

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SİMETRİK I-ENKESİTLİ ÇELİK EĞİLME ELEMANLARININ TASARIM  
İLKELERİNİN İRDELENMESİ VE TASARIM TABLOLARININ  
HAZIRLANMASI**

**MOHAMMAD SAMİM NASRAT**

**KOCAELİ 2018**

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SİMETRİK I-ENKESİTLİ ÇELİK EĞİLME ELEMANLARININ  
TASARIM İLKELERİNİN İRDELENMESİ VE TASARIM  
TABLOLARININ HAZIRLANMASI

MOHAMMAD SAMİM NASRAT

Doç. Dr. Seval PINARBAŞI ÇUHADAROĞLU

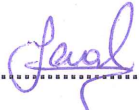


Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Fuad OKAY

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Burhanettin ALTAN

Jüri Üyesi, Giresun Üniversitesi

  
.....  
  
.....  
  
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 11.05.2018

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tezde, simetrik I-enkesitli çelik eğilme elemanların, 2016 yılında yürürlüğe giren ve yapısal çelik binaların tasarımı için hazırlanan “Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliği” çerçevesinde tasarım ilkeleri irdelenerek, TS 648'deki tasarım ilkeleriyle karşılaştırılmış, TS 648'e göre tasarlanan bir çelik eğilme elemanının yeni yönetmeliğe göre yeterli dayanım ve rijitliğe sahip olup olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, Türkiye'de çelik yapı tasarımı yapan yapı mühendislerinin yeni yönetmeliğe göre çelik eğilme elemanlarının tasarımında kullanabilecekleri pratik tasarım tabloları oluşturulmuştur.

Kocaeli Üniversitesi'ne ilk adımı attığımdan beri çok sıcak karşılama ile birlikte gerek kendisinden aldığı derslerde, gerek bu tez çalışmamda hiç bir yardımı esirgemeyen, öneri ve teşvikleriyle çelik yapı vizyonumunun gelişmesine katkı yapan, aynı zamanda benim danışmanlığımı da yapan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Seval Pınarbaşı Çuhadaroğlu'na gönülden teşekkür ederim.

Hayatımda maddi ve manevi açıdan sürekli yanımda olan değerli ailem ve sevgili eşim Nadya Omar'a sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Mayıs – 2018

Mohammad Samim NASRAT

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLOLAR DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
GİRİŞ.....	1
1. ÇELİK EĞİLME ELEMANLARININ BAŞLICA SINIR DURUMLARI.....	6
1.1. Kuvvetli Eksenleri Etrafında Eğilen Çelik Yapı Elemanlarının Eğilme Momenti Dayanımı ile İlişkili Sınır Durumlar.....	7
1.1.1. Akma sınır durumu.....	9
1.1.2. Yerel burkulma sınır durumu.....	12
1.1.3. Yanal burulmalı burkulma sınır durumu.....	14
1.2. Zayıf Eksenleri Etrafında Eğilen Çelik Yapı Elemanlarının Eğilme Momenti Dayanımı ile İlişkili Sınır Durumlar.....	16
1.2.1. Akma sınır durumu.....	17
1.2.2. Yerel başlık burkulması sınır durumu.....	17
1.3. Gövde Düzleminde Kesme Kuvveti Etkisindeki Çelik Yapı Elemanlarının Kesme Kuvveti Dayanımı ile İlişkili Sınır Durumlar.....	18
1.3.1. Gövdenin kesme etkisinde akması sınır durumu.....	21
1.3.2. Gövdenin kesme etkisinde burkulması sınır durumu.....	22
1.4. Başlıklarına Paralel Düzlemde Kesme Kuvveti Etkisindeki Çelik Yapı Elemanlarının Kesme Kuvveti Dayanımı ile İlişkili Sınır Durumlar.....	25
1.4.1. Başlıkların kesme etkisinde akması sınır durumu.....	26
1.4.2. Başlıkların kesme etkisinde burkulması sınır durumu.....	26
2. TÇY (2016)'DA ÇELİK EĞİLME ELEMANLARI İÇİN TANIMLANAN TASARIM İLKELERİ.....	28
2.1. Tasarım Yaklaşımları.....	28
2.1.1. YDKT ve ilgili yük birleşimleri.....	29
2.1.2. GKT ve ilgili yük birleşimleri.....	29
2.2. Kuvvetli Eksenleri Etrafında Eğilen Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları.....	30
2.2.1. Dayanım ve güvenlik katsayıları.....	31
2.2.2. Akma sınır durumu.....	31
2.2.3. Yerel burkulma sınır durumu.....	31
2.2.4. Yanal burulmalı burkulma sınır durumu.....	36
2.3. Zayıf Eksenleri Etrafında Eğilen Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları.....	39
2.3.1. Dayanım ve güvenlik katsayıları.....	39
2.3.2. Akma sınır durumu.....	40
2.3.3. Yerel burkulma sınır durumu.....	40
2.4. Gövde Düzleminde Kesme Kuvveti Etkisindeki Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları.....	41
2.4.1. Dayanım ve güvenlik katsayıları.....	42
2.4.2. Gövdenin kesme etkisinde akması sınır durumu.....	43
2.4.3. Gövdenin kesme etkisinde burkulması sınır durumu.....	43

2.5. Başlıklarına Paralel Düzlemde Kesme Kuvveti Etkisindeki Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları .....	44
2.5.1. Dayanım ve güvenlik katsayıları.....	45
2.5.2. Başlıkların kesme etkisinde akması sınır durumu.....	45
2.5.3. Başlıkların kesme etkisinde burkulması sınır durumu.....	45
3. TS 648'DE ÇİFT SİMETRİ EKSENLİ I-ENKESİTLİ ÇELİK EĞİLME ELEMANLARI İÇİN TANIMLANAN TASARIM İLKELERİ .....	47
3.1. Tasarım Yaklaşımı ve İlgili Yük Birleşimleri .....	48
3.2. Kuvvetli Eksenleri Etrafında Eğilen Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları.....	50
3.3. Zayıf Eksenleri Etrafında Eğilen Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları.....	54
3.4. Gövde Düzleminde Kesme Kuvveti Etkisindeki Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları.....	55
3.5. Başlıklarına Paralel Düzlemde Kesme Kuvveti Etkisindeki Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları .....	56
4. ÇİFT SİMETRİ EKSENLİ I-ENKESİTLİ ÇELİK EĞİLME ELEMANLARI İÇİN TÇY (2016) VE TS 648'DE TANIMLANAN TASARIM İLKELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI .....	58
4.1. İncelenen Hadde Profillerin Enkesit Özelliklerinin Karşılaştırılması.....	59
4.1.1. Birim boy ağırlıkları ve enkesit boyutları .....	59
4.1.2. Mukavemet momentlerinin oranları (şekil faktörleri) .....	62
4.1.3. Basınç etkisindeki enkesit parçalarının genişlik/kalınlık oranları.....	63
4.1.4. Etkin atalet yarıçapları.....	69
4.1.5. Yanal burulmalı burkulma sınır durumu için sınır eleman uzunlukları.....	71
4.1.6. Gövde ve başlık alanları.....	75
4.2. Tasarım Yaklaşımları ve İlgili Yük Birleşimleri .....	82
4.3. Yerel Burkulma Sınır Durumu İçin Enkesitlerin Sınıflandırılması.....	84
4.4. Kuvvetli Eksen Etrafında Eğilme Etkisinde Tasarım Kurallarının ve Dayanımların Karşılaştırılması.....	86
4.4.1. Yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt enkesitli elemanlar .....	87
4.4.2. Yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt olmayan başlıklı elemanlar .....	88
4.4.3. Yanal burkulma tehlikesi olan elemanlar .....	89
4.5. Zayıf Eksen Etrafında Eğilme Etkisinde Tasarım Kurallarının ve Dayanımların Karşılaştırılması.....	106
4.5.1. Kompakt enkesitli elemanlar .....	106
4.5.2. Kompakt olmayan başlıklı elemanlar.....	108
4.6. Gövde Düzleminde Kesme Kuvveti Etkisinde Tasarım Kurallarının ve Dayanımların Karşılaştırılması.....	108
4.7. Başlıklarına Paralel Düzlemde Kesme Kuvveti Etkisinde Tasarım Kurallarının ve Dayanımların Karşılaştırılması .....	112
5. I-ENKESİTLİ EĞİLME ELEMANLARI İÇİN PRATİK TASARIM TABLOLARI .....	117
5.1. Kuvvetli Eksen Etrafında Eğilme/Gövde Düzleminde Kesme.....	117
5.2. Zayıf Eksen Etrafında Eğilme/Başlıklara Paralel Düzlemde Kesme .....	139
5.3. Pratik Tasarım Tablolarının Kullanılması ve Tablolardan Elde Edilen Değerlerin El Çözümleriyle Karşılaştırılması .....	143
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	159
KAYNAKLAR .....	164
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	166
ÖZGEÇMİŞ .....	167

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Düzgün yayılı yük etkisindeki bir basit kirişte oluşan kesit zorlarının kiriş boyunca değişimi.....	6
Şekil 1.2.	Kuvvetli ekseni etrafında eğilen basit bir kirişte oluşan kesit zorları ve elastik normal gerilme dağılımı.....	8
Şekil 1.3.	Kuvvetli ekseni etrafında eğilen çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanında gözlenen burkulma modları (a) Yanal burulmalı burkulma (b) Yerel (başlık) burkulma.....	9
Şekil 1.4.	Açıklık ortasından uygulanan tekil yükün etkisindeki basit bir kirişin en çok zorlanan kesitinde oluşan gerilme dağılımının artan yüklerle değişimi.....	10
Şekil 1.5.	Sıcak şekil verilmiş I kesitli bir çelik yapı elemanında haddeleme nedeniyle oluşan artık gerilmeler.....	11
Şekil 1.6.	Çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanında plastik moment etkisinde oluşan normal gerilme dağılımı.....	11
Şekil 1.7.	TÇY (2016)'ya göre, kuvvetli ekseni etrafında eğilen kompakt gövdeli çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanının karakteristik eğilme momenti dayanımının basınç başlığının genişlik/kalınlık oranıyla değişimi.....	13
Şekil 1.8.	TÇY (2016)'ya göre, kuvvetli ekseni etrafında eğilen kompakt enkesitli I-şekilli profillerin karakteristik eğilme momenti dayanımının yanal doğrultuda desteklenmemiş boyla değişimi.....	15
Şekil 1.9.	TÇY (2016)'ya göre, zayıf ekseni etrafında eğilen çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanının karakteristik eğilme momenti dayanımının basınç başlığının genişlik/kalınlık oranıyla değişimi.....	18
Şekil 1.10.	Gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki bir çelik eğilme elemanında oluşan kayma gerilmeleri.....	19
Şekil 1.11.	Gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanının enkesitinde oluşan kayma gerilmesi dağılımı.....	20
Şekil 1.12.	Gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanının enkesitinde oluşan ortalama kayma gerilmesi dağılımı.....	20
Şekil 1.13.	Çift simetri eksenli I-enkesitlerde (a) gövde düzleminde etkiyen (b) başlıklara paralel düzlemde etkiyen kesme kuvveti nedeniyle enkesitte oluşan kayma gerilmesi dağılımları.....	21
Şekil 1.14.	Gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki bir çelik eğilme elemanında oluşan kayma gerilmeleri.....	23
Şekil 1.15.	Düşey rijitlik levhalarının gövdenin burkulma alanını sınırlaması.....	23
Şekil 1.16.	AISC 360-10'a göre, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanının karakteristik kesme kuvveti dayanımının gövdenin genişlik/kalınlık oranıyla değişimi.....	24
Şekil 1.17.	Gövde düzleminde kesme için, AISC 360-16 (2016)'da tanımlanan dayanım eğrisinin AISC 360-10 (2010)'da tanımlanan eğriyle karşılaştırılması.....	25

Şekil 1.18.	TÇY (2016)'ya göre, başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanının karakteristik kesme kuvveti dayanımının başlıklarının genişlik/kalınlık oranıyla değişimi.....	27
Şekil 2.1.	Çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanında (a) rijitleştirilmemiş başlık (b) rijitleştirilmiş gövde parçalarının genişlik ve kalınlıklarının tanımlanması.....	32
Şekil 2.2.	TÇY (2016)'da kuvvetli eksenlerinde eğilen çift simetri eksenli I-enkesitli çelik eğilme elemanlarının basınç etkisindeki parçaları için tanımlanan sınır narinlikler .....	33
Şekil 2.3.	TÇY (2016)'da, kuvvetli eksen etrafında eğilen kompakt gövdeli çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik elemanın yerel burkulma sınır durumunda eğilme momenti dayanımı hesabı için verilen tasarım eğrisi .....	35
Şekil 2.4.	TÇY (2016)'da, kuvvetli eksen etrafında eğilen kompakt gövdeli çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik elemanın yanal burkulma (YBB) sınır durumunda eğilme momenti dayanımı hesabı için verilen tasarım eğrisi ( $C_b=1$ için) .....	37
Şekil 2.5.	TÇY (2016)'ya göre, kuvvetli eksen etrafında eğilen kompakt gövdeli çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik elemanı için yanal burkulmalı burkulma sınır durumunda $C_b$ 'nin karakteristik eğilme momenti dayanımına etkisi .....	37
Şekil 2.6.	TÇY (2016)'da zayıf eksenlerinde eğilen çift simetri eksenli I-enkesitli çelik eğilme elemanların başlıkları için tanımlanan sınır narinlikler .....	40
Şekil 2.7.	TÇY (2016)'da, gövde düzlemindeki kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli hadde profillerin yerel burkulma sınır durumunda kesme kuvveti dayanımı hesabı için verilen tasarım eğrisi.....	43
Şekil 2.8.	TÇY (2016)'da, başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli hadde profillerinin yerel burkulma sınır durumunda kesme kuvveti dayanımı hesabı için verilen tasarım eğrisi .....	46
Şekil 3.1.	$C_b=1$ için, kuvvetli eksenlerinde eğilen (a) IPE300 ve (b) HEA 300 enkesitli elemanların emniyetli eğilme momenti dayanımlarının elemanların "burkulma" boylarıyla değişimleri (Noktalı çizgiler, $F_{Bx}=F_{Bx2}$ kabulüyle çizilmiştir).....	53
Şekil 4.1.	İncelenen enkesitlerin birim boy ağırlıkları ile enkesit ve gövde yüksekliklerinin karşılaştırılması.....	60
Şekil 4.2.	İncelenen enkesitlerin başlık genişlikleri ile başlık ve gövde kalınlıklarının karşılaştırılması.....	61
Şekil 4.3.	İncelenen enkesitlerin kuvvetli eksen etrafında eğilmede şekil faktörleri (mukavemet momenti oranları) .....	64
Şekil 4.4.	İncelenen enkesitlerin zayıf eksen etrafında eğilmede şekil faktörleri (mukavemet momenti oranları) .....	65
Şekil 4.5.	İncelenen enkesitlerin başlık narinliklerinin ( $\lambda_f$ ) karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.6.	İncelenen enkesitlerin gövde narinliklerinin ( $\lambda_w$ ) karşılaştırılması .....	68
Şekil 4.7.	İncelenen enkesitlerin etkin atalet yarıçaplarının ( $i_{ts}$ ) hesabı için TÇY (2016)'da verilen iki denklemle (Denklem 2.12 ve 2.13) TS 648'de verilen denklemin (Denklem 3.6) sonuçlarının karşılaştırılması .....	70
Şekil 4.8.	S235 çeliği için, incelenen enkesitlerin (a) plastik sınır boylarının ( $L_p$ ) (b) elastik sınır boylarının ( $L_r$ ) ve (c) sınır boyların oranlarının ( $L_r/L_p$ ) karşılaştırılması .....	72

Şekil 4.9.	S275 çeliği için, incelenen enkesitlerin (a) plastik sınır boylarının ( $L_p$ ) (b) elastik sınır boylarının ( $L_r$ ) ve (c) sınır boyların oranlarının ( $L_r/L_p$ ) karşılaştırılması .....	73
Şekil 4.10.	S355 çeliği için, incelenen enkesitlerin (a) plastik sınır boylarının ( $L_p$ ) (b) elastik sınır boylarının ( $L_r$ ) ve (c) sınır boyların oranlarının ( $L_r/L_p$ ) karşılaştırılması .....	74
Şekil 4.11.	$C_b=1$ durumunda, incelenen enkesitlerin plastik sınır boyları ( $L_p$ ) için TS 648'den elde edilen değerlerin TÇY (2016)'dan elde edilen değerlere oranı .....	76
Şekil 4.12.	İncelenen enkesitlerin gövde alanlarının ( $A_w$ ) karşılaştırılması .....	78
Şekil 4.13.	İncelenen enkesitlerin TÇY (2016)'ya göre gövde alanlarının karşılaştırılması .....	79
Şekil 4.14.	İncelenen enkesitlerin gövde alanlarının enkesit alanlarına oranlarının ( $dt_w/A$ oranlarının) karşılaştırılması .....	80
Şekil 4.15.	İncelenen enkesitlerin toplam başlık alanlarının ( $2b_{ft}$ ) karşılaştırılması .....	81
Şekil 4.16.	İncelenen enkesitlerin toplam başlık alanlarının gövde alanlarına oranlarının ( $A_v/A_w=2b_{ft}/dt_w$ ) karşılaştırılması.....	83
Şekil 4.17.	HEA enkesitlerinin başlık narinliklerinin üç farklı çelik sınıfı için hesaplanan kompakt başlık parçası için sınır narinlik ( $\lambda_{pf}$ ) değerleriyle karşılaştırılması .....	86
Şekil 4.18.	Yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt enkesitli hadde profilleri için kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti dayanım oranları .....	88
Şekil 4.19.	Yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt olmayan enkesitli hadde profilleri için kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti dayanım oranları (kesikli çizgiler yerel başlık burkulmasının önlenildiği durumu ( $\Psi_{Mx0}$ ) ifade etmektedir) .....	89
Şekil 4.20.	300 numaralı I enkesitli hadde profillerinin kuvvetli eksen etrafında eğilmeye güvenli ( $M_{nx}/\Omega_b$ ) ve emniyetli ( $M_{x,all}$ ) eğilme momenti dayanım eğrilerinin çelik kalitesiyle değişimi.....	91
Şekil 4.21.	S235 ve S355 için, 300 numaralı I enkesitli hadde profillerinin emniyetli (TS 648) ve güvenli (TÇY (2016)) eğilme momenti dayanım eğrilerinin karşılaştırılması.....	95
Şekil 4.22.	Farklı çelik kaliteli, 300 numaralı I enkesitli hadde profillerinin kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti dayanım oranları.....	96
Şekil 4.23.	300 numaralı HE enkesitli hadde profillerin kuvvetli eksen etrafında eğilmeye güvenli ( $M_{nx}/\Omega_b$ ) ve emniyetli ( $M_{x,all}$ ) eğilme momenti dayanım eğrilerinin çelik kalitesiyle değişimi.....	98
Şekil 4.24.	S235 ve S355 için, 300 numaralı HE enkesitli hadde profillerin emniyetli (TS 648) ve güvenli (TÇY (2016)) eğilme momenti dayanım eğrilerinin karşılaştırılması.....	99
Şekil 4.25.	Farklı çelik kaliteli, 300 numaralı HE enkesitli hadde profillerin kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti dayanım oranları.....	100
Şekil 4.26.	Kompakt olmayan başlıklı I-enkesitli eğilme elemanlarında tanımlanan "azaltılmış" plastik eğilme momenti ( $M'_p$ ) ve "artırılmış" plastik sınır boy ( $L'_p$ ) .....	101
Şekil 4.27.	S355 çelik kaliteli, HEA300 enkesitli bir eğilme elemanın kuvvetli eksen etrafında eğilmeye dayanım eğrisinde kompakt olmayan başlıkların etkisi.....	102
Şekil 4.28.	S235 çelik kaliteli, I-enkesitli hadde profillerin kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti dayanım oranları.....	103



Şekil 4.29. S235 çelik kaliteli, HE-enkesitli hadde profillerinin kuvvetli ekseninde eğilme momenti dayanım oranları .....	105
Şekil 4.30. Kompakt I-enkesitli hadde profillerinin zayıf ekseninde eğilme momenti dayanım oranları .....	109
Şekil 4.31. Kompakt I-enkesitli hadde profillerinin zayıf ekseninde eğilme momenti dayanım oranları .....	110
Şekil 4.32. I-enkesitli hadde profillerinin gövde düzleminde kesme kuvveti dayanım oranları.....	113
Şekil 4.33. I-enkesitli hadde profillerinin başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti dayanım oranları .....	115
Şekil 5.1. Örnek 1 için tasarım eğilme momenti dayanımlarının Tablo 5.8'den okunması .....	143
Şekil 5.2. Örnek 1 için tasarım eğilme momenti dayanımlarının Tablo 5.3'ten okunan değerlerden belirlenmesi .....	144
Şekil 5.3. Örnek 2 için tasarım eğilme momenti dayanımlarının Tablo 5.13'ten okunması .....	149
Şekil 5.4. Düzgün yayılı yük etkisindeki basit giriş .....	150
Şekil 5.5. Açıklığın dörtte birindeki kesit zorları .....	151
Şekil 5.6. Örnek 4 için tasarım kesme kuvveti dayanımlarının Tablo 5.3'ten okunması .....	156
Şekil 5.7. Örnek 5 için tasarım kesme kuvveti dayanımlarının Tablo 5.13'ten okunması .....	158

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 4.1. Tezin kapsamında ele alınan I-enkesitli Avrupa hadde profilleri.....	58
Tablo 4.2. İncelenen enkesitlerin başlık ve gövde narinliklerinin (b/t oranlarının) enkesit grubu içindeki en büyük, en küçük ve ortalama değerleri.....	69
Tablo 4.3. TÇY (2016)'da eğilme momenti etkisindeki I-enkesitli hadde profillerin başlık ve gövdeleri için tanımlanan sınır narinliklerin farklı çelik sınıfları için değerleri.....	85
Tablo 5.1. Kuvvetli eksen etrafında eğilen IPE enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları.....	118
Tablo 5.2. Kuvvetli eksen etrafında eğilen IPN enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları.....	119
Tablo 5.3. Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEA enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları.....	121
Tablo 5.4. Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEB enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları.....	122
Tablo 5.5. Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEM enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları.....	124
Tablo 5.6. Kuvvetli eksen etrafında eğilen IPE enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları.....	128
Tablo 5.7. Kuvvetli eksen etrafında eğilen IPN enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları.....	130
Tablo 5.8. Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEA enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları.....	133
Tablo 5.9. Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEB enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları.....	134
Tablo 5.10. Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEM enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları.....	136
Tablo 5.11. Zayıf eksen etrafında eğilen çift simetri IPE çelik eğilme elemanlarının farklı çelik sınıfları altında eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları .....	140
Tablo 5.12. Zayıf eksen etrafında eğilen çift simetri IPN çelik eğilme elemanlarının farklı çelik sınıfları altında eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları .....	140
Tablo 5.13. Zayıf eksen etrafında eğilen çift simetri HEA çelik eğilme elemanlarının farklı çelik sınıfları altında eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları .....	141
Tablo 5.14. Zayıf eksen etrafında eğilen çift simetri HEB çelik eğilme elemanlarının farklı çelik sınıfları altında eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları .....	141
Tablo 5.15. Zayıf eksen etrafında eğilen çift simetri HEM çelik eğilme elemanlarının farklı çelik sınıfları altında eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları .....	142

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$A_f$	: Başlık enkesit alanı ( $\text{mm}^2$ )
$A_v$	: Enkesitin toplam başlık alanı ( $\text{mm}^2$ )
$A_w$	: Enkesit yüksekliği ile hesaplanan gövde alanı ( $\text{mm}^2$ )
$C_b$	: Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda moment düzeltme katsayısı
$C_{v1}$	: Gövde kesme kuvveti dayanımı katsayısı
$C_{v2}$	: Kayma etkisinde başlık burkulma katsayısı
$C_w$	: Çarpılma sabiti ( $\text{mm}^6$ )
$E$	: Yapısal çelik elastisite modülü (200000 MPa)
$E$	: Deprem etkisi
$F_{all}$	: Emniyet gerilmesi (MPa)
$F_B$	: Basit eğilmede basınç emniyet gerilmesi (MPa)
$F_{Bx}$	: Kuvvetli eksen etrafında basit eğilmede basınç emniyet gerilmesi (MPa)
$F_{By}$	: Zayıf eksen etrafında basit eğilmede basınç emniyet gerilmesi (MPa)
$F_{cr}$	: Elastik plak burkulma gerilmesi (MPa)
$F_{cr}$	: Kritik gerilme (MPa)
$F_{crx}$	: Kuvvetli eksen etrafında eğilmede elastik kritik gerilme (MPa)
$F_{cry}$	: Zayıf eksen etrafında eğilmede elastik kritik gerilme (MPa)
$F_{gövde}$	: Gövdenin enkesit alanı ( $\text{mm}^2$ )
$F_t$	: Çekme emniyet gerilmesi (MPa)
$F_u$	: Yapısal çelik karakteristik çekme dayanımı (MPa)
$F_v$	: Kayma emniyet gerilmesi (MPa)
$F_y$	: Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi (MPa)
$G$	: Yapısal çelik kayma modülü (77200 MPa)
$G$	: Sabit yük
$G$	: Birim boy ağırlığı (kN/m)
$I_x, I_y$	: Asal eksenlere göre atalet momenti ( $\text{mm}^4$ )
$J$	: Burulma sabiti ( $\text{mm}^4$ )
$K$	: Burkulma boyu katsayısı
$L$	: Eleman boyu (mm)
$L_b$	: Basınç başlığında yan al yerdeğiştirmenin ve enkesit burulmasının önlendiği noktalar arasındaki eleman uzunluğu (stabilite bağlantısıyla desteklenmeyen eleman uzunluğu) (mm)
$L_p'$	: "Artırılmış" plastik sınır boyu (mm)
$L_p$	: Akma sınır durumu için yan al olarak desteklenmeyen sınır uzunluk (mm)
$L_r$	: Elastik olmayan yan al burulmalı burkulma durumu için sınır uzunluk (mm)
$M_A$	: Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğunun 1/4 noktasındaki eğilme momentinin mutlak değeri (kNm)
$M_a$	: GKT yük birleşimleri altında gerekli eğilme momenti dayanımı (kNm)
$M_B$	: Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğunun 1/2 noktasındaki eğilme momentinin mutlak değeri (kNm)
$M_C$	: Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğunun 3/4 noktasındaki eğilme momentinin mutlak değeri (kNm)
$M_{cr}$	: Elastik yan al burulmalı burkulma için kritik eğilme momenti (kNm)

$M_{maks}$	: Yanal stabilite elemanları arasındaki kiriş uzunluğu boyunca en büyük eğilme momentinin mutlak değeri (kNm)
$M_n$	: Karakteristik eğilme momenti dayanımı (kNm)
$M_{nx}$	: Kuvvetli eksen etrafında karakteristik eğilme momenti dayanımı (kNm)
$M_{px}$	: Kuvvetli eksen etrafında plastik eğilme momenti (kNm)
$M_{px}$	: "Azaltılmış" plastik eğilme momenti (kNm)
$M_{py}$	: Zayıf eksen etrafında plastik eğilme momenti (kNm)
$M_{rx}$	: Kuvvetli eksen etrafında ilk akma momenti (kNm)
$M_x$	: Kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti (kNm)
$M_{x,all}$	: Kuvvet eksen etrafında emniyetli eğilme momenti dayanımı (kNm)
$M_y$	: Akma momenti (kNm)
$M_{yx}$	: Kuvvetli eksen etrafında eğilmede akma momenti (kNm)
$M_{y,all}$	: Zayıf eksen etrafında emniyetli eğilme momenti dayanımı (kNm)
$Q$	: Hareketli yük
$Q_r$	: Çatı hareketli yük
$Q_y$	: Kayma gerilmesi hesabı yapılan noktanın üstünde ya da altında kalan enkesit alanının kuvvetli eksen etrafındaki eğilme için tanımlanmış elastik tarafsız eksene göre birinci alan momenti ( $mm^3$ )
$R$	: Yağmur yükü
$R_a$	: GKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanım (kN)
$R_n$	: Karakteristik dayanımı (kN)
$R_u$	: YDKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanım (kN)
$S$	: Kar yükü
$S_x$	: Kuvvetli asal eksenin üstünde ya da altında kalan yarım enkesit alanın aynı eksene göre statik alan momenti ( $mm^3$ )
$S_y$	: En büyük kayma gerilmesinin olduğu nokta için statik alan momenti ( $mm^3$ )
$V_n$	: Karakteristik kesme kuvveti dayanımı (kN)
$V_{nx}$	: Zayıf eksende karakteristik kesme kuvveti dayanımı (kN)
$V_{ny}$	: Gövde düzleminde karakteristik kesme kuvveti dayanımı (kN)
$V_{px}$	: Zayıf eksende plastik kesme kuvveti dayanımı (kN)
$V_{py}$	: Gövde düzleminde plastik kesme kuvveti dayanımı (kN)
$V_x$	: Zayıf eksende etkiyen kesme kuvveti (kN)
$V_{x,all}$	: Zayıf eksende emniyetli kesme kuvveti dayanımı (kN)
$V_y$	: Gövde düzleminde etkiyen kesme kuvveti (kN)
$V_{y,all}$	: Gövde düzleminde emniyetli kesme kuvveti dayanımı (kN)
$W$	: Rüzgar yükü
$W_{ex}$	: x-ekseni etrafında elastik mukavemet momenti ( $mm^3$ )
$W_{ey}$	: y-ekseni etrafında elastik mukavemet momenti ( $mm^3$ )
$W_p$	: Plastik mukavemet momenti ( $mm^3$ )
$W_{px}$	: x-ekseni etrafında plastik mukavemet momenti ( $mm^3$ )
$W_{py}$	: y-ekseni etrafında plastik mukavemet momenti ( $mm^3$ )
$b$	: Enkesitin basınç parçasının genişliği (mm)
$b_f$	: Başlık genişliği (mm)
$d$	: Enkesit yüksekliği (mm)
$f$	: Yalnız eğilme momenti etkisi altında hesaplanan basınç gerilmesi (MPa)
$f$	: Şekil faktörü
$f_{bx}$	: Yalnız kuvvetli eksen etrafındaki eğilme momenti etkisi altında hesaplanan basınç gerilmesi (MPa)
$f_c$	: Basit kesme durumunda asal basınç gerilmesi (MPa)
$f_t$	: Basit kesme durumunda asal çekme gerilmesi (MPa)
$f_v$	: Kayma gerilmesi (MPa)

$f_{v,x}$	: Gövde düzleminde kesme etkisinde enkesitte oluşan en büyük kayma gerilmesi (MPa)
$f_{v,y}$	: Zayıf ekseninde kesme etkisinde enkesitte oluşan en büyük kayma gerilmesi (MPa)
$f_{v,ave}$	: Ortalama kayma gerilmesi (MPa)
$f_x$	: Kuvvetli eksen etrafında eğilen bir çelik yapı elemanının şekil faktörü
$h$	: Düz gövde yüksekliği (mm)
$i$	: Atalet yarıçapı (mm)
$i_b$	: Basınç başlığı ve gövdenin basınç bölgesinin 1/3'ünün gövde eksenine göre atalet yarıçapı (mm)
$i_{ts}$	: Etkin atalet yarıçapı (mm)
$i_x$	: x-eksenine göre atalet yarıçapı (mm)
$i_y$	: y-eksenine göre atalet yarıçapı (mm)
$k$	: Plak burkulma katsayısı
$k_c$	: Rijitleştirilmemiş narin parçalar için katsayı
$k_v$	: Kesme kuvveti etkisinde gövde levhası burkulması katsayısı
$t$	: Kalınlık (mm)
$t_f$	: Başlık kalınlığı (mm)
$t_w$	: Gövde kalınlığı (mm)
$\Psi_{Mx}$	: Kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti dayanım oranı
$\Omega$	: Güvenlik katsayısı
$\Omega_b$	: Eğilme momenti etkisi için güvenlik katsayısı
$\Omega_v$	: Kesme kuvveti etkisi için güvenlik katsayısı
$\lambda$	: Basınç parçasının narinliği
$\lambda_f$	: Enkesitin başlık parçasının narinliği
$\lambda_{f,ort}$	: İncelenen enkesit grubu için ortalama başlık narinlik sınır değeri
$\lambda_{f,max}$	: İncelenen enkesit grubu için en büyük başlık narinlik sınır değeri
$\lambda_{f,min}$	: İncelenen enkesit grubu için en küçük başlık narinlik sınır değeri
$\lambda_p$	: Kompakt enkesit parçası için narinlik sınır değeri
$\lambda_{pf}$	: Kompakt başlık parçası için narinlik sınır değeri
$\lambda_{pw}$	: Kompakt gövde parçası için narinlik sınır değeri
$\lambda_r$	: Kompakt olmayan enkesit parçası için narinlik sınır değeri
$\lambda_{rf}$	: Kompakt olmayan başlık parçası için narinlik sınır değeri
$\lambda_{rw}$	: Kompakt olmayan gövde parçası için narinlik sınır değeri
$\lambda_w$	: Enkesitin gövde parçasının narinliği
$\lambda_{w,ort}$	: İncelenen enkesit grubu için ortalama gövde narinlik sınır değeri
$\lambda_{w,max}$	: İncelenen enkesit grubu için en büyük gövde narinlik sınır değeri
$\lambda_{w,min}$	: İncelenen enkesit grubu için en küçük gövde narinlik sınır değeri
$\mu$	: Poisson oranı
$\sigma_B$	: Yalnız eğilme momenti etkisi altında müsaade edilecek basınç eğilme gerilmesi (MPa)
$\sigma_d$	: Çekme dayanım gerilmesi (MPa)
$\sigma_{max}$	: Yalnız eğilme momenti etkisi altında hesaplanan basınç gerilmesi (MPa)
$\sigma_{çem}$	: Çekme emniyet gerilmesi (MPa)
$\tau$	: Hesaplanan kayma gerilmesi (MPa)
$\tau_{em}$	: Kayma emniyet gerilmesi (MPa)
$\tau_y$	: Kesme etkisinde karakteristik akma dayanımı (MPa)
$\phi$	: Dayanım katsayısı
$\phi_f$	: Eğilme momenti etkisi için dayanım katsayısı
$\phi_v$	: Kesme kuvveti etkisi için dayanım katsayısı

## Kısaltmalar

AISC	:	American Institute of Steel Construction (Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü)
ASD	:	Allowable Stress Design (Güvenlik Katsayıları ile Tasarım)
DBYBHY	:	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
EG	:	Emniyet Gerilmesi
GKT	:	Güvenlik Katsayıları ile Tasarım
LRFD	:	Load and Resistance Factor Design (Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım)
TÇY	:	Türk Çelik Yönetmeliği
TS	:	Türk Standartları
TSDS	:	Turkish Steel Design Specification (Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar)
YDKT	:	Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım



## SİMETRİK I-ENKESİTLİ ÇELİK EĞİLME ELEMANLARININ TASARIM İLKELERİNİN İRDELENMESİ VE TASARIM TABLOLARININ HAZIRLANMASI

### ÖZET

Son yıllarda yapısal çelik sektöründe gözlenen gelişmeler ve yenilikler, hem dünyada hem de Türkiye’de yapısal çelik kullanımının artmasına neden olmuştur. Türkiye’de 1980 yılında yayınlanan “TS 648: Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları”, literatürdeki ve teknolojiadaki gelişmeler dikkate alınarak belli aralıklarla güncellenmediği için, yürürlükteki pek çok modern çelik tasarım yönetmeliğinin gerisinde kalmıştır. Bu nedenle, Türkiye Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Amerika Birleşik Devletleri’nde yapısal çelik binaların tasarımı için hazırlanan ve 2016 yılında basılan “AISC 360-16: Specification for Structural Steel Buildings (Yapısal Çelik Binalar için Yönetmelik)” yönetmeliğinin taslak metni temel alınarak ulusal bir çelik yapı tasarım yönetmeliğinin hazırlanmasını sağlamıştır. Bu yönetmeliğin, “Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliği” ismiyle 2016 yılında Resmi Gazetede yayınlanmasıyla TS 648 yürürlükten kalkmıştır. Bu tezde, simetrik I-enkesitli çelik eğilme elemanların yeni yönetmelik çerçevesinde tasarım ilkeleri irdelenerek, TS 648’deki tasarım ilkeleriyle karşılaştırılmış; böylece TS 648’e göre tasarlanan I-enkesitli bir hadde elemanının eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımlarının yeni yönetmeliğe göre yeterli olup olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, Türkiye’de çelik yapı tasarımı yapan yapı mühendislerinin yeni yönetmeliğe göre çelik eğilme elemanlarının tasarımında kullanabilecekleri pratik tasarım tabloları oluşturulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliği, I-Enkesitli Çelik Hadde Elemanlar, Tasarım Tabloları, TS 648 Standardı, Yapısal Çelik Eğilme Elemanları.

## **REVIEW OF DESIGN GUIDELINES FOR HOT-ROLLED I-SHAPED STEEL FLEXURAL MEMBERS AND PREPARATION OF PRACTICAL DESIGN TABLES**

### **ABSTRACT**

In recent years, advances and innovation observed in steel industry have caused the structural steel usage to grow up fastly both in Turkey and in the world. Since, not having been revised regularly based upon advances in the state of knowledge and changes in design practice, "TS 648: Building Code for Steel Structures", which was published in 1980 in Turkey, has fallen behind most modern structural steel design specifications. For this reason, the Ministry of Environment and Urbanization of Turkey has organized the preparation of a national structural steel design specification based on the draft version of "AISC 360-16: Specification for Structural Steel Buildings", which was prepared in the United State of America for the design of structural steel buildings and published in 2016. With the name of "Specification for Design and Construction of Steel Structures", this specification was published on the Official Gazette of Turkey in 2016 and superseded TS 648. In this thesis, the design guidelines in current specification for hot-rolled I-shaped steel flexural members have been studied and compared with those in TS 648; thereby, the suitability of the flexural and shear strengths of an hot-rolled I-shaped steel flexural member which has been designed using TS 648 based on the current specification is evaluated. Moreover, practical design tables which can be used in the design of steel flexural members have been prepared for structural engineers who design structural steel buildings in Turkey.

**Keywords:** Specification for Design and Construction of Steel Buildings, Hot-Rolled I-Shaped Steel Members, Design Tables, TS 648 Standard, Structural Steel Flexural Members.



## GİRİŞ

Çelik eğilme elemanları (sık kullanılan ismiyle kirişler) çoğu çelik yapıda düşey yük taşıyan yapı sisteminin temel elemanlarıdır. Yatay yüklerin tamamının çerçeve elemanlarıyla taşındığı moment aktaran çelik çerçevelerde, kirişler ayrıca yapıya etkiyen rüzgar ve deprem gibi yatay yüklerin güvenli bir şekilde temele aktarılmasını sağlarlar. Benzer şekilde, özellikle dışmerkez çelik çaprazlı çerçevelerde, çaprazların bağlandığı kirişler, deprem yükleri etkisinde, oldukça büyük doğrusal olmayan şekil değiştirmeler yapacak şekilde tasarlanır ve yatay yük taşıma sisteminin birincil elemanlarından biridir.

Yapılarda çoğu zaman yatay konumda kullanılan kirişler, eksenlerine dik yönde etkiyen ve enkesitlerin kayma merkezinden geçen yüklerin etkisinde, kesme kuvveti ile eğilme momentinin ortak zorlaması altındadır. Enkesiti çift simetri eksenli bir döşeme kirişinde olduğu gibi, kirişe etkiyen yüklerin doğrultusunun kesitin düşey asal eksenine çakışması durumunda, kirişte yalnız düşey kesme kuvveti ile yatay eksen etrafında eğilme momenti oluşur. Buna karşın, kirişe etkiyen yüklerin kesitin asal eksenlerinden birine paralel olmaması durumunda, kiriş eğik eğilmeye ve eğik kesmeye maruz kalır. Bu durumda, kirişin her iki asal eksen etrafındaki eğilme momenti dayanımları ile kesme kuvveti dayanımlarının belirlenmesi gerekir. Kesitleri simetrik olmayan kirişlerde sıkça gözlendiği gibi, kesme kuvvetinin kiriş kesitinin kayma merkezinden geçmediği durumlarda ise eğilme elemanında oluşan kesit zorlarına burulma momenti de eklenir. Aslında eğilme elemanlarının çoğu az da olsa eksenel yüklerin de etkisi altındadır. Ancak, çoğu pratik hallerde eksenel yükün etkisi ihmal edilip eleman "basit" eğilme elemanı olarak tasarlanır. Buna karşın, eksenel yükün ihmal edilemeyecek kadar büyük olması durumunda, elemanın kiriş-kolon olarak sınıflandırılması ve tasarımının eksenel yük ve eğilme momentinin ortak etkisi dikkate alınarak yapılması gerektiği unutulmamalıdır. Aslında, çelik bir kiriş-kolonun tasarımında da eksenel yükün elemanın eğilme momenti dayanımına etkisini belirleyebilmek için ilk olarak elemanın "basit" eğilme etkisindeki moment dayanımının belirlenmesi gerekir. Diğer bir deyişle, yapısal çelik elemanların eğilme momenti dayanımları ile kesme kuvveti dayanımlarının belirlenmesi, yalnız "basit" eğilme etkisindeki elemanlar için değil, farklı zorlamaların bileşik etkisindeki çelik yapı elemanlarının tasarımı için de önemlidir.

Türkiye’de çelik yapıların tasarım ilkeleri 2016 yılında yenilenmiştir. 1980 yılında Türk Standartları tarafından yayınlanarak yürürlüğe giren “Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları” [1] isimli çelik yapı tasarım standardı (bu tezde “Standart” olarak atıfta bulunulacaktır), yerini 2016 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından hazırlanan ve 01/09/2016 tarihinde resmi gazetede yayınlanarak yürürlüğe giren “Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik” (TÇY, 2016) [2] isimli çelik yapı tasarım yönetmeliğine (bu tezde “Yönetmelik” olarak atıfta bulunulacaktır) bırakmıştır.

TS 648’de tanımlanan tasarım ilkelerinin pek çoğu “Emniyet Gerilmeleri (EG)” yöntemi temel alınarak hazırlanmıştır. Bu yöntem, “çalışma” yükleri etkisinde yapısal çelik elemanlarda oluşan gerilmelerin, belirli emniyet katsayıları kullanılarak hesaplanan emniyet gerilmelerini aşmayacak şekilde tasarlanması ilkesine dayanmaktadır. Rüzgar veya deprem yükü etkisinde veya bu yüklerden birinin bulunduğu yük birleşimlerinde, çalışma yükleri için tanımlanan emniyet gerilmelerinin belirli oranlarda artırılmasına izin verilir. “Specification for Structural Steel Buildings: Allowable Stress Design and Plastic Design (Yapısal Çelik Binalar için Yönetmelik: Emniyet Gerilmelerine Göre Tasarım ve Plastik Tasarım)” [3] yönetmeliğine göre, rüzgâr veya deprem yüklerinin yalnız veya sabit ve/veya ilave tasarım yükleriyle birlikte etkimesi durumunda, emniyet gerilmeleri 1/3 oranında artırılabilir. TS 648’de, rüzgâr ve deprem yüklerini de kapsayan tüm “ilave” yüklerin bulunduğu yük birleşimleri için, aksi belirtilmediği müddetçe, emniyet gerilmelerindeki artış %15 olarak tanımlanmıştır. 2007 yılında yürürlüğe giren “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” [4] kapsamında ise, “düşey yükler ve depremin ortak etkisi altında Emniyet Gerilmeleri Yöntemi’ne göre yapılan kesit hesaplarında, emniyet gerilmeleri en fazla %33 artırılacaktır (Bölüm 4.2.3.5)” hükmü bulunmaktadır.

Amerika Birleşik Devletlerinde (ABD’de) 2016 yılında yürürlüğe giren “Specification for Structural Steel Buildings (Yapısal Çelik Binalar için Yönetmelik)” [5] temel alınarak hazırlanan TÇY (2016)’da tanımlanan tasarım ilkeleri ise “Sınır Durumlara Göre Tasarım” yöntemine dayanmaktadır. Bu tasarım yönteminde ana felsefe, çelik yapı elemanlarının/birleşimlerinin “yapının işletme ömrü boyunca kendinden beklenen tüm fonksiyonları belirli bir güvenlik altında yerine getirebilecek düzeyde dayanım, kararlılık ve rijitliğe sahip olacak şekilde (TÇY, 2016; Bölüm 5.2)” tasarlanmasıdır. Bunun için, tasarımda olası bütün dayanım ve kullanılabilirlik sınır durumları dikkate alınmalıdır. Aynı yönetmelikte, Bölüm 5.2.1’e göre, dayanım sınır durumları, “dayanım ve stabilite yetersizliği nedeniyle bölgesel veya tümsel göçme” oluşumunu tanımlayan

sınır durumlarıdır. Kullanılabilirlik sınır durumları ise “yapıdan beklenen fonksiyonları engelleyen aşırı yerdeğişirmeler ve benzeri özellikler” cinsinden tanımlanan sınır durumlarıdır.

TÇY (2016), çelik yapı elemanlarının/birleşimlerin tasarımında iki farklı yaklaşımdan birinin kullanımına izin vermektedir. “Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT)” yöntemi, yapısal çelik elemanların karakteristik dayanımlarının ilgili güvenlik katsayılarına (değerleri 1’den büyük) bölünmesiyle elde edilen “güvenli dayanım”larının, bu yöntem için tanımlanan yük birleşimleri altında hesaplanan “gerekli dayanım”lara eşit ya da daha büyük olması ilkesine dayanmaktadır (TÇY, 2016; Bölüm 5.2.3). Yönetmelik’te verilen GKT yük birleşimleri (Bölüm 5.3.2) incelendiğinde, bu tasarım yönteminde yüklerin artırılmadığı fark edilebilir. Yük birleşimlerinde yükler ya değiştirilmeden ya da azaltılarak birleştirilmektedir. Bazı yük birleşimlerinde görülen yük azaltmasının temel nedeni, özellikle zamana bağlı yüklerin tasarım değerlerinin aynı anda oluşma olasılığının düşük olmasıdır. Her ne kadar temel tasarım felsefeleri farklı olsa da, GKT yöntemi, pek çok açıdan, Standart’ta kullanılan EG yöntemine benzemektedir; zira her iki yöntemde de yükler artırılmamakta, buna karşın, dayanımlar/gerilmeler ciddi oranlarda azaltılmaktadır.

TÇY (2016)’da tanımlanan ikinci tasarım yöntemi ise “Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT)” olarak isimlendirilmiştir. YDKT yönteminde temel hedef, yapısal çelik elemanların/birleşimlerin karakteristik dayanımlarının ilgili dayanım katsayılarıyla (değerleri 1’den küçük) çarpılmasıyla elde edilen “tasarım dayanım”larının, bu yaklaşım için tanımlanan yük birleşimleri altında hesaplanan “gerekli dayanım”lara eşit veya daha büyük olmasını sağlamaktadır (TÇY, 2016; Bölüm 5.2.2). Yönetmelik’te verilen YDKT yük birleşimleri (Bölüm 5.3.1) incelendiğinde, taşıma gücü felsefesine göre tanımlanması nedeniyle artırılmayan deprem yükünün sabit yüklerle birleştirildiği yük birleşiminin haricindeki bütün yük birleşimlerinde, yük terimlerinden en az birinin katsayısının 1’den büyük olduğu gözlenmektedir. Bu yöntemde yükler arttırıldığı için dayanımlar GKT yöntemine kıyasla daha az azaltılmaktadır.

GKT ve YDKT yöntemlerindeki en belirgin ortak özellik, her iki yöntemde de aynı karakteristik dayanımların kullanılıyor olmasıdır. Yönetmelik’te farklı dayanım sınır durumları için tanımlanan dayanım azaltma katsayıları (YDKT’de dayanım; GKT’de güvenlik katsayıları) incelendiğinde, güvenlik katsayılarının dayanım katsayılarına oranının her sınır durum için 1,5 değerine eşit olduğu gözlenebilir. Diğer bir deyişle,

bir çelik yapı elemanının/birleşiminin tasarım dayanımı, aynı dayanım sınır durumu için hesaplanan güvenli dayanımın 1,5 katıdır. Bu da yapı elemanının tasarım ya da güvenli dayanımlarından birinin bilinmesi durumunda diğerinin çok basit bir şekilde (1,5 ile çarpılarak ya da 1,5'a bölerek) hesaplanabileceği anlamına gelmektedir.

Bu çalışmanın iki temel amacı vardır. İlki, çelik eğilme elemanları için, TÇY (2016)'da GKT yöntemi kapsamında tanımlanan tasarım ilkeleriyle TS 648'de tanımlanan tasarım ilkelerini karşılaştırarak, TS 648'e göre tasarlanmış bir çelik eğilme elemanının TÇY (2016)'ya göre yeterli dayanım ve rijitliğe sahip olup olmadığını belirlemektir. Her ne kadar Standart ile Yönetmelik'in temel tasarım felsefeleri farklı ise de, "çalışma" yükleri altında, çelik yapı elemanlarının emniyetle taşıyabileceği kesit zorlarının (diğer bir deyişle, iç kuvvet ve/veya momentlerin) "güvenli" değerleri her iki tasarım dokümanında verilen kurallar çerçevesinde hesaplanarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp TS648'e göre tasarlanan bir çelik yapı elemanının güçlendirilmesine gerek olup olmadığına karar verilebilir. Çalışmanın ikinci amacı ise, Türkiye'de çelik yapı tasarımı yapan yapı mühendislerinin çelik eğilme elemanlarının tasarımında kullanabilecekleri pratik tasarım tabloları oluşturmaktır. Tasarımcıların yönetmelikte tanımlanan ve oldukça yoğun işlem gerektiren tasarım denklemlerini kullanmaksızın uygun ve ekonomik kesitler seçmesini sağlayacak bu tabloların çelik eğilme elemanlarının tasarımını oldukça kolaylaştıracağı düşünülmektedir.

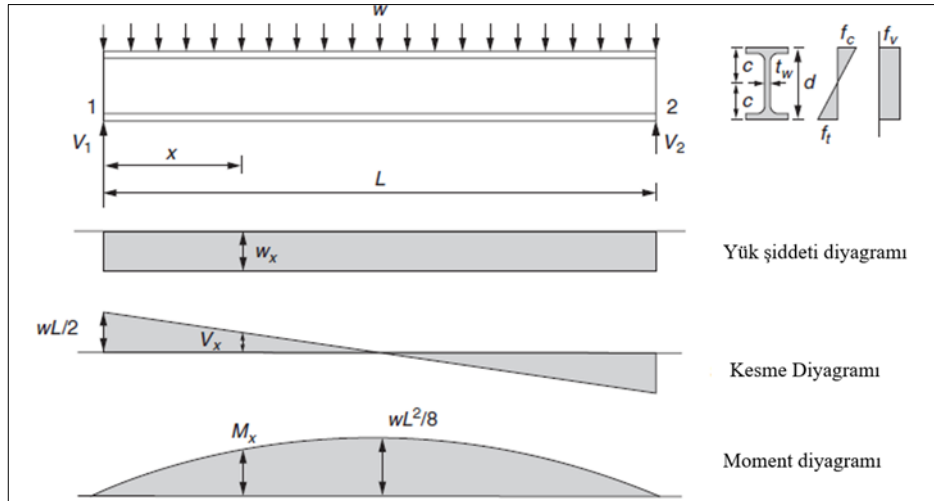
Çalışmanın temel hedeflerinden birinin çelik eğilme elemanlarının her iki asal eksenindeki kesme kuvveti dayanımları ile her iki asal eksen etrafındaki eğilme momenti dayanımlarının belirlenmesi olması nedeniyle, çalışmada Türkiye'de giriş kesiti olarak yaygın şekilde kullanılan tüm çift simetri eksenli I-enkesitli hadde profiller ele alınmıştır. Bu kapsamda, 111 farklı Avrupa-tipi I-enkesitli (18 IPE, 24 HEA, 24 HEB, 24 HEM ve 21 IPN) hadde profilinin (i) kuvvetli eksenleri etrafındaki eğilme momenti dayanımları, (ii) zayıf eksenleri etrafındaki eğilme momenti dayanımları, (iii) gövde düzleminde kesme kuvveti dayanımları ve (iv) başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti dayanımları, üç farklı çelik sınıfı (karakteristik akma gerilmeleri sırasıyla 235, 275 ve 355 MPa olan S235 (veya St37), S275 (veya St44) ve S355 (veya St52)) ve farklı eleman boyları için hesaplanmış ve tablolanmış. Kuvvetli eksen etrafındaki eğilme momenti dayanımları belirlenirken, yalnız basit eğilme (sabit moment) durumu dikkate alınmış, eğilme momentinin elemanın yanal doğrultuda desteklenmemiş uzunluğu boyunca değişimi ile farklı mesnet koşullarının elemanın eğilme momenti dayanımındaki olası olumlu etkileri göz ardı edilmiştir. Diğer bir deyişle, moment düzensizlik katsayısı kullanılmamıştır. Esasen, her iki tasarım

dokümanında da, moment düzensizlik katsayısı  $C_b$  sembolüyle ifade edilmektedir ve  $C_b=1$  durumunda, yani, moment düzensizliğinin dikkate alınmadığı durumda, her iki tasarım dokümanı da eleman için en düşük yanal burulmalı burkulma dayanımını vermektedir. Elemanların kesme kuvveti dayanımları belirlenirken ara rijitlik levhaları kullanılmadığı kabul edilmiş, çekme alanı katkısı (gövdenin burkulma sonrası dayanımı) göz ardı edilmiştir.



## 1. ÇELİK EĞİLME ELEMANLARININ BAŞLICA SINIR DURUMLARI

Bir çelik yapı elemanının davranışını kontrol eden sınır durumu belirlemek için, o eleman için tanımlanan olası bütün sınır durumlar incelenmelidir. Bunun için de ilk olarak o elemanda oluşan zorlamalar belirlenmelidir. Şekil 1.1’de uçlarından moment aktarmayan (mafsallı) birleşimle ana taşıyıcı kirişlere bağlanan çift simetri eksenli I-enkesitli bir döşeme (ikincil) kirişinde düşey düzgün yayılı yük altında oluşan kesit zorlarının eleman boyunca değişimi görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, bu tip bir yüklemde kirişte hem gövde düzleminde kesme hem de kuvvetli eksen etrafında eğilme oluşmaktadır. Kirişte oluşan kesme kuvvetinin en büyük değeri mesnetlerde gözlenirken, en büyük eğilme momenti açıklık ortasındadır. Mesnet koşullarının ve/veya yükleme tipinin değişimi, kritik kesit zorlarının şiddetinin ve bu zorların olduğu kesitlerin değişmesine neden olabilir. Bu nedenle, bir eğilme elemanının tasarımındaki en önemli adımlardan biri, elemana etkiyen kesit zorlarının en büyük değerlerini belirlemektir. Şekil 1.1’de gösterildiği gibi, tipik bir döşeme kirişinde, bu işlem basit statik ilkeleri kullanılarak yapılabilir. Ancak, hiperstatik bir kirişin en büyük kesit zorlarını belirlemek için hazır bilgisayar programlarını kullanmak daha pratik olabilir.



