

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKSENEL BASINÇ KUVVETİ VE EĞİLME MOMENTİNİN  
BİLEŞİK ETKİSİ ALTINDAKİ KAFES ÖRGÜ ELEMANLI  
İKİ PARÇALI BASINÇ ELEMANLARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hüseyin Gazi AYDOĞAN**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yapı Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2019**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKSENEL BASINÇ KUVVETİ VE EĞİLME MOMENTİNİN  
BİLEŞİK ETKİSİ ALTINDAKİ KAFES ÖRGÜ ELEMANLI  
İKİ PARÇALI BASINÇ ELEMANLARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hüseyin Gazi AYDOĞAN  
(501151018)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yapı Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Cüneyt VATANSEVER**

**HAZİRAN 2019**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501151018 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hüseyin Gazi AYDOĞAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "EKSENEL BASINÇ KUVVETİ VE EĞİLME MOMENTİNİN BİLEŞİK ETKİSİ ALTINDAKİ KAFES ÖRGÜ ELEMANLI İKİ PARÇALI BASINÇ ELEMANLARI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Dr. Öğr. Üyesi Cüneyt VATANSEVER** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Cavidan YORGUN** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Edip SEÇKİN** .....  
İstanbul Kültür Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : 3 Mayıs 2019  
**Savunma Tarihi** : 12 Haziran 2019





*Aileme ve arkadaşlarıma,*



## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, eksenel basınç kuvveti ve eğilme momentinin bileşik etkisi altındaki kafes örgü elemanlı iki parçalı basınç elemanlarına ilişkin mevcut tasarım yaklaşımları incelenerek Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği (ÇYTHYE) 2018 kapsamında yer alacak şekilde değerlendirilmek üzere, esasları Avrupa standartlarına dayanan bir tasarım yaklaşımı sunulmakta ve farklı tasarım özellikleri içeren bu tür iki parçalı elemanların tekrarlı tersinir yatay yükler altında davranışları araştırılmaktadır.

Tez çalışmamın tüm süreçlerinde bana kıymetli vaktini ayıran, çalışmam boyunca engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Cüneyt VATANSEVER'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Kendisinin ilgi, özveri ve desteği sayesinde çalışmam nihayetlenmiştir. Tez jürimde olmayı kabul ederek değerli vaktini ayıran Prof. Dr. Cavidan YORGUN ve Dr. Öğr. Üyesi Edip SEÇKİN'e çok teşekkür ederim. Ayrıca, tez çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Adem KARASU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışma sürecimde ve meslek hayatımda, yardımlarını esirgemeyen ve yüksek lisans çalışmalarım boyunca beni her zaman destekleyen ve yanımda olan İnş. Yük. Müh. Efkan ARSLAN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Profesyonel mühendislik hayatımda kıymetli bilgilerini benimle paylaşan ve yüksek lisans çalışmalarım bana yol gösteren ve destekleyen İnş. Yük. Müh. Serhan BAKIR, İnş. Yük. Müh. Mücahit BEKİN ve İnş. Yük. Müh. Onur CAN'a teşekkür ederim. Tez çalışmalarım sırasında, bana gösterdiği ilgi ve alaka sayesinde çalışma motivasyonu bulabildiğim ve her konuda destek olan kıymetli arkadaşım Şirin ALTINIŞIK'a çok teşekkür ederim.

Bugüne kadar her türlü fedakârlıktan kaçınmayarak bana destek olan sevgili aileme, bana hep doğru yolu gösterdikleri ve beni bugünlere kadar getirdikleri için sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2019

Hüseyin Gazi AYDOĞAN  
İnşaat Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
SEMBOLLER .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY .....	xxv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Amacı .....	3
1.2 Çalışmanın Kapsamı .....	4
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>7</b>
2.1 Yapma Enkesitli Kolonlar Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	7
2.2 Kafes Örgü Elemanlı Yapma Enkesitli Kolonların Sismik Davranışı Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	9
2.3 Kafes Örgü Elemanlı Yapma Enkesitli Kolonlar Üzerine Yönetmelikler .....	10
<b>3. YAPMA ENKESİTLİ KOLONLARIN EKSENEL BASINÇ KUVVETİ VE EĞİLME MOMENTİNİN ORTAK ETKİSİ ALTINDA TASARIMI .....</b>	<b>13</b>
3.1 Tasarım Yaklaşımlarının Değerlendirilmesi .....	13
3.1.1 Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği 2018 (ÇYTHYE 2018)'e göre yapma enkesitli basınç elemanları.....	13
3.1.2 Eurocode 3 (EC 3)'e göre yapma enkesitli kolonların aksenal basınç kuvveti ve eğilme momenti etkisinde incelenmesi.....	16
3.1.3 Çin Çelik Yapılar Yönetmeliği (GB 50017–2003)'e göre yapma enkesitli kolonların aksenal basınç kuvveti ve eğilme momenti etkisinde incelenmesi .....	25
3.2 Tasarım Yaklaşımlarının Yapma Enkesitli Kolon Örnekleri Üzerinde İncelenmesi .....	27
3.2.1 Yapma enkesitli iki ucu mafsallı bir kolon ile bir konsol kolonun sonlu eleman modelleri .....	27
3.2.2 ÇYTHYE 2018, EC 3 ve GB 50017–2003 esaslarının değerlendirilmesi	29
3.3 ÇYTHYE 2018 İçin Esas Alınacak Tasarım Yaklaşımı ve Bir Örnek Kolon Üzerinde Değerlendirilmesi.....	43
<b>4. YAPMA ENKESİTLİ KOLONLARIN SABİT DÜŞEY YÜK VE TEKRARLI TERSİNİR YATAY YÜKLERİN ORTAK ETKİSİNDE DAVRANIŞI .....</b>	<b>53</b>
4.1 Sonlu Eleman Modeli .....	53
4.2 Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması .....	63
4.3 Sabit Düşey yük ve Tekrarlı Tersinir Yatay Yüklerin Ortak Etkisindeki Farklı Özelliklere Sahip Yapma Enkesitli Kolonların Davranışının İncelenmesi .....	65

4.3.1 Yapma enkesitli tipik konsol kolonların özelliklerinin belirlenmesi .....	66
4.3.2 Tipik konsol kolonların ÇYTHYE 2018 esas alınarak tasarımı .....	72
4.3.3 Tipik konsol kolonların önerilen esaslara göre eksenel basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisindeki tasarımı .....	73
4.3.4 Tipik konsol kolonların sonlu eleman modelleri.....	78
<b>5. SONLU ELEMAN MODELLERİNİN ANALİZİ VE ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....</b>	<b>83</b>
5.1 Önerilen Tasarım Yaklaşımının Sonlu Eleman Modellerinin Analiz Sonuçlarına Göre Değerlendirilmesi .....	83
5.2 Farklı Sabit Eksenel Basınç Kuvveti (Düşey Yük) Seviyelerinin Davranışa Etkisi .....	84
5.3 Farklı Açılarla Yerleştirilen Örgü Elemanlarının Davranışa Etkisi .....	90
5.4 Farklı Yükseklikte Bağ Levhalarının Kullanılmasının Davranışa Etkisi .....	93
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>97</b>
6.1 Sonuçlar.....	97
6.2 Öneriler.....	98
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>101</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>103</b>

## **KISALTMALAR**

<b>AISC</b>	: American Institute of Steel Construction
<b>AS-4100</b>	: Australian Standart for the Design of Steel Structures
<b>ASD</b>	: Allowable Stress Design
<b>CSA S16-01</b>	: Canadian Standards Association
<b>ÇYTHYE 2018</b>	: Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları 2018
<b>EC 3</b>	: Eurocode 3 1993-1-1: 2005
<b>GB 50017–2003</b>	: Çin Çelik Yapılar Yönetmeliği
<b>LRFD</b>	: Load and Resistance Factor Design
<b>TBDY 2018</b>	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018



## SEMBOLLER

- a** : Profil üzerindeki bağlantı elemanlarının aralığı
- A<sub>ch</sub>** : EC 3'e göre profillerden birinin enkesit alanı
- A<sub>d</sub>** : EC 3'e göre örgü elemanlarının enkesit alanı
- A<sub>Lc</sub>** : Örgü elemanlarının enkesit alanı
- A<sub>1</sub>** : Profillerden birinin enkesit alanı
- d** : EC 3'e göre örgü elemanının uzunluğu
- E** : Elastisite modülü
- e** : Profil eksenleri arasındaki uzaklık
- e<sub>0</sub>** : EC 3'e göre geometrik ön kusur
- h<sub>0</sub>** : EC 3'e göre profil eksenleri arasındaki uzaklık
- I<sub>e</sub>** : Yapma enkesitli elemanın etkin atalet momenti
- I<sub>eff</sub>** : EC 3'e göre yapma enkesitli elemanın etkin atalet momenti
- i** : Basınç elemanı enkesitinin burkulma eksenini etrafındaki atalet yarıçapı
- i<sub>i</sub>** : Profillerden birinin minimum atalet yarıçapı
- K<sub>i</sub>** : Profil yerleşimine göre belirlenen katsayı
- L** : Yapma enkesitli elemanın uzunluğu
- L<sub>b</sub>** : Örgü elemanın uzunluğu
- (L/i)<sub>m</sub>** : Etkin narinlik oranı
- (L/i)<sub>o</sub>** : Enkesiti oluşturan parçaların tek parça gibi davrandığı varsayımıyla hesaplanan, elemanın burkulma eksenini etrafındaki narinlik oranı
- M<sub>G</sub>** : Sabit yüklerden altında meydana gelen eğilme momenti
- M<sub>u</sub>** : YDKT'ye göre, ikinci mertebe etkileri içeren gerekli eğilme momenti dayanımları

**$M_a$**  : GKT'ye göre, ikinci merteye etkileri içeren gerekli eğilme momenti dayanımları

**$M_{Ed}$**  : EC 3'e göre yapma enkesitli kolon elemanına etkileyen ve ikinci merteye etkileri içeren eğilme momenti

**$M_{Ed}^I$**  : EC 3'e göre yapma enkesitli kolon elemanına etkileyen ve ikinci merteye etkileri içermeyen eğilme momenti

**$n$**  : Örgü elemanlarının düzlem sayısı

**$N_{b,Ed}$**  : EC 3'e göre profillerden biri için hesaplanan burkulma dayanımı

**$N_{ch,Ed}$**  : EC 3'e göre profillerden biri için hesaplanan gerekli burkulma dayanımı

**$N_{cr}$**  : EC 3'e göre etkin burkulma yükü

**$N_{Ed}$**  : EC 3'e göre elemana etkileyen aksel basınç kuvveti

**$P_e$**  : Etkin burkulma yükü

**$P_G$**  : Sabit yüklerden altında meydana gelen aksel basınç kuvveti

**$P_u$**  : Yapma enkesitli elemanın ana parçalarından birinde oluşan, YDKT'ye göre gerekli basınç kuvveti dayanımı

**$P_a$**  : Yapma enkesitli elemanın ana parçalarından birinde oluşan, GKT'ye göre gerekli basınç kuvveti dayanımı

**$S_v$**  : EC 3'e göre örgü elemanlı yapma enkesitlerin kesme rijitliği

**$\beta_v$**  : Örgü elemanlı yapma enkesitlerin kesme rijitliği

**$\Delta$**  : Geometrik ön kusur

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 4.1 : Çalışmada kullanılan elemanların malzeme özellikleri.....	55
Çizelge 4.2 : Sonlu eleman modelinde kullanılan elastik malzeme özellikleri. ....	56
Çizelge 4.3 : Sonlu eleman modelinde kullanılan kinematik malzeme özellikleri....	60
Çizelge 4.4 : Deneysel çalışma yapılan elemanların tipleri ve isimleri.....	60
Çizelge 4.5 : E12 tipi elemanların deney sonuçlarındaki veriler [19]. ....	63





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Yapma enkesitli kolon profillerinin yerleşim örnekleri [1].....	1
Şekil 1.2 : Endüstri yapılarında yapma enkesitli kolonlarının kullanım örnekleri [2].	2
Şekil 1.3 : Bağlantı elemanlarının düzenine göre yapma enkesitli kolon tipleri [1].	3
Şekil 3.1 : Çok parçalı basınç elemanlarının geometrik sınır koşulları, ÇYTHYE Uygulama Klavuzu 2018 Örnek 8.5 [23].	15
Şekil 3.2 : Örgü elemanlı ve bağ levhalı yapma enkesitli kolon örnekleri [5].	16
Şekil 3.3 : Farklı düzenlerde yerleştirilmiş örgü elemanlı yapma enkesitli kolonlar için kesme rijitliği [5].	17
Şekil 3.4 : İki ucu mafsallı ve uç noktalarından desteklenen elemanın kesme, moment ve ikinci merteye etkileri [24].	19
Şekil 3.5 : Kesme kuvvetinin etkin burkulma yükü altındaki elemana etkisi [24].	21
Şekil 3.6 : V-tipi örgü elemanlı yapma enkesitli kolonun şekildeğiştirmesi [24].	22
Şekil 3.7 : K-tipi örgü elemanlı yapma enkesitli kolonun şekildeğiştirmesi [24].	23
Şekil 3.8 : X-tipi örgü elemanlı yapma enkesitli kolonun şekildeğiştirmesi [24].	23
Şekil 3.9 : Geometrik ön kusurun eleman üzerindeki etkisi [24].	24
Şekil 3.10 : Yapma enkesitli kolonun plan gösterimi [6].	26
Şekil 3.11 : Farklı tasarım yaklaşımlarının değerlendirilmesi için oluşturulan elemanın geometrik özellikleri ve sonlu eleman modeli [23].	27
Şekil 3.12 : EC 3 ve GB 50017–2003 tasarım yaklaşımlarını değerlendirebilmek için için farklı tipte yüklemelere sahip sonlu eleman modelleri.	29
Şekil 3.13 : EC 3 ve GB 50017–2003 tasarım yaklaşımlarına göre düzenlenmiş farklı tipte yüklemelere sahip sonlu eleman modelleri.	30
Şekil 3.14 : İki ucu mafsallı yapma enkesitli kolonun profillerinden birinde elde edilen maksimum aksenal basınç kuvveti.	32
Şekil 3.15 : İki ucu mafsallı ve uç noktalarından desteklenen yapma enkesitli kolonun üst bölgesindeki örgü elemanlarının aksenal basınç kuvvetleri.	35
Şekil 3.16 : İki ucu mafsallı ve uç noktalarından desteklenen yapma enkesitli kolonun alt bölgesindeki örgü elemanlarının aksenal basınç kuvvetleri.	36
Şekil 3.17 : Yapma enkesitli konsol kolonun profillerinden birinde elde edilen maksimum aksenal basınç kuvveti.	38
Şekil 3.18 : Yapma enkesitli konsol kolonun kafes örgü elemanlarda elde edilen aksenal basınç kuvvetleri.	42
Şekil 4.1 : Deneysel çalışma yapılan elemanların kesit görünüşü [19].	54
Şekil 4.2 : Deneysel çalışma yapılan elemanların tipik plan görünüşü [19].	54
Şekil 4.3 : E12-P35 numunesinin sonlu eleman modeli.	55
Şekil 4.4 : Yarım döngü verileri yöntemi [26].	56
Şekil 4.5 : Dengelenmiş döngü verileri yöntemi [26].	57
Şekil 4.6 : İzotropik Pekleşme Döngüsü [26].	58
Şekil 4.7 : Tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmeler altındaki gerilme – şekildeğiştirme grafiği [17].	59

<b>Şekil 4.8</b> : ATC 24'te tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmelerin tanımı [28].	61
<b>Şekil 4.9</b> : Sonlu eleman modelindeki tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmeleri	62
<b>Şekil 4.10</b> : Deney düzeneğinde sabit aksenal basınç kuvvetini aktaran sistemin diyagonalleşmesi ile oluşan yatay etki [19].	62
<b>Şekil 4.11</b> : E12 tipleri için yatay yük–yerdeğiştirme grafiği [19].	63
<b>Şekil 4.12</b> : E12-P35 tipi için deneysel sonuçlar ile sonlu eleman analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet – yerdeğiştirme grafiklerinin karşılaştırılması.	64
<b>Şekil 4.13</b> : Elemanların deney sonucundaki göçme modları [19].	64
<b>Şekil 4.14</b> : Sonlu eleman analiz sonuçlarında elde edilen göçme modu.	65
<b>Şekil 4.15</b> : Farklı düşey yük seviyelerine sahip yapma enkesitli kolonun kesit ve plan görünüşleri.	67
<b>Şekil 4.16</b> : Farklı açılarla yerleştirilmiş örgü elemanlarından oluşan yapma enkesitli kolon kesitlerinin karşılaştırılması.	70
<b>Şekil 4.17</b> : Farklı yükseklikteki bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli kolon kesitlerinin karşılaştırılması.	71
<b>Şekil 4.18</b> : Sırasıyla Model–P, Model–Açı ve Model–Bağ olarak isimlendirilen sonlu eleman modelleri.	78
<b>Şekil 4.19</b> : İtme analizinden elde edilen kuvvet – yerdeğiştirmesi.	80
<b>Şekil 4.20</b> : ATC 24'e [28] uygun tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmeler.	80
<b>Şekil 4.21</b> : Yapma enkesitli konsol kolonun birinci burkulma modu.	81
<b>Şekil 5.1</b> : Yapma enkesitli referans konsol kolon modelinin göçme modu.	83
<b>Şekil 5.2</b> : Yapma enkesitli referans konsol kolon modelinin burkulma yükü.	84
<b>Şekil 5.3</b> : %10 P sabit basınç yüküne sahip modelin kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.	85
<b>Şekil 5.4</b> : %20 P sabit basınç yüküne sahip modelin kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.	85
<b>Şekil 5.5</b> : %30 P sabit basınç yüküne sahip modelin kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.	85
<b>Şekil 5.6</b> : %40 P sabit basınç yüküne sahip modelin kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.	86
<b>Şekil 5.7</b> : %50 P sabit basınç yüküne sahip modelin kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.	86
<b>Şekil 5.8</b> : %60 P sabit basınç yüküne sahip modelin kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.	86
<b>Şekil 5.9</b> : %70 P sabit basınç yüküne sahip modelin kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.	87
<b>Şekil 5.10</b> : Farklı seviyelerde sabit basınç yüküne sahip sonlu eleman modellerinin kuvvet – yerdeğiştirme grafiklerinin karşılaştırılması.	87
<b>Şekil 5.11</b> : Farklı seviyelerde sabit basınç yüküne sahip sonlu eleman modellerinin iskelet eğrilerinin karşılaştırılması.	88
<b>Şekil 5.12</b> : Farklı seviyelerde sabit basınç yüküne sahip sonlu eleman modellerinin enerji eğrilerinin karşılaştırılması.	88
<b>Şekil 5.13</b> : Farklı seviyelerde sabit aksenal basınç kuvvetlerine sahip yapma enkesitli elemanların göçme modları.	89
<b>Şekil 5.14</b> : 60° açı ile yerleştirilen örgü elemanlı yapma enkesitli konsol kolonun kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.	90
<b>Şekil 5.15</b> : 48° açı ile yerleştirilen örgü elemanlı yapma enkesitli konsol kolonun kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.	90
<b>Şekil 5.16</b> : Farklı açılarla yerleştirilen örgü elemanlarına sahip sonlu eleman modellerinin kuvvet – yerdeğiştirme grafiklerinin karşılaştırılması.	91
<b>Şekil 5.17</b> : Farklı açılarla yerleştirilen örgü elemanlarına sahip sonlu eleman modellerinin iskelet eğrilerinin karşılaştırılması.	91
<b>Şekil 5.18</b> : Farklı açılarla yerleştirilen örgü elemanlarına sahip sonlu eleman modellerinin enerji eğrilerinin karşılaştırılması.	92
<b>Şekil 5.19</b> : Farklı açılardaki örgü elemanlarına sahip elemanların göçme modları.	92

<b>Şekil 5.20</b> : 200mm yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonun kuvvet–yerdeğiştirme grafiği. ....	93
<b>Şekil 5.21</b> : 100mm yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonun kuvvet–yerdeğiştirme grafiği. ....	93
<b>Şekil 5.22</b> : Farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonların kuvvet – yerdeğiştirme grafiklerinin karşılaştırılması. ....	94
<b>Şekil 5.23</b> : Farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonların iskelet eğrilerinin karşılaştırılması. ....	94
<b>Şekil 5.24</b> : Farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonların enerji eğrilerinin karşılaştırılması. ....	95
<b>Şekil 5.25</b> : Farklı yükseklikte bağ levhaları elemanların göçme modları. ....	95
<b>Şekil 5.26</b> : Farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonların von mises gerilme diyagramlarının karşılaştırılması. ....	96





## **EKSENEL BASINÇ KUVVETİ VE EĞİLME MOMENTİNİN BİLEŞİK ETKİSİ ALTINDAKİ KAFES ÖRGÜ ELEMANLI İKİ PARÇALI BASINÇ ELEMANLARI**

### **ÖZET**

Günümüzde endüstri yapılarının tasarımında büyük açıklıkların geçilmesi kaçınılmaz olmaktadır. Çelik yapılarda gördüğümüz bu geniş açıklıklar genellikle kafes kiriş sistemler kullanılarak geçilmektedir. Büyük açıklıkların olması durumunda, her bir kolon tarafından paylaşılan düşey yük değeri de yapının kullanım amacına bağlı olarak büyük değerlere ulaşabilmektedir. Bununla birlikte, yatay kuvvetler (deprem ve rüzgâr etkileri) altında oluşan etkiler de düşey yük ile birlikte yeterli dayanım ve rijitliğe sahip kolonlar tarafından güvenle aktarılabilir. Basınç kuvvetinin büyük olduğu durumlarda dolu gövdeli hadde profillerinin kullanılması halinde, genel olarak zayıf eksen etrafındaki eğilmeli burkulma sınır durumu mevcut dayanımın belirlenmesinde etkin olmaktadır. Bu nedenle, iki adet profilin örgü elemanları ve bağ levhaları kullanılarak birleştirilmesiyle elde edilen yapma enkesitli kolonlar, daha ekonomik çözümler sağlayabilmektedir.

Yapma enkesitli kolonlar, ekonomik olması ve büyük basınç kuvveti dayanımına sahip olmaları nedeniyle, genellikle büyük düşey yük etkisindeki elemanların enkesitleri olarak kullanılmaktadır. Özellikle kren girişini taşıyan yapı cephesindeki yapma enkesitli kolonlar, deprem ve rüzgârın oluşturduğu etkiler nedeniyle, eksenel basınç kuvvetleri ile eğilme momentinin ortak etkisi altında kalmaktadır. Bu kolonlar, profillerin birbirlerine bağ levhası veya kafes örgü elemanları ile bağlanmasına göre iki farklı tipe sahiptir.

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne göre yapma enkesitli kolonlar, en az iki uçta bağ levhalarının kullanıldığı örgü elemanları ile sadece eksenel basınç kuvveti etkisi altında boyutlandırılabilir. Ancak deprem ve rüzgârın yatay etkileri altında bu tür kolonların, eksenel kuvvetler ile eğilme momentinin ortak etkisi altında boyutlandırılması gerekmektedir. Henüz ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği bu ortak etki için tasarım esaslarını içermemektedir.

Bu çalışma kapsamında, eksenel basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisi altındaki yapma enkesitli elemanlar için tasarım esasları içeren Eurocode 3 (EC 3) ve Çin Çelik Yapılar Yönetmeliği (GB 50017 – 2003) incelenerek, bu dokümanlardaki tasarım yaklaşımları araştırılmış ve ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8 kapsamında yer alacak şekilde değerlendirilmek üzere, esasları EC 3'e dayanan bir tasarım yaklaşımı sunulmuştur.

Tasarım yaklaşımları, sonlu eleman modelleri kullanılarak da değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda, EC 3'te verilen tasarım esaslarının sonuçları ile sonlu eleman analizlerinin sonuçlarının yeterince uyumlu olduğu görülmüştür. Bu inceleme kapsamında iki ucu mafsallı bir kolon ile bir konsol kolonun sonlu eleman modelleri kullanılmıştır. Esas alınan tasarım yaklaşımının uygulama adımları, ÇYTHYE 2018

Yönetmeliği gözetilerek düzenlenmiş ve bir öneri olarak sunulmuştur. Önerilen tasarım yaklaşımı örnek bir kolon üzerinde ayrıca değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında, bir tasarım yaklaşımının önerilmesinin yanı sıra, kafes örgü elemanlı yapma enkesitli kolonların tekrarlı tersinir yatay yükler altındaki davranışları da farklı parametreler esas alınarak araştırılmıştır. Bu parametreler, aksel basınç kuvveti seviyesi, örgü elemanlarının düşey aksle yaptığı açı ve bağ levhalarının yüksekliği olarak belirlenmiştir. Yapma enkesitli tipik elemanların tekrarlı tersinir yatay yükler altında davranışları, her bir parametre için süneklik, dayanım ve rijitlik, enerji sönümlene kapasitesi ve göçme modu açısından değerlendirilmektedir.

Yapma enkesitli kolonların sabit düşey yük ve tekrarlı tersinir yatay yüklerin ortak etkisinde davranışlarının araştırılabilmesi amacıyla, ilk olarak sonlu eleman modeli için doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yapma enkesitli kolonların deneysel sonuçlarını içeren yayınlardan yararlanılmıştır. Yapısal çeliğin tekrarlı yükler altında malzeme olarak davranış modeli, deneysel sonuçlar ile sonlu eleman analizlerinin sonuçları karşılaştırılarak oluşturulmuştur. Sonuçlar arasındaki uyum, malzeme davranışı tanımındaki ilgili parametrelerin uygun şekilde seçilmesi ile sağlanmıştır.

Yapma enkesitli kolonların tekrarlı yatay yükler altında davranışlarının araştırılması amacıyla gözönüne alınan parametrelerin etkilerinin inceleneceği üç farklı tipik konsol kolonun geometrik özellikleri ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne göre belirlenmiştir. Bu kolonların karakteristik aksel basınç kuvveti dayanımları için ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği esas alınmıştır. Kolonların tasarımı, belirli sabit aksel basınç kuvveti ile eğilme momentinin ortak etkisi altında gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlar, sonlu eleman modellerinin sonuçlarına göre değerlendirildiğinde önerilen tasarım yaklaşımının uygulanabilir olduğu görülmektedir.

Belirli seviyelerdeki sabit düşey yükler ile tekrarlı tersinir yatay yükler altında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda, düşey yük seviyesi arttıkça süneklik, dayanım ve enerji sönümlene kapasitelerinin azaldığı, başlangıç rijitliğinin değişmediği gözlenmiştir.

Örgü elemanlarının düşey aksle yaptığı açının  $60^\circ$  den küçük olduğu sonlu eleman modelinin, süneklik, dayanım, başlangıç rijitliği ve enerji sönümlene kapasitesi bakımından,  $60^\circ$  açıyla yerleştirilen örgü elemanlı model ile benzer bir davranış sergilediği, ancak dayanımın artan yerdeğiştirme ile birlikte daha büyük kayıplar göstererek azaldığı görülmüştür.

Bağ levhalarının yüksekliğinin 100mm olduğu modelin analiz sonuçları değerlendirildiğinde, 200mm yüksekliğindeki bağ levhalarının kullanıldığı modele göre, daha yüksek bir dayanım ve başlangıç rijitliği elde edildiği görülmektedir. Ayrıca benzer bir sünek davranış göstermeleriyle birlikte, enerji sönümlene kapasitesinin arttığı gözlenmektedir. Bu farklılığın tabandaki kısa bağ levhası nedeniyle, taban levhası için kullanılan rijitlik levhalarının, dayanım ve rijitlik ile enerji sönümlene kapasitesine olan katkısından kaynaklanmaktadır.

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği gözetilerek önerilen tasarım yaklaşımı, aksel kuvvet ile eğilme momentinin ortak etkisi altındaki yapma enkesitli kolonların boyutlandırılmasını kapsamaktadır. Yapma enkesitli bu tür kolonlarda kesme kuvvetleri, kafes örgü elemanlarının aksel kuvvetleri olarak aktarıldığından, örgü elemanlarının aksel basınç ve çekme kuvveti dayanımları boyutlandırma aşamasında etkili olmaktadır.

Sonuç olarak, özellikle örgü elemanları ve bağ levhalarının yerleşim düzenlerinin, yapma enkesitli kolonların doğrusal olmayan davranışına etkileri üzerine deneysel ve nümerik çalışmaların genişletilmesi önerilebilir. Ayrıca, yapma enkesitli bu tür kolonlar için öngörülen diğer geometrik esasların da benzer sonlu eleman analizleri gerçekleştirilerek incelenmesi önerilmektedir.





# **BUILT-UP COMPRESSION MEMBERS COMPOSED OF TWO SHAPES INTERCONNECTED BY LACING BARS UNDER COMBINED AXIAL COMPRESSION AND FLEXURE**

## **SUMMARY**

Today's design of the industrial buildings involves beams and girders with very long spans. These long spans we see in the steel structures are generally accomplished by using trusses. In case of long spans, load demand that needs to be carried by columns, increases to high values based on the building type. In addition to this, lateral (earthquake and wind effects) and gravitational loads need to be reliably transmitted by columns with sufficient strength and rigidity. In cases where the lateral load is high, the flexural buckling limit state in weak axis would control the strength of I-shape columns. Consequently, built-up I-shape columns using lacing bars and tie plates can provide a more economical solution.

Due to their economy and high axial load capacities, the built-up columns are used for very high load demands. Especially built-up columns on the facade carrying the crane girder, are under the influence of axial compression forces and flexural moments due to the effects of earthquake and wind. These columns have two different types depending on the main profiles that are connected to each other by tie plate or lacing bars.

The built-up columns according to the Specification of ÇYTHYE 2018 may be designed only under the influence of axial compression forces with lacing bars using tie plates at least on two ends. Nevertheless, under the horizontal effects of earthquake and wind, such columns should be designed under the influence of their flexural moment with axial load. The Specification of ÇYTHYE 2018 does not include any design provision for combination of flexural moment and axial load.

Within the scope of this study, Eurocode 3 (EC 3) and China Steel Structures Regulation (GB 50017 - 2003), which includes design principles for built-up columns lacing bars under combined compression and flexure, have been examined and their design approaches have been researched and in Chapter 8 of the Specification of ÇYTHYE 2018, a design approach based on EC 3 is presented for evaluation.

The design approaches were also evaluated by using finite element models. As a result of this evaluation, it has been seen that the results of the design basis given in EC 3 and the results of the finite element analysis were sufficiently compatible. Within this scope of the study, finite element models of both end pinned column and a cantilever column are used. The implementation steps of the underlying design approach have been prepared and presented as a suggestion, taking into account the Specification of ÇYTHYE 2018. Also, the proposed design approach was evaluated separately on a sample column.

In the scope of work, in addition to proposing a design approach, the behavior of lacing bars built-up columns with cage mesh elements under lateral cyclic loads have also been researched based on different parameters. These parameters are determined as the axial compression force level, the angle of the lacing bars with the vertical axis and the height of the tie plates. The behavior of the typical built-up columns under lateral cyclic loads is evaluated for each parameter in terms of ductility, strength and stiffness, energy absorption capacity and collapse mode.

On the purpose of investigating the behavior of the built-up columns under axial loads and cyclic lateral loads a finite element model has been performed for verification. In this study, publications that contain experimental results of built-up columns were used.

The hysteresis model as material of structural steel under cyclic loads was determined by comparing the results of experimental results and finite element analysis results. The correlation between the results is provided by selecting the relevant parameters in the material hysteresis definition.

The geometric characteristics of three different typical cantilever columns in which the effects of the parameters taken into consideration in order to investigate the behavior of the built-up columns under lateral cyclic loads are determined according to the Specification of ÇYTHYE 2018. The characteristic axial compression forces of these columns are based on the Specification of ÇYTHYE 2018.

The design of the columns have been carried out under the influence of certain fixed axial compression forces and flexural moment. When these designs are evaluated according to the results of the finite element models, it has been seen that the proposed design approach is applicable.

As a result of nonlinear analysis performed with constant vertical loads at certain levels with lateral cyclic loads, it has been observed that as the vertical load level increases ductility, strength and energy absorption capacities decreases and the initial rigidity does not change.

The finite element model of which the lacing bars are placed at an angle less than  $60^\circ$  with the vertical axis, behaves similar to the lacing bar placed at  $60^\circ$  angle in terms of ductility, strength, initial rigidity and energy absorption capacity, but it has been observed that the resistance decreases by showing greater losses with increasing displacement.

The comparison between models with 100mm long tie plates and 200mm long tie plates shows that the model with 100mm long tie plates has higher strength and initial rigidity than the other model. Even though two models show similar ductility, the model with 100mm long tie plates presents higher energy absorption capacity. This difference is due to the contribution of the short stiffeners used for the base plate to the strength, initial stiffness and energy dissipation capacity.

The proposed design approach, considering the Specification of ÇYTHYE 2018 involves to be designed built-up columns under combined axial compression and flexure. Shear forces in these built-up columns act like axial forces in the lacing bars, for this reason axial compression and tension capacities of lacing bars are controlling factor in the design process of built-up columns.

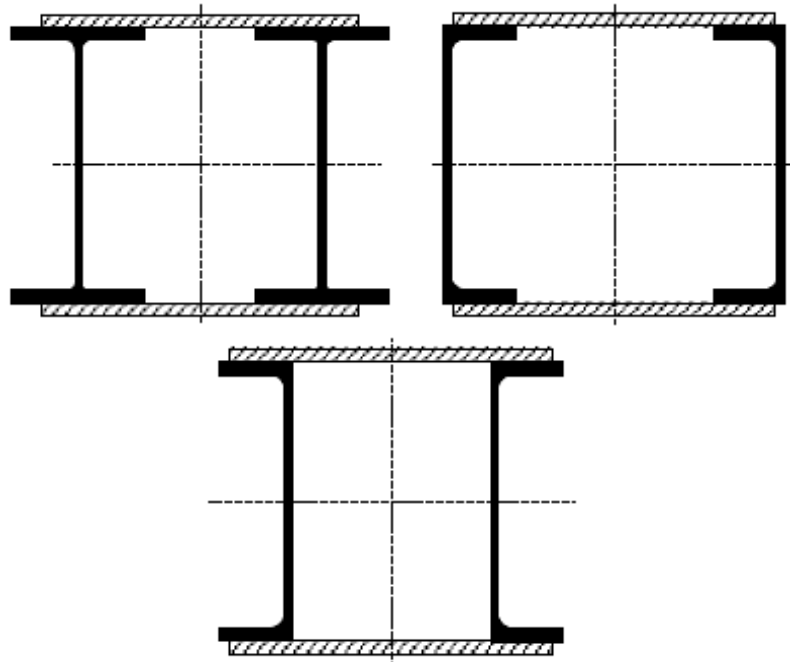
In conclusion, a non-linear effect of lacing and tie bars configuration can be studied using numerical and experimental models. It is also recommended that the other geometric principles can be studied for such built-up columns by performing similar finite element analysis.





## 1. GİRİŞ

Yapı mühendisliğinin amacı; yapıları belirli bir güvenlik, yeterli bir rijitlik ve en ekonomik olarak boyutlandırmaktır. Belirli güvenlik, yönetmeliklerdeki sınır değerleri sağlayarak; yeterli rijitlik, gerekli dayanım ve sehim şartlarını sağlayarak; ekonomiklik ise güvenli tarafta kalmak şartıyla boyutları en az maliyetli bir biçimde belirlemek olarak tanımlanabilir. Geniş açıklıklı ve kat yüksekliğinin fazla olduğu çelik yapılarda, kolon profilleri için dolu gövdeli hadde profilleri seçilmiş olsa da genellikle elemandaki yüksek aksenal basınç kuvvetinden dolayı burkulma dayanımı yetersiz kalabilmektedir. Bunun için, kolunun iki yöndeki rijitliğini ve dayanımını arttırabilmek amacıyla çok parçalı yapma enkesitli kolonlar kullanılmaktadır. Yapma enkesitli kolonlar, iki profilin birbirlerine kafes örgü elemanları ve bağ levhaları ile bağlanması şeklinde teşkil edilebilmektedir. Bu şekilde, dolu gövdeli hadde profillerine göre daha hafif enkesitler oluşturabilmek mümkün olabilmektedir. Genellikle, yapma enkesitli kolonlar oluşturulurken, Şekil 1.1'deki gibi, ana profil olarak I veya U profilleri tercih edilmektedir.



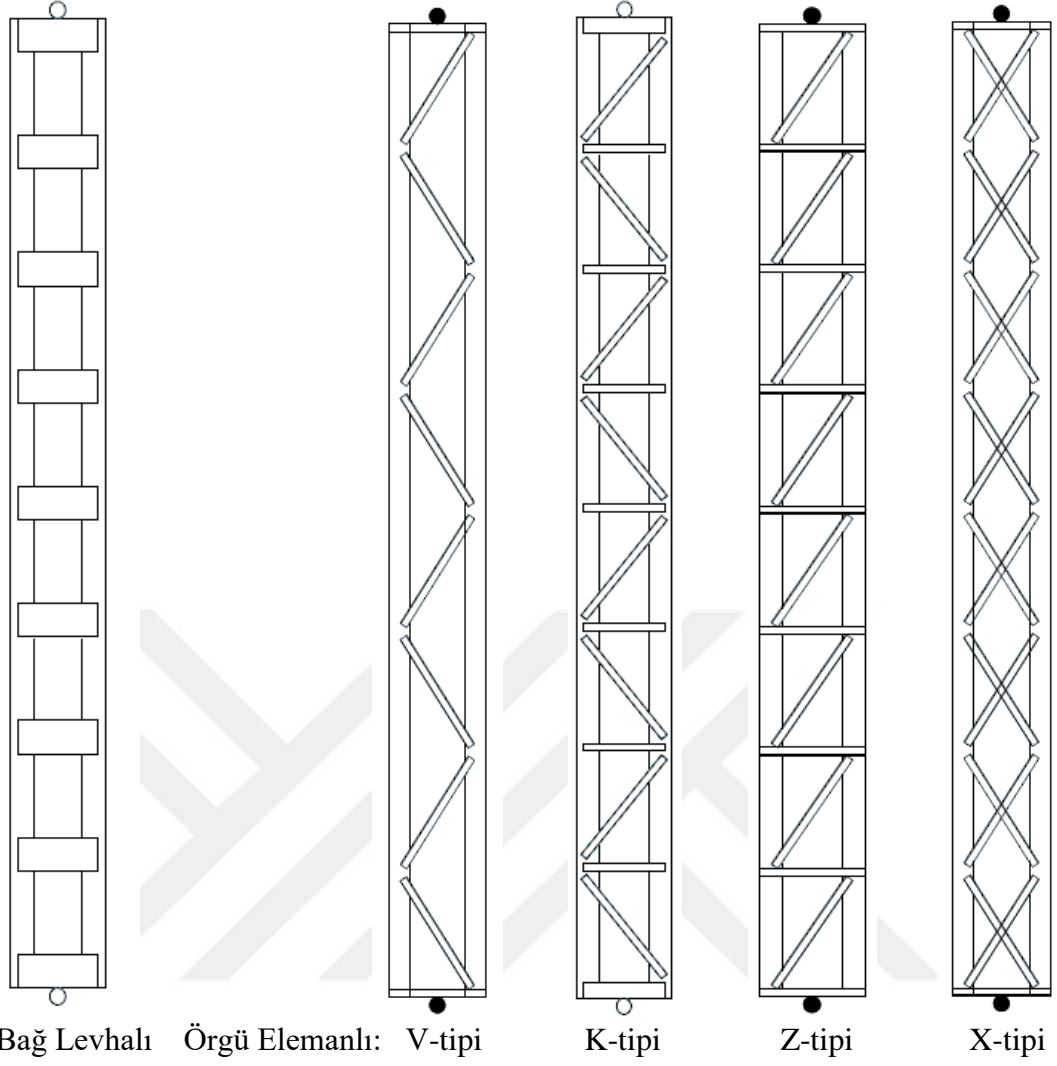
Şekil 1.1 : Yapma enkesitli kolon profillerinin yerleşim örnekleri [1].

Yapma enkesitli kolonlar genellikle, endüstri yapılarında, burkulma boylarının fazla olduğu kenar kolonlar olarak veya Şekil 1.2'deki gibi kren kirişini taşıyan kolonlar olarak kullanılmaktadır. Yapma enkesitli kolonların sahip oldukları büyük basınç kuvveti dayanımları kayma şekildeğiştirmelerinden fazlasıyla etkilenmektedir. Bu nedenle basınç kuvveti dayanımını etkileyen birinci faktör, zayıf eksendeki atalet momentidir. Bu atalet momentini, profil eksenleri arasındaki mesafenin artması ile artmaktadır. Mesafenin artması ile levha ağırlıkları da artacağından en uygun mesafe belirlenerek tasarım yapılması gerekmektedir.



