

**T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ZAYIFLATILMIŞ KİRİŞ VE GÖVDE ENKESİTLİ ÇELİK ÇERÇEVE
SİSTEMLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞLARININ DEPREM
PERFORMANSINA ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

BÜLENT KOPARAN

(0609122059)

Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı: YAPI

TEMMUZ 2021

**T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ZAYIFLATILMIŞ KİRİŞ VE GÖVDE ENKESİTLİ ÇELİK ÇERÇEVE
SİSTEMLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞLARININ DEPREM
PERFORMANSINA ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

BÜLENT KOPARAN

(0609122059)

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Haziran 2021
Tezin Savunulduğu Tarih : 02 Temmuz 2021**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Erdal Coşkun
Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Ahmet Murat Türk
Dr. Öğr. Üyesi Edip Seçkin
Doç. Dr. Cüneyt Vatansever (İTÜ)
Doç. Dr. Barlas Özden Çağlayan (İTÜ)**

TEMMUZ 2021

ÖNSÖZ

Doktora tezi çalışmalarım süresince değerli fikir ve tecrübelerinden yararlandığım, danışman hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Erdal COŞKUN'a, yardımları ve katkıları ile çalışmalarımı yönlendiren hocalarım İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Ahmet Murat TÜRK ve Sayın Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER'e, hiçbir zaman maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen değerli aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Haziran 2021

Bülent KOPARAN

İnşaat Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	1
İÇİNDEKİLER	2
KISALTMALAR.....	4
ÇİZELGE LİSTESİ	5
ŞEKİL LİSTESİ.....	6
SİMGE LİSTESİ.....	10
ÖZET	13
ABSTRACT.....	16
1. GİRİŞ	19
1.1. Depremlerin Çelik Yapılara Olan Etkileri	19
1.2. Zayıflatılmış Kiriş ve Gövde Enkesitleri.....	24
1.3. Zayıflatılmış Kiriş ve Gövde Enkesitleri İle İlgili Önceki Çalışmalar.....	25
1.4. İlgili Yönetmelik ve Şartnamelerde Zayıflatılmış Kiriş Enkesitleri İçin Önerilen Tasarım Esasları	35
1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	39
2. YAPISAL ÇELİK.....	40
2.1. Genel Bakış.....	40
2.1.1. Malzeme Olarak Çelik	40
2.2. Çelik Malzemenin Davranış Özellikleri	42
2.2.1. Malzemede Kuvvet-Yer Değiştirme İlişkisi Modelleri	47
2.2.2. Çelik Kesitlerin Plastik Davranışı	48
2.2.3. Çeliğin Çevrimsel Yükler Altında Davranışı.....	50
3. MOMENT AKTARAN ÇELİK ÇERÇEVE SİSTEMLER	55
3.1. Moment Aktaran Çelik Çerçeve Sistemlerin Davranış Esasları	55
3.1.1. Kirişler	58
3.1.2. Kolon-Kiriş Birleşimleri	60
3.1.3. Panel bölgesi	61
4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE MODELİN DOĞRULANMASI	62

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	62
4.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulama Adımları	63
4.2.1. Ön İşlemci (<i>Pre-Processing</i>) Adımı	63
4.2.2. Çözüm (<i>Solution</i>)	64
4.2.3. Son İşlemci (<i>Post-Processing</i>).....	64
4.3. Modelin Doğrulanması.....	65
4.3.1. Numunelerin Tasarımı.....	66
4.4. Modellemede Yapılan Kabuller	70
4.4.1. Malzeme Özellikleri.....	70
4.5. Doğrulama Çalışması.....	71
5. ÇERÇEVE ÇÖZÜMLEMELERİ.....	73
5.1. Malzeme ve Çerçevelerin Özellikleri.....	74
5.2. Dört Katlı Çerçeveler	78
5.3. Sekiz Katlı Çerçeveler	84
5.4. Oniki Katlı Çerçeveler	89
6. BİRLEŞİM MODELLERİ ÜZERİNDEKİ ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI	95
6.1. Kullanılan Modeller	95
6.2. Moment-Dönme Eğrilerinin Elde Edilmesi.....	98
6.3. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	108
6.4. Ağ Yapısı Düzenlemesinin Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçlarına Etkisi.....	116
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	127
KAYNAKLAR	131
EK-1 : BOYUTLANDIRMA	135
EK-2 :GÖVDESİNDEN ZAYIFLATILMIŞ KİRİŞ ENKESİTLİ BİRLEŞİMLERİN HESABI	154

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AISC	: American Institute of Steel Construction
ANSI/AISC 341-16	: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings
ASD	: Allowable Stress Design
ASTM	: American Society for Testing of Materials
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
MDC	: Moment Dayanımlı Çerçeve
TBDY-2018	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
YDKT	: Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım
ZGE	: Zayıflatılmış Gövde Enkesiti
ZKE	: Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti

ÇİZELGE LİSTESİ

Tablo 1.1 : FEMA350 yönetmeliği gereğince uygulama sınırları	36
Tablo 1.2 : Kaynaklı zayıflatılmış kiriş enkesitli kiriş – Kolon birleşim detayının uygulama sınırları (TBDY-2018).....	38
Tablo 2.1: Sıcak haddelenmiş yapısal çeliklerde, karakteristik akma gerilmesi (Fy) ve çekme dayanımı (Fu) değerleri	42
Tablo 4.1 : Zayıflatılmış kiriş enkesitlerin geometrik karakteristikleri	66
Tablo 4.2: D.T.Pachoumis ve diğ. tarafından yapılan deney numunelerinin özellikleri	67
Tablo 4.3 : Yükleme protokolü	69
Tablo 5.1 : Malzeme karakteristik değerleri	75
Tablo 5.2 : Çerçevelerin özellikleri.....	76
Tablo 5.3 : Çerçeve yükleri.....	77
Tablo 5.4 : Başlangıç yükünün on katı yük için gerilme ve deformasyon değerleri .	79
Tablo 5.5 : Başlangıç yükünün 16 katı yük için gerilme ve deformasyon değerleri .	80
Tablo 5.6 : 4 Katlı çerçeveler için etkileşim katsayıları.....	82
Tablo 5.7: 8 katlı çerçeve yükleme adımları.....	84
Tablo 5.8: 8 katlı çerçevede gerilme ve deformasyon değerleri	86
Tablo 5.9 : 8 Katlı çerçeveler için etkileşim katsayıları.....	87
Tablo 5.10: 12 katlı çerçeve yükleme adımları.....	90
Tablo 5.11: 12 katlı çerçevede gerilme ve deformasyon değerleri	92
Tablo 5.12: 12 Katlı çerçeveler için etkileşim katsayıları.....	93
Tablo 6.1: Birleşim tipleri tablosu	96
Tablo 6.2 : Birleşim tipleri tablosu	97
Tablo 6.3 : Analiz sonuçları	114
Tablo 6.4 : Birleşim özellikleri	115

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: 17 Ocak 1994 Northridge Depremi ivme kaydı.....	20
Şekil 1.2: Northridge depremi öncesinde kullanılan birleşim detayları ve çatlak oluşumları.....	21
Şekil 1.3: (a) Kaynaklarda kırılma (b) Kiriş başlığının, kolon başlığından uzaklaşması (c) Kolon başlığına doğru ilerleyen kırılma (d) Yırtılmanın kolonun gövdesinde yayılması (Bruneau ve diğ, 2011).	22
Şekil 1.4 : Kobe, Japonya depremi nedeniyle: (a) Kiriş alt başlıklarında kırılma; (b) Kirişte kırılmanın gövdeye yayılması; (c) Diyaframın ısıdan etkilenen bölgesinde başlayan kırılma, (d) Kolonda kırılmanın yayılması (Bruneau ve diğ, 2011).	23
Şekil 1.5 : İdeal kiriş mekanizması	24
Şekil 1.6: Tipik ZKE’li birleşim detayı.....	25
Şekil 1.7: Düz kesimli kiriş-kolon ZKE’li bağlantısı (Plumier, 1996).	26
Şekil 1.8: Zayıflatılmış kiriş enkesiti (ZKE) tipik kesim detayları.....	27
Şekil 1.9: Kiriş başlığında gerilme dağılımı a) Güçlü eksen b) Zayıf eksen Gilton ve Uang (2002)	28
Şekil 1.10: Düz guseli deney elemanında plastik mafsall oluşumu (Lee ve diğ. 2005).	29
Şekil 1.11: Kiriş gövde enkesitinde yapılan azaltma (Ashrafi ve diğ, 2009).....	30
Şekil 1.12: ZKE’li çelik kirişte kullanılan (a) Merkeze yerleştirilmiş berkitme levhası (b) İki berkitme levhası (c) Üç berkitme levhası (Li ve Morisako, 2009)	31
Şekil 1.13: Gövde boşluklarında çeşitli düzenlemeler (Hedayat ve Çelikağ 2009)... ..	32
Şekil 1.14: Yarık sönümleyici kiriş-kolon birleşim önerisi [31]	32
Şekil 1.15: ZKE’li ve ZKE’siz sistemlerin karşılaştırmalı itme analizi eğrileri Kildashti ve diğ. (2012).....	33
Şekil 1.16: Özgün tasarımlı gövde boşlukları (Tsavdaridis ve diğ. 2014).....	34
Şekil 1.17 : ZKE’li birleşim detayı ve boyutlandırma limitleri	35
Şekil 1.18 : Eurocode 3’de ZKE düzenlemesi (EN 1993-1-8 2005).....	36
Şekil 1.19 : ZKE’li kirişlerin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) birleşim detayı.....	37
Şekil 2.1: Çeliğin çekme kuvveti altında genel gerilme (σ) - şekil değiştirme (ϵ) diyagramı.....	433
Şekil 2.2: Yerel ve genel süneklik arasındaki ilişkide, yapısal tepki seviyeleri arasındaki bağlantı	46
Şekil 2.3 : (a) Doğrusal elastik malzeme (b) Doğrusal olmayan elastik malzeme (c) Elasto-plastik malzeme (d) Rijit doğrusal olmayan/plastik malzeme (e) İdeal elasto-plastik malzeme (f) Pekleşen ideal elasto-plastik malzeme	48
Şekil 2.4 : Bauschinger etkisi (Bruneau, M., Uang C.-M., Sabelli, R. 2011).....	51
Şekil 2.5: Çelikte histeretik enerji a) Yarı histeretik b) Tam histeretik (Bruneau, M., Uang C.-M., Sabelli, R. 2011)	52
Şekil 2.6 : (a) İzotropik pekleşme modelinde malzemenin σ - ϵ ilişkisi. (b) Kinematik pekleşme modelinde malzemenin σ - ϵ ilişkisi (Youngjiu, S., Meng, W., Yuanqing, W., 2011).....	53
Şekil 2.7 : Ramberg-Osgood gerilme-şekil değiştirme modeli.....	54
Şekil 3.1 : Moment çerçevesi (Uzgider, E., Çağlayan Ö. 2005).	55

Şekil 3.2 : Moment aktaran çerçevelerin Moment-Birleşim Dönme diyagramı karşılaştırması	56
Şekil 3.3 : Moment çerçevesi mafsallaşma durumları (a) Kolon mekanizması (b) Kiriş mekanizması.....	57
Şekil 3.4 : Yerel ve genel yapısal tepki arasındaki hiyerarşik ilişki (Elnashai, A., Sorno, L.D., 2008).	58
Şekil 3.5 : Çelik kirişin tipik moment-açısal dönme eğrisi.....	59
Şekil 3.6 : Moment aktaran çerçevelerin birleşim bölgesinde oluşan hasarlar (a) Kolon başlığında oluşan hasarlar (b) Küt kaynakta oluşan hasarlar (c) Panel bölgesindeki yırtılma (d) Panel bölgesinde hasar tipi (Bruneau, M., Uang C.-M., Sabelli, R. 2011).....	600
Şekil 3.7 : Yatay yüklemeye maruz sünek, moment aktaran çelik çerçevenin panel bölgesine etki eden momentler, kesme kuvvetleri ve eksenel kuvvetler.	61
Şekil 4.1: Tipik sonlu elemanlar modeli	64
Şekil 4.2 : Temel eleman.....	65
Şekil 4.3: Deney düzeneği (Pachoumis ve diğerleri, 2009).....	67
Şekil 4.4 : Test düzeneğinin genel görünümü (Pachoumis ve diğerleri, 2009)	68
Şekil 4.5 : Yükleme protokolü (SAC).....	68
Şekil 4.6 : Analizde kullanılan gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	70
Şekil 4.7 : SAC yükleme protokolü , Pachoumis ve ekibi [14] tarafından yapılan deney fotoğrafı, ve sağ resimde Tsavdaridis ve ekibinin [24] yaptığı analitik çalışmanın görüntüsü.	71
Şekil 4.8 : Tez çalışmasından elde edilen von Misses gerilme dağılımı.....	72
Şekil 4.9 : Tez çalışmasından elde edilen Moment-Dönme eğrisi ile deneysel çalışmadan elde edilen moment eğrilik grafiğinin karşılaştırılması (Kolon yüzünden 75 cm mesafede)	72
Şekil 5.1: a) Yapının planı, b) Tipik döşeme enkesiti.....	73
Şekil 5.2 : 4, 8 ve 12 katlı çelik moment çerçeveleri	74
Şekil 5.3 : Malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrisi.....	75
Şekil 5.4 : 4 katlı çerçeve modeli	78
Şekil 5.2 : Şekil değiştirmiş 4 katlı ZGE çerçeve	78
Şekil 5.6 : Değerlendirme yapılan bölge.....	79
Şekil 5.7 : 4 katlı çerçevelerin itme eğrileri	80
Şekil 5.8: 4 katlı çerçevelerin kritik birleşim bölgesinde eşdeğer plastik deformasyon dağılımı	82
Şekil 5.9 : Etkileşim yüzeyi (4 katlı çerçeve için)	83
Şekil 5.10 : Şekil değiştirmiş 8 katlı ZGE çerçeve	84
Şekil 5.11: 8 katlı çerçevelerin itme eğrileri	85
Şekil 5.12: 8 katlı çerçevelerin kritik birleşim bölgesinde eşdeğer plastik deformasyon dağılımı.....	86
Şekil 5.13 : Azaltma çapı ve uzaklığına bağlı gerilme değişimi.....	87
Şekil 5.14: Etkileşim yüzeyi (8 katlı çerçeve için)	88
Şekil 5.15: Şekil değiştirmiş 12 katlı ZKE çerçeve	89
Şekil 5.16 : 12 katlı çerçevelerin itme eğrileri	90
Şekil 5.17 : 12 katlı çerçevelerin kritik birleşim bölgesinde eşdeğer plastik deformasyon dağılımı.....	91
Şekil 5.18 : Azaltma çapı ve uzaklığına bağlı gerilme değişimi.....	92

Şekil 5.19 : Etkileşim yüzeyi (12 katlı çerçeve için)	94
Şekil 6.1 : Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti (ZKE)	98
Şekil 6.2 : Zayıflatılmış Gövde Enkesiti (ZGE).....	98
Şekil 6.3: ANSYS modeli	98
Şekil 6.4 : Eşdeğer gerilme (von Misses gerilmesi) a) HE300A-IPE400 D=200 M300 b) HE300A-IPE400 D=260 M300 c) HE300A-IPE400 D=300 M300 d) IPE300 D=150 M225 e) IPE300 D=195 M225 f) IPE300 D=240 M225 g) IPE200 D=100 M150 h) IPE200 D=130 M150 i) IPE200 D=160 M150 k).....	100
Şekil 6.5 : HEA300 Kolon IPE400 Kiriş İçin Birim Şekil Değiştirme Dağılımı	101
Şekil 6.6 : IPE400 Kolon-Kiriş için Birim Şekil Değiştirme Dağılımı.....	102
Şekil 6.7 : IPE300 Kolon-Kiriş İçin Birim Şekil Değiştirme Dağılımı	103
Şekil 6.8 : IPE200 Kolon-Kiriş İçin Birim Şekil Değiştirme Dağılımı	104
Şekil 6.9 : HEA300 Kolon IPE400 Kiriş İçin Moment Dönme Eğrileri	105
Şekil 6.10: IPE300 Kolon-Kiriş İçin Moment Dönme Eğrileri	105
Şekil 6.11: IPE300 Kolon-Kiriş İçin İçin Moment Dönme Eğrileri	106
Şekil 6.12 : IPE200 Kolon-Kiriş İçin İçin Moment Dönme Eğrileri	106
Şekil 6.13 : a): HEA300 -IPE400 Birleşimler için a) $M_u / M_{u, \text{solid}}$ grafiği b) $M_u / M_{u, \text{reduced}}$ grafiği	107
Şekil 6.14 : a): IPE400 -IPE400 Birleşimler için a) $M_u / M_{u, \text{solid}}$ grafiği b) $M_u / M_{u, \text{reduced}}$ grafiği.....	107
Şekil 6.15 : a): IPE300 –IPE300 Birleşimler için a) $M_u / M_{u, \text{solid}}$ grafiği b) $M_u / M_{u, \text{reduced}}$ grafiği	107
Şekil 6.16: a): IPE200 –IPE200 Birleşimler için a) $M_u / M_{u, \text{solid}}$ grafiği b) $M_u / M_{u, \text{reduced}}$ grafiği	108
Şekil 6.17 : D/h=0.5 M/h=0.25	110
Şekil 6.18 : D/h=0.5 M/h=0.33 Eşdeğer Gerilme	111
Şekil 6.19 : D/h=0.5 M/h=0.41 Eşdeğer Gerilme	111
Şekil 6.20 : D/h=0.5 M/h=0.67 Eşdeğer Gerilme	111
Şekil 6.21 : D/h=0.65 M/h=0.33 Eşdeğer Gerilme	111
Şekil 6.22 : D/h=0.65 M/h=0.50 Eşdeğer Gerilme	112
Şekil 6.23: D/h=0.65 M/h=0.67 Eşdeğer Gerilme	112
Şekil 6.24 : D/h=0.75 M/h=0.33 Eşdeğer Gerilme	112
Şekil 6.25 : D/h=0.75 M/h=0.50 Eşdeğer Gerilme	112
Şekil 6.26: D/h=0.75 M/h=0.67 Eşdeğer Gerilme	113
Şekil 6.27 : D/h=0.65 M/h=0.33 Virendeel Etkisi	113
Şekil 6.28 : Ağ Yapısının Kalitesinin Sonuçlara Etkisi	116
Şekil 6.29 : Etkileşim Akış Şeması	117
Şekil 6.30 : Etkileşim değerlendirmesi	118
Şekil 6.32: IPE200 Kolon IPE200 Kiriş path2 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi	119
Şekil 6.32: IPE200 Kolon IPE200 Kiriş path1 ve path2 için iki boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi	119
Şekil 6.33 : IPE200 Kolon IPE200 Kiriş path2 için plastik deformasyonu veren denklem katsayıları	119
Şekil 6.34 : IPE300 Kolon IPE300 Kiriş Etkileşim değerlendirmesi	121
Şekil 6.35 : PE300 Kolon IPE300 Kiriş Path1 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi	121

Şekil 6.36 : IPE300 Kolon IPE300 Kiriş path2 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi	121
Şekil 6.37: IPE300 Kolon IPE300 Kiriş path1 ve path2 için iki boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi	121
Şekil 6.38 : IPE300 Kolon IPE300 Kiriş path2 için plastik deformasyonu veren denklem katsayıları	122
Şekil 6.39 : IPE400 Kolon IPE400 Kiriş Etkileşim değerlendirmeesi	122
Şekil 6.40 : IPE400 Kolon IPE400 Kiriş path1 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi	123
Şekil 6.41 : IPE400 Kolon IPE400 Kiriş path2 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi	123
Şekil 6.42 : IPE400 Kolon IPE400 Kiriş path1 ve path2 için iki boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi	123
Şekil 6.43 : IPE400 Kolon IPE400 Kiriş path2 için plastik deformasyonu veren denklem katsayıları	124
Şekil 6.44 : HE300A Kolon IPE400 Kiriş Etkileşim değerlendirmeesi	124
Şekil 6.45: HE300A Kolon IPE400 Kiriş path1 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi	125
Şekil 6.46: HE300A Kolon IPE400 Kiriş path2 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi	125
Şekil 6.47: HE300A Kolon IPE400 Kiriş path1 ve path2 için iki boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi	125
Şekil 6.48: HE300A Kolon IPE400 Kiriş path2 için plastik deformasyonu veren denklem katsayıları	126
Şekil 6.49 : HE300A Kolon IPE400 Kiriş path1 için plastik deformasyonu veren denklem katsayıları	126
Şekil 7.1 : Akma Momentine Etki Eğrisi (Tsavdaridis ve diğ.).....	127
Şekil 7.2 : K _p değişimi.....	128
Şekil 7.3 : Şekil değiştirme enerjisi a) Solid kesit b) ZGE	128
Şekil 7.4 : TBDY 2018'e göre kaynaklı birleşim detayı.....	
Şekil 7.5 : Farklı tipteki birleşimler için plastik şekil değiştirme	
Şekil 7.1 : Çerçeve uç ve mafsal momentleri.....	156
Şekil 7.2 : BS EN 1993-1-1'e göre T kesitte kesme alanı	157
Şekil 8.3 : TÇY 2016'e göre T kesitte kesme alanı	157
Şekil 7.4 : TBDY 2018'e göre kaynaklı birleşim detayı.....	158
Şekil 7.5 : Süreklilik levhası detayı.....	159
Şekil 7.6 : Kolon gövdesi takviye levhası.....	159

SİMGE LİSTESİ

A	: Enkesit alanı
A_g	: Brüt enkesit alanı
A_e	: Etkili net enkesit alan
A_n	: Net enkesit alan
b	: Yapı uzun kenarı
B_1	: $P-\delta$ etkisini dikkate alan büyütme katsayısı
B_2	: $P-\Delta$ etkisini dikkate alan büyütme katsayısı
b_f	: Profil başlık genişliği
C_a	: Gerekli eksenel kuvvet dayanımının tasarım eksenel kuvvet dayanımına oranı
C_b	: Moment düzeltme katsayısı
C_t	: Ampirik doğal titreşim periyodu hesabında kullanılan katsayı
C_w	: Çarpılma sabiti
d	: Yapı kısa kenarı
D	: Dayanım fazlalığı katsayısı
d_{fi}	: Fiktif yükler altında yer değiştirme değeri
E	: Elastisite modülü
$e(x)$	: Dış merkez uzaklığı
$E_d(H)$	: Yatay deprem etkisi
$E_d(z)$	: Düşey deprem etkisi
E_{QX}	: X yönü deprem etkisi
E_{QY}	: Y yönü deprem etkisi
F_1	: 1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı
F_{cr}	: Kritik burkulma gerilmesi
F_{cre}	: Olası akma gerilmesi ile hesaplanan kritik burkulma gerilmesi
F_e	: Elastik burkulma gerilmesi
F_{fi}	: Deprem doğrultusunda binanın hâkim doğal titreşim periyodunun hesabında i'inci kata etki ettirilen fiktif yük
F_s	: Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı
F_u	: Çelik kopma gerilmesi
F_y	: Çelik akma gerilmesi
G	: Sabit yük
g	: Yerçekimi ivmesi
G	: Yapısal çelik kayma modülü
h	: Yapı yüksekliği
H	: Yapı yüksekliği
H_N	: Yapı yüksekliği
I	: Bina önem katsayısı
$I_{x,y}$	: X ve Y yönleri atalet momentleri
$i_{x,y}$	: X ve Y atalet yarıçapları
J	: Burulma sabiti
K	: Burkulma boyu katsayısı
K_z	: Burulmalı burkulma durumunda burkulma boyu katsayısı
L	: Yapı kısa kenar uzunluğu (m)
L	: Etkili uzunluk
L_b	: Basınç başlığında yanal yer değiştirmenin ve enkesit burulmasının önlendiği noktalar arasındaki eleman uzunluğu (stabilite bağlantısı ile desteklenmeyen eleman uzunluğu)

L_p	: Akma sınır durumu için yanal olarak desteklenmeyen sınır uzunluk
L_r	: Elastik olmayan yanal burulmalı burkulma durumu için sınır uzunluk
M_A	: Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğunun 1/4 noktasındaki eğilme momentinin mutlak değeri
M_B	: Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğunun 1/2 noktasındaki eğilme momentinin mutlak değeri
M_C	: Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğunun 3/4 noktasındaki eğilme momentinin mutlak değeri
M_{cx}, M_{cy}	: Mevcut eğilme momenti dayanımı
M_{dy}, M_{dx}	: Tasarım eğilme momenti dayanımı
m_i	: i'inci katın toplam kütlesi
M_{maks}	: Yanal stabilite elemanları arasındaki kiriş uzunluğu boyunca en büyük eğilme momentinin mutlak değeri
M_n	: Karakteristik eğilme momenti dayanımı
M_{ny}, M_{nx}	: Karakteristik eğilme momenti dayanımı
M_p	: Plastik eğilme momenti
η_{bi}	: i'inci katta tanımlanan burulma düzensizlik katsayısı
N_G	: Sabit fiktif yükler
N_i	: Sabit ve hareketli fiktif yükleri
N_S	: Kar(hareketli) fiktif yükler
P_c	: Beklenen kritik basınç dayanım kuvveti
P_d	: Tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı
P_{Emh}	: Mekanizma durumunda hesaplanan artırılmış eksenel kuvvet
P_n	: Karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı
P_r	: Eksenel basınç kuvveti
P_{uc}	: Arttırılmış deprem etkileri göz önüne alınarak, (YDKT) yük birleşimleri için hesaplanan gerekli eksenel basınç kuvveti
Q	: Hareketli yük
R	: Sistem davranış katsayısı
R_a	: Deprem yükü azaltma katsayısı
R_y	: Akma dayanımı azaltma katsayısı
R_y	: Akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı
s	: Çatı kar yükü
s_1	: 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
S_{ae}	: Elastik spektral ivme katsayısı
S_{aR}	: Azaltılmış tasarım spektral ivme
S_{D1}	: 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı
S_{Ds}	: Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
s_k	: Karakteristik zemin kar yükü değeri
s_s	: Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı
t	: Et kalınlığı
t_d	: Tasarım et kalınlığı
T_A, T_B	: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu (s)
T_d	: Tasarım eksenel çekme kuvveti dayanımı
t_f	: Profil başlık et kalınlığı
T_n	: Karakteristik eksenel çekme kuvveti dayanımı
$T_{p(X)}$	: X yönü 1. doğal titreşim periyodu
$T_{p(Y)}$	: Y yönü 1. doğal titreşim periyodu
T_r	: Eksenel çekme kuvveti
t_w	: Profil gövde et kalınlığı

T_x	: X yönü birinci doğal titreşim periyodu
T_y	: Y yönü birinci doğal titreşim periyodu
V_b	: Esas rüzgâr hızı
$V_{b,0}$	: Rüzgâr temel değeri
$v_m(z)$	: Ortalama rüzgar hızı
V_{tE}	: Toplam yatay eşdeğer deprem yükü
$w(z)$	: Yüzeylere etkiyen net rüzgar basıncı
W_{ex}, W_{ey}	: Elastik mukavemet momenti
w_i	: Toplam düşey yük katılımı
$W_{px,py}$	: Plastik mukavemet momenti
Y_G	: Toplam sabit yük
Y_i	: Toplam düşey yük
Y_s	: Toplam hareketli yük
Z_D	: Orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakları
z_{maks}	: En büyük yükseklik
z_{min}	: En küçük yükseklik
z_0	: Engebelilik uzunluğu
δ	: Yer değiştirme
θ_y	: Akma durumu için yer değiştirmiş eksen dönmesi
κ	: İzin verilen görelî kat ötelemelerinin tanımında betonarme ve çelik taşıyıcı sistemler için farklı olarak kullanılan katsayı
λ	: Görelî kat ötelemelerinin sınırlandırılmasında kullanılan ampirik katsayı
λ	: Narinlik
λ_{hd}	: Süneklik düzeyi yüksek elemanlar için enkesit koşulu sınır değeri
Δ	: Yer değiştirme
$\Delta_{i(x)max}$	: X yönü maksimum azaltılmış görelî kat ötelemesi
$\Delta_{i(x)ort}$	: X yönü ortalama azaltılmış görelî kat ötelemesi
$\Delta_{i(y)max}$	: Y yönü maksimum yer değiştirme değeri
$\Delta_{i(y)ort}$	: Y yönü ortalama yer değiştirme değerleri

Enstitüsü	: Lisansüstü Eğitim
Anabilim Dalı	: İnşaat Mühendisliği
Programı	: Yapı
Tez Danışmanı	: Dr. Öğr. Üyesi Erdal Coşkun
Tez Türü ve Tarihi	: Doktora – Temmuz 2021

ÖZET

ZAYIFLATILMIŞ KİRİŞ VE GÖVDE ENKESİTLİ ÇELİK ÇERÇEVE SİSTEMLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞLARININ DEPREM PERFORMANSINA ETKİSİ

Bülent Koparan

Yapılarda deprem gibi tekrarlı yükler altında sünek davranışın sağlanabilmesi için yapıda oluşacak plastik deformasyonların öncelikle sünek davranan elemanlarda oluşması yani eleman sünekliliği istenir. Eğilme etkisindeki elemanların davranışı, sadece eksenel kuvvet veya eksenel kuvvet ile eğilme etkisindeki elemanların davranışına göre daha sünektir. Büyük depremlerde kolonda ve birleşim bölgesinde oluşabilecek ve kolon mekanizmasına yol açabilecek mafsallaşmaların kirişlerde oluşmasını sağlayan bir düzeneğin oluşturulması sistem sünekliliği açısından istenen davranış modelidir. Çeşitli ülke yönetmeliklerinde bu mekanizmayı sağlayan birleşim düzenlemeleri önerilmektedir. Yönetmeliklerde yer almayan birleşim tipleri için ise, süneklik düzeylerine bağlı olarak sağlaması gereken koşullar verilmiştir.

Tez çalışmasında zayıflatılmış kiriş ve gövde enkesitli çelik çerçeve sistemlerin davranışı incelenmiş ve öneriler sunulmuştur. Zayıflatılmış gövde enkesitli birleşimler yönetmeliklerde henüz yer almamaktadır. Bu nedenle birçok araştırmacı tarafından bu konu üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Çalışmanın birinci bölümünde zayıflatılmış enkesitli ve zayıflatılmış gövde enkesitli elemanlar tanımlanmıştır. Çalışmanın birinci bölümünde özellikle Northridge ve Kobe depremleri sonrası araştırmacıların zayıflatılmış kiriş enkesitli birleşimler için geliştirdikleri modellere değinilmiştir. Deprem sonrası araştırmacıların çelik yapılar üzerinde yapmış olduğu incelemeler gelecekte çelik yapıların tasarımına ışık tutmaktadır.

İkinci bölüm çeliğin yapılarda kullanılmaya başlanması ve çelik yapıların gelişim sürecine ayrılmıştır. 1779 yılında İngiltere’de Severn Nehri üzerine 30,63 metre açıklığında, kemer tarzındaki dökme demirden yapılan Coalbrookdale köprüsüyle çeliğin yapılarda kullanılması başlamıştır. Çeliğin çok katlı binada kullanılması yine İngiltere’de olmuştur. Daha sonra özellikle çok katlı binalarda Amerika’da çelik kullanımı artmaya devam etmiştir. Çeliğin kullanımıyla birlikte çeliğin üretim teknolojisi de gelişmiş, mekanik ve fiziksel olarak daha dayanıklı, daha sünek çelik üretimi başlamıştır. Yine malzemenin davranışı bu bölümde

anlatılmıştır. Çevrimsel yükler altında çelik malzemesinin elastik ve plastik özellikleri bu bölümde yer almaktadır.

Moment aktaran çerçeve sistemlerin davranışı üçüncü bölümde yer almaktadır. Bu bölümde bir Amerikan ulusal standardı olan ANSI/AISC 341-16, Çelik Taşıyıcı Sistemli Binalar için Sismik Kurallar (*Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*) yönetmeliğine göre çelik çerçevelerin sınıflandırılması özetlenmiştir. Burada çerçeve türlerinin moment aktaran birleşimleri için sahip olması gereken özelliklerin açıklanması çalışmanın amacı açısından gereklidir. Birleşimin sahip olması gereken en önemli özelliklerinden biri Şekil 3.2 diyagramıyla süneklik düzeyi yüksek moment çerçevelerinde yüksek dönme kapasitesine sahip olması gerektiği gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 3.3’de yapıda depremde istenmeyen ve olması gereken kat mekanizmaları yer almaktadır. Deprem sonrası çelik yapıların birleşiminde görülen hasarların neler olduğu yeni yapılacak çelik yapılarda oluşabilecek depremlerin sonrasında benzer hasarların oluşmasını önlemek için önemlidir. Şekil 3.6 moment aktaran çerçevelerin birleşim bölgesinde oluşan hasarları göstermektedir.

Çalışmaya daha önce deneyleri yapılmış benzer bir araştırmanın analizleri yapılarak başlanmıştır. Konuyla ilgili birçok araştırmacının analitik çözümlemelerini doğrulamakta kullandığı çalışma kullanılmıştır. Doğrulamakta kullanılan çalışmanın tercih edilmesindeki nedenlerin ilki bu çalışmaya yakın olması, ikincisi ise bu çalışmanın çok sayıda doğrulama için kullanılmış olmasıdır. Dördüncü bölümde doğrulama için yapılmış çalışmanın özellikleri ve sonuçlarının yapılan çalışmanın sonuçlarının karşılaştırılması ve çeşitli öneriler yer almaktadır.

Çalışmanın beşinci bölümünde çerçevelere yer verilmiştir. 4, 8 ve 12 katlı zayıflatılmış kiriş ve gövde enkesitli birleşim modelleriyle solid enkesitli birleşim modellerinin yatay yükler altında analizleri yapılmıştır. Zayıflatılmış gövde enkesitlerde farklı zayıflatma çapı ve kolon yüzü uzaklıkları için birleşim bölgesinde gerilmenin değişimi araştırılmıştır. Sonuçlar ayrıca *Cornerstone* etkileşim yazılımıyla derlenerek gerilme değişimini veren denklemler elde edilmiştir. Elde edilen denklemler yalnızca analizi yapılan çerçevelere ait yükleme durumu malzeme ve kesit özellikleri için bulunmuş değerlerdir. Çerçeve çözümlemeleri ile zayıflatılmış kesitlerin yatay yük taşıma kapasitelerini ve birleşim bölgesinde gerilme dağılımını etkilediği görülmüştür. Kiriş kesitinde zayıflama etkisiyle gerilmelerin delik bölgesinde yoğunlaşarak, kaynak bölgesindeki gerilmeyi azalttığı Şekil 5.8, Şekil 5.12, Şekil 5.17’ den görülmektedir.

Altıncı bölümde 67 farklı çelik birleşimin SAC yükleme protokolüne göre tersinir deplasman yüklemeleri altında hesapları yapılmıştır. Bu analizlerden her birleşimin moment eğrilik diyagramları ile kolon kiriş birleşim bölgesi kiriş üst başlığında ve kiriş üst başlık eksen boyunca gerilme değişimleri çıkarılmıştır. Yine analiz sonuçları *Cornerstone* yazılımından derlenerek parametrik olarak plastik şekil değiştirmeyi veren denklem elde edilmiştir. Burada elde edilen plastik şekil değiştirmeyi veren denklemler genel olmayıp elde edildiği malzemenin ve kesitlerin özelliklerine ait değerlerdir.

Tüm bu çalışmaların sonuçlarında zayıflatılmış kiriş gövde enkesitli birleşimlerin tasarımının düzenlenmesine yönelik önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Süneklik, sonlu elemanlar, zayıflatılmış kesit, eşdeğer gerilme, plastik deformasyon

Bilim dalı sayısal kodu:



Institute : Graduate Education Institute
Department : Civil Engineering
Programme : Construction
Supervisor : Dr. Öğr. Üyesi Erdal Coşkun
Degree Awarded And Date : PhD – July 2021

ABSTRACT

THE EFFECT OF NONLINEAR BEHAVIOUR OF REDUCED BEAM AND REDUCED WEB SECTIONS FRAME SYSTEMS ON EARTHQUAKE PERFORMANCE

Bülent Koparan

In order to provide ductile behavior under repeated loads such as earthquake loads, plastic deformations that will occur in the structure are required to occur primarily in ductile elements. The behavior of the members under the influence of bending is more ductile than the behavior of the members under the influence of axial force or axial force. Increasing axial force in structural elements causes ductility loss. Establishing a mechanism that removes excessive deformations in the column and junction area in severe earthquakes and ensures that these deformations occur in beams under the effect of bending is the desired behavior model in terms of building safety. There are combination types that provide this mechanism in the regulations. For the joint types not included in the regulation, the conditions that must be met depending on the ductility levels are given.

In this thesis, the behavior of weakened beam and body cross-section steel frame systems has been investigated. Weakened body cross-section connections have not yet been included in the regulations. Therefore, many researchers are still working on this subject. The thesis aim is to contribute to the behavior of weakened beam-body cross-section connections.

In the first stage of the study, the behavior of steel structures was emphasized. Post-earthquake researchers' investigations on steel structures shed light on the design of steel structures in the future. In the first part of the study, especially after the Northridge and Kobe earthquakes, the models developed by the researchers for weakened beam cross-section connections are mentioned.

The second chapter is devoted to the use of steel in structures and the development process of steel structures. In 1779, the use of steel in structures began with the Coalbrookdale Bridge, which was made of arch-style cast iron over the Severn River with a span of 30.63 meters. The use of steel in multi-storey buildings was also in England. Later, the use of steel continued to increase in the United States, especially in multi-storey buildings. With the use of steel, the production technology of steel has also improved, and the production of mechanically and physically more

durable, more ductile steel has begun. Again, the behavior of the material is explained in this section. Elastic and plastic properties of steel material under cyclic loads are included in this section.

The behavior of moment-transmitting frame systems is given in the third chapter. In this section, the classification of steel frames according to ANSI/AISC 341-16, an American national standard, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings regulation is explained. Here, the properties that frame types must have for moment-transmitting combinations are important for the purpose of the study. One of the most important properties that the joint should have is shown in Figure 3.2 that it should have high rotational capacity in moment frames with high ductility level. In addition, in Figure 3.3, there are undesirable and necessary floor mechanisms in the building in an earthquake. What are the damages seen in the combination of the steel structures after the earthquake is important in order to prevent the occurrence of similar damages after the earthquakes that may occur in the new steel structures. Figure 3.6 shows the damages in the junction area of the moment transmitting frames.

The study was started by analyzing similar research that had been tested before. The study used by many researchers on the subject to validate their analytical analysis was used. The reasons for choosing the study used for validation were first because it was close to this study and secondly because this study was used for multiple validations. In the fourth chapter, the characteristics of the study conducted for validation and the comparison of the results of the study and various suggestions are included.

Frames are included in the fifth part of the study. Analysis of 4, 8, and 12-storey weakened beam and body cross-section connection models and solid cross-section connection models under lateral loads were performed. The variation of stress at the junction was investigated for different weakening diameters and column face distances in attenuated body cross-sections. The results were also compiled with the *Cornerstone* interaction program and the equations giving the stress variation were obtained. The equations obtained here are only the values obtained for the loading state material and section properties of the frames analyzed here. Frame analyzes have shown that weakened sections affect the lateral load carrying capacity and stress distribution in the joint area. It can be seen from Figure 5.8, Figure 5.12, Figure 5.17 that the stresses in the beam section are concentrated in the hole region due to the weakening effect and reduce the stress in the weld region.

In the sixth section, 67 different combinations were analyzed under reversible displacement loading according to the SAC loading protocol. From these analyses, moment curvature diagrams of each joint and stress changes in the column-beam junction area at the beam cap and along the beam cap axis were deduced. Again, the results of the analysis were compiled in the *Cornerstone* program and the equation giving the plastic deformation parametrically was obtained. The equations giving the plastic deformation obtained here are not general, but are the values belonging to the properties of the material and sections from which it is obtained.

At the end of all these studies, suggestions were made on how to design weakened beam-body cross-section connections.

Keywords: Ductility, finite element, equivalent stress, reduced section, plastic deformation

Science numeric code:



1. GİRİŞ

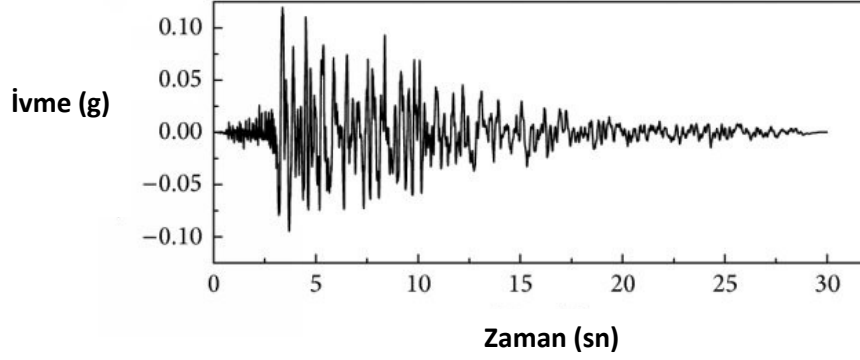
1.1. Depremlerin Çelik Yapılara Olan Etkileri

Türkiye’de ve yerkürenin farklı bölgelerinde meydana gelen yıkıcı depremler, her yıl büyük ölçüde can ve mal kayıplarına, yaralanmalara ve ağır ekonomik sonuçlara yol açmaktadır.

Öte yandan çelik, yapıya kazandıracağı yüksek dayanım ve mimariye sağlayabileceği avantajlar açısından inşaat sektöründe giderek önem kazanmaktadır. Çelik, deprem enerjisini kalıcı deformasyonlarla tüketebilmesi özelliği olarak bilinen süneklik özelliği sayesinde deprem bölgelerinde yapılacak yapılar arasında sıklıkla tercih edilmektedir.

Bununla beraber yakın geçmişte ortaya çıkan depremler, Moment Dayanımlı Çelik Çerçevelerdeki (MDC) birtakım güvenlik açıklıklarını gözler önüne sermiştir. Çelik yapılara etkili iki büyük sismik gelişme, 17 Ocak 1994, Northridge, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve 17 Ocak 1995, Kobe, Japonya depremlerinde çelik yapıların hasar gördüğü, özellikle kaynaklı kiriş-kolon birleşim bölgelerinde gevrek kırılmaların olduğu gözlemlenmiştir. Northridge depreminde 30 milyar Amerikan Doları civarında, Kobe depreminde ise 100 milyar Amerikan Doları civarında maddi hasar oluşmuştur (Smolka ve Rauch, 1996).

17 Ocak 1994 tarihinde, ABD’nin Los Angeles şehir merkezine 32 km uzakta, San Fernando vadisindeki Northridge’de meydana gelen depremin aletsel büyüklüğü 6.7 M_w , şiddeti ise Mercalli ölçeğine göre IX olarak saptanmıştır (Şekil 1.1). Depremin yatayda en büyük kuvvetli yer ivmesi değeri 1,82g (17,9 m/sn²) olarak ölçülmüştür. ABD Ulusal Jeofizik Veri Merkezi depremin hiposantrının coğrafi koordinatlarını 34°12’47’’K 118°32’13’’B ve derinliğini de 17 km olarak hesaplamıştır. Depreme neden olan fay, Pico bindirme fayı olarak da adlandırılan Northridge bindirme fayıdır (Smolka ve Rauch, 1996).



Şekil 1.1: 17 Ocak 1994 Northridge Depremi ivme kaydı

Çelik yapılarda mimari sebepler ve yangın güvenliği açısından taşıyıcı elemanların alçı esaslı veya benzeri malzemelerle kaplanmış olması nedeniyle taşıyıcı elemanlarda olan hasarlar hemen fark edilmemiştir. Depremi takip eden günlerde yapılan ayrıntılı incelemelerde, kolon-kiriş birleşimlerinin kaynaklarında ve kaynağa yakın olan bölgelerde birtakım çatlakların oluştuğu belirlenmiştir. Northridge depremi sırasında, hasar düzeyi düşük olarak değerlendirilen çelik yapılar, artçı depremlerde ise ağır hasar görmüşlerdir (Brunesi ve diğ, 2015).

Genellikle kirişlerde herhangi bir plastik deformasyon belirtisi olmadan 150' den fazla yapıda birleşim kaynaklarının yakınlarında gevrek kırılma oluşumları gözlemlenmiştir.

Yapılan tespitler sonucunda çelik yapılarda hasar nedenleri genel olarak üç grupta toplanmaktadır:

- Ölçüm dışı işçilik ve yetersiz denetim.
- Kolon-kiriş birleşimlerinde, altbaşlık küt kaynağının oluşturulması sırasında kiriş gövdesi buna engel oluşturmakta olup, alt başlık küt kaynağında üretim kusuru olma olasılığını yükseltmektedir.
- Kiriş başlığının küt kaynakla kolon başlığına birleştirilmesi aşamasında kullanılan karşılama parçaları, Northridge depreminden önce kaynağın bitirilmesinden sonra yerinde bırakılmaktaydı. Burada, karşılama levhası kenarı ile kolon başlığı arasında kalan küçük kaynak yapılmamış bölge, bir süreksizlik ve çatlak odağı şeklinde ifade edilebilir.

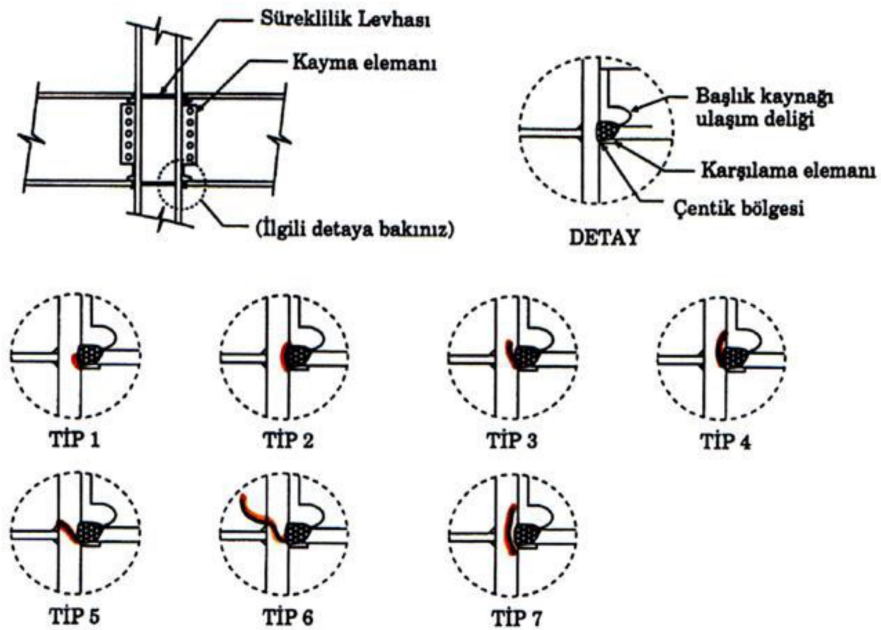
Sünek davranış gösterebilen sistemler olduğu düşünülün, kaynaklı ve bulonlu birleşim türleri 1960'lar ile 1990'ların arasında yaygın olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, Northridge, ABD depreminden sonra teknik açıdan sorgulanmaya başlanmıştır.

Bu süreksizlik, tekrarlı yükler etkisi altında o bölgede gerilme yığılmasını yükselterek yeni çatlakların meydana gelmesine sebep olabilmektedir. Şekil 1.2'de Northridge depremi öncesinde kullanılan tipik birleşim detayları ve depremde oluşan çatlak formları gösterilmektedir.

Bu birleşim noktası detayı depremden sonra yayınlanan bir raporla, yönetmeliklerden acilen çıkarılmıştır (Gross, 1998).

ABD'de bu tür çelik birleşimlerde oluşan hasarların nedenlerini ve çözüm olanaklarını araştıran için başlatılan çalışmalar halen sürmektedir. Yapılan araştırmaların oldukça ayrıntılı bir derlemesi (Bayülke, 1996 ve 2003) çalışmalarından incelenebilir.

Özetlemek gerekirse, kaynakların fiziksel yapıları nedeni ile tekrarlı yükler altında sünek davranmayacakları sonucu önemli bir bulgudur. Şekil 1.3'de Northridge depreminde çelik yapı birleşimlerinde görülen hasar türleri gösterilmiştir (Bruneau ve diğ, 2011).

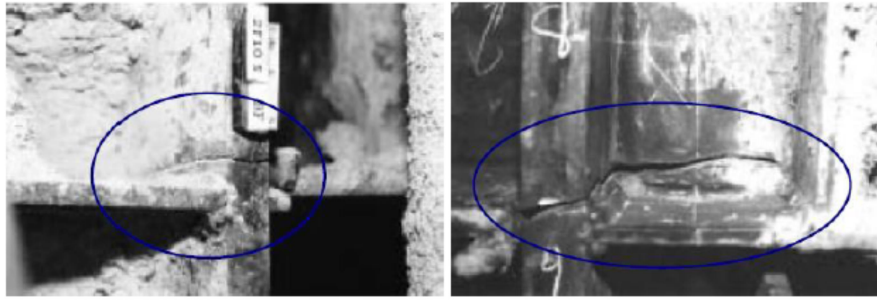


Şekil 1.2: Northridge depremi öncesinde kullanılan birleşim detayları ve çatlak oluşumları



(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 1.3: (a) Kaynaklarda kırılma (b) Kiriş başlığının, kolon başlığından uzaklaşması (c) Kolon başlığına doğru ilerleyen kırılma (d) Yırtılmanın kolonun gövdesinde yayılması (Bruneau ve diğ, 2011)

Kobe depremi sonrasında çelik yapılarda saptanan kiriş-kolon hasarları, çatlama ve kırılmaların yoğunlukla kirişlerde ve plastik mafsallarla birlikte olduğu şeklindedir. Ancak Kobe depremi hasarları Northridge depremi hasarlarından biraz daha farklı gelişmiştir.

Plastikleşme, daha çok kare şeklindeki, kutu kesitli kolonlara sahip moment çerçevelerinin kirişlerinin kaynaklarında gözlemlenmiştir. Bu vakaların çoğunda kolonlarda plastikleşme izine rastlanmamıştır.

Hasarların çoğu, kirişlerin alt başlıklarında meydana gelmiş olup kirişler, başlıkların yerel burkulmasının eşlik ettiği plastik mafsallaşma görüntüsü sergilemişlerdir (Şekil 1.4).

Tipik olarak kırılmalar, bir kaynak erişim deliğinin köşesinden veya kiriş başlığının veya diyaframındaki ısıdan etkilenen bölgelerden başlamaktadır. Şekil 1.4b’de alt

başlıkta oluşan kırılma verilmiştir. Şekil 1.4c’de diyaframın ısıdan etkilenen bölgesinde başlayan kırılma gösterilmiştir.

Çoğu durumda, hasar kirişin gövdesine doğru ilerleyip (Şekil 1.4b) ve bazı durumlarda kolon başlıklarına doğru yayılmaktadır (Şekil 1.4d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 1.4 : Kobe, Japonya depremi nedeniyle: (a) Kiriş alt başlıklarında kırılma; (b) Kirişte kırılmanın gövdeye yayılması; (c) Diyaframın ısıdan etkilenen bölgesinde başlayan kırılma, (d) Kolonda kırılmanın yayılması (Bruneau ve diğ, 2011)

Yıkıcı boyutlardaki Northridge ve Kobe depremleri, mühendislere ve konunun araştırmacılarına, çelik yapıların depremlerde daha güvenli olduğu düşüncesinin gerçekçi olmadığını göstermiştir. Çelik yapıların deprem performansını iyileştirmek için yapısal sistemde, özellikle düğüm noktalarında anlamlı çözümler geliştirmek gerekliliği de ortaya çıkmış ve bu yönde uzun yıllardan bu yana süregelen çok sayıda araştırma yapılmıştır.

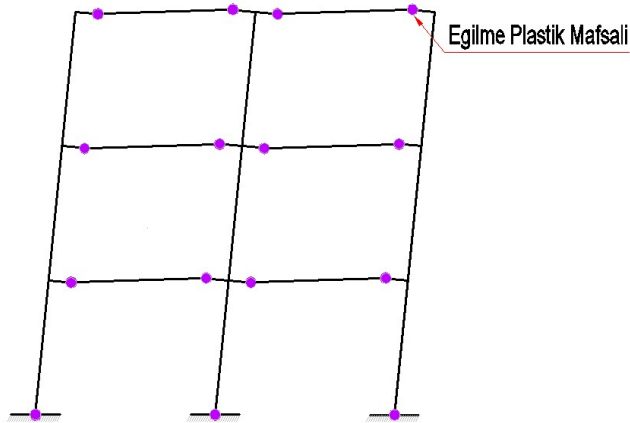
1.2. Zayıflatılmış Kiriş ve Gövde Enkesitleri

elik yapılarda, uygun düzenlenmiş kiriş-kolon birleşimlerinin kesit özellikleri, birleşimin plastik dönme kapasitesini etkileyen en önemli unsurların başında gelmektedir. elik kiriş-kolon birleşim noktalarında gevrek kırılmaların oluşmaması, bunun yerine, bu noktaların sistemin sünekliğine uygun bir davranış göstermesi istenmektedir.

Northridge sonrası MD birleşimleriyle ilişkili sorunları aşabilmek adına genel anlamda iki temel yaklaşım:

- 1) Birleşimlerin yük taşıma kapasitelerinin arttırılması
 - 2) Birleşimde bulunan kiriş kapasitelerinin azaltılması
- şeklinde oluşmuştur.

Bu yaklaşımlardaki amaç, üç eksenli gerilme koşullarına maruz kalan kaynakların potansiyel kırılganlığıyla ilgili daha önce bahsedilen problemlerden kaçınmak için plastik mafsalı kolonun yüzeyinden uzaklaştırmak, ereve sistemde kolon mekanizması yerine kiriş mekanizması oluşmasını sağlamaktır. şekil 1.5’de bir moment çerçevesinde ideal kiriş mekanizması hali gösterilmiştir.



şekil 1.5 : İdeal kiriş mekanizması

Bu çalışmanın da odaklandığı ikinci durumda, kiriş-kolon birleşiminden belirli bir uzaklıkta kiriş enkesiti isteyerek azaltılabilir ve böylece kirişin birleşimden uzakta ve kesit boyutları azaltılmış bölümünde plastik mafsallaşmanın oluşması sağlanabilir.

Soruna birleşimde bulunan kiriş kapasitelerinin azaltılması yaklaşımıyla bakan araştırmacılar tarafından ‘‘Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti’’ (ZKE) kavramı veya ‘‘köpek

kemiği” (Dog bone) şeklinde ifade edilen birleşim türleri geliştirilmiş ve konuyla ilgili ayrıntılı araştırmalar sürdürülmüştür (Engelhardt ve diğ, 1996).

ZKE’li birleşimlerde, kolon yüzünden uygun bir mesafede, kirişin üst ve alt başlık genişlikleri kesimle azaltılarak plastik şekil değiştirmelerin zayıflatılmış bölgede yoğunlaştırılması ve yapının göçme durumunun kontrol altına alınabilmesi amaçlanmaktadır. Bu işlem, yapının bir çeşit göçme sigortası da olmaktadır (Şekil 1.6).



Şekil 1.6: Tipik ZKE’li birleşim detayı

ZKE’lerin, Avrupa, Luxemburg kökenli, ABD’li çelik üreticisi *ArcelorMittal International*^R tarafından geliştirilerek patenti alınmıştır. 1994, Northridge depreminden sonra bu şirket, tüm kullanım haklarından vazgeçerek bu birleşim türünün geniş çapta kullanılması ve araştırılması için katkı vermektedir.

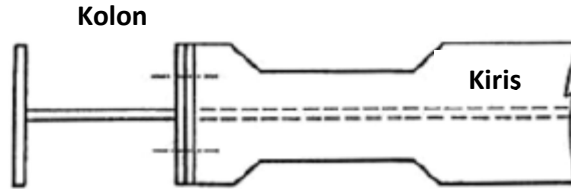
Kirişlerin kapasitelerinin azaltılmasında bir diğer yaklaşım da, kiriş gövdesinde çeşitli geometrik formlarda boşluklar oluşturularak plastik deformasyonların kolon yüzünden uzaklaştırılması yani Zayıflatılmış Gövde Enkesitleri (ZGE) oluşturulmasıdır.

1.3. Zayıflatılmış Kiriş ve Gövde Enkesitleri İle İlgili Önceki Çalışmalar

Yıkıcı Northridge ve Kobe depremlerinden alınan derslerden görülmüştür ki, birleşim noktalarının dayanımını artıracak şekilde düzenlenmesi çelik yapıların büyük depremler karşısında performanslarını iyileştirmektedir.

Çalışmaların önemli bir kısmı, birleşimlerin dayanımını artırmaya ve gerilme yığılmalarını azaltmaya yoğunlaşmışken, diğerleri mafsallaşma bölgesini kiriş-kolon birleşiminden uzaklaştırmaya yöneliktir.

Şekil 1.7’de gösterildiği gibi Northridge depremi öncesi de kiriş elemanlarda düz kesimli azaltılmış kesit önerisi getirilmiştir (Plumier, 1990).



Şekil 1.7: Düz kesimli kiriş-kolon ZKE’li bağlantısı (Plumier, 1996).

ARBED-EU projesi kapsamında, HEB 300 kolonları ve HEA 260 kirişleri kullanılarak gerçekleştirilen düz kesimli ZKE’li kiriş-kolon birleşimleri üzerinde yapılan deneyler, kiriş kesitindeki zayıflatma şeklini aşağıda verilen unsurları göz önüne alarak tanımlamaktadır:

- (a) Plastik mafsallın uzunluğu, kiriş yüksekliği,
- (b) İki tür gerilme yığılmasının varlığı (kesim kaynağından ötürü yerel olanlar ve zayıflatma bölümünün şeklinden kaynaklanan genel olanlar),
- (c) Yerel gerilme yığılmaları, kirişin geneline yayılmış gerilme yığılmalarından daha çoktur (Plumier, 1990).

Steel TIPS bir sayısında, o zamana değin gerçekleştirilen düz kesim, konik kesim ve yarım daire kesim ZKE’li moment çerçevesi birleşimlerinin deney sonuçlarının kapsamlı bir değerlendirmesini yapmıştır (Moore ve diğ, 1999).

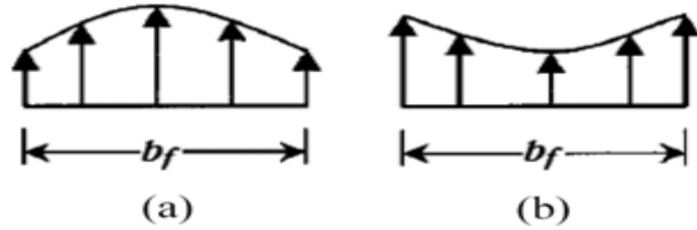
Lee ve Foutch (2001), belirli bir performans hedefine ulaşmak amacıyla bir moment çerçevesinde güvenlik düzeyini belirleyen yeni bir yöntem önermişlerdir.

Araştırmacılar, ZKE ile 3, 9 ve 20 katlı yapılar tasarlamışlar ve düşey yüklerin katkılarını da hesaba katan analitik modeller geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada yapıların statik itme analizleri (*pushover*) yapılmıştır. Yatay yer değiştirme kapasiteleri ve talepleri artımlı dinamik analiz kullanılarak

- e) Kiriş başlık genişliği, süreklilik plakasının genişliğinin % 70'inden daha azsa, plakanın köşesi kesilmelidir,
- f) Kirişteki kesme kuvvetinin büyük bir kısmı kiriş gövdesi tarafından alınmaktadır (Gilton ve Uang, 2002).

Şekil 1.9'da kiriş başlığında meydana gelen gerilme dağılımı verilmiştir.



Şekil 1.9: Kiriş başlığında gerilme dağılımı a) Güçlü eksen b) Zayıf eksen, (Gilton ve diğ. 2002)

Shanmugan ve diğ. (2002), ZGE'li birleşimli kirişlerin doğrusal olmayan davranışını ve nihai kapasitesini araştırmak için dairesel ve dikdörtgen gövde boşlukları içeren kirişlerin sonlu eleman modellemesini yapmışlardır.

