi biçimde temsil edecek şekilde sonlu sayıda elemana ayrılır. Bu elemanlar birbirleri ile düğüm noktası denen yerler sayesinde ilişki içerisinde bulunurlar. Sonlu elemanlar yönteminde bilinmeyen olarak kabul edilen nicelikler de bu düğüm noktalarındaki yerdeğişikliklerdir. Sonlu elemanların içindeki yerdeğişiklik değişimi de şekil fonksiyonları olarak adlandırılan fonksiyonlar sayesinde elemanın düğüm noktalarındaki bilinen yerdeğişiklik değerlerinden yararlanılarak belirlenebilir. Yerdeğişiklikler elde edildikten sonra şekil değişikliklerine oradan da gerilmelere geçilebilir.

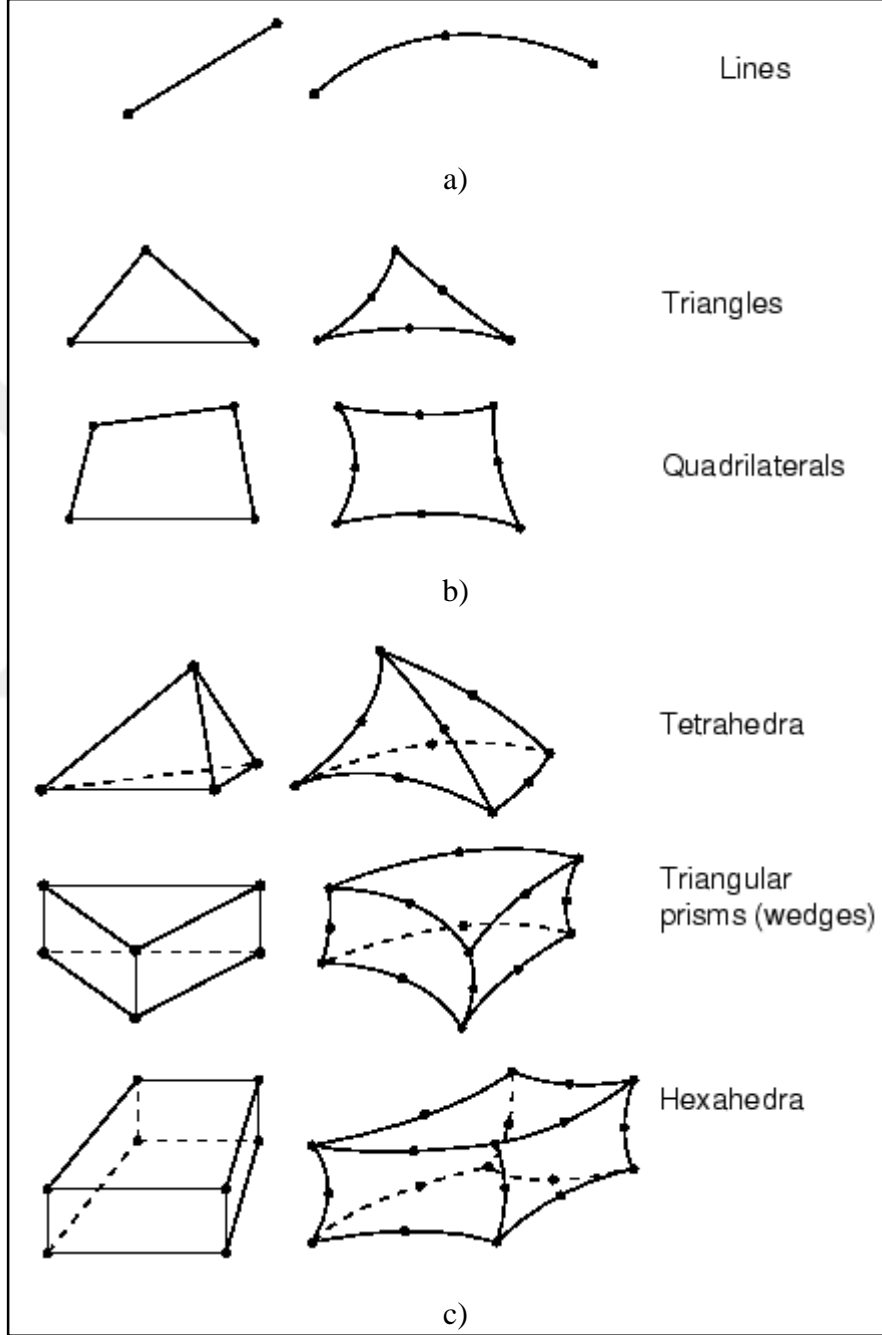
Sonlu eleman çözümlemesi düğüm noktalarında kurulmuş olan denge denklemleri vasıtasıyla gerçekleştirilir. Çözüm sırasında, sistem denge denklemleri doğrusal olduğunda yerdeğişiklikler,

$$\{u\} = [K]^{-1}\{F\} \quad (2.16)$$

bağıntısıyla kolayca elde edilebilirler. Yani doğrusal problemlerde $[K]$ ile ifade edilen rijitlik matrisi ve $\{F\}$ ile betimlenen yük vektörü yerdeğişikliklerden bağımsızdır. Bununla birlikte yapı mühendisliğinde karşılaşılan birçok problemde rijitlik matrisi ve/veya yük vektörü yerdeğişikliklere bağlı olabilmektedir. Böyle bir durumda geometri değişimlerinin büyük olması, malzeme davranışının doğrusal olmaması veya sınır şartlarının yüklemeye bağlı olmasından dolayı sistem denge denklemleri doğrusal denklem takımı oluşturmazlar. Dolayısıyla bu tipteki problemlerin çözümü de yukarıda bahsedildiği gibi doğrudan elde edilemez [29]. Böyle problemlerin çözümünün nasıl gerçekleştirileceği ile ilgili detaylı bilgi bölüm 2.9 'da verilecektir.

Dikkate alınan problemin sonlu eleman ağı oluşturulurken problemin tipine göre bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu eleman tipleri kullanılır. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan ABAQUS/CAE sonlu elemanlar programında bahsi geçen eleman tiplerinin var olduğu, farklı tipteki problemlerin çözümünü oldukça gerçekçi bir şekilde sağlayacak olan çok zengin bir eleman kütüphanesi bulunmaktadır. Bu programda gerilme analizlerinde, ısı transfer analizlerinde, akustik analizlerde v.b. kullanılmak üzere ayrı ayrı sonlu eleman tipleri mevcuttur.

ABAQUS/CAE programında her mesh bölgesi varsayılan olarak atanan bir ya da birden fazla eleman tipine sahiptir. Her eleman tipi, ilgili bölgede kullanılabilen bir eleman şekline tekabül eder. Örneğin Şekil 2. 42 b) 'de görüldüğü gibi kabuk elemanlara ait mesh bölgesi varsayılan olarak atanan quadrilateral (dört kenarlı) ve triangular (üçgen şeklinde) eleman tiplerine sahiptir [49].



Şekil 2.42 ABAQUS/CAE sonlu elemanlar programındaki a) bir boyutlu, b) iki boyutlu ve c) üç boyutlu sonlu eleman tipleri [49]

ABAQUS/CAE programı kütüphanesinde bulunan ve bir boyutlu elemanlar için kullanılan **line** eleman şekline sahip sonlu eleman örneği olarak B31 elemanı verilebilir.

Bu eleman, uzayda iki düğüm noktalı doğrusal bir çubuk eleman olarak tanımlanmıştır. İki boyutlu elemanlar için kullanılan **quadrilateral** ve **triangular** eleman şekilleri vardır. Quadrilateral eleman şekline SFM3D8 elemanı örnek olarak verilebilir. Bunun anlamı, sekiz düğüm noktalı dörtgenel yüzey elemanıdır. Triangular eleman şekline STRI65 örnek olarak verilebilir. Bunun anlamı da altı düğüm noktalı, herbir düğüm noktasında beş tane serbestliği bulunan üçgenel tipte, ince kabuk elemanıdır. Üç boyutlu elemanlar için ise **tetrahedra**, **triangular prism** ve **hexahedra** eleman şekilleri kullanılmaktadır. Hexahedra eleman şekline C3D8 elemanı örnek olarak verilebilir. Bunun anlamı, sekiz düğüm noktalı doğrusal tuğla elemanıdır. Triangular prism eleman şekline C3D15 elemanı örnek olarak verilebilir. Bu eleman, onbeş düğüm noktalı parabolik üçgenel bir prizma olarak tariflenmiştir. Tetrahedra eleman şekline ise C3D10 elemanı örnek verilebilir. Bu eleman on düğüm noktalı parabolik bir dörtyüzlüdür [49].

Yukarıdaki elemanların özellikleri açıklanırken doğrusal ve parabolik ifadeleri kullanılmıştır. Bu durum ABAQUS/CAE programında **Geometric Order** olarak ifade edilen özellikten kaynaklanmaktadır. Bu özellik sayesinde herbir sonlu elemanda kullanılan şekil fonksiyonunun doğrusal mı yoksa parabolik mi olması gerektiği belirlenir. Örneğin bu sayede eleman içinde bulunan bir noktadaki şekil değiştirme değeri düğüm noktalarındaki şekil değiştirme değerlerinden yola çıkılarak doğrusal ya da parabolik nitelikteki şekil fonksiyonlarıyla belirlenebilir. Büyük şekil değiştirmelerin beklendiği durumlarda parabolik şekil fonksiyonlarının kullanılması daha doğru sonuçlar vermektedir. Buradan hareketle bu çalışma kapsamında 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nin ivme kaydına tabi tutulan yapılarda oluşabilecek muhtemel büyük şekil değiştirmelerin göz önünde bulundurulabilmesi amacıyla şekil fonksiyonları parabolik olarak seçilmiştir.

Bu tez çalışmasında C3D10 tipi eleman kullanılmıştır. Bugüne kadar yapılan çalışmalar aynı eleman sayısı için hexa tipinde eleman kullanmanın tetra eleman kullanmaya nazaran doğruluğunun daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Fakat bu çalışmadaki modellerin hexa tipi elemanlarla alt bölgelere ayrılması problemleri bir durum oluşturduğu için tetrahedron elemanlar kullanılmıştır. Hexahedron elemanlarla modelleme yapılsaydı 15000 – 20000 civarında eleman kullanılacaktı. Fakat bu çalışmada tetrahedron elemanlarla 90000 – 120000 civarında eleman kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yukarıda aynı eleman sayısı kullanıldığı takdirde hexa elemanlarla modellenen analizlerde daha doğru sonuçlar elde edildiği belirtilmişti. Tetra elemanların daha fazla

miktarda kullanılmasıyla da bu dezavantaj nispeten giderilmiştir. Fazla eleman kullanmanın zaman maliyeti açısından getireceği dezavantajlı durum ise yüksek performanslı bilgisayar kullanmakla minimize edilmiştir.

2.9 Doğrusal Olmayan Çözüm Yöntemleri

Sonlu elemanlar yöntemine ait denge denkleminin genel anlamda,

$$[K]\{\Delta\} = \{F\} \quad (2.17)$$

şeklinde olduğu söylenebilir.

Doğrusal problemlerde rijitlik matrisi $[K]$ ve kuvvet vektörü $\{F\}$ sabit olup yerdeğıştirmelerden $\{\Delta\}$ bağımsızdırlar. Çünkü malzeme özellikleri yerdeğıştirmenin ve gerilmenin bir fonksiyonu değildir. Öte yandan doğrusal olmayan problemlerde rijitlik matrisi ve kuvvet vektörü yerdeğıştirmelerin bir fonksiyonudur. Bu yüzden doğrusal olmayan denklemlerin çözümü iteratif bir süreci gerektirmektedir.

Genellikle doğrusal olmayan denklemlerin çözümü için üç temel yöntem kullanılır. Bunlar Artımsal Yöntem, Newton-Raphson ya da İterasyon Yöntemi ve Artımsal İterasyon Yöntemidir [57].

2.9.1 Artımsal Yöntem

Bu yöntemde, k artım sayısını göstermek üzere F toplam yükü bu artım sayısı kadar yükün toplanmasıyla elde edilir. Bu durum,

$$\{F\} = \sum_{i=1}^k \{\delta F_i\} \quad (2.18)$$

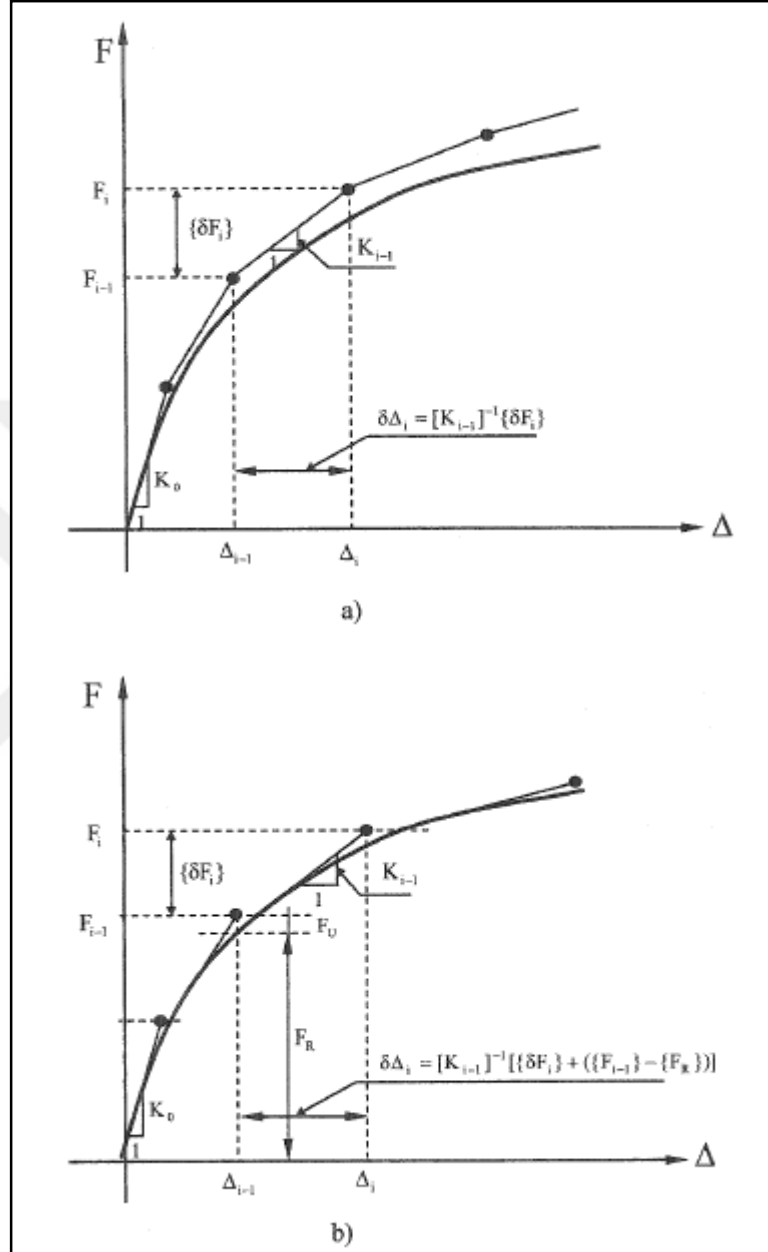
şeklinde ifade edilir. Şekil 2. 43 'te görüldüğü gibi ilk yük artımı için $[K_0]$ başlangıç rijitlik matrisi kullanılır. i 'inci artım için rijitlik matrisi, $(i-1)$ 'inci yük artımı sonundaki mevcut gerilme-şekil değıştirme ilişkisine göre belirlenir.

$$[K_{i-1}]\{\delta\Delta_i\} = \{\delta F_i\} \quad (2.19)$$

Burada $[K_{i-1}]$ ifadesi $\{\Delta_{i-1}\}$ 'in bir fonksiyonudur. Bu durumda i 'inci yük artımındaki toplam yerdeğıştirme vektörü,

$$\{\Delta_i\} = \sum_{j=1}^i \{\delta\Delta_j\} \quad (2.20)$$

ile belirlenir.



Şekil 2.43 a) Artımsal yöntem ve b) değiştirilmiş artımsal yöntem [57]

Bu yöntemin dezavantajlarından birisi yaklaşık çözümün her artımda gerçek çözümden biraz daha uzaklaşmasıdır (Şekil 2.43). Bu kusuru gidermek için yük terimine düzeltme uygulanır. Bu düzeltme terimi her bir artımdaki dengelenmemiş yüklerin hesabından yola çıkılarak elde edilir. i 'inci adımda dengelenmemiş yük $\{F_U\}$, uygulanan artım yükü $\{F_i\}$

ile rijitlik matrisinin mevcut yerdeğiştirme vektörüyle çarpımından hesaplanan kuvvet vektörü $\{F_R\}$ 'nin farkından hesaplanır. Örneğin i 'inci artım için bu durum,

$$\{\Delta_{i+1}\} = \{\Delta_i\} + [K_i]^{-1}[\{\delta F_{i+1}\} + (\{F_i\} - \{F_R\})] \quad (2.21)$$

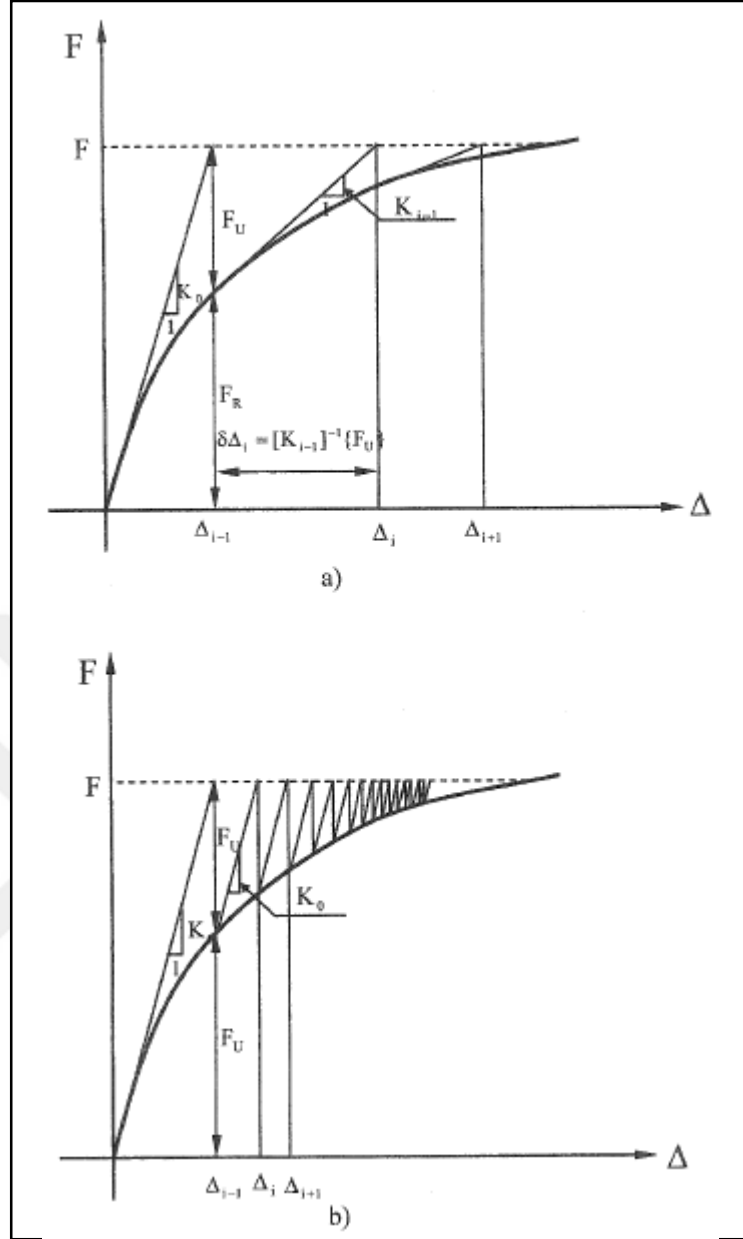
ile ifade edilir.

Dengelenmemiş kuvvetlerin sisteme uygulanmasıyla, herbir artımda uygulanan yük düzeltilir ve gerçek çözümden uzaklaşma durumu azaltılmış olur [57]. Ayrıca bu yöntemin doğruya yakın sonuçlar verebilmesi için adım aralıklarının oldukça küçük tutulması zorunluluğu vardır.

2.9.2 Newton-Raphson Yöntemi ya da İterasyon Yöntemi

Bu yöntemde toplam yük uygulanır ve iterasyonlara tatmin edici bir yakınsaklık kriteri sağlanıncaya kadar devam edilir. Artımsal yönteme benzer şekilde, ilk iterasyon başlangıç rijitlik matrisiyle başlar ve sonraki iterasyonlar için rijitlik matrisi önceki iterasyon sonuçlarına dayalı olarak hesaplanır. Bu hesaplanan rijitlik tanjant rijitliği olarak adlandırılır. Her iterasyondan sonra, dengelenmemiş kuvvetler hesaplanır ve bir sonraki iterasyonda yük olarak uygulanır. i 'inci iterasyon için dengelenmemiş kuvvet vektörü (2.22) 'de olduğu gibi elde edilir.

$$\{F_U\} = \{F\} - \{F_R\} \quad (2.22)$$



Şekil 2.44 a) Tanjant rijitlik yöntemi ve b) başlangıç rijitlik yöntemi [57]

Burada $\{F\}$ uygulanan toplam yük, $\{F_R\}$ ise bir önceki rijitlik matrisinin mevcut yerdeğiştirme vektörüyle çarpımından elde edilen kuvvet vektörüdür. Dengelenmemiş kuvvetin bilinmesi sayesinde $\{F_U\}$ ya karşılık gelen $\{\delta\Delta_i\}$ yerdeğiştirme artımı (2.23) 'te olduğu gibi hesaplanır.

$$[K_{i-1}]\{\delta\Delta_i\} = \{F_U\} \quad (2.23)$$

Öte yandan i 'inci iterasyondan sonraki toplam yerdeğiştirme Artımsal Yöntem 'dekine benzer şekilde (2.24) 'te olduğu gibi hesaplanır.

$$\{\Delta_i\} = \sum_{j=1}^i \{\delta\Delta_j\} \quad (2.24)$$

Değiştirilmiş Newton-Raphson adıyla anılan bir başka yöntem daha vardır. Bu yöntemde tüm süreç için esas itibarı ile başlangıç rijitliği olan tanjant rijitliği, ya hiç güncellenmez ya da çok nadiren güncellenir. Bu yüzden karmaşık yapılarda rijitlik matrisinin her bir iterasyonda tekrarlanmasından kaçınılmış olur. Şekil 2. 44 'te görüldüğü gibi bu yöntem, yakınsamanın sağlanabilmesi için birçok iterasyon döngüsüne ihtiyaç duymaktadır.

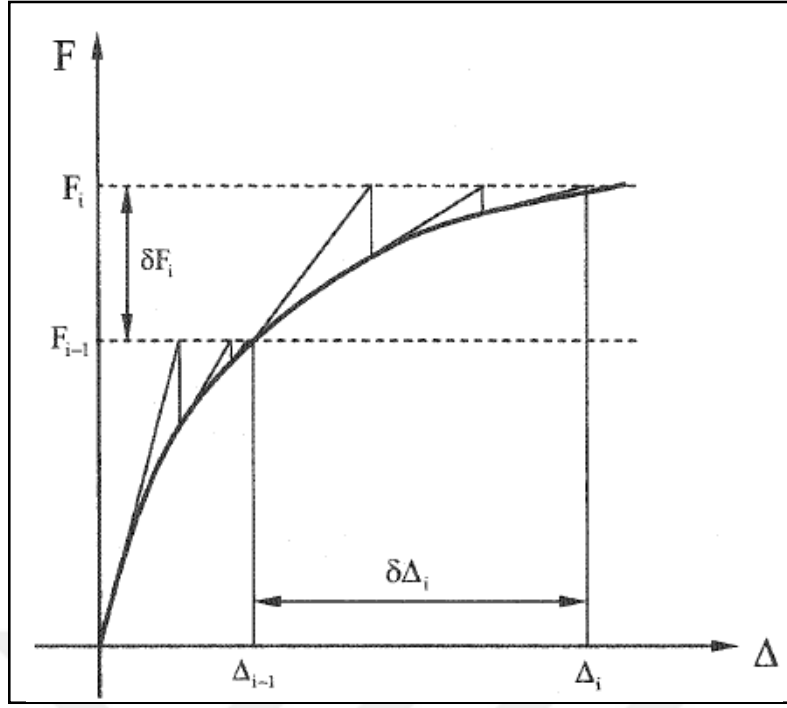
2.9.3 Artımsal-İterasyon Yöntemi

Bu yöntem daha önce bahsi geçen iki yöntemin birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Bu yöntemde yük, parçalara ayrılmak suretiyle artımsal olarak uygulanır (Şekil 2.45). Her bir yük artımının uygulanmasından sonra iterasyona geçilir. i 'inci yük artımının uygulanmasından sonra, ilk iterasyon için, bir önceki yük artımının sonunda, $(i-1)$ 'inci artımın sonunda, hesaplanan tanjant rijitliği, mevcut iterasyon için artımsal yerdeğiştirmeyi hesaplamak amacıyla kullanılır.