**Şekil 1.2 :** Endüstri yapılarında yapma enkesitli kolonlarının kullanım örnekleri [2].

Genel olarak yapma enkesitli kolonlar, profillerin birbirlerine bağ levhası veya kafes örgü elemanları ile bağlanmasına göre iki farklı tipe sahiptir. Bağ levhaları ile oluşturulan yapma enkesitli kolonlarda, profiller düz levhalar ile belirli aralıklarda birbirine bağlanmaktadır. Kafes örgü elemanları ile oluşturulan yapma enkesitli kolonlarda ise örgü elemanları, yerleşimine göre, V, N ve X tipleri olmak üzere Şekil 1.3'teki gibi başlıca üç tipte teşkil edilebilir. Örgü elemanları ile oluşturulan yapma enkesitli kolonlarda alt ve üst uç ile arada boşluklar bulunması halinde bu boşlukların iki ucunda, bağ levhaları kullanılmalıdır.



**Şekil 1.3** : Bağlantı elemanlarının düzenine göre yapma enkesitli kolon tipleri [1].

### 1.1 Çalışmanın Amacı

Günümüzde yapma enkesitli kolonlar aksenal kuvvet ve eğilme momentinin ortak etkilerini aktarmak üzere de kullanılmaktadır. Bu durumda, bu tür kolonların bileşik etkiler altında da yeterli dayanıma sahip olacak şekilde boyutlandırılması gerekmektedir.

Yapma enkesitli kolonlar, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8.4 [4] kapsamında en az iki uçta bağ levhalarının kullanıldığı örgü elemanları ile, sadece aksenal basınç kuvveti etkisi altında boyutlandırılabilir. Henüz ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği [4] bu ortak etki için tasarım esaslarını içermemektedir. Bu çalışma kapsamında, aksenal basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisi altındaki yapma enkesitli elemanlar için tasarım esaslarını içeren Eurocode 3 (EC 3) [5] ve Çin Çelik Yapılar

Yönetmeliği (GB 50017–2003) [6] incelenerek, bu dokümanlardaki tasarım yaklaşımları araştırılmıştır. Çalışmanın amacı, eksenel basınç kuvveti ve eğilme momentinin bileşik etkisi altındaki kafes örgü elemanlı iki parçalı basınç elemanları için ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği [4] gözetilerek, esasları Avrupa standartlarına dayanan bir tasarım yaklaşımı sunmaktır. Buna ek olarak, farklı tasarım özellikleri içeren bu tür iki parçalı basınç elemanlarının tekrarlı tersinir yatay yükler altındaki davranışları da araştırılmıştır.

## 1.2 Çalışmanın Kapsamı

Çalışmanın ilk bölümünde, yapma enkesitli kolonlar hakkında genel bilgiler verilerek kullanım alanları ve amaçları hakkında temel ve tanıtıcı bilgiler sunulmuştur. Ayrıca çalışmanın amacı ve kapsamı bu bölümde belirtilmiştir.

İkinci bölümde ise yapma enkesitli kolonlar üzerine yapılan literatür araştırması yer almaktadır. Bu kapsamda, yapma enkesitli kolonlar hakkında genel konuları içeren kaynaklar ve bu tür enkesitlerin tekrarlı yükler altında doğrusal olmayan davranışlarını araştıran çalışmalar değerlendirilmektedir. Ayrıca bu bölümde çalışma kapsamında incelenen, ÇYTHYE 2018 [4], EC 3 [5] ve GB 50017–2003 [6] ile ilgili genel bilgilere yer verilmiştir.

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği [4] ile eksenel basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisi altındaki yapma enkesitli elemanlar için tasarım esasları içeren EC 3 [5] ve GB 50017–2003 [6] üçüncü bölümde incelenmiştir. Bu inceleme kapsamında, iki ucu mafsallı bir kolon ile bir konsol kolonun sonlu eleman modelleri kullanılmıştır. Esas alınan tasarım yaklaşımının uygulama adımları, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği [4] gözetilerek düzenlenmiş ve bir öneri olarak sunulmuştur. Önerilen tasarım yaklaşımı örnek bir kolon üzerinde ayrıca değerlendirilmiştir.

Dördüncü bölümde, yapma enkesitli kolonların sabit düşey yük ve tekrarlı tersinir yatay yüklerin ortak etkisindeki davranışlarının araştırılabilmesi amacıyla, ilk olarak sonlu eleman modeli için doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapısal çeliğin tekrarlı yükler altında malzeme olarak davranış modeli, deneysel sonuçlar ile sonlu eleman analizlerinin sonuçları karşılaştırılarak oluşturulmuştur. Sonuçlar arasındaki uyum, malzeme davranışı tanımındaki ilgili parametrelerin uygun şekilde seçilmesi ile sağlanmıştır. Deneysel sonuçlar için mevcut literatürden yararlanılmıştır. ÇYTHYE

2018 Yönetmeliği [4] ve önerilen esaslara göre, farklı geometrik özellikteki yapma enkesitli elemanların tasarımı yapılarak, belirlenen malzeme davranışı parametreleri ile sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur.

Önerilen tasarım yaklaşımının sonlu eleman analizlerinin sonuçları ve tasarımları bakımından farklı geometrik özelliklere sahip yapma enkesitli kolonların bu özelliklerinin davranışa etkisi beşinci bölümde yer almaktadır. Her bir modele ait analiz sonuçları, süneklik, dayanım ve rijitlik ile enerji sönümlene kapasitesi ve göçme modu bakımından bu bölümde değerlendirilmiştir.

Son bölüm olan altıncı bölümde, dikkate alınan parametrelerin modellerin davranışlarına olan etkileri sunularak, önerilen tasarım yaklaşımının uygulanabilir bir yaklaşım olduğu belirtilmektedir. Ayrıca gelecekte çalışılması öngörülen konular hakkında önerilerde bulunulmuştur.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1 Yapma Enkesitli Kolonlar Üzerine Yapılan Çalışmalar

Lue, Yen ve Liu [7] tarafından yapılan çalışmada, AISC-ASD [8], AISC-LRFD [9], AS-4100 [10] ve CSA S16-01 [11] gibi çeşitli tasarım şartnamelerinde bulunan narinlik oranları karşılaştırılarak, çok parçalı basınç elemanları için AISC-LRFD [9] narinlik oranı formüllerinin deney çalışmaları ile doğrulanması sunulmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda, 1999 LRFD [12] tasarım dayanımlarının güvenilir tarafta kaldığını, 2005 LRFD'de [9] ise güvenlik faktörü çarpanının 0.85 yerine 0.90 alınmasıyla daha gerçeğe yakın bir sonuç verdiği gözlenmiştir. Avustralya şartnamesine (AS-4100) [10] göre elde edilen narinlik oranı çok daha güvenilir tarafta kalmakta, Kanada şartnamesi (CSA S16-01) [11] ise LRFD [9] ile benzer tasarım sonuçları verdiği tespit edilmiştir.

Liu, Lue ve Lin [13] tarafından yapılan çalışmada, AISC'e [9] göre çok parçalı basınç elemanlarında, bağlantı elemanları arasında kalan profilin narinlik oranı, eleman narinlik oranının 0.75 katından daha küçük olması gerektiği tasarım kuralı incelenmiştir. Şartnamede yer alan kuralın aksine, bu oranın 0.75 ile 1 arası olduğu durum ele alınarak sonuçlar karşılaştırılarak oranın 0.75'ten büyük olması durumunda tasarım dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Bu nedenle, yapma enkesitli kolonları oluşturan örgü elemanları ve bağ levhalarının aralığı arttıkça, yapma enkesitli kolonun eksenel basınç kuvveti dayanımı azalmaktadır.

Hasheela [14], tek diyagonal örgü elemanı ve çapraz örgü elemanı ile oluşturulan yapma enkesitli kolonların karşılaştırılması üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmada, ABAQUS [15] sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak elde edilen doğrusal olmayan sonuçlar paylaşılmaktadır. Çalışma sonucunda, farklı örgü elemanı düzeninde, sonuçların az değişiklik göstermesine rağmen çapraz örgü elemanı ile oluşturulan yapma enkesitli kolonların burkulma dayanımı seviyelerinin daha yüksek olduğu gözlenmektedir.

Sahoo ve Rai [16] tarafından, sabit aksenal basınç kuvveti ile tekrarlı tersinir yatay yerdeştirmelerin ortak etkisindeki yapma enkesitli konsol kolonların bağ levhalarının yerleşim düzenine göre değişen davranışları deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Bağ levhalarının yerleşim düzenine göre üç tip ele alınmıştır. Birincisi, bağ levhalarının belirli aralıklarla yerleştirilmesi ile oluşturulan yapma enkesitli kolon tipidir. Tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmeler etkisinde, konsol elemanın mafsal bölgesi alt uçta olduğundan, bu bölgede bağ levhalarının daha küçük aralıklarla yerleştirildiği ikinci yapma enkesitli kolon tipi bulunmaktadır. Üçüncü olarak, mafsal bölgesinin geniş bir bağ levhası ile birleştirildiği yapma enkesitli kolon tipidir. Çalışma sonucunda, ikinci ve üçüncü tip yerleşimin, birinci tip yerleşime göre eğilme dayanımı, rijitlik, süneklik ve enerji sönümleme kapasiteleri açısından daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, üçüncü tip yerleşim ile yapma enkesitli kolonun plastik moment kapasitesine ulaştığı gözlenmiştir.

Alih, Vafaei, Mansour ve Halim [17] tarafından yapılan sayısal bir çalışmada, farklı genişlikteki bağ levhalarından oluşan üç farklı yapma enkesitli kolonunun farklı seviyelerdeki sabit aksenal basınç kuvveti ile tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmelerin ortak etkisindeki sonuçları karşılaştırılmıştır. Bağ levhalarının genişlikleri 2.5cm, 5cm ve 10cm iken, farklı seviyelerdeki sabit aksenal basınç kuvvetleri 10 kN, 15 kN ve 20 kN olmaktadır. Çalışma sonucunda, bağ levhalarının daha düşük kesme kapasitelerine sahip olması, elemanın dayanım ve sünekliğini olumlu yönde etkilerken, üzerindeki aksenal basınç kuvvetinin artmasıyla eleman dayanım ve sünekliğinin azaldığı görülmüştür.

Hashemi ve Jafari [18] tarafından, sabit aksenal basınç kuvveti ile tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirme etkisindeki bağ levhalı yapma enkesitli kolonların sünekliğini ve göçme anındaki davranışlarını değerlendirmek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Ayrıca, farklı seviyelerdeki aksenal basınç kuvvetleri, bağ levhaları arasındaki uzaklık ile profil eksenleri arasındaki uzaklık gibi farklı parametrelerin sünekliğe olan etkisi de incelenmiştir. Yapılan alışmalar sonucunda, yapma enkesitli kolonların sünekliği, dolu gövdeli hadde profillerinin sünekliğinden daha düşük olmaktadır. Bağ levhalı yapma enkesitli kolonların göçme modu, profillerin genel ve yerel burkulmalarının birleşimi şeklinde oluşmaktadır. Yapma enkesitli kolonların üzerindeki sabit aksenal basınç kuvvetinin artmasıyla süneklik azalırken, geometrik özelliklerinin değişmesi ile, mevcut süneklik üzerinde kayda değer bir etkiye neden olmadığı görülmüştür.

## 2.2 Kafes Örgü Elemanlı Yapma Enkesitli Kolonların Sismik Davranışı Üzerine Yapılan Çalışmalar

Hashemi ve Bonab [19] tarafından, sabit eksenel basınç kuvvetleri ile tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmelerin ortak etkisindeki, farklı parametrelere sahip kafes örgü elemanlı yapma enkesitli kolonların deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, farklı düşey yük seviyeleri ile profil eksenleri arasındaki farklı uzaklıkları kapsayan 8 adet eleman incelenmiştir. Deney sonuçlarında, eksenel basınç kuvveti seviyesinin, elemanın sünekliliğini, dayanımını ve rijitliğini önemli ölçüde etkilediği gözlenmiştir. Profil eksenleri arasındaki farklı uzaklıklara göre, eleman sünekliliği değişirken, dayanım, rijitlik ve enerji sönümleme kapasitesi bakımından benzer bir davranış sergilemiştir. Deney sonuçları, kafes örgü elemanlı yapma enkesitli kolonların daha iyi sismik özellikler gösterdiğini ve bu kolonların orta dereceli deprem bölgelerinde kullanılmasının kabul edilebilir olduğunu göstermiştir.

Hashemi ve Bonab [20] tarafından, yapılan çalışmanın [19] devamı niteliğinde, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı geometrik parametrelere sahip farklı seviyelerdeki eksenel basınç kuvveti ile tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmelerin ortak etkisinde çeşitli geometrik özelliklere sahip 18 adet örgü elemanlı yapma enkesitli kolon analizi yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ilk olarak, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu göstermektedir. Ayrıca, eksenel basınç kuvveti kapasitesinin %50'sinden daha büyük eksenel basınç kuvveti seviyelerinde, sünekliliğin çok düşük olduğu gözlenmiştir. Örgü elemanlarının enkesit şekli, profil eksenleri arasındaki uzaklık ve örgü elemanlı yapma enkesitli kolonların uzunluğu sünekliliği etkileyen ana geometrik parametreler olduğu sonucuna varılmıştır.

Kalochairetis, Gantes ve Lignos [21] tarafından yapılan çalışmanın amacı, dışmerkezli düşey yükler altındaki Z-tipi örgü elemanlı yapma enkesitli kolonların düzlem içi doğrultusundaki davranışının deneysel ve sayısal olarak incelenmesidir. Yapma enkesitli kolonların dayanımına etkisini değerlendirebilmek için dışmerkezliğin büyüklüğü, yönü, bağ ve örgü elemanlarının yoğunluğu değiştirilmektedir. Sonlu eleman analiz sonuçları, geometrik ön kusurlardan ve sıcaklık değişiminden dolayı oluşmuş artık gerilme etkilerini içermektedir. Deney ile sonlu eleman analiz sonuçları arasında çok iyi bir uyum gözlenmiştir. Uç moment etkisinin, yapma enkesitli kolonun eksenel basınç kuvveti dayanımını önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir.

Kalochairetis ve Gantes [22] tarafından, kesme rijitliklerinin azalmasından dolayı kayma şekildeğişirmelerinin önemli etkileri ile, yerel ve genel burkulmalar arasındaki etkileşim ele alınarak, sayısal bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu, dayanımdaki en büyük azalma, yerel ve genel Euler kritik gerilmesi ve akma gerilmelerinin aynı anda meydana gelmesi durumunda gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Dayanımdaki azalma, geometrik ön kusurların varlığında daha belirgin hale gelmektedir. Mod etkileşiminin zararlı etkilerine rağmen, birçok uluslararası şartname, bu konuda yeterli tasarım esaslarına sahip değildir. Çalışma içerisinde, bahsedilen etkilerin yanı sıra, genel kusurlar, yerel düzensizlik ve plastisite gibi genel kusurları hesaba katarak, kafes örgü elemanlı yapma enkesitli kolonların aksel basınç kuvveti dayanımını hesaplamak için basit bir analitik yöntem önerilmiştir.

### **2.3 Kafes Örgü Elemanlı Yapma Enkesitli Kolonlar Üzerine Yönetmelikler**

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8.4 [4] kapsamında yapma enkesitli kolonlar, en az iki uçta bağ levhalarının kullanıldığı örgü elemanları ile, sadece aksel basınç kuvveti etkisi altında boyutlandırılabilir. Eleman tasarımında ilk olarak, örgü elemanlı yapma enkesitli kolonlar, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8.4 [4] kapsamında yer alan konstrüktif kurallara göre boyutlandırılmalıdır. Boyutlandırma sonrasında, elemanın eğilmeli burkulma sınır durumu ve burulmalı burkulma sınır durumlarına bakılarak sadece aksel basınç kuvveti altında dayanım kontrolü yapılarak yapma enkesitli kolon tasarımı tamamlanmaktadır.

Eurocode 3 (EC 3) [5] şartnamesi, uç noktalarından mafsal teşkil edilen yerdeğişirmelere karşı desteklenen yapma enkesitli kolonlar için aksel basınç kuvveti ile eğilme momentinin ortak etkisi altındaki tasarımı kapsamaktadır. Bu tasarım yaklaşımında, elemana etkiyen aksel basınç kuvveti profillere eşit olarak paylaşılırken, ikinci mertebe etkileri de içeren eğilme momenti, kuvvet çiftine dönüştürülerek profillerden birine aksel çekme kuvveti, diğerine ise aksel basınç kuvveti olarak etkidiği düşünülmektedir. Bu durumda, maksimum aksel basınç kuvvetine maruz kalan profil için, örgü elemanları arasında kalan profil uzunluğuna göre, düzlem içi doğrultusunda, eleman uzunluğuna göre, düzlem dışı doğrultusunda burkulma hesabı yapılarak aksel basınç kuvveti ile eğilme momentinin ortak etkisindeki dayanım kontrolü yapılarak yapma enkesitli kolon tasarımı tamamlanmaktadır.

Çin Çelik Yapılar Yönetmeliği (GB 50017–2003) [6] kapsamında, yapma enkesitli kolonlar için aksenal basınç kuvveti ile eğilme momentinin ortak etkisi altında farklı bir tasarım yaklaşımı yer almaktadır. Bu tasarım yaklaşımında da elemana etkiyen aksenal basınç kuvveti profillere eşit olarak paylaştırılmaktadır. Ancak, eğilme momenti, EC 3'e [5] göre profillere kuvvet çifti olarak etkidiği düşünülmekteyken, GB 50017–2003'e [6] göre profillerin atalet momentleri ve merkeze olan uzaklıkları oranında profillere eğilme momenti olarak dağıldığı düşünülmektedir. Yapma enkesitin simetrik olması durumunda eğilme momenti profillere eşit şekilde paylaştırılabilir. Bu doğrultuda, aksenal basınç kuvveti ile eğilme momenti ortak etkisindeki profil için dayanım kontrolü yapılarak yapma enkesitli kolon tasarımı tamamlanmaktadır.





### **3. YAPMA ENKESİTLİ KOLONLARIN EKSENEL BASINÇ KUVVETİ VE EĞİLME MOMENTİNİN ORTAK ETKİSİ ALTINDA TASARIMI**

#### **3.1 Tasarım Yaklaşımlarının Değerlendirilmesi**

Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları (ÇYTHYE) 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre yapma enkesitli kolonlar, en az iki uçta bağ levhalarının kullanıldığı örgü elemanları ile sadece aksenal basınç kuvveti etkisi altında boyutlandırılabilir. Ancak, deprem ve rüzgârın yatay etkileri altında bu tür kolonların, aksenal kuvvetler ile eğilme momentinin ortak etkisi altında boyutlandırılması gerekmektedir. Bu bölümde, aksenal kuvvetler ile eğilme momentinin ortak etkisi altındaki yapma enkesitli elemanların tasarım esaslarını içeren Eurocode 3 (EC 3) [5] ve Çin Çelik Yapılar Yönetmeliği (GB 50017 – 2003) [6] örnek yapma enkesitli kolonların sonlu eleman analizleri de kullanılarak incelenecektir. Örnek kolonlar, yapma enkesitli iki ucu mafsallı bir kolon ile bir konsol kolon olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği [4] kapsamında değerlendirilmek üzere, EC 3'e [5] dayanan bir tasarım yaklaşımı önerilmiştir.

#### **3.1.1 Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği 2018 (ÇYTHYE 2018)'e göre yapma enkesitli basınç elemanları**

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8.4 [4] kapsamında, en az iki uçta bağ levhalarının kullanıldığı örgü elemanları ile, sadece aksenal basınç kuvveti etkisi altında boyutlandırılabilir. Belirli bir aralıkla konumlandırılan basınç elemanlarının bağ levhaları ve kafes örgü elemanları ile birleştirildiği çok parçalı basınç elemanlarında, kayma şekil değiştirmelerinin karakteristik basınç kuvveti dayanımına etkisi gözönüne alınacaktır. Bu etki, elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımı hesabında, bağ levhası ve kafes örgü elemanlarının birleşim özelliklerine göre etkin narinlik oranı kullanılacaktır. Etkin narinlik oranı,  $(L_c/i)_m$ , bağlantı elemanlarının birleşim tiplerine göre iki farklı şekilde hesaplanmaktadır.

(a) Basit sıkma uygulanan bulonlu birleşimler için;

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{L_c}{i}\right)_o^2 + \left(\frac{a}{i_i}\right)^2} \quad (3.1)$$

(b) Bulonların tanımlanan sınıflara uygun kontrollü sıkıldığı birleşimler ile kaynaklı birleşimler için;

$$\frac{a}{i_i} \leq 40 \quad \text{için} \quad \left(\frac{L_c}{i}\right)_m = \left(\frac{L_c}{i}\right)_o \quad (3.2)$$

$$\frac{a}{i_i} > 40 \quad \text{için} \quad \left(\frac{L_c}{i}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{L_c}{i}\right)_o^2 + \left(\frac{K_i a}{i_i}\right)^2} \quad (3.3)$$

Bu hesaplamalarda kullanılan  $(L_c/i)_m$ , etkin narinlik oranı,  $(L_c/i)_o$ , enkesiti oluşturan parçaların tek parça gibi davrandığı varsayımıyla hesaplanan, elemanın burkulma eksenini etrafındaki narinlik oranını,  $i$ , basınç elemanı enkesitinin burkulma eksenini etrafındaki atalet yarıçapını,  $a$ , bağlantı elemanlarının aralığını,  $i_i$ , tek bir parçanın minimum atalet yarıçapını ifade etmektedir.  $K_i$  parametresi ise profilleri sırt-sırta yerleştirilen çift korniyer için 0.50, sırt-sırta yerleştirilen çift U profili için 0.75, diğer durumlar için 1.00 olmaktadır.

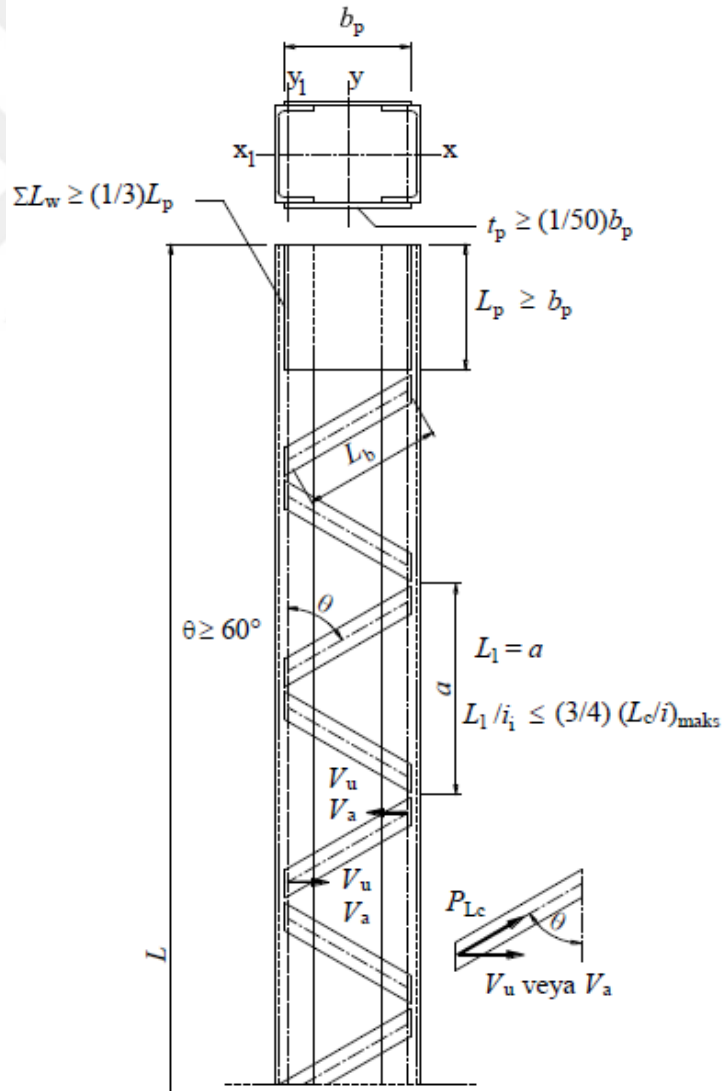
ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8.4 (b) paragrafı [4] uyarınca, kafes örgü elemanlarının basınç elemanlarına bağlandığında serbest profil uzunluğu,  $a$  olarak tanımlanmaktadır. Bu uzunluktaki en küçük atalet yarıçapı ile hesaplanan,  $(a/i_i)$ , basınç elemanlarından birinin maksimum narinliğinin 3/4 ünü aşmayacaktır.

$$\frac{a}{i_i} \leq \frac{3}{4} \left(\frac{L_c}{i}\right)_{\text{maks}} \quad (3.4)$$

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8.4 (f) paragrafı [4] uyarınca, izin verilen yapma enkesitli kolonların kafes örgü elemanları levha, korniyer, U-profil gibi başka enkesitler seçilebilmektedir. Ancak, tek diyagonale sahip yapma enkesitli kolonların kafes örgü elemanlarının narinliği  $L/i < 140$  olmalıdır. Başlıkları birleştiren birleşim araçlarının eksenleri arasındaki enine uzaklık 380mm'yi aştığında, kafes örgü sistemini oluşturan elemanlar, korniyerlerden teşkil edilmeli veya çapraz örgü kullanılması tercih edilmelidir.

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8.4 (h) paragrafı [4] uyarınca, kafes örgü elemanları, bağ levhaları ve birleşim elemanları,  $\phi_c P_n$  (YDKT) veya  $P_n/\Omega_c$  (GKT) olmak üzere, basınç elemanının mevcut aksel kuvvet dayanımının %2'si ile hesaplanan, basınç elemanı eksenine dik kesme kuvveti etkisi altında boyutlandırılmalıdır. Kolon, yanal yük veya eğilme momenti etkisinde olduğu durumda ise örgü elemanları ve birleşim elemanları, ilave kesme kuvveti ve eğilme momenti etkisi gözönüne alınarak boyutlandırılacaktır.

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8.4 (e) ve (f) paragrafları [4] uyarınca, en az iki uçta bağ levhalarının kullanıldığı örgü elemanları ile oluşturulan yapma enkesitli kolonların tasarım aşamasında Şekil 3.1'de yer alan geometrik şartların sağlanması gerekmektedir.

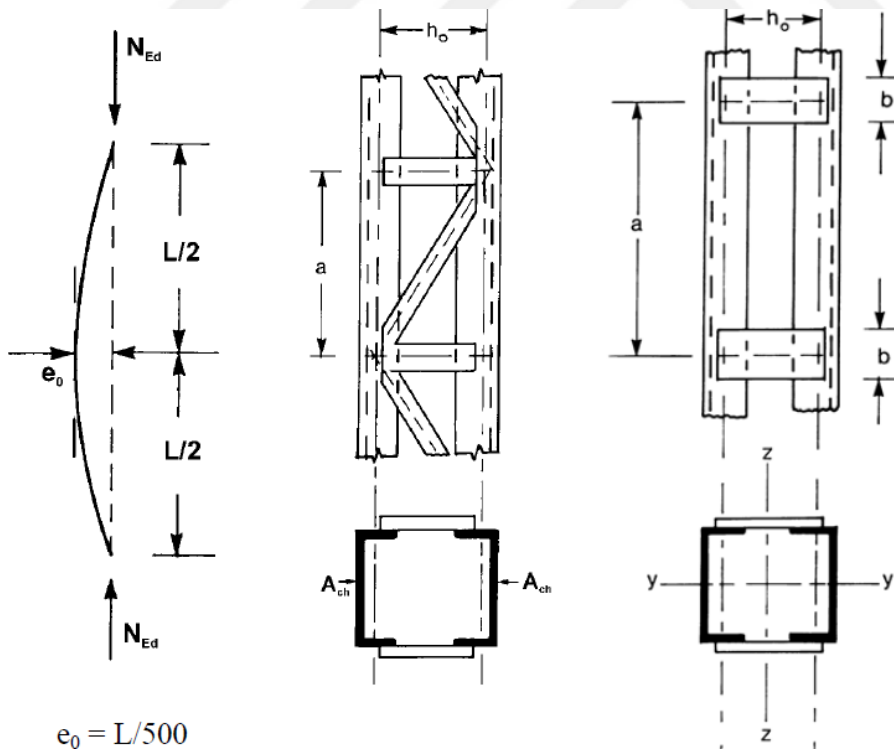


**Şekil 3.1** : Çok parçalı basınç elemanlarının geometrik sınır koşulları, ÇYTHYE Uygulama Klavuzu 2018 Örnek 8.5 [23].

### 3.1.2 Eurocode 3 (EC 3)'e göre yapma enkesitli kolonların aksenal basınç kuvveti ve eğilme momenti etkisinde incelenmesi

Eurocode 3 [5] şartnamesi, aksenal basınç kuvveti ile eğilme momentinin ortak etkisi altındaki yapma enkesitli kolonlar için bir tasarım yaklaşımına sahiptir. Bu tasarım yaklaşımında, elemana etkiyen aksenal basınç kuvveti profillere eşit olarak paylaştırılırken, ikinci derece etkileri de içeren eğilme momenti, kuvvet çiftine dönüştürülerek profillerden birine aksenal çekme kuvveti, diğerine ise aksenal basınç kuvveti olarak etki ettiği düşünülmektedir. Bu dönüşüm, simetrik elemanlar için, moment değerinin profil eksenleri arasında uzaklığa oranıyla yapılmaktadır.

EC 3 [5] tasarım yaklaşımı, iki ucu mafsallı olarak teşkil edilen ve yerdeğiştirmelere karşı desteklenen iki aksenli kafes örgü elemanlı ve bağ levhalı yapma enkesitli kolonları kapsamaktadır. Ancak, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği [4] kapsamında, en az iki uçta bağ levhalarının kullanıldığı örgü elemanlı yapma enkesitli kolonlara izin verildiğinden, bu bölümde, EC 3 [5] tasarım yaklaşımına göre örgü elemanlı yapma enkesitli kolonlar incelenmektedir.



Şekil 3.2 : Örgü elemanlı ve bağ levhalı yapma enkesitli kolon örnekleri [5].

EC 3 [5] tasarım yaklaşımında, eğilme momentinin kuvvet çiftine dönüştürülmesiyle profillerden birinde maksimum aksenal basınç kuvveti oluşmaktadır. Bu durumda, maksimum aksenal basınç kuvvetine maruz kalan profilin dayanım kontrolü için, örgü

elemanları arasında kalan profil uzunluğuna göre, düzlem içi doğrultusunda, eleman uzunluğuna göre, düzlem dışı doğrultusunda burkulma hesabı yapılması gerekmektedir. Hesaplanan aksenal basınç kuvveti dayanımı, aşağıdaki adımlar sonucu elde edilen gerekli basınç kuvveti dayanımından büyük olması ile tasarım tamamlanmaktadır.

EC3 [5] tasarım yaklaşımında, elemana etkiyen aksenal basınç kuvvetinin profillere eşit olarak paylaşılmasını ve ikinci mertbe etkileri de içeren eğilme momentinin, kuvvet çiftine dönüştürülmesini kapsayan aşağıdaki hesap adımları sonucunda, profillerden birinde oluşan maksimum aksenal basınç kuvveti bulunmaktadır.

Yapma enkesitli kolon elemanının geometrik ön kusuru, etkin atalet momenti ve etkin burkulma yükü aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$e_0 = \frac{L}{500} \quad (3.5)$$

$$I_{\text{eff}} = 0.5h_0^2 A_{\text{ch}} \quad (3.6)$$

$$N_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 E I_{\text{eff}}}{L^2} \quad (3.7)$$

Yukarıdaki denklemlerde, L, eleman uzunluğunu,  $e_0$ , geometrik ön kusuru,  $h_0$ , profil eksenleri arasındaki uzaklığı,  $A_{\text{ch}}$ , profillerden birinin enkesit alanını,  $I_{\text{eff}}$ , elemanının etkin atalet momentini, E, elastisite modülünü ve  $N_{\text{cr}}$ , elemanının etkin burkulma yükü ifade etmektedir.

System			
$S_v$	$\frac{nEA_d ah_0^2}{2d^3}$	$\frac{nEA_d ah_0^2}{d^3}$	$\frac{nEA_d ah_0^2}{d^3 \left[ 1 + \frac{A_d h_0^3}{A_v d^3} \right]}$

Şekil 3.3 : Farklı düzenlerde yerleştirilmiş örgü elemanlı yapma enkesitli kolonlar için kesme rijitliği [5].

Şekil 3.3'te yer alan V-tipi, K-tipi ve Z-tipi örgü elemanlı yapma enkesitlerin kesme rijitliği sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$S_v = \frac{nEA_d ah_0^2}{2d^3} \quad (3.8)$$

$$S_v = \frac{nEA_d ah_0^2}{d^3} \quad (3.9)$$

$$S_v = \frac{nEA_d ah_0^2}{d^3 \left[ 1 + \frac{A_d h_0^3}{A_v d^3} \right]} \quad (3.10)$$

Yukarıdaki denklemlerde,  $A_d$ , örgü elemanının enkesit alanı,  $A_v$ , bağ levhasının enkesit alanı,  $a$ , düzlem içi doğrultusundaki serbest profil uzunluğu,  $d$ , örgü elemanının uzunluğu,  $h_0$ , profil eksenleri arasındaki uzaklık,  $n$ , düzlem sayısı ve  $S_v$ , yapma enkesitli elemanın kesme rijitliğini ifade etmektedir.

EC 3'e [5] göre ikinci mertebe etkileri içeren eğilme momenti,  $M_{Ed}$ , profillerden birinde oluşan gerekli aksenal basınç kuvveti dayanımı,  $N_{ch,Ed}$  aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed} e_0 + M_{Ed}^I}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}} \quad (3.11)$$

$$N_{ch,Ed} = 0.5N_{Ed} + \frac{M_{Ed} h_0 A_{ch}}{2I_{eff}} \quad (3.12)$$

EC 3'e [5] göre dayanım kontrolü için, örgü elemanları arasında kalan profil uzunluğuna göre, düzlem içi doğrultusunda, eleman uzunluğuna göre, düzlem dışı doğrultusunda burkulma hesabı yapılması gerekmektedir. Hesaplanan aksenal basınç kuvveti dayanımı, gerekli basınç kuvveti dayanımından büyük olması ile tasarım tamamlanmaktadır.

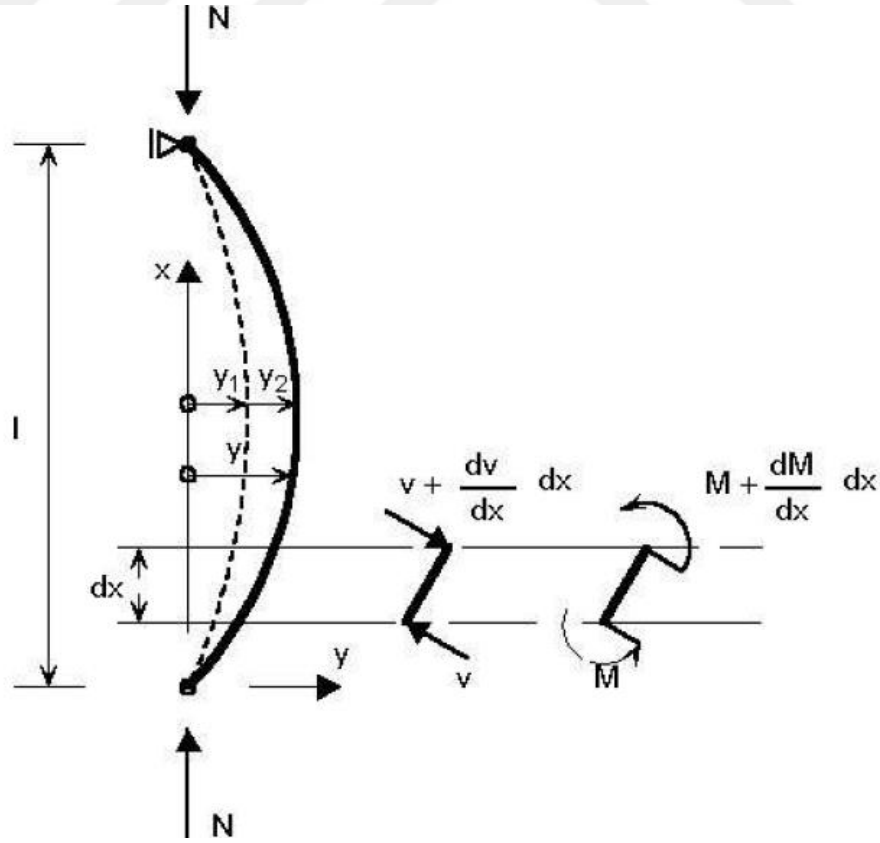
$$\frac{N_{cd,Ed}}{N_{b,Ed}} \leq 1,0 \quad (3.13)$$

Denklemlerde kullanılan  $M_{Ed}^I$ , ikinci merteye etkileri içermeyen eğilme momentini,  $M_{Ed}$ , ikinci merteye etkileri içeren eğilme momentini,  $N_{Ed}$ , elemana etkiyen aksel basınç kuvvetini,  $N_{ch,Ed}$ , profillerden birinde oluşan gerekli aksel basınç kuvveti dayanımını, ve  $N_{b,Ed}$  ise profillerden biri için hesaplanan aksel basınç kuvveti dayanımını ifade etmektedir.

Eksenel basınç kuvveti ve eğilme momentinin bileşik etkisi altındaki yapma enkesitli kolonlarda, elemanın kesme kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [1]. Bu kesme kuvveti ile, kafes örgü elemanlarının düşey eksenle yaptığı açı kullanılarak elde edilen trigonometrik dönüşüm sonucunda, örgü elemanları için gerekli aksel basınç kuvveti dayanımı bulunmaktadır. Örgü elemanlarının enkesitine göre aksel basınç kuvveti dayanımı hesaplanarak burkulma kontrolleri sonunda tasarım tamamlanır.

$$V_{Ed} = \frac{1}{L} \left( 4 - (4 - \pi) \frac{e_0 N_{Ed}}{e_0 N_{Ed} + M_{Ed}^I} \right) M_{Ed} \quad (3.14)$$

EC 3 [5] tasarım yaklaşımında, yapma enkesitli kolonların ortak etki altında tasarımında kullanılan denklemlerin teorik altyapısı bu bölümde paylaşılmaktadır [24].



Şekil 3.4 : İki ucu mafsallı ve uç noktalarından desteklenen elemanın kesme, moment ve ikinci merteye etkileri [24].

EC 3 [5] tasarım yaklaşımının esas aldığı iki ucu mafsallı olarak teşkil edilen ve yerdeğiştirmelere karşı desteklenen elemanın kesme kuvveti, eğilme momenti ve ikinci mertebe etkileri aşağıdaki gibi paylaşılmaktadır.

$$M = N y \quad (3.15)$$

$$V = \frac{dM}{dx} = N \frac{dy}{dx} \quad (3.16)$$

Eleman merkezinin toplam yatay yerdeğiştirmesi  $y$ , iki bileşenin toplamıdır.

$$y = y_1 + y_2 \quad (3.17)$$

Eğilme momenti,  $M$ ,  $y_1$  bileşenine neden olurken, kesme kuvveti,  $V$ ,  $y_2$  yerdeğiştirmesine neden olmaktadır. Aşağıdaki denklemlerde,  $E$ , elastisite modülünü,  $I$ , atalet momentini ifade etmektedir.

$$\frac{d^2 y_1}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = -\frac{Ny}{EI} \quad (3.18)$$

Toplam burkulma eğriliği, eğilme momentini ve kesme kuvvetini içeren yukarıdaki denklemlere bağlıdır. Aşağıdaki denklemlerde,  $A$ , enkesit alanını,  $G$ , kayma rijitliğini,  $\beta$ , kolon enkesitinin şekil faktörünü ifade etmektedir.

$$\frac{dy_2}{dx} = \beta \frac{V}{GA} = \beta \frac{N}{GA} \frac{dy}{dx} \quad (3.19)$$

$$\frac{d^2 y_2}{dx^2} = \beta \frac{dV}{GA dx} = \beta \frac{N}{GA} \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (3.20)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{d^2 y_1}{dx^2} + \frac{d^2 y_2}{dx^2} = -\frac{Ny}{EI} + \beta \frac{N}{GA} \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (3.21)$$

Paylaşılan denklemlerin düzenlenmesiyle aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{N}{(1 - \frac{\beta N}{GA})EI} y = 0 \quad (3.22)$$

Euler denklemi için de aynı yöntem izlenebilmektedir.

$$\frac{N}{(1 - \frac{\beta N}{GA})EI} = \frac{\pi^2}{l^2} \quad (3.23)$$

Yapma enkesitli kolonların  $N_{cr,id}$  etkin burkulma yükü, bu tasarım yaklaşımında aşağıdaki gibi elde edilebilir.