Jones ve diğ. (2002), ZKE'lerin, panel bölgesi, kirişin ve kolonun elastik bölgelerini, göreceli yatay öteleme katkılarını izole eden bir ZKE'nin yük-yer değiştirme ilişkisini hesap edebilen yapısal bir model geliştirilmiştir.

Model, sonlu elemanlar yönetimi ile, analitik ve tam ölçekli örnekler kullanılarak deneysel olarak doğrulanmıştır. Daha sonra Güney Kaliforniya'daki 13 katlı bir binanın doğrusal olmayan dinamik analizinde kullanılmıştır. Araştırmacılar, bu modelin simetrik bir ZKE'li moment çerçevesinin performansa dayalı tasarımında kullanılabileceğini önermişlerdir.

Liu ve Chung (2003), yaptıkları çalışmalarda çeşitli şekil ve boyutlarda gövde boşluklarına sahip olan yani ZGE'li çelik kirişlerin, farklı düzeylerde moment ve kesme kuvvetlerinin etkisi altında birbirlerine yakın davranış gösterdiklerini saptamışlardır. Öte yandan, farklı şekil ve boyutlarda gövde boşluklarına sahip çelik kirişlerin kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin de birbirine oldukça yakın değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

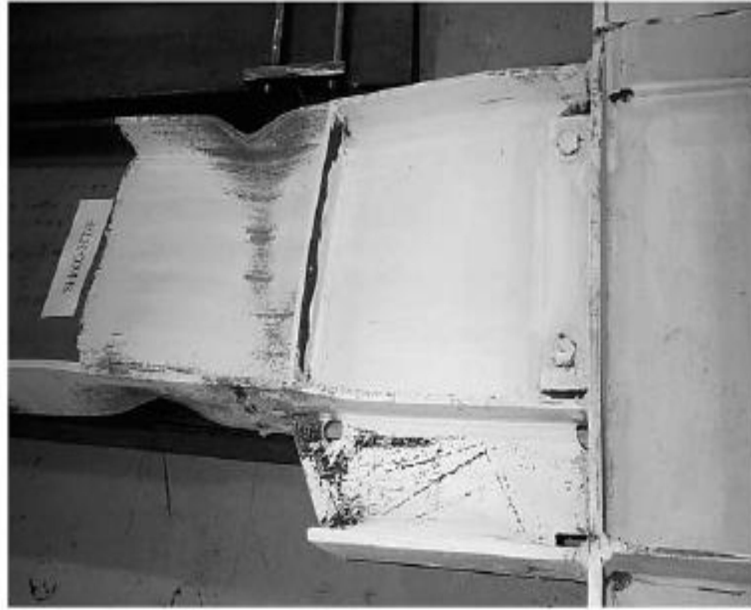
Kirişlerde yaygın olarak gözlenen göçme modları, kirişlerin yükleme ve mesnetlenme koşullarına ve ayrıca kiriş açıklığı boyunca gövde boşluklarının

konumuna bağı olarak kesme göçmesi, eğilme göçmesi veya Vierendeel mekanizması şeklinde meydana gelebilir. ZGK'de oluşan Vierendeel mekanizmasının yerel deformasyonlardan dolayı yüksek miktarda enerjiyi sönümllediği ve böylece kaynaklarda oluşabilecek gevrek kırılmanın önlenilebileceği anlaşılmıştır.

Lepage ve diğ. (2004), çalışmalarında ZGE'li kirişler kullanmış ve kirişlerin zayıflatılmış bölgeleri, rijit yaylar ile modellemişlerdir.

Lee ve diğ. (2005), tarafından düz ve üçgen guselerle güçlendirilmiş birleşimler üzerinde çevrimsel yüklemenin etkisini araştırmak için deneyler yapılmıştır.

Kaynaklı guseler ile iyileştirilmiş moment birleşimlerinin daha yüksek çevrimsel yükler altında iyi performans gösterdiği görülmüştür. Şekil 1.10'de deneyi yapılan düz guseli deney elemanı gösterilmektedir.



Şekil 1.10: Düz guseli deney elemanında plastik mafsal oluşumu (Lee ve diğ. 2005)

Jin ve El-Tawil (2005), Los Angeles bölgesinde yer alan 4, 8 ve 16 katlı ZKE'li moment çerçevelerinin doğrusal olmayan itme (*Pushover*) çözümlemelerini yapmışlardır. Her bina için hemen kullanım ve göçmenin önlenmesi düzeyleri için 20 adet ölçeklendirilmiş deprem kaydı kullanılmıştır.

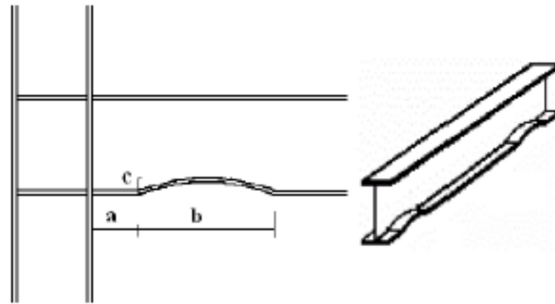
Bu çalışma, ZGE'li moment çerçevelerinin deprem riski yüksek olan bölgelerde iyi performans gösterebileceklerini doğrulanmıştır.

Oh ve diğ. (2007), ZKE'li moment çerçevelerinde betonarme döşemenin yapının deprem performansı üzerinde etkisini incelemek ve kirişi berkitme levhaları ile takviye ederek dayanımını arttırmak amacıyla analitik çalışmalar yapmışlardır.

Çalışmalarının sonuçlarında, ZKE'li moment çerçevelerinin kiriş-kolon birleşimlerinin kompozit döşeme ile birlikte çalışmasında olumlu yönde performans gösterdiği değerlendirilmiştir. Moment taşıyan çelik kiriş-kolon birleşiminde, döşeme etkisi nedeniyle kiriş alt başlığında çekme kuvvetleri oluşmuş ve göçmüştür. Çalışmanın sonucunda, kirişin alt başlık güçlendirmesinin, güçlendirilmeyen kirişe göre iki kat daha çok plastik deformasyon kapasitesi ortaya çıkardığı saptanmıştır.

Lee ve Chung (2007), çalışmalarında ZKE'lerde başlık bölümünün zayıflatılmasının çerçeve rijitliğinde de düşüğe neden olduğunu ve bu durumun çerçeve ötelemelerinde en az % 4'lük artışa yol açtığını saptamışlardır.

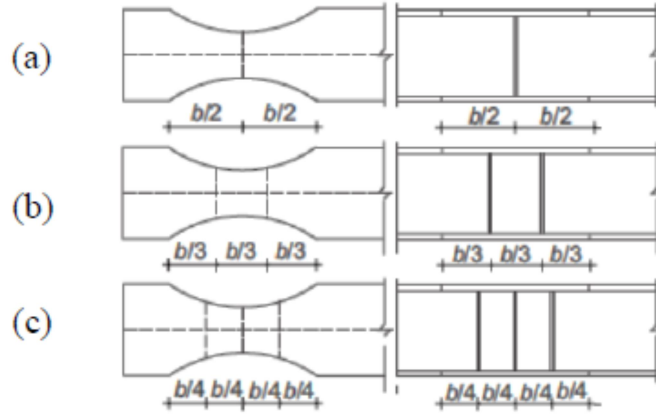
Ashrafi ve diğ. (2009), yaptıkları çalışmalarda, gövdede yapılan zayıflatmanın başlıkta yapılan zayıflatmaya kıyasla kirişe oldukça fazla plastik deformasyon kapasitesi kazandırdığı sonucuna varmışlardır. Araştırmacıların yaptıkları bir diğer değerlendirme ise, yapının diğer katlarında ZKE uygulanmasına gerek duyulmadığı yönündedir. Bu çalışmada kiriş gövde enkesitinde yapılan zayıflatma Şekil 1.11'de verilmiştir.



Şekil 1.11: Kiriş gövde enkesitinde yapılan zayıflatma (Ashrafi ve diğ, 2009)

Li ve Morisako (2009), ZKE bölgesinde akma önce yerel burkulma ile oluşabilecek göçmenin önüne geçebilmek amacıyla, kirişlerde berkitme levhaları kullanma yoluna gitmiş ve tekrarlı yüklemeler altındaki birleşimlerin yerel burkulma ve yerel burkulma sonrası davranışlarını gözlemlemiştir.

Yukarıda konu edilen çalışmada, berkitme levhalarının kirişin yanal burkulmasına katkısının olmadığına saptanmasına karşın, bu düzenlemenin yerel burkulma oluşumunu önleyerek elemanın yük taşıma kapasitesini arttırdığı değerlendirilmiştir (Şekil 1.12).

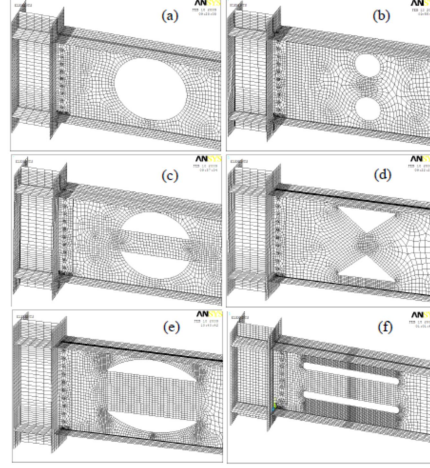


Şekil 1.12: ZKE'li çelik kirişte kullanılan (a) Merkeze yerleştirilmiş berkitme levhası (b) İki berkitme levhası (c) Üç berkitme levhası (Li ve Morisako, 2009)

Hedayat ve Çelikağ (2009), farklı geometride gövde boşlukları geliştirerek ve bunların kapsamlı modellerini oluşturarak sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerini yapmışlardır. Çalışmadaki amaç, kiriş gövdesinde birbirine paralel iki yatay doğrultuda boşluklar oluşturularak plastik deformasyonların kolon yüzünden uzaklaştırılmasıdır (Şekil 1.13).

Sonlu elemanlar yöntemi sonuçları, oluşturulan büyük boşlukların, yeterli sünekliği sağlamak ve gerekli %4 toplam dönmeyi elde ederek kaynaklı kiriş-kolon birleşimindeki gerilmeyi azalttığını göstermiştir.

Birleşimdeki gerilmenin azalmasına karşın, boşluklardaki erken göçme bu tip düzenlemenin olumsuz yanlarından biridir.

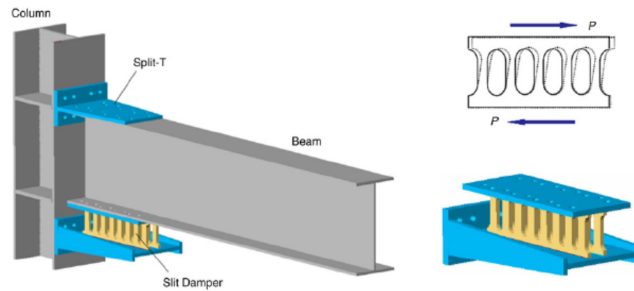


Şekil 1.13: Gövde boşluklarında çeşitli düzenlemeler (Hedayet ve diğ., 2009)

Kazemi ve Hoseinzadeh (2011), tarafından gerçekleştirilen çalışmaların sonuçlarında, ZGE birleşimli çerçevelerinde, ZKE'li çerçevelerin sağlayabildiği düzeyde performans artışı sağlayabilmiş olduğu vurgusu yapılmaktadır.

Hedayet ve diğ. (2011), kirişin sünekliğini artırmak ve birleşimi güçlendirmek için kiriş-kolon birleşimine yakın, 8 farklı özgün tipte küçük yarık sönümleyici tasarlayıp, test etmiştir. Şekil 1.14'de, sırasıyla sonlu eleman modelini ve yarıklı sönümleyici konumlarını göstermektedir.

Sonlu elemanlar yönteminin analitik sonuçları, yarıklı sönümleyicilerin yerel gerilmeyi azaltacağını ve kaynaklı kolon-kiriş birleşiminin dayanımını artırarak, bazı deney numunelerinin sünekliğini % 4,46 toplam dönmeye kadar ulaşmasına neden olacağını ortaya koymuştur.

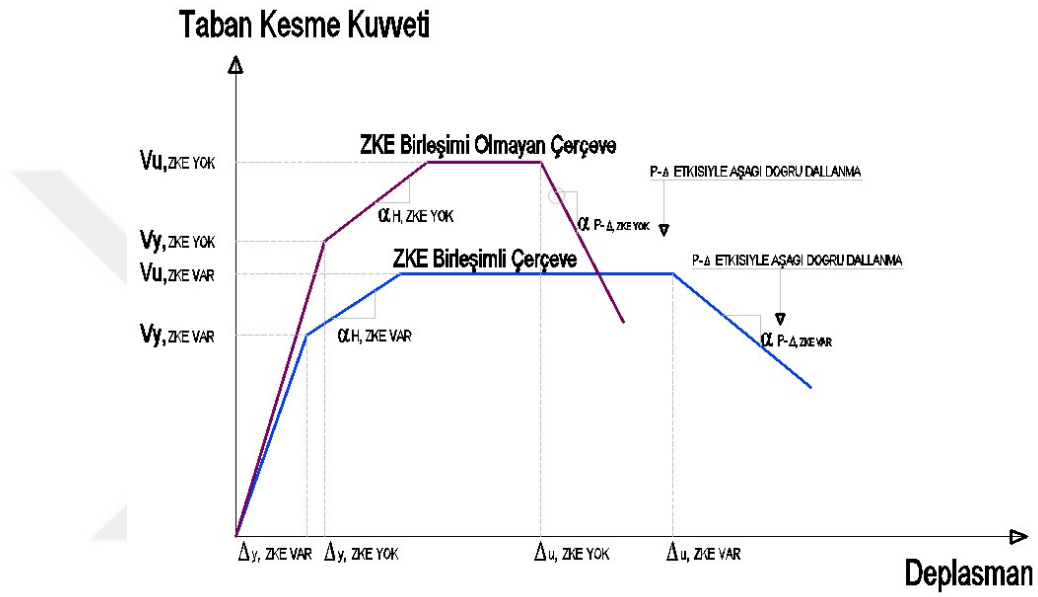


Şekil 1.14: Yarık sönümleyici kiriş-kolon birleşim önerisi (Hedayet ve diğ. 2011)

Güçlendirilmiş, takviye edilmiş birleşimler doğal olarak yapım maliyetlerini de yükseltir. Ayrıca artan kaynak ve bulonlama işlemlerinin yanı sıra artan birleşim dayanımı ve dolayısıyla gerilme yığılmasına neden olan daha güçlü panel bölgesi

oluşumu gibi yeni sorunlara yol açabileceği gibi yapının ağırlığını ve dolayısıyla deprem kuvvetlerini de artırır.

Kildashti ve diğ. (2012), 18 katlı ZKE’li moment aktaran çelik çerçeve sistemini inceleyerek sistemin süneklik kapasitesini ve dayanımı azaltan etkilerden kaçınmayı hedeflemişlerdir. Şekil 1.15’de gösterildiği gibi bu çalışmanın elde ettiği sonuçlar, ZKE’li sistemlerin dayanımının bir miktar azalmasına karşın, süneklik düzeyi öngörüldüğü üzere yükseldiği doğrultusundadır.

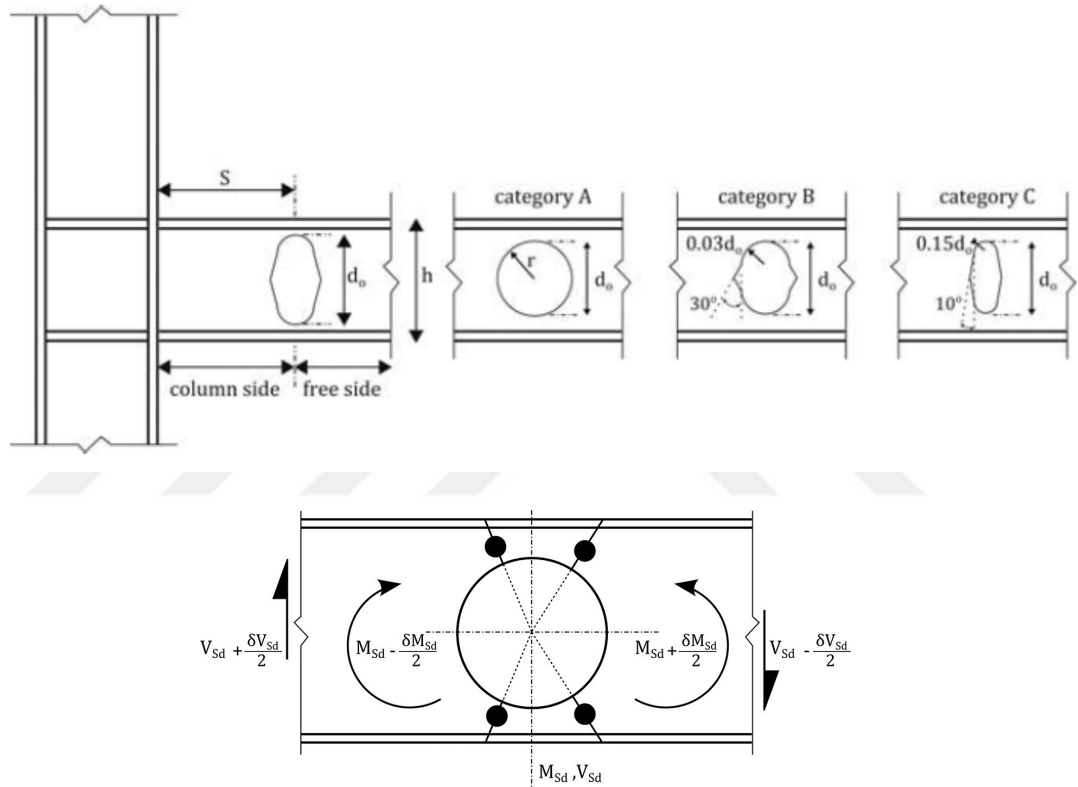


Şekil 1.15: ZKE’li ve ZKE’siz sistemlerin karşılaştırmalı itme analizi eğrileri (Kildashti ve diğ. 2012)

Karip (2014), ZKE’li çelik çerçevelerin deprem yükleri altında doğrusal olmayan karşılaştırmalı performans hesabı adlı tez çalışmasında, ZKE’li sistemlerin benzer davranışları göstermesi nedeniyle, optimum boyutlandırma bakımından çeşitli kaynaklarda çok sınırlı düzeyde değinilen bölgesel ZKE’li sistemlerin tercih edilmesi önerilmektedir. Böylece istemlerin en yoğun olduğu birleşimlerin bulunduğu katlarda ZKE uygulaması yeterli görülmekte, üst katlarda ise böyle bir uygulamaya gerek duyulmamaktadır.

Tsavdaridis ve diğ. (2014), tarafından delik geometrisinin kiriş-kolon birleşiminin sünekliliğine ve performansına etkisi araştırılmıştır. Çalışmada üç farklı zayıflatma şekli kullanmıştır. Delik şekillerinden biri standart dairesel formda, diğer ikisi de bu çalışmaya özgü geometrik şekildedirler (Şekil 1.16).

Burada kullanılan her farklı geometrik şeklin birleşimin davranışını farklı etkilediğini bildirmiştir. Çalışmada, özgün şekilde yapılan azaltmanın dairesel şekildeki azaltmaya göre daha iyi performans ortaya koyduğunu gösterilmiştir. Gövdeden azaltılmış çelik kirişlerde kesme ve eğilme kapasitesinde en fazla boşluk derinliği etkiliyken, Vierendeel mekanizmasında ise en fazla boşluk genişliği etkilidir. Özgün boşluk şeklinde, aynı boşluk yüksekliği için genişliği daha az olan boşluk şekli kullanılarak Vierendeel mekanizması standart dairesel şekildeki boşluklu kesitlere göre geliştirilmiştir.



Şekil 1.16: Özgün tasarımı gövde boşlukları (Tsavdaridis ve diğ. 2014)

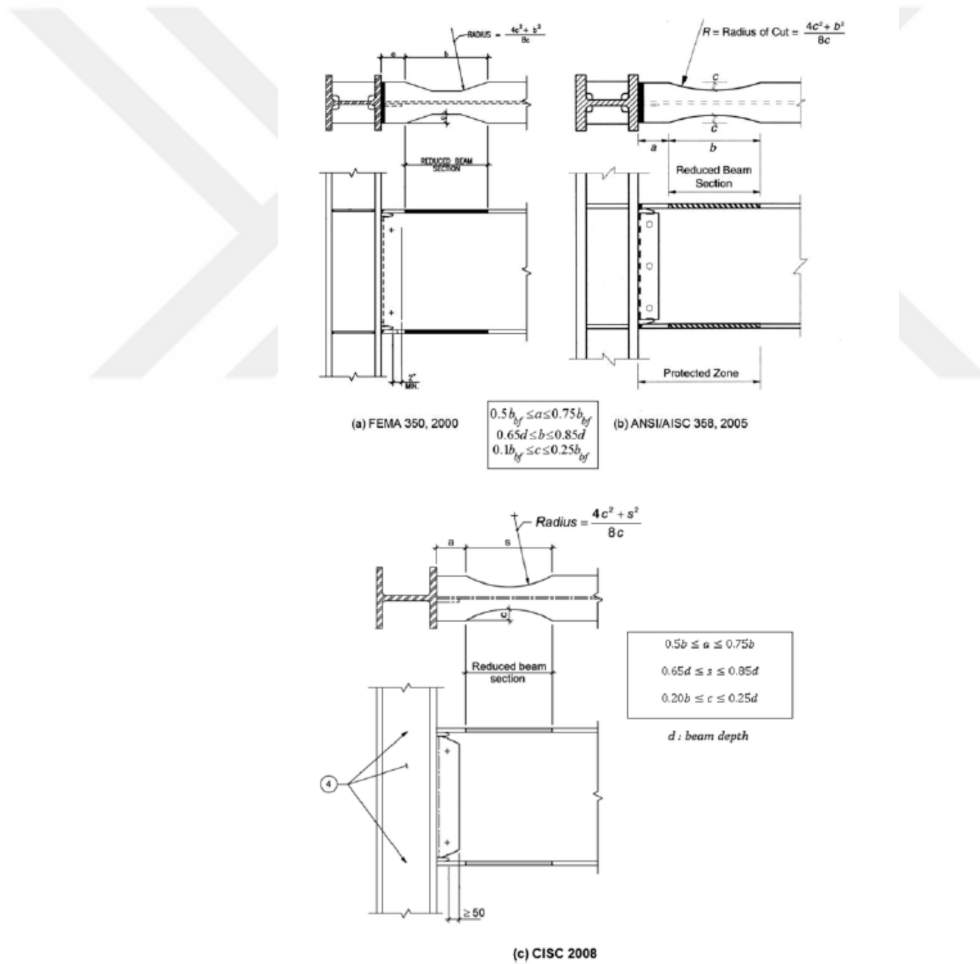
Naughton ve diğ. (2017), ZGK'lı ve ZKE'li moment çerçevelerinin itme analizlerini yapmışlardır. Çalışmada 4, 8 ve 16 katlı çerçevelerin tümü, ZGE'li yapılmasıyla bu sistemler bir dayanım ve rijitlik kaybı sergilemişlerdir. Dayanım kaybı en çok 16 katlı çerçevede (%33) olmuşken, 4 ve 8 katlı çerçevede (%17 ve %16) dayanım kaybı meydana gelmiştir.

ZGE'li 4 ve 8 katlı çerçeveler, alt katlarda daha küçük göreceli kat ötelemeleri yaparken, üst katlarda ZGE'siz çerçevelere göre daha büyük kat ötelemeleri yapmaktadır.

ZGE'li 16 katlı çerçeve, alt katlarda daha büyük göreceli kat ötelemeleri (0,06'ya oranla 0,07'lik tepe farkı) ve üst katlarda daha küçük göreceli kat ötelemeleri (0,007-0,01) göstermiştir.

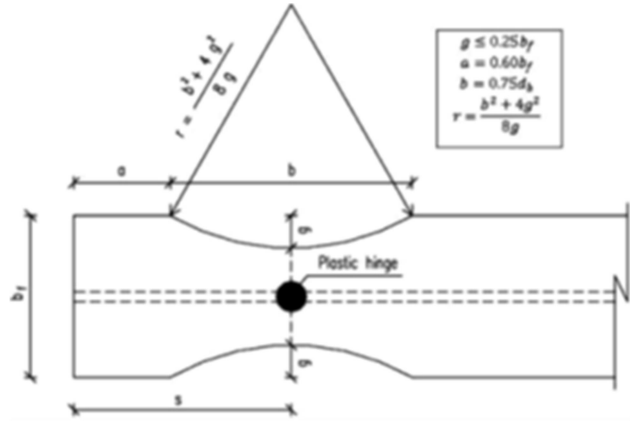
1.4. İlgili Yönetmelik ve Şartnamelerde Zayıflatılmış Kiriş Enkesitleri İçin Önerilen Tasarım Esasları

ZKE'li birleşimlerin uygulama detayı, FEMA'da, ANSI / AISC'de ve Kanada Standartlarında (FEMA 350, 2000; ANSI / AISC 358-05, 2005; CISC / ICCA, 2008) karakterize edilmektedir. Şekil 1.17'de, önerilen boyutlandırma sınırları ile birlikte verilmektedir.



Şekil 1.17 : ZKE'li birleşim detayı ve boyutlandırma limitleri (FEMA 350, 2000; ANSI / AISC 358-05, 2005; CISC / ICCA, 2008)

ZKE, Eurocode 3'de, çelik kirişlerin yerel sünekliğini iyileştirmek için ve kiriş-kolon birleşimi düzenleme seçeneği olarak sunulmaktadır (EN 1993-1-8 2005). Şekil 1.18'deki şematik gösterimde boyutlandırma için öneriler verilmektedir.



Şekil 1.18 : Eurocode 3’de ZKE düzenlemesi (EN 1993-1-8 2005)

ABD, Kanada ve Avrupa yönetmeliklerin ilgili maddelerindeki benzerlikler Şekil 1.17 ve Şekil 1.18’den görülebilmektedir.

ZKE tasarımında plastik mafsallaşmanın yerinin saptanması ve düzenleme için gerekli geometrik ayrıntılar FEMA350 yönetmeliği gereğince uygulama sınırları Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1 : FEMA350 yönetmeliği gereğince uygulama sınırları

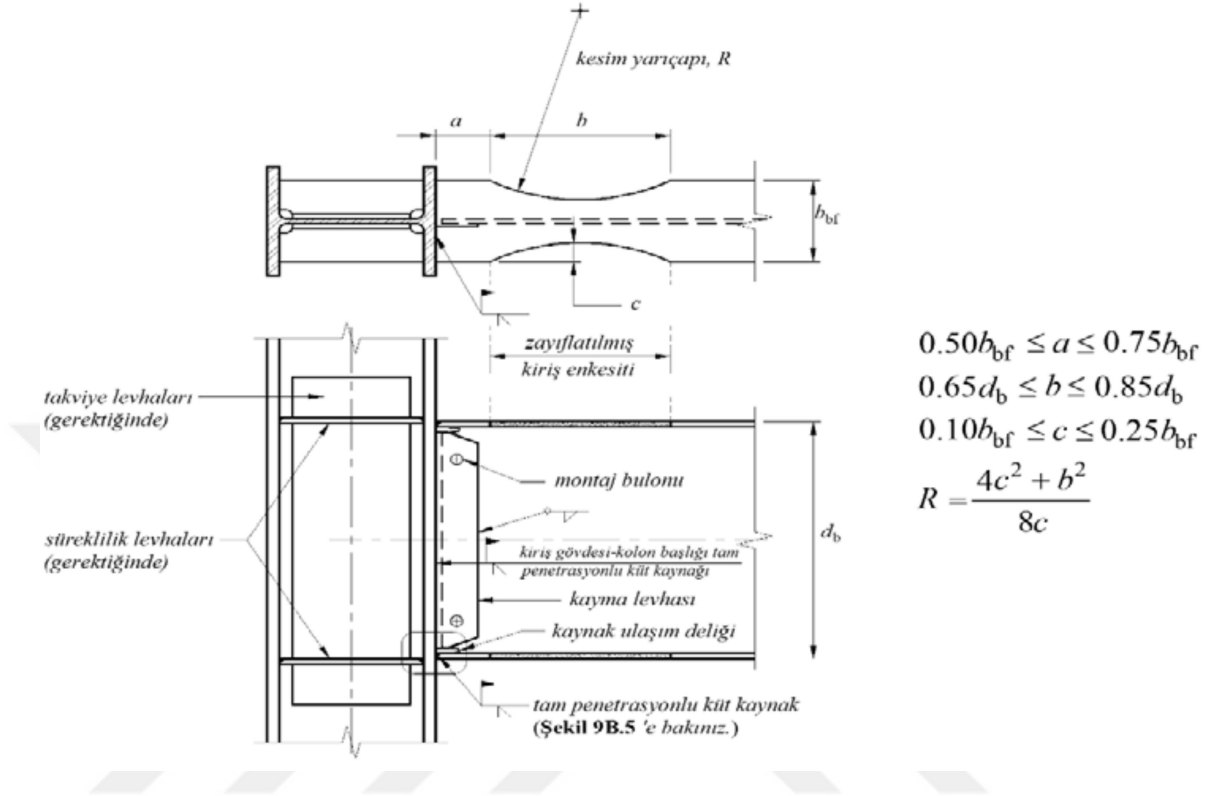
Birleşim Detayı Parametreleri	Uygulama Sınırları
Genel	
Uygulanabilir sistem	OMF, SMF
S_h	$d_c/2 + a + b/2$
Kiriş parametre sınırları	
Kiriş boyu	$\leq d_{bw36}$
Kiriş ağırlığı	$\leq 447 \text{ kg/m (300 lbs/ft)}$
Kiriş açıklık/boy oranı	OMF için, ≥ 5 SMF için, ≥ 7
$b/2t_f$	$\leq 52 / \sqrt{F_{ye}}$
Kiriş başlığı kalınlığı	$\leq 44.50 \text{ mm (1-3/4")}$
Kolon parametre sınırları	
Kolon boyu	OMF için, sınır yok SMF için, $\leq d_{cw12} / \leq d_{cw14}$

†Çizelgede verilen verilerin birimleri Ksi’dır. Bu nedenle yapı çeliği akma gerilmesi $F_{ye} = 51.49 \text{ Ksi}$ olarak kullanılacaktır.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 (TBDY-2018)’de, kaynaklı, zayıflatılmış kiriş enkesitli moment aktaran birleşim detaylarında, kiriş-kolon birleşimine yakın bölgede kiriş başlıklarının genişlikleri uygun bir kesimle azaltılır.

Birleşim detayları Şekil 1.19’de verilmiştir. Burada tanımlanan koşullar birleşimin, azaltılmış kiriş enkesitinde plastik mafsall oluşmasını sağlayacak yeterli dayanıma sahip olması prensibini esas almaktadır.

TBDY-2018 'de bu birleşimin süneklik düzeyi yüksek ve süneklik düzeyi sınırlı moment aktaran çerçevelerde, kullanılabilmesi için, Tablo 1.2'de verilen uygulama sınırları çerçevesinde, aşağıda verilen ek koşullara uyulması zorunludur.



Şekil 1.19 : ZKE'li kirişlerin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) birleşim detayı

Birleşimin azaltılmış kiriş enkesitinde akma nedeniyle plastik mafsall oluşması öngörüldüğünden, bu noktalarda her iki başlıkta yanal burulmalı burkulmaya karşı ilave yanal destek teşkil edilmelidir. Ancak, kiriş üst başlığının merkezleri arasındaki uzaklık 300 mm'yi aşmayan başlıklı çelik ankrajlar ile betonarme döşemeye bağlanması halinde, kiriş alt ve üst başlıklarında bu ilave yanal desteklerin kullanılmasına gerek yoktur.

Yanal destek kullanılması durumunda bu destek, kiriş enkesitinin azaltıldığı bölgenin kolondan en uzak olan noktasından en fazla kiriş yüksekliğinin yarısı kadar uzakta teşkil edilmelidir.

Yanal desteğin, kolon yüzü ile azaltılmış kiriş enkesit bölgesinin kolon yüzünden en uzak ucu arasındaki bölge içinde kirişe birleşimine izin verilmez (TBDY-2018).

Tablo 1.2 : Kaynaklı Zayıflatılmış Kiriş Enkesitleri (ZKE) – Kolon birleşim detayının uygulama sınırları (TBDY-2018)

Birleşim Detayı Parametreleri	Uygulama Sınırları
Kiriş enkesit yüksekliği	≤ 920 mm
Kiriş birim boy ağırlığı	≤ 450 kg/m
Kiriş açıklığı / enkesit yüksekliği oranı	≥ 7 (süneklik düzeyi yüksek çerçeveler) ≥ 5 (süneklik düzeyi sınırlı çerçeveler)
Kiriş başlık kalınlığı	≤ 44 mm
Kolon enkesit yüksekliği	≤ 920 mm (I profilleri için) ≤ 610 mm (yapma kutu profiller için)
Kaynak ulaşım deliği	gerekli
Ek başlık levhası kaynağı	Tam penetrasyonlu küt kaynak
Kapasitesi korunan bölge	Kolon yüzü ile zayıflatılmış kiriş enkesitinin en uzak noktası arasındaki bölge

Süneklik düzeyi yüksek çerçevelerde kiriş gövdesinin kolon başlığına bağlantısı, kaynak ulaşım delikleri arasında tam nüfuzlu küt kaynak ile sağlanmalıdır. Tam nüfuzlu küt kaynak için kaynak ulaşım delikleri arasında, altlık levhası görevi görmesi amacıyla, kalınlığı en az 10 mm olan kayma levhası kullanılmasına izin verilir. Kiriş gövdesinde montaj amaçlı bulon delikleri açılabilir.

(b) Süneklik düzeyi sınırlı çerçevelerde (a)'da verilen koşullar uygulanabilir. Ancak bu sistemlerde, bulonlu kayma levhali gövde birleşimine de izin verilmektedir. Bu durumda, birleşim sürtünme etkili birleşim olarak boyutlandırılacak ve uygulanması sağlanacaktır.

Kayma levhasının kolon başlığı ile birleşiminde tam nüfuzlu küt kaynak ya da iki yönlü köşe kaynak kullanılacaktır. Köşe kaynak kullanılması durumunda, her bir köşe kaynağın minimum kalınlığı levha kalınlığının 0.70'i olmalıdır. Bulon delikleri standart delik olacaktır.

Ancak, kiriş gövdesi veya kayma levhasından birinde açılması koşulu ile kiriş başlığına paralel açılmış kısa oval delik kullanılmasına izin verilmektedir

Northridge depremi sonrasında geliştirilen güçlendirilmiş kolon-kiriş birleşim tiplerinin aksine, ZKE'li birleşim herhangi bir takviye levhası ve bu levhaları kirişe bağlayacak karmaşık ve uygulaması zor kaynak dikişleri gerektirmemekte, bu sayede malzeme ve işçilik açısından ekonomik bir birleşim olma özelliği kazanmaktadır.

1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, zayıflatılmış kiriş enkesitleri, benzer kesit özelliklerine sahip azaltılmamış ve zayıflatılmış gövde enkesitli sistemlerle karşılaştırılarak birleşimlerin davranış esasları karşılaştırılmıştır. Gövdesinden azaltılmış kesitlerin, farklı delik ve delik merkezinin kolon yüzüne olan uzaklıklarına bağlı olarak uygun tasarım parametreleri araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan kolon kiriş birleşiminin, deney koşulları ile uyum sağlaması için gereken sınır koşulları uygulanmıştır.

Yukardaki bölümlerde de belirtildiği gibi ZKE birleşimin tasarım ve düzenleme kuralları TBDY2018' de ve diğer ülkelerin yönetmeliklerinde yer almaktadır. ZGE birleşimlerde soruna alternatif bir çözüm oluşturması açısından önem kazanmaktadır.

ZGE sahip kirişlerde ayrıca bu boşluklardan çeşitli tesisat elamanları da geçirilerek yapısal mimariye katkı sunulmaktadır.

ZGE birleşimler, süneklik düzeyi yüksek moment çerçevelerinin birleşimlerinde uygun bir çözüm önerisi olarak araştırılmış ve düzenlemeleri ile ilgili öneriler sunulmuştur. Çalışmanın kapsamında gövdesinden dairesel zayıflatılmış kiriş enkesitli birleşim modelleri çalışılmıştır.

Birleşim düzeyinde ve çerçeve düzeyinde yapılan çözümlemelerle bu birleşim türü araştırılarak çeşitli çözümlere ulaşılmıştır.

2. YAPISAL ÇELİK

2.1. Genel Bakış

Demir ve çelik beş bin yıldır kullanılmakla beraber, insanlık tarihinde iki yüzyıl öncesine kadar yalnızca silah ve eşya yapımında yer almışlardır. Ancak, 18. yüzyılda İngiltere’de ham demir üretiminin başlamasıyla birlikte demir yapı malzemesi olarak da kullanılmaya başlanmıştır. İnşaat sanayinde kullanılan ilk demir türevi malzeme ise fonttur. Yüksek fırınlarda demir cevherinin ergitilmesi ve indirgenmesi ile elde edilen, kum ya da metal kalıplarda katılaştırılmış olan ve bileşiminde %2’den çok karbon bulunan demir-karbon alaşımına “font” (pik) adı verilmektedir.

Çeliğin, köprü gibi büyük açıklıkları geçmeyi ve ağır yükler taşımayı gerektiren mühendislik yapılarında kullanımının getirdiği faydalar, çeliğin binalarda da kullanım olanaklarının araştırılması ve geliştirilmesinde önemli roller oynamıştır. İngiltere’de

Çelik yapılarla çeşitlilik içeren birleşim düzenlemeleri sayesinde istenilen geometri ve şekilde tasarım yapılabilir. Yüksek dayanımı nedeniyle küçük kesitler gerektirdiğinden sabit ağırlığının, faydalı yüklere oranı düşüktür. Dolayısıyla daha hafif yapılar elde edilebilir. Öte yandan çelik taşıyıcı sistemlerin, montajı tamamlandığı andan itibaren atmosfer koşullarından bağımsız olarak tam yüklemeye çalışabilmesi, kolayca takviye edilebilmesi ve sökülebilmesi, kalıp gerektirmemesi, sürdürülebilirlik açısından bakıldığında ise söküldükten sonra tekrar kullanılabilmesi gibi olumlu yanları vardır.

Bu türden yararları nedeniyle çelik sistemlerin mühendislik yapılarında kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

2.1.1. Malzeme Olarak Çelik

Yapısal çelik, homojen, izotrop bir malzeme olduğu ve kontrollü üretildiği için güvenli bir taşıyıcı sistem malzemesidir.

Karbon çelikteki en önemli alaşım elementidir. Çeliğin içinde karışım olarak bulunmaz. Demir ile karbon molekülleri bileşik oluştururlar. Bu, “demir karbürü” ya da “sementit” (Fe_3C) olarak tanımlanır. Saf demirin yumuşak ve kolay şekil

verilebilir bir element olmasına karşın, demir karbürü yüksek sertliğe sahip, gevrek bir malzemedir. Karbürün çeliğin içindeki yayılımı düzenlidir.

Demir cevherinin (*ore*) yüksek fırınlarda kok kömürü ile eritilmesinden ham demir elde edilir. Daha sonra uygulanan ısıtma işlemleriyle ham demirin içinde bulunan ve ona şekil verilebilmesini engelleyen, karbon, fosfor ve silisyum gibi elementler belirli oranların altına düşürülür. Yapısal çelik üretiminde karbon oranı çelik ağırlığının % 0.15 -% 0.30 ‘u arasındadır. Çelikte istenilen malzeme özelliklerini elde edebilmek için üretim sürecinde, Manganez (Mn), Silisyum (Si), Bakır (Cu), Nikel (Ni), Sülfür (S), Krom (Cr), Vanadium (V), Fosfor (P), Molibden (Mo) gibi elementler belirli oranlarda eklenir. Bu alaşım elementlerinin katılmasındaki gözetilen amaçlar, çeliğin sertleşme yeteneğinin artırılması, mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, tokluğunun artırılması, aşınma direncinin artırılması, korozyon direncinin artırılması ve manyetik özelliklerini iyileştirmek olarak sıralanabilir.

Soğuk şekil vermede, malzemenin üniform olmayan şekil değiştirmesinden sonra kuvvetler kalkınca malzemede kalıcı olan gerilmelere de artık gerilmeler (*Residual stresses*) adı verilir.

Pekleşen malzemede elastik olmayan şekil değiştirmelerden ötürü dayanım yükselir, süneklik azalır bunu artık şekil değiştirmelerin (*Residual strains*) oluşumu izler. Artık şekil değiştirmeler belli bir noktada yoğunlaşarak plastik mafsallı meydana getirirler.

Çelik malzemede pekleşme, pekleşmenin hızı ile tanımlanabilir. Pekleşmenin hızı σ_g gerçek gerilme, ϵ_g şekil değiştirme eğrisinin eğimidir. Şekil değiştirme sırasında oluşan pekleşmenin değeri, herhangi iki şekil değiştirmeye karşılık gelen gerilmeler arasında oluşan farktır. Pekleşme, elastik olmayan bölgede homojen şekil değiştirmelerin olduğu bölgede meydana gelir.

Tablo 2.1’de 2018 yılında yürürlüğe giren Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Yönetmeliği’nde yer alan” sıcak haddelenmiş yapısal çeliklerde, karakteristik akma gerilmesi ve çekme dayanımı “değerleri verilmiştir. Tablo 2.1’de verilen değerler, çelik yapıların tasarım hesaplarında kullanılacak karakteristik değerlerdir (Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Yönetmeliği, 2018).

Tablo 2.1: Sıcak haddelenmiş yapısal çeliklerde, karakteristik akma gerilmesi (F_y) ve çekme dayanımı (F_u) değerleri

Standart ve Çelik Sınıfı	Karakteristik Kalınlık, t (mm)			
	$t \leq 40\text{mm}$		$40\text{mm} < t \leq 80\text{mm}$	
	F_y (N/mm ²)	F_u (N/mm ²)	F_y (N/mm ²)	F_u (N/mm ²)
EN 10025-2				
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	470
S450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S275 N/NL	275	390	255	370
S355 N/NL	355	490	335	470
S420 N/NL	420	520	390	520
S460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S275 M/ML	275	370	255	360
S355 M/ML	355	470	335	450
S420 M/ML	420	520	390	500
S460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S235 W	235	360	215	340
S355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

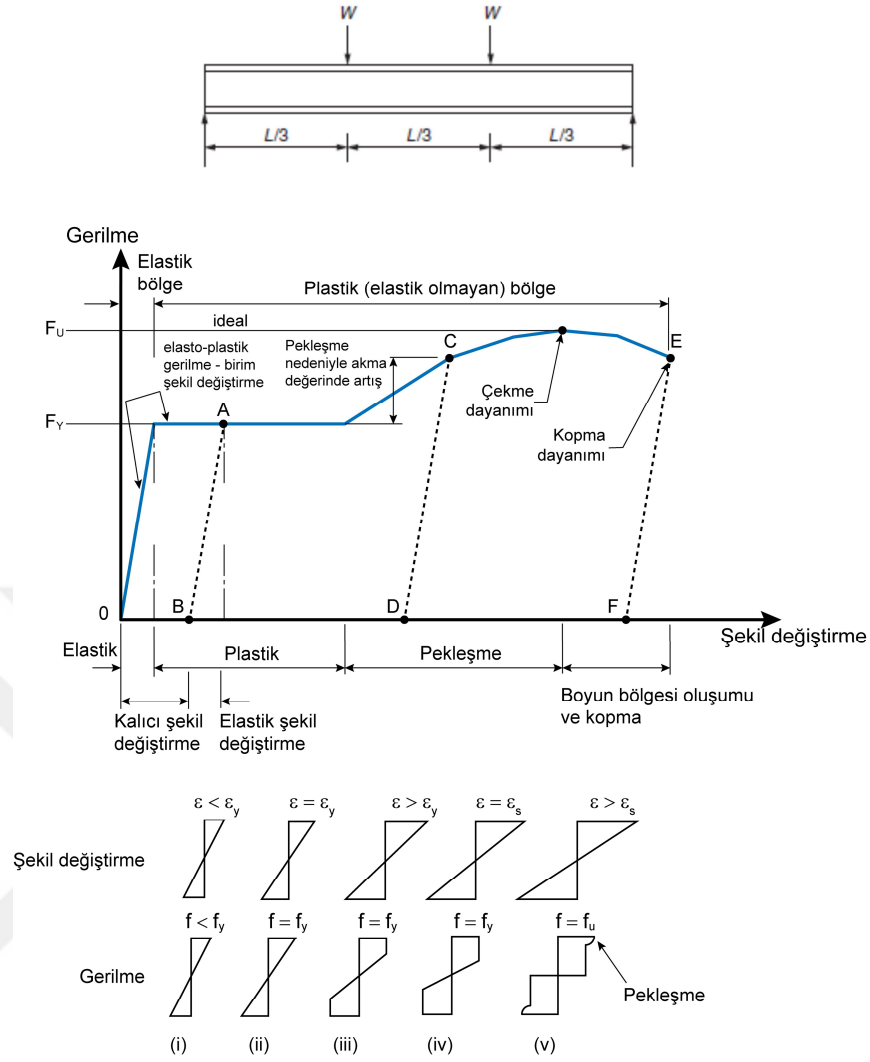
Sıcakta haddelenerek üretilen profillerin çelikleri;

- Karbon çelikleri (akma dayanımı, $F_y = 220 - 290$ MPa),
- Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler ($F_y = 275 - 480$ MPa),
- Alaşımlı çelikler ($F_y = 550 - 760$ MPa)

olarak sınıflandırılır.

2.2. Çelik Malzemenin Davranış Özellikleri

Kristalize bir yapıya sahip olan yapısal çelik, izotrop ve homojen bir malzemedir. Çeliğe çekme deneyi uygulandığında Şekil 2.1' de verilen gerilme (σ)- şekil değiştirme (ϵ) diyagramı elde edilir.



Şekil 2.1: Çeliğin çekme kuvveti altında genel gerilme (σ) - şekil değişirme (ϵ) diyagramı

Elastik bölgede, Hooke kanunu geçerlidir. Kuvvet kaldırıldığında, elastik şekil değiştirmeler de ortadan kalkar. Malzeme elastik davranışın sonunda akma gerilmesine ulaşır bu aşamada gerilme sabit kalarak plastik şekil değiştirmeler kesitin ortasına doğru yayılarak artar.

Kesit C ve D noktaları arasında şekil değiştirmeler artarken kesitin gerilme taşıma kapasitesi de artar, bu bölge pekleşme (*Strain-hardening*) evresi olarak tanımlanır. D noktasından itibaren, malzeme E noktasında kırılıncaya kadar kesitin gerilme taşıma kapasitesi azalır.

Malzemenin karakteristik özelliği olan Elastisite Modülü (E) , diyagramın doğrusal kısmın eğimine eşittir. E büyüdükçe, malzeme daha rijit hale gelir, diğer bir deyişle gerilme ile daha az şekil değişirme yapar. Elastisite modülü küçüldükçe malzeme

daha elastik davranır. Malzemenin plastik şekil değiştirmeye başladığı gerilme değerine “akma dayanımı” adı verilir. Belirli miktar kalıcı uzamanın oluştuğu (% 0.2 veya 0.002 mm/mm) gerilme değeri akma dayanımı (F_y) olarak alınır.

Burada en önemli karakteristik gerilme değeri, çeliğin akma dayanımıdır. Diğeri ise pekleşme bölgesinin tepesinde yer alan çekme dayanımıdır. Pekleşme, malzemedeki süreksizliklerin birbirleri üzerine yığılması, harekete engel oluşturması ve çeliğin akma sınırının yükselmesi olarak ifade edilebilir. Çeşitli göçme sınır durumları için çekme dayanımının akma dayanımına oranı da çelik malzemenin önemli karakteristik özelliklerinden biridir.

Süneklik taşıyıcı sistemlerde aranan en önemli özelliktir. Süneklik özelliği sayesinde sistem göçmeden önce büyük şekil değiştirmeler yani plastik deformasyonlar yapabilir. Buna karşılık gevrek davranış gösteren bir eleman fark edilebilen bir şekil değiştirme yapmadan aniden göçer. Sünek malzemeler için akma gerilmesi, gevrek malzemeler için kırılma gerilmesi, bu tür malzemelerin dayanım sınırını belirlemektedir.

Yapıların çoğu, ekonomik nedenlerden ötürü büyük depremler altında elastik ötesi davranacak şekilde tasarlanmaktadır.

Deprem titreşimlerinin genlikleri, yapıların sünek deformasyonlarla enerjiyi emme ve dağıtma yeteneklerinin bir işlevi olan enerji yayılım düzeyine bağlıdır.

Düşük enerji dağılımı halinde, taşıyıcı sistemlerde büyük yatay yüklerden dolayı gerilmeler oluşabilir. Bu, 0.5g ila 1.0g civarında ivme düzeyinde gözlemlenmiştir (Housner, 1956).

Sonuç olarak, bu tür yapılar, elastik aralıkta kalmak için ağırlıklarıyla orantılı yatay yüklere dayanacak şekilde tasarlanmalıdır.

Bu, diğer güvenlik açısından kritik yapıların yanı sıra nükleer enerji santralleri, açık deniz platformları ve su veya sıvı- tutma yapıları dışındaki tüm pratik uygulamalarda ekonomik değildir.

Yer değiştirme sünekliğinin genel analitik tanımını aşağıda verilmiştir:

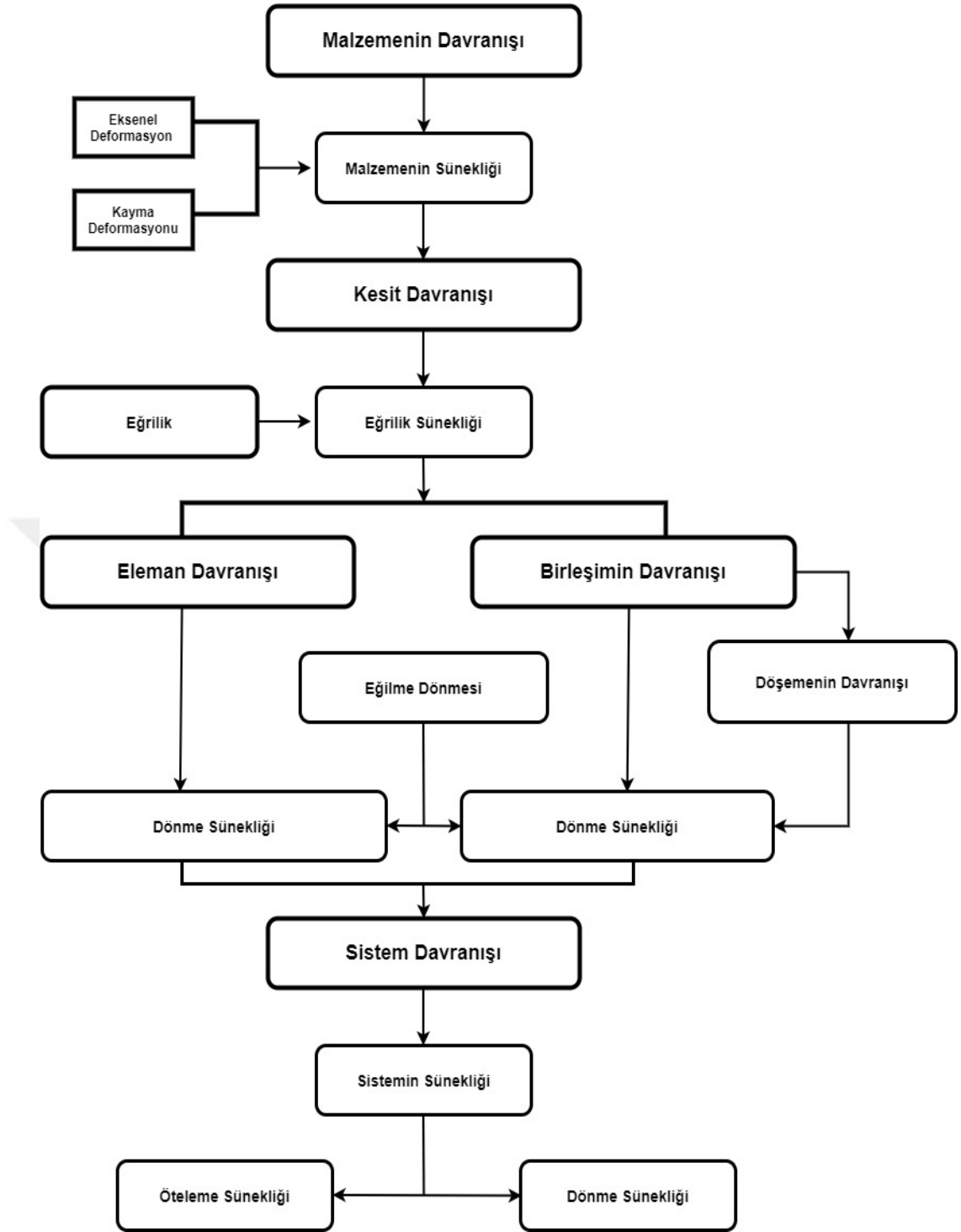
$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (2.1)$$

Denklem (2.1) 'deki μ oranı' süneklik faktörü 'olarak adlandırılır. Burada Δ_u ve Δ_y sırasıyla nihai ve akma noktalarındaki yer değiştirmelerdir.

Aşağıdaki süneklik türleri, yapıların dış yüklere karşı tepkilerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır:

- Malzeme sünekliği (μ_ϵ), malzeme plastik deformasyonlarını karakterize eder.
- Kesit (eğrilik) sünekliği (μ_χ), enine kesitlerin plastik deformasyonları ile bağıntılıdır.
- Eleman (rotasyon) sünekliği (μ_θ), kiriş ve kolon gibi yapısal bileşenlerde meydana gelebilecek plastik dönmeleri belirtir. Bu tip süneklik genellikle yapısal elemanların birleşimleri için de kullanılır.
- Yapısal (yer değiştirme) sünekliği (μ_δ), yatay yüklere maruz taşıyıcı sistemlerin elastik olmayan davranışının genel bir ölçüsüdür.

Yerel ve genel süneklik arasındaki kavramsal ilişkide, yapısal tepki seviyeleri arasındaki hiyerarşik bağlantıyı yansıtan diyagramı şekil 2.2 'de akış şeması halinde gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Yerel ve genel süneklik arasındaki ilişkide, yapısal tepki seviyeleri arasındaki bağlantı

Çelik malzeme basınç ve çekme etkisinde benzer davranış gösterirler. Akma gerilmeleri yaklaşık olarak birbirine eşittir.

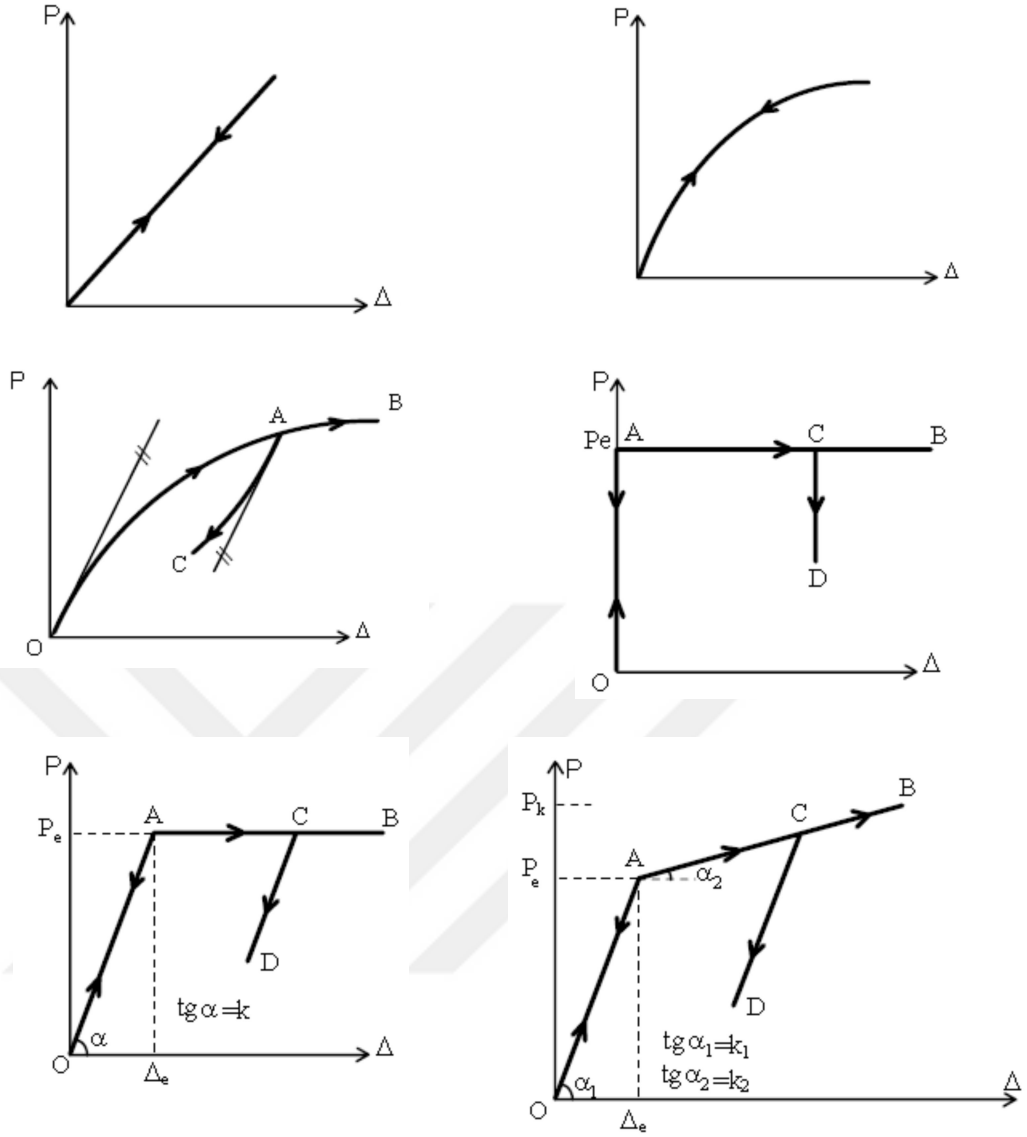
Poisson oranı (ν) malzemelerin elastik özelliklerini belirleyen diğer bir önemli parametredir. Plastik şekil değiştirmelerde hacim sabit kalırken elastik şekil değiştirmeler sırasında malzeme hacminde değişiklikler meydana gelir.

Sünek malzemenin kopana dek yuttuğu toplam enerji tokluk ile ifade edilmektedir. Tokluk, gerilme (σ)-Şekil Değiştirme (ϵ) eğrisinin altında kalan alana eşittir. Sünek malzemelerin tokluğu gevrek malzemelere göre daha yüksektir. Kayma modülü (G), kayma gerilmesinin kayma birim şekil değiştirmesine oranı olarak tanımlanır. Kayma gerilmesi-şekil değiştirme eğrisinde doğrusal kısmın eğimine eşittir

2.2.1. Malzemede Kuvvet-Yer Değiştirme İlişkisi Modelleri

Bu bölümde, kuvvet-yer değiştirme ilişkisinin açıklanabilmesi amacıyla birtakım kabuller yapılmıştır. Aşağıda malzeme modelleri sıralanmıştır.

- Doğrusal - elastik model : Yükleme ve boşaltma eğrileri aynı doğru üzerinde kalan ve elastik davranan malzemedir. Bu modelde kuvvet-yer değiştirme eğrisi doğrusaldır (Şekil 2.3a).
- Doğrusal olmayan elastik model: Yükleme ve boşaltma eğrileri aynı doğru üzerinde yer alan bu malzemenin kuvvet-yer değiştirme ilişkisi doğrusal değildir (Şekil 2.3b).
- Elasto-plastik model: Yükleme ve boşaltma eğrileri birbiriyle çakışmayan, fakat boşaltma eğrisinin başlangıç rijitliği yükleme eğrisine paralel olan modeldir (Şekil 2.3c).
- Rijit doğrusal olmayan/plastik model: Elastik şekil değiştirmelerin bulunmadığı malzemede boşaltma eğrisi yükün P_e değerini aşmadığı durumlarda, yükleme eğrisi ile aynı olup aşılması durumunda ise OA doğrusuna paralel bir yol takip etmektedir (Şekil 2.3d).
- İdeal elasto-plastik model: Yükleme eğrisinin iki doğru parçasından meydana geldiği kabul edilmiştir. Doğru, elastik P_e kuvvet değerine ulaştıktan sonra yer değiştirme eksenine paralel kalacak şekilde devam eder. Boşaltma eğrisi elastik yer değiştirme sınırına kadar yükleme eğrisi ile aynı yolu takip etmektedir. Bu değeri geçtikten sonra ise OA doğrusuna paralel kalır (Şekil 2.3e).
- Pekleşen ideal elasto-plastik model: İdeal elasto- plastik malzeme modeline göre kuvvetin P_e değerini aştıktan sonra pekleşme ile yükseldiği kabul edilmektedir (Şekil 2.3f).