Yerdeğiştirme artımının bilinmesiyle,

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\Delta_i\} \quad (2.25)$$

bağıntısı yardımıyla artımsal şekil değiştirmeler, $\delta\varepsilon_i$, hesaplanır ve toplam şekil değiştirme bir önceki toplam şekil değiştirmeye, $\{\varepsilon_i\}$, artımsal şekil değiştirmenin eklenmesiyle hesaplanır. Toplam şekil değiştirmeye karşılık gelen gerilme ve düğüm noktası iç kuvvetleri bulunur ve daha sonra iç kuvvetler ile dış kuvvetler arasındaki denge kontrol edilir. Eğer $\{\delta F_U\}$ olarak adlandırılan herhangi bir artı kalan bir kuvvet varsa başka bir iterasyonun daha gerekli olduğu anlaşılır ve bu dengelenmemiş kuvvetler ters işaretli olacak şekilde yeni düğüm noktası kuvvetleri olarak uygulanır. İterasyon süreci, iç ve dış kuvvetler arasındaki denge daha önce sınırı belirlenen tatmin edici bir yakınsaklık ile sağlanıncaya kadar tekrarlanır. Artımsal-İterasyon yönteminin daha önce tanımlanan iki yöntemle göre doğrusal olmayan analizlerde kullanımının daha uygun olduğu belirtilebilir [57]. Bu çalışma kapsamında kullanılan ABAQUS/CAE sonlu elemanlar programında yapılan analizlerde de Artımsal-İterasyon yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 2.45 Artımsal-İterasyon Yöntemi [57]

BÖLÜM 3

YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR ve İRDELEME

3.1 Analizlerde Kullanılacak Malzeme Verilerinin ve Modellerin Oluşturulması

Bu tez çalışması kapsamında ABAQUS/CAE v6.14 sonlu elemanlar programı bünyesinde bulunan *Concrete Damaged Plasticity* malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modelinde, bölüm 2.6.1.4'te detaylı bir şekilde ifade edilen ve **plasticity** olarak adlandırılan parametrelerden *dilation angle*'ın değeri 36° , *eccentricity*'nin değeri 0,059, σ_{b0}/σ_{c0} 'ın değeri 1,16, K 'nın değeri 0,667 ve son olarak *viskozite* parametresinin değeri de 0 olarak dikkate alınmıştır.

Bunlara ek olarak Eurocode 2'den beton malzemeye ait elastisite modülü E , 36000 MPa poisson oranı ν , 0,2 ve özkütle değeri ρ , 2400 kg/m³ olarak alınmıştır. Hesaplamalarda karakteristik basınç dayanımı 45 MPa olan ve **C45** ile sembolize edilen beton kullanılmıştır. Beton malzemeye ait analizlerde kullanılan dayanım, Eurocode 2 tarafından belirtilen ve karakteristik dayanımın malzemeye ait kısmi güvenlik katsayısına bölünmesiyle elde edilen hesap dayanımı olarak kullanılmıştır. Kısmi güvenlik katsayısı değeri bu standartta beton için 1,5 olarak önerilmiştir. Dolayısıyla f_{cd} ile tariflenen betona ait hesap dayanımı 30 MPa olarak dikkate alınmıştır. Öte yandan yine bu standarttan yola çıkılarak çekme gerilmeleri altındaki betonun davranışı modellenirken, C50 ve daha altındaki dayanım sınıfında bulunan betonlar için önerilen,

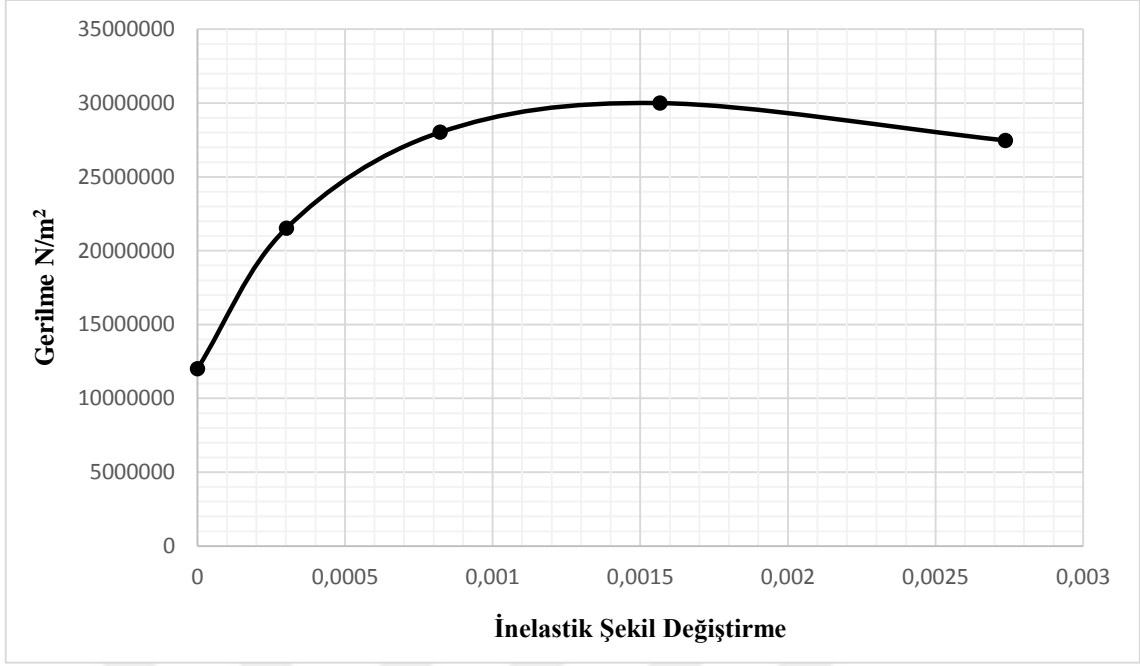
$$f_{ctm} = 0,30f_{ck}^{(2/3)} \quad (2.26)$$

bağıntısından yola çıkılarak betonun ortalama çekme dayanımı elde edilmiş, daha sonra ise bunun 0,7 katı alınarak betonun minimum çekme dayanımı anlamına gelen f_{ctk} , 0,05 'ya ait değer hesaplanmıştır. Daha sonra ise bu değer malzeme katsayına

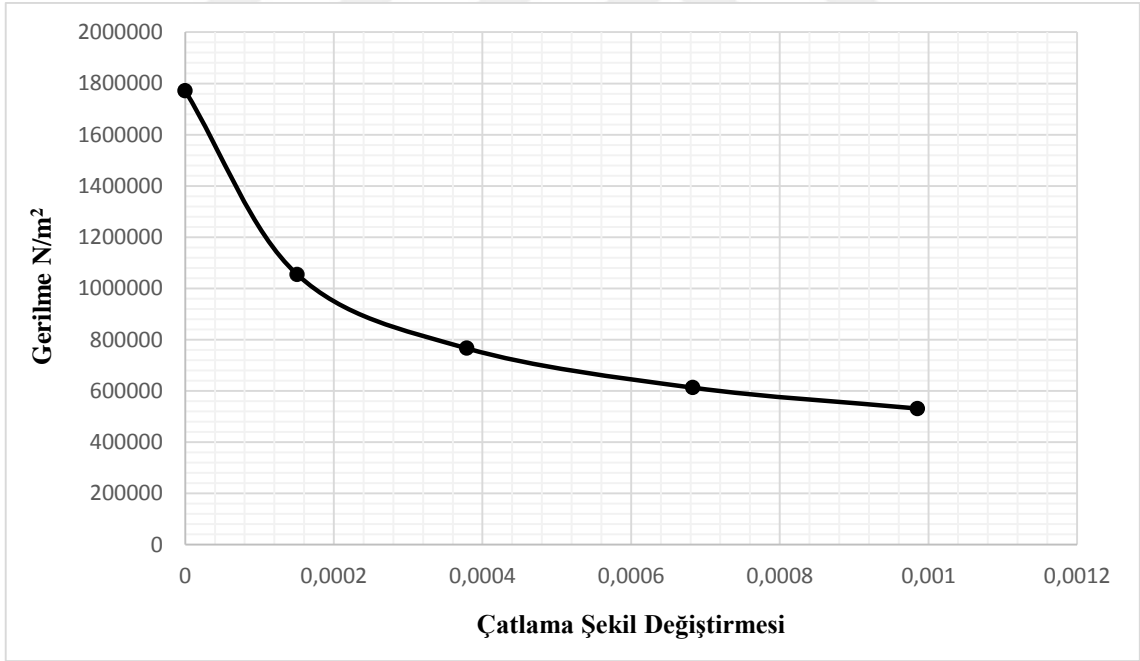
bölünerek f_{ctd} ile tariflenen betonun hesap çekme dayanımı değeri 1,771 olarak elde edilmiş ve hesaplarda bu değer kullanılmıştır. Bu değer (2.15) ile belirtilen ve f_{cr} ile sembolize edilen, betonun çekme etkisindeki çatlama gerilmesi değerinin kendisidir. Elde edilen tüm bu veriler kullanılarak (2.13)'te verilen bağıntı ile basınç etkisindeki betona ait gerilme-şekil değiştirme grafiği, (2.14) ve (2.15)'te verilen bağıntı ile ise çekme etkisindeki betona ait gerilme-şekil değiştirme grafiği çizilmiştir. Buradan yola çıkılarak da Concrete Damaged Plasticity modeline ait gerilmeye karşılık inelastik şekil değiştirme ve çatlama şekil değiştirmesi grafikleri bölüm 2.6.1.1'de detaylı bir şekilde ifade edildiği gibi çizilmiş ve ABAQUS/CAE programına bu grafiklerin çizilmesine ait sayısal değerler girilmiştir. Bu grafikler Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de gösterildiği gibi çizilmiştir. Bunun yanında bölüm 2.6.1.2'de verilen malzemede hasarın tanımlanması ve bölüm 2.6.1.3'te verilen rijitlik iyileşmesi durumlarına ait elde edilen sayısal değerler de ABAQUS/CAE programına girilmiştir.

Ayrıca Eurocode 2'de C45 betonu için ϵ_{c1} ile ifade edilen maksimum gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme değeri 0,0024 ve ϵ_{cu1} ile belirtilen kopma anındaki şekil değiştirme değeri de 0,0035 olarak alınması önerilmiştir. Bunların yanında, basınç gerilmelerine maruz betonun pik gerilme değerinin %40'ı mertebesine kadar doğrusal davrandığı, bu andan sonra ise doğrusal olmayan bir davranış sergilediği belirtilmektedir.

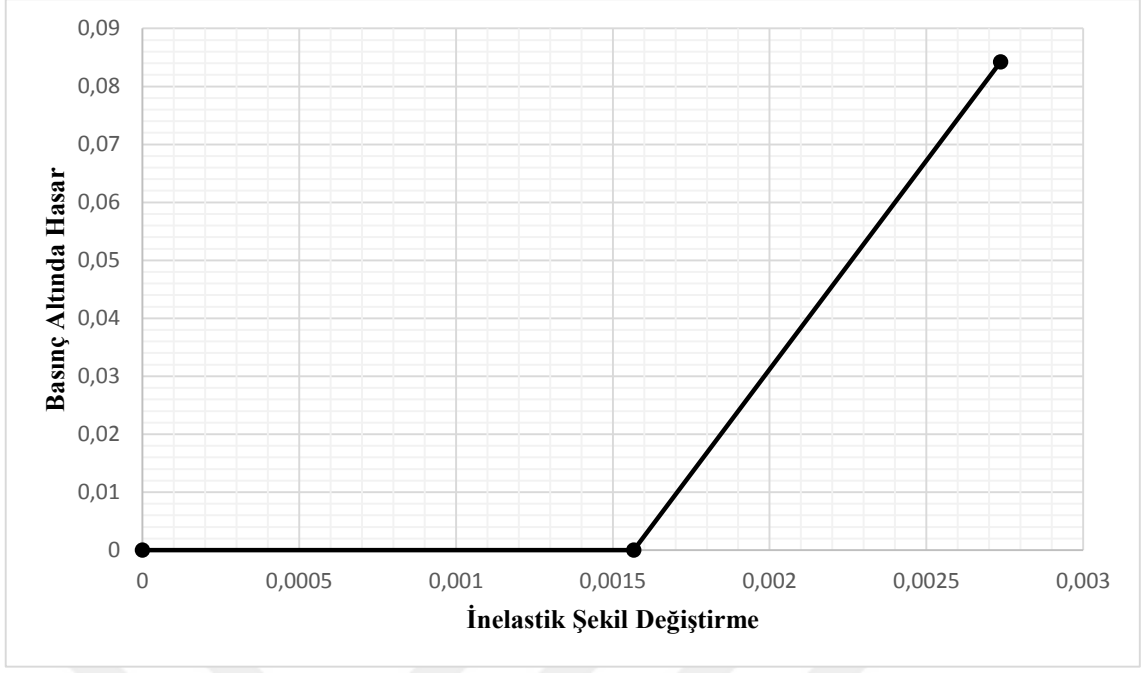
Öte yandan bu tez çalışması kapsamında, Şekil 3.3'te verilen basınç etkisindeki C45 betonuna ait hasar-inelastik şekil değiştirme grafiği ve Şekil 3.4'te verilen çekme etkisindeki C45 betonuna ait hasar-çatlama şekil değiştirmesi grafiği kullanılmıştır.



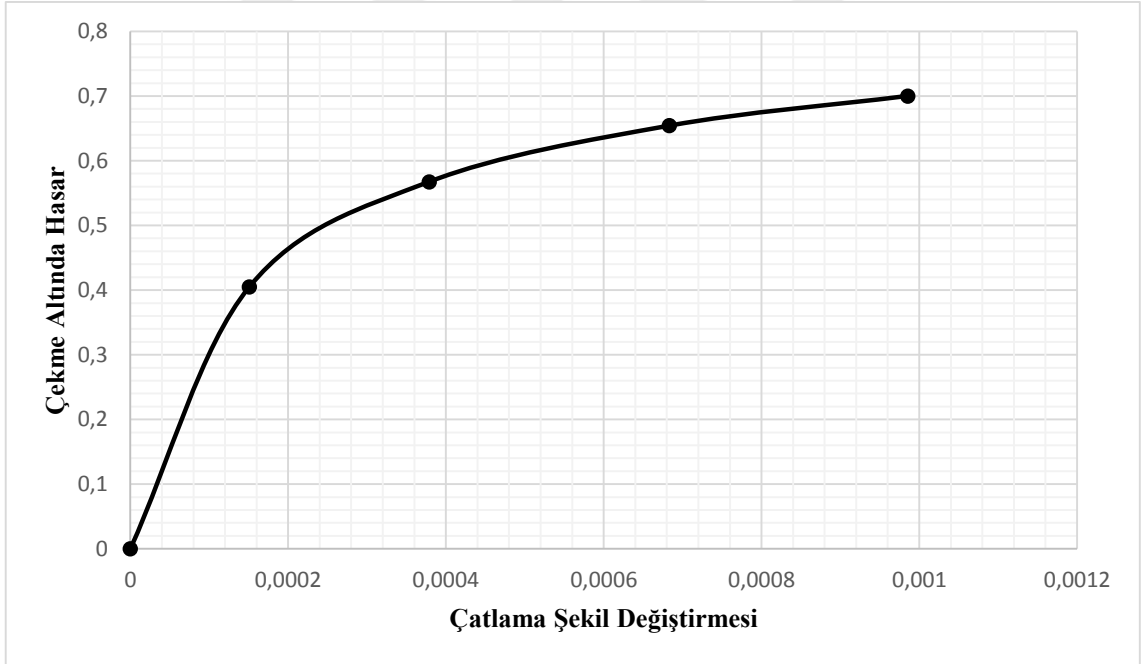
Şekil 3.1 Basınç etkisindeki C45 betonuna ait gerilme-inelastik şekil değıştirme



Şekil 3.2 Çekme etkisindeki C45 betonuna ait gerilme-çatlama şekil değıştirmesi



Şekil 3.3 Basınç etkisindeki C45 betonuna ait hasar-inelastik şekil değişirme



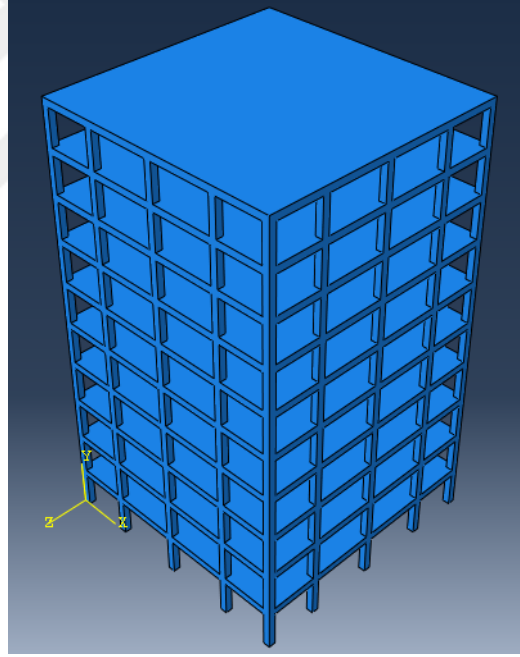
Şekil 3.4 Çekme etkisindeki C45 betonuna ait hasar-çatlama şekil değişirmesi

Farklı elemanlar kullanılarak rijitleştirilen yapıların deprem etkisindeki doğrusal olmayan davranışlarının incelendiği bu çalışmada Model 1, Model 2, Model 3 ve Model 4 olarak adlandırılan dört tip yapı modeli oluşturulmuştur. Bunlardan Model 1 geleneksel çerçeve sistemi, Model 2 köşegen eğik elemanlı sistemi, Model 3 X tipindeki eğik elemanlı sistemi ve Model 4 ise betonarme perde ile rijitleştirilen sistemi ifade etmektedir. Yapılan

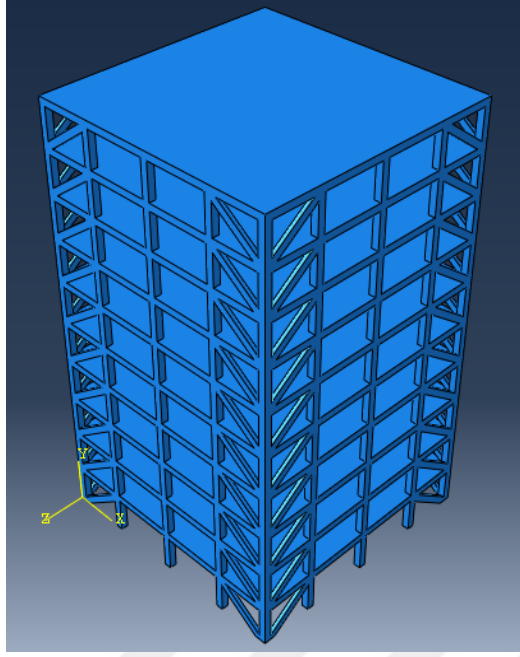
önboyutlandırma hesabına göre tüm yapılar için geçerli olmak üzere kenar kolonların enkesit boyutları 50 x 50 cm, orta kolonların enkesit boyutları ise 60 x 60 cm olarak belirlenmiştir. Ayrıca kirişler 25 x 50 cm enkesit boyutlarında ve döşeme plak kalınlığı ise 12 cm olarak seçilmiştir. Dört modelde bulunan tüm rijitleştirici elemanların enine boyutları kirişlerle aynı olacak şekilde yani 25 cm olarak seçilmiştir. Köşegen eğik elemanlı ve X tipi eğik elemanlı sistemlerin enkesitlerine ait yükseklik değeri de 50 cm olarak belirlenmiştir.

Ayrıca planda her iki yönde de simetriye sahip bu sistemde kenar akslar arası mesafe 4m, orta akslar arası mesafe ise 5m olarak dikkate alınmıştır. Bunun yanında kat yüksekliği 3m olup tüm yapılar 10 kat olarak modellenmiştir.

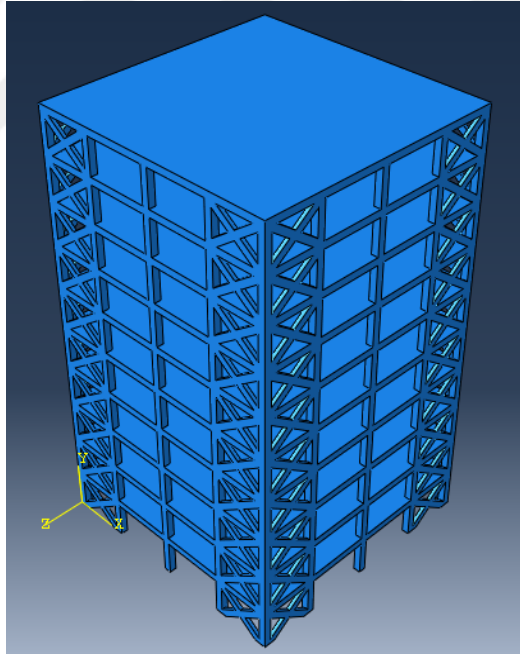
Bu çalışma kapsamında Şekil 3.5'teki geleneksel çerçeve sistem, Şekil 3.6'daki köşegen eğik elemanlı sistem, Şekil 3.7'deki X tipi eğik elemanlı sistem ve Şekil 3.8'deki betonarme perdeli sistem kullanılmıştır.



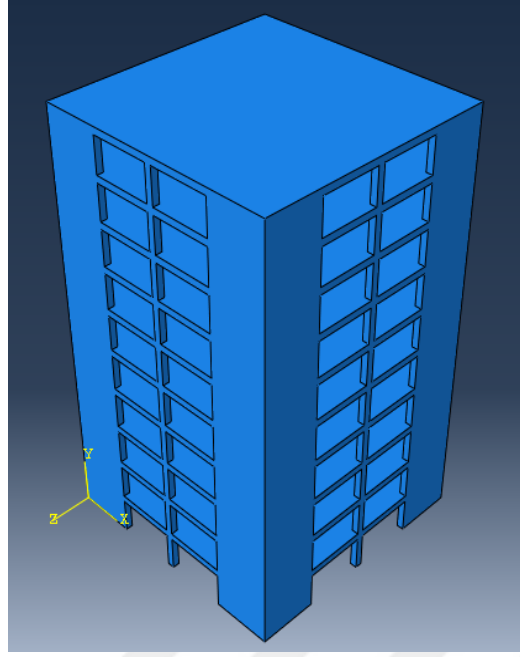
Şekil 3.5 Model 1 – Geleneksel Çerçeve Sistem



Şekil 3.6 Model 2 – Köşegen Eğik Elemanlı Sistem

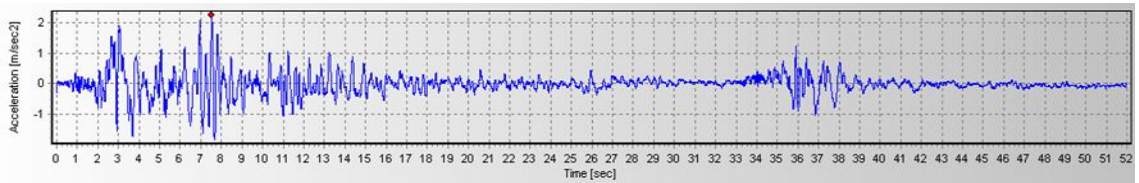


Şekil 3.7 Model 3 – X Tipi Eğik Elemanlı Sistem

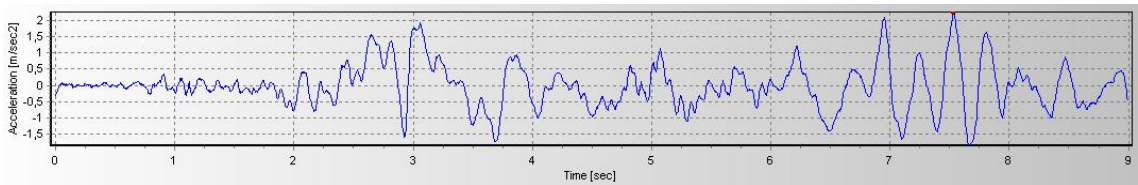


Şekil 3.8 Model 4 – Betonarme Perdeli Sistem

Bu sistemler zaman tanım alanında analiz yöntemiyle, 1999 yılında Kocaeli ilinin Gölcük ilçesinde meydana gelen depremin Kocaeli Merkez Meteoroloji İstasyon Müdürlüğü'ne ait doğu-batı doğrultusundaki ivme kaydı altında analiz edilmiştir (Şekil 3.9). 0,005'lik zaman adımıyla tutulan bu kayıta maksimum ivme değeri 7,53. saniyede oluştuğu için yaklaşık 52 saniyelik olan bu kaydın ilk 9 saniyesi dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kayıta maksimum ivme değeri yaklaşık $2,25 \text{ m/s}^2$ 'dir. Analizlere başlamadan önce yapılan zaman adımını belirleme işlemlerine geçmeden önce ise 0,005'lik bu ivme kaydı kullanılarak her iki zaman adımının arası beş parçaya bölünmek suretiyle 0,001'lik ivme kaydı oluşturulmuştur.



a)



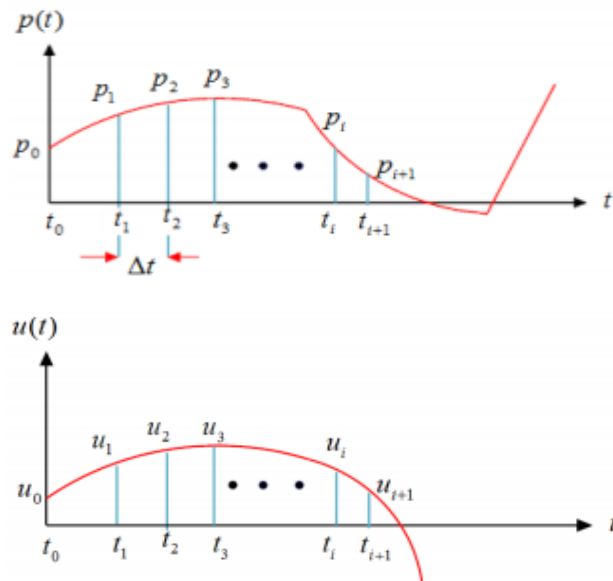
b)

Şekil 3.9 Kullanılan deprem ivme kaydının a) tamamı ve b) 9 sn'lik kısmı

Yukarıda bahsi geçen zaman tanım alanında analiz yönteminde (*time-history analysis*) adım adım çözüm yapılmak suretiyle yapıya ait genel davranış elde edilmeye çalışılır. Dinamik yüklere maruz kalan bir sistemin matematiksel modeli oluşturulduktan sonra yaygın şekilde bilinen hareket denklemi olan $m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = p(t)$ ikinci dereceden adi diferansiyel denklemi elde edilmektedir. Fakat bu denklemin analitik çözümü her zaman mümkün olmadığı için bu tür denklemlerin çözülebilmesi amacıyla yaklaşık çözümler veren sayısal integrasyon yöntemleri geliştirilmiştir [58].