Şekil 1.1. Düzgün yayılı yük etkisindeki bir basit kirişte oluşan kesit zorlarının kiriş boyunca değişimi [6]

Dayanım sınır durumları dikkate alındığında, burulma etkisi olmaksızın yalnız kesme kuvveti ve eğilme momenti etkisindeki bir eğilme elemanının davranışını belirleyen

sınır durumlar dört ana başlık altında toplanabilir: (i) elemanın eğilme momenti dayanımıyla ilişkili sınır durumlar (ii) elemanın kesme kuvveti dayanımıyla ilişkili sınır durumlar, (iii) elemanın birleşimlerinde tanımlanan sınır durumlar ve (iv) elemana tekil yük etkimesi durumunda tekil yükün uygulandığı bölgede tanımlanan sınır durumlar. Elbette, öngörülen çalışma yükleri (servis yükleri) altında, elemanın işlevselliğinin korunması ve elemanla etkileşimde olan yapısal olmayan elemanların hasar görmemesi için, dayanım sınır durumlarının yanı sıra, eleman için tanımlanan sehim, titreşim ve benzeri kullanılabilirlik sınır durumları da kontrol edilmelidir. Bu tezde, yalnız çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanın eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımlarıyla ilgili sınır durumlar ele alınacaktır.

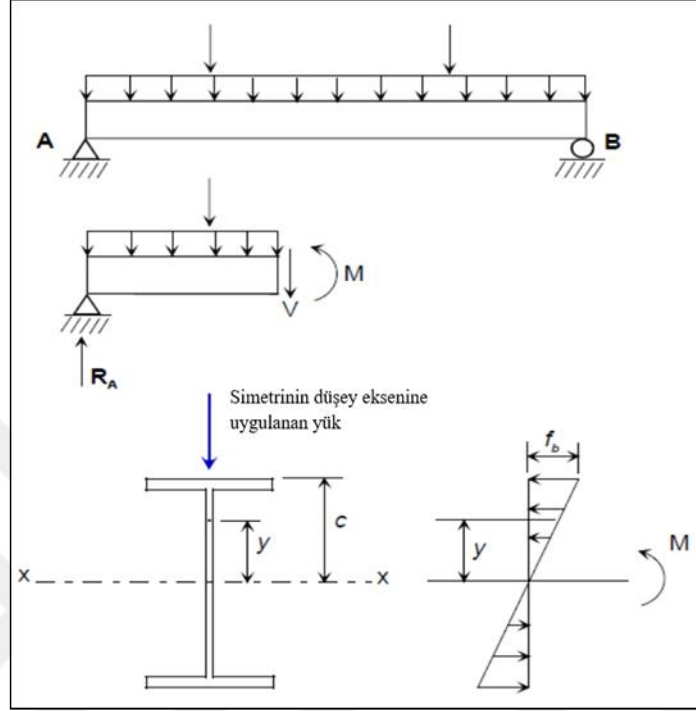
TÇY (2016)'da I-enkesitli elemanların kuvvetli eksenini, yani başlıklarına paralel asal eksenini, x eksenini olarak tanımlanmaktadır. Benzer şekilde, zayıf eksen, yani başlıklara dik eksen, y eksenini olarak isimlendirilmektedir. Bu nedenle, sağ el kuralına göre, enkesite dik eksen z eksenidir. Bu tezde, TÇY (2016)'da tanımlanan bu eksen takımı kullanılacaktır.

### **1.1. Kuvvetli Eksenleri Etrafında Eğilen Çelik Yapı Elemanlarının Eğilme Momenti Dayanımı ile İlişkili Sınır Durumlar**

Kuvvetli eksenini etrafında eğilen çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanının eğilme momenti dayanımına üç farklı sınır durumdan biriyle ulaştığı kabul edilir: (i) enkesitin tamamının akması (plastik mafsall oluşması), (ii) basınç başlığının veya gövdenin basınç etkisi altında kalan bölümünün yerel burkulması (yerel başlık veya gövde burkulması) ve (iii) basınç başlığının ve gövdenin basınç etkisi altında kalan bölümünün kararlılığını kaybetmesi nedeniyle elemanın yanal burulmalı burkulması.

Şekil 1.2'den görülebileceği gibi, açıklığı boyunca pozitif eğilme momenti etkisinde olan (yani, alt lifleri çekme etkisinde olan) bir kirişin herhangi bir enkesitinde oluşan normal gerilme dağılımı, akma gözlenene kadar teorik olarak doğrusaldır. En büyük basınç gerilmesi enkesitin en üst liflerinde, en büyük çekme gerilmesi ise en alt liflerinde oluşur. Sünek bir çelik eğilme elemanının yerel ve yanal burkulma dayanımları yeterince artırılırsa, eleman enkesitinde ilk akmanın gözlemlendiği yükten daha büyük yükler taşıyabilir. Bu durumda, enkesitte kısmen ya da tamamen plastikleşme oluşur. Teorik olarak, kuvvetli eksenini etrafında eğilen ve burkulma tehlikesi olmayan bir eğilme elemanının eğilme momenti dayanımının enkesitindeki tüm liflerin aktığı durumda elde edilen "plastik moment dayanımı"na eşit olduğu kabul

edilir. Elbette, pekleşme nedeniyle gerçekte bu dayanım daha büyüktür. Ancak, tasarımda şekil değiştirmelerin makul sınırlar içinde kalması istendiğinden, plastik moment dayanımı belirlenirken pekleşmenin etkisi ihmal edilir.

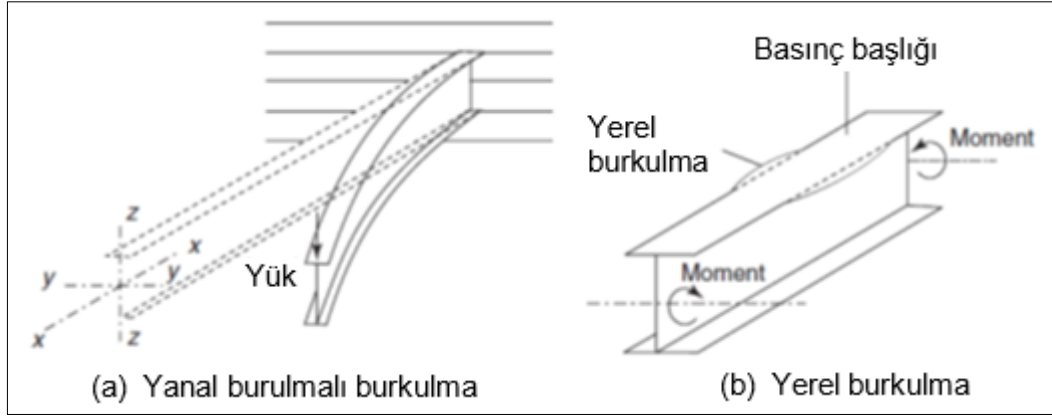


Şekil 1.2. Kuvvetli eksenini etrafında eğilen basit bir kirişte oluşan kesit zorları ve elastik normal gerilme dağılımı [7]

Bir çelik eğilme elemanının plastik moment kapasitesine ulaşabilmesi için, enkesitindeki liflerin tamamı akana kadar elemanda ya da elemanı oluşturan parçalarda burkulma gözlenmemelidir. Yanal doğrultuda desteklenmemiş boyu fazla olan (Şekil 1.3(a)) ve/veya enkesitinde büyük genişlik/kalınlık oranına sahip parçalar içeren (Şekil 1.3(b)) bir eğilme elemanında burkulma, enkesitin en çok zorlanan lifleri dahi akmadan gözlenebilir. Bu tip bir elemanın eğilme momenti dayanımı elastik burkulma momentine eşittir ve yönetmeliklerde verilen burkulma denklemleri kullanılarak hesaplanabilir. Buna karşın, eğer eleman ya da parça burkulması, enkesitin tamamı akmadan önce ancak enkesitte bazı lifler aktıktan sonra gerçekleşirse, elemanın eğilme davranışını inelastik (elastik olmayan) burkulma belirleyecektir. Kesitte akmanın kısmen oluşması nedeniyle bu durumda elastik denklemlerin kullanımı uygun değildir. Ancak, elemanların inelastik burkulma yüklerinin hesabı karışık diferansiyel denklemlerin çözümünü gerektirir ve çoğu zaman elde edilen çözümler pratik tasarım denklemlerine indirgenemez. Bu nedenle,



çelik yapı elemanlarının inelastik burkulma dayanımları genellikle deneysel verilerden elde edilen amprik denklemler kullanılarak hesaplanır.



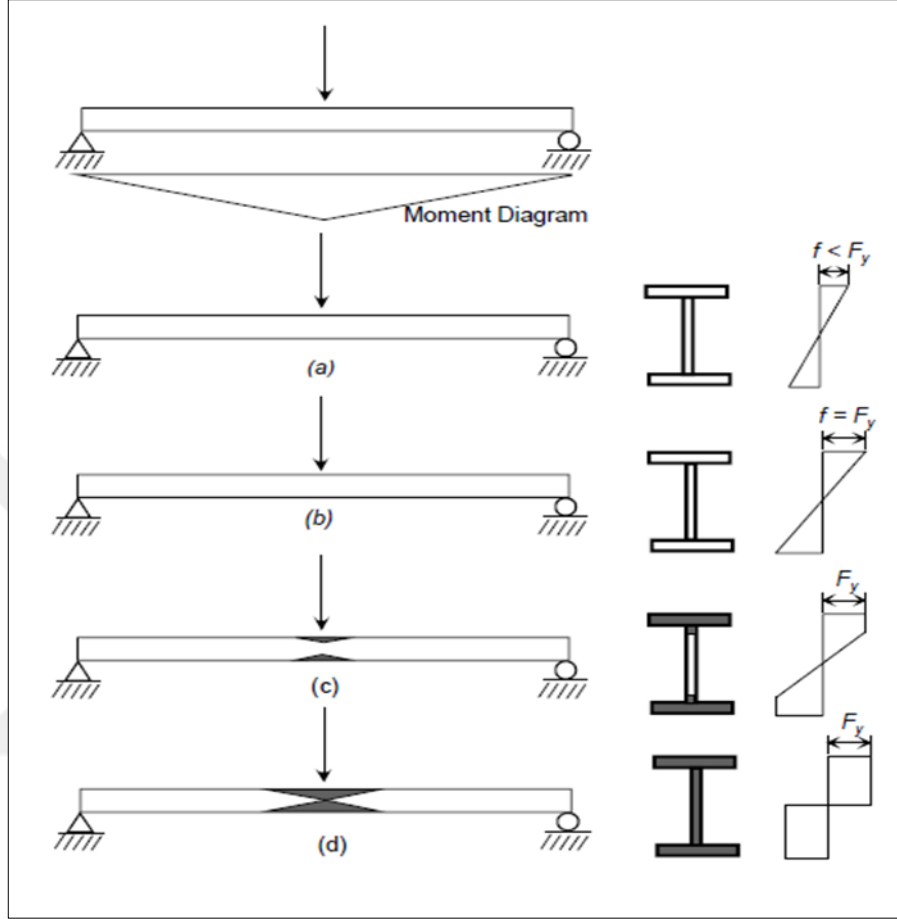
Şekil 1.3. Kuvvetli eksenini etrafında eğilen çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanında gözlenen burkulma modları (a) Yanal burulmalı burkulma (b) Yerel (başlık) burkulma [8]

#### 1.1.1. Akma sınır durumu

Basınç başlığının yanal hareketi engellenmiş, çift simetri eksenli “kompakt” I-enkesitli basit mesnetli bir çelik yapı elemanının açıklık ortasından etkiyen tekil yük altında en çok zorlanan enkesitinde oluşan normal gerilme dağılımının artan yüküyle değişimi Şekil 1.4’te gösterilmiştir. Şekilde artık gerilmelerin etkisi göz ardı edilmiştir. Şekil 1.4(a)’dan da görülebileceği gibi, elastik davranış süresince, gerilme dağılımı birim şekil değiştirme dağılımı gibi doğrusaldır. Kirişe uygulanan yük arttıkça, tüm kesitte gerilme artar. Elastik davranış, en dış liflerin akmasına kadar devam eder. Kesitte tarafsız eksene en uzak liflerin akmasına neden olan moment olarak tanımlanan “akma momenti”, elemanın hala elastik ve doğrusal davranış gösteriyor olması nedeniyle, elastik eğilme denkleminde  $(\sigma_{max} = f = M_x/W_{ex}$ ; burada  $\sigma_{max}$  (ya da  $f$ ) kesitteki en büyük normal gerilme,  $M_x$  kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti ve  $W_{ex}$  enkesitin kuvvetli eksen etrafındaki elastik mukavemet momentidir) hesaplanabilir. Akma momenti etkisinde,  $\sigma_{max} = F_y$  ( $F_y$ , karakteristik akma gerilmesi) olacağına göre (Şekil 1.4(b)), kuvvetli eksen etrafında eğilmede akma momenti ( $M_{yx}$ ) karakteristik akma gerilmesiyle ( $F_y$ ) elastik mukavemet momenti ( $W_{ex}$ ) çarpılarak hesaplanabilir;

$$M_{yx} = F_y W_{ex} \quad (1.1)$$

Ancak, deneysel çalışmalar, gerçekte kesitte ilk akmanın  $M_{yx}$ 'ten daha kk momentlerde olduğunu göstermiştir. Bunun başlıca nedeni, elemanın üretimi sırasında kesitte oluşan "artık gerilmeler"dir.

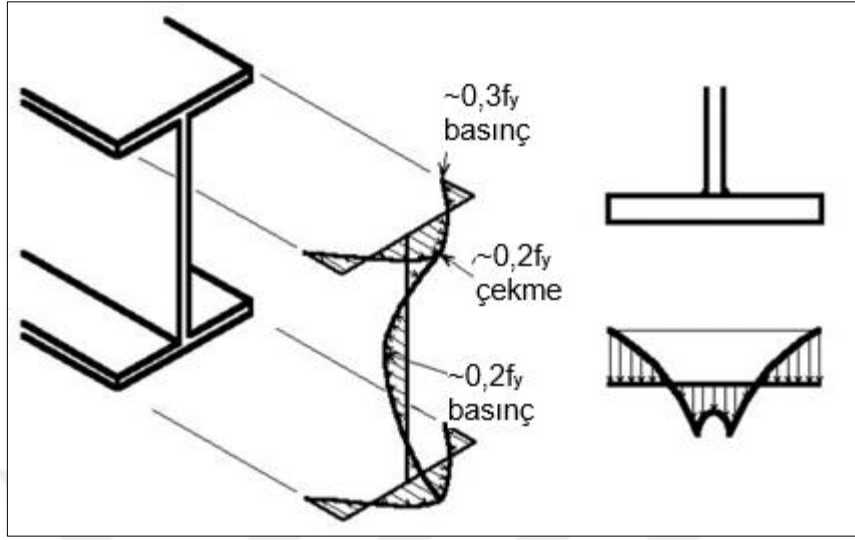


şekil 1.4. Açıklık ortasından uygulanan tekil yükün etkisindeki basit bir kirişin en çok zorlanan kesitinde oluşan gerilme dağılımının artan yükle değişimi [6]

Haddeleme esnasında elemanı oluşturan tüm parçaların aynı hızla soğumaması nedeniyle, I-enkesitli bir elik yapı elemanının başlıklarının uçlarında ve gövdesinin ortasında artık basınc gerilmeleri, başlıklarla gövdenin birleştiği bölgelerde ise artık çekme gerilmeleri oluştuğu bilinmektedir (şekil 1.5). Her ne kadar elik yapı elemanlarında oluşan artık gerilmeler elemanın enkesit şekli, boyu, üretim yöntemi, elik sınıfı gibi pek çok parametreye bağlıysa da, çoğu yönetmelik, güvenli tarafta kalarak, elik yapı elemanlarındaki artık gerilmeleri sabit bir değer olarak tasarım denklemlerine dâhil etmektedir. TY (2016), kuvvetli eksenine etrafında eğilen bir elik yapı elemanı için "ilk akma momenti"ni ( $M_{rx}$ ) akma momentinin %70'i olarak tanımlamaktadır;

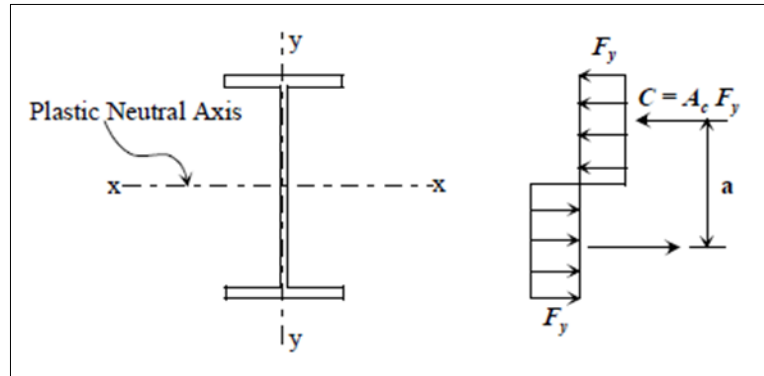
$$M_{rx} = 0,7F_y W_{ex}$$

(1.2)



Şekil 1.5. Sıcak şekil verilmiş I kesitli bir çelik yapı elemanında haddeleme nedeniyle oluşan artık gerilmeler [9]

Şekil 1.6'da çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanının plastik eğilme momenti dayanımına karşılık gelen normal gerilme dağılımı gösterilmektedir. Eğilmenin gerçekleştiği kuvvetli eksen etrafında enkesit simetrik olduğu için "plastik tarafsız eksen" (enkesiti iki eşit parçaya ayıran eksen) elastik tarafsız eksen gibi enkesitin geometrik merkezinden geçer. Elemanın plastik eğilme momenti dayanımı ( $M_{px}$ ), plastik tarafsız eksenin üstünde ve altında kalan gerilme bloklarının hacminden hesaplanacak,  $C = F_y A_c$  şiddetli (burada,  $A_c$  yarım enkesit alanıdır) statikçe eşdeğer kuvvetlerin oluşturduğu kuvvet çiftinin şiddeti ( $M_{px} = Ca = F_y A_c a = F_y W_{px}$ ; burada  $W_{px}$  enkesitin kuvvetli eksen etrafındaki "plastik mukavemet momenti" olarak adlandırılır) hesaplanarak belirlenebilir.



Şekil 1.6. Çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanında plastik moment etkisinde oluşan normal gerilme dağılımı [7]

Diğer bir deyişle, kuvvetli eksen etrafında plastik eğilme momenti ( $M_{px}$ ), karakteristik akma gerilmesiyle ( $F_y$ ) kuvvetli eksen etrafında plastik mukavemet momenti ( $W_{px}$ ) çarpılarak hesaplanabilir;

$$M_{px} = F_y W_{px} \quad (1.3)$$

Literatürde, plastik eğilme momentinin akma momentine oranı “şekil faktörü” olarak adlandırılır ve genellikle  $f$  sembolüyle gösterilir. Kuvvetli eksen etrafında eğilen bir çelik yapı elemanının şekil faktörü ( $f_x$ ), elemanın kuvvetli eksen etrafında plastik eğilme momenti ( $M_{px}$ ) aynı eksen etrafında akma momentine ( $M_{yx}$ ) bölünerek hesaplanabilir. Her iki eğilme momenti dayanımı hesabında da yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesinin ( $F_y$ ) kullanıldığı hatırlanırsa, aslında hadde profillerinde şekil faktörünün enkesitin mukavemet momentlerinin oranına eşit olduğu görülebilir;

$$f_x = \frac{M_{px}}{M_{yx}} = \frac{F_y W_{px}}{F_y W_{ex}} = \frac{W_{px}}{W_{ex}} \quad (1.4)$$

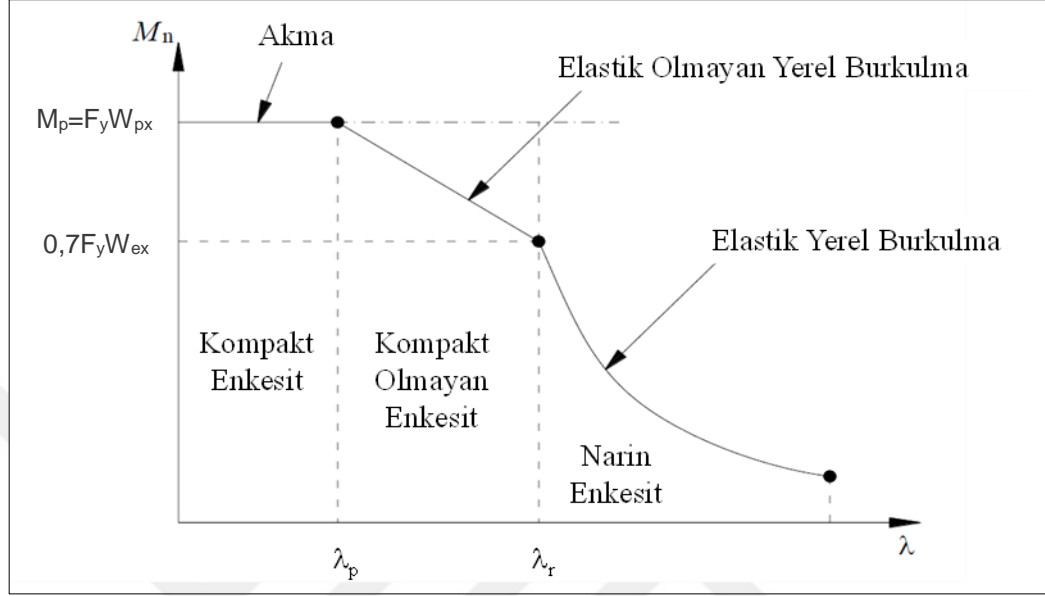
### 1.1.2. Yerel burkulma sınır durumu

Bir çelik eğilme elemanının basınç etkisindeki enkesit parçalarından en az birinin genişlik/kalınlık oranı ( $b/t$  oranı veya narinliği,  $\lambda$ ) yönetmeliklerde tanımlanan sınır narinliklerin (TÇY (2016)'da  $\lambda_r$  ve  $\lambda_p$  olarak adlandırılmaktadır) en az birinden büyükse, elemanın eğilme momenti dayanımı plastik eğilme momenti dayanımından daha küçük olacaktır. Şekil 1.7'de, TÇY (2016)'ya göre kuvvetli eksen etrafında eğilen kompakt gövdeli çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanının karakteristik eğilme momenti dayanımının ( $M_n$ ) basınç başlığının narinliğiyle ( $\lambda=\lambda_f$ ) değişimi gösterilmektedir.

Şekil 1.7'den de görülebileceği gibi, narin başlıklı I-enkesitli (yani, başlıklarının genişlik/kalınlık oranı  $\lambda_r$  sınır narinliğinden büyük I-enkesitli) bir çelik eğilme elemanında yerel burkulma elastik bölgede gerçekleşmektedir. Bu nedenle, bu tip elemanların eğilme momenti dayanımı, “elastik plak burkulma gerilmesi”nin ( $F_{cr}$ ) elastik mukavemet momentiyle ( $W_{ex}$ ) çarpılmasıyla hesaplanan “elastik burkulma momenti”ne ( $M_{cr}$ ) eşittir;

$$M_{cr} = F_{cr} W_{ex} ; F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \quad (1.5)$$

Denklem (1.5)'te  $k$  plak burkulma katsayısı olup parçaya etkiyen gerilme türüne ve sınır koşullarına bağlı olarak değişir,  $E$  ve  $\mu$ , sırasıyla, yapısal çeliğin elastisite modülü ve Poisson oranıdır,  $b/t$  ise narin enkesit parçasının genişlik/kalınlık oranıdır.



Şekil 1.7. TÇY (2016)'ya göre, kuvvetli eksen etrafında eğilen kompakt gövdeli çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanının karakteristik eğilme momenti dayanımının basınç başlığının genişlik/kalınlık oranıyla değişimi [17]

Elastik yerel burkulma sınır durumunda, plak burkulma gerilmesi akma gerilmesinden çok daha küçük olduğu için, elemanın eğilme momenti dayanımı oldukça küçüktür. TÇY (2016)'ya göre, elastik yerel başlık burkulmasının davranışı belirlediği durumlarda, çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanının karakteristik eğilme momenti dayanımı, ilk akma momentinden ( $M_{rx}=0,7F_yW_{ex}$ 'ten) küçüktür. Buna karşın, kompakt olmayan başlıklı I-enkesitli (yani, başlıklarının genişlik/kalınlık oranı  $\lambda_r$ 'den küçük ama  $\lambda_p$ 'den büyük sınır narinliğinden büyük I-enkesitli) eğilme elemanlarında yerel burkulma kesitin bir kısmında akma gözlemlendikten sonra oluşur (Şekil 1.7). Ancak, eleman sınır durumuna enkesitinin tamamı akmadan ulaştığı için, elemanın eğilme momenti dayanımı plastik eğilme momenti dayanımından küçüktür. Burkulma doğrusal olmayan bölgede gerçekleştiği için, kompakt gövdeli ancak kompakt olmayan başlıklı I-enkesitli eğilme elemanlarının moment dayanımı Denklem (1.5) kullanılarak hesaplanamaz. Mevcut yönetmelikler, kompakt olmayan enkesitli eğilme elemanlarının dayanım hesabı için deneysel verilerle uyumlu geçiş eğrileri tanımlamaktadır. Şekil 1.7'de gösterildiği gibi, TÇY (2016), elastik olmayan bölgede karakteristik eğilme momenti dayanımı hesabında,  $(\lambda_{px}, M_{px})$  ve  $(\lambda_{rx}, M_{rx})$  noktaları arasında tanımlanmış bir doğru denklemi kullanmaktadır.

Yürürlükteki çelik yapı tasarım yönetmelikleri incelendiğinde, kompakt olmayan veya narin gövdeli eğilme elemanlarının eğilme momenti dayanımlarının hesabı için ayrı tasarım denklemleri tanımlandığı ve bu denklemlerin kompakt gövdeli enkesitler için tanımlanan denklemlerden daha karışık olduğu gözlemlenir. Daha çok gövdeleri derin ve ince yapma profiller için tanımlanan bu denklemlerin I-enkesitli hazır profillerde kullanılmasına gerek olmadığı bilinmektedir. İlerleyen bölümlerde gösterileceği gibi, bu tez kapsamında incelenen hazır profillerin tamamının gövdeleri kompakttır. Bu nedenle, bu tezde gövdeleri kompakt olmayan eğilme elemanlarının tasarımına değinilmeyecektir.

### 1.1.3. Yanal burulmalı burkulma sınır durumu

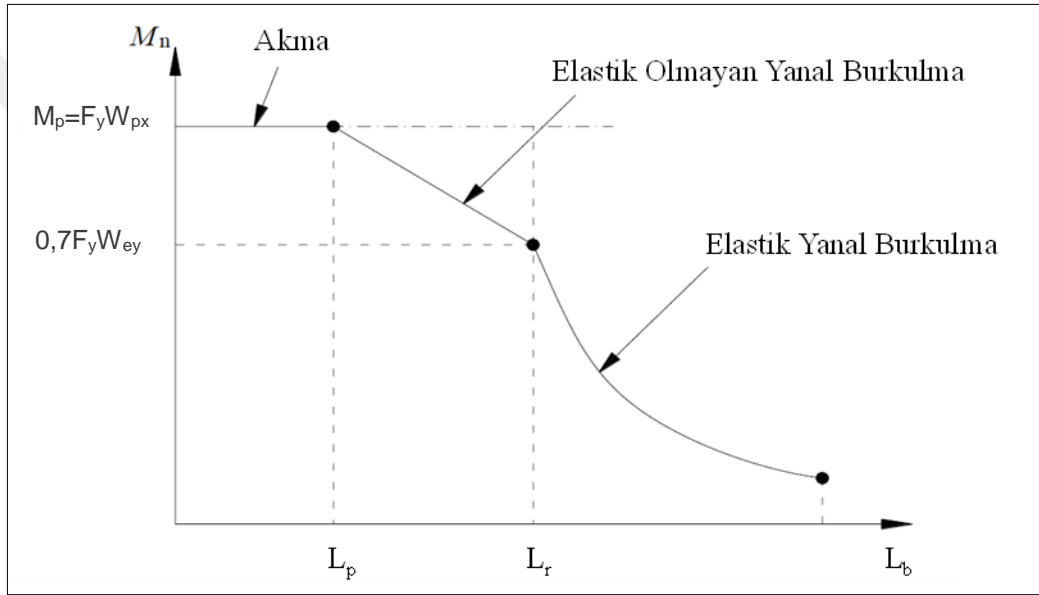
Yanal yönde desteklenmemiş boyu büyük olan bir eğilme elemanının davranışını belirleyen sınır durumlardan biri de “yanal burulmalı burkulma” veya kısaca “yanal burkulma”dır. Pozitif moment etkisindeki bir çelik eğilme elemanında tarafsız eksenin altında kalan lifler çekme gerilmelerinin etkisindeyken, üstünde kalan lifler basınç gerilmelerinin etkisindeki. Bu tip bir elemanın yanal doğrultuda desteklenmemiş boyu yeterince büyükse elemanın basınç etkisindeki bölümü (basınç başlığı ve gövdenin basınca çalışan kısmı) eğilme düzlemine dik doğrultuda burkulacaktır. Elemanın çekme etkisindeki bölümünün stabilite sorununun olmaması nedeniyle bulunduğu düzlemde kalma eğilimi, elemanın burkulmasına kesit burulmasının da eşlik etmesine neden olur. Diğer bir deyişle, bir eğilme elemanı ancak burulurak burkulabilir. Bu nedenle, bir eğilme elemanının burkulma dayanımını artırmanın en etkili yöntemlerden biri de elemanın burulmasını engellemektir.

Yerel burkulma sınır durumunda olduğu gibi, bir eğilme elemanı yanal burkulma sınır durumuna elastik ya da elastik olmayan bölgede ulaşabilir. Şekil 1.8’de, TÇY (2016)’ya göre, kuvvetli eksen etrafında eğilen kompakt enkesitli bir çelik eğilme elemanının karakteristik eğilme momenti dayanımının ( $M_n$ ) elemanının yanal doğrultuda desteklenmemiş boyuyla ( $L_b$ ) değişimi gösterilmektedir. Şekil 1.8’den de görülebileceği gibi, elemanın yanal doğrultuda desteklenmemiş boyunun elastik sınır boydan ( $L_r$ ) küçük ancak plastik sınır boydan ( $L_p$ ) büyük olduğu durumlarda elemanın yanal burulmalı burkulma dayanımı  $M_{px}$ ’ten küçük ancak  $M_{rx}$ ’ten büyük olmaktadır. Bu durumda, elemanın eğilme momenti dayanımı geçiş denklemi kullanılarak hesaplanır. TÇY (2016), tıpkı yerel başlık burkulmasında olduğu gibi, bu bölgede ( $L_p$ ,  $M_{px}$ ) ve ( $L_r$ ,  $M_{rx}$ ) noktaları arasında tanımlanmış bir doğru denklemi kullanmaktadır (Şekil 1.8).

Buna karşın,  $L_b$ 'nin  $L_r$ 'den büyük olması durumunda, dayanım elastik yanal burulmalı burkulma momentine eşit olacaktır.

Sabit moment etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanın “elastik yanal burulmalı burkulma momenti” ( $M_{cr}$ ), elemanın zayıf eksen etrafında eğilme rijitliği ( $EI_y$ ), burulma rijitliği ( $GJ$ ) ve çarpılma rijitliğine ( $EC_w$ ) bağlıdır ve aşağıdaki denklemle hesaplanabilir [10];

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI_y}{L_b^2} \left( GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{L_b^2} \right)} \quad (1.6)$$



Şekil 1.8. TÇY (2016)'ya göre, kuvvetli eksen etrafında eğilen kompakt enkesitli I-şekilli profillerin karakteristik eğilme momenti dayanımının yanal doğrultuda desteklenmemiş boyla değişimi [17]

Denklem (1.6)'da,  $G$  yapısal çeliğin kayma modülü,  $I_y$  enkesitin zayıf eksen etrafında atalet momenti,  $C_w$  ise enkesitin çarpılma katsayısıdır. Mevcut çelik yapı tasarım yönetmeliklerinde, kuvvetli eksenleri etrafında eğilen elemanların elastik yanal burulmalı burkulma momenti dayanımı hesabı için ya Denklem (1.6)'e atıfta bulunulmakta ya da, TÇY (2016)'da olduğu gibi, bu denklemden türetilmiş ve bu denklemle aynı sonucu veren ancak farklı terimlerle ifade edilmiş bir burkulma denklemi kullanılmaktadır.

Daha önce de belirtildiği gibi, Denklem (1.6)'da verilen elastik burkulma denklemi sabit moment etkisindeki eğilme elemanları için geçerlidir. Aslında, elemana etkiyen momentin eleman boyunca değişimi, genel olarak, elemanın yanal burulmalı

burkulma dayanımını artırır. Bu nedenle, bu değişimin göz ardı edilmesi çoğu zaman güvenli tasarımlara neden olur. Ancak, çoğu durumda, yönetmelikler ekonomik tasarım için, değişken moment dağılımının elemanın eğilme momenti dayanımına olumlu etkisinin tasarıma dâhil edilmesine izin verir. Çoğu tasarım yönetmeliği, farklı moment diyagramları için farklı denklemler sunmak yerine eğilme momentinin eleman boyunca değişimini, sabit moment kabulüyle çıkarılan temel burkulma denklemini (örneğin, Denklem (1.6)'i) bir katsayıyla çarpmak suretiyle büyüterek tasarıma dâhil etmektedir. TÇY (2016)'da "moment düzeltme katsayısı" olarak adlandırılan ve  $C_b$  sembolüyle ifade edilen bu katsayı çelik yapı tasarımında pek çok yönetmelikte uzun yıllardır kullanılmaktadır. TS 648'de bu katsayının hesaplandığı denklemdeki en önemli parametreler elemanın uçlarındaki momentlerin oranı ile elemanda oluşan eğrilik sayısı (tek veya çift) iken TÇY (2016)'da  $C_b$  için sunulan denklemde elemanın yanal doğrultuda desteklenmemiş uzunluğu boyunca eşit aralıklarla tanımlanmış üç noktadan okunan eğilme momentlerinin mutlak değerleri ile elemana etkiyen en büyük momentin mutlak değeri kullanılmaktadır.

## **1.2. Zayıf Eksenleri Etrafında Eğilen Çelik Yapı Elemanlarının Eğilme Momenti Dayanımı ile İlişkili Sınır Durumlar**

Eğik eğilme etkisinde veya bazı özel yükleme/mesnetlenme durumlarında, çelik bir yapı elemanı zayıf eksen etrafında eğilebilir [6]. Eğilme momenti dayanımıyla ilişkili sınır durumlar açısından, çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik yapı elemanının zayıf eksen etrafında eğilmesinin güçlü eksen etrafında eğilmesinden en önemli farkı yerel gövde burkulması ile yanal burulmalı burkulma sınır durumlarının zayıf eksen etrafında eğilmede davranışı belirleyen dayanım sınır durumlarından olmamasıdır. Zayıf eksen etrafında eğilen çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanında eğilme momentinin hemen hemen tamamını başlıklar taşır. Tarafsız eksene çok yakın olması nedeniyle gövdedeki normal gerilmelerin değeri oldukça küçüktür. Bu nedenle, bu tip elemanlar sınır durumlarına eğilme momenti nedeniyle oluşan yerel gövde burkulmasıyla ulaşmazlar. Diğer yandan, zayıf eksen etrafında eğilmede oluşacak olası yanal burkulma güçlü eksen etrafında eğilmeyi gerektirir. Yapılan çalışmalar zayıf eksen etrafında eğilen elemanların yanal burkulma sınır durumuna ulaşmadan sehimle ilgili kullanılabilirlik sınır durumuna ulaştığını göstermiştir. Bu nedenle, yanal burulmalı burkulma da zayıf eksenleri etrafında eğilen I-enkesitli çelik yapı elemanlarının davranışını belirleyen bir sınır durum değildir [11]. Bu durumda, çift-simetri eksenli I-enkesitli eğilme elemanlarının zayıf eksen etrafında eğilme momenti dayanımları hesaplanırken, sadece iki sınır durumun dikkate alınması yeterlidir: (a)



enkesitin tamamının akması (plastik mafsal oluşması) ve (b) başlıkların basınç etkisi altında kalan parçalarının yerel burkulması.

### 1.2.1. Akma sınır durumu

Zayıf eksen etrafında eğilen çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanın plastik eğilme momenti ( $M_{py}$ ), karakteristik akma gerilmesiyle ( $F_y$ ) enkesitin zayıf eksen etrafındaki plastik mukavemet momenti ( $W_{py}$ ) çarpılarak hesaplanabilir;

$$M_{py} = F_y W_{py} \quad (1.7)$$

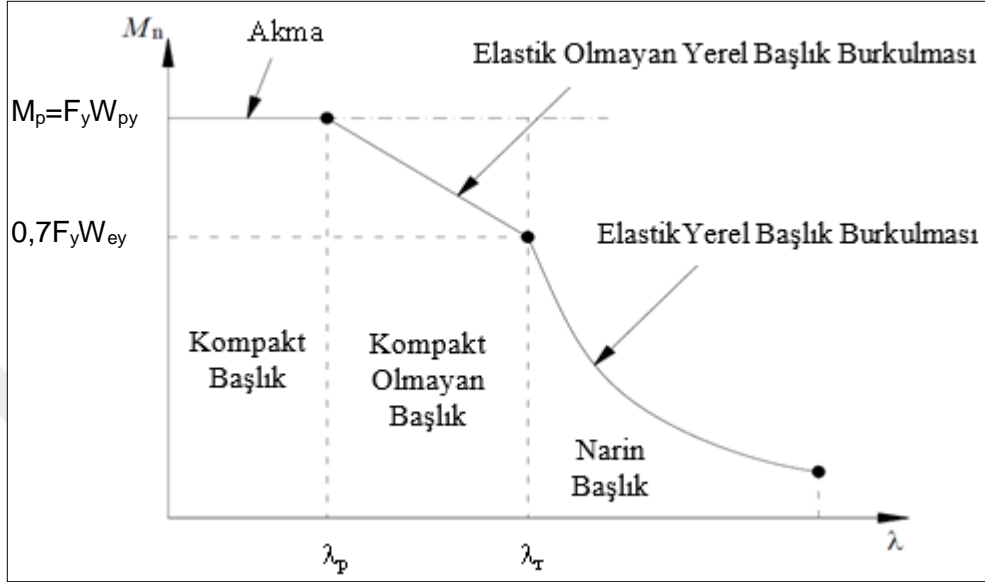
Bu tip çelik yapı elemanlarının zayıf eksen etrafında eğilmesinin güçlü eksen etrafında eğilmeden bir diğer önemli farkı da zayıf eksen etrafında eğilmede plastik momentin akma momentine oranının (yani “şekil faktörü”nün) çok daha yüksek olmasıdır. Güçlü eksenleri etrafında eğilen Avrupa I profillerde bu oran 1,1-1,3 arasında değişirken, zayıf eksenleri etrafında eğilen kesitlerde 1,5’tan daha büyük değerlerle karşılaşılabilir. Şekil faktörü yüksek enkesitli eğilme elemanlarının plastik eğilme momentine ulaşabilmesi için büyük doğrusal olmayan şekil değiştirmeler yapması gerektiğinden çoğu yönetmelik zayıf eksen de eğilme momenti dayanımının akma momentine oranını sınırlar. TÇY (2016)’da bu oran 1,6’dır.

### 1.2.2. Yerel başlık burkulması sınır durumu

Güçlü eksen de eğilmede olduğu gibi, zayıf eksen de eğilmede de elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı başlıkların genişlik/kalınlık oranı arttıkça azalır. Şekil 1.9’da, TÇY (2016)’ya göre zayıf ekseni etrafında eğilen I-enkesitli bir çelik yapı elemanının karakteristik eğilme momenti dayanımının ( $M_n$ ) başlıklarının narinliğiyle ( $\lambda$ ) değişimi gösterilmektedir.

Şekil 1.7 ile Şekil 1.9 karşılaştırıldığında, zayıf eksen etrafında eğilmenin güçlü eksen etrafındaki eğilmeden en önemli farkının sınır dayanımların ( $M_p$  ve  $M_r$ ) hesabında zayıf eksen etrafındaki mukavemet momentlerin ( $W_{py}$  ve  $W_{ey}$ ) kullanılması olduğu gözlenebilir. Farklı gerilme dağılımlarına sahip olmalarına karşı, TÇY (2016)’da, zayıf eksen etrafında eğilen elemanlar için tanımlanan sınır narinlikler ( $\lambda_p$  ve  $\lambda_r$ ), kuvvetli eksen etrafında eğilen elemanlar için tanımlanan sınır narinliklerle aynıdır. Şekil 1.9’dan fark edilebileceği gibi, güçlü eksen de eğilmede olduğu gibi, zayıf eksen de eğilmede de elastik olmayan yerel başlık burkulması durumunda, doğrusal enterpolasyon yapılmaktadır. Benzer şekilde, elastik yerel başlık burkulması

durumunda ise elastik plak burkulma gerilmesi kullanılmaktadır. Ancak, TÇY (2016)'da burkulma denklemlerinde kullanılan plak burkulma katsayıları (k) başlıklardaki gerilme dağılımındaki ve sınır koşullarındaki farklılıkları dikkate alacak şekilde güçlü ve zayıf ekseninde eğilme durumlarında farklı tanımlanmıştır.



Şekil 1.9. TÇY (2016)'ya göre, zayıf eksen etrafında eğilen çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanının karakteristik eğilme momenti dayanımının basınç başlığının genişlik/kalınlık oranıyla değişimi [17]

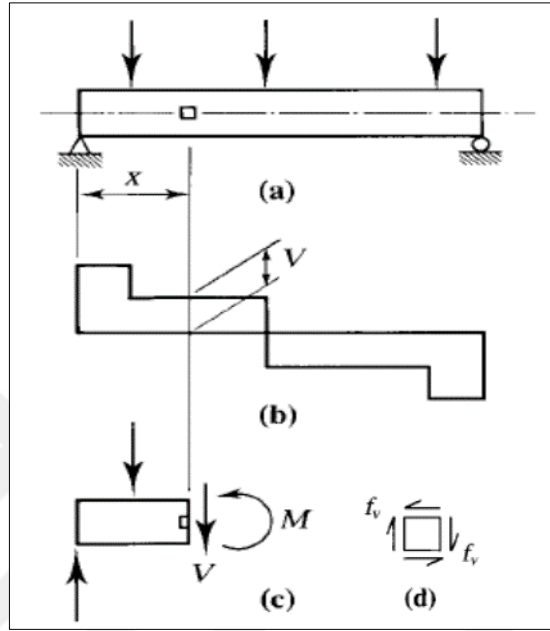
### 1.3. Gövde Düzleminde Kesme Kuvveti Etkisindeki Çelik Yapı Elemanlarının Kesme Kuvveti Dayanımı ile İlişkili Sınır Durumlar

Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de gösterildiği gibi, kuvvetli eksenleri etrafında eğilen çelik elemanlarda oluşan bir diğer kesit zoru da gövde düzleminde (başlıklara dik düzlemde) etkiyen kesme kuvvetidir. Şekil 1.10(a)'da gösterilen basit mesnetli kirişte sol mesnetten x kadar uzaklıkta bir kesit alınıp, Şekil 1.10(c)'deki gibi tarafsız düzlem üzerinde bulunan sonsuz küçük bir eleman incelendiğinde, elemanda yalnız kayma gerilmelerinin ( $f_v$ ) olduğu görülebilir (Şekil 1.10(d)). Elastik bölgede, çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanında oluşan kayma gerilmeleri ( $f_v$ ) aşağıda verilen denklemden hesaplanabilir;

$$f_v = \frac{V_x Q_y}{I_x t} \quad (1.8)$$

Denklem (1.8)'de  $V_x$  elemanın incelenen enkesitinde gövde düzleminde etkiyen kesme kuvvetinin şiddeti,  $Q_y$ , kayma gerilmesi hesabı yapılan noktanın üstünde ya da

altında kalan enkesit alanının kuvvetli eksen etrafındaki eğilme için tanımlanmış elastik tarafsız eksene göre birinci alan momenti,  $I_x$  enkesitin kuvvetli eksene göre atalet momenti,  $t$  enkesitin kayma gerilmesi hesabı yapılan noktasındaki kalınlığıdır. Denklem (1.8)'de tanımlanan kayma gerilmesinin kesit üzerindeki dağılımı Şekil 1.11'de gösterilmektedir.

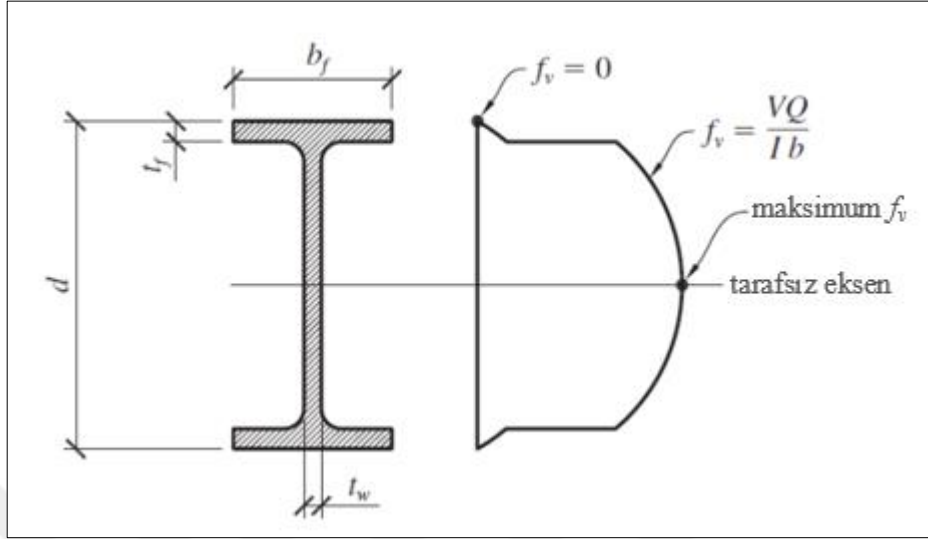


Şekil 1.10. Gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki bir çelik eğilme elemanında oluşan kayma gerilmeleri [12]

Şekil 1.11'den de gözlenebileceği gibi, başlıklarda "b" kalınlığı çok yüksek olduğu için oluşan düşey kayma gerilmelerinin şiddeti oldukça düşüktür. Buna karşın, en büyük düşey kayma gerilmeleri gövdede oluşmaktadır. Şekil 1.11'de verilen gerilme dağılımı çift simetri eksenli I-enkesitli eğilme elemanlarında kesme kuvvetinin çok büyük bir bölümünün elemanın gövdesi tarafından taşındığını açıkça göstermektedir. Bu nedenle, çoğu tasarım yönetmeliğinde, kuvvetli eksenleri etrafında eğilen I-enkesitli çelik yapı elemanlarında oluşan kayma gerilmesinin, Şekil 1.12'de gösterildiği gibi, enkesit üzerindeki tüm noktalarda sabit olduğu ve şiddetinin gövdedeki ortalama kayma gerilmesine eşit olduğu kabul edilir.

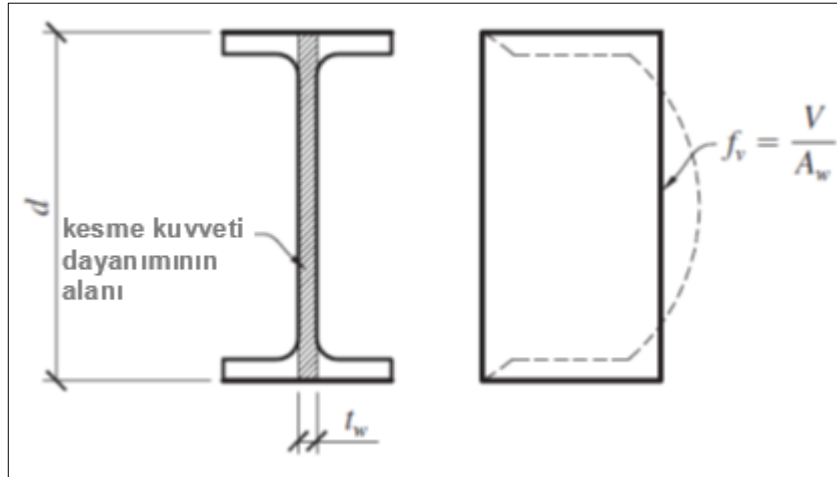
Yani, kuvvetli ekseni etrafında eğilen I-enkesitli bir eğilme elemanındaki ortalama kayma gerilmesi ( $f_{v,ave}$ ), gövde düzleminde etkiyen kesme kuvveti ( $V_x$ ) gövde alanına ( $A_w$ ) bölünerek hesaplanabilir;

$$f_{v,ave} = \frac{V_x}{A_w} \quad (1.9)$$



Şekil 1.11. Gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanının enkesitinde oluşan kayma gerilmesi dağılımı [12]

Her ne kadar gövde alanı olarak bazı yönetmelikler başlıkların arasında kalan gövde parçasının alanını alıyor olsa da TÇY (2016)'da gövde alanı ( $A_w$ ), Şekil 1.12'de gösterildiği gibi, enkesit yüksekliği ( $d$ ) ile gövde kalınlığının ( $t_w$ ) çarpımından elde edilen alan olarak tanımlanmaktadır.

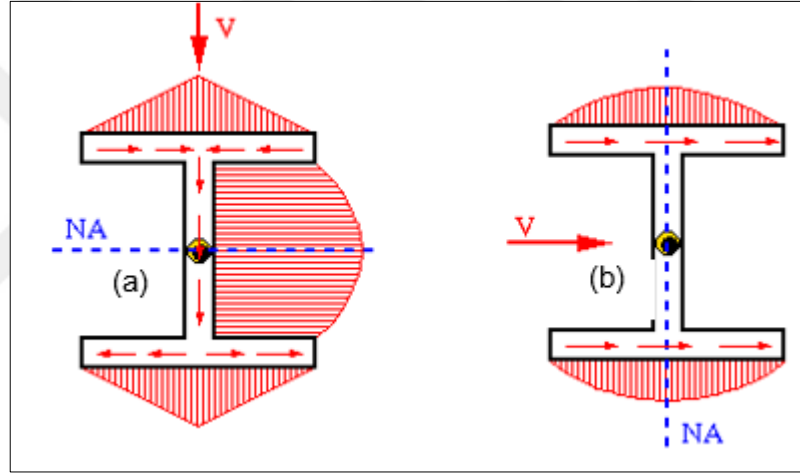


Şekil 1.12. Gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanının enkesitinde oluşan ortalama kayma gerilmesi dağılımı [12]

I-kesitli elemanlarda olduğu gibi açık kesitli elemanlarda gövde düzleminde etkiyen kesme kuvvetinin enkesitin başlıklarında başlıklara paralel kayma gerilmelerine de

neden olduğu unutulmamalıdır. Şekil 1.13(a)'da gösterildiği gibi, başlıklarda oluşan kayma gerilmelerinin şiddetinin başlıkların uçlarından başlıkların gövdeyle birleştikleri noktaya doğru doğrusal arttığı kabul edilir. Bu nedendir ki güçlü ekseninde eğilmede aslında başlık-gövde birleşim bölgesinde de oldukça yüksek kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Bu durum, TÇY (2016)'da gövde alanı belirlenirken gövdenin başlıklarda kalan bölümünün de hesaba dâhil edilmesini kısmen açıklar.

Gövde düzleminde etkiyen kesme kuvvetinin hemen hemen tamamının elemanın gövdesi tarafından taşındığı göz önünde bulundurulduğunda, kuvvetli ekseninde eğilen bir çelik yapı elemanın kesme kuvveti dayanımını belirleyen iki sınır durumu olduğu fark edilebilir: (i) gövdenin kesme etkisinde akması ve (ii) gövdenin kesme etkisinde burkulması.