Şekil 2.3 : (a) Doğrusal elastik malzeme (b) Doğrusal olmayan elastik malzeme (c) Elasto-plastik malzeme (d) Rijit doğrusal olmayan/plastik malzeme (e) İdeal elasto-plastik malzeme (f) Pekleşen ideal elasto-plastik malzeme

Yapısal çeliğin elastisite modülü, $E = 2 \times 10^5$ MPa, Poisson oranı $\nu = 0.30$, kayma modülü, $G = 77200$ MPa dır. Çeliğin yoğunluğu $\gamma = 7850$ kg/m³, sıcaklık genleşme katsayısı, $\alpha = 10^{-5}$ 1/C⁰ dur.

2.2.2. Çelik Kesitlerin Plastik Davranışı

Malzeme bakımından doğrusal davranmayan yapılarda, doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin plastik mafsalları olarak belirlenen kesitlerde toplandığı, diğer taraflarda da sistemin doğrusal elastik davranış gösterdiği kabulü yapılabilir. Genellikle malzemelerin gerilme-şekil değiştirme bağlantısı doğrusal olmayıp, malzemenin karakteristiklerine bağlı olarak hayli karmaşık bir yapı göstermektedir.

Çelik için gerilme – şekil değiştirme ilişkisi biliniyorsa, eleman enkesitlerinin elastik ve plastik davranışları tanımlanabilir ve bunlara karşı gelen elastik ve plastik dayanım kapasiteleri hesaplanabilir.

Taşıyıcı sistemlerin plastik davranış göstermeleri, gerilmelerin akma gerilmesine ulaşmasını sağlayacak büyüklükte yükleme olması halinde belirli kesitlerde oluşan mafsallaşmadır.

Bu yük durumu, “Taşıma Yüğü” olarak adlandırılabilir. Bu tür yükleme durumları ve elemanların plastik davranışları esas alınarak geliştirilen hesap yöntemi de “Taşıma Gücü Hesap Yöntemi” olarak isimlendirilir (Arda, T.S.,Uzgider, E., 1986).

Çelik yapıların plastik taşıma yüğü analizinin dayandığı genel varsayımlar:

- Çelik malzeme sünek davranış göstermektedir. Kırılmadan ya da kopmadan büyük şekil değiştirmeler yapabilir.
- Yer değiştirmeler küçüktür. Bu nedenle, statikten bilinen denge denklemleri sistemin yer değiştirme yapmamış şekli üzerinde yazılır (I. Mertebe Teorisinde yüklerle oluşan elastik eğrinin başlangıçtaki konumundan çok az farklılık gösterdiği varsayılır ve bu farklılık hesaplarda ihmal edilir).
- Yükler ve taşıyıcı sistem aynı düzlemedir.
- Çelik eleman, plastik taşıma gücüne ulaşmadan genel burkulma, yerel burkulma, burulmalı burkulma gibi stabilite kaybı sorunları oluşmamalıdır.
- Birleşimler, plastik moment kapasitesini aktaracak bir şekilde süreklilik sağlamalıdır.
- Elastisite modülü ve akma gerilmesi değerleri çeliğin basınç ve çekme bölgeleri için aynıdır.
- Homojen ve izotrop bir malzeme olan çelik hem elastik hem de plastik bölgede aynı özellikleri gösterir.

Plastik mafsal oluşumu yeterli bir düzeye ulaştıktan sonra, taşıyıcı sistem yüklemenin şiddetindeki bir artıma gereksinim duymadan yer değiştirmeler ve dönmeler yapabilir. Bu duruma mekanizma oluşumu denir.

Kesit zorlarının bir kesite basit ya da bileşik olarak etkimesi halinde, kesitin bu zorlara dayanması için kesitte zorları dengeleyebilecek plastik bir gerilme dağılımının bulunması gereklidir.

Gerilmelerin plastik gerilme olması için seçilen akma ölçütlerine uymaları gerekir. Akma ölçütü olarak düzlem gerilme durumu için 2.2 ifadesi ile verilen “Von Mises Akma Ölçütü” kullanılabilir.

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 + 3\tau^2 \leq \sigma_y^2 \quad (2.2)$$

Çelik elemanın kesitinde sadece P normal kuvveti varsa kuvvetin değeri, kesitin P_n karakteristik aksenal kuvvet taşıma kapasitesini aşmamalıdır. Ya da sadece eğilme momenti (M) etkisi varsa bu momentin değeri, kesitin M_p plastik eğilme momenti kapasitesini aşmamalıdır. Bir kesitte sadece kesme kuvveti (V) etkisi varsa kesme kuvvetinin değeri, kesitin V_p plastik kesme kuvveti kapasitesini aşmamalıdır. Basit eğilme etkisinin değeri, kesitin plastik eğilme momenti kapasitesini geçmelidir.

$$M_{pX} = F_y W_{pX} \quad (2.3)$$

$$M_{pY} = F_y W_{pY} \quad (2.4)$$

W_{pX} : X-X ekseninde etrafında plastik mukavemet momenti,

W_{pY} : Y-Y ekseninde etrafında plastik mukavemet momenti,

Herhangi bir kesitin plastik momenti ve akma momenti arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$M_p = S M_y \quad (2.5)$$

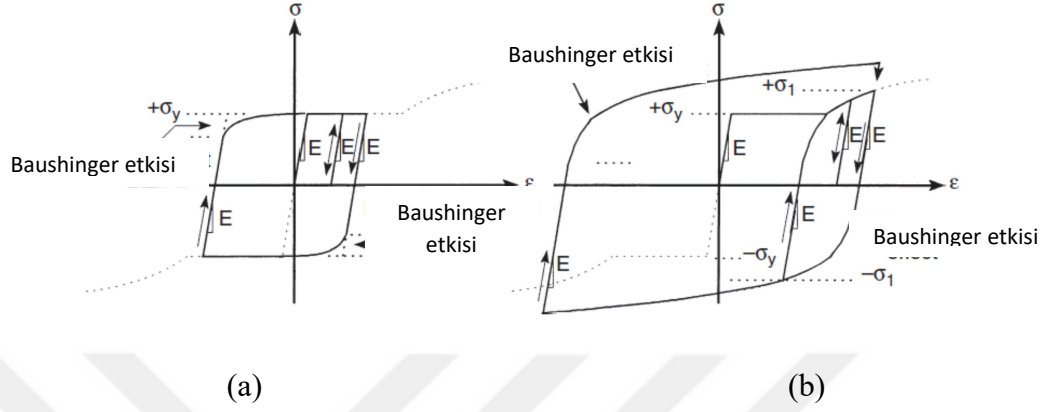
Burada S, şekil faktörü olarak tanımlanır. Dikdörtgen kesitler için 1.0, I kesitler için 1.1-1.2 değerleri civarındadır.

2.2.3. Çeliğin Çevrimsel Yükler Altında Davranışı

Çeliğin deprem yükleri açısından karakteristik özellikleri; Sünek davranabilme özelliği ve tekrarlı elastik olmayan yükleme altında enerji yutma kapasitesidir.

Çelik malzemede, elastik sınırının ötesinde, plastik bölgede, tekrarlanan yükleme ve boşaltma, yeniden yükleme ve tekrar boşaltma çevrimi sırasında bir dizi gelişme gözlemlenmektedir.

İlk olarak, $\sigma = 0$ 'dan yüklemeyi başlatma, boşaltma ve daha önce ulaşılan maksimum gerilme düzeyine kadar tekrar yükleme halinde Şekil 2.4a'da gösterildiği gibi eğri, asıl rijitlik E 'ye eşit bir rijitlik değerine kadar ulaşmaktadır.



Şekil 2.4 : Bauschinger etkisi (Bruneau, M., Uang C.-M., Sabelli, R. 2011)

Yukardaki şekilde açıklandığı gibi, gerilmenin boşaltılıp ters doğrultuda tekrar yükleme yapılması durumunda ($\sigma = -\sigma_y$), akma noktasındaki köşe kaybolmakta ve akma erken oluşmaktadır.

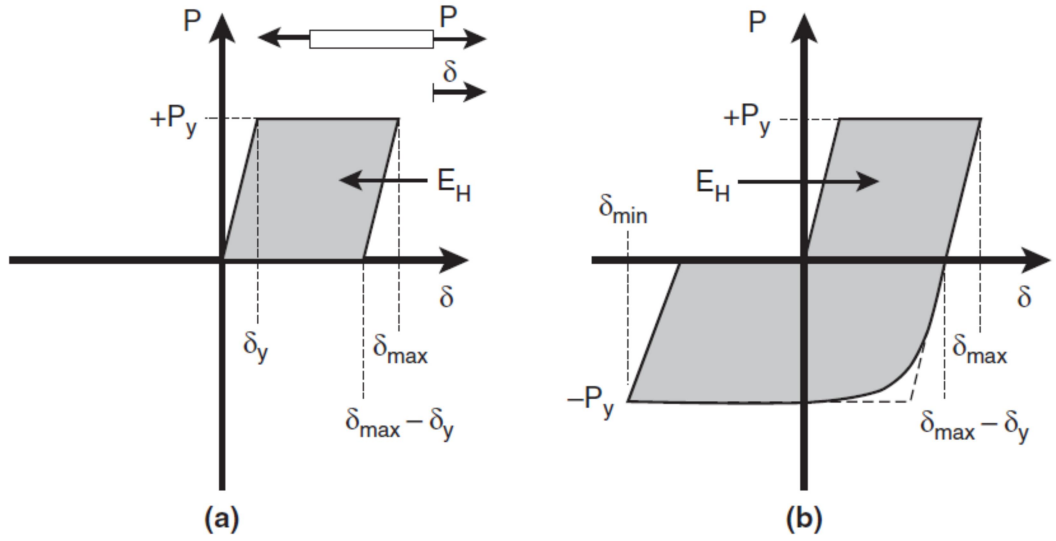
Bauschinger etkisi olarak bilinen bu davranış (Alman bilim adamı, mühendis Johann Bauschinger'e ithafen), çeliğin doğal özelliğidir. Gerilmenin tersine çevrilmesi, çelik bir yönde yüklendiğinde gerilme rijitleştirme aralığına ulaşılmadan önce başlatılırsa, Şekil 2.5a'da gösterildiği gibi ters yükleme yönünde sonunda bir akma platosu bulunacaktır.

Bununla birlikte, pekleşme bölgesinde yükleme yönünde, akma platosu her iki yükleme yönünde de etkin bir şekilde kaybolur (Şekil 2.5b).

Büyük çevrimsel, elastik ötesi yüklemeye maruz kalan çelik elemanların en tipik davranış özelliği, enerjiyi sönümleme kapasitesi olarak bilinmektedir.

Bir çelik elemanı plastik olarak uzatmak veya kısaltmak için gereken enerji, plastik kuvvet ile plastik yer değiştirmenin çarpımı yani, plastik aralıkta yapılan iş olarak hesaplanabilir ve histeretik enerji olarak adlandırılır.

Kinetik veya şekil değiştirme enerjisinin aksine, histeretik enerji, geri dönüşü olmayan, tüketilmiş bir enerjidir.



Şekil 2.5: Çelikte histeretik enerji a) Yarı histeretik b) Tam histeretik (Bruneau, M., Uang C.-M., Sabelli, R. 2011)

E_H histeretik enerji olduğuna göre, Şekil 2.5(a)'da taralı alanın değeri:

$$E_H = P_Y(\delta_{MAX} - \delta_Y) \quad (2.6)$$

Şekil 2.5(b)'de ise taralı alanın yaklaşık değeri:

$$E_H \cong P_Y[(\delta_{MAX} - \delta_Y) + (\delta_{MAX} - \delta_{MIN} - 2\delta_Y)] \quad (2.7)$$

olarak hesaplanabilir.

Histeretik enerjinin daha doğru hesaplanması, kuvvet-yer değiştirme eğrisinin yuvarlatılmış köşelerinde Bauschinger etkisine bağlı olarak gelişen küçük histeretik enerji kaybını dikkate almakla olacaktır.

Bir taşıyıcı sisteme deprem yükü tarafından dışardan enerji uygulanır. Bu enerjinin karşılığı ise, sistem içinde plastik enerji harcanması ile istemde depolanan deformasyon enerjisi ve kinetik enerjidir.

$$E_D = E_K + E_e + E_H$$

E_D = Deprem enerjisi

$$E_K = \text{Kinetik enerji} \quad (2.8)$$

$E_e = \text{Elastik deformasyon enerjisi}$

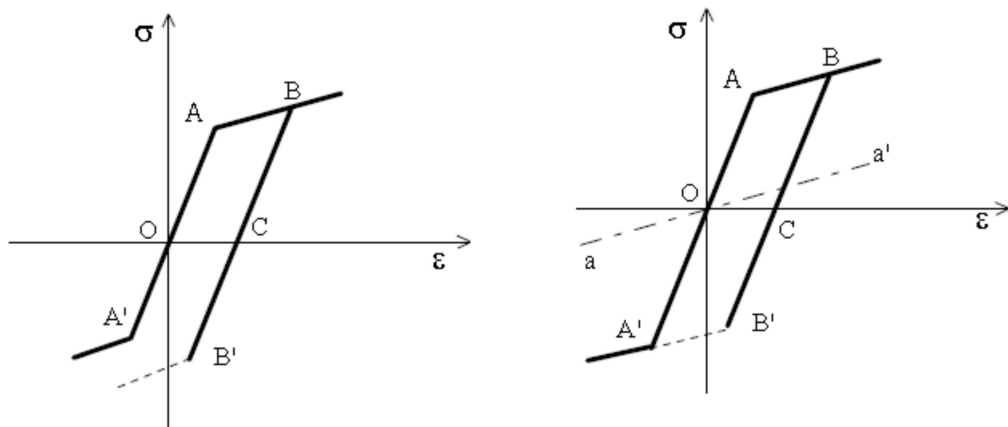
$E_H = \text{Harcanan plastik enerji}$

Yüksek enerji yutma kapasitesi sayesinde çelik; deprem yükleri etkisi altındaki çelik yapıların kinetik ve elastik enerji birikimini azaltmakta, yapının deprem anında dinamik etkiler karşısındaki kararlılığını olumlu yönde etkilemektedir.

Yükün boşaltılmadan sürekli artırıldığı yükleme monotoniktir. Yön değiştiren tekrarlı yüklemede ise yükleme ve boşaltma ardışık olarak gerçekleştirilmektedir. Tekrarlı yön değiştiren yüklemeler altında kuvvet-yer değiştirme ilişkisinin tanımlandığı malzeme modellerinden izotropik pekleşme modeli ile kinematik pekleşme modelleri en çok kullanılanlarındandır (Şekil 2.6 a,b).

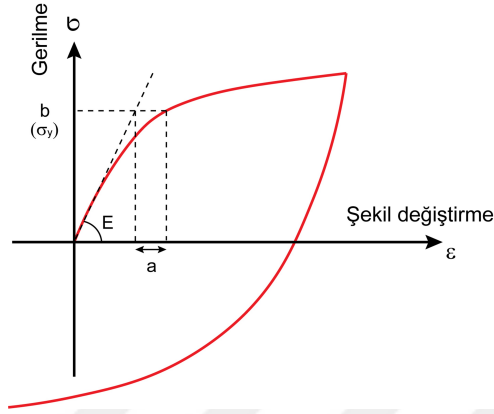
Tekrarlı yön değiştiren yüklemeler altında çekme ve basınç akma gerilmelerinin aynı olduğu kabul edilen yükleme İzotropik pekleşme modeli olarak tanımlanır. İzotropik pekleşme malzeme modelinde Baushinger etkisi ihmal edilmektedir.

Elastik aralığın değişmediği varsayılan kinematik pekleşme modelinde, Baushinger etkisi dikkate alınmaktadır. Histeretik yüklemelerde malzemenin kristal yapısındaki kaymalar arttığından, Baushinger etkisi hızla gelişmekte ve akma platosu hızla gözden kaybolmaktadır (Youngjiu, S., Meng, W., Yuanqing, W., 2011)



Şekil 2.6 : (a) İzotropik pekleşme modelinde malzemenin σ - ϵ ilişkisi. (b) Kinematik pekleşme modelinde malzemenin σ - ϵ ilişkisi (Youngjiu, S., Meng, W., Yuanqing, W., 2011)

Pekleşme özelliği gösteren malzemenin akma limitine ulaştıktan sonra davranışını daha gerçekçi yansıtan çok çeşitli modeller geliştirilmiştir. Şekil 2.7’de gerilme-şekil değiştirme ilişkisi verilen Ramberg - Osgood modeli, pekleşmeli malzemeler için oldukça gerçekçi sonuçlar vermektedir (Osgood W. R. ve Ramberg W., 1943).



Şekil 2.7 : Ramberg-Osgood gerilme-şekil değiştirme modeli

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + a \left(\frac{\sigma}{b} \right)^n \quad (2.9)$$

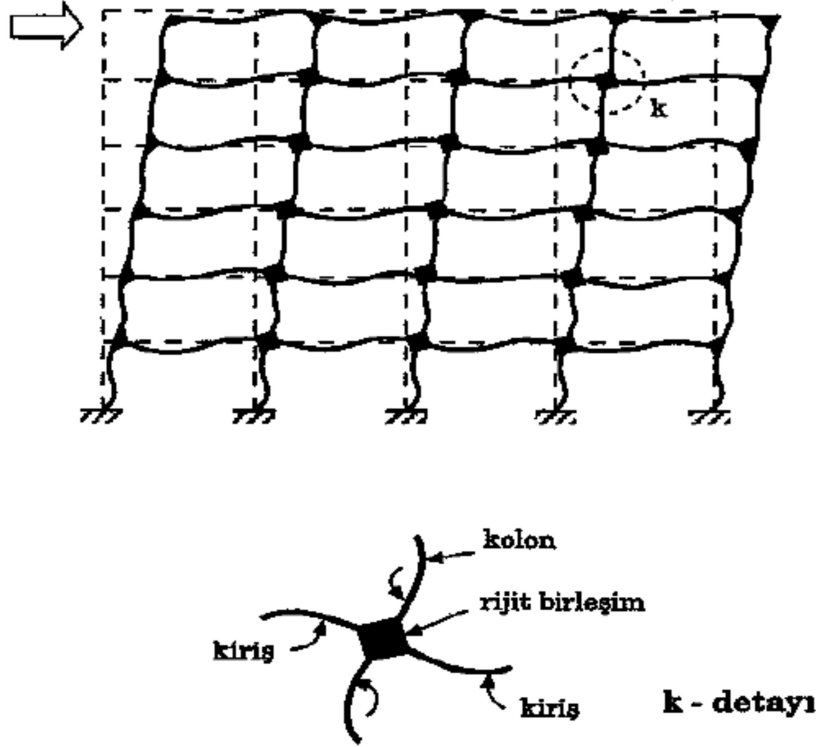
Yukardaki ifadede, σ gerilme, ε şekil değiştirme, E elastisite modülü, a, b ve n ise malzeme türüne bağlı davranış parametreleri olarak verilmektedir.

Depremin çelik yapıya yüklediği enerjinin plastik davranışla tüketilebilen kısmının tanımlaması, kesitin dönme kapasitesi ile yapılmaktadır. Ancak kesitin basınç etkisindeki bölgede yerel burkulma oluşabilir. Bu nedenle kesit tam plastikleşme kapasitesine ulaşamaz ve enerji sönmleme kapasitesi de azalır.

3. MOMENT AKTARAN ÇELİK ÇERÇEVE SİSTEMLER

3.1. Moment Aktaran Çelik Çerçeve Sistemlerin Davranış Esasları

Genel olarak ifade edilmesi gerekirse, moment aktaran çelik çerçeveler, düğüm noktalarından rijit olarak bağlanmış kolon ve kiriş elemanlardan oluşur (Şekil 3.1). Yatay yüklere karşı dayanım, çerçeveyi oluşturan elemanlarda ve birleşimlerinde moment ve kesme kuvvetlerinin oluşması ile gelişmektedir.



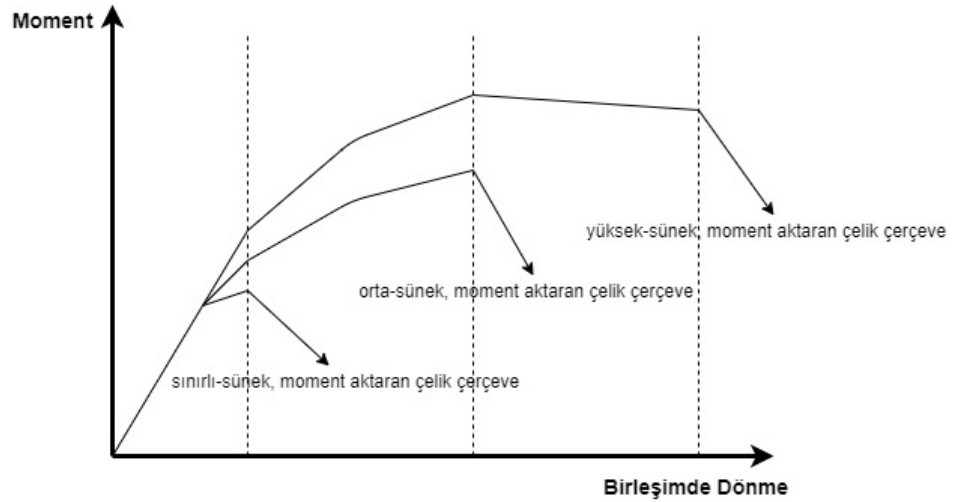
Şekil 3.1 : Moment çerçevesi (Uzgider, E., Çağlayan Ö. 2005).

Amerikan ulusal standardı olan ANSI/AISC 341-16, Çelik Taşıyıcı Sistemli Binalar için Sismik Kurallar (*Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*) yönetmeliğine göre çelik çerçeveler aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır:

- Sınırlı sünek, moment aktaran çelik çerçeveler (*Ordinary Moment Frames (OMF)*)
 - Sınırlı ve elastik olmayan deformasyonlara dayanacak şekilde tasarlanır.
 - Yönetmeliğe göre nitelikli birleşimlerin kullanılması gerekli değildir.
 - Test edilmesi gerekli değildir.
 - Tipik olarak sismik olmayan ya da düşük sismik bölgelerde kullanılır.

- Orta sünek, moment aktaran çerçeveler (*Intermediate Moment Frames (IMF)*)
 - Orta derecede elastik olmayan deformasyonlara dayanacak şekilde tasarlanır.
 - Yönetmeliğe göre nitelikli birleşimlerin kullanılmasını gerektirir
 - Katlar arası öteleme açısı en az 0,02 radyan olmalıdır.
 - Tipik olarak düşük ya da orta sismik bölgelerde kullanılır.
- Yüksek sünek, moment aktaran çerçeveler (*Special Moment Frames (SMF)*)
 - Önemli düzeyde elastik olmayan deformasyonlara dayanacak şekilde tasarlanır.
 - Yönetmeliğe göre nitelikli birleşimlerin kullanılmasını gerektirir veya deneyle doğrulanır.
 - Katlar arası öteleme açısı en az 0,04 radyan olmalıdır.
 - Tipik olarak orta ya da yüksek sismik bölgelerde kullanılır.

Şekil 3.2’de ANSI/AISC 341-16’de tanımlanan moment çerçevelerinin Moment-Birleşim Dönme diyagramı karşılaştırılmıştır.

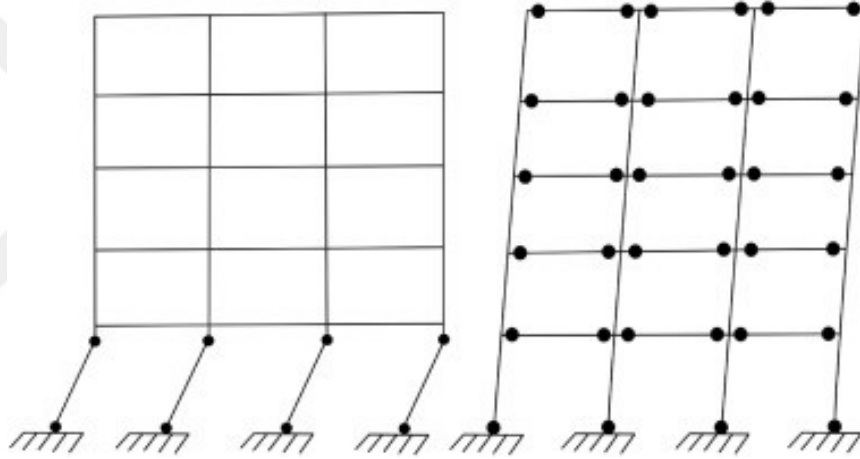


Şekil 3.2 : Moment aktaran çerçevelerin Moment-Birleşim Dönme diyagramı karşılaştırması

Moment aktaran çelik çerçeve sistemleri yüksek süneklik kapasitesine sahiptirler. Ancak Northridge ve Kobe depremlerinde moment aktaran çelik çerçeve sistemlerde gözlenen performans düşüklüğü birtakım kaygıları da beraberinde getirmektedir (Bkz. Bölüm1).

Moment aktaran çelik çerçeve sistemleri, deprem yükleri altında plastik mafsalların kolonlarda değil de kirişlerde oluşması halinde daha fazla histeretik enerjiyi sönümlerler. İstenmeyen bir durum olan ve kirişler yerine kolonlarda mafsallaşmanın oluşması halinde sistem mekanizma haline gelerek göçebilir. Plastik mafsalların kirişlerde oluşması halinde ise yapının toptan göçmesi önlenir. Bu durumda, plastik mafsalların kolonlardan ziyade kirişlerde oluşacak şekilde boyutlandırılmış olan çerçeve sistemlerine “güçlü kolon-zayıf kiriş sistemleri” adı verilir (Şekil 3.3).

Diğer bir deyişle güçlü kolon-zayıf kiriş ilkesiyle çelik çerçeve tasarımı için, o çerçevede bir düğüm noktasında birleşen kolon plastik moment kapasitelerinin toplamı, kiriş moment kapasitelerinin toplamından büyük olması koşulunu önermektedir (Uzgider, E., Çağlayan Ö. 2005).

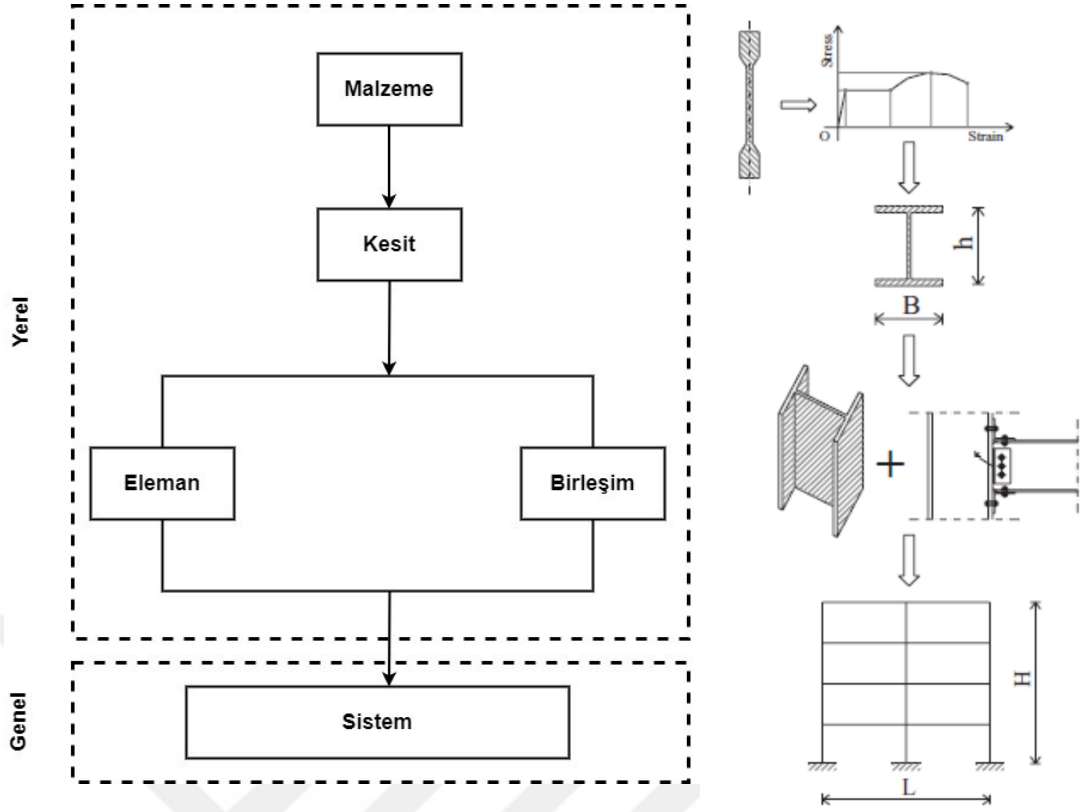


Şekil 3.3 : Moment çerçevesi mafsallaşma durumları (a) Kolon mekanizması (b) Kiriş mekanizması

Yerel ve genel yapısal tepki arasındaki hiyerarşik ilişki Şekil 3.3'te verilmiştir. Yerel yük - deformasyon özelliklerini genel tepki düzeylerine bağlayan nicel ifadeler, yalnızca idealleştirilmiş koşullar altında ve uygulama kapsamlarını sınırlayan bir dizi basitleştirici varsayım ile türetilmektedir.

Yerel-genel etkileşimin niteliksel değerlendirmesi ve belirli durumlara uygulanması, kontrollü sismik performansın merkezinde yer almaktadır.

Burada bir veya daha fazla elemanın akma durumuna gelmesi tüm sistemin yanıtı olarak değerlendirilemez ve bu nedenle mutlak bir sistem sınır durumu değildir.



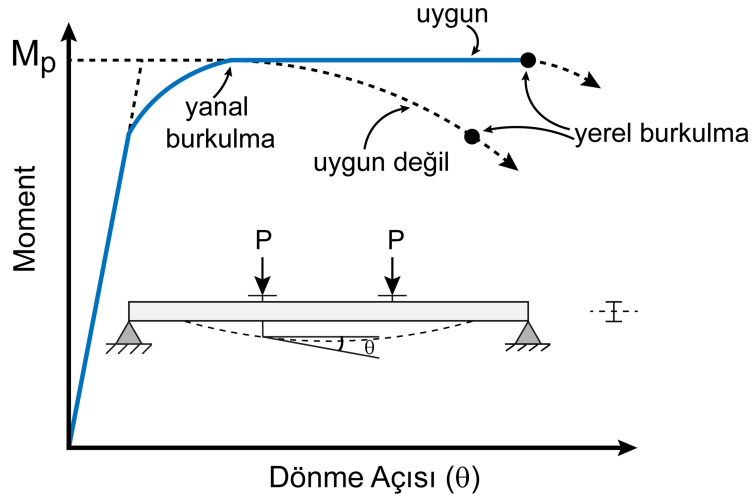
Şekil 3.4 : Yerel ve genel yapısal tepki arasındaki hiyerarşik ilişki (Elnashai, A., Sorno, L.D., 2008).

3.1.1. Kirişler

Çelik çerçeve sistemlerin yük taşıma kapasitesini etkileyen en önemli taşıyıcı sistem bileşenlerinden biri kirişlerdir. I kesite sahip çelik kirişlerde kayma gerilmeleri esas olarak gövde tarafından karşılanırken, eğilme gerilmeleri başlıklar tarafından karşılanır. Eğilme gerilmeleri ile kayma gerilmeleri değerlerinin aralarındaki etkileşim ihmal edilebilir mertebelerdedir. Ancak büyük gövde boşluklarının bulunması, kesitin kayma dayanımı önemli ölçüde azaltacağından, eğilme ve kayma gerilmeleri arasındaki etkileşim dikkate alınmalıdır.

Bu tür birleşik yüklemeler altında akma gerilmelerini hesaplayabilmek için Von Mises kriterini kullanmak uygundur.

Bir çelik kirişin tipik moment-açısal dönme eğrisi Şekil 3.5’de gösterilmektedir (Uzgider, E. Piroğlu, F., Deren, H., Çağlayan, Ö., 2002).



Şekil 3.5 : Çelik kirişin tipik moment-açısal dönme eğrisi

Çelik kirişlerde yük taşıma kapasitesinin kaybı, kiriş başlıklarında, gövde levhasında meydana gelen yerel burkulma ve yanal burkulma nedeniyle oluşur.

Kirişin ideal geometriye sahip olduğu ve yüklemenin tam olarak gövde düzeyinde yapıldığı ideal durum için, yanal stabilite kaybının başladığı limit yük, elastik yanal burulmalı, burkulma yükü olarak adlandırılır.

Deprem yükleri etkisi altındaki kirişlerde yanal burkulma çeşitli etkenlere bağlıdır. Bunlar:

- Kiriş başlıklarının düğüm noktasındaki durumu
- Eğilme momenti eğrisinin şekli
- Birleşim ayrıntısı
- Kirişi yanal burkulmaya karşı tutan yanal bağlantıların aralığı
- Kiriş uç noktaları arasında, kirişe bağlanan döşeme kirişleri

olarak sıralanabilir.

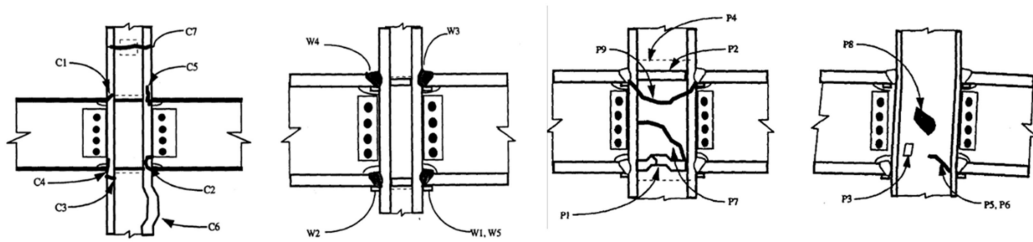
Çelik kirişlerde elastik olmayan davranıştan yararlanabilmek, eğilme sünekliğini yüksek tutabilmek için, yerel burkulmanın elastik bölgede oluşmasının engellenmesi gerekir (Uzgider, E., Çağlayan Ö. 2005).

3.1.2. Kolon-Kiriş Birleşimleri

Deprem dayanımı moment aktaran çerçeve sistemler ile sağlandığında, yatay yükler öncelikle kolon-kiriş birleşimleri ile taşınır. Bu birleşim noktalarında oluşacak gerilmeler oldukça fazladır.

Moment aktaran çerçeve sistemin çalışma prensibi çerçevenin taşıma sınır durumundan önce deprem enerjisini yutacak şekilde deformasyona uğramasıdır. Bu deformasyonların emniyetli sınırlar içinde olabilmesi özellikle birleşim bölgesindeki sünek davranışa bağlıdır. Aynı prensip betonarme çerçeve yapılar için de geçerlidir.

Şekil 3.6’da gösterildiği gibi, Northridge depreminden sonra yapılan incelemelerde kolon-kiriş birleşimlerinde meydana gelen hasarın kolonda, kaynakta ya da panel bölgesinde yoğunlaştığı gözlenmiştir.



Şekil 3.6 : Moment aktaran çerçevelerde birleşim bölgesinde oluşan hasarlar (a) Kolon başlığında oluşan hasarlar (b) Küt kaynakta oluşan hasarlar (c) Panel bölgesindeki yırtılma (d) Panel bölgesinde hasar tipi (Bruneau, M., Uang C.-M., Sabelli, R. 2011)

Northridge depreminden sonra moment çerçevelerinin düğüm noktalarını geliştirmek için öneriler getirilmiştir ve bunlar ülkelerin ilgili yönetmeliklere yansımıştır.

Bölüm 1.2’de de belirtildiği gibi Northridge sonrası moment çerçevesi birleşimleriyle ilişkili sorunları aşmak için genel anlamda iki temel yaklaşım gözetilmektedir. Bunlar:

- Birleşimlerin yük taşıma kapasitelerinin artırılması
- Birleşimde bulunan kirişlerin kapasitelerinin azaltılması

şeklindedir.

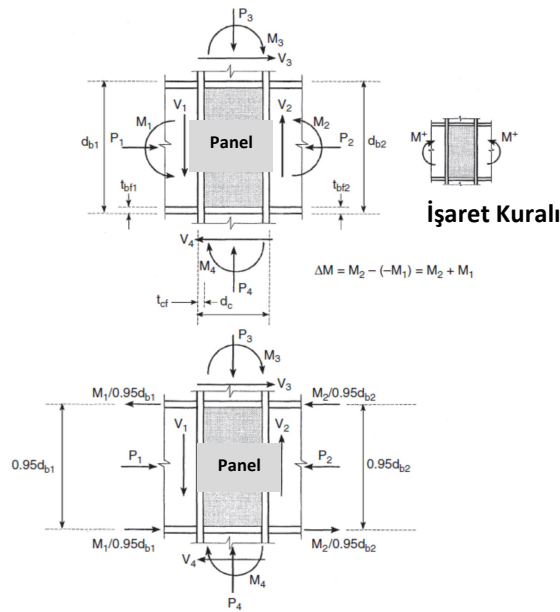
Tanımlanan tasarım prensipleri, birleşim elemanlarının, elastik olmayan şekil değiştirmelerin kiriş enkesitindeki akma nedeniyle meydana gelmesini sağlayacak yeterli dayanıma sahip olmaları esasına dayanmaktadır

3.1.3. Panel bölgesi

Moment aktaran türde kolon-kiriş birleşimlerinde diğer önemli bölge panel bölgesidir. Panel bölgesi, birleşime giren kiriş başlıklarının hizasında üstten ve alttan sınırlanmış kolon gövdesidir. Bu bölge, moment ve kesme kuvvetine karşı koyacak şekilde tasarlanır. Bunun için kayma bölgesinde takviye levhaları ve süreklilik levhaları kullanılmaktadır (Şekil 3.7).

Bununla birlikte, Northridge depremi sonrasında yönetmeliklerde yapılan birden fazla değişikliklerin yanı sıra (Lee ve diğerleri, 2005b'de özetlenmiştir), AISC 341 ve 358, panel bölgesindeki kesmenin kolon yüzünde etki eden momentlerden belirlenmesini gerektirir, kirişte oluşması beklenen plastik momentin plastik mafsallın pekleşmesini de göz önünde bulundurularak ve Bölüm 8.6'da sunulan serbest gövde diyagramlarıyla tutarlı bir şekilde projeksiyonu ile belirlenir.

Bu durumda, panel bölgelerinin gücü, amaçlanan nihai davranışın bir fonksiyonu olarak bağımsız olarak değerlendirilir.



Şekil 3.7 : Yatay yüklemeye maruz sünek, moment aktaran çelik çerçevenin panel bölgesine etki eden momentler, kesme kuvvetleri ve eksenel kuvvetler.

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE MODELİN DOĞRULANMASI

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislikteki çeşitli karmaşık problemlere çözüm getirmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Gerilme analizi, ısı transferi, akışkanlar mekaniği, elektrostatik ve elektrodinamik problemlerindeki sürekli, geçici, doğrusal veya doğrusal olmayan problemler sonlu elemanlar yöntemiyle çözülebilmektedir. Sınır elemanlar yöntemi, sonlu farklar yöntemi gibi sayısal çözüm yöntemleri içinde en çok kullanılanı ve en yaygın olanıdır. Yöntemdeki temel mantık, karmaşık bir mühendislik problemini, o problemi basite indirgeyerek çözmektir.

Sonlu elemanlar yöntemindeki çözüm bölgesi çok sayıda basit, küçük, birbirleriyle ilintili, sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemindeki bir diğer yaklaşım, sürekli fonksiyonları, bölgesel sürekli fonksiyonlarla ifade edebilmektir. Bu bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün, değeri o elemanın düğüm noktalarındaki değerler kullanılarak interpolasyon kullanılarak hesaplanmasıdır. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemindeki bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler düğüm noktalarındaki değerlerdir. Bir varyasyonel yaklaşım kullanılarak büyüklük alanının düğüm noktalarındaki değerleri için bir denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının matris formdaki genel gösterimi (4.1) ifadesi ile aşağıda verilmiştir.

$$[K][u]=[F] \quad (4.1)$$

Burada $[u]$ düğüm noktalarındaki bilinmeyenleri gösterir. $[F]$ yük matrisi, $[K]$ ise rijitlik matrisidir.

Günümüzde kullanılan sonlu elemanlar yönteminin kökleri, 1900'lerin başlarına kadar uzanmaktadır. Bu çalışmalarda ayrık eşdeğer elastik çubuklar modellenmiştir.

Sonlu eleman yöntemlerinin kullanımında bir sonraki önemli adım, Boeing şirketi tarafından 1950'lerde atılmış olup, uçak kanatlarını modellemek için üçgen gerilme elemanları kullanılmıştır. 1960'larda, araştırmacılar sonlu elemanlar yöntemini ısı transferi ve sızıntı problemleri gibi diğer mühendislik alanlarına uygulamaya başladılar. Zienkiewicz ve Cheung (1967), sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili ilk

kitabı yazmıştır. Bilgisayar teknolojilerinin ve yazılımlarının hızla gelişmesi, sonlu elemanlar yönteminin ilerlemesine önemli katkılar sağlamıştır.

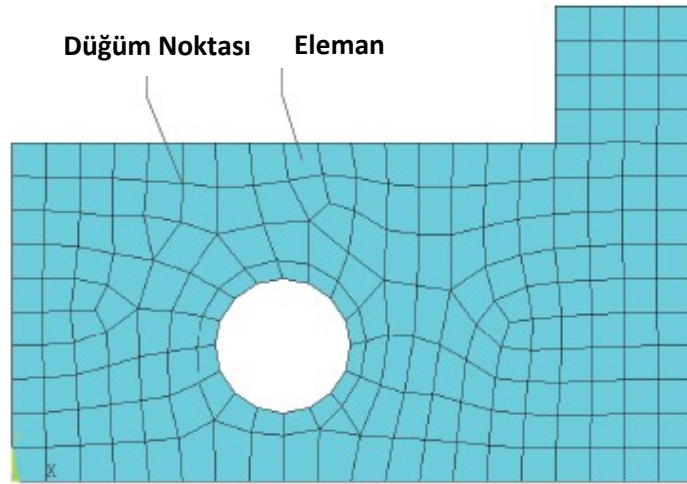
4.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulama Adımları

Sonlu elemanlar yönteminin adımları genel olarak Ön İşlemci (*Pre-Processing*), Çözüm (*Solution*), Son İşlemci (*Post- Processing*) aşamalarıdır.

4.2.1. Ön İşlemci (*Pre-Processing*) Adımı

Bu adım problemin geometrik modelinin ve sistemin sonlu eleman ağ yapısının oluşturularak çözüme hazır hale getirilmesidir.

- a) Modelleme: Sistemin geometrik yapısının oluşturulmasıdır. Karmaşık şekillerin boyutlandırılmasında çeşitli geometrik elemanlar vardır. Bu nesneler en küçük biriminden büyük olan birime doğru sırasıyla: nokta (keypoint), doğru (line), alan (area), hacim (volume) dir.
- b) Eleman Seçimi: Yapılan çözümleme türüne ve yapının geometrik şekline göre yapılır.
- c) Malzeme özelliklerinin belirlenmesi: Bu değerler, elastisite modülü, poisson oranı, kayma modülü, genleşme katsayısı gibi değerlerdir. Nonlineer malzeme özellikleri ise genelde plastisite, genleşme, hiperstatik malzeme verileri olarak tanımlanır.
- d) Sonlu eleman modeli ağ yapısı (*meshing*) oluşturma: Bu adım geometrik yapının önceden davranışı belirlenmiş belli sayıda elemana bölünmesidir. Yazılım tarafından ya da kullanıcı tanımlamasıyla oluşturulur (Şekil 4.1). Ağ yapısı, analiz için gerekli olan düğüm noktaları koordinatlarını ve düğüm noktaları numaralarını kapsar.



Şekil 4.1: Tipik sonlu elemanlar modeli

- e) **Yüklerin ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi:** Bu adım sisteme etkiyen yüklerin ve sınır şartlarının (serbestlik derecelerinin) belirlenmesidir.

4.2.2. Çözüm (*Solution*)

Çözüm adımı, yükleri ve sınır koşulları verilen bir modelin sonlu elemanları arasında kurulan denklemlerin çözülmesi ve sonuçların elde edilmesidir. Yazılımlarda sonlu elemanlar çözücüsü genel olarak üçe ayrılır. Bunlar ön çözümleyici, matematik motor ve son çözümleyicidir. Ön çözümleme aşamasında tanımlanan tüm ilgili parametreler ön çözümleyici tarafından kontrol edilir. Ön tanımlamalarda bir eksiklik varsa matematik motorun devreye girmesini engeller. Model doğruysa, son çözümleyici devreye girerek eleman rijitlik matrislerini oluşturur ve gerilme, yer değiştirme gibi değerleri hesaplayan matematik motoru çalıştırır.

4.2.3. Son İşlemci (*Post-Processing*)

Son işlemcide çözümleme sonucunda incelenen büyüklüğün düğüm noktalarındaki değerlerinden hareketle ikincil değerleri hesaplanır.

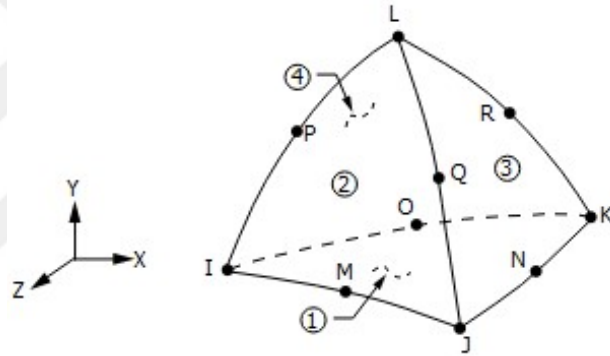
Bu çalışmada kullanılan ANSYS sonlu elemanlar yazılımı 1971'de kullanıma açılmıştır.

ANSYS, 100.000'den fazla kod satır içeren kapsamlı ve genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımıdır. Modelleme tekniği açısından çok çeşitli seçenekler sunar.

ANSYS ile, statik, dinamik, ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve elektromanyetik problemlerinin analizleri yapılabilmektedir.

ANSYS *Workbench* ise, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çok çeşitli mühendislik problemlerinin modellenmesini ve çözümünü sağlayan bir simülasyon platformudur. Entegre bir simülasyon ortamında ANSYS tasarım ve analiz modül ailesine erişim sağlar. Dolayısıyla sistemlerin modelleme tekniği, çalışmanın gereksinimlerine ve hedef olarak seçilen sonuç parametrelerine göre kişiselleştirilebilir.

Çalışmada, ANSYS *Workbench* sonlu elemanlar yazılımında, üç boyutlu 10 düğüm noktalı eleman kullanılmıştır (Şekil 4.2). Bu elemanın her düğüm noktası üç serbestlik derecesine sahip olup, x, y, ve z doğrultularında hareket serbestlikleri vardır.



Şekil 4.2 : Temel eleman

Bu eleman modeli, plastik, hiperelastik, sünme, pekleşme, büyük deformasyonlar ve büyük şekil değiştirmeler kapasitesine sahiptir. Eleman modelinin kullanılma nedeni, sistemde doğrusal formda profillerde dairesel kesimlerin olması, aynı zamanda profillerin başlık ve gövde birleşimlerinin de dairesel formda olması sebebiyle oluşacak düzensiz geometrilerin davranışını quadratik deplasman davranışıyla en iyi yansıtacak eleman tipi olmasıdır.

4.3. Modelin Doğrulanması

Pachoumis ve diğerleri (2009) tarafından zayıflatılmış kiriş enkesitli birleşim örneği (Şekil 4.3) deneysel olarak incelenerek, çözümlerin deneysel çalışmalarla örtüşüp örtüşmediği kontrol edilmiştir. Bu makalede, Avrupa'da yaygın olarak kullanılan

HEA profillerini kullanarak döngüsel yüklemeye tabi tutulan yarım daire kesimli ZKE moment çerçevelerinin deneysel çalışmasının sonuçları irdelenmiştir.

4.3.1. Numunelerin Tasarımı

Yukarıda adı geçen çalışmada RBS1 ve RBS2 olarak belirtilen iki tür örnek incelenmiştir. Numuneler HE 240A kiriş ve HE 300B kolonundan oluşmaktadır. Tablo 4.1’de çalışmada kullanılan ZKE’lerin geometrik karakteristikleri FEMA350/351 VE EC8’e göre verilmiştir.

Tablo 4.1 : Zayıflatılmış kiriş enkesitlerin geometrik karakteristikleri

FEMA 350 [1]/351 [13]	EC 8, Part 3[14]
$a=0.50-0.75b_f$	$a=0.60b_f$
$b=0.65-0.85d_b$	$b=0.75d_b$
$c \leq 0.25b_f$	$g \leq 0.25b_f$
$s=a+b/2$	$s=a+b/2$
$r=(4c^2-b^2)/8c$	$r=(4g^2-b^2)/8g$

a = Zayıflatılmış kesitten kolon yüzüne olan uzaklık

b = Zayıflatılmış kesitin boyu

b_f =Başlık genişliği

d_b =Kiriş yüksekliği

g = Başlık kesiminin derinliği

r = Üst ve alt başlıklardaki kesimin yarıçapı

s = Amaçlanan plastik mafsalın mesafesi

Bu numuneler ile “köpek kemiği” formu kiriş-kolon birleşimini meydana getirilmiştir. Birleşimde yüksek kaliteli kaynak kullanılmıştır.

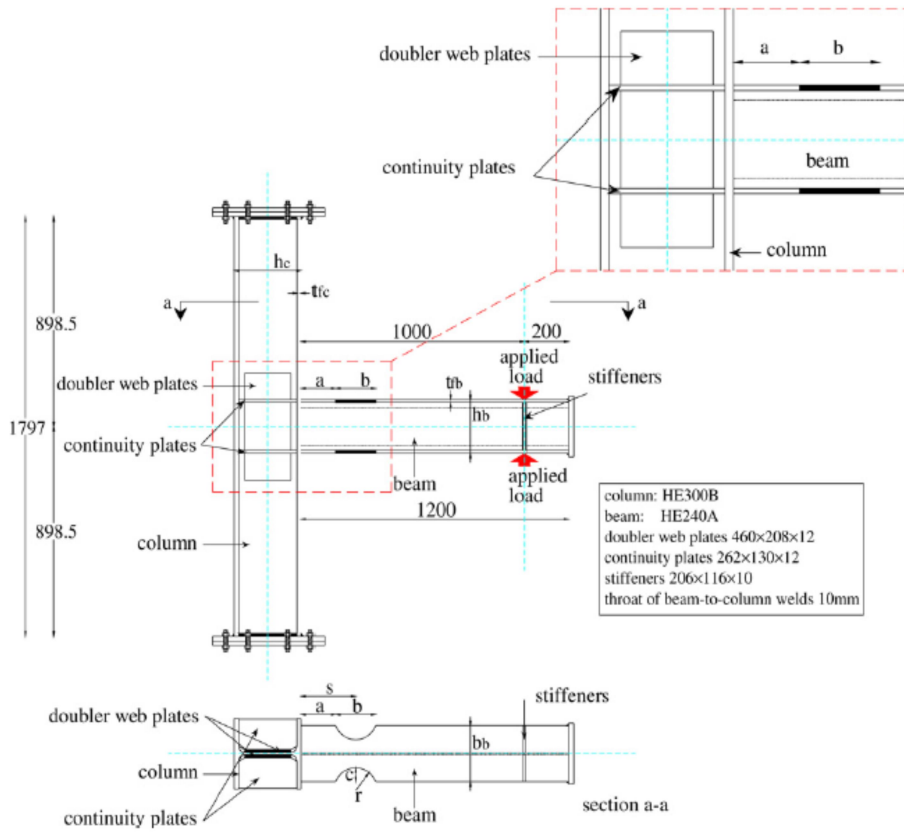
Kolonda, kiriş başlık kalınlığına eşit kalınlıkta çift gövde levhası ve süreklilik levhaları kullanılmış, böylece azaltılmış kesit bölgesinde plastik mafsal oluşumunu zorlaştıran güçlü bir panel bölgesi oluşturulmuştur.

Bu iki numune arasındaki fark, yarım daire kesimli geometrik parametrelerdedir. ZKE bağlantıları EC8, Bölüm 3 tarafından yapılan önerilere göre tasarlanmıştır. ZKE bölgesi için boyutlar Tablo 4.2’ de verilmiştir.

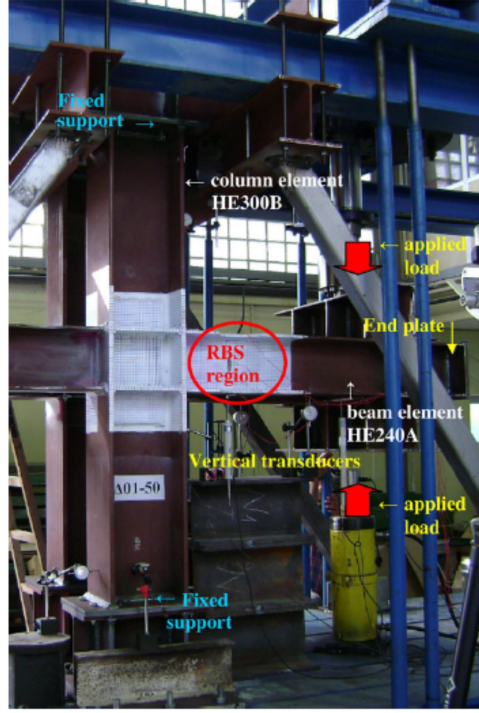
Tablo 4.2: Pachoumis ve diğ. (2009) deney numunelerinin özellikleri

Numune	b_f (mm)	d_b	a		b		g		s (mm)	r (mm)
			% b_f	(mm)	% d_b	(mm)				
RBS1	240	230	65	156	80	184	50	60	248	100.53
RBS2	240	230	65	156	80	184	30	36	248	135.56

Ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle de oluşturulan sonlu elemanlar modeli de deneysel çalışmadan elde edilenlerle karşılaştırılmıştır.

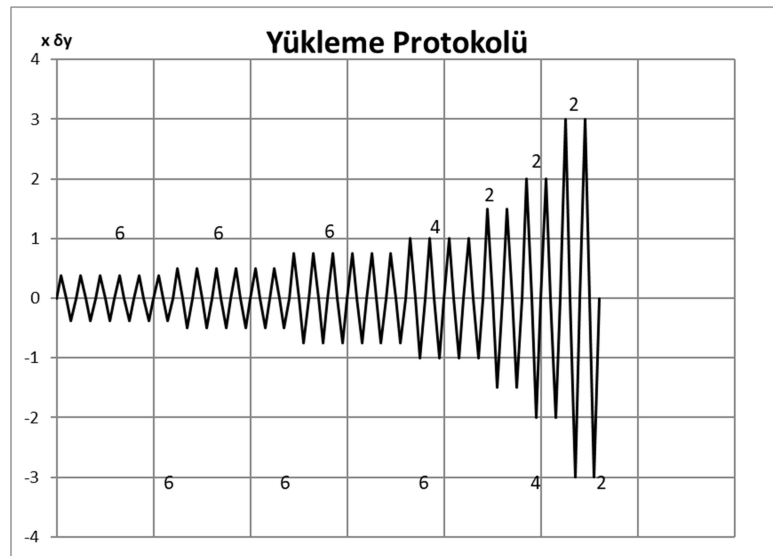


Şekil 4.3: Deney düzeneği (Pachoumis ve diğerleri, 2009)



Şekil 4.4 : Test düzeneğinin genel görünümü (Pachoumis ve diğerleri, 2009)

Çalışmada kolon yüzünden 1.0 metre mesafede kirişi ucunda düşey yönde tekrarlı çevrimsel deplasman yüklemesi yapılmıştır. Çevrimsel yüklemenin şiddeti, AISC *Seismic Provisions* (AISC 2002) deki yükleme protokolüne uygun olarak yapılmıştır. Bu protokol SAC (1997) yükleme protokolü ile aynıdır. Bu yükleme protokolü Şekil 4.5 ve Tablo 1’da gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : Yükleme protokolü (SAC)

Tablo 4.3 : Yükleme protokolü

Yük Adımı	Max deplasman	Tekrar sayısı
1	± 0.375	6
2	± 0.5	6
3	± 0.75	6
4	± 1.00	4
5	± 1.50	2
6	± 2.00	2
7	± 3.00	2

(Deplasman artışı her bir adımda δ_y kadar arttırılarak devam etmektedir.)

Çalışmada ZKE tekniği üzerine yapılan deneyler ve analizler aşağıdaki bulgulara ulaşmıştır:

Hem deneysel hem de sayısal sonuçlar, ZKE bölgesinde plastik mafsall oluştuğunda ZKE birleşiminin döngüsel performansının mükemmel olduğunu doğrulamaktadır.

Kaynak kırılması gözlenmemiştir. *RBS1* numunesi, tasarımın geçerliliğini destekleyerek, kırılma olmaksızın kabul edilebilir 0,03 rad plastik dönme değerinin üstüne ulaşmıştır.

“Sigorta” bölgelerinin varlığı, komşu bölgelere olan talepleri azaltır; bu durum, kirişin zayıflatılmış bölümünde plastik mafsallın oluştuğu *RBS1* numunesinde açıkça gözlenmiştir.

Sağlanan moment kapasitesinin talep değerinkine eşit olmasına izin vermek için birleşim etrafındaki kirişin başlıklarını kırarak, genişletilmiş bir plastik bölge elde edilebilir ve deformasyon kapasitesi iyileştirilebilir.

Yine EC8 tarafından yapılan önerilere göre tasarlanan *RBS2* numunesi çok zayıf performans göstermiştir. Akma, beklendiği gibi ZKE alanında değil, kolon yüzüne yakın kirişin alt başlığında gözlemlenmiştir.

EC8 tarafından benimsenen yarıçap kesimli ZKE tasarımı için temel parametreler, Avrupa profillerine güvenli bir şekilde uygulanabilmesi için yeniden ayarlanmalıdır.

Pachoumis ve diğerlerinin yaptığı deneysel çalışmalar başka araştırmacılar tarafından da çalışmalarını, deneysel sonuçlarla doğrulamak için kullanmıştır. Deneysel sonuçları karşılaştırmak için üç boyutlu malzeme ve geometri bakımından nonlinear sonlu elemanlar modeli katı (*Solid*) elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Deneyde kullanılan model malzeme ve sınır şartlarını sağlayacak şekilde modellenmiştir.

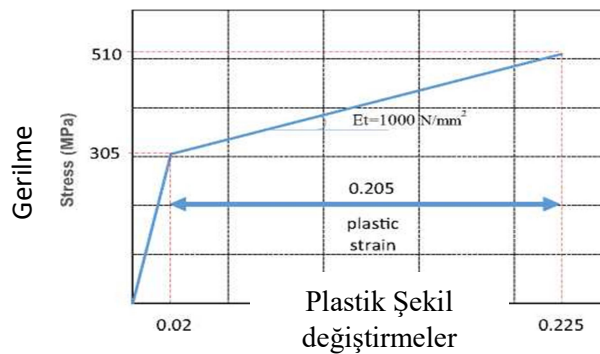
4.4. Modellemede Yapılan Kabuller

Çözümleme için kullanılan kolon kiriş birleşiminin, deney şartlarıyla uyum sağlaması için gerekli sınır şartları uygulanmıştır. Sonlu elemanlar modelinde kirişin serbest ucu uygulanan deplasman yönüne dik doğrultuda harekete karşı sınırlandırılmıştır. Kolon her iki ucundan hareket ve dönmeye karşı tutulmuştur.