Bu tez çalışması kapsamında, ABAQUS/CAE sonlu elamanlar programındaki Dynamic Implicit ile analizler gerçekleştirilmiştir. Burada doğrudan integrasyon yöntemi kullanılmaktadır. ABAQUS/CAE programında çözüm tekniği olarak “Full Newton” seçildiği takdirde Hilber-Hughes-Taylor zaman integrasyon operatörü kullanılmaktadır. Hilber-Hughes-Taylor, Newmark- β ‘nın geliştirilmiş bir versiyonudur [49]. Doğrusal olmayan dinamik denge denklemlerinin çözümünde ise Artımsal-İterasyon yönteminin kullanıldığı daha önce belirtilmişti. Bu konularda daha detaylı bilgi edinmek için Abaqus User’s Guide’den yararlanılabilir.

Zaman tanım alanında hesap yönteminde zaman adım aralığı Δt , doğrusal analizlerde daima sabit alınabilir. Fakat hızın değişimine bağlı olarak, doğrusal olmayan analizlerde bu adım aralığının kendi içerisinde alt adımlara bölünmesiyle hesap yapılması gerekebilir. Sayısal integrasyon yöntemlerinde Şekil 3.10’da görüldüğü gibi her adımdaki değişken parametreleri hesap edilerek, her p_i kuvvetine karşı $u_i, \dot{u}_i, \ddot{u}_i$ değerleri bulunur ve sistemin davranışı elde edilmiş olur [58].



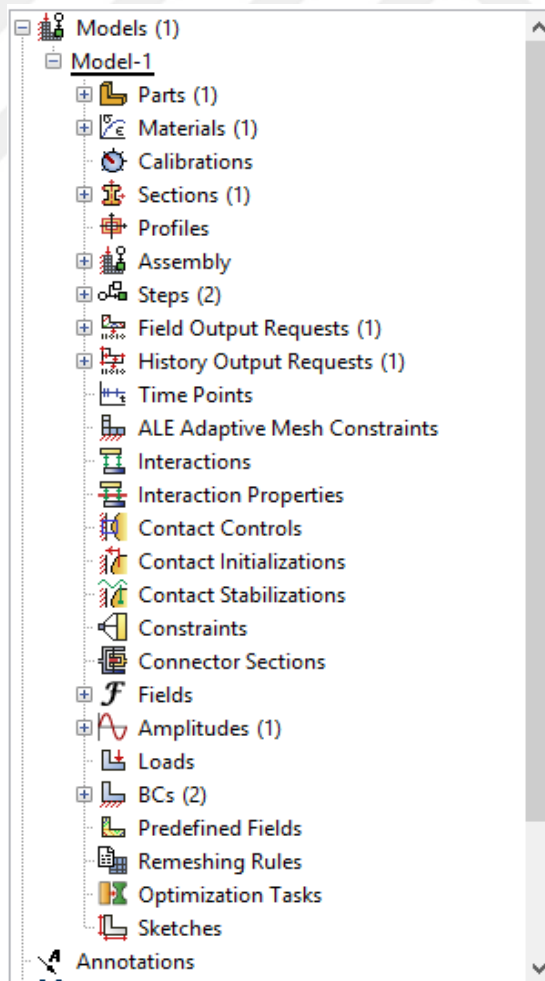
Şekil 3.10 Grafik olarak adım adım çözümlemenin gösterimi [58]

3.2 ABAQUS/CAE v6.14 Sonlu Elemanlar Programı ile Modellemelerin Yapılması

Bu bölümde ABAQUS/CAE v6.14 sonlu elemanlar programı ile bir yapının zaman tanım alanında hesap yöntemiyle deprem etkileri altındaki doğrusal olmayan analizinin nasıl yapılacağı adım adım olarak detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Programa ait menü ve alt menüler tanıtarak bu menüler sayesinde modellemenin nasıl yapılacağı ile ilgili bilgiler verilmiştir.

3.2.1 Model Ağacı

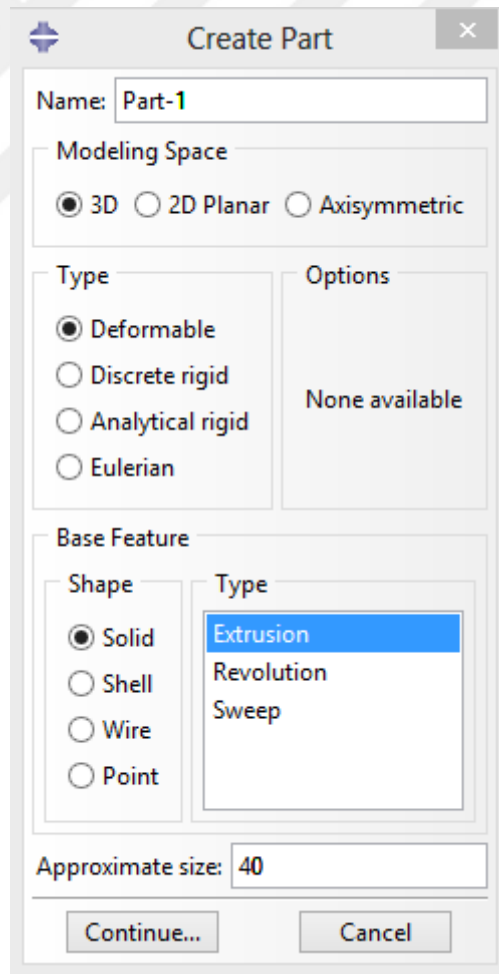
Model ağacı, verilerin girildiği ve modellemenin gerçekleştirildiği, Abaqus ana ekranının sol tarafında bulunan kısımdır (Şekil 3.11). Burada bulunan alt bölümler sayesinde modellerin çizilmesi, malzemelerin tanımlanması, kesitlerin atanması, analiz tipinin seçilmesi, yüklerin ve sınır şartlarının tanımlanması, şayet varsa elemanlar arası etkileşimlerin modellenmesi ve elemanların sonlu elemanlara ayrılması gibi işlemler yapılabilmektedir.




Şekil 3.11 Abaqus programına ait model ağacı

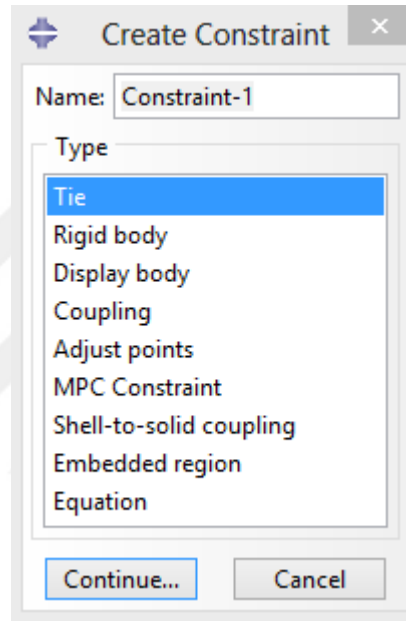
3.2.2 Kısım (*Parts*) Menüsü

Bu menüde elemanlara ait geometrilerin oluşturulması işlemleri gerçekleştirilir. Bu amaçla model ağacındaki “*Parts*” ikonuna çift tıkladığı zaman ekrana Şekil 3.12’deki pencere açılacaktır. Açılan pencereden, tüm elemanlar solid olarak modelleneceği için *Modeling Space* olarak **3D**, *Type* olarak **Deformable** ve *Base Feature* olarak da *Shape* kısmından **Solid**, *Type* kısmından ise **Extrusion** seçilir. En alttaki *Approximate size* kısmına da her bir karelağın kenarının 1 m olmasını sağlamak amacıyla **40** girilebilir. Bu arada Abaqus programında birim kavramı geçerli değildir. Birim kontrolü kullanıcı tarafından yapılmaktadır. Bu çalışmada birim olarak kuvvetler için Newton, uzunluklar için metre ve zaman için de saniye kullanılmıştır. *Approximate size* kısmına ilgili değer girildikten sonra *Continue* ikonuna tıklanır ve küçük karelağlardan ibaret olan açılan sayfada, sayfanın solunda açılan menüler vasıtasıyla elemanların çizim işlemleri yapılabilir.



Şekil 3.12 Model bilgi girişinin yapılışı

Yukarıda anlatılan şekliyle sadece bir yapı elemanı, örneğin bir kolon veya bir kiriş, modellenebilmektedir. Yapıya ait tüm elemanların modellenebilmesi için ya bu işlemlerin her bir eleman için tekrarlanması ya da benzer özellikteki elemanların gruplandırılıp kopyalanması gerekmektedir. İkinci alternatifte ait durumun bile büyük bir yapının modellenmesi sürecinde ciddi bir zahmet getireceği aşıkardır. Ardından bu elemanlar modellendikten sonra, sistemdeki her bir elemanın kendisiyle etkileşim halinde bulunan elemanlarla temas özelliklerinin tanımlanması gerekir. Bu işlem model ağacındaki ( Constraints) ikonuna tıklanarak açılan pencerede Şekil 3.13'te gösterildiği gibi **Tie Constraint** seçeneğinin tıklanıp ilgili kısımların doldurulması ile gerçekleştirilir.

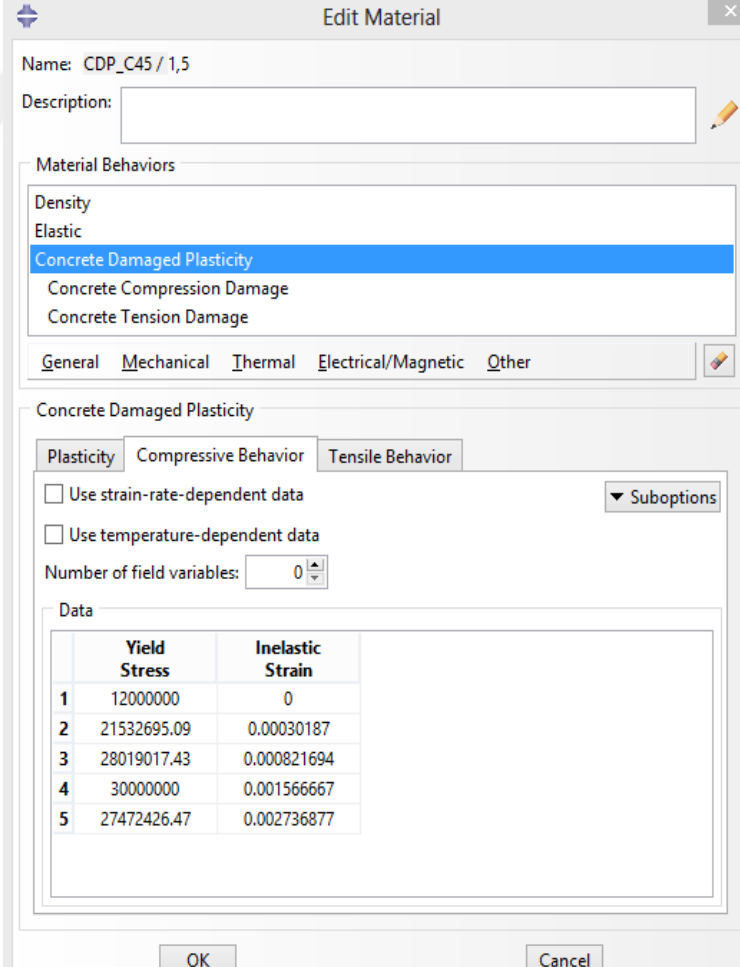


Şekil 3.13 Elemanların Tie Constraint ile birbirine bağlanması

Bu tez çalışmasında, yapı modellendiği için ve bu yapı da yüzlerce elemandan oluştuğu için her bir elemanın modellenmesi ve birbirleriyle olan etkileşimlerinin tanımlanması gibi ciddi bir zorlukla karşılaşmaktadır. Bunu aşmak için bu çalışmada, tüm yapı AutoCAD 2016 programı ile programın “merge” özelliği sayesinde tek bir part halinde modellenmiş ve daha sonra bu model Abaqus programına “import” edilmiştir. Bu *import* işlemi *parts* ikonuna sağ tıklandıktan sonra, import denilerek gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu işlem sayesinde hem elemanların tek tek modellenmesi zorunluluğu hem de tüm bu elemanların birbirleriyle temas özelliklerinin tanımlanması zorunluluğu ortadan kalkmıştır.

3.2.3 Malzeme (*Materials*) Menüsü

Bu menüde malzemelere ait özellikler tanımlanabilmektedir. Bu menüye erişebilmek için model ağacındaki “*materials*” ikonuna çift tıklanır ve ekrana Şekil 3.14’teki pencere gelir. Açılan pencerede *name* kısmına malzemenin adı yazılır. Ardından **General >> Density** kısmından malzemeye ait özkütle değeri girilir. Daha sonra **Mechanical >> Elasticity >> Elastic** kısmından ise malzemeye ait elastisite modülü ve poisson oranına ait veriler girilir. Bu işlemlerden sonra ise daha önce bahsi geçen Concrete Damaged Plasticity modeline ait veriler girilir. Bunun için **Mechanical >> Plasticity >> Concrete Damaged Plasticity** kısmından bu malzeme modeline ait “*plasticity, compressive behavior ve tensile behavior*” kısımlarına ait veriler girilir. Ayrıca *Concrete Damaged Plasticity* modülünde iken *Suboptions* bölümünden “*compression damage ve tensile damage*” ile ilgili kısımlar doldurularak malzemede hasar tanımlanması işlemleri de gerçekleştirilmiş olur. Son olarak *OK* ikonuna tıklanmasıyla malzemenin tanımlanmasına ait işlemler tamamlanmış olur.



Name: CDP_C45 / 1,5

Description:

Material Behaviors

- Density
- Elastic
- Concrete Damaged Plasticity**
- Concrete Compression Damage
- Concrete Tension Damage

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Concrete Damaged Plasticity

Plasticity Compressive Behavior Tensile Behavior

Use strain-rate-dependent data

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0


Data

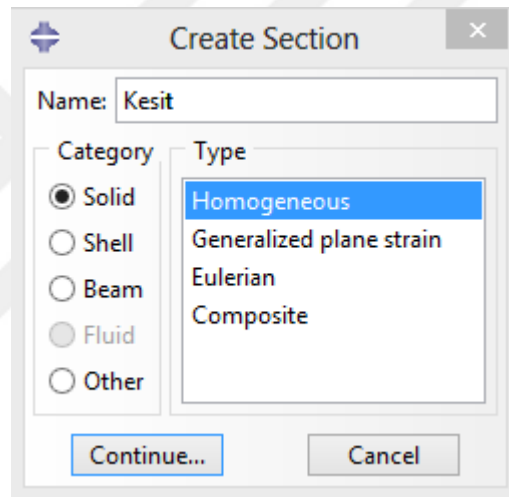
	Yield Stress	Inelastic Strain
1	12000000	0
2	21532695.09	0.00030187
3	28019017.43	0.000821694
4	30000000	0.001566667
5	27472426.47	0.002736877

OK Cancel

Şekil 3.14 Malzemenin tanımlanması


3.2.4 Kesitler (Sections) Menüsü

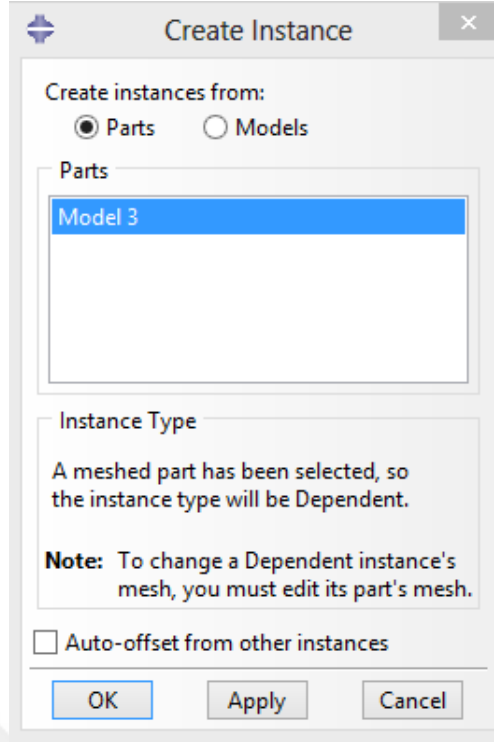
Bu menüde elemanlara kesit atanması işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla model ağacındaki “**Sections**” ikonuna çift tıklanır ve açılan pencerede *name* kısmına kesitin adı yazılır (Şekil 3.15). Yine bu pencerede *Category* kısmından **Solid**, *Type* kısmından ise **Homogeneous** seçilerek *Continue* denir. Daha sonra açılan pencerede ise kesite atanması istenen malzeme seçilerek *OK* ikonuna tıklanır. Kesit tanımlanması işlemi tamamlandıktan sonra kesit atanması işlemine geçilir. Bunun için *Sections* menüsünde iken sayfanın solunda bulunan *Assign Section* () ikonuna tıklanarak sayfanın aşağı kısmında çıkan “*Select the regions to be assigned a section*” bilgisi uyarınca ana ekrandaki modelin tamamı seçilir ve *Done* daha sonra da *OK* ikonlarına tıklanarak kesit atanması işlemleri de tamamlanmış olur.



Şekil 3.15 Elemanlara kesit atanması işlemi

3.2.5 Birleştirme (Assembly) Menüsü

Bu menüde, kesitleri atanmış modellerin birleştirilmeleri sağlanarak tek bir platformda yer almaları amaçlanmaktadır. Bu tez çalışmasında, ele alınan yapı tek part olarak modellendiği için bu tek parçanın assembly aşaması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla model ağacından “**Assembly**” alt menüsüne ait ikona çift tıklanarak sol tarafta açılan menüden *Create Instance* () seçilir. Ardından, açılan pencerede Şekil 3.16’da olduğu gibi birleştirilmesi istenen parça ya da parçalar seçilir ve *OK* ikonuna tıklanarak bu menüye ait yapılması gereken işlemler tamamlanmış olur.

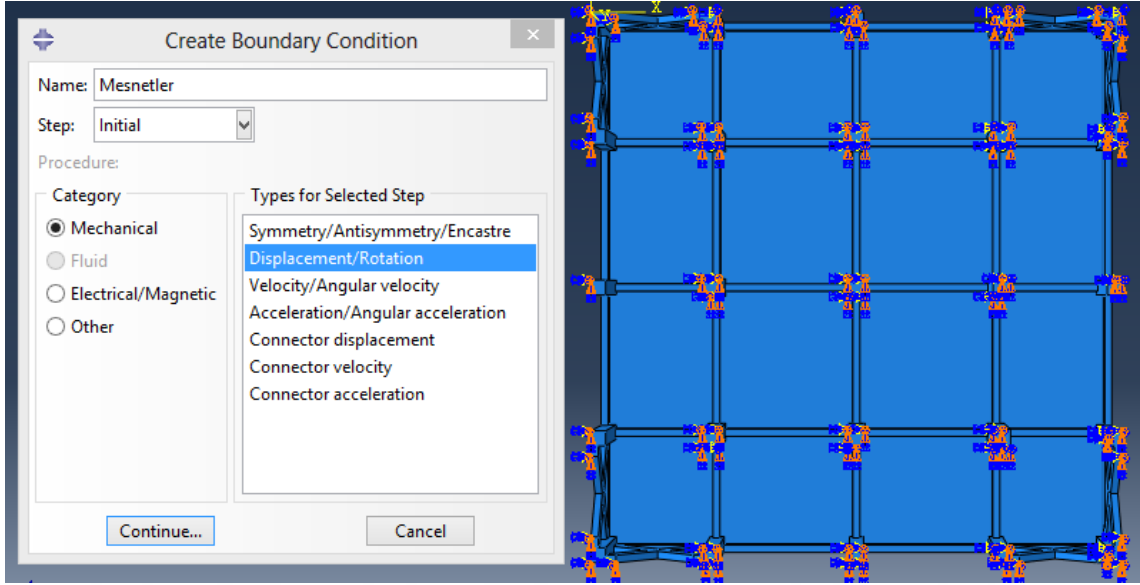


Şekil 3.16 Assembly menüsünün kullanımı

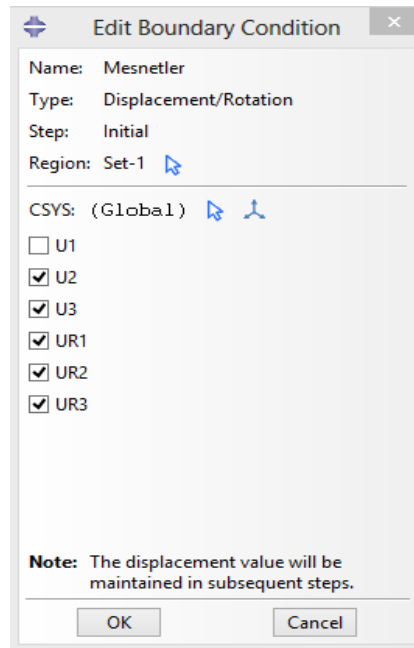
3.2.6 Adımlar (*Steps*) Menüsü

Oldukça kapsamlı olan “*Steps*” menüsü bünyesinde, ayrı alt menüler olarak da tanımlanabilen *Boundary Conditions*, *Loads*, *Field Output* menüleri de bulunmaktadır. Steps menüsünde esas itibarı ile statik analiz, dinamik analiz, burkulma analizi, modal analiz, geostatik analiz gibi analiz çeşitlerinden yapılması istenen analiz ya da analizler seçilir. Menünün adından da anlaşılacağı gibi analiz süreci boyunca hangi adımda hangi analizin yapılacağına, hangi adımda hangi sınır şartlarının ve yük tiplerinin geçerli olacağına v.b. bu menü sayesinde karar verilebilmektedir. Bu menünün bünyesinde *initial* isiminde bir alt menü varsayılan olarak daima yer almaktadır. Örneğin bu *initial* alt menüsü sayesinde analizin en başından itibaren geçerli olması istenen bir sınır şartı veya yükleme çeşidi varsa bu kriterler bu alt menüde tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada da *initial* alt menüsünde deprem analizi yapılacak yapıya ait sınır şartları ve ivme atanması işlemi tanımlanmıştır. Buradan hareketle, öncelikle Şekil 3.17’de görüldüğü gibi *boundary conditions* alt menüsünde yapıya ait sınır şartları, yani mesnet bağları, atanması işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla *initial* menüsü bünyesindeki *boundary conditions* menüsüne çift tıklanarak açılan pencerede *Step* kısmından **Initial**, *Category* kısmından **Mechanical** ve *Types for Selected Step* kısmından da **Displacement/Rotation** seçildikten sonra Şekil 3.17’de görüldüğü gibi yapının zemin kat kolonlarının alt


kesitlerine mesnet atanması işlemi gerçekleştirilir. Deprem ivmesi x-x yönünde atanacağı için burada, mesnetler atanırken x yönündeki yerdeğiştirme (U1) hariç diğer tüm bağların tutulu olmasına dikkat edilmelidir. Çünkü Abaqus programında ivme atanırken, ivmenin atandığı doğrultudaki yerdeğiştirmenin serbest bırakılması istenmektedir. Mesnetler atanırken zemin kat kolonlarının alt kesitleri seçildikten sonra *Done* ikonuna tıklanır. Ardından Şekil 3.18'deki gibi U2, U3, UR1, UR2, UR3 seçenekleri işaretlendikten sonra *OK* ikonu tıklanarak mesnet şartlarının tanımlanması işlemleri tamamlanmış olur.