Şekil 1.13. Çift simetri eksenli I-enkesitlerde (a) gövde düzleminde etkiyen (b) başlıklara paralel düzlemde etkiyen kesme kuvveti nedeniyle enkesitte oluşan kayma gerilmesi dağılımları [13]

### 1.3.1. Gövdenin kesme etkisinde akması sınır durumu

Gövde düzleminde artan kesme kuvveti etkisindeki “gövdesi kararlı” çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanın, teorik olarak, gövdesindeki bütün lifler kesme nedeniyle aktığı an elemanın kesme kuvveti dayanımına ulaştığı kabul edilir. Elemanın plastik kesme kuvveti dayanımı ( $V_{py}$ ), yapısal çeliğin basit kesme etkisindeki akma dayanımıyla ( $\tau_y$ ) gövde alanı ( $A_w$ ) çarpılarak hesaplanabilir;

$$V_{py} = \tau_y A_w \quad (1.10)$$

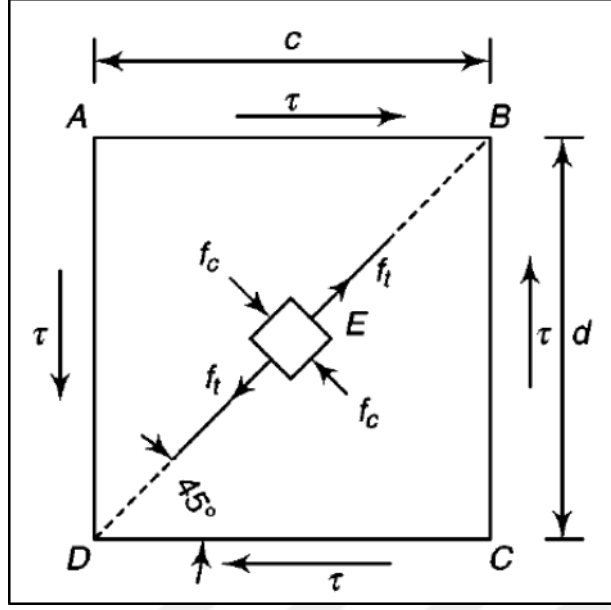
Von Mises akma kriterine göre, yapısal çeliğin basit kesme etkisindeki karakteristik akma dayanımının ( $\tau_y$ ) basit çekme etkisindeki karakteristik akma dayanımına ( $F_y$ ) oranı  $1/\sqrt{3}$ 'e, yani, yaklaşık olarak 0,577'e eşittir. Çoğu çelik yönetmeliği bu oranı, pekleşmenin de etkisini kısmen dâhil ederek, 0,6 olarak almaktadır. Bu durumda, kuvvetli eksen etrafında eğilen, gövdesi kararlı çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik yapı elemanının karakteristik kesme kuvveti dayanımı yapısal çeliğin basit çekme etkisindeki karakteristik akma dayanımının %60'ıyla ( $0,6F_y$ ) gövde alanı ( $A_w$ ) çarpılarak hesaplanabilir;

$$V_{py} = 0,6F_y A_w \quad (1.11)$$

### 1.3.2. Gövdenin kesme etkisinde burkulması sınır durumu

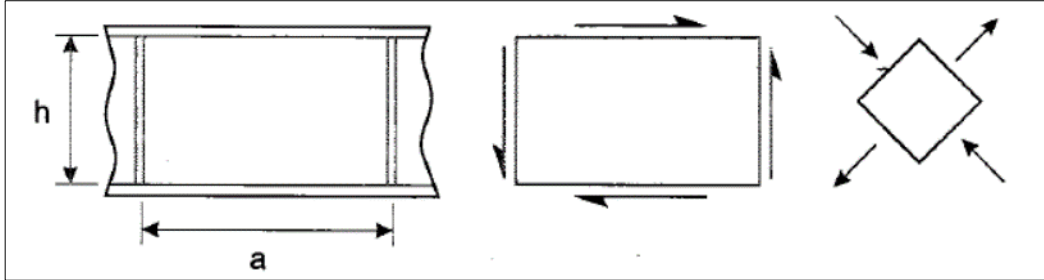
Gövde düzleminde kesme kuvveti etkisinde olan, gövdesi derin ve/veya ince, yani gövdesinin genişlik/kalınlık oranı yüksek, çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanının gövdesi, gövdedeki tüm lifler akmadan burkulabilir. Aslında gövde burkulmasının asıl nedeni, gövdede oluşan kayma gerilmelerinin neden olduğu "asal basınç gerilmeleri"dir. Elemana etkiyen eğilme momentinin elemanın kesme davranışına etkisi ihmal edilirse, yani, normal gerilmelerle kayma gerilmelerinin etkileşimi göz ardı edilirse, gövde düzlemindeki kesme kuvveti etkisindeki bir gövde parçasında, Şekil 1.14'te gösterildiği gibi, basit kesme durumu olduğu kabul edilebilir. Basit kesme durumunda, asal çekme ( $f_t$ ) ve asal basınç gerilmelerinin ( $f_c$ ) şiddetleri birbirine ve kayma gerilmesinin ( $\tau$ ) şiddetine eşittir ve asal düzlemler, Şekil 1.14'te gösterildiği gibi, gövde düzlemiyle yaklaşık 45 derecelik açı yapar.

Çift simetri eksenli I-enkesitli narin gövdeli bir eğilme elemanının gövdesinin kesme kuvveti etkisinde burkulma dayanımını artırmanın en pratik yolu gövde burkulmasını sınırlandıracak "rijitlik levhaları" kullanmaktır (Şekil 1.15). Pratikte rijitlik levhalarının çoğunlukla derin ve ince gövdeli yapma profiller için kullanıldığı, buna karşın hazır profillerin çoğunun burkulmadan plastik kesme kuvveti dayanımına ulaştığı bilinmektedir.



Şekil 1.14. Gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki bir çelik eğilme elemanında oluşan kayma gerilmeleri [14]

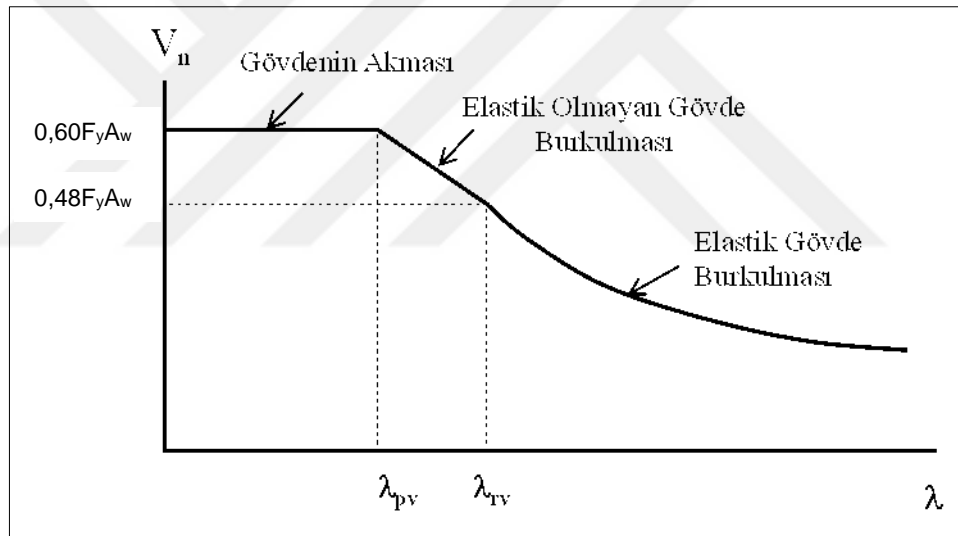
Bu tezde yalnız hazır profiller çalışıldığı için, tasarım tablolarında, elemanların kesme kuvveti dayanımları hesaplanırken rijitlik levhaları kullanılmadığı varsayılacak, gövde burkulmasının elemanın kesme davranışını belirleyen bir sınır durum olduğunun fark edilmesi durumunda, tabloya elemanın kesme kuvveti dayanımının rijitlik levhalarının kullanımıyla artırılabilceği notu düşülecektir.



Şekil 1.15. Düşey rijitlik levhalarının gövdenin burkulma alanını sınırlaması [15]

Çoğu yönetmelik, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanının kesme kuvveti dayanımının gövdenin narinliğiyle değişimini Şekil 1.7 ve Şekil 1.9'daki gibi üç eğrili bir ilişkiyle tanımlamaktadır. Örneğin, ABD'de 2010 yılında yürürlüğe giren ancak 2016 yılında yenilenecek yürürlükten kaldırılan "Specification for Structural Steel Buildings (Yapısal Çelik Binalar için Yönetmelik)" (AISC 360-10) yönetmeliğinde, bu ilişki Şekil 1.16'da gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Gövde narinliği bu sınır durum için özel olarak tanımlanan alt sınır

narınlikten (şekilde  $\lambda_{pv}$  sembolüyle gösterilmektedir) küçükse, elemanın kesme kuvveti dayanımını belirleyen sınır durum gövdenin kesme etkisinde akmasıdır. Buna karşın, gövdenin narınlığı alt sınır narınlikten büyük ancak üst sınır narınlikten (şekilde  $\lambda_{rv}$  sembolüyle gösterilmektedir) küçükse gövdenin tamamı kesme etkisinde akmadan önce burkulacaktır. Gövde narınlığının  $\lambda_{rv}$ 'den büyük olduğu durumlarda ise kesme etkisinde elastik gövde burkulması gözlenecektir. Şekil 1.16'da verilen grafiğin Şekil 1.7 ve Şekil 1.9'da verilen grafiklerden önemli bir farkı kesme etkisinde tanımlanan geçiş eğrisinin doğrusal olmamasıdır. Bir diğer önemli fark da ilk akma dayanımının plastik dayanıma oranıdır. Eğilme durumunda bu oran 0,7 olarak alınırken kesmede 0,8 olarak alınmıştır. Tıpkı eğilme durumunda olduğu gibi, elastik burkulma dayanımı elastik plak burkulma gerilmesinden hesaplanmakta, gövdedeki gerilme tipinin farklılığı denklemde uygun plak burkulma katsayısı kullanılarak tasarıma dâhil edilmektedir.

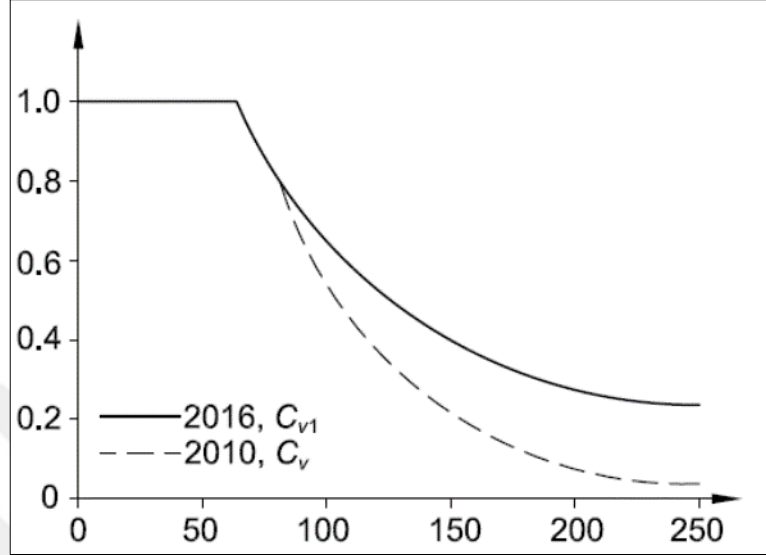


Şekil 1.16. AISC 360-10'a göre, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanın karakteristik kesme kuvveti dayanımının gövdenin genişlik/kalınlık oranıyla değişimi

AISC 360-16 yönetmeliğinde, Şekil 1.16'da tanımlanan üç eğrili dayanım eğrisinin yalnız ilk iki eğriyi kapsayacak şekilde yeniden düzenlendiği gözlenmiştir. Gövde düzleminde kesme için, eski (2010) ve yeni (2016) Amerikan çelik tasarım yönetmeliklerinde tanımlanan dayanım eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 1.17'de sunulmuştur. Şekilden de görülebileceği gibi, güncel Amerikan yönetmeliğinde elastik olmayan bölgede tanımlanan burkulma denklemi elastik bölgeye de uzatılmıştır. Aslında, özellikle narın gövdeli kirişlerde, gövdenin kesme etkisinde burkulmasının gerçek bir sınır durum olmadığı, gövde levhasının burkulduktan sonra da yük



taşımaya devam ettiği, bu nedenle gövdenin burkulma sonrası dayanımının tasarıma dâhil edilebileceği bilinmektedir. Dayanım eğrisinde yapılan bu değişimin temel nedeni gövdenin burkulma sonrası dayanımının dikkate alınmasıdır.



Şekil 1.17. Gövde düzleminde kesme için, AISC 360-16 (2016)'da tanımlanan dayanım eğrisinin AISC 360-10 (2010)'da tanımlanan eğriyle karşılaştırılması [5]

TÇY (2016)'da gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki elemanların tasarımları için verilen denklemler AISC 360-16'de verilen denklemlerle aynıdır. Diğer bir deyişle, TÇY (2016)'da Şekil 1.17'de gösterilen iki eğrili dayanım narinlik ilişkisi kullanılmaktadır. Buna göre, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisinde kompakt gövdeli eğilmeli elemanlarının karakteristik kesme kuvveti dayanımı plastik kesme kuvveti dayanımına eşitken, gövdesi kompaktlık koşulunu sağlamayan elemanların dayanımı plastik dayanımdan daha küçük alınmalıdır. TÇY (2016) gövdeleri kompaktlık koşulunu sağlamayan elemanlar için ayrı bir dayanım formülü tanımlamamakta, yerine "gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı" olarak adlandırılan,  $C_{v1}$  sembolüyle ifade edilen ve gövdenin narinliğine bağlı olarak değişen bir katsayı tanımlayarak plastik kesme kuvveti dayanımını ( $V_{py}$ ) bu katsayıyla çarpıtılarak dayanımı azalttırmaktadır.

#### 1.4. Başlıklarına Paralel Düzlemde Kesme Kuvveti Etkisindeki Çelik Yapı Elemanlarının Kesme Kuvveti Dayanımı ile İlişkili Sınır Durumlar

Zayıf eksen etrafında eğilen bir çelik yapı elemanı başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisinde kalır. Şekil 1.13(b)'de başlıklarına paralel düzlemde kesme

kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanında oluşan kayma gerilmelerinin enkesitteki dağılımı gösterilmektedir.

Şekillerden de görülebileceği gibi, gövde düzleminde etkiyen kesme kuvveti gövde tarafından taşınırken, başlıklara paralel düzlemde etkiyen kesme kuvvetini başlıklar taşımaktadır. Bu nedenle, başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik yapı elemanının kesme kuvveti dayanımını belirleyen iki sınır durum vardır: (i) başlıkların kesme etkisinde akması ve (ii) başlıkların kesme etkisinde burkulması.

#### 1.4.1. Başlıkların kesme etkisinde akması sınır durumu

Kesme kuvveti etkisinde başlıkları kompakt çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanının karakteristik kesme kuvveti dayanımı ( $V_{nx}$ ) başlıklardaki bütün liflerin kesme etkisinde aktığı kabulüyle hesaplanan plastik kesme kuvveti dayanımına ( $V_{px}$ ) eşittir. Bunun için, yapısal çeliğin basit kesme etkisindeki akma dayanımıyla ( $\tau_y$ ) toplam başlık alanı ( $2A_f$ ; burada bir başlık alanı  $A_f = b_f t_f$  olup,  $b_f$  başlık genişliği,  $t_f$  ise başlık kalınlığıdır) çarpılmalıdır;

$$V_{px} = \tau_y 2A_f \quad (1.12)$$

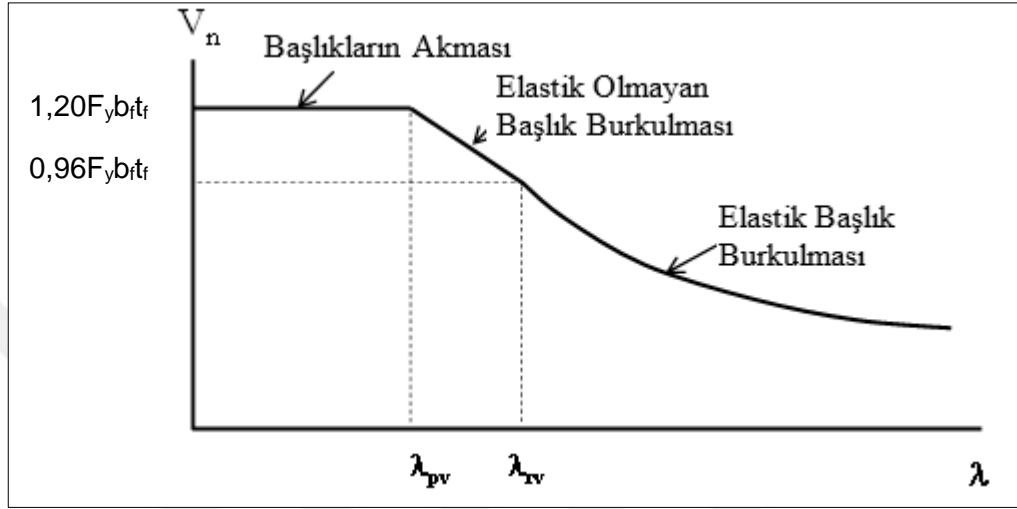
Yapısal çeliğin basit kesme etkisindeki akma dayanımının basit çekme etkisindeki akma dayanımının %60'ına eşit olduğu kabul edilerek,  $V_{px}$  yapısal çeliğin basit çekme etkisindeki karakteristik akma gerilmesi ( $F_y$ ) ile başlık genişliği ve kalınlığı (sırasıyla,  $b_f$  ve  $t_f$ ) cinsinden şu şekilde ifade edilebilir;

$$V_{px} = 1,2F_y b_f t_f \quad (1.13)$$

#### 1.4.2. Başlıkların kesme etkisinde burkulması sınır durumu

Başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisinde olan geniş ve/veya ince başlıklı çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanının başlıkları, kesme nedeniyle oluşan asal basınç gerilmelerinin etkisinde burkulabilir. AISC 360-16, ve dolayısıyla TÇY (2016), bu durum için Şekil 1.16'ya benzer, üç-eğrili bir dayanım-narinlik ilişkisi tanımlamıştır. AISC 360-16'da, zayıf eksenlerinde eğilen narin başlıklı kirişler için yeterince deneysel veri olmaması nedeniyle başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki narin başlıklı elemanların burkulma sonrası dayanımlarının tasarıma dâhil edilemediği belirtilmektedir. TÇY (2016)'da, gövde düzleminde etkiyen

kesme durumunda olduğu gibi, narinlik nedeniyle azaltılmış kesme kuvveti dayanımı için ayrı tasarım denklemleri tanımlanmamakta, bunun yerine, “kayma etkisinde başlık burkulma katsayısı” olarak adlandırılan,  $C_{v2}$  sembolüyle ifade edilen ve başlığın narinliğine bağlı olarak değişen bir katsayı tanımlanarak plastik kesme kuvveti dayanımının ( $V_{px}$ ) bu katsayıyla çarpılarak azaltılması sağlanmaktadır.



Şekil 1.18. TÇY (2016)'ya göre, başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanının karakteristik kesme kuvveti dayanımının başlıklarının genişlik/kalınlık oranıyla değişimi [17]

## **2. TÇY (2016)'DA ÇELİK EĞİLME ELEMANLARI İÇİN TANIMLANAN TASARIM İLKELERİ**

TÇY (2016)'da, asal eksenlerinden biri etrafında eğilen çelik yapı elemanlarının tasarım kuralları Bölüm 9'da tanımlanmaktadır. Yönetmelikte, elemanın "basit" eğilme etkisinde kabul edilebilmesi için elemana etkiyen yüklerin enkesitin kayma merkezinden geçen asal eksene paralel düzlemde olması veya elemanın yük etkime noktalarıyla mesnetlerde burulmaya karşı desteklenmiş olması gerektiği belirtilmektedir. Gövde düzleminde veya başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisinde olan çelik yapı elemanlarının tasarım kuralları ise Bölüm 10'da tanımlanmaktadır. Bu bölümdeki kurallar elemana etkiyen kesme kuvvetinin elemanın enkesitinin kayma merkezinden geçtiği kabulüne dayanır. Aksi durumda elemanda oluşacak burulma momentinin etkileri Bölüm 11'de tanımlandığı gibi tasarıma dâhil edilmelidir.

Tezin bu bölümünde, çift simetri eksenli I-enkesitli çelik eğilme elemanlarının Bölüm 1'de tanımlanan sınır durumlardaki tasarım/güvenli dayanımlarının belirlenmesi için TÇY (2016)'da verilen tasarım denklemleri ve kuralları sunulacaktır. Temel tasarım denklemlerine geçmeden önce yönetmelikte tanımlanan tasarım yaklaşımları ile ilgili yük birleşimleri özetlenecektir.

### **2.1. Tasarım Yaklaşımları**

TÇY (2016)'da, çelik yapı elemanlarının/birleşimlerinin tasarımı için iki farklı tasarım yaklaşımı tanımlanmıştır: (i) Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) veya (ii) Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT). Yönetmelik yalnız birini kullanmak koşuluyla tasarımcının iki yöntemden dilediğini kullanmasına izin vermektedir. Her ne kadar her iki yöntemde de hesaplanan karakteristik dayanımlar aynı olsa da, yapısal güvenlik koşulunun kontrolü esnasında kullanılacak kesit zorlarının belirlendiği yük birleşimleri iki yöntemde farklıdır. Bu yüzden, tasarımcı tasarımda seçtiği yöntemle uyumlu yük birleşimlerini kullandığından emin olmalıdır.

### 2.1.1. YDKT ve ilgili yük birleşimleri

YDKT yönteminde temel hedef, yapısal çelik elemanların/birleşimlerin karakteristik dayanımlarının ( $R_n$ ) ilgili dayanım katsayılarıyla (değerleri 1'den küçük  $\phi$  katsayılarıyla) çarpılmasıyla elde edilen "tasarım dayanım"larının ( $\phi R_n$ ), bu yaklaşım için tanımlanan yük birleşimleri altında hesaplanan "gerekli dayanım"lardan ( $R_u$ ) daha az olmamasını sağlamaktadır. YDKT yöntemi için yapısal güvenlik koşulu şu şekilde tanımlanmıştır;

$$R_u \leq \phi R_n \quad (2.1)$$

TÇY (2016) Bölüm 5.3.1'de YDKT yük birleşimleri aşağıdaki gibi listelenmiştir:

- (1) 1,4G
- (2) 1,2G + 1,6Q + 0,5(Q<sub>r</sub> veya S veya R)
- (3) 1,2G + 1,6(Q<sub>r</sub> veya S veya R) + (Q veya 0,8W)
- (4) 1,2G + 1,0Q + 0,5(Q<sub>r</sub> veya S veya R) + 1,6W
- (5) 1,2G + 1,0Q + 0,2S + 1,0E
- (6) 0,9G + 1,6W
- (7) 0,9G + 1,0E

Yük birleşimlerinde, G sabit yük, Q hareketli yük, Q<sub>r</sub> çatı hareketli yükü, S kar yükü, R yağmur yükü, W rüzgâr yükü ve E deprem etkisi olarak tanımlanmış olup akışkan madde basınç yükü, sıcaklık değişimi, mesnet çökmesi etkileri ile yatay zemin/zemin suyu/yığılı madde basıncı gibi yüklerin bulunduğu yük birleşimleri için yönetmeliğin ilgili maddesine başvurulmalıdır.

YDKT yöntemi için tanımlanan yük birleşimleri incelendiğinde, taşıma gücü felsefesine göre tanımlanması nedeniyle artırılmayan deprem yükünün sabit yükle birleştirildiği yedinci yük birleşiminin haricindeki bütün yük birleşimlerinde, yük terimlerinden en az birinin katsayısının 1'den büyük olduğu gözlenmektedir. Bu da bu yöntemde gerekli dayanımların artırılmış yükler kullanılarak hesaplanması gerektiğini göstermektedir.

### 2.1.2. GKT ve ilgili yük birleşimleri

GKT yöntemi, yapısal çelik elemanların karakteristik dayanımlarının ( $R_n$ ) ilgili güvenlik katsayılarına (değerleri 1'den büyük  $\Omega$  katsayılarına) bölünmesiyle elde edilen

“güvenli dayanım”larının ( $R_n/\Omega$ ), bu yöntem için tanımlanan yük birleşimleri altında hesaplanan “gerekli dayanım”lardan ( $R_a$ ) daha az olmaması ilkesine dayanmaktadır. GKT yöntemi için yapısal güvenlik koşulu aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilebilir;

$$R_a \leq \frac{R_n}{\Omega} \quad (2.2)$$

TÇY (2016) Bölüm 5.3.2’de GKT yük birleşimleri şu şekilde listelenmiştir:

- (1) G
- (2) G + Q
- (3) G + (Q<sub>r</sub> veya S veya R)
- (4) G + 0,75Q + 0,75(Q<sub>r</sub> veya S veya R)
- (5) a) G + W  
b) G + 0,7E
- (6) a) G + 0,75Q + 0,75(Q<sub>r</sub> veya S veya R) + 0,75W  
b) G + 0,75Q + 0,75S + 0,75(0,7E)
- (7) 0,6G + W
- (8) 0,6G + 0,7E

GKT yöntemi için tanımlanan yük birleşimleri incelendiğinde, bu tasarım yönteminde yüklerin artırılmadığı fark edilebilir. Yük birleşimlerinde yükler ya değiştirilmeden ya da azaltılarak birleştirilmektedir. Bazı yük birleşimlerinde görülen yük azaltmasının temel nedeni, özellikle zamana bağlı yüklerin tasarım değerlerinin aynı anda oluşma olasılığının düşük olmasıdır. Her ne kadar temel tasarım felsefeleri farklı olsa da, GKT yöntemi, pek çok açıdan, Standart’ta kullanılan emniyet gerilmeleri (EG) yöntemine benzemektedir; zira her iki yöntemde de yükler artırılmamakta, buna karşın, dayanımlar/gerilmeler ciddi oranlarda azaltılmaktadır.

## **2.2. Kuvvetli Eksenleri Etrafında Eğilen Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları**

TÇY (2016) Bölüm 9.1’e göre, kuvvetli eksenleri etrafında eğilen bir çelik yapı elemanının “karakteristik eğilme momenti dayanımı” ( $M_{nx}$ ) olası her bir sınır durum için belirlenecek dayanımların en küçüğü alınarak hesaplanmalıdır. Kuvvetli eksenleri etrafında eğilen çift simetri eksenli I-enkesitli elemanların tasarım ilkeleri, Bölüm 9.1, 9.2, 9.3 ve 9.5’te tanımlanmaktadır.

### 2.2.1. Dayanım ve güvenlik katsayıları

TÇY (2016) Bölüm 9.1’de, kuvvetli eksen etrafında eğilen bir çelik yapı elemanının “tasarım eğilme momenti dayanımı” ( $\phi_b M_n$ ) veya “güvenli eğilme momenti dayanımı” ( $M_n/\Omega_b$ ) hesaplanırken kullanılması gereken dayanım ve güvenlik katsayıları ( $\phi_b$  ve  $\Omega_b$ ) şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\phi_b = 0,90 \quad \text{ve} \quad \Omega_b = 1,67 \quad (2.3)$$

### 2.2.2. Akma sınır durumu

TÇY (2016) Bölüm 9.2.1’e göre, akma sınır durumu için kuvvetli eksen etrafında karakteristik eğilme momenti dayanımı ( $M_{nx}$ ), Bölüm 1.1.1’de tanımlandığı gibi, elemanın plastik eğilme momentine ( $M_{px}$ ) eşit olup, yapısal çelik karakteristik akma gerilmesiyle ( $F_y$ ) enkesitin kuvvetli eksen etrafında plastik mukavemet momenti ( $W_{px}$ ) çarpılarak hesaplanmalıdır.

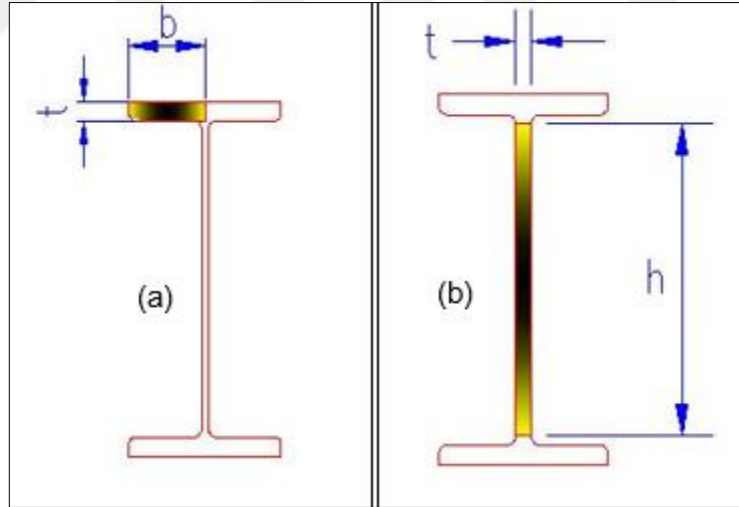
$$M_{nx} = M_{px} = F_y W_{px} \quad (2.4)$$

Çift simetri eksenli I-enkesitli hadde profillerin plastik mukavemet momentleri profil tablolarında listelenmektedir. Sıcak haddelenmiş yapısal çeliklerin karakteristik akma gerilmeleri ise TÇY (2016) Tablo 2.1.A’da verilmektedir. Bu tabloya göre, bu tezin kapsamında olan ve Türkiye’de sık kullanılan çelik sınıfları için (S235, S275 ve S355) 40 mm’den daha kalın enkesit parçası içermeyen profillerin dayanım hesaplarında kullanılacak karakteristik akma gerilmesinin ( $F_y$ ) MPa (N/mm<sup>2</sup>) cinsinden değeri çelik sınıfının isimlendirmesinde S harfinden sonra gelen 3 haneli rakama eşittir. Yani, S235 çeliği için  $F_y = 235$  MPa, S275 çeliği için  $F_y = 275$  MPa, S355 çeliği için  $F_y = 355$  MPa’dır.

### 2.2.3. Yerel burkulma sınır durumu

TÇY (2016) Bölüm 5.4.1’e göre, yerel burkulma sınır durumu dikkate alındığında, eğilme momenti etkisindeki enkesitler üç farklı sınıfa ayrılır: (a) kompakt enkesitler, (b) kompakt olmayan enkesitler ve (c) narin enkesitler. Bir çelik eğilme elemanının enkesitinin hangi sınıfa dahil olduğunu belirlemek için yapılması gereken ilk işlem elemanın basınç etkisindeki tüm enkesit parçalarının genişlik/kalınlık oranlarının (yani, narinliklerinin) hesaplanmasıdır. TÇY (2016) Bölüm 5.4.1.1’de, basınç kuvveti doğrultusuna paralel kenarlarından yalnız biri enkesitin diğer parçasıyla bağlanan

basınç etkisindeki enkesit parçaları “rijitleştirilmemiş” enkesit parçaları olarak tanımlanır. Buna karşın, TÇY (2016) Bölüm 5.4.1.2’de, basınç kuvveti doğrultusuna paralel kenarlarından her ikisi birden enkesitin diğer parçalarıyla bağlanan basınç etkisindeki enkesit parçaları “rijitleştirilmiş” enkesit parçaları olarak tanımlanır. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, çift simetri eksenli I-enkesitlerde, kenarlarından yalnız biri gövde levhasına bağlanan yarım başlık levhası bir rijitleştirilmemiş enkesit parçasıyken, her iki kenarından başlık levhalarına bağlanan gövde levhası rijitleştirilmiş enkesit parçasıdır. TÇY (2016) Bölüm 5.4.1’de I-enkesitli hadde profillerin basınç etkisindeki parçalarının genişliği başlıklarda, Şekil 2.1(a)’da gösterildiği gibi, yarım başlık genişliği ( $b = b_f/2$ ), gövdede ise, Şekil 2.1(b)’de gösterildiği gibi, başlıklar arasındaki uzaklıktan eğrilik yarıçaplarının çıkarılmasıyla elde edilen yükseklik ( $h$ ), ya da diğer bir deyişle düz gövde yüksekliği, olarak tanımlanmaktadır. Yönetmeliğin aynı maddesinde başlık kalınlıkları değişken olan enkesitlerin narinlik hesaplarında ortalama kalınlık kullanılması gerektiği, başlıkların serbest uçlarıyla gövde levhasına birleşen kenarlarının arasındaki orta noktadaki kalınlığın başlıkların ortalama kalınlığı olarak alınması gerektiği belirtilmektedir.



Şekil 2.1. Çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik eğilme elemanında (a) rijitleştirilmemiş başlık (b) rijitleştirilmiş gövde parçalarının genişlik ve kalınlıklarının tanımlanması [16]

Basınç etkisindeki enkesit parçaları birbirinin eşdeğeri iki yarım başlık parçası ile bir gövde parçasından oluşan çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanının enkesitini sınıflandırabilmek için başlık ve gövde narinliklerini (sırasıyla,  $\lambda_f$  ve  $\lambda_w$ ) hesaplamak yeterlidir.



$$\lambda_f = \left( \frac{b}{t} \right)_f = \frac{b_f/2}{t_f} \quad \text{ve} \quad \lambda_w = \left( \frac{b}{t} \right)_w = \frac{h}{t_w} \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'te,  $t_f$  başlık kalınlığı (değişken başlık kalınlığına sahip kesitlerde ortalama başlık kalınlığı),  $t_w$  ise gövde kalınlığıdır.

Bir çelik eğilme elemanının enkesitinin hangi sınıfa dâhil olduğunu belirlemek için yapılması gereken ikinci adım ise enkesiti oluşturan basınç parçalarının her birini ayrı ayrı sınıflandırmaktır. Bunun için, incelenen basınç parçasının hesaplanan narinliği TÇY (2016) Tablo 5.1.B'de o parça için tanımlanan sınır narinliklerle ( $\lambda_p$  ve  $\lambda_r$  ile) karşılaştırılmalıdır. Eğer basınç etkisindeki enkesit parçasının narinliği, ilgili alt sınır narinlikten ( $\lambda_p$ ) küçükse, enkesit parçası "kompakt" olarak sınıflandırılır. Parçanın narinliği alt sınır narinlikten ( $\lambda_p$ ) büyük ancak üst sınır narinlikten küçükse ( $\lambda_r$ ) enkesit parçası "kompakt olmayan" olarak sınıflandırılır. Parçanın narinliğinin üst sınır narinliği aşması durumunda ise parça "narin" olarak sınıflandırılır. Elemanın basınç etkisindeki enkesit parçaları ayrı ayrı sınıflandırıldıktan sonra artık elemanın enkesiti sınıflandırılabilir. Eğer elemanın basınç etkisindeki parçalarının tamamı kompaktsa, eleman kompakt kesitlidir. Eğer elemanda kompakt olmayan parça(lar) var ancak narin parça yoksa eleman kompakt olmayan kesitlidir. Elemanın basınç etkisindeki enkesit parçalarından en az birinin narin olması durumunda ise eleman narin enkesitlidir.

TABLO 5.1B – EĞİLME MOMENTİNİN BASINÇ BİLEŞENİ ETKİSİNDEKİ ENKESİT PARÇALARI İÇİN GENİŞLİK / KALINLIK ORANLARI					
Durum	Tanım	Genişlik / Kalınlık Oranı, $\lambda$	Genişlik / Kalınlık Oranı Sınır Değerleri		Enkesit
			$\lambda_p$ (kompakt / kompakt olmayan)	$\lambda_r$ (kompakt olmayan / narin)	
10	Hadde I-profiller, U-profiller ve T-enkesitli elemanların başlıkları	$b/t$	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
15	U-profillerin ve çift simetri eksenli I-profillerin gövdeleri	$h/t_w$	$3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Şekil 2.2. TÇY (2016)'da kuvvetli eksenlerinde eğilen çift simetri eksenli I-enkesitli çelik eğilme elemanlarının basınç etkisindeki parçaları için tanımlanan sınır narinlikler [2]

Eğilme etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli hadde profillerin başlık ve gövdeleri için sınır narinlikler TÇY (2016) Tablo 5.1.B'de sırasıyla Durum 10 ve Durum 15'te tanımlanmaktadır (Şekil 2.2). Bu tezde başlıklar için tanımlanan sınır narinlikler için

$\lambda_{pf}$  ve  $\lambda_{rf}$  sembolleri, gövde için tanımlanan sınır narinlikler için  $\lambda_{pw}$  ve  $\lambda_{rw}$  sembolleri kullanılacaktır. Şekil 2.2'ye göre, simetrik I-enkesitlerde sınır narinlikler şu şekilde ifade edilebilir;

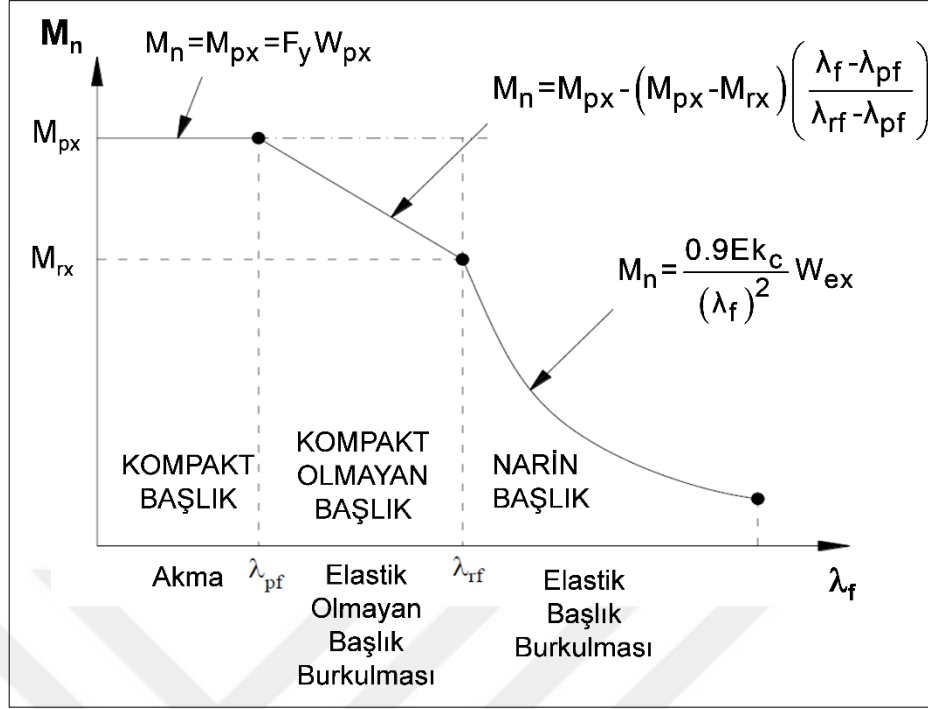
$$\lambda_{pf} = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \lambda_{rf} = 1,00 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{ve} \quad \lambda_{pw} = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \lambda_{rw} = 5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.6)$$

Aslında, TÇY (2016)'da, kuvvetli eksenleri etrafında eğilen çift simetri eksenli I-enkesitli çelik yapı elemanlarının yerel burkulma ve yanal burulmalı burkulma sınır durumlarıyla ilişkili tasarım denklemleri enkesit sınıfından çok, gövde ve başlıkların sınıflarına bağlı olarak farklı bölümlerde verilmektedir. Örneğin, eğer gövde narinse Bölüm 9.5'te verilen tasarım denklemleri kullanılmalıdır. Buna karşın, gövdesi narin olmayan ancak başlıkları narin ya da kompakt olmayan sınıfına dahil olan elemanların tasarımı Bölüm 9.3'e göre yapılmalıdır. İlerleyen bölümlerde daha detaylı bir şekilde gösterileceği gibi, bu tez kapsamında incelenen çift simetri eksenli I-enkesitli Avrupa profillerin tamamının gövdelerinin kompakt olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, bu bölümde yalnız "gövdeleri kompakt" çift simetri eksenli I-enkesitli çelik yapı elemanlarının tasarım denklemleri özetlenecektir.

TÇY (2016) Bölüm 9.3.2(a)'ya göre, gövdesi kompakt I-enkesitli eğilme elemanlarının yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı ( $M_n$ ) Şekil 2.3'te gösterildiği gibi hesaplanmalıdır. Buna göre, elemanın enkesiti kompaktsa, yani gövde gibi başlıklar da kompaktsa, yerel burkulma sınır durumunun tasarımda göz önüne alınmasına gerek yoktur çünkü başlık burkulması plastik moment kapasitesinden daha büyük momentlerde gözlenecektir. Gövdenin kompakt olmasına karşın başlıkların kompakt olmayan olarak sınıflandırılması durumunda, kuvvetli eksen etrafında karakteristik eğilme momenti dayanımı ( $M_{nx}$ ), Bölüm 9.3.2(a) gereğince, aşağıdaki denklemden hesaplanmalıdır;

$$M_{nx} = M_{px} - (M_{px} - M_{rx}) \left( \frac{\lambda_r - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \quad \text{burada} \quad M_{rx} = 0,7F_y W_{ex} \quad (2.7)$$

Denklem (2.7)'de  $W_{ex}$  enkesitin kuvvetli eksen etrafında elastik mukavemet momentidir. Bölüm 1.1.2'de belirtildiği ve Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, TÇY (2016), elastik olmayan başlık burkulması sınır durumunda, karakteristik moment dayanımı hesabı için  $M_{px}$  ile  $M_{rx}$  arasında doğrusal bir geçiş denklemi tanımlamaktadır.



Şekil 2.3. TÇY (2016)'da, kuvvetli eksen etrafında eğilen kompakt gövdeli çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik elemanın yerel burkulma sınır durumunda eğilme momenti dayanımı hesabı için verilen tasarım eğrisi [18]

Başlıkları narin ancak gövdesi kompakt I-enkesitli eğilme elemanlarının kuvvetli eksen etrafında karakteristik eğilme momenti dayanımı ( $M_n$ ) ise TÇY (2016) Bölüm 9.3.2(b) gereğince aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$M_{nx} = F_{crx} W_{ex} = \frac{0,9Ek_c}{(\lambda_f)^2} W_{ex} \quad \text{burada} \quad 0,35 \leq k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}} \leq 0,76 \quad (2.8)$$

Denklem (2.8)'de  $E$  yapısal çeliğin elastisite modülü (200 GPa),  $k_c$  ise rijitleştirilmemiş narin elemanlar için tanımlanmış bir katsayıdır. Yapısal çeliğin Poisson oranının 0,3 olduğunu hatırlayarak, Denklem (1.5)'teki  $\pi^2/(12(1-\mu^2))$  terimin değeri hesaplanırsa, sonucun 0,9038 olduğu görülebilir. Yani, TÇY (2016) narin başlıklı eğilme elemanlarının yerel burkulma sınır durumundaki eğilme momenti dayanımlarını elastik plak burkulma gerilmesi denklemini kullanarak hesaplatmaktadır. Denklem (2.8)'den fark edilebileceği gibi, plak burkulma katsayısı  $k_c$  gövde narinliğine bağlı olup gövde narinliği 27,7'den küçük kesitlerde üst sınır olarak tanımlanan 0,76 değerini almaktadır.

#### 2.2.4. Yanal burulmalı burkulma sınır durumu

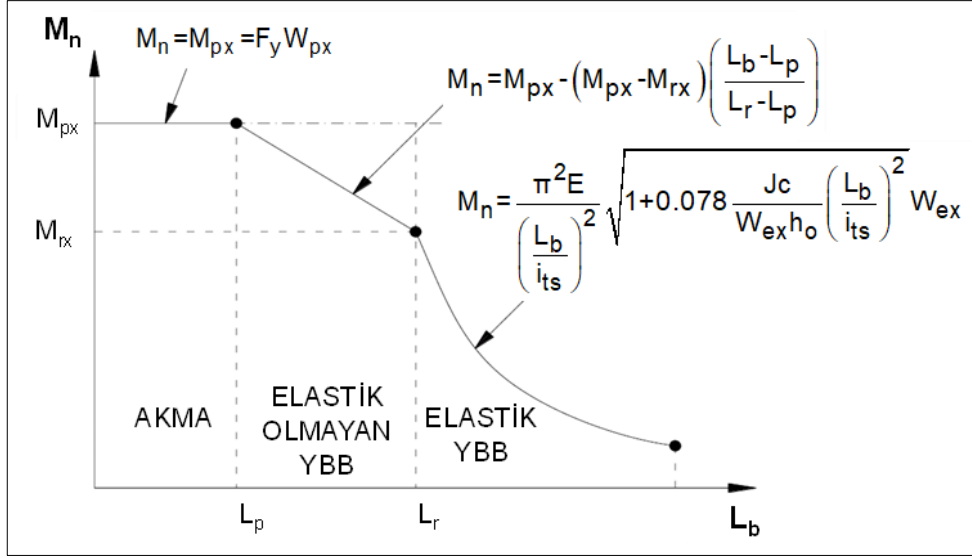
TÇY (2016) Bölüm 9.1'e göre, yanal burulmalı burkulma sınır durumunda, yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki uzunluk ( $L_b$ ) boyunca, eğilme momenti yayılışının olumlu katkısı aşağıdaki denklemle tanımlanan "moment düzeltme katsayısı" ( $C_b$ ) kullanılarak hesaba katılabilir;

$$C_b = \frac{12,5 M_{maks}}{2,5 M_{maks} + 3,0 M_A + 4,0 M_B + 3,0 M_C} \quad (2.9)$$

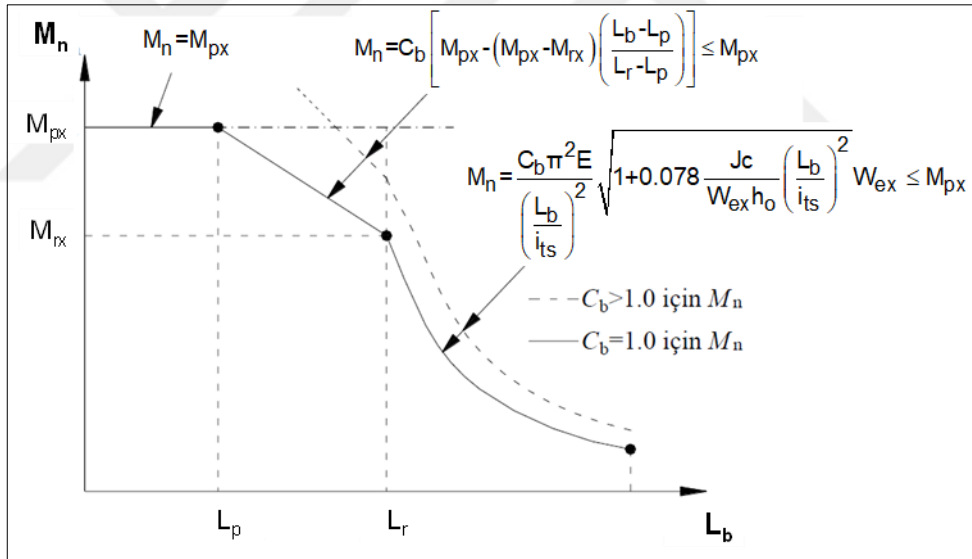
Denklem (2.9)'da  $M_{maks}$ ,  $L_b$  uzunluğu boyunca oluşan en büyük eğilme momentinin mutlak değeri;  $M_A$ ,  $M_B$  ve  $M_C$  ise sırasıyla bu uzunluğun 1/4, 1/2 ve 3/4 noktalarına karşılık gelen enkesitlerde oluşan eğilme momentlerinin mutlak değerleridir. Denklem (2.9) enkesiti çift simetri eksenli, konsol olarak çalışmayan tüm eğilme elemanlarında kullanılabilir. TÇY (2016) tüm yükleme durumlarında, güvenli tarafta kalan bir yaklaşımla moment düzeltme katsayısının 1,0'e eşit alınmasına izin vermektedir. Bu tezde, eğilme elemanları için TÇY (2016)'da GKT yöntemi için verilen tasarım ilkeleri TS648'de verilen tasarım ilkeleriyle karşılaştırılırken her iki yöntemde de  $C_b=1$  alınacaktır. Benzer şekilde, TÇY (2016)'ya göre hazırlanacak tasarım tablolarında da moment yayılışının olumlu katkısı göz ardı edilecek, ancak bu katkının tasarıma nasıl dahil edileceği örnekle gösterilecektir.

TÇY (2016) Bölüm 9.2.2 ve 9.3.1'e göre, kuvvetli eksenleri etrafında eğilen kompakt gövdeli çift simetri eksenli I-enkesitli çelik yapı elemanlarının yanal burulmalı burkulma (YBB) sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı Şekil 2.4'te gösterildiği gibi hesaplanmalıdır.

Şekil 2.4'te verilen tasarım denklemleri  $C_b=1$  durumu için geçerlidir.  $C_b>1$  durumunda, YBB denklemleri  $C_b$  ile çarpılarak büyütülmelidir.  $C_b$ 'nin karakteristik dayanıma etkisi Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Şekilden de fark edilebileceği gibi,  $C_b$  katsayısının 1'den büyük olduğu durumlarda, karakteristik eğilme momenti dayanımı elemanın plastik moment dayanımını ( $M_{px}$ ) aşabilmektedir. Bu nedenle,  $C_b>1$  durumunda, YBB denklemleri  $M_{px}$  ile sınırlandırılmaktadır.



Şekil 2.4. TÇY (2016)'da, kuvvetli eksen etrafında eğilen kompakt gövdeli çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik elemanın yanal burulmalı burkulma (YBB) sınır durumunda eğilme momenti dayanımı hesabı için verilen tasarım eğrisi (Cb=1 için) [17]



Şekil 2.5. TÇY (2016)'ya göre, kuvvetli eksen etrafında eğilen kompakt gövdeli çift simetri eksenli I-enkesitli bir çelik elemanı için yanal burulmalı burkulma sınır durumunda Cb'nin karakteristik eğilme momenti dayanımına etkisi [17]

TÇY (2016) Bölüm 9.2.2(a)'ya göre, “basınç başlığında yanal yerdeğiştirmenin ve enkesit burulmasının önlendiği noktalar arasındaki eleman uzunluğu”, diğer bir deyişle, stabilite bağlantısıyla desteklenmeyen eleman uzunluğu, olarak tanımlanan Lb, “akma sınır durumu için yanal olarak desteklenmeyen sınır uzunluk” olarak tanımlanan Lp değerinden küçükse, elemanın eğilme momenti dayanımı hesabında

yanal burulmalı burkulma sınır durumunun dikkate alınmasına gerek yoktur. TÇY (2016) Bölüm 9.2.2'ye göre  $L_p$  aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$L_p = 1,76i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.10)$$

Denklem (2.10)'da  $i_y$  enkesitin y eksenine (zayıf eksenine) göre atalet yarıçapıdır.

$L_b$ 'nin  $L_p$ 'den büyük olduğu durumda, hangi tasarım denkleminin kullanılacağı  $L_b$  uzunluğunun “elastik olmayan yanal burulmalı burkulma durumu için sınır uzunluk” olarak adlandırılan  $L_r$  uzunluğundan büyük ya da küçük olmasına bağlıdır. TÇY (2016) Bölüm 9.2.2'ye göre  $L_r$  aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$L_r = 1,95i_{ts} \frac{E}{0,7F_y} \sqrt{\frac{J}{W_{ex} h_o} + \sqrt{\left(\frac{J}{W_{ex} h_o}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7F_y}{E}\right)^2}} \quad (2.11)$$

Denklem (2.11)'de  $J$  enkesitin burulma sabitidir;  $h_o$  ise enkesit başlıklarının ağırlık merkezleri arasındaki uzaklık olup enkesit yüksekliğinden başlık kalınlığı çıkarılarak ( $h_o=d-t_f$ ) hesaplanabilir. Çift simetri eksenli enkesitlerde, “etkin atalet yarıçapı” olarak adlandırılan  $i_{ts}$ 'nin hesabı için yönetmelikte iki denklem sunulmuştur. Tek simetri eksenli enkesitlerde de kullanılabilen ilk denklem enkesitin üç geometrik özelliğine bağlıdır: zayıf eksen etrafında atalet momenti ( $I_y$ ), çarpılma sabiti ( $C_w$ ) ve kuvvetli eksen etrafında elastik mukavemet momenti ( $W_{ex}$ ),

$$i_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{I_y C_w}}{W_{ex}}} \quad (2.12)$$

Daha güvenli tarafta kalan ikinci denklemde ise enkesitin basınç başlığı ile gövdesinin 1/6'sıyla tanımlanan parçasının düşey simetri eksenine göre atalet yarıçapı hesaplanmaktadır;

$$i_{ts} = \frac{b_f}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} \frac{ht_w}{b_f t_f}\right)}} \quad (2.13)$$

Bu tezde, özel olarak belirtilmeyen bütün durumlarda,  $i_{ts}$  Denklem (2.12) kullanılarak hesaplanacaktır.

TÇY (2016) Bölüm 9.2.2(b) gereğince,  $L_b$ ,  $L_p$ 'den büyük ancak  $L_r$ 'den küçükse, kuvvetli eksen etrafında karakteristik eğilme momenti dayanımı ( $M_{nx}$ ),  $M_{px}$  ile  $M_{rx}$  arasında tanımlanmış aşağıdaki doğrusal geçiş denklemi kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$M_{nx} = C_b \left[ M_{px} - (M_{px} - M_{rx}) \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_{px} \quad \text{burada} \quad M_{rx} = 0,7F_y W_{ex} \quad (2.14)$$

$L_b$ 'nin  $L_r$ 'den de büyük olması durumunda, Bölüm 9.2.2(c) gereğince, karakteristik dayanım aşağıda verilen elastik burkulma denklemi kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$M_{nx} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left( \frac{L_b}{i_{ts}} \right)^2} \sqrt{1 + 0,078 \frac{J}{W_{ex} h_o} \left( \frac{L_b}{i_{ts}} \right)^2} W_{ex} \leq M_{px} \quad (2.15)$$

$C_b=1$  durumu için, Denklem (2.15)'te verilen tasarım denkleminin Denklem (1.6)'daki denklemle hemen hemen aynı sonuçlar verdiği bilinmektedir.

### 2.3. Zayıf Eksenleri Etrafında Eğilen Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları

Zayıf eksenleri etrafında eğilen çift simetri eksenli I-enkesitli elemanların tasarım ilkeleri TÇY (2016) Bölüm 9.6'da tanımlanmaktadır. Buna göre, bu tip elemanların "karakteristik eğilme momenti dayanımı" ( $M_{ny}$ ) olası her bir sınır durum için belirlenecek dayanımların en küçüğü alınarak hesaplanmalıdır.

#### 2.3.1. Dayanım ve güvenlik katsayıları

TÇY (2016) Bölüm 9.6'ya göre, zayıf eksenleri etrafında eğilen I-enkesitli çelik yapı elemanlarının "tasarım eğilme momenti dayanımı" ( $\phi_b M_{ny}$ ) veya "güvenli eğilme momenti dayanımı" ( $M_{ny}/\Omega_b$ ) hesaplanırken kullanılması gereken dayanım ve güvenlik katsayıları ( $\phi_b$  ve  $\Omega_b$ ) kuvvetli eksenleri etrafında eğilen elemanlar için tanımlananlarla aynıdır;

$$\phi_b = 0,90 \quad \text{ve} \quad \Omega_b = 1,67 \quad (2.16)$$

### 2.3.2. Akma sınır durumu

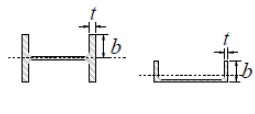
TÇY (2016) Bölüm 9.6.1'e göre, akma sınır durumu için zayıf eksen etrafında karakteristik eğilme momenti dayanımı ( $M_{ny}$ ) aşağıdaki denklemle hesaplanmalıdır;

$$M_{ny} = M_{py} = F_y W_{py} \leq 1,6 F_y W_{ey} \quad (2.17)$$

Denklem (2.17)'de  $W_{ey}$  ve  $W_{py}$  sırasıyla enkesitin zayıf eksen etrafında elastik ve plastik mukavemet momentleridir. Bölüm 1.2.1'de de belirtildiği gibi, TÇY (2016) zayıf eksen etrafında eğilmede karakteristik dayanımını, akma momentinin 1,6 katıyla sınırlandırmaktadır.

### 2.3.3. Yerel burkulma sınır durumu

TÇY (2016)'da, zayıf eksen etrafında eğilme etkisindeki I-enkesitli profillerin başlıklarının sınıflandırılmasında kullanılan sınır narinlikler ( $\lambda_{pf}$  ve  $\lambda_{rf}$ ) Tablo 5.1B Durum 13'te tanımlanmıştır (Şekil 2.6).