4.4.1. Malzeme Özellikleri

Malzemede kinematik bilinear nonlinear malzeme özelliği kullanılmıştır. Kolon ve kiriş için aynı malzeme kullanılmıştır. Malzemenin, elastisite modülü $E = 207 \text{ GPa}$, kopma dayanımı $f_u = 510 \text{ MPa}$, akma gerilmesi $f_y = 305 \text{ MPa}$ ve tanjant modülü $E_t = 1000 \text{ MPa}$ olarak alınmıştır. Malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi Şekil.4.6’de verilmiştir.

Eğer malzemede birim şekil değiştirmelerdeki değişim belli bir yüzdeyi geçerse, deformasyondan dolayı geometri değişiminin de hesaplarda dikkate alınması gerekir. Bu etkileri dikkate alınarak yapılan analize büyük birim şekil değiştirmeli veya sonlu birim şekil değiştirmeli analiz adı verilir. Hesaplarda lineer olmayan şekil değiştirme etkilerini de dikkate alacak seçenekler ANSY Workbench programında etkinleştirilmiştir.



Şekil 4.6 : Analizde kullanılan gerilme-şekil değiştirme diyagramı

4.5. Doğrulama Çalışması

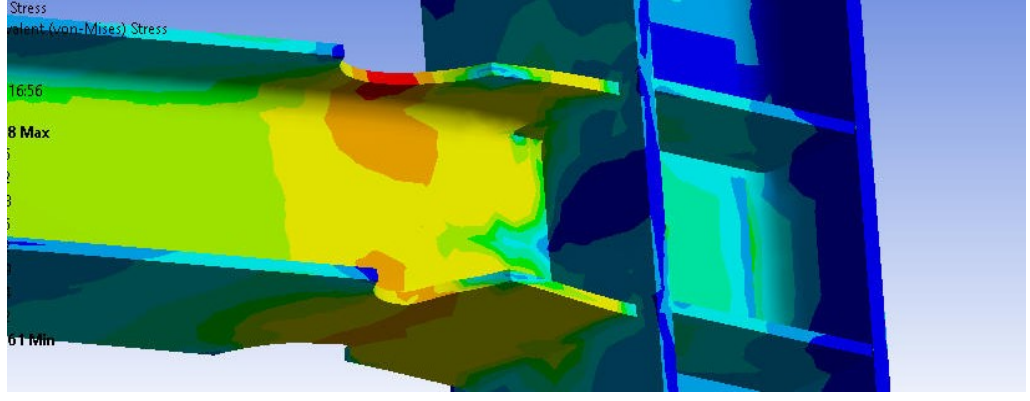
Tüm analizleri gerçekleştirmeden önce modelleme tekniği, yapılan kabuller sonlu elemanların hassasiyeti gibi birçok parametre analiz sonunda elde edilen sonuçların ne doğrultuda gerçeği yansıttığını göstermektedir. Bunu görebilmek adına daha önce yapılan deneysel ve teorik çalışmaların benzer modelini oluşturarak sonuçlarını karşılaştırmak gerekmektedir.

Bunun için, yukarıda verilen, Pachoumis ve diğ. tarafından yapılan deneysel çalışmada kullanılan sistem aynen modellenerek sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada oluşturulan modelden elde edilen sonuçların Pachoumis ve ekibi tarafından yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen değerlerle örtüştüğü görülmektedir. Bu da çalışmada kullanılacak diğer modellerin analizleri sonucunda elde edilecek değerlerin deneysel yapılacak değerlerle kabul edilebilir doğrulukta olduğunu göstermektedir.

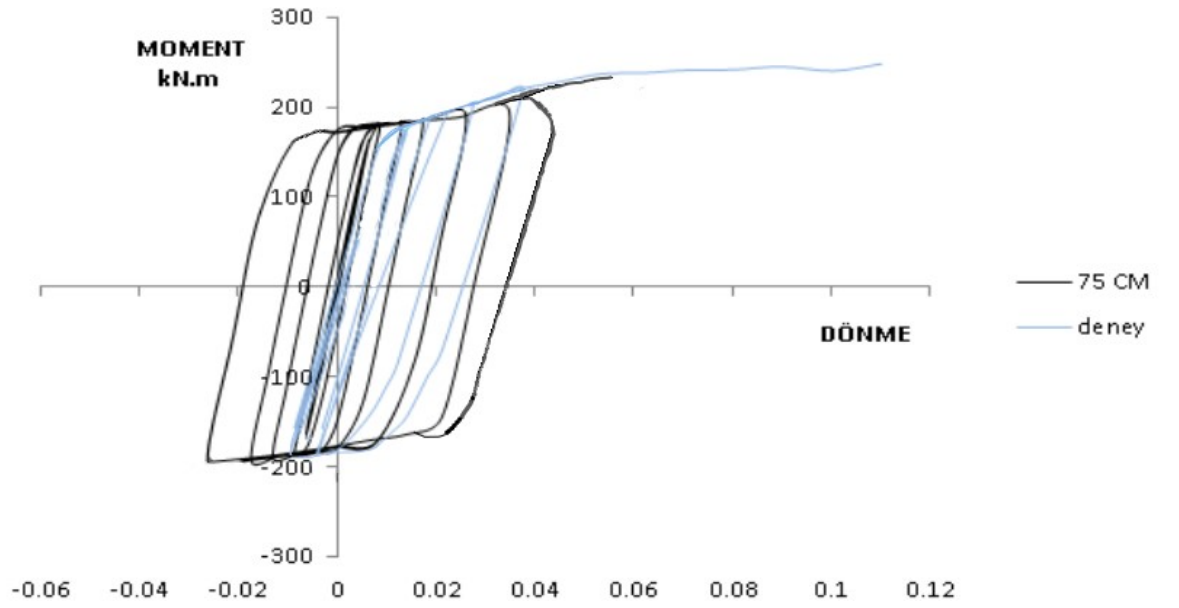
Deneysel çalışmada elde edilen maksimum moment değeri 220 kNm iken çalışmada sonlu elemanlar analizinde bulunan maksimum moment değeri 214 kNm'dir. Şekil 4.7 de Pachoumis ve ekibi tarafından yapılan çalışmanın deney sonucundaki deforme olmuş birleşimin fotoğrafını ve Tsavdaridis ve diğ. tarafından yapılan sonlu elemanlar analizinden elde edilen von Misses gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 4.8 de ise bu çalışmada sonlu elemanlar analiz sonucundan elde edilen von Misses gerilme dağılımı gösterilmiştir. İki sonuç karşılaştırıldığında sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7 : SAC yükleme protokolü , Pachoumis ve diğ. tarafından yapılan deney fotoğrafı, ve sağ resimde Tsavdaridis ve diğ. yaptığı analitik çalışmanın görüntüsü



Şekil 4.8 : Tez çalışmasında elde edilen von Misses gerilme dağılımı



Şekil 4.9 : Tez çalışmasında elde edilen Moment-Dönme eğrisi ile deneysel çalışmadan elde edilen moment eğrilik grafiğinin karşılaştırılması (Kolon yüzünden 75 cm mesafede)

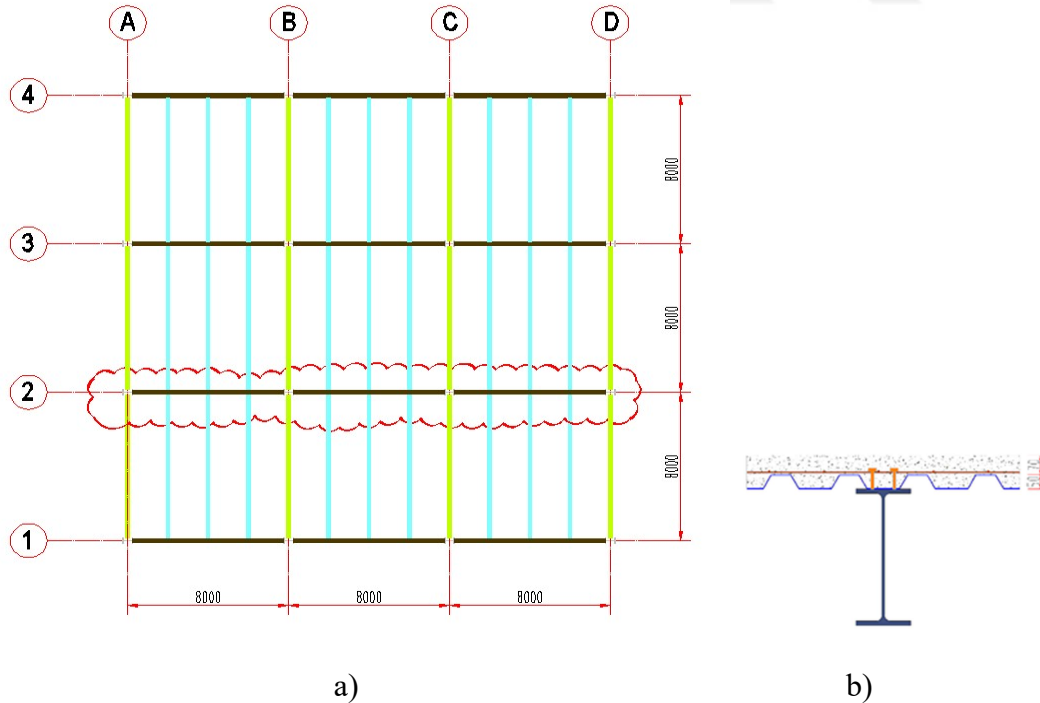
Şekil 4.9’ da D.T.Pachoumis ve diğerleri tarafından yapılan deneysel çalışmadan elde edilen moment eğrilik grafiği ile bu çalışmada elde edilen eğrilik grafiği karşılaştırılmıştır. Doğrulama için kullanılan deneysel sonuçlar ile analitik çalışmadan elde edilen sonuçlar birbirine yakın değerler verdiği için, analitik çalışmada yapılan kabullerin ve modellemelerin belli bir yeterlikte doğru olduğu kabul edilmiştir.

5. ÇERÇEVE ÇÖZÜMLEMELERİ

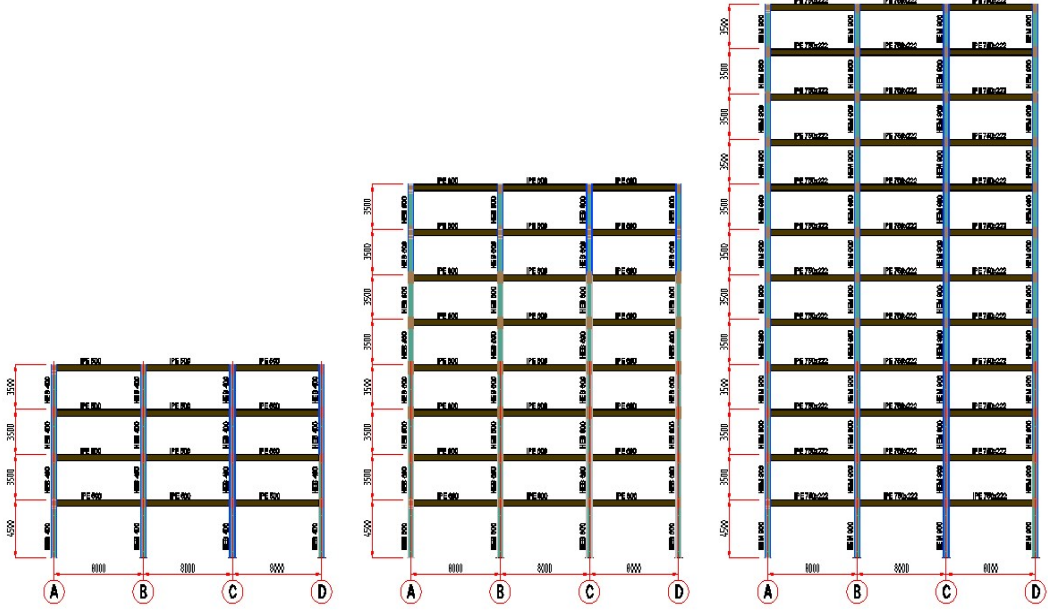
Birleşim modellerine geçmeden önce çerçeve modelleri üzerinde çalışılmıştır. Çerçeve modelleri üzerinde yapılacak çalışmanın konu üzerine önemli katkıları olacağı düşünülerek, birleşim modellerinden önce çerçeve modellerinin çözümlemeleri yapılmıştır. Çerçeve modelleri üzerinde farklı birleşim tipleri için itme analizi (*pushover*) yapılarak farklı davranış durumları incelenmiştir.

Gövdesinden azaltılmış kiriş kesitli birleşimlerin yatay yük taşıma kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca yatay kuvvet etkisinde ZGE birleşimlerin kolon yüzündeki gerilme ve şekil değiştirmelere olan etkisi irdelenmiştir.

Çerçeveler için oluşturulan parametrik modellerde 4, 8 ve 12 katlı çelik moment çerçeveleri kullanılmıştır. Şekil 5.1’de tipik plan ve tipik döşeme kesiti Şekil 5.2’de boyuna kesitler verilmiştir. Çerçeveler TDBY, (2018) ve Çelik Yapılar Yönetmeliği, (2016) esaslarına göre çözülüp tasarlanmıştır. Çözümleme ve tasarımla ilgili ayrıntılar Ek:A’da yer almaktadır.



Şekil 5.1: a) Yapının planı, b) Tipik döşeme enkesiti



Şekil 5.2 : 4, 8 ve 12 katlı çelik moment çerçeveleri

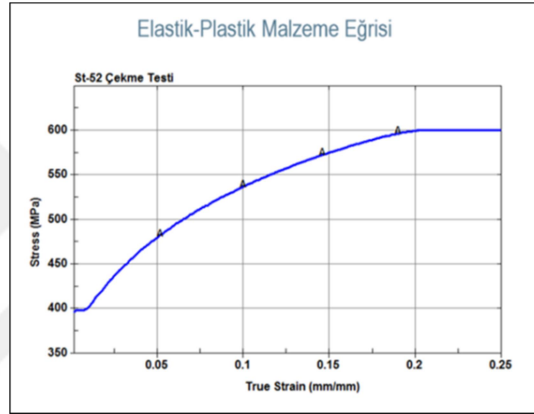
Çerçevelerin tasarımında, Avrupa ve Türkiye’de sıkça kullanılan profil çeşitleri seçilmiş, yukarıda bahsedilen yönetmeliklere uygun olarak kolon ve kirişler boyutlandırılmıştır. Kolonlar HEB ve HEM sınıfından kirişler ise IPE sınıfından profillerle oluşturulmuş, birleşimlerindeki kirişler başlıklarından ve gövdesinden zayıflatılarak elde edilen moment çerçeveleri sonlu elemanlar çözümlmeleri yapılarak irdelenmişlerdir. Birleşimde zayıflatma çapının ve yerinin etkilerini görmek amacıyla farklı çaplardaki zayıflatmaların kolon yüzüne göre çözümleri yapılmıştır.

5.1. Malzeme ve Çerçevelerin Özellikleri

Modellemede kullanılan malzemenin karakteristik özellikleri Tablo 5.1 de verilmektedir. Malzemenin gerilme birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 5.3’te verilmiştir. Bu hesaplamalarda tek yönlü itme analizi (*pushover*) yapıldığından, elemanlarda oluşacak gerilme değişimlerine göre uygun malzeme modeli olarak *multilineer izotropik hardening* malzeme modeli kullanılmıştır. Malzeme ile ilgili gerilme birim şekil değiştirme değerleri, çelik bir yapı için kullanılacak profillerden alınmış numune örneğinin laboratuvarında çekme deneyinden elde edilmiş test değerleridir.

Tablo 5.1 : Malzeme karakteristik değerleri

Elastisite Md	200000	MPa
Poisson Oranı	0.3	
Birim Şek.Değ	Gerilme	
0	400	MPa
0.05	480	MPa
0.1	540	MPa
0.15	575	MPa
0.2	600	MPa



Şekil 5.3 : Malzemenin gerilme- şekil değiştirme eğrisi

Sonlu elemanlar analizinde ANSYS 20 R2 programı kullanılmıştır. Kolon ve kirişler Shell elemanlarla modellenmiştir. Burada SHELL 181 eleman tipi kullanılmıştır.

Tablo 5.2 : Çerçevelerin özellikleri

#	Kat Sayısı	DoE Set						
		D			M			
		0.5*Hkiriş	0.65*Hkiriş	0.8*Hkiriş	0.5*Hkiriş	0.75*Hkiriş	1*Hkiriş	1.25* Hkiriş
1	4 KATLI	300			300			
2			390		300			
3				480	300			
4		300				450		
5			390			450		
6				480		450		
7		300					600	
8			390				600	
9				480			600	
10		300						750
11			390					750
12				480				750
13	8 KATLI	300			300			
14			390		300			
15				480	300			
16		300				450		
17			390			450		
18				480		450		
19		300					600	
20			390				600	
21				480			600	
22		300						750
23			390					750
24				480				750
25	12 KATLI	300			300			
26			390		300			
27				480	300			
28		300				450		
29			390			450		
30				480		450		
31		300					600	
32			390				600	
33				480			600	
34		300						750
35			390					750
36				480				750

Tablo 5.2 çerçeve matrisinde D ile delik çapı ve M ile delik merkezinin kolon yüzüne olan uzaklığı ifade edilmiştir. Delik çapı için kiriş yüksekliğine bağlı olarak, kiriş yüksekliğinin sırasıyla 0.50, 0.65 ve 0.80 katı çapta boşluklar alınmıştır. Her bir farklı boşluk çapı için kolon yüzüne olan uzaklığı yine kiriş yüksekliğinin 0.50, 0.75, 1.00 ve 1.25 katı uzaklık alınarak 36 farklı çerçeve modellenmiştir.

Bölümün başında da belirtildiği gibi parametrik çalışmaya konu olan çerçeveler 4 katlı, 8 katlı ve 12 katlı olmak üzere 3 farklı kat grubundan oluşmaktadır. 4 katlı çerçevelerin kolonları HE400A, kirişleri IPE600, 8 katlı çerçevelerin kolonları HEM600 kirişleri IPE600 ve 12 katlı çerçevelerin kolonları için HEM900 kirişleri içinde IPE750 kesitler kullanılmıştır. Bu kesitlerin seçiminde TBDY2018 ve Çelik

Yapılar 2016 yönetmelikleri kullanılmıştır. Hesap ayrıntıları EK-1 kısmında verilmiştir.

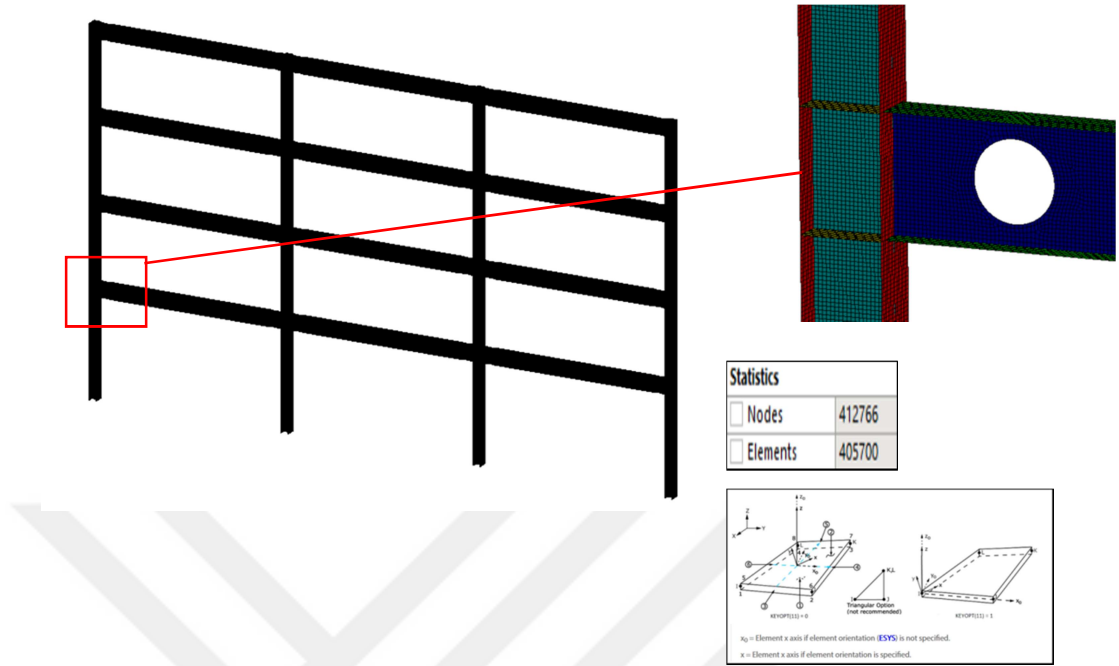
Tablo 5.3 : Çerçevelerin yükleri

Toplam Yük (kN)		1800	3600	8000
Kat Tipi		4 katlı	8 katlı	12 katlı
Kat	1	221400	122400	128000
Kat	2	396000	216000	232000
Kat	3	568800	306000	320000
Kat	4	613800	403200	424000
Kat	5	0	493200	528000
Kat	6	0	586800	632000
Kat	7	0	684000	736000
Kat	8	0	792000	832000
Kat	9	0	0	936000
Kat	10	0	0	1040000
Kat	11	0	0	1120000
Kat	12	0	0	1200000

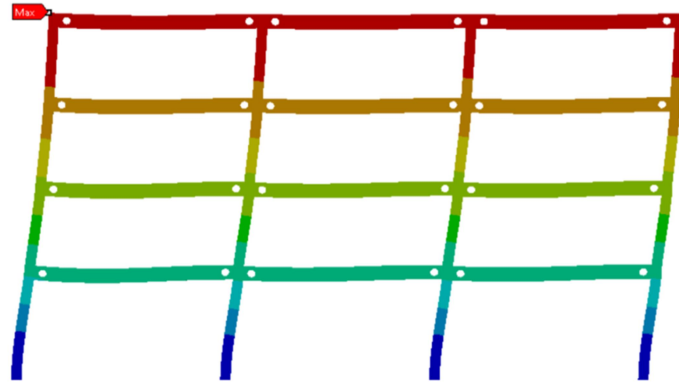
Tablo 5.3'te çerçevelere uygulanan yüklerin katlara göre dağılımı ve toplam değeri görülmektedir. Çerçevelerin boyutlandırılması sırasında deprem yüklerinin katlara dağıtılması deprem yönetmeliğine uygun olarak yapılmıştır. Yükler çerçeveye aşamalı olarak uygulanmıştır. Her kattaki deprem yükü küçük bir değerden başlayarak aynı oranda aşamalı olarak arttırılmıştır. Yukarda verilen deprem yüklerinin dışında çerçevelerde doğal olarak sabit ve hareketli yükler de vardır.

Normal kat kirişlerinde 42,75 kN/m sabit yük, 16,00 kN/m Hareketli yük alınmıştır. Çatı katında bu değer 38,40 kN/m sabit, 12 kN/m hareketli yük alınarak hesaplara yansıtılmıştır. Düşey yükler çerçeveye deprem yükünden önce ön yük olarak uygulanmıştır. Hesaplamalar sırasında 2. mertebe etkilerinin de dikkate alınması için büyük deplasman etkileri etkinleştirilmiştir. Dört katlı çerçeve için toplam 1800 kN yük uygulanmıştır. Bu yük ($1800/16=112,5$ kN) her adımda 112,5 kN arttırılarak etkitilmiştir.

5.2. Dört Katlı Çerçeveler



Şekil 5.4 : Dört katlı çerçeve modeli



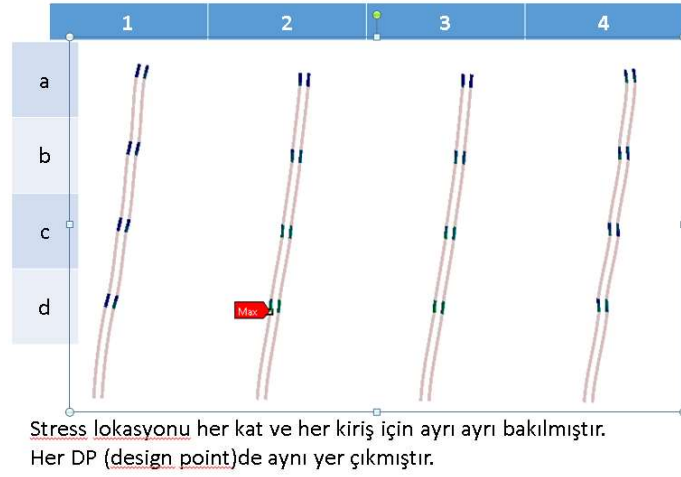
Şekil 5.2 : Şekil değiştirmiş 4 katlı ZGE çerçeve

Dört katlı çerçevelerde kolonlarda HEB400, kirişlerde IPE600 profil kullanılmıştır. 4 katlı tüm çerçevelerin birleşiminde panel bölgesinde kolon gövdesinde kiriş başlık hizasında 20 mm kalınlıkta süreklilik levhaları kullanılmıştır. Gövdedeki zayıflatmanın panel bölgesindeki etkisinin daha net anlaşılabilmesi için panel bölgesinde gövde takviye levhaları kullanılmamıştır.

Şekil 5.4 de görülen örnekte 412766 düğüm noktası 405700 eleman sayısı bulunmaktadır. Bu değer her çerçeve de farklı olmakla birlikte kat sayısı arttıkça kat

sayısı oranının üzerinde bir değerde artmaktadır. Doğal olarak düğüm noktası ve eleman sayısının artışına bağlı olarak hesaplama süresi de katıyla artmaktadır.

En fazla plastik deformasyonların görüldüğü bölgede tüm çerçeve tipleri için sonuçlar değerlendirilmiştir. Şekil 5.6 da 1. katta ortadaki kolon kiriş birleşim bölgesinde tüm çerçevelerin çözümlerinden ortaya çıkan en büyük değerler bu bölgenin kritik olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.6 : Değerlendirme yapılan bölge

Tablo 5.4 : Başlangıç yükünün on katı yük için gerilme ve deformasyon değerleri

Table of Design Points									
1	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Name	P1 - Delik_Cap	P2 - Delik_Uzaklık	P3 - Directional Deformation Maximum	P4 - Force Reaction Maximum X Axis	P5 - Equivalent Stress Maximum	P6 - Equi... Plastic Strain Max...	Retain	Retained Data
2	Units	mm	mm	mm	N	MPa	mm mm ⁻¹		
3	DP 0 (Current)	300	300	83.865	-1E+05	391.44	0.0016957	☒	☒
4	DP 1	390	300	84.588	-1E+05	400.03	0.0016948	☒	☒
5	DP 2	480	300	88.252	-1E+05	398.33	0.012256	☒	☒
6	DP 3	300	450	83.944	-1E+05	386.59	0.0016461	☒	☒
7	DP 4	390	450	84.74	-1E+05	388.9	0.0015498	☒	☒
8	DP 5	480	450	88.121	-1E+05	391.56	0.010614	☒	☒
9	DP 6	300	600	83.945	-1E+05	384.72	0.0016855	☒	☒
10	DP 7	390	600	84.732	-1E+05	384.87	0.0016247	☒	☒
11	DP 8	480	600	87.835	-1E+05	382.83	0.0094645	☒	☒
12	DP 9	300	750	83.933	-1E+05	384.22	0.0017056	☒	☒
13	DP 10	390	750	84.693	-1E+05	383.76	0.0016691	☒	☒
14	DP 11	480	750	87.528	-1E+05	380.85	0.0081059	☒	☒
15	DP 12	434.94	524.18	85.623	-1E+05	386.81	0.0031256	☒	☒
*								☐	

Tablo 5.4'den başlangıç yükünün 10 katı yükleme sonucunda ($10 \times 112,5 = 1125$ kN) elde edilen eşdeğer gerilme ve plastik şekil değiştirme değerleri görülmektedir. Ayrıca bu yükleme sonucunda tepe ötelenmesi değeri D sütununda verilmiştir. Bu

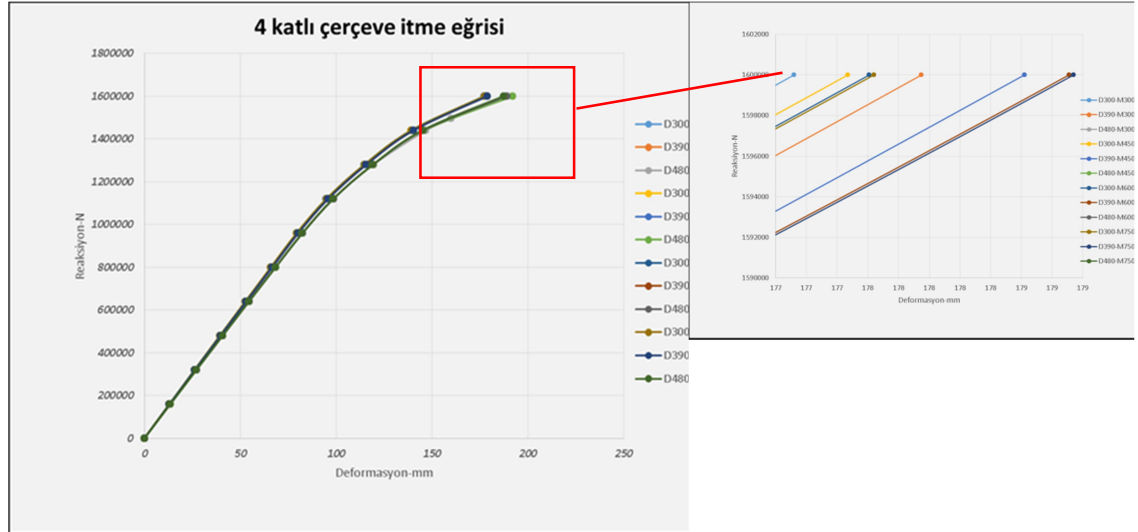
tablonun B sütunu delik çapını C sütunu delik merkezinin kolon yüzüne olan uzaklığını göstermektedir.

Onbeşinci satırda rastgele bir delik çapı ve kolon yüzüne uzaklık mesafesi için değerler verilmiştir. Bu değerler, analiz sonuçlarını kullanarak bulunan delik çapı ve delik merkezi uzaklığını değişken olarak alan denklem kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 5.5 : Başlangıç yükünün 16 katı yük için gerilme ve deformasyon değerleri

Table of Design Points									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	P1 - Delik_Cap	P2 - Delik_Uzaklık	P3 - Directional Deformation Maximum	P4 - Force Reaction Maximum X Axis	P5 - Equivalent Stress Maximum	P6 - Equi... Plastic Strain Max...	Retain	Retained Data
2	Units	mm	mm	mm	N	MPa	mm mm^-1		
3	DP 0 (Current)	300	300	177.12	-1.6E+05	404.74	0.0097474	☒	☒
4	DP 1	390	300	177.95	-1.6E+05	405.51	0.0097803	☒	☒
5	DP 2	480	300	198.56	-1.6E+05	405.91	0.067774	☒	☒
6	DP 3	300	450	177.47	-1.6E+05	404.6	0.0097806	☒	☒
7	DP 4	390	450	178.62	-1.6E+05	407	0.0098469	☒	☒
8	DP 5	480	450	192.24	-1.6E+05	405.06	0.048837	☒	☒
9	DP 6	300	600	177.61	-1.6E+05	404.13	0.0097948	☒	☒
10	DP 7	390	600	178.91	-1.6E+05	404.54	0.0098787	☒	☒
11	DP 8	480	600	189.09	-1.6E+05	402.84	0.035449	☒	☒
12	DP 9	300	750	177.64	-1.6E+05	404.07	0.0097972	☒	☒
13	DP 10	390	750	178.94	-1.6E+05	404.12	0.0098842	☒	☒
14	DP 11	480	750	187.34	-1.6E+05	402.98	0.029043	☒	☒

Tablo 5.5'te son yükleme durumunda kritik kesitteki gerilme ve deformasyon değerleriyle birlikte çerçevenin maksimum öteleme değeri görülmektedir.

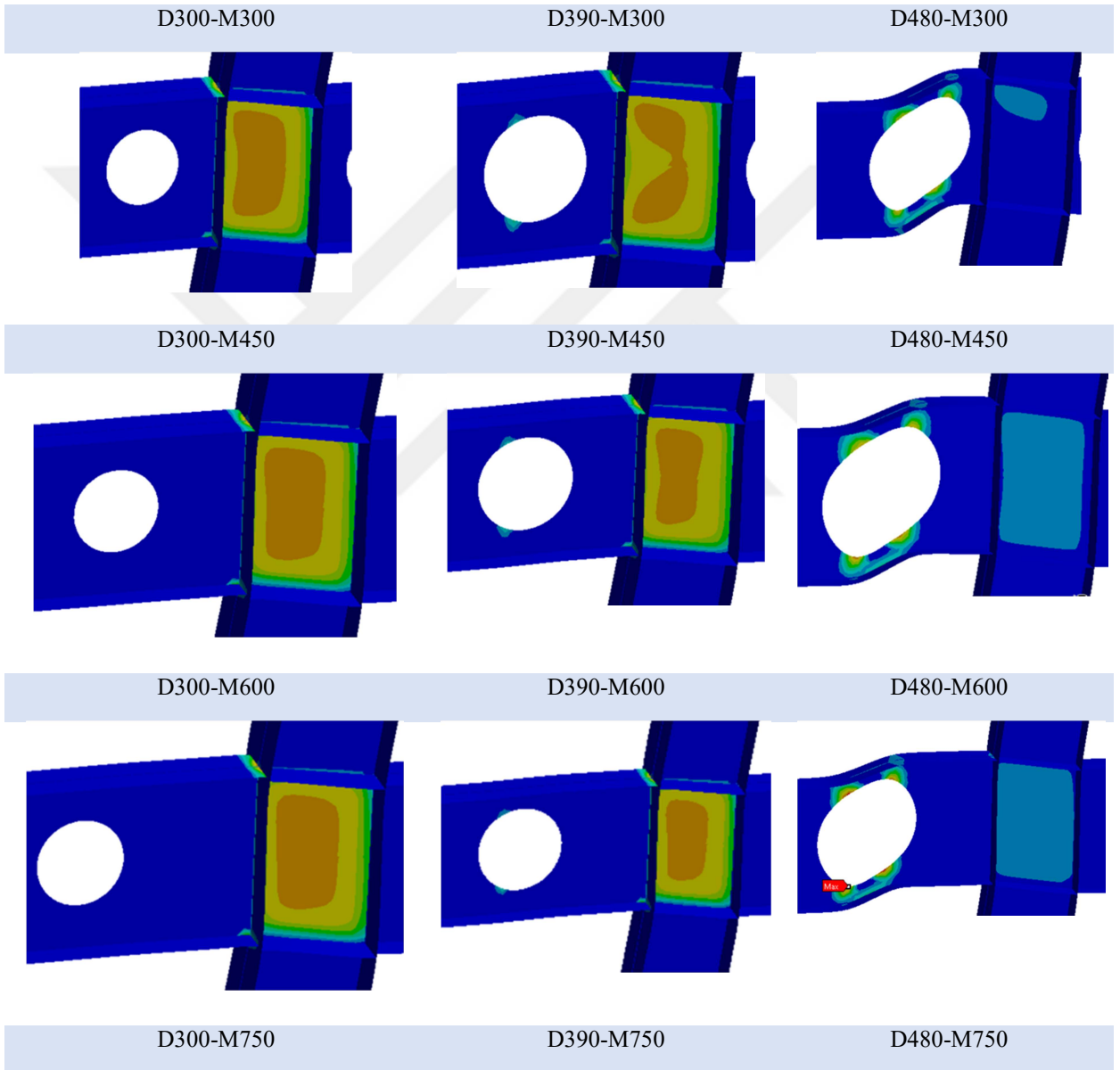


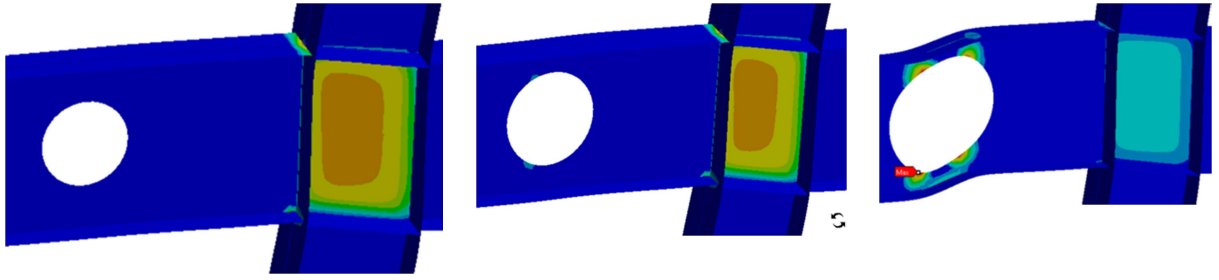
Şekil 5.7 : Dört katlı çerçevelerin itme eğrileri

Şekil 5.7'deki itme eğrisi grafiğinden delik çapı büyüdükçe ötelemelerin arttığı görülmektedir. Burada azaltma çapı kiriş yüksekliğinin 0.50 ve 0.65 katları için büyük farklar olmamakla birlikte delik çapının 0.80 katı için fark artmaktadır.

Zayıflatma merkezinin kolon yüzüne olan uzaklığının davranışa olan etkisi delik çapının etkisi kadar değildir.

Dört katlı çerçevelerin çözümlerinden elde edilen gerilme değerleri *Cornerstone* yazılımı ile değerlendirilerek zayıflatma çapı (D) ve zayıflatma merkezinin kolon yüzüne uzaklığı (M) değerleri ile gerilmenin değişimini veren bir denklem elde edilmeye çalışılmıştır. Burada çıkarılan denklem $D/h_{kiriş}$ ve $M/h_{kiriş}$ değişimleri üzerinden genelleştirilebilir.





Şekil 5.8: Dört katlı çerçevelerin kritik birleşim bölgesinde eşdeğer plastik deformasyon dağılımı

Plastik şekil değiştirmeleri gösteren Şekil 5.8'den, azaltma çapının artmasıyla kolonda ve birleşimde gerilmelerin azaldığı ve maksimum gerilmenin delik çevresinde olduğu görülmektedir. Küçük azaltma çapları için, azaltmanın etkisi kolon yüzünden uzaklaştıkça birleşimdeki gerilme değişimi üzerine etkisi kaybolmaktadır. Azaltma çapı büyüdükçe kolonda ve birleşim bölgesindeki gerilmeler düşmektedir. Delik çapının artmasıyla delik çevresindeki plastik deformasyonlar da artmaktadır. Delik çevresinde simetrik bir şekilde dört bölgede oluşan plastik deformasyonların düşeyle yaptığı açı yaklaşık olarak $25\sim 30^\circ$ aralığındadır. Küçük çaplarda, kolon yüzünden uzaklaştıkça kolon yüzündeki gerilmeler artmakta gövdedeki zayıflatmanın etkisi ise azalmaktadır.

Tablo 5.6 : Dört katlı çerçeveler için etkileşim katsayıları

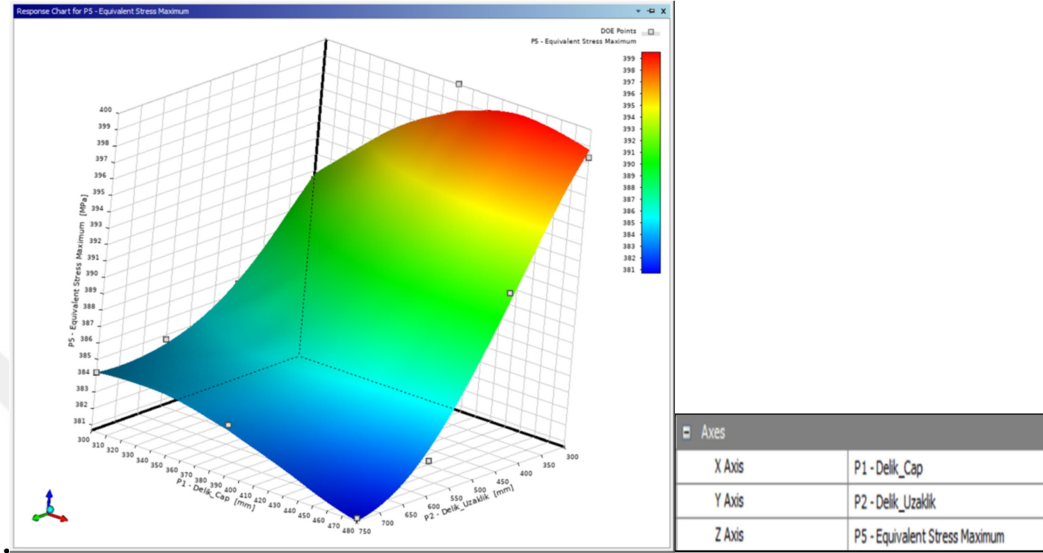
6:6	1 Term	2 Coefficient	3 Std Error	4 T-Value	5 Significance	6 VIF
1	Constant	358.536	16.9034	21.21	0.0000	0.0000
2	P1 - Delik_Cap	0.250783	0.0821995	3.05	0.0186	15.1746
3	P2 - Delik_Uzaklik	-0.0529074	0.0221063	-2.39	0.0479	9.1824
4	P1 - Delik_Cap^2	-0.000216435	0.000103069	-2.10	0.0739	14.8351
5	P1 - Delik_Cap * P2 - Delik_Uzaklik	-0.000139272	3.27617e-05	-4.25	0.0038	6.2642
6	P2 - Delik_Uzaklik^2	7.30130e-05	1.70292e-05	4.29	0.0036	7.4952

Girdi	P1 - Delik_Cap	480			
	P2 - Delik_Uzaklik	300			
Çıktı	Terim	Katsayılar	Hesap		
	P1	0.250782768	120.3757		
	P2	-0.052907391	-15.8722		
	P1^2	-0.000216435	-49.8665		
	P1*P2	-0.000139272	-20.0551		
	P2^2	7.3013E-05	6.571174		
	C	358.236	358.236		
				Sv=	399.389

Tablo 5.6'da verilen katsayılardan oluşan bağıntı yazıldığında (5.1) ifadesi elde edilmiş olur. Burada elde edilen katsayılar yukarıda yükleme durumu ve özellikleri verilen çerçeveye ait değerlerdir. Etkileşim tablosunda verilen sabit ve katsayı değerleri yüklemenin şiddetine göre değişecektir. Böyle bir ifade elde etmekteki

amaç ZGE kirişlerin davranışlarını öngörmektir. Farklı çerçeveler içinde çeşitli örneklemeler yapılarak bu tür birleşimler için genellemeler yapılabilir.

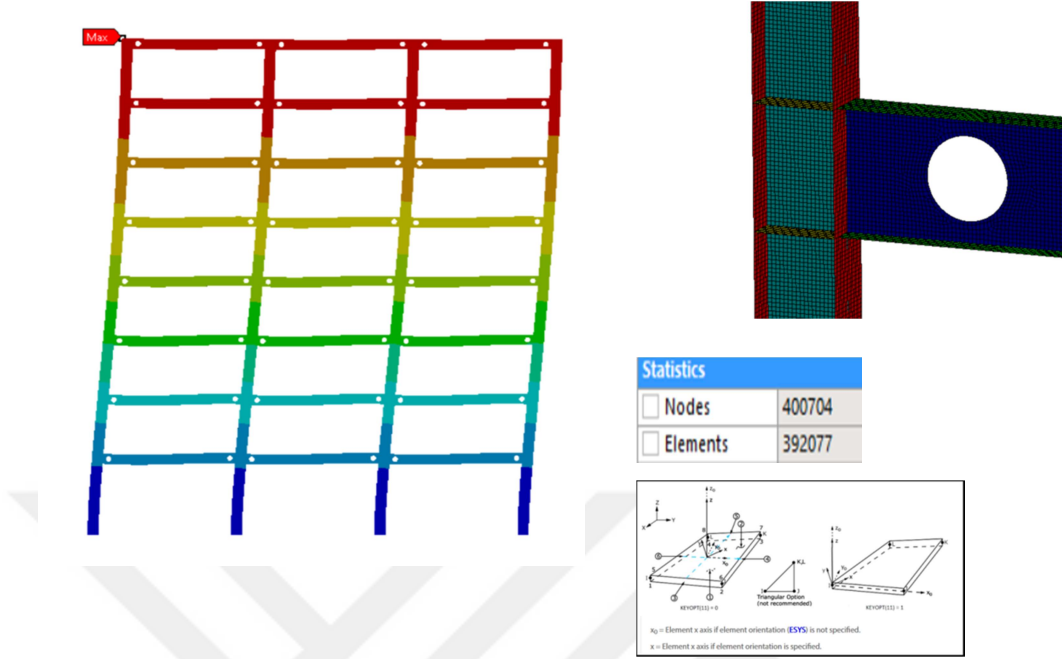
$$\sigma = C + 0,250782768.D - 0,05529074.M - 0,000216435.(D)^2 - 0,000139272.(D.M) + 0,000073013.(M)^2 \quad (5.1)$$



Şekil 5.9 : Etkileşim yüzeyi (4 katlı çerçeve için)

Şekil 5.9'daki etkileşim yüzeyinde eksenlerden biri boşluk çapını, diğeri boşluğun merkezinin kolona uzaklığını ve üçüncü eksen de gerilme değerini göstermektedir. Etkileşim yüzeyinden azaltma çapı ve kolon yüzüne olan uzaklık değişimleriyle gerilmenin değişimi gösterilmiştir.

5.3. Sekiz Katlı Çerçevesler



Şekil 5.10 : Şekil değiştirmiş 8 katlı ZGE çerçeve

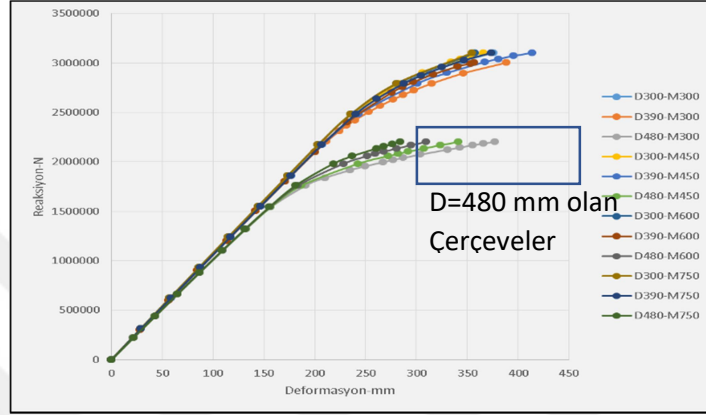
Sekiz katlı çerçevenin çözümünde ortalama 400.000 üzerinde düğüm noktası ve yaklaşık 400.000 civarında sonlu eleman kullanılmıştır. Bu çözümlemede de SHELL 181 eleman tipi kullanılmıştır. İkinci mertebe etkilerini dikkate alan analiz seçeneği etkinleştirilmiştir

Tablo 5.7: Sekiz katlı çerçevenin yükleme adımları

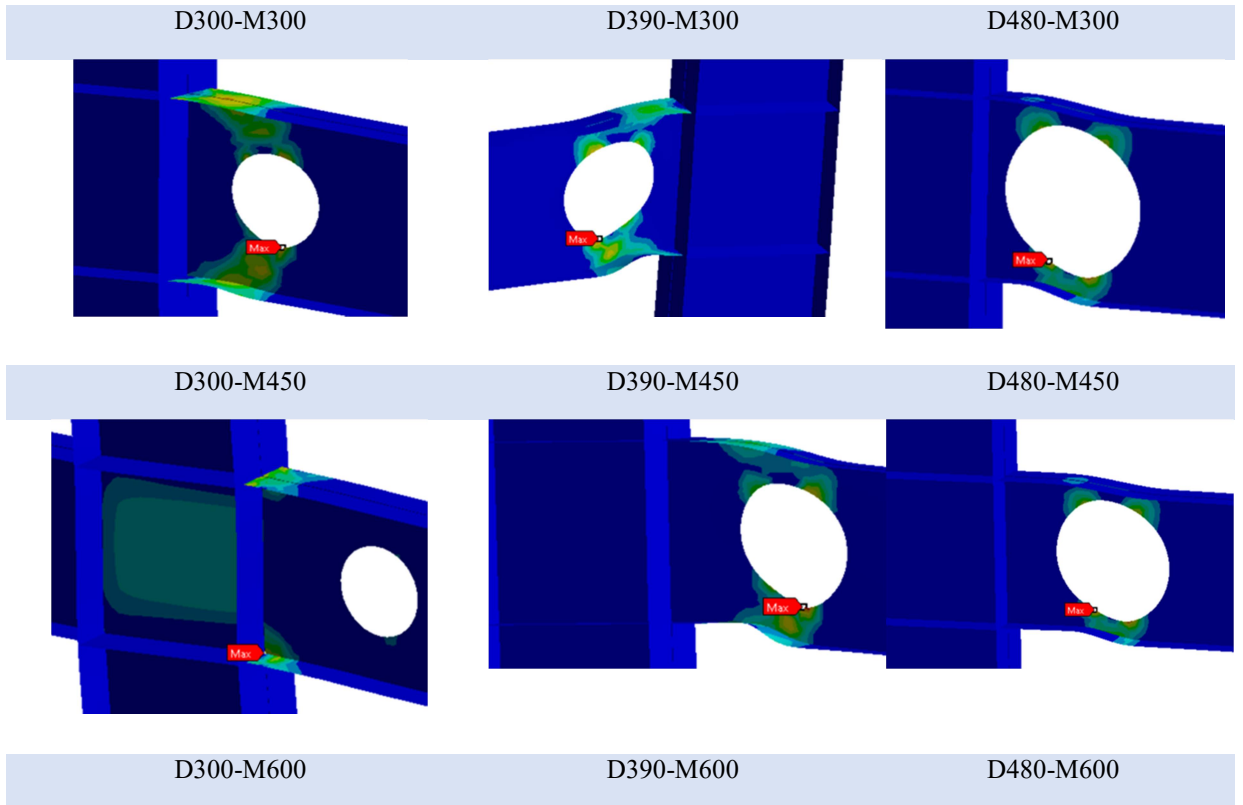
Yan Yükleme			
8 Katlı (N)			
1	22	30	31
3400	74800	102000	105400
6000	132000	180000	186000
8500	187000	255000	263500
11200	246400	336000	347200
13700	301400	411000	424700
16300	358600	489000	505300
19000	418000	570000	589000
22000	484000	660000	682000

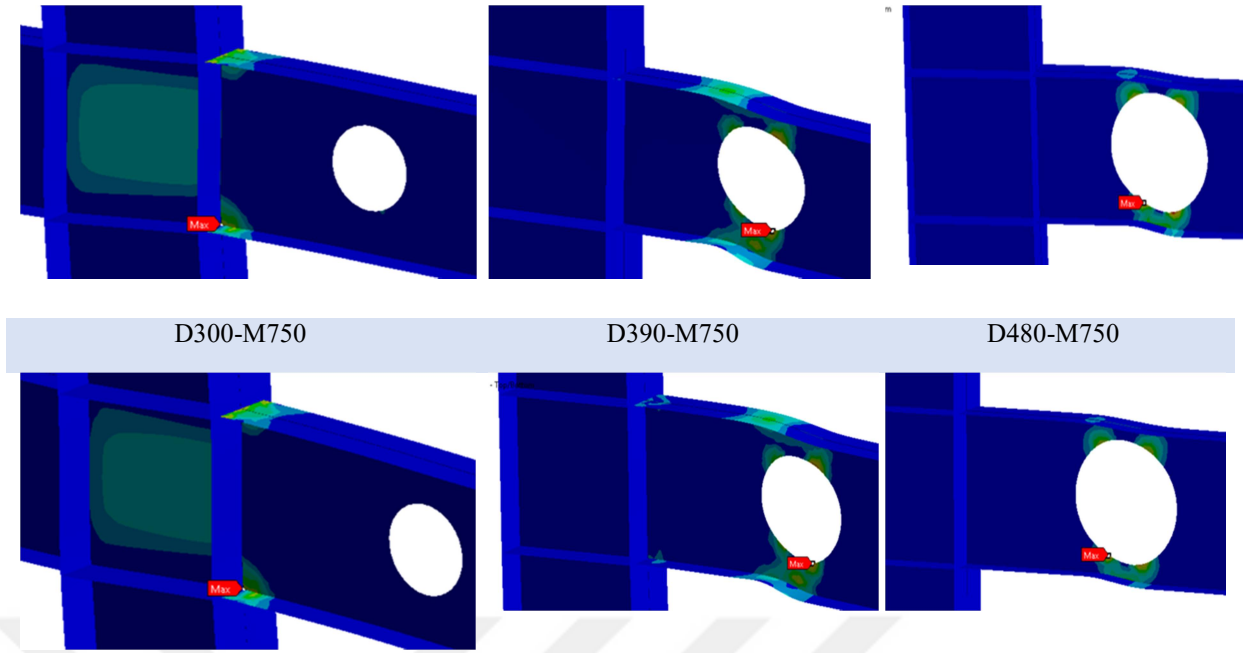
Tüm çerçevelerde olduğu gibi 8 katlı çerçevelerin analizinde de yüklemeler adım adım yapılmıştır. Başlangıçta düşey yüklerle yüklenmiş, arkasından yatay yükler

kademeli olarak arttırılmıştır. Tablo 5.7 de başlangıç yüküyle birlikte 22., 30. ve 31. adımdaki yükler verilmiştir. Bu adımlar çerçeveler için son yükleme adımlarıdır. Toplam taban kesme kuvvetinin katlara dağılım oranı sabittir. Benzer şekilde Şekil 5.12’den görüldüğü gibi D300-M450 kesit için maksimum deformasyonlar kolon yüzünün dışında delik çevresinde ve kiriş bölgesinde iken D300-M600 ve D300-M750 kesitlerde maksimum deformasyonlar kolon yüzünde ve civarında görülmektedir.



Şekil 5.11: Sekiz katlı çerçevelerin itme eğrileri





Şekil 5.12: Sekiz katlı çerçevelerin kritik birleşim bölgesinde eşdeğer plastik deformasyon dağılımı

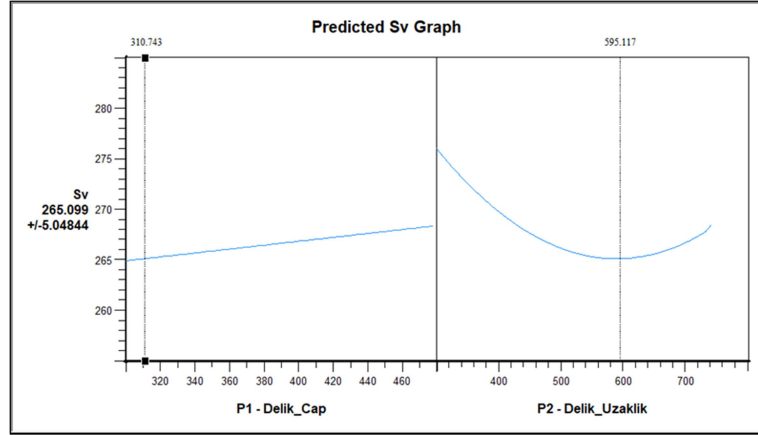
Tablo 5.8: Sekiz katlı çerçevede gerilme ve deformasyon değerleri

1	Name	P1 - Delik_Cap	P2 - Delik_Uzaklık	P4 - Equivalent Plastic Strain Maximum	P5 - Directional Deformation Maximum	P6 - Force Reaction Maximum X Axis	P7 - Equi... Stress 2 Max...	P8 - Equivalent Stress Maximum	Retain	Ret	Force x
2	Units	mm	mm	mm mm ⁻¹	mm	N	MPa	MPa			
3	DP 0 (Current)	300	300	0.0046504	208.17	-2.2022E+05	403.45	274.16	☒	☒	31
4	DP 1	390	300	0.012022	216.18	-2.2022E+05	399.85	282.39	☒	☒	30
5	DP 2	480	300	0.18685	377.17	-2.2022E+05	398.87	296.86	☒	☒	22
6	DP 3	300	450	0.0042943	208.05	-2.2022E+05	399.38	268.85	☒	☒	31
7	DP 4	390	450	0.0094257	213.68	-2.2022E+05	403.01	271.46	☒	☒	31
8	DP 5	480	450	0.15434	341.61	-2.2022E+05	398.21	275.36	☒	☒	22
9	DP 6	300	600	0.0042806	207.95	-2.2022E+05	399.31	267.06	☒	☒	31
10	DP 7	390	600	0.0074094	212.54	-2.2022E+05	399.29	267.53	☒	☒	30
11	DP 8	480	600	0.12205	309.86	-2.2022E+05	400.4	267.6	☒	☒	22
12	DP 9	300	750	0.0042947	207.88	-2.2022E+05	399.29	266.59	☒	☒	31
13	DP 10	390	750	0.0058858	211.97	-2.2022E+05	399.26	266.5	☒	☒	31
14	DP 11	480	750	0.10423	284.64	-2.2022E+05	396.06	265.6	☒	☒	22
15	DP 12	434.94	524.18	0.021885	224.83	-2.2022E+05	403.82	269.78	☒	☒	31

Tablo 5.8’de 8 katlı çerçeveler için kritik birleşim bölgesinde oluşan maksimum gerilme, birim şekil değiştirme, çerçevede maksimum tepe ötelenmesi değerleri olarak verilmiştir. Tablonun sağ tarafında ise bu değerlerin başlangıç yükünün kaç katı yüklemeye olduğunu göstermektedir.

Çerçevelerin tamamında aynı yatay yük değerine kadar yükleme yapılamamıştır. Bunun nedeni belli bir yükten sonra kesit üzerindeki deformasyon değerlerinin artışı dolayısıyla analizin durmasıdır. Sekiz katlı çerçevelerin itme eğrilerinden azaltma çapının D=480 mm (D/h=0.85) olması durumunda, D=300 mm (D/h=0.5) ve D=390

mm ($D/H=0.65$) olması durumlarına göre yatay yük taşıma kapasitesindeki farkın daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.13 : Azaltma çapı ve uzaklığına bağlı gerilme değişimi

Yukarıda verilen Şekil 5.13 kolon kiriş birleşim bölgesinde kiriş başlığını kolona bağlayan kaynak bölgesindeki gerilme değişimini vermektedir (Şekil 6.15 a) da path2 ile tanımlanan bölge). Gövdedeki azaltmanın kaynak bölgesindeki gerilmelerin azalmasında etkisi olmaktadır. Kolona yakın bölgede azaltma çapı arttıkça gerilmelerde artış gözlenmekte fakat azaltmayı kolondan uzaklaştırdıkça gerilme düşmektedir. Delik merkezinin kolon yüzüne olan uzaklığı arttıkça yine bu bölgede gerilme değeri düşmekte fakat $M/h=1$ değerinden sonra gerilme tekrar artmaktadır. Sanki $M/h=1$ değerinden sonra azaltma etkisini azaltmaya başlamaktadır. Bu durumda delik merkezinin kolon yüzüne uzaklığı için $M/h = 1$ en uygun uzaklık olarak görülmektedir.