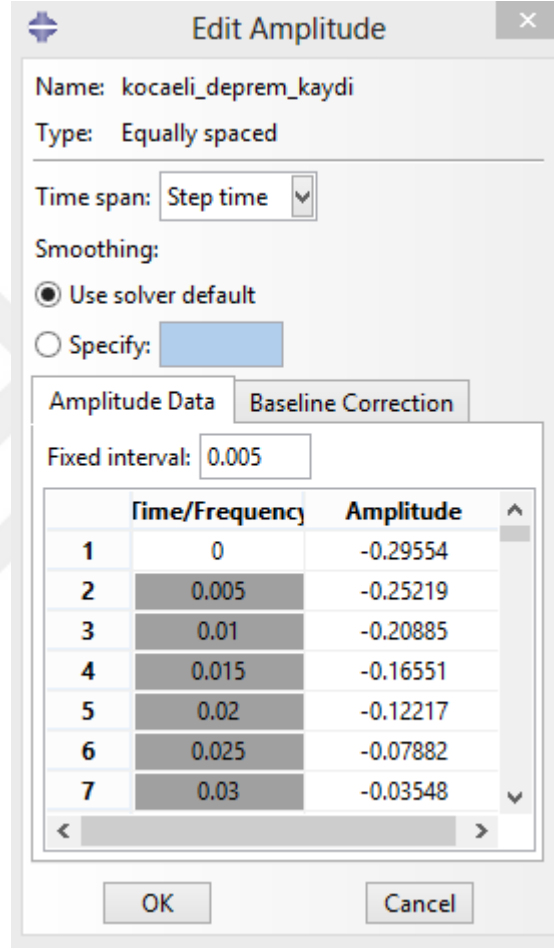


Şekil 3.17 Mesnet şartlarının tanımlanması



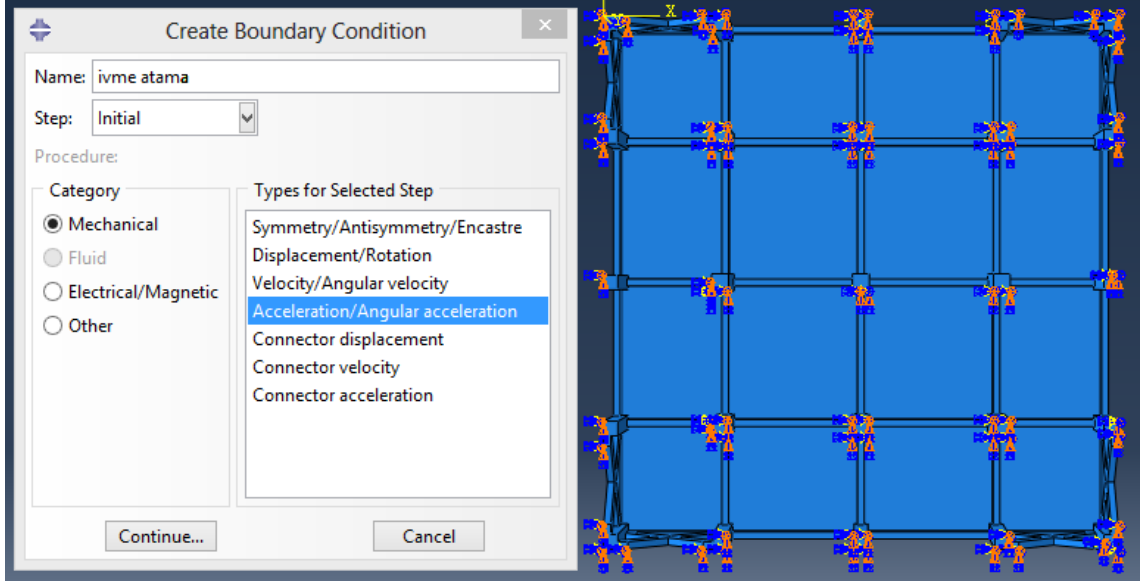
Şekil 3.18 Mesnet şartlarının seçilmesi

Sınır şartı olarak deprem ivmesi atanmadan önce model ağacındaki **Amplitudes** alt menüsü ( **Amplitudes**) sayesinde 1999 Kocaeli Depremine ait ivme kaydı atanması işlemi gerçekleştirilmelidir. Bu amaçla **Amplitudes** ikonuna çift tıklanır ve açılan pencerede **Name** kısmından atanacak kaydın ismi girilir ve **Type** kısmından ise **Equally spaced** seçilir ve **Continue** denir. Daha sonra Şekil 3.19’da görüldüğü gibi, açılan pencereden **Fixed interval** alanına zaman adımı değeri olan 0,005 girilir. **Amplitude** sütununa da ilgili dosyadan ivme değerleri kopyalandıktan sonra bu değerler yapıştırılır.



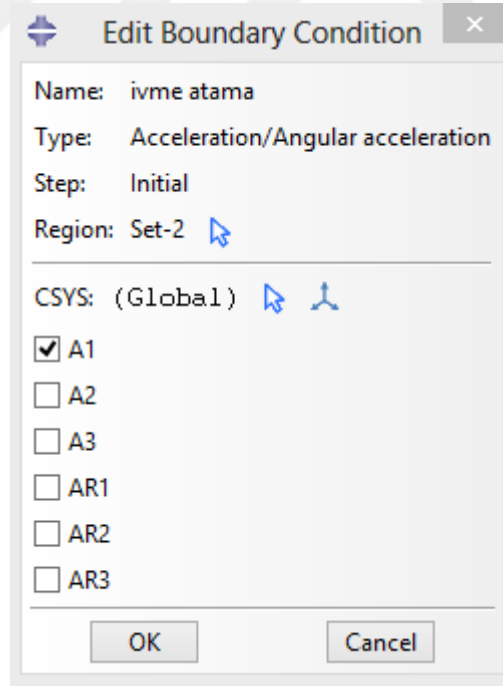
Şekil 3.19 Deprem ivmesine ait kaydın programa girilmesi

İvme kaydı programa tanımlandıktan sonra ivme atanması işlemine geçilir. Bu işlem mesnet şartlarının tanımlanmasına oldukça benzerdir. Yani **initial** menüsü bünyesindeki **boundary conditions** menüsüne çift tıklanarak açılan pencerede **Step** kısmından **Initial**, **Category** kısmından **Mechanical** ve **Types for Selected Step** kısmından da **Acceleration/Angular acceleration** seçildikten sonra Şekil 3.20’de görüldüğü gibi yapının zemin kat kolonlarının alt kesitlerine ivme atanması işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 3.20 Zemin kat kolonlarının alt kesitlerine deprem ivmesinin tanımlanması

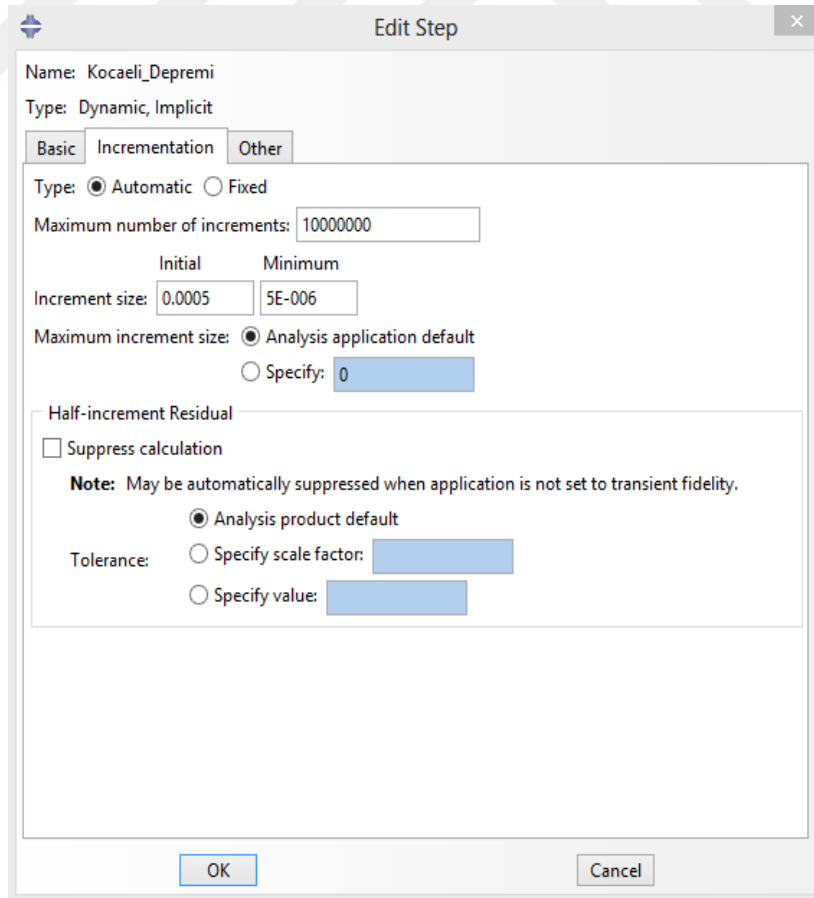
İvme atanırken zemin kat kolonlarının alt kesitleri seçildikten sonra *Done* ikonuna tıklanır. Ardından Şekil 3.21’deki gibi A1 seçeneği işaretlendikten sonra *OK* ikonu tıklanarak sınır şartı olarak ivmenin tanımlanması işlemleri tamamlanmış olur. Buradaki A1, deprem ivmesinin x-x doğrultusunda tanımlandığı anlamına gelmektedir.



Şekil 3.21 İvmenin doğrultusunun seçilmesi

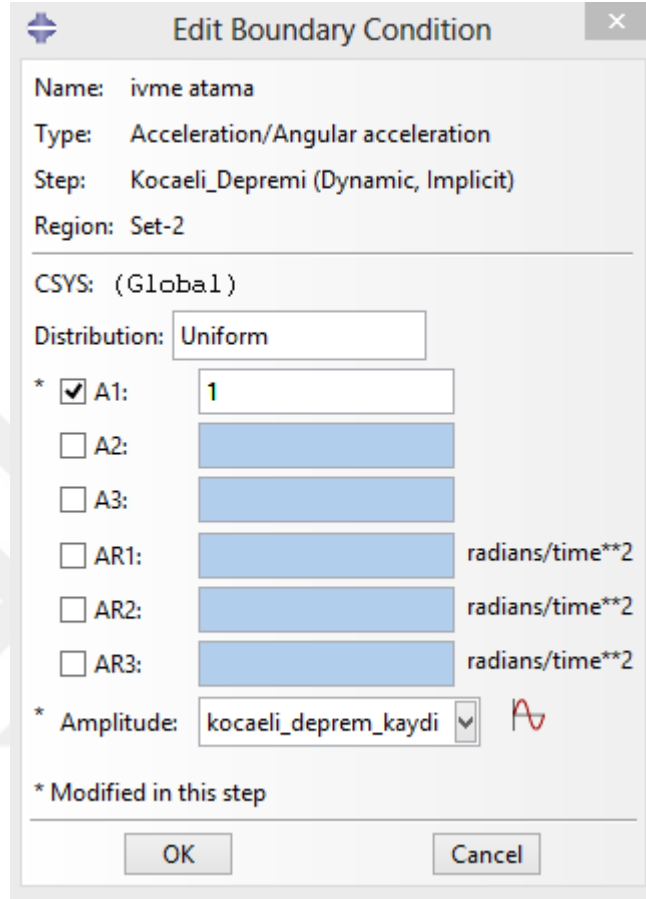
Hem mesnetlerin hem de deprem ivmesinin atanmasıyla modele ait sınır şartlarının tanımlanması işlemleri tamamlanmış olur.

Daha sonra, yapılacak olan analiz tipinin seçilmesi amacıyla *Steps* menüsüne çift tıklanır. Açılan pencereden, deprem analizi yapmaya uygun analiz tipi olan *Dynamic, Implicit* seçilir, *Name* kısmına ise “Kocaeli_Depremi” yazılır ve *Continue* denir. Bu işlem yapıldıktan sonra ekranda Şekil 3.22’deki gibi bir pencere açılacaktır. Açılan bu penceredeki *Basic* sekmesinde bulunan *Time period* kısmına deprem analizinin süresi olan **9** saniyeye ait değer girilir. Yine bu sekmede “*Nlgeom*” olarak yazılan ve nonlinear geometrik şartların gözönünde bulundurulup bulundurulmamasını ifade eden bir özellik vardır. Bu çalışma kapsamında nonlinear geometri durumu dikkate alınmayacağı için burada **off** seçeneği seçilir. Daha sonra yine bu penceredeki *Incrementation* sekmesinde bulunan “*Maximum number of increments*” kısmına **10000000**, “*Increment size*” olarak “*Initial*” kısmına **0,0005** ve “*Minimum*” kısmına da **0,000005** değerleri girilebilir. Ayrıca bu sekmede bulunan *Type* kısmından da **Automatic** seçeneği seçilir. Bunun anlamı, her bir zaman adımı için yapılan yükleme anlamına gelen “load step” ‘lerin dışında kalan, bu zaman adımlarının arasındaki bir ana tekabül eden yükleme anlamına gelen “substep” ‘lere ait aralıkların otomatik olarak belirlenmesidir. Bu penceredeki işlemler tamamlandıktan sonra *OK* ikonuna tıklanarak bu adım tamamlanmış olur.



Şekil 3.22 Dynamic, Implicit analiz tipinin tanımlanması

Ardından “Kocaeli_Depremi” ikonu altında bulunan *boundary conditions* alt menüsündeki “ivme atama” kısmına tıklanır. Daha sonra açılan pencerede, Şekil 3.23’teki gibi A1 kısmına 1 değeri girilir ve alt taraftaki *Amplitude* kısmından ise daha önce tanımlanan ivme kaydı seçilir ve *OK* ikonuna tıklanır.



Şekil 3.23 Deprem ivmesinin atanması

3.2.7 İstenilen Çıktılar (*Field Output Requests*) Menüsü

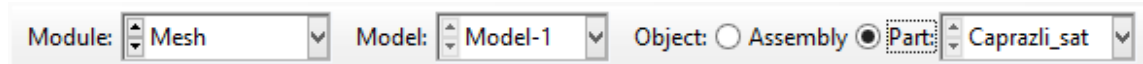
Bu menü sayesinde analiz sonuçlarından hangilerinin çözüm dosyasına (*ODB dosyası*) yazdırılması isteniyorsa onların seçilmesi işlemleri yapılır. Bu arada Abaqus programının, yaptığı tüm analizlerdeki yüklemeleri zamana bağlı olarak gerçekleştirdiğini belirtmek gerekir. Örneğin basit bir kirişin statik analizi düşünülecek olursa, basit kirişin üzerine uygulanan yük ilk anda sıfır iken kullanıcı tarafından girilen zamanın sonunda da bu değer maksimuma ulaşır. Yani kullanıcı tarafından belirlenen zamanın sonunda bu yükün tamamı uygulanmış olur. Bu yükleme gerçekleşirken ara adımların tanımlanması ise “*Field Output Requests*” menüsündeki *Frequency* kısmından yapılır.

Buradan hareketle model ağacındaki *Field Output Requests* alt menüsüne çift tıklanmasıyla ekranda Şekil 3.24'teki pencere açılacaktır. Açılan bu penceredeki *Frequency* kısmından **Every x units of time** seçeneği seçilir. Bunun seçilmesiyle, yan tarafta açılan kutucuğa depremin zaman adımı olan 0,005 veya 0,001 değeri girilir. Ayrıca *Output Variables* kısmından çözüm dosyasına yazdırılması istenen analiz sonuçları, örneğin gerilmeler, şekil değiştirmeler, yerdeğiştirmeler, mesnet tepkileri, hasar değerleri v.b., seçilir ve *OK* ikonuna tıklanır. Bu menüden herhangi bir seçim yapılmaması durumunda program, varsayılan olarak belirlediği zaman adımını kullanarak varsayılan olarak belirlediği sonuçları çözüm dosyasına yazdırmaktadır.



Şekil 3.24 Yazdırılması istenen analiz sonuçlarının seçilmesi

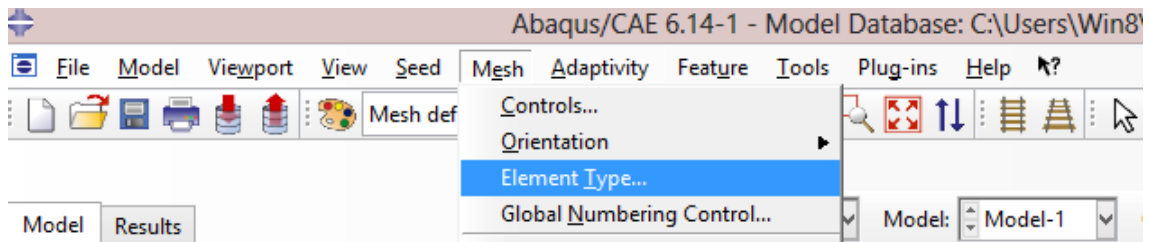
3.2.8 Ağ (*Mesh*) Menüsü

Bu menü sayesinde *Parts* menüsüyle geometrisi oluşturulan ve *Sections* menüsüyle de kesit atanması işlemleri tamamlanmış ve sonlu eleman analizi yapılacak olan modelin sonlu sayıdaki elemana bölünmesi işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla model ağacındaki *Parts* menüsü altında bulunan **Mesh** alt menüsüne çift tıklanarak bu menüye ait özelliklerin ekrana gelmesi sağlanır. Buradan ilk olarak Şekil 3.25'te görüldüğü gibi sayfanın üst tarafında bulunan imleçten *Part* seçeneği seçilir.



Şekil 3.25 Mesh işlemi yapılacak olan modelin seçilmesi

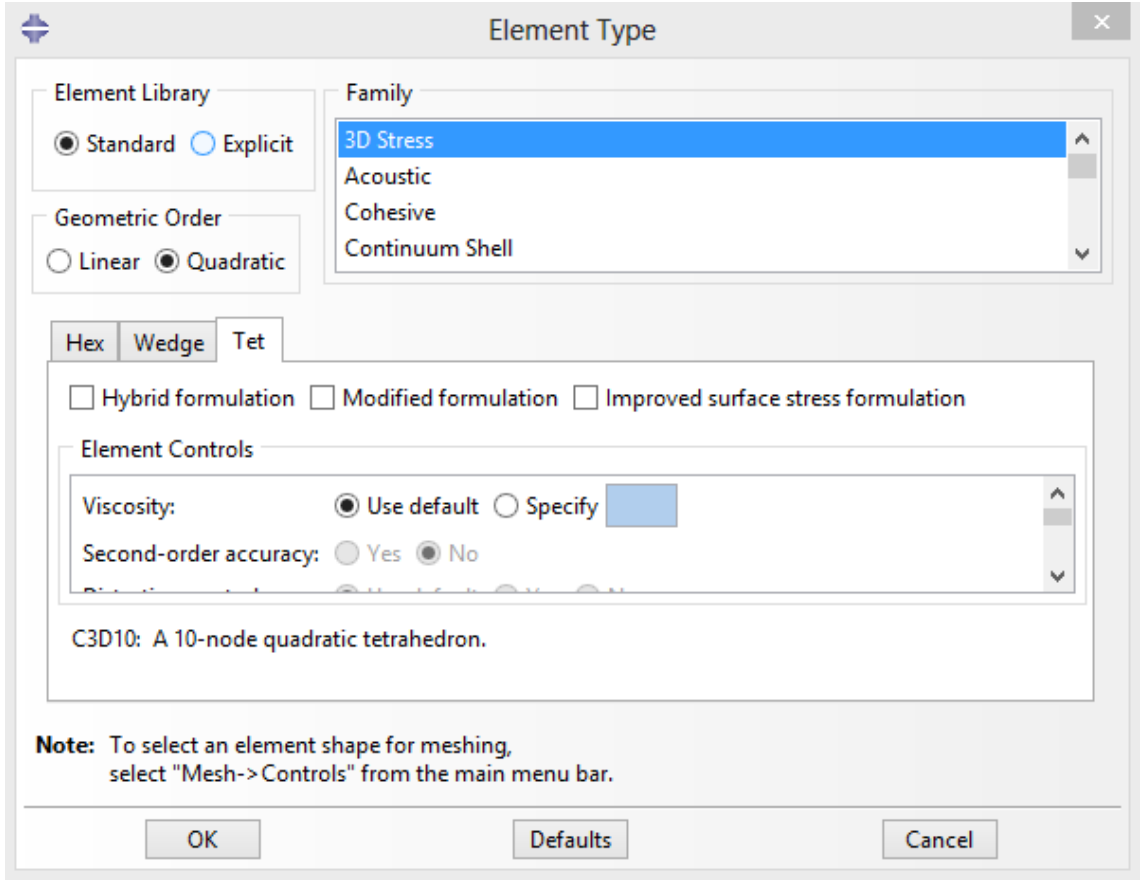
Ardından sol taraftaki *Assign Mesh Controls* ikonuna () tıklanır ve ana ekranda bulunan modelin tamamı seçilerek sayfanın altında bulunan *Done* ikonuna tıklanır. Açılan pencerede *Element Shape* olarak **Tet** seçilir ve *OK* denir. Bu sayede sonlu elemanların şeklinin tetra elemanlardan oluşacağı belirlenmiş olur. Daha sonra yine sayfanın sol tarafındaki menüden *Seed Part* ikonuna () tıklanır ve açılan pencerenin *Sizing Controls* bölümünden *Approximate global size* kısmına herbir sonlu elemanın kenarlarının yaklaşık boyutunun ne olması isteniyorsa o değer girilir ve *OK* denir. Bu çalışmada buraya ilk olarak **1** değeri girilmiş daha sonra sistemlerin sonlu eleman sayıları belirlenirken bu değer yeterli yakınsaklık sağlanıncaya kadar küçültülmüştür. Bu işlem tamamlandıktan sonra ise Şekil 3.26'da görüldüğü gibi sayfanın üst tarafındaki menüden *Mesh >> Element Type* kısmına tıklanarak ana sayfadaki modelin seçilip *Done* ikonuna tıklanmasıyla Şekil 3.27'deki pencere ekrana gelecektir.



Şekil 3.26 Element Type seçilmesi

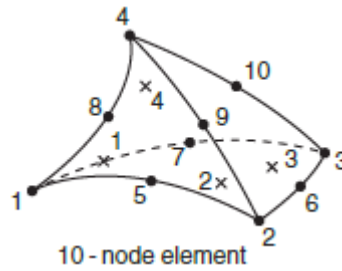
Açılan bu pencereden de eleman özellikleri seçilir. Bunun için Şekil 3.27'deki pencerede *Element Library* olarak **Standart**, *Geometric Order* olarak **Quadratic**, *Family* olarak **3D Stress** ve tetra eleman tipi olarak da **C3D10** seçilerek sırasıyla *OK* ve *Done* ikonlarına tıklanır. Daha sonra üstteki menüden *Mesh >> Part* kısmına tıklanır ve alt taraftaki

imleçten *Yes* butonuna tıklanarak modelin sonlu elemanlara ayrılması işlemi tamamlanmış olur.



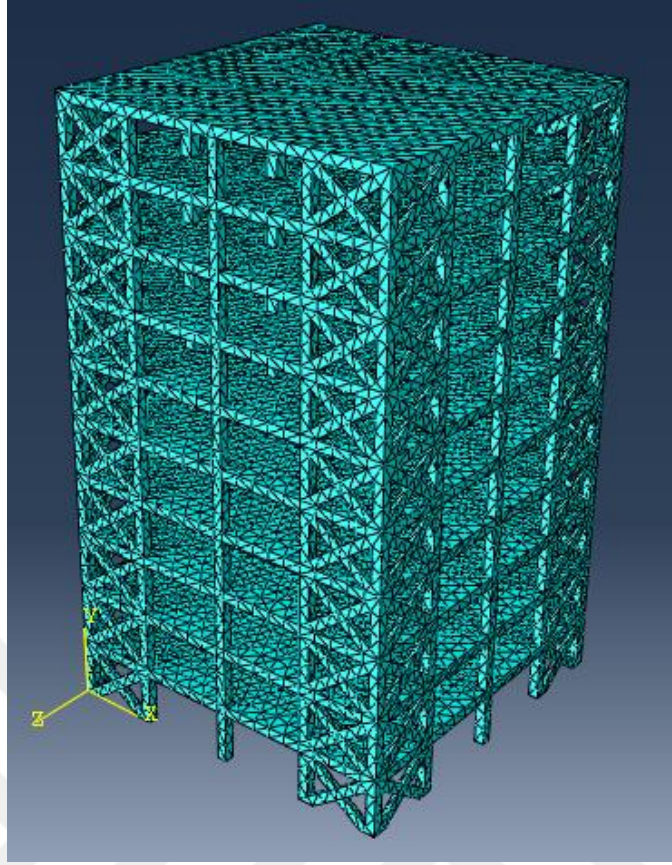
Şekil 3.27 Sonlu elemana ait özelliklerin seçilmesi

Şekil 3.28’de bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde kullanılan sonlu eleman tipi görülmektedir.



Şekil 3.28 Analizlerde kullanılan 10 düğüm noktalı C3D10 tipi eleman [49]

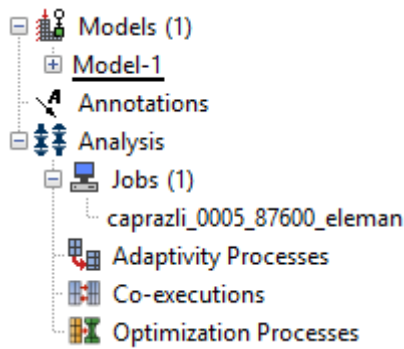
Şekil 3.29’da, hazırlanan bir modelin sonlu elemanlara ayrılmış haline ait örnek gösterilmektedir.