13	Zayıf eksen etrafında eğilme etkisindeki tüm I-enkesitli elemanlar ve U-profiller	$b/t$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
----	---	-------	-----------------------------	-----------------------------	---

Şekil 2.6. TÇY (2016)'da zayıf eksenlerinde eğilen çift simetri eksenli I-enkesitli çelik eğilme elemanların başlıkları için tanımlanan sınır narinlikler [2]

Özellikle elastik bölgede her iki eğilme durumunda başlıklardaki gerilme dağılımlarının oldukça farklı olduğu bilinmektedir. Kuvvetli eksenleri etrafında eğilen kirişlerin başlıklarında hemen hemen ünifom basınç gözlenirken, zayıf eksenleri etrafında eğilen kirişlerin başlıklarının yalnız basınç etkisindeki yarısı doğrusal artan basınç gerilmelerinin etkisindedir. Şekil 2.6'da verilen değerler, Şekil 2.2'de verilen değerlerle karşılaştırıldığında, zayıf eksen etrafında eğilmede tanımlanan sınır narinliklerin kuvvetli eksen etrafında eğilmede tanımlanan başlık sınır narinlikleriyle aynı olduğu görülür. Bu da demektir ki, TÇY (2016), zayıf eksen etrafında eğilmede, başlık sınır narinlikleri açısından oldukça güvenli tarafta kalmaktadır.

TÇY (2016) Bölüm 9.6.2(a)'ya göre, başlıkları kompakt enkesitlerde, yani  $\lambda_f \leq \lambda_{pf} = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$  olan enkesitlerde, yerel burkulma sınır durumunun göz önüne alınmasına gerek yoktur. Buna karşın, başlık parçaları kompakt olmayan olarak sınıflandırılan enkesitlerde, yani başlık narinliği  $\lambda_{pf} < \lambda_f \leq \lambda_{rf} = 1,00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$  olan



enkesitlerde, Bölüm 9.6.2(b) gereğince, yerel burkulma sınır durumunda zayıf eksen etrafında karakteristik eğilme momenti dayanımı ( $M_{ny}$ ),  $M_{py}$  ile  $M_{ry}$  arasında tanımlanmış doğrusal geçiş eğrisi denklemi kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$M_{ny} = M_{py} - (M_{py} - M_{ry}) \left( \frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \quad \text{burada} \quad M_{ry} = 0,7F_y W_{ey} \quad (2.18)$$

Bölüm 9.6.2(c) uyarınca, başlıkları narin ( $\lambda_f > \lambda_{rf}$ ) enkesitli elemanlarda ise karakteristik dayanım aşağıdaki elastik burkulma denklemi kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$M_{ny} = F_{cry} W_{ey} = \frac{0,69E}{(\lambda_f)^2} W_{ey} \quad (2.19)$$

Denklem (2.19)'da tanımlanan elastik kritik gerilme ( $F_{cry}$ ), Denklem (2.8)'de tanımlanan elastik kritik gerilmeyle karşılaştırıldığında, gerilme denklemlerinin aslında çok benzer olduğu, güçlü ekseninde eğilmede plak burkulma katsayısı  $k_c$ 'nin gövdenin narinliğine bağlı olarak değişen bir değer alıyor olmasına karşın, zayıf ekseninde eğilmede bu katsayının yaklaşık olarak güçlü ekseninde eğilmede tanımlanan üst sınır değer olan 0,76'ya eşit alındığı görülmektedir.

#### **2.4. Gövde Düzleminde Kesme Kuvveti Etkisindeki Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları**

Gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli elemanların tasarım ilkeleri TÇY (2016) Bölüm 10.1, 10.2 ve 10.3'te tanımlanmaktadır. Bu tip elemanların "karakteristik kesme kuvveti dayanımı"nın ( $V_{ny}$ ) hesabında Bölüm 10.3'te tanımlanan çekme alanı katkısının kullanılabilmesi için aynı bölümde belirtilen koşullara uygun düşey rijitlik levhalarının kullanılarak etkin gövde panellerinin oluşması sağlanmalıdır. Bölüm 1.3'te belirtildiği gibi, rijitlik levhaları pratikte çoğunlukla derin ve ince gövdeli yapma profillerde kullanılmaktadır. Bu tezin kapsamında yalnız hadde profiller ele alındığı için, tasarım tablolarında, elemanların kesme kuvveti dayanımları rijitlik levhaları kullanılmadığı varsayılarak hesaplanacak, gövde burkulmasının elemanın kesme davranışını belirleyen bir sınır durum olduğunun fark edilmesi durumunda, tabloya elemanın kesme kuvveti dayanımının rijitlik levhalarının kullanımıyla artırılabilirliği notu düşülecektir. Bu nedenle, tezin bu bölümünde çekme alanı katkısının ele alındığı bölüme atıf yapılmayacaktır.

TÇY (2016) Bölüm 9'da, bir çelik yapı elemanının karakteristik eğilme momenti dayanımının ilgili sınır durumlar için ayrı ayrı hesaplanan karakteristik dayanımlardan en küçüğüne eşit olacak şekilde belirlenmesi gerektiği belirtilmiştir. Bunun en önemli nedeni, yönetmelikte eğilme momenti etkisindeki elemanların karakteristik dayanımlarının her bir sınır durum için farklı denklemlerle tanımlanıyor olmasıdır. Bölüm 1.3 ve Bölüm 1.4'te belirtildiği gibi, kesme kuvveti etkisindeki çelik yapı elemanlarında iki temel sınır durum tanımlanmaktadır: akma ve yerel burkulma. TÇY (2016) Bölüm 10'da, Bölüm 9'un aksine, kesme kuvveti etkisindeki elemanların karakteristik dayanımlarını her bir sınır durum için farklı denklemlerle tanımlanmamaktadır. Bunun yerine, yerel burkulma sınır durumu için tanımlanan dayanım, akma sınır durumu için tanımlanan dayanımın  $C_{v1}$  ve  $C_{v2}$  sembolleriyle ifade edilen katsayılardan ilgili olanıyla çarpılmasıyla elde edilmektedir.  $C_{v1}$  ve  $C_{v2}$  katsayılarının değerlerinin bire eşit olduğu durum akma sınır durumuna karşılık gelmektedir. Tezin bu bölümünde bir önceki bölümlerle uyumlu olmak amacıyla, TÇY (2016)'da sunulan tasarım denklemleri eleman için tanımlanan her bir sınır durum için ayrı ayrı ifade edilecektir. Elemanın karakteristik kesme kuvveti dayanımını bulmak için her bir sınır durum için hesaplanan dayanımlardan küçük olan alınmalıdır.

#### 2.4.1. Dayanım ve güvenlik katsayıları

TÇY (2016) Bölüm 10.1 ve 10.2(a)'da, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli "hadde" profillerin "tasarım kesme kuvveti dayanımı" ( $\phi_v V_{ny}$ ) veya "güvenli kesme kuvveti dayanımı" ( $V_{ny}/\Omega_v$ ) hesaplanırken kullanılması gereken dayanım ve güvenlik katsayıları ( $\phi_v$  ve  $\Omega_v$ ) şu şekilde tanımlanmıştır;

$$\frac{h}{t_w} \leq 2,24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{ise} \quad \phi_v = 1,00 \quad \text{ve} \quad \Omega_v = 1,50 \quad (2.20)$$

$$\frac{h}{t_w} > 2,24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{ise} \quad \phi_v = 0,90 \quad \text{ve} \quad \Omega_v = 1,67 \quad (2.21)$$

Denklem (2.20) ve (2.21)'den anlaşılacağı gibi, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli hadde profiller için tanımlanan dayanım/güvenlik katsayıları gövdenin narinliğine bağlı olarak değişmektedir.

#### 2.4.2. Gövdenin kesme etkisinde akması sınır durumu

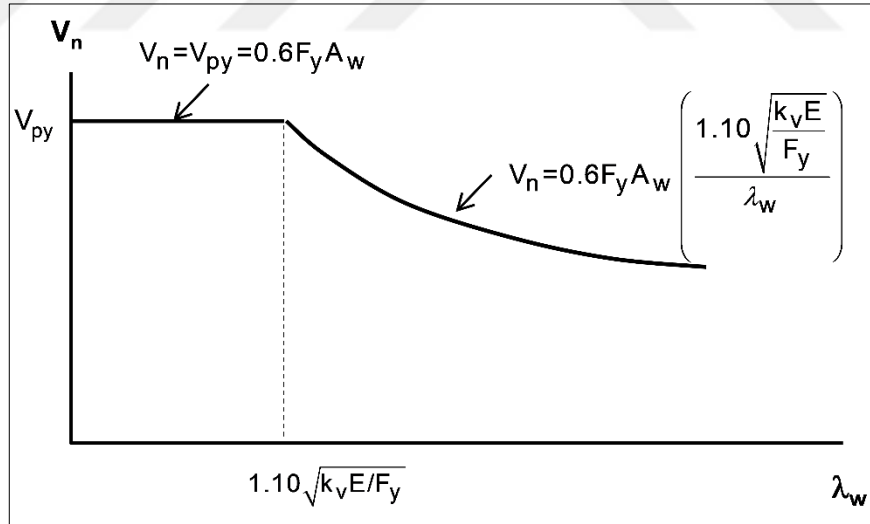
TÇY (2016) Bölüm 10.2.1'e göre, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli "hadde" profillerinin, çekme alanı katkısı göz önüne alınmadığında, karakteristik kesme kuvveti dayanımı ( $V_{ny}$ ) aşağıdaki denklemle hesaplanabilir;

$$V_{ny} = V_{py} = 0,6F_y A_w \quad (2.22)$$

Denklem (2.22)'de  $A_w$  gövde alanı olup enkesit yüksekliği ( $d$ ) ile gövde kalınlığı ( $t_w$ ) çarpılarak hesaplanmalıdır. Denklem (2.22)'in Denklem (1.11)'la aynı olduğu görülebilir.

#### 2.4.3. Gövdenin kesme etkisinde burkulması sınır durumu

TÇY (2016) Bölüm 10.2.1(b)'ye göre, çekme alanı katkısı göz önüne alınmadığında, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli çelik yapı elemanlarının yerel burkulma sınır durumunda karakteristik kesme kuvveti dayanımı ( $V_n$ ) Şekil 2.7'de özetlendiği gibi hesaplanmalıdır.



Şekil 2.7. TÇY (2016)'da, gövde düzlemindeki kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli hadde profillerin yerel burkulma sınır durumunda kesme kuvveti dayanımı hesabı için verilen tasarım eğrisi [17]

Şekil 2.7'ye göre, gövde narinliği ( $\lambda_w = h/t_w$ ),  $\lambda_{pv} = 1,10\sqrt{k_v E/F_y} \cong 2,54\sqrt{E/F_y}$  sınır narinlikten küçükse, gövdenin kesme etkisinde burkulması sınır durumunun tasarıma dahil edilmesine gerek yoktur. Sınır narinlik hesaplanırken TÇY (2016) Bölüm

10.2.1’de, “gövde levhası burkulma katsayısı” olarak tanımlanan  $k_v$  için, aynı bölümde gövdede rijitlik levhalarının kullanılmadığı durumlar için verilen 5,34 değeri kullanılmıştır. Gövde narinliğinin sınır narinlikten daha büyük olduğu durumda gövde düzleminde karakteristik kesme kuvveti dayanımı ( $V_{ny}$ ), aşağıdaki denklemden hesaplanmalıdır;

$$V_{ny} = 0,6F_y A_w C_{v1} = 0,6F_y A_w \frac{1,10\sqrt{k_v E/F_y}}{\lambda_w} = 1,525 \frac{\sqrt{EF_y}}{\lambda_w} A_w \quad (2.23)$$

Sınır narinlikte olduğu gibi, Denklem (2.23)’te de, gövdede rijitlik levhalarının kullanılmadığı kabul edilerek,  $k_v=5,34$  değeri kullanılmıştır.

Şekil 2.7’de sunulan dayanım eğrisi incelendiğinde, TÇY (2016)’nın gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki bir çelik yapı elemanının kesme kuvveti dayanımını belirlerken, Bölüm 1.3.2’de belirtildiği gibi, özellikle narin gövdeli (yani gövde burkulmasının elastik bölgede gözlemlendiği) elemanlarda, gövdenin burkulma sonrası dayanımının tasarıma dahil edildiği görülebilir.

TÇY (2016) Bölüm 10.2.1 (a)’da I-enkesitli hadde profilleri için özel bir tasarım ilkesi sunulmuştur. Yönetmelik, bu tip hadde profillerin narinliğinin  $2,24\sqrt{E/F_y}$  sınır değerinden küçük olduğu durumlarda, “gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı”  $C_{v1}$ ’in değerinin 1,0 olarak alınabileceğini belirtmektedir. Aksi durumda Bölüm 10.2.1 (b)’ye göre hesap yapılmalıdır.

## **2.5. Başlıklarına Paralel Düzlemde Kesme Kuvveti Etkisindeki Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar İçin Tasarım Kuralları**

Başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli elemanların tasarım ilkeleri TÇY (2016) Bölüm 10.7’de verilmektedir. Bu bölümde, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki elemanların tasarımında olduğu gibi, “karakteristik kesme kuvveti dayanımı”nın ( $V_{nx}$ ) hesabında elemanın davranışını belirleyen iki sınır durum (akma ve yerel burkulma) için ayrı tasarım formülleri tanımlanmamıştır. Bunun yerine, yerel burkulma sınır durumu için tanımlanan dayanım, akma sınır durumu için tanımlanan dayanımın “kayma etkisinde başlık burkulma katsayısı” olarak adlandırılan  $C_{v2}$  katsayısıyla çarpılmasıyla elde edilmektedir. Tezin bu bölümünde bir önceki bölümdeki gibi, TÇY (2016)’da sunulan tasarım denklemleri eleman için tanımlanan her bir sınır durum için ayrı ayrı ifade

edilecektir. Elemanın karakteristik dayanımını bulmak için elemanın davranışını belirleyen sınır durumdaki dayanım alınmalıdır.

### 2.5.1. Dayanım ve güvenlik katsayıları

TÇY (2016) Bölüm 10.1'e göre, başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli çelik yapı elemanlarının "tasarım kesme kuvveti dayanımı" ( $\phi_v V_{nx}$ ) veya "güvenli kesme kuvveti dayanımı" ( $V_{nx}/\Omega_v$ ) hesaplanırken kullanılması gereken dayanım ve güvenlik katsayıları ( $\phi_v$  ve  $\Omega_v$ ) şu şekilde tanımlanmıştır;

$$\phi_v = 0,90 \quad \text{ve} \quad \Omega_v = 1,67 \quad (2.24)$$

Denklem (2.24)'ten anlaşılacağı gibi, kesme kuvvetinin başlıklara paralel etkimesi durumunda dayanım/güvenlik katsayıları enkesit özelliklerinden bağımsızdır.

### 2.5.2. Başlıkların kesme etkisinde akması sınır durumu

TÇY (2016) Bölüm 10.7'ye göre, başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli çelik yapı elemanlarının, çekme alanı katkısı göz önüne alınmadığında, karakteristik kesme kuvveti dayanımı ( $V_{nx}$ ) aşağıdaki denklemle hesaplanabilir;

$$V_{nx} = V_{px} = 1,2F_y b_f t_f \quad (2.25)$$

Denklem (2.25)'in Denklem (1.13)'le aynı olduğu görülebilir.

### 2.5.3. Başlıkların kesme etkisinde burkulması sınır durumu

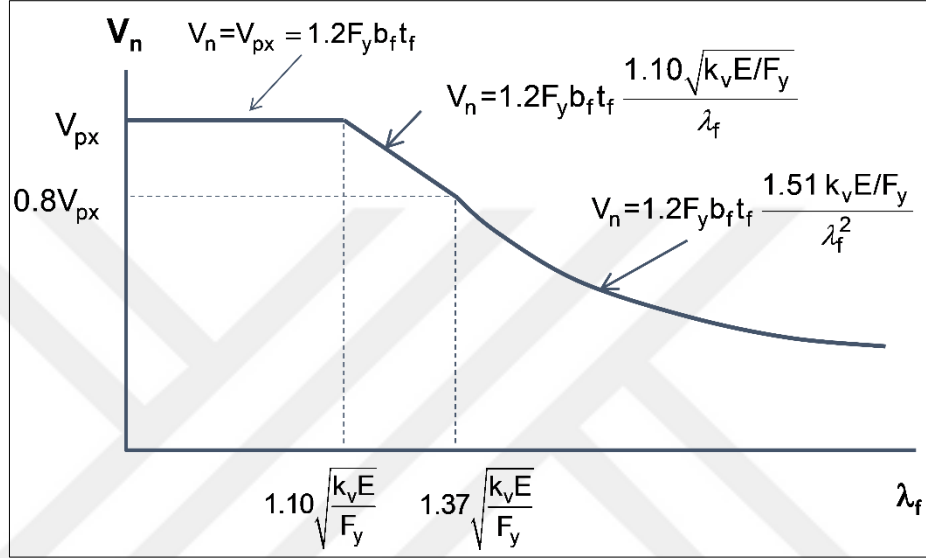
TÇY (2016) Bölüm 10.7'ye göre, başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli çelik yapı elemanlarının yerel burkulma sınır durumunda karakteristik kesme kuvveti dayanımı Şekil 2.8'de gösterildiği gibi hesaplanmalıdır.

Şekil 2.8'e göre, başlık narinliği ( $\lambda_f = b_f/2t_f$ ), değeri  $1,10\sqrt{k_v E/F_y} \cong 1,20\sqrt{E/F_y}$  olan alt sınır narinlikten küçükse, başlıkların kesme kuvveti etkisinde burkulması sınır durumunun tasarıma dahil edilmesine gerek yoktur. Alt sınır narinlik hesaplanırken TÇY (2016) Bölüm 10.7'gereğince, başlık levhası burkulma katsayısı  $k_v = 1,2$  olarak alınmıştır. Başlıkların narinliklerinin alt sınır değerden büyük ancak üst sınır değer olan  $1,37\sqrt{k_v E/F_y} \cong 1,50\sqrt{E/F_y}$  'den küçük olması durumunda, başlıklara paralel

düzlemde kesme kuvveti dayanımı ( $V_{nx}$ ), aşağıda verilen elastik olmayan burkulma denklemi kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$V_{ny} = 1,2F_y b_f t_f C_{v2a} = 1,2F_y b_f t_f \frac{1,10\sqrt{k_v E/F_y}}{\lambda_f} = 2,89\sqrt{EF_y} t_f^2 \quad (2.26)$$

Sınır narinliklerde olduğu gibi, Denklem(2.26)'da,  $k_v=1,2$  değeri kullanılmıştır.



Şekil 2.8. TÇY (2016)'da, başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli hadde profillerinin yerel burkulma sınır durumunda kesme kuvveti dayanımı hesabı için verilen tasarım eğrisi [17]

Başlıkların narinliklerinin üst sınır değerden de büyük olması durumunda, başlıklara paralel düzlemde kesme kuvveti dayanımı ( $V_{nx}$ ), aşağıda verilen elastik burkulma denklemi kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$V_{ny} = 1,2F_y b_f t_f C_{v2b} = 1,2F_y b_f t_f \frac{1,51k_v E/F_y}{\lambda_f^2} = 2,17 \frac{E}{\lambda_f^2} b_f t_f \quad (2.27)$$

Bölüm 1.4.2'de belirtildiği gibi, TÇY (2016)'da zayıf eksenlerinde eğilen narin başlıklı kirişler için yeterince deneysel veri olmaması nedeniyle başlıklara paralel düzlemde kesme kuvveti dayanımı hesabında elemanın burkulma sonrası dayanımı tasarıma dahil edilmemektedir.

### **3. TS 648'DE ÇİFT SİMETRİ EKSENLİ ENKESİTLİ ÇELİK EĞİLME ELEMANLARI İÇİN TANIMLANAN TASARIM İLKELERİ**

TS 648'de, eğilmeye çalışan dolu gövdeli kirişlerin tasarım kuralları Bölüm 3.3'te tanımlanmaktadır. Bu bölümde, "stabilite tahkikleri" başlığı altında, gövdeleri düzleminde eğilme etkisi altındaki kirişlerin yanal burkulma emniyet gerilmesi hesabı için tasarım denklemleri sunulmaktadır. Bu bölümdeki tasarım kurallarının herhangi bir kesit sınıflandırması yapılmaksızın eksenel simetrisi olan bütün kirişlerde kullanılabilirdiği belirtilmektedir. Diğer bir deyişle, TS 648 basit eğilme etkisindeki "hadde" profillerin tasarımında yanal burkulma sınır durumunu dikkate almakta buna karşın yerel burkulma sınır durumunu dikkate almamaktadır. TS 648'de zayıf eksenleri etrafında eğilme momenti etkisindeki dolu gövdeli kirişler için de özel tasarım denklemleri bulunmamaktadır. Yalnız, eksenel basınç ve eğilmenin bileşik etkisindeki elemanların tasarım denklemlerini içeren bölümde (TS 648 Bölüm 3.4) zayıf ekseninde eğilme dolaylı olarak geçmektedir.

Benzer şekilde, TS 648'de kesme kuvveti etkisindeki çelik yapı elemanları için özel tasarım kuralları sunulmamaktadır. TS 648 Bölüm 2.3.5'te, "boyutlandırmaya esas olan enkesitler" başlığı altında kayma gerilmesi hesabında gövde alanı kullanılması gerektiği; gövdede oluşan kayma gerilmesinin ortalama değerinin kesme kuvvetinin gövde alanına bölünmesiyle elde edilebileceği belirtilmektedir. Ancak, burada sadece gövde düzleminde etkiyen kesme kuvveti dikkate alınmakta, başlıklarına paralel kesme kuvveti etkisindeki elemanlar için kesme alanı tanımlanmamaktadır.

TÇY (2016)'dan farklı olarak, TS 648 Bölüm 4.2'de, dolu gövdeli yapı elemanlarının gövdelerinde oluşan ortalama kayma gerilmesinin kayma emniyet gerilmesinin yarısını aşması durumunda "kıyaslama gerilmesi" kontrolü yapılması şart koşulmaktadır. Kesite etkiyen kesme kuvvetinin şiddetinin oldukça yüksek olduğu durumlarda yapılması istenen bu kontrol "Von Misses Akma Kriteri"ni kullanarak asal gerilmelerin hesaplanması ilkesine dayanmaktadır. Yönetmelik'te, hadde profillerin tasarımında kesme ve eğilmenin bileşik etkisi göz önüne alınmadığından, TS 648'de tanımlanan tasarım kriterleri TÇY (2016)'da tanımlananlarla karşılaştırılırken kıyaslama gerilmesi hesabı yapılmayacaktır.

Tezin bu bölümünde, sıcak haddelenmiş çift simetri eksenli I-enkesitli çelik eğilme elemanları için TS 648'de verilen tasarım denklemleri ve kuralları sunulacaktır. Temel tasarım denklemlerine geçmeden önce standartta kullanılan tasarım yaklaşımı ve ilgili yük birleşimleri özetlenecektir. TÇY (2016)'yla uyumlu olması için, bu bölümde eğilme momenti nedeniyle kesitte oluşan normal gerilmeler için TS 648'de kullanılan  $\sigma_b$  sembolü yerine  $f_b$  sembolü; kesme kuvveti nedeniyle kesitte oluşan kayma gerilmeleri için ise  $\tau$  sembolü yerine  $f_v$  sembolü kullanılacaktır. Benzer şekilde, çekme emniyet gerilmesi için  $\sigma_{\text{çem}}$  yerine  $F_t$ , basit eğilmede basınç emniyet gerilmesi için  $\sigma_B$  yerine  $F_B$ , kayma emniyet gerilmesi için  $\tau_{\text{em}}$  yerine  $F_v$  sembolleri kullanılacaktır. Malzemenin akma sınırı için  $\sigma_a$  yerine  $F_y$ , çekme dayanımı için ise  $\sigma_d$  yerine  $F_u$  kullanılacaktır. TS 648 Çizelge 1'de elastisite modülünün  $E=206182$  MPa olarak tanımlandığı görülebilir. Ancak, bu tezde, elde edilecek sonuçların TÇY (2016) ile uyumlu olması amacıyla, elastisite modülü bu yönetmelikte tanımlandığı gibi  $E=200000$  MPa olarak kullanılacaktır. Benzer şekilde, akma sınırları 235 ve 353 MPa olarak verilen Fe 37 ve Fe 52 çeliklerinin TÇY (2016)'da S235 ve S355 olarak isimlendirilen yapısal çeliklere karşılık geldiği kabul edilerek, malzemelerin akma sınırları bu yönetmelikte tanımlandığı gibi (235 ve 355 MPa olarak) kullanılacaktır.

### 3.1. Tasarım Yaklaşımı ve İlgili Yük Birleşimleri

TS 648'de tanımlanan tasarım ilkelerinin pek çoğu Emniyet Gerilmeleri (EG) yöntemi temel alınarak hazırlanmıştır. Bu yöntem, "çalışma" yükleri etkisinde yapısal çelik elemanlarda oluşan gerilmelerin ( $f$ ), belirli emniyet katsayıları kullanılarak hesaplanan emniyet gerilmelerini ( $F_{\text{all}}$ ) aşmayacak şekilde tasarlanması ilkesine dayanmaktadır [3]. EG yöntemi için yapısal güvenlik koşulu aşağıdaki denklemle ifade edilebilir,

$$f \leq F_{\text{all}} \quad (3.1)$$

Bu tasarım yönteminde, yapısal elemanlar için tanımlanan emniyet gerilmeleri, çoğu zaman çeliğin karakteristik akma gerilmesi ( $F_y$ ), çekme dayanımı ( $F_u$ ) veya elemanın burkulma gerilmesi ( $F_{cr}$ ), elemanın davranışıyla uyumlu emniyet katsayılarına ( $\Omega$ ) bölünerek hesaplanmaktadır,

$$F_{\text{all}} = \frac{(F_y \text{ veya } F_u \text{ veya } F_{cr})}{\Omega} \quad (3.2)$$



TS 648 Bölüm 2.4.1’de “enkesitler boyutlandırıldıktan sonra en çok etkili enkesitlerde gerilmelerin en büyük değerleri hesaplanır ve emniyet gerilmeleriyle karşılaştırılır” olarak tanımlanan temel tasarım felsefesinin Denklem (3.1)’de ifade edilen yapısal güvenlik koşuluyla aynı olduğu görülebilir.

TS 648 Bölüm 2.3.2’de, bir yapıya etkiyen yükler esas ve ilave (tali) yükler olarak ikiye ayrılmaktadır. Esas yükler, öz yükler ile munzam ve hareketli yükleri, kar yükünü ve makinelerin kitle kuvvetlerini kapsar. İlave yükler ise rüzgar, deprem ve ısı etkileri ile yatay yanal kuvvetleri kapsar. TS 648 Bölüm 2.3.3’e göre, dayanım kontrollerinde iki farklı yükleme durumu dikkate alınmalıdır. “EY yükleme” olarak tanımlanan yüklemelerde sadece esas yükler; “EİY yükleme” olarak tanımlanan yüklemelerde ise hem esas hem de ilave yükler toplanmalıdır. TS 648 Bölüm 2.3.4’te, en büyük enkesitleri gerektiren yükleme, “boyutlandırmaya esas olan yükleme hali” olarak tanımlanmaktadır. Yüklemelerin tanımlarından da anlaşılacağı gibi, TS 648’de yükler TÇY (2016)’da tanımlanan GKT yöntemindeki gibi artırılmadan toplanmaktadır.

Genel olarak, TS 648’de tasarım denklemleri kesitteki en büyük gerilmeler ve ilgili emniyet gerilmeleri cinsinden tanımlanırken, TÇY (2016) GKT yönteminde tasarım denklemleri güvenli ve gerekli dayanımlar (yani, kesit zorları) cinsinden tanımlanmaktadır. Bu tezde, tasarım denklemlerini daha kolay karşılaştırabilmek amacıyla, TS 648’de gerilme cinsinden verilen denklemler ilgili kesit zorları cinsinden yeniden yazılacaktır. Örneğin kuvvetli eksenleri etrafında eğilme momenti etkisindeki çelik yapı elemanlarının tasarımında, enkesitte oluşan en büyük basınç gerilmesi ( $f_{bx}$ ), Bölüm 1.1.1’de özetlendiği gibi, elastik eğilme denklemi ( $f_{bx} = M_x/W_{ex}$ ) kullanılarak, enkesitteki eğilme momenti ( $M_x$ ) cinsinden yazılarak yanal burkulma emniyet gerilmesine eşitlenecek ( $F_{Bx}$ ) ve bu eşitlikten kesitin emniyetle taşıyabileceği en büyük eğilme momenti hesaplanacaktır. Bu şekilde elde edilen eğilme momenti, bir tür “emniyetli dayanım” olacağı için, TÇY (2016) GKT yönteminden elde edilen güvenli dayanımla ( $M_{nx}/\Omega_b$ ) karşılaştırılabilir. Bu tezde, TS 648’e göre, elemanın en çok zorlanan enkesitinde hesaplanan ve emniyetle taşıyabileceği en büyük eğilme momenti, elemanın “emniyetli eğilme momenti dayanımı” olarak adlandırılacak ve tasarım denklemlerinde güçlü ekseninde eğilmede  $M_{x,all}$ , zayıf ekseninde eğilmede ise  $M_{y,all}$  sembolleriyle ifade edilecektir. Benzer şekilde, elemanın en çok zorlanan enkesitinde hesaplanan ve emniyetle taşıyabileceği en büyük kesme kuvveti, elemanın “emniyetli kesme kuvveti dayanımı” olarak adlandırılacak ve gövde düzleminde kesmede  $V_{y,all}$ , başlıklara paralel düzlemde kesmede ise  $V_{x,all}$  sembolleriyle ifade edilecektir.

### 3.2. Kuvvetli Eksenleri Etrafında Eğilen Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları

TS 648, daha kesin hesap yöntemleriyle belirlenmediği müddetçe, eksenel simetrisi olan ve gövde düzleminde yüklenen kirişlerde basınç emniyet gerilmesi ( $F_{Bx}$ ) hesabı için, Bölüm 3.3.4.2'de iki tasarım denklemi sunmaktadır. Bu denklemlerden birinin kullanılabilmesi için enkesitin basınç başlığının dolu ve yaklaşık olarak dikdörtgen enkesite sahip olması ve ayrıca basınç başlığının enkesitinin çekme başlığı enkesitinden daha ufak olmaması gerekmektedir. İkinci denklemle tanımlanan emniyet gerilmesi için ise herhangi bir koşul tanımlanmamıştır. TS 648, her iki tasarım denkleminin kullanılabilirdiği durumlarda, basınç emniyet gerilmesi ( $F_{Bx}$ ) olarak iki denklemden elde edilen emniyet gerilmelerinden ( $F_{Bx1}$  ve  $F_{Bx2}$ ) büyüğünün alınmasına izin vermektedir. İlgili bölümde ayrıca yanal burkulma emniyet gerilmesinin değerinin,  $0,60F_y$  değerini aşamayacağı da belirtilmektedir. Bu tezin kapsamında ele alınan çelik yapı elemanlarının tamamı çift simetri eksenli I-enkesitli hadde profilleri olduğu için, TS 648'de belirtilen enkesit koşulunun sağlandığı kabul edilerek yanal burkulma emniyet gerilmesi her iki tasarım denklemi kullanılarak hesaplanacak ve büyük olan değer tasarımda kullanılacaktır. Dolayısıyla, kuvvetli eksenleri etrafında eğilen çift simetri eksenli I-enkesitler için TS 648'de tanımlanan tasarım koşulu şu şekilde ifade edilebilir;

$$f_{bx} \leq F_{Bx} \leq 0,6F_y \quad (3.3)$$

Yanal burkulma emniyet gerilmesi ( $F_{Bx}$ ) Denklem (3.4) ve Denklem (3.5)'ten hesaplanabilir.

$$F_{Bx1} = \frac{84000C_b}{L_b d / A_f} \text{ (MPa)} \quad (3.4)$$

$$F_{Bx2} = \begin{cases} \frac{L_b}{i_{ts}} \leq \sqrt{\frac{3000000C_b}{F_y}} \text{ ise } \left[ \frac{2}{3} - F_y \frac{(L_b / i_b)^2}{9000000C_b} \right] F_y \text{ (MPa)} \\ \frac{L_b}{i_{ts}} > \sqrt{\frac{3000000C_b}{F_y}} \text{ ise } \frac{1000000C_b}{(L_b / i_b)^2} \text{ (MPa)} \end{cases} \quad (3.5)$$

Denklem (3.4) ve Denklem (3.5)'te  $A_f$  başlık alanı,  $d$  enkesit yüksekliği,  $L_b$  kirişin "basınç başlığında dönmeye ve yanal deplasmana karşı mesnetleri arasındaki mesafe",  $i_{ts}$  "basınç başlığı ve gövdenin basınç bölgesinin 1/3'ünün gövde eksenine

göre atalet yarıçapı"dır. Eğrilikler ihmal edilerek,  $i_{ts}$  değeri aşağıdaki denklemden hesaplanabilir,

$$i_{ts} = \sqrt{\frac{\left( b_f^3 t_f + \frac{(d-2t_f)}{6} t_w^3 \right)}{12 \left( b_f t_f + \frac{(d-2t_f)}{6} t_w \right)}} \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'da verilen ifadenin yaklaşık olarak Denklem (2.13)'te verilen ifadeye eşit olduğu görülebilir.

Denklem (3.4) ve Denklem (3.5)'te bulunan  $C_b$  katsayısının hesabı için ise TS 648'de aşağıdaki denklem verilmiştir,

$$C_b = 1,75 + 1,05 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) + 0,3 \left( \frac{M_1}{M_2} \right)^2 \leq 2,3 \quad (3.7)$$

Denklem (3.7)'de  $M_1$  ve  $M_2$  kirişin yanal desteklerinin olduğu noktadaki uç momentlerinden sırasıyla küçük ve büyük olandır. Momentlerin oranının işareti iki yönlü eğilmede (çift eğrilikli kirişlerde) pozitif, tek yönlü eğilmede (tek eğrilikli kirişlerde) negatif olmalıdır. TS 648, yanal mesnetler arasında herhangi bir noktadaki momentin uç momentlerinden büyük olması durumunda  $C_b$ 'nin değerinin 1,0 olarak alınması gerektiğini belirtmektedir. TÇY (2016)'da olduğu gibi, TS 648'de de  $C_b$  katsayısı kiriş üzerindeki moment yayılışının olumlu katkısını tasarıma dahil etmek için kullanılmıştır ve en küçük değeri 1,0'dir. Bu tezde aksi belirtilmediği müddetçe, karşılaştırmalarda kolaylık sağlamak ve güvenli tarafta kalmak için  $C_b=1$  olarak kabul edilecektir.

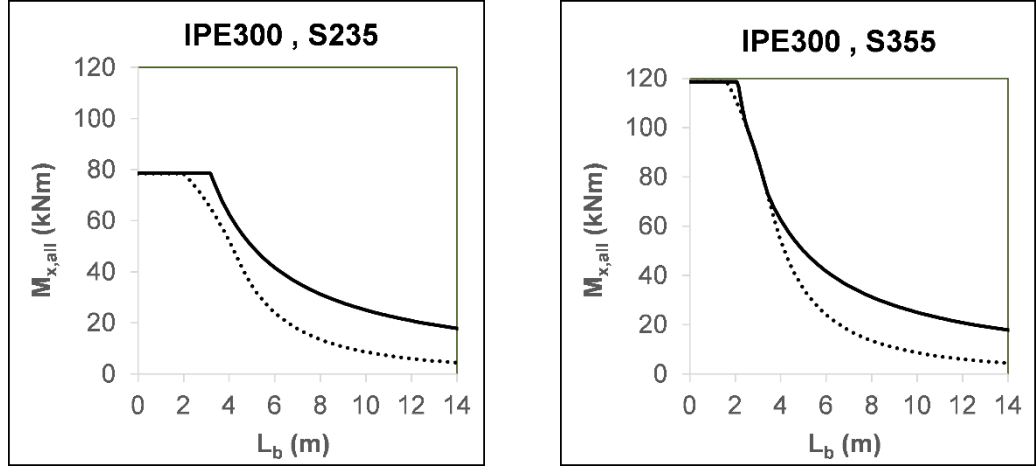
Denklem (3.4) ve Denklem (3.5)'te akma gerilmesi MPa cinsinden girilmelidir. Bu durumda, bu denklemlerden elde edilecek emniyet gerilmelerinin birimleri de MPa cinsinden olacaktır. TS 648'de ilgili tasarım denklemleri kgf ve cm birimleri cinsinden tanımlanmıştır. Bu tezde Newton ve mm birimlerinin (SI birim sisteminin) kullanılmasına karar verildiği için Denklem (3.4) ve Denklem (3.5)'te verilen tasarım denklemlerinde birim çevrimi yapılmıştır. Kgf birimini Newton'a çevirirken, TS 498 (1987)'de [18] önerildiği gibi, çevirmelerde kolaylık sağlaması bakımından, 1kgf = 9,80665 Newton değeri yerine 1kgf = 10 N değeri kullanılmıştır.

TÇY (2016) GKT yönteminden elde edilen güvenli eğilme momenti dayanımıyla ( $M_{nx}/\Omega_b$ ) karşılaştırabilmek amacıyla, Denklem (3.3)'te verilen tasarım denklemi ilgili kesit zoru (eğilme momenti) cinsinden yazılabilir. Bunun için, elemanın en çok zorlanan enkesitinde oluşan en büyük basınç gerilmesi ( $f_{bx}$ ), Bölüm 1.1.1'de özetlendiği gibi, elastik eğilme denklemi ( $f_{bx} = M_x/W_{ex}$ ; burada  $M_x$  ve  $W_{ex}$  kuvvetli eksen etrafında eğilmede moment ve ilgili elastik mukavemet momentidir) kullanılarak enkesitteki eğilme momenti ( $M_x$ ) cinsinden yazılarak emniyet gerilmesine ( $F_{Bx}$ ) eşitlenmeli ve bu eşitlikten kesitin emniyetle taşıyabileceği en büyük eğilme momenti, yani "kuvvetli ekseninde eğilmede emniyetli eğilme momenti dayanımı ( $M_{x,all}$ )" hesaplanmalıdır.

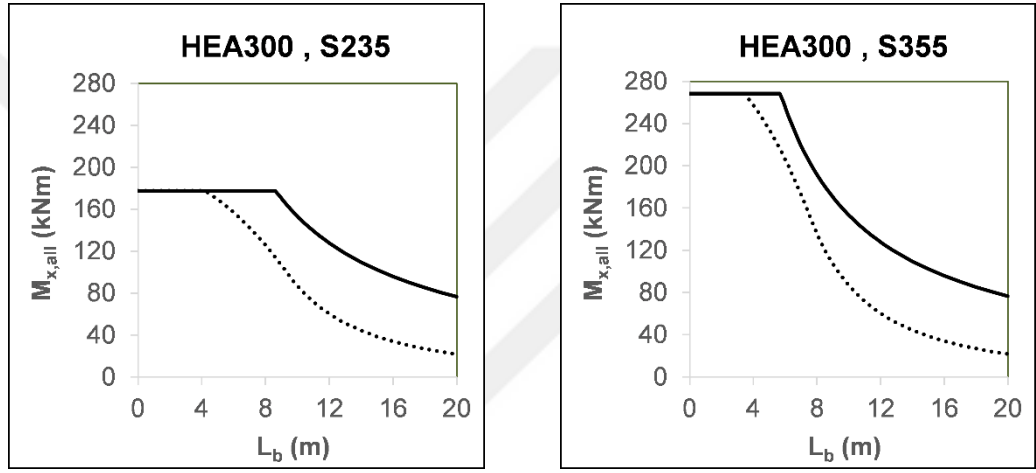
$$f_{bx} = \frac{M_x}{W_{ex}} \leq F_{Bx} \leq 0,6F_y \quad \text{dolayısıyla} \quad M_{x,all} = F_{Bx} W_{ex} \leq 0,6F_y W_{ex} \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'deki yanal burkulma emniyet gerilmesi ( $F_{Bx}$ ) Denklem (3.4) ve Denklem (3.5)'ten elde edilen değerlerden büyüğü olarak alınacaktır. Denklem (3.8)'den fark edilebileceği gibi, TS 648 "emniyetli eğilme momenti dayanımı"nı akma momentinin %60 ile sınırlandırmaktadır.

Şekil 3.1'de kuvvetli eksenleri etrafında eğilen IPE300 ve HEA300 enkesitli çelik yapı elemanlarının TS 648'e göre hesaplanan emniyetli eğilme momenti dayanımlarının ( $M_{x,all}$ ) yanal/burkulma stabilite bağlantısıyla desteklenmeyen boyla (bu tezde "elemanın burkulma boyu" olarak da adlandırılacaktır) ( $L_b$ ) değişimleri çizilmiştir. Grafikler hem S235 hem de S355 çeliği için çizilmiştir. Grafiklerde düz çizgiler, TS 648'de tanımlandığı gibi,  $F_{Bx}$  hesabında  $F_{Bx1}$  ile  $F_{Bx2}$ 'in büyüğü alınarak hesaplanan dayanım değerlerini göstermektedir. Şekil 3.1'de düz çizgiyle gösterilen değişimler incelediğinde, TS 648'in de belli bir sınır boya kadar emniyetli dayanım hesabında yanal burulmalı burkulma sınır durumunu dikkate almadığı görülmektedir. Bu durumda emniyetli dayanım  $M_{x,all,max} = 0,6F_y W_{ex}$ 'e eşit olmaktadır. Örneğin, yanal burkulma tehlikesi olmayan, S235 çelik kaliteli IPE300 enkesitli bir çelik yapı elemanının emniyetli dayanımı  $M_{x,all,max} = 0,6 \times 235 \times 557 \times 10^{-3} = 78,5$  kNm'dir. Aslında, TÇY (2016)'da  $L_p$  olarak adlandırılan plastik sınır boy TS 648'in tasarım denklemlerinden de elde edilebilir. Bunun için, emniyet gerilmesi  $0,6F_y$ 'ye eşitlenmelidir. Ancak, TS 648, iki farklı emniyet gerilmesinden büyüğünün kullanılmasına izin verdiği için,  $L_p$  sınırı belirlenirken önce hangi emniyet gerilmesi denklemi kullanılacağına karar verilmelidir. Bu amaçla, emniyetli dayanımlar yalnız  $F_{Bx2}$  kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 3.1'de noktalı çizgilerle çizilmiştir.



(a) IPE300



(b) HEA300

Şekil 3.1.  $C_b=1$  için, kuvvetli eksenlerinde eğilen (a) IPE300 ve (b) HEA300 enkesitli elemanların emniyetli eğilme momenti dayanımlarının elemanların "burkulma" boylarıyla değişimleri (Noktalı çizgiler,  $F_{Bx}=F_{Bx2}$  kabulüyle çizilmiştir).

Şekil 3.1b'den görülebileceği gibi, HEA300 enkesitli çelik yapı elemanının kuvvetli ekseninde eğilmede emniyetli moment dayanımı hesaplanırken emniyet gerilmesi hem S235 hem de S355 çeliği için  $F_{Bx}=F_{Bx1} \leq 0,6F_y$  çıkmıştır. Benzer bir durum, S235 çelik kaliteli ve IPE300 enkesitli eleman için de geçerlidir. S355 çelik kaliteli ve IPE300 enkesitli elemanda ise kiriş boyu yaklaşık olarak 2,5 m ile 3,5 m arasındayken  $F_{Bx}=F_{Bx2}$  olmaktadır. Ancak, bu durumda dahi sabit moment bölgesinin sınırını (yani,  $L_p$  boyunu)  $F_{Bx1}$  denklemiyle hesaplanan emniyet gerilmesi belirlemektedir. Denklem (3.4)'te verilen emniyet gerilmesi  $0,6F_y$ 'ye eşitlenirse, TS 648'e göre,  $L_p$ 'nin değeri belirlenebilir;

$$F_{Bx1} = \frac{84000C_b}{L_p d / A_f} = 0,6F_y \quad \text{dolayısıyla} \quad L_p = \frac{140000C_b}{F_y d / A_f} \quad (3.9)$$

Denklem (3.9)'dan  $L_p$ 'nin yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesiyle ters orantılı olduğu görülebilir. S235, S275 ve S355 çelik kalitesindeki IPE3000 enkesitli eğilme elemanlarının  $C_b=1$  durumundaki  $L_p$  değerleri sırasıyla 3,19 m, 2,72 m ve 2,11 m olarak hesaplanmıştır.

Yine, Şekil 3.1b'den görülebileceği gibi, emniyet gerilmesinin  $F_{Bx}=F_{Bx1} \leq 0,6F_y$  olduğu durumlarda, TS648, TÇY (2016)'da olduğu gibi bir üst sınır ( $L_r$ ) tanımlanamamaktadır. Denklem (3.4) ile Denklem (3.5) karşılaştırıldığında, TS 648'de,  $F_{Bx2}$  için elastik ve elastik olmayan burkulma durumlarına karşılık gelen iki ayrı denklem tanımlandığı, ancak  $F_{Bx1}$  için burkulmanın türünden bağımsız tek bir denklem tanımlandığı görülmektedir. Tezin kapsamında ele alınan enkesit ve çelik kalitelerinde,  $F_{Bx}=F_{Bx2}$  olan kesitler/çelik sınıfları/boylar belirlenmiştir. S235 çelik sınıfındaki hiç bir kesitte bu durum gözlenmemektedir. S275 çelik kalitesinde, yalnız IPE500, IPE550, IPE600 kesitleri ile HEA1000 kesitlerinde; S355 çelik kalitesinde ise IPE300-600; HEA800-1000 ve HEB1000 kesitlerinde bazı burkulma boylarında bu durum gözlenmektedir (Şekil 3.1a, S355). Ancak, ilgili boylar çelik kalitesi ve enkesit tipi/numarasına göre değişmektedir. Ayrıca, yapılan çalışmada  $C_b=1$  kabul edildiği de unutulmamalıdır. Özet olarak, TS 648'e göre, elastik sınır boy ancak bazı enkesit ve çelik kalitelerinde tanımlanabilir ancak bu durumlarda bile pratik bir tanım yapmak hemen hemen imkansızdır.

### 3.3. Zayıf Eksenleri Etrafında Eğilen Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları

TS 648'de zayıf eksenleri etrafında eğilen elemanlar için özel tasarım denklemleri bulunmamaktadır. Ancak, bu tip elemanlarda yanal burkulma tehlikesi olmadığı düşünüldüğünde, basınç emniyet gerilmesinin ( $F_{By}$ ) kuvvetli eksen etrafında eğilmede üst sınır olarak tanımlanan  $0,6F_y$  değerine eşit olduğu kabul edilebilir. Bu durumda, bir önceki bölümde tanımlandığı gibi, zayıf eksen etrafında eğilme momenti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanının "emniyetli eğilme momenti dayanımı" ( $M_{y,all}$ ),  $0,6F_y$  ile enkesitin zayıf eksen etrafında elastik mukavemet momenti ( $W_{ey}$ ) çarpılarak elde edilebilir;

$$M_{y,all} = 0,6F_y W_{ey} \quad (3.10)$$

### 3.4. Gövde Düzleminde Kesme Kuvveti Etkisindeki Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları

TS 648 Bölüm 4.1’de, kayma emniyet gerilmesinin  $F_v = F_t / \sqrt{3}$  formülünden elde edilebileceği belirtilmektedir. Burada,  $F_t$  çekme emniyet gerilmesi olup, TS 648 Bölüm 3.1.1’de malzemenin akma sınırının ( $F_y$ ) %60’ından ve çekme dayanımının %50’sinden daha büyük olamayacağı belirtilmektedir. Bu tezin kapsamında ele alınan bütün çelik sınıfları için (S235, S275 ve S355),  $0,6F_y < 0,5F_u$  olduğu bilindiğine göre, çekme emniyet gerilmesi  $F_t = 0,6F_y$  olarak ifade edilebilir. Bu durumda, TS 648’e göre, kayma emniyet gerilmesi yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesi ( $F_y$ ) cinsinden şu şekilde ifade edilebilir;

$$F_v = \frac{0,6F_y}{\sqrt{3}} \quad (3.11)$$

TS 648 Bölüm 2.3.5’te, “boyutlandırmaya esas olan enkesitler” başlığı altında gerilme kontrollerinde göz önünde tutulması gereken enkesit değerlerinin listelendiği çizelgede (Çizelge 2), zorlama çeşidinin kesme kuvveti olduğu durumda, kayma gerilmesi hesabında  $F_{gövde}$  sembolüyle ifade edilen (ancak Yönetmelik’le uyumlu olması için bu tezde  $A_w$  sembolüyle ifade edilecek) “gövde alanı” kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Bu durumda, kesitte oluşan ortalama kayma gerilmesi ( $f_{v,ort}$ ) kayma emniyet gerilmesine eşitlenerek, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki I-kesitli bir hadde profili için “emniyetli kesme kuvveti dayanımı” ( $V_{y,all}$ ) Denklem (3.12)’de ifade edildiği gibi elde edilebilir,

$$f_{v,ort} = \frac{V_y}{A_w} \leq F_v = \frac{0,6F_y}{\sqrt{3}} \quad \text{buradan} \quad V_{y,all} = \frac{0,6F_y}{\sqrt{3}} A_w \quad (3.12)$$

Ancak, yönetmelikte gövde alanı ( $A_w$ ) açık bir şekilde tanımlanmamıştır. Pratikteki uygulamalara ve ders notlarına [11] bakıldığında, gövde alanı olarak çoğunlukla başlıkların arasında kalan alanın alındığı görülmektedir. Bu tezde de gövde alanı, başlıkların arasındaki net gövde yüksekliğiyle gövde kalınlığı çarpılarak hesaplanacaktır. Yine pratikteki uygulamalara ve ders notlarına bakıldığında [19], gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli bir hadde profilinde oluşan en büyük kayma gerilmesinin hesabında sıklıkla Denklem (1.8)’de verilen genel elastik kayma gerilmesi denkleminin de kullanıldığı görülmektedir. Çift simetri eksenli I-enkesitli elemanlarda, kuvvetli eksen etrafında eğilmede, en büyük kayma

gerilmelerinin kuvvetli asal eksen üzerinde oluşacağı bilindiğine göre, elemanın “emniyetli kesme kuvveti dayanımı” ( $V_{y,all}$ ), şu şekilde de ifade edilebilir,

$$f_{v,y} = \frac{V_y S_x}{I_x t_w} \leq F_v \quad \text{buradan} \quad V_{y,all} = \frac{0,6F_y}{\sqrt{3}} \frac{2I_x t_w}{W_{px}} \cong 0,693 \frac{I_x t_w}{W_{px}} \quad (3.13)$$

Denklem (3.13)'te  $V_y$ , gövde düzleminde etkiyen kesme kuvvetinin şiddeti;  $f_{v,y}$ ,  $V_y$  nedeniyle enkesitte oluşan en büyük kayma gerilmesi;  $S_x$ , kuvvetli asal eksenin üstünde ya da altında kalan yarım enkesit alanın aynı eksene göre statik alan momenti,  $I_x$ , enkesitin kuvvetli asal eksenine göre atalet momenti ve  $t_w$ , gövde kalınlığıdır. Kuvvetli asal eksene göre simetrik enkesitlerde  $S_x$ 'in enkesitin aynı eksene göre plastik mukavemet momentinin ( $W_{px}$ ) yarısına eşit olduğu bilinmektedir. Denklem (3.13) elde edilirken bu ilişki ( $S_x = W_{px}/2$ ) kullanılmıştır.

Bu tezde, TÇY (2016)'ya göre belirlenen güvenli kesme kuvveti dayanımı, TS 648'e göre belirlenen emniyetli kesme kuvveti dayanımıyla karşılaştırılırken emniyetli dayanımlar hem Denklem (3.12) hem de Denklem (3.13) kullanılarak hesaplanacak, böylece bu iki denklemden elde edilen sonuçlar da karşılaştırılmış olacaktır.

### 3.5. Başlıklarına Paralel Düzlemde Kesme Kuvveti Etkisindeki Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Elemanlar için Tasarım Kuralları

Zayıf eksende eğilme durumunda olduğu gibi, başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki elemanlar için TS 648'de özel tasarım ilkeleri verilmemiştir. Hadde elemanlarında yerel burkulma sınır durumunun ne eğilme momenti etkisinde ne de kesme kuvveti etkisinde tanımlandığı göz önünde bulundurulduğunda, bu tip elemanlarda yapılacak gerilme kontrolünün basit mukavemet temellerine dayanacağı fark edilebilir. Gövde düzleminde kesme durumunda anlatıldığı gibi, Denklem (1.8)'de verilen genel elastik kayma gerilmesi denklemi kullanılarak kesitteki en büyük kayma gerilmesi ( $f_{v,x}$ ) hesaplanarak Denklem (3.11)'de verilen kayma emniyet gerilmesine eşitlenirse, başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki I-kesitli hadde profillerin “emniyetli kesme kuvveti dayanımı” ( $V_{x,all}$ ) belirlenebilir;

$$f_{v,x} = \frac{V_x S_y}{I_y t_f} \leq F_v \quad \text{buradan} \quad V_{x,all} = \frac{0,6F_y}{\sqrt{3}} \frac{8I_y}{(b_f^2 - t_w^2)} \quad (3.14)$$

Denklem (3.14)'te,  $V_x$ , başlıklara paralel düzlemde etkiyen kesme kuvvetinin şiddeti;  $f_{v,x}$ ,  $V_x$  nedeniyle enkesitte oluşan en büyük kayma gerilmesi;  $S_y$ , en büyük kayma



gerilmesinin oluştuğu nokta için hesaplanan statik alan momenti;  $I_y$ , enkesitin zayıf asal eksenine göre atalet momenti;  $b_f$ , başlık genişliği ve  $t_f$ , başlık kalınlığıdır. Zayıf ekseninde eğilen bir elik yapı elemanında en büyük kayma gerilmelerinin başlıkların gövdeyle birleştiği kesitte oluştuğu kabul edilebilir. Bu durumda, eğrilikler ihmal edilirse,  $S_y$  başlığın ucundan başlığın gövdeyle birleştiği kesite kadar olan yarım başlık alanının (yani,  $t_f$  kalınlıklı  $(b_f - t_w)/2$  genişliğindeki dikdörtgen alanın) zayıf asal eksene göre momenti alınarak hesaplanabilir. Burada, moment kolu  $(b_f + t_w)/4$ 'e eşit olup,  $S_y = t_f (b_f^2 - t_w^2) / 8$  olarak bulunacaktır. Denklem (3.14)'te bu ilişki kullanılmıştır.



#### 4. ÇİFT SİMETRİ EKSENLİ I-ENKESİTLİ ÇELİK EĞİLME ELEMANLARI İÇİN TÇY (2016) VE TS 648'DE TANIMLANAN TASARIM İLKELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Tezin bu bölümünde, kuvvetli ya da zayıf eksenleri etrafında eğilen ve Tablo 4.1'de listelenen çift simetri eksenli I-enkesitli çelik hadde profilleri için TÇY (2016)'da ("Yönetmelik" olarak da atıf yapılacaktır) tanımlanan tasarım ilkeleri ve denklemleri TS 648'de ("Standart" olarak da atıf yapılacaktır) tanımlananlarla karşılaştırılacaktır. Böylece hem iki tasarım dokümanı arasındaki temel farklılıklar irdelenecek hem de TS 648'e göre tasarlanmış bir çelik eğilme elemanının TÇY (2016)'ya göre yeterli dayanım ve kararlılığa sahip olup olmadığı belirlenecektir.