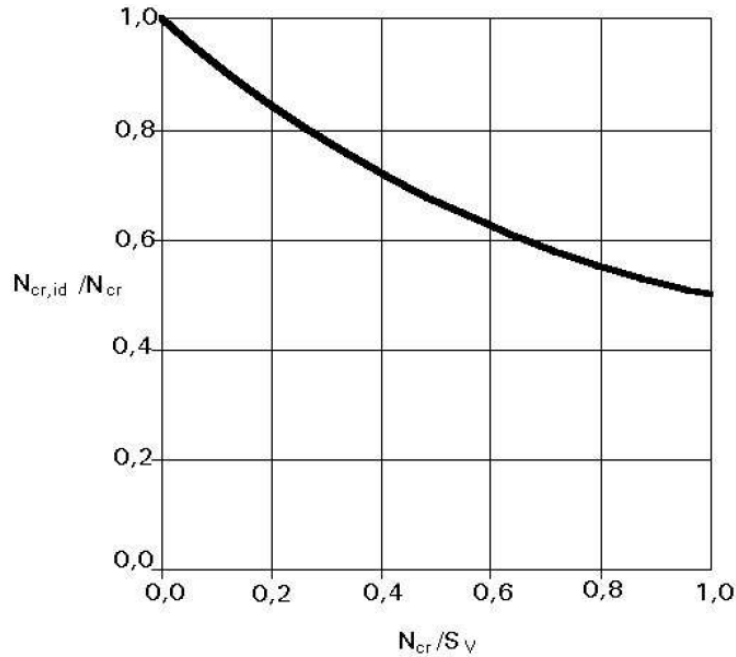
$$N_{cr,id} = \frac{1}{\frac{1}{N_{cr}} + \frac{1}{S_v}} = N_{cr} \frac{1}{1 + \frac{N_{cr}}{S_v}} \quad (3.24)$$

Etkin burkulma yükü, kesme kuvvetinden kaynaklanan şekildeğişirmelerin göz ardı edilmesiyle aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (3.25)$$

Elemanın kesme rijitliği hesabı aşağıdaki gibidir.  $N_{cr,id} / N_{cr} < 1$  oranı,  $N_{cr}/S_v$  arttıkça azalır. Yukarıdaki denklemlerden elde edilen  $N_{cr,id}/N_{cr}$  oranı, Şekil 3.5'te,  $N_{cr}/S_v$  oranının bir fonksiyonu olacak şekilde çizilmiştir.

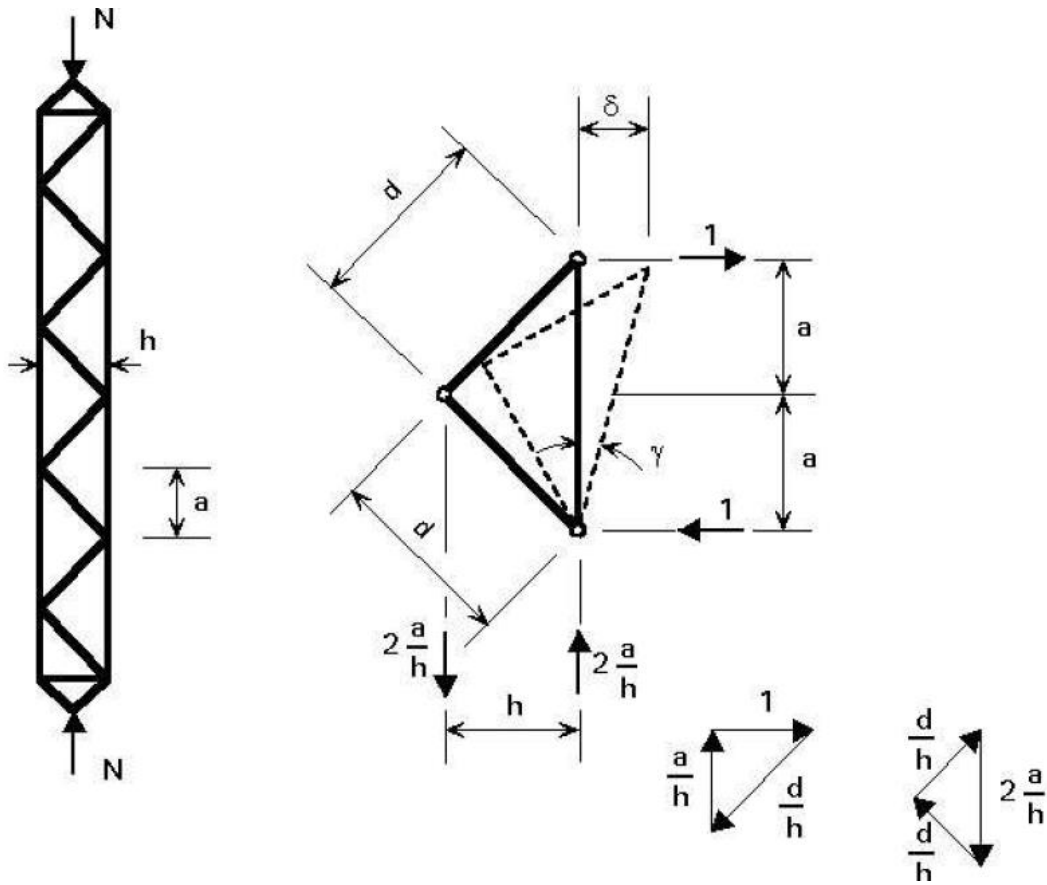
$$S_v = \frac{GA}{\beta} \quad (3.26)$$



Şekil 3.5 : Kesme kuvvetinin etkin burkulma yükü altındaki elemana etkisi [24].

Dolu gövdeli hadde profillerde, kesme rijitliği  $S_v$ ,  $N$ 'den daha büyük olmaktadır. Bu nedenle,  $N_{cr,id}$  ile  $N_{cr}$  arasındaki fark, tasarım için ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Yapma enkesitli kolonların kesme rijitliği,  $S_v$ , dolu gövdeli hadde profillerin kesme rijitliğine göre çok küçüktür. Bu yüzden, etkin burkulma yükünün azalmasındaki kesme kuvvetlerinin etkisi çok önemlidir.

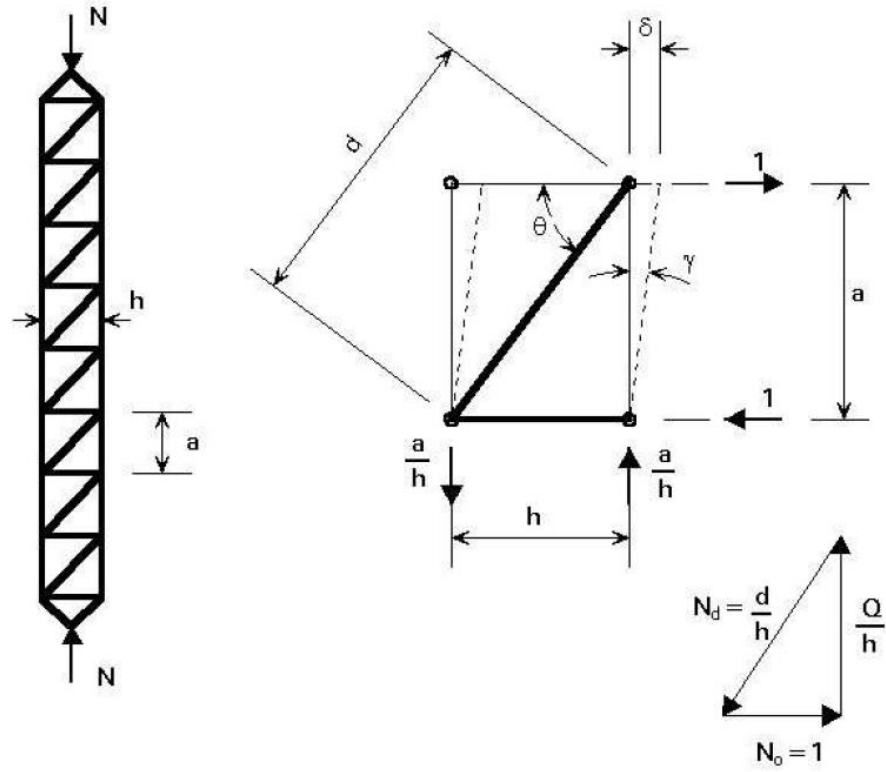
V-tipi, K-tipi ve X-tipi düzeninde yerleştirilen örgü elemanlı yapma enkesitli kolon kesme rijitlikleri sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilmektedir. Burada,  $\delta$ , birim kesme kuvvetinden dolayı yanal yerdeğiştirmeyi ifade etmektedir.



Şekil 3.6 : V-tipi örgü elemanlı yapma enkesitli kolonun şekildeğiştirmesi [24].

$$\delta = 2N_d \frac{d}{EA_d} N_d = 2 \frac{d}{h} \frac{d}{EA_d} \frac{d}{h} = 2 \frac{d^3}{h^2 EA_d} \quad (3.27)$$

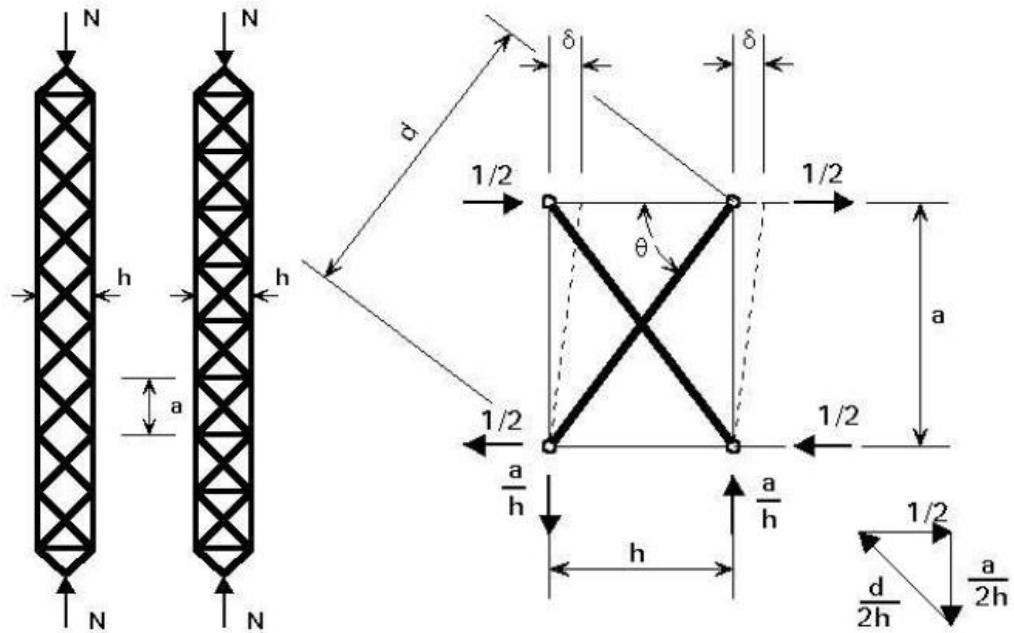
$$\frac{1}{S_v} = \frac{\delta}{2a} = \frac{d^3}{ah^2 EA_d} \quad (3.28)$$



Şekil 3.7 : K-tipi örgü elemanlı yapma enkesitli kolonun şekildeğiştirilmesi [24].

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = N_d \frac{d}{EA_d} N_d + N_o \frac{h}{EA_o} = \frac{d}{h} \frac{d}{EA_d} \frac{d}{h} + \frac{h}{EA_o} \quad (3.29)$$

$$\frac{1}{S_v} = \frac{1}{aE} \left( \frac{h}{A_o} + \frac{d^3}{h^2 A_d} \right) = \frac{1}{ah^2 E} \left( \frac{h^3}{A_o} + \frac{d^3}{A_d} \right) = \frac{d^3}{ah^2 EA_d} \left( \frac{h^3 A_d}{d^3 A_o} + 1 \right) \quad (3.30)$$



Şekil 3.8 : X-tipi örgü elemanlı yapma enkesitli kolonun şekildeğiştirilmesi [24].

$$\delta = 2N_d \frac{d}{EA_d} N_d = 2 \frac{d}{2h} \frac{d}{EA_d} \frac{d}{2h} = \frac{1}{2} \frac{d^3}{h^2 EA_d} \quad (3.31)$$

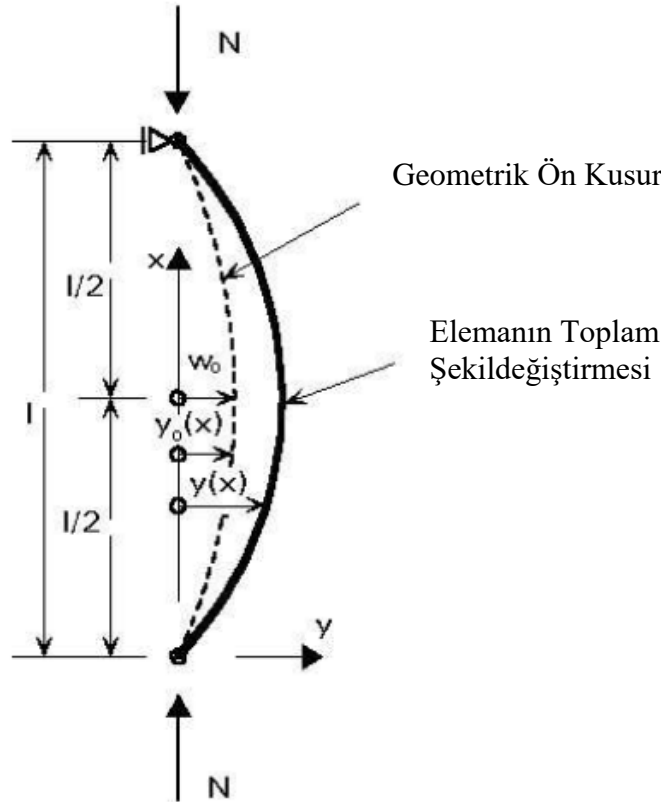
$$\frac{1}{S_v} = \frac{\delta}{a} = \frac{d^3}{2ah^2 EA_d} \quad (3.32)$$

Örgü elemanı sayısı altıya eşit veya daha büyükse, kesme rijitiği  $S_v$ 'nin yapma enkesitli kolon üzerindeki dağılımı homojen kabul edilebilmektedir. Eğer altıdan az ise, çubuk elemanlar ile daha detaylı analizlerin yapılması gerekmektedir. V-tipi örgü elemanlı yapma enkesitli kolonlar için eşdeğer narinlik oranı aşağıdaki gibidir.

$$\lambda_{eq} = \sqrt{\lambda^2 + \frac{2\pi^2 A_c d^3}{ah^2 EA_d}} \quad (3.33)$$

$$\lambda^2 = 1/\rho^2 = 2A_c l^2 / I \quad (3.34)$$

Çelik yapılarda kullanılan profillerde, imalat ve uygulama sırasında çeşitli nedenlerden dolayı  $L/500$  oranında geometrik ön kusur olduğu varsayılmaktadır. Şekil 3.9'da,  $y_0$  ile elemanın geometrik ön kusurunu ifade etmektedir.



Şekil 3.9 : Geometrik ön kusurun eleman üzerindeki etkisi [24].

Yapma enkesitli elemanın geometrik ön kusurundan dolayı, aksenal basınç kuvvetleri ek eğilme momenti oluşmasına neden olmaktadır. Bu ikinci merteye etkiler, aşağıdaki yaklaşımla tasarımda gözönünde bulundurulmaktadır.

$$y_0(x) = e_0 \sin(\pi x/l) \quad (3.35)$$

$$e_0 = \frac{L}{500} \quad (3.36)$$

$$y(x) = y_0(x) \frac{1}{1 - N/N_{cr,id}} = \frac{e_0}{1 - N/N_{cr,id}} \sin(\pi x/l) \quad (3.37)$$

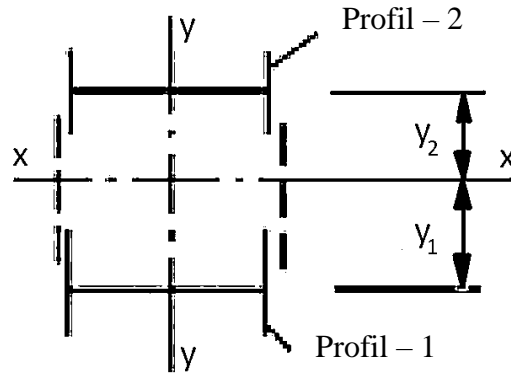
$$M = N y(1/2) = \frac{e_0 N}{1 - \frac{N}{N_{cr,id}}} \quad (3.38)$$

Yukarıdaki denklemlerde,  $e_0$ , geometrik ön kusuru,  $y_0(x)$ , başlangıç durumunda  $x$  noktasındaki geometrik ön kusurdan oluşan yerdeğiştirmeyi,  $y$ , elemanın ortak etki altında  $x$  noktasında oluşan yerdeğiştirmeyi ifade etmektedir.

### 3.1.3 Çin Çelik Yapılar Yönetmeliği (GB 50017–2003)'e göre yapma enkesitli kolonların aksenal basınç kuvveti ve eğilme momenti etkisinde incelenmesi

Çin Çelik Yapılar Yönetmeliği (GB 50017–2003) [6] kapsamında, yapma enkesitli kolonlar için aksenal basınç kuvveti ile eğilme momentinin ortak etkisi altında EC 3'ten [5] farklı bir tasarım yaklaşımı yer almaktadır. Bu tasarım yaklaşımında da elemana etkiyen aksenal basınç kuvveti profillere eşit olarak paylaştırılmaktadır. Ancak, eğilme momenti, EC 3'e [5] göre profillere kuvvet çifti olarak paylaştırılırken, GB 50017–2003'e [6] göre ise, profillerin atalet momentleri ve merkeze olan uzaklıkları oranında eğilme momenti olarak paylaştırılmaktadır. Yapma enkesitin simetrik olması durumunda eğilme momenti profillere eşit bir şekilde paylaştırılabilir. Bu doğrultuda, aksenal basınç kuvveti ile eğilme momenti ortak etkisindeki profil için dayanım kontrolü yapılarak yapma enkesitli kolon tasarımı tamamlanmaktadır.

Yapma enkesitli kolonun plan gösterimi, GB 50017-2003 Şekil 5.2.6'a [6] göre Şekil 3.10'daki gibi gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Yapma enkesitli kolonun plan gösterimi [6].

Yapma enkesitli kolon elemanına gelen eğilme momentinin profillere dağılımı, GB 50017-2003 Denklem 5.2.6-2 ve Denklem 5.2.6-3'e [6] göre aşağıdaki gibi olmaktadır.

Profil-1 için;

$$M_{y1} = \frac{I_1/y_1}{I_1/y_1 + I_2/y_2} M_y \quad (3.39)$$

Profil-2 için;

$$M_{y2} = \frac{I_2/y_2}{I_1/y_1 + I_2/y_2} M_y \quad (3.40)$$

GB 50017-2003 Denklem 5.2.6-1'e [6] göre, aksenal basınç kuvveti ve eğilme momentinin bileşik etkisindeki yapma enkesitli kolonlarda dayanım kontrolü aşağıdaki gibi gerilme kontrolü ile yapılmaktadır.

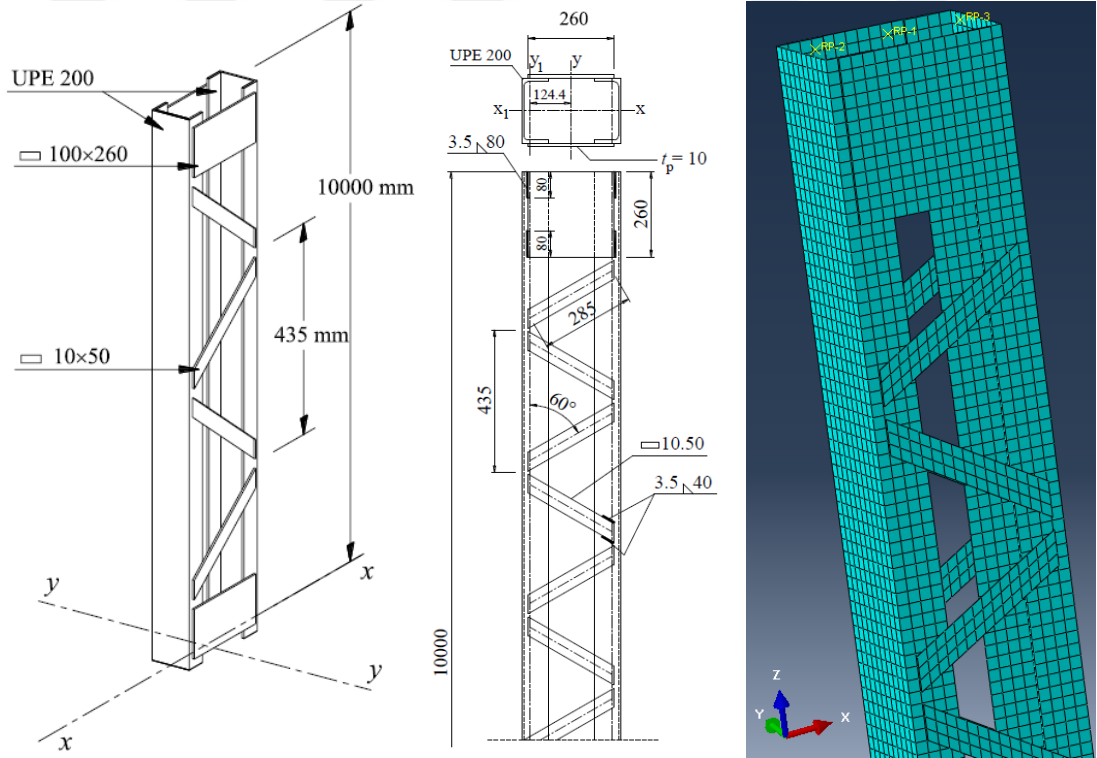
$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{W_{1x} \left(1 - \varphi_x \frac{N}{N'_{Ex}}\right)} + \frac{\beta_{ty} M_y}{W_{1y}} \leq f \quad (3.41)$$

## 3.2 Tasarım Yaklaşımlarının Yapma Enkesitli Kolon Örnekleri Üzerinde İncelenmesi

### 3.2.1 Yapma enkesitli iki ucu mafsallı bir kolon ile bir konsol kolonun sonlu eleman modelleri

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre yapma enkesitli kolonlar, en az iki uça bağ levhalarının kullanıldığı örgü elemanları ile sadece aksel basınç kuvveti etkisi altında boyutlandırılabilir. Bu bölümde, aksel basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisi altındaki yapma enkesitli kolonlar için tasarım esaslarını içeren EC3 [5] ve GB 50017 – 2003 [6] incelenerek, sonlu eleman analizleri ile gerçeğe daha yakın sonuçlara sahip tasarım yaklaşımı belirlenmektedir.

Farklı iki tasarım yaklaşımı incelendiğinde, aksel basınç kuvveti profillere eşit olarak paylaştırılmaktadır. Ancak, eğilme momenti, EC 3'e [5] göre profillere kuvvet çifti olarak paylaştırılırken, GB 50017–2003'e [6] göre profillerin atalet momentleri ve merkeze olan uzaklıkları oranında profillere eğilme momenti olarak paylaştırılmaktadır. Bu iki farklı tasarım yaklaşımını değerlendirebilmek için ABAQUS [15] programı ile sayısal bir çalışma yapılmıştır.



Şekil 3.11 : Farklı tasarım yaklaşımlarının değerlendirilmesi için oluşturulan elemanın geometrik özellikleri ve sonlu eleman modeli [23].

Şekil 3.11’de görüldüğü üzere, S4R kabuk elemanları ile modellenen, 10m uzunluğunda, iki ucu mafsallı ve uç noktalarından destekli, ÇYTHYE Uygulama Klavuzu 2018 Örnek 8.5’te [23] bulunan yapma enkesitli kolon modellenmiştir. Sonlu eleman modellerinde birimler Newton ve milimetre kullanılarak, elemanın geometrik ön kusuru modelde tanıtılmıştır. Kullanılan malzeme ve profil özellikleri aşağıdaki gibi belirtilmiştir.

Malzeme:	S275	$F_y = 275 \text{ N/mm}^2$	$F_u = 430 \text{ N/mm}^2$
		$E = 200000 \text{ N/mm}^2$	$\nu = 0.3$
Profil:	UPE200	$A_g = 29.01 \text{ cm}^2$	$h = 152 \text{ mm}$
		$b_f = 80 \text{ mm}$	$d = 200 \text{ mm}$
		$t_w = 6 \text{ mm}$	$t_f = 11 \text{ mm}$
		$i_x = 8.11 \text{ cm}$	$i_y = 2.54 \text{ cm}$

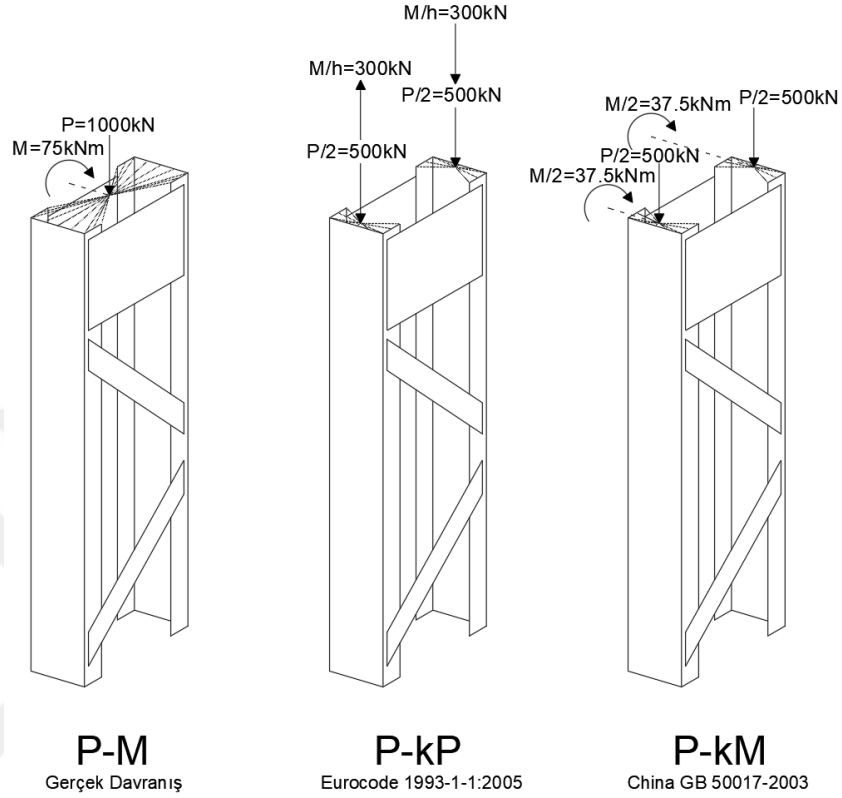
EC 3 [5] ve GB 50017 – 2003 [6] tasarım yaklaşımlarını değerlendirebilmek için farklı tipte yüklemelere sahip P-M, P-kP ve P-kM adlı üç sonlu eleman modeli oluşturulmuştur.

P–M modelinde, profillerin üst ucundaki düğüm noktaları, RP-1 adlı referans noktasında toplanmıştır. Bu noktadan, 1000 kN eksenel basınç kuvveti ile 75 kNm eğilme momenti modele etkilmiştir.

P–kP modelinde, sol profilin üst ucundaki düğüm noktaları, RP-2 adlı referans noktasında, sağ profilin üst ucundaki düğüm noktaları, RP-3 adlı referans noktasında toplanmıştır. EC 3 [5] tasarım yaklaşımında, eksenel basınç kuvveti sağ ve sol profillere eşit olarak paylaştırılmıştır. Ancak, eğilme momenti, profillere kuvvet çiftine dönüştürülmesi gerektiğinden, elemana etkiyen eğilme momenti, profil eksenleri arasındaki uzaklığa bölünerek elde edilen kuvvet değeri bir profile eksenel basınç kuvveti olarak, diğer profile ise eksenel çekme kuvveti olarak etkilmiştir.

P–kM modelinde de, sol profilin üst ucundaki düğüm noktaları, RP-2 adlı referans noktasında, sağ profilin üst ucundaki düğüm noktaları, RP-3 adlı referans noktasında toplanmıştır. GB 50017 – 2003 [6] tasarım yaklaşımında, eksenel basınç kuvveti sağ ve sol profillere eşit olarak paylaştırılmıştır. Ancak, eğilme momenti, bu tasarım yaklaşımı kapsamında profillere eğilme momenti olarak paylaştırılması gerekmektedir. Yapma enkesitli kolon elemanı simetrik olduğundan eğilme momenti, profillere eşit olarak paylaştırılmıştır.

EC 3 [5] ve GB 50017–2003 [6] tasarım yaklaşımlarını değerlendirebilmek için farklı tipte yüklemelere sahip P-M, P-kP ve P-kM adlı üç sonlu eleman modeli Şekil 3.12’de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.

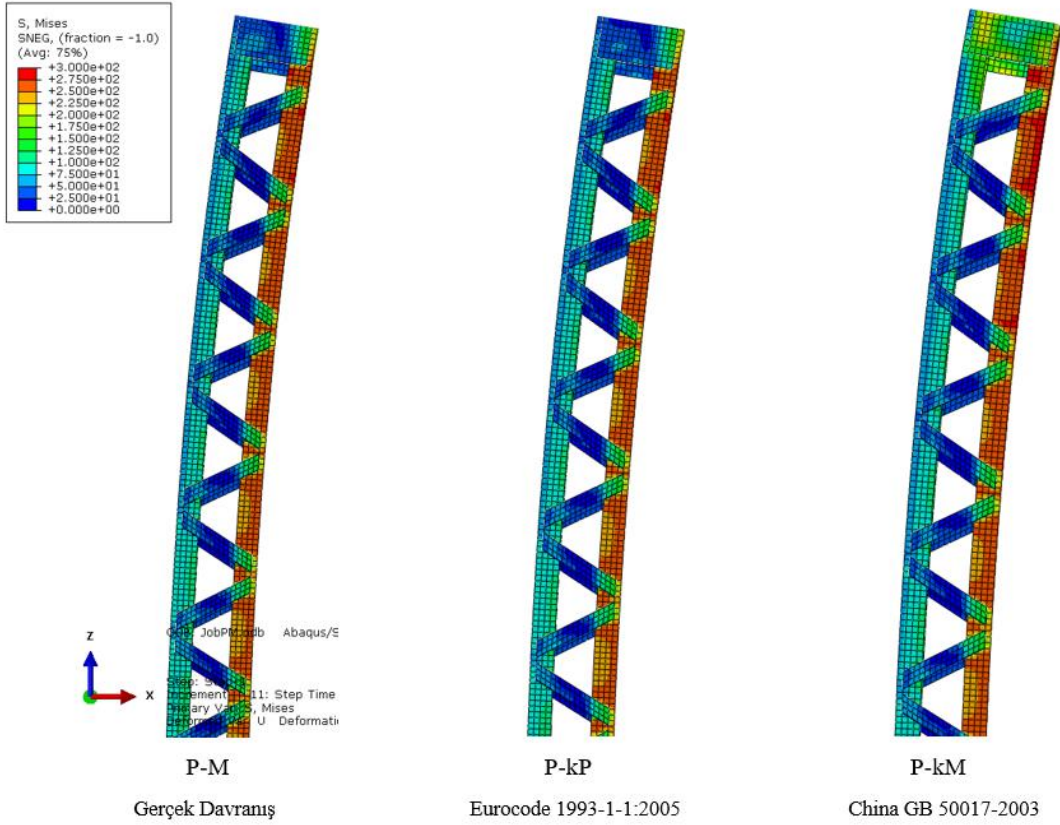


**Şekil 3.12** : EC 3 ve GB 50017–2003 tasarım yaklaşımlarını değerlendirebilmek için farklı tipte yüklemelere sahip sonlu eleman modelleri.

EC 3 [5] ve GB 50017–2003 [6] tasarım yaklaşımlarının değerlendirilmesi için kullanılan sonlu eleman analiz sonuçlarına göre gerçeğe daha yakın sonuç veren tasarım yaklaşımı esas alınacaktır. Esas alınan tasarım yaklaşımı, iki ucu mafsallı bir kolon ile bir konsol kolon örnekleri üzerinde incelenerek sonuçların sonlu eleman analiz sonuçları ile uyumu kontrol edilecektir.

### 3.2.2 ÇYTHYE 2018, EC 3 ve GB 50017–2003 esaslarının değerlendirilmesi

Sonlu eleman analizleri ile, farklı tipte yüklemelere sahip yapma enkesitli kolonların üst ucunda oluşan gerilmeler Şekil 3.13’te karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, EC 3 [5] tasarım yaklaşımının gerçek davranışla daha uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu doğrultuda, EC 3 [5] tasarım yaklaşımı esas alınarak, iki ucu mafsallı bir kolon ve bir konsol kolon örneği ile sonlu eleman analiz sonuçları arasındaki uyum değerlendirilecektir.



**Şekil 3.13 :** EC 3 ve GB 50017–2003 tasarım yaklaşımlarına göre düzenlenmiş farklı tipte yüklemelere sahip sonlu eleman modelleri.

İlk olarak, iki ucu mafsalı ve uç noktalarından yerdeğiştirmelere karşı desteklenen, 100 kN aksenal basınç kuvveti ve 10 kNm eğilme momentinin ortak etkisi altındaki yapma enkesitli kolon örneği için esas alınan EC 3 [5] tasarım yaklaşımına göre profillerden birinde oluşan maksimum aksenal basınç kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Etkin atalet momenti,

$$I_{eff} = 0.5h_0^2 A_{ch} = 0.5 \times 25^2 \times 29.01 = 9065.63 \text{ cm}^4 \quad (3.42)$$

Kesme rijitliği ( V-tipi ),

$$S_v = \frac{nEA_d a h_0^2}{2d^3}$$

$$S_v = \frac{2 \times 200000 \times 50 \times 10 \times 435 \times (250)^2}{2 \times 285^3} \times 10^{-3} = 117445 \text{ kN} \quad (3.43)$$

Geometrik ön kusur,

$$e_0 = \frac{L}{500} = \frac{10000}{500} = 20 \text{ mm} \quad (3.44)$$

Etkin burkulma yükü,

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{eff}}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 9065.63 \times 10^4}{10000^2} \times 10^{-3} = 1790 \text{ kN} \quad (3.45)$$

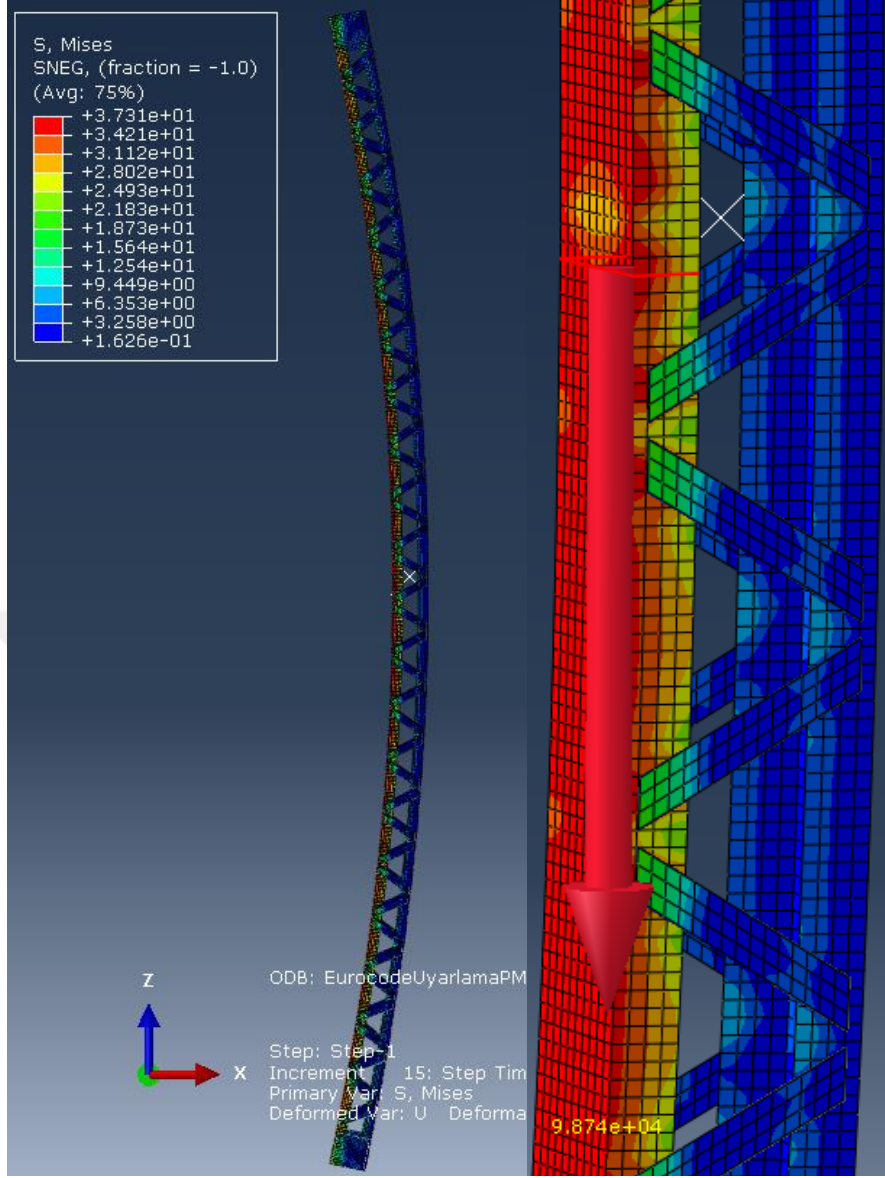
İkinci mertebe etkileri içeren gerekli eğilme momenti dayanımı,

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed}e_0 + M_{Ed}^I}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}} = \frac{100 \times 0.02 + 10}{1 - \frac{100}{1790} - \frac{100}{117445}} = 12.72 \text{ kNm} \quad (3.46)$$

Profillerden birinde oluşan, gerekli basınç kuvveti dayanımı,

$$N_{ch,Ed} = 0.5N_{Ed} + \frac{M_{Ed}h_0A_{ch}}{2I_{eff}}$$
$$N_{ch,Ed} = \frac{100}{2} + \frac{12.72 \times 0.25 \times 29.01 \times 10^{-4}}{2 \times 9065.63 \times 10^{-8}} = 100.9 \text{ kN} \quad (3.47)$$

EC 3 [5] tasarım yaklaşımı ile profil üzerindeki maksimum aksel basınç kuvveti 100.9 kN bulunurken, sonlu eleman analiz sonuçlarına göre bu değer Şekil 3.14'teki gibi 98.7 kN elde edilmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, %2 oranında fark olması ve EC 3 [5] tasarım yaklaşımı ile daha büyük değer elde edilmesi, aksel basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisi altındaki iki ucu mafsallı yapma enkesitli kolon örneği için EC 3 [5] tasarım yaklaşımının uygulanabilir olduğunu göstermektedir.



**Şekil 3.14 :** İki ucu mafsallı yapma enkesitli kolonun profillerinden birinde elde edilen maksimum aksenal basınç kuvveti.

Eksenal basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisi altındaki iki ucu mafsallı yapma enkesitli kolon örneği için hesaplanan kesme kuvveti ile kafes örgü elemanlarına gelen aksenal basınç kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_{Ed} = \frac{1}{L} \left( 4 - (4 - \pi) \frac{e_0 N_{Ed}}{e_0 N_{Ed} + M_{Ed}^I} \right) M_{Ed}$$

$$V_{Ed} = \frac{1}{10} \left( 4 - (4 - \pi) \frac{0.02 \times 100}{0.02 \times 100 + 10} \right) 12.72 = 4.91 \text{ kN} \quad (3.48)$$

$$N_{d,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n \cdot \sin \theta} = \frac{4.91}{2 \cdot \sin 60^\circ} = 2.84 \text{ kN} \quad (3.49)$$

Yapma enkesitli kolonun örgü elemanlarına gelen aksenal basınç kuvveti, EC 3 [5] tasarım yaklaşımına göre 2.84 kN olmaktadır. Ayrıca, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre örgü elemanlarında elde edilen aksenal basınç kuvveti aşağıdaki gibi elde edilerek sonuçlar, sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre, yapma enkesitli kolon elemanının kesme kuvveti, aksenal basınç kuvveti dayanımının %2'si olarak kabul edilmektedir. Bu yüzden, elemanın kesme kuvveti hesabı için aksenal basınç kuvveti dayanımının elde edilmesi gerekmektedir. İki ucu mafsallı yapma enkesitli kolonun her iki doğrultusunda burkulma boyu katsayısı 1 olarak alınmaktadır.

$$L_{cx} = L_{cy} = K \times L = 1 \times 10000 = 10000 \text{ mm} \quad (3.50)$$

Profiller, düzlem içi doğrultusunda birlikte çalıştığından atalet momenti ve yarıçapı aşağıdaki gibi tekrardan hesaplanmaktadır.

$$I_y = 2 \times (I_{y,1} + A_1 e^2)$$

$$I_y = 2 \times (187.3 \times 10^4 + 2901 \times (124.4)^2) = 9353 \times 10^4 \text{ mm}^4 \quad (3.51)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_g}{A_g}} = \sqrt{\frac{9353 \times 10^4}{5802}} = 127 \text{ mm} \quad (3.52)$$

$$I_x = 1909 \times 10^4 \text{ mm}^4 \quad i_x = 81.13 \text{ mm} \quad (3.53)$$

Düzlem içi ve düzlem dışı doğrultularındaki, burkulma boylarının atalet yarıçapına oranı ile elde edilen narinlik oranlarının 200'den küçük olması gerekmektedir.