Şekil 3.29 Modelin sonlu elemanlara ayrılmış hali

3.2.9 Analiz (Analysis) Menüsü

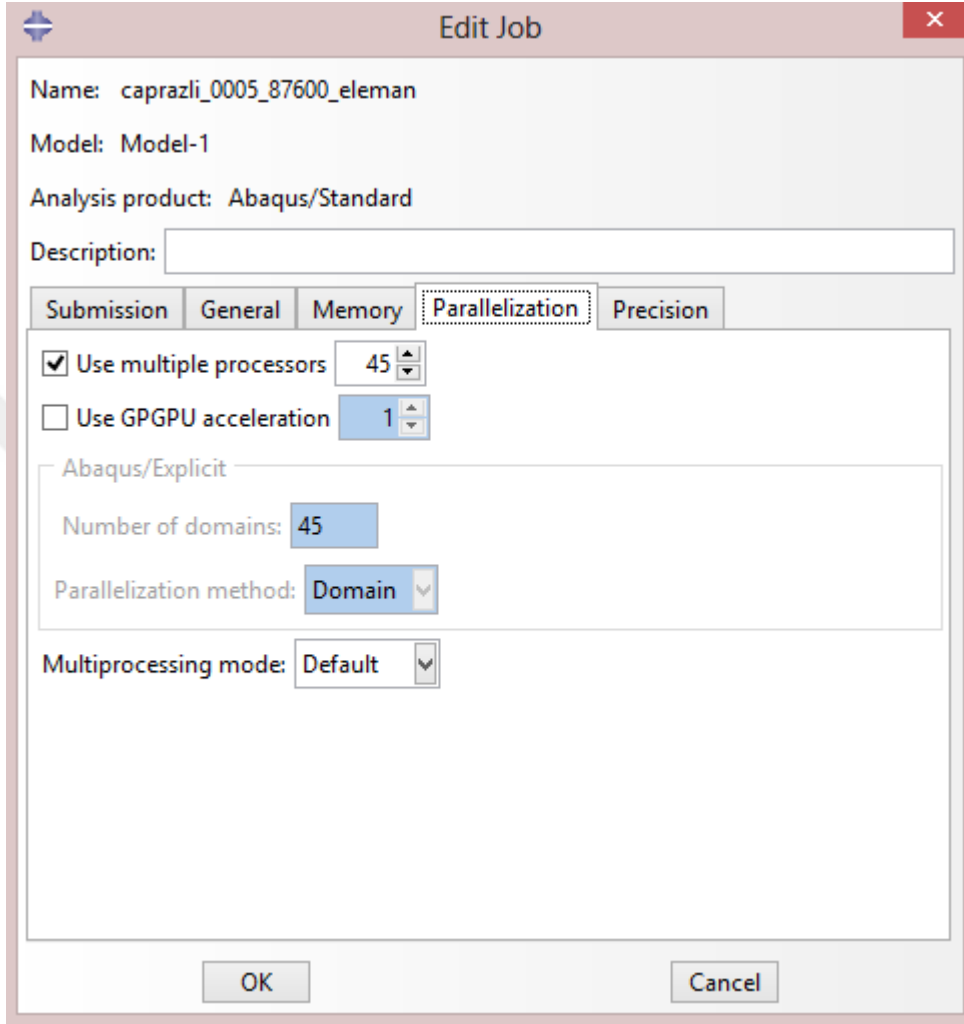
Model ağacının altındaki kısımda bulunan menüdür (Şekil 3.30). Bu menüdeki Jobs alt menüsünden analizlerin yapılması ile ilgili işlemler gerçekleştirilir.




Şekil 3.30 Analysis menüsünün görünümü

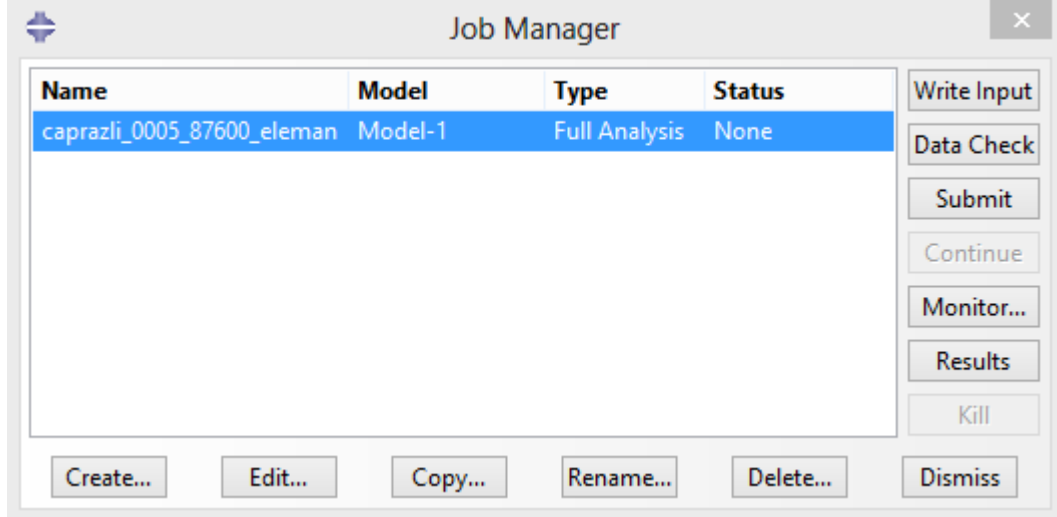
Bu menüdeki **Jobs** alt menüsüne çift tıklanır ve açılan penceredeki *Name* kısmına yapılacak analizin adı yazılır. Daha sonra *Source* kısmından analizi yapılacak olan model seçilerek *Continue* denir. Ardından, açılan pencerede *Memory* sekmesinden RAM üzerinde kullanılması istenen alan belirlenebilmektedir. Yine aynı pencerede,

Parallelization sekmesi altında bulunan *Use multiple processors* bölümüne tıklanarak buradan mevcut bilgisayarın kapasitesine göre kullanılması istenen çekirdek sayısı girilir ve *OK* denir (Şekil 3.31). Bu penceredeki diğer özellikler varsayılan konumunda bırakılabilir.



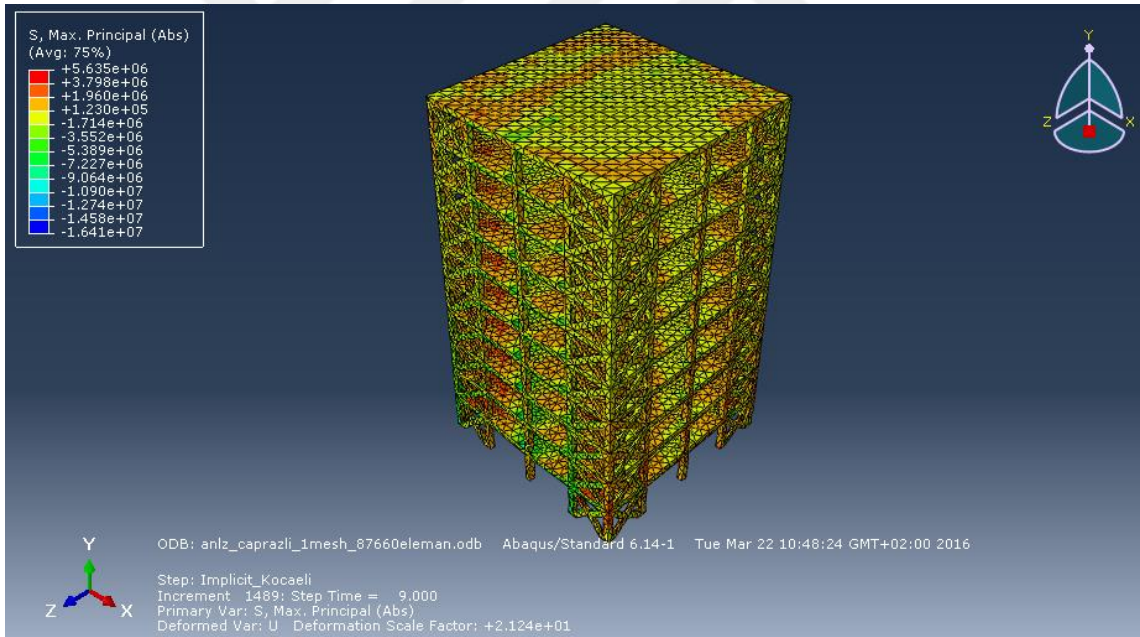
Şekil 3.31 Analizin oluşturulması

Daha sonra Jobs alt menüsünde iken sol tarafta bulunan *Job Manager* kısmına () tıklanır ve açılan pencerede de *Submit* ikonuna tıklanmasıyla analiz süreci başlatılmış olur (Şekil 3.32).



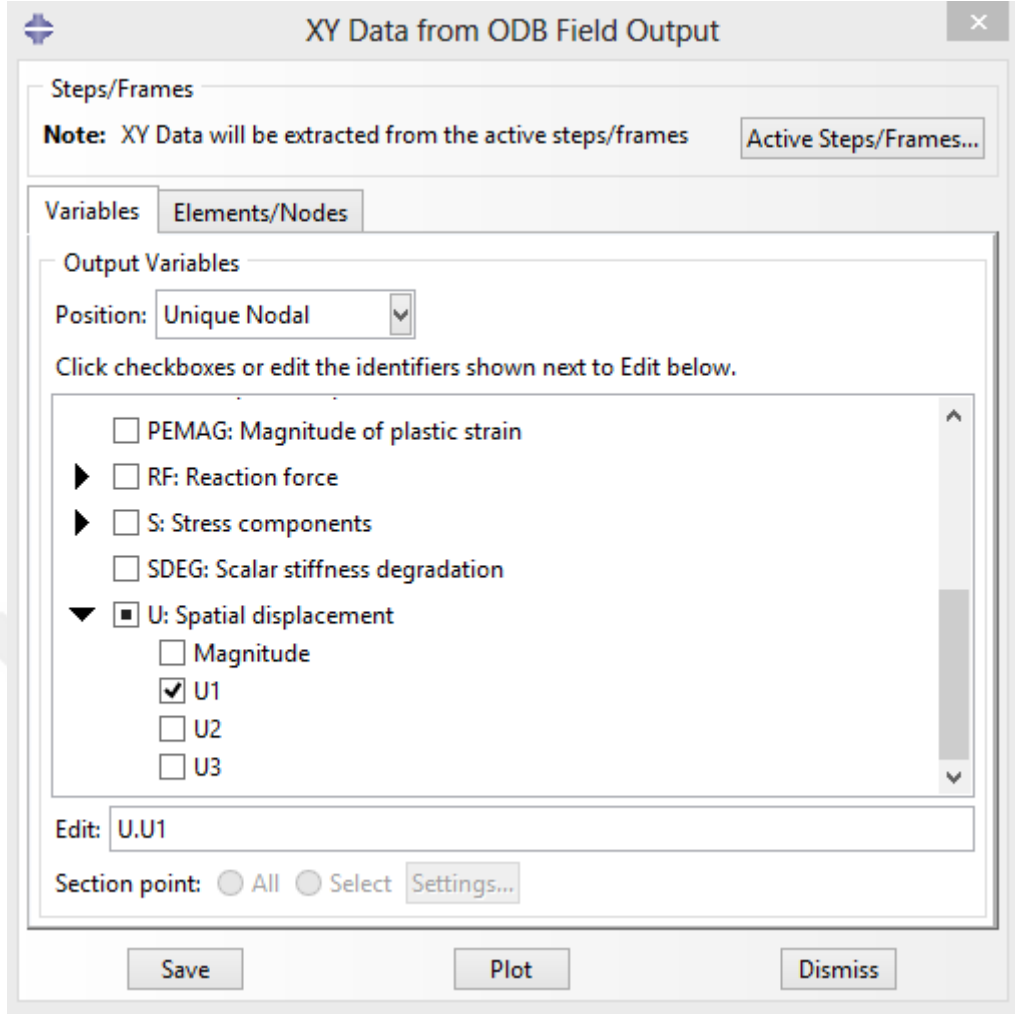
Şekil 3.32 Analizin başlatılması

Analiz işlemleri tamamlandıktan sonra Şekil 3.32'deki *Results* ikonuna tıklanarak *Visualization* modülüne geçiş yapıp Şekil 3.33'te olduğu gibi analiz sonuçlarına bakılabilir.



Şekil 3.33 Analiz sonuçları

Ayrıca *Visualization* modülünde iken sol tarafta bulunan menüden *Create XY Data* ikonuna tıklanarak açılan pencereden *ODB Field Output* seçeneği seçilip *Continue* denedikten sonra istenen herhangi bir düğüm noktasına ya da sonlu elemana ait analiz sonuçlarına detaylı bir şekilde bakılabilir (Şekil 3.34).



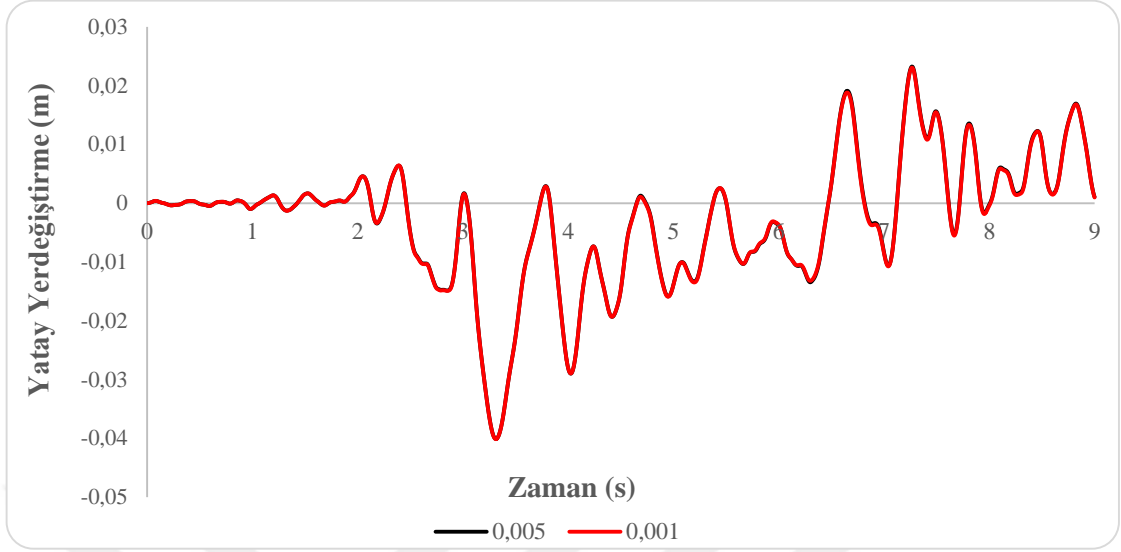
Şekil 3.34 İstenilen bir düğüm noktasındaki analiz sonuçlarının gösterimi

3.3 Elde Edilen Bulgular ve Bu Bulguların Karşılaştırılması

3.3.1 Analizler için Zaman Adımının ve Sonlu Eleman Sayısının Belirlenmesi

Mühendislikte, harcanan zaman, işlem yükü ve gerçek çözüme kabul edilebilir yakınsaklıktaki doğru çözümlere ulaşabilmek önemli kavramlardır. Harcanan zamanın ve işlem yükünün olabildiğince azaltılarak mümkün olan ve doğruya en yakın çözümün elde edilmesi esastır. Bu amaç doğrultusunda, analizlere başlanmadan önce tüm sistemler için zaman adımının belirlenmesi ve sonlu eleman sayısının belirlenmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Zaman adımının belirlenmesi için depreme ait 0,005'lik ve 0,001'lik ivme kayıtlarından yararlanılmıştır. 0,001'lik ivme kaydı 0,005'lik ivme kaydından her iki zaman adımının arasının doğrusal olarak beş eşit parçaya bölünmesiyle elde edilmiştir. Buradan hareketle ilk olarak betonarme perdeli sistem için zaman adımının belirlenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz neticesinde, modelin X-Y düzleminin sağ en üst

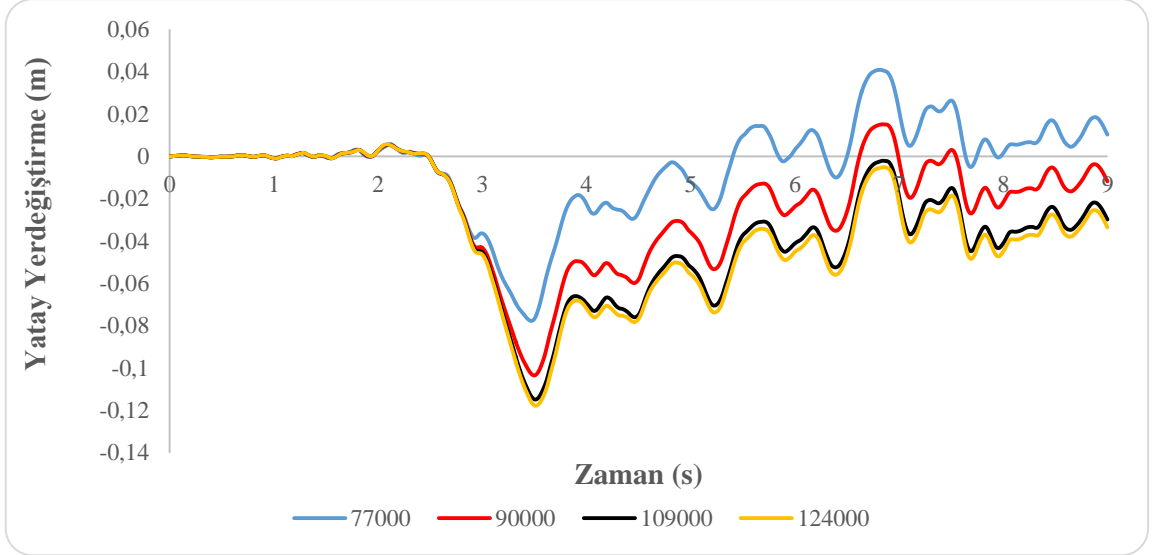
köşesindeki düğüm noktasına ait (Şekil 3.40, C noktası) 0,005 ve 0,001 zaman adımlarının yatay yerdeğiştirme grafikleri çizilmiştir (Şekil 3.35).



Şekil 3.35 Betonarme perdeli sisteme ait farklı zaman artımları için C noktasının yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi

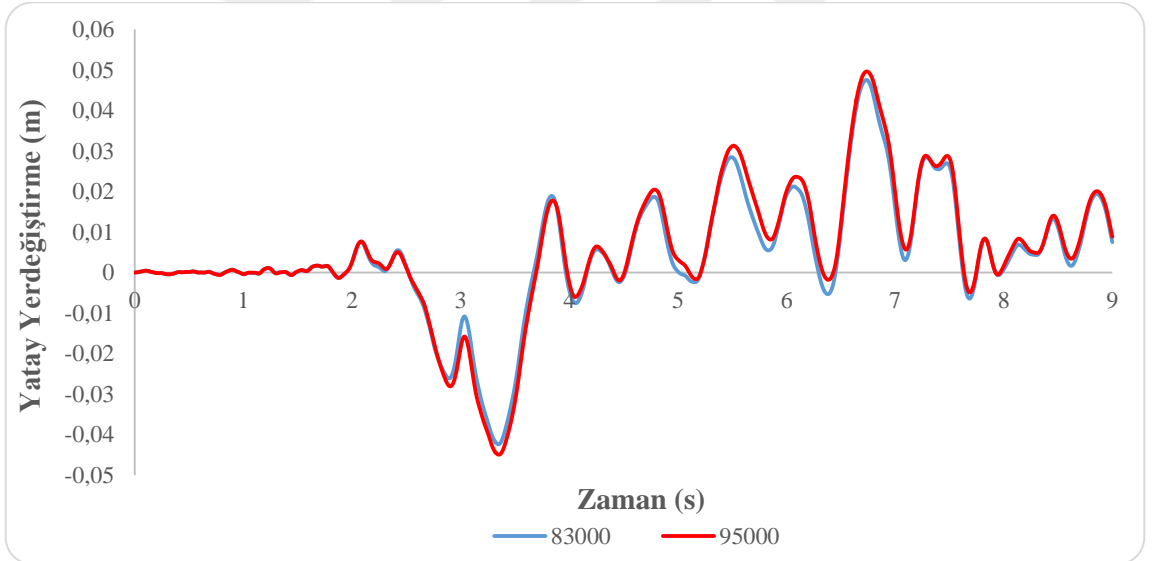
Bu grafikten görüldüğü gibi her iki zaman adımı sonuçları birebir üst üste çakışmıştır. Buradan hareketle zaman adımının belirlenmesi işlemlerinde, perdeli sistemin daha rijit olmasından dolayı diğer sistemler için de yeterli olacağı düşünülerek tüm sistemler için analizlerde kullanılacak uygun zaman adımının 0,005 olarak dikkate alınabileceğine karar verilmiştir.

Sonraki aşamada ise sonlu eleman sayısının belirlenmesine geçilmiştir. Bu amaçla tüm sistemler için eleman sayıları artırılarak yakınsama analizleri yapılmıştır. Aşağıda tüm sistemlerin yakınsama analizlerine ait grafikler verilmiştir. Bu grafikler çizilirken de zaman adımı belirlenirken dikkate alınan düğüm noktasına ait yatay yerdeğiştirme değerleri kullanılmıştır.



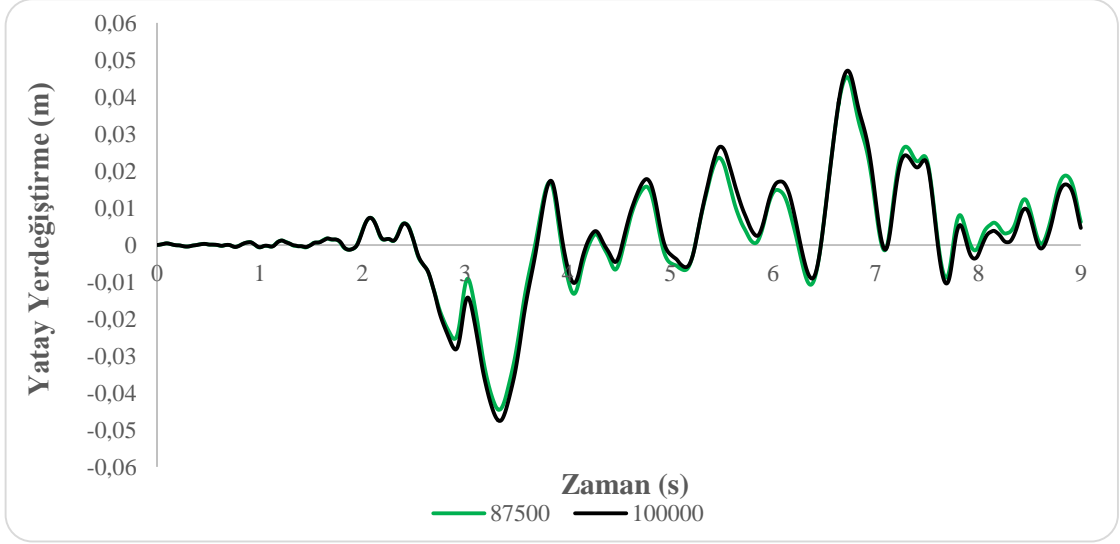
Şekil 3.36 Geleneksel çerçeve sistemin farklı sonlu eleman sayıları için C noktasının yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi

Şekil 3.36'ya bakıldığı takdirde geleneksel çerçeve sistem için 124000 eleman sayısı ile yapılan analiz sonucunda bu sistem için yakınsama sağlanmaktadır.



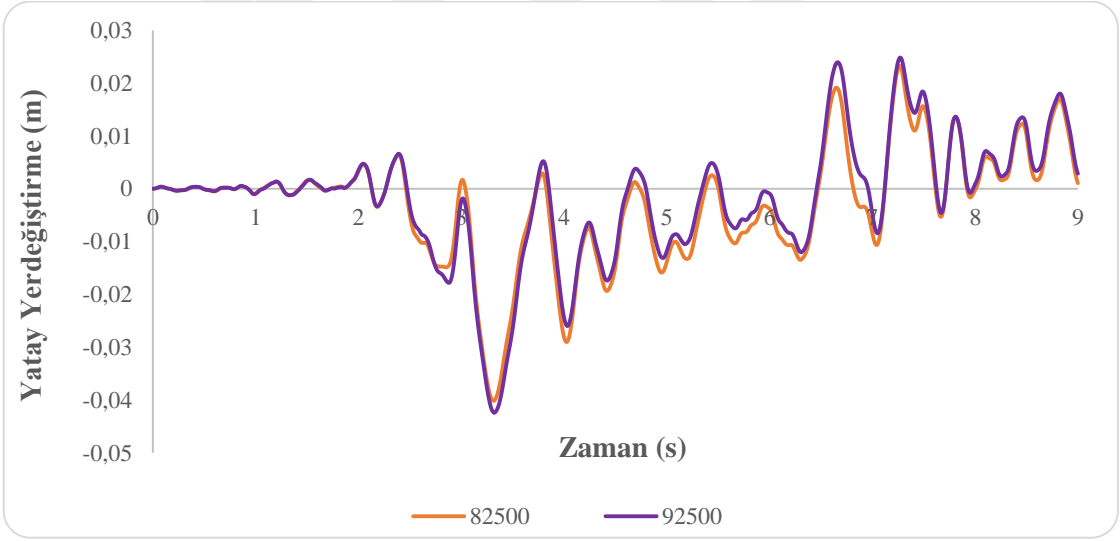
Şekil 3.37 Köşegen eğik elemanlı sistemin farklı sonlu eleman sayıları için C noktasının yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi

Şekil 3.37'ye bakıldığı takdirde köşegen eğik elemanlı sistem için 95000 eleman sayısı ile yapılan analiz sonucunda bu sistem için yakınsama sağlanmaktadır.