Tablo 4.1. Tezin kapsamında ele alınan I-enkesitli Avrupa hadde profilleri

Enkesit Türü	Enkesit Numarası
IPE	80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 270, 300, 330, 360, 400, 450, 500, 550, 600
IPN	80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380, 400, 450, 500, 550, 600
HEA, HEB, HEM	100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 800, 900, 1000

Tablo 4.1'de belirtildiği gibi, tezin kapsamında 18'i IPE ve 21'i IPN olmak üzere toplam 39 I-enkesiti ile her biri 24'er adet üç farklı tür HE enkesiti (HEA, HEB ve HEM) ele alınacaktır. Karşılaştırmalarda, genel olarak, I ve HE enkesitleri ayrı iki grup halinde ele alınacak; aynı gruptaki enkesitler ise enkesit numaralarına göre karşılaştırılacaktır. Örnek olarak, enkesit numarası 300 olan üç HE enkesiti, HEA300, HEB300 ve HEM300'dür ve grafikler bu üç enkesitin değerleri birbirleriyle karşılaştırılabilecek şekilde çizilecektir. HE enkesitlerinin aksine, bazı I enkesitlerinin numaraları çakışmamaktadır. Örneğin, IPE330 ile aynı enkesit numarasına sahip bir IPN enkesiti yoktur. Bu nedenle, I profillerinin kendi aralarında karşılaştırılmaları yapılırken profillerin özellikleri aynı grafik üzerinde çizdiriliyorsa, o grafikte yalnız numaraları ortak olan I enkesitlerinin (16 adet) değerleri sunulacak; ayrı grafiklerde çizdiriliyorsa, bu grafiklerde Tablo 4.1'de listelenen bütün enkesitler dikkate alınacaktır.

Dayanım hesaplarında, üç farklı çelik sınıfı, S235, S275 ve S355, dikkate alınacak, yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesi ( $F_y$ ) olarak her iki tasarım dokümanının denklemlerinde de Yönetmelik'te tanımlanan değerler (sırasıyla, 235, 275 ve 355 MPa olarak) kullanılacaktır. Benzer şekilde, tasarım denklemlerinde yapısal çeliğin elastisite modülü için  $E=200$  GPa değeri kullanılacaktır.

Tasarım denklemlerinin karşılaştırılmasına geçmeden önce, elemanların eğilme davranışlarını daha iyi anlamak ve yorumlamak amacıyla, karşılaştırmalarda kullanılacak profillerin temel enkesit özellikleri karşılaştırılacaktır.

Genel olarak, bu tezde dayanımlar karşılaştırılırken, ilgili kesit zoru etkisinde elemanın TS 648'e göre "emniyetli" dayanımı ile TÇY (2016)'ya göre "güvenli" dayanımı hesaplanacak ve oranlanacaktır. En genel haliyle, bu oran "dayanım oranı" olarak adlandırılacak ve  $\Psi$  sembolüyle gösterilecektir. Örnek olarak, kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti etkisindeki I-enkesitli bir hadde profilinin "emniyetli eğilme momenti dayanımı"nın ( $M_{x,all}$ ), "güvenli eğilme momenti dayanımı"na ( $M_{nx}/\Omega_b$ ) oranı, "kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti dayanım oranı" olarak adlandırılacak ve  $\Psi_{Mx}$  sembolüyle gösterilecektir. Benzer şekilde, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki bir eleman için "gövde düzleminde kesme kuvveti dayanım oranı",  $\Psi_{Vy}$ , emniyetli kesme kuvveti dayanımı" ( $V_{y,all}$ ), "güvenli kesme kuvveti dayanımı"na ( $V_{ny}/\Omega_v$ ) bölünerek hesaplanacaktır. Herhangi bir dayanım oranının 1'den küçük olması, ilgili kesit zoru etkisinde, Standart'a göre yapılan tasarımın, eleman dayanımı (ve kararlılığı) açısından, Yönetmelik'e göre yapılan tasarıma göre daha güvenli tarafta kaldığını göstermektedir. Bu durumda, elemanın dayanımı (ve kararlılığı) yeterlidir ve bu özelliklerinin artırılması için güçlendirilmesine gerek yoktur.

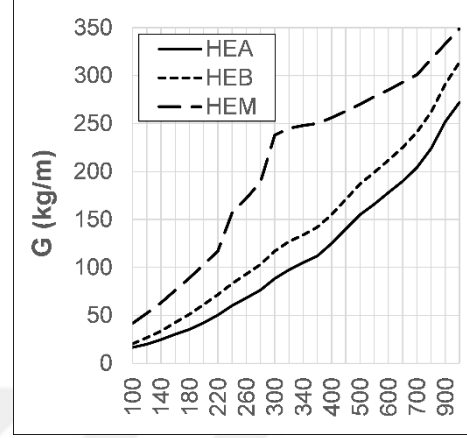
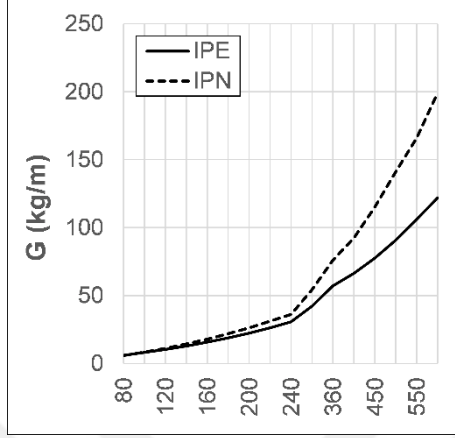
#### **4.1. İncelenen Hadde Profillerin Enkesit Özelliklerinin Karşılaştırılması**

Bu bölümde, incelenen hadde profillerinin önemli enkesit özellikleri karşılaştırılacaktır.

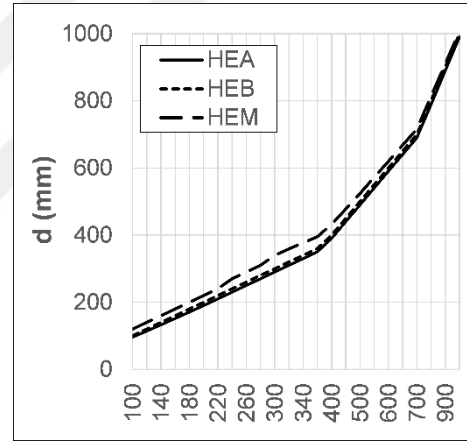
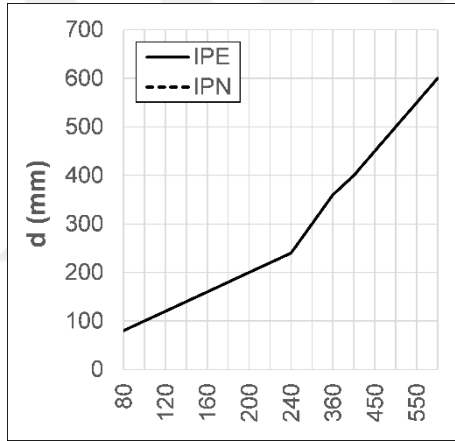
##### **4.1.1. Birim boy ağırlıkları ve enkesit boyutları**

Şekil 4.1'in sol tarafında sunulan grafiklerde, aynı enkesit numaralı IPE profillerle IPN profillerin birim boy ağırlıkları ( $G$ ), kesit yükseklikleri ( $d$ ) ve düz gövde yükseklikleri ( $h$ ) karşılaştırılmaktadır. Benzer grafikler, aynı enkesit numaralı HE profiller için de Şekil 4.1'in sağ tarafında verilmektedir. İncelenen enkesitlerin başlık genişlikleri ( $b_f$ ) ile başlık ve gövde kalınlıklarının (sırasıyla,  $t_f$  ve  $t_w$ ) karşılaştırılmaları ise Şekil 4.2'deki grafiklerde sunulmuştur.

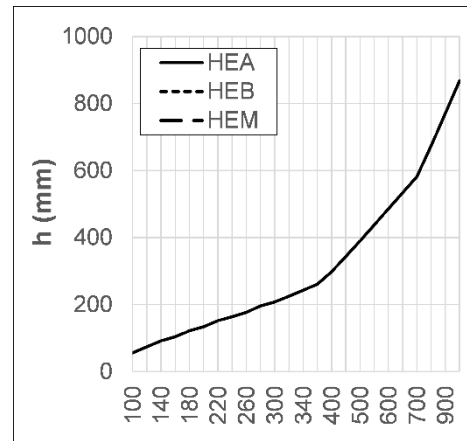
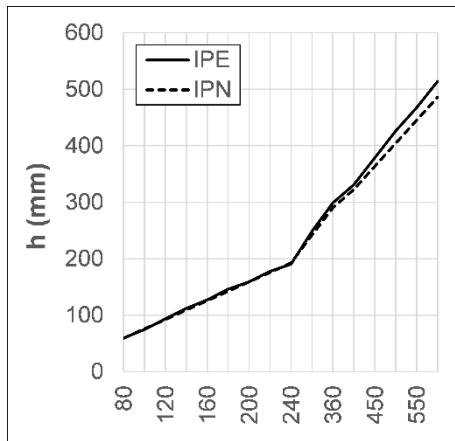
Şekil 4.1(b) ve (c)'den, I ve HE profillerin enkesit numaralandırmaları karşılaştırıldığında, enkesit numaraları aynı olan I profillerde enkesit yüksekliklerinin (d), HE profillerde ise düz gövde yüksekliklerinin (h) eşdeğer olduğu görülmektedir.



(a) birim boy ağırlığı (G)

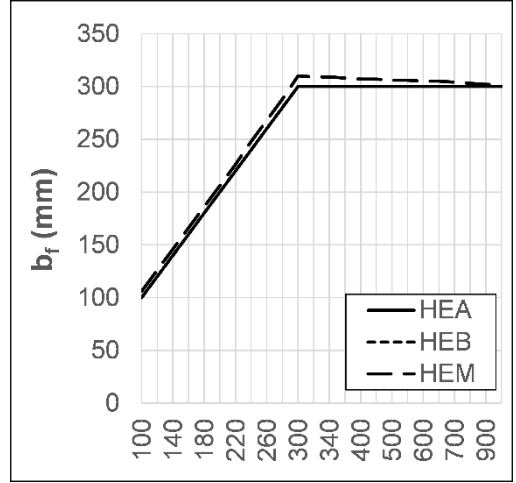
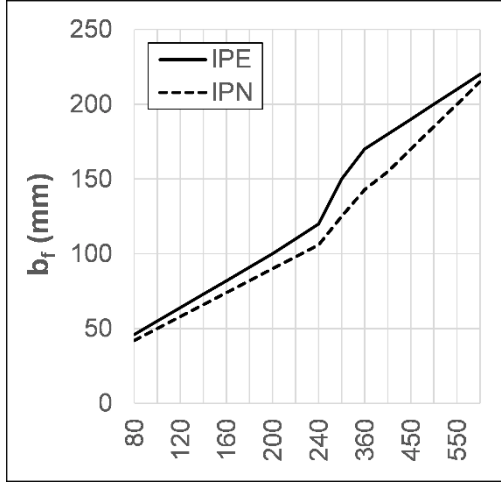


(b) enkesit yüksekliği (d)

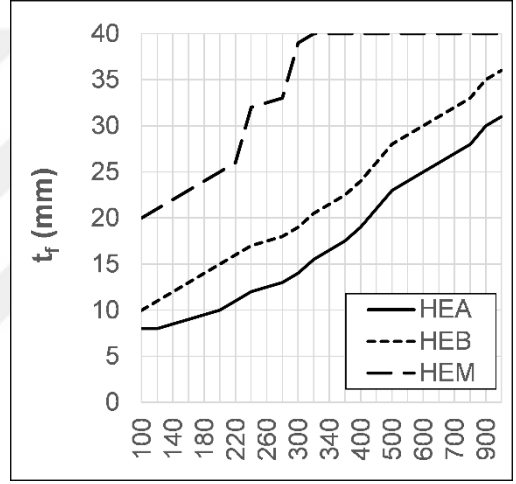
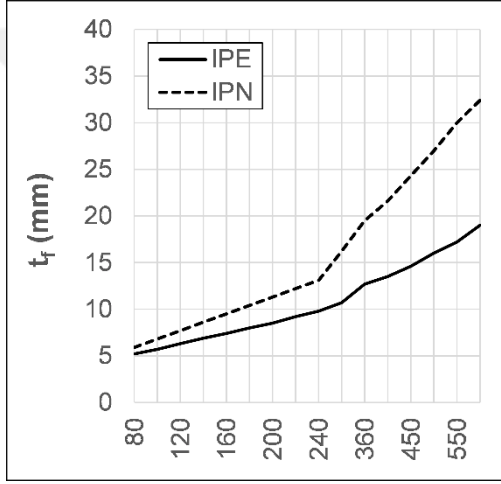


(c) düz gövde yüksekliği (h)

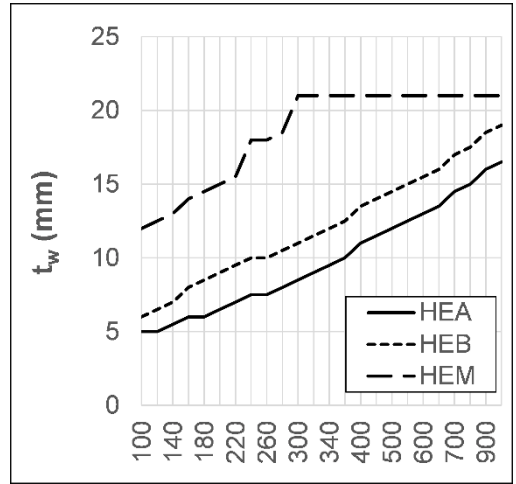
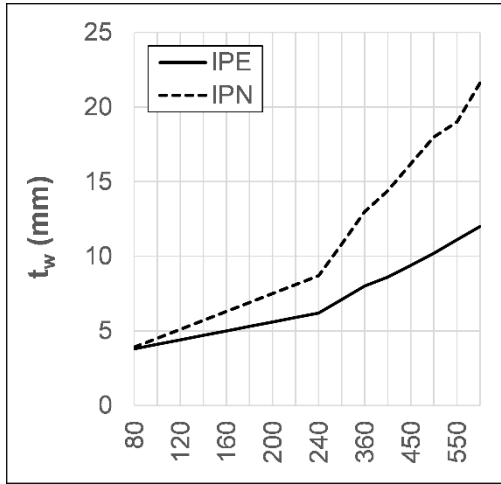
Şekil 4.1. İncelenen enkesitlerin birim boy ağırlıkları ile enkesit ve gövde yüksekliklerinin karşılaştırılması



(a) başlık genişliği ( $b_f$ )



(b) başlık kalınlığı ( $t_f$ )



(c) gövde kalınlığı ( $t_w$ )

Şekil 4.2. İncelenen enkesitlerin başlık genişlikleri ile başlık ve gövde kalınlıklarının karşılaştırılması

Aynı kesit numarasına sahip IPE ve IPN profillerin birim boy ağırlıkları karşılaştırıldığında (Şekil 4.1(a)), genel olarak IPE enkesitlerinin daha hafif olduğu, aynı numaralı enkesitler arasındaki ağırlık farkının enkesit numarası arttıkça arttığı görülmektedir. Örnek olarak, IPE80 ile IPN80 enkesitlerinin birim boy ağırlıkları hemen hemen aynıyken, IPE600 enkesiti, IPN600'den yaklaşık %40 daha hafiftir. Şekil 4.2(b) ve (c)'den fark edilebileceği gibi, bunun en önemli nedeni aynı enkesit numarasına sahip IPE profillerin başlık ve gövde kalınlıklarının IPN profillerine kıyasla daha küçük olmasıdır. IPN enkesitlerinin başlık kalınlıklarının IPE enkesitlerinde olduğu gibi sabit olmayıp değişken olduğu da unutulmamalıdır. Şekil 4.2(a)'dan, IPE enkesitlerin başlık genişliklerinin aynı numaralı IPN enkesitlerden daha büyük olduğu, ancak, aradaki farkın genel olarak çok yüksek olmadığı da görülebilir.

Şekil 4.1(a)'da, aynı enkesit numarasına sahip HE profilleri karşılaştırıldığında, birim boy ağırlığı en küçük olan enkesitlerin HEA'lar, en büyük olan enkesitlerin ise HEM'ler olduğu gözlenebilir. Düz gövde yüksekliklerinin eşit olmasının yanı sıra, aynı enkesit numarasına sahip HE enkesitlerin başlık genişlikleri de hemen hemen aynıdır. Ayrıca, enkesit numarası 300'den daha büyük olan HE enkesitlerinde başlık genişliği enkesit numarasından bağımsızdır. (Bu sonuca varılırken, HEM enkesitlerindeki küçük değişimler göz ardı edilmiştir). Şekil 4.2(b) ve (c)'den görülebileceği gibi, HE profiller arasındaki en belirgin fark ise başlık ve gövde kalınlıklarıdır. Aynı enkesit numarasına sahip HE profilleri arasında, başlık ve gövde kalınlıkları en yüksek olanlar HEM'lerdir. Aynı grafiklerden, enkesit numarası 300'den büyük olan bütün HEM profillerinde, başlık ve gövde kalınlıklarının sabit ve değerlerinin sırasıyla 40 mm ve 21 mm'ye eşit olduğu da gözlenebilir. Buna karşın, HEA ve HEB'lerde kalınlıklar artan enkesit numarasıyla artmaktadır. Bu nedenle, enkesit parçalarının kalınlıkları açısından en büyük farklar, enkesit numarası 300'e yakın olan profillerde gözlenmektedir. Örnek olarak, HEA300 ve HEB300'ün başlık kalınlıkları aynı enkesit numarasına sahip HEM300'ün başlık kalınlığının sırasıyla yaklaşık %35 ve %50'si kadardır.

#### **4.1.2. Mukavemet momentlerinin oranları (şekil faktörleri)**

Bölüm 1.1 ve Bölüm 1.2'de basit eğilme etkisindeki çelik yapı elemanlarının eğilme momenti dayanımını belirleyen geometrik özelliklerinden birinin enkesitin asal eksenleri etrafındaki elastik ve plastik mukavemet momentleri olduğu belirtilmişti. Aslında, Bölüm 1.1.1'de özetlendiği gibi, bir eğilme elemanının akma sonrası ne kadar "yedek" kapasitesi olduğu enkesitin "şekil faktörü"ne bağlıdır. Denklem (1.4)'te ispatlandığı gibi, hadde profillerinde şekil faktörü "mukavemet momentlerinin oranı"na

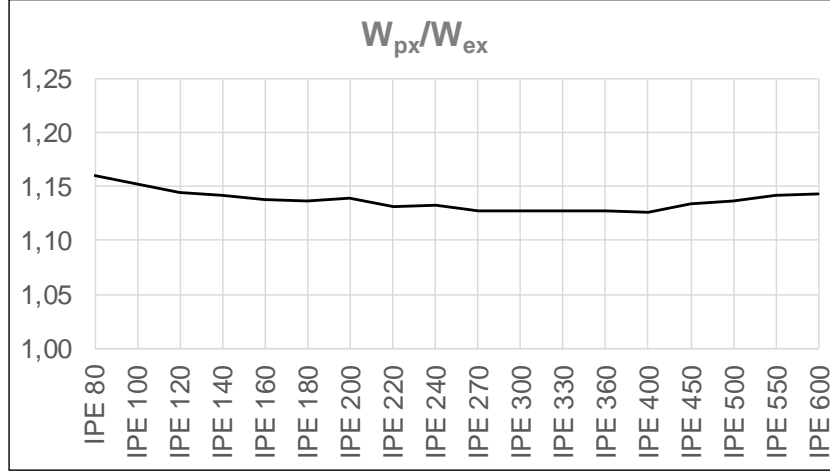
(yani, güçlü eksen eğilmede  $W_{px}/W_{ex}$  oranına, zayıf eksen eğilmede  $W_{py}/W_{ey}$  oranına) eşittir. Tablo 4.1'de listelenen bütün enkesitler için  $W_{px}/W_{ex}$  ve  $W_{py}/W_{ey}$  oranları hesaplanarak sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sunulmuştur. Şekil 4.3(a) ve (b)'den, kuvvetli eksen etrafında eğilmede şekil faktörünün I enkesitlerinde neredeyse sabit olduğu görülebilir. IPE enkesitleri için ortalama değer 1,14; IPN enkesitleri için ise 1,17'dir. Şekil 4.3(c) incelendiğinde, HE enkesitlerinin kuvvetli eksen eğilmedeki şekil faktörlerinin ise nispeten enkesit numarasına bağlı olarak değiştii fark edilebilir.

Kuvvetli eksen eğilmede ortalama şekil faktörü HEA'lar için 1,11; HEB'ler için 1,13 ve HEM'ler için ise 1,17 olarak belirlenmiştir. Ortalama değerlerden de fark edilebileceği gibi, aynı enkesit numarasına sahip HE enkesitlerinden, HEM enkesitinin şekil faktörü en büyük, HEA enkesitinin şekil faktörü en küçüktür. Bu da akma sonrası yedek kapasitenin HEM'lerde daha büyük olduğu anlamına gelmektedir. İncelenen tüm enkesitler arasında, güçlü eksen eğilmede en küçük şekil faktörü 1,10 (pek çok HEA enkesiti); en büyük şekil faktörü ise 1,24 (HEM100) olarak belirlenmiştir.

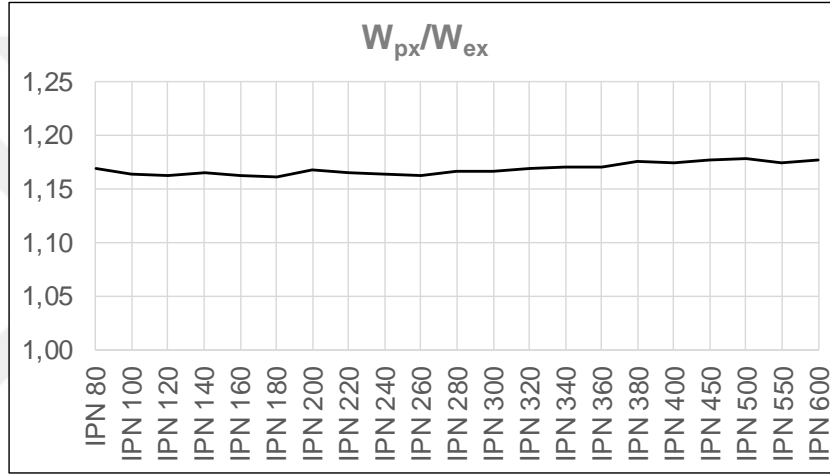
Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sunulan grafikler birbirleriyle karşılaştırıldığında, incelenen bütün enkesitlerin zayıf eksen eğilmedeki şekil faktörlerinin güçlü eksen eğilmedeki şekil faktörlerinden daha büyük olduğu ve zayıf eksen eğilmedeki şekil faktörlerinin enkesit numarasına göre değişiminin oldukça az olduğu görülmektedir. Zayıf eksen eğilmede ortalama şekil faktörü; IPE'lerde 1,57; IPN'lerde 1,69; HEA'larda 1,53; HEB'lerde 1,54; HEM'lerde ise 1,54'tür. Tüm enkesitler dikkate alındığında, en küçük şekil faktörü 1,52 (pek çok HE enkesiti); en büyük şekil faktörü ise 1,73 (IPN600) olarak belirlenmiştir. Şekil 4.4'ten, zayıf eksen eğilmede IPN enkesitlerinin şekil faktörlerinin diğer enkesitlerden daha büyük olduğu, IPN enkesitlerinin haricindeki bütün enkesitlerin şekil faktörlerinin 1,6'dan küçük olduğu, IPN'lerin ise tamamında bu oranın 1,6'dan büyük olduğu görülmektedir.

#### **4.1.3. Basınç etkisindeki enkesit parçalarının genişlik/kalınlık oranları**

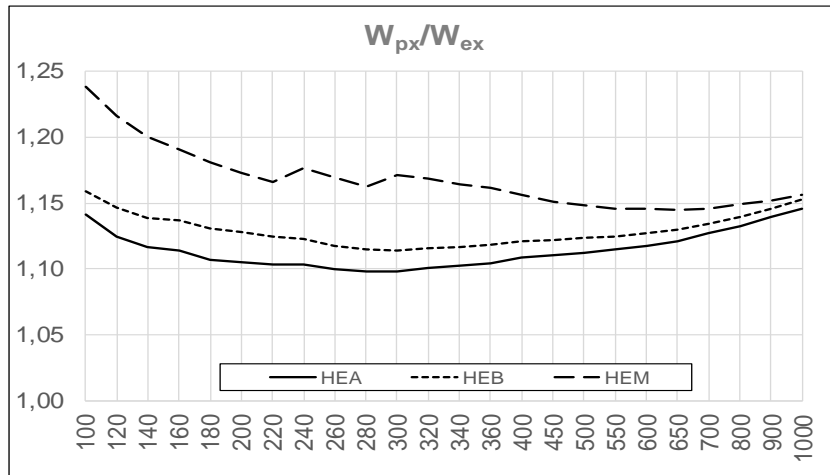
Bölüm 1.1.2'de özetlendiği gibi, I-enkesitli çelik eğilme elemanlarının temel sınır durumlarından biri de basınç bağlığının ya da gövdenin yerel burkulmasıdır. Bölüm 2.2.3'te belirtildiği gibi, TÇY (2016)'ya göre, yerel burkulma sınır durumunun elemanın davranışını belirleyen sınır durumlardan biri olup olmadığını belirlemek için, elemanın basınç etkisindeki enkesit parçalarının genişlik/kalınlık oranları (b/t oranları, yani narinlikleri) hesaplanmalıdır.



(a) IPE enkesitler



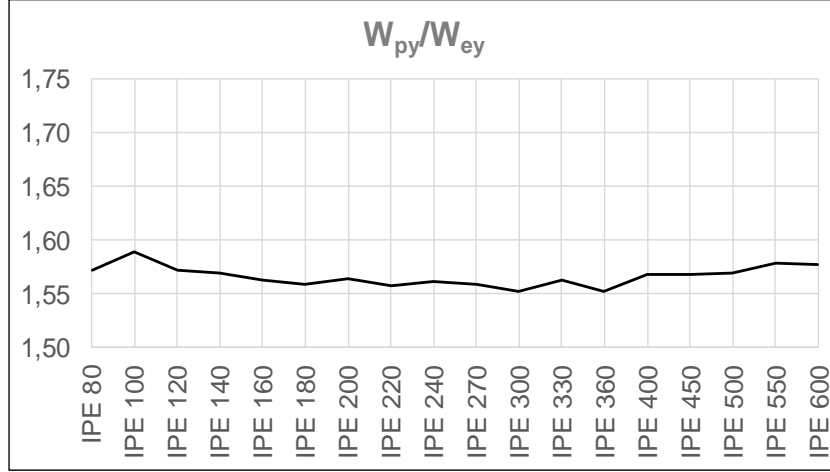
(b) IPN enkesitler



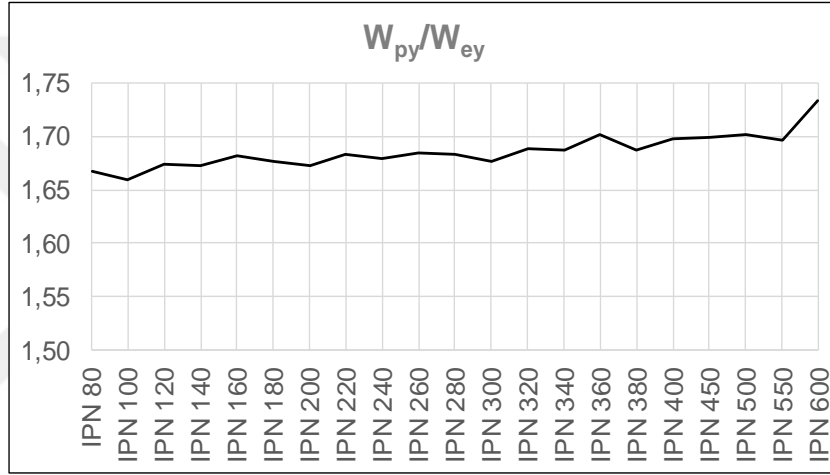
(c) HE enkesitler

Şekil 4.3. İncelenen enkesitlerin kuvvetli ekseninde eğilmede şekil faktörleri (mukavemet momenti oranları)

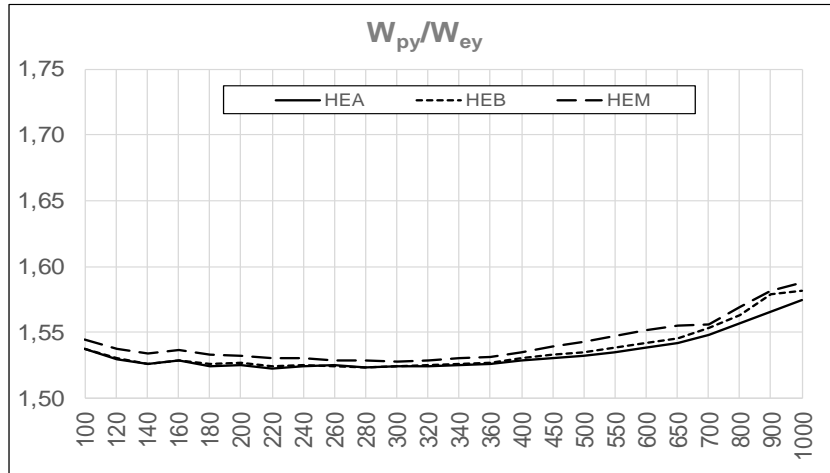




(a) IPE enkesitler



(b) IPN enkesitler



(c) HE enkesitler

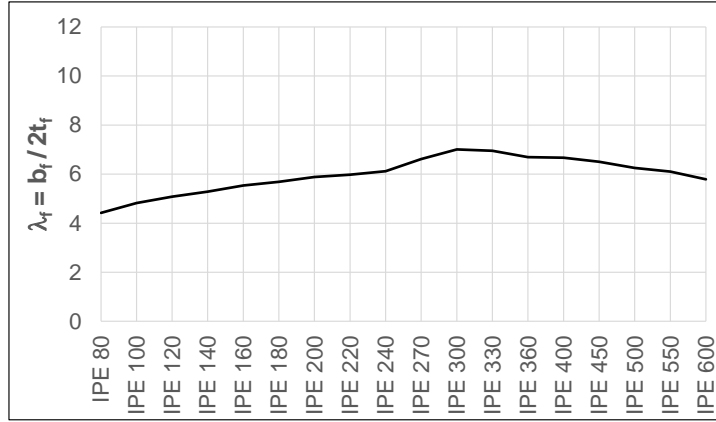
Şekil 4.4. İncelenen enkesitlerin zayıf eksende eğilmede şekil faktörleri (mukavemet momenti oranları)

Tablo 4.1’de listelenen enkesitlerin her birinin başlık ve gövde narinlikleri (yani, sırasıyla,  $\lambda_f$  ve  $\lambda_w$  değerleri) Denklem (2.5) kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 4.5 ile Şekil 4.6’da sunulmuştur. Ayrıca, incelenen tüm enkesit türleri için, başlık ve gövde narinliklerinin en büyük, en küçük ve ortalama değerleri (sırasıyla,  $\lambda_{f,max}$ ,  $\lambda_{f,min}$ ,  $\lambda_{f,ort}$  ile  $\lambda_{w,max}$ ,  $\lambda_{w,min}$ ,  $\lambda_{w,ort}$ ) de belirlenerek Tablo 4.2’de sunulmuştur.

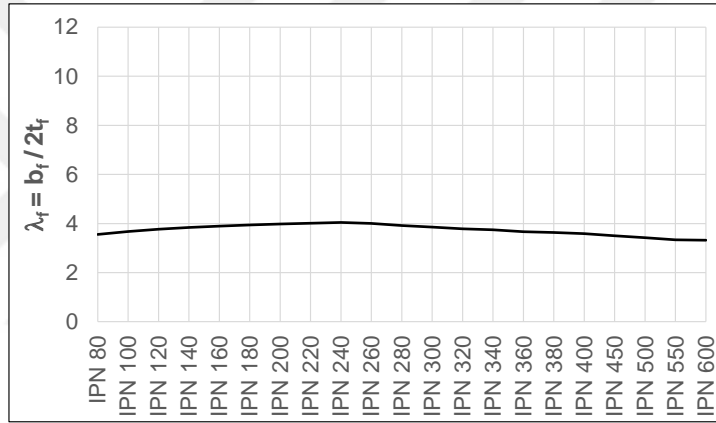
Şekil 4.5(a)’dan, IPE enkesitlerinin başlık narinliklerinin IPE300 enkesitine kadar artan kesit numarasıyla arttığı, daha büyük enkesitlerde ise azaldığı gözlenmektedir. Şekil 4.5(b) ile Şekil 4.5(a) karşılaştırıldığında, IPN enkesitlerinin başlık narinliklerinin IPE’lerinden çok daha küçük olduğu ve hemen hemen enkesit numarasından bağımsız olduğu söylenebilir. Şekil 4.5(c)’de HE enkesitlerinin başlık narinlikleri karşılaştırıldığında, aynı enkesit numaralı HE profiller arasında, başlık narinlikleri en büyük olan enkesitlerin HEA’lar, en küçük olanların ise HEM’ler olduğu görülebilir. Bu durum, başlık genişliği enkesit numarasından neredeyse bağımsız olan HE enkesitlerinde başlık kalınlıklarının HEA’lardan HEM’lere doğru artıyor olmasının doğal sonucudur (Şekil 4.2(a) ve (b)). Şekil 4.5(c) ve Tablo 4.2 incelendiğinde, HEM’lerin başlık narinliklerinin enkesit numarasıyla değişiminin diğer H enkesitlere göre daha az olduğu görülebilir. HEB’lerin başlık narinliği HEB300’e kadar artan kesit numarasıyla artmakta, daha büyük enkesitlerde ise azalmaktadır. HEA’ların başlık narinliklerinde görülen değişim de benzerdir. HEA280 ( $\lambda_{f,max}=\lambda_{f,HEA280}= 10,8$ ; Tablo 4.2) en büyük başlık narinliğine sahip HEA enkesiti olup, aynı zamanda, incelenen bütün enkesitler arasında başlık narinliği en yüksek olan enkesittir.

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da verilen grafikler karşılaştırıldığında, incelenen enkesitlerin gövde narinliklerinin başlık narinliklerinden çok daha büyük olduğu görülmektedir. Elbette, bunun en önemli nedeni, Bölüm 2.2.3’te belirtildiği gibi, rijitleştirilmiş enkesit parçası olan gövdenin burkulma dayanımının rijitleştirilmemiş enkesit parçası olan başlıkların burkulma dayanımına kıyasla daha yüksek olmasıdır. Ayrıca, elastik bölgede, basit eğilmede gövdenin yalnız yarısının basınç etkisinde kaldığı ve gövdede oluşan basınç gerilmelerinin tarafsız eksenden uzaklaştıkça doğrusal olarak arttığı, buna karşın, başlıklarda gerilme dağılımının neredeyse sabit olduğu da unutulmamalıdır [17]. Şekil 4.6’dan, incelenen enkesitler arasında gövde narinliği enkesit numarasıyla en az değişen enkesitlerin IPN’ler olduğu görülebilir. Diğer enkesitlerde, gövde narinliklerinin artan enkesit numarasıyla arttığı gözlenmektedir. Aynı enkesit numarasına sahip HE profillerde, gövde narinliği en yüksek olan enkesit HEA, en düşük olansa HEM’dir. İncelenen bütün enkesitler arasında gövde narinliği

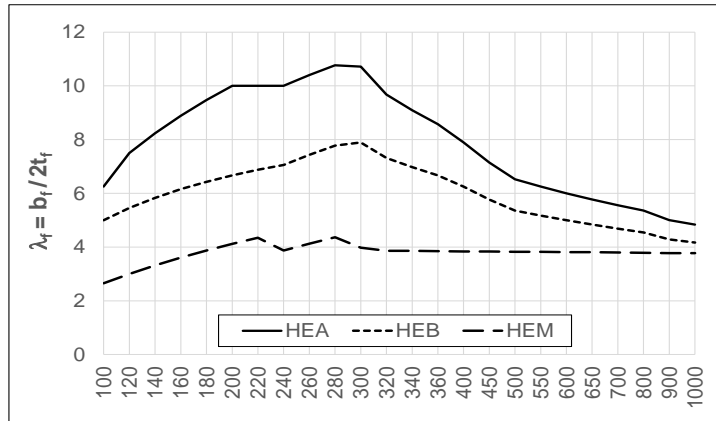
en yüksek olan enkesit ise HEA1000 ( $\lambda_{w,max}=\lambda_{w,HEA1000}=52,6$ ; Tablo 4.2) olarak belirlenmiştir.



(a) IPE enkesitler

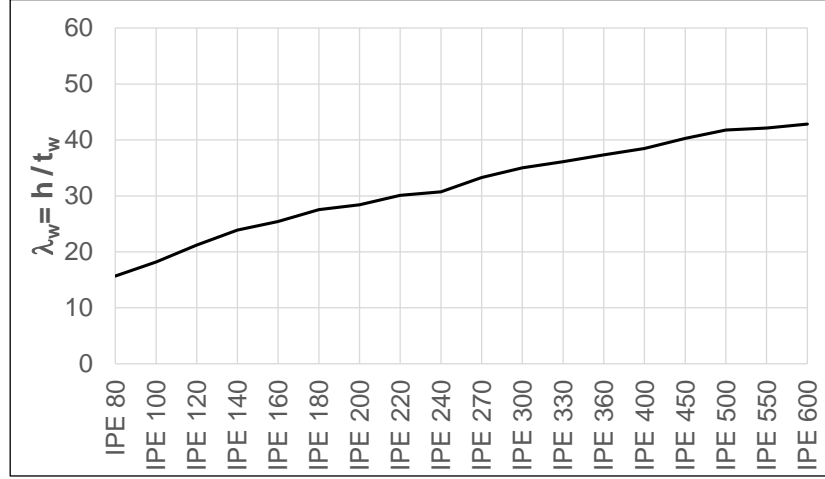


(b) IPN enkesitler

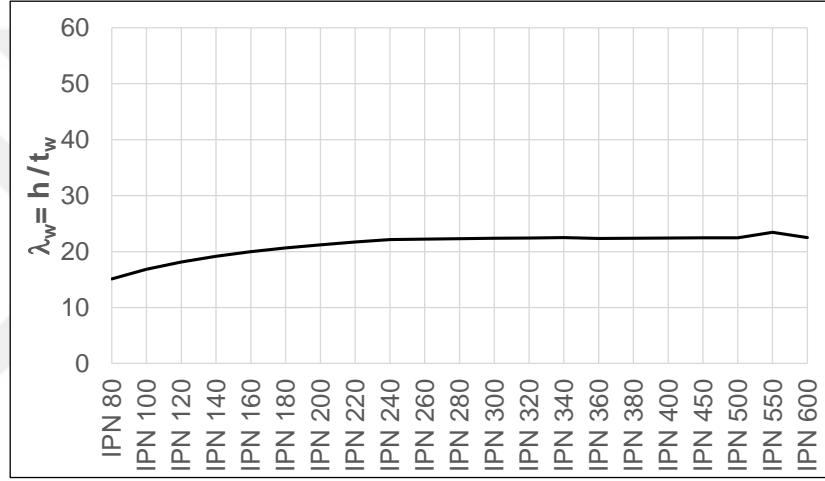


(c) HE enkesitler

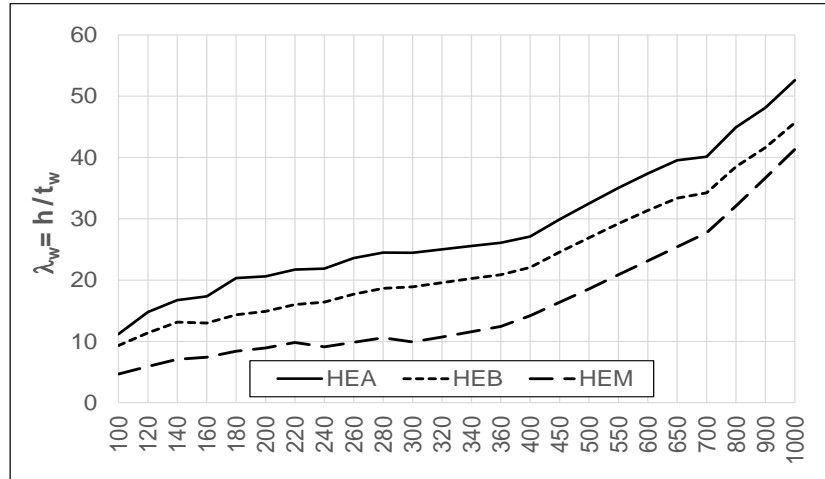
Şekil 4.5. İncelenen enkesitlerin başlık narinliklerinin ( $\lambda_f$ ) karşılaştırılması



(a) IPE enkesitler



(b) IPN enkesitler



(c) HE enkesitler

Şekil 4.6. İncelenen enkesitlerin gövde narinliklerinin ( $\lambda_w$ ) karşılaştırılması

Tablo 4.2. İncelenen enkesitlerin başlık ve gövde narinliklerinin (b/t oranlarının) enkesit grubu içindeki en büyük, en küçük ve ortalama değerleri

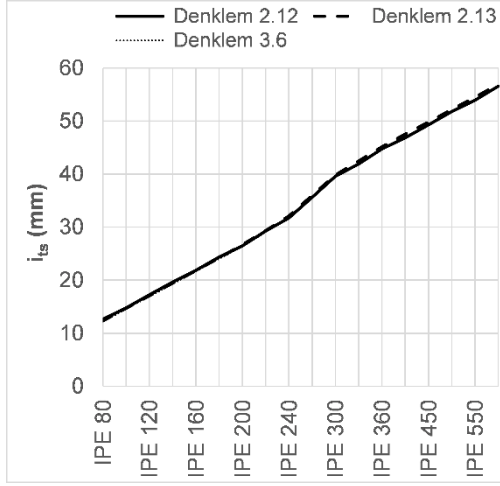
	IPE	HEA	HEB	HEM	IPN
$\lambda_{f,max}$	7,01	10,8	7,89	4,36	4,05
$\lambda_{f,min}$	4,42	4,84	4,17	2,65	3,32
$\lambda_{f,ort}$	5,97	7,91	5,98	3,79	3,74
$\lambda_{w,max}$	42,8	52,6	45,7	41,3	23,5
$\lambda_{w,min}$	15,7	11,2	9,33	4,70	15,1
$\lambda_{w,ort}$	31,6	28,4	23,0	15,9	21,2

#### 4.1.4. Etkin atalet yarıçapları

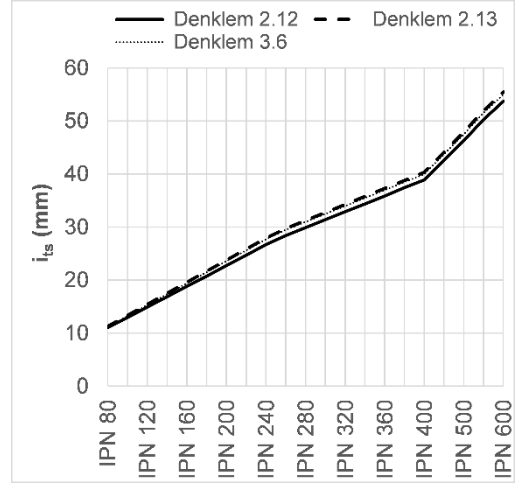
Bölüm 2.2.4 ve Bölüm 3.2'ye göre, kuvvetli eksenleri etrafında eğilme etkisindeki bir çelik yapı elemanının yanal burulmalı burkulma dayanımını belirleyen enkesit özelliklerinden biri "etkin atalet yarıçapı"dır. TÇY (2016)'da  $i_{ts}$  sembolüyle gösterilen bu enkesit özelliği, Denklem (2.12) kullanılarak hesaplanabilir. TÇY (2016),  $i_{ts}$  hesabı için daha güvenli tarafta kalacak şekilde basitleştirilmiş bir denklem (Denklem (2.13)'te verilmiştir) daha sunmuştur. TS 648'de, basınç başlığı ve gövdenin basınçta kalan bölümünün üçte birinin düşey eksene göre atalet yarıçapı olarak tanımlanan etkin atalet yarıçapı için Denklem (3.6)'da verilen eşitlik, TÇY (2016)'daki bu basitleştirilmiş denklemle hemen hemen aynıdır.

İncelenen bütün enkesitlerin etkin atalet yarıçapları bu üç denklem (Denklem (2.12), Denklem (2.13) ve Denklem (3.6)) kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 4.7'de sunulmuştur. Buna göre, basitleştirilmiş iki denklemden (Denklem (2.13) ve Denklem (3.6)'dan) elde edilen değerler bütün enkesitlerde birbirleriyle hemen hemen aynıdır ve Denklem (2.12)'den elde edilen değerlere çok yakındır. HEM'lerin haricindeki enkesitlerde, basitleştirilmiş denklemlerden elde edilen değerlerdeki hata oranı %5'i aşmamaktadır. Küçük numaralı HEM enkesitlerinde ise bu oran %8'lere ulaşabilmektedir.

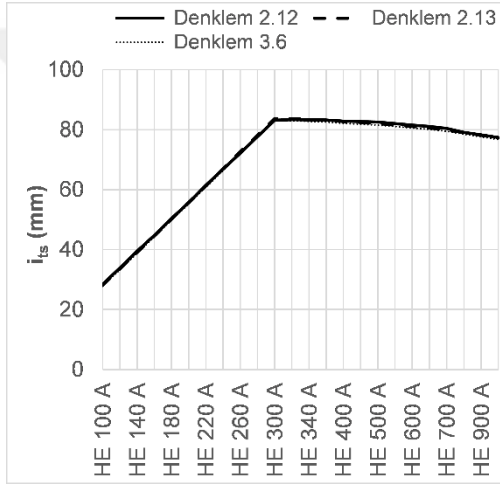
Şekil 4.7(a) ve (b)'ye göre, I enkesitlerde, enkesit numarası arttıkça  $i_{ts}$  artmaktadır. Etkin atalet yarıçapı en yüksek olan enkesitler, enkesit numaraları en büyük olanlar, yani IPE600 ( $i_{ts,max,IPE} = 56,6$  mm) ve IPN600 ( $i_{ts,max,IPN} = 53,7$  mm) profilleridir.



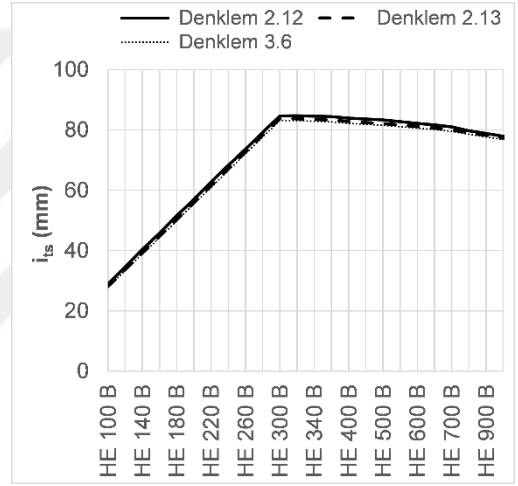
(a) IPE enkesitler



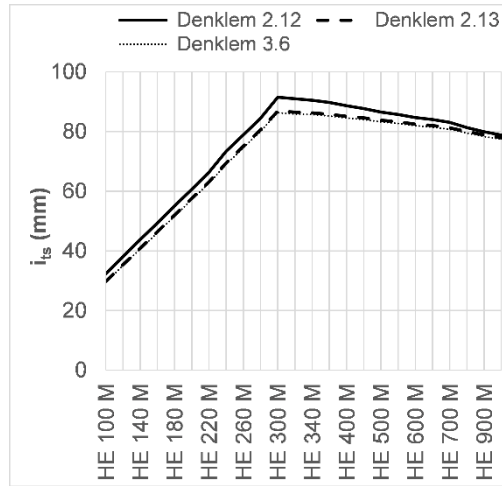
(b) IPN enkesitler



(c) HEA enkesitler



(d) HEB enkesitler



(e) HEM enkesitler

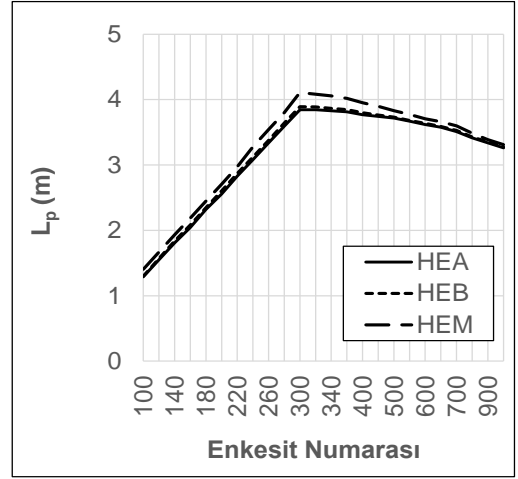
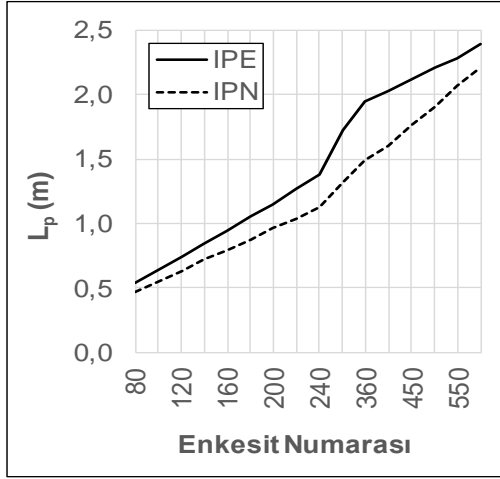
Şekil 4.7. İncelenen enkesitlerin etkin atalet yarıçaplarının ( $i_{ts}$ ) hesabı için TÇY (2016)'da verilen iki denklemle (Denklem 2.12 ve 2.13) TS 648'de verilen denklemin (Denklem 3.6) sonuçlarının karşılaştırılması

Buna karşın, HEA ve HEB'lerde, numarası 320'den büyük enkesitlerde,  $i_{ts}$ 'nin hemen hemen sabit kaldığı görülebilir. HEA'larda etkin atalet yarıçapının en büyük değeri  $i_{ts,max,HEA} = i_{ts,HEA320} = 83,4$  mm, HEB'lerde ise  $i_{ts,max,HEB} = i_{ts,HEB320} = 84,7$  mm'dir. HEM enkesitlerinde ise HEM300'den sonra etkin atalet yarıçapı artan enkesit numarasıyla azalmaktadır. Şekil 4.7'den, incelenen tüm enkesitler arasında en büyük etkin atalet yarıçapına ( $i_{ts,max} = i_{ts,HEM300} = 91,5$  mm) sahip enkesitin HEM300 olduğu görülebilir.

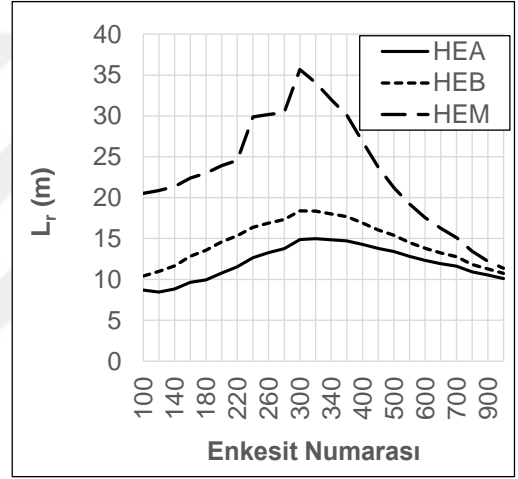
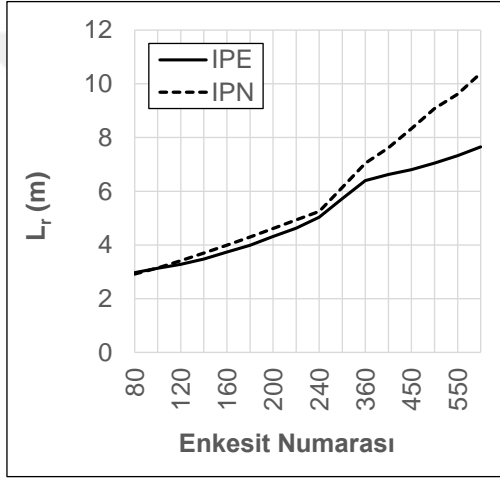
#### 4.1.5. Yanal burulmalı burkulma sınır durumu için sınır eleman uzunlukları

Bölüm 2.2.4'te belirtildiği gibi, TÇY (2016)'ya göre, yanal burulmalı burkulma sınır durumunun elemanın davranışını belirleyen sınır durumlardan biri olup olmadığını belirlemek için "akma sınır durumu için yanal olarak desteklenmeyen sınır uzunluk" olarak adlandırılan  $L_p$  değeri (bu tezde, "plastik sınır boy" olarak da adlandırılacaktır) hesaplanmalıdır. "Yanal ve/veya burulma stabilite bağlantısıyla desteklenmeyen eleman boyu" olan  $L_b$ 'nin  $L_p$  sınır değeri aşması durumunda, elemanın yanal burulmalı burkulma dayanımını hesaplariken hangi burkulma denkleminin kullanılacağına ise,  $L_b$  değeri Yönetmelik'te "elastik olmayan yanal burulmalı burkulma sınır durumu için sınır uzunluk" olarak adlandırılan  $L_r$  değeriyle (bu tezde, "elastik sınır boy" olarak da adlandırılacaktır) karşılaştırılarak karar verilir. TÇY (2016)'nın  $L_p$  ve  $L_r$  hesabı için verdiği denklemler, Denklem (2.10) ve Denklem (2.11)'de sunulmuştur. Bu denklemlerden de fark edilebileceği gibi, sınır uzunluklar elemanın enkesit özelliklerinin yanı sıra malzeme özelliklerine de bağlıdır. Yönetmelik, yapısal çeliğin elastisite modülü ( $E$ ) için sabit bir değer verdiği için aslında sınır eleman uzunlukları enkesit özelliklerinin haricinde yalnız yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesine ( $F_y$ ) bağlıdır.