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = \left[\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right); \left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)\right]_{\max}$$

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = \left[\left(\frac{10000}{81.13}\right); \left(\frac{10000}{127}\right)\right]_{\max}$$

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = [(123.26); (78.74)]_{\max} = 123.26 \leq 200 \quad \checkmark \quad (3.54)$$

Eğilmeli burkulma sınır durumu;

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(123.26)^2} = 129.92 \text{ MPa} \quad (3.55)$$

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{275}{129.92} = 2.12 \leq 2.25 \quad (3.56)$$

$$F_{cr} = \left(0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right) \times F_y = (0.658^{2.12}) \times 275 = 113.39 \text{ MPa} \quad (3.57)$$

Burulmalı burkulma sınır durumu;

$$F_e = \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(L_{cz})^2} + GJ \right] \frac{1}{I_x + I_y}$$

$$F_e = \left[ \frac{\pi^2 \times 200000 \times (2 \times 1188) \times 10^7}{(10000)^2} + \dots \right]$$

$$F_e = [\dots + 77200 \times (2 \times 88840)] \frac{1}{2 \times 1909 \times 10^4 + 9353 \times 10^4}$$

$$F_e = 107.70 \text{ MPa} \quad (3.58)$$

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{275}{107.7} = 2.55 > 2.25 \quad (3.59)$$

$$F_{cr} = 0.877 \times F_e = 0.877 \times 107.70 = 94.45 \text{ MPa} \quad (3.60)$$

Burkulma dayanımı bu iki durumun küçüğü ile aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$F_{cr} = (113.39; 94.45)_{\min} = 94.45 \text{ MPa} \quad (3.61)$$

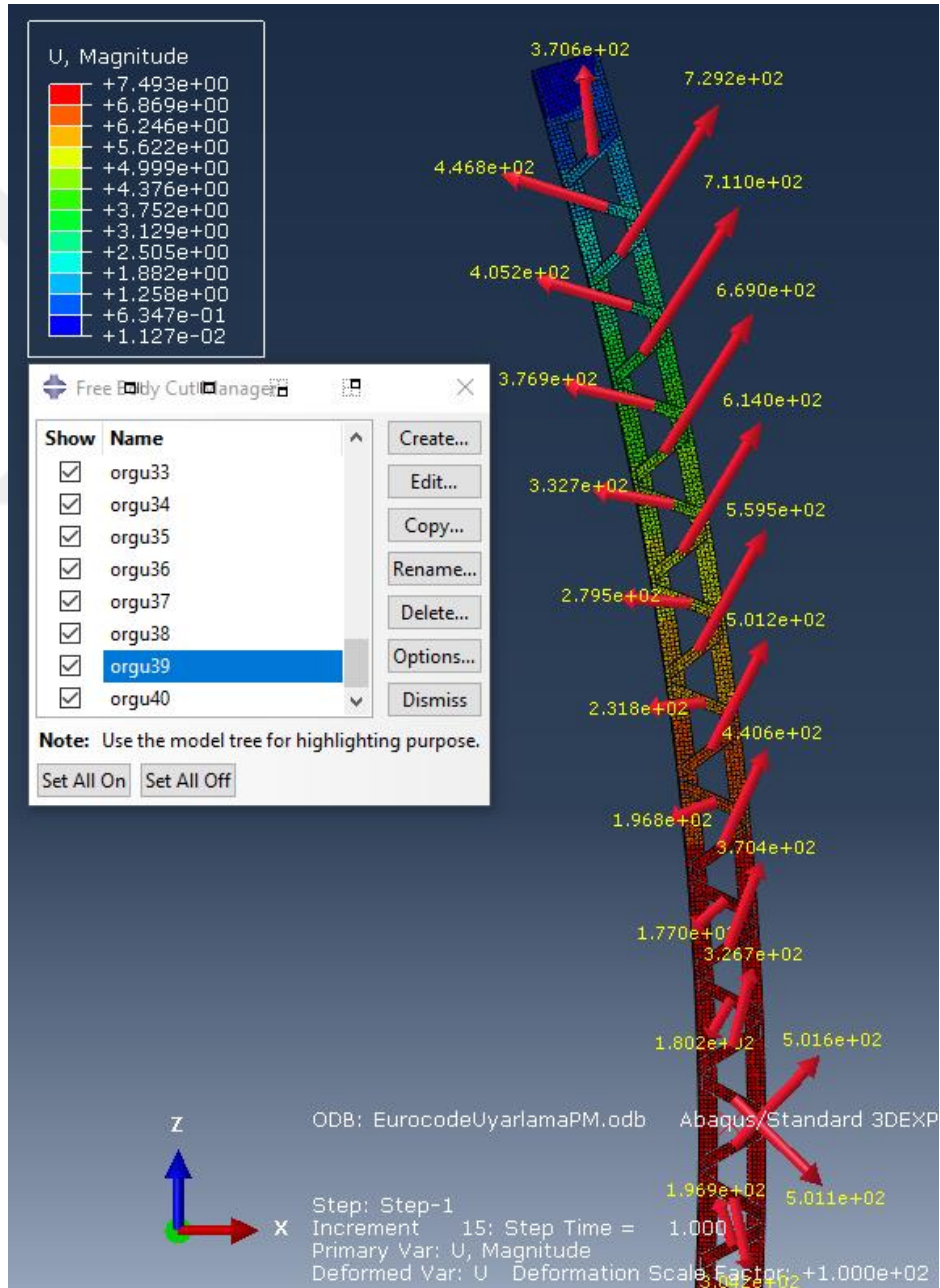
$$P_n = F_{cr} \times A_g = 94.45 \times (2 \times 2901) \times 10^{-3} = 548 \text{ kN} \quad (3.62)$$

$$P_d = \phi \times P_n = 0.90 \times 548 = 493 \text{ kN} \quad (3.63)$$

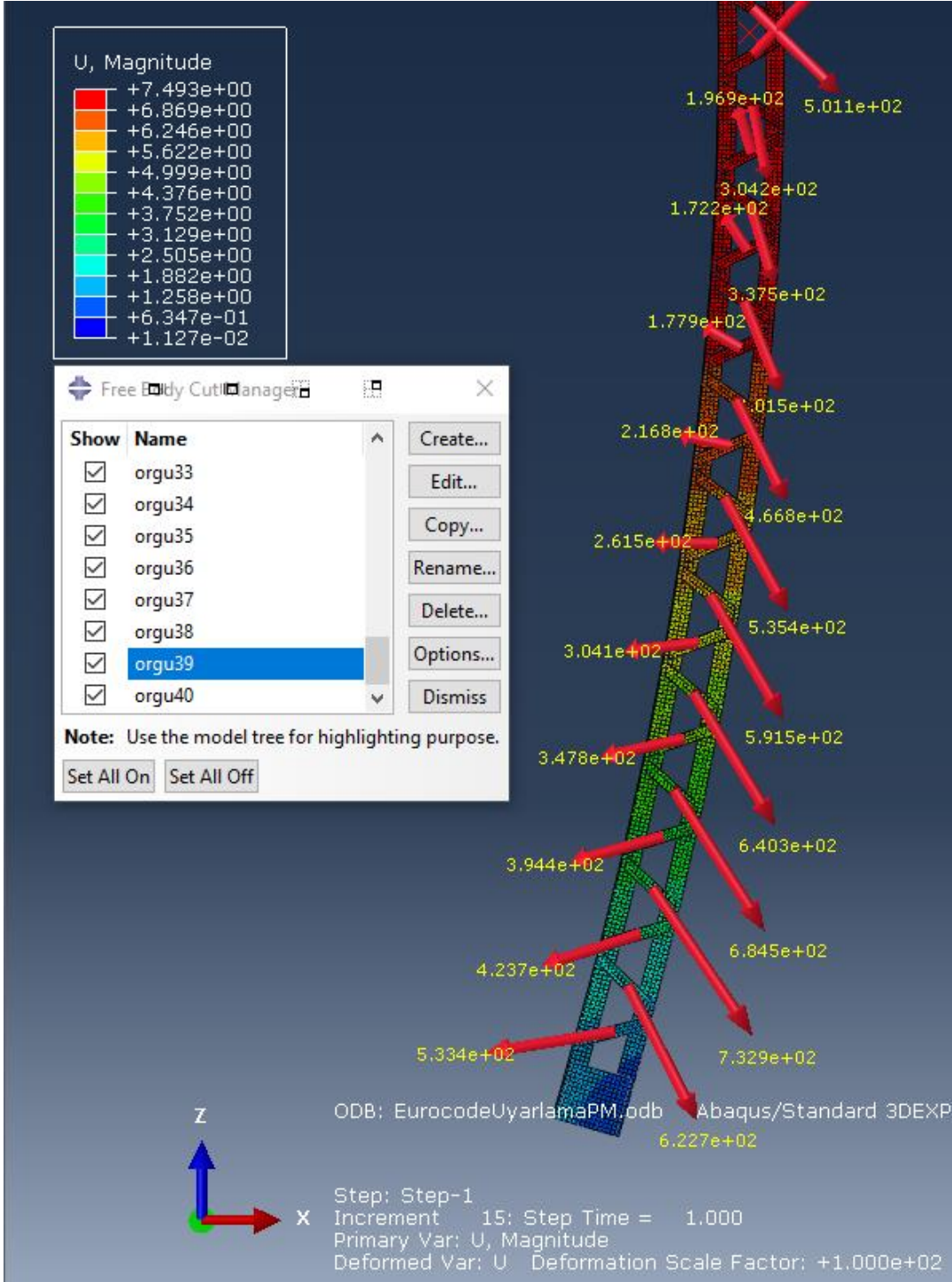
ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre, yapma enkesitli kolon elemanının kesme kuvveti, eksenel basınç kuvveti dayanımının %2'si olarak kabul edilmektedir. Kesme kuvvetinin trigonometrik dönüşümü ile örgü elemanlarına gelen eksenel basınç kuvveti aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$V_u = 0.02P_d = 0.02 \times 493 = 9.86 \text{ MPa} \quad (3.64)$$

$$P_{Lc} = \frac{V_u/2}{\sin \theta} = \frac{9.86/2}{\sin 60^\circ} = 5.69 \text{ kN} \quad (3.65)$$



Şekil 3.15 : İki ucu mafsallı ve uç noktalarından desteklenen yapma enkesitli kolonun üst bölgesindeki örgü elemanlarının eksenel basınç kuvvetleri.



**Şekil 3.16 :** İki ucu mafsallı ve uç noktalarından desteklenen yapma enkesitli kolonun alt bölgesindeki örgü elemanlarının aksel basınç kuvvetleri.

EC 3 [5] tasarım yaklaşımı ile örgü elemanları üzerindeki maksimum aksel basınç kuvveti 2.84 kN iken, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre 5.69 kN olmaktadır. Sonlu eleman analizi sonucunda, örgü elemanları üzerindeki maksimum aksel basınç kuvveti Şekil 3.16'da görüldüğü üzere, 0.73 kN olarak elde edilmektedir.

İkinci olarak, alt ucu sabitlenmiş, üst ucu ise sadece düzlem dışı doğrultusunda yerdeğiştirmelere karşı desteklenen 5.8m uzunluğunda yapma enkesitli konsol kolon örneği incelenmektedir. Bu yapma enkesitli konsol kolonun, üst noktasından, 100 kN aksenal basınç kuvveti ve 10 kN yatay kuvvet etkimektedir. Yatay kuvvet nedeniyle eleman alt ucunda oluşan 58 kNm eğilme momenti ile 100 kN aksenal basınç kuvvetinin ortak etkisi altında EC 3 [5] tasarım yaklaşımına göre profillerden birinde oluşan maksimum aksenal basınç kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Etkin atalet momenti,

$$I_{\text{eff}} = 0.5h_0^2 A_{\text{ch}} \quad I_{\text{eff}} = 0.5 \times 25^2 \times 29.01 = 9065.63 \text{ cm}^4 \quad (3.66)$$

Kesme rijitliği ( V-tipi ),

$$S_v = \frac{nEA_d a h_0^2}{2d^3}$$

$$S_v = \frac{2 \times 200000 \times 50 \times 10 \times 435 \times (250)^2}{2 \times 285^3} \times 10^{-3} = 117445 \text{ kN} \quad (3.67)$$

Geometrik ön kusur,

$$e_0 = \frac{L}{500} = \frac{5800}{500} = 11.6 \text{ mm} \quad (3.68)$$

Etkin burkulma yükü,

$$N_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 E I_{\text{eff}}}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 9065.63 \times 10^4}{5800^2} \times 10^{-3} = 5320 \text{ kN} \quad (3.69)$$

İkinci mertebe etkileri içeren gerekli eğilme momenti dayanımı,

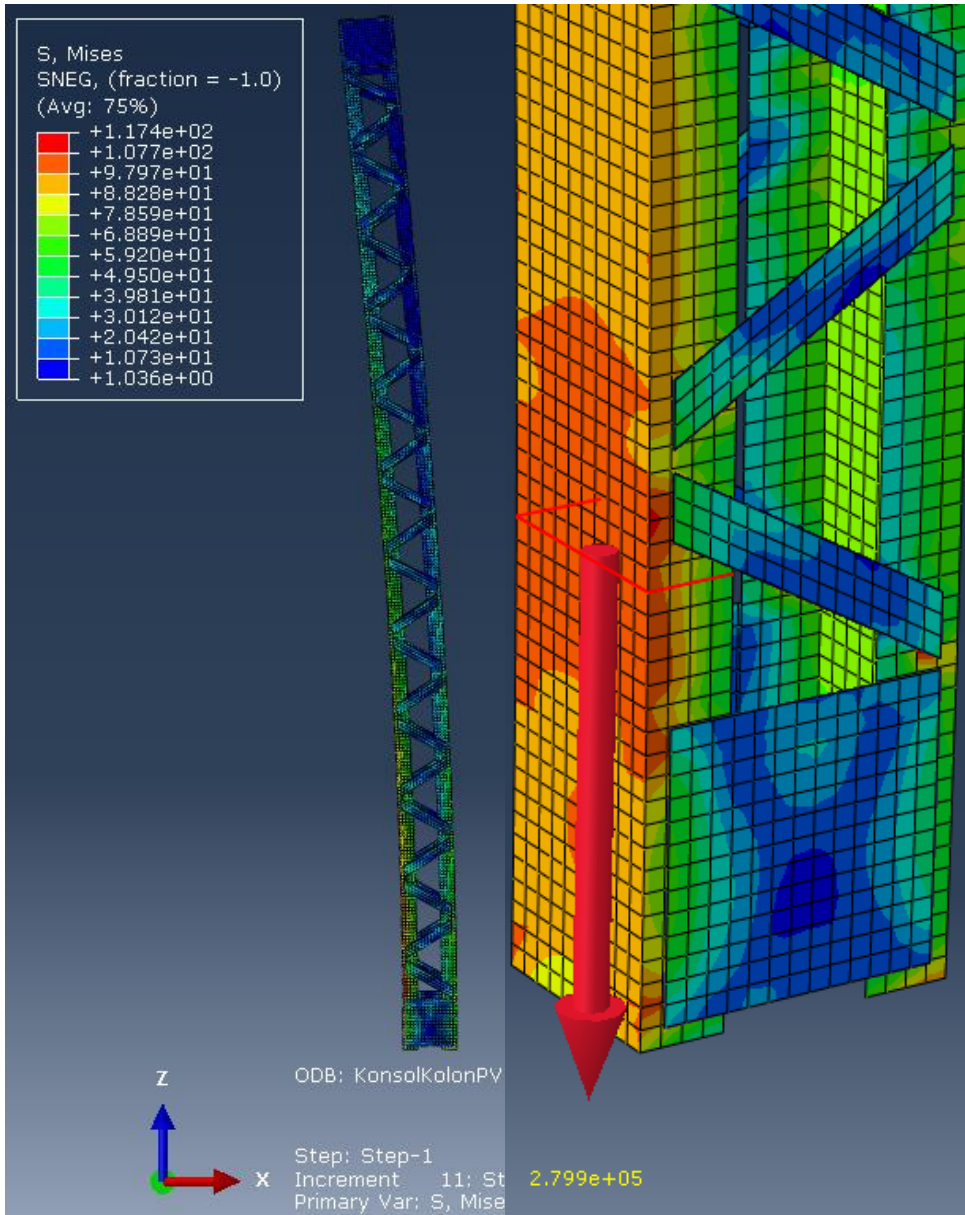
$$M_{\text{Ed}} = \frac{N_{\text{Ed}} e_0 + M_{\text{Ed}}^I}{1 - \frac{N_{\text{Ed}}}{N_{\text{cr}}} - \frac{N_{\text{Ed}}}{S_v}} = \frac{100 \times 0.0116 + 58}{1 - \frac{100}{5320} - \frac{100}{117445}} = 60.35 \text{ kNm} \quad (3.70)$$

Profillerden birinde oluşan, gerekli basınç kuvveti dayanımı,

$$N_{\text{ch,Ed}} = 0.5N_{\text{Ed}} + \frac{M_{\text{Ed}} h_0 A_{\text{ch}}}{2I_{\text{eff}}}$$

$$N_{ch,Ed} = \frac{100}{2} + \frac{60.35 \times 0.25 \times 29.01 \times 10^{-4}}{2 \times 9065.63 \times 10^{-8}} = 291.4 \text{ kN} \quad (3.71)$$

EC 3 [5] tasarım yaklaşımı ile profil üzerindeki maksimum aksenal basınç kuvveti 291.4 kN bulunurken, sonlu eleman analiz sonuçlarına göre bu değer Şekil 3.17'deki gibi 279.9 kN elde edilmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, %4 oranında fark olması ve EC 3 [5] tasarım yaklaşımı ile daha büyük değer elde edilmesi, aksenal basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisi altındaki yapma enkesitli konsol kolon örneği için EC 3 [5] tasarım yaklaşımının uygulanabilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.17 : Yapma enkesitli konsol kolonun profillerinden birinde elde edilen maksimum aksenal basınç kuvveti.

Yapma enkesitli kolonun örgü elemanlarına gelen aksenal basınç kuvveti, EC 3 [5] tasarım yaklaşımına göre 2.84 kN olmaktadır. Ayrıca, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre örgü elemanlarında elde edilen aksenal basınç kuvveti aşağıdaki gibi elde edilerek sonuçlar, sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre, yapma enkesitli kolon elemanının kesme kuvveti, aksenal basınç kuvveti dayanımının %2'si olarak kabul edilmektedir. Bu yüzden, elemanın kesme kuvveti hesabı için aksenal basınç kuvveti dayanımının elde edilmesi gerekmektedir. İki ucu mafsallı yapma enkesitli kolonun her iki doğrultusunda burkulma boyu katsayısı 1 olarak alınmaktadır.

Eksenal basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisi altındaki yapma enkesitli konsol kolon örneği için hesaplanan kesme kuvveti ile kafes örgü elemanlarına gelen aksenal basınç kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_{Ed} = \frac{1}{5.8} \left( 4 - (4 - \pi) \frac{0.0116 \times 100}{0.0116 \times 100 + 58} \right) 60.35 = 41.5 \text{ kN} \quad (3.72)$$

$$N_{d,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n \cdot \sin \theta} = \frac{41.5}{2 \cdot \sin 60^\circ} = 23.9 \text{ kN} \quad (3.73)$$

Yapma enkesitli kolonun örgü elemanlarına gelen aksenal basınç kuvveti, EC 3 [5] tasarım yaklaşımına göre 23.9 kN olmaktadır. Ayrıca, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre örgü elemanlarında elde edilen aksenal basınç kuvveti aşağıdaki gibi elde edilerek sonuçlar, sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre, yapma enkesitli kolon elemanının kesme kuvveti, aksenal basınç kuvveti dayanımının %2'si olarak kabul edilmektedir. Bu yüzden, elemanın kesme kuvveti hesabı için aksenal basınç kuvveti dayanımının elde edilmesi gerekmektedir. Yapma enkesitli konsol kolonun üst ucu, düzlem içi doğrultusunda serbest iken, düzlem dışı doğrultusundaki yerdeğiştirmelere karşı desteklenmiştir. Bu durumda, burkulma boyu katsayıları düzlem içi ve düzlem dışı olmak üzere sırasıyla  $K_y = 2.10$  ve  $K_x = 0.80$  olmaktadır.

$$L_{cy} = K_y \times L = 2.10 \times 5800 = 12180 \text{ mm} \quad (3.74)$$

$$L_{cx} = K_x \times L = 0.80 \times 5800 = 4640 \text{ mm} \quad (3.75)$$

Profiller, düzlem içi doğrultusunda birlikte çalıştığından atalet momenti ve yarıçapı aşağıdaki gibi tekrardan hesaplanmalıdır.

$$I_y = 2 \times (I_{y,1} + A_1 e^2)$$

$$I_y = 2 \times (187.3 \times 10^4 + 2901 \times (124.4)^2) = 9353 \times 10^4 \text{ mm}^4 \quad (3.76)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_g}{A_g}} = \sqrt{\frac{9353 \times 10^4}{5802}} = 127 \text{ mm} \quad (3.77)$$

$$I_x = 1909 \times 10^4 \text{ mm}^4 \quad i_x = 81.13 \text{ mm} \quad (3.78)$$

Düzlem içi ve düzlem dışı doğrultularındaki, burkulma boylarının atalet yarıçapına oranı ile elde edilen narinlik oranları 200'den küçük olması gerekmektedir.

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = \left[\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right); \left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)\right]_{\max}$$

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = \left[\left(\frac{4640}{81.13}\right); \left(\frac{12180}{127}\right)\right]_{\max}$$

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = [(57.19); (95.91)]_{\max} = 95.91 \leq 200 \quad \checkmark \quad (3.79)$$

Eğilmeli burkulma sınır durumu;

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(95.91)^2} = 214.58 \text{ MPa} \quad (3.80)$$

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{275}{214.58} = 1.28 \leq 2.25 \quad (3.81)$$

$$F_{cr} = \left(0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right) \times F_y = (0.658^{1.28}) \times 275 = 160.84 \text{ MPa} \quad (3.82)$$

Burulmalı burkulma sınır durumu;

$$F_e = \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(L_{cz})^2} + GJ\right] \frac{1}{I_x + I_y}$$

$$F_e = \left[ \frac{\pi^2 \times 200000 \times (2 \times 1188) \times 10^7}{(5800)^2} + \dots \right]$$

$$F_e = [.. + 77200 \times (2 \times 88840)] \frac{1}{2 \times 1909 \times 10^4 + 9353 \times 10^4}$$

$$F_e = 114.73 \text{ MPa} \quad (3.83)$$

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{275}{114.73} = 2.40 > 2.25 \quad (3.84)$$

$$F_{cr} = 0.877 \times F_e = 0.877 \times 114.73 = 100.62 \text{ MPa} \quad (3.85)$$

Burkulma dayanımı bu iki durumun küçüğü ile aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$F_{cr} = (160.84; 100.62)_{\min} = 100.62 \text{ MPa} \quad (3.86)$$

$$P_n = F_{cr} \times A_g = 100.62 \times (2 \times 2901) \times 10^{-3} = 584 \text{ kN} \quad (3.87)$$

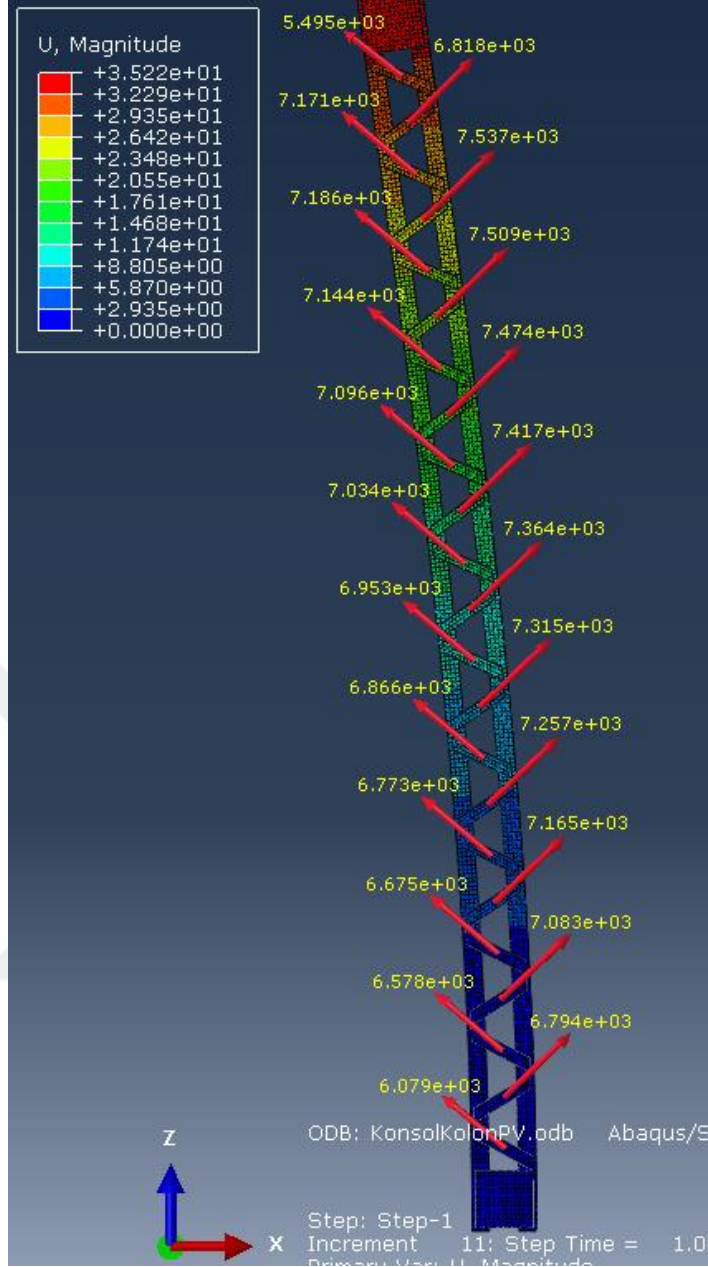
$$P_d = \phi \times P_n = 0.90 \times 584 = 525 \text{ kN} \quad (3.88)$$

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre, yapma enkesitli kolon elemanının kesme kuvveti, eksenel basınç kuvveti dayanımının %2'si olarak kabul edilmektedir. Kesme kuvvetinin trigonometrik dönüşümü ile örgü elemanlarına gelen eksenel basınç kuvveti aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$V_u = 0.02P_d = 0.02 \times 525 = 10.51 \text{ MPa} \quad (3.89)$$

$$P_{Lc} = \frac{V_u/2}{\sin \theta} = \frac{10.51/2}{\sin 60^\circ} = 6.07 \text{ kN} \quad (3.90)$$

EC 3 [5] tasarım yaklaşımı ile örgü elemanları üzerindeki maksimum eksenel basınç kuvveti 23.9 kN iken, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre 6.07 kN olmaktadır. Sonlu eleman analizi sonucunda, örgü elemanları üzerindeki maksimum eksenel basınç kuvveti Şekil 3.18'deki gösterildiği üzere 7.54 kN olarak elde edilmektedir.



**Şekil 3.18 :** Yapma enkesitli konsol kolonun kafes örgü elemanlarda elde edilen aksenal basınç kuvvetleri.

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8.4 (h) paragrafı [4] uyarınca kolon, yanal yük veya eğilme momenti etkisinde olduğu durumda ise örgü elemanları ve birleşim elemanları, ilave kesme kuvveti ve eğilme momenti etkisi gözönüne alınarak boyutlandırılması gerekmektedir. EC 3 [5] tasarım yaklaşımına göre hesaplanan kesme kuvveti  $V_{Ed}$ , ilave kesme kuvveti ve eğilme moment etkisini de kapsamakta olduğundan tasarım için daha uygun olmaktadır. Ancak, bu yaklaşımla hesaplanan örgü elemanlarındaki aksenal basınç kuvveti, sonlu eleman analiz sonuçlarına daha uyumlu olabilmesi için bu konudaki sayısal ve deneysel çalışmaların artırılması önerilmektedir.

### 3.3 ÇYTHYE 2018 İçin Esas Alınacak Tasarım Yaklaşımı ve Bir Örnek Kolon Üzerinde Değerlendirilmesi

Bu bölümde, eksenel basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisi altındaki örgü elemanlı yapma enkesitli kolonlar üzerine, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği [4] için önerilen tasarım yaklaşımı örnek bir kolon üzerinde değerlendirilmiştir. Bu tasarım yaklaşımı aşağıdaki gibi üç aşamadan oluşmaktadır.

- 1) Yapma enkesitli kolonun geometrik özellikleri, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8.4 [4] kapsamında verilen geometrik esaslara ve konstrüktif kurallara uygun olması gerekmektedir. Geometrik esaslar ve konstrüktif kurallar bu çalışma kapsamında Bölüm 3.1.1’de sunulmaktadır.
- 2) Yapma enkesitli kolona etkiyen eksenel basınç kuvveti esas alınarak ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği’ne [4] göre, eğilmeli burkulma ve burulmalı burkulma sınır durumları dikkate alınarak mevcut eksenel basınç kuvveti dayanımı belirlenmeli veya dayanım kontrolü yapılmalıdır.
- 3) Yapma enkesitli kolona etkiyen eğilme momenti, kuvvet çiftine dönüştürülerek her bir profile etkiyen eksenel kuvvet hesaplanmalıdır. En büyük eksenel basınç kuvveti etkisindeki profil esas alınarak ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği’ne [4] göre eksenel basınç kuvveti dayanımı belirlenmelidir. Bu işlem sırasında, ilgili profilin düzlem içindeki burkulma boyu ( $L_c = K \times a = 1.0 \times a$ ), örgü elemanları arasındaki uzaklığa eşit alınmalıdır. Profilin düzlem dışına burkulması durumu için ise, toplam profil uzunluğu esas alınarak, burkulma boyu,  $L_c = K \times L = 1.0 \times L$  şeklinde elde edilmelidir. Bu dayanım, gerekli eksenel basınç kuvveti dayanımı ile karşılaştırılmalıdır. Ayrıca, bu tasarım yaklaşımı ile örgü elemanları için gerekli eksenel basınç kuvveti dayanımı da elde edilmelidir. Tasarım, örgü elemanlarının eksenel basınç kuvveti dayanımı kontrol edilerek tamamlanır.

Profillerden birinde oluşan maksimum eksenel basınç kuvveti hesabı için, önerilen yaklaşım aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Geometrik ön kusur,

$$\Delta = \frac{L}{500} \quad (3.91)$$

Etkin atalet momenti,

$$I_e = 0.5e^2A_1 \quad (3.92)$$

Etkin burkulma yükü,

$$P_e = \frac{\pi^2EI_e}{L^2} \quad (3.93)$$

V-tipi örgü elemanlı yapma enkesitlerin kesme rijitliği,

$$\beta_v = \frac{nEA_{Lc}ae^2}{2L_b^3} \quad (3.94)$$

K-tipi örgü elemanlı yapma enkesitlerin kesme rijitliği,

$$\beta_v = \frac{nEA_{Lc}ae^2}{L_b^3} \quad (3.95)$$

Z-tipi örgü elemanlı yapma enkesitlerin kesme rijitliği,

$$\beta_v = \frac{nEA_{Lc}ae^2}{L_b^3 \left[ 1 + \frac{A_{Lc}e^3}{A_vL_b^3} \right]} \quad (3.96)$$

X-tipi örgü elemanlı yapma enkesitlerin kesme rijitliği,

$$\beta_v = \frac{2nEA_{Lc}ae^2}{L_b^3} \quad (3.97)$$

İkinci merteye etkileri içeren gerekli eğilme momenti dayanımı,

$$M_u = \frac{P_G\Delta + M_G}{1 - \frac{P_G}{P_e} - \frac{P_G}{\beta_v}} \quad (3.98)$$

Profillerden birinde oluşan, gerekli basınç kuvveti dayanımı,

$$P_u = 0.5P_G + \frac{M_u}{e} \quad (3.99)$$

Yapma enkesitli kolon elemanında oluşan kesme kuvveti,

$$V_u = \frac{1}{L} \left( 4 - (4 - \pi) \frac{\Delta \times P_G}{\Delta \times P_G + M_G} \right) M_u \quad (3.100)$$

Örgü elemanları için gerekli aksenal basınç kuvveti dayanımı,

$$P_{Lc} = \frac{V_u}{n \cdot \sin \theta} \quad (3.101)$$

YDKT'ye göre ikinci merteye etkileri içeren gerekli eğilme momenti dayanımı,  $M_u$  ve yapma enkesitli elemanın ana parçalarından birinde oluşan, YDKT'ye göre gerekli basınç kuvveti dayanımı,  $P_u$  ile ifade edilmektedir. GKT yöntemi kullanılması durumunda gerekli eğilme momenti dayanımı,  $M_a$ , gerekli basınç kuvveti dayanımı,  $P_a$  ile gösterilmelidir.

Denklem içindeki ifadelerden  $P_G$ , yapma enkesitli kolon elemanına etkileyen aksenal basınç kuvvetini,  $M_G$ , yapma enkesitli kolon elemanına etkileyen eğilme momentini,  $L$ , eleman uzunluğunu,  $e$ , profil eksenleri arasındaki uzaklığı,  $A_1$ , bir profilin enkesit alanını,  $n$ , örgü elemanlarının düzlem sayısını,  $E$ , elastisite modülünü,  $A_{Lc}$ , örgü elemanlarının enkesit alanını,  $a$ , iki örgü elemanı arasında kalan serbest profil boyunu,  $L_b$ , örgü elemanının uzunluğunu ifade etmektedir.

Önerilen tasarım yaklaşımını örneklendirmek için Bölüm 3.2.1'de yer alan iki ucu mafsallı ve uç noktalarından desteklenen, 100 kN aksenal basınç kuvveti ile 10 kNm eğilme momentinin ortak etkisi altındaki yapma enkesitli kolon kullanılarak, önerilen tasarım yaklaşımına göre elemanın tasarımı gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, yapma enkesitli kolonun geometrik özellikleri, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8.4 [4] kapsamında verilen geometrik esaslara ve konstrüktif kurallara göre kontrol edilmesi gerekmektedir.

- Tek diyagonal örgü elemanları ile oluşturulan yapma enkesitli kolon elemanında, kafes örgü elemanlarının düşey eksen ile yaptığı açı  $60^\circ$ 'den daha az olmaması gerekmektedir. Bu açı, yapma enkesitli örnek kolonda  $60^\circ$  olduğundan gerekli koşul sağlanmaktadır.
- Yapma enkesitli kolon elemanında alt ve üst uçlarda yer alan bağ levhası yüksekliği, bağ levhası genişliğine eşit veya daha büyük olmalıdır. Yapma enkesitli örnek kolonda, bağ levhası genişliği 260mm iken, bağ levhası yüksekliğinin 260mm olduğundan gerekli koşul sağlanmaktadır.

- Bağ levhası kalınlığı, bağ levhası genişliğinin 1/50'sinden az olmamalıdır. Bu doğrultuda, genişliği 260mm olan bağ levhası kalınlığı 5mm'den fazla olması yeterlidir. Seçilen örgü ve bağ levhası kalınlıkları 10mm olduğundan bu koşul sağlanmaktadır.

İkinci olarak, yapma enkesitli kolon elemanına etkiyen aksenal basınç kuvveti altında, eleman genelinde ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre gerekli burkulma kontrollerinin yapılması gerekmektedir.

Yerel burkulma sınır durumu için;

Başlık parçası (ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği – Tablo 5.1A, Durum 1 [4])

$$\lambda = \frac{b}{t_f} = \frac{80}{11} = 7.27 \leq \lambda_r = 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.56 \sqrt{\frac{200000}{275}} = 15.10 \quad \checkmark \quad (3.102)$$

Gövde parçası (ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği – Tablo 5.1A, Durum 5 [4])

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{152}{6} = 25.3 \leq \lambda_r = 1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.49 \sqrt{\frac{200000}{275}} = 40.18 \quad \checkmark \quad (3.103)$$

İki ucu mafsallı yapma enkesitli kolonun her iki doğrultusundaki burkulma boyu katsayısı 1 olarak alınmaktadır.

$$L_{cx} = L_{cy} = K \times L = 1 \times 10000 = 10000 \text{ mm} \quad (3.104)$$

Enkesitin, düzlem içine ait atalet momenti ve atalet yarıçapı aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$I_y = 2 \times (I_{y,1} + A_1 e^2)$$

$$I_y = 2 \times (187.3 \times 10^4 + 2901 \times (124.4)^2) = 9353 \times 10^4 \text{ mm}^4 \quad (3.105)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_g}{A_g}} = \sqrt{\frac{9353 \times 10^4}{5802}} = 127 \text{ mm} \quad (3.106)$$

$$I_x = 1909 \times 10^4 \text{ mm}^4 \quad i_x = 81.13 \text{ mm} \quad (3.107)$$

Düzlem içine ve düzlem dışına ait burkulma boylarının atalet yarıçaplarına oranı ile elde edilen narinlik oranları 200'den küçük olması gerekmektedir.