Şekil 3.38 X tipi eğik elemanlı sistemin farklı sonlu eleman sayıları için C noktasının yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi

Şekil 3.38'e bakıldığı takdirde 100000 eleman sayısı ile yapılan analiz sonucunda X tipi eğik elemanlı sistem için yakınsama sağlanmaktadır.



Şekil 3.39 Betonarme perdeli sistemin farklı sonlu eleman sayıları için C noktasının yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi

Şekil 3.39'a bakıldığı takdirde 92500 eleman sayısı ile yapılan analiz sonucunda betonarme perdeli sistem için yakınsama sağlanmaktadır.

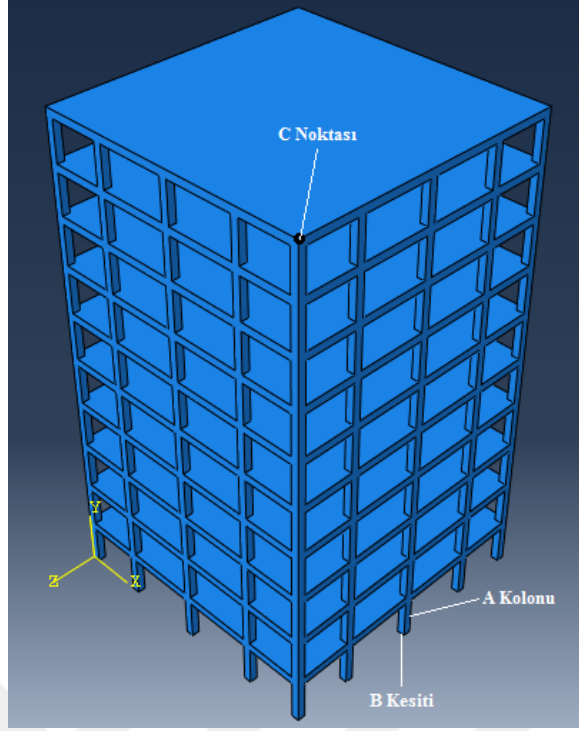
3.3.2 Analizlerden Elde Edilen Bulgular

Bu çalışmada, analiz sonuçlarını değerlendirmek için deprem ivmesi doğrultusundaki maksimum normal gerilmeler ve maksimum yatay yerdeğiştirmeler dikkate alınmıştır. Tüm sistemler için, deprem ivmesine dik doğrultuda bulunan Y-Z düzleminin zemin kat orta kolonunun mesnet kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi grafiği ve deprem ivmesi doğrultusunda bulunan X-Y düzleminin sağ en üstteki düğüm noktasına ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi grafiği verilmektedir.

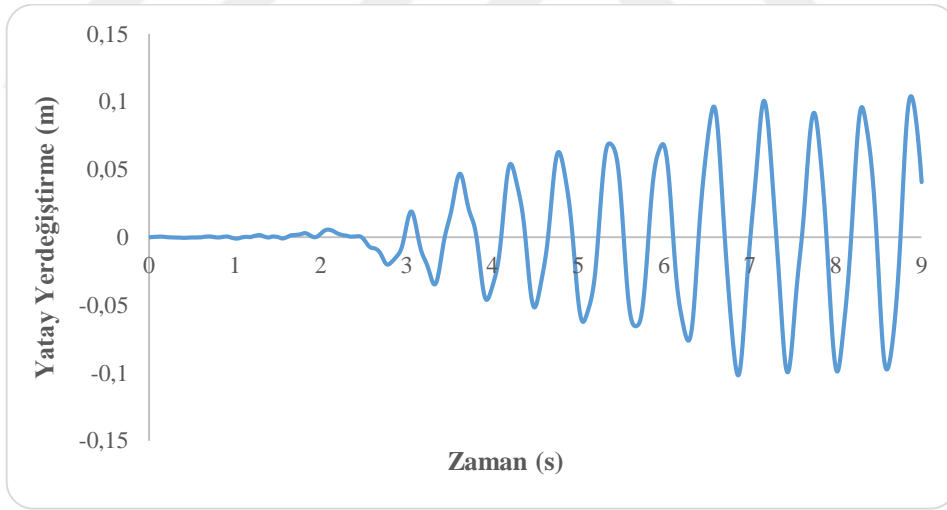
Geleneksel çerçeve sistem için göçme anına kadar (6.95'inci sn), diğer sistemlerde ise, sistemler göçmedikleri için, 9 sn boyunca maksimum normal gerilmenin olduğu yer ve değeri, maksimum yatay yerdeğiştirmenin olduğu yer ve değeri, deprem ivmesine dik doğrultuda bulunan Y-Z düzleminin zemin kat orta kolonunun (Şekil 3.40, A kolonu) mesnet kesitine (bkz. Şekil 3.40, B kesiti) ait normal gerilmenin zamanla değişimi ve deprem ivmesi doğrultusunda bulunan X-Y düzleminin sağ en üstteki düğüm noktasına (bkz. Şekil 3.40, C noktası) ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi sunulmuştur.

Normal gerilmenin zamanla değişimi grafikleri çizilmeden önce tüm sistemlerde mesnet bölgesi açısından en büyük gerilmelerin hangi kesitlerde olduğu belirlenmiştir. Buna göre tüm sistemlerde en büyük gerilmeler A kolonunun B kesitinde olmaktadır. Bu nedenle tüm sistemlerde, bu mesnet kesitine ait normal gerilmeler verilmektedir. Benzer şekilde yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi verilmeden önce tüm sistemlerde en büyük yatay yerdeğiştirmenin hangi noktada olduğu belirlenmiştir. Buna göre tüm sistemlerde en büyük yatay yerdeğiştirme C noktasında olmaktadır. Bu nedenle tüm sistemlerde, C noktasına ait yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi verilmektedir. Belirtilen kolon, kesit ve düğüm noktaları tüm sistemler için aynı şekilde ifade edilmiştir.

Araştırmacıların literatürdeki verilerle karşılaştırabilmesi açısından, bu çalışmanın amacının kapsamı dışında olmasına rağmen, geleneksel çerçeve sistemin C noktasının doğrusal analizinden elde edilen yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi Şekil 3.41'de verilmektedir.



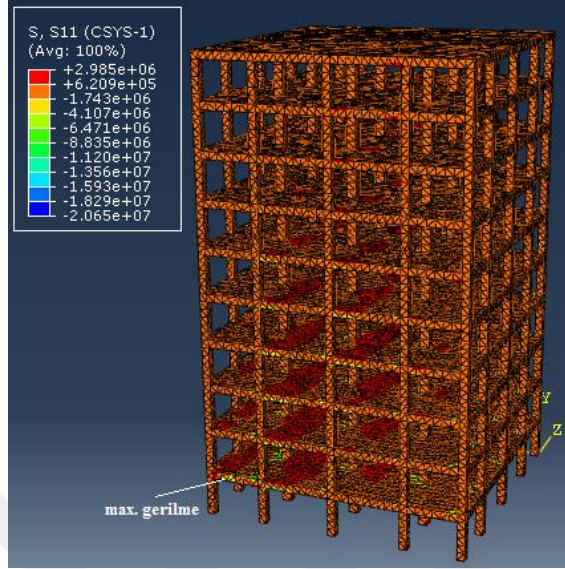
Şekil 3.40 Grafiklerin çiziminde dikkate alınan kolon, kesit ve düğüm noktası



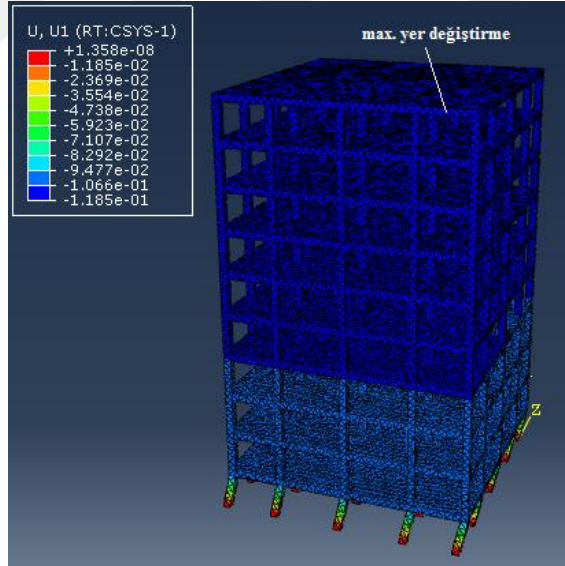
Şekil 3.41 C noktasına ait doğrusal analizden elde edilen yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

3.3.2.1 Geleneksel Çerçeve Sisteme Ait Bulgular

Geleneksel çerçeve sisteme ait maksimum normal gerilme ve maksimum yatay yerdeğiştirme sırasıyla Şekil 3.42 ve Şekil 3.43'te verilmektedir.



Şekil 3.42 Geleneksel çerçeve sisteme ait maksimum normal gerilmenin yeri ve değeri

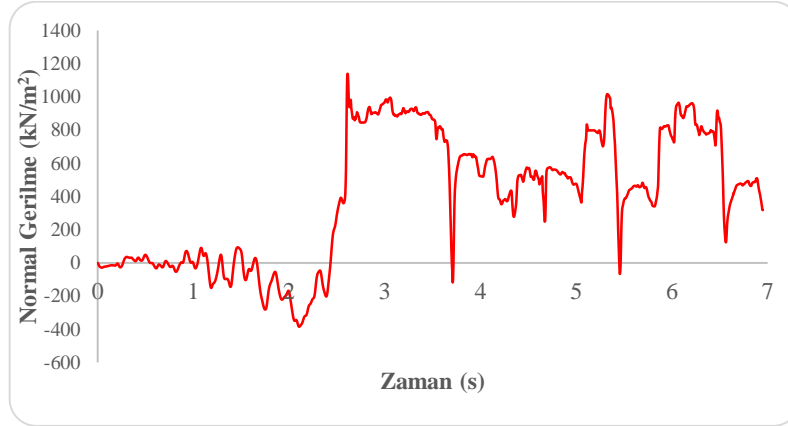


Şekil 3.43 Geleneksel çerçeve sisteme ait maksimum yatay yerdeğiştirmenin yeri ve değeri

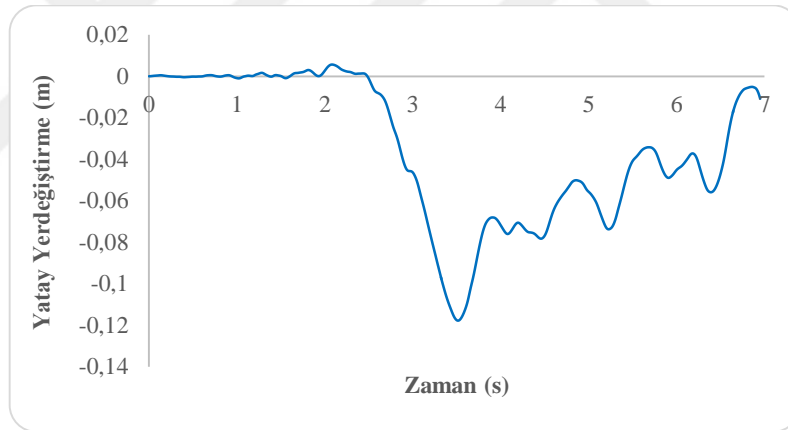
Şekil 3.42'den görüldüğü gibi, geleneksel çerçeve sistemde maksimum normal gerilme değeri 20650 kN/m² olarak 6,725'inci saniyede elde edilmiştir.

Şekil 3.43'ten görüldüğü gibi, geleneksel çerçeve sistemde maksimum yatay yerdeğiştirme değeri 11,85 cm olarak 3,515'inci saniyede elde edilmiştir.

Geleneksel çerçeve sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi ve C noktasına ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi sırasıyla Şekil 3.44 ve Şekil 3.45'te verilmiştir.



Şekil 3.44 Geleneksel çerçeve sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi



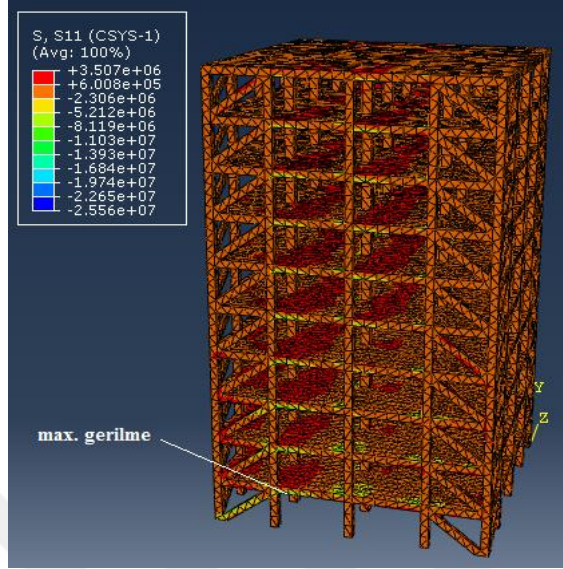
Şekil 3.45 Geleneksel çerçeve sistemin C noktasına ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

Şekil 3.44'ten görüldüğü gibi, geleneksel çerçeve sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi grafiğine göre, maksimum normal gerilme değeri 1150 kN/m² olarak 2,70'inci saniyede elde edilmiştir.

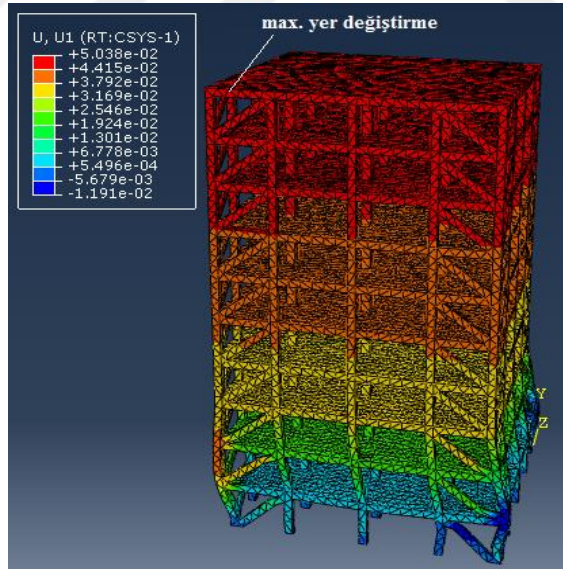
Şekil 3.45'ten görüldüğü gibi, geleneksel çerçeve sistemin C noktasına ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi grafiğine göre, maksimum yatay yerdeğiştirme değeri 12 cm olarak 3,60'ıncı saniyede elde edilmiştir.

3.3.2.2 Köşegen Eğik Elemanlı Sisteme Ait Bulgular

Köşegen eğik elemanlı sisteme ait maksimum normal gerilme ve maksimum yatay yerdeğiştirme sırasıyla Şekil 3.46 ve Şekil 3.47’de verilmektedir.



Şekil 3.46 Köşegen eğik elemanlı sisteme ait maksimum normal gerilmenin yeri ve değeri

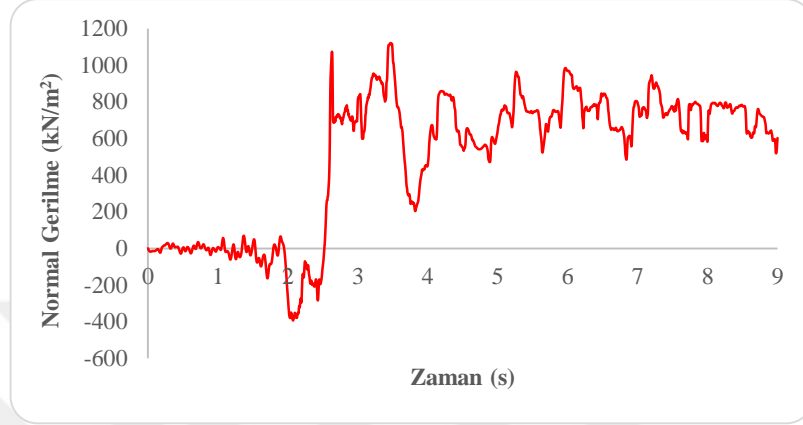


Şekil 3.47 Köşegen eğik elemanlı sisteme ait maksimum yatay yerdeğiştirmenin yeri ve değeri

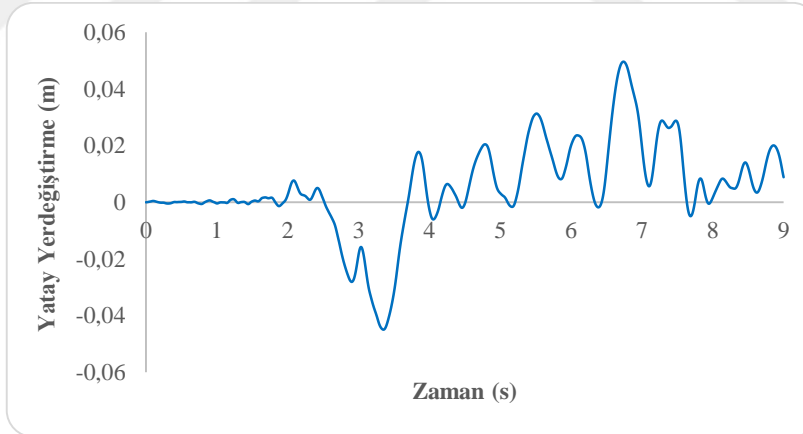
Şekil 3.46’den görüldüğü gibi, köşegen eğik elemanlı sistemde maksimum normal gerilme değeri 25560 kN/m^2 olarak 6,63’üncü saniyede elde edilmiştir.

Şekil 3.47'den görüldüğü gibi, köşegen eğik elemanlı sistemde maksimum yatay yerdeğiştirme değeri 5,04 cm olarak 6,74'üncü saniyede elde edilmiştir.

Köşegen eğik elemanlı sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi ve C noktasına ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi sırasıyla Şekil 3.48 ve Şekil 3.49'da verilmiştir.



Şekil 3.48 Köşegen eğik elemanlı sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi



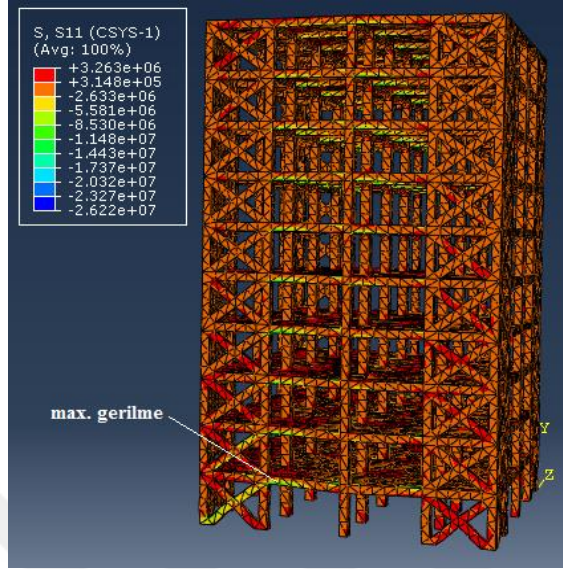
Şekil 3.49 Köşegen eğik elemanlı sistemin C noktasına ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

Şekil 3.48'den görüldüğü gibi, köşegen eğik elemanlı sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi grafiğine göre, maksimum normal gerilme değeri 1100 kN/m^2 olarak 3,50'inci saniyede elde edilmiştir.

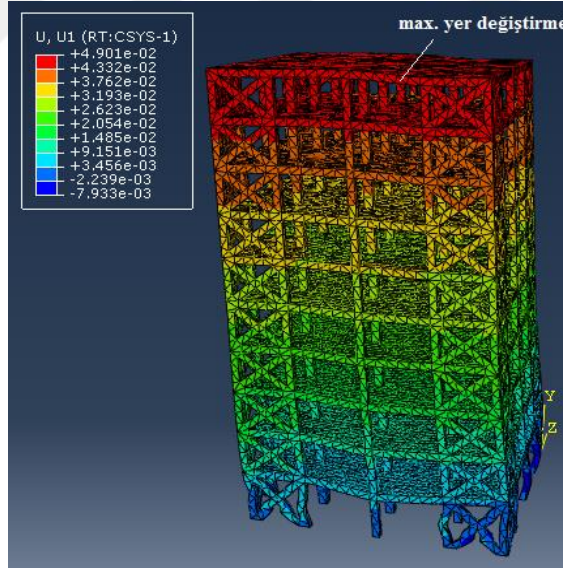
Şekil 3.49'dan görüldüğü gibi, köşegen eğik elemanlı sistemin C noktasına ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi grafiğine göre, maksimum yatay yerdeğiştirme değeri 5 cm olarak 6,80'inci saniyede elde edilmiştir.

3.3.2.3 X Tipi Eğik Elemanlı Sisteme Ait Bulgular

X tipi eğik elemanlı sisteme ait maksimum normal gerilme ve maksimum yatay yerdeğiştirme sırasıyla Şekil 3.50 ve Şekil 3.51’de verilmektedir.



Şekil 3.50 X tipi eğik elemanlı sisteme ait maksimum normal gerilmenin yeri ve değeri

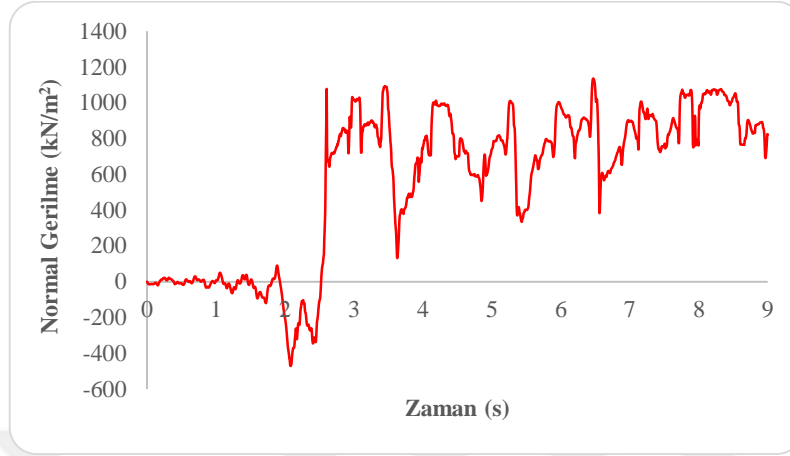


Şekil 3.51 X tipi eğik elemanlı sisteme ait maksimum yatay yerdeğiştirimenin yeri ve değeri

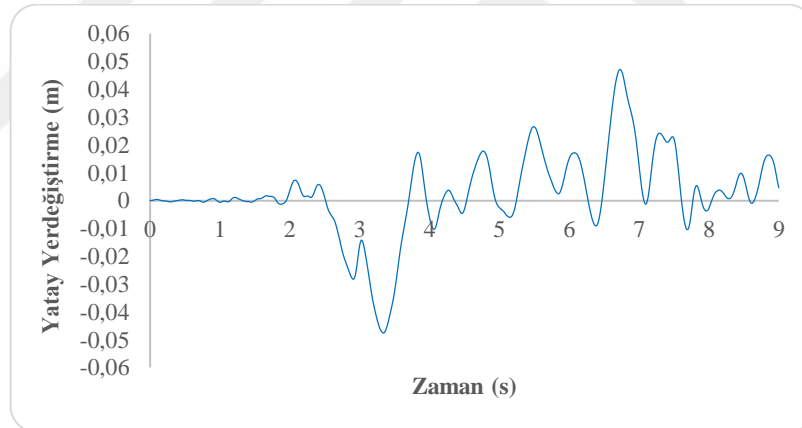
Şekil 3.50’den görüldüğü gibi, X tipi eğik elemanlı sistemde maksimum normal gerilme değeri 26220 kN/m² olarak 3,755’inci saniyede elde edilmiştir.

Şekil 3.51’den görüldüğü gibi, X tipi eğik elemanlı sistemde maksimum yatay yerdeğiştirme değeri 4,9 cm olarak 6,73’üncü saniyede elde edilmiştir.

X tipi eğik elemanlı sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi ve C noktasına ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi sırasıyla Şekil 3.52 ve Şekil 3.53'te verilmiştir.