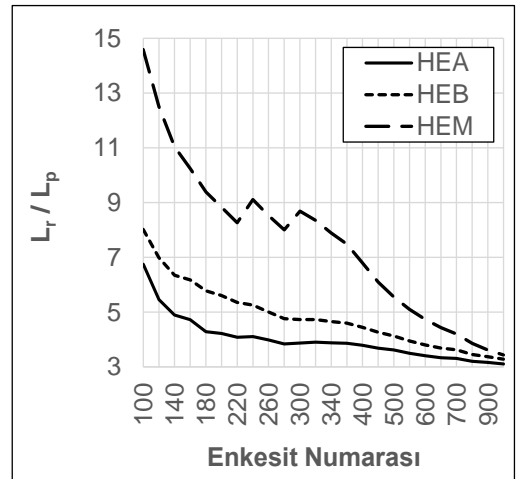
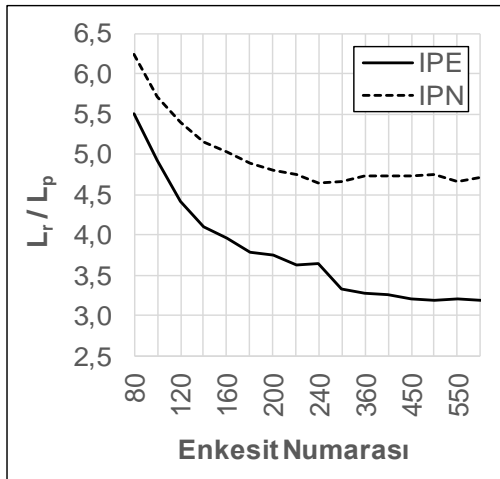
İncelenen tüm enkesitlerin  $L_p$  ve  $L_r$  değerleri üç farklı akma gerilmesi ( $F_y = 235$  MPa, 275 MPa ve 355 MPa) için hesaplanarak Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'daki grafiklerde sunulmuştur. Hesaplarda,  $i_{ts}$  için Denklem (2.12)'de verilen eşitlik kullanılmıştır. Aynı şekillerde,  $L_r/L_p$  oranları da verilmiştir. Farklı çelik kaliteleri için çizdirilen grafikler karşılaştırıldığında, grafiklerin şekillerinin benzer olduğu, yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesi arttıkça sınır değerlerin azaldığı görülmektedir. I enkesitlerde, sınır uzunlukların artan enkesit numarasıyla arttığı, buna karşın, HE enkesitlerinde artışın yaklaşık 300 numaralı enkesite kadar devam ettiği ancak daha büyük enkesitlerde artan enkesit numarasıyla azaldığı görülmektedir.



(a) L<sub>p</sub> değerleri



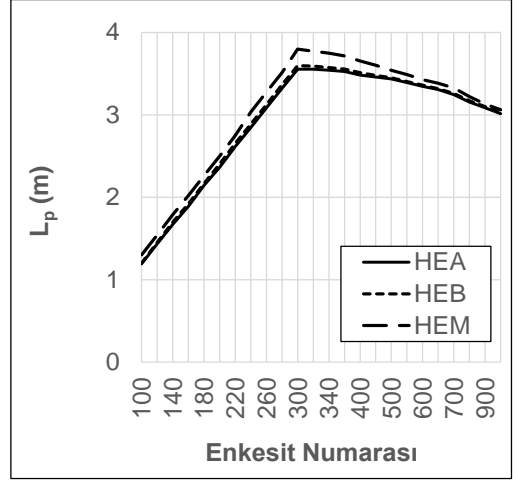
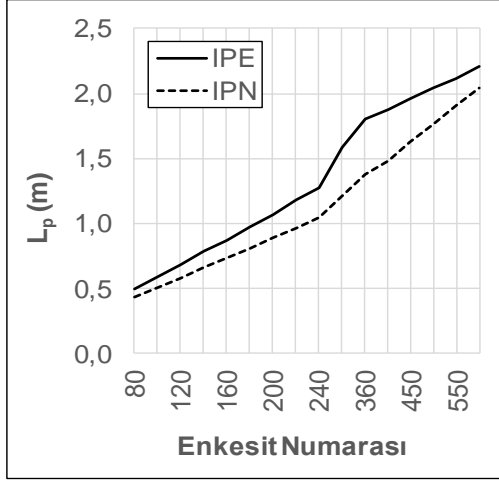
(b) L<sub>r</sub> değerleri



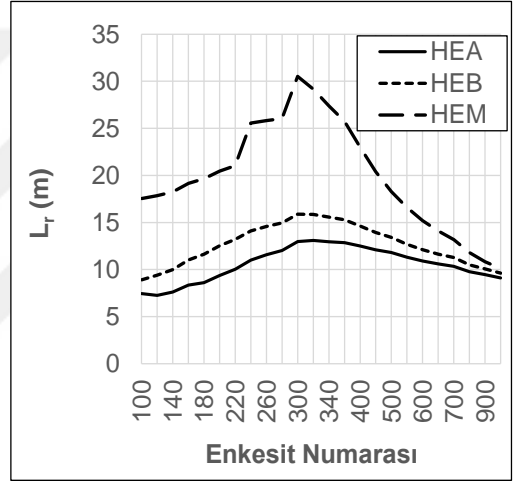
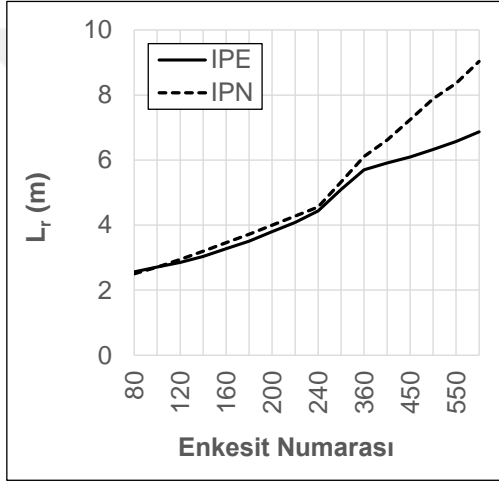
(c) L<sub>r</sub>/L<sub>p</sub> oranları

Şekil 4.8. S235 çeliği için, incelenen enkesitlerin (a) plastik sınır boylarının (L<sub>p</sub>) elastik sınır boylarının (L<sub>r</sub>) ve (c) sınır boyların oranlarının (L<sub>r</sub>/L<sub>p</sub>) karşılaştırılması

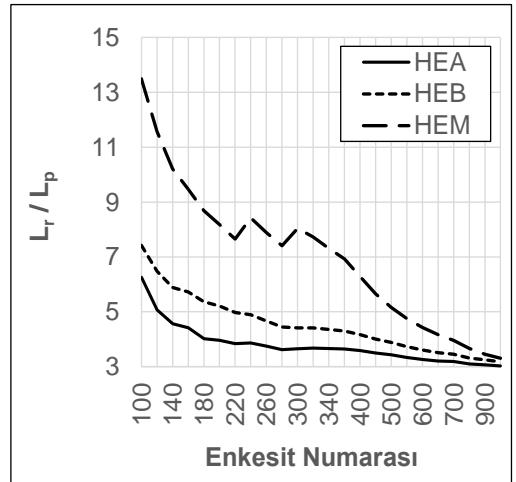
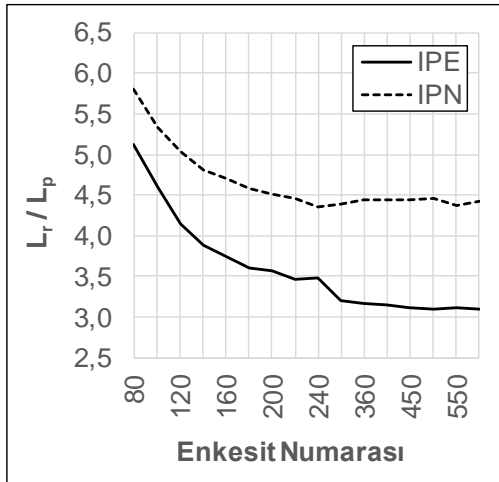




(a) L<sub>p</sub> değerleri

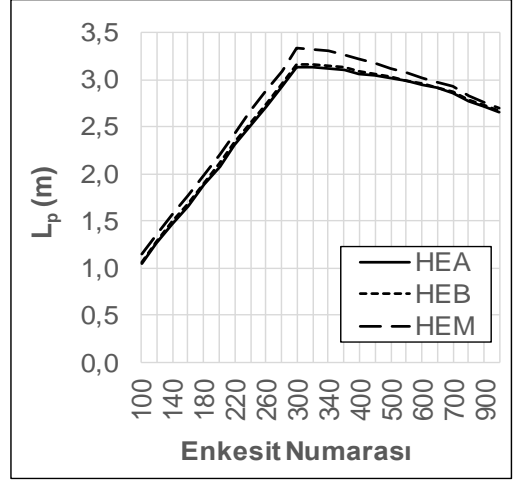
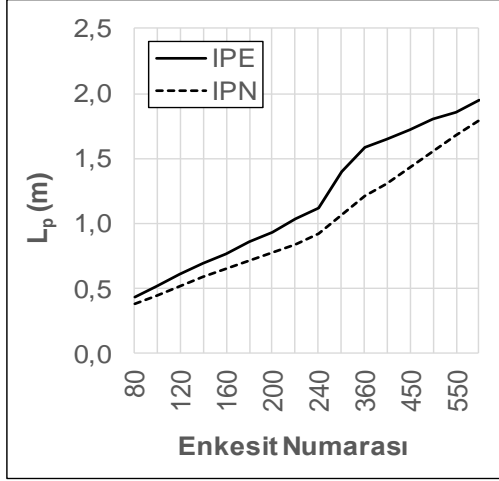


(b) L<sub>r</sub> değerleri

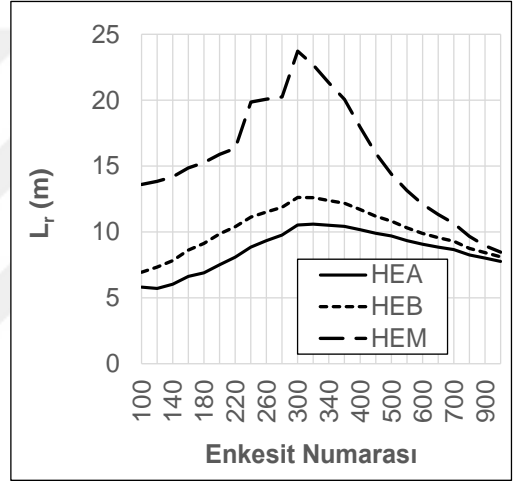
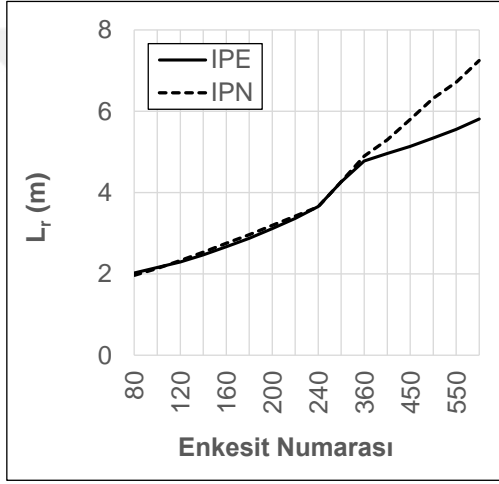


(c) L<sub>r</sub>/L<sub>p</sub> oranları

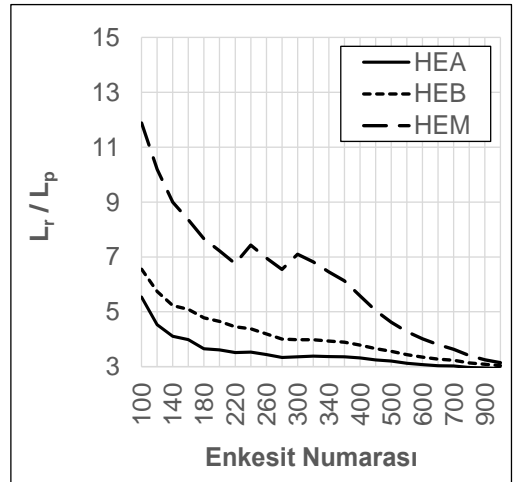
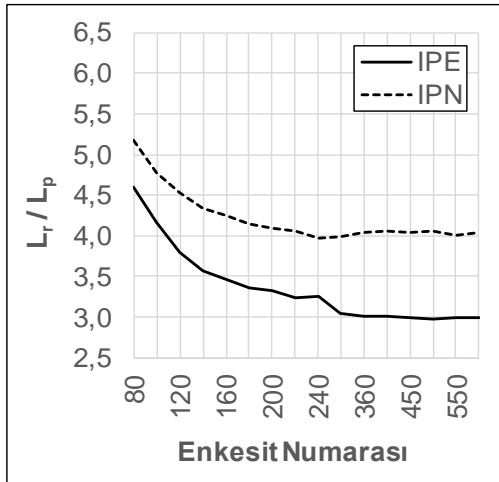
Şekil 4.9. S275 çeliği için, incelenen enkesitlerin (a) plastik sınır boylarının (L<sub>p</sub>) elastik sınır boylarının (L<sub>r</sub>) ve (c) sınır boyların oranlarının (L<sub>r</sub>/L<sub>p</sub>) karşılaştırılması



(a) L<sub>p</sub> değerleri



(b) L<sub>r</sub> değerleri



(c) L<sub>r</sub>/L<sub>p</sub> oranları

Şekil 4.10. S355 çeliği için, incelenen enkesitlerin (a) plastik sınır boylarının (L<sub>p</sub>) elastik sınır boylarının (L<sub>r</sub>) ve (c) sınır boyların oranlarının (L<sub>r</sub>/L<sub>p</sub>) karşılaştırılması

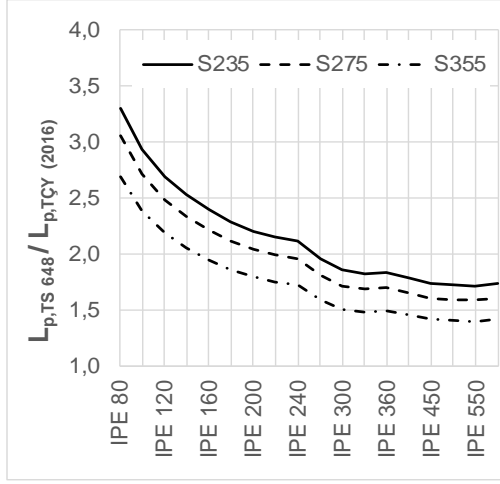
Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'daki grafiklerden, aynı enkesit numaralı HE profillerin plastik sınır boylarının hemen hemen aynı olduğu, elastik sınır boylarının ise enkesit türüne bağlı olduğu, HEM enkesitinin en büyük değere, HEA enkesitinin ise en küçük değere sahip olduğu görülmektedir. Aynı grafiklerden, enkesit numarası yaklaşık olarak 300'den küçük, aynı enkesit numarasına sahip I profillerin elastik sınır boylarının hemen hemen aynı olduğu da görülebilir.

Şekil 4.8(c), Şekil 4.9(c) ve Şekil 4.10(c)'de verilen sınır boy oranları ( $L_r/L_p$ ) incelendiğinde, genel olarak, oranların artan enkesit numaralarıyla azaldığı gözlenir. Diğer bir deyişle, elastik olmayan burkulma bölgesi büyük enkesitlerde daha kısadır. İncelenen enkesit ve çelik kalitelerinde,  $L_r/L_p$  oranı için elde edilen en büyük değer yaklaşık 15, en küçük değer ise 3'tür.  $L_r/L_p$  oranları nispeten daha büyük olan HEM enkesitlerinin dışında kalan enkesitlerde ise bu oranının en büyük değeri yaklaşık 8 olarak hesaplanmıştır. Enkesit numarası 300'den büyük olan I enkesitlerinde  $L_r/L_p$  oranının hemen hemen sabit kaldığı, ancak oranın sabit değerinin çelik kalitesine bağlı olduğu görülmektedir.

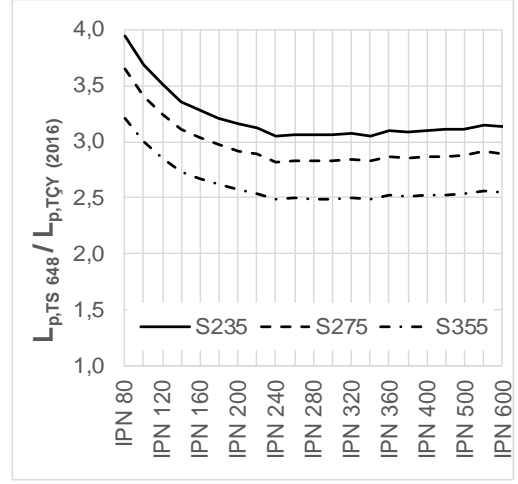
Bölüm 3.2'de belirtildiği gibi, her ne kadar TS 648'de sınır boylar özel olarak tanımlanmamış olsa da, yanal burkulma emniyet gerilmesi üst sınır olan  $0,6F_y$ 'ye eşitlenerek  $L_p$  sınır boyu elde edilebilir. Tezde incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için, TS 648'e göre tanımlanan  $L_p$  değerleri Denklem (3.9) kullanılarak hesaplanmış, bu değerler TÇY (2016)'dan elde edilen  $L_p$  değerlerine bölünerek  $L_{p,TS648} / L_{p,TÇY(2016)}$  oranları bulunmuş ve bu oranlar Şekil 4.11'de gösterilen grafiklerde çizilmiştir. Grafiklerden de gözlenebileceği gibi, dayanım eğrisindeki plato, yani, kuvvetli ekseninde eğilme momenti dayanımının "elemanın burkulma boyu"  $L_b$ 'den bağımsız olduğu başlangıç bölgesi, TS 648'de daha uzundur. Bu sonuç, incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için geçerlidir. HEM enkesitleri dışında, incelenen tüm enkesitler arasında  $L_{p,TS648} / L_{p,TÇY(2016)}$  oranının en büyük değeri 4,59 (HEB100 ve S235) olarak belirlenmiştir. HEM'lerde bu oran 7,48'lere kadar yükselmektedir. Şekil 4.11'de, yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesi arttıkça  $L_p$  oranlarının azaldığı da görülmektedir.

#### 4.1.6. Gövde ve başlık alanları

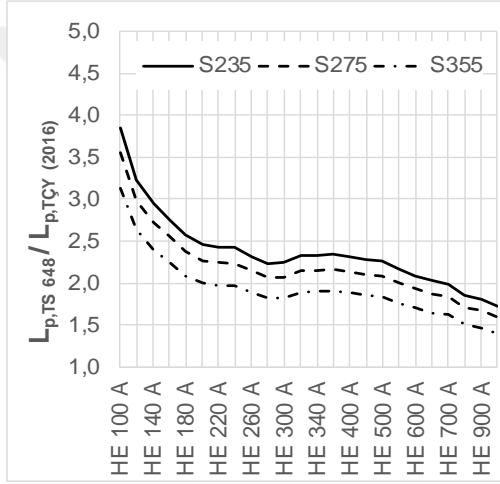
Bölüm 1.3'te gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki çelik yapı elemanlarının kesme kuvveti dayanımını belirleyen en önemli enkesit özelliğinin gövde alanı olduğu belirtilmişti.



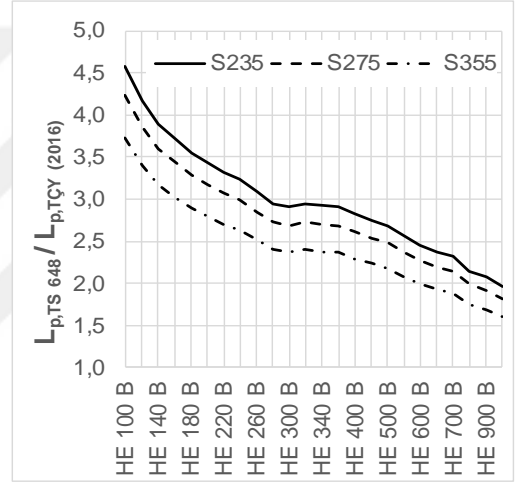
(a) IPE enkesitler



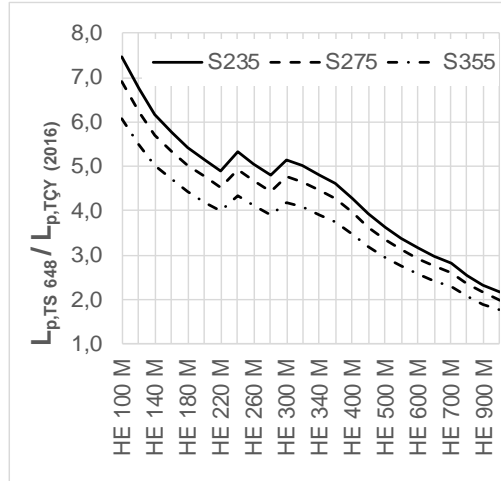
(b) IPN enkesitler



(c) HEA enkesitler



(d) HEB enkesitler



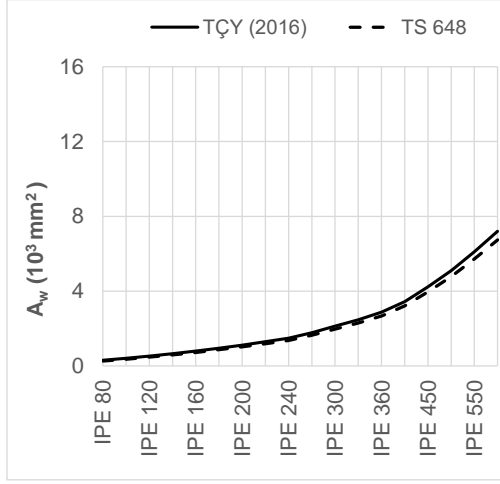
(e) HEM enkesitler

Şekil 4.11.  $C_b=1$  durumunda, incelenen enkesitlerin plastik sınır boyları ( $L_p$ ) için TS 648'den elde edilen değerlerin TÇY (2016)'dan elde edilen değerlere oranı

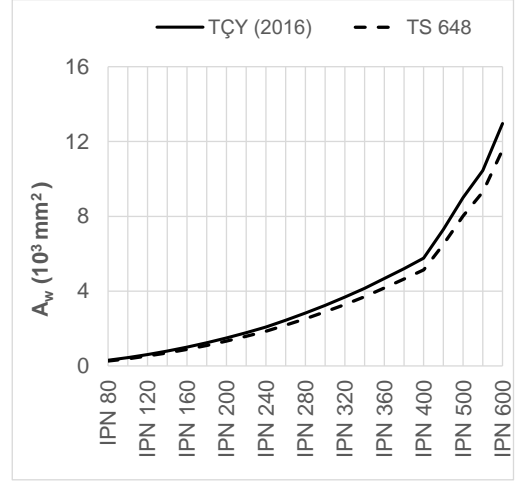
Bölüm 2.4.2'de özetlendiği gibi, TÇY (2016)'da gövde alanı enkesit yüksekliği ile gövde kalınlığının çarpımı (yani,  $A_{w,TÇY(2016)}=dt_w$ ) olarak tanımlamaktadır. Buna karşın, Bölüm 3.4'te belirtildiği gibi, TS 648'e göre tasarım yapılırken çoğu zaman gövde alanı, başlıkların arasındaki net gövde yüksekliğiyle gövde kalınlığı çarpılarak (yani,  $A_{w,TS648}=(d-2t_f)t_w$ ) hesaplanmaktadır. Şekil 4.12'de incelenen enkesitlerin gövde alanları karşılaştırılmıştır. Gövde alanları hesaplanırken, gövde yüksekliği olarak hem TÇY (2016)'da belirtildiği gibi enkesit yüksekliği kullanılmış (grafiklerde devamlı çizgi ile gösterilmiştir), hem de TS 648'in çoğu uygulamasında yapıldığı gibi başlıkların arasında kalan net gövde yüksekliği kullanılmıştır (grafiklerde kesik çizgi ile gösterilmiştir).

Tanımlardan da fark edilebileceği gibi, TÇY (2016) eğrilerinin TS 648 eğrileriyle arasında fark, başlık ve gövde kalınlıklarının çarpımının iki katına (yani,  $2t_f t_w$ 'dir) eşittir. Şekil 4.12'den, TÇY (2016) eğrileriyle TS 648 eğrilerinin arasındaki farkın en fazla HEM enkesitlerinde olduğu gözlenmektedir. Gövde yüksekliği için enkesit yüksekliği yerine başlıklar arası gövde yüksekliği alındığında, gövde alanı IPE'lerde %6-13; IPN'lerde %11-15; HEA'larda %6-17; HEB'lerde %7-20 ve HEM'lerde %8-33 azalmaktadır. Genel olarak, en büyük yüzde farklar numarası en küçük kesitlerde görülmektedir.

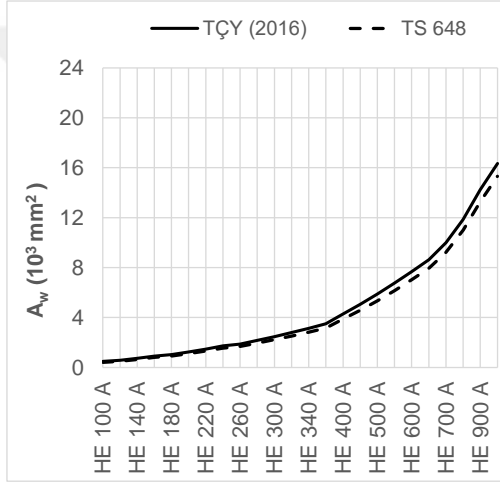
Enkesitlerin gövde alanlarını kendi grupları içinde daha kolay bir şekilde karşılaştırabilmek için, grup içinde aynı enkesit numarasına sahip profillerin enkesit yükseklikleriyle gövde kalınlıkları çarpılarak Şekil 4.13'teki grafikler oluşturulmuştur. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'e göre, incelenen bütün enkesitlerde, gövde alanı enkesit numarası arttıkça artmaktadır, ancak gövde alanındaki artış genelde doğrusal değildir. Küçük enkesit numaralarında küçük, büyük enkesit numaralarında ise nispeten daha büyük artış (yaklaşık olarak logaritmik artış) gözlenmektedir. Şekil 4.13(a)'da, aynı enkesit numaralı I profillerin gövde alanları karşılaştırıldığında, IPE profillerin gövde alanlarının IPN'lerinkinden daha küçük olduğu ve aradaki farkın enkesit numarası arttıkça arttığı görülmektedir. Aynı numaralı HE enkesitlerinde ise gövde alanı en büyük olanın HEM, en küçük olanın ise HEA enkesiti olduğu gözlenmektedir (Şekil 4.13(b)). Gövde alanları açısından, aynı numaraya sahip HEM enkesitleriyle diğer HE enkesitleri arasındaki fark, numarası 300'e yakın enkesitlerde daha fazladır.



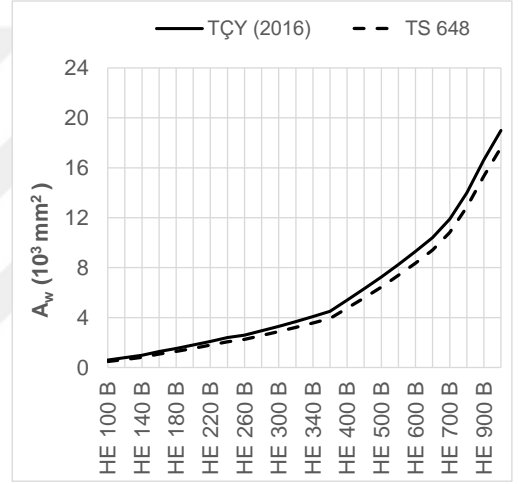
(a) IPE enkesitler



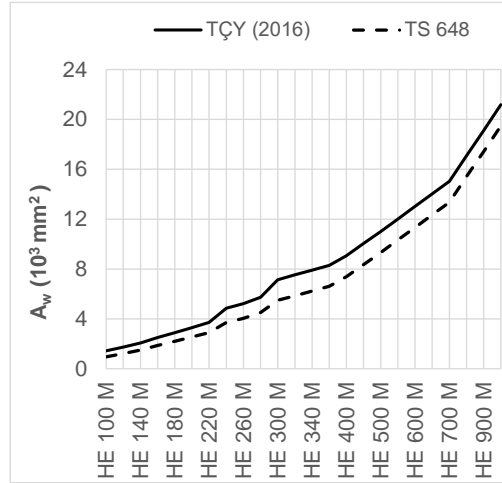
(b) IPN enkesitler



(c) HEA enkesitler

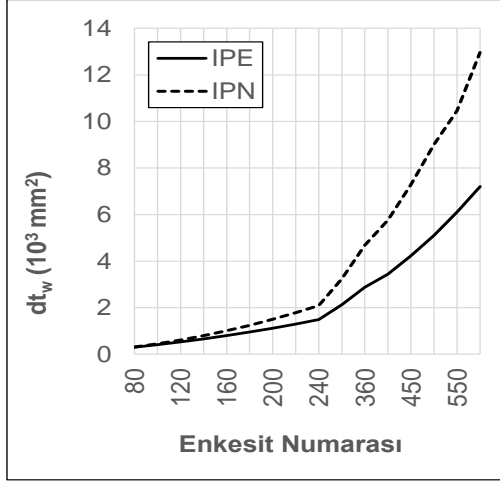


(d) HEB enkesitler

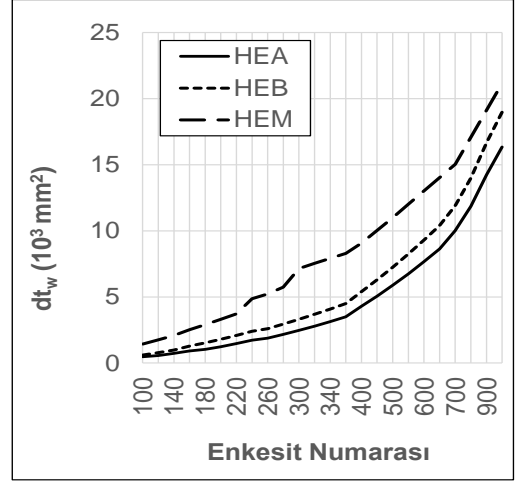


(e) HEM enkesitler

Şekil 4.12. İncelenen enkesitlerin gövde alanlarının ( $A_w$ ) karşılaştırılması



(a) I enkesitler

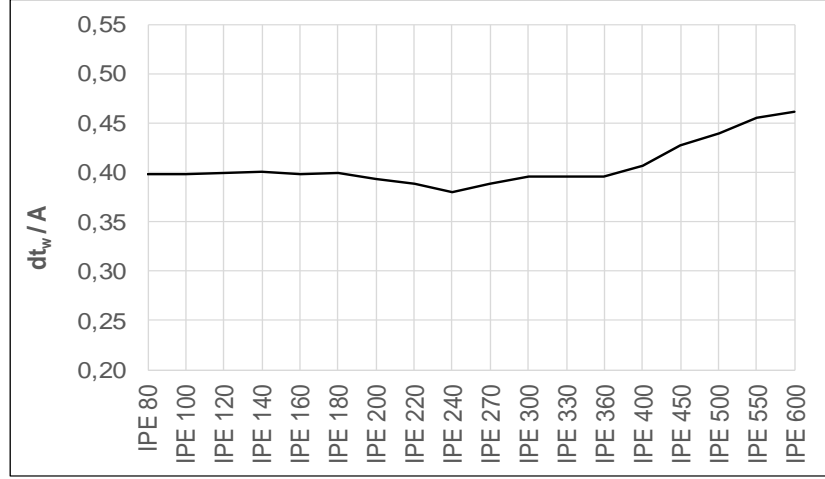


(b) HE enkesitler

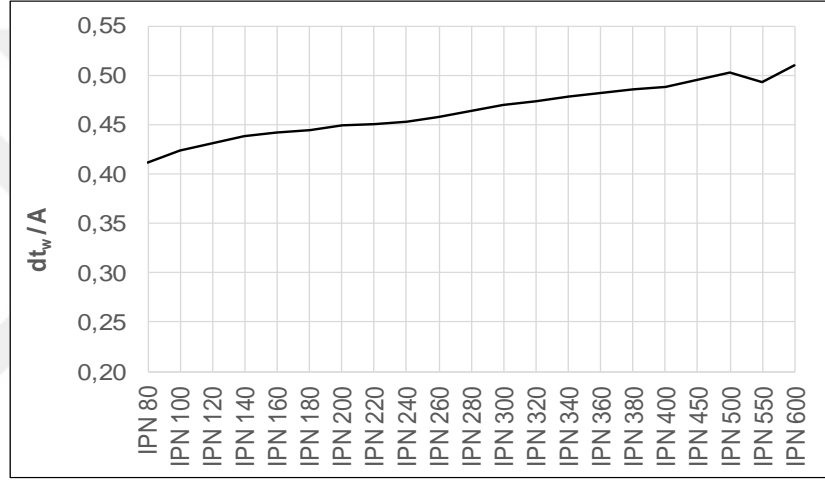
Şekil 4.13. İncelenen enkesitlerin TÇY (2016)'ya göre gövde alanlarının karşılaştırılması

İncelenen enkesitlerin gövde alanları enkesit alanlarına bölünerek  $dt_w/A$  oranları hesaplanmış ve her bir kesit grubu için Şekil 4.14'te verilen grafiklerde çizdirilmiştir. Şekil 4.14(a)'ya göre,  $dt_w/A$  oranı, IPE enkesitlerde, numarası 400'den küçük enkesitlerde hemen hemen sabittir ve değeri 0,40'a eşittir. Daha büyük enkesitlerde ise enkesit numarasıyla artmaktadır. IPN enkesitlerde ise, IPN 550 hariç tutulursa,  $dt_w/A$  oranının artan enkesit numarasıyla yaklaşık olarak 0,40'dan 0,50'ye doğru arttığı (Şekil 4.14(b)) söylenebilir. Şekil 4.14(c)'ye göre, HE enkesitlerinde  $dt_w/A$  oranının enkesit numarasıyla değişimi I enkesitlerinden biraz farklıdır. HEA ve HEB'lerde, numarası 300'den küçük enkesitlerde  $dt_w/A$  oranı ortalama 0,23 değeriyle yaklaşık sabit gitmekte, daha büyük enkesitlerde ise artan enkesit numarasıyla artmaktadır. Enkesit numarası büyük HE profillerinde, aynı enkesit numaralı profillerin üçü için de bu oranın hemen hemen aynı olduğu söylenebilir. HE enkesitlerinde,  $dt_w/A$  oranının en büyük olduğu enkesit HEM 1000 olup (0,477), HEA1000 ve HEB1000 için bu oranlar en büyük değere çok yakındır (sırasıyla 0,471 ve 0,475).

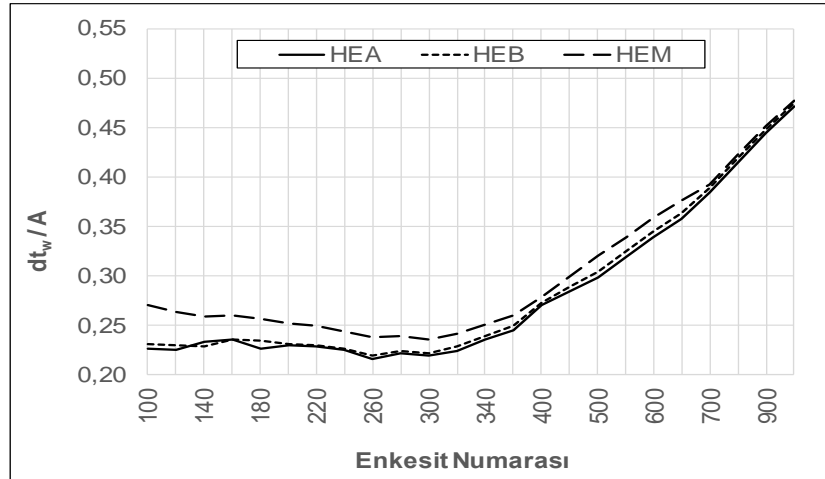
Bölüm 1.4'te başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki çelik yapı elemanlarının kesme kuvveti dayanımını belirleyen en önemli enkesit özelliğinin toplam başlık alanı olduğu belirtilmişti. İncelenen enkesitlerin toplam başlık alanları ( $A_v=2bt_f$ ) hesaplanarak Şekil 4.15'te verilen grafiklerde çizdirilmiştir. Şekil 4.15(a) incelendiğinde, 240 numaralı enkesite kadar, aynı enkesit numarasına sahip IPE ve IPN profillerin toplam başlık alanlarının hemen hemen eşit olduğu ve artan enkesit numarasıyla arttığı görülmektedir.



(a) IPE enkesitler



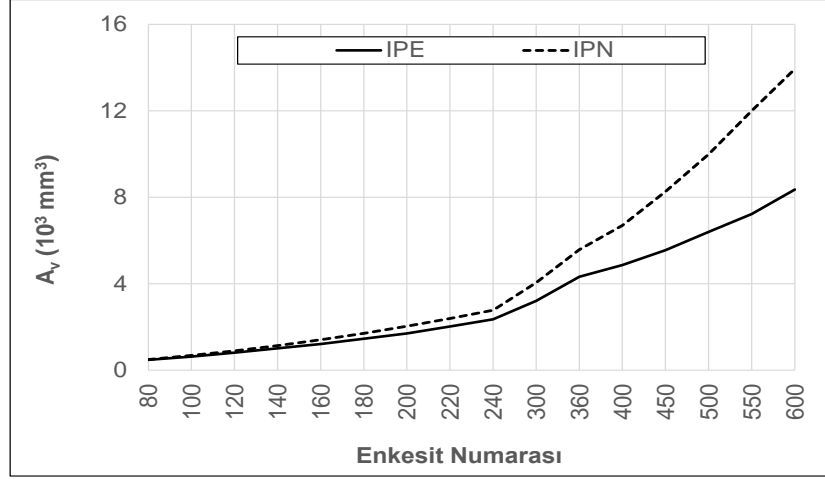
(b) IPN enkesitler



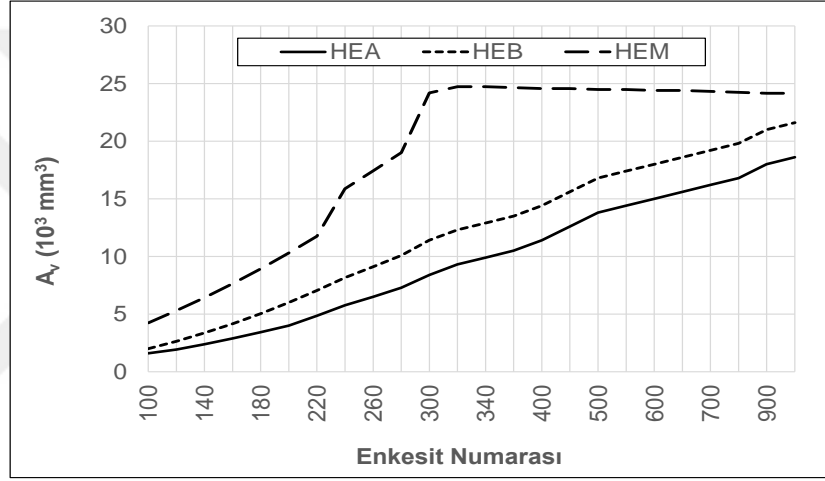
(c) HE enkesitler

Şekil 4.14. İncelenen enkesitlerin gövde alanlarının enkesit alanlarına oranlarının ( $dt_w/A$  oranlarının) karşılaştırılması





(a) I enkesitler



(b) HE enkesitler

Şekil 4.15. İncelenen enkesitlerin toplam başlık alanlarının ( $2b_f t_f$ ) karşılaştırılması

Daha büyük enkesitlerde, aynı enkesit numarasına sahip IPN enkesitlerin toplam başlık alanı IPE'lerden daha büyüktür. Aradaki fark, artan enkesit numarasıyla artmaktadır. IPN600 enkesitinin toplam başlık alanının IPE600 enkesitinin toplam başlık alanına oranı 1,67'dir. HE enkesitler için Şekil 4.15(b)'de verilen grafik incelendiğinde, numarası 300'den büyük HEM enkesitlerinde toplam başlık alanının hemen hemen sabit kaldığı gözlenebilir. Ancak, bu durumda bile aynı enkesit numarasına sahip HE profilleri arasında toplam başlık alanı en yüksek olan enkesitler HEM'lerdir. HEA ve HEB'lerin başlık alanları artan enkesit numarasıyla neredeyse doğrusal bir şekilde artmaktadır. HEM'lerle diğer HE'ler arasındaki fark, enkesit numarası 300'ün üzerinde olan enkesitlerde, artan enkesit numarasıyla azalmasıdır.

Şekil 4.16'da incelenen enkesitlerin toplam başlık alanlarının ( $A_v=2b_f t_f$ ) gövde alanlarına ( $A_w=dt_w$ ) oranları çizdirilmiştir. Şekil 4.16'daki grafiklerden, incelenen bütün

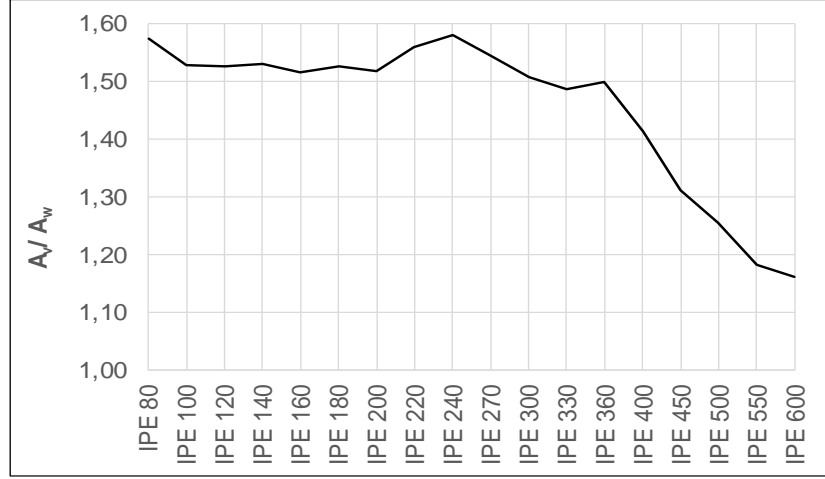
enkesitlerin toplam başlık alanlarının gövde alanlarından büyük olduğu görülebilir. Şekil 4.16(a) incelendiğinde, IPE360'a kadar  $A_v/A_w$  oranının IPE profillerde neredeyse sabit olduğu (yaklaşık 1,50 değeriyle), daha büyük enkesitlerde ise artan enkesit numarasıyla azalarak IPE600'de 1,16'ya eşitlendiği görülmektedir. IPN enkesitlerde (Şekil 4.16(b)) ise, IPN 550 hariç tutulursa,  $A_v/A_w$  oranının değeri, en küçük enkesit numarasından başlamak üzere, artan enkesit numarasıyla 1,59'dan 1,08'e doğru yaklaşık olarak doğrusal bir şekilde azalmaktadır.

HE enkesitleri için  $A_v/A_w$  oranlarının enkesit numarasına göre değişimi Şekil 4.16(c)'de verilmektedir. Buna göre, enkesit numarası 300'e kadar olan tüm HE enkesitlerinde,  $A_v/A_w$  oranı hemen hemen sabittir (3,3 ortalama değeriyle). Daha büyük numaralı enkesitlerde ise oran artan enkesit numarasıyla yaklaşık olarak doğrusal azalarak 1,14 değerine ulaşmaktadır. Büyük numaralı HE enkesitlerinde, toplam başlık alanının gövde alanına oranı aynı enkesit numarasına sahip üç tür HE enkesitte de yaklaşık eşit olduğu söylenebilir.

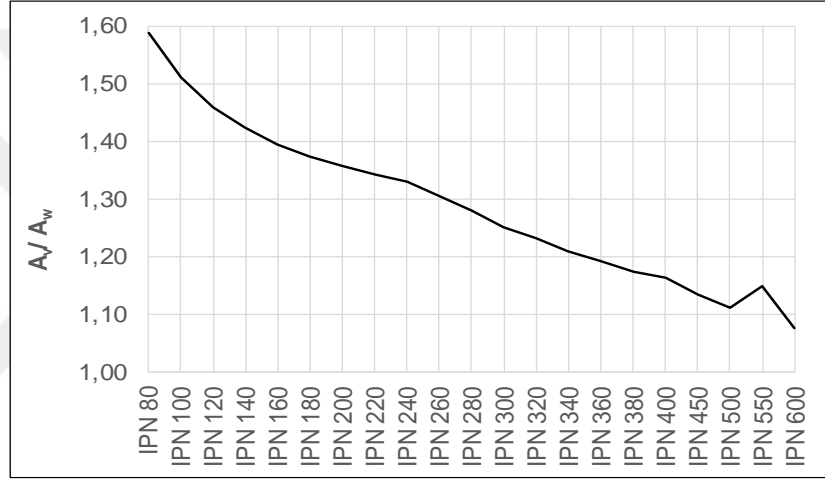
#### **4.2. Tasarım Yaklaşımları ve İlgili Yük Birleşimleri**

Bölüm 2.1 ve Bölüm 3.1 karşılaştırıldığında, TS 648'de tanımlanan tasarım ilkelerinin Emniyet Gerilmeleri (EG) yöntemi temel alınarak hazırlandığı, buna karşın TÇY (2016)'da tanımlanan tasarım yaklaşımlarının her ikisinde de karakteristik dayanımların sınır durumlara göre tasarım ilkelerine göre hesaplandığı görülmektedir. Yönetmelik'te tanımlanan iki tasarım yaklaşımı arasındaki en önemli fark, YDKT yönteminde kullanılan yük birleşimlerinde yüklerin bazılarının yük katsayılarıyla artırılmasına karşın GKT yönteminde yüklerin hiç bir yük birleşiminde artırılmamasıdır. Bu nedenle, temel yapı tasarımı felsefesi uyarınca, GKT yönteminde dayanımlar YDKT yöntemine göre 1,5 kat daha fazla azaltılmaktadır.

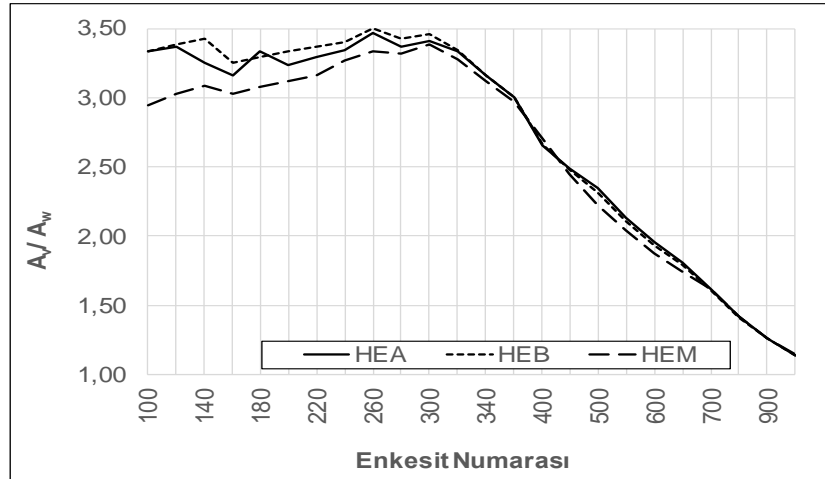
Yüklerin artırılmadan birleştirildiği göz önünde bulundurulduğunda, Yönetmelik'te GKT yöntemi için tanımlanan yük birleşimlerinin Standart'taki yük birleşimlerine benzediği düşünülebilir. Ancak, Standart'ta tanımlanan yük birleşimleri ile GKT yöntemi için Bölüm 2.1.2'de tanımlanan yük birleşimleri karşılaştırıldığında, GKT yük birleşimlerinde zamana bağlı ilave yüklerin yapıya aynı anda etkime olasılığının düşük olmasının dikkate alındığı, buna karşın Standart'ta tanımlanan yük birleşimlerinde yüklerin azaltılmadan toplandığı görülmektedir.



(a) IPE enkesitler



(b) IPN enkesitler



(c) HE enkesitler

Şekil 4.16. İncelenen enkesitlerin toplam başlık alanlarının gövde alanlarına oranlarının ( $A_v/A_w=2b_f t_f/d t_w$ ) karşılaştırılması

Bununla birlikte, Giriş bölümünde belirtildiği gibi, Standart'ta, zamana bağlı ilave yüklerin bulunduğu yük birleşimlerinde emniyet gerilmelerinin %15 artırılmasına izin verildiği unutulmamalıdır. GKT yük birleşimlerinin Standart'ta tanımlanan yük birleşimlerinden bir diğer önemli farkı da deprem etkilerinin dahil edildiği yük birleşimlerinde gözlenmektedir. GKT yük birleşimlerinde, istatistiksel nedenlerle uygulanan azaltma katsayılarının haricinde, deprem etkileri %30 azaltılarak yük birleşimine dahil edilmektedir. Buna karşın, Standart'ta deprem etkileri azaltılmadan kullanılmaktadır. İki tasarım yaklaşımı arasındaki bu farklılığın, kısmen yürürlükteki Türk Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) tarafından azaltıldığı düşünülebilir; zira, Giriş bölümünde belirtildiği gibi, DBYBHY (2007) düşey yükler ve depremin ortak etkisi altında Standart'a göre yapılan kesit hesaplarında emniyet gerilmelerinin %33 artırılmasına izin vermektedir. TÇY (2016) GKT yöntemi için tanımlanan yük birleşimleriyle Standart'ta tanımlanan yük birleşimlerinin detaylı karşılaştırması bu tezin kapsamı dışında olup, bu tezde tasarım kuralları karşılaştırılırken yük birleşimlerindeki farklılıklar göz ardı edilerek, temel tasarım denklemlerinin yalnız dayanımlarla ilgili olan bölümleri karşılaştırılacaktır.

#### **4.3. Yerel Burkulma Sınır Durumu İçin Enkesitlerin Sınıflandırılması**

Basit eğilme etkisindeki çelik hadde elemanlarının tasarım ilkeleri açısından Standart'la Yönetmelik arasındaki önemli farklardan biri Standart'ta yerel burkulma sınır durumunun tasarıma dahil edilmemesidir. Buna karşın, Bölüm 2.2.3'te belirtildiği gibi, Yönetmelik basit eğilme etkisindeki çelik yapı elemanlarının basınç etkisindeki enkesit parçalarını sınıflandırarak, gerekli durumlarda, yerel burkulma sınır durumunu dayanım hesaplarına dahil etmektedir. Yönetmelik'te, I-enkesitli elemanların basınç başlıkları ve gövdeleri için sınır narinlikler tanımlanmakta, bu yolla enkesitler sınıflandırılmaktadır. TÇY (2016)'da, sınır narinlikler, kompakt başlık (gövde) parçası için sınır narinlik ve kompakt olmayan başlık (gövde) parçası için sınır narinlik olarak adlandırılmakta, sırasıyla  $\lambda_{pf}$  ve  $\lambda_{rf}$  ( $\lambda_{pw}$  ve  $\lambda_{rw}$ ) sembolleriyle ifade edilmektedir. Denklem (2.6)'da verilen sınır narinliklerin yalnız yapısal çeliğin malzeme özelliklerine bağlı olduğu gözlenebilir. Yönetmelik'te yapısal çeliğin elastisite modülü için sabit bir değer ( $E=200$  GPa) tanımlandığı dikkate alınır, sınır narinliklerin yalnız yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesine ( $F_y$ ) bağlı olduğu fark edilebilir. Tezin kapsamında incelenen çelik sınıfları için sınır değerler Denklem (2.6)'daki eşitlikler kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.3'te sunulmuştur.

Tablo 4.3. TÇY (2016)'da eğilme momenti etkisindeki I-enkesitli hadde profillerin başlık ve gövdeleri için tanımlanan sınır narinliklerin farklı çelik sınıfları için değerleri

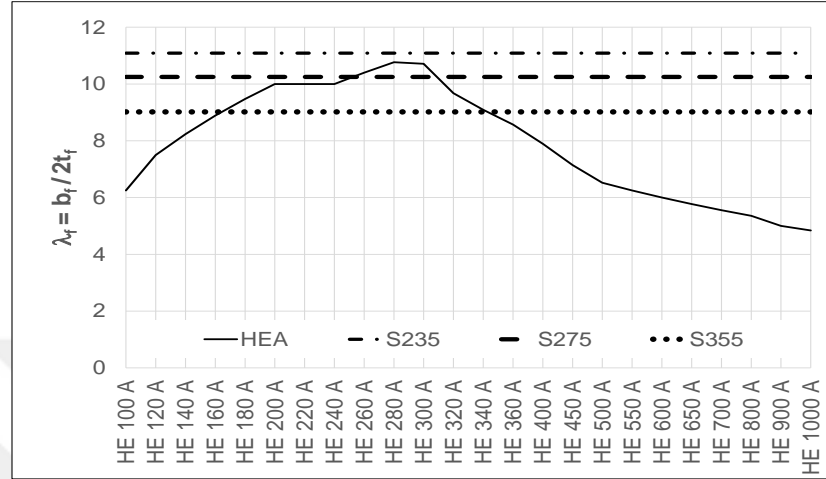
Çelik Sınıfı	$\lambda_{pf}$	$\lambda_{rf}$	$\lambda_{pw}$	$\lambda_{rw}$
S235	11,1	29,2	110	166
S275	10,2	27,0	101	154
S355	9,02	23,7	89,3	135

Tablo 4.3'ten de görülebileceği gibi,  $F_y$  arttıkça sınır narinlikler küçülmektedir. S355 çeliği için gövde narinliğinin üst sınır değeri  $\lambda_{pw,S355}=89,3$  olarak belirlenmiştir. Tablo 4.2'deki değerler, Tablo 4.3'teki ilgili sınır değerlerle karşılaştırıldığında, tüm enkesitler arasında gövde narinliği en yüksek olan HEA1000 enkesitinin gövde narinliğinin ( $\lambda_{w,max}=52,6$ ) bile incelenen en yüksek akma dayanımına sahip çelik sınıfı olan S355 çeliği için hesaplanan kompakt gövde parçası için sınır narinlik değerinden ( $\lambda_{pw,max}=89,3$ ) çok daha küçük olduğu görülebilir. Buradan, bu tez kapsamında incelenen tüm enkesitlerin gövdelerinin kompakt olduğu sonucu çıkarılabilir.