Tablo 5.9 : Sekiz katlı çerçeveler için etkileşim katsayıları

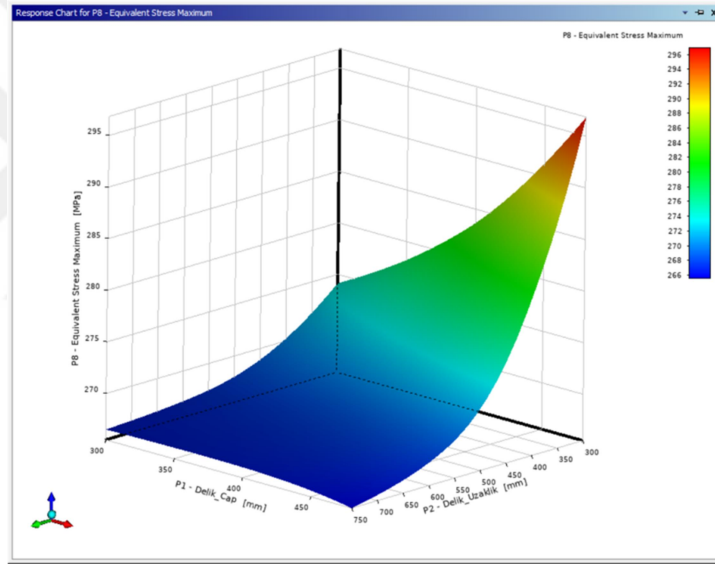
Sv Coefficient Table						
1	2	3	4	5	6	7
Constant	251.657	12.9958	19.36	0.0000	0.0000	
P1 - Delik_Cap	0.189214	0.0283659	6.67	0.0002	3.3293	
P2 - Delik_Uzaklik	-0.0651853	0.0347043	-1.88	0.0972	9.1649	
P1 - Delik_Cap * P2 - Delik_Uzaklik	-0.000285375	5.15298e-05	-5.54	0.0005	6.2642	
P2 - Delik_Uzaklik^2	0.000130484	2.67071e-05	4.89	0.0012	7.4735	

Calculator - 8 Katlı				
Girdi	P1 - Delik_Cap	480		
	P2 - Delik_Uzaklik	300		
Çıktı	Terim	Katsayılar	Hesap	
	P1	0.189214	90.82272	
	P2	-0.06519	-19.5556	
	P1^2	0	0	
	P1*P2	-0.00029	-41.094	
	P2^2	0.00013	11.74356	
	C	251.657	251.657	
				Sv= 411.0032

Cornerstone yazılımıyla yapılan değerlendirmeler sonrası elde edilen Adj R square değerinin 1'e yakın olması hata oranının çok küçük olduğu anlamına gelmektedir.

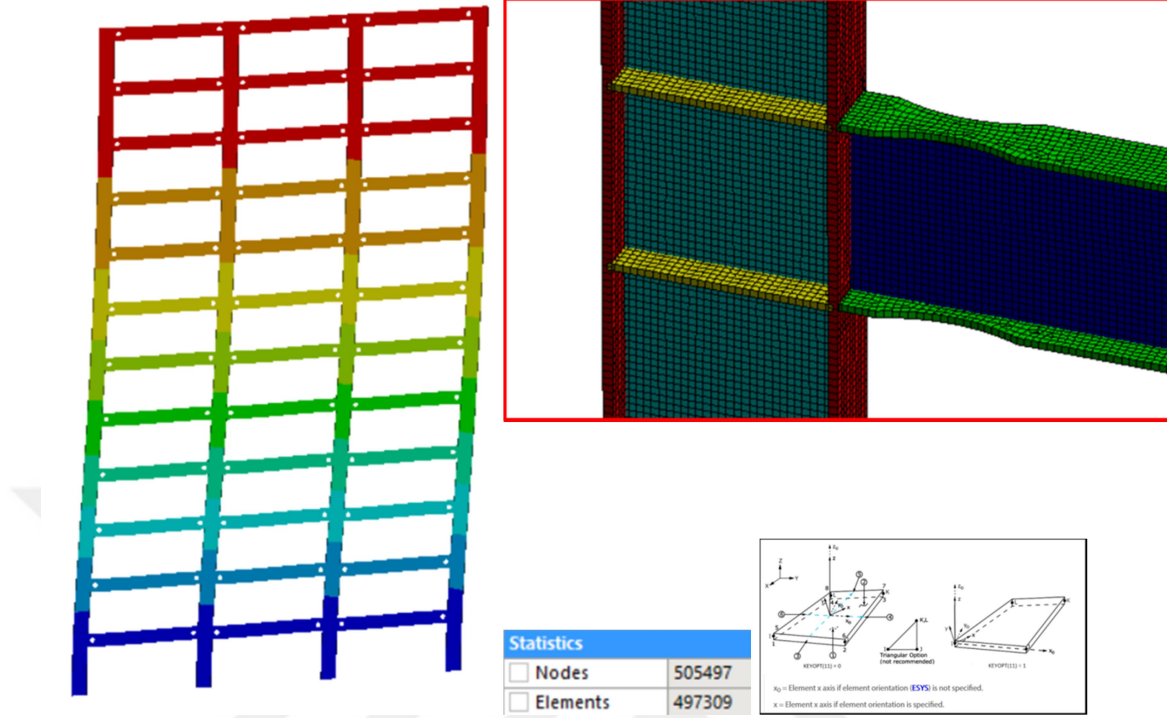
Tablo 5.9 da verilen sonuç değerlerinden elde edilen katsayılar yerine yazıldığında (5.2) denklemi elde edilmektedir.

$$\sigma = C + 0,189214.D - 0,06519.M - 0,00029.(D.M) + 0,00013.(M)^2 \quad (\text{Mpa}) \quad (5.2)$$



Şekil 5.14: Etkileşim yüzeyi (8 katlı çerçeve için)

5.4. Oniki Katlı Çerçeveler



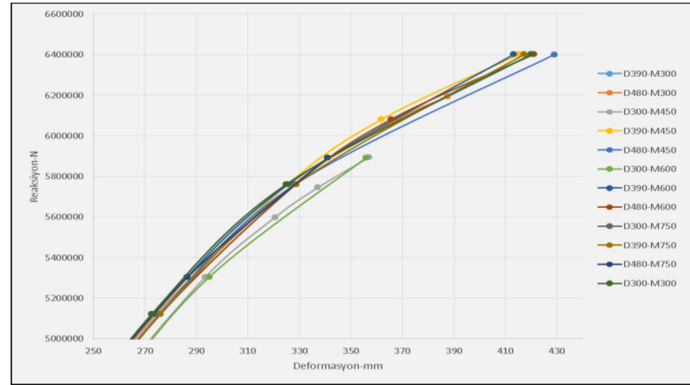
Şekil 5.15: Şekil değiştirmiş 12 katlı ZKE çerçeve

Oniki katlı çerçevelerin çözümünde ortalama 500.000 üzerinde düğüm noktası ve yaklaşık 500.000 civarında sonlu eleman kullanılmıştır. Tüm hesaplarda olduğu gibi burada da SHELL 181 eleman tipi kullanılmıştır. İkinci mertebe etkilerini dikkate alan seçenek etkinleştirilmiştir.

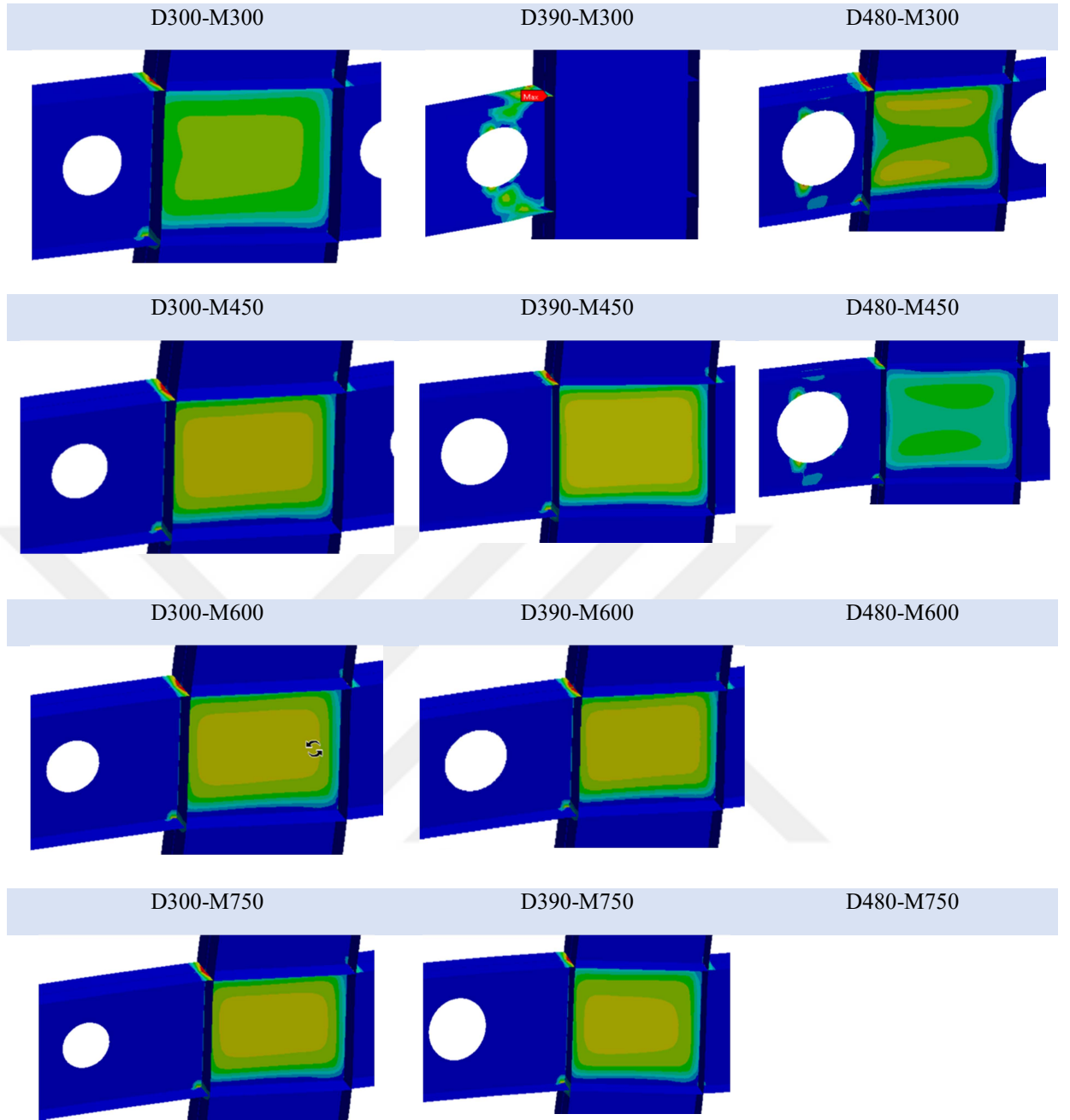
Tablo 5.10: Oniki katlı çerçeve yükleme adımları

12 katlı (N)		
1	58	63
1600	92800	100800
2900	168200	182700
4000	232000	252000
5300	307400	333900
6600	382800	415800
7900	458200	497700
9200	533600	579600
10400	603200	655200
11700	678600	737100
13000	754000	819000
14000	812000	882000
15000	870000	945000

Diğer çerçevelerde olduğu gibi 12 katlı çerçeve çözümünde de yüklemeler adım adım yapılmıştır. Başlangıçta düşey yüklenmiş, arkasından yatay yükler kademeli olarak arttırılmıştır. Tablo 5.10 da başlangıç yüküyle birlikte 58. ve 63. adımdaki yükler verilmiştir. Bu adımlar çerçeveler için son yükleme adımlarıdır. Toplam taban kesme kuvvetinin katlara dağılım oranı sabittir.



Şekil 5.16 : Oniki katlı çerçevelerin itme eğrileri

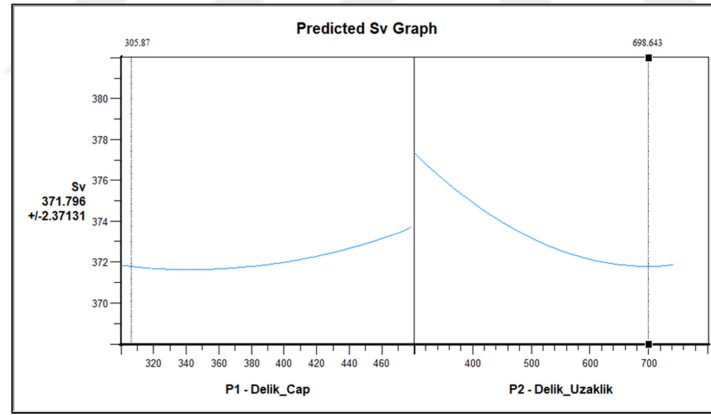


Şekil 5.17 : Oniki katlı çerçevelerin kritik birleşim bölgesinde eşdeğer plastik deformasyon dağılımı

Tablo 5.11: 12 katlı çerçevede gerilme ve deformasyon değerleri

Table of Design Points									Force x
1	Name	P1 - Delik_Cap	P2 - Delik_Uz...	P3 - Equivalent Stress Maximum	P5 - Equivalent Plastic Strain Maximum	P6 - Equivalent Stress 2 Maximum	P7 - Directional Deformation Maximum	Retain	
2	Units	mm	mm	MPa	mm mm^-1	MPa	mm		
3	DP 0 (Current)	300	300	403.92	0.011212	399.45	340.99	☒	58
4	DP 1	390	300	405.3	0.011272	400.72	345.01	☒	58
5	DP 2	480	300	406.54	0.015059	400.79	357.04	☒	58
6	DP 3	300	450	401.52	0.011251	402.64	341.24	☒	58
7	DP 4	390	450	404.79	0.011334	400.56	344.89	☒	58
8	DP 5	480	450	405.23	0.013187	402.88	355.96	☒	58
9	DP 6	300	600	404.17	0.011275	402.47	341.33	☒	58
10	DP 7	390	600	402.92	0.011368	401.31	344.6	☒	58
11	DP 8	480	600	403.92	0.011212	399.45	340.99	☒	58
12	DP 9	300	750	403.92	0.011212	399.45	340.99	☒	58
13	DP 10	390	750	403.92	0.011212	399.45	340.99	☒	58
14	DP 11	480	750	403.92	0.011211	399.45	340.99	☒	58

Tablo 5.11’ de 12 katlı çerçeveler için kritik birleşim bölgesinde oluşan maksimum gerilme, birim şekil değiştirme, çerçevede maksimum tepe ötelenmesi değerleri verilmiştir. Tablonun sağ tarafında ise bu değerlerin başlangıç yükünün kaç katı yüklemeye olduğunu göstermektedir. Çerçevelerin itme eğrilerinden elde edilen gerilme değerlerinden büyük azaltma çaplarında azaltma kolon yüzüne yaklaştıkça kritik yerdeki gerilmelerin arttığı ($M/h \leq 0.5$) , uzaklaştıkça da gerilmelerin azaldığı görülmüştür ($M/h \geq 0.5$).



Şekil 5.18 : Azaltma çapı ve uzaklığına bağlı gerilme değişimi

Şekil 5.18, kolon kiriş birleşim bölgesinde kiriş başlığını kolona bağlayan kaynak bölgesindeki gerilme değişimini vermektedir (Şekil 6.15- a’da path2 ile tanımlanan bölge). Oniki katlı çerçeve çözümlerinden elde edilen değerlerde 4 ve 8 katlı çerçevelerden elde edilen değerlerle benzer özellik göstermektedir.

Kolona yakın bölgede azaltma çapı arttıkça gerilmelerde artış gözlenmekte fakat azaltmayı kolondan uzaklaştırdıkça gerilme düşmektedir. Delik merkezinin kolon yüzüne olan uzaklığı arttıkça yine bu bölgede gerilme değeri düşmekte fakat $M/h=1$

değerinden sonra gerilme tekrar artmaktadır. Yine 12 katlı çerçevelerin çözümünden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde $0,50.h < D/h < 0,80.h$ değerleri arasında delik merkezinin kolon yüzüne olan uzaklığı için $M/h = 1$ en uygun oran olarak görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde en iyi gerilme dağılımının D300-M300, D390-M300 ve D480-M450 birleşimlerinde olduğu görülmektedir. 4 katlı, 8 katlı çerçevelerde de benzer dağılım görülmüştür. Buradan $D/H \approx 1$ değerinde en uygun gerilme dağılımı elde edilmektedir.

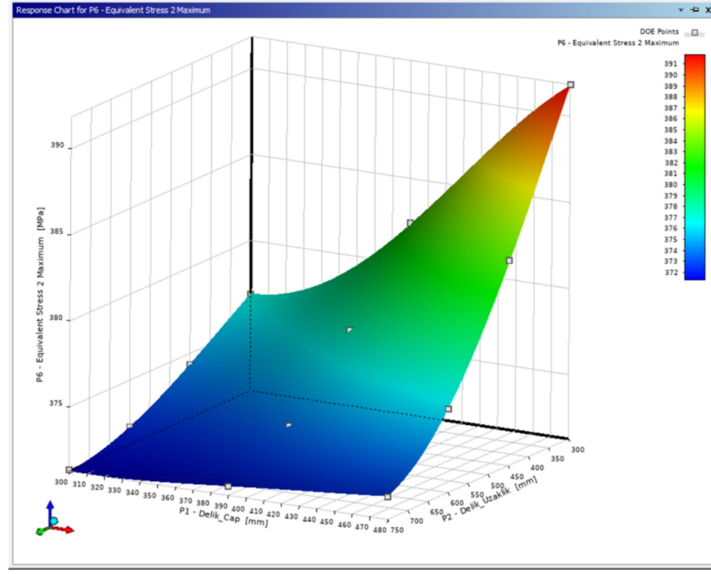
Tablo 5.12: Oniki Katlı çerçeveler için etkileşim katsayıları

6:6	1 Term	2 Coefficient	3 Std Error	4 T-Value	5 Significance	6 VIF
1	Constant	365.289	9.15653	39.89	0.0000	0.0000
2	P1 - Delik_Cap	0.0430147	0.0437888	0.98	0.3639	15.3666
3	P2 - Delik_Uzaklik	0.00347554	0.0118730	0.29	0.7796	9.5088
4	P1 - Delik_Cap^2	0.000111365	5.48406e-05	2.03	0.0886	15.0444
5	P1 - Delik_Cap * P2 - Delik_Uzaklik	-0.000171055	1.69917e-05	-10.07	0.0001	6.2423
6	P2 - Delik_Uzaklik^2	3.49442e-05	9.30675e-06	3.75	0.0095	7.8899

Calculator - 12 Katlı			
Girdi	P1 - Delik_Cap	480	
	P2 - Delik_Uzaklik	300	
Çıktı	Terim	Katsayılar	Hesap
	P1	0.0430147	20.64706
	P2	0.00347554	1.042662
	P1^2	0.000111365	25.6585
	P1*P2	-0.00017106	-24.6319
	P2^2	3.49442E-05	3.144978
	C	365.289	365.289
			Sv= 391.1503

Cornerstone yazılımıyla yapılan değerlendirmeler sonrası elde edilen Adj R square değerinin 1'e yakın olması hata oranının çok küçük olması anlamına gelmektedir. Yukarıda Şekil 6.20'de sağ taraftaki sonuç tablosundan elde edilen katsayılar yazıldığında (5.3) denklemi elde edilmektedir.

$$\sigma = C + 0,0430147.D + 0,00347554.M + 0.000111365.(D)^2 - 0,00017106.(D.M) + 0,0000349442.(M)^2 \quad (\text{Mpa}) \quad (5.3)$$



Şekil 5.19 : Etkileşim yüzeyi (12 katlı çerçeve için)

6. BİRLEŞİM MODELLERİ ÜZERİNDEKİ ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

6.1. Kullanılan Modeller

Çerçeve üzerinde yapılan çalışmanın ikinci aşaması gövdeden azaltma etkisinin birleşim modelleri üzerinde tersinir yer değiştirme etkileriyle incelenmesidir. Burada HEA300 kolon IPE400 kiriş, IPE400 kolon IPE400 kiriş, IPE300 kolon IPE300 kiriş ve IPE200 kolon IPE200 kiriş kesitler için analizler gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de çalışmada kullanılan profiller ve birleşimlerin geometrik özellikleri verilmiştir.

Tablolarda kiriş kesitinde hiçbir azaltmanın yapılmadığı kesit katı birleşim türü veya solid birleşim olarak ifade edilmiştir.

Tabloda ZKE ile ilgili a,b,c değerlerinin ayrıntıları Şekil.6.1’te verilmiş azaltma değerleridir. Şekil 6.2’de ZGE ile ilgili düzenlemeler gösterilmiştir.

Gövdesinden zayıflatılmış kiriş enkesitlerde, gövdedeki azaltma çapı kiriş yüksekliğinin 0.5 ile 0.8 katı arasında değişmektedir ($0.5h \sim 0.8h$).

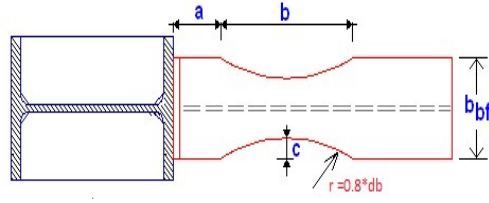
Delik çapının kolon yüzünden mesafesi ise kiriş yüksekliğinin 0.5 katı ile 1.0 katı arasında değişen değerlerde alınmıştır ($M=(0,5 \sim 1.0) \times h$). Şekil 6.3’ de birleşimlerden birinin ANSYS Workbench programında sonlu elemanlar modelini görülmektedir. Şekilde ayrıca SAC yükleme protokolüne göre deplasman yüklemesi görülmektedir.

Tablo 6.1: Birleşim tipleri tablosu

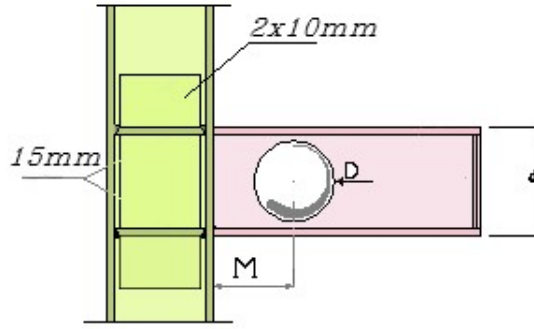
ISIM	BİRLEŞİM TÜRÜ	KOLON	KİRİŞ	a	b	c	D(delik çapı)	M	Pan.böl.ilave levha kalınlığı (mm) $\Sigma t =$	Süreklilik Lev. kal.	Rijitleştiric kalınlığı (mm)
HEA3-IPE4-DUZ	SOLID	HE300A	IPE400	-	-	-	-	-	20	15	10
HEA3-IPE4-RED	ZKE	HE300A	IPE400	110	280	36	-	-	20	15	10
HEA3-IPE4-D20-M15	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	200	150	20	15	10
HEA3-IPE4-D20-M20	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	200	200	20	15	10
HEA3-IPE4-D20-M25	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	200	250	20	15	10
HEA3-IPE4-D20-M30	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	200	300	20	15	10
HEA3-IPE4-D20-M35	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	200	350	20	15	10
HEA3-IPE4-D20-M40	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	200	400	20	15	10
HEA3-IPE4-D26-M20	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	260	200	20	15	10
HEA3-IPE4-D26-M25	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	260	250	20	15	10
HEA3-IPE4-D26-M30	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	260	300	20	15	10
HEA3-IPE4-D26-M35	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	260	350	20	15	10
HEA3-IPE4-D26-M40	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	260	400	20	15	10
HEA3-IPE4-D30-M20	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	300	200	20	15	10
HEA3-IPE4-D30-M25	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	300	250	20	15	10
HEA3-IPE4-D30-M30	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	300	300	20	15	10
HEA3-IPE4-D30-M35	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	300	350	20	15	10
HEA3-IPE4-D30-M40	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	300	400	20	15	10
HEA3-IPE4-D32-M20	ZGE	HE300A	IPE400	-	-	-	320	200	20	15	10
IPE4-IPE4-DUZ	SOLID	IPE400	IPE400	-	-	-	-	-	20	15	10
IPE4-IPE4-RED	ZKE	IPE400	IPE400	110	280	36	-	-	20	15	10
IPE4-IPE4-D20-M15	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	200	150	20	15	10
IPE4-IPE4-D20-M20	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	200	200	20	15	10
IPE4-IPE4-D20-M25	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	200	250	20	15	10
IPE4-IPE4-D20-M30	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	200	300	20	15	10
IPE4-IPE4-D20-M35	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	200	350	20	15	10
IPE4-IPE4-D20-M40	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	200	400	20	15	10
IPE4-IPE4-D26-M20	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	260	200	20	15	10
IPE4-IPE4-D26-M25	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	260	250	20	15	10
IPE4-IPE4-D26-M30	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	260	300	20	15	10
IPE4-IPE4-D26-M35	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	260	350	20	15	10
IPE4-IPE4-D26-M40	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	260	400	20	15	10
IPE4-IPE4-D30-M20	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	320	200	20	15	10
IPE4-IPE4-D32-M25	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	320	250	20	15	10
IPE4-IPE4-D32-M30	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	320	300	20	15	10
IPE4-IPE4-D32-M35	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	320	350	20	15	10
IPE4-IPE4-D32-M40	ZGE	IPE400	IPE400	-	-	-	320	400	20	15	10
IPE3-IPE3-DUZ	SOLID	IPE300	IPE300	-	-	-	-	-	12	12	10

Tablo 6.2 : Birleşim tipleri tablosu

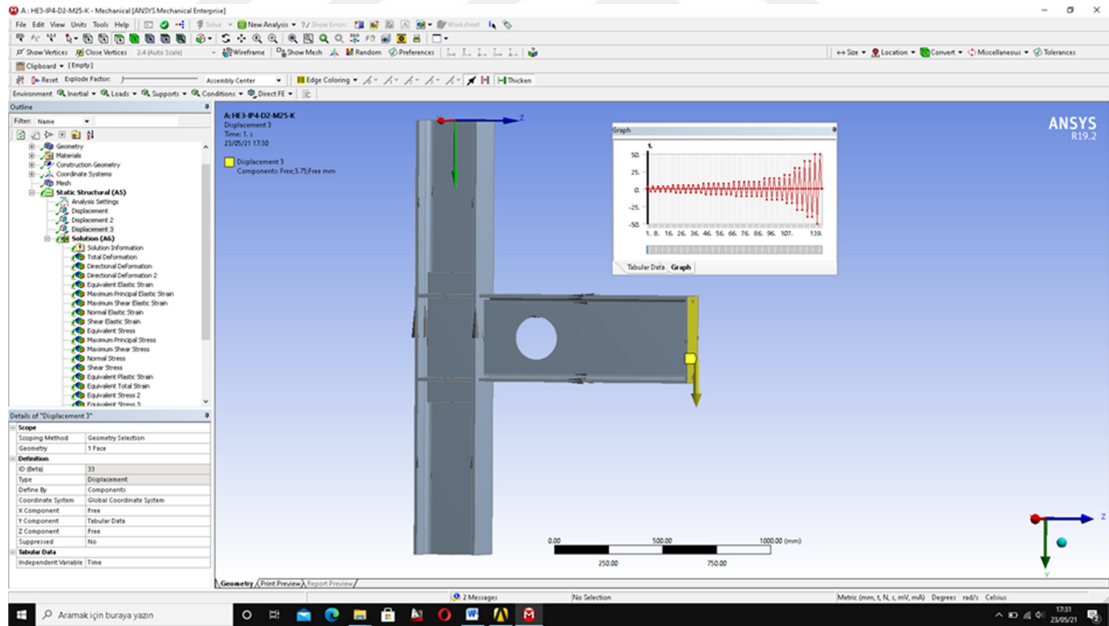
İSİM	BİRLEŞİM TÜRÜ	KOLON	KIRIŞ	a	b	c	D(delik çapı)	M	Pan.böl.ilave .levha kalınlığı (mm) Σt=	Süreklilik Lev. kal.	Rijitleştiric kalınlığı (mm)
IPE3-IPE3-RED	ZKE	IPE300	IPE300	90	210	30	-	-	12	12	10
IPE3-IPE3-D15-M113	ZGE	IPE300	IPE300	-	-	-	150	113	12	12	10
IPE3-IPE3-D15-M150	ZGE	IPE300	IPE300	-	-	-	150	150	12	12	10
IPE3-IPE3-D15-M225	ZGE	IPE300	IPE300	-	-	-	150	225	12	12	10
IPE3-IPE3-D15-M30	ZGE	IPE300	IPE300	-	-	-	150	300	12	12	10
IPE3-IPE3-D15-M375	ZGE	IPE300	IPE300	-	-	-	150	375	12	12	10
IPE3-IPE3-D195-M150	ZGE	IPE300	IPE300	-	-	-	195	150	12	12	10
IPE3-IPE3-D195-M225	ZGE	IPE300	IPE300	-	-	-	195	225	12	12	10
IPE3-IPE3-D195-M30	ZGE	IPE300	IPE300	-	-	-	195	300	12	12	10
IPE3-IPE3-D195-M375	ZGE	IPE300	IPE300	-	-	-	195	375	12	12	10
IPE3-IPE3-D24-M150	ZGE	IPE300	IPE300	-	-	-	240	150	12	12	10
IPE3-IPE3-D24-M225	ZGE	IPE300	IPE300	-	-	-	240	225	12	12	10
IPE3-IPE3-D24-M30	ZGE	IPE300	IPE300	-	-	-	240	300	12	12	10
IPE3-IPE3-D24-M375	ZGE	IPE300	IPE300	-	-	-	240	375	12	12	10
IPE2-IPE2-DUZ	SOLID	IPE200	IPE200	-	-	-	-	-	12	10	10
IPE2-IPE2-RED	ZKE	IPE200	IPE200	60	140	20	-	-	12	10	10
IPE2-IPE2-D10-M10	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	100	100	12	10	10
IPE2-IPE2-D10-M15	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	100	150	12	10	10
IPE2-IPE2-D10-M20	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	100	200	12	10	10
IPE2-IPE2-D10-M25	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	100	250	12	10	10
IPE2-IPE2-D10-M30	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	100	300	12	10	10
IPE2-IPE2-D13-M10	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	130	100	12	10	10
IPE2-IPE2-D13-M15	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	130	150	12	10	10
IPE2-IPE2-D13-M20	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	130	200	12	10	10
IPE2-IPE2-D13-M25	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	130	250	12	10	10
IPE2-IPE2-D13-M30	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	130	300	12	10	10
IPE2-IPE2-D16-M10	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	160	100	12	10	10
IPE2-IPE2-D16-M15	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	160	150	12	10	10
IPE2-IPE2-D16-M20	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	160	200	12	10	10
IPE2-IPE2-D16-M25	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	160	250	12	10	10
IPE2-IPE2-D16-M30	ZGE	IPE200	IPE200	-	-	-	160	300	12	10	10



Şekil 6.1 : Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti (ZKE)



Şekil 6.2 : Zayıflatılmış Gövde Enkesiti (ZGE)



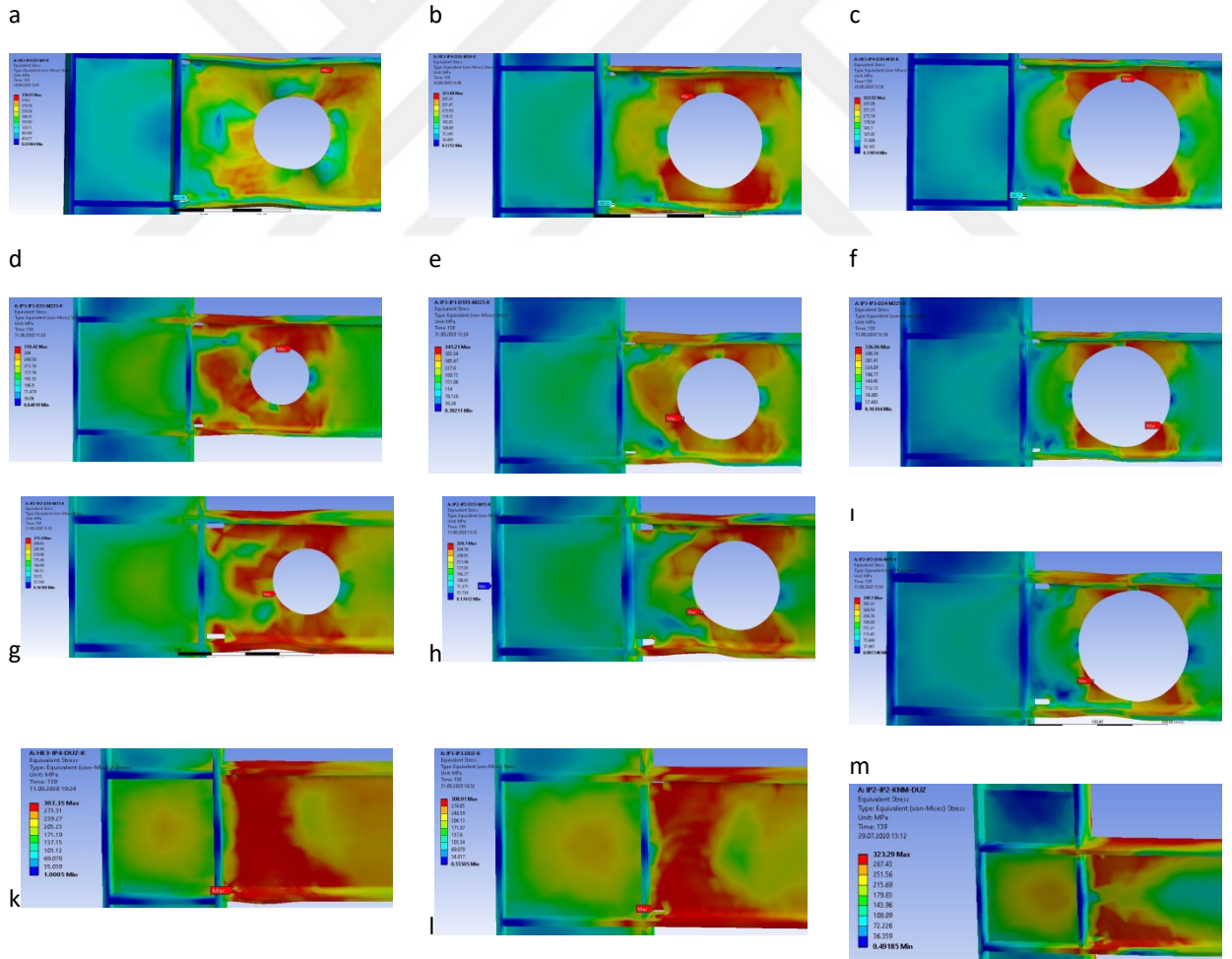
Şekil 6.3: ANSYS modeli

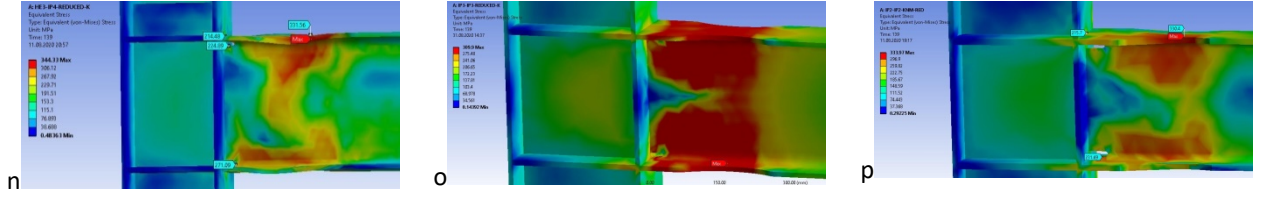
6.2. Moment-Dönme Eğrilerinin Elde Edilmesi

Sonlu elemanlar çözümü sonuçlarından elde edilen moment dönme eğrileri incelendiğinde, delik çapının değişimi momentin değerini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.

Artan delik çapı kesitte moment taşıma kapasitesini düşürmektedir. Delik merkezinin kolon yüzüne olan uzaklığının değişiminin kesitin moment taşıma kapasitesine etkisi ise minimum düzeydedir. Buna karşılık delik çapının kolon yüzeyinden uzaklığı birleşim bölgesinde kaynak ulaşım deliğinde ve kaynak bölgesindeki plastik deformasyonların oluşumuna olan etkisi yüksektir.

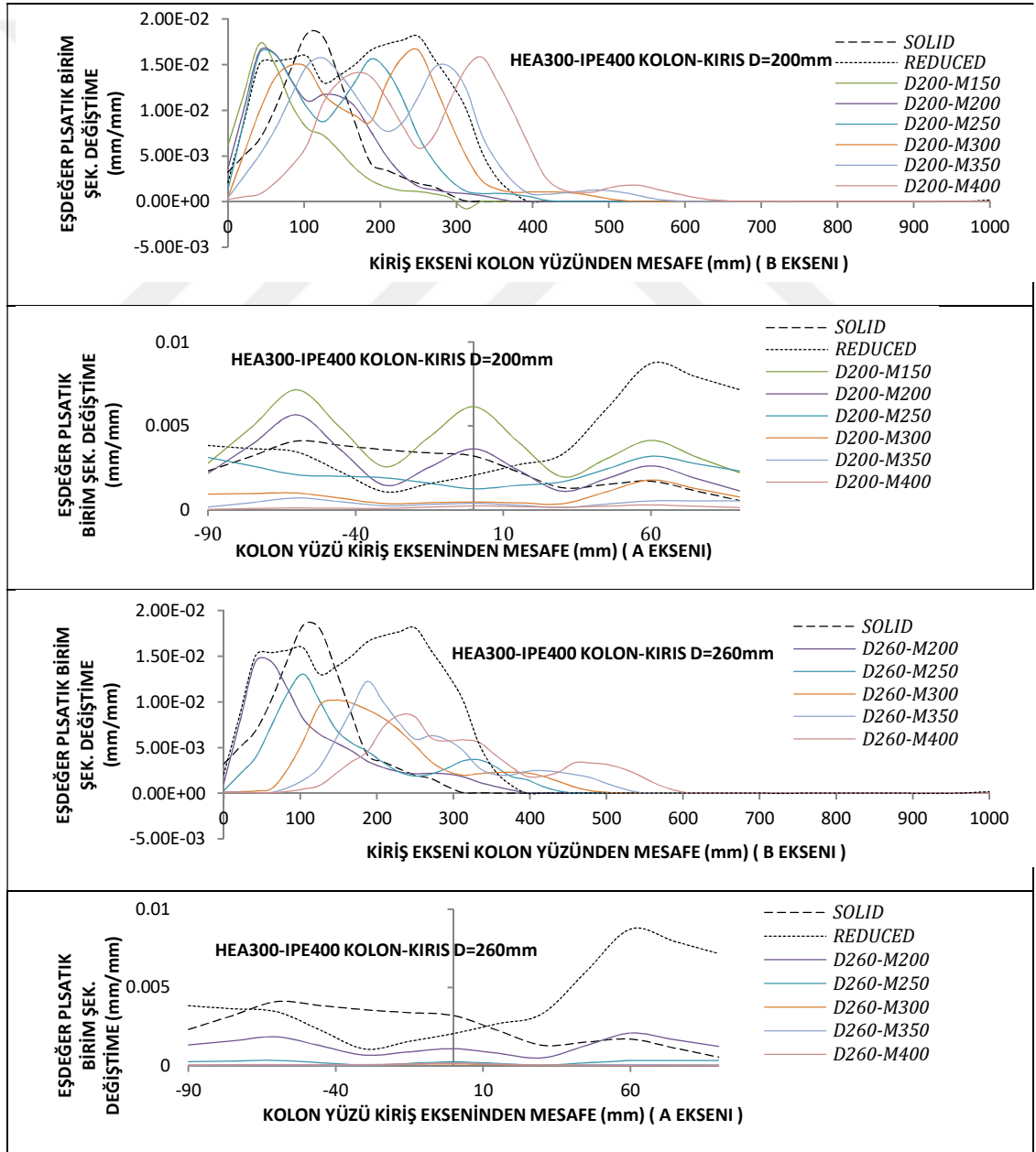
Delik çapının kolon yüzüne yaklaşması, oluşması istenmeyen bölgelerde plastik deformasyonların artışına neden olmaktadır. ZGE kesitlerde yapılan analizlerde delik çapının $0.5H$ olduğu HE300A-IPE400 ($D=200$, $M=300$) birleşimde, eşdeğer gerilmenin kirişte başlık bölgesine yakın bölgede (Şekil 6.4.a) kiriş gövdesinde oluşurken, diğer tüm ZGE birleşimlerde maksimum eşdeğer gerilme ve birim şekil değiştirmelerin delik çevresinde olduğu görülmektedir (Şekil 6.4 b,c,d,e,f,g,h,i). Maksimum eşdeğer gerilme şekillerinden zayıflatılmış gövde enkesitli kirişlerde düşeyle $25-30^\circ$ açı yapan düzlemda maksimum gerilmelerin olduğu görülmüştür.

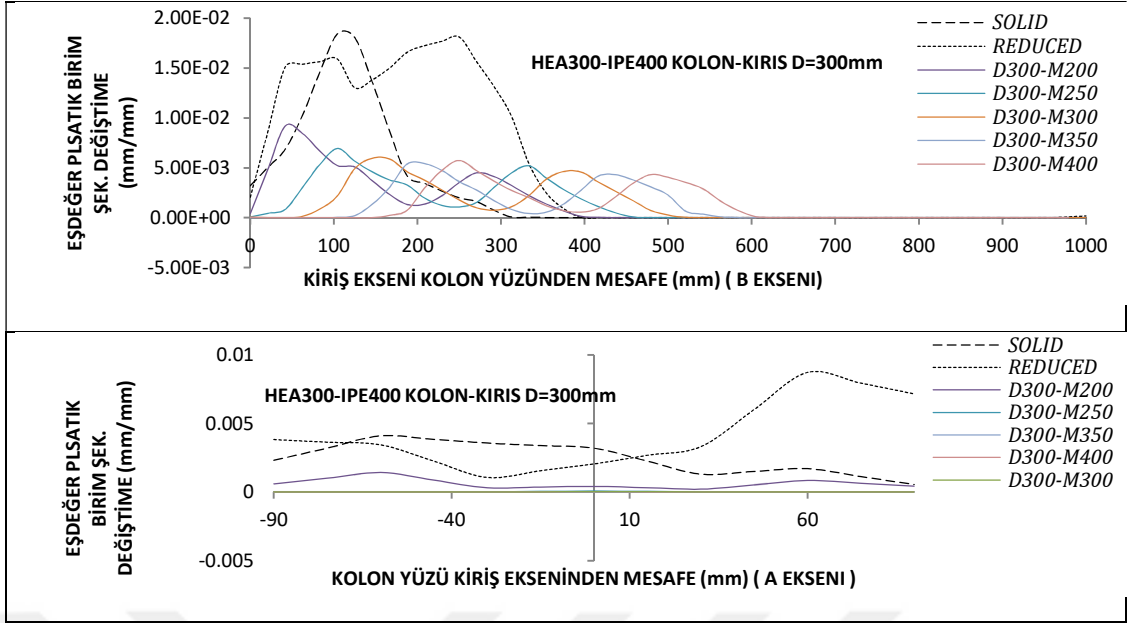




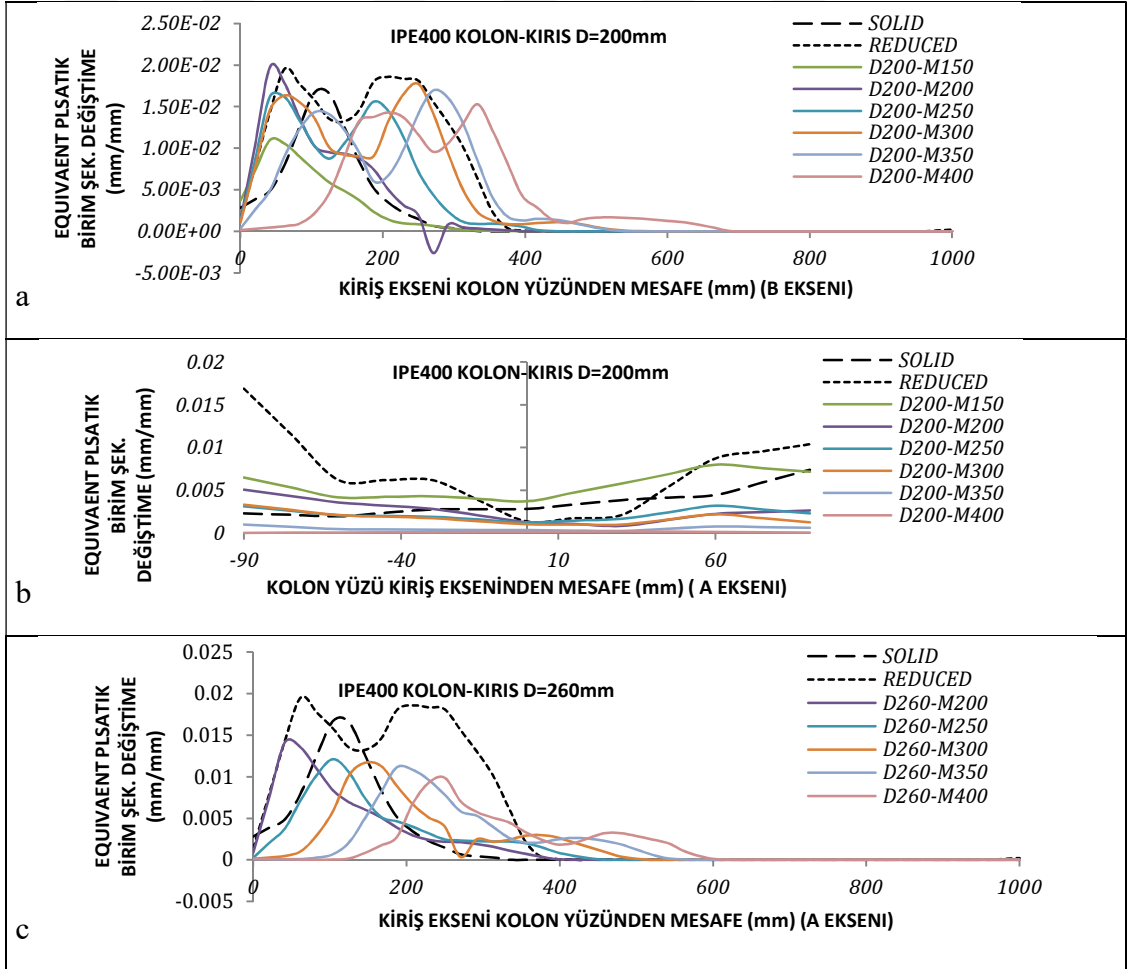
Şekil 6.4 : Eşdeğer Gerilme (von Misses gerilmesi) a) HE300A-IPE400 D=200 M300 b) HE300A-IPE400 D=260 M300 c) HE300A-IPE400 D=300 M300 d) IPE300 D=150 M225 e) IPE300 D=195 M225 f) IPE300 D=240 M225 g) IPE200 D=100 M150 h) IPE200 D=130 M150 i) IPE200 D=160 M150 k)

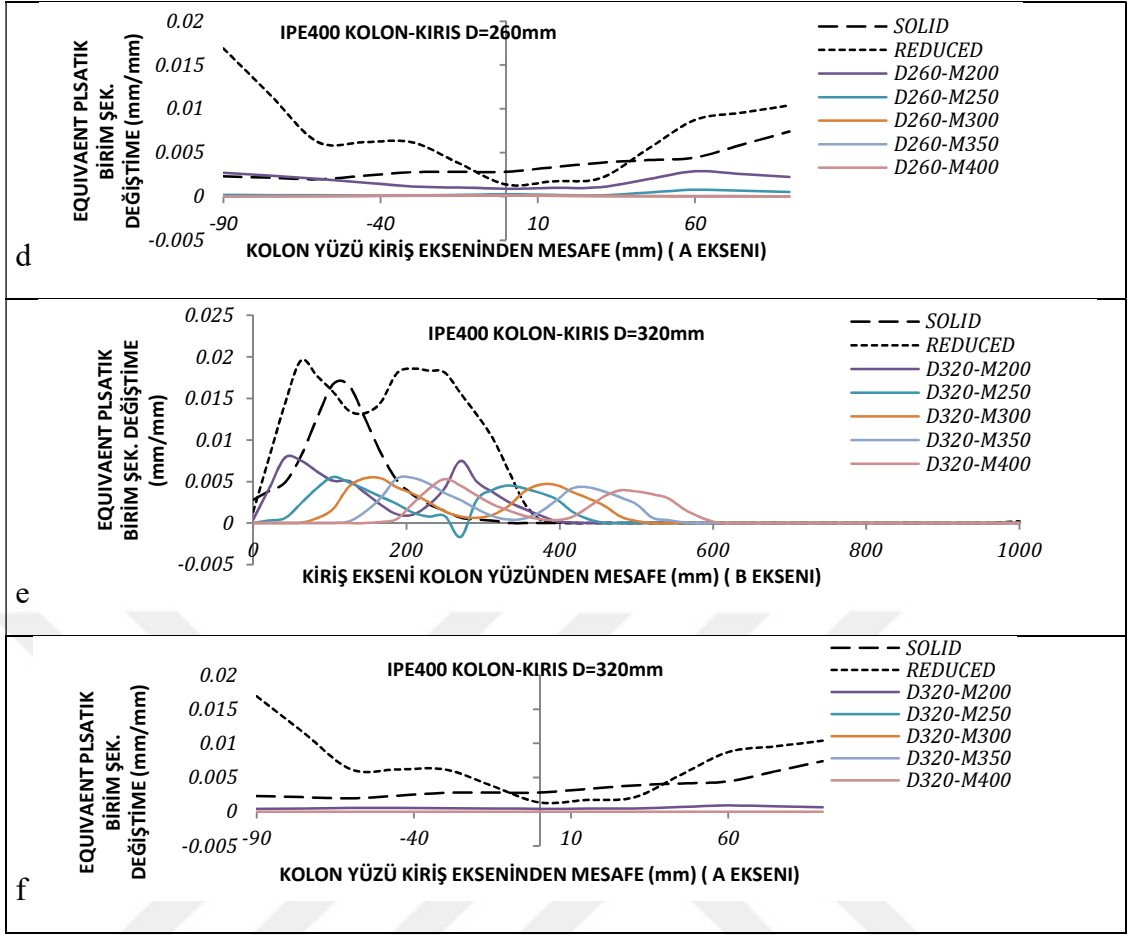
Şekil 6.5’de HEA300 Kolon IPE400 kiriş için, Şekil 6.6’da IPE400 kolon-kiriş için, Şekil 6.7’de IPE300 kolon-kiriş için, Şekil 6.8’da IPE200 kolon-kiriş için maksimum dönmeye karşılık gelen eşdeğer birim şekil değiştirme değerleri verilmiştir.



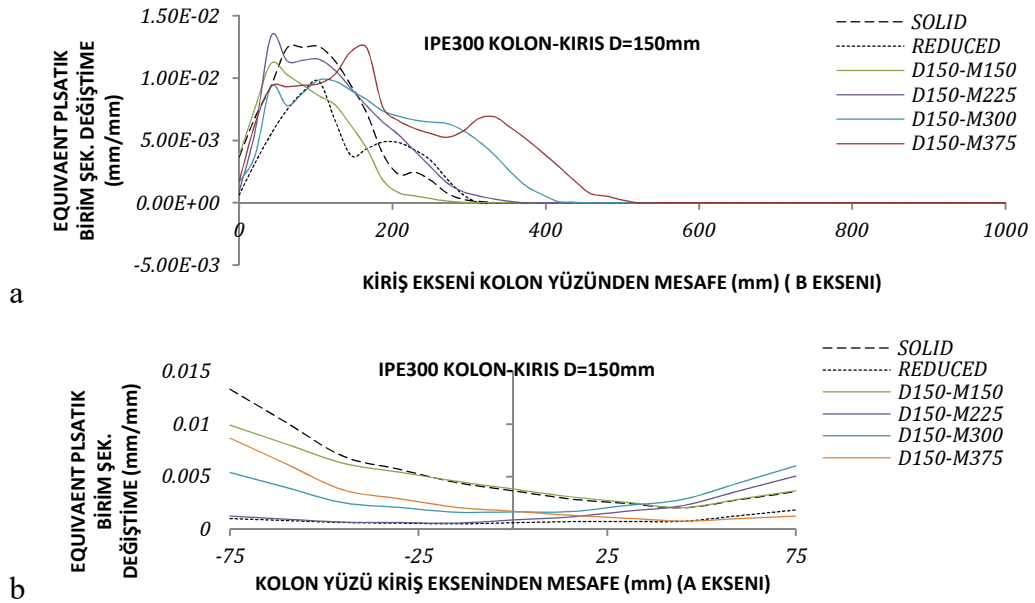


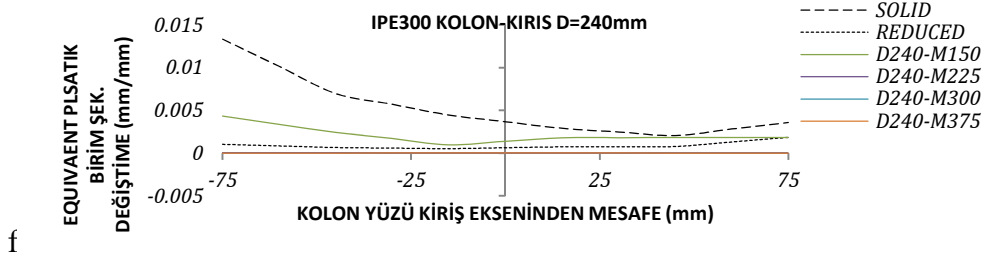
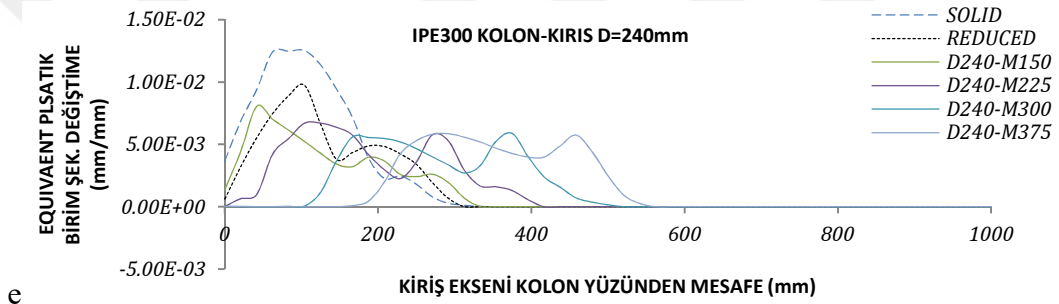
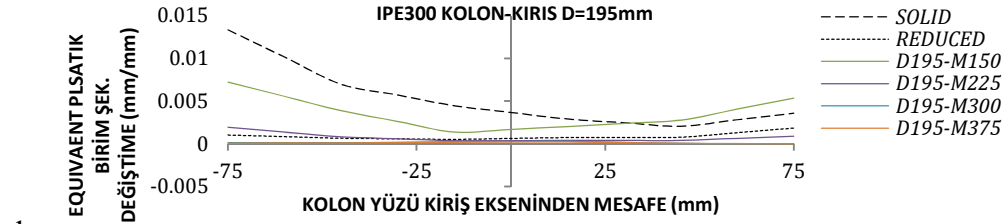
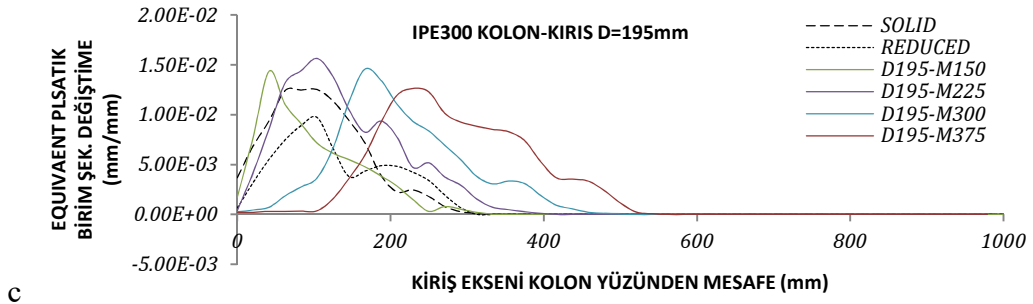
Şekil 6.5 : HEA300 Kolon IPE400 Kiriş İçin Birim Şekil Değiştirme Dağılımı



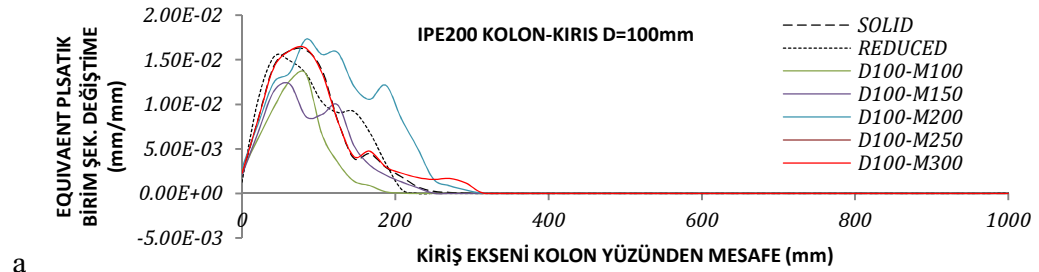


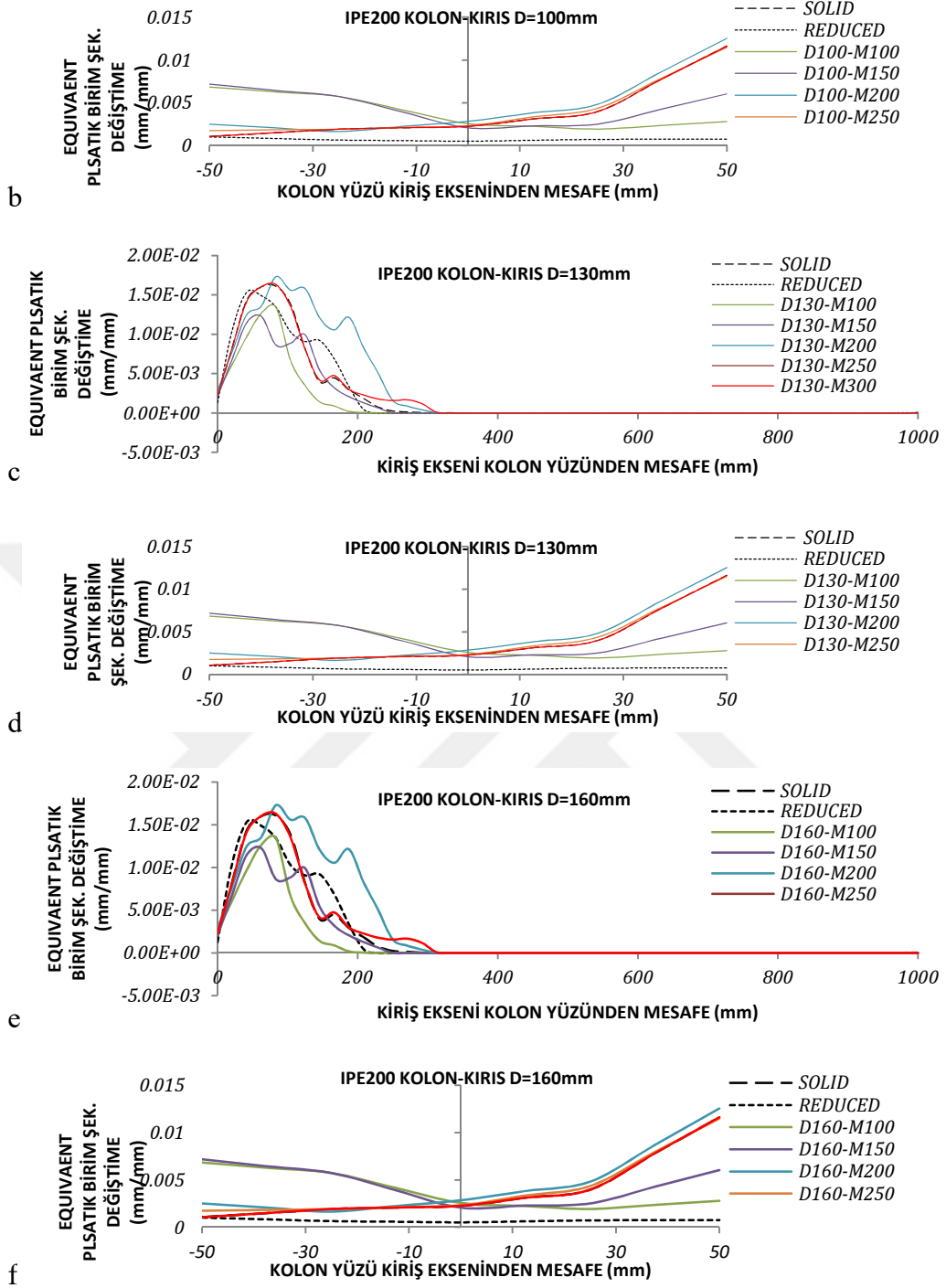
Şekil 6.6 : IPE400 Kolon-Kiriş için Birim Şekil Değiştirme Dağılımı





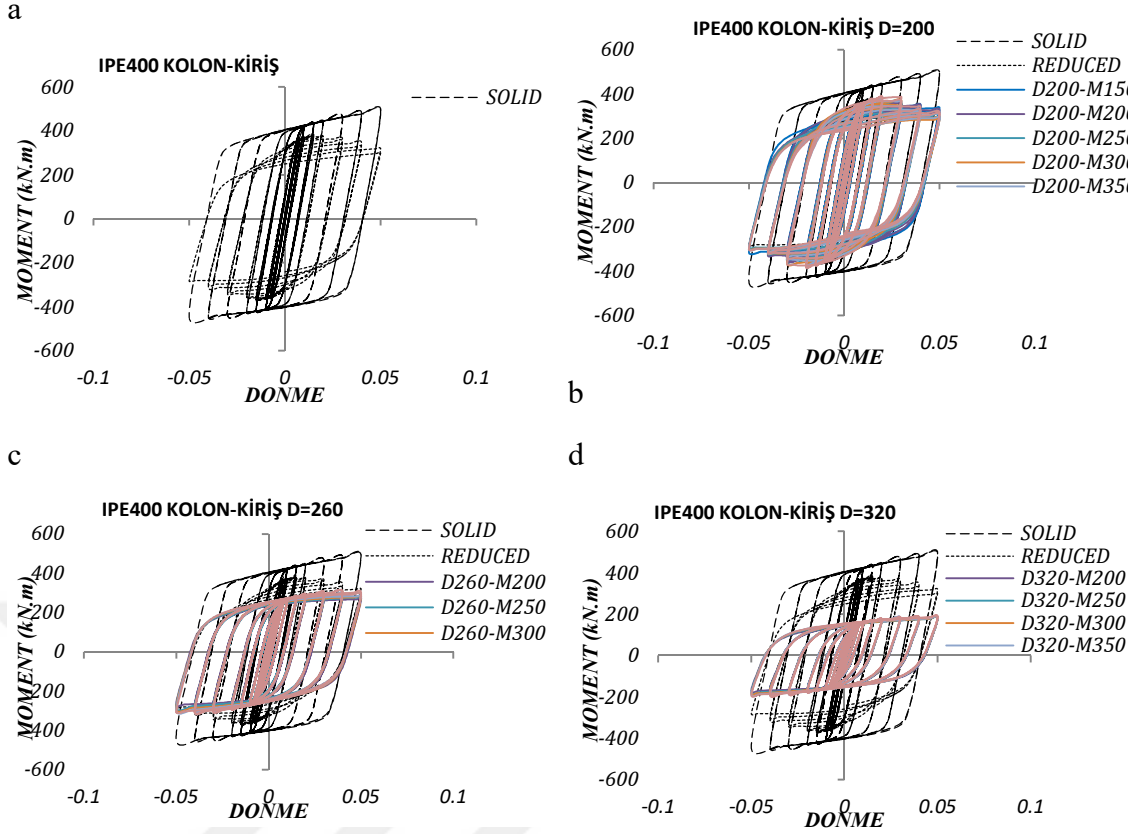
Şekil 6.7 : IPE300 Kolon-Kiriş İçin Birim Şekil Değiştirme Dağılımı



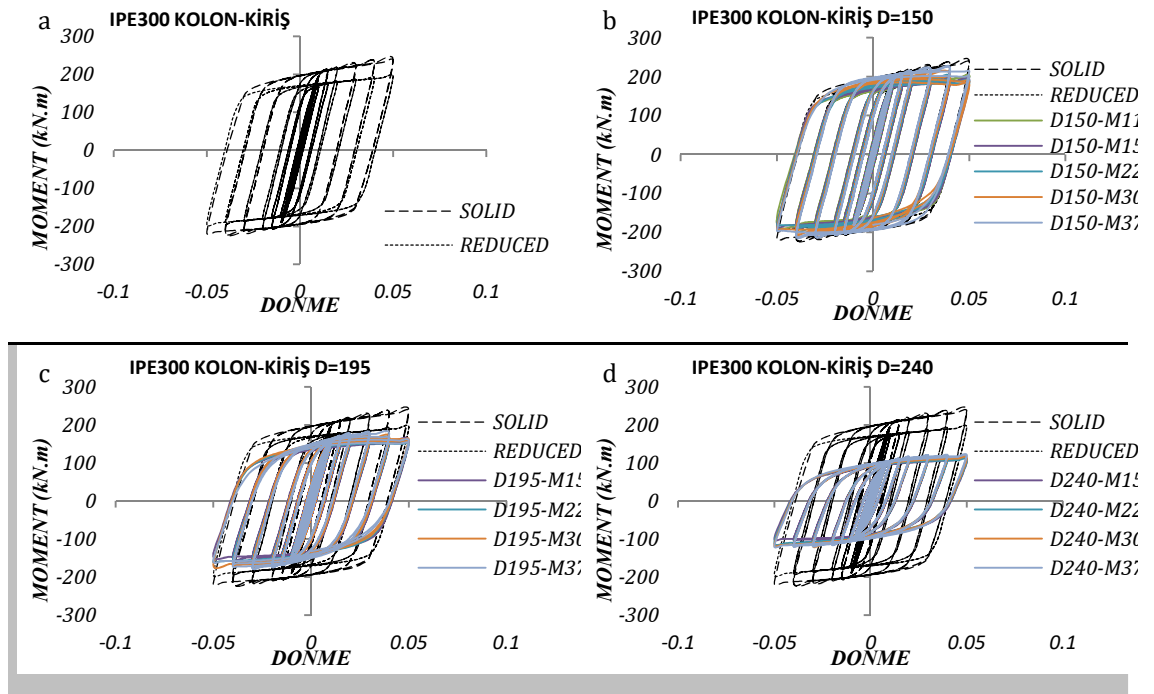


Şekil 6.8 : IPE200 Kolon-Kiriş İçin Birim Şekil Değiştirme Dağılımı

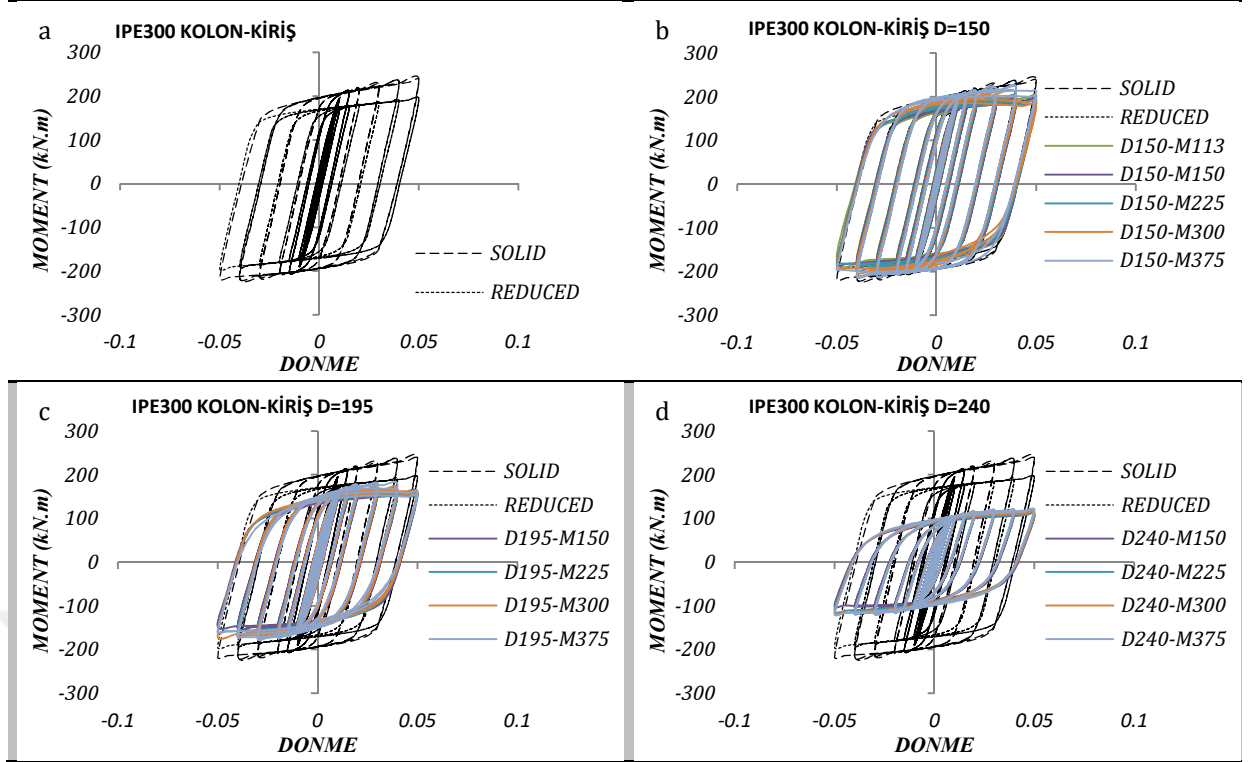
Aşağıda sırasıyla, Şekil 6.9’da HEA300 Kolon, IPE400 Kiriş; Şekil 6.10’da IPE300 Kolon-Kiriş; Şekil 6.11’de IPE400 Kolon-Kiriş; Şekil 6.12’de IPE200 Kolon-Kiriş için moment dönme eğrileri verilmiştir.