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = \left[\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right); \left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)\right]_{\max}$$

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = \left[\left(\frac{10000}{81.13}\right); \left(\frac{10000}{127}\right)\right]_{\max}$$

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = [(123.26); (78.74)]_{\max} = 123.26 \leq 200 \quad \checkmark \quad (3.108)$$

Kafes örgü elemanlarının eksenleri arasında kalan profil için, zayıf eksendeki narinlik oranı, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8.4'e [4] göre iki ayrı sınır değer ile kontrol edilmektedir.

$$\left(\frac{a}{i_i}\right) \leq \frac{3}{4} \left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max}$$

$$\left(\frac{a}{i_i}\right) = \left(\frac{435}{25.41}\right) = 17.12 \leq \frac{3}{4} \left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = \frac{3}{4} \times 123.26 = 92.45 \quad \checkmark \quad (3.109)$$

$$\left(\frac{a}{i_i}\right) \leq 40$$

$$\left(\frac{a}{i_i}\right) = \left(\frac{435}{25.41}\right) = 17.12 \leq 40 \quad \checkmark \quad (3.110)$$

Eğilmeli burkulma sınır durumu;

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(123.26)^2} = 129.92 \text{ MPa} \quad (3.111)$$

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{275}{129.92} = 2.12 \leq 2.25 \quad (3.112)$$

$$F_{cr} = \left(0.658 \frac{F_y}{F_e}\right) \times F_y = (0.658^{2.12}) \times 275 = 113.39 \text{ MPa} \quad (3.113)$$

Burulmalı burkulma sınır durumu;

$$F_e = \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(L_{cz})^2} + GJ \right] \frac{1}{I_x + I_y}$$

$$F_e = \left[ \frac{\pi^2 \times 200000 \times (2 \times 1188) \times 10^7}{(10000)^2} + \dots \right]$$

$$F_e = [\dots + 77200 \times (2 \times 88840)] \frac{1}{2 \times 1909 \times 10^4 + 9353 \times 10^4}$$

$$F_e = 107.70 \text{ MPa} \quad (3.114)$$

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{275}{107.7} = 2.55 > 2.25 \quad (3.115)$$

$$F_{cr} = 0.877 \times F_e = 0.877 \times 107.70 = 94.45 \text{ MPa} \quad (3.116)$$

Burkulma dayanımı bu iki durumun küçüğü ile aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$F_{cr} = (113.39; 94.45)_{\min} = 94.45 \text{ MPa} \quad (3.117)$$

$$P_n = F_{cr} \times A_g = 94.45 \times (2 \times 2901) \times 10^{-3} = 548 \text{ kN} \quad (3.118)$$

$$P_d = \phi \times P_n = 0.90 \times 548 = 493 \text{ kN} \quad (3.119)$$

$$P_d = 493 \text{ kN} > P_u = 100 \text{ kN} \quad \checkmark \quad (3.120)$$

Üçüncü olarak, önerilen tasarım yaklaşımına göre düzlem içi aksenal basınç kuvveti dayanımı hesaplanırken, iki örgü elemanının merkezleri arasında kalan profil uzunluğu esas alınmaktadır. Bu bölgede, örgü elemanları ile desteklenen profilin burkulma boyu katsayısı  $K = 1$  olarak kabul edilmektedir.

$$L_c = K \times L = 1 \times 435 = 435 \text{ mm} \quad (3.121)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{i_y}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{\left(\frac{435}{25.41}\right)^2} = 6735.4 \text{ MPa} \quad (3.122)$$

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{275}{6735.4} = 0.041 \leq 2.25 \quad (3.123)$$

$$F_{cr} = \left( 0.658^{\frac{F_y}{F_e}} \right) \times F_y = (0.658^{0.041}) \times 275 = 270.34 \text{ MPa} \quad (3.124)$$

Karakteristik ve tasarım burkulma dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_n = F_{cr} \times A_g = 270.34 \times (2901) \times 10^{-3} = 784 \text{ kN} \quad (3.125)$$

$$P_d = \emptyset \times P_n = 0.90 \times 784 = 705.8 \text{ kN} \quad (3.126)$$

Düzlem dışı doğrultusundaki burkulma dayanımı için burkulma boyu hesaplanırken, hesap doğrultusundaki mesnetler arasında kalan profil uzunluğu esas alınmaktadır. Alt ve üst ucu mafsallı ve yerdeğiştirmelere karşı desteklenen profil için  $K = 1$  olarak kabul edilmektedir.

$$L_{cx} = K \times L = 1 \times 10000 = 10000 \text{ mm} \quad (3.127)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left( \frac{L_{cx}}{i_y} \right)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{\left( \frac{10000}{81.13} \right)^2} = 130 \text{ MPa} \quad (3.128)$$

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{275}{130} = 2.12 \leq 2.25 \quad (3.129)$$

$$F_{cr} = \left( 0.658^{\frac{F_y}{F_e}} \right) \times F_y = (0.658^{2.12}) \times 275 = 113.4 \text{ MPa} \quad (3.130)$$

Karakteristik ve tasarım burkulma dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_n = F_{cr} \times A_g = 113.4 \times (2901) \times 10^{-3} = 328.9 \text{ kN} \quad (3.131)$$

$$P_d = \emptyset \times P_n = 0.90 \times 328.9 = 296.1 \text{ kN} \quad (3.132)$$

Konsol yapma enkesitli kolon profilinin tasarım burkulma dayanımı, düzlem içi ve düzlem dışı doğrultularındaki burkulma dayanımlarından küçüğü olarak seçilmektedir.

$$P_d = (705.8; 296.1)_{\min} = 296.1 \text{ kN} \quad (3.133)$$

Önerilen tasarım yaklaşımına göre, yapma enkesitli kolon profillerinden birinin dayanımı 296.1 kN olmaktadır. Eksenel basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisine altındaki yapma enkesitli kolona etkiyen eğilme momentinin, kuvvet çiftine dönüştürülmesiyle, profillerden birinde oluşan maksimum eksenel basınç kuvveti önerilen tasarım yaklaşımı kapsamında aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Etkin atalet momenti,

$$I_e = 0.5e^2A_1 \quad I_e = 0.5 \times 25^2 \times 29.01 = 9065.63 \text{ cm}^4 \quad (3.134)$$

V-tipi örgü elemanlı yapma enkesitlerin kesme rijitliği,

$$\beta_v = \frac{nEA_{Lc}ae^2}{2L_b^3}$$

$$\beta_v = \frac{2 \times 200000 \times 50 \times 10 \times 435 \times (250)^2}{2 \times 285^3} \times 10^{-3} = 117445 \text{ kN} \quad (3.135)$$

Geometrik ön kusur,

$$\Delta = \frac{L}{500} = \frac{10000}{500} = 20 \text{ mm} \quad (3.136)$$

Etkin burkulma yükü,

$$P_e = \frac{\pi^2 EI_e}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 9065.63 \times 10^4}{10000^2} \times 10^{-3} = 1790 \text{ kN} \quad (3.137)$$

İkinci mertebe etkileri içeren gerekli eğilme momenti dayanımı,

$$M_u = \frac{P_G \Delta + M_G}{1 - \frac{P_G}{P_e} - \frac{P_G}{\beta_v}} = \frac{100 \times 0.02 + 10}{1 - \frac{100}{1790} - \frac{100}{117445}} = 12.72 \text{ kNm} \quad (3.138)$$

Profillerden birinde oluşan, gerekli basınç kuvveti dayanımı,

$$P_u = 0.5P_G + \frac{M_u}{e} = \frac{100}{2} + \frac{12.72}{25 \times 10^{-2}} = 100.9 \text{ kN} \quad (3.139)$$

$$P_d = 296.1 > P_u = 100.9 \text{ kN} \quad \checkmark \quad (3.140)$$

Önerilen tasarım yaklaşımı kapsamında, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre hesaplanan, profillerden birinin eksenel basınç kuvveti dayanımı, yapma enkesitli kolona etkiyen eksenel basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisi altında profillerden birinin gerekli eksenel basınç kuvveti dayanımından büyük olması ile, profil seçiminin ve yerleşim düzeninin kontrolü sağlanmaktadır.

Yapma enkesitli kolonun kafes örgü elemanları için, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği [4] kapsamında, aşağıdaki gibi narinlik oranı kontrolü yapılarak, eksenel basınç kuvveti dayanımı hesaplanmaktadır.

$$I_{\min} = \frac{t^3 b}{12} = \frac{10^3 \times 50}{12} = 4166.67 \text{ mm}^4 \quad (3.141)$$

$$i_{\min} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}} = \sqrt{\frac{4166.67}{10 \times 50}} = 2.89 \text{ mm} \quad (3.142)$$

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{L_b}{i_{\min}} \leq 140 \quad \lambda_{\text{maks}} = \frac{285}{2.89} = 98.62 \leq 140 \quad \checkmark \quad (3.143)$$

$$\frac{L_b}{i_{\min}} = 98.62 \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 127 \quad (3.144)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{i_{\min}}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{98.62^2} = 203 \text{ MPa} \quad (3.145)$$

$$F_{cr} = \left(0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right) \times F_y = \left(0.658^{\frac{275}{203}}\right) \times 275 = 156 \text{ MPa} \quad (3.146)$$

Karakteristik ve tasarım burkulma dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_n = F_{cr} \times A_g = 156 \times (10 \times 50) \times 10^{-3} = 78 \text{ kN} \quad (3.147)$$

$$P_d = \phi \times P_n = 0.90 \times 78 = 70.2 \text{ kN} \quad (3.148)$$

Yapma enkesitli kolon elemanında oluşan kesme kuvveti,

$$V_u = \frac{1}{L} \left( 4 - (4 - \pi) \frac{\Delta \times P_G}{\Delta \times P_G + M_G} \right) M_u$$

$$V_u = \frac{1}{10} \left( 4 - (4 - \pi) \frac{0.02 \times 100}{0.02 \times 100 + 10} \right) 12.72 = 4.91 \text{ kN} \quad (3.149)$$

Örgü elemanları için gerekli aksenal basınç kuvveti dayanımı,

$$P_{Lc} = \frac{V_u}{n \cdot \sin \theta}$$

$$P_{Lc} = \frac{V_u}{n \cdot \sin \theta} = \frac{4.91}{2 \cdot \sin 60^\circ} = 2.84 \text{ kN} \quad (3.150)$$

Geometrik ön kusur,  $\Delta$ , eleman uzunluğu,  $L$ , yapma enkesitli kolon elemanına etkileyen aksenal basınç kuvveti,  $P_G$ , yapma enkesitli kolon elemanına etkileyen eğilme momenti,  $M_G$ , YDKT'ye göre ikinci mertebe etkileri içeren gerekli eğilme momenti dayanımı,  $M_u$  ile ifade edilmektedir. GKT yöntemi kullanılması durumunda, gerekli eğilme momenti dayanımı,  $M_a$  ile ifade edilmektedir.

Kafes örgü elemanlarının aksenal basınç kuvveti dayanımı, gerekli aksenal basınç kuvveti dayanımından büyük olması ile, örgü elemanlarının kesit kontrolü yapılarak tasarım tamamlanır.

$$P_d = 70.2 \text{ kN} > P_u = 2.84 \text{ kN} \quad \checkmark \quad (3.151)$$

#### **4. YAPMA ENKESİTLİ KOLONLARIN SABİT DÜŞEY YÜK VE TEKRARLI TERSİNİR YATAY YÜKLERİN ORTAK ETKİSİNDE DAVRANIŞI**

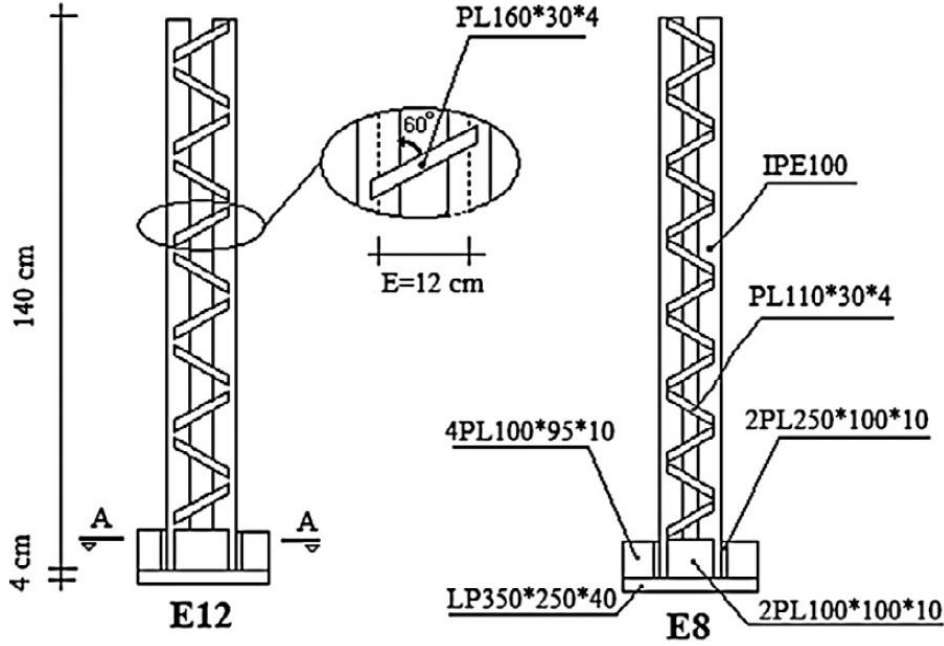
Deprem ve rüzgârın oluşturduğu yatay etkiler nedeniyle yapma enkesitli kolonların, aksel kuvvetler ile eğilme momentinin ortak etkisi altında boyutlandırılabilmesi için ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği [4] gözetilerek düzenlenmiş, önerilen tasarım yaklaşımı Bölüm 3'te sunulmuştur. Bu bölümde ise, kafes örgü elemanlı yapma enkesitli kolonların tekrarlı tersinir yatay yükler altındaki davranışları farklı parametreler esas alınarak araştırılmıştır. Bu parametreler, aksel basınç kuvveti seviyesi, örgü elemanlarının düşey aksel ile yaptığı açı ve bağ levhalarının yüksekliği olarak belirlenmiştir. Yapma enkesitli kolonların sabit düşey yük ve tekrarlı tersinir yatay yüklerin ortak etkisinde davranışlarının araştırılabilmesi amacıyla, ilk olarak sonlu eleman modeli için doğrulama çalışması gerçekleştirilerek malzeme davranışı tanımındaki ilgili parametrelerin uygun şekilde seçilmesi ile sağlanmıştır.

##### **4.1 Sonlu Eleman Modeli**

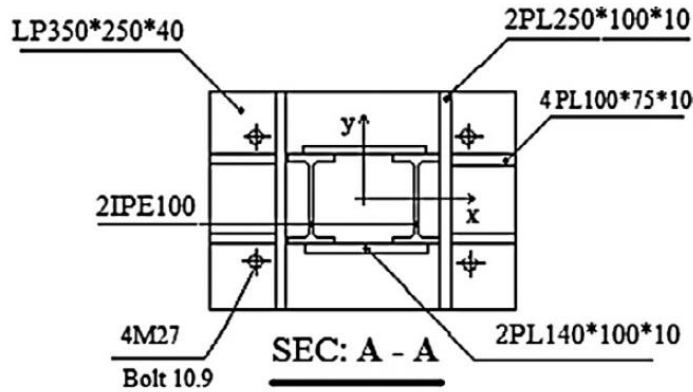
Malzeme davranışı parametrelerinin seçiminde, yapma enkesitli kolonların deneysel sonuçlarını içeren Behrokh Hosseini Hashemi ve Alireza Poursamad Bonab'ın "Experimental investigation of the behavior of laced columns under constant axial load and cyclic lateral load" [19] adlı çalışmalarından yararlanılmıştır. Bu bölümde, çalışmada kullanılan yapma enkesitli kolon ile ilgili geometrik ve malzeme özellikleri paylaşarak, sonlu eleman modeli oluşturulacaktır. Bu çalışmada, sabit aksel basınç kuvveti ile tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmelere maruz kalan yapma enkesitli kolonun üzerindeki farklı sabit aksel basınç kuvveti seviyeleri için, profil eksenleri arasında iki farklı mesafe olması durumu incelenmektedir.

Çalışma kapsamında, E12 ve E8 olmak üzere iki farklı yapma enkesitli kolon tipi bulunmaktadır. IPE 100 profillerinin kullanıldığı bu yapma enkesitli kolon elemanlarının geometrik özellikleri incelendiğinde, E12 tipi için, profil eksenleri arasındaki mesafe 12cm iken, E8 tipi için, profil eksenleri arasındaki mesafe 8cm

olmaktadır. Örgü elemanlarının ve bağ levhalarının yükseklikleri ile kalınlıkları sabit iken, profil eksenleri arasındaki uzaklık değiştiği için levha uzunlukları da değişmektedir. 140cm uzunluğundaki IPE 100 profilleri ile örgü elemanlarının yaptığı açı iki tip için de 60° olmaktadır. Makalede, bu iki tip yapma enkesitli kolon elemanının geometrik özelliklerini içeren kesit ve plan görünüşleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'deki gibidir.



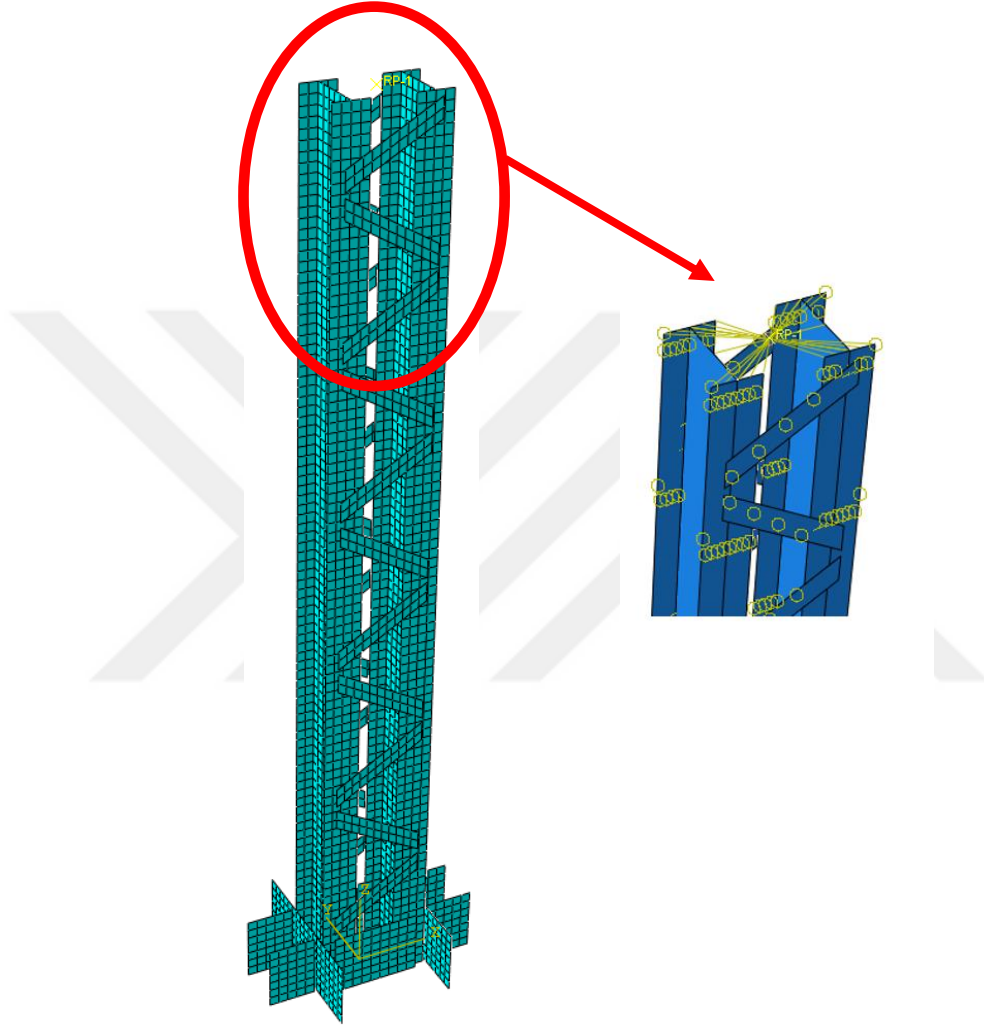
Şekil 4.1 : Deneysel çalışma yapılan elemanların kesit görünüşü [19].



Şekil 4.2 : Deneysel çalışma yapılan elemanların tipik plan görünüşü [19].

Çalışmada bulunan kuvvet – yerdeğiştirme grafikleri incelendiğinde, sonuçların sonlu eleman analiz sonuçlarına yakın olması açısından en simetrik grafiğe sahip E12-P35 örneği üzerine doğrulama çalışması yapılacaktır. Profil eksenleri arasındaki mesafe 12cm olan E12-P35 yapma enkesitli kolon profili için belirtilen geometrik

özelliklerine göre, S4R matematik modeli kullanılarak kabuk eleman ile Şekil 4.3'teki gibi modellenmiştir. Sonlu eleman analizlerinde, gerçeğe daha yakın gerilme dağılımı elde edebilmek için 15mm boyutunda bölünmüştür. Düşey ve yatay kuvvetlerin dağılımı, yapma enkesitli kolon elemanının davranışına bağlı olabilmesi için, profillerin üst ucu RP-1 adlı referans noktasında birleştirilmiştir.



**Şekil 4.3 :** E12-P35 numunesinin sonlu eleman modeli.

Yapılan çalışmada, IPE 100 profillerinden ve örgü elemanlarından üç adet parça alınarak ASTM (E8M-04) [25] standartlarına göre çekme deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarında elde edilen, akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve elastisite modülü gibi değerlerin ortalaması Çizelge 4.1'deki gibi olmaktadır.

**Çizelge 4.1 :** Çalışmada kullanılan elemanların malzeme özellikleri.

Malzeme	$F_y$ (MPa)	$F_u$ (MPa)	E (MPa)
IPE100	286.6	407.2	204000
Örgü Elemanları	287.5	412.2	201000

Sonlu eleman modelinde, malzeme özellikleri elastik ve plastik olmak üzere iki farklı bölge için değerlendirilmelidir. Bunlardan ilki olan elastik bölge, kalıcı şekildeğişikliklerin olmadığı bölgeyi kapsamaktadır. Elastik bölgedeki malzeme davranışı doğrusal olmaktadır. Bu malzeme modeli için gerekli elastisite modülü, E ve poisson oranı,  $\nu$  ile ifade edilerek Çizelge 4.2'deki gibi tanımlanmıştır.

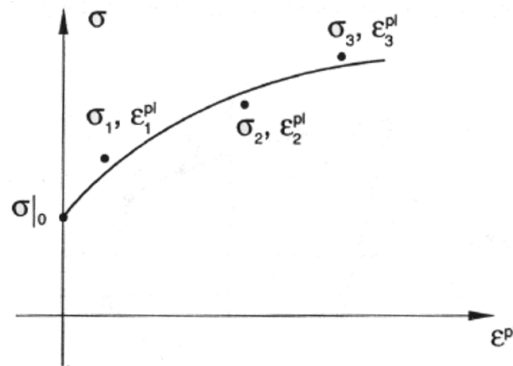
**Çizelge 4.2 :** Sonlu eleman modelinde kullanılan elastik malzeme özellikleri.

Malzeme	E (MPa)	$\nu$
IPE100	204000	0.3
Örgü Elemanları	201000	

Plastik bölge, malzemenin kalıcı şekildeğişikliklere maruz kaldığı bölgeyi kapsamaktadır. Plastik bölgedeki malzeme modeli, doğrusal olmayan izotropik ve kinematik pekleşme olmak üzere iki farklı bileşenden oluşur. İzotropik pekleşme, başlangıçtaki akma yüzeyinin dönme ve bozulma olmadan eşit olarak genişlemesi olarak tanımlanabilir. Kinematik pekleşmede ise, akma yüzeyinde dönmeler olması ile akma yüzeyi merkezinin yer değiştirmesi gözlenir.

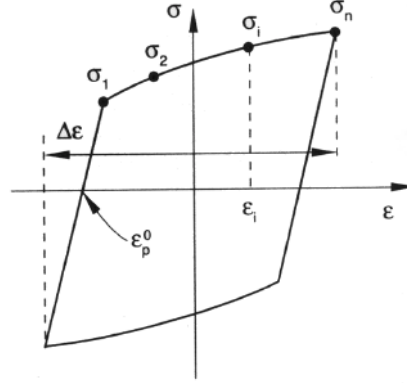
Malzemenin kinematik pekleşme bileşeninin tanıtılması için üç farklı yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler; doğrudan parametreler, yarım döngü verileri ve dengelenmiş döngü verileridir. ABAQUS [15] programında ise sırasıyla; “direct parameters”, “half cycle data” ve “stabilized cycle data” olarak ifade edilmektedir.

Yarım döngü verileri yöntemi kullandığında, tek yönlü bir çekme deneyinin ilk yarı döngüsünden elde edilen gerilme ve şekildeğişikliklerin tablo değerleri olarak girilmesiyle malzeme modeli Şekil 4.4'teki gibi elde edilmektedir.



**Şekil 4.4 :** Yarım döngü verileri yöntemi [26].

Dengelenmiş döngü verileri yöntemi kullandığında, simetrik tekrarlı tersinir yatay şekildeğiştirmelere maruz bir elemanın, gerilme ve şekildeğiştirme değerlerinin tablo değerleri olarak girilmesiyle malzeme modeli elde edilmektedir. Bu yöntem ile eleman sabit bir duruma gelene kadar tekrarlı tersinir şekildeğiştirmeler devam ettirilerek Şekil 4.5'teki gibi dengelenmiş döngü elde edilmiş olur.



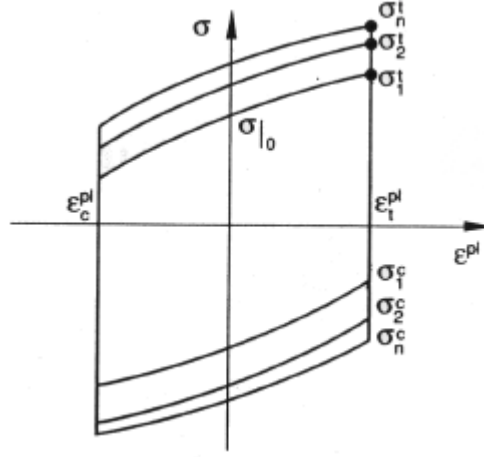
**Şekil 4.5 :** Dengelenmiş döngü verileri yöntemi [26].

Doğrudan parametreler yöntemi kullanıldığında ise aşağıdaki parametre değerlerinin doğrudan girilmesi gereklidir. Bu çalışmada, malzeme davranış parametreleri mevcut olmadığından, ABAQUS [15] analizleri için doğrusal olmayan kinematik pekleşme bileşeninin tanımlanması için doğrudan parametreler yöntemi kullanılarak sonuçlar arasında uyumu sağlayacak parametreler seçilmiştir.

Kinematik pekleşme bileşeninin tanımlanması için gerekli olan parametrelerden elastik akma gerilmesi,  $\sigma_y$ , başlangıç kinematik pekleşme modülü,  $C_1$ , artan plastik şekildeğiştirme ile azalan kinematik pekleşme modülünün oranı,  $\gamma_1$  ile ifade edilmektedir.

Malzemenin izotropik pekleşme bileşeni, Şekil 4.6'daki gibi elastik bölgenin bir döngüden diğer döngüye kadar olan değişimini tanımlar. İzotropik pekleşme modeli iki farklı şekilde tanımlanabilir. Bunlardan ilki, ilgili malzeme parametrelerinin doğrudan tanıtılmasıdır. Diğeri ise, eşdeğer gerilmenin tanımlanabilmesi için her yükleme döngüsündeki elastik bölgedeki gerilmenin büyüklüğü,  $\sigma_0$  ile eşdeğer plastik şekildeğiştirme,  $\epsilon_{pl}$  değerlerinin tablo halinde girilerek tanıtılmasıdır. Bu çalışmada, malzeme davranış parametreleri mevcut olmadığından, ABAQUS [15] analizleri için izotropik pekleşme bileşeninin tanımlanması için de doğrudan parametreler yöntemi kullanılmıştır.

İzotropik pekleşme bileşeninin tanımlanması için gerekli olan parametrelerden elastik akma gerilmesi,  $\sigma_{eq,y}$ , elastik bölgenin boyutundaki maksimum değişimi,  $Q_b$ , plastik şekildeğiştirmeler arttıkça, elastik bölgenin boyutundaki değişim oranı,  $b$  ile ifade edilmektedir.



Şekil 4.6 : İzotropik Pekleşme Döngüsü [26].

Kinematik pekleşme bileşeni, farklı şekildeğiştirme bölgelerinde farklı pekleşme oranlarına sahip olduğu için, bir adet döngü (backstress) gerçeği tam olarak yansıtamaz. Chaboche (1986) tarafından, elastik ve plastik bölgeler arasındaki geçişi daha iyi yansıtan, birkaç döngüye sahip kinematik pekleşme modeli (Chaboche Modeli) önerilmiştir. Her döngü, belirli bir şekildeğiştirme bölgesini kapsamaktadır. Tüm döngülerinin başlangıç değeri sıfırdır [27].

$$\alpha = \sum_i^n \alpha_i ; \quad d\alpha_i = \frac{2}{3} C_i d\varepsilon_p - \gamma_i \alpha_i \varepsilon_{eq} \quad (4.1)$$

Tüm döngüler sayısı,  $\alpha$ ,  $i$ 'nci döngü (backstress),  $\alpha_i$ , toplam döngülerin sayısı,  $n$ , malzemenin başlangıç kinematik pekleşme modülü,  $C$ , malzemenin artan plastik şekil değiştirme ile azalan kinematik pekleşme modülünün oranı,  $\gamma$  ile ifade edilmektedir.

Chaboche modelinin, doğrusal olmayan izotropik pekleşme modelinin ile birleşimi, birleştirilmiş model olarak geçmektedir. ABAQUS [15] programında, birleştirilmiş model, "Combined Model" olarak yer almaktadır. Von mises akma denkleminin, izotropik bileşen denklemi aşağıdaki gibidir.

$$dR = k(Q_\infty - R)d\varepsilon_{eq} \quad (4.2)$$



Kinematik ve izotropik pekleşme modelleri için deney sonuçlarını en doğru şekilde yansıtan, sonlu eleman analizlerinde esas alınan parametre değerleri Çizelge 4.3'teki gösterilmiştir.

**Çizelge 4.3 :** Sonlu eleman modelinde kullanılan kinematik malzeme özellikleri.

Sonlu Eleman Modeli İçin Malzeme Davranışı Parametreleri		
$F_y = 286.6 \text{ MPa}$	$C_1 = 50$	$\gamma_1 = 5$
$F_{eq,y} = 286.6 \text{ MPa}$	$Q_\infty = 1000$	$b = 0.6$

Çalışmada esas alınan E12-P35 elemanın alt ucu, rijitlik levhaları ve taban levhası ile deney düzeneğine sabitlendiğinden yerdeğiştirmelere ve dönmelere karşı sabitlenmiştir. Üst ucu ise, sadece düzlem içi doğrultusunda yerdeğiştirmelere serbest iken, deney düzeneğine bağlı olduğundan dönmelere karşı sabitlenmiştir. Ayrıca üst uç, eleman üzerindeki eksenel basınç kuvvetinin etkisiyle düzlem dışı doğrultusunda burkulma gerçekleşmemesi için, düzlem dışı doğrultusunda yerdeğiştirmelere karşı desteklenmiştir. Sonlu eleman modelinde, daha yakın analiz sonuçları elde edebilmek amacıyla L/500 geometrik ön kusur uygulanmıştır.

E12 ve E8 tiplerinde, farklı seviyelerde sabit eksenel basınç kuvveti ile Çizelge 4.4'te yer alan 8 farklı yapma enkesitli kolon elemanı oluşturulmuştur. Sabit eksenel basınç kuvveti, malzemenin akma gerilmesi ile enkesit alanının çarpımından elde edilerek farklı seviyelerde uygulanmaktadır. Yapma enkesitli kolonlar, profil eksenleri arasındaki uzaklıklara ve düşey yük seviyelerine göre isimlendirilmektedir.

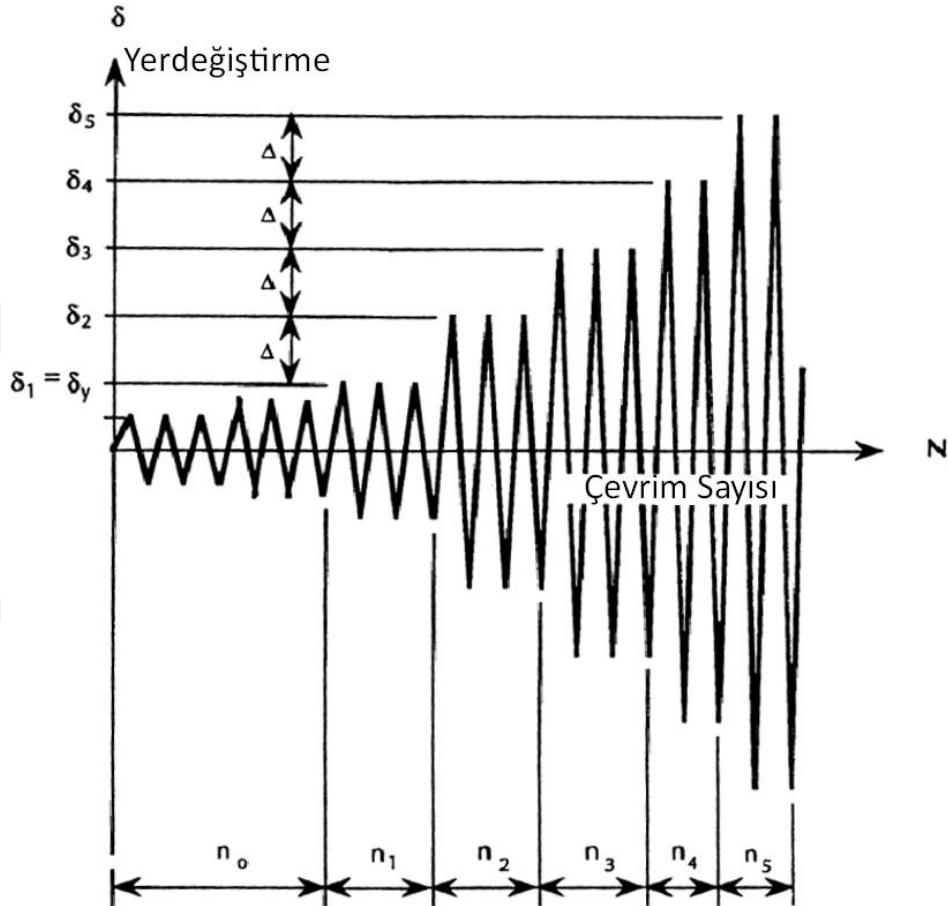
**Çizelge 4.4 :** Deneysel çalışma yapılan elemanların tipleri ve isimleri.

Mesafe\Yük	%18 P	%25 P	%35 P	%45 P	%52 P
E8 tipi	E8-P18	E8-P25	E8-P35	E8-P45	E8-P52
E12 tipi	E12-P18		E12-P35		E12-P52

Sonlu eleman modelinin doğrulanması kapsamında, çalışmadaki E12-P35 tipindeki yapma enkesitli kolon incelenmektedir. Eleman üzerindeki sabit eksenel basınç kuvveti hesabı için, deneyde elde edilen karakteristik akma dayanımı,  $F_y$ , 286.6 N/mm<sup>2</sup>, iki adet IPE 100 profilinin enkesit alanı,  $A_g$ ,  $2 \times 1030 = 2060 \text{ mm}^2$  olmaktadır.

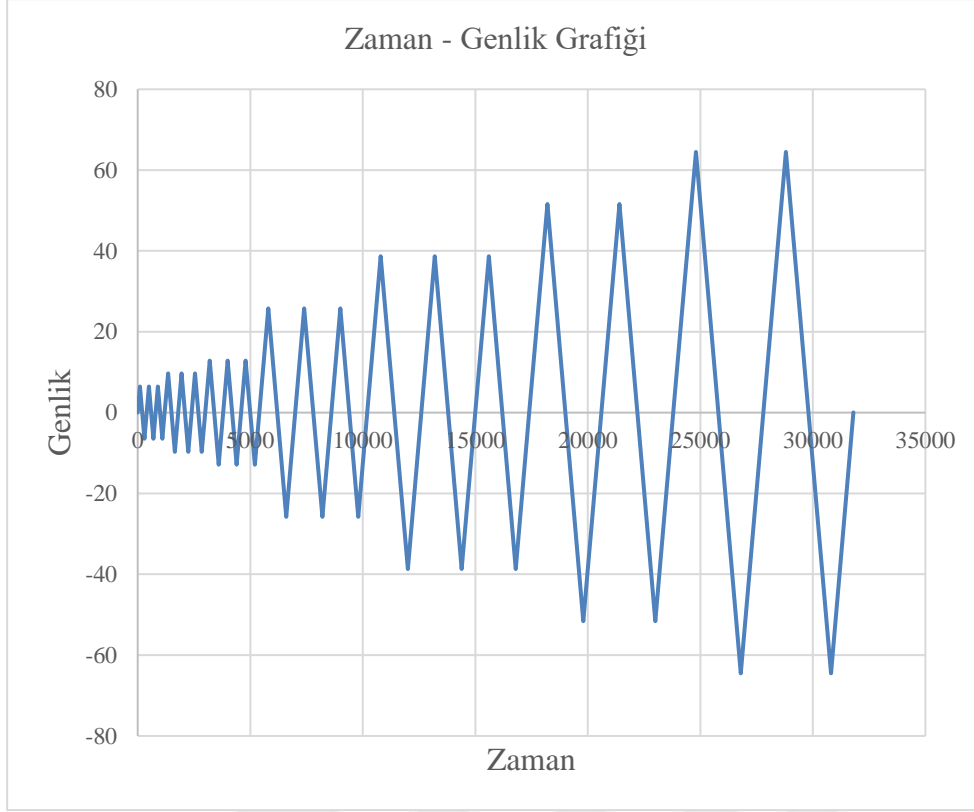
$$\%35 P_a = 0.35 \times F_y \times A_g = 0.35 \times 286.6 \times 2060 \cong 206.6 \text{ kN} \quad (4.5)$$

Yapma enkesitli kolonlara etkiyen tekrarlı tersinir yatay yerdeşiftirmeler, çalışmada ATC 24'e [28] göre uygulanmıştır. ATC 24'e [28] uygun olarak, elemanın st ucu, akma yerdeşiftirmesi kadar değişen farklı yerdeşiftirmelere maruz bırakılmıştır. ATC 24'e [28] göre Şekil 4.8'deki gibi, akma yerdeşiftirmesi düzeyine ulaşana kadar iki farklı düzeyde üçer döngü uygulanmaktadır. Daha sonra, akma yerdeşiftirmesinin üç kat seviyesine kadar üçer döngü, sonrasında ise ikişer döngü uygulanmaktadır.



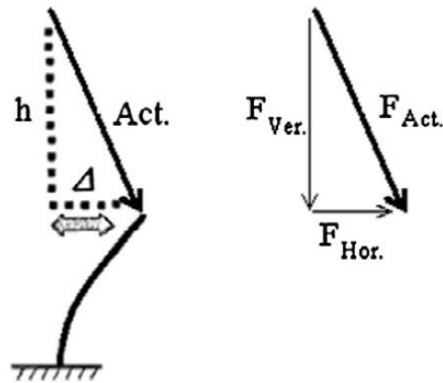
**Şekil 4.8 :** ATC 24'te tekrarlı tersinir yatay yerdeşiftirmelerin tanımı [28].

Sonlu eleman modelinde, çalışmada esas alınan akma yerdeşiftirmeleri mevcut olmadığından, E12-P35 için analiz sonuçlarından yararlanılarak akma yerdeşiftirmesi 12.9mm alınarak, elemanın st ucunda tekrarlı tersinir yatay yerdeşiftirmeler uygulanmıştır. Uygulanan yatay yerdeşiftirmeler, ATC 24'e [28] uygun döngü sayılarına göre Şekil 4.9'daki gibi sonlu eleman modeline uygulanmıştır.



**Şekil 4.9 :** Sonlu eleman modelindeki tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmeleri

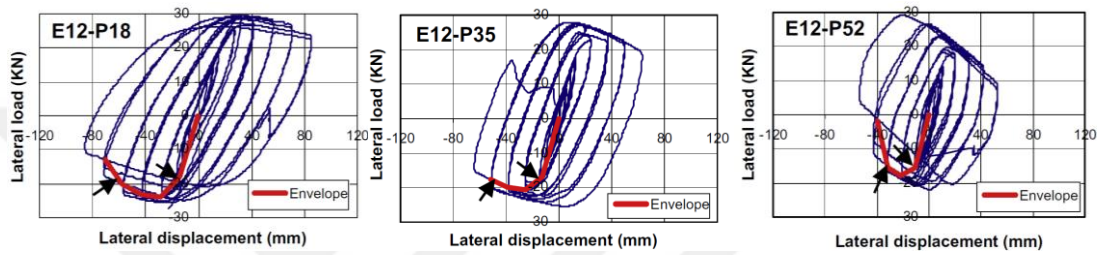
Çalışmada kullanılan deney düzeneğinden dolayı, uygulanan yatay yerdeğiştirmeler sırasında, sabit aksenal basınç kuvvetini aktaran sistemin Şekil 4.10'daki gibi diyagonalleşmesi nedeniyle elemanlarda ilave yatay kuvvet oluşturmaktadır. Sonlu eleman modelinde tanımlanamayan, ancak deney sisteminde var olan bu ilave yatay kuvvetten dolayı, malzeme özelliklerinden, birleşim rijitliğinden, mesnetlenme ve yükleme koşullarından dolayı deney ile analiz sonuçlarını karşılaştırdığımızda küçük ölçekli farklılıkların olması beklenmektedir.



**Şekil 4.10 :** Deney düzeneğinde sabit aksenal basınç kuvvetini aktaran sistemin diyagonalleşmesi ile oluşan yatay etki [19].

## 4.2 Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması

Çalışmadaki deney sonuçlarında, yatay kuvvet – yerdeğiştirme grafikleri ve burkulma durumundaki fotoğrafları sunularak, elemanların sünekliği, dayanımı, rijitliği, enerji sönümlenme kapasiteleri ve göçme modu ele alınmıştır. Yatay yük – yerdeğiştirme grafikleri, eleman üst ucundaki yerdeğiştirme ile taban enkesitinde oluşan kesme kuvveti değerlerinden elde edilmektedir. Şekil 4.11’deki, E12 tipleri için yatay yük – yerdeğiştirme grafikleri incelendiğinde, etkiyen sabit eksenel basınç kuvveti seviyesi arttıkça, döngü sayısının azalması sünekliğin de azaldığını ifade etmektedir.



Şekil 4.11 : E12 tipleri için yatay yük–yerdeğiştirme grafiği [19].

Bir yapının stabilitesi, büyük plastik yerdeğiştirmelerin gerçekleşmesine, enerjinin sönümlenmesine ve gerekli dayanımına bağlıdır. Yapıların uygun süneklik göstermesi durumunda yapılara etkiyen deprem kuvveti azalmaktadır. Süneklik, en büyük plastik yerdeğiştirmenin, akma yerdeğiştirmesine olan oranı şeklinde tanımlanmaktadır.