Buna karşın, enkesitler arasında başlık narinliği en yüksek olan HEA280 enkesitinin başlık narinliğinin ( $\lambda_{f,max}=10,8$ ) yalnız S235 çelik sınıfı için hesaplanan kompakt başlık parçası için sınır narinlik değerinden ( $\lambda_{pf,S235}=11,1$ ) küçük olduğu; daha yüksek çelik kaliteleri için hesaplanan sınır değerlerden ( $\lambda_{pf,S275}=10,2$  ve  $\lambda_{pf,S355}=9,02$ ) büyük olduğu görülebilir. Bununla birlikte, Tablo 4.3'ten de fark edilebileceği gibi HEA280 enkesitinin başlık narinliği ( $\lambda_{f,max}=10,8$ ) bile, incelenen en yüksek akma dayanımına sahip çelik sınıfı olan S355 çeliği için hesaplanan kompakt olmayan başlık parçası için sınır narinlik değerinin ( $\lambda_{rf,max}=23,7$ ) çok altındadır. Diğer bir deyişle, Tablo 4.1'de listelenen enkesitler arasında narin başlıklı enkesit bulunmamaktadır; ancak başlıkları kompakt olmayan enkesitler mevcuttur. Tablo 4.2'de listelenen enkesitler arasında HEA enkesitlerinin haricindeki enkesitler dikkate alınır, en yüksek başlık narinliğinin HEB enkesit grubunda olduğu ve değerinin de 7,89'a eşit olduğu görülebilir. Bu değer S355 çeliği için hesaplanan  $\lambda_{pf}$  değerinden (9,02) küçük olduğu göz önünde bulundurulursa, bu tez kapsamında incelenen enkesitlerin arasında, HEA enkesitlerinin haricinde, kompakt olmayan enkesit bulunmadığı sonucuna varılabilir. Bu durumda, TÇY (2016)'ya göre, HEA enkesitlerinin haricinde incelenen tüm enkesitler kompakt olarak sınıflandırılmaktadır.

Şekil 4.17'de, HEA enkesitlerinin başlık narinlikleri üç farklı çelik sınıfı için hesaplanan kompakt başlık için sınır narinlik ( $\lambda_{pf}$ ) değerleriyle karşılaştırılmaktadır. Şekilden de görülebileceği gibi, HEA grubundaki tüm enkesitler yalnız S235 çelik kalitesinde

kompakt kalmaktadır. S275 çelik kalitesi için, üç HEA enkesitinin (HEA260, HEA280 ve HEA300) başlıkları kompakt olmayan sınıfa dahildir. S355 çelik sınıfı için ise başlıkları kompakt olmayan HEA enkesiti sayısı dokuzdur. Bu enkesitler, numaraları 180 ila 340 arasında olan enkesitlerdir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. HEA enkesitlerinin başlık narinliklerinin üç farklı çelik sınıfı için hesaplanan kompakt başlık parçası için sınır narinlik ( $\lambda_{pf}$ ) değerleriyle karşılaştırılması

#### 4.4. Kuvvetli Eksen Etrafında Eğilme Etkisinde Tasarım Kurallarının ve Dayanımların Karşılaştırılması

Kuvvetli eksenleri etrafında eğilme momenti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli çelik yapı elemanları için Bölüm 2.2 ve Bölüm 3.2'de verilen tasarım kuralları karşılaştırıldığında, Yönetmelik'le Standart arasındaki önemli farklardan birinin Standart'ta yerel burkulma ve akma sınır durumlarının tasarıma dahil edilmemesi olduğu görülebilir. Tasarım ilkelerindeki bu önemli farkın eleman dayanımlarına etkilerini detaylı olarak incelemek amacıyla önce yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt enkesitli elemanlar, ardından yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt olmayan başlıklı elemanlar ve son olarak da yanal burkulma tehlikesi olan elemanlar ele alınacaktır.

#### 4.4.1. Yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt enkesitli elemanlar

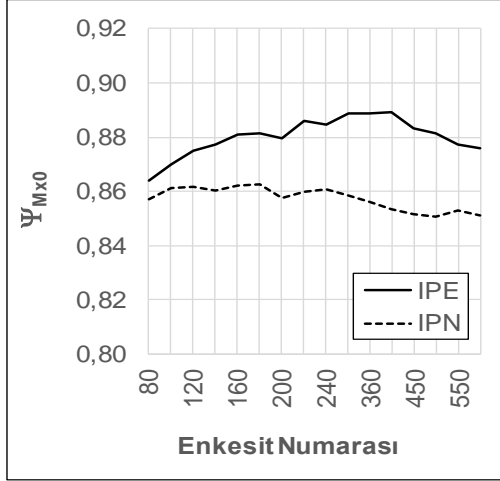
TS 648 burkulma tehlikesi olmayan elemanların “emniyetli eğilme momenti dayanımı”nı akma momentinin %60’yla sınırlarken, TÇY (2016) “güvenli eğilme momenti dayanımı”nın üst sınırını plastik moment dayanımının yaklaşık %60’ı olarak belirlemiştir. Bu durumda, burkulma tehlikesi olmayan (yani, enkesiti kompakt ve  $L_b < L_p$  olan) ve kuvvetli eksen etrafında eğilen I-enkesitli bir hadde profilinin emniyetli eğilme momenti dayanımının ( $M_{x,all}$ ) güvenli eğilme momenti dayanımına ( $M_{nx}/\Omega_b$ ) oranı, yani, “kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti dayanım oranı”, yaklaşık olarak enkesitin kuvvetli eksen etrafında elastik mukavemet momentinin ( $W_{ex}$ ) aynı eksen etrafındaki plastik mukavemet momentine ( $W_{px}$ ) oranına eşittir,

$$\Psi_{Mx0} = \frac{(M_{x,all})_{max}}{(M_{nx} / \Omega_b)_{max}} = \frac{0,6F_y W_{ex}}{F_y W_{px} / 1,67} \cong \frac{W_{ex}}{W_{px}} \quad (4.1)$$

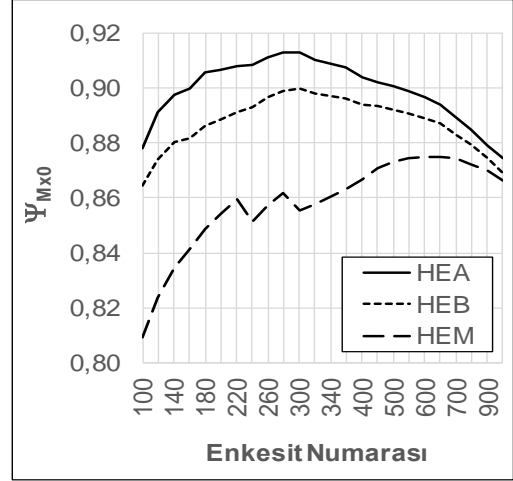
Denklem (4.1)’de dayanım oranı için kullanılan semboldeki ( $\Psi_{Mx0}$ ) 0 alt indisi, elemenda yerel/yanal burkulma tehlikesinin olmaması koşulunu ifade etmektedir.  $\Psi_{Mx0}$  aynı zamanda kuvvetli eksen de eğilmedeki şekil faktörünün (Şekil 4.3) tersine de eşittir.

Bir enkesitin bir eksene göre elastik mukavemet momentinin aynı eksene göre plastik mukavemet momentinden daha küçük olduğu bilindiğine göre, incelenen bütün kompakt enkesitli elemanlar için  $\Psi_{Mx0} < 1,0$ ’dir. Diğer bir deyişle, yanal burkulma tehlikesi olmayan I-enkesitli hadde profillerinin kuvvetli eksen de eğilme momenti dayanımlarını hesaplarken Standart incelenen tüm kompakt enkesit ve çelik kalitelerinde Yönetmelik’ten daha güvenli tarafta kalmaktadır.

Tezin kapsamında incelenen tüm enkesitler için  $\Psi_{Mx0}$  değerleri Denklem (4.1) kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 4.18’de sunulmuştur.



(a) I enkesitler



(b) HE enkesitler

Şekil 4.18. Yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt enkesitli hadde profilleri için kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti dayanım oranları

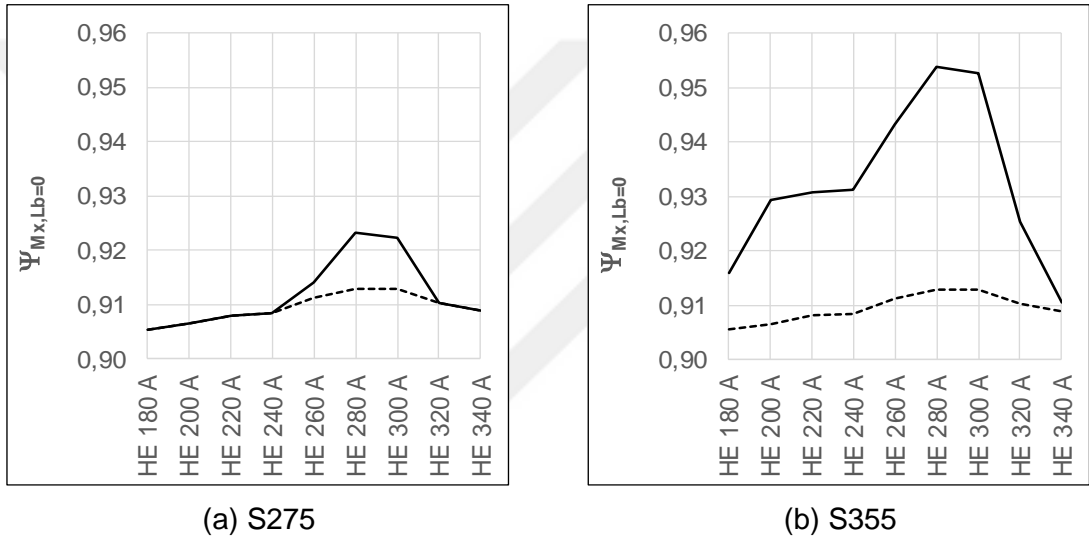
Denklem (4.1)'den fark edilebileceği gibi,  $\Psi_{Mx0}$  çelik kalitesinden bağımsızdır. Şekil 4.18'den, dayanım oranının en büyük değerinin yaklaşık 0,91 olduğu (HEA enkesitlerinde) görülmektedir. Bazı IPN ve HEM enkesitlerinde ise bu oran 0,85'in altına düşmektedir.

#### 4.4.2. Yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt olmayan başlıklı elemanlar

TÇY (2016)'ya göre, kompakt olmayan veya narin başlıklı çift simetri eksenli I-enkesitli eğilme elemanlarının karakteristik eğilme momenti dayanımları hesaplanırken yerel başlık burkulması sınır durumu dikkate alınmalıdır. Bölüm 4.3'te, tezde incelenen enkesitlerden yalnız bir kaç HEA enkesitinin başlıklarının çelik sınıfının S275 ve S355 olması durumunda kompakt olmayan sınıfına dahil olduğu, buna karşın narin başlıklı enkesitin bulunmadığı belirlenmişti. Yönetmelik'e göre, yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt olmayan başlıklı HEA enkesitlerinin kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti etkisindeki davranışını elastik olmayan başlık burkulması belirleyecektir. Bu durumda, elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı Denklem (2.7)'de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmalıdır. TS 648 yerel burkulma sınır durumunu tasarıma dahil etmediği için, bu tür elemanlarda emniyetli eğilme momenti dayanımı  $M_{x,all} = 0,6F_yW_{ex}$ 'e eşittir. S355 çelik sınıfında kompakt olmayan başlıklı olarak sınıflandırılan tüm HEA enkesitlerinin güvenli dayanımları hem S275 hem de S355 çeliği için Denklem (2.7) kullanılarak hesaplanıp, emniyetli eğilme momenti dayanımlarına bölünerek dayanım oranları bulunmuş ve ilgili grafikler Şekil 4.19(a) ve (b)'de sunulmuştur. Şekil 4.19'da verilen grafiklerde dayanım oranı için kullanılan semboldeki ( $\Psi_{Mx,Lb=0}$ ) " $L_b=0$ " alt indisi, elemanda yanal burkulma tehlikesinin olmaması



koşulunu ifade etmektedir. Yerel başlık burkulması sınır durumunun dayanım oranını nasıl etkilediğini belirlemek amacıyla, grafiklere kesikli çizgiler kullanılarak  $W_{ex}/W_{px}$  değerleri de eklenmiştir. Şekil 4.19'dan görülebileceği gibi, S355 çelik kalitesinde güvenli eğilme momenti dayanımındaki azalma, dolayısıyla dayanım oranındaki artış, daha yüksektir. Dayanım oranındaki en büyük artış başlık narinliği en yüksek olan HEA280 enkesitinde gözlenmektedir. Ancak, bu durumda dahi dayanım oranının değeri 1'i aşmamaktadır. Diğer bir deyişle, yanal burkulma tehlikesi olmayan elemanlarda, kuvvetli eksende eğilme momenti dayanımı açısından, tezin kapsamında incelenen tüm enkesit ve çelik kalitelerinde, Standart Yönetmelik'ten daha güvenli tarafta kalmaktadır.



Şekil 4.19. Yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt olmayan enkesitli hadde profilleri için kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti dayanım oranları (kesikli çizgiler yerel başlık burkulmasının önlendiği durumu ( $\Psi_{Mx0}$ ) ifade etmektedir)

#### 4.4.3. Yanal burkulma tehlikesi olan elemanlar

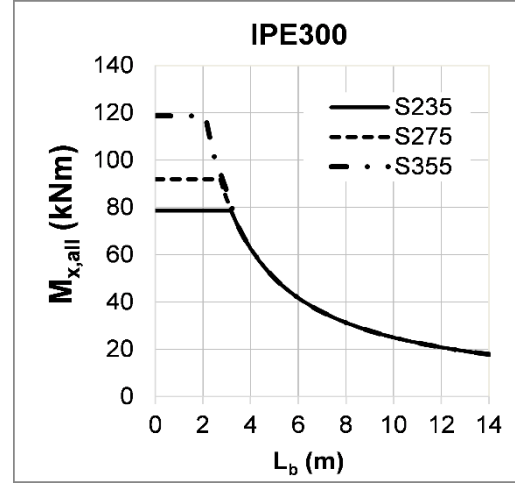
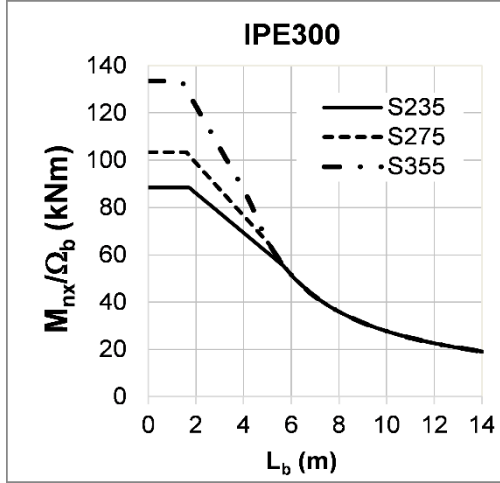
TÇY (2016)'ya göre, yanal burkulma tehlikesi olan elemanlarda, yani, stabilite bağlantısıyla desteklenmeyen eleman uzunluğu olarak tanımlanan  $L_b$  değeri, akma sınır durumu için yanal olarak desteklenmeyen sınır uzunluk olan  $L_p$  değerinden büyük olan elemanlarda, kuvvetli eksen etrafında karakteristik eğilme momenti dayanımı hesaplanırken yanal burulmalı burkulma sınır durumu da dikkate alınmalıdır. Kompakt enkesitli elemanlarda, karakteristik eğilme momenti dayanımı ( $M_{nx}$ ),  $L_b$  elastik olmayan yanal burulmalı burkulmada sınır uzunluktan ( $L_r$ ) küçükse Denklem (2.14), büyükse Denklem (2.15)'te verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmalıdır. Kompakt olmayan başlıklı elemanlarda ise yanal burkulma sınır durumu için elde edilen karakteristik dayanım, yerel burkulma sınır durumu için Denklem (2.7)'de

verilen eşitlik kullanılarak hesaplanan dayanımla karşılaştırılmalı, bu iki değerden küçüğü elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı olarak alınmalıdır.

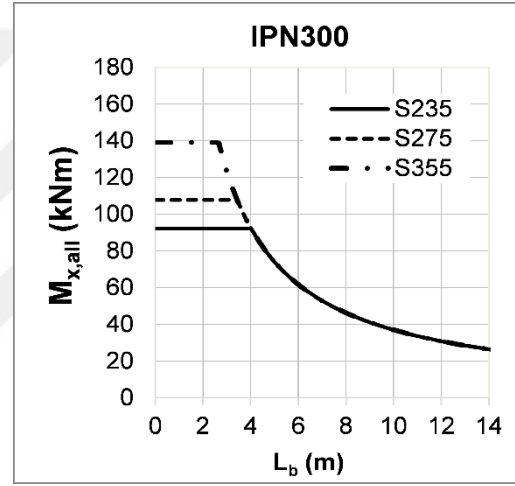
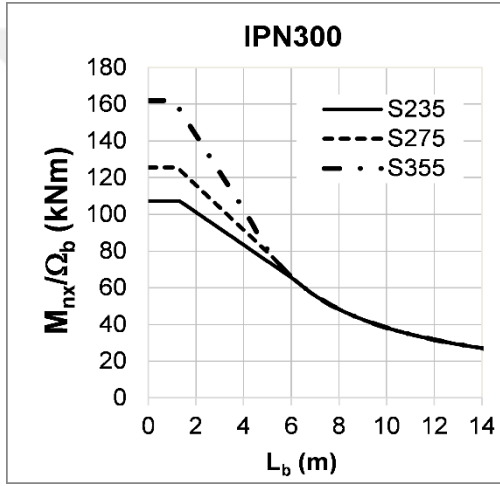
TS 648'de ise yanal burkulma emniyet gerilmesi Denklem (3.4)'te verilen eşitlikle Denklem (3.5)'te verilen eşitliklerden uygun olanı kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmalı, hesaplanan değerlerden büyüğü  $0,60F_y$  değerini aşmayacak şekilde kullanılmalıdır. Çoğu hadde profilinde Denklem (3.4)'ten hesaplanan emniyet gerilmesi değerinin Denklem (3.5)'ten hesaplanandan daha büyük olduğu belirlenmiştir.

Kuvvetli eksenleri etrafında eğilen IPE300 ve IPN300 enkesitli çelik yapı elemanlarının farklı burkulma boylarındaki ( $L_b$ ) güvenli eğilme momenti dayanımları ( $M_{nx}/\Omega_b$ ) Yönetmelik'te verilen tasarım denklemleri kullanılarak üç farklı çelik kalitesi (S235, S275 ve S355) için hesaplanmış ve Şekil 4.20'de sol sütunda sunulmuştur. Aynı enkesit ve çelik sınıfları için, Standart'da verilen tasarım denklemleri kullanılarak emniyetli eğilme momenti dayanımları ( $M_{x,all}$ ) hesaplanarak Şekil 4.20'de sağ sütunda sunulmuştur. Şekil 4.20'de verilen dayanım eğrileri karşılaştırıldığında, incelenen enkesit ve çelik kaliteleri için, Yönetmelik ve Standart'ın tasarım denklemleri arasındaki farklar belirlenebilir.

Öncelikle hem IPE hem de IPN enkesitinin kompakt olmaları nedeniyle, Şekil 4.20'de çizilen güvenli dayanım eğrilerinde yerel burkulma sınır durumunun dikkate alınmadığı, yalnız akma ve yanal burkulma sınır durumlarının göz önünde bulundurulduğu belirtilmelidir. Güvenli dayanım eğrilerinin, Yönetmelik'in tanımına uygun olarak, üç bölgeden oluştuğu görülmektedir. Elemanın burkulma boyunun ( $L_b$ 'nin)  $L_p$ 'den küçük olduğu ilk bölgede güvenli eğilme momenti dayanımı, elemanın burkulma boyundan bağımsızdır ve şiddeti  $M_{nx}/\Omega_b=M_{px}/1,67$ 'ye eşittir. Bu bölgede, yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesi ( $F_y$ ) arttıkça elemanın dayanımı artmaktadır. Plastik eğilme momenti, enkesitin elastik mukavemet momenti ile akma gerilmesinin çarpımına eşit olduğundan, dayanım akma gerilmesiyle doğru orantılı olarak artmaktadır. Örneğin, S235 çeliği için elde edilmiş dayanım değeri, akma dayanımlarının oranı olan  $355/235$  değeriyle çarpıldığında aynı elemanın S355 çelik kalitesindeki dayanımı belirlenebilir.



(a) IPE300 için emniyetli (sağda) ve güvenli (solda) eğilme momenti dayanımları



(b) IPN300 için emniyetli (sağda) ve güvenli (solda) eğilme momenti dayanımları

Şekil 4.20. 300 numaralı I enkesitli hadde profillerinin kuvvetli eksen etrafında eğilmeye güvenli ( $M_{nx}/\Omega_b$ ) ve emniyetli ( $M_{x,all}$ ) eğilme momenti dayanım eğrilerinin çelik kalitesiyle değişimi

Şekil 4.20'deki güvenli dayanım eğrilerinden, çeliğin akma dayanımı arttıkça dayanımın sabit kaldığı platonun uzunluğunun (yani,  $L_p$ 'nin değerinin) azaldığı görülmektedir. Örnek olarak, IPE 300 için  $L_p$  değerleri, S235, S275 ve S355 çelik sınıfları için sırasıyla, 1,72 m, 1,59 m ve 1,4 m'dir. Bu da demektir ki aynı burkulma boyuna ve enkesitine sahip ancak farklı çelik kalitesinde üretilmiş iki eğilme elemanının davranışını farklı sınır durumları belirleyebilmektedir. Örnek olarak,  $L_b=1,5$  m olan IPE enkesitli bir çelik yapı elemanının davranışını çelik kalitesi S235 veya S275 ise akma, S355 ise inelastik yanal burulmalı burkulma sınır durumu belirleyecektir.

Güvenli dayanım hesabında doğrusal geçiş denkleminin kullanıldığı bölgede, elemanın davranışını elastik olmayan yanal burkulma sınır durumu belirleyecektir. Şekil 4.20'deki güvenli dayanım eğrilerinden görülebileceği gibi, bu bölgede çelik

kalitesinin dayanımdaki etkisi  $L_b$  arttıkça azalmaktadır. İkinci bölgeyle üçüncü bölge arasındaki sınırı belirleyen  $L_r$  değerleri de tıpkı  $L_p$  değerleri gibi akma gerilmesi arttıkça azalmaktadır. Örnek olarak, IPE 300 için  $L_r$  değerleri, S235, S275 ve S355 çelik sınıfları için sırasıyla, 5,72 m, 5,10 m ve 4,26 m'dir. Aynı enkesit ve çelik kaliteleri için  $L_r - L_p$  değerleri, yani, elastik olmayan burkulma bölgesinin boyları, sırasıyla 4,00 m; 3,51 m ve 2,86 m olarak hesaplanabilir. Bu da demektir ki, akma gerilmesi arttıkça elastik olmayan burkulma bölgesinin uzunluğu da azalmaktadır. S275 ve S355 çelik kaliteleri için elde edilen  $L_r - L_p$  değerleri, S235 için elde edilen değere oranlanırsa, bu oranın sırasıyla 0,878 ve 0,715 olduğu belirlenebilir. İncelenen tüm enkesitler için bu oranlar hesaplandığında, S275 için ortalama 0,85 (en büyük 0,89, en küçük 0,86) ve S355 için ortalama 0,67 (en büyük 0,64, en küçük 0,75) değerleri elde edilmiştir.

$L_b=L_r$  durumunda  $M_{nx}=M_{rx}=0,7W_{ex}F_y$  olduğuna göre, Şekil 4.20'deki güvenli dayanım eğrilerinde üçüncü bölgenin başladığı eleman burkulma boyundaki dayanımlar aslında çeliğin akma gerilmesiyle doğru orantılıdır. Ancak,  $L_r$  değerleri çelik kalitesine bağlı olduğu için bu oranı grafiklerde görmek nispeten daha zordur.  $L_b>L_r$  durumunda, yani elemanın eğilme momenti dayanımının elastik yanal burkulma sınır durumuyla belirlendiği burkulma boylarında, dayanım çelik kalitesinden bağımsızdır. Bu nedenle, belli bir burkulma boyundan sonra üç farklı çelik kalitesi için çizilmiş güvenli dayanım eğrileri tek bir eğriye indirgenmektedir. Güvenli dayanım eğrilerinin çelik kalitesinden bağımsız olduğu en küçük eleman burkulma boyu, akma gerilmesi en küçük olan çelik sınıfı için hesaplanan  $L_r$  değerine eşittir. Örnek olarak, Şekil 4.20(a)'da IPE300 için çizilen güvenli dayanım eğrileri  $5,72 \text{ m} \leq L_b$  için tek bir eğriye indirgenmektedir.

Şekil 4.20(b)'de IPN300 için verilen güvenli dayanım eğrileri Şekil 4.20(a)'da IPE300 için verilenlerle karşılaştırılırsa, aynı çelik kalitesi ve burkulma boyu için, IPN300 enkesitli elemanın kuvvetli ekseninde eğilmede güvenli eğilme momenti dayanımının IPE300 enkesitli elemanın dayanımından daha büyük olduğu görülebilir. Elbette bunun en önemli nedeni, IPN300 enkesitinin mukavemet momentlerinin ( $W_{px}=762000 \text{ mm}^3$ ,  $W_{ex}=653000 \text{ mm}^3$ ) IPE300 enkesitinininkinden ( $W_{px}=628000 \text{ mm}^3$ ,  $W_{ex}=557000 \text{ mm}^3$ ) büyük olmasıdır. Birinci bölgede, herhangi bir çelik sınıfı için, IPN300 enkesitli elemanın güvenli dayanımının IPE300 enkesitli elemanın güvenli dayanımına oranı enkesitlerin  $W_{px}$ 'lerinin oranına, yani, 1,21'e eşittir. S235, S275 ve S355 çelik sınıflarında, IPN300 enkesiti için,  $L_p$  değerleri sırayla 1,31 m, 1,22 m ve 1,07 m;  $L_r$  değerleriyse 6,14 m, 5,33 m ve 4,27 m olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.20(b)'den de görülebileceği gibi, IPN300 için hesaplanan  $L_p$  değerleri, incelenen tüm çelik kalitelerinde, IPE300 için hesaplanarlardan daha küçüktür. Diğer bir deyişle, IPN300

enkesitinin güvenli dayanım eğrilerinde birinci bölge daha kısadır. Buna karşın, IPN300'ün  $L_r$  değerleri, IPE300'ün değerlerinden daha büyüktür. Buradan, IPN300 profilinin güvenli dayanım eğrilerinde ikinci bölgenin incelenen bütün çelik kalitelerinde IPE300'e kıyasla daha uzun olduğu sonucu çıkarılabilir. Bu durum, ilgili grafiklerde de görülmektedir.

300 numaralı I enkesitlerinin Standart'a göre belirlenmiş "emniyetli" dayanım eğrileri Şekil 4.20'de (sağda) verilmiştir. Bu eğrilerin iki bölgeden oluştuğu görülmektedir. Her ne kadar yanal burkulma emniyet gerilmesi hesabında kullanılan denklemlerden biri elemanın narinliğine göre ( $L_b/i_{ts}$ ) değişiyor olsa da ilgili grafiklerde bu değişim görünmemektedir. Bunun en önemli nedeni, Bölüm 3.2'de belirtildiği gibi, incelenen enkesitlerin çoğunda kiriş narinliğine bağlı olarak hesaplanan emniyet gerilmesinin (Denklem (3.5)), narinlikten bağımsız olan emniyet gerilmesinden (Denklem (3.4)) küçük çıkması nedeniyle dayanım hesabına katılmamasıdır. İncelenen tüm enkesitlerde, S235 çelik kalitesinde yanal burkulma emniyet gerilmesi Denklem (3.4)'ten hesaplanmaktadır. S275 çeliğinde IPE500, IPE550, IPE600 ve HEA1000 enkesitli elemanların bazı burkulma boylarında, S355 çeliğinde ise enkesit numarası 300 ve üstü IPE profillerin, enkesit numarası 800 ve üstü HEA profillerin ve HEB1000 profilinin bazı burkulma boylarında emniyet gerilmesi Denklem (3.5) kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak bu durumlarda da (örneğin, Şekil 4.20(a)(sağ)'da, IPE300 enkesiti ve S355 çelik kalitesi durumunda), Denklem (3.4) ve Denklem (3.5)'ten elde edilen değerlerin birbirine oldukça yakın olmasından dolayı grafiklerde gözle görülebilir düzensizlikler oluşmamaktadır. Bu nedendir ki incelenen enkesit ve çelik kaliteleri için TS 648'de verilen tasarım ilkelerinin iki bölgeyi dayanım eğrileri oluşturduğu varsayılabilir. TÇY (2016)'daki gibi, dayanımın elemanın burkulma boyundan bağımsız olduğu ilk bölgede emniyetli eğilme momenti dayanımı  $0,6F_yW_{ex}$ 'e eşittir çünkü bu bölgede yanal burkulma emniyet gerilmesi,  $0,6F_y$ 'den büyüktür. Şekil 4.20'de, IPE300 enkesiti ve S235 çelik kalitesi için sağ ve sol sütunda verilen grafikler karşılaştırılacak olursa, kompakt enkesitler için, Standart'ın tanımladığı en büyük emniyetli eğilme momenti dayanımının (78,5 kNm) Yönetmeliğin tanımladığı en büyük güvenli eğilme momenti dayanımına (88,4 kNm) oranının yaklaşık 0,9'a eşit olduğu, bu değer de aslında  $\Psi_{Mx0}$ 'a eşit olduğu görülebilir.

Standart'a göre, burkulma boyu Bölüm 3.2'de tanımlanan  $L_p$  boyunu (tezin bu bölümünde  $L_p^*$  sembolüyle ifade edilecektir.) aştığında, elemanın eğilme davranışını yanal burulmalı burkulma belirlemeye başlar. İkinci bölgede elemanın dayanımı burkulma boyu arttıkça azalır. IPE 300 enkesiti ve S235, S275 ve S355 çelik kaliteleri

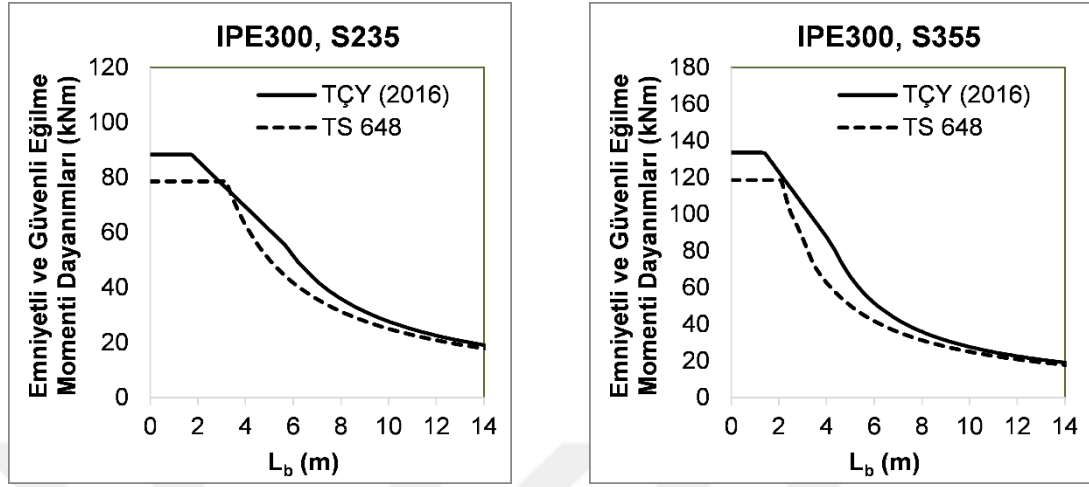
için  $L_p^*$  değerleri sırayla 3,19 m, 2,72 m ve 2,11 m olarak belirlenmiştir. Bu değerler, aynı enkesit ve çelik kaliteleri için, Yönetmelik'e göre belirlenen  $L_p$  değerleriyle karşılaştırıldığında, Standart'ta tanımlanan dayanım eğrisinde sabit dayanım bölgesinin Yönetmelik'te tanımlanandan daha uzun olduğu görülebilir. İncelenen tüm enkesit ve çelik kaliteleri için bu durumun geçerli olduğu belirlenmiştir.

Standart'la Yönetmelik'in dayanım eğrileri arasındaki önemli farklardan biri de, Standart'a göre tasarımda,  $L_b > L_p^*$  olduğu durumda dayanımın çelik kalitesinden bağımsız oluşudur. İncelenen bütün enkesit ve çelik kalitelerinde, Standart artık gerilmelerin etkisini ihmal ederek yanal burulmalı burkulmanın elastik bölgede oluşacağını kabul etmektedir. Buna karşın, Yönetmelik'te  $L_p < L_b < L_r$  durumunda, dayanım çelik kalitesine bağlıdır.

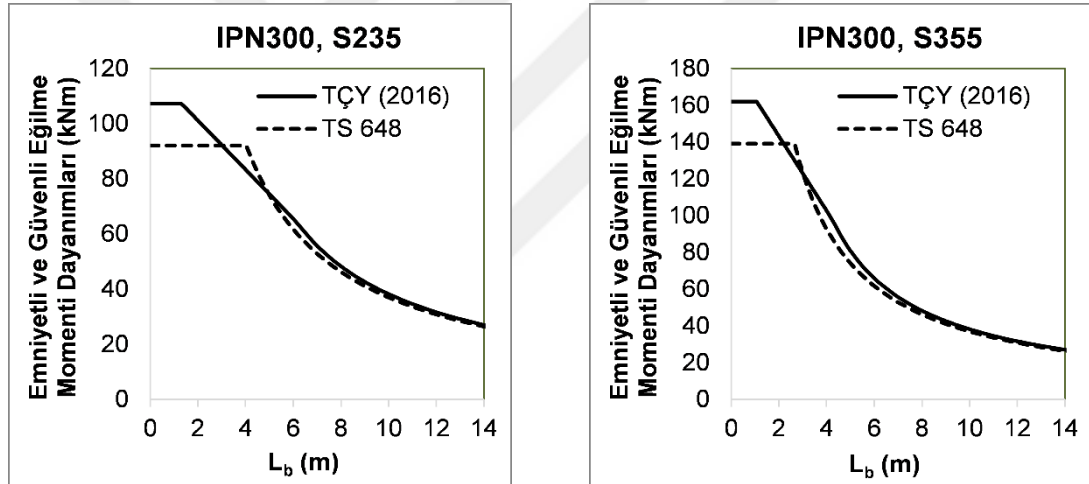
Kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti etkisindeki IPE300 enkesitli bir eğilme elemanı için Standart ve Yönetmelik'te tanımlanan dayanım eğrilerini daha rahat karşılaştırabilmek için, ilgili dayanım eğrileri, S235 ve S355 çelik sınıfları için, karşılaştırmalı olarak çizilerek, Şekil 4.21(a)'da sunulmuştur. Benzer grafikler, IPN300 enkesiti için Şekil 4.21(b)'de sunulmuştur.

Şekil 4.21(a)'dan görülebileceği gibi, IPE300 ve S355 durumunda, Standart'ın tanımladığı dayanım eğrisi Yönetmelik'in tanımladığı eğrinin tamamen altında kalmaktadır. S235 için, Şekil 4.21(a)'da IPE300 ve Şekil 4.21(b)'de IPN300 için sunulan karşılaştırmalı dayanım eğrileri incelendiğinde, emniyetli eğilme momenti dayanımlarının genel olarak güvenli eğilme momenti dayanımlarından küçük olduğu; buna karşın, kiriş burkulma boyunun  $L_p^*$  değerlerine yakın olduğu durumlarda (yani, Standart'a göre tanımlanan sabit dayanım bölgesinin sonlarında) güvenli eğilme momenti dayanımları geçtiği gözlenmektedir. Şekil 4.21'de iki farklı I enkesiti için çizdirilen grafiklerden, emniyetli eğilme momenti dayanımının güvenli eğilme momenti dayanımına oranının enkesit türü ile numarasına, çelik kalitesine ve eleman boyuna bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Bu tezde, Standart ve Yönetmelik'te verilen tasarım ilkelerinin 111 farklı enkesit ve 3 farklı çelik kalitesi için karşılaştırılması hedeflendiği için, bütün enkesitler için dayanım eğrileri çizmek yerine dayanım oranları hesaplamasının daha pratik ve uygun olacağına karar verilmiştir. Örnek olarak, kuvvetli ekseni etrafında eğilen IPE300 enkesitli bir çelik yapı elemanın, üç farklı çelik sınıfı ve  $0 \leq L_b \leq 20$  m için, TS 648'e göre hesaplanan emniyetli eğilme momenti dayanımları TÇY (2016)'ya göre hesaplanan güvenli eğilme momenti dayanımlarına oranlanarak "kuvvetli eksende eğilme momenti dayanım oranları" ( $\Psi_{M_x}$ ) belirlenmiş ve

Şekil 4.22(a)'da sunulmuştur. Benzer bir grafik IPN300 enkesitli eğilme elemanı için de çizilerek Şekil 4.22(b)'de sunulmuştur.



(a) IPE300, S235 ve S355 için

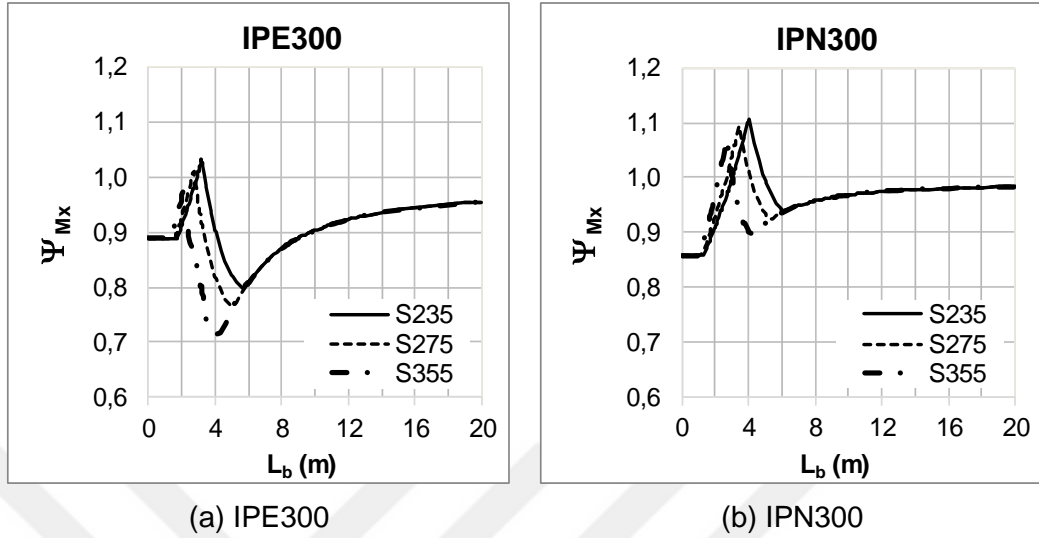


(b) IPN 300, S235 ve S355 için

Şekil 4.21. S235 ve S355 için, 300 numaralı I enkesitli hadde profillerinin emniyetli (TS 648) ve güvenli (TÇY (2016)) eğilme momenti dayanım eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 4.21(a)'dan IPE300 ve S355 için, incelenen bütün burkulma boylarında, TS 648'in güvenli tarafta kaldığını görmüştük. Şekil 4.22(a)'da S355 için çizilen eğrinin en büyük değerinin 1,0'den küçük olduğu görülebilir. Bununla birlikte, S235 çelik sınıfında bile, IPE300 için hesaplanan en büyük dayanım oranı 1,1 değerinin altında kalmaktadır. Dayanım hesaplarına göre, S235 çelik kalitesinde, dayanım oranı  $2,9 \text{ m} \leq L_b \leq 3,4 \text{ m}$  arasında 1,0 değerini aşmakta, en yüksek değeri olan 1,03'e yaklaşık  $L_b = 3,2 \text{ m}$ 'de ulaşmaktadır. Bu da demektir ki TS 648, TÇY (2016)'ya göre, kuvvetli eksen etrafında eğilen IPE300 enkesitli bir eğilme elemanın dayanımını en fazla %3

güvensiz tarafta kalarak hesaplamaktadır. Şekil 4.22(b)'den görülebileceği gibi, IPN enkesitlerde bu yüzde biraz daha yüksektir (%11).



Şekil 4.22. Farklı çelik kaliteli, 300 numaralı I enkesitli hadde profillerinin kuvvetli ekseninde eğilme momenti dayanım oranları

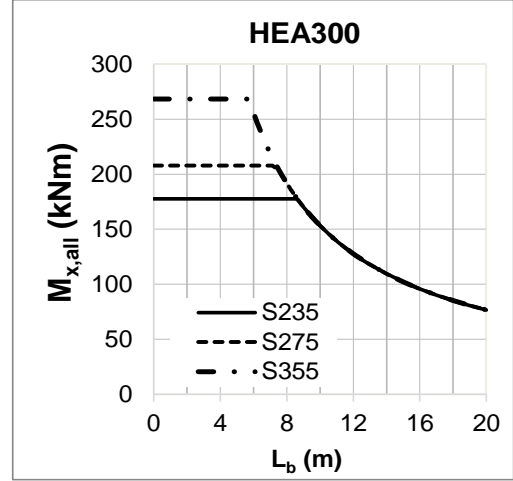
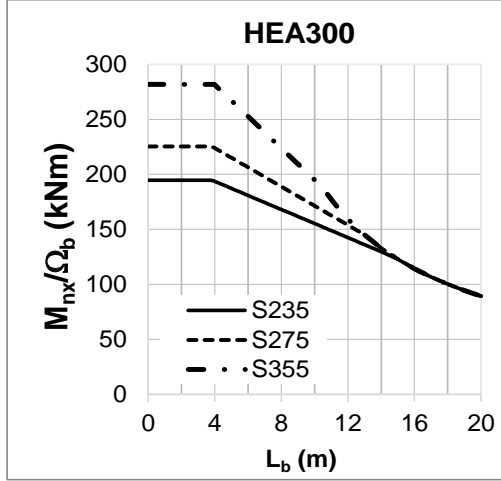
Şekil 4.22'de verilen grafiklerde, dayanım oranlarının çeliğin akma gerilmesiyle değişimi de incelenebilir. Grafiklerden görülebileceği gibi, kesitlerin her ikisi de kompakt olduğu için,  $L_b < L_p$  durumunda  $\Psi_{Mx} = \Psi_{Mx0}$  olmaktadır. Bu bölgede dayanım oranı sabit ve çelik kalitesinden bağımsızdır.  $L_b$ 'nin Yönetmelik'e göre hesaplanan  $L_p$  değerinden büyük olduğu boylarda dayanım oranının önce arttığı, sivri bir uç yaparak azaldığı ve sonra gitgide azalan bir eğimle yeniden arttığı gözlenmektedir. Örnek olarak, Şekil 4.22(a)'dan, IPE 300 enkesiti ve S235 çelik kalitesi için, dayanım oranının  $L_b \leq 1,72$  m'ye kadar sabit ve 0,889'a eşit olduğu gözlenebilir. Sabit bölgenin Yönetmelik'e göre hesaplanan  $L_p$  değerinde (1,72 m) sonlandığı fark edilebilir. Eleman burkulma boyunun  $1,72 \text{ m} < L_b \leq 3,19 \text{ m}$  arasında olduğu bölgede ise dayanım oranı artan  $L_b$  ile artmaktadır. Dayanım oranı en büyük değerine (1,07)  $L_b = 3,19$  m'de ulaşmaktadır. Bu değer ise Standart'a göre hesaplanan  $L_p$  değerine ( $L_p^* = 3,19 \text{ m}$ ) eşittir.  $3,19 \text{ m} \leq L_b \leq 5,72 \text{ m}$  bölgesinde ise dayanım oranı azalarak,  $L_b = 5,72$  m'de en küçük değerine (0,798) ulaşmaktadır.  $L_b = 5,72 \text{ m}$  olan bu sınır değer Yönetmelik'e göre hesaplanan  $L_r$  değerine eşit olduğu fark edilebilir.  $5,72 \text{ m} \leq L_b$  durumunda ise dayanım oranı asimptotik olarak artarak  $L_b = 20$  m'de 0,955 değerine ulaşmaktadır. Çelik kalitesi dayanım oranı eğrilerinde yalnız  $L_p \leq L_b \leq L_r$  bölgesinde etkindir.  $L_p$  ve  $L_r$  sınır eleman uzunlukları çelik kalitesine bağlı olduğu için, dayanım oranı grafiklerinde her bir bölgeyi belirleyen sınır uzunluklar da farklı olmaktadır. Genel olarak,  $L_p \leq L_b \leq L_r$  bölgesinde, çeliğin akma gerilmesi arttıkça dayanım oranın



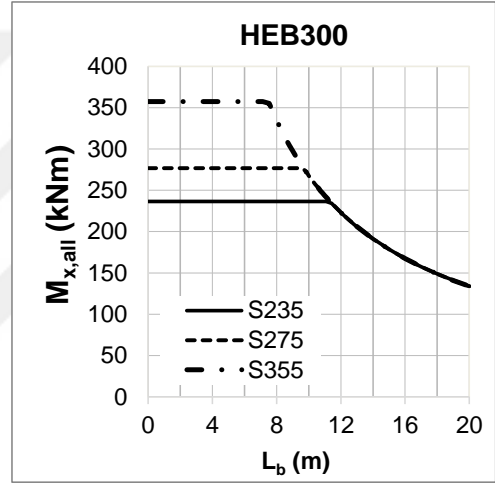
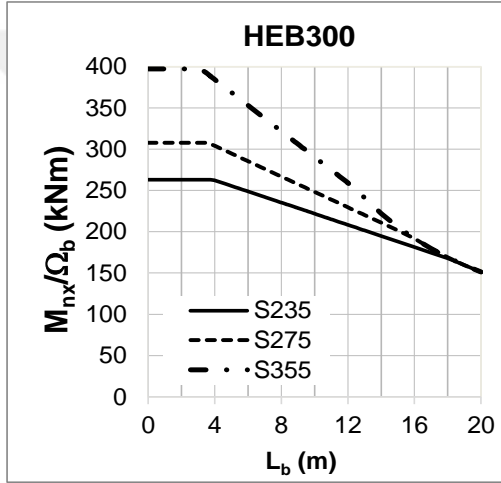
en büyük değerinin azaldığı en küçük değerinin de arttığı söylenebilir. Şekil 4.22(b)'de IPN300 enkesiti için verilen dayanım oranı eğrileri incelendiğinde, eğrilerdeki değişimin Şekil 4.22(a)'de IPE300 için çizilen eğrilere çok benzediği, ancak,  $L_b = L_r$  değerindeki dayanım oranının  $L_b = 0$ 'daki dayanım oranının (yani,  $\Psi_{Mx0}$ ) altına düşmediği görülmektedir.

Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'den I enkesitli elemanlar için elde edilen sonuçların HE enkesitli elemanlar için de geçerli olup olmadığını belirlemek amacıyla benzer grafikler 300 numaralı HE enkesitli eğilme elemanları için de oluşturulmuş ve Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te sunulmuştur. Bu grafikler arasında S355 çelik sınıfında başlıkları kompakt olmayan HEA300 enkesiti de bulunmaktadır.

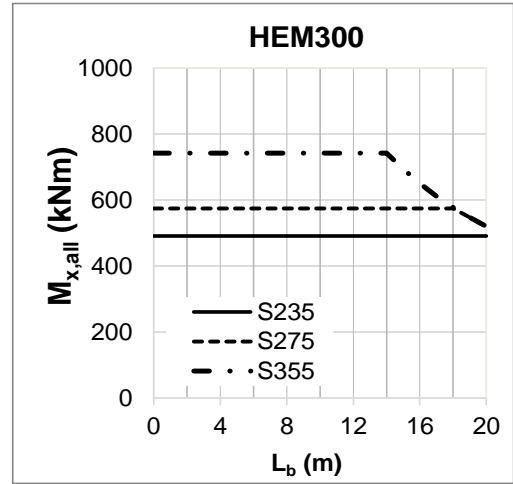
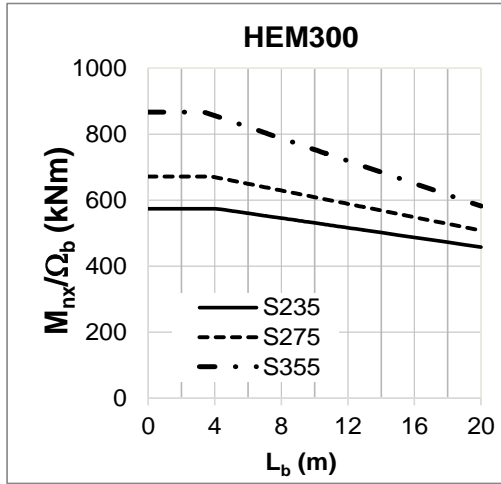
Şekil 4.23'te sunulan güvenli dayanım eğrileri Şekil 4.20'deki güvenli dayanım eğrileriyle karşılaştırıldığında, genel olarak, 300 enkesit numaralı I profiller için elde edilen sonuçların aynı enkesit numaralı HE profiller için de geçerli olduğu gözlenebilir. 300 numaralı HE enkesitlerin Yönetmelik'e göre belirlenen  $L_p$  ve  $L_r$  değerleri aynı enkesit numarasına sahip I profillerden daha büyük olduğu için güvenli dayanım eğrilerinde elastik olmayan ve elastik burkulma bölgeleri daha büyük burkulma boylarına doğru kaymıştır. Hatta HEM300 enkesiti için çizilen grafiklerde, elastik burkulma bölgesi neredeyse hiç gözükmemektedir. HEM300 enkesiti için  $L_r$  değerlerinin S235, S275 ve S355 çelikleri için, sırasıyla, 35,7 m, 30,5 m, 23,7 m'ye eşit olduğu ve bu üç değer de tezin kapsamında  $L_b$  için belirlenen en üst değer olan 20 m'yi aştığı belirtilmelidir. Benzer şekilde, Şekil 4.23'te sunulan emniyetli dayanım eğrileri Şekil 4.20'deki emniyetli dayanım eğrileriyle karşılaştırıldığında, genel olarak, 300 enkesit numaralı I profiller için elde edilen sonuçların aynı enkesit numaralı HE enkesitler için de geçerli olduğu görülmektedir. Emniyetli dayanım eğrilerinde sabit dayanım bölgesi daha uzundur ve bunun nedeni  $L_p^*$  değerlerinin daha büyük olmasıdır. Öyle ki HEM300 enkesiti için elde edilen emniyetli dayanım eğrisi sabit bir doğrudur, zira, HEM300 enkesiti için elde edilen sınır boy  $L_p^* = 21,2$  m'ye eşittir.