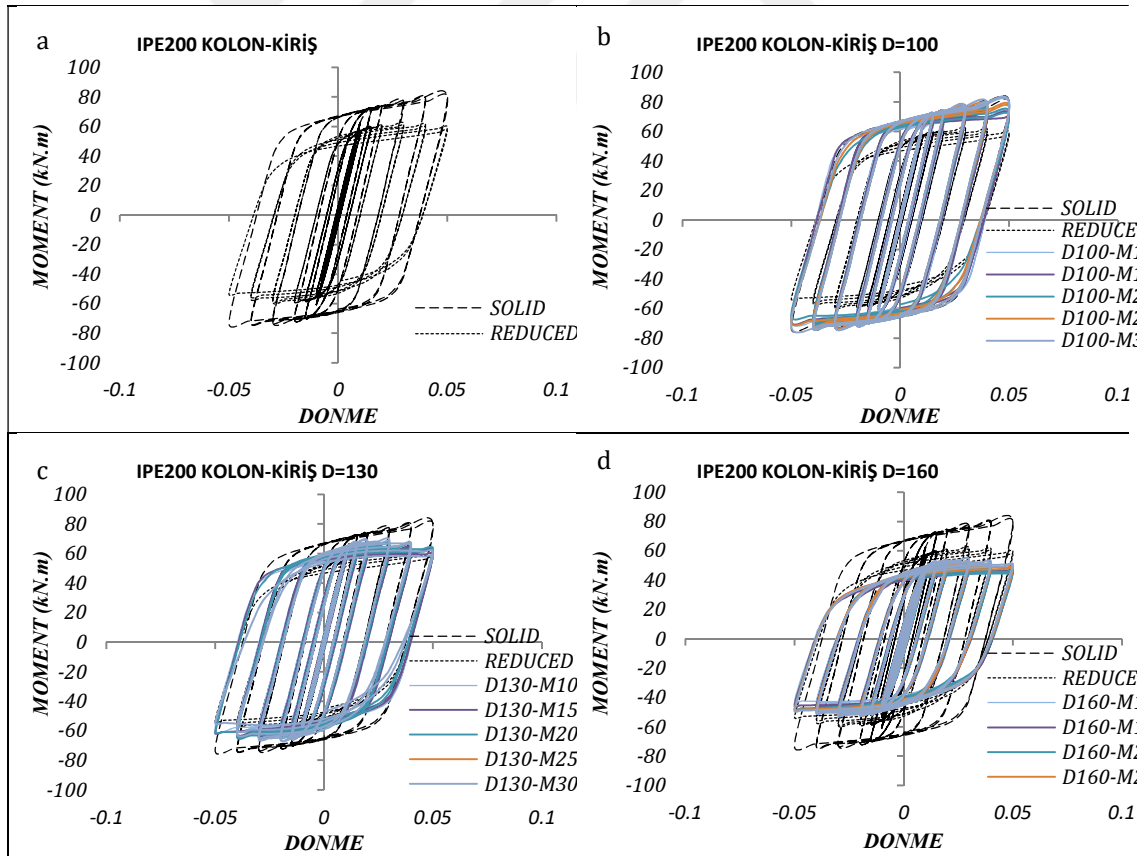
Şekil 6.9 : HEA300 Kolon IPE400 Kiriş İçin Moment Dönme Eğrileri



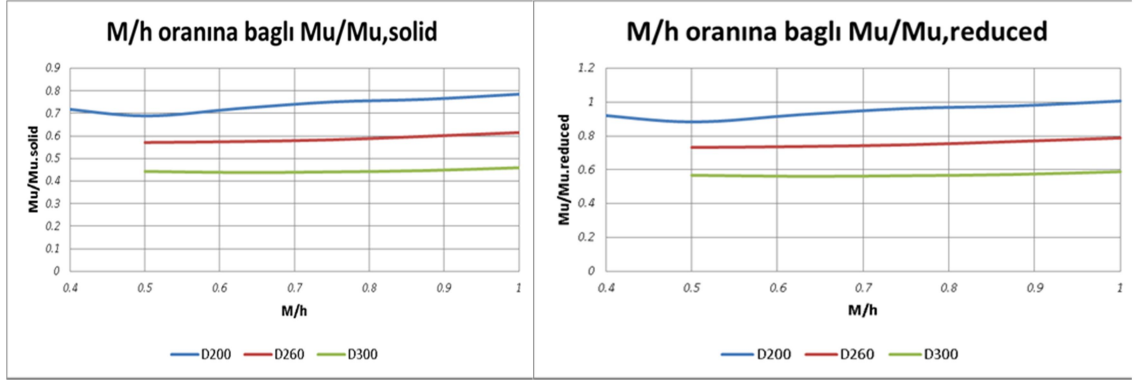
Şekil 6.10: IPE300 Kolon-Kiriş İçin Moment Dönme Eğrileri



Şekil 6.11: IPE300 Kolon-Kiriş İçin İçin Moment Dönme Eğrileri



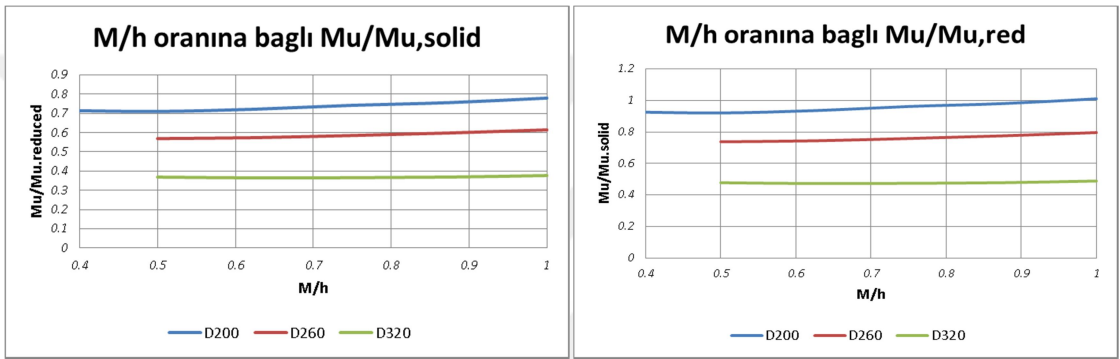
Şekil 6.12 : IPE200 Kolon-Kiriş İçin İçin Moment Dönme Eğrileri



a)

b)

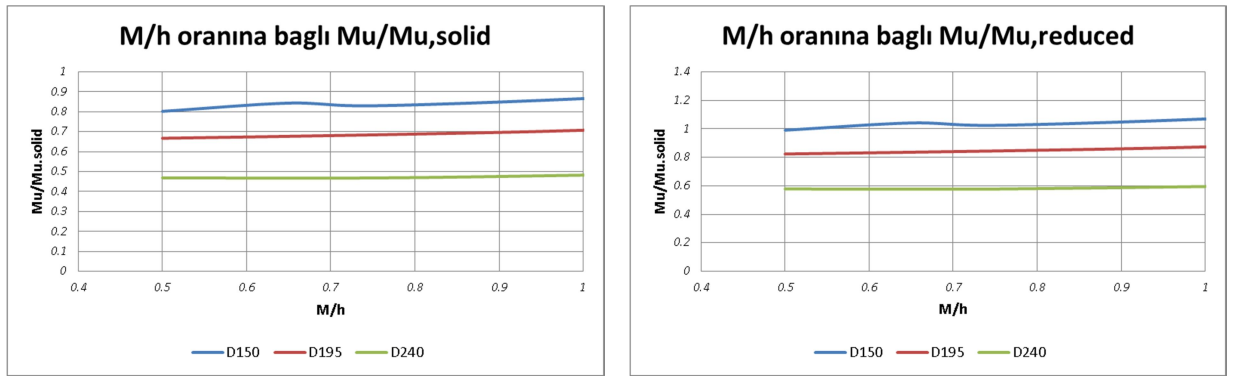
Şekil 6.13 : a): HEA300 -IPE400 Birleşimler için a) $M_u / M_{u,solid}$ grafiği b) $M_u / M_{u,reduced}$ grafiği



a)

b)

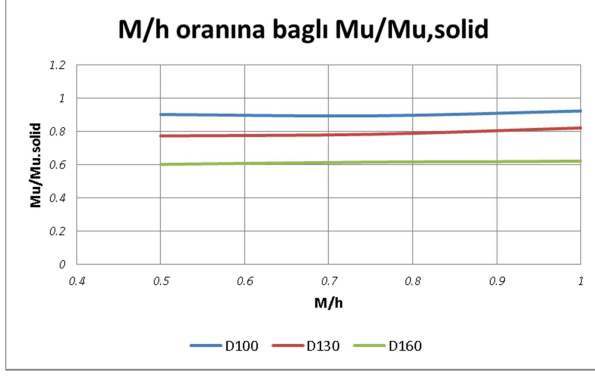
Şekil 6.14 : a): IPE400 -IPE400 Birleşimler için a) $M_u / M_{u,solid}$ grafiği b) $M_u / M_{u,red}$ grafiği



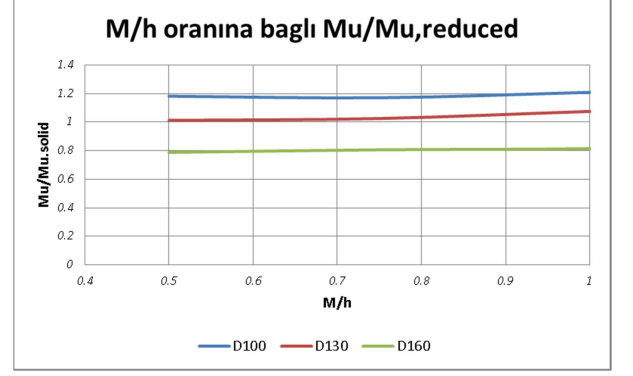
a)

b)

Şekil 6.15 : a): IPE300 –IPE300 Birleşimler için a) $M_u / M_{u,solid}$ grafiği b) $M_u / M_{u,red}$ grafiği



a)



b)

Şekil 6.16: a): IPE200 –IPE200 Birleşimler için a) $M_u / M_{u,solid}$ grafiği b) $M_u / M_{u,reduced}$ grafiği

Her bir birleşim için analiz sonuçları değerlendirilerek birleşimin azaltılma yapılmayan kesit için maksimum moment değerleriyle azaltılma yapılmış kesitlerdeki maksimum moment değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırma zayıflatma oranının ve yerinin moment değişimi üzerindeki etkisini vermektedir.

Bu değişim HE300A kolon IPE400 kiriş birleşimi için Şekil 6.13 de verilmiştir. Bu grafiğin yatay eksen dairesel azaltmanın kolon yüzüne olan uzaklığının kiriş yüksekliğine oranını (M/h) ve dikey eksen ise her bir birleşimden elde edilen maksimum moment değerinin aynı kesitin azaltılmamış birleşimden elde edilen maksimum moment değerine oranını vermektedir. Grafikte boşluk çapları 200 mm, 260 mm ve 300 mm için ayrı eğriler görülmektedir. Von Misses gerilme dağılımından delik çapı arttıkça kolon kiriş birleşiminde kaynak bölgesindeki gerilmelerin azaldığını görmekteyiz buna karşılık moment kapasitesi grafikte verilen oranlarda düşmektedir. Şekil 6.14, Ş. 6.15, Ş. 6.16 şekillerinde farklı profil tipleri için elde edilen moment oranları görülmektedir.

6.3. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Maksimum moment kapasitesi: Solid gövdeli kesitte maksimum moment kapasitesi elde edilmiştir. Gövdedeki kesit azaltması arttıkça buna bağlı olarak moment kapasitesi düşmektedir. Boşluk çapı (D) arttıkça kesme kapasitesindeki azalma moment kapasitesindeki azalmaya göre daha fazladır. Boşluğun kolon yüzüne olan uzaklığı (M) arttıkça moment kapasitesi artmaktadır.

Plastik Mafsal Oluşumları: Sonlu elemanlar analiz sonuçlarından elde edilen plastik mafsal oluşumları (PMO) çalışmanın daha rahat anlaşılması açısından bölge (PMY) olarak dört kategoride sıralanmıştır. Eğer giriş gövdesindeki azaltmadan dolayı delik çevresinde oluşan karşılıklı minör bazlı mafsallar ‘DC’ ile ifade edilecektir. ‘KY’ ile kolon yüzündeki ‘RED’ ile başlıktan azaltılmış bölgedeki ve ‘BB’ ile giriş başlığındaki plastik mafsal oluşum bölgeleri ifade edilecektir. Ayrıca mafsalin büyüklüğüne (PMT) göre kısmi plastik mafsal oluşumunu ‘K’ ve bölgenin tamamı mafsallaşıyorsa kısaca ‘T’ ile ifade edilecektir.

Kolon Yüzündeki Gerilmeler: Sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre kolon yüzündeki gerilme düzeylerini dört kategoriye ayırırsak, Kolon yüzündeki gerilme düzeyleri için ‘D’ düşük gerilme, ‘O’ orta gerilme, ‘Y’ yüksek gerilme düzeyini ve ‘ÇY’ çok yüksek gerilme düzeyini ifade etmektedir.

Tablo 6.3 ve Tablo 6.4 birleşimlerin analizlerinden elde edilmiş değerleri vermektedir. Burada solid kesitler için en büyük değerler elde edilmiştir. Zayıflatma çapı arttıkça kesitin moment taşıma kapasitesi düşmektedir. Tabloda E ile gösterilen ifade birim şekil değiştirme enerjisini göstermektedir. Birim hacimdeki şekil değiştirme enerjisi çevrimsel yükler altında gerilme birim şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alanın toplamıdır.

Tabloda verilen tüm çevrimsel yükler için birleşimin toplam şekil değiştirme enerjisidir. Doğal olarak rijitliği yüksek olan kesitlerde harcanan enerji daha fazladır. Burada toplam şekil değiştirme enerjisini maksimum momente bölerek birim moment için harcanan işi bulunur. Birim moment için harcanan işler incelendiğinde zayıflatma çapıyla zayıflatma merkezinin kolon yüzüne uzaklığı (D/M) değeri yaklaşık ≈ 1 değeri maksimum değer elde edilmektedir.

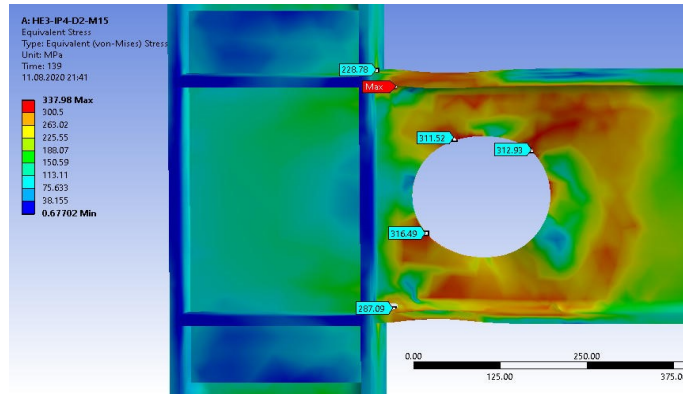
Gerilme dağılımları incelendiğinde $D/h = 0.5$ ve $M/h=0.25$ için maksimum gerilmeler delik çevresinde oluşmasına rağmen kolon yüzüne yakın bölgelerde gerilmelerin yine yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 6.17). $D/h = 0.5$ ve $M/h=0.33$ oranları için maksimum gerilmeler delik çevresinde, kolon yüzüne yakın bölgelerde gerilmeler azalmaktadır (Şekil 6.18). $D/h = 0.5$ ve $M/h=0.42$ oranları için maksimum gerilmeler delik çevresinde, kolon yüzüne yakın bölgelerde gerilmeler yüksek değildir.

Vierendeel Mekanizması: Gövde boşluklarından dolayı, boşlukta kalan T kesitte kesme kuvvetinin yatay boşluk boyunca oluşturduğu etkilere Vierendeel etkileri denmektedir. Boşluk bölgesinde Vierendeel etkilerinin de tesiriyle boşluk çevresinde oluşan mafsallaşma durumuna da Vierendeel mekanizması adı verilmektedir.

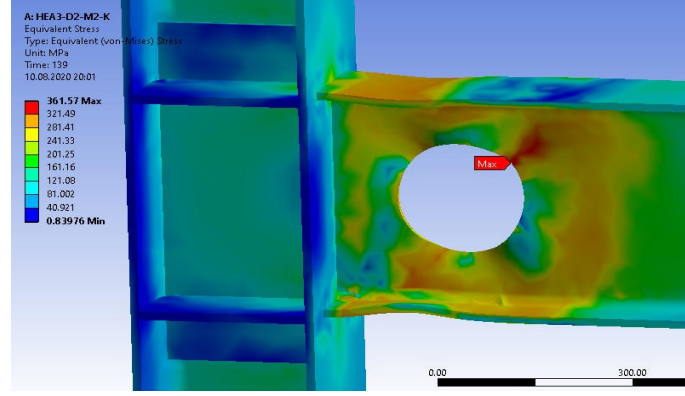
Küçük boşluklarda Vierendeel etkisi düşük, büyük boşluklarda ise daha belirgin olmaktadır. Vierendeel etkisiyle delik çevresinde simetrik bir şekilde dörtlü mafsallar oluşmaktadır. Küçük zayıflatma çaplarında mafsallaşma delik çevresinde küçük bölgesel iken delik çapı büyüdükçe mafsallaşan olan büyüyerek simetrik 4 taraflı olarak tüm T kesiti kapsamaktadır.

Zayıflatma çapı arttıkça kayma alanı düştüğünden kayma gerilmesi artmakta sabit kayma gerilmesi için azalan momente bağlı olarak normal gerilme düştüğünden asal gerilmelerin yönü daha da dikleşmektedir. $D/h=0.75$ için M/h arttıkça eşdeğer gerilmelerin düşeyle yaptığı açının azaldığı görülmektedir.

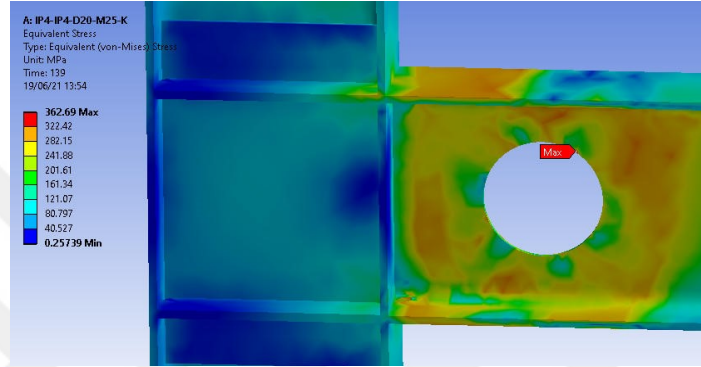
$D/h = 0.50$ olan kesitlerde Vierendeel etkisi hissedilmezken, $D/h = 0.65$ ve $D/h = 0.80$ olan kesitlerde Vierendeel etkisiyle zayıflatılmış bölgelerdeki T kesitlerde gerilmenin yön değiştirdiği görülmektedir.



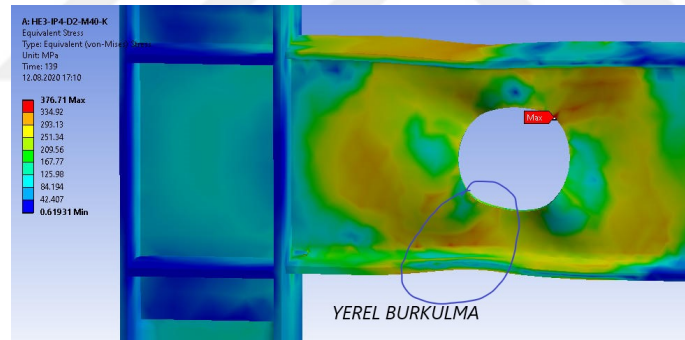
Şekil 6.17 : $D/h=0.5$ $M/h=0.25$



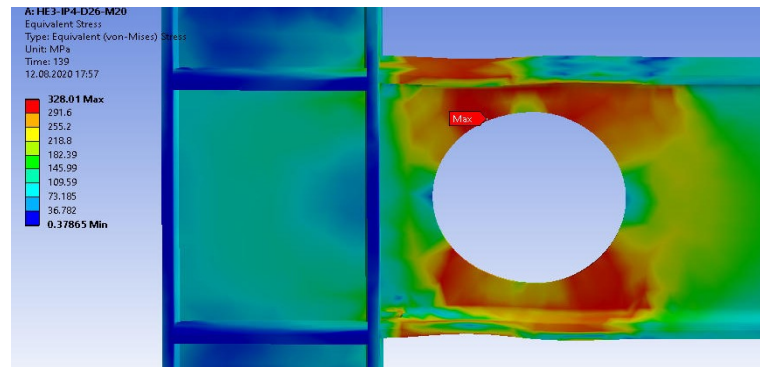
Şekil 6.18 : $D/h=0.5$ $M/h=0.33$ Eşdeğer Gerilme



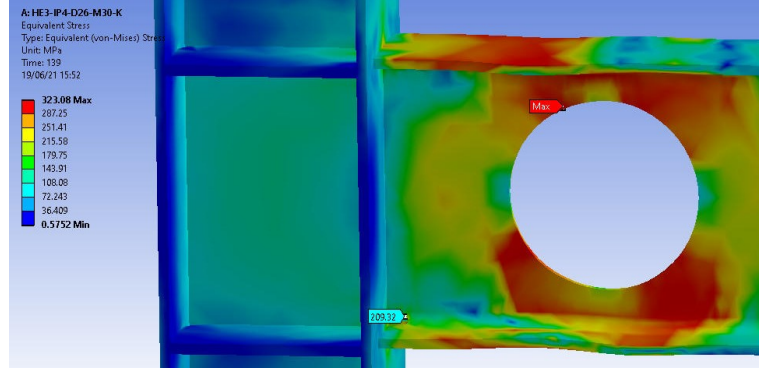
Şekil 6.19 : $D/h=0.5$ $M/h=0.41$ Eşdeğer Gerilme



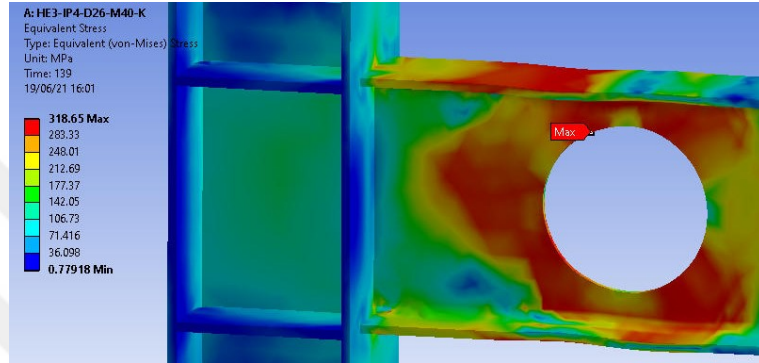
Şekil 6.20 : $D/h=0.5$ $M/h=0.67$ Eşdeğer Gerilme



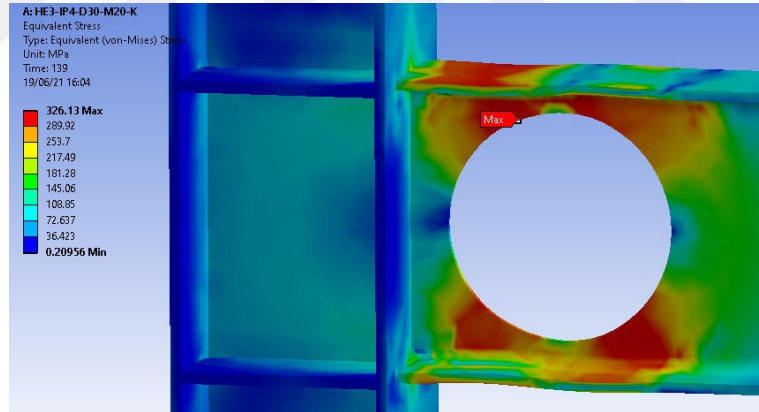
Şekil 6.21 : $D/h=0.65$ $M/h=0.33$ Eşdeğer Gerilme



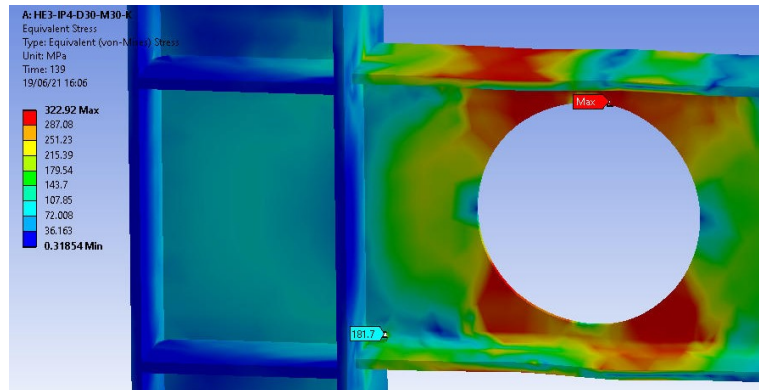
Şekil 6.22 : $D/h=0.65$ $M/h=0.50$ Eşdeğer Gerilme



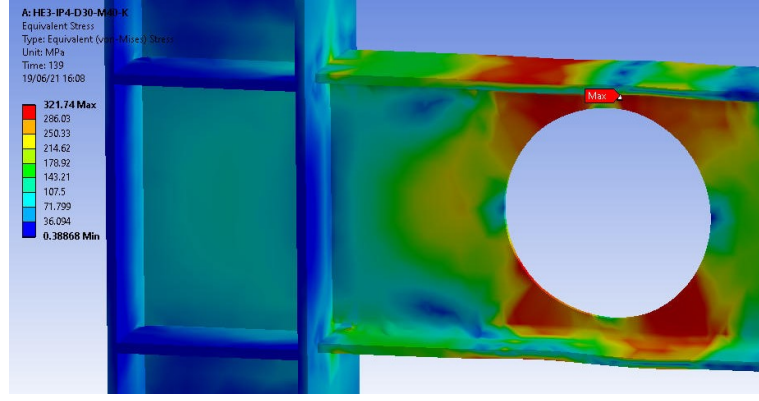
Şekil 6.23: $D/h=0.65$ $M/h=0.67$ Eşdeğer Gerilme



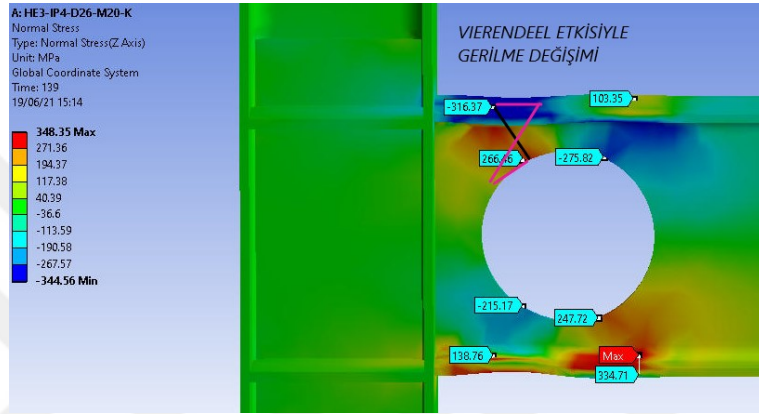
Şekil 6.24 : $D/h=0.75$ $M/h=0.33$ Eşdeğer Gerilme



Şekil 6.25 : $D/h=0.75$ $M/h=0.50$ Eşdeğer Gerilme



Şekil 6.26: $D/h=0.75$ $M/h=0.67$ Eşdeğer Gerilme



Şekil 6.27 : $D/h=0.65$ $M/h=0.33$ Vierendeel Etkisi

Şekil 6.27’de zayıflatma çapı büyüdükçe artan Vierendeel etkisi görülmektedir. Vierendeel momenti etkisiyle T kesit içinde yön değiştiren gerilmeler şekil üzerinde gösterilmiştir.

Yukarıda 6.17’den 6.26’ya kadar olan şekiller birleşim üzerindeki eşdeğer gerilme dağılımı parametrik değişimlere bağlı olarak göstermektedir. Parametrik değişimin gerilme dağılımı üzerindeki etkisi bu şekillerden daha net anlaşılmaktadır.

Tablo 6.3 : Analiz Sonuçları

ISIM	BİRL. TÜRÜ	Wx cm3	Wpx cm3	My kN.m	Mu kN.m	My' kN.m	M'u kN.m	Awg cm2	V kN	Vy kN	Vng kN	Vy/Vng	Mu/Musol	E mj	E/Mu 10 ⁵
HEA3-IPE4-DUZ	SOLID	1156	1307	355	494.36			34.4	494.36	355	629	0.564	1	3.43E+08	6.94
HEA3-IPE4-RED	ZKE	793.5	931	244	385.68	183	289.26	34.4	385.68	244	629	0.388	0.780	2.68E+08	6.95
HEA3-IPE4-D20-M15	ZGE	1127.8	1221	266	359.32	226.1	305.422	17.2	359.32	266	314.7	0.845	0.727	2.86E+08	7.96
HEA3-IPE4-D20-M20	ZGE	1127.8	1221	270	340.54	216	272.432	17.2	340.54	270	314.7	0.858	0.689	2.80E+08	8.22
HEA3-IPE4-D20-M25	ZGE	1127.8	1221	272	356.78	204	267.585	17.2	356.78	272	314.7	0.864	0.722		0.00
HEA3-IPE4-D20-M30	ZGE	1127.8	1221	277	371.1	193.4	259.77	17.2	371.1	277	314.7	0.880	0.751	2.62E+08	7.06
HEA3-IPE4-D20-M35	ZGE	1127.8	1221	280	376.84	182	244.95	17.2	376.84	280	314.7	0.890	0.762	2.58E+08	6.85
HEA3-IPE4-D20-M40	ZGE	1127.8	1221	292	388.18	175.2	232.91	17.2	388.18	292	314.7	0.928	0.785	2.52E+08	6.49
HEA3-IPE4-D26-M20	ZGE	1093.5	1161	198	282.22	158.4	225.8	12.04	282.22	198	220.33	0.899	0.571	2.39E+08	8.47
HEA3-IPE4-D26-M25	ZGE	1093.5	1161	210	284.3	157.5	213.2	12.04	284.3	210	220.33	0.953	0.575	2.39E+08	8.41
HEA3-IPE4-D26-M30	ZGE	1093.5	1161	213	288.2	149.1	201.7	12.04	288.2	213	220.33	0.967	0.583	2.40E+08	8.33
HEA3-IPE4-D26-M35	ZGE	1093.5	1161	219	295.7	140.4	192.2	12.04	295.7	219	220.33	0.994	0.598	2.40E+08	8.12
HEA3-IPE4-D26-M40	ZGE	1093.5	1161	223	303.9	133.8	182.3	12.04	303.9	223	220.33	1.012	0.615	2.42E+08	7.96
HEA3-IPE4-D30-M20	ZGE	1060	1114	160	218.88	128	175.1	8.6	218.88	160	157	1.019	0.443	1.86E+08	8.50
HEA3-IPE4-D30-M25	ZGE	1060	1114	161	216.42	120.75	162.3	8.6	216.42	161	157	1.025	0.438	1.86E+08	8.59
HEA3-IPE4-D30-M30	ZGE	1060	1114	162	217.84	113.4	152.5	8.6	217.84	162	157	1.032	0.441	1.87E+08	8.56
HEA3-IPE4-D30-M35	ZGE	1060	1114	162	220.64	105.3	143.4	8.6	220.64	162	157	1.032	0.446	1.87E+08	8.48
HEA3-IPE4-D30-M40	ZGE	1060	1114	162	226.96	97.2	136.2	8.6	226.96	162	157	1.032	0.459	1.88E+08	8.28
IPE4-IPE4-DUZ	SOLID	1156	1307	356	494.14			34.4	494	356	629	0.566	1	3.65E+08	7.39
IPE4-IPE4-RED	ZKE	793.5	931	248	381.42	186	286.06	34.4	381	248	629	0.394	0.772	2.81E+08	7.37
IPE4-IPE4-D20-M15	ZGE	1127.8	1221	276	353.56	234.6	300.5	17.2	353	276	314.7	0.877	0.716	2.98E+08	8.43
IPE4-IPE4-D20-M20	ZGE	1127.8	1221	275	351.06	220	280.8	17.2	351	275	314.7	0.874	0.710	2.94E+08	8.37
IPE4-IPE4-D20-M25	ZGE	1127.8	1221	285	356.78	213.4	267.6	17.2	357	285	314.7	0.906	0.722	2.84E+08	7.96
IPE4-IPE4-D20-M30	ZGE	1127.8	1221	291	366.78	203.7	256.7	17.2	367	291	314.7	0.925	0.742	2.75E+08	7.50
IPE4-IPE4-D20-M35	ZGE	1127.8	1221	295	373.72	191.8	243	17.2	374	295	314.7	0.937	0.756	2.72E+08	7.28
IPE4-IPE4-D20-M40	ZGE	1127.8	1221	307	385.42	184.2	231.3	17.2	385	307	314.7	0.976	0.780	2.71E+08	7.03
IPE4-IPE4-D26-M20	ZGE	1093.5	1161	203	281.28	162.4	225	12.04	281	203	220.33	0.921	0.569	2.48E+08	8.82
IPE4-IPE4-D26-M25	ZGE	1093.5	1161	212	283.7	159	213	12.04	284	212	220.33	0.962	0.574	2.39E+08	8.42
IPE4-IPE4-D26-M30	ZGE	1093.5	1161	217	289.22	152	202	12.04	289	217	220.33	0.985	0.585	2.50E+08	8.64
IPE4-IPE4-D26-M35	ZGE	1093.5	1161	220	295.72	143	192	12.04	296	220	220.33	0.999	0.598	2.51E+08	8.49
IPE4-IPE4-D26-M40	ZGE	1093.5	1161	223	303.62	133.8	182	12.04	304	223	220.33	1.012	0.614	2.53E+08	8.33
IPE4-IPE4-D32-M20	ZGE	1039	1114	130	182.266	104	146	8.6	182	130	157	0.828	0.369	1.60E+08	8.78
IPE4-IPE4-D32-M25	ZGE	1039	1087	131	180.298	98.25	135	6.88	180	131	125.6	1.043	0.365	1.60E+08	8.87
IPE4-IPE4-D32-M30	ZGE	1039	1087	132	180.834	92.4	126	6.88	181	132	125.6	1.051	0.366	1.61E+08	8.90
IPE4-IPE4-D32-M35	ZGE	1039	1087	135	182.396	87.75	119	6.88	182	135	125.6	1.075	0.369	1.62E+08	8.88
IPE4-IPE4-D32-M40	ZGE	1039	1087	136	186.348	81.6	112	6.88	186	136	125.6	1.083	0.377	1.59E+08	8.53
IPE3-IPE3-DUZ	SOLID	557.1	628.4	170	237.92			21.3	238	170	390	0.436	1	1.59E+08	6.68
IPE3-IPE3-RED	ZKE	378	443	144	192.67	116	167.6	21.3	193	124	390	0.318	0.810	1.48E+08	7.67
IPE3-IPE3-D150-M150	ZGE	544	588.4	144	190.896	122.4	162.3	10.65	191	144	195	0.738	0.802	1.46E+08	7.63
IPE3-IPE3-D150-M225	ZGE	544	588.4	157	197.506	121.7	153	10.65	198	157	195	0.805	0.830	1.46E+08	7.41
IPE3-IPE3-D150-M300	ZGE	544	588.4	162	206.12	113.4	144	10.65	206	162	195	0.831	0.866	1.48E+08	7.16
IPE3-IPE3-D150-M375	ZGE	544	588.4	168	220.26	105	137.7	10.65	220	168	195	0.862	0.926	1.52E+08	6.90
IPE3-IPE3-D195-M150	ZGE	528	561	118	158.792	100.3	135	7.455	159	118	136	0.868	0.667	1.27E+08	7.97
IPE3-IPE3-D195-M225	ZGE	528	561	122	162.85	94.55	126.2	7.455	163	122	136	0.897	0.684	1.27E+08	7.80
IPE3-IPE3-D195-M300	ZGE	528	561	128	168.344	89.6	117.8	7.455	168	128	136	0.941	0.708	1.30E+08	7.75
IPE3-IPE3-D195-M375	ZGE	528	561	130	178.362	81.25	111.5	7.455	178	130	136	0.956	0.750	1.26E+08	7.05
IPE3-IPE3-D240-M150	ZGE	502	526	80	111.558	68	78	4.26	111	80	78	1.026	0.469	9.09E+07	8.15
IPE3-IPE3-D240-M225	ZGE	502	526	81	111.444	62.8	86.4	4.26	111	81	78	1.038	0.468	9.16E+07	8.22
IPE3-IPE3-D240-M300	ZGE	502	526	83	114.808	58.1	80.4	4.26	114	83	78	1.064	0.483	9.26E+07	8.07
IPE3-IPE3-D240-M375	ZGE	502	526	92	118.832	57.5	74.3	4.26	118	92	78	1.179	0.499	9.38E+07	7.89
IPE2-IPE2-DUZ	SOLID	194.3	220.6	60.1	80.208			11.2	80	60.1	205	0.293	1.000	4.90E+07	6.11
IPE2-IPE2-RED	ZKE	132	155	48.2	61.23	42	53.3	11.2	61	40.7	205	0.199	0.763	4.13E+07	6.75
IPE2-IPE2-D10-M10	ZGE	189.6	206.6	56	72.366	50.4	65	5.6	72	56	102	0.549	0.902	4.80E+07	6.63
IPE2-IPE2-D10-M15	ZGE	189.6	206.6	57.3	71.702	48.7	61	5.6	72	57.3	102	0.562	0.894	4.80E+07	6.69
IPE2-IPE2-D10-M20	ZGE	189.6	206.6	58.2	74.034	46.6	59	5.6	74	58.2	102	0.571	0.923	4.64E+07	6.27
IPE2-IPE2-D10-M25	ZGE	189.6	206.6	59.7	76.68	44.8	58	5.6	77	59.7	102	0.585	0.956	4.74E+07	6.18
IPE2-IPE2-D10-M30	ZGE	189.6	206.6	59.8	79.76	41.9	56	5.6	80	59.8	102	0.586	0.994	4.81E+07	6.03
IPE2-IPE2-D13-M10	ZGE	184	197	50	62.024	45	56	3.92	62	50	72	0.694	0.773	4.48E+07	7.22
IPE2-IPE2-D13-M15	ZGE	184	197	52	62.798	44.2	53	3.92	63	52	72	0.722	0.783	4.48E+07	7.13
IPE2-IPE2-D13-M20	ZGE	184	197	52.5	65.85	42	53	3.92	66	52.5	72	0.729	0.821	4.47E+07	6.79
IPE2-IPE2-D13-M25	ZGE	184	197	53.4	68.664	40	51	3.92	69	53.4	72	0.742	0.856	4.21E+07	6.13
IPE2-IPE2-D13-M30	ZGE	184	197	54.5	71.618	38.2	50	3.92	72	54.5	72	0.757	0.893	4.22E+07	5.89
IPE2-IPE2-D16-M10	ZGE	175	185	36.7	48.286	33	43	2.24	48	36.7	41	0.895	0.602	3.66E+07	7.58
IPE2-IPE2-D16-M15	ZGE	175	185	37.7	49.398	32	42	2.24	49	37.7	41	0.920	0.616	3.68E+07	7.45
IPE2-IPE2-D16-M20	ZGE	175	185	38	49.896	30.4	40	2.24	50	38	41	0.927	0.622	3.69E+07	7.40
IPE2-IPE2-D16-M25	ZGE	175	185	38.7	52.154	29	39	2.24	52	38.7	41	0.944	0.650	3.74E+07	7.17
IPE2-IPE2-D16-M30	ZGE	175	185	39.1	53.64	27.4	38	2.24	54	39.1	41	0.954	0.669	3.75E+07	6.99

Tablo 6.4 : Birleşim Özellikleri

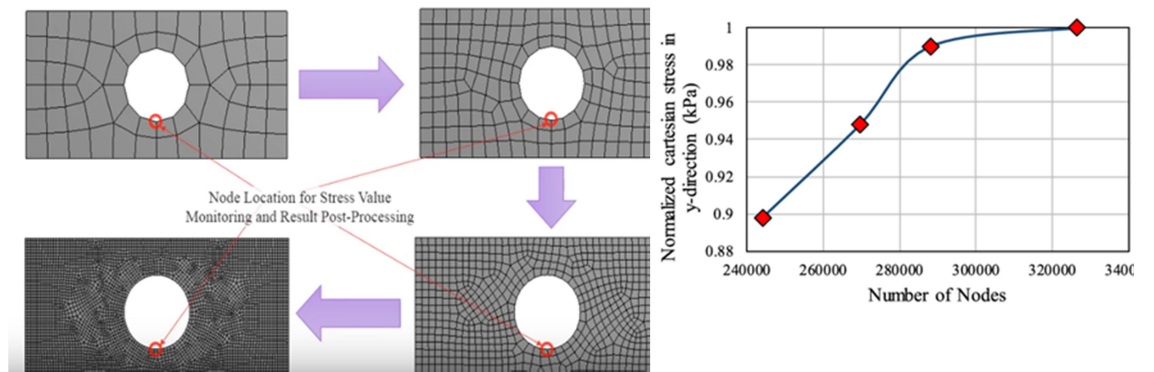
ISIM	BİRL. TÜRÜ	Qy(rad)	Qu(rad)	My kN.m	Mu kN.m	Mu/Musol	E mj	E/Mu 10 ⁵	Ki (kNm/rad)	KYG	PMY	PMT
HEA3-IPE4-DUZ	SOLID	0.0076	0.05	355	494.36	1	3.43E+08	6.94	46900	ÇY	KY	F
HEA3-IPE4-RED	ZKE	0.0055079	0.05	244	385.68	0.780	2.68E+08	6.95	44300	D	DC	F
HEA3-IPE4-D20-M15	ZGE	0.006215	0.05	266	359.32	0.727	2.86E+08	7.96	42800	Y	DC	K
HEA3-IPE4-D20-M20	ZGE	0.0062558	0.05	270	340.54	0.689	2.80E+08	8.22	43160	O	DC	K
HEA3-IPE4-D20-M25	ZGE	0.0063109	0.05	272	356.78	0.722		0.00	43100	D	DC	K
HEA3-IPE4-D20-M30	ZGE	0.0064344	0.05	277	371.1	0.751	2.62E+08	7.06	43050	D	DC	K
HEA3-IPE4-D20-M35	ZGE	0.0064935	0.05	280	376.84	0.762	2.58E+08	6.85	43120	D	DC	K
HEA3-IPE4-D20-M40	ZGE	0.0067671	0.05	292	388.18	0.785	2.52E+08	6.49	43150	D	DC	K
HEA3-IPE4-D26-M20	ZGE	0.0051429	0.05	198	282.22	0.571	2.39E+08	8.47	38500	O	DC	K
HEA3-IPE4-D26-M25	ZGE	0.005483	0.05	210	284.3	0.575	2.39E+08	8.41	38300	O	DC	K
HEA3-IPE4-D26-M30	ZGE	0.0055614	0.05	213	288.2	0.583	2.40E+08	8.33	38300	D	DC	K
HEA3-IPE4-D26-M35	ZGE	0.005718	0.05	219	295.7	0.598	2.40E+08	8.12	38300	D	DC	K
HEA3-IPE4-D26-M40	ZGE	0.0058073	0.05	223	303.9	0.615	2.42E+08	7.96	38400	D	DC	K
HEA3-IPE4-D30-M20	ZGE	0.0048338	0.05	160	218.88	0.443	1.86E+08	8.50	33100	D	DC	K
HEA3-IPE4-D30-M25	ZGE	0.0049235	0.05	161	216.42	0.438	1.86E+08	8.59	32700	Y	DC	F
HEA3-IPE4-D30-M30	ZGE	0.0049693	0.05	162	217.84	0.441	1.87E+08	8.56	32600	D	DC	F
HEA3-IPE4-D30-M35	ZGE	0.0049541	0.05	162	220.64	0.446	1.87E+08	8.48	32700	D	DC	F
HEA3-IPE4-D30-M40	ZGE	0.004939	0.05	162	226.96	0.459	1.88E+08	8.28	32800	D	DC	F
IPE4-IPE4-DUZ	SOLID	0.0070203	0.05	356	494.14	1	3.65E+08	7.39	50710	ÇY	KY	F
IPE4-IPE4-RED	ZKE	0.0051753	0.05	248	381.42	0.772	2.81E+08	7.37	47920	D	RED	F
IPE4-IPE4-D20-M15	ZGE	0.0059323	0.05	276	353.56	0.716	2.98E+08	8.43	46525	Y	DC	K
IPE4-IPE4-D20-M20	ZGE	0.0059537	0.05	275	351.06	0.710	2.94E+08	8.37	46190	Y	DC	K
IPE4-IPE4-D20-M25	ZGE	0.0061769	0.05	285	356.78	0.722	2.84E+08	7.96	46140	O	DC	K
IPE4-IPE4-D20-M30	ZGE	0.0062987	0.05	291	366.78	0.742	2.75E+08	7.50	46200	D	DC	K
IPE4-IPE4-D20-M35	ZGE	0.006377	0.05	295	373.72	0.756	2.72E+08	7.28	46260	D	DC	K
IPE4-IPE4-D20-M40	ZGE	0.0066378	0.05	307	385.42	0.780	2.71E+08	7.03	46250	D	DC	K
IPE4-IPE4-D26-M20	ZGE	0.0049488	0.05	203	281.28	0.569	2.48E+08	8.82	41020	Y	DC	K
IPE4-IPE4-D26-M25	ZGE	0.0055512	0.05	212	283.7	0.574	2.39E+08	8.42	38190	Y	DC	K
IPE4-IPE4-D26-M30	ZGE	0.0053134	0.05	217	289.22	0.585	2.50E+08	8.64	40840	O	DC	K
IPE4-IPE4-D26-M35	ZGE	0.005379	0.05	220	295.72	0.598	2.51E+08	8.49	40900	D	DC	K
IPE4-IPE4-D26-M40	ZGE	0.005439	0.05	223	303.62	0.614	2.53E+08	8.33	41000	O	DC	K
IPE4-IPE4-D32-M20	ZGE	0.0042623	0.05	130	182.266	0.369	1.60E+08	8.78	30500	Y	DC	F
IPE4-IPE4-D32-M25	ZGE	0.0043478	0.05	131	180.298	0.365	1.60E+08	8.87	30130	O	DC	F
IPE4-IPE4-D32-M30	ZGE	0.0043927	0.05	132	180.834	0.366	1.61E+08	8.90	30050	D	DC	F
IPE4-IPE4-D32-M35	ZGE	0.0044806	0.05	135	182.396	0.369	1.62E+08	8.88	30130	D	DC	F
IPE4-IPE4-D32-M40	ZGE	0.0047387	0.05	136	186.348	0.377	1.59E+08	8.53	28700	D	DC	F
IPE3-IPE3-DUZ	SOLID	0.0080211	0.05	170	237.92	1	1.59E+08	6.70	21194	ÇY	KY	F
IPE3-IPE3-RED	ZKE	0.0072202	0.05	144	192.67	0.810	1.48E+08	7.67	19944	D	RED	F
IPE3-IPE3-D150-M150	ZGE	0.0071429	0.05	144	190.896	0.802	1.46E+08	7.63	20160	Y	DC	K
IPE3-IPE3-D150-M225	ZGE	0.0077877	0.05	157	197.506	0.830	1.46E+08	7.41	20160	O	DC	K
IPE3-IPE3-D150-M300	ZGE	0.0080278	0.05	162	206.12	0.866	1.48E+08	7.16	20180	Y	DC	K
IPE3-IPE3-D150-M375	ZGE	0.0083168	0.05	168	220.26	0.926	1.52E+08	6.90	20200	Y	DC	K
IPE3-IPE3-D195-M150	ZGE	0.0062706	0.05	118	158.792	0.667	1.27E+08	7.97	18818	O	DC	K
IPE3-IPE3-D195-M225	ZGE	0.0064904	0.05	122	162.85	0.684	1.27E+08	7.80	18797	O	DC	K
IPE3-IPE3-D195-M300	ZGE	0.0065675	0.05	128	168.344	0.708	1.30E+08	7.75	19490	D	DC	K
IPE3-IPE3-D195-M375	ZGE	0.0068809	0.05	130	178.362	0.750	1.26E+08	7.05	18893	Y	DC	K
IPE3-IPE3-D240-M150	ZGE	0.0050742	0.05	80	111.558	0.469	9.09E+07	8.15	15766	Y	DC	F
IPE3-IPE3-D240-M225	ZGE	0.0051936	0.05	81	111.444	0.468	9.16E+07	8.22	15596	D	DC	F
IPE3-IPE3-D240-M300	ZGE	0.0052913	0.05	83	114.808	0.483	9.26E+07	8.07	15686	D	DC	F
IPE3-IPE3-D240-M375	ZGE	0.0058476	0.05	92	118.832	0.499	9.38E+07	7.89	15733	D	DC	F
IPE2-IPE2-DUZ	SOLID	0.0093906	0.05	60.1	80.208	1.000	4.90E+07	6.11	6400	ÇY	KY	F
IPE2-IPE2-RED	ZKE	0.0079934	0.05	48.2	61.23	0.763	4.13E+07	6.75	6030	Y	RED	F
IPE2-IPE2-D10-M10	ZGE	0.00896	0.05	56	72.366	0.902	4.80E+07	6.63	6250	Y	BB	K
IPE2-IPE2-D10-M15	ZGE	0.009168	0.05	57.3	71.702	0.894	4.80E+07	6.69	6250	Y	BB	K
IPE2-IPE2-D10-M20	ZGE	0.0092823	0.05	58.2	74.034	0.923	4.64E+07	6.27	6270	Y	BB	K
IPE2-IPE2-D10-M25	ZGE	0.0095215	0.05	59.7	76.68	0.956	4.74E+07	6.18	6270	Y	BB	K
IPE2-IPE2-D10-M30	ZGE	0.0095072	0.05	59.8	79.76	0.994	4.81E+07	6.03	6290	Y	BB	K
IPE2-IPE2-D13-M10	ZGE	0.0082372	0.05	50	62.024	0.773	4.48E+07	7.22	6070	Y	DC	K
IPE2-IPE2-D13-M15	ZGE	0.0085809	0.05	52	62.798	0.783	4.48E+07	7.13	6060	Y	DC	K
IPE2-IPE2-D13-M20	ZGE	0.0086491	0.05	52.5	65.85	0.821	4.47E+07	6.79	6070	O	DC	K
IPE2-IPE2-D13-M25	ZGE	0.0087685	0.05	53.4	68.664	0.856	4.21E+07	6.13	6090	O	DC	K
IPE2-IPE2-D13-M30	ZGE	0.0089491	0.05	54.5	71.618	0.893	4.22E+07	5.89	6090	D	DC	K
IPE2-IPE2-D16-M10	ZGE	0.0065302	0.05	36.7	48.286	0.602	3.66E+07	7.58	5620	Y	DC	K
IPE2-IPE2-D16-M15	ZGE	0.0067442	0.05	37.7	49.398	0.616	3.68E+07	7.45	5590	O	DC	K
IPE2-IPE2-D16-M20	ZGE	0.0067857	0.05	38	49.896	0.622	3.69E+07	7.40	5600	D	DC	K
IPE2-IPE2-D16-M25	ZGE	0.0068739	0.05	38.7	52.154	0.650	3.74E+07	7.17	5630	D	DC	K
IPE2-IPE2-D16-M30	ZGE	0.0069449	0.05	39.1	53.64	0.669	3.75E+07	6.99	5630	D	DC	K

6.4. Ağ Yapısı Düzenlemesinin Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçlarına Etkisi

Genel olarak bir sistemin sonlu elemanlar modellenmesine, eleman sayısı az, geometrik ayrıntıların basitleştirildiği, buna karşın fiziksel özelliklerin mümkün olduğunca doğru, ancak ayrıntısız bir biçimde ifade edildiği, bir ağ yapısı modeli ile başlanabilir. Bu kaba modelin çalıştırılmasından alınan sonuçlar, sistemin genel davranışı hakkında ön bilgiler verir. Şekil 6.28’de ağ yapısının kalitesinin sonuçlara etkisi gösterilmiştir.