Şekil 3.52 X tipi eğik elemanlı sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi



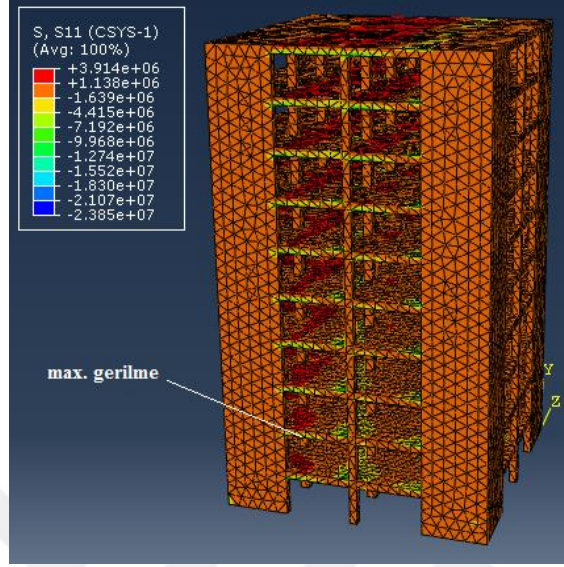
Şekil 3.53 X tipi eğik elemanlı sistemin C noktasına ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

Şekil 3.52'den görüldüğü gibi, X tipi eğik elemanlı sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi grafiğine göre, maksimum normal gerilme değeri 1100 kN/m^2 olarak 6.50'inci saniyede elde edilmiştir.

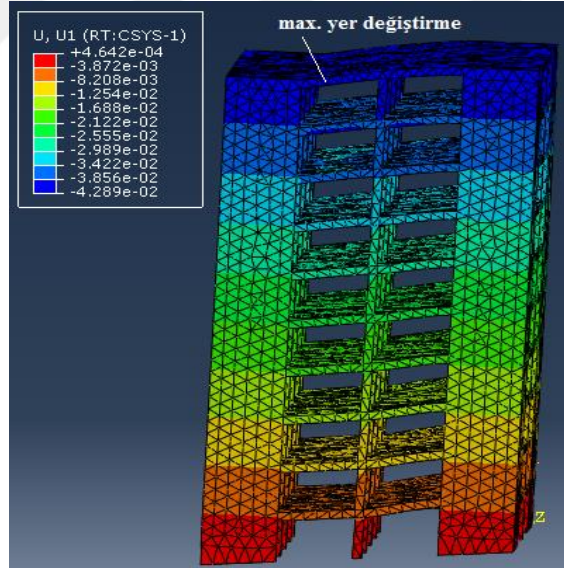
Şekil 3.53'ten görüldüğü gibi, X tipi eğik elemanlı sistemin C noktasına ait yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi grafiğine göre, maksimum yatay yerdeğiştirme değeri 5 cm olarak 3,3'üncü saniyede elde edilmiştir.

3.3.2.4 Betonarme Perdeli Sisteme Ait Bulgular

Betonarme perdeli sisteme ait maksimum normal gerilme ve maksimum yatay yerdeğiştirme sırasıyla Şekil 3.54 ve Şekil 3.55'te verilmektedir.



Şekil 3.54 Betonarme perdeli sisteme ait maksimum normal gerilmenin yeri ve değeri

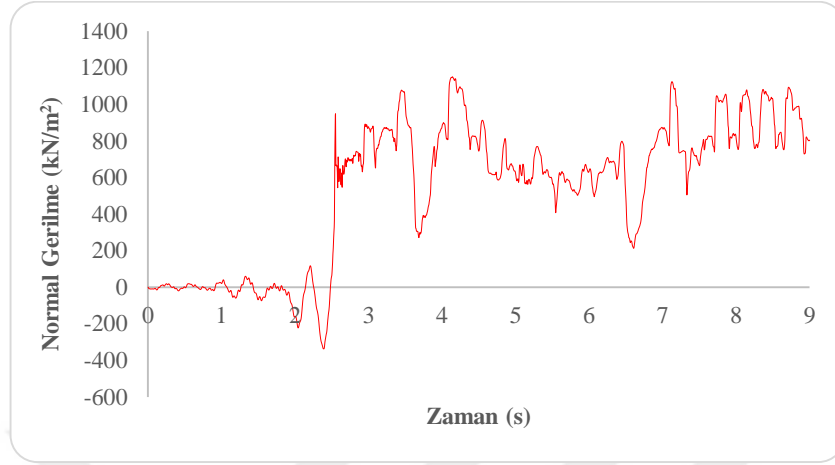


Şekil 3.55 Betonarme perdeli sisteme ait maksimum yatay yerdeğiştirmenin yeri ve değeri

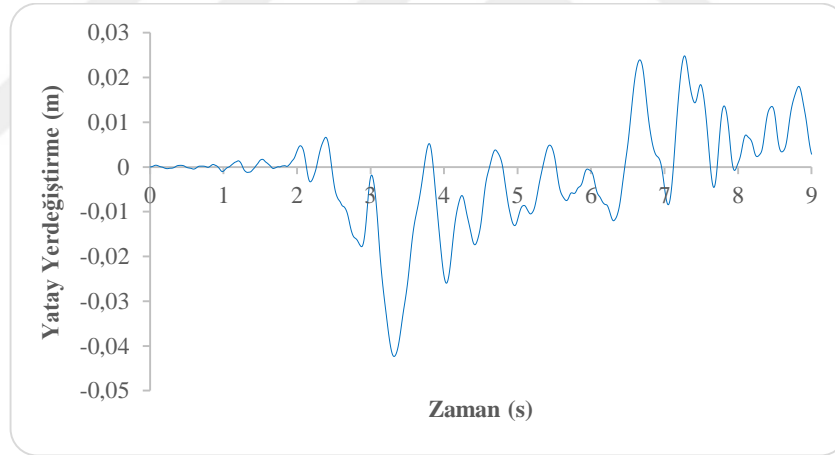
Şekil 3.54'ten görüldüğü gibi betonarme perdeli sistemde maksimum normal gerilme değeri 23850 kN/m² olarak 6,655'inci saniyede elde edilmiştir.

Şekil 3.55'ten görüldüğü gibi betonarme perdeli sistemde maksimum yatay yerdeğiştirme değeri 4,29 cm olarak 3,32'inci saniyede elde edilmiştir.

Betonarme perdeli sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi ve C noktasına ait yatay yerdeğiştirimin zamanla değişimi sırasıyla Şekil 3.56 ve Şekil 3.57’de verilmiştir.



Şekil 3.56 Betonarme perdeli sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi



Şekil 3.57 Betonarme perdeli sistemin C noktasına ait yatay yerdeğiştirimin zamanla değişimi

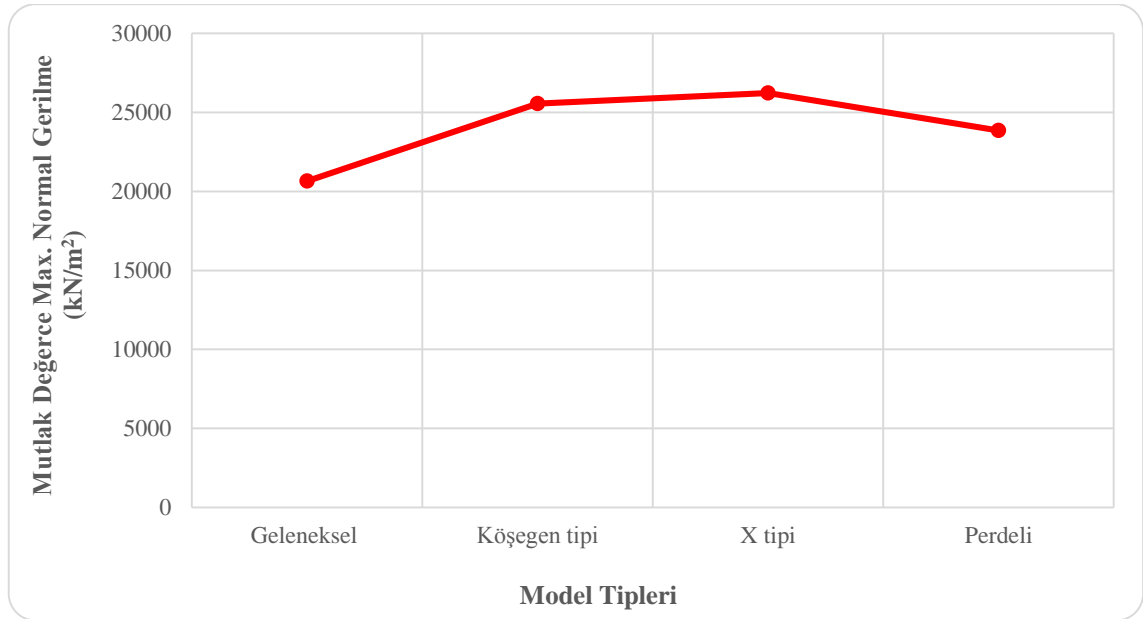
Şekil 3.56’den görüldüğü gibi, betonarme perdeli sistemin A kolonunun B kesitine ait normal gerilmenin zamanla değişimi grafiğine göre, maksimum normal gerilme değeri 1150 kN/m^2 olarak 4,20’inci saniyede elde edilmiştir.

Şekil 3.57’den görüldüğü gibi, betonarme perdeli sistemin C noktasına ait yatay yerdeğiştirimin zamanla değişimi grafiğine göre, maksimum yatay yerdeğiştirme değeri 4 cm olarak 3,3’nc saniyede elde edilmiştir.

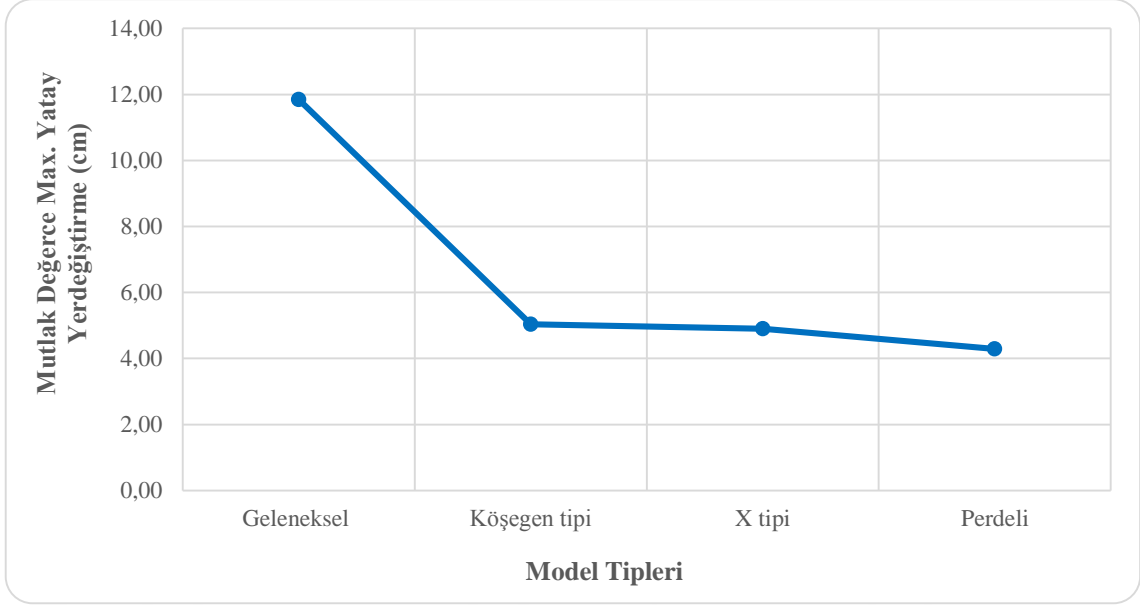
Bu tez çalışması kapsamında ele alınan ve doğrusal olmayan analizleri yapılan dört ayrı modelin 9 sn'lik deprem süresince göçüp göçmediğinin belirlenmesi işlemleri 2007 DBYBHY'ye göre gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 2007 deprem yönetmeliğinde mevcut olan “Betonarme Elemanların Kesit Birim Şekil Değiştirme Kapasiteleri” bölümüne göre zemin katta bulunan kolonların kaç tanesinin maksimum basınç şekil değiştirmesi kapasitesine ulaştığı diğer bir deyimle kaç tanesinin bireysel anlamda göçme sınırına ulaştığı belirlenmiştir. Burada, zemin kat kolonlarının dikkate alınmasının nedeni deprem etkisindeki yapılarda en çok zorlanmanın zemin katta oluşmasıdır. Bunu yaparken “can güvenliği performans düzeyinin” sağlanması amacıyla yola çıkılmıştır. 2007 deprem yönetmeliğinde can güvenliği performans düzeyinin sağlanabilmesi için “ileri hasar bölgesindeki kolonların, her bir katta kolonlar tarafından taşınan kesme kuvvetine toplam katkısı %20'nin altına olmalıdır” şartının yerine getirilmesi gerekmektedir [59]. Dikkate alınan bu kriterlere göre geleneksel çerçeve sistemin depremin 6,95'inci saniyesinde göçtüğü sonucuna ulaşılırken diğer üç sistemde göçmenin olmadığı bilgisine ulaşılmıştır.

3.3.2.5 Sistemlere Ait Bulguların Karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında dikkate alınan *mutlak değerce maksimum normal gerilme* ve *mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirme* değerlerine ait grafikler sırasıyla Şekil 3.58 ve Şekil 3.59'da verilmiştir.



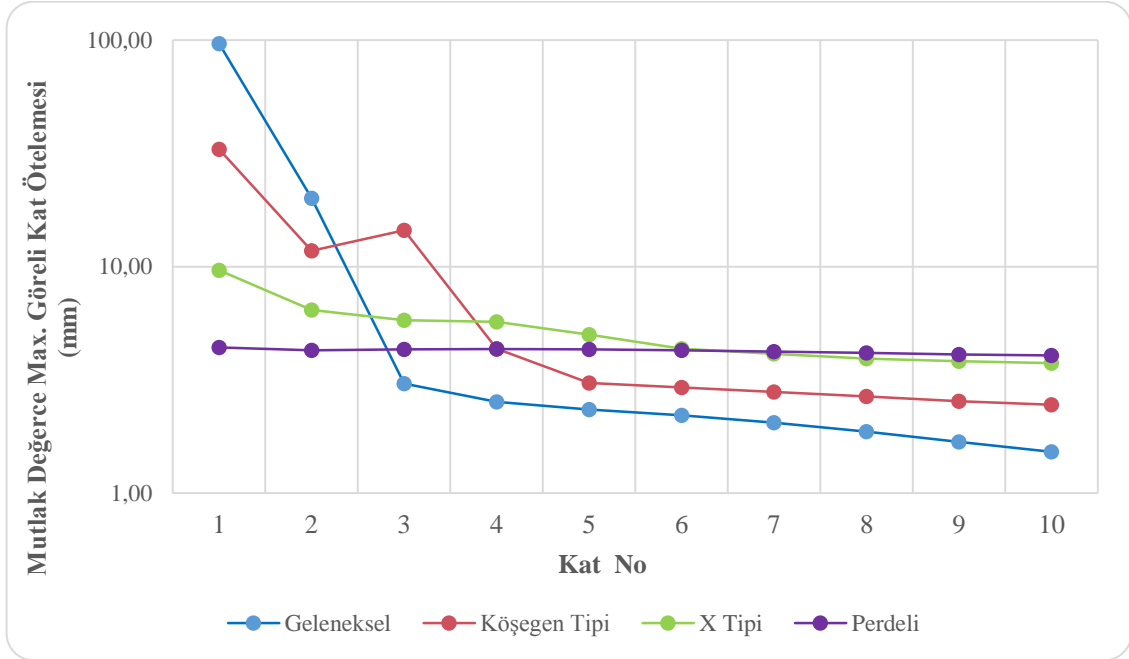
Şekil 3.58 Mutlak değerce maksimum normal gerilmenin sistemlere göre değişimi



Şekil 3.59 Mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmenin sistemlere göre değişimi Şekil 3.58’den görüldüğü gibi geleneksel çerçeve sisteme ait mutlak değerce maksimum normal gerilme değeri diğerlerinden daha düşük seviyededir. Burada geleneksel çerçeve sistem için göçme anına kadar (6,95’inci sn), diğer sistemler için ise 9 sn’lik deprem etkisi boyunca herhangi bir anda oluşmuş olan maksimum normal gerilmeler dikkate alınmıştır. Ayrıca yine aynı şekle bakıldığında rijitleştirilen sistemlerde oluşan maksimum normal gerilme değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir.

Şekil 3.59’dan görüldüğü gibi betonarme perde duvarla rijitleştirilen sisteme ait mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirme değeri diğer sistemlerden daha düşük seviyededir. Öte yandan sırasıyla X tipi eğik elemanlı sistemde, köşegen eğik elemanlı sistemde ve geleneksel çerçeve sistemde oluşan maksimum yatay yerdeğiştirme değerleri artan bir eğilim göstermektedir. Bu grafikte de geleneksel çerçeve sistem için göçme anına kadar (6,95’inci sn), diğer sistemler için ise 9 sn’lik deprem etkisi boyunca herhangi bir anda oluşmuş olan maksimum yatay yerdeğiştirmeler dikkate alınmıştır

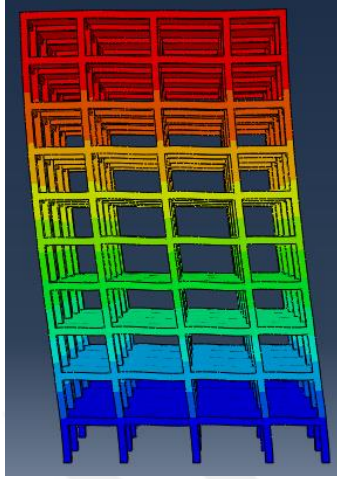
Şekil 3.60'ta mutlak değerce maksimum görel kat ötelemesi değerleri görülmektedir. Burada kastedilen farklı saniyelerde de olsa yapıların her bir katında meydana gelmiş olan görel kat ötelemelerinin mutlak değerce maksimumunu elde etmektir.



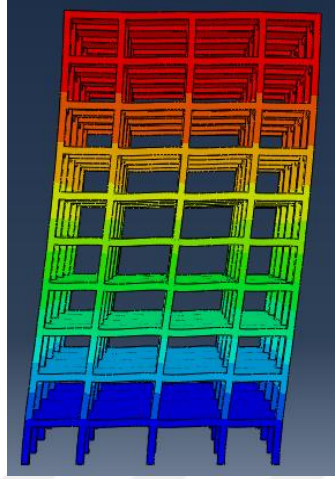
Şekil 3.60 Mutlak değerce maksimum görel kat ötelemesinin sistemlere göre değişimi. Buna göre geleneksel çerçeve sistem ilk kat için en büyük mutlak değerce maksimum görel kat ötelemesi değerine sahiptir. Bu değer kabaca diğerlerinden on kat daha büyüktür. Öte yandan en küçük mutlak değerce maksimum görel kat ötelemesi değerleri betonarme perdeli sistemde elde edilmiştir.

3.3.2.6 Dikkate Alınan Sistemlere Ait Mod Şekilleri

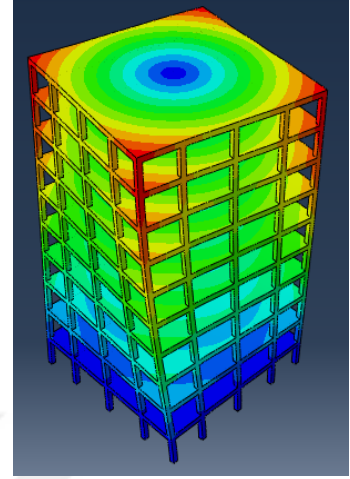
Bu çalışma kapsamında dikkate alınan bütün sistemlerin ilk altı moduna ait *periyot* ve *mod şekilleri* sırasıyla Şekil 3.61, Şekil 3.62, Şekil 3.63 ve Şekil 3.64'te verilmiştir.



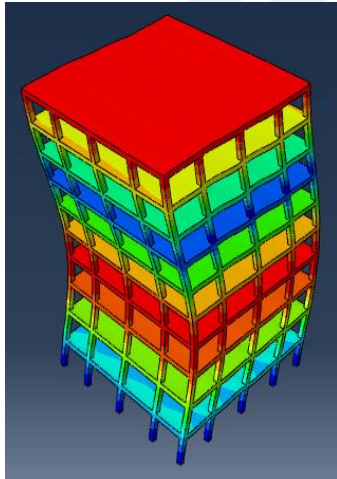
a) Mod 1 , $T_1 = 0,5733$



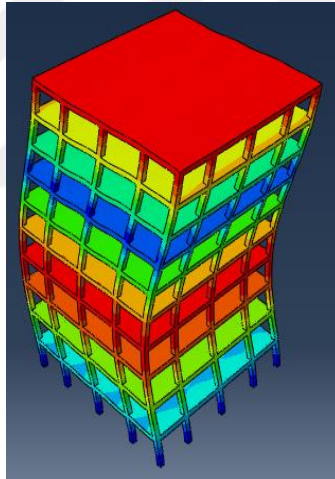
b) Mod 2 , $T_2 = 0,5731$



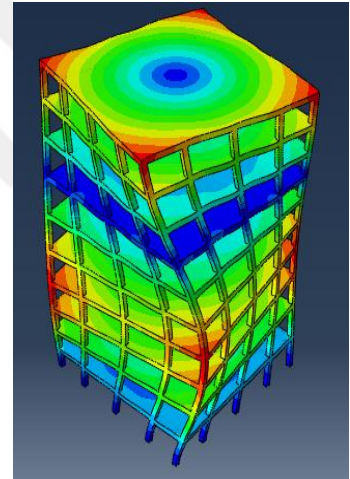
c) Mod 3 , $T_3 = 0,5166$



d) Mod 4 , $T_4 = 0,1855$



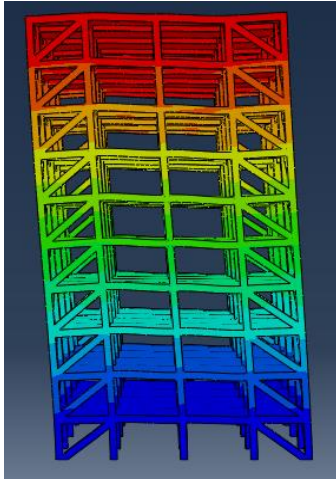
e) Mod 5 , $T_5 = 0,1854$



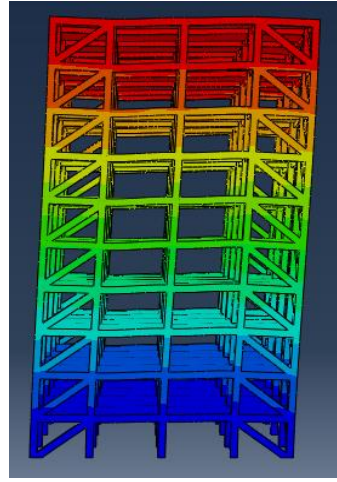
f) Mod 6 , $T_6 = 0,1683$

Şekil 3.61 Geleneksel çerçeve sisteme ait periyot değerleri ve mod şekilleri

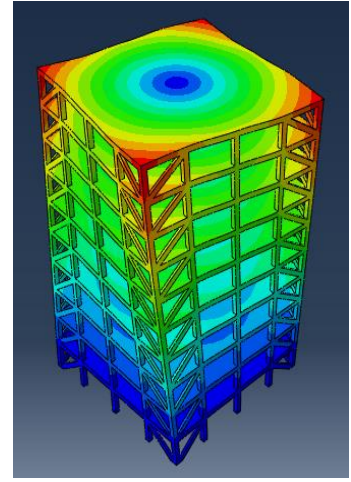
Şekil 3.61'den görüldüğü gibi, geleneksel çerçeve sistemin birinci periyodu 0,5733 saniye iken altıncı moda ait periyodu 0,1683 saniyedir. Ayrıca bu şekilden üçüncü ve altıncı modların burulma modu olduğu görülmektedir.