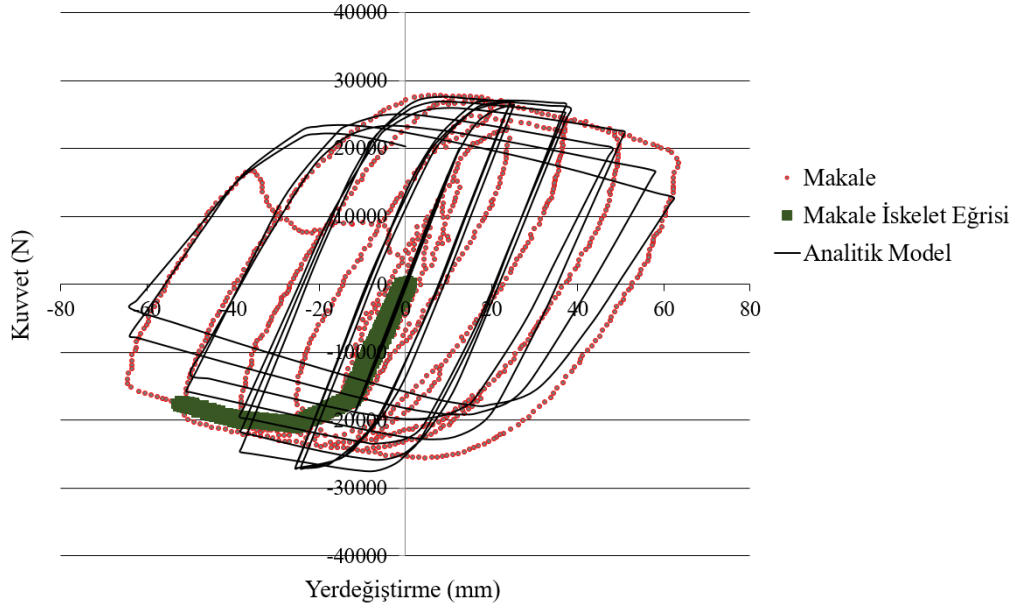
$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (4.6)$$

Elemanların deney sonuçlarındaki, akma ve en büyük plastik yerdeğiştirmeleri, taban kesme kuvvetleri ve süneklik faktörleri Çizelge 4.5’te gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, profillerdeki eksenel basınç kuvveti seviyesi arttıkça, süneklik faktörünün azaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.5 : E12 tipi elemanların deney sonuçlarındaki veriler [19].

Numune	$\Delta_y$ (mm)	$V_y$ (kN)	$\Delta_u$ (mm)	$\mu$
E12-P18	14.4	18.0	61.1	4.2
E12-P35	12.9	17.0	51.6	4.0
E12-P52	10.8	15.5	32.2	3.0

Yapısal çeliğin tekrarlı yükler altında malzeme olarak davranış modeli, deneysel sonuçlar ile sonlu eleman analizlerinin sonuçları kuvvet – yerdeğiştirme grafiği ile Şekil 4.12'deki gibi karşılaştırılarak oluşturulmuştur. Sonuçlar arasındaki uyum, malzeme davranışı tanımındaki ilgili parametrelerin uygun şekilde seçilmesi ile sağlanmıştır.



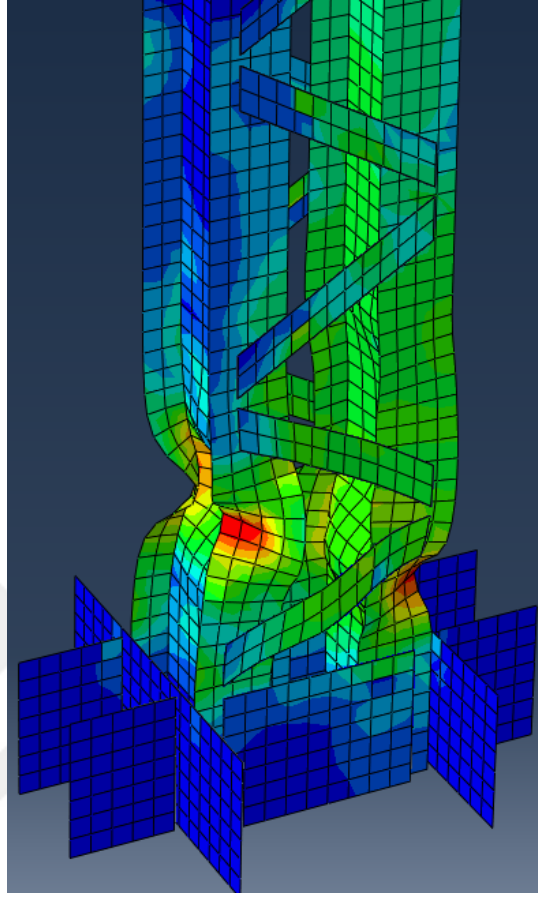
**Şekil 4.12 :** E12-P35 tipi için deneysel sonuçlar ile sonlu eleman analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet – yerdeğiştirme grafiklerinin karşılaştırılması.

Deney sonuçlarında, yapma enkesitli kolonların profillerinin gövde ve başlıklarında yerel burkulma gözlenmiştir. Düzlem içi doğrultusundaki burkulma, ilk örgü elemanı ile rijitleştirilmiş uç arasında veya birinci ve ikinci örgü elemanları arasında kalan bölgede gerçekleşmiştir. Bu bölgelerde, profillerin başlık ve gövdelerinde içe veya dışa doğru şişmeler gerçekleşmiştir.



**Şekil 4.13 :** Elemanların deney sonucundaki göçme modları [19].

Sonlu eleman analiz sonuçlarında, Şekil 4.14'teki gibi elde edilen göçme modu, deney sonuçlarında elde edilen göçme modlarına benzer olmaktadır.



**Şekil 4.14 :** Sonlu eleman analiz sonuçlarında elde edilen göçme modu.

Deneysel sonuçlar ile sonlu eleman analizlerinin sonuçları göçme modu, kuvvet – yerdeğiştirme grafikleri, döngü sayıları uyumlu olduğundan sonlu eleman modelleme esasları ve malzeme davranışı tanımındaki ilgili parametrelerin uygun olarak seçilmesi ile sağlanmıştır. Diğer sonlu eleman çalışmaları için, bu çalışmada kullanılan modelleme esasları ile malzeme davranışı parametreleri kullanılacaktır.

### **4.3 Sabit Düşey yük ve Tekrarlı Tersinir Yatay Yüklerin Ortak Etkisindeki Farklı Özelliklere Sahip Yapma Enkesitli Kolonların Davranışının İncelenmesi**

Çalışmanın bu bölümünde, sabit aksenal basınç kuvvetine sahip yapma enkesitli kolonların deprem ve rüzgâr gibi tekrarlı tersinir yatay yükler altındaki davranışını inceleyebilmek adına sabit aksenal basınç kuvveti ile tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmelerin ortak etkisinde farklı sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir.

Farklı seviyelerdeki eksenel basınç kuvvetlerinin davranışa etkisini inceleyebilmek adına yedi farklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Eksenel basınç kuvveti seviyeleri için plastik eksenel basınç kuvvetinin, %10 artırımla %70 oranlarında uygulanmıştır. Oluşturulan bu sonlu eleman modellerinin, örgü elemanlarının düşey eksen ile yaptığı açı  $60^\circ$  ve bağ levhalarının yüksekliği 200mm olması açısından %30 seviyesindeki plastik eksenel basınç kuvvetine sahip model, referans model olarak kabul edilmektedir.

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'nde [4] örgü elemanlarının düşey eksen ile yaptığı açı en az  $60^\circ$  olması kuralını değerlendirebilmek için referans modelden farklı olarak daha küçük açılara sahip örgü elemanlarının kullanıldığı sonlu eleman modeli ile karşılaştırılması gerekmektedir. Farklı açılarla yerleştirilen örgü elemanlarının davranışa etkisini görebilmek amacıyla örgü elemanları açısının  $48^\circ$  olduğu sonlu eleman modeli oluşturularak referans model ile karşılaştırılacaktır.

ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'nde [4] bağ levhası yüksekliğinin, bağ levhası genişliğine eşit veya daha büyük olması kuralını değerlendirebilmek için referans modelden farklı olarak daha küçük yükseklikteki bağ levhalarının kullanıldığı sonlu eleman modeli ile karşılaştırılması gerekmektedir. Farklı yükseklikteki bağ levhalarının davranışa etkisini görebilmek amacıyla bağ levhası yüksekliğinin 100mm olduğu farklı bir model daha oluşturularak referans modelle karşılaştırılmaktadır.

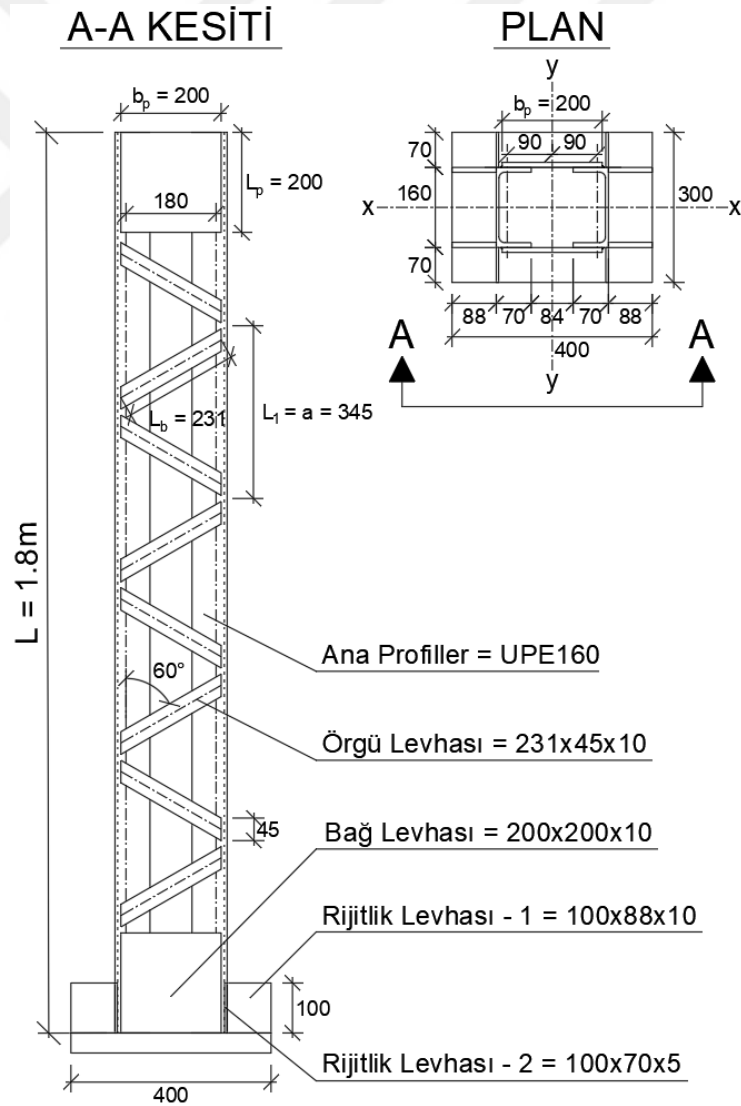
#### **4.3.1 Yapma enkesitli tipik konsol kolonların özelliklerinin belirlenmesi**

Sonlu eleman modeli çalışmaları için oluşturulan yapma enkesitli konsol kolon elemanlarının geometrik özellikleri, önerilen tasarım yaklaşımının ilk adımına uygun olarak ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8.4'te [4] yer alan ve bu çalışmada Bölüm 3.1.1'de incelenen geometrik esaslardan ve konstrüktif kurallardan faydalanılmıştır.

- Tek diyagonal örgü elemanı ile oluşturulan yapma enkesitli kolon elemanlarında, kafes örgü elemanlarının düşey eksen ile yaptığı açı  $60^\circ$ 'den daha az olmamalıdır. Bu yüzden, farklı sabit düşey yük seviyelerine sahip kolon tipinin sonlu eleman modellerinde bu açı  $60^\circ$  olarak alınmıştır.
- Yapma enkesitli kolon elemanının uçlarında yer alan bağ levhasının yüksekliği, bağ levhasının genişliğine eşit veya daha büyük olmalıdır. Bu nedenle, genişliği 200mm olan bağ levhasının yüksekliği de 200mm olarak seçilmiştir.

- Bağ levhalarının kalınlığı, bağ levhalarının genişliğinin 1/50'nden daha az olmamalıdır. Bu doğrultuda, genişliği 200mm olan bağ levhasının kalınlığı 4mm'den fazla olması gerekmektedir. Seçilen örgü elemanları ve bağ levhalarının kalınlıkları 10mm olduğundan bu şart sağlanmıştır.
- Dönmelere ve yerdeğiştirmelere karşı hareketleri sınırlandırılmış ankastre mesnete sahip alt uç, rijitlik levhaları ile güçlendirilmiştir. Bu levhaların kalınlıkları profillerin başlık ve gövde kalınlıklarına uygun olması için 5mm ve 10mm seçilmiştir.

Yapma enkesitli konsol kolon elemanı, Şekil 4.15'teki geometrik özelliklere göre modellenmiştir. Malzeme özellikleri için, Bölüm 4.1'de elde edilen malzeme davranışı parametreleri kullanılmıştır.



Şekil 4.15 : Farklı düşey yük seviyelerine sahip yapma enkesitli kolonun kesit ve plan görünüşleri.

Profil: UPE 160	$h = 160 \text{ mm}$	$b = 70 \text{ mm}$	$t_w = 5.5 \text{ mm}$
	$t_f = 9.5 \text{ mm}$	$A = 2170 \text{ mm}^2$	$J = 52000 \text{ mm}^4$
	$I_x = 911 \times 10^4 \text{ mm}^4$	$I_y = 107 \times 10^4 \text{ mm}^4$	$i_x = 64.8 \text{ mm}$
	$i_y = 22.2 \text{ mm}$	$C_w = 3.96 \times 10^9 \text{ mm}^6$	
Malzeme: S275	$E = 204000 \text{ N/mm}^2$	$\nu = 0.30$	$G = 77200 \text{ MPa}$
	$F_y = \sigma_y = 286.6 \text{ MPa}$	$C_1 = 50$	$\gamma_1 = 5$
	$\sigma_{eq,y} = 286.6 \text{ MPa}$	$Q_b = 1000$	$b = 0.6$

Yerel burkulma sınır durumu için;

Başlık parçası (ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği – Tablo 5.1A, Durum 1 [4])

$$\lambda = \frac{b}{t_f} = \frac{70}{9.5} = 7.36 \leq \lambda_r = 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.56 \sqrt{\frac{204000}{286.6}} = 14.94 \quad \checkmark \quad (4.7)$$

Gövde parçası (ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği – Tablo 5.1A, Durum 5 [4])

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{160}{5.5} = 29.1 \leq \lambda_r = 1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.49 \sqrt{\frac{204000}{286.6}} = 39.75 \quad \checkmark \quad (4.8)$$

Farklı parametrelerin davranışa etkisini inceleyebilmek için sonlu eleman modelleri ile yapılan yapma enkesitli konsol kolon elemanının alt ucu, ankastre mesnet tanımlanarak dönmelere ve yerdeğiştirmelere, üst ucu, düzlem dışı yerdeğiştirmelere karşı desteklenmiştir.

Yapma enkesitli konsol kolon elemanının narinlik oranı kontrolü için düzlem içi ve düzlem dışı doğrultularındaki burkulma boyu katsayısı aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Düzlem içi (y-ekseni etrafında) doğrultusunda burkulma boyu katsayısı, alt uç ankastre, üst uç serbest olduğundan  $K_y = 2.10$ , düzlem dışı (x-ekseni etrafında) doğrultusunda burkulma boyu katsayısı, alt uç ankastre, üst uç yerdeğiştirmeye karşı desteklenmiş olduğundan,  $K_x = 0.80$  olmaktadır. Burkulma boyları aşağıdaki gibidir.

$$L_{cy} = K_y \times L = 2.10 \times 1800 = 3780 \text{ mm} \quad (4.9)$$

$$L_{cx} = K_x \times L = 0.80 \times 1800 = 1440 \text{ mm} \quad (4.10)$$

Profiller, düzlem içi doğrultusunda birlikte çalıştığından atalet momenti ve yarıçapı aşağıdaki gibi tekrardan hesaplanmalıdır.

$$I_y = 2 \times (I_{y,1} + A_1 e^2)$$

$$I_y = 2 \times (107 \times 10^4 + 2170 \times (90)^2) = 3729.4 \times 10^4 \text{ mm}^4 \quad (4.11)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_g}{A_g}} = \sqrt{\frac{3729.4 \times 10^4}{4340}} = 92.7 \text{ mm} \quad (4.12)$$

$$I_x = 911 \times 10^4 \text{ mm}^4 \quad i_x = 64.8 \text{ mm} \quad (4.13)$$

Düzlem içi ve düzlem dışı doğrultularındaki, burkulma boylarının atalet yarıçapına oranı ile elde edilen narinlik oranları 200'den küçük olması gerekmektedir.

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = \left[\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right); \left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)\right]_{\max}$$

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = \left[\left(\frac{1440}{64.8}\right); \left(\frac{3780}{92.7}\right)\right]_{\max} = [(22.2); (40.8)]_{\max} = 40.8$$

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = 40.8 \leq 200 \quad \checkmark \quad (4.14)$$

Kafes örgü elemanlarının eksenleri arasında kalan profil için, zayıf eksendeki narinlik oranı, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği Bölüm 8.4'e [4] göre iki ayrı sınır değer ile kontrol edilmektedir.

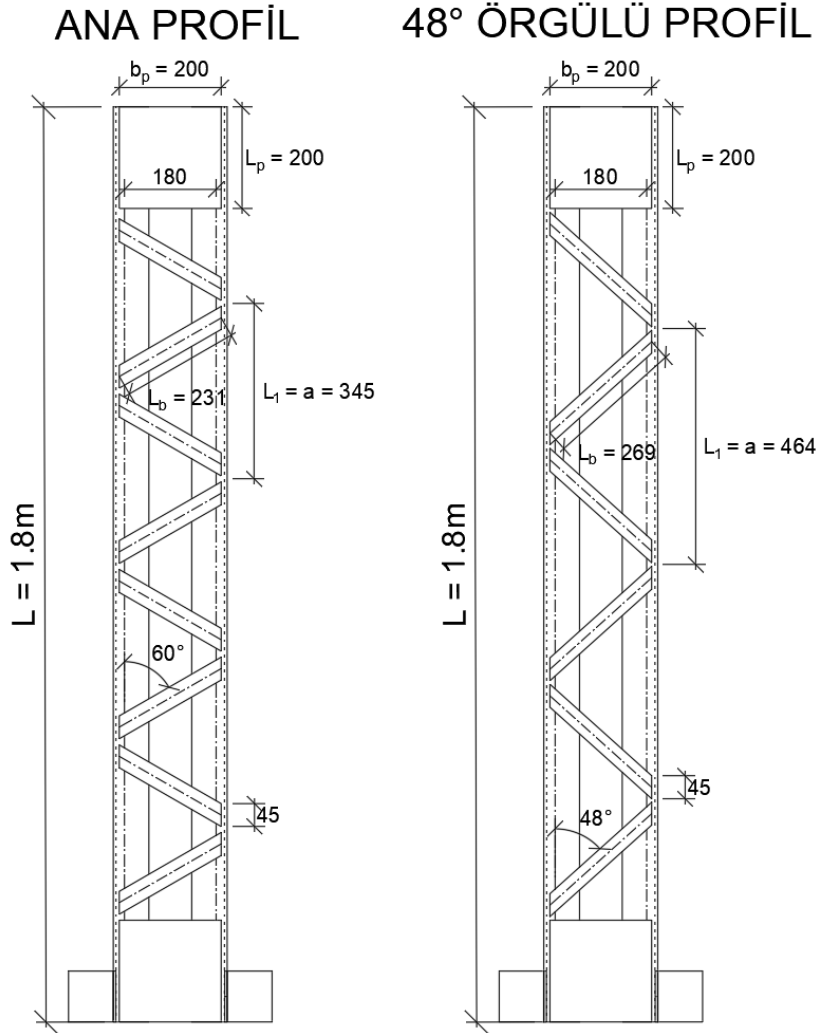
$$\left(\frac{a}{i_i}\right) \leq \frac{3}{4} \left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max}$$

$$\left(\frac{a}{i_i}\right) = \left(\frac{345}{22.2}\right) = 15.5 \leq \frac{3}{4} \left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = \frac{3}{4} \times 40.8 = 30.6 \quad \checkmark \quad (4.15)$$

$$\left(\frac{a}{i_i}\right) \leq 40$$

$$\left(\frac{a}{i_i}\right) = \left(\frac{345}{22.2}\right) = 15.5 \leq 40 \quad \checkmark \quad (4.16)$$

Farklı açılarla yerleştirilen örgü elemanlarının davranışa etkisini incelemek amacıyla referans yapma enkesitli konsol kolon elemanının, Şekil 4.16'daki gibi sadece örgü elemanlarının düşey eksen ile yaptığı açı  $60^\circ$ 'den,  $48^\circ$  olarak değiştirilmiştir.



**Şekil 4.16 :** Farklı açılarla yerleştirilmiş örgü elemanlarından oluşan yapma enkesitli kolon kesitlerinin karşılaştırılması.

Örgü elemanlarının açısının değişmesi nedeniyle örgü elemanlarının ve örgü elemanları arasında kalan profil uzunluğu da değişmektedir. Bundan dolayı, narinlik oranı kontrolleri, örgü elemanlarının düşey eksen ile açısı  $48^\circ$  olan yapma enkesitli konsol kolon elemanı için de kontrol edilmesi gerekmektedir.

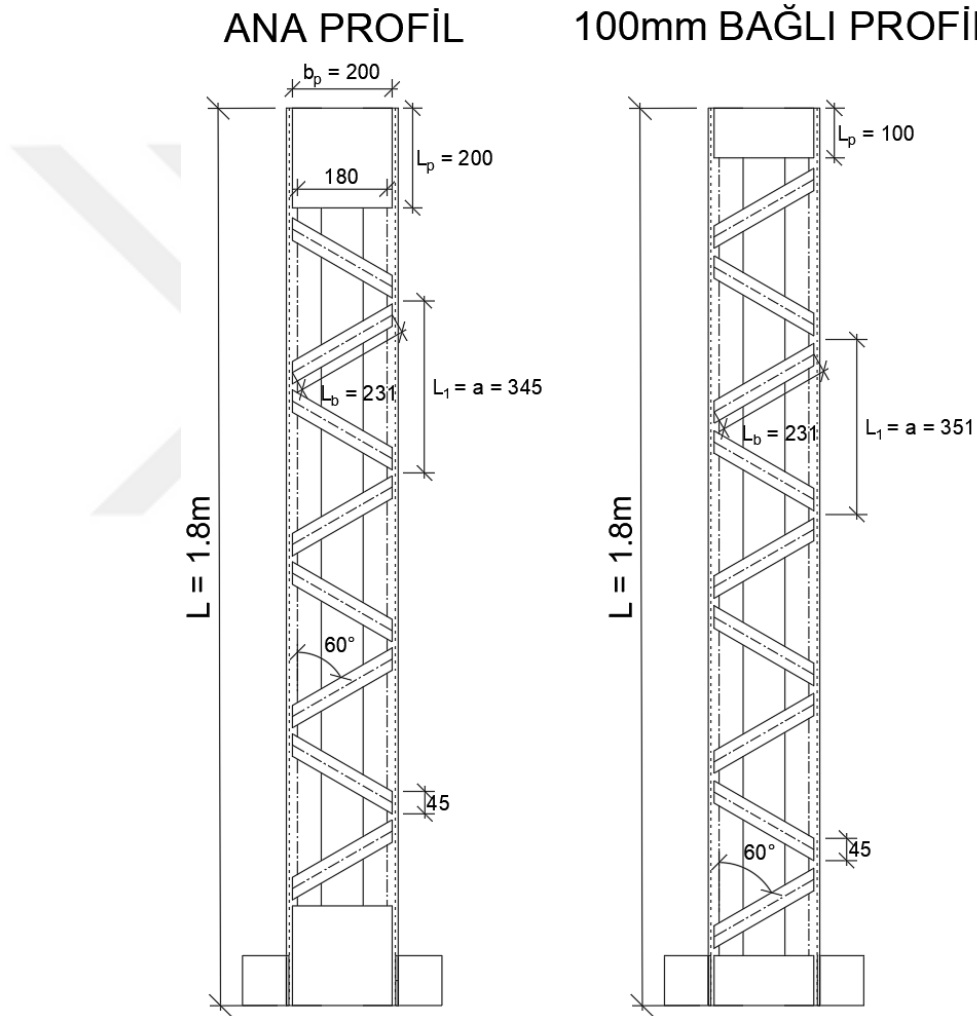
$$\left(\frac{a}{i_y}\right) \leq \frac{3}{4} \left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max}$$

$$\left(\frac{a}{i_y}\right) = \left(\frac{464}{22.2}\right) = 20.9 \leq \frac{3}{4} \left(\frac{L_c}{i}\right)_{\max} = \frac{3}{4} \times 40.8 = 30.6 \quad \checkmark \quad (4.17)$$

$$\left(\frac{a}{i_i}\right) \leq 40$$

$$\left(\frac{a}{i_i}\right) = \left(\frac{464}{22.2}\right) = 20.9 \leq 40 \quad \checkmark \quad (4.18)$$

Farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanılmasının davranışa etkisini incelemek amacıyla referans yapma enkesitli konsol kolon elemanının, Şekil 4.17'deki gibi sadece bağ levhası yükseklikleri 200mm'den 100mm olarak değiştirilmiştir.



**Şekil 4.17** : Farklı yükseklikteki bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli kolon kesitlerinin karşılaştırılması.

Bağ levhası yüksekliklerinin değişmesi nedeniyle örgü elemanlarının ve örgü elemanları arasında kalan profil uzunluğunda kayda değer bir değişiklik görülmektedir. Bundan dolayı, narinlik oranı kontrolleri, bağ levhası yüksekliklerinin 100mm olduğu yapma enkesitli konsol kolon elemanı için kontrol edilmesine gerek duyulmamıştır.

### 4.3.2 Tipik konsol kolonların ÇYTHYE 2018 esas alınarak tasarımı

Bu bölümde, önerilen tasarım yaklaşımının ikinci adımına uygun olarak, referans yapma enkesitli eleman için, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne [4] göre, sadece aksel basınc kuvveti altındaki dayanım kontrolü yapılmıştır.

Eğilmeli burkulma sınır durumu;

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 204000}{(40.8)^2} = 1209 \text{ MPa} \quad (4.19)$$

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{286.6}{1209} = 0.237 \leq 2.25 \quad (4.20)$$

$$F_{cr} = \left(0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right) \times F_y = (0.658^{0.237}) \times 286.6 = 260 \text{ MPa} \quad (4.21)$$

Burulmalı burkulma sınır durumu;

$$F_e = \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(L_{cz})^2} + GJ \right] \frac{1}{I_x + I_y}$$

$$F_e = \left[ \frac{\pi^2 \times 204000 \times (2 \times 396) \times 10^7}{(3780)^2} + \dots \right]$$

$$F_e = [\dots + 77200 \times (2 \times 52000)] \frac{1}{2 \times 911 \times 10^4 + 3729 \times 10^4}$$

$$F_e = 164.74 \text{ MPa} \quad (4.22)$$

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{286.6}{164.7} = 1.74 \leq 2.25 \quad (4.23)$$

$$F_{cr} = \left(0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right) \times F_y = (0.658^{1.74}) \times 286.6 = 138 \text{ MPa} \quad (4.24)$$

Burkulma dayanımı bu iki durumun küçüğü ile aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$F_{cr} = (260; 138)_{\min} = 138 \text{ MPa} \quad (4.25)$$

$$P_n = F_{cr} \times A_g = 138 \times (2 \times 2170) \times 10^{-3} = 599 \text{ kN} \quad (4.26)$$

$$P_d = \emptyset \times P_n = 0.90 \times 599 = 539 \text{ kN} \quad (4.27)$$

### 4.3.3 Tipik konsol kolonların önerilen esaslara göre aksenal basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisindeki tasarımı

Bu bölümde, önerilen tasarım yaklaşımının üçüncü adımına uygun olarak aksenal basınç kuvveti ile eğilme momentinin ortak etkisindeki yapma enkesitli kolon elemanı için burkulma dayanımı hesaplanmıştır. Profillerden biri için hesaplanan burkulma dayanımında, düzlem içi doğrultusunda, örgü elemanları arasında kalan profil uzunluğu, düzlem dışı doğrultusunda, tüm profilin uzunluğu esas alınmaktadır. Burkulma boyu katsayısı iki doğrultu için de uç koşullarına göre değerlendirilmesi gerekmektedir.

Örgü elemanları arasında kalan profil için, düzlem içi doğrultusunda burkulma boyu katsayısı,  $K = 1$  olarak kabul edilmektedir.

$$L_c = K \times L = 1 \times 345 = 345 \text{ mm} \quad (4.28)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{i_y}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 204000}{\left(\frac{345}{22.2}\right)^2} = 8336.7 \text{ MPa} \quad (4.29)$$

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{286.6}{8336.7} = 0.034 \leq 2.25 \quad (4.30)$$

$$F_{cr} = \left(0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right) \times F_y = (0.658^{0.034}) \times 286.6 = 282.5 \text{ MPa} \quad (4.31)$$

Karakteristik ve tasarım burkulma dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_n = F_{cr} \times A_g = 282.5 \times (2170) \times 10^{-3} = 613 \text{ kN} \quad (4.32)$$

$$P_d = \phi \times P_n = 0.90 \times 613 = 551.7 \text{ kN} \quad (4.33)$$

Düzlem dışı doğrultusunda ise, alt uç ankastre, üst uç yerdeğıştirmelere karşı desteklenmiş olduğu için  $K = 0.8$  olarak kabul edilmektedir

$$L_{cx} = K \times L = 0.8 \times 1800 = 1440 \text{ mm} \quad (4.34)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{i_y}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 204000}{\left(\frac{1440}{64.8}\right)^2} = 4077.1 \text{ MPa} \quad (4.35)$$

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{286.6}{4077.1} = 0.07 \leq 2.25 \quad (4.36)$$

$$F_{cr} = \left(0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right) \times F_y = (0.658^{0.07}) \times 286.6 = 278.3 \text{ MPa} \quad (4.37)$$

Karakteristik ve tasarım burkulma dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_n = F_{cr} \times A_g = 278.3 \times (2170) \times 10^{-3} = 603.9 \text{ kN} \quad (4.38)$$

$$P_d = \phi \times P_n = 0.90 \times 603.9 = 543.5 \text{ kN} \quad (4.39)$$

Konsol yapma enkesitli kolon profilinin tasarım burkulma dayanımı düzlem içi ve düzlem dışı burkulma dayanımları için yapılan hesaplardan küçük olana eşitlenir.

$$P_d = (551.7; 543.5)_{\min} = 543.5 \text{ kN} \quad (4.40)$$

Yukarıdaki adımlarda, profillerden biri için düzlem içi ve düzlem dışı doğrultularındaki aksenal basınç kuvveti dayanımı hesaplanmaktadır. Ancak, çalışma kapsamında, düzlem içi doğrultusundaki davranış esasları incelendiğinden, sonlu eleman analiz sonuçları ile düzlem içi doğrultusundaki karakteristik aksenal basınç kuvveti dayanımı olan 613 kN karşılaştırılacaktır.

Referans yapma enkesitli konsol kolonun davranışını inceleyebilmek için, %30 seviyesindeki plastik aksenal basınç kuvveti sabit iken, hangi yüzde mertebelerine kadar plastik eğilme momenti dayanımı sağlanabildiğine bakılmaktadır.

Plastik aksenal basınç kuvvetinin hesabı için kullanılacak olan S275 için karakteristik akma dayanımı,  $F_y$ , 275 N/mm<sup>2</sup>, iki adet UPE 160 profilinin enkesit alanı, 2 x  $A_g$ , 4340mm<sup>2</sup> olmaktadır.

Referans yapma enkesitli konsol kolon elemanı üzerindeki, %30 seviyesindeki sabit plastik aksenal basınç kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P = F_y \times A_g = 275 \times 4340 \times 10^{-3} = 1193.5 \text{ kN} \quad (4.41)$$

$$\%30 P = 0.30 \times P = 0.30 \times 1193500 \times 10^{-3} = 358 \text{ kN} \quad (4.42)$$

Plastik eğilme momenti, elemanın akma gerilmesi ile plastik mukavemet momentinin çarpımı sonucunda aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\sum W_{p,y} = (A_c d_c + A_T d_T)$$

$$\sum W_{p,y} = (2170 \times 90 + 2170 \times 90) = 390600 \text{ mm}^3 \quad (4.43)$$

$$M_p = F_y \times \sum W_{p,y} = 275 \times 390600 \times 10^{-6} = 107.4 \text{ kNm} \quad (4.44)$$

Eleman üzerinde %30 seviyesindeki sabit plastik aksenal basınç kuvveti ile birlikte %60 seviyesine kadar aşağıdaki gibi farklı plastik eğilme momenti seviyeleri için aksenal basınç kuvveti ile eğilme momentinin ortak etkisi, referans yapma enkesitli konsol kolon için değerlendirilmektedir.

- %30 P = 358 kN + %10 M<sub>p</sub> = 10.74 kNm
- %30 P = 358 kN + %20 M<sub>p</sub> = 21.48 kNm
- %30 P = 358 kN + %30 M<sub>p</sub> = 32.23 kNm
- %30 P = 358 kN + %40 M<sub>p</sub> = 42.97 kNm
- %30 P = 358 kN + %50 M<sub>p</sub> = 53.71 kNm
- %30 P = 358 kN + %60 M<sub>p</sub> = 64.44 kNm

Farklı seviyelerdeki plastik eğilme momentine sahip yükleme durumları için, aksenal basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisi altında gerekli aksenal basınç kuvveti dayanımı hesabında ortak olarak kullanılacak olan parametreler aşağıdaki gibidir.

Etkin atalet momenti,

$$I_e = 0.5e^2 A_1$$

$$I_e = 0.5 \times (180)^2 \times 2170 = 3515.4 \times 10^4 \text{ mm}^4 \quad (4.45)$$

Geometrik ön kusur,

$$\Delta = \frac{L}{500} = \frac{1800}{500} = 3.6 \text{ mm} \quad (4.46)$$

V-tipi örgü elemanlı yapma enkesitlerin kesme rijitliği,

$$\beta_v = \frac{nEA_{Lc}ae^2}{2L_b^3}$$

$$\beta_v = \frac{2 \times 200000 \times (45 \times 10) \times 345 \times (180)^2}{2 \times 231^3} \times 10^{-3} = 81615 \text{ kN} \quad (4.47)$$

Etkin burkulma yükü,

$$P_e = \frac{\pi^2 EI_{eff}}{L^2}$$

$$P_e = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 3515.4 \times 10^4}{1800^2} \times 10^{-3} = 21417 \text{ kN} \quad (4.48)$$

%30 seviyesindeki plastik aksenal basınç kuvveti ile, farklı seviyelerdeki plastik eğilme momentine sahip yükleme durumları için gerekli aksenal basınç kuvveti dayanımları ve dayanım kontrolleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

- %30 P = 358 kN + %10 M<sub>p</sub> = 10.74 kNm

$$M_u = \frac{P_G \Delta + M_G}{1 - \frac{P_G}{P_e} - \frac{P_G}{\beta_v}} = \frac{358 \times 0.0036 + 10.74}{1 - \frac{358}{21417} - \frac{358}{81615}} = 12.29 \text{ kNm} \quad (4.49)$$

$$P_u = 0.5P_G + \frac{M_u}{e} = \frac{358}{2} + \frac{12.29}{180 \times 10^{-3}} = 247.3 \text{ kN} \quad (4.50)$$

$$P_u = 247.3 \text{ kN} \leq P_d = 543.5 \text{ kN} \quad \checkmark \quad (4.51)$$

- %30 P = 358 kN + %20 M<sub>p</sub> = 21.48 kNm

$$M_u = \frac{P_G \Delta + M_G}{1 - \frac{P_G}{P_e} - \frac{P_G}{V_n}} = \frac{358 \times 0.0036 + 21.48}{1 - \frac{358}{21417} - \frac{358}{81615}} = 23.16 \text{ kNm} \quad (4.52)$$

$$P_u = 0.5P_G + \frac{M_u}{e} = \frac{358}{2} + \frac{23.16}{180 \times 10^{-3}} = 307.6 \text{ kN} \quad (4.53)$$

$$P_u = 307.6 \text{ kN} \leq P_d = 543.5 \text{ kN} \quad \checkmark \quad (4.54)$$

$$- \text{\%30 } P = 358 \text{ kN} + \text{\%30 } M_p = 32.23 \text{ kNm}$$

$$M_u = \frac{P_G \Delta + M_G}{1 - \frac{P_G}{P_E} - \frac{P_G}{V_n}} = \frac{358 \times 0.0036 + 32.23}{1 - \frac{358}{21417} - \frac{358}{81615}} = 34.24 \text{ kNm} \quad (4.55)$$

$$P_u = 0.5P_G + \frac{M_u}{e} = \frac{358}{2} + \frac{34.24}{180 \times 10^{-3}} = 370.0 \text{ kN} \quad (4.56)$$

$$P_u = 370.0 \text{ kN} \leq P_d = 543.5 \text{ kN} \quad \checkmark \quad (4.57)$$

$$- \text{\%30 } P = 358 \text{ kN} + \text{\%40 } M_p = 42.97 \text{ kNm}$$

$$M_u = \frac{P_G \Delta + M_G}{1 - \frac{P_G}{P_E} - \frac{P_G}{V_n}} = \frac{358 \times 0.0036 + 42.97}{1 - \frac{358}{21417} - \frac{358}{81615}} = 45.21 \text{ kNm} \quad (4.58)$$

$$P_u = 0.5P_G + \frac{M_u}{e} = \frac{358}{2} + \frac{45.21}{180 \times 10^{-3}} = 430.2 \text{ kN} \quad (4.59)$$

$$P_u = 430.2 \text{ kN} \leq P_d = 543.5 \text{ kN} \quad \checkmark \quad (4.60)$$

$$- \text{\%30 } P = 358 \text{ kN} + \text{\%50 } M_p = 53.71 \text{ kNm}$$

$$M_u = \frac{P_G \Delta + M_G}{1 - \frac{P_G}{P_E} - \frac{P_G}{V_n}} = \frac{358 \times 0.0036 + 53.71}{1 - \frac{358}{21417} - \frac{358}{81615}} = 56.20 \text{ kNm} \quad (4.61)$$

$$P_u = 0.5P_G + \frac{M_u}{e} = \frac{358}{2} + \frac{56.20}{180 \times 10^{-3}} = 491.1 \text{ kN} \quad (4.62)$$

$$P_u = 491.1 \text{ kN} \leq P_d = 543.5 \text{ kN} \quad \checkmark \quad (4.63)$$

$$- \text{\%30 } P = 358 \text{ kN} + \text{\%60 } M_p = 64.44 \text{ kNm}$$

$$M_u = \frac{P_G \Delta + M_G}{1 - \frac{P_G}{P_E} - \frac{P_G}{V_n}} = \frac{358 \times 0.0036 + 64.44}{1 - \frac{358}{21417} - \frac{358}{81615}} = 67.15 \text{ kNm} \quad (4.64)$$

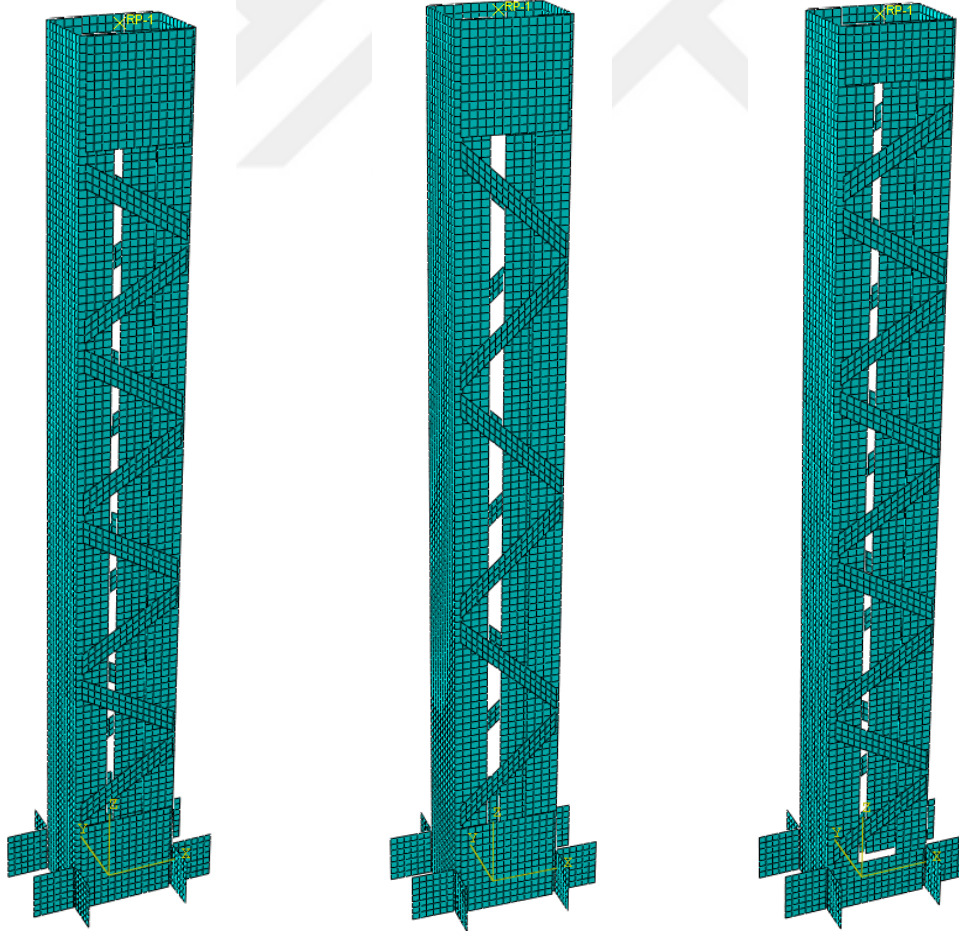
$$P_u = 0.5P_G + \frac{M_u}{e} = \frac{358}{2} + \frac{67.15}{180 \times 10^{-3}} = 552.0 \text{ kN} \quad (4.65)$$

$$P_u = 552.0 \text{ kN} > P_d = 543.5 \text{ kN} \quad \times \quad (4.66)$$

Yapılan hesaplar doğrultusunda, %30 seviyesinde plastik aksel basınç kuvveti ile plastik eğilme momentinin %60 seviyelerine kadar referans yapma enkesitli konsol kolon için aksel basınç kuvveti dayanımı yeterli olmaktadır.