Diğer yandan kabaca düzenlenen ağ yapısı ile yapılan analizlerde sonuçlardan elde edilen gerilmeler yüzeye dönüştürüldüğünde, yüzeyi oluşturan noktalar arasındaki gerilme farklarının daha hassas ağ yapısıyla elde edilen sonuçlara göre fazla olduğu görülmektedir. Bu durum sonuçların hassaslığını ifade eden regression değeriyle ifade edilebilir. Regression sonucunun (R^2) 1’e yaklaşması sonuçların anlamlı olmasını ifade eder.

Regression değerinin genellikle 0,90 dan büyük olması istenir. Kaba düzenlenen ağ yapısı durumunda ise ani değişimler nedeniyle regression (R^2) değeri düşük çıkmaktadır. Düşük kaliteli ağ yapısı ile elde edilen analiz sonuçlarının düşük regression değeri, ağ kalitesi artırılarak 0,90 değerinin üzerine çıkartılmıştır ve çalışmada daha anlamlı yüzeyler elde edilmiştir.



a) Farklı ağ kalitesi

b) Ağ kalitesinin gerilme dağılımına olan etkisi

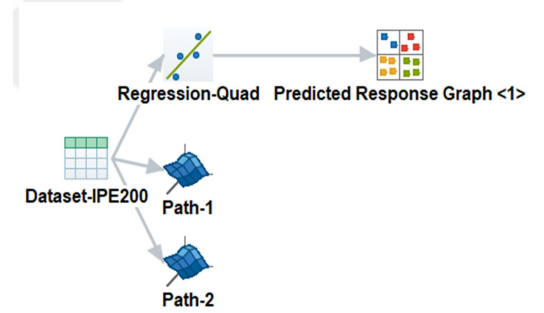
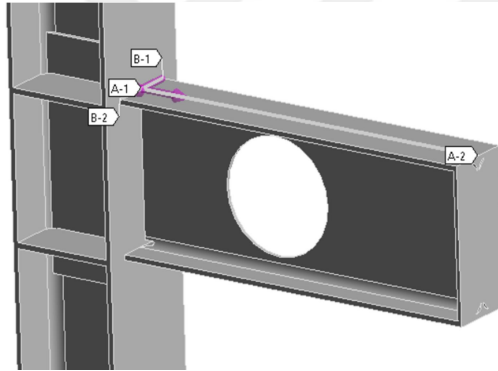
Şekil 6.28 : Ağ yapısının kalitesinin sonuçlara etkisi

6.5. Etkileşim Yüzeylerinin Elde Edilmesi

Bu bölümün amacı gövdedeki boşluk çapının ve gövde boşluğunun kolon yüzüne olan uzaklığının kolon kiriş birleşim bölgesindeki deformasyon ve gerilme dağılımına olan etkilerini araştırmak ve öneriler geliştirmektir. Kiriş gövdesindeki boşluğun çapı ve bu boşluğun merkezinden kolon yüzüne olan uzaklık dikkate alınan parametrelerdir. Bu parametrelere bağlı olarak kolon yüzünde kiriş üst başlığı hizasında plastik deformasyonu veren bir denklem elde edilmiştir.

Kolon kiriş birleşim bölgesinin kiriş başlığındaki plastik deformasyon değişimini elde etmek için birleşimlerde eksen üzerinde *path1* ve *path2* olarak tanımlanan ve plastik şekil değiştirme değişimini veren denklemler *Cornerstone* yazılımı kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 6.29).

Analiz sonuçlarından elde edilen değerler kullanılarak *Cornerstone* yazılımı yardımıyla etkileşim analizi yapılmıştır.



a) B1 ve B2 noktaları arası *path2*, A1 ve A2 noktaları arası *path1*

b) Etkileşim için işlem şeması

Şekil 6.29 : Etkileşim akış şeması

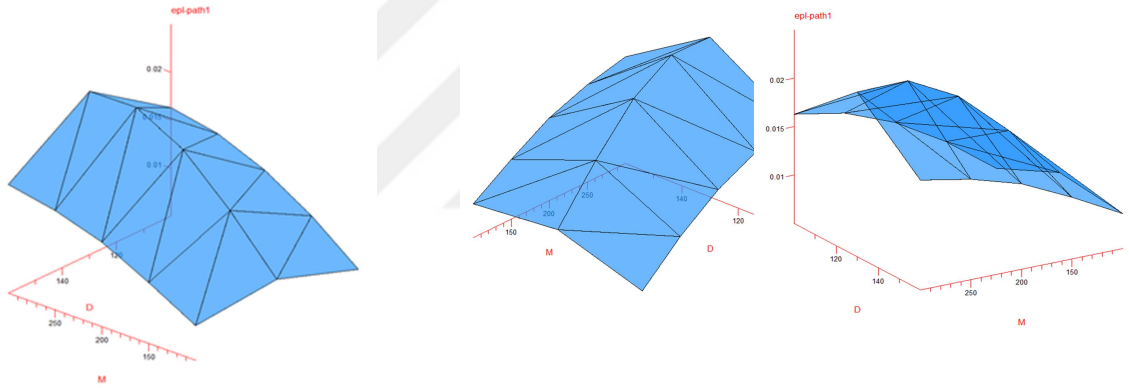
15.4	1 D	2 M	3 epl-path1	4 epl-path2	5
1	100	100	0.006433	0.0058331	
2	100	150	0.010268	0.0081802	
3	100	200	0.013297	0.010543	
4	100	250	0.015346	0.011498	
5	100	300	0.0163	0.011637	
6	130	100	0.0094104	0.0027307	
7	130	150	0.014827	0.0046598	
8	130	200	0.019448	0.0063539	
9	130	250	0.0221	0.0078002	
10	130	300	0.022016	0.0078322	
11	160	100	0.0085983	0.00024096	
12	160	150	0.011354	0.00017699	
13	160	200	0.013809	6.9356e-05	
14	160	250	0.015364	4.4152e-05	
15	160	300	0.016351	5.0499e-05	
16					

Term	path1	path2
Constant	8e-06	0.057
D	9e-06	0.101
M	3e-04	9e-04
D^2	1e-05	0.038
D * M	0.297	0.004
R-Square	0.961	0.963
Adj R-Square	0.946	0.953
RMS Error	0.001	1e-03
Residual df	10	11

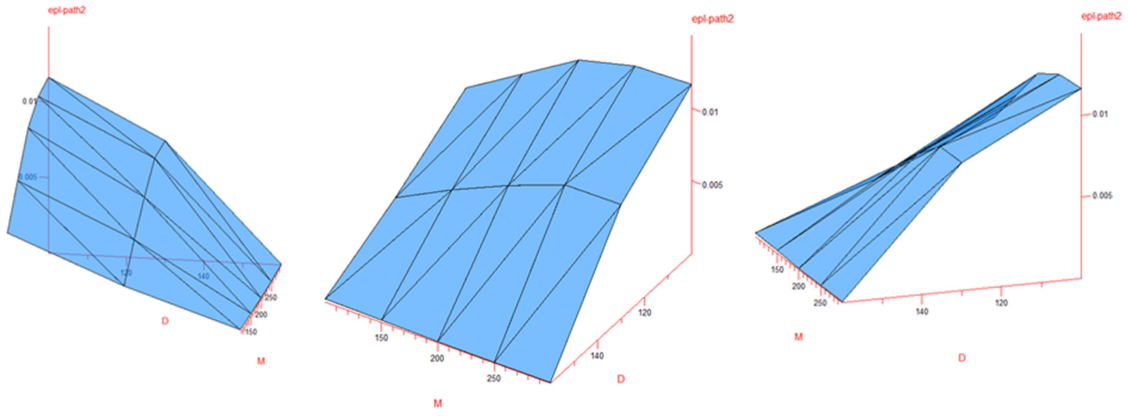
a) IPE200 Kolon IPE200 Kiriş için plastik deformasyon değerleri

b) IPE200 Kolon IPE200 Kiriş *Cornerstone* yazılımından elde edilen regression katsayıları

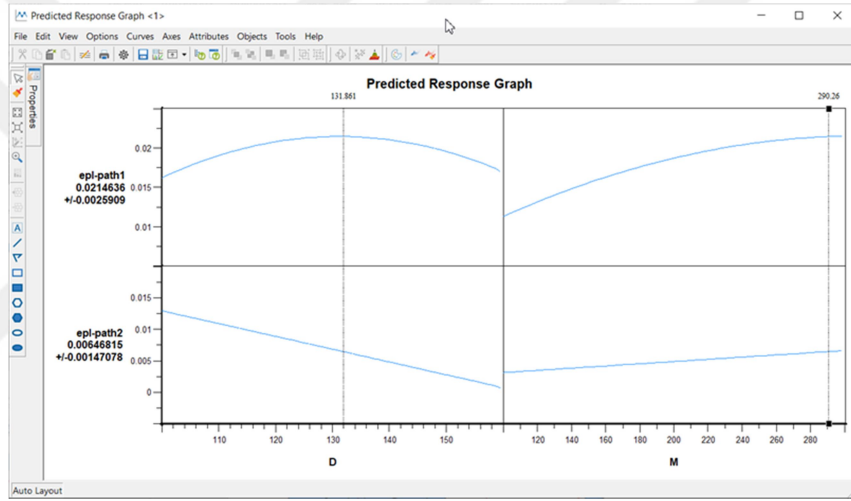
Şekil 6.30 : Etkileşim değerlendirme



Şekil 6.31: IPE200 Kolon IPE200 Kiriş path1 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi



Şekil 6.32: IPE200 Kolon IPE200 Kiriş path2 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi



Şekil 6.32: IPE200 Kolon IPE200 Kiriş path1 ve path2 için iki boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi

path2 Coefficient Table						
1	2	3	4	5	6	7
Term	Coefficient	Std Error	T-Value	Significance	VIF	
1 Constant	0.00850924	0.00399900	2.13	0.0568	0.0000	
2 D	-5.41021e-05	3.02296e-05	-1.79	0.1010	3.0000	
3 M	8.54074e-05	1.88515e-05	4.53	0.0009	5.4006	
4 D * M	-5.14645e-07	1.42504e-07	-3.61	0.0041	6.0964	
5						
6						

Şekil 6.33 : IPE200 Kolon IPE200 Kiriş path2 için plastik deformasyonu veren denklem katsayıları

Etkileşim analizi sonucu kolon kiriş birleşiminde kiriş başlığında D/h_k ve M/h_k değerlerinin değişimine bağlı olarak plastik deformasyon değerini veren denklemin katsayıları Şekil 6.31’ de görülmektedir. Bu denklemde plastik deformasyon değeri (ϵ_{plas});

$$\epsilon_{plas} = -0,000054102.D + 0,000085407.M - 0,000000514645.D.M + 0,00850924 \quad (6.1)$$

D: delik çapı (mm)

M: delik merkezinin kolon yüzünden uzaklığı (mm)

Doğal olarak etkileşim analizinden bulunan sabit (0,00850924) değeri plastik deformasyon durumunda yüklemenin şiddetine bağlı olarak değişebilecek bir değerdir.

Bu denklemde etkileşim katsayısı $R_2 = 0,963$ dır. Bu değer denklemin sapma payının çok küçük olduğunu göstermektedir. Doğru bir sonuç için bu değer 0,90 değerinden büyük olması gerekmektedir.

Şekil 6.29 ve Şekil 6.30’da gösterildiği gibi *path2* eksen kolon yüzündeki plastik deformasyon değişimleri delik çapı (D) ve delik merkezinin kolon yüzüne olan uzaklığı (M) değişimleri için yapılan regression sonucu elde edilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, plastik deformasyonun maksimum olduğu değer $\epsilon_{plas} = 0,0214636$, delik çapı $D = 131,861$ mm, kolon yüzünden uzaklığı ise $M = 290,26$ mm olduğu görülmektedir.

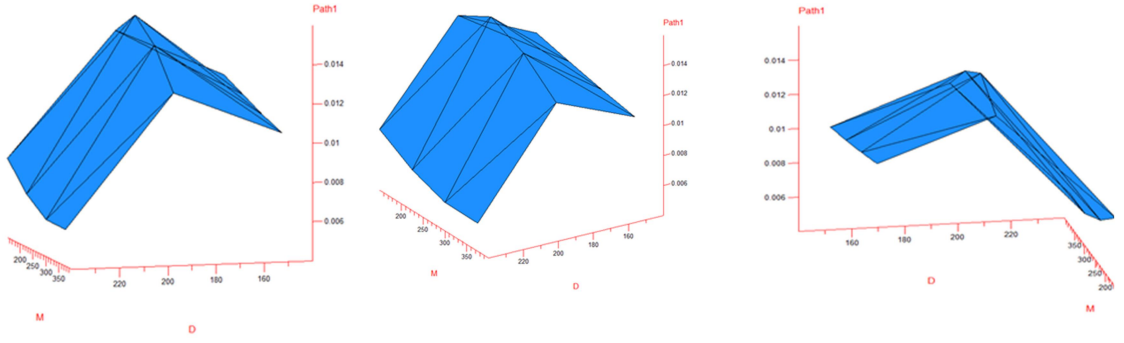
	1 D	2 M	3 Path1	4 Path2
1	150	150	0.0119187	0.0099043
2	150	225	0.011379	0.0050796
3	150	300	0.0108556	0.0060445
4	150	375	0.010409	0.00868
5	195	150	0.014363	0.007215
6	195	225	0.015637	0.0019487
7	195	300	0.014565	0.00027955
8	195	375	0.012627	0.0002236
9	240	150	0.008048	0.0043126
10	240	225	0.0067057	3.6087e-05
11	240	300	0.0058804	2.2965e-05
12	240	375	0.0058627	3.3408e-05
13				

Term	Path1	Path2
Constant	2e-05	4e-04
D	4e-06	0.001
M	0.76	0.374
D^2	3e-06	3e-06
R-Square	0.977	0.959
Adj R-Square	0.963	0.944
RMS Error	7e-04	9e-04
Residual df	7	8

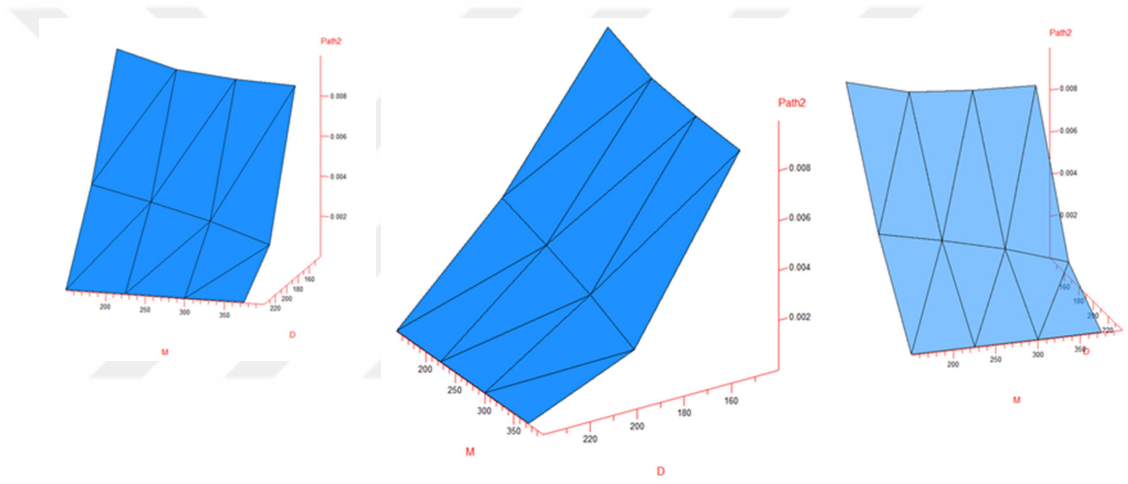
a) IPE300 Kolon IPE300 Kiriş için plastik deformasyon değerleri

b) IPE300 Kolon IPE300 Kiriş Cornerstone yazılımından elde edilen regression katsayıları

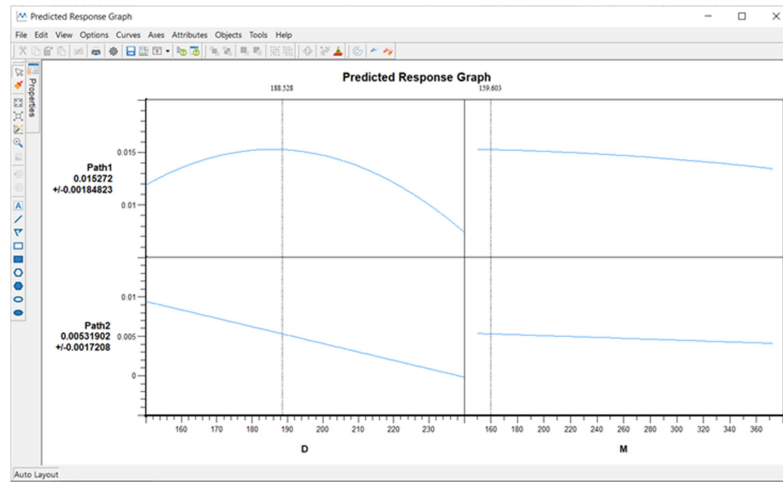
Şekil 6.34 : IPE300 Kolon IPE300 kiriş etkileşim değerlendirilmesi



Şekil 6.35 : PE300 Kolon IPE300 kiriş Path1 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi



Şekil 6.36 : IPE300 Kolon IPE300 kiriş path2 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi



Şekil 6.37: IPE300 Kolon IPE300 kiriş path1 ve path2 için iki boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi

1 Term	2 Coefficient	3 Std Error	4 T-Value	5 Significance	6 VIF	7	8
1 Constant	0.0281148	0.00484952	5.80	0.0004	0.0000		
2 D	-0.000116113	2.44393e-05	-4.75	0.0014	3.2863		
3 M	-1.65801e-05	1.75983e-05	-0.94	0.3737	5.4006		
4 D * M	5.78633e-08	8.86871e-08	0.65	0.5324	6.2423		
5							
6							

Şekil 6.38 : IPE300 Kolon IPE300 kiriş path2 için plastik deformasyonu veren denklem katsayıları

Etkileşim analizi sonucu IPE300 kolon-kiriş birleşim bölgesinde kiriş başlığında parametre değişimlerine bağlı olarak plastik deformasyon değerini veren denklemin katsayıları Şekil 6.36’da verilmektedir. Bu denklem için Etkileşim katsayısı $R^2 = 0,959$ dır

$$\epsilon_{\text{plas}} = -0,000116113.D - 0,0000165801.M + 0,0000000578633.D.M + 0,0281148 \quad (6.2)$$

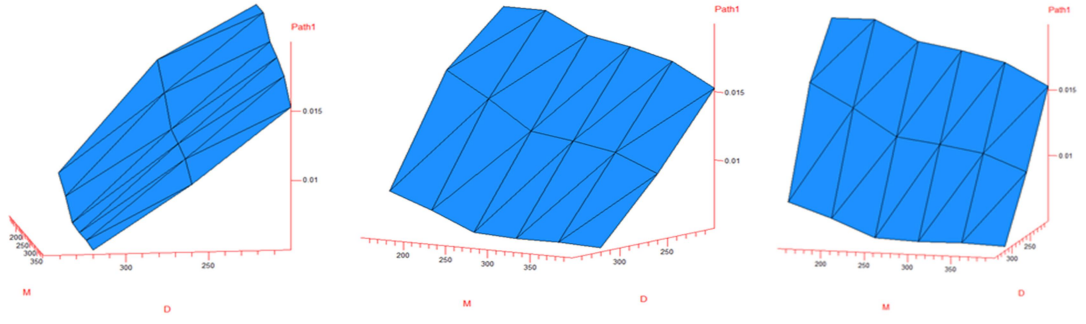
1 D	2 M	3 Path1	4 Path2	5
200	150	0.019996	0.0079974	
200	200	0.019794	0.0050658	
200	250	0.018271	0.0031869	
200	300	0.017721	0.0033181	
200	350	0.016944	0.0009941	
200	400	0.01528	0.00018967	
260	150	0.016	0.0025	
260	200	0.014181	0.002863	
260	250	0.012114	0.00076786	
260	300	0.011675	0.0001106	
260	350	0.011135	0.0001011	
260	400	0.0098701	0.00011238	
320	150	0.008	0.001	
320	200	0.0068821	0.00092032	
320	250	0.0055442	2.061e-05	
320	300	0.0053993	9.3848e-06	
320	350	0.0054332	9.4743e-06	
320	400	0.0053049	4.3892e-06	

Term	Path1	Path2
Constant	1e-04	5e-09
D	0.51	2e-07
M	0.026	5e-07
D^2	0.225	0.599
R-Square	0.986	0.963
Adj R-Square	0.982	0.955
RMS Error	7e-04	4e-04
Residual df	13	14

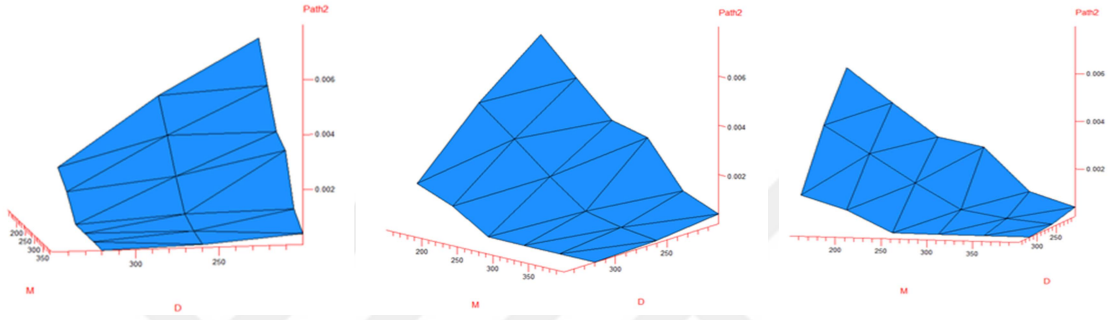
a) IPE400 Kolon IPE400 Kiriş için plastik deformasyon değerleri

b) IPE400 Kolon IPE400 Kiriş Cornerstone yazılımından elde edilen regression katsayıları

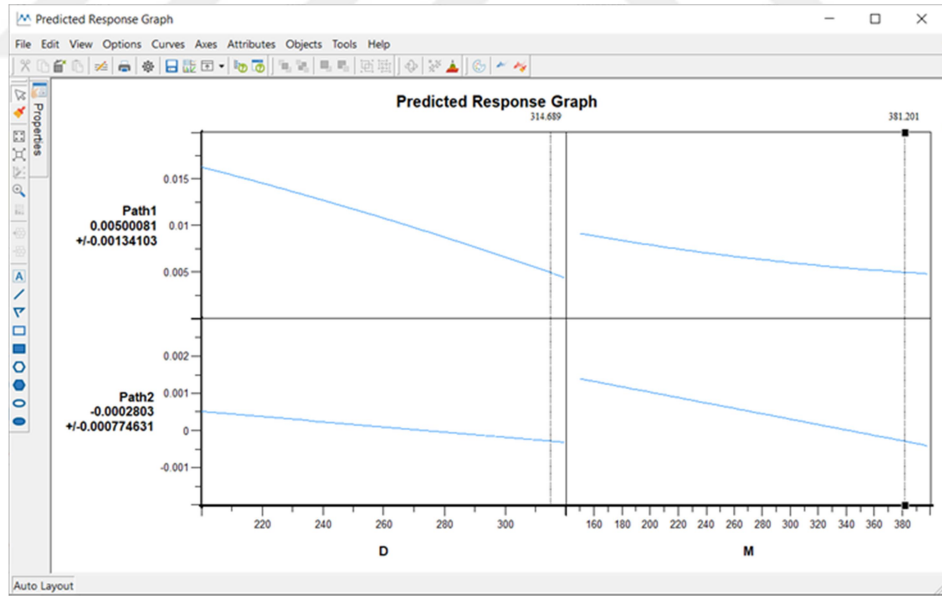
Şekil 6.39 : IPE400 Kolon IPE400 kiriş etkileşim değerlendirme



Şekil 6.40 : IPE400 Kolon IPE400 kiriş path1 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi



Şekil 6.41 : IPE400 Kolon IPE400 kiriş Path2 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi



Şekil 6.42 : IPE400 Kolon IPE400 kiriş path1 ve path2 için iki boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi

1 Term	2 Coefficient	3 Std Error	4 T-Value	5 Significance	6 VIF
1 Constant	0.0211490	0.00167170	12.65	0.0000	0.0000
2 D	-5.93208e-05	6.31842e-06	-9.39	0.0000	3.3722
3 M	-5.05004e-05	5.80546e-06	-8.70	0.0000	5.4006
4 D * M	1.37455e-07	2.19426e-08	6.26	0.0000	6.2879

Şekil 6.43 : IPE400 Kolon IPE400 kiriş Path2 için plastik deformasyonu veren denklem katsayıları

Etkileşim analizi sonucu IPE400 kolon-kiriş birleşim bölgesinde kiriş başlığında parametre değişimlerine bağlı olarak plastik deformasyon değerini veren denklemin katsayıları Şekil 6.40’da görülmektedir. Bu denklem için etkileşim katsayısı $R^2 = 0,963$ dır.

$$\epsilon_{plas} = -0,0000593208.D - 0,0000505004.M + 0,0000000137455.D.M + 0,0211490 \quad (6.3)$$

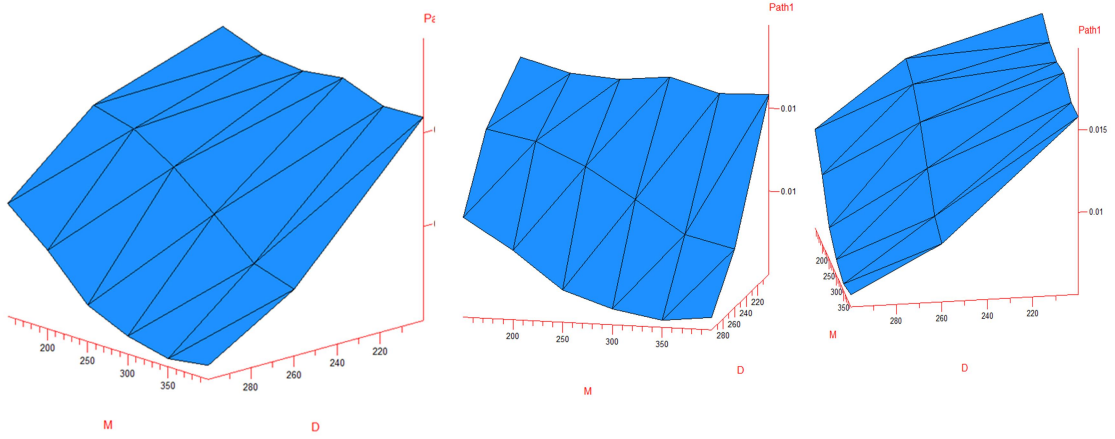
18:4	1 D	2 M	3 Path1	4 Path2	5
1	200	150	0.0173	0.0051499	
2	200	200	0.016489	0.0046561	
3	200	250	0.016271	0.0031869	
4	200	300	0.016576	0.0017739	
5	200	350	0.015731	0.00069781	
6	200	400	0.015822	0.00028334	
7	260	150	0.015	0.003	
8	260	200	0.0144	0.0020819	
9	260	250	0.013042	0.0006373	
10	260	300	0.011201	0.00025876	
11	260	350	0.009251	0.00017423	
12	260	400	0.0085344	0.00015676	
13	300	150	0.011	0.002	
14	300	200	0.0091804	0.0008251	
15	300	250	0.0069351	6.6741e-05	
16	300	300	0.0059588	3.2156e-05	
17	300	350	0.0054332	9.4743e-06	
18	300	400	0.0057423	2.9476e-05	

Term	Path1	Path2
Constant	0.218	6e-07
D	0.387	1e-05
M	0.11	3e-05
D^2	0.122	0.24
D * M	0.008	5e-04
M^2	0.369	0.002
R-Square	0.947	0.928
Adj R-Square	0.93	0.913
RMS Error	0.001	5e-04
Residual df	13	14

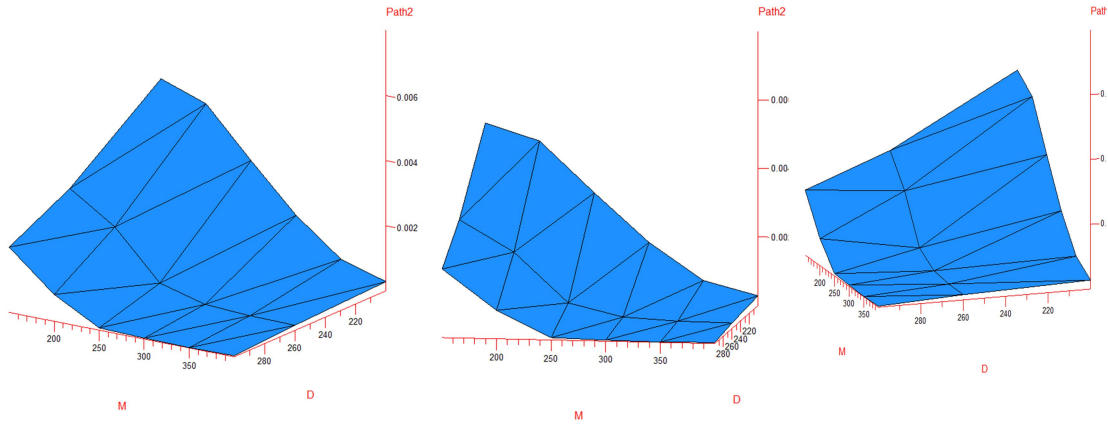
a) HE300A Kolon IPE400 Kiriş için plastik deformasyon değerleri

b) HE300A Kolon IPE400 kiriş *Cornerstone* yazılımından elde edilen regression katsayıları

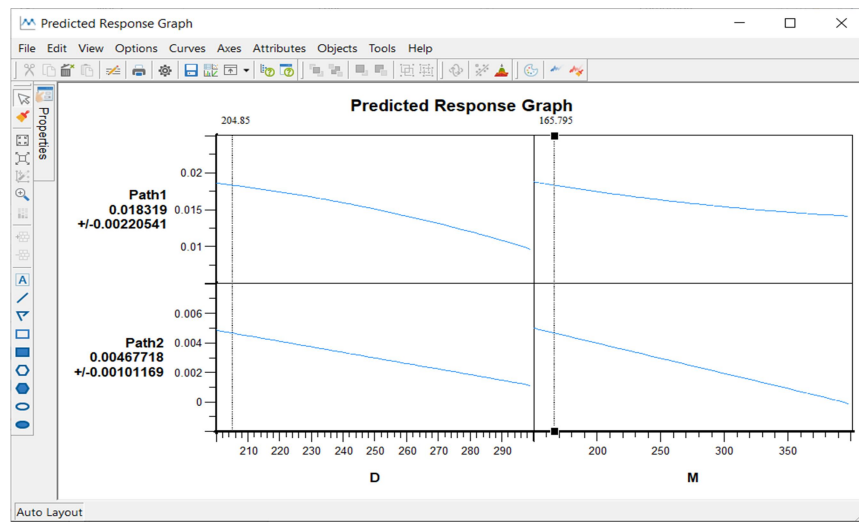
Şekil 6.44 : HE300A Kolon IPE400 Kiriş Etkileşim değerlendirilmesi



Şekil 6.45: HE300A Kolon IPE400 Kiriş path1 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi



Şekil 6.46: HE300A Kolon IPE400 Kiriş Path2 için üç boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi



Şekil 6.47: HE300A Kolon IPE400 Kiriş path1 ve path2 için iki boyutlu parametrik plastik deformasyon değişimi

Path2 Coefficient Table

1	2	3	4	5	6	7
Term	Coefficient	Std Error	T-Value	Significance	VIF	
Constant	0.0207454	0.00240502	8.63	0.0000	0.0000	
D	-6.18727e-05	9.37099e-06	-6.60	0.0000	3.3722	
M	-5.03965e-05	8.35213e-06	-6.03	0.0000	6.2450	
D * M	1.46097e-07	3.25435e-08	4.49	0.0005	7.0265	

Rows Selected: 0 All Rows: 4 rows

Şekil 6.48: HE300A Kolon IPE400 Kiriş Path2 için plastik deformasyonu veren denklem katsayıları

Path1 Coefficient Table

1	2	3	4	5	6	7
Term	Coefficient	Std Error	T-Value	Significance	VIF	
Constant	0.0188017	0.0145169	1.30	0.2178	0.0000	
D	0.000104647	0.000116965	0.89	0.3872	18.1948	
M	-4.02710e-05	2.35047e-05	-1.71	0.1104	7.5973	
D^2	-3.89092e-07	2.35061e-07	-1.66	0.1218	18.1948	
M^2	3.94602e-08	4.23640e-08	0.93	0.3686	7.5973	

Rows Selected: 0 All Rows: 5 rows

Şekil 6.49 : HE300A Kolon IPE400 Kiriş Path1 için plastik deformasyonu veren denklem katsayıları

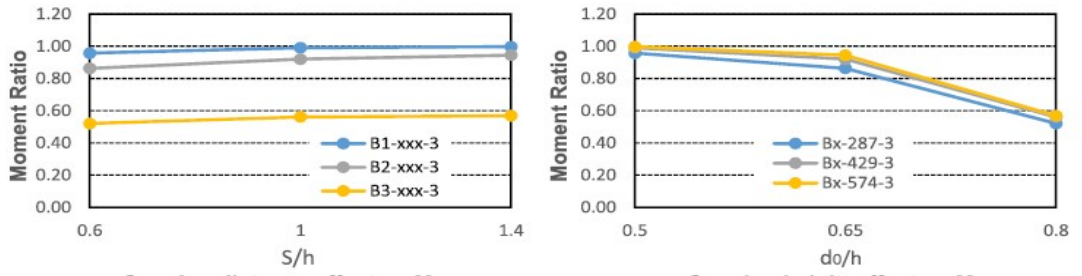
Etkileşim analizi sonucu HE300A kolon IPE400 kiriş birleşim bölgesinde kiriş başlığında parametre değişimlerine bağlı olarak plastik deformasyon değerini veren denklemin katsayıları Şekil 6.30'da görülmektedir. Bu denklem için Etkileşim katsayısı $R^2 = 0,928$ dır.

$$\epsilon_{\text{plas}} = -0,0000593208.D - 0,0000505004.M + 0,0000000137455.D.M + 0,0211490 \quad (6.3)$$

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Tsavdaridis ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada zayıflatma çapına ve zayıflatma merkezinin kolon yüzüne olan uzaklığına bağlı olarak, zayıflatılmış enkesitteki akma momentinin zayıflatılmamış enkesitteki akma momentine oranı Şekil 7.1 de verilmiştir.

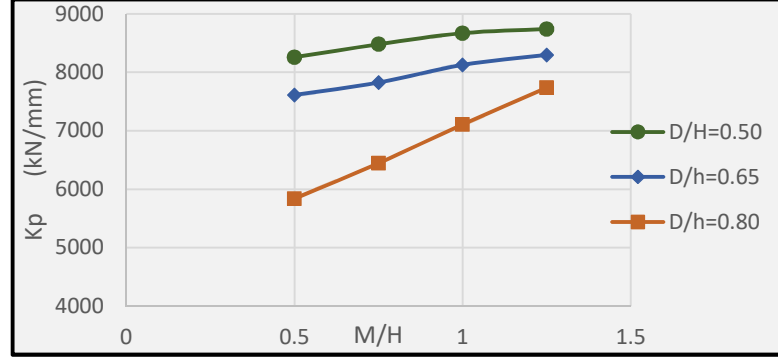
Bu grafikte gösterilenler, B1 ile ifade edilen kiriş yüksekliğinin 0.5 katı ($d_o=0.5h$) azaltma, B2 kiriş yüksekliğinin 0.65 katı ($d_o=0.65h$) azaltma ve B3 kiriş yüksekliğinin 0.8 katı ($d_o=0.80h$) azaltma yapılmış kesitlerdir. Soldaki grafikte deliğin merkezinden kolon yüzüne olan uzaklığın kiriş yüksekliğine oranı değeri için (s/h) moment oranı, sağdakinde ise boşluk çapının kiriş yüksekliğine oranına bağlı moment oranı gösterilmektedir. Grafikteki gösterilen bu değerler maksimum moment değerleri içinde geçerlidir.



Şekil 7.1 : Tsavdaridis ve diğ. (2019) akma momentine etki eğrisi

2. Çalışmanın altıncı bölümünde Şekil 6.14, Şekil 6.15, Şekil 6.16, Şekil 6.17’de olarak verilen eğriler ile Tsavdaridis ve diğ. (2019)’nin geliştirdiği ve Şekil 7.1’de verilen eğrilere benzer değerleri ifade etmektedir. İki çalışmanın sonuçları bu eğriler üzerinden karşılaştırılabilir. Sonuçlar küçük farklarla birbirine oldukça yakındır.

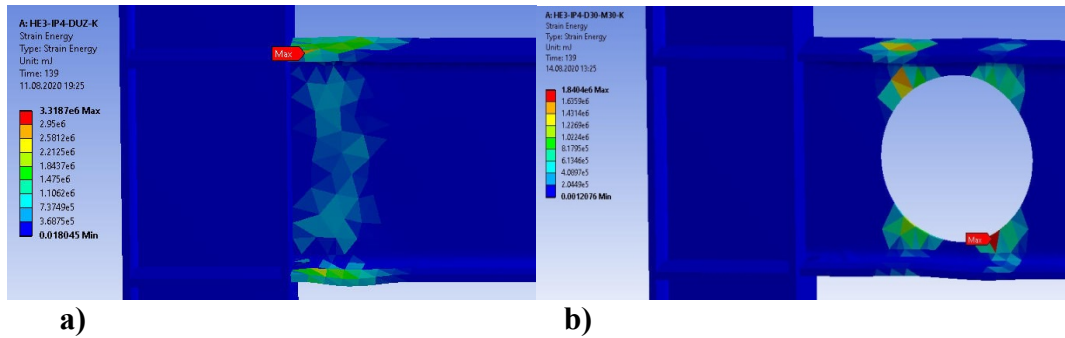
Her iki çalışmanın sonucundan zayıflatma çapına bağlı olarak zayıflatılmış enkesitin moment taşıma kapasitesinin zayıflatılmamış enkesitin moment taşıma kapasitesine oranı 0,45~0,90 arasında değişirken, azaltma merkezinin kolon yüzüne uzaklığının etkisi azaltma çapının etkisi kadar olmamaktadır. Zayıflatma merkezinin kolon yüzünden uzaklığı arttıkça, bu değer çalışmada maksimum 1 olarak alınmıştır ($M/h=1$), %10’a varan artış görülmektedir.



Şekil 7.2 : K_p değişimi

3. Şekil 7.2, 8 katlı çerçevelerin itme analizinin (*pushover*) sonucu elemanlarda plastik deformasyon sonrası yapı rijitliği değerini göstermektedir. Bu değer kuvvetin deplasmana bölümüyle elde edilmiştir ($K_p = V/\nabla$). Özellikle D/h oranı 0.80 için yatay rijitlik %28 oranında azalırken, boşluk merkezinin kolon yüzüne uzaklığı (M/h) arttıkça bu azalmanın %10 seviyelerine geldiği görülmektedir.

4. Birleşimde birim moment başına harcanan enerjinin büyüklüğü ve yeri incelendiğinde solid kesitler için harcanan toplam enerji fazla olsa da zayıflatılmış kesitler için birim moment başına düşen şekil değiştirme enerjisi solid kesite göre daha fazladır. Solid kesitlerde enerjinin büyük bölümü birleşim bölgesinde sönümlenirken, ZGE birleşimlerde zayıflatılmış bölgede sönümlenmektedir. Boşluk çapının boşluğun kolon yüzüne olan uzaklık oranı 0.80 ile 1.10 ($D/M \approx 0.8-1.10$) değerlerinde birim moment başına sarf edilen şekil değiştirme enerjisinin en yüksek değerde olduğu görülmektedir. Bu açıdan zayıflatmanın yeri için bu değerlerin seçilmesi uygundur.



Şekil 7.3 : Şekil değiştirme enerjisi a) Solid kesit b) ZGE

5. ZGE birleşimlerinde davranış üzerine istenilen etkiyi gösterdiği söylenebilir. Tsavdaridis ve diğerlerinin (2019) yaptıkları çalışmanın sonunda ZGE birleşimlerin tasarımı için verilen değerlere bakıldığında,

$$\begin{aligned} 0.65 h &\leq d_o \leq 0.80 h \\ 0.65 h &\leq S \leq 1.40 h \end{aligned} \quad (7.1)$$

Burada:

h = kiriş yüksekliği

d_o = zayıflatma çapı

S = zayıflatma merkezinden kolon yüzüne olan mesafe

Tsavdaridis ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada performansındaki belirsizlikler nedeniyle $d_o=0.50h$ kullanımını önermemişlerdir.

Bu çalışmada $d_o/h = 0.65$ değerini en uygun değer olarak görülmektedir. Ayrıca birim moment için sarf edilen enerjiye göre d_o/S oranı $0.80 - 1.10$ değeri maksimum aralığa karşılık gelmektedir.

6. Birleşimler için elde edilen etkileşim analizlerinden birleşim bölgesinde Path2 ile tanımlanan bölgede delik çapı ve uzaklığın artmasıyla deformasyonlar azaldığı görülmekte. $D=0.65-0.80.h$ azaltma değerlerinde kolon yüzüne yakın bölgelerde kaynak ulaşım deliği ve civarında deformasyonların yüksek olduğu dikkate alındığında bu değerler için kolon yüzü uzaklığının $M > 0.8 h$ olacak şekilde seçmenin uygun olduğu görülmektedir.

7. Path1 ile tanımlanan kiriş eksenindeki etkileşim değerine bakıldığında IPE200 ve IPE300 kesitlerde $D=0.60-0.70h$ değerleri arasında kiriş ekseninde daha büyük deformasyon değerleri görülmekte, bu değerin altındaki ve üzerindeki değerlerde deformasyon azalmaktadır.

Path1 ile gösterilen ekseninde tüm birleşim türlerinde ve çerçevelerdeki kirişlerde deformasyonlar, delik merkezinde geçen düşey eksen etrafında yoğunlaşmaktadır. Çerçeve çözümlemelerinden elde edilen etkileşim grafiklerinde azaltma çapının

artmasıyla gerilmeler azalmaktadır. Bu durumda en uygun uzaklığın $M=1.0h$ olduğu söylenebilir.

8. Tüm bu değerlendirilmelerin sonucunda ZGE kesitlerin sünek davranış için birleşim bölgesinde istenmeyen aşırı deformasyonları azaltma bölgesine çekerek istenen davranışı gösterdiği ve bunun için en uygun azaltma çapını $D=0.6-0.70h$, azaltma merkezi kolon yüzü uzaklığını $M = 0.80-1.20h$ ve ayrıca D/M oranı $0.80 - 1.10$ değerleri olduğu görülmüştür.

9. Elde edilen sonuçlar çalışmada kullanılan birleşimler ve çerçeve tipleri ile sınırlıdır. Daha farklı birleşimler ve çerçeve tipleriyle, elemanların malzeme ve kesitleri çeşitlendirilerek yapılacak çalışmalarla birlikte büyük çaplı zayıflatılmış gövde en kesitlerde azalan kayma dayanımına karşı delik çevresinde kullanılacak gövde takviyeli kesitlerin davranışının incelenmesi de ileri bir çalışma olarak konuya katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

ANSI/AISC 358-05 (2005). Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA.

Arda, T.S. ve Uzgider, E. (1986). Çelik Yapılarda Taşıma Gücü, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul s. 4-18.

Ashrafi, Y., Behzad, R. and Howson, P. W. (2009). Evaluation of the Performance of Reduced Beam Section (RBS) Connections in Steel Moment Frames Subjected to Cyclic Loading, Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE 2009), Vol II, London, U.K.

Bruneau, M., Uang C. M. and Sabelli, R. (2011). Ductile Design of Steel Structures, The McGraw-Hill Companies, 2. Edition.

Brunesi, E., Nascimbene, R., and Rassati, G. A. (2015). Seismic response of MRFs with partially-restrained bolted beam-to-column connections through FE analyses. *J. Constr. Steel Res.* 107, 37–49. doi:10.1016/j.jcsr.2014. 12.022

Chen, S. J. (2001). Design of ductile seismic moment connections, increased beam section method and reduced beam section method. *International Journal of steel structures.*1:1, 45-52.

CISC/ICCA (2008). Moment Connections for Seismic Applications. Canadian Institute of Steel Construction, Markham, Ontario, Canada.

Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Yönetmeliği (2018). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.

Pachoumis, D.T., Galoussis, E.G., Kalfas, C.N. and Christitsas A.D. (2009). Reduced beam section moment connections subjected to cyclic loading: Experimental analysis and FEM simulation , , *Journal of Constructional Steel Research.*

Pachoumis, D.T., Galoussis, E.G., Kalfas, C.N. and Efthimiou, I.Z. (2010). Cyclic performance of steel moment-resisting connections with reduced beam sections experimental analysis and finite element model simulation , *Journal of Constructional Steel Research.*

Elnashai, A. and Sorno, L.D. (2008). Fundamentals of Earthquake Engineering, John Wiley&Sons, Ltd. Publications.

EN 1993-1-8 (2005). Eurocode 3: Design of Steel Structures-Part 1.8, Design of joints. European Committee for Standardizations, Brussels.

Engelhardt, M.D., Winneberger, T., Zekany, A. and Potyraj, T. (1996). 'The dogbone connection - Part 11', *Modern Steel Construction.*

FEMA 350 (2000). Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

FEMA 355F, (2000). State of the Art Report on Performance Prediction and Evaluation of Steel Moment-Frame Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington.

Gilton, C.S. and Uang, C.M. (2002). Cyclic Response and Design Recommendations of Weak-Axis Reduced Beam Section Moment Connections, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 128(4), 452-463.

Hedayat, A.A., Saffari, H. and Eghbali, A. (2011). Behaviour of steel reduced beam web (RBW) connections with drilled voids. 5th SASTech. Mashhad, Iran: Khavaran Higher-education Institute; 2011.

Hedayat, A.A. and Celikag, M. (2009). "Post-Northridge connection with modified beam end configuration to enhance strength ductility", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, No. 7, pp. 1413–1430.

Jin, J. and El-Tawil, S. (2005). Seismic performance of steel frames with reduced beam section connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 61:4, 453–471.

Jones, S. L., Fry, G. T. and Engelhardt, M. D. (2002). "Experimental Evaluation of Cyclically Loaded Reduced Beam Section Moment Connections." *Journal of Structural Engineering*, 128(4), 441-451.

Karip, C. (2014). Zayıflatılmış kiriş enkesitli (ZKE) çelik çerçevelerin deprem yükleri altında doğrusal olmayan karşılaştırmalı performans hesabı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kazemi, M.T. and Hoseinzadehasl, M. (2011). Modeling of inelastic mixed hinge and its application in analysis of the frames with reduced beam section. *International Journal of Steel Structures*. 11:1, 51-63.

Kildashti, K., Mirghaderi, R. and Kani, I. M. (2012). The Efficiency of Reduced Beam Section Connections for Reducing Residual Drifts in Moment Resisting Frames, University of Tehran, Tehran, Iran.

Koparan, B. (2006). Süneklik Düzeyi Yüksek ve Süneklik Düzeyi Normal Moment Birleşimlerinin Analizi İçin Program Hazırlanması , Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü.

Lee, C.H. and Chung, S.W. (2007). A simplified analytical story drift evaluation of steel moment frames with radius-cut reduced beam section. *Journal of Constructional Steel Research*. 63:4, 564-570.

Lee, C.H., Jeon, S.-W., Kim, J.-H. and Uang, C.-M. (2005). Effects of Panel Zone Strength and Beam Web Connection Method on Seismic Performance of Reduced

Beam Section Steel Moment Connections, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 131(12), 1854-1865.

Lee, K. and Foutch, D. (2001). "Performance Evaluation of New Steel Frame Buildings for Seismic Loads." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 653-670.

Lepage, A., Aschheim, M. and Senescu, R. (2004). Shear-yielding steel outriggers for high-rise construction. *Proc. 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Canadian association of earthquake Engineering, Vancouver, B.C. paper 2078.

Li, F.-X., Kanao, I., Li, J. and Morisako, K. (2009). Local Buckling of RBS Beams Subjected to Cyclic Loading, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 12, 1491-1498.

Liu, T.C.H. and Chung, K.F. (2003). Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: finite element investigation. *Journal of Constructional Steel Research*. **59:9**, 1159-1176.

Moore, K. S., Malley, J. O., and Engelhardt, M. D. (1999). "Design of Reduced Beam Section (RBS) Moment Frame Connections." Steel TIPS, Structural Steel Educational Council, Moraga, CA.

Naeim, F. (2001). The seismic design handbook. 2nd ed. Kluwer Academic Publishers; p. 418.

Naughton, D.T., Tsavdaridis, K.D., Maraveas C. and Nicolaou A. (2017). Pushover Analysis of Steel Seismic Resistant Frames with Reduced Web Section and Reduced Beam Section Connections. *Front. Built Environ.* 3:59. doi: 10.3389/fbuil.2018.00059

Oh, S.H., Kim, Y.J. and Moon, T.S. (2007). Cyclic Performance of Existing Moment Connections in Steel Retrofitted with a Reduced Beam Section and Bottom Flange Reinforcements, *Canadian Journal of Structural Engineering*, Vol. 34, 199-209.

Osgood, W. R. and Ramberg, W. (1943). "Description of StressStrain Curves by Three Parameters," NACA Technical Note 902, *National Bureau of Standards*, Washington DC, 1943.

Plumier, A., (1990). New Idea for Safe Structure in Seismic Zone, IABSE Symposium on Mixed Structures Including New Materials, 431-436.

Plumier, A. (1997). "The Dogbone: Back to the Future." *Engineering Journal*, AISC, 2nd Quarter, pp. 61-68.

Shanmugan, N.E., Lian, V.T. and Thevendran, V. (2002). Finite element modelling of plate girders with web openings. *Thin walled structures*. **40:5**, 443-464.

Shen, and Yunlu (2009). Seismic Performance of Steel Moment-Resisting Frames with Nonlinear Replaceable Links , A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of *Applied Science Department of Civil Engineering University of Toronto*.

Smolka, A., and Rauch, E. (1996). *The Earthquakes of Northridge 1994 and Kobe 1995 – Lessons for Risk Assessment and Loss Prevention with Special Reference to Earthquake Insurance*. Acapulco, Mexico: Elsevier Science Ltd.

Tezer, Ö. (2002). Zayıflatılmış Kiriş Enkesitinin Moment Aktaran Çelik Çerçevelerin Elastik ve Elastik Olmayan Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-46

Tsavdaridis, K. and Pilbin, C. (2014). Finite element modelling of steel connections with web openings: aseismic design and progressive collapse The 7th European Conference on Steel and Composite Structures.

Tsavdaridis, K., Faghih, F. and Nikitas, N. (2014). Assessment of Perforated Steel Beam-to-Column Connections Subjected to Cyclic Loading, *Journal of Earthquake Engineering*, 18:8, 1302-1325.

Tsavdaridis, K., Kavoos, B. and Gaochuang, C. (2019). Seismic behaviour of RWS moment connections to deep columns with European sections, *Journal of Constructional Steel Research*, 161,416-435

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği - Deprem Etkisi Altındaki Binaların Tasarımı İçin Esaslar (2018). TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası.

Uang ,C-M., Yu Q-S., Noel, S. and Gross J. (2000). “Cyclic testing of steel moment connections rehabilitated with RBS or welded haunch”. *J Struct Eng, ASCE*; 126(1):57–68.

Uzgider, E. Piroğlu, F., Deren, H., Çağlayan, Ö., (2002). Çelik Yapılar, Çağlayan Kitapevi, İstanbul.

Uzgider, E. ve Çağlayan, Ö. (2005). Depreme Dayanıklı Çelik Yapılar, Türk Yapısal Çelik Derneği Yayınları, Teknik Yayınlar Dizisi-I.

Youngjiu, S., Meng, W. and Yuanqing, W. (2011). Experimental and constitutive model study of structural steel under cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 67, pp. 1185-1198.

Zienkiewicz, O. C., and Cheung, Y. K. (1968). *The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics*, London, McGraw-Hill.

EK-1 : BOYUTLANDIRMA

YÜK HESABI

Çelik Konstrüksiyonun ağırlığı		= 80 kg/m ²
Betonarme Döşeme (50 +70=120 mm)	...0,12x2500	= 300 kg/m ²
Kaplama ağırlığı		= 100 kg/m ²

Döşeme için toplam sabit yük	g	= 480 kg/m ²
Hareketli yük	q	= 200 kg/m ²
Duvar ağırlığı		= 150 kg/m ²
Net duvar yüksekliği 3,5-0,6 = 2,9 mt		
Duvar ağırlığı (birim boy için)	$g_{\text{duvar}} = 2.9 \times 150$	= 435 kg/m

MOMENT ÇERÇEVESİ İÇİN YÜKLER

NORMAL KATLARDA

Sabit yük	$g = 8 \times 480 + 435$	= 4275 kg/m = 42,75 kN/m
Hareketli yük	$g = 8 \times 200$	= 1600 kg/m = 16,00 kN/m

ÇATI KATINDA

Sabit yük	$g = 8 \times 480$	= 3840 kg/m = 38,40 kN/m
Hareketli yük	$g = 8 \times 150$	= 1200 kg/m = 12,00 kN/m

Diğer doğrultuda kirişlerden kolona aktarılan eksenel kuvvet:

$$P_g = 8 \times 4,35 = 34,80 \text{ kN}$$

DEPREM YÜKLERİ

Çerçeve elemanlarının kesitlerini hesaplamak amacıyla yakın saha deprem etkilerini içermesi açısından haritada spektral ivme değeri yüksek olan rastgele bir bölge seçilmiştir.

ENLEM : 41,25

BOYLAM : 35,45

YEREL ZEMİN SINIFI : ZC

Spektral İvme Değerleri

$$S_s = 0,977$$

$$S_1 = 0,304$$

ZB zemin sınıfı için : Az ayrılmış, orta sağlam kayalar

$$(V_s)_{30} \text{ (m/s)} : 360-760 \text{ (m/s)}$$

$$(V_{60})_{30} \text{ (darbe/30cm)} : >50$$

$$(C_u)_{30} \text{ (kpa)} : >250$$

Fay hattına uzaklık $\leq 15 \text{ km}$

Sadece DD1 ve DD2 deprem yer hareketi düzeylerinde S_{D1} 'e uygulanmak üzere :

$$\gamma_F = 1.2 \quad L_F < 15 \text{ km}$$

$$\gamma_F = 1.2 - 0,02 (L_F - 15) \quad 15 \text{ km} < L_F < 25 \text{ km}$$

Yerel Zemin	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_s					
Sınıfı	$S_s < 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s > 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır (Bkz.16.5).					

Yerel Zemin	1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
Sınıfı	$S_1 < 0.10$	$S = 0.20$	$S = 0.30$	$S = 0.40$	$S = 0.50$	$S > 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.8	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır (Bkz.16.5).					

$$S_{DS} = S_S \cdot F_S \quad , \quad S_S = 0,977 \text{ için } F_S = 1,2$$

$$S_{DS} = 0,977 \times 1,2 = 1,1724$$

$$S_{D1} = S_1 \cdot \gamma_F \cdot F_1 \quad , \quad S_1 = 0,304 \text{ için } F_1 = 1,5$$

$$S_{D1} = (0,304) (1,2) (1,5) = 0,5472$$

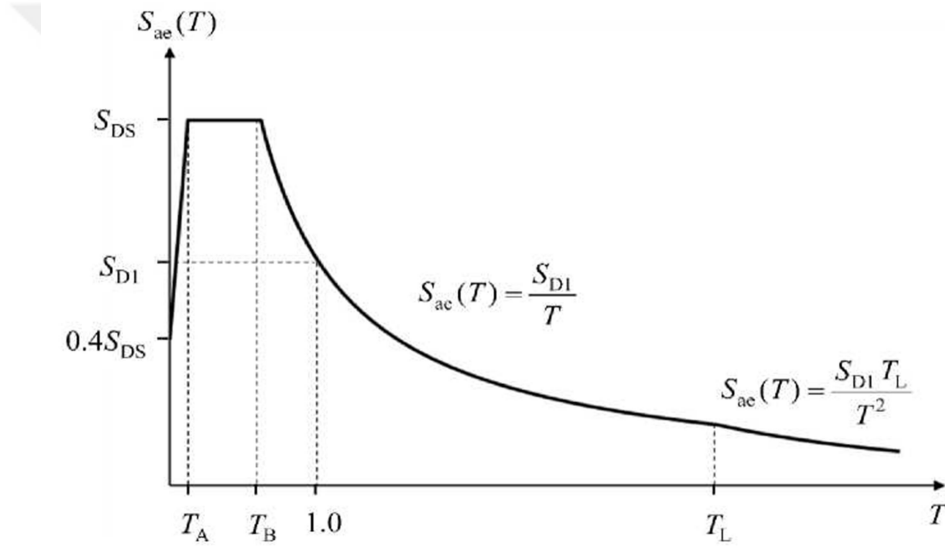
Yatay Elastik Tasarım Spektrumu

$$S_{ae}(T) = (0.4 + 0.6 T/T_A) S_{DS} \quad (0 < T \leq T_A)$$

$$S_{ae}(T) = S_{DS} \quad (T_A \leq T \leq T_B)$$

$$S_{ae}(T) = S_{D1} / T \quad (T_B \leq T \leq T_L)$$

$$S_{ae}(T) = S_{D1} \cdot T_L / T^2 \quad (T_A \leq T \leq T_B)$$



$$T_A = 0,2 (S_{D1}/S_{DS}) = 0,2 \cdot 0,5472/1,1724 = 0,0933 \text{ sn}$$

$$T_B = S_{D1}/S_{DS} = 0,5472/1,1724 = 0,466 \text{ sn}$$

$$T_L = 6 \text{ sn}$$

Ofis binası olarak düşünülen yapının bina kullanım sınıfı ve bina önem katsayısı değeri

BKS=3 (Bina Kullanım Sınıfı)

I = 1,0 (Bina Önem Katsayısı)

Yapının taşıyıcı sistem davranış katsayısı ve dayanım fazlalığı katsayısı deprem yönetmeliği Tablo 4.1 den deprem yüklerinin süneklik düzeyi yüksek çerçevelerle karşılandığı binalar için

R=8 ve D=3

DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})	Bina Kullanım Sınıfı	
	BKS = 1	BKS = 2, 3
$S_{DS} < 0.33$	DTS = 4a	DTS = 4
$0.33 < S_{DS} < 0.50$	DTS = 3a	DTS = 3
$0.50 < S_{DS} < 0.75$	DTS = 2a	DTS = 2
$0.75 < S_{DS}$	DTS = 1a	DTS = 1

Deprem yönetmeliği Tablo 3.2'e göre $0.75 < S_{DS}$ ve BKS=3 için deprem tasarım sınıfı , DTS=2 dir.