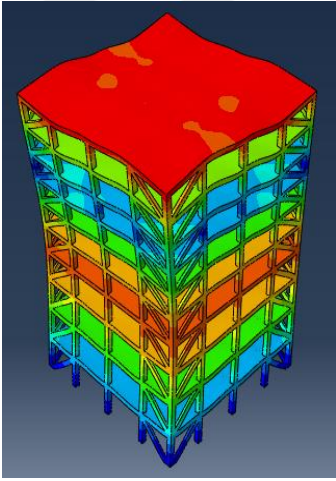
a) Mod 1 , $T_1 = 0,4501$



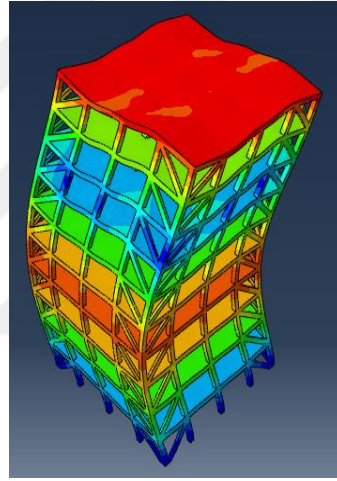
b) Mod 2 , $T_2 = 0,4500$



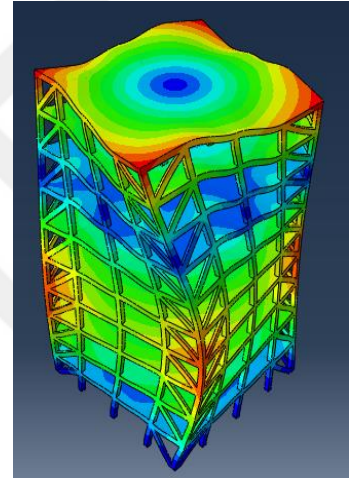
c) Mod 3 , $T_3 = 0,3237$



d) Mod 4 , $T_4 = 0,1361$



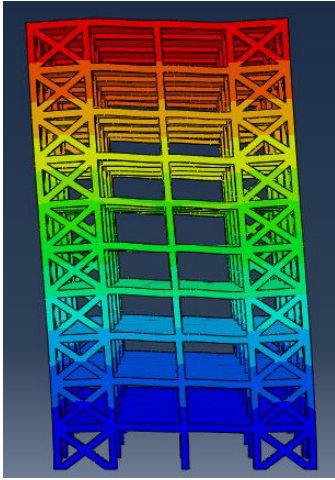
e) Mod 5 , $T_5 = 0,1361$



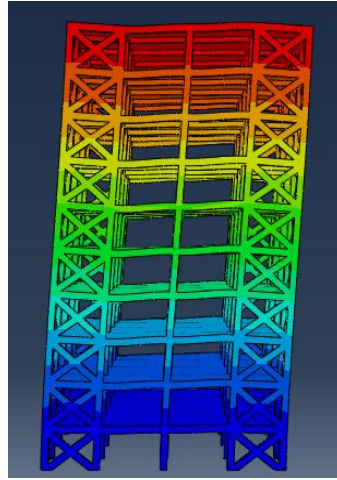
f) Mod 6 , $T_6 = 0,0957$

Şekil 3.62 Köşegen eğik elemanlı sisteme ait periyot değerleri ve mod şekilleri

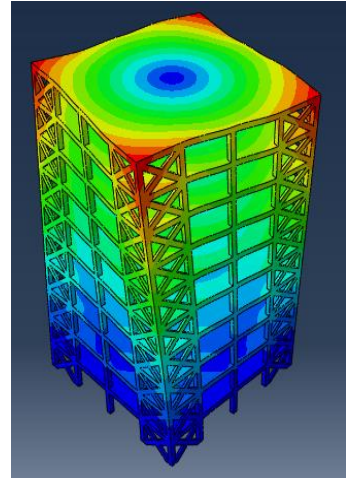
Şekil 3.62'den görüldüğü gibi, köşegen eğik elemanlı sistemin birinci periyodu 0,4501 saniye iken altıncı moda ait periyodu 0,0957 saniyedir. Ayrıca bu şekilden üçüncü ve altıncı modların burulma modu olduğu görülmektedir.



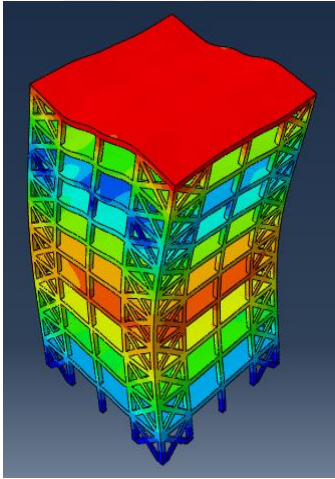
a) Mod 1 , $T_1 = 0,4246$



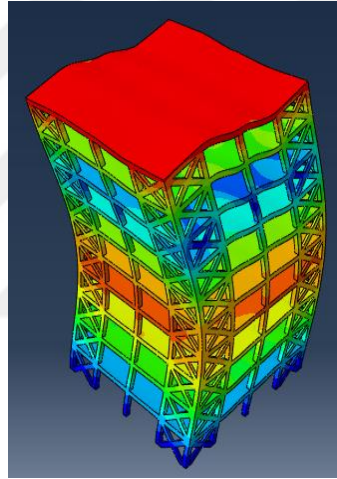
b) Mod 2 , $T_2 = 0,4244$



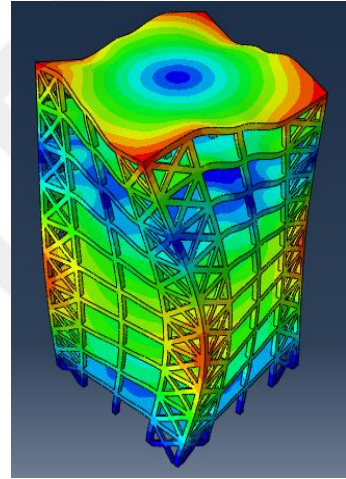
c) Mod 3 , $T_3 = 0,2852$



d) Mod 4 , $T_4 = 0,1198$



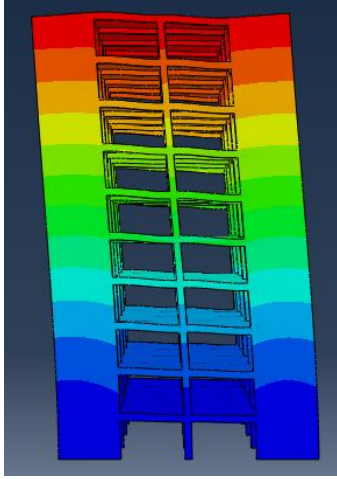
e) Mod 5 , $T_5 = 0,1197$



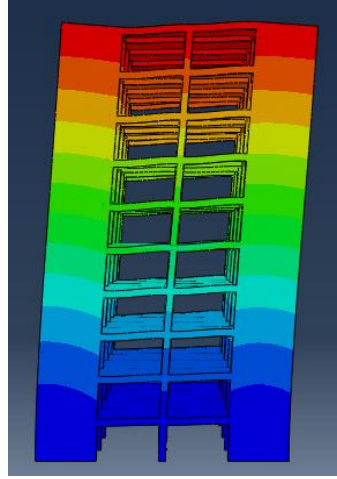
f) Mod 6 , $T_6 = 0,0788$

Şekil 3.63 X tipi eğik elemanlı sisteme ait periyot değerleri ve mod şekilleri

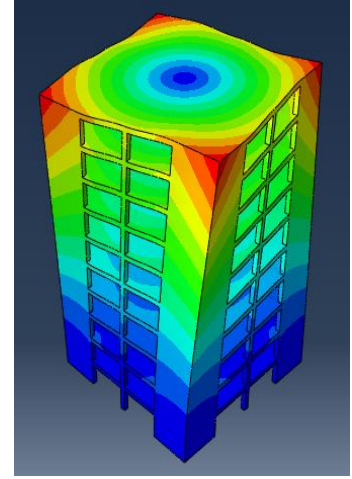
Şekil 3.63'ten görüldüğü gibi, X tipi eğik elemanlı sistemin birinci periyodu 0,4246 saniye iken altıncı moda ait periyodu 0,0788 saniyedir. Ayrıca bu şekilden üçüncü ve altıncı modların burulma modu olduğu görülmektedir.



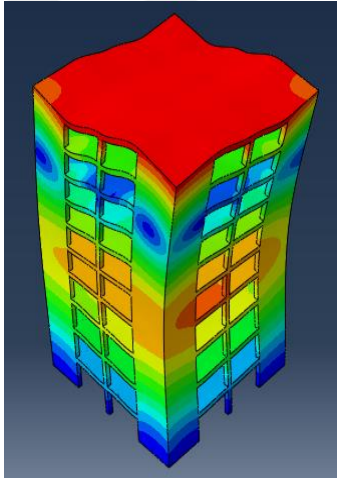
a) Mod 1 , $T_1 = 0,3652$



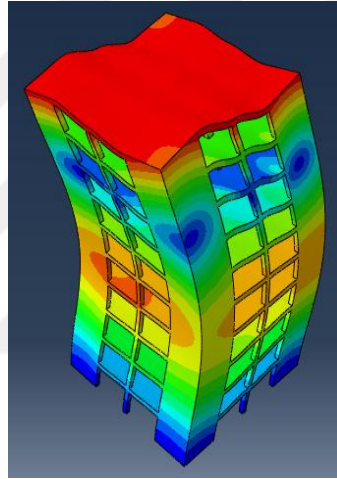
b) Mod 2 , $T_2 = 0,3649$



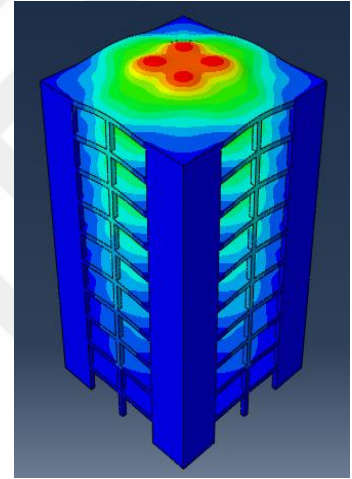
c) Mod 3 , $T_3 = 0,2406$



d) Mod 4 , $T_4 = 0,0933$



e) Mod 5 , $T_5 = 0,0933$



f) Mod 6 , $T_6 = 0,0601$

Şekil 3.64 Betonarme perdeli sisteme ait periyot değerleri ve mod şekilleri

Şekil 3.64'ten görüldüğü gibi, betonarme perdeli sistemin birinci periyodu 0,3652 saniye iken altıncı moda ait periyodu 0,0601 saniyedir. Ayrıca bu şekilden üçüncü modun burulma modu olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.1 Sistemlere ait periyot değerleri

	<i>Geleneksel</i>	<i>Köşegen Tipi</i>	<i>X Tipi</i>	<i>Perdeli</i>
1. Mod	0,5733	0,4501	0,4246	0,3652
2. Mod	0,5731	0,4500	0,4244	0,3649
3. Mod	0,5166	0,3237	0,2852	0,2406
4. Mod	0,1855	0,1361	0,1198	0,0933
5. Mod	0,1854	0,1361	0,1197	0,0933
6. Mod	0,1683	0,0957	0,0788	0,0601

Çizelge 3.1’de tüm sistemlere ait periyot değerleri tablo halinde sunulmuştur. Bu çizelgeye göre geleneksel çerçeve sisteme ait periyot değerleri rijitleştirilen diğer sistemlerden daha büyüktür.

BÖLÜM 4

SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmanın amacı geleneksel çerçeve sistem ve farklı elemanlarla rijitleştirilmiş sistemlerin deprem etkisi altındaki doğrusal olmayan davranışlarının karşılaştırmalı olarak incelenmesidir. Bu amaçla bu bölümde, yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar verilmiş ayrıca bazı önerilerde bulunulmuştur.

Deprem etkilerine maruz kalan betonarme yapıların davranışları depremin niteliğine, mevcut zeminin tipine ve bu yapıların dinamik karakteristiklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, esas anlamda bu çalışmadan elde edilen sonuçları genelleştirebilmek için farklı deprem kayıtlarına tabi tutulan birçok farklı yapıya ait sonuçların birlikte değerlendirilmesi elzemdir. Bununla birlikte, yapılan bu çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Genellikle, dikkate alınan kriterler bakımından betonarme perdelerle rijitleştirilen sistem daha iyi sonuçlar vermiştir.
- Geleneksel çerçeve sistem rijitlik yetersizliğinden dolayı göçmüştür. Fakat farklı elemanlarla rijitleştirilen diğer sistemlerde göçme gözlenmemiştir. Bu durum, rijitleştirici elemanların deprem etkilerine maruz kalan bir yapıyı daha dayanıklı hale getirdiği sonucunu vermektedir.
- Bu çalışmada kullanılan tüm rijitleştirici elemanlar yatay yerdeğiştirmeleri azaltmışlardır. Çünkü sonuçlara bakıldığında, geleneksel çerçeve sisteme ait yatay yerdeğiştirme değerleri diğer sistemlerden daha büyük seviyededir.
- Mutlak değerce maksimum normal gerilme açısından karşılaştırma yapmak gerekirse geleneksel çerçeve sistem dışındaki sistemlerde gerilmeler hemen

hemen aynı mertebelerde görülürken geleneksel çerçeve sisteme ait normal gerilme değeri bunlardan biraz daha düşük seviyededir.

- Mutlak değerce maksimum görelî kat ötelemesi sonuçlarına göre geleneksel çerçeve sistemde ilk kat için diğerlerinden yaklaşık olarak on kat daha büyük sonuçlar elde edildiği görölmektedir. Buna göre geleneksel çerçeve sistemin diğer sistemlerden daha fazla süneklîğe sahip olmasına rağmen rijitlik açısından diğer sistemlere nazaran oldukça yetersiz olduğu sonucu çıkarılabilir. Öte yandan, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar baz alınırsa mutlak değerce maksimum görelî kat ötelemesi sonuçlarına göre sistemler rijitleştikçe görelî kat ötelemeleri daha düzenli ve birbirine yakın değerler almaktadır.
- Sistemlerin ilk altı periyot değerlerine bakıldığında betonarme perdeli sistemin periyot değerlerinin daha düşük olduğu görölmektedir. Daha sonra, sırasıyla, X tipi eğik elemanlı sistem, köşegen eğik elemanlı sistem ve geleneksel çerçeve sistem şeklinde olmak üzere periyot değerleri giderek artma eğilimi göstermektedir.
- Analiz sonuçlarına göre tüm sistemlerde en fazla normal gerilmeye maruz kalan kolonlardan biri olduğu belirlenen Y-Z düzleminin zemin kat orta kolonunun mesnet kesitine ait normal gerilme sonuçlarına göre tüm sistemlerde oluşan maksimum normal gerilmelerin hemen hemen aynı seviyelerde olduğu söylenebilir.
- Yapılan bu çalışmada tüm sistemler simetrik olarak seçilmiş, kat adedi on olarak dikkate alınmıştır. Benzer bir çalışmayı simetrik olmayan sistemler seçilerek farklı kat adetlerine sahip yapılar için gerçekleştirmek, daha genel sonuçlar elde edebilmek açısından yararlı olacaktır.
- Yapılan bu çalışmada geleneksel çerçeve sistem üç farklı tipteki elemanlarla rijitleştirilmiştir. Daha kapsamlı sonuçlar elde edebilmek için daha fazla sayıda ve daha farklı tipteki elemanlarla rijitleştirilen yapıların analiz edilmesi faydalı olacaktır.
- Bu çalışmada zeminin etkisi dikkate alınmamıştır. Benzer bir çalışmayı zeminin etkisini de dikkate alarak yapmak daha yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Bazaez, R., ve Dusicka, P., (2016). "Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Bridge Bent Retrofitted with Buckling Restrained Braces", *Engineering Structures*, 119: 34-48.
- [2] Wang, Y., Ibarra, L. ve Pantelides, C., (2016). "Seismic Retrofit of a Three Span RC Bridge with Buckling-Restrained Braces", *Journal of Bridge Engineering*, 04016073.
- [3] Fu, Feng., (2009). "Progressive Collapse Analysis of High-Rise Building with 3-D Finite Element Modeling Method", *Journal of Constructional Steel Research*, 65: 1269-1278.
- [4] Jain, A.K., (1985). "Seismic Response of RC Frames with Steel Braces", *Journal of Structural Engineering*, 111(10): 2138-2148.
- [5] Sinabadi, S.B., (2015). Seismic Behavior of Buckling Restrained Braced Frames, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Callister, J.T. ve Pekelnicky, R.G., (2011). "Seismic Evaluation of an Existing Low Ductility Braced Frame Building in California", *Structures Congress 2011*, 14-16 April 2011, Las Vegas.
- [7] Taşkın, K., (2011). Betonarme Çerçevelerin Özel Köşe Çaprazları ile Güçlendirilmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] Ghowsi, A.F. ve Sahoo, D.R., (2013). "Seismic Performance of Buckling-Restrained Braced Frames with Varying Beam-Column Connections", *International Journal of Steel Structures*, 13(4): 607-621.
- [9] Corte, G.D., D'Aniello, M. ve Landolfo, R., (2015). "Field Testing of All-Steel Buckling-Restrained Braces Applied to a Damaged Reinforced Concrete Building", *Journal of Structural Engineering*, 141(1): D4014004.
- [10] Ameen, N.M., (2012). Nonlinear Analysis of Conventional and Buckling Restrained Braced Frames Under Near-Field Ground Motions, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- [11] Tan, H., Huang, L., Yan, L., Yi, H., Lu, Y. ve Bai, W., (2016). "Cyclic Loading Test of Three-Bay RC Space Frame Strengthened with X-Shape RC Braces", *Materials and Structures*, 49: 3509-3522.

- [12] Badoux, M. ve Jirsa, J.O., (1990). "Steel Bracing of RC Frames for Seismic Retrofitting", *Journal of Structural Engineering*, 116(1): 55-74.
- [13] Ayvaz, Y., Doğangün, A. ve Durmuş, A., (1997). "Farklı Rijitleştirici Elemanlara Sahip Yapıların Depreme Göre Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi", *Türkiye İnşaat Mühendisliği 14. Teknik Kongresi*, 23 Ekim 1997, İzmir.
- [14] Pincheira, J.A. ve Jirsa, J.O., (1995). "Seismic Response of RC Frames Retrofitted with Steel Braces or Walls", *Journal of Structural Engineering*, 121(8): 1225-1235.
- [15] Açar, M., (2008). *Strengthening of Reinforced Concrete Frames by Using Steel Bracings*, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [16] Abdallah, R., (2013). *A Study on Effectiveness of Buckling Restrained Braces in Mitigating Earthquake Response of Framed Buildings*, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- [17] Üzer, M., (2015). *Asma Germe Sistemlerin Uygulandığı Endüstriyel Yapıların Deprem Davranışının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] Xie, Q., (2005). "State of the Art of Buckling-Restrained Braces in Asia", *Journal of Constructional Steel Research*, 61: 727-748.
- [19] Gürsoy, Ş., (2013). "Farklı Rijitleştirici Elemanlara Sahip Binaların Depreme Göre Maliyetlerinin Karşılaştırılması" *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(3): 533-544.
- [20] Kılıç, İ.E., (2008). *Nonlinear Analysis and Retrofit Strategy Selection of a Historical Reinforced Concrete Building According to Turkish Earthquake Code 2007*, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] Akın, S.K., (2006). *Betonarme Çerçevelerin Çapraz Çubuklar Yardımıyla Güçlendirilmesi*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [22] El-Sokkary, H. ve Galal, K., (2009). "Analytical Investigation of the Seismic Performance of RC Frames Rehabilitated Using Different Rehabilitation Techniques", *Engineering Structures*, 31: 1955-1966.
- [23] Baş, E.E., (2013). *Burkulması Önlenmiş Çaprazlı Çelik Çerçevelerde Büyütme Katsayısının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [24] Düzel, E., (2010). *Düşeyde Rijitlik Düzensizliği Bulunan Çerçevelerin Sönüm Elemanları ve Çelik Çaprazlar ile Rehabilitasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- [25] Toksoy, S., (2006). *Farklı Elemanlarla Rijitleştirilmiş Çerçeve Sistem Yapıların Lineer ve Lineer Olmayan Davranışlarının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [26] Sivritepe, S., (2011). *Çok Katlı Betonarme Yapılarda Yanal Rijitliği Arttırmada Kullanılan Yöntemler*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- [27] Lee, J. ve Fenves, G.L., (1998). "Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures", *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8): 892-900.
- [28] Phuvoravan, K., (2003). A Finite Element for the Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Slabs, Doktora Tezi, Faculty of Purdue University, Indiana.
- [29] Lale, E., (2011). Betonarme Elemanların Plastisite ve Hasar Mekaniği Esasları Kullanılarak Doğrusal Olmayan Analizi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] Wang, T. ve Hsu, T.T.C., (2001). "Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures Using New Constitutive Models", *Computers and Structures*, 79: 2781-2791.
- [31] Tezer, B. A., (2013). Damage Evaluation of Civil Engineering Structures Under Extreme Loadings, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [32] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. ve Onate, E., (1989). "A Plastic-Damage Model for Concrete", *International Journal Of Solids and Structures*, 25(3): 299-326.
- [33] Dede, T., (2009). Farklı Kriterler Kullanılarak Betonarme Kirişlerin Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Davranışının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [34] Alinoori, F., (2013). Rehabilitation and Strengthening of a Reinforced Concrete Building by Using Different Approaches, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [35] Çoşgun, T., (2001). Plak, Perde, Çerçeve ve Çekirdekten Oluşan Komple Yapı Sistemlerinin Nonlinear Çözümlemesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [36] Obaidat, Y.T., (2011). Structural Retrofitting of Concrete Beams Using FRP – Debonding Issues, Doktora Tezi, Department of Construction Sciences of Lund University, Lund.
- [37] Polat, Z., Doran, B. ve Köksal, H.O., (2000). "Drucker-Prager Akma Kriteri Kullanılarak Betonda Doğrusal Olmayan Davranışın İncelenmesi", *Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi*, 1(1): 1-10.
- [38] Grassl, P., Lundgren, K. ve Gylltoft, K., (2002). "Concrete in Compression: A Plasticity Theory with a Novel Hardening Law", *International Journal of Solids and Structures*, 39: 5205-5223.
- [39] Kazaz, Y., (1999). Farklı Rijitleştirici Elemanlara Sahip Deprem Etkisindeki Yapıların Lineer Olmayan Davranışlarının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [40] Özdemir, Y.I., (2001). Farklı Rijitleştirici Elemanlara Sahip Deprem Etkisindeki Yapıların Lineer Davranışlarının Zemini de Dikkate Alarak Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [41] Cumhuriyet, A., Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı Ders Notları, web.hitit.edu.tr/dosyalar/materyaller/alpercumhur@hititedutr161120154U1G3P4S.doc, 12 Ağustos 2016.

- [42] Değirmenci, N., Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, <https://bauarchitecture.files.wordpress.com/2012/05/depreme-dayanikli-yapi-tasarimi-6.pdf>, 12 Ağustos 2016.
- [43] Değirmenci, N., Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, <https://bauarchitecture.files.wordpress.com/2012/05/depreme-dayanikli-yapi-tasarimi-5.pdf>, 12 Ağustos 2016.
- [44] Çavdar, Ö., (2005). K Ve Dirsek Tipi Eğik Elemanlarla Rijitleştirilmiş Deprem Etkisindeki Yapıların Lineer Davranışlarının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [45] Doran, B., (2001). Boşluklu Perdelerin Elastik-Plastik Analizi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [46] Özer, E., (2009), Yapı Sistemlerinin Doğrusal Olmayan Analizi, <http://docplayer.biz.tr/4568622-Yapi-sdstemlerdndn-dogrusal-olmayan-analdzd.html>, 15 Ağustos 2016.
- [47] Çoşgun, T., (2003). “Yapı Sistemlerinin Doğrusal Olmayan Çözümlemesi İçin Bir Bilgisayar Programı”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2): 215-222.
- [48] Celep, Z., (2007). “Betonarme Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış: Plastik Mafsallı Kabulü ve Çözümleme”, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul.
- [49] ABAQUS 6.14. (2014). User’s Guide, Dassault Systèmes Simulia Corp.
- [50] Jankowiak, T., Lodygowski, T., (2005). “Identification of Parameters of Concrete Damaged Plasticity Constitutive Model”, Foundation of Civil and Environmental Engineering, 6: 53-69.
- [51] Jason, L., Pijaudier-Cabot, G., Huerta, A., Crouch, R. ve Ghavamian, S., An Elastic Plastic Damage Formulation for the Behaviour of Concrete, <http://framcos.org/FraMCoS-5/Jason.An.pdf>, 26 Ağustos 2016.
- [52] Zheng, F., Wu, Z., Gu, C., Bao, T. ve Hu, J., (2012). “A Plastic Damage Model for Concrete Structure Cracks with Two Damage Variables”, Science China Technological Sciences, 55(11): 2971-2980.
- [53] Tysmans, T., Wozniak, M., Remy, O. ve Vantomme, J., (2015). “Finite Element Modelling of the Biaxial Behaviour of High-Performance Fibre-Reinforced Cement Composites (HFRCC) Using Concrete Damaged Plasticity”, Finite Elements In Analysis and Design, 100: 47-53.
- [54] Kmiecik, P. ve Kaminski, M., (2011). “Modelling of Reinforced Concrete Structures and Composite Structures with Concrete Strength degradation Taken Into Consideration”, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 11(3): 623-636.
- [55] EN 1992-1-1, (2004). Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, European Committee for Standardization, Brussels.
- [56] Aydoğan, M., Yapı Sistemlerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, http://www.imogaziantep.org.tr/resimler/dosya_ekler/163b412846f30e4_ek.pdf, 01 Eylül 2016.

- [57] Rahmanian, N., (2003). Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Space Frames under Combined Actions, Yüksek Lisans Tezi, Faculty of Graduate Studies and Research of Carleton University, Ottawa.
- [58] Çilsalar, H. ve Aydın, K., (2013). “Dinamik Analiz Problemleri İçin Yeni Bir Adım Adım Sayısal Çözümleme Yöntemi”, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 25-27 Eylül 2013, Hatay.
- [59] T.C. Resmi Gazete, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. (26454), 06.03.2007.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet Safa AYDOĞAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 06.02.1988 – Konya
Yabancı Dili : İngilizce, Almanca
E-posta : safaaydogan@outlook.com
msafa@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İnşaat Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2017
Lisans	İnşaat Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Fen	Selçuklu Atatürk Anadolu Öğretmen Lisesi	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2015 –	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Aydoğan, M., S. ve Ayvaz, Y., (2016). “Comparative Study of Nonlinear Behavior of 3D Structures with Different Stiffening Members Subjected to Earthquake”, International Congress on Advanced Earthquake Resistant Structures, 26 Ekim 2016, Samsun.