#### 4.3.4 Tipik konsol kolonların sonlu eleman modelleri

Sonlu eleman modelleri ile farklı sabit aksel basınç kuvveti seviyelerinin, farklı açılarla yerleştirilen örgü elemanlarının ve farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanılmasının davranışa etkisi incelenmektedir. Bu inceleme doğrultusunda, Şekil 4.18'deki gibi üç farklı geometrik özelliklere sahip sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.18 : Sırasıyla Model-P, Model-Açı ve Model-Bağ olarak isimlendirilen sonlu eleman modelleri.

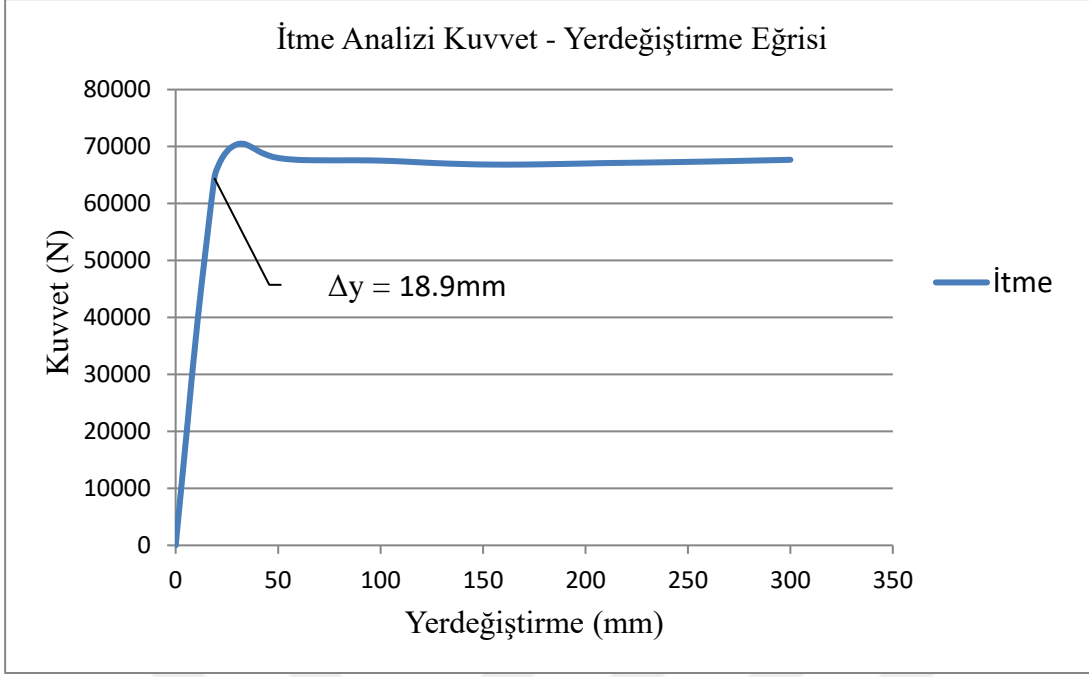
Model–P sonlu eleman modeli, yedi farklı aksel basınç kuvveti seviyelerinin davranışa etkisini inceleyebilmek için oluşturulmuştur. Ayrıca, bağ levhası yüksekliğinin 200mm ve örgü elemanlarının düşey eksen ile yaptığı açı  $60^\circ$  olduğu, %30 seviyesinde plastik aksel basınç kuvveti ile tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmelerin ortak etkisindeki yapma enkesitli konsol kolon elemanının sonlu elemanlar modeli, referans model olarak kabul edilmektedir.

Model–Açı sonlu eleman modeli, referans modelden farklı olarak örgü elemanlarının düşey eksen ile yaptığı açı  $48^\circ$  olmaktadır. Bu model ile referans model karşılaştırılarak, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'nde [4] yer alan örgü elemanlarının düşey eksen ile yaptığı açı en az  $60^\circ$  olması kuralı değerlendirilecektir.

Model–Bağ sonlu eleman modeli, referans modelden farklı olarak 100mm yükseklikte bağ levhaları kullanılmaktadır. Bu model ile referans model karşılaştırılarak, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'nde [4] yer alan bağ levhası yüksekliği, bağ levhası genişliğinden eşit veya daha büyük olması kuralı değerlendirilecektir.

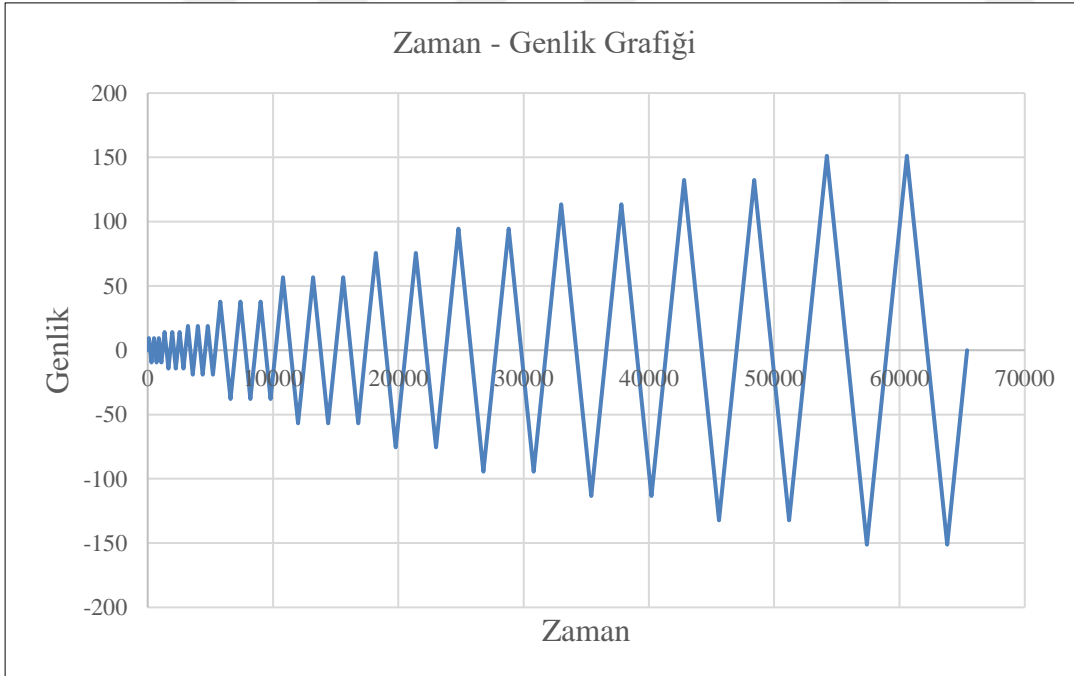
Üç farklı geometrik özelliklere sahip yapma enkesitli konsol kolonların sonlu eleman analizleri için, ABAQUS [15] programından yararlanılmıştır. Profiller ile örgü elemanları ve bağ levhaları arasında rijit bir bağ oluşturularak birlikte çalışmaları sağlanmıştır. S4R matematik modeline sahip, 15mm boyutlarında kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Malzeme özellikleri için, Bölüm 4.1'de elde edilen malzeme davranış parametreleri kullanılmıştır. Elemanların alt ucu ankastre mesnet, üst ucu ise düzlem dışı doğrultusunda yerdeğiştirmelere karşı destekli olarak teşkil edilmiştir. Profillerin üst düğüm noktaları, RP-1 adlı referans noktasında birleştirilerek, düşey ve yatay etkiler bu noktadan elemana tanımlanmıştır.

Sonlu eleman modellerinde sabit aksel basınç kuvveti ile birlikte ATC24 [28] standardına uygun olarak tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmeler tanımlanmıştır. Bu standartta göre eleman üst ucundan, eleman akma yerdeğiştirmesinin belirli katlarında yatay yerdeğiştirmelerin uygulanması gerekmektedir. Bu yüzden, ilk olarak, yapma enkesitli konsol kolon elemanına itme analizi uygulanarak, Şekil 4.19'daki gibi akma yerdeğiştirmesi bulunmuştur.



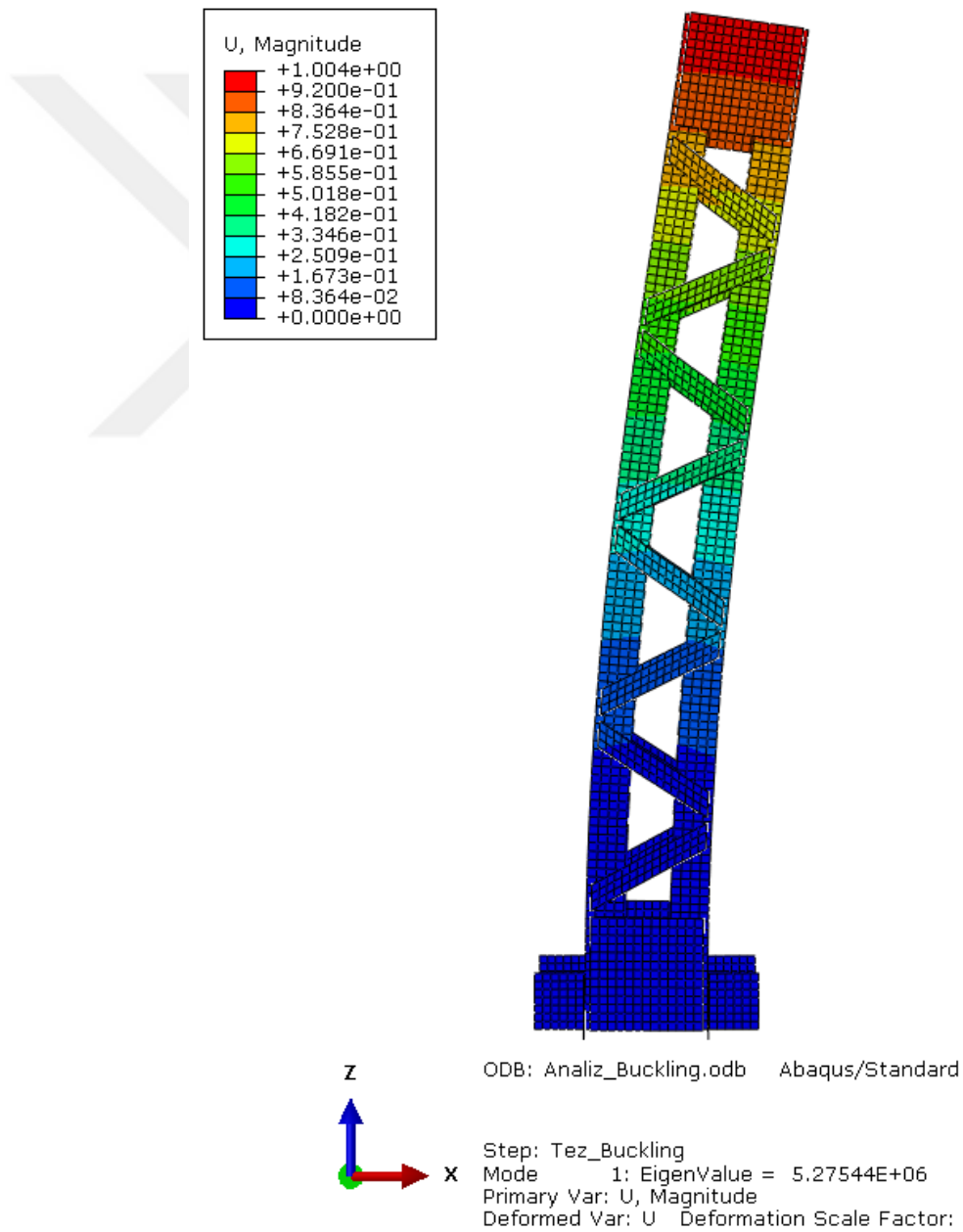
**Şekil 4.19 :** İtme analizinden elde edilen kuvvet – yerdeğiştirmesi.

Elde edilen akma yerdeğiştirmesi ile, yapma enkesitli konsol kolon elemanına, ATC24 [28] standardına uygun olarak tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmeler Şekil 4.20'deki gibi tanımlanmıştır.



**Şekil 4.20 :** ATC 24'e [28] uygun tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmeler.

Sonlu eleman modellerinde geometrik ön kusur tanımlayabilmek için eleman burkulma modu referans verilmesi gerekmektedir. Elemanın burkulma modlarını görebilmek için burkulma analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda, birinci burkulma modu, Şekil 4.21’deki gibi düzlem içi doğrultusunda olmaktadır. Çalışma kapsamında, düzlem içi doğrultusundaki davranışı incelediğimiz için geometrik ön kusur, birinci burkulma modunu referans verilerek tanımlanmıştır. Esas alınan tasarım yaklaşımında, L/500 oranında geometrik ön kusur hesaplanmaktadır. Bu hesap doğrultusunda, 1.8m uzunluğundaki eleman için 3.6mm geometrik ön kusur uygulanmıştır.



Şekil 4.21 : Yapma enkesitli konsol kolonun birinci burkulma modu.

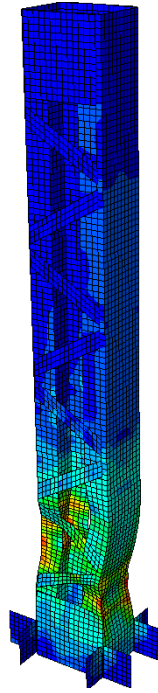


## 5. SONLU ELEMAN MODELLERİNİN ANALİZİ VE ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Önerilen tasarım yaklaşımının sonlu eleman analizlerinin sonuçları ve tasarımları bakımından farklı geometrik özelliklere sahip yapma enkesitli kolonların bu özelliklerinin davranışa etkisi bu bölümde yer almaktadır. Her bir modele ait analiz sonuçları, süneklik, dayanım ve rijitlik ile enerji sönümlenme kapasitesi ve göçme modu bakımından bu bölümde değerlendirilmiştir.

### 5.1 Önerilen Tasarım Yaklaşımının Sonlu Eleman Modellerinin Analiz Sonuçlarına Göre Değerlendirilmesi

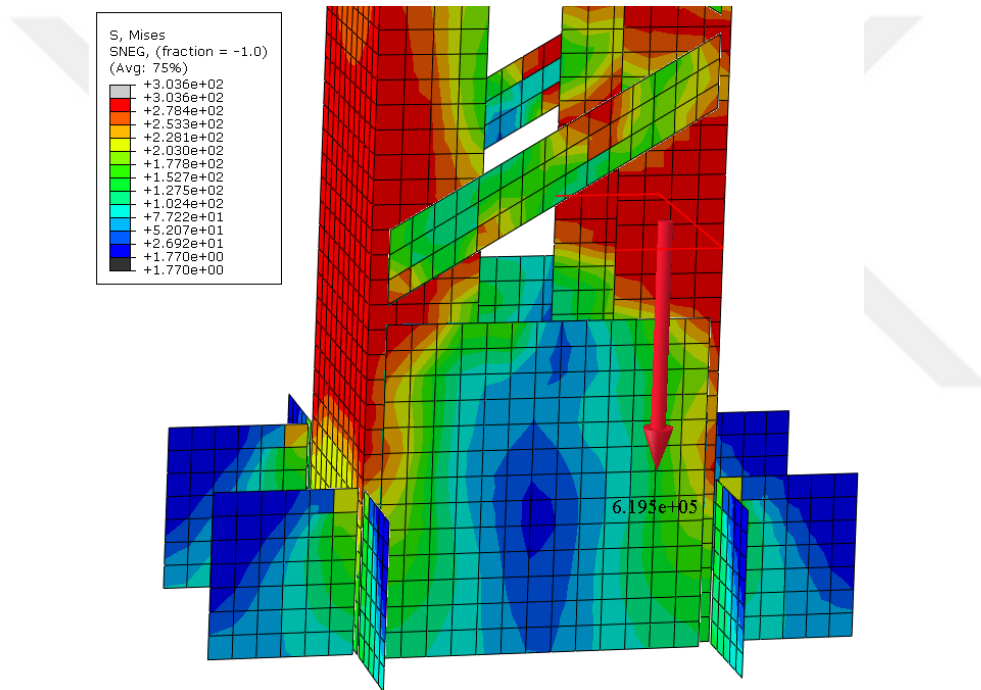
Yapma enkesitli referans konsol kolonun önerilen tasarım yaklaşımlarına göre hesaplanan burkulma dayanımı, sonlu eleman analiz sonuçları ile bu bölümde karşılaştırılacaktır. %30 seviyelerinde sabit plastik aksenal basınç kuvveti ile tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmelerin ortak etkisindeki referans modelde göçme modu, Şekil 5.1'deki gibi elemanın düzlem içi doğrultusunda oluşmaktadır.



Şekil 5.1 : Yapma enkesitli referans konsol kolon modelinin göçme modu.

Sonlu eleman analiz sonuçlarında, profillerden birinin aksel basınç kuvveti dayanımı, profil üzerine gelen aksel basınç kuvvetlerindeki kritik değişikliklerin azaldığı ilk döngüdeki kuvvet olmaktadır.

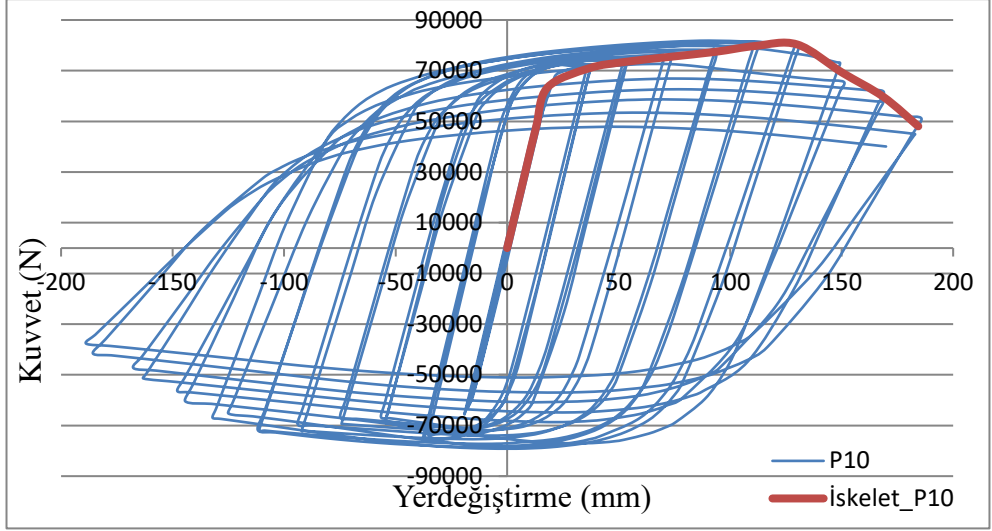
Sonlu eleman analiz sonuçlarına göre burkulma anında, sağ profil üzerinde Şekil 5.2'deki gibi 619.5 kN aksel basınç kuvveti bulunmaktadır. Önerilen tasarım yaklaşımına göre düzlem içi doğrultusundaki karakteristik aksel basınç kuvveti dayanımı 613 kN olarak hesaplanmaktadır. Buna göre, sonlu eleman analiz sonuçlarından elde edilen gerçek dayanımın %1 oranında daha büyük olduğu görülmektedir. Sonuçlar, önerilen tasarım yaklaşımının esas alınabileceğini bir kez daha göstermektedir.



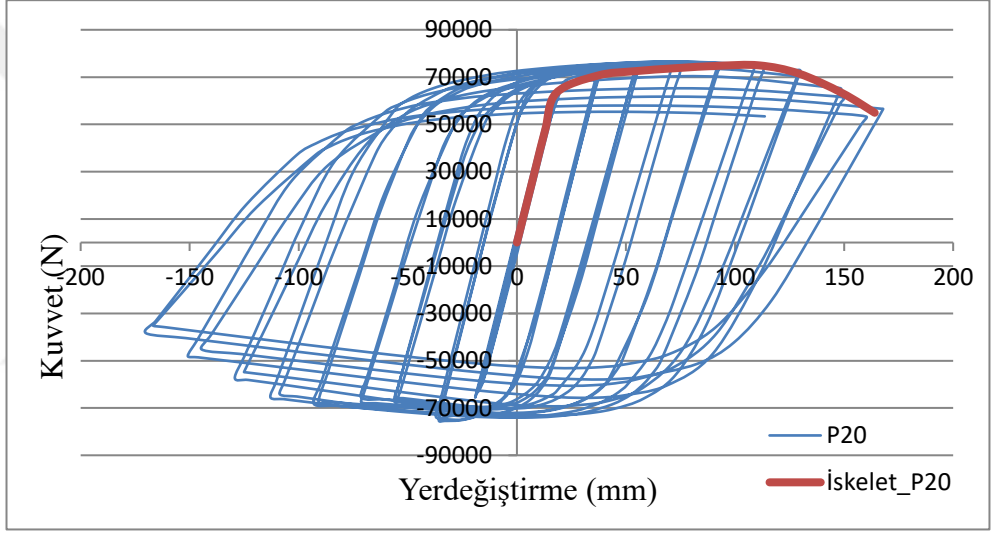
Şekil 5.2 : Yapma enkesitli referans konsol kolon modelinin burkulma yükü.

## 5.2 Farklı Sabit Aksel Basınç Kuvveti (Düşey Yük) Seviyelerinin Davranışa Etkisi

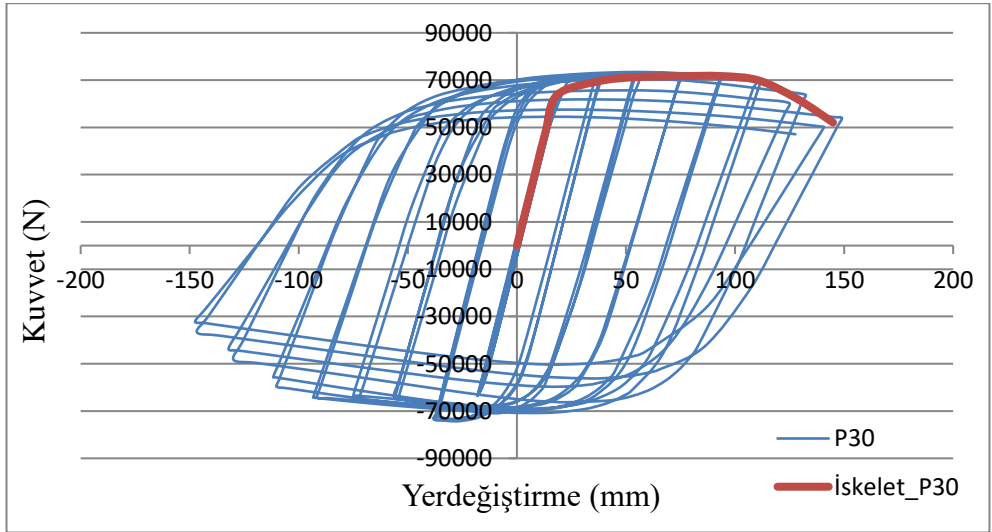
Yapma enkesitli konsol kolon elemanlarda, farklı sabit aksel basınç kuvveti seviyelerinin davranışa etkisini anlayabilmek amacıyla elemanın plastik aksel basınç kuvveti %10 artımla %70 seviyelerine kadar yedi model için uygulanmıştır. Sabit aksel basınç kuvvetleri ile tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmelere maruz kalan sonlu eleman modellerinin kuvvet – yerdeğiştirme grafikleri çizilerek, iskelet eğrileri karşılaştırılmıştır.



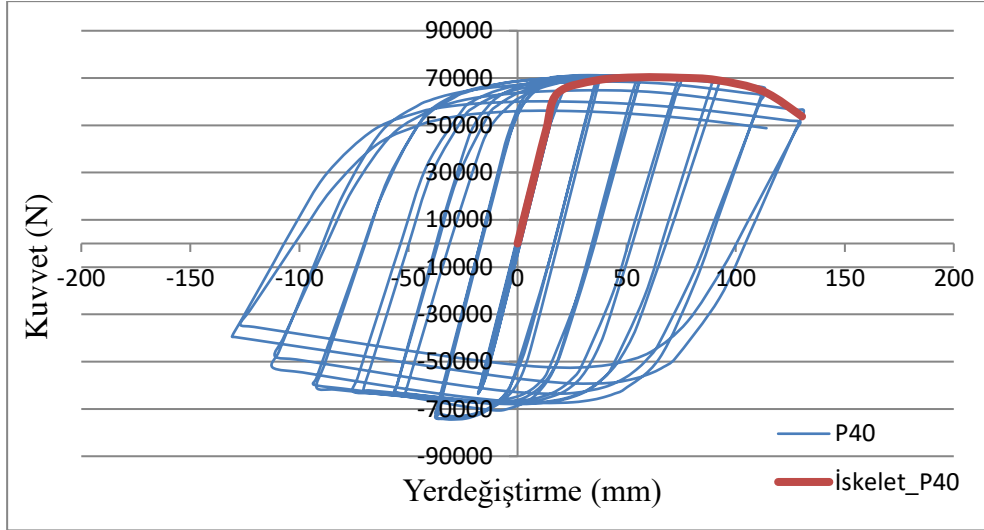
Şekil 5.3 : %10 P sabit basınç yüküne sahip modelin kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.



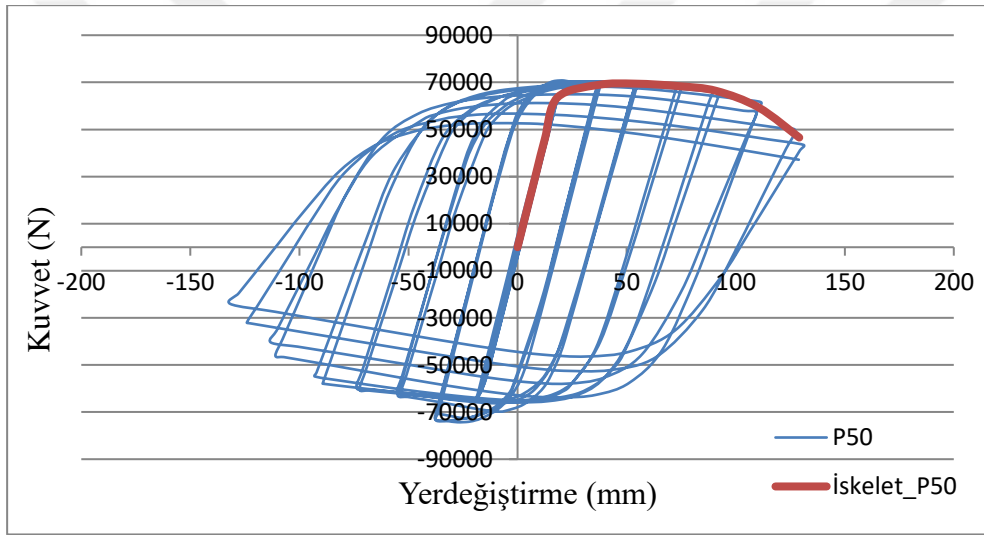
Şekil 5.4 : %20 P sabit basınç yüküne sahip modelin kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.



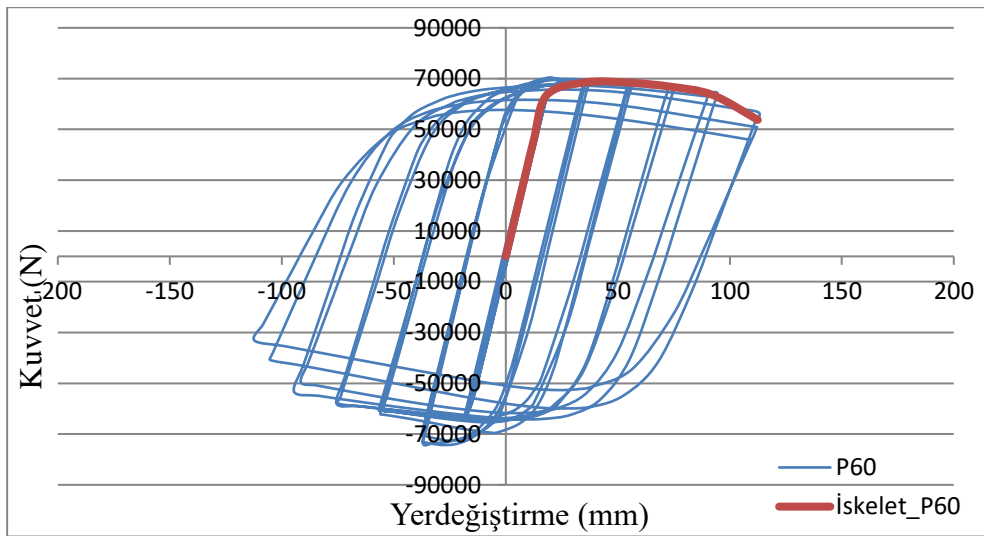
Şekil 5.5 : %30 P sabit basınç yüküne sahip modelin kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.



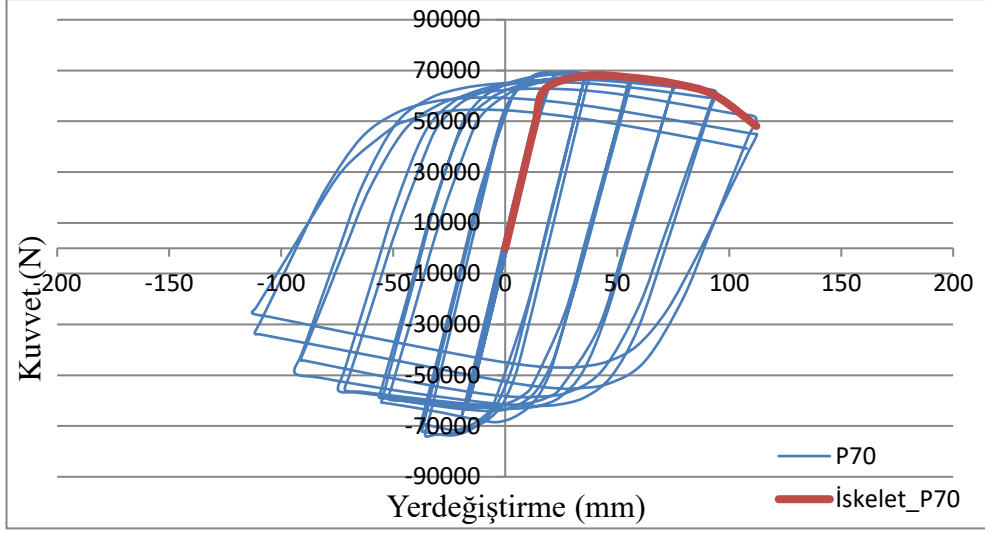
Şekil 5.6 : %40 P sabit basınç yüküne sahip modelin kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.



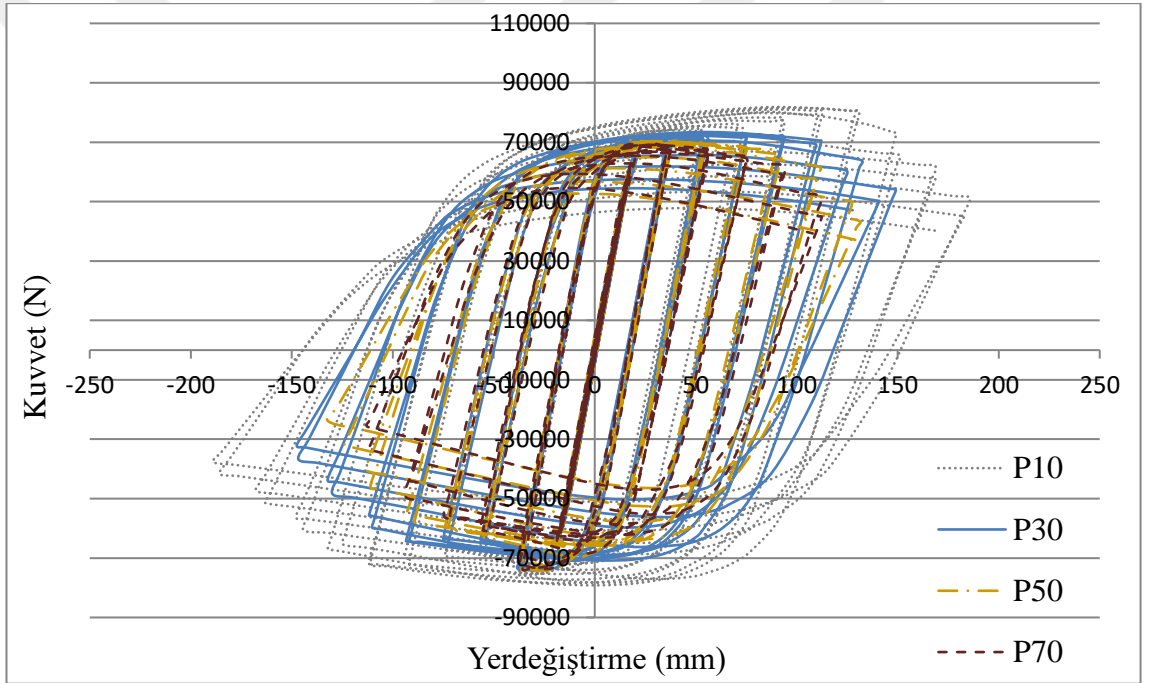
Şekil 5.7 : %50 P sabit basınç yüküne sahip modelin kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 5.8 : %60 P sabit basınç yüküne sahip modelin kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.

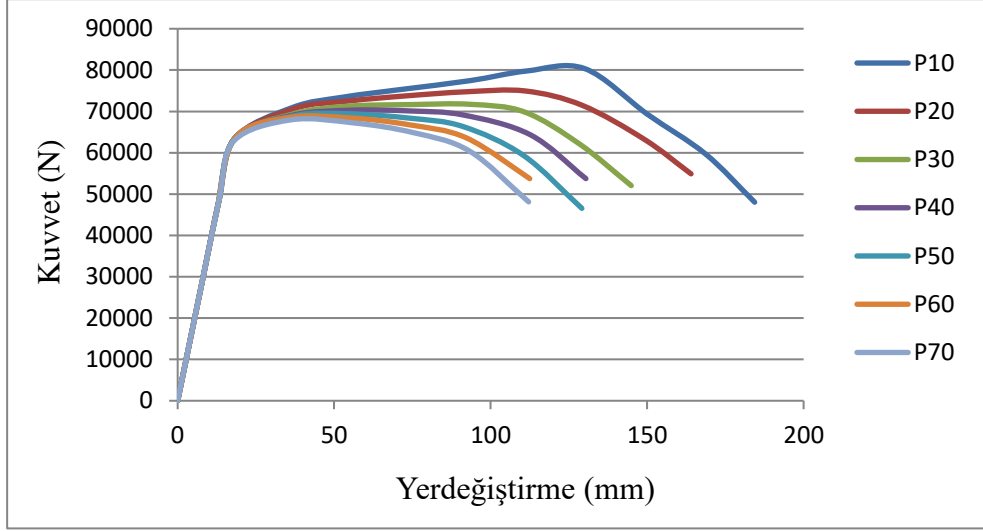


**Şekil 5.9** : %70 P sabit basınç yüküne sahip modelin kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.



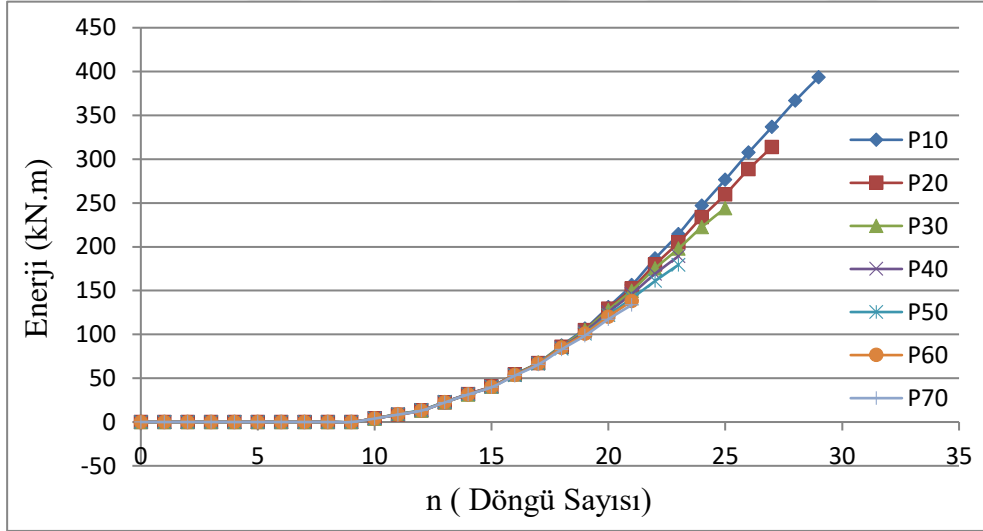
**Şekil 5.10** : Farklı seviyelerde sabit basınç yüküne sahip sonlu eleman modellerinin kuvvet – yerdeğiştirme grafiklerinin karşılaştırılması.

Süneklik, en yüksek dayanımdaki yerdeğiştirmenin, akma anındaki yerdeğiştirmeye oranı olarak tanımlanabilir. Belirli seviyelerdeki sabit düşey yükler ile tekrarlı tersinir yatay yükler altında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen kuvvet – yerdeğiştirme grafikleri incelendiğinde, düşey yük seviyesi arttıkça sünekliğin azaldığı gözlenmektedir.



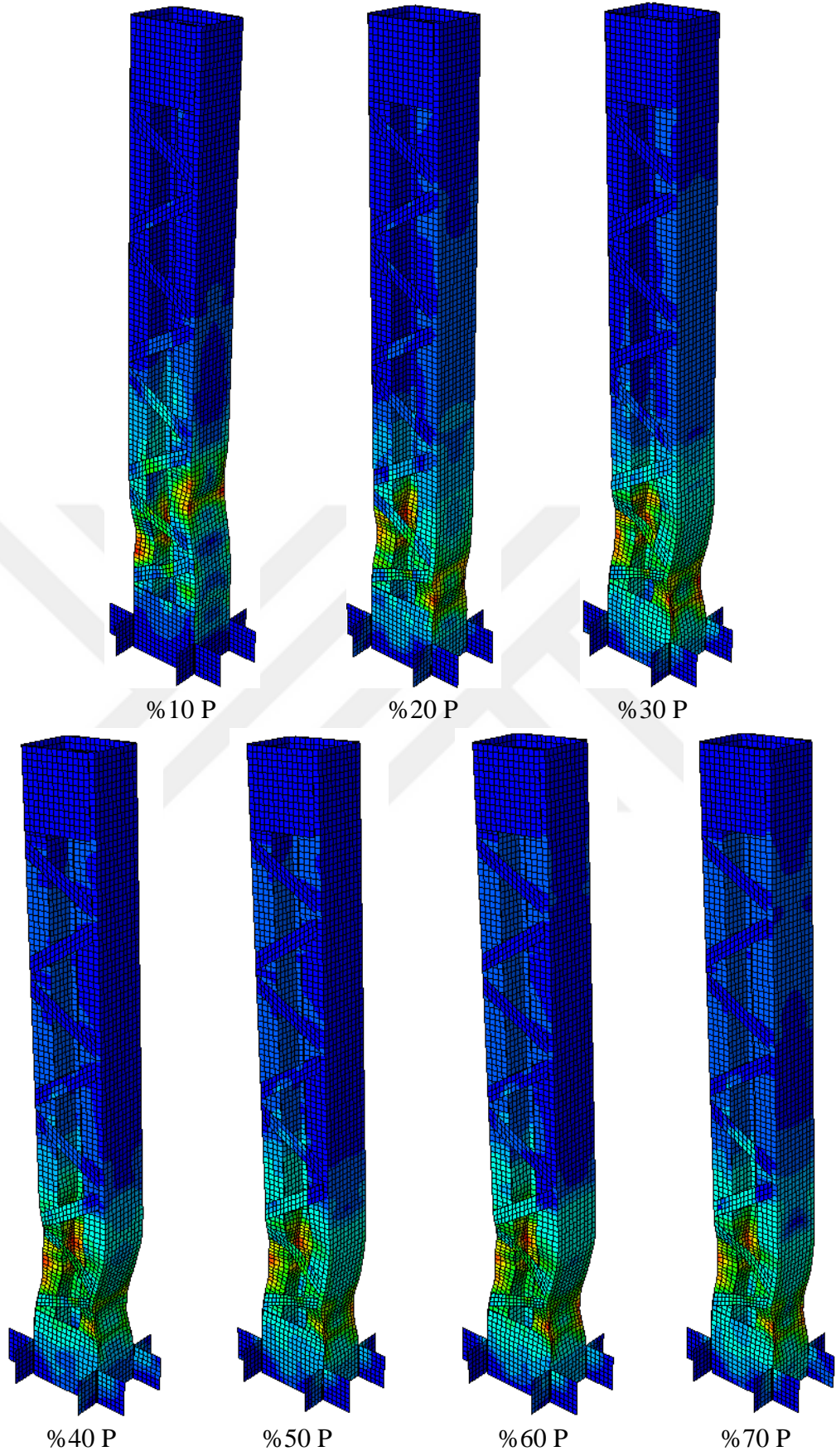
**Şekil 5.11 :** Farklı seviyelerde sabit basınç yüküne sahip sonlu eleman modellerinin iskelet eğrilerinin karşılaştırılması.