TBDY Tablo 3.3'e göre, DTS=2 için,

4 katlı çerçevede, $10.5 < H_N=15 \leq 18.5$ olduğundan, bina yükseklik sınıfı, BYS=6

8 katlı çerçevede, $28 < H_N=29 \leq 42$ olduğundan, bina yükseklik sınıfı, BYS=4

12 katlı çerçevede, $42 < H_N=43 \leq 56$ olduğundan, bina yükseklik sınıfı, BYS=3

Kat ağırlıkları ve kat kütleleri

4 Katlı Çerçeve

$$F_{fi} = F_0 \cdot \frac{m_i \cdot H_i}{\sum_{j=1}^N m_j \cdot H_j}$$

F_{fi} fiktif kuvvetleri kat ağırlıkları ve kat yükseklikleri ile orantılı kuvvetlerdir bu kuvvetler yukardaki bağıntıya göre hesaplanmıştır. Burada periyod hesabı için toplam $F_0=100$ kN alınmıştır.

<i>KAT</i>	<i>w_i</i> (kN)	<i>m_i</i> (kN- s ² /m)					<i>F_o</i> =	<i>100</i>	<i>kN</i>	
			Kat yük	<i>H_i</i>	<i>w_{i,hi}</i>	<i>F_i</i> <i>oranı</i>	Fi	di	mi.di ²	Fi.di
4	1008	103	3.5	15	15120	0.33	32.98	0.0091	0.00852943	0.300157068
3	1280	130	3.5	11.5	14720	0.32	32.11	0.00796	0.008237008	0.255609075
2	1280	130	3.5	8	10240	0.22	22.34	0.006038	0.004739468	0.134880279
1	1280	130	4.5	4.5	5760	0.13	12.57	0.00344	0.001538368	0.043225131
Σ	4848	493	15	Σ =	45840	1	100		0.023044274	0.733871553
			$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N m_i d_{fi}^2}{\sum_{i=1}^N F_{fi} d_{fi}}} =$			Tp =	1.113			
			Ct =	0.08	Tpa =	1.4.Ct.Hn ^{0.75} =	0.854			

$$S_{ae}(T) = S_{D1} / T = 0,5472 / 0,854 = 0,640$$

$$S_{aR}(T) = S_{ae} / R_a(T) = 0,640 / 8 = 0,08$$

$$V_{tE} = m_t \cdot S_{aR}(T_p) \geq 0,04 \cdot m_t \cdot I \cdot S_{DS} \cdot g$$

$$V_{tE} = (493)(0,080 \cdot 9,81) \geq 0,04(493)(1)(1,1724)(9,81)$$

$$V_{tE} = 386,9 \text{ kN} \geq 226,8 \text{ kN}$$

$$DF_{NE} = 0,0075 N V_{tE} = 0,0075 (4)(386,9) = 11,61 \text{ kN}$$

$$F_{iE} = (V_{tE} - DF_{NE}) m_i H_i / (\sum_{j=1}^N m_j H_j)$$

$$F_{iE} = (386,9 - 11,61) m_i H_i / (\sum_{j=1}^N m_j H_j)$$

<i>V_{tE}</i> =	<i>DF_{NE}</i>	<i>V_{tE} - DF_{NE}</i>
386.9	11.607	375.293
<i>F_i oranı</i>	<i>F_{iE}</i>	<i>KAT KUV.</i>
0.33	123.79	135.39
0.32	120.51	120.51
0.22	83.84	83.84
0.13	48.16	48.16
1	375.29	386.90

Düşey Deprem Etkisi

$$E_d \approx (2/3) S_{DS} G$$

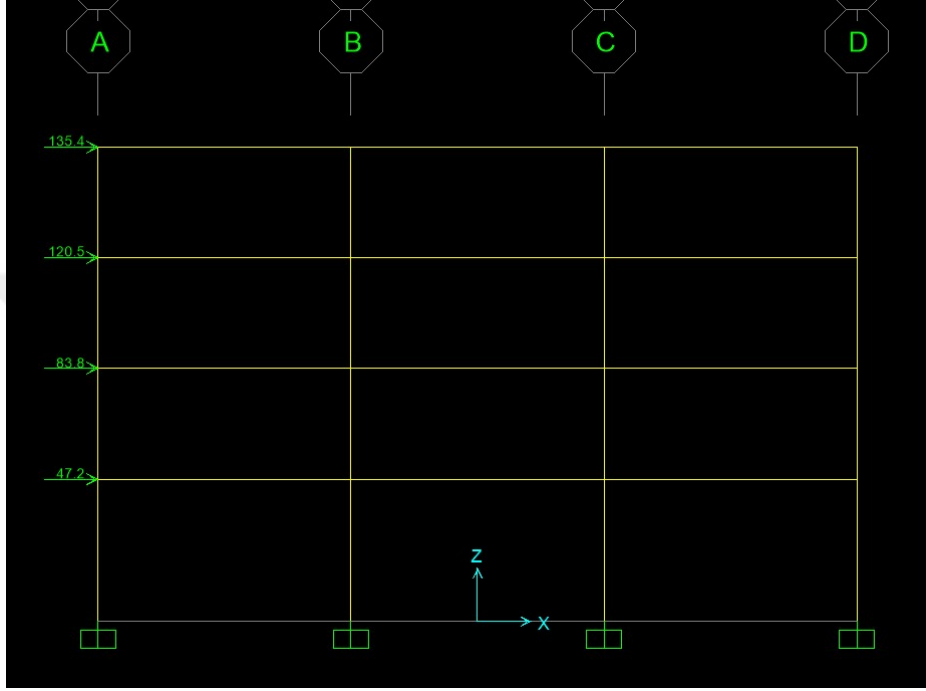
$$G(1.2 + 0.3(2/3)S_{DS}) = G(1.2 + 0.3(2/3)1.1724) = 1.434G$$

$$G(0.9 - 0.3(2/3)S_{DS}) = G(0.9 - 0.3(2/3)1.1724) = 0.666G$$

Deprem etkisini içeren yük birleşimlerinde düşey deprem etkisi aşağıdaki şekilde dikkate alınmıştır.

$$1.434 G + 0.5 Q \pm E_d$$

$$0.666 G \pm E_d$$



Etkin göreceli kat ötelemelerinin kontrolü

$R =$	8	$I =$	I	$R/I =$	8
kat	hi	ui	Di	di=(R/I)Di	□ di/hi
4	3.5	0.0272	0.0034	0.0272	0.003186
3	3.5	0.0238	0.0058	0.0464	0.005435
2	3.5	0.018	0.0078	0.0624	0.007310
1	4.5	0.0102	0.0102	0.0816	0.007435

$$\square = S_{ae}(T)_{DD-3} / S_{ae}(T)_{DD-2} = 0.41 \quad \square = 0.5 \text{ (Çelik binalar için)}$$

$$\square = 0.41$$

$$\square (d_{i,max} / hi) \square 0.016 \quad \square = 0.008$$

$$0.007435 < 0.008$$

İkinci Mertebe Etkilerinin Kontrolü

İKİNCİ MERTEBE

ETKİLERİ

KAT	w _i (kN)	W _k	Kat yük	KAT KUV.	V _i	Diort	Diort. W _k	V _i .h _i	11
4	1008	1008	3.5	135.39	135.39	0.00272	2.74	473.88	0.0058
3	1280	2288	3.5	120.51	255.91	0.00464	10.62	895.68	0.0119
2	1280	3568	3.5	83.84	339.74	0.00624	22.26	1189.10	0.0187
1	1280	4848	4.5	48.16	386.90	0.00816	39.56	1741.05	0.0227
□	4848		15	386.9					

Çelik bina için $C_h=1.0$

$$\theta_{i,max}=0.0227 \leq 0.12 D / (C_h R)=0.12 \frac{3}{(1.0)(8)}=0.045$$

Kolon kesiti : HE500B

F	Kesitin adı	I _{x-x}	W _{x-x}	i _{x-x}	I _{y-y}	W _{y-y}	i _{y-y}	G	J	C _w	W _{p-x}
cm ²		cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	kg/m	cm ⁴	cm ⁶ X 10 ³	cm ³
238.60	HE 500 B	107200.00	4287.00	21.19	12620.00	841.60	7.27	187.00	538.40	7018.00	4815.00
yan elemanlarda, başlık yönü x-x olarak seçilecektir)											
F _b	Kesitin adı	I _b	i _b	L _w	L _w 6	h	t _f	t _w	b	d	h ₀
cm ²		cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	mm
94.73	BAŞLIK	6300.00	8.16	44.40	7.40	50.00	2.80	1.45	30.00	39.00	472.00

$$P_{ns}=F_y A_g=(355)(23860)10^{-3}=8470 \text{ kN}$$

$$\frac{\alpha P_r}{P_{ns}} = \frac{1.0(2444)}{8470} = 0,288 < 0,5 \text{ olduğundan } \tau_b=1,0 \text{ alınması uygun olduğu ve bu durumda eğilme rijitliğinin ayrıca azaltılmasına gerek yoktur.}$$

TBDY 9.3.1 uyarınca kolon enkesitinin başlık genişliği/kalınlığı ve gövde yüksekliği/kalınlığı oranları TBDY Tablo 9.3'te verilen λ_{hd} sınır değerini aşmayacaktır. Buna göre,

Başlık parçası,

$$\frac{b}{t} = \frac{300/2}{28} = 5,35 < 0,3 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 7,12 \text{ seçilen kesit süneklik düzeyi yüksek enkesit koşulunu sağlamaktadır.}$$

Gövde parçası için,

$$C_a = \frac{P_{uc}}{\phi_c(F_y A)} = \frac{2516}{(0,9)(8470)} = 0,33 > 0,125$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{390}{14,5} = 26,9 \leq 0,77 \sqrt{\frac{E}{F_y}} (2,93 - C_a) = 0,77 \sqrt{\frac{200000}{355}} (2,93 - 0,33) = 47,52$$

$26,9 \leq 1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 35.37$ olduğundan süneklik düzeyi yüksek enkesit koşulunu sağlamaktadır.

Kolonun tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

İkinci mertebe etkilerini dikkate alarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu yüzden burada kolon burkulma boyunun hesabında K değeri 1 olarak alınacaktır.

$$K_x=1.0 \quad \frac{L_{cx}}{i_x} = \frac{(1.0)(4500)}{211,9} = 21,23 < 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 111.79$$

$$F_{crx} = [0.658^{\frac{F_y}{F_{ex}}}] F_y \quad F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)^2} = \frac{\pi^2 200.000}{21,23^2} = 4379 \text{ mpa}$$

$$F_{crx} = \left[0.658^{\frac{355}{4379}}\right] 355 = 343 \text{ mpa}$$

Y ekseninde eğilmeli burkulma sınır durumu

$$K_y=1.0 \quad \frac{L_{cy}}{i_y} = \frac{(1.0)(4500)}{72,7} = 61.9 < 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 111.79$$

$$F_{cry} = [0.658^{\frac{F_y}{F_{ey}}}] F_y \quad F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)^2} = \frac{\pi^2 200.000}{61,9^2} = 515 \text{ mpa}$$

$$F_{cry} = \left[0.658^{\frac{355}{515}}\right] 355 = 266 \text{ mpa}$$

Boyuna (z ekseninde) etrafında burulmalı burkulma sınır durumu

$$K_z=1.0$$

$$F_{crz} = [0.658^{\frac{F_y}{F_{ez}}}] F_y \quad F_{ez} = \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(L_{cz})^2} + G J \right] \frac{1}{I_x + I_y} = 929 \text{ mpa}$$

$$F_{crz} = \left[0.658^{\frac{355}{929}}\right] 355 = 303 \text{ mpa}$$

$$P_n = A_g F_{cry} = (23860) 10^{-3} (266) = 4348,76 \text{ kN}$$

$$P_d = \phi_b P_n = 0.9 (4348,76) = 5712 \text{ kN}$$

Kolonun tasarım eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

$$L_b = 4500 \text{ mm} \quad L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = (1.76)(72,7) \sqrt{\frac{200000}{355}} = 3037 \text{ mm}$$

$L_b = 4500 \text{ mm} \geq L_p = 3037 \text{ mm}$ olduğundan L_r hesaplanmalıdır.

$$L_r = 1.95 i_{ts} \frac{E}{0.7 F_y} \sqrt{\frac{J c}{W_{ex} h_0} + \sqrt{\left(\frac{J c}{W_{ex} h_0}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7 F_y}{E}\right)^2}}$$

$$L_r = 10218 \text{ mm}$$

$L_p = 3037 \text{ mm} < L_b = 4500 \text{ mm} < L_r = 10218 \text{ mm}$ olduğundan karakteristik eğilme momenti dayanımı

$$M_{nx} = C_b \left[M_{px} - (M_{px} - 0.7 F_y W_{ex}) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right]$$

$$C_b = \frac{12.5 M_{maks}}{2.5 M_{maks} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

$$M_{maks} = 270 \text{ kN.m} , M_A = 142.25 \text{ kN.m} , M_B = 14.5 \text{ kN.m} , M_C = 113.25 \text{ kN.m}$$

$$C_b = 2.25$$

$$M_{nx} = 3540 \text{ kN.m} > M_{px} = 1709 \text{ kN.m}$$

$$M_{dx} = \phi_b M_{nx} = 0.90 (1709) = 1538 \text{ kN.m}$$

Eğilme momenti ve eksenel basınç kuvveti etkisinde, TBDY 9.3.1.3(a)'ya göre tasarım dayanımı kontrolü

$$\frac{P_r}{P_d} = \frac{2280}{6346} = 0.359 \geq 0.20 \text{ olduğundan}$$

$$\frac{P_r}{P_d} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{dx}} + \frac{M_{ry}}{M_{dy}} \right) = \frac{2280}{6346} + \frac{8}{9} \left(\frac{270}{1538} + 0 \right) = 0.515 \leq 1.0$$

Sadece eksenel basınç kuvveti etkisinde, TBDY 9.3.1.3(b)'ye göre dayanım kontrolü

$$P_d = 6346 \text{ kN} > P_{uc} = 2516 \text{ kN}$$

Kolonun tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü

Çift simetri eksenli I-enkesitte ÇYTHYE 10.2.1(a) uyarınca,

$$h/t_w = 390/14.5 = 26.9 \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 53.17 \text{ olduğundan } \phi_v = 1.00 \text{ (YDKT) ve } C_{vI} = 1.0 \text{ alınacaktır.}$$

ÇYTHYE 10.2'ye göre,

$$V_n = 0.6 F_y A_w C_{vI}$$

$$V_n = 0.6 (355) (390 \times 14.5) 1.0 (10)^{-3} = 1205 \text{ kN}$$

$$V_d = \phi_v V_n = 1.0 (1205) = 1205 \text{ kN}$$

$$\frac{V_u}{V_d} = \frac{108.6}{1205} = 0.089 \leq 1.0$$

Kiriş kesiti : IPE500

F	Kesitin adı	I_{x-x}	W_{x-x}	i_{x-x}	I_{y-y}	W_{y-y}	i_{y-y}	G	J	C_w	W_p-x
cm^2		cm	cm^3	cm	cm^4	cm^3	cm	kg/m	cm^4	$cm^6 \times 10^3$	cm^3
115.50	IPE 500	48200.00	1928.00	20.43	2142.00	214.20	4.31	90.70	89.29	1249.00	2194.00
yan elemanlarda, başlık yönü x-x olarak seçilecektir)											
F_b	Kesitin adı	I_b	i_b	L_w	$L_w/6$	h	t_f	t_w	b	d	h_0
cm^2		cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	mm
39.96	BAŞLIK	1066.67	5.17	46.80	7.80	50.00	1.60	1.02	20.00	42.60	484.00

Kiriş enkesiti için enkesit koşulunun kontrolü

TBDY 9.3.1 uyarınca giriş enkesitinin başlık genişliği/kalınlığı ve gövde yüksekliği/kalınlığı oranları, TBDY Tablo 9.3'te verilen, λ_{hd} sınır değerini aşmayacaktır. Buna göre

Başlık parçası

$$\frac{b}{t} = \frac{200/2}{16} = 6.25 < 0.30 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.30 \sqrt{\frac{200000}{355}} = 8.12 \quad \text{olduğundan süneklik düzeyi yüksek}$$

enkesit için verilen koşulu sağlamaktadır.

Gövde parçası,

$$C_a = \frac{P_{uc}}{\phi_c(F_y A)} = \frac{0}{(0.9)(355)(11550)} = 0 \leq 0.125 \quad \text{olmak üzere}$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{426}{10.2} = 41.8 \leq 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} (1 - 0.93C_a) = 2.45 \sqrt{\frac{200000}{355}} (1 - 0.93(0)) = 58.15$$

olduğundan süneklik düzeyi yüksek enkesit için verilen koşulu sağlamaktadır.

TBDY 9.2.8.1(a)'ya göre, süneklik düzeyi yüksek girişlerin alt ve üst başlıklarının desteklendiği noktalar arasındaki uzaklık L_b 'nin

$$L_b = 0.086 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{koşulunu sağlaması gerekmektedir.}$$

Burada dikkate alınan yapının döşeme sistemi kompozit olduğunda üst başlık boyunca giriş kompozit döşeme ile desteklenmektedir. Kompozit ikincil taşıyıcı girişlerin aralıkları 2.0 metre arayla kullanılmaktadır. İkincil kompozit ara girişlerle alt başlık tutulmaktadır.

$$L_b = 2.00 \text{ m} \leq 0.086(43.1) \sqrt{\frac{200000}{355}} 10^{-3} = 2.088 \text{ m} \quad \text{olduğundan yönetmelik koşulu sağlanmaktadır.}$$

ÇYTHY 10.2'ye göre,

$$V_n = 0,6 F_y A_v C_{v1} = 0,6(355)(426 \times 10,2)1,0(10)^{-3} = 925,53 \text{ kN}$$

$$V_d = \phi_v V_n = 1,0(925,53) = 925,53 \text{ kN}$$

1.434 G + 0.5 Q + E_d yük birleşimi altında elde edilen gerekli kesme kuvveti dayanımı, V_u = 345 kN

$$\frac{V_u}{V_d} = \frac{345}{925,53} = 0,373 \leq 1,0 \checkmark$$

Kolonların kirişlerden daha güçlü olması koşulu

$$C_{pr} = (F_y + F_u) / 2F_y \leq 1,2 \rightarrow (355 + 510) / (2(355)) = 1,22 > 1,2$$

$$M_{pr} = M_{prR} = M_{prL} = C_{pr} R_y F_y W_p = (1,2)(1,25)(355)(2,194.000)10^{-6} = 1168,31 \text{ kNm}$$

$$l_n = L - 2 \frac{d_c}{2} - 2l_h = 8 - 2 \frac{0,500}{2} - 2(0,355) = 6,79 \text{ m}$$

$$V_{ucR} = \frac{2M_{prR}}{l_n} - V_{dR} = \frac{2(1168,31)}{6,79} - 220 = 124,22 \text{ kN}$$

$$V_{ucL} = \frac{2M_{prL}}{l_n} - V_{dL} = \frac{2(1168,31)}{6,79} + 220 = 564,13 \text{ kN}$$

$\Sigma M_{uv} = (V_{ucR} + V_{ucL})(l_h + d_c/2) =$	416.39	kN.m
$\Sigma M_{pb} = 2(1,1 R_y F_{yb} W_{pb}) =$	2141.89	kN.m
$\Sigma M_{pb} = \Sigma M_{pb} + \Sigma M_{ub} =$	2558.28	kN.m
$M_{pcz} = W_{pcz} (F_{yc} - \frac{P_{ucz}}{A_{gz}}) =$	1249.22	kN.m
$M_{pc1} = W_{pc1} (F_{yc} - \frac{P_{uc1}}{A_{g1}}) =$	1388.46	kN.m
$M'_{pc1} = M_{pc1} (\frac{H_1}{H_1 - d_b}) =$	1619.87	kN.m
$M'_{pcz} = M_{pcz} (\frac{H_z}{H_z - d_b}) =$	1405.37	kN.m
$\frac{\Sigma M'_{pc}}{\Sigma M'_{pb}} =$	1.18	

Benzer işlemler 8katlı ve 12 katlı çerçeveler içinde yapılmış ve kesitler bu hesaplara göre belirlenmiştir.

F	Kesitin adı	I _{x-x}		W _{x-x}	i _{x-x}	I _{y-y}	W _{y-y}	i _{y-y}	G	J	C _w	W _{p-x}
cm ²		cm ⁴	⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	kg/m	cm ⁴	cm ⁶ × 10 ³	cm ³
363.70	HE 600 M	237400.00		7660.00	25.55	18980.00	1244.00	7.22	285.00	1564.00	15910.00	8772.00
İçerideki elemanlarda, başlık yönü x-x olarak seçilecektir)												
F _b	Kesitin adı	I _b		i _b	L _w	L _w /6	h	t _f	t _w	b	d	h ₀
cm ²		cm	⁴	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	mm
140.90	BAŞLIK	9457.54		8.19	54.00	9.00	62.00	4.00	2.10	30.50	48.60	580.00

$$P_{ns} = F_y A_g = (355)(36370)10^{-3} = 12911,35 \text{ kN}$$

$\frac{\alpha P_r}{P_{ns}} = \frac{1.0(4720)}{12911} = 0,366 < 0,5$ olduğundan $\tau_b = 1,0$ alınması uygun olduğu ve bu durumda eğilme rijitliğinin ayrıca azaltılmasına gerek yoktur.

$(1,434G + 0,5Q + 0,2S + D(E_d^{(x)} + 0,3E_d^{(y)}))$ yük birleşimi altında aksel basınç kuvveti dayanımının kontrolü için $P_{uc} = 4740 \text{ kN}$

TBDY 9.3.1 uyarınca kolon enkesitinin başlık genişliği/kalınlığı ve gövde yüksekliği/kalınlığı oranları TBDY Tablo 9.3'te verilen λ_{hd} sınır değerini aşmayacaktır. Buna göre,

Başlık parçası,

$$\frac{b}{t} = \frac{305/2}{40} = 3,81 < 0,3 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 7,12 \text{ seçilen kesit süneklik düzeyi yüksek enkesit koşulunu sağlamaktadır.}$$

Gövde parçası için,

$$C_a = \frac{P_{uc}}{\phi_c (F_y A)} = \frac{4740}{(0,9)(12911)} = 0,408 > 0,125$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{486}{21} = 23,14 \leq 0,77 \sqrt{\frac{E}{F_y}} (2,93 - C_a) = 0,77 \sqrt{\frac{200000}{355}} (2,93 - 0,408) = 46,09$$

$23,14 \leq 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 35,37$ olduğundan süneklik düzeyi yüksek enkesit koşulunu sağlamaktadır.

Kolonun tasarım aksel basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

İkinci mertebe etkilerini dikkate alarak hesaplar gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle kolon burkulma boyunun hesabında K değeri 1 olarak alınacaktır.

$$K_x = 1,0 \quad \frac{L_{cx}}{i_x} = \frac{(1,0)(4500)}{255} = 17,65 < 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 111,79$$

$$F_{crx} = [0,658^{\frac{F_y}{F_{ex}}} F_y] \quad F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)^2} = \frac{\pi^2 200.000}{17,65^2} = 5749 \text{ mpa}$$

$$F_{crx} = \left[0,658^{\frac{355}{5749}}\right] 355 = 345,94 \text{ mpa}$$

Y ekseninde eğilmeli burkulma sınır durumu

$$K_y=1.0 \quad \frac{L_{cy}}{i_y} = \frac{(1.0)(4500)}{72,2} = 62,32 < 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 111.79$$

$$F_{cry} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_{ey}}} \right] F_y \quad F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{i_y} \right)^2} = \frac{\pi^2 200.000}{62,32^2} = 508 \text{ mpa}$$

$$F_{cry} = \left[0.658^{\frac{355}{508}} \right] 355 = 265 \text{ mpa}$$

Boyuna (z ekseninde) burulmalı burkulma sınır durumu

$$K_z=1.0$$

$$F_{crz} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_{ez}}} \right] F_y \quad F_{ez} = \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(L_{cz})^2} + G J \right] \frac{1}{I_x + I_y} = 1092,32 \text{ mpa}$$

$$F_{crx} = \left[0.658^{\frac{355}{1092}} \right] 355 = 309,85 \text{ mpa}$$

$$P_n = A_g F_{cry} = (36370) 10^{-3} (265) = 9634,66 \text{ kN}$$

$$P_d = \phi_b P_n = 0.9 (9634,66) = 8671 \text{ kN}$$

Kolonun tasarım eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

$$L_b = 4500 \text{ mm} \quad L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = (1.76)(72,2) \sqrt{\frac{200000}{355}} = 3016 \text{ mm}$$

$L_b = 4500 \text{ mm} \geq L_p = 3016 \text{ mm}$ olduğundan L_r hesaplanmalıdır.

$$L_r = 1.95 i_{ts} \frac{E}{0.7 F_y} \sqrt{\frac{J c}{W_{ex} h_0} + \sqrt{\left(\frac{J c}{W_{ex} h_0} \right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7 F_y}{E} \right)^2}}$$

$$L_r = 11160 \text{ mm}$$

$L_p = 3016 \text{ mm} < L_b = 4500 \text{ mm} < L_r = 11160 \text{ mm}$ olduğundan karakteristik eğilme momenti dayanımı

$$M_{nx} = C_b \left[M_{px} - (M_{px} - 0.7 F_y W_{ex}) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right]$$

$$C_b = \frac{12.5 M_{maks}}{2.5 M_{maks} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

$$M_{maks} = 504 \text{ kN.m} , M_A = 336,50 \text{ kN.m} , M_B = 169 \text{ kN.m} , M_C = 1,50 \text{ kN.m}$$

$$C_b = 2,14$$

$$M_{nx} = 6306 \text{ kN.m} > M_{px} = 3114 \text{ kN.m}$$

$$M_{dx} = \phi_b M_{nx} = 0.90 (3114) = 2803 \text{ kN.m}$$

Eğilme momenti ve aksel basınç kuvveti etkisinde, TBDY 9.3.1.3(a)'ya göre tasarım dayanımı kontrolü

$$\frac{P_r}{P_d} = \frac{4720}{8671} = 0.544 \geq 0.20 \text{ olduğundan}$$

$$\frac{P_r}{P_d} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{dx}} + \frac{M_{ry}}{M_{dy}} \right) = \frac{4720}{8671} + \frac{8}{9} \left(\frac{504}{2803} + 0 \right) = 0.70 \leq 1.0$$

Sadece aksel basınç kuvveti etkisinde, TBDY 9.3.1.3(b)'ye göre dayanım kontrolü

$$P_d = 8671 \text{ kN} > P_{uc} = 4750 \text{ kN}$$

Kolonun tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü

Çift simetri eksenli I-enkesitte ÇYTHYE 10.2.1(a) uyarınca,

$$h/t_w = 486/21,0 = 23,14 \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 53,17 \text{ olduğundan } \phi_v = 1.00 \text{ (YDKT) ve } C_{vI} = 1.0 \text{ alınacaktır.}$$

ÇYTHYE 10.2'ye göre,

$$V_n = 0.6 F_y A_w C_{vI}$$

$$V_n = 0.6 (355) (486 \times 21,0) 1.0 (10)^{-3} = 2174 \text{ kN}$$

$$V_d = \phi_v V_n = 1.0 (2174) = 2174 \text{ kN}$$

$$\frac{V_u}{V_d} = \frac{149}{2174} = 0.069 \leq 1.0$$

KİRİŞ KESİTİ

F	Kesitin adı	I _{x-x}		W _{x-x}	i _{x-x}	I _{y-y}	W _{y-y}	i _{y-y}	G	J	C _w	W _{p-x}
cm ²		cm ⁴		cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	kg/m	cm ⁴	cm ⁶ × 10 ³	cm ³
156.00	IPE 600	92080		3069	24.30	3387	307.90	4.66	122.00	165.40	2846	3512
İç elemanlarda, başlık yönü x-x olarak seçilecektir												
F _b	Kesitin adı	I _b		i _ϕ	L _w	L _w /6	h	t _t	t _w	b	d	h ₀
cm ²		cm		cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	mm
53.04	BAŞLIK	1685.93		5.64	56.20	9.37	60.00	1.90	1.20	22.00	51.40	581.00

Kiriş enkesiti için enkesit koşulunun kontrolü

TBDY 9.3.1 uyarınca kiriş enkesitinin başlık genişliği/kalınlığı ve gövde yüksekliği/kalınlığı oranları, TBDY Tablo 9.3'te verilen, λ_{hd} sınır değerini aşmayacaktır. Buna göre

Başlık parçası

$$\frac{b}{t} = \frac{220/2}{19} = 5,79 < 0.30 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.30 \sqrt{\frac{200000}{355}} = 8.12 \text{ olduğundan süneklik düzeyi yüksek enkesit için verilen koşulu sağlamaktadır.}$$

Gövde parçası,

$$C_a = \frac{P_{uc}}{\phi_c(F_y A)} = \frac{0}{(0.9)(355)(15600)} = 0 \leq 0.125 \quad \text{olmak üzere}$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{514}{12} = 42.8 \leq 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} (1 - 0.93C_a) = 2.45 \sqrt{\frac{200000}{355}} (1 - 0.93(0)) = 58.15$$

olduğundan süneklik düzeyi yüksek enkesit için verilen koşulu sağlamaktadır.

TBDY 9.2.8.1(a)'ya göre, süneklik düzeyi yüksek kirişlerin alt ve üst başlıklarının desteklendiği noktalar arasındaki uzaklık L_b 'nin

$$L_b = 0.086 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ koşulunu sağlaması gerekmektedir.}$$

Burada dikkate alınan yapının döşeme sistemi kompozit olduğunda üst başlık boyunca kiriş kompozit döşeme ile desteklenmektedir. Kompozit ikincil taşıyıcı kirişlerin aralıkları 2.0 metre arayla kullanılmaktadır. İkincil kompozit ara kirişlerle alt başlık tutulmaktadır.

$$L_b = 2.00 \text{ m} \leq 0.086(46,6) \frac{200000}{355} 10^{-3} = 2,228 \text{ m} \quad \text{olduğundan yönetmelik koşulu sağlanmaktadır.}$$

Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü en büyük eğilme momentinin olduğu bölgede yapılacaktır. Burada yanal olarak desteklenmeyen kiriş parçasının uzunluğu, $L_b=1.75 \text{ m}$ dir.

$$L_b = 1700 \text{ mm} \leq L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.76(46,6) \sqrt{\frac{200000}{355}} = 1946 \text{ mm}$$

Olduğundan karakteristik eğilme momenti dayanımının elde edilmesinde akma sınır durumu belirleyici olacaktır. Bu dayanım ÇYTHYE Denklem (9.2) ile hesaplanacaktır.

$$M_{nx} = M_p = F_y W_{px}$$

$$M_{nx} = M_p = (355)(3.512.000)10^{-6} = 1246,76 \text{ kN.m}$$

Tasarım eğilme momenti dayanımı, M_{dx}

$$M_{dx} = \phi_b M_{nx} = 0,90 (1246,76) = 1122,08 \text{ kN.m}$$

Kirişin tasarım eğilme momenti kontrolü

Kiriş için 2.mertebe etkilerinin de dikkate alarak hesaplanan en büyük eğilme momenti

$$M_u = 537 \text{ kN.m}$$

$$\frac{M_u}{M_d} = \frac{537}{1122} = 0,479 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Çift eksenli simetrik I-enkesitte ÇYTHYE 10.2.1(a) uyarınca,

$$h/t_w = 486/12 = 40,50 \leq 2,24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 2,24 \sqrt{\frac{200000}{355}} = 53,17$$

$\phi_v = 1,00$ (YDKT) ve $C_v = 1,0$ olarak alınacaktır.

ÇYTHY 10.2'ye göre,

$$V_n = 0,6 F_y A_v C_v I = 0,6(355)(486 \times 12,0) 1,0(10)^{-3} = 1242,22 \text{ kN}$$

$$V_d = \phi_v V_n = 1,0(1242,22) = 1242,22 \text{ kN}$$

1.434 G + 0.5 Q + E_d yük birleşimi altında elde edilen gerekli kesme kuvveti dayanımı, $V_u = 321 \text{ kN}$

$$\frac{V_u}{V_d} = \frac{321}{1242,22} = 0,258 \leq 1,0 \checkmark$$

$$C_{pr} = (F_y + F_u) / 2F_y \leq 1,2 \rightarrow (355 + 510) / (2(355)) = 1,22 > 1,2$$

$$M_{pr} = M_{prR} = M_{prL} = C_{pr} R_y F_y W_p = (1,2)(1,25)(355)(3,512.000) 10^{-6} = 1870,14 \text{ kNm}$$

$$l_n = L - 2 \frac{d_c}{2} - 2l_h = 8 - 2 \frac{0,500}{2} - 2(0,355) = 6,67 \text{ m}$$

$$V_{ucR} = \frac{2M_{prR}}{l_n} - V_{dR} = \frac{2(1870,14)}{6,67} - 220 = 340,76 \text{ kN}$$

$$V_{ucL} = \frac{2M_{prL}}{l_n} - V_{dL} = \frac{2(1870,14)}{6,67} + 220 = 780,76 \text{ kN}$$

$V_{ucR} = \frac{2M_{prR}}{l_n} - V_{dR} =$		340.76	kN
$V_{ucL} = \frac{2M_{prL}}{l_n} + V_{dL} =$		780.76	kN
$\Sigma M_{uv} = (V_{ucR} + V_{ucL})(l_h + d_c/2) =$		745.81	kN.m
$\Sigma M_{pb} = 2(1,1 R_y F_y b W_{pb}) =$		3428.59	kN.m
$\Sigma M_{pb} = \Sigma M_{pb} + \Sigma M_{ub} =$		4174.40	kN.m
$M_{pcz} = W_{pcz} (F_{yc} - \frac{P_{ucz}}{A_{gz}}) =$		1967.94	kN.m
$M_{pc1} = W_{pc1} (F_{yc} - \frac{P_{uc1}}{A_{g1}}) =$		2118.68	kN.m
$M'_{pc1} = M_{pc1} (\frac{H_1}{H_1 - d_b}) =$		2557.03	kN.m
$M'_{pcz} = M_{pcz} (\frac{H_z}{H_z - d_b}) =$		2270.69	kN.m
$\frac{\Sigma M'_{pc}}{\Sigma M'_{pb}} =$	1.16		

12 katlı												$V_{iE} =$	ΔF_{NE}	$VtE - \Delta F_{NE}$
KAT	w_i	m_i					$Fo =$	100	kN			705.3	63.45	641.85
	(kN)	$(kN \cdot s^2 / m)$	Kat yük	H_i	w_{iHi}	F_i oranı	Fi	di	$mi \cdot di^2$	Fi di	F_i oranı	F_{iE}	KAT KUV	
12	1008	103	3.5	43	43344	0.12	12.28	0.0082	0.00692572	0.100656124	0.12	78.79	142.24	
11	1280	130	3.5	39.5	50560	0.14	14.32	0.008	0.00832	0.114549821	0.14	91.90	91.90	
10	1280	130	3.5	36	46080	0.13	13.05	0.0076	0.0075088	0.099179845	0.13	83.76	83.76	
9	1280	130	3.5	32.5	41600	0.12	11.78	0.0071	0.0065533	0.083646744	0.12	75.62	75.62	
8	1280	130	3.5	29	37120	0.11	10.51	0.0064	0.0053248	0.067279895	0.11	67.47	67.47	
7	1280	130	3.5	25.5	32640	0.09	9.24	0.0057	0.0042237	0.052689293	0.09	59.33	59.33	
6	1280	130	3.5	22	28160	0.08	7.97	0.0048	0.0029952	0.03827994	0.08	51.19	51.19	
5	1280	130	3.5	18.5	23680	0.07	6.71	0.0039	0.0019773	0.026154334	0.07	43.04	43.04	
4	1280	130	3.5	15	19200	0.05	5.44	0.003	0.00117	0.016312475	0.05	34.90	34.90	
3	1280	130	3.5	11.5	14720	0.04	4.17	0.0021	0.0005733	0.008754361	0.04	26.76	26.76	
2	1280	130	3.5	8	10240	0.03	2.90	0.0013	0.0002197	0.003769994	0.03	18.61	18.61	
1	1280	130	4.5	4.5	5760	0.02	1.63	0.0006	0.0000468	0.000978748	0.02	10.47	10.47	
Σ	15088	1533	43	$\Sigma =$	353104	1	100.00		0.04583862	0.612251575	1.00	641.85	705.30	

$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N m_i d_{fi}^2}{\sum_{i=1}^N F_{fi} d_{fi}}}$	$T_p =$	1.718				$S_{ac}(T) = S_{D1} / T = 0.5472 / 1.718 = 0.319$		
	$T =$	1.718				$S_{aR}(T) = S_{ac} / R_a(T) = 0.319 / 8 = 0.04$		
$Ct =$	0.08	$Tpa =$	$1.4.Ct.Hn^{0.75} =$	1.881		$V_{tE} = m_t.S_{aR}(T_p) \geq 0.04.m_t.I.S_{Ds.g}$		
						$V_{tE} = (1533)(0.04.9.81) \geq 0.04(1533)(1)(1.1724)(9.81)$		
						$V_{tE} = 601.5 kN \geq 705.3 kN$		
						$\Delta F_{NE} = 0.0075 N V_{tE} = 0.0075 (12)(705.3) = 63.45 kN$		

R =	8	I =	I	R/I =	8
kat	hi	ui	Δi	δi=(R/I) Δi	λδi/hi
12	3.5	0.061	0.0024	0.0192	0.002249
11	3.5	0.0586	0.0033	0.0264	0.003093
10	3.5	0.0553	0.0041	0.0328	0.003842
9	3.5	0.0512	0.0049	0.0392	0.004592
8	3.5	0.0463	0.0056	0.0448	0.005248
7	3.5	0.0407	0.0062	0.0496	0.005810
6	3.5	0.0345	0.0066	0.0528	0.006185
5	3.5	0.0279	0.0067	0.0536	0.006279
4	3.5	0.0212	0.0062	0.0496	0.005810
3	3.5	0.015	0.0055	0.044	0.005154
2	3.5	0.0095	0.005	0.04	0.004686
1	4.5	0.0045	0.0045	0.036	0.003280
$\lambda = S_{ac}(T)_{DD-3} / S_{ac}(T)_{DD-2} = 0.41 \quad \kappa = 0.5$ (Çelik binalar için)					
$\lambda = 0.41$					
$\lambda (\delta_{i,max} / hi) \leq 0.016 \quad \kappa = 0.008$					

İKİNCİ MERTEBE ETKİLERİ									
KAT	wi (kN)	ΣWk	Kat yük	KAT KUV.	Vi	Δiort	Δiort. ΣWk	Vi .hi	θn
12	1008	1008	3.5	142.24	142.24	0.0024	2.42	497.83	0.0049
11	1280	2288	3.5	91.90	234.14	0.0033	7.55	819.50	0.0092
10	1280	3568	3.5	83.76	317.90	0.0041	14.63	1112.66	0.0131
9	1280	4848	3.5	75.62	393.52	0.0049	23.76	1377.33	0.0172
8	1280	6128	3.5	67.47	461.00	0.0056	34.32	1613.49	0.0213
7	1280	7408	3.5	59.33	520.33	0.0062	45.93	1821.14	0.0252
6	1280	8688	3.5	51.19	571.51	0.0066	57.34	2000.30	0.0287
5	1280	9968	3.5	43.04	614.56	0.0067	66.79	2150.96	0.0310
4	1280	11248	3.5	34.90	649.46	0.0062	69.74	2273.11	0.0307
3	1280	12528	3.5	26.76	676.22	0.0055	68.90	2366.76	0.0291
2	1280	13808	3.5	18.61	694.83	0.005	69.04	2431.90	0.0284
1	1280	15088	4.5	10.47	705.30	0.0045	67.90	3173.85	0.0214
Σ	15088		43	705.3					

EK-2 :GÖVDESİNDEN ZAYIFLATILMIŞ KİRİŞ ENKESİTLİ BİRLEŞİMLERİN HESABI

Zayıflatılmış Kiriş Ekesitli Birleşimlerin Hesabı İçin İzlenecek Yol:

1) Deneme için kolon ve kiriş kesitleri ile şekil 7.1'e göre d_o ve S değerlerini aşağıdaki limitlere göre belirlenmektedir.

$$0.60 h < d_o < 0.7 h \quad (7.1)$$

$$0.80 < d_o/S < 1.1 \quad (7.2)$$

burada:

h = toplam kiriş yüksekliği, mm.

d_o = gövdedeki boşluk çapı , mm.

S = kolon yüzünden boşluk başlangıcına olan mesafe , mm.

Seçilen kolon ve kiriş kesitinin yönetmeliklere göre tüm yük kombinasyonlarına göre yeterli dayanımda olmalıdır. Ayrıca seçilen kesitlere göre yapı yönetmeliklerin belirlediği öteleme ve deformasyon şartlarını sağlamalıdır. Bu hesaplarda zayıflatılmış kiriş enkesitin etkisi dikkate alınmalıdır.

2.) Zayıflatılmış kesitin plastik mukavemet momentini hesaplama

AISC 358–10 [2] plastik mukavemet hesabında kesitin ağırlık merkezine göre tüm kesitin plastik mukavemet momentinden azaltmanın plastik mukavemet momenti çıkartılarak en kolay şekilde hesaplanabileceğini önermektedir. Buradan zayıflatılmış kiriş enkesitin plastik momenti hesaplanır.

W_{pl} : Kayıpsız kesitin plastik mukavemet momenti

$W_{pl,ZGE}$: Zayıflatılmış kesitin plastik mukavemet momenti

$$W_{pl,ZGE} = W_{pl} - \frac{tw \cdot d_o^2}{4} \quad (7.3)$$

3) Zayıflatılmış kesitte olası eğilme momenti kapasitesinin hesaplanması :

$$M_{pr}$$

$$M_{pr} = \kappa \cdot C_{pr} R_y F_y W_{pl,ZGE} \quad (7.4)$$

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \leq 1.2 \quad (7.5)$$

Zayıflatılmış kesitin moment kapasitesinin belirlenmesinde D/h ve S/h oranlarına bağlı olarak 6.bölümde verilen Şekil 6.14, Şekil 5.15, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17 deki moment oranları katsayısı kullanılarak hesap yapılabilir. D/h ≤ 0.50 değerleri için $W_{pl,ZGE}$ ile hesaplanan moment değeri değerleri analiz sonuçlarıyla yakın değerler çıkmıştır. D/h > 0.50 olduğunda kesitte Vierendal etkisinin artışı sonucunda artan gerilmelerle kesitin moment taşıma kapasitesi azalmaktadır.

Burada R_y olası akma dayanımı katsayısı olup TDY2018'e göre **Tablo 2** de verilmiştir.

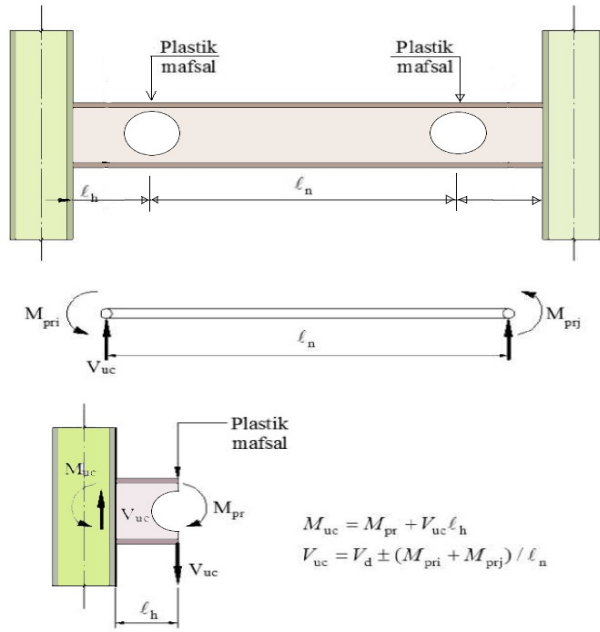
κ : D/h ve S/h değerlerine bağlı azaltma katsayısı

4) Kolon yüzündeki gerekli kesme kuvveti dayanımının hesaplanması : V_{uc}

Kirişin her iki ucundaki gövdesi zayıflatılmış kiriş enkesitlerinin merkezlerindeki kesme kuvveti hesaplanır. Gövdeden zayıflatılmış enkesitlerin merkezleri arasındaki kiriş parçası çıkarılarak elde edilen serbest cisim diyagramında, gövdeden zayıflatılmış enkesitlerin herbirinin merkezlerinde M_{pr} momenti olduğu kabul edilerek kesme kuvveti hesaplanır. Serbest cisim diyagramı ayrıca kiriş üzerindeki düşey yükleride içerir. Buradaki düşey yük kombinasyonu için $(1.2G+0.5Q+0.2S)$ katsayıları kullanılacaktır.

$$V_{uc} = V_d \pm (M_{pri} + M_{prj})/l_n \quad (7.6)$$

$$V_d = 1.2G + 0.5Q + 0.2S \quad (7.7)$$



Şekil 7.1 : Çerçeve uç ve mafsals momentleri

5) Kolon yüzündeki gerekli eğilme momenti dayanımının hesaplanması : M_{uc}

$$M_{uc} = M_{pr} + V_{uc} \cdot l_h \quad (\text{Kolon başlık yüzeyindeki moment}) \quad (7.8)$$

$$V_{uc} = V_d \pm (M_{pri} + M_{prj}) / l_n \quad (7.9)$$

$$M_c = M_{pr} + V_p \cdot \frac{d_c}{2} \quad (\text{Kolon ağırlık merkezi üzerindeki moment})$$

6) Zayıflatılmamış kesitin plastik momentinin hesaplanması : M_r

$$M_r = \kappa R_y F_y W_p \quad (7.10)$$

7) Moment taşıma kapasitesinin kontrolü :

Kirişin kolon yüzünde beklenen eğilme momenti dayanımının kirişin plastik moment taşıma kapasitesine oranının 1.0 den küçük yada eşit olması koşulunun sağlanması

$$\frac{M_{uc}}{\phi_d M_r} \leq 1.0 \quad (7.11)$$

$$\frac{M_{uc}}{\phi_d M_r} = 0.85 \sim 1.0 \text{ aralığında olmalı}$$

Eğer M_{uc} değeri $\phi_d M_r$ değerini aşarsa

Zayıflatılmış kesit için “ d_0 ” kesim değerini kiriş yüksekliğinin (h) %80’ini aşmayacak şekilde arttır;

Sünek göçme sınır durumu için dayanım katsayısı $\phi_d=1.0$ alınabilir.

8) Gerekli kesme dayanımının hesabı:

$$V_{uc} = V_d \pm (M_{pri} + M_{prj})/l_n \quad (7.12)$$

$$V_{uc} = V_d \pm V_{pr} \quad (\text{Zayıflatılmış kesitteki kesme kuvveti}) \quad (7.13)$$

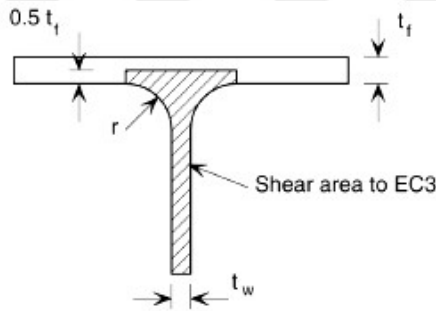
$$h/t_w \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (7.14)$$

t_w : Profil gövde et kalınlığı

F_y : Çeliğin akma gerilmesi

Zayıflatılmış kesitin kesme kuvveti kapasitesi, $V_{o,ZGE}$ ise

$$V_{o,g} = 0.578.F_y.A_{vo} \quad (7.15)$$



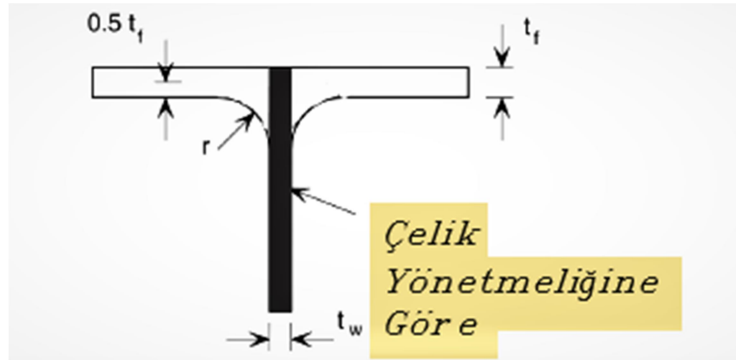
Şekil 7.2 : BS EN 1993-1-1'e göre T kesitte kesme alanı

Burada

$$A_{vg} = A_v - d_o.t_w \quad (7.16)$$

A_v = Kayıpsız kesitin kesme alanı

A_{vg} = Zayıflatılmış kesitin kesme alanı



Şekil 7.3 : TÇY 2016'e göre T kesitte kesme alanı

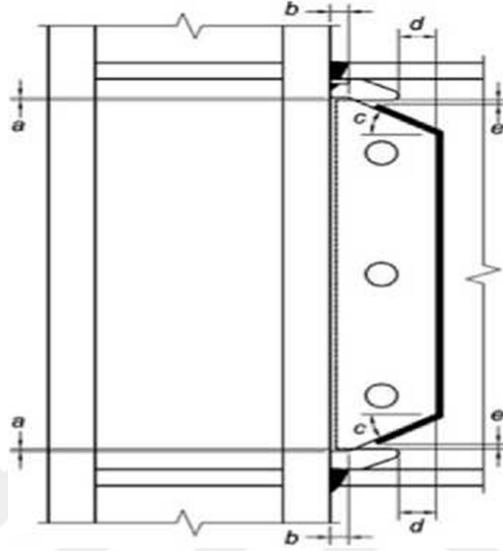
$$V_{ng} = 0.6 F_y A_{wg} C_{vl} \quad C_{vl} = 1.0 \quad (7.17)$$

$$V_{dg} = \phi V_{ng} \quad \phi = 1.0 \quad (7.18)$$

$$V_{dg} \geq V_{uc} \text{ şartının sağlanması gerekir.} \quad (7.19)$$

9) Kiriş gövdesinin kolona bağlantısı

TBDY2018 de verilen süneklik düzeyi yüksek kaynaklı kolon kiriş birleşimi için ilgili detaylara uygun olacak şekilde yapılacaktır (Şekil 8.4) .



Şekil 7.4 : TBDY 2018'e göre kaynaklı birleşim detayı

- Gövde kayma levhasının kalınlığı en az kiriş gövde kalınlığına eşit olacaktır. Gövde kayma levhasının yüksekliği, üst ve alt başlıklar için levha kenarları ile kaynak ulaşım deliğinin kenarları arasında minimum 6 mm ve maksimum 12 mm uzaklık olacak şekilde düzenlenecektir. Genişliği ise kaynak ulaşım deliğinden en az 50 mm uzakta bitecek şekilde belirlenecektir (Şekil 7.4).
- Gövde kayma levhası kolon başlığına kaynaklanacaktır. Kaynakların tasarım dayanımı, h_p levha yüksekliği ve t_p levha kalınlığı olmak üzere, $h_p t_p (0.6 R_y F_{yp})$ şeklinde hesaplanacak değerden az olmayacaktır.
- Gövde kayma levhası kiriş gövdesine Şekil 8.4'da verilen detaya uygun şekilde, kol uzunluğu $t_p - 2$ mm olan köşe kaynaklar ile birleştirilecektir.
- Gerektiğinde kiriş gövdesinde standart veya kiriş doğrultusunda kısa oval deliklere sahip montaj bulonlarının kullanımına izin verilebilir.
- Kolon başlığı ve kiriş gövdesi kaynakları, kaynak ulaşım delikleri arasındaki bölgenin tüm uzunluğu boyunca uygulanan tam penetrasyonlu küt kaynak olmalıdır. Kaynak işlemi için başlangıç ve bitiş levhaları gerekli değildir.

aktaracak boy ve kalınlıkta olması gereklidir.

c) Kolon başlık kalınlığının

$$t_{cf} \geq 0.4 \sqrt{1.8 b_{bf} t_{bf} \frac{R_{yb} F_{yb}}{R_{yc} F_{yc}}} \quad (7.20)$$

ve

$$t_{cf} \geq \frac{b_{bf}}{6} \quad (7.21)$$

koşullarının her ikisini de birlikte sağlaması durumunda süreklilik levhasına gerek olmayabilir.

R_{yb} = Kirişte olası akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı

R_{yc} = Kolonda olası akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine

oranı

F_{yb} = Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi

F_{yc} = Kolon malzemesinin karakteristik akma gerilmesi

b_{bf} = Kiriş başlık genişliği

t_{bf} = Kiriş başlık kalınlığı

t_{cf} = Kolon başlık kalınlığı

11) Panel bölgesinin kontrolü

Kiriş-kolon birleşim detayında, kolon ve kiriş başlıklarının sınırladığı kayma bölgesinin (Şekil 7.5) V_{up} gerekli kesme kuvveti dayanımı, kolona birleşen kirişlerin olası plastik momentleri etkisinden meydana gelen kolon kesme kuvveti esas alınarak hesaplanacaktır.

$$V_{up} = \sum M_{uc} \cdot \left(\frac{1}{d_b - t_{bf}} - \frac{1}{H_{ort}} \right) \quad (7.22)$$

H_{ort} : Ele alınan birleşim noktasının üstündeki ve altındaki kat yüksekliklerinin ortalaması

d_b : Kiriş kesit yüksekliği t_{bf} : Kiriş başlık kalınlığı

a) Kayma bölgesi yeterli kesme kuvveti dayanımına sahip olacak şekilde boyutlandırılacaktır. Bunun için, kayma etkisinde akma sınır durumu göz önüne alınarak, kayma bölgesinin tasarım kesme kuvveti dayanımı $\phi_v = 1.0$ (YDKT) ile belirlenecektir. Bu koşulun sağlanamaması halinde kayma bölgesi, gövde takviye levhaları veya örneğin köşegen doğrultusunda levhalar eklenerek güçlendirilecektir.

b) Kolon gövde levhasının ve eğer kullanılmış ise takviye levhalarının her birinin en küçük kalınlığı, $t_{min} > u/180$ koşulunu sağlayacaktır (Şekil 7.6). Bu koşulun sağlanmadığı durumlarda, takviye levhaları ve kolon gövde levhası birlikte çalışmaları sağlanacak şekilde birbirlerine kaynaklanacak ve levha

kalınlıkları toplamının $\sum t > u / 180$ koşulunu sağladığı kontrol edilecektir.

- c) Kayma bölgesinde takviye levhaları kullanılması halinde, bu levhaların kolon başlık levhalarına bağlanması için tam penetrasyonlu küt kaynak veya köşe kaynağı kullanılacaktır (Şekil 7.6). Bu kaynaklar, takviye levhası tarafından karşılanan kesme kuvveti gözönüne alınarak boyutlandırılacaktır.

$$\phi_v R_n = \phi_v 0.60 F_y d_c t_w \left(1 + \frac{3 b_{cf} t_{cf}^2}{d_b d_c t_w} \right) \quad (7.23)$$

$$\phi_v R_n \geq V_{up} \quad (7.24)$$

Kayma bölgesinde takviye levhalarının kullanılması durumunda, takviye levhalarının kolon başlarına bağlantısı için tam penetrasyonlu küt kaynak kullanılacaktır. Bu kaynaklar takviye levhası tarafından karşılanan, F_{cu}

$$F_{cu} = V_{up} - \phi_v R_n \quad (7.25)$$

kesme kuvvetine göre boyutlandırılacaktır.

12) Kirişlerin kolonlardan daha güçlü olması koşulu

Süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçevelerin veya betonarme perdeli çelik çerçeveli sistemlerin çerçevelerinin her bir kiriş-kolon düğüm noktasında, gözönüne alınan deprem doğrultusunda, aşağıdaki denklemle uyumlu olarak kolonların kirişlerden daha güçlü olması gerekmektedir.

$$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} > 1.0 \quad (7.26)$$

M_{pc}^* : kolon eğilme momenti kapasiteleri

M_{pb}^* : kiriş eğilme momenti kapasiteleri,

zayıflatılmış kiriş enkesitli birleşim kullanılması durumunda ise kiriş eğilme momenti kapasitelerinin hesabında azaltılmış kesitin plastik mukavemet momenti kullanılacaktır.

Kolon eğilme momenti kapasitelerinin hesabında, depremin yönü ile uyumlu olarak bu eğilme

momenti kapasitelerini en küçük yapan, P_{ac} (GKT) veya P_{uc} (YDKT) gerekli eksenel basınç kuvveti gözönüne alınacaktır.

$$\sum M_{pc}^* = \sum W_{pc} (F_{yc} - 1.5 P_{ac} / A_g) \quad (\text{GKT}) \quad (7.27)$$

veya

$$\sum M_{pc}^* = \sum W_{pc} (F_{yc} - P_{uc} / A_g) \quad (\text{YDKT}) \quad (7.28)$$

$$\sum M_{pb}^* = \sum (1.1 R_y F_{yb} W_{RBS} + 1.5 M_{av}) \quad (\text{GKT}) \quad (7.29)$$

veya

$$\sum M_{pb}^* = \sum (1.1 R_y F_{yb} W_{RBS} + M_{uv}) \quad (\text{YDKT}) \quad (7.30)$$

13) Kolon stabilitesinin kontrolü

Çerçeve düzlemi dışına doğru meydana gelebilecek dönmelerin önlenmesi amacıyla kolonlar, kiriş-kolon birleşim bölgelerinde, aşağıdaki durumlar dikkate alınarak desteklenecektir.

- a) Kiriş - kolon birleşim bölgelerinin döşeme sistemi veya çatı stabilite bağlantıları ile yanal doğrultuda desteklendiği durumlarda, kiriş ve kolon gövdelerinin aynı düzlemde olması halinde ve kayma bölgesi dışında kolonun elastik kaldığı gösterildiğinde, kolon başlıkları sadece kiriş üst başlıkları hizasında yanal doğrultuda desteklenecektir. $\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} > 1.0$ 'de verilen oranın 2.0 den büyük olduğu durumlarda kolonların elastik kaldığı varsayılabilir. Diğer durumlarda, kolon başlıkları, kiriş alt ve üst başlıkları hizalarından yanal doğrultuda desteklenecektir. Her bir yanal destek elemanı, $F_y A_{fb} / 1.5$ (GKT) veya $F_y A_{fb}$ (YDKT) ile hesaplanan değer in %2 sine eşit bir eksenel kuvvet etkisi altında boyutlandırılacaktır.
- b) Kiriş - kolon birleşim bölgelerinin bulundukları çerçeve düzlemine dik doğrultuda yanal olarak desteklenmediği durumlarda kolonlar, yanal olarak desteklendikleri noktalar arasında kalan boy kullanılarak ve aşağıdaki koşullara uygun olarak, “Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik” Bölüm 11 esasları çerçevesinde boyutlandırılacaktır.
- c) Kolonun gerekli dayanımı, TDY 2018 9.2.6'da tanımlanan yük birleşimleri kullanılarak elde edilecektir.
- d) Kolonun narinlik oranı, $L / i < 60$ koşulunu sağlayacaktır.
- e) Kolonun çerçeve düzlemine dik doğrultudaki gerekli eğilme momenti dayanımı, yanal destek elemanı için (a)'da tanımlanan gerekli eksenel kuvvet dayanımı etkisinde oluşacak yanal doğrultudaki yer değiştirmenin esas alındığı ikinci mertebe eğilme momenti olarak hesaplanacaktır.

14) Kirişin yanal burkulmaya karşı kontrolü

Birleşimin gövdeden zayıflatılmış kiriş enkesitinde akma nedeniyle plastik mafsall oluşması öngörüldüğünden, bu noktalarda $L_b \leq 0.086i_y \sqrt{E/F_y}$ olacak şekilde her iki başlıkta yanal burulmalı burkulmaya karşı ilave yanal destek oluşturulmalıdır.

Ancak, kiriş üst başlığının merkezleri arasındaki uzaklık 300 mm'yi aşmayan başlıklı çelik ankrajlar ile betonarme döşemeye bağlanması halinde, kiriş alt ve üst başlıklarında bu ilave yanal desteklerin kullanılmasına gerek yoktur.

Yanal destek kullanılması durumunda bu destek, kiriş enkesitinin azaltıldığı bölgenin kolondan en uzak olan noktasından en fazla kiriş yüksekliğinin yarısı kadar uzakta teşkil edilmelidir. Yanal desteğin, kolon yüzü ile azaltılmış kiriş enkesit bölgesinin kolon yüzünden en uzak ucu arasındaki bölge içinde kirişe birleşimine izin verilmez.