Farklı seviyelerdeki sabit eksenel basınç kuvvetine sahip yapma enkesitli kolon elemanlarının iskelet eğrileri karşılaştırıldığında, sabit eksenel basınç kuvveti seviyesi arttıkça, dayanımın azaldığı, başlangıç rijitliğinin değişmediği gözlenmiştir.



**Şekil 5.12 :** Farklı seviyelerde sabit basınç yüküne sahip sonlu eleman modellerinin enerji eğrilerinin karşılaştırılması.

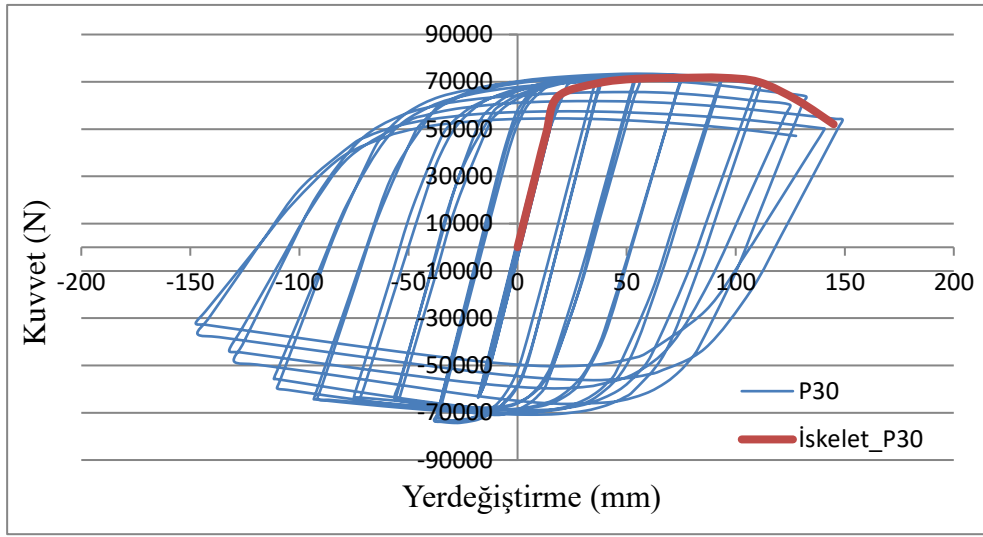
Yapma enkesitli kolon elemanına etkileyen tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmelerin sonucunda kuvvet – yerdeğiştirme grafiğinde oluşan her bir döngünün içinde kalan alan, o döngüde sönmölen enerjiyi ifade etmektedir. Enerji eğrileri karşılaştırıldığında düşey yük seviyesinin arttıkça, enerji sönmöleme kapasitelerinin azaldığı gözlenmiştir. Elemanların göçme modu incelendiğinde, düşey yük seviyesi arttıkça, burkulmanın alt uca yakın bölgelerde gerçekleştiği görölmüştür.



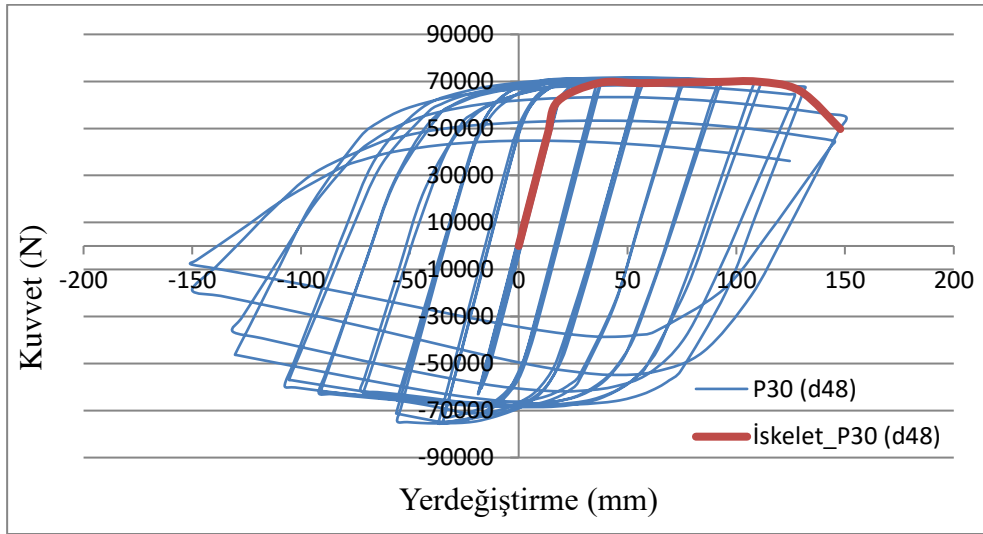
**Şekil 5.13 :** Farklı seviyelerde sabit aksenal basınç kuvvetlerine sahip yapma enkesitli elemanların göçme modları.

### 5.3 Farklı Açılarla Yerleştirilen Örgü Elemanlarının Davranışa Etkisi

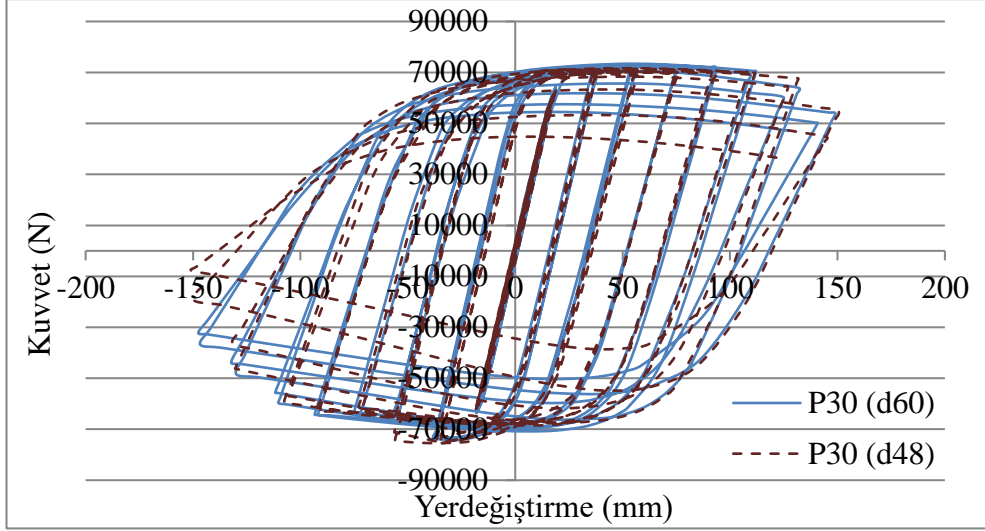
Yapma enkesitli konsol kolon elemanlarında, farklı açılarla yerleştirilen örgü elemanlarının davranışa etkisini anlayabilmek amacıyla örgü elemanları açısının  $48^\circ$  olduğu sonlu eleman modeli oluşturularak örgü elemanları açısının  $60^\circ$  olduğu referans model ile karşılaştırılacaktır. %30 seviyesinde plastik eksenel basınç kuvvetleri ile tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmelere maruz kalan farklı açılarla yerleştirilen örgü elemanlarına sahip sonlu eleman modellerinin kuvvet – yerdeğiştirme grafikleri aşağıdaki gibi çizilerek, iskelet eğrileri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.14 :  $60^\circ$  açı ile yerleştirilen örgü elemanlı yapma enkesitli konsol kolonun kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.

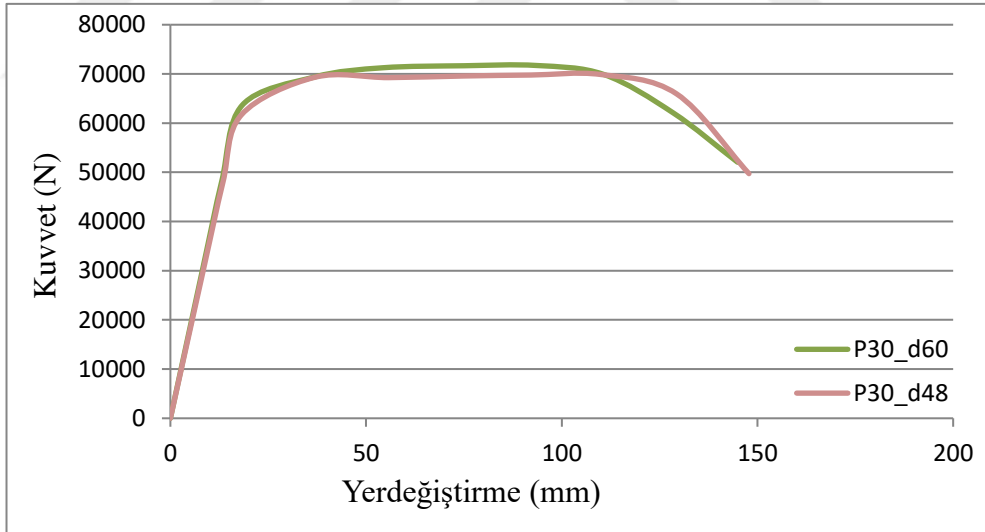


Şekil 5.15 :  $48^\circ$  açı ile yerleştirilen örgü elemanlı yapma enkesitli konsol kolonun kuvvet–yerdeğiştirme grafiği.



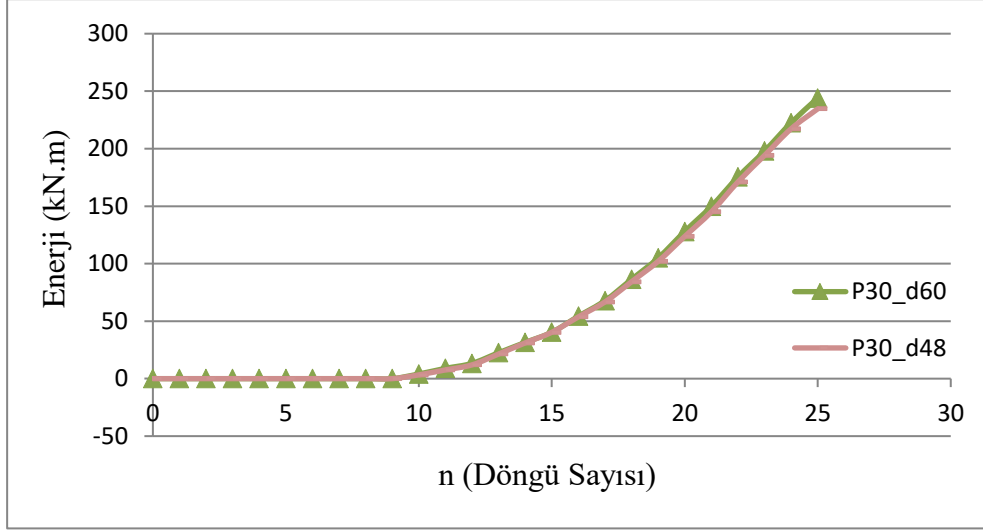
**Şekil 5.16 :** Farklı açılarla yerleştirilen örgü elemanlarına sahip sonlu eleman modellerinin kuvvet – yerdeğiştirme grafiklerinin karşılaştırılması.

%30 seviyesindeki plastik aksenal basınç kuvveti ile tekrarlı tersinir yatay yükler altında gerçekleştirilen farklı açılarla yerleştirilen örgü elemanlarına sahip sonlu eleman modellerinin kuvvet – yerdeğiştirme grafikleri incelendiğinde, süneklik bakımından benzer davranış gözlenmektedir.



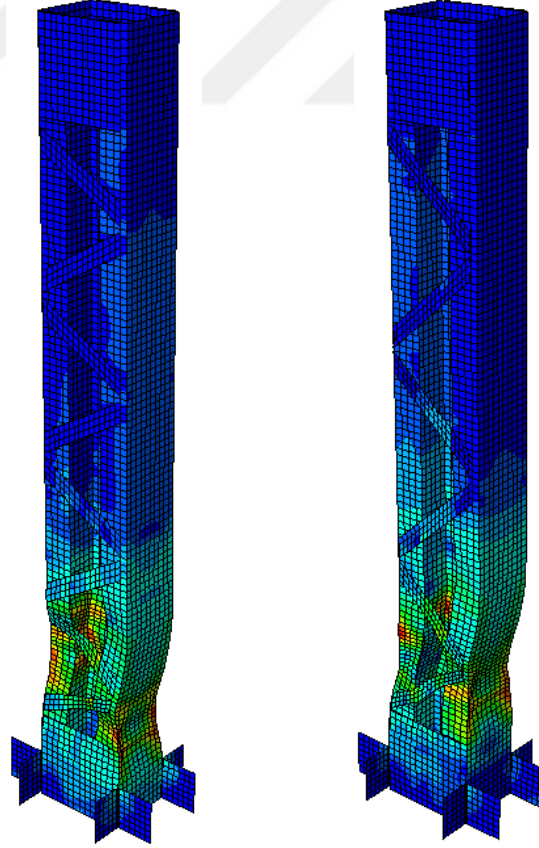
**Şekil 5.17 :** Farklı açılarla yerleştirilen örgü elemanlarına sahip sonlu eleman modellerinin iskelet eğrilerinin karşılaştırılması.

Farklı açılarla yerleştirilen örgü elemanlarına sahip yapma enkesitli konsol kolon elemanlarının iskelet eğrileri karşılaştırıldığında, örgü elemanlarının düşey eksen ile yaptığı açının azalmasıyla dayanım ve başlangıç rijitliği bakımından benzer bir davranış sergilediği, ancak dayanımın artan yerdeğiştirme ile birlikte daha büyük kayıplar göstererek azaldığı görülmüştür.



**Şekil 5.18** : Farklı açılarla yerleştirilen örgü elemanlarına sahip sonlu eleman modellerinin enerji eğrilerinin karşılaştırılması.

Enerji eğrileri karşılaştırıldığında, örgü elemanlarının daha küçük açılarla yerleştirilmesi, enerji sönümlenme kapasitelerini önemli ölçüde etkilememiştir. Elemanların göçme modu incelendiğinde ise, benzer davranışlar gözlenmiştir.



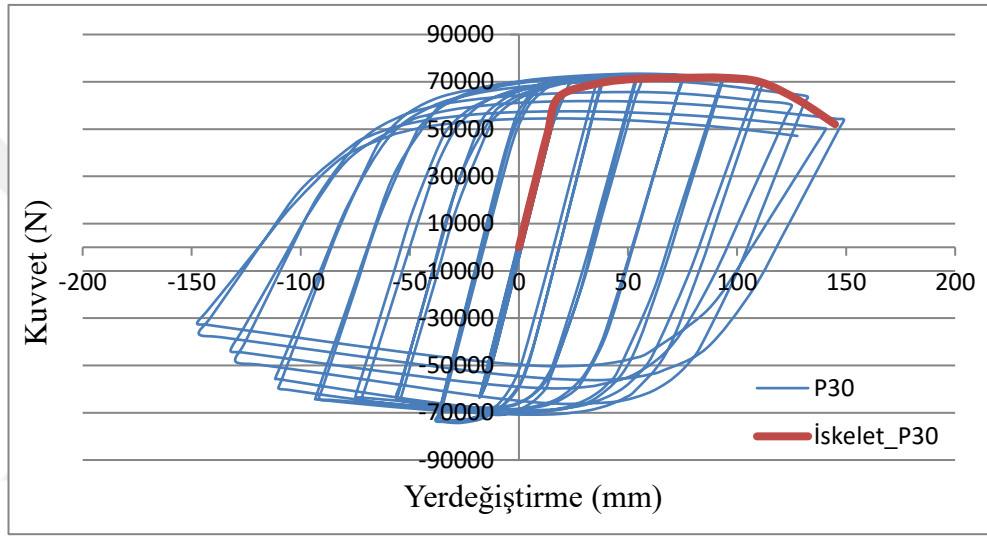
60° Örgü Elemanlı

48° Örgü Elemanlı

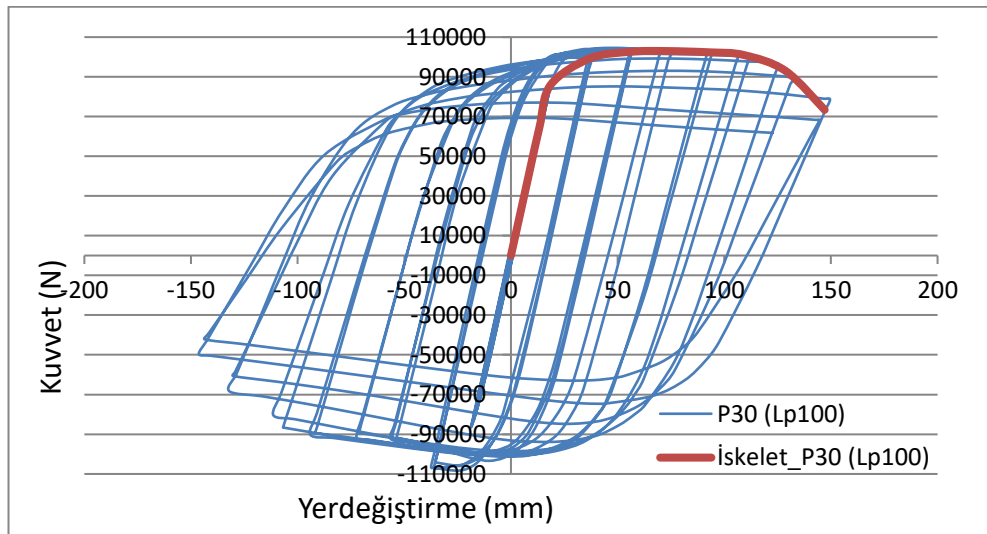
**Şekil 5.19** : Farklı açılardaki örgü elemanlarına sahip elemanların göçme modları.

#### 5.4 Farklı Yükseklikte Bağ Levhalarının Kullanılmasının Davranışa Etkisi

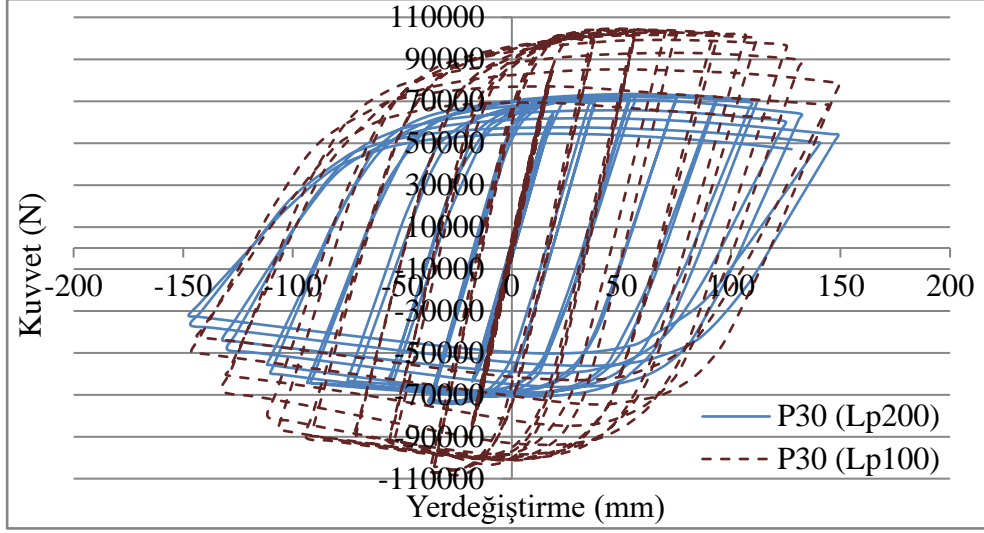
Yapma enkesitli konsol kolon elemanlarında, farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanılmasının davranışa etkisini anlayabilmek amacıyla bağ levhası yüksekliğinin 100mm olduğu sonlu eleman modeli oluşturularak bağ levhası yüksekliğinin 200mm olduğu referans model ile karşılaştırılacaktır. %30 seviyesinde plastik aksenal basınç kuvvetleri ile tekrarlı tersinir yatay yerdeğiştirmelere maruz kalan farklı yükseklikte bağ levhaları kullanılan sonlu eleman modellerinin kuvvet – yerdeğiştirme grafikleri aşağıdaki gibi çizilerek, iskelet eğrileri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.20 : 200mm yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonun kuvvet-yerdeğiştirme grafiği.

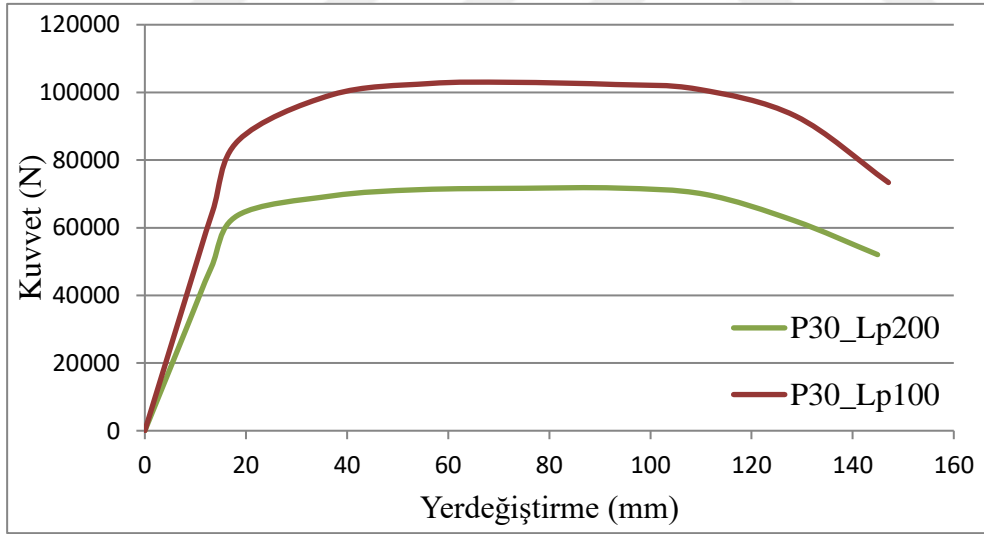


Şekil 5.21 : 100mm yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonun kuvvet-yerdeğiştirme grafiği.



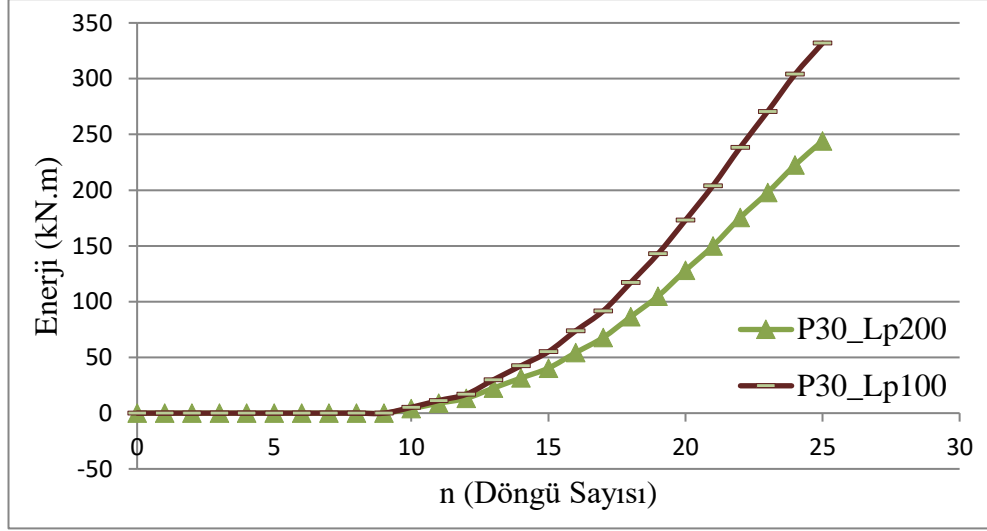
**Şekil 5.22 :** Farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonların kuvvet – yerdeğiştirme grafiklerinin karşılaştırılması.

%30 seviyesindeki plastik eksenel basınç kuvveti ile tekrarlı tersinir yatay yükler altında gerçekleştirilen farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonların kuvvet – yerdeğiştirme grafikleri incelendiğinde, benzer bir sünek davranış gözlenmiştir.



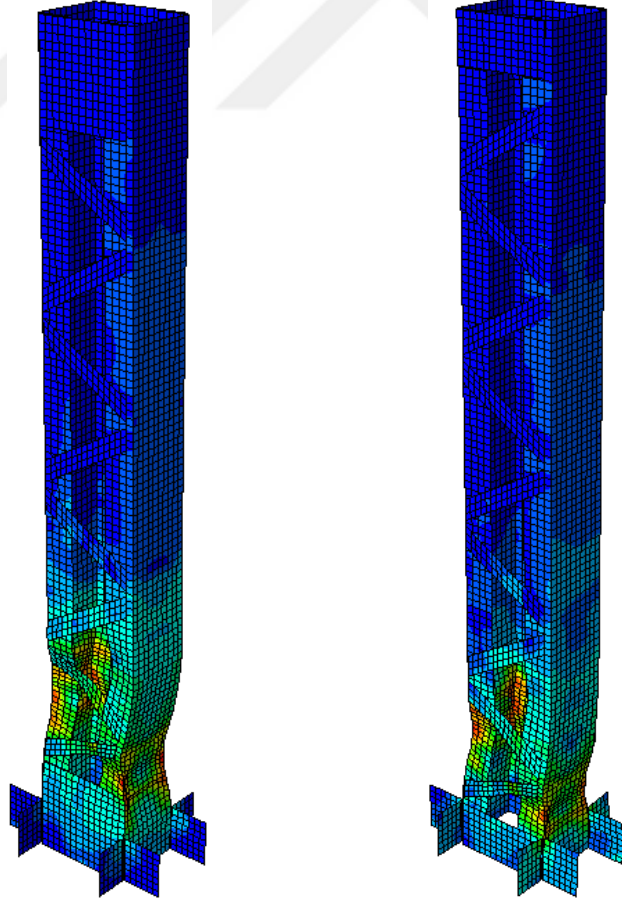
**Şekil 5.23 :** Farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonların iskelet eğrilerinin karşılaştırılması.

Farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonların iskelet eğrileri karşılaştırıldığında, 100mm yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolon modelinde, daha yüksek bir dayanım ve başlangıç rijitliği elde edildiği görülmektedir.



**Şekil 5.24 :** Farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonların enerji eğrilerinin karşılaştırılması.

Enerji eğrileri karşılaştırıldığında, 100mm yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı modelde, enerji sönümlenme kapasitesi artmıştır. Ancak, eleman göçme modu incelendiğinde ise, benzer davranışlar gözlenmiştir.

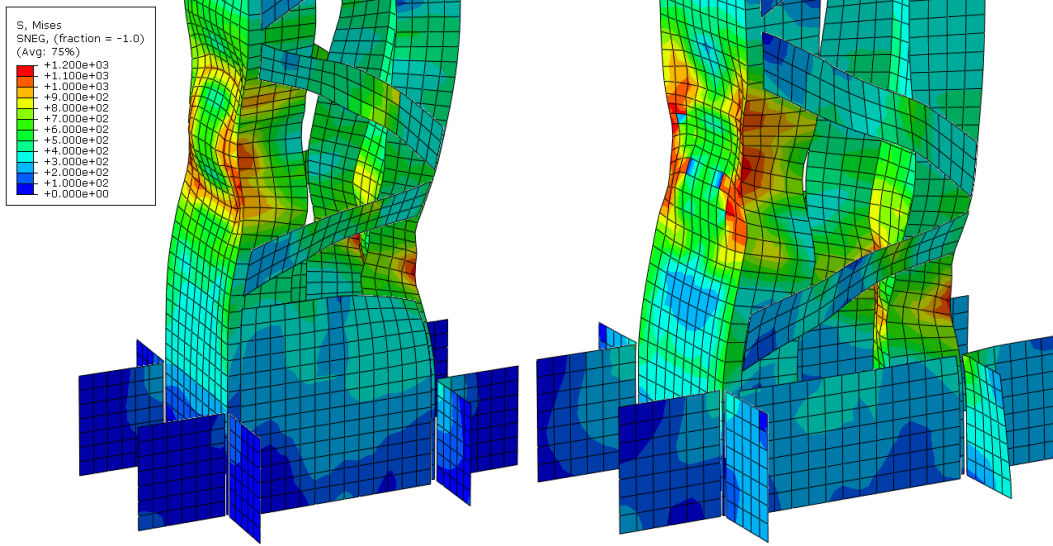


200mm Bağ Levhalı

100mm Bağ Levhalı

**Şekil 5.25 :** Farklı yükseklikte bağ levhalı elemanların göçme modları.

Farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonların analiz sonuçları karşılaştırıldığında, 100mm yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı modelde, dayanım, başlangıç rijitliği ve enerji sönümlenme kapasitesinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bu farklılık, tabandaki kısa bağ levhası nedeniyle, taban levhası için kullanılan rijitlik levhalarının, dayanım ve rijitlik ile enerji sönümlenme kapasitesine olan katkısından kaynaklandığı düşünülmektedir.



**Şekil 5.26** : Farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli konsol kolonların von mises gerilme diyagramlarının karşılaştırılması.

Şekil 5.26'daki von Mises gerilme diyagramları incelendiğinde, 200mm yükseklikli bağ levhalarının kullanıldığı elemanda, dayanımda belirleyici olan enkesit sadece ana profillerin oluşturduğu enkesit iken, 100mm yükseklikli bağ levhalarının kullanıldığı elemanda ise, dayanım, bağ levhaları ile kısmen rijitlik levhalarının katkılarına da içermektedir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, eksenel basınç kuvveti ve eğilme momentinin bileşik etkisindeki kafes örgü elemanlı iki parçalı basınç elemanlarının tasarımına yönelik esasların araştırılması amaçlanmıştır. Ayrıca, sabit düşey yük ve tekrarlı tersinir yatay yüklerin ortak etkisindeki farklı konstrüktif özelliklere sahip yapma enkesitli bu tür kolonların doğrusal olmayan davranışları incelenmiştir. ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği [4] incelendiğinde yapma enkesitli kolonlar sadece eksenel kuvvetler altında boyutlandırılabilir. Eurocode 3 (EC 3) [5] ve Çin Çelik Yapılar Yönetmeliği (GB 50017 – 2003) [6] bu konu üzerine iki farklı tasarım yaklaşımına sahiptir. Yapma enkesitli iki ucu mafsallı bir kolon ile bir konsol kolon üzerinde yürütülen çalışmalar sonucunda, EC 3 [5] tasarım yaklaşımının esas alınabileceği görülmüştür. Esas alınan tasarım yaklaşımı, ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği [4] kapsamında değerlendirilerek bir tasarım yaklaşımı önerilmiştir.

Ayrıca önerilen tasarım yaklaşımının uygulandığı yapma enkesitli örnek konsol kolonların, konstrüktif kurallara dayalı iki parametre esas alınarak sabit düşey yük ve tekrarlı tersinir yatay yükler altında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Belirlenen iki adet parametre, örgü elemanlarının düşey eksenle yaptığı açı ve bağ levhası yüksekliğidir. Konsol kolonların sonlu eleman modellerinin analizleri ile, farklı açılarla yerleştirilen örgü elemanlarının ve farklı yükseklikte bağ levhalarının kullanılmasının farklı sabit düşey yük seviyelerinde davranışa olan etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'nde [4] yer verilmek üzere, eksenel basınç kuvveti ve eğilme momentinin bileşik etkisi altındaki kafes örgü elemanlı iki parçalı basınç elemanlarına ilişkin EC 3 [5] esaslı bir tasarım yaklaşımı önerilmiştir.

- Mevcut bir çalışma [19] esas alınarak sonlu eleman modelleme aşamaları doğrulanmış ve çelik malzeme davranışı için ilgili parametrelerin sayısal değerleri belirlenmiştir.
- Farklı sabit düşey yük seviyelerinin davranışa etkisini araştırmak amacıyla yapılan çalışmalarda, belirli seviyelerdeki sabit düşey yükler ile tekrarlı tersinir yatay yükler altında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler sonucunda, düşey yük seviyesi arttıkça süneklik, dayanım ve enerji sönümleme kapasitelerinin azaldığı, başlangıç rijitliğinin değişmediği gözlenmiştir.
- Örgü elemanlarının düşey eksenle yaptığı açının  $60^\circ$ 'den küçük olduğu ( $48^\circ$ ) sonlu eleman modelinin, süneklik, dayanım, başlangıç rijitliği ve enerji sönümleme kapasitesi bakımından,  $60^\circ$  açıyla yerleştirilen örgü elemanlı model ile benzer bir davranış sergilediği, ancak dayanımın artan yerdeğiştirme ile birlikte daha büyük kayıplar göstererek azaldığı görülmüştür.
- Bağ levhalarının yüksekliğinin 100mm olduğu modelin analiz sonuçları değerlendirildiğinde, 200mm yüksekliğindeki bağ levhalarının kullanıldığı modele göre, daha yüksek bir dayanım ve başlangıç rijitliği elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, benzer bir sünek davranış göstermeleriyle birlikte, enerji sönümleme kapasitesinin arttığı görülmektedir. Bu farklılık, tabandaki kısa bağ levhası nedeniyle, taban levhası için kullanılan rijitlik levhalarının, dayanım ve rijitlik ile enerji sönümleme kapasitesine olan katkısından kaynaklanmaktadır.

## 6.2 Öneriler

Eğilme momenti ile aksenal basınç kuvvetinin bileşik etkisindeki yapma enkesitli kolonların boyutlandırılması amacıyla esas alınan hesap yöntemine [5] göre, ara bağlantı elemanları için elde edilen aksenal kuvvetlerin sonlu eleman modellerinin analizleri sonunda elde edilen aksenal kuvvetlerden yüksek oranlarda daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durumda, aksenal basınç kuvveti ve eğilme momentinin bileşik etkisindeki yapma enkesitli kolonlarda oluşan kesme kuvvetleri ile ilgili daha fazla sayısal ve deneysel çalışmanın yapılması gerekmektedir.

Yapma enkesitli kolonların ön tasarım aşamasında ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'nde [4] yer alan geometrik ve konstrüktif esaslara uyulmaktadır. Ancak, sabit düşey yük ve tekrarlı tersinir yatay yük etkisindeki tipik konsol kolon çalışmasına göre, 60°'den daha küçük bir açıyla yerleştirilen örgü elemanları ile teşkil edilen yapma enkesitli kolonların benzer bir davranış sergilediği, yüksekliği daha küçük bağ levhalarının kullanıldığı yapma enkesitli kolonlarda ise, kolon ayağı teşkili için yerleştirilen rijitleştirici levhaların eğilme momenti dayanıma etkileri nedeniyle daha büyük bir dayanım oluştuğu gözlenmiştir. Bu durumda, geometrik ve konstrüktif esasların etkilerinin daha detaylı olarak incelenmesi önerilmektedir.





## KAYNAKLAR

- [1] **Mittal A., Trager P. ve Corus** (2008). Single – Storey Steel Buildings, Part 6: Detailed Design of Built – up Columns, CTICM ve SCI
- [2] **Tripathi, S. ve Jaiswar, H.** (2014). Analytical Investigation & Comparison Between Steel Laced & Battened Columns (Bachelor’s Thesis). University of Mumbai, Department of Civil Engineering, New Mumbai.
- [3] **TBDY** (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- [4] **ÇYTHYE** (2018). Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- [5] **Eurocode 3** (2005). Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, European Committee for Standardization, Brussels.
- [6] **GB 50017** (2003). Code for Design of Steel Structures, National Standard of The People’s Republic of China.
- [7] **Lue, D.M., Yen, T. ve Liu, J.L.** (2006). Experimental investigation on built-up columns, Journal of Constructional Steel Research 62(1), 1325-1332.
- [8] **AISC-ASD** (2005). American Institute of Steel Construction, Allowable Stress Design (ASD) Specification for Structural Steel Buildings, second edition, Chicago, Illinois, USA.
- [9] **AISC-LRFD** (2005). American Institute of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design (LRFD) Specification for Structural Steel Buildings, second edition, Chicago, Illinois, USA.
- [10] **AS-4100** (1998). Australian Standart for the Design of Steel Structures, Steel Structures, Standart Association of Australia, Sydney, Australia.
- [11] **CSA S16-01** (2001). Canadian Standards Association, Limit states design of steel structures, Toronto, Canada.
- [12] **AISC-LRFD** (1999). American Institute of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design (LRFD) Specification for Structural Steel Buildings, second edition, Chicago, Illinois, USA.
- [13] **Liu, J.L., Lue, D.M. ve Lin, C.H.** (2009). Investigation on slenderness ratios of built-up compression members, Journal of Constructional Steel Research 65(9), 237-248.
- [14] **Hasheela, P.F.** (2013). Behavior of Sinle Laced Columns versus Double Laced Columns. (Master’s Thesis). University of the Witwatersrand, Faculty of Engineering and Built Environment, Johannesburg.

- [15] **ABAQUS** (2010). Finite Element Analysis and Computer-Aided Engineering, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- [16] **Sahoo B. ve Rai, D.C.** (2004). Battered Built-up Beam-Columns Under Cyclic Loads, 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering 67(4), Vancouver, B.C., Canada
- [17] **Alih, S.C., Vafaei, M., Mansour, F.R. ve Halim, N.H.F.A.** (2017). A Numerical on the Seismic Performance of Built-Up Battered Columns, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Structural Construction Engineering 11(5), 671-674.
- [18] **Hashemi, B.H. ve Jafari, M.A.** (2012). Experimental evaluation of cyclic behavior of batten columns, Journal of Constructional Steel Research 78(6), 88-96.
- [19] **Hashemi, B.H. ve Bonab, A.P.** (2013). Experimental investigation of the behavior of laced under constant axial load and cyclic lateral load, Engineering Structures 57(4), 536-543.
- [20] **Hashemi, B.H. ve Bonab, A.P.** (2012). Analytical investigation of cyclic behavior of laced built-up columns, Journal of Constructional Steel Research 73(4), 128-138.
- [21] **Kalochairetis, K.E., Gantes C.J., ve Lignos, X.A.** (2014). Experimental and numerical investigation of eccentrically loaded laced built-up steel columns, Journal of Constructional Steel Research 101(5), 66-81.
- [22] **Kalochairetis, K.E. ve Gantes, C.J.** (2011). Numerical and analytical investigation of collapse loads of laced built-up columns, Computers and Structures 89(11), 1166-1176.
- [23] **ÇYTHYE Uygulama Klavuzu** (2018). Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik Hakkında Uygulama Kılavuzu, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- [24] **Moze, P.** (2014). ESDEP WG 7 Lecture 7.6: Built-up Columns, Univerza v Ljubljani.
- [25] **ASTM** (1993). Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, Annual Book of ASTM Standards, No. A370.
- [26] **Payne, T.** (2000). Nonlinear Response of Steel Beams, Department of the Interior Bureau of Reclamation.
- [27] **Jia, L.J. ve Kumawura, H.** (2014). Prediction of Cyclic Behaviors of Mild Steel at Large Plastic Strain Using Coupon Test Results, Journal of Structural Engineering 140.
- [28] **ATC 24** (1992). Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures, Applied Technology Council, Redwood city, California.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Hüseyin Gazi Aydoğan  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 1992, Ankara  
**E-posta** : huseyingaziaydogan@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lise** : 2010, Reha Alemdaroğlu Anadolu Lisesi
- **Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversite, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2015-2016, Yapı Teknik Proje Müşavirlik ve Mühendislik Ltd. Şti.
- 2016-2017, Fen Teknik Mühendislik Mimarlık Ltd. Şti.
- 2017-Hâlen, STAND Engineering Consulting and Trade Ltd.