(a) HEA300 için emniyetli (solda) ve güvenli (sağda) eğilme momenti dayanımları

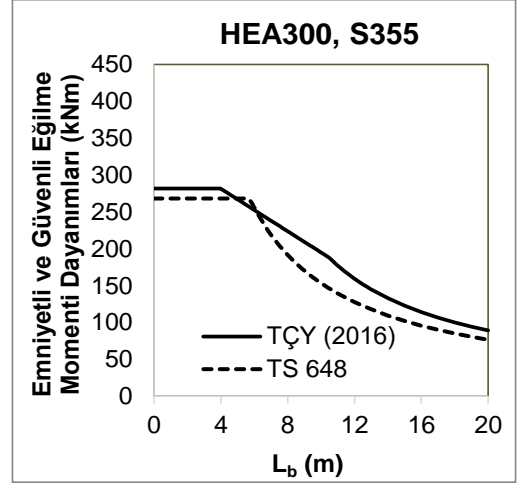
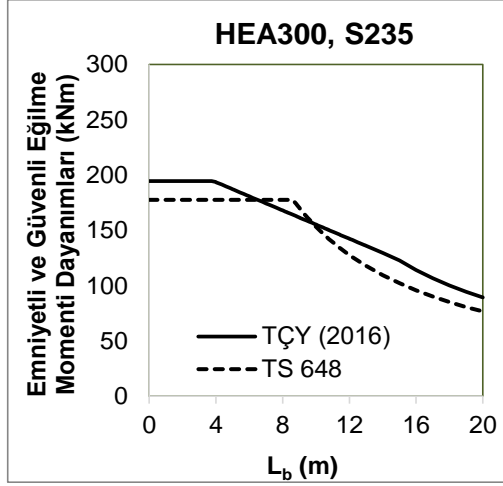


(b) HEB300 için emniyetli (solda) ve güvenli (sağda) eğilme momenti dayanımları

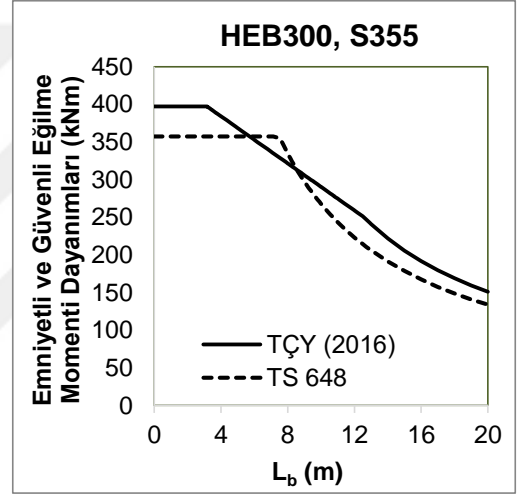
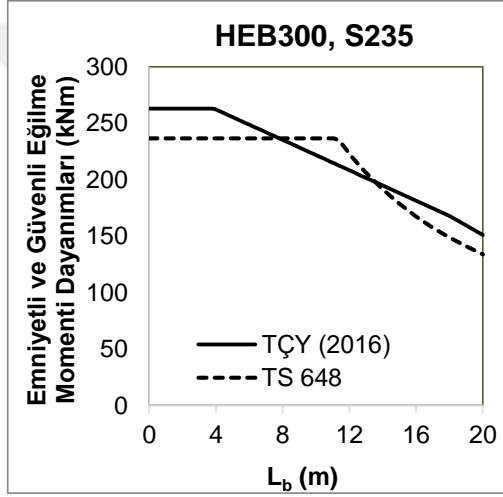


(c) HEM300 için emniyetli (solda) ve güvenli (sağda) eğilme momenti dayanımları

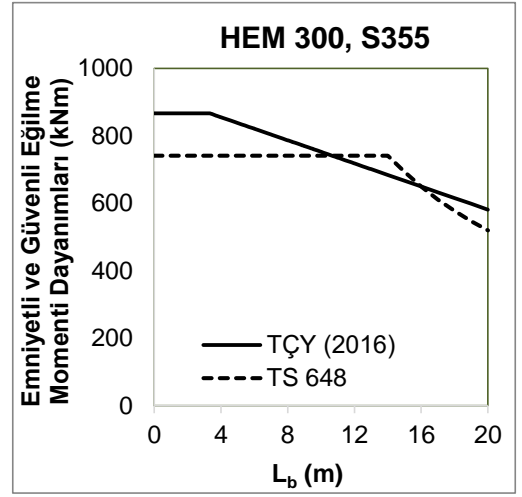
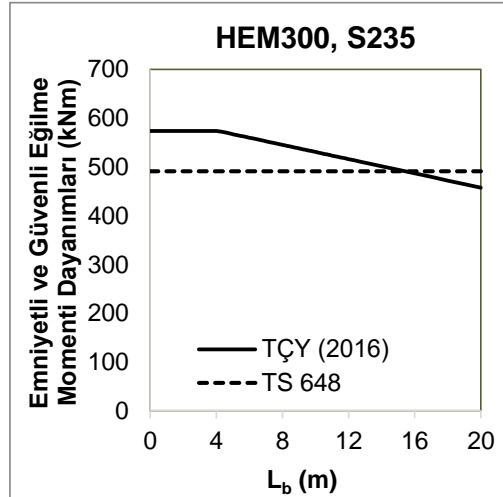
Şekil 4.23. 300 numaralı HE enkesitli hadde profillerin kuvvetli eksen etrafında eğilmeye güvenli ( $M_{nx}/\Omega_b$ ) ve emniyetli ( $M_{x,all}$ ) eğilme momenti dayanım eğrilerinin çelik kalitesiyle değişimi



(a) HEA300, S235 ve S355 için

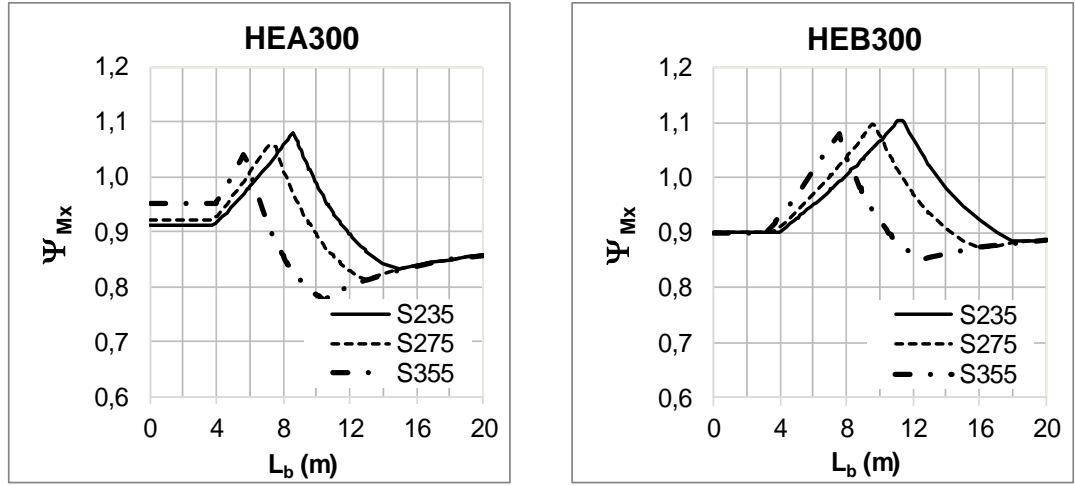


(b) HEB300, S235 ve S355 için



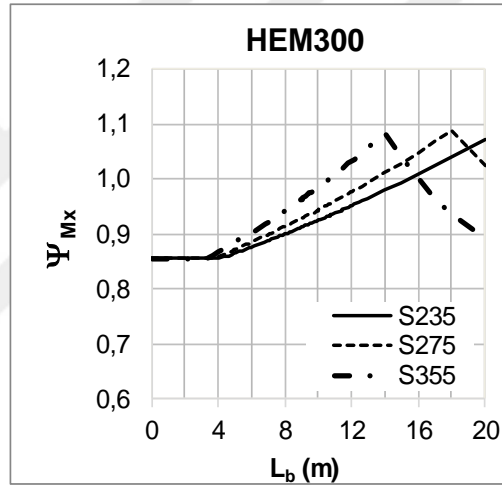
(c) HEM300, S235 ve S355 için

Şekil 4.24. S235 ve S355 için, 300 numaralı HE enkesitli hadde profillerin emniyetli (TS 648) ve güvenli (TÇY (2016)) eğilme momenti dayanım eğrilerinin karşılaştırılması



(a) HEA300

(b) HEB300



(c) HEM300

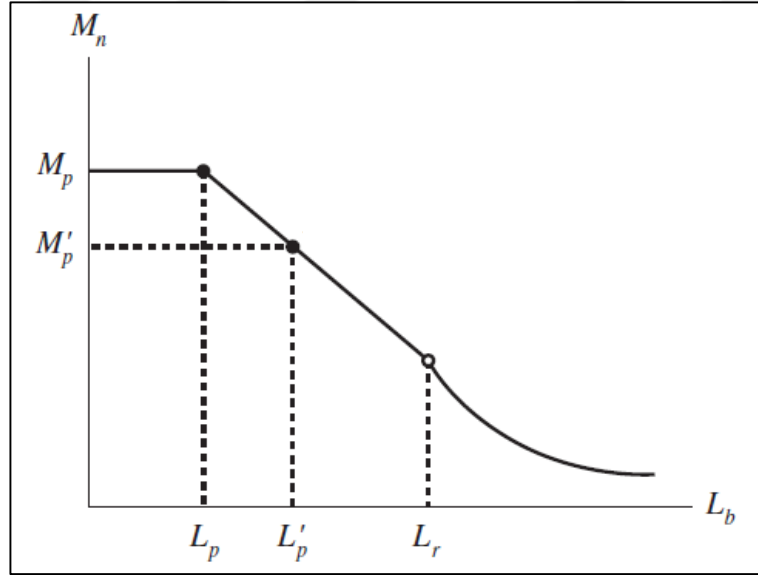
Şekil 4.25. Farklı çelik kaliteli, 300 numaralı HE enkesitli hadde profillerin kuvvetli ekseninde eğilme momenti dayanım oranları

Şekil 4.24'te verilen grafikler, Şekil 4.21'de verilenlerle karşılaştırıldığında, incelenen HE profilleri için de, aynı enkesit numaralı I profillerinde olduğu gibi, Standart'ın çoğu burkulma boylarında güvenli tarafta kaldığı, yalnız emniyetli eğilme momenti dayanımı eğrisinde sabit dayanım bölgesinin sonlarında (yani,  $L_p^*$  değerine yakın olan eleman burkulma boylarında) emniyetli dayanımların güvenli dayanımları aştığı gözlenmektedir.

300 numaralı HE enkesitli eğilme elemanlarının dayanım oranlarının elemanların burkulma boyuyla değişimleri Şekil 4.25'te sunulan grafiklerde görülmektedir. Şekil 4.25'teki grafikler incelendiğinde, dayanım oranlarının sabit olduğu ilk bölgede, HEB300 ve HEM300 profillerinin dayanım oranı eğrilerinin Şekil 4.22'de gösterilen IPE300 ve IPN300 profillerinin eğrileri gibi çelik kalitesinden bağımsız olduğu

görülmektedir. Buna karşın, bu bölgede, HEA300 enkesitinde dayanım oranı çeliğin akma gerilmesi arttıkça artmaktadır. Bunun nedeni HEA300 enkesitinin başlıklarının S355 çelik kalitesinde kompakt olmayan sınıfına dahil olmasıdır. 300 enkesit numaralı I ve HE profiller arasında yalnız HEA300 enkesitli profilin S275 ve S355 çelik kalitelerinde güvenli eğilme momenti dayanımı hesaplanırken yerel başlık burkulması sınır durumunun dikkate alındığı belirtilmelidir.

En genel haliyle, başlıkların kompakt olmaması nedeniyle karakteristik eğilme momenti dayanımı eğrisinde gözlenen temel değişim Şekil 4.26'da gösterilmektedir. Kompakt enkesitli elemanlarda  $L_b < L_p$  durumunda, karakteristik eğilme momenti dayanımı, Denklem (2.4)'te verilen plastik eğilme momentine ( $M_p$ ) eşittir. Buna karşın, kompakt olmayan başlıklı elemanlarda, sabit dayanım bölgesinde, karakteristik dayanım Denklem (2.7)'de verilen "azaltılmış" plastik eğilme momentine (Şekil 4.26'da  $M'_p$  olarak adlandırılmaktadır) eşittir. Bir diğer önemli fark ise dayanımın sabit kaldığı en büyük eleman burkulma boyunda gözlenmektedir. Kompakt enkesitli elemanlarda sınır boy Denklem (2.10)'da tanımlanan  $L_p$  değerine eşitken, kompakt olmayan başlıklı elemanlarda bu sınır boy (Şekil 4.26'da  $L'_p$  olarak adlandırılmaktadır)  $L_p$  değerinden daha büyüktür.



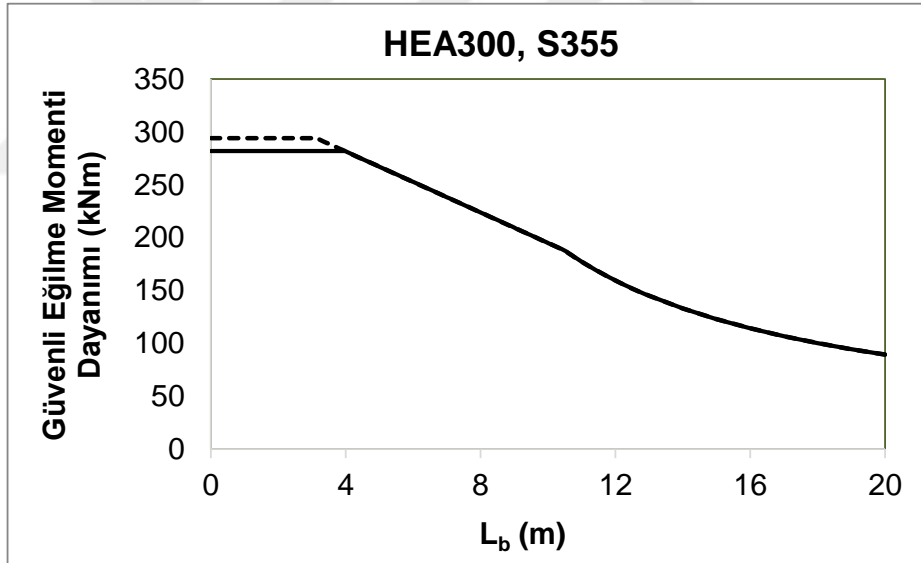
Şekil 4.26. Kompakt olmayan başlıklı I enkesitli eğilme elemanlarında tanımlanan "azaltılmış" plastik eğilme momenti ( $M'_p$ ) ve "artırılmış" plastik sınır boy ( $L'_p$ ) [6]

Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü (American Institute of Steel Construction, AISC) tarafından yayınlanan Çelik Yapı Kılavuzunun (Steel Construction Manual) 14.

Baskısında [20], “artırılmış” plastik sınır boy ( $L_p'$ ) aşağıdaki denklemle tanımlanmaktadır,

$$L_p' = L_p + (L_r - L_p) \left( \frac{M_{px} - M_{px}'}{M_{px} - M_{rx}} \right) \quad (4.2)$$

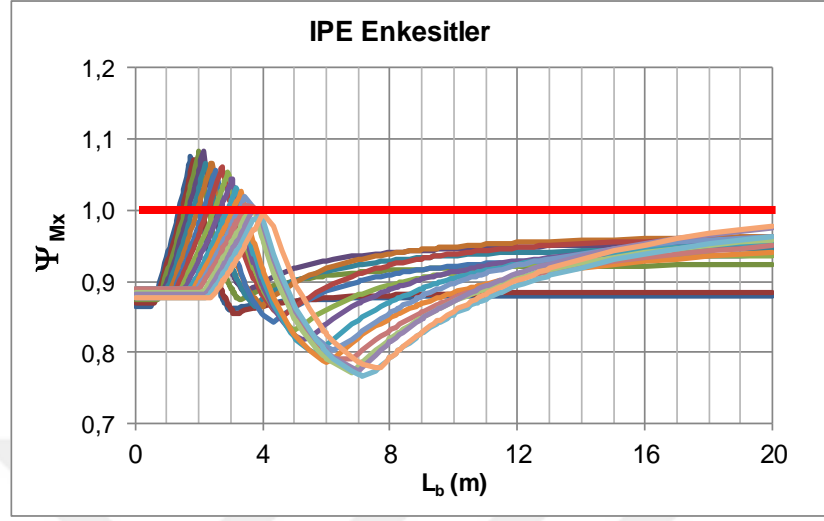
Denklem (4.2)'de,  $L_p$  ve  $L_r$ , sırasıyla Denklem (2.10) ve (2.11) ile,  $M_{px}$  Denklem (2.4) ile hesaplanmalıdır.  $M_{rx}=0,7F_yW_{ex}$ 'e;  $M_{px}'$  ise Denklem (2.7)'den hesaplanan karakteristik dayanıma ( $M_{nx}$ ) eşittir. S355 çelik kaliteli, HEA300 enkesitli bir eğilme elemanı için, plastik eğilme momenti  $M_{px} = 491$  kNm, azaltılmış plastik eğilme momenti  $M_{px}' = 471$  kNm, ilk akma momenti  $M_{rx} = 313$  kNm, plastik sınır boy  $L_p = 3,13$  m, artırılmış plastik sınır boy  $L_p' = 3,98$  m ve elastik sınır boy  $L_r = 10,5$  m olarak belirlenmiştir. Şekil 4.27'de bu elemanın güvenli dayanım eğrisi sürekli çizgiyle çizilerek gösterilmiştir. Aynı grafikte kesik çizgiyle gösterilen eğri, yerel başlık burkulması sınır durumu ihmal edilerek elde edilen dayanım eğrisidir.



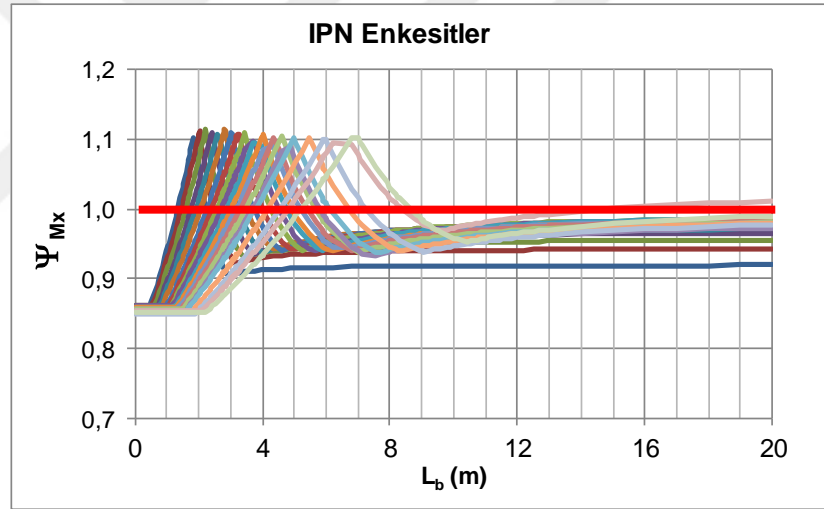
Şekil 4.27. S355 çelik kaliteli, HEA300 enkesitli bir eğilme elemanın kuvvetli eksen etrafında eğilmedeki dayanım eğrisinde kompakt olmayan başlıkların etkisi

Şekil 4.27'de verilen grafikten de görülebileceği gibi, güvenli eğilme momenti dayanımı yerel başlık burkulması sınır durumundan elde edilen değerle (282 kNm) sınırlıdır. Başlıkların narinliği nedeniyle güvenli dayanım yaklaşık %4 azalmıştır. Dayanımın sabit kaldığı bölgenin uzunluğu ise %27 artmıştır. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'den fark edilebileceği gibi, başlıkların kompakt olmaması sabit moment bölgesinin dışında güvenli dayanım eğrisini değiştirmemektedir. Şekil 4.25(a)'da, çelik

sınıfının S355 olması durumunda dahi, dayanım oranının sabit dayanım bölgesinde 1'i geçmediği gözlenmektedir.



(a) IPE enkesitler



(b) IPN enkesitler

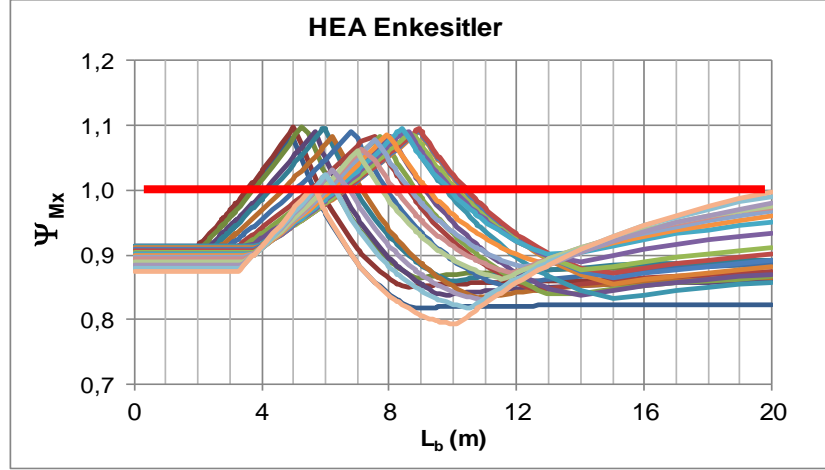
Şekil 4.28. S235 çelik kaliteli, I-enkesitli hadde profillerin kuvvetli ekseninde eğilme momenti dayanım oranları

Şekil 4.25'te verilen grafikler, Şekil 4.22'de verilenlerle karşılaştırıldığında, sabit dayanım bölgesinin dışında kalan diğer bölgelerde 300 enkesit numaralı HE profiller için çizilen dayanım oranı eğrilerinin aynı enkesit numaralı I profiller için çizilenlerle benzer şekle sahip olduğu görülmektedir. HE enkesitlerinde  $L_r$  değerleri oldukça yüksek olduğu için eğrilerdeki son bölge genelde oldukça kısadır. S235 çeliği ve HEM300 enkesiti için çizilen eğrilerde, incelenen en büyük eleman burkulma boyunda (yani  $L_b = 20$  m'de) üçüncü ve dördüncü bölgeye henüz ulaşamadığı görülebilir. S235 çelik sınıfı için, dayanım oranının en yüksek değerleri, HEA300, HEB300 ve HEM300

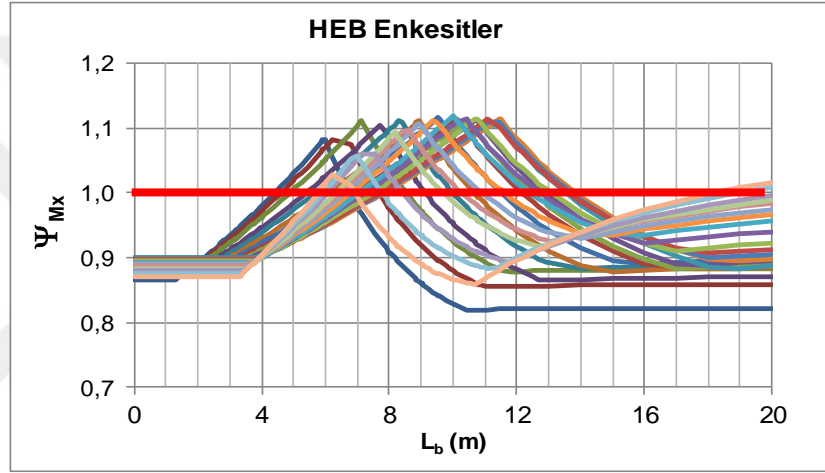
enkesitleri için sırasıyla 1,08; 1,11 ve 1,07 olarak tespit edilmiştir. Diğer bir deyişle, 300 numaralı HE enkesitleri için, Standart'a göre hesaplanan emniyetli eğilme momenti dayanımları, Yönetmelik'e göre hesaplanan güvenli eğilme momenti dayanımlarından en çok %11 daha büyüktür. Dayanım oranı eğrilerinden de gözlenebileceği gibi, Standart'ın güvensiz kaldığı eleman burkulma boyları, enkesit türüne ve çelik kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak, çeliğin akma gerilmesi arttıkça, dayanım oranının 1'den büyük olduğu burkulma boyu aralığının küçüldüğü gözlenmektedir.

Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'dan, dayanım oranı eğrilerinin, genel olarak, dayanım oranlarının Yönetmelik'e göre hesaplanan  $L_p$  (kompakt olmayan başlıklı kesitlerde Denklem (4.2)'e göre hesaplanan  $L_p'$ ) sınır boyuna kadar sabit kaldığı, sonra artarak Standart'a göre belirlenen  $L_p^*$  değerinde en yüksek değerine ulaştığı, ardından Yönetmelik'e göre hesaplanan  $L_r$  değerine kadar azaldığı ve son olarak  $L_r$  değerinden büyük  $L_b$  değerlerinde ise artan  $L_b$  değeriyle asimptotik olarak arttığı dört bölgeden oluştuğu görülmektedir. Özellikle numaraları küçük IPE ve IPN enkesitlerde asimptotik değere çok küçük boylarda ulaşıldığı için dördüncü bölgede de dayanım oranı neredeyse sabit kalmaktadır. Ancak bu sabit değer, enkesit numarasına bağlı olarak değişmektedir. S235 çeliği için, incelenen bütün IPE enkesitleri dikkate alındığında, dayanım oranlarının en büyük değerinin 1,08 olduğu görülmüştür. Bu değer IPN'ler için 1,11, HEA'lar için 1,10, HEB'ler için 1,12 ve HEM'ler için 1,13 olarak belirlenmiştir. S275 çeliği için dayanım oranlarının en büyük değerleri, IPE, IPN; HEA, HEB ve HEM enkesitleride, sırasıyla, 1,07, 1,10, 1,09, 1,11 ve 1,12; S355 çeliği için ise, sırasıyla, 1,05, 1,08, 1,08, 1,09 ve 1,11 olarak tespit edilmiştir. Değerler karşılaştırıldığında, en büyük değerlerin akma dayanımı en küçük olan S235 çelik kalitesinde gözlemlendiği ama diğer çelik kalitelerindeki değerlerin de çok da farklı olmadığı görülmektedir. Sonuç olarak, tezin kapsamında incelenen bütün enkesit, çelik kaliteleri ve eleman burkulma boyları için, Standart'a göre hesaplanan emniyetli eğilme momenti dayanımı, Yönetmelik'e göre hesaplanan güvenli eğilme momenti dayanımından en çok %13 fazla çıkmaktadır. Dayanım oranının 1'in üstünde olduğu boy aralığı enkesitin türüne, numarasına ve çelik kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Belirli bir çelik kalitesi ve enkesit için, dayanım oranının en büyük değeri  $L_b=L_p^*$ de oluşmaktadır.

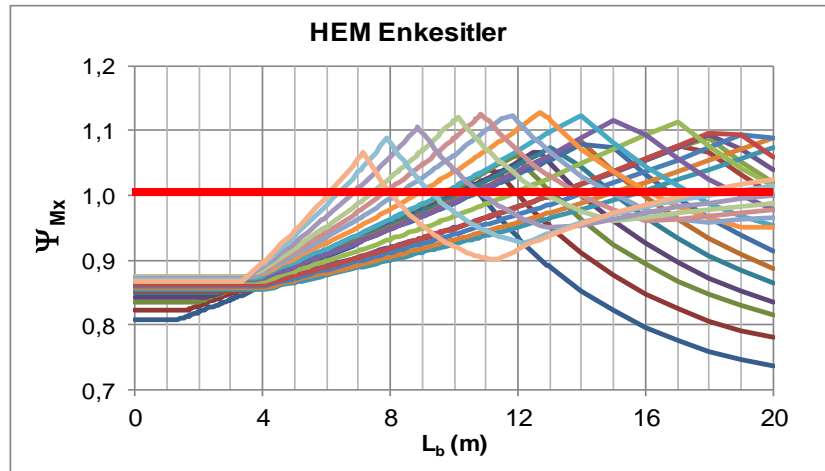




(a) HEA enkesitler



(b) HEB enkesitler



(c) HEM enkesitler

Şekil 4.29. S235 çelik kaliteli, HE-enkesitli hadde profillerin kuvvetli eksende eğilme momenti dayanım oranları

Tezin kapsamında incelenen bütün IPE enkesitler için kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti dayanım oranları ( $\Psi_{Mx}$ ) S235 çeliği için hesaplanarak Şekil 4.28(a)'da sunulmuştur. Benzer grafikler, IPN enkesitler için Şekil 4.28(b)'de, HE enkesitler için ise Şekil 4.29'da sunulmuştur. Grafiklerden gözlenebileceği gibi, eğrilerin genel şekli her grupta o gruba ait 300 numaralı enkesit için çizilen eğrinin genel şekline benzemektedir.

#### **4.5. Zayıf Eksen Etrafında Eğilme Etkisinde Tasarım Kurallarının ve Dayanımların Karşılaştırılması**

Bölüm 2.3'te özetlendiği gibi, TÇY (2016), zayıf eksenleri etrafında eğilme momenti etkisindeki I-enkesitli hadde profillerin tasarımında iki dayanım sınır durumu dikkate almaktadır: akma ve yerel başlık burkulması. Buna karşın, Bölüm 3.3'te belirtildiği gibi, TS 648'de zayıf eksenlerinde eğilen çelik yapı elemanlarının tasarımı için özel kurallar tanımlanmamıştır. Ancak, zayıf eksenlerde eğilmede yanal burkulma tehlikesi olmadığı dikkate alınarak, temel elastik eğilme formülü kullanılarak ve basınç emniyet gerilmesinin  $0,6F_y$ 'ye eşit olduğu kabul edilerek emniyetli eğilme momenti dayanımı  $M_{y,all}=0,6F_yW_{ey}$  denkleminde elde edilebilir. Zayıf eksenleri etrafında eğilen elemanların dayanımları açısından Yönetmelik'le Standart arasındaki temel farkları detaylı olarak incelemek amacıyla önce kompakt enkesitli elemanlar, ardından kompakt olmayan başlıklı elemanlar ele alınacaktır.

##### **4.5.1. Kompakt enkesitli elemanlar**

Zayıf eksenleri etrafında eğilen I-enkesitli hadde profillerin TS 648'e göre "emniyetli eğilme momenti dayanımı" elemanın zayıf eksene göre akma eğilme momentinin %60'ına eşittir. Buna karşın, TÇY (2016)'ya göre, kompakt enkesitli olması durumunda, aynı elemanın "güvenli eğilme momenti dayanımı" zayıf eksene göre plastik eğilme momentinin yaklaşık %60'ına eşittir. Ancak, bu şekilde elde edilen dayanım, zayıf eksene göre akma eğilme momentinin 1,6 katını geçmemelidir. Diğer bir deyişle, kompakt I-enkesitli bir hadde profilinin zayıf ekseninde eğilmede emniyetli eğilme momenti dayanımının ( $M_{y,all}$ ) güvenli eğilme momenti dayanımına ( $M_{ny}/\Omega_b$ ) oranı, yani, "zayıf eksen etrafında eğilme momenti dayanım oranı", 0,625 değerinden küçük olmamak koşuluyla, yaklaşık olarak enkesitin zayıf eksen etrafında elastik mukavemet momentinin ( $W_{ey}$ ) aynı eksen etrafındaki plastik mukavemet momentine ( $W_{py}$ ) oranına eşittir;

$$\Psi_{My0} = \frac{(M_{y,all})_{max}}{(M_{ny} / \Omega_b)_{max}} = \frac{0,6F_y W_{ey}}{\min(F_y W_{py}, 1,6F_y W_{ey}) / 1,67} \cong \frac{W_{ey}}{W_{py}} \geq 0,625 \quad (4.3)$$

Denklem (4.1)'de dayanım oranı için kullanılan semboldeki ( $\Psi_{My0}$ ) 0 alt indisi, elemanda yerel burkulma tehlikesinin olmaması, yani, enkesitin kompakt başlıklı olması, koşulunu ifade etmektedir.  $\Psi_{My0}$  aynı zamanda zayıf ekseninde eğilmedeki şekil faktörünün (Şekil 4.4) tersine de eşittir.

Bir enkesitin bir eksene göre elastik mukavemet momentinin aynı eksene göre plastik mukavemet momentinden daha küçük olduğu bilindiğine göre, incelenen bütün kompakt enkesitli elemanlar için  $0,625 \leq \Psi_{My0} < 1,0$ 'dir. Diğer bir deyişle, I-enkesitli hadde profillerin zayıf ekseninde eğilme momenti dayanımlarını hesaplarken Standart incelenen tüm kompakt başlıklı enkesitlerde Yönetmelik'ten daha güvenli tarafta kalmaktadır. Denklem (4.1)'den fark edilebileceği gibi, kompakt başlıklı enkesitler için elde edilen dayanım oranı çelik kalitesinden bağımsızdır.

Bölüm 2.3.3'te belirtildiği gibi, Yönetmelik'te zayıf eksen etrafında eğilme etkisindeki I profiller için tanımlanan sınır narinlik değerleri ( $\lambda_{pf}$  ve  $\lambda_{rf}$ ), güçlü eksen etrafında eğilme etkisindeki I profiller için tanımlanan sınır narinliklerle aynıdır. Bu durumda, zayıf eksen etrafında eğilme durumunda, enkesitlerin yeniden sınıflandırılmasına gerek yoktur; zira, güçlü eksen etrafında eğilme durumu için elde edilen enkesit sınıfları zayıf eksen etrafında eğilme durumu için de geçerlidir. Bölüm 4.3'te, kuvvetli ekseninde eğilmede, tezde incelenen enkesitlerden yalnız bir kaç HEA enkesitinin başlıklarının çelik sınıfının S275 ve S355 olması durumunda kompakt olmayan sınıfına dahil olduğu, buna karşın narin başlıklı enkesitin bulunmadığı belirlenmişti. Bu durumda, zayıf eksen etrafında eğilmede de S235 çelik sınıfı için incelenen tüm enkesitler kompakt başlıklıdır. Daha yüksek çelik kalitelerinde, başlıkları kompakt olmayan enkesitlerde başlık narinliğinin dayanım oranına etkisi bir sonraki bölümde ele alınacaktır. Bu bölümde HEA profilleri için sunulan grafiklerin ve elde edilen sonuçların S235 çelik kalitesi için geçerli olduğu düşünülebilir.

Tezin kapsamında incelenen bütün enkesitler için  $\Psi_{My0}$  değerleri Denklem (4.3) kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 4.30'da sunulmuştur. Şekil 4.30(a)'a göre, IPE profillerinde,  $\Psi_{My0}$ 'ın ortalama değeri 0,64 olup en küçük  $\Psi_{My0}$  değeri 0,631 en büyük  $\Psi_{My0}$  değeri ise 0,645'tir. Şekil 4.30(c)-(e)'den fark edilebileceği gibi, HE profillerinde dayanım oranında enkesit numarasına bağlı olarak gözlenen değişim daha azdır ve

$\Psi_{My0}$ 'ın ortalama değeri HE enkesitlerinde yaklaşık 0,65'e eşittir. İncelenen bütün enkesitler içinde, yalnız IPN enkesitlerinde bu oran enkesit numarasından bağımsız olarak izin verilen en küçük değer olan 0,625'e eşittir. Bunun temel nedeni, Şekil 4.4(b)'de gösterildiği gibi, IPN enkesitlerin tamamının zayıf eksene göre eğilmede şekil faktörünün 1,6'dan büyük olmasıdır. Diğer bir deyişle, incelenen bütün IPN enkesitlerin zayıf eksende eğilmede güvenli eğilme momentleri Yönetmelik'te tanımlanan üst sınır olan  $1,6F_yW_{ey}$ 'ye eşittir.

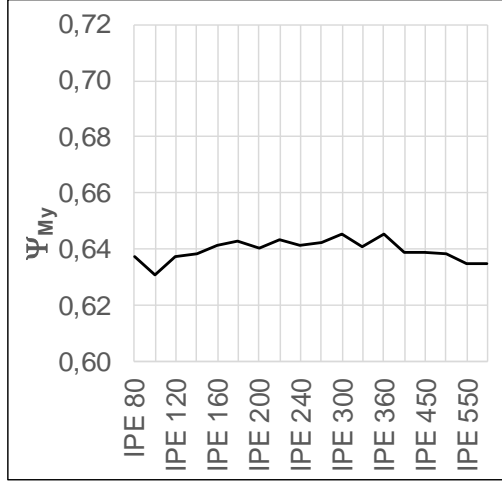
#### 4.5.2. Kompakt olmayan başlıklı elemanlar

TÇY (2016)'ya göre, kompakt olmayan başlıklı çift simetri eksenli I-enkesitli bir eğilme elemanının tasarımında elastik olmayan yerel başlık burkulması sınır durumu dikkate alınmalı, elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı Denklem (2.18)'de verilen doğrusal geçiş denklemi kullanılarak hesaplanmalıdır. TS 648 yerel burkulma sınır durumunu tasarıma dahil etmediği için, bu tür elemanlarda emniyetli eğilme momenti dayanımı  $M_{y,all}=0,6F_yW_{ey}$ 'ye eşittir. HEA enkesitlerinin güvenli dayanımları üç farklı çelik sınıfı için (S235, S275 ve S355 için) Denklem (2.18) kullanılarak hesaplanıp emniyetli eğilme momenti dayanımlarına bölünerek dayanım oranları bulunmuş ve ilgili grafikler çizilerek Şekil 4.31'de sunulmuştur.

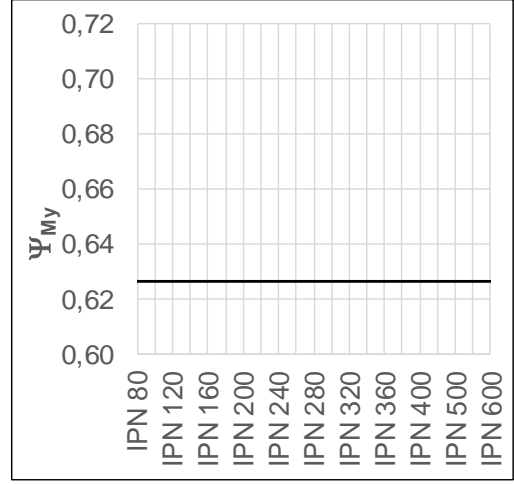
Şekil 4.31'den görülebileceği gibi, S355 çelik kalitesinde güvenli eğilme momenti dayanımındaki azalma, dolayısıyla dayanım oranındaki artış, daha yüksektir. Dayanım oranındaki en büyük artış (%7), başlık narinliği en yüksek olan HEA280 enkesitinde gözlenmektedir. Ancak, bu durumda dahi dayanım oranının değeri 1'i aşmamaktadır. Diğer bir deyişle, zayıf eksende eğilme momenti dayanımı açısından, tezin kapsamında incelenen bütün enkesit ve çelik kalitelerinde, Standart Yönetmelik'ten daha güvenli tarafta kalmaktadır.

#### 4.6. Gövde Düzleminde Kesme Kuvveti Etkisinde Tasarım Kurallarının ve Dayanımların Karşılaştırılması

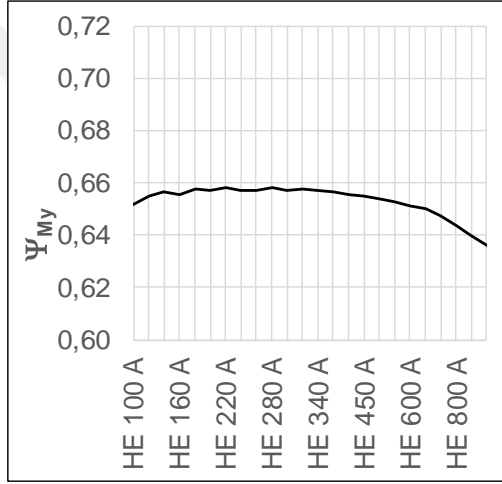
Bölüm 2.4'te özetlendiği gibi, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli elemanların tasarımında, elemanın gövdesinde rijitlik levhalarının kullanılmadığı durumda, TÇY (2016) iki dayanım sınır durumunu dikkate almaktadır: gövdenin kesme etkisinde (i) akması ve (ii) burkulması. Hangi sınır durumun elemanın dayanımını belirlediği gövdenin narinliğine ( $\lambda_w=h/t_w$ ) bağlıdır.



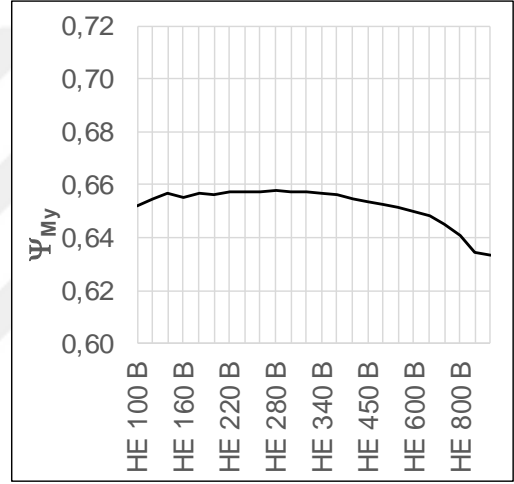
(a) IPE enkesitler



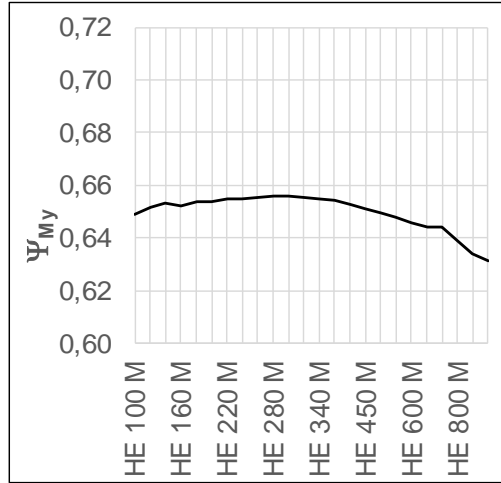
(b) IPN enkesitler



(c) HEA enkesitler

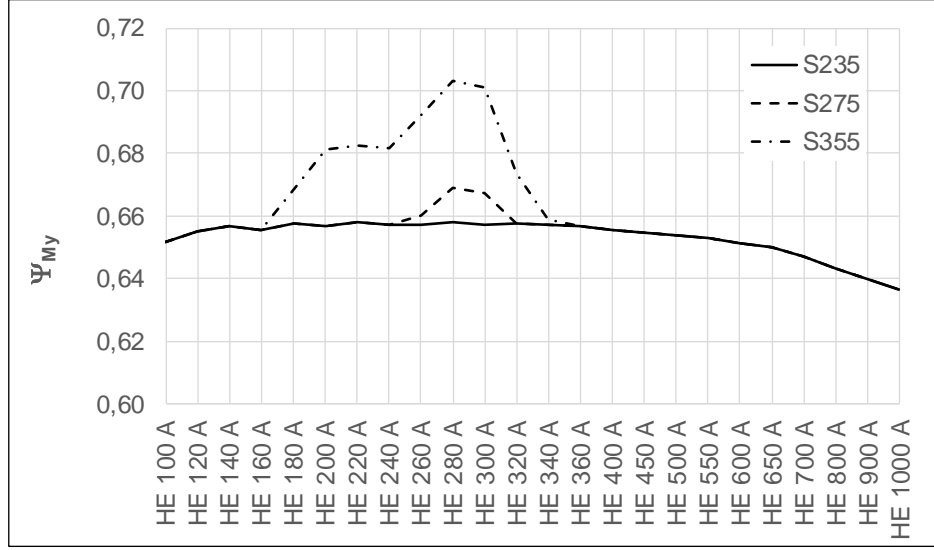


(d) HEB enkesitler



(e) HEM enkesitler

Şekil 4.30. Kompakt I-enkesitli hadde profillerinin zayıf ekseninde eğilme momenti dayanım oranları



Şekil 4.31. Kompakt I-enkesitli hadde profillerinin zayıf ekseninde eğilme momenti dayanım oranları

Bölüm 2.4.1’de özetlendiği gibi, eğilme etkisindeki elemanların tasarımından farklı olarak, gövde düzleminde kesme etkisindeki I-enkesitli hadde profillerin tasarımında kullanılan güvenlik katsayı ( $\Omega_v$ ) da gövde narinliğine bağlıdır. Gövde narinliği, Denklem (2.20) ve (2.21)’de verilen ve yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesiyle elastisite modülüne bağlı olan sınır değerden ( $2,24\sqrt{E/F_y}$ ) küçük olan profillerde güvenlik katsayısı 1,50’ye; büyük olanlarda ise 1,67’ye eşittir. S235, S275 ve S355 için, ilgili sınır narinlik değerleri, sırasıyla 65,4, 60,4 ve 53,2 olarak hesaplanmıştır. Diğer bütün sınır narinliklerde olduğu gibi, akma gerilmesi arttıkça sınır narinliğin değeri azalmaktadır. Bölüm 4.1.3’te belirttiği gibi, incelenen bütün enkesitler arasında gövde narinliği en yüksek olan enkesit HEA1000 olup bu enkesitin gövde narinliği 52,6’ya eşittir. Bu değer S355 çeliği için elde edilen sınır değeri bile aşmadığı göz önünde bulundurulursa, incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için güvenlik katsayısının 1,50’ye eşit olduğu söylenebilir.

Bölüm 2.4.3’te de belirtildiği gibi Yönetmelik, narinliği  $2,24\sqrt{E/F_y}$  sınır değerden küçük I-enkesitli hadde profillerinde, “gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı”nın  $C_{v1}=1,0$  olarak alınması gerektiğini belirtmektedir. İncelen bütün çelik kalitelerinde, hiç bir enkesitin gövdesi bu sınır değeri aşmadığı için, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisinde güvenli dayanım hesaplanırken yalnız akma sınır durumunun göz önünde bulundurulması yeterlidir. Bu durumda, güvenli dayanım  $V_{ny}/\Omega_v= 0,40F_yA_w$ ’ya eşittir ve çelik kalitesinin haricinde yalnız enkesit yüksekliğiyle gövde kalınlığının çarpımından elde edilen gövde alanına ( $A_w=dt$ ) bağlıdır. Şekil 4.12’de incelenen

enkesitlerin gövde alanlarının enkesit numarasıyla değişimi görülmektedir. Bu eğriler,  $0,40F_y$  ile çarpıldığında güvenli dayanım eğrilerini verir. Grafiklerden de görülebileceği gibi, belli bir enkesit grubunda, enkesit numarası arttıkça gövde alanı, yani kesme kuvveti dayanımı, artmaktadır. Büyük enkesit numaralarında, dayanımdaki artış daha fazladır.

Bölüm 3.4'te belirtildiği gibi, TS 648'e göre, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli bir hadde profilinin tasarımı (yerel burkulma sınır durumunu dikkate almaksızın) enkesitte oluşan en büyük kayma gerilmesi kayma emniyet gerilmesini aşmayacak şekilde yapılmalıdır. Ancak, Standart'ta bu tür elemanların tasarımı için özel bir bölümün sunulmamış olması nedeniyle, Türkiye'de Standart'a göre yapılan tasarım uygulamalarında kesitteki kayma gerilmelerinin iki farklı denklemle hesaplandığı belirlenmiştir. Gövde alanı kullanılarak hesaplanan ortalama kayma gerilmesinden elde edilen emniyetli kesme kuvveti dayanımı (bu bölümde  $V_{y,all1}$  sembolüyle ifade edilecektir) Denklem (3.12)'de verilmekte, gövdedeki en büyük kayma gerilmesinden elde edilen emniyetli kesme kuvveti dayanımı (bu bölümde  $V_{y,all2}$  sembolüyle ifade edilecektir) ise Denklem (3.13)'te sunulmaktadır. Gövde düzleminde kesme etkisindeki I-enkesitli bir hadde profilinin Denklem (3.12) veya Denklem (3.13)'ten elde edilen emniyetli kesme kuvveti dayanımı, güvenli kesme kuvveti dayanımına bölünerek "gövde düzleminde kesme kuvveti dayanım oranı  $\Psi_{vy}$ " aşağıdaki denklemlerde elde edildiği gibi belirlenebilir,

$$\Psi_{vy} = \frac{V_{y,all1}}{V_{ny} / \Omega_v} = \frac{0,60F_y (d - 2t_f) t_w}{\sqrt{3} \cdot 0,40F_y d t_w} \cong 0,866 \left( 1 - 2 \frac{t_f}{d} \right) \quad (4.4)$$

veya;

$$\Psi_{vy} = \frac{V_{y,all2}}{V_{ny} / \Omega_v} = \frac{1,20F_y I_x t_w}{\sqrt{3} W_{px} d} = \sqrt{3} \frac{I_x}{W_{px} d} = \frac{\sqrt{3} W_{ex}}{2 W_{px}} \quad (4.5)$$

Bölüm 3.4'te belirtildiği gibi, Denklem (4.4) elde edilirken emniyetli kesme kuvveti dayanımında gövde alanı olarak başlıkların arasındaki net gövde yüksekliğiyle gövde kalınlığı çarpılmıştır. Denklem (4.4) ve Denklem (4.5)'ten fark edilebileceği gibi, dayanım oranı malzeme özelliklerinden bağımsızdır. Denklem (4.4)'ten, Standart'la Yönetmelik'in arasındaki gövde alanı tanımındaki fark göz ardı edildiğinde, dayanım oranının  $0,866$ 'ya eşit olacağı görülmektedir. Gövde alanı tanımındaki fark göz

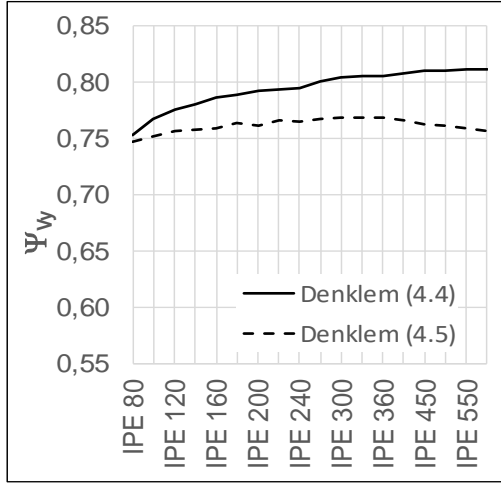
önünde bulundurulduğunda ise incelenen bütün enkesitlerde dayanım oranı 0,866 değerinden küçük olmaktadır. Benzer şekilde, Denklem (4.5)'ten de, dayanım oranının 1'den küçük olduğu görülebilir. Diğer bir deyişle, incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli bir hadde profilinin tasarımında, Standart Yönetmelik'ten daha güvenli tarafta kalmaktadır.

Denklem (4.4) ve Denklem (4.5) kullanılarak elde edilen dayanım oranlarının enkesit numarasına göre değişimi incelenen bütün enkesit grupları için çizdirilerek ilgili grafikler Şekil 4.32'de sunulmuştur. IPE ve IPN enkesitli elemanlarda, bütün enkesit numaralarında, Denklem (4.5)'ten elde edilen değerler, Denklem (4.4)'ten elde edilen değerlerden daha büyüktür. HE enkesitli elemanlarda ise bu durum yalnız büyük numaralı enkesitlerde geçerlidir. Küçük enkesit numaralı elemanlarda Denklem (4.4)'ten hesaplanan dayanım oranı daha küçük çıkmaktadır. Genel olarak, Denklem (4.4)'ten hesaplanan dayanım oranı HE enkesitlerde, özellikle HEM'lerde, enkesit numarasına bağlı olarak değişmektedir. Denklem (4.5)'ten hesaplanan dayanım oranlarının enkesit grubu içinde nispeten daha az değişken olduğu gözlenmektedir. İncelenen bütün enkesitlerde, dayanım oranı için Denklem (4.4)'ten elde edilen en büyük değer 0,812 (IPE550), Denklem (4.5)'ten elde edilen en büyük değer ise 0,789 (HEA280) olarak bulunmuştur. Her iki değer de 1,00'den küçük olması, farklı kayma gerilmesi tanımları kullanıldığında dahi, gövde düzleminde kesme etkisindeki I-enkesitli hadde elemanlarının tasarımında, Standart'ın Yönetmelik'ten daha güvenli tarafta kaldığını göstermektedir.

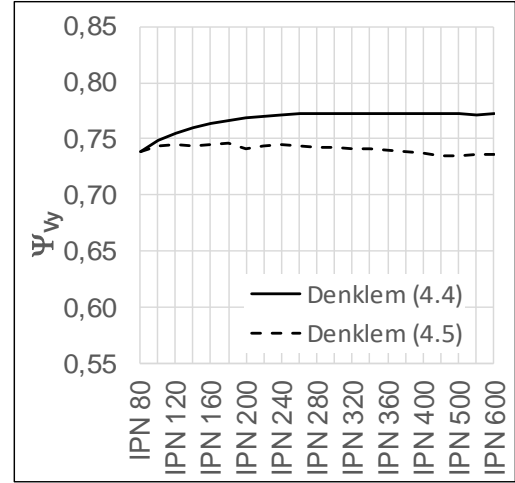
#### **4.7. Başlıklarına Paralel Düzlemde Kesme Kuvveti Etkisinde Tasarım Kurallarının ve Dayanımların Karşılaştırılması**

Bölüm 2.5'te özetlendiği gibi, başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli elemanların tasarımında, TÇY (2016) iki dayanım sınır durumunu dikkate almaktadır: başlıkların kesme etkisinde (i) akması ve (ii) burkulması. Elemanın dayanımını hangi sınır durumun belirlediği başlıkların narinliğine ( $\lambda_f = b_f / 2t_f$ ) bağlıdır. Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, başlık narinliği  $1,10\sqrt{1,20E/F_y} \cong 1,20\sqrt{E/F_y}$  sınır değerinden küçük olan I-enkesitli hadde profillerinde, "kayma etkisinde başlık burkulma katsayısı"  $C_{v2}=1,0$  olup, elemanın dayanımı başlık narinliğinden bağımsızdır. S235, S275 ve S355 için, ilgili sınır narinlik değerleri, sırasıyla, 35,2, 32,5 ve 28,6 olarak hesaplanmıştır.

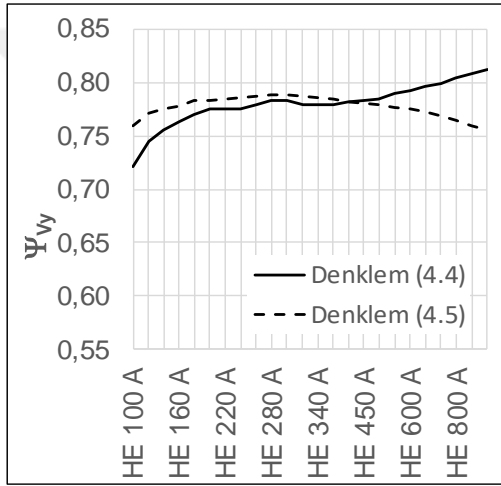




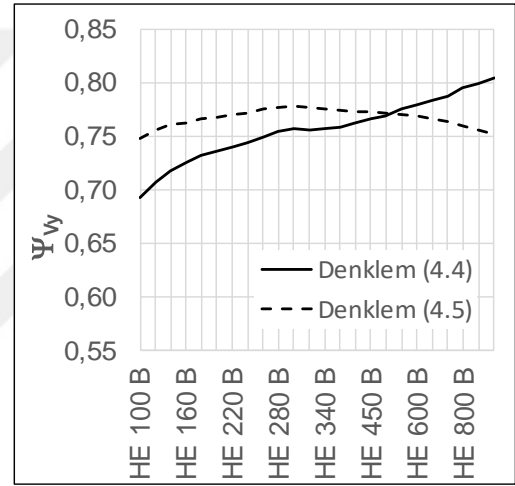
(a) IPE enkesitler



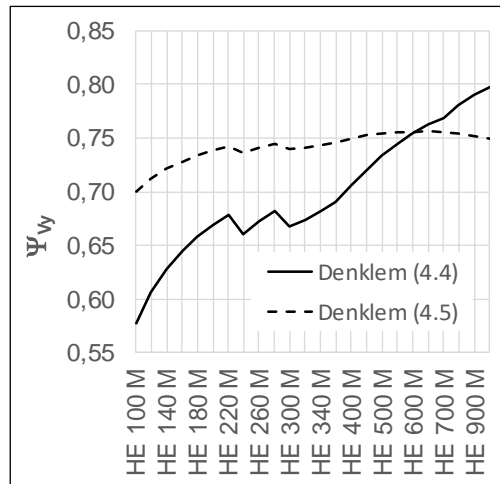
(b) IPN enkesitler



(c) HEA enkesitler



(d) HEB enkesitler



(e) HEM enkesitler

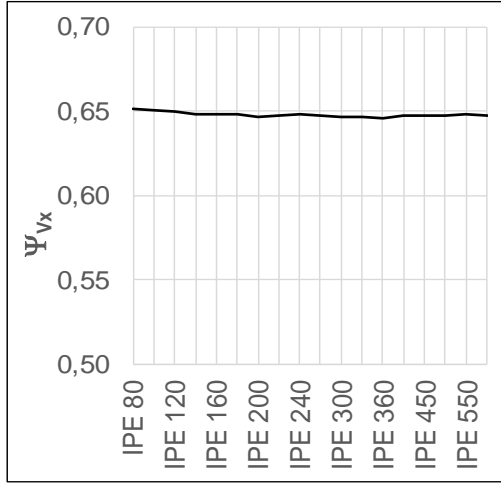
Şekil 4.32. I-enkesitli hadde profillerin gövde düzleminde kesme kuvveti dayanım oranları

Bölüm 4.1.3'te belirtildiği gibi, incelenen bütün enkesitler arasında başlık narınlığı en yüksek olan enkesit HEA280 olup bu enkesitin başlık narınlığı 10,8'e eşittir. Bu değer in S355 çeliği için elde edilen sınır değeri bile aşmadığı göz önünde bulundurulursa, incelenen bütün enkesit ve çelik kalitelerinde, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisinde güvenli dayanım hesaplanırken yalnız akma sınır durumunun göz önünde bulundurulması yeterlidir. Bu durumda, güvenli dayanım  $V_{nx}/\Omega_v = 0,60F_y A_v / 1,67 \cong 0,359F_y A_v$  'ye eşittir ve çelik kalitesinin haricinde yalnız toplam başlık alanına ( $A_v = 2b_f t_f$ ) bağlıdır. Şekil 4.15'te incelenen enkesitlerin toplam başlık alanlarının enkesit numarasıyla değişimi görülmektedir. Bu eğriler,  $0,359F_y$  ile çarpıldığında güvenli dayanım eğrilerini verir. Grafiklerden de görülebileceği gibi, HEM'lerin haricinde, belli bir enkesit grubunda, enkesit numarası arttıkça toplam başlık alanı, yani kesme kuvveti dayanımı, artmaktadır. HEM'lerde ise büyük numaralı enkesitlerde başlık alanı sabit kaldığı için güvenli kesme kuvveti dayanımı da sabittir.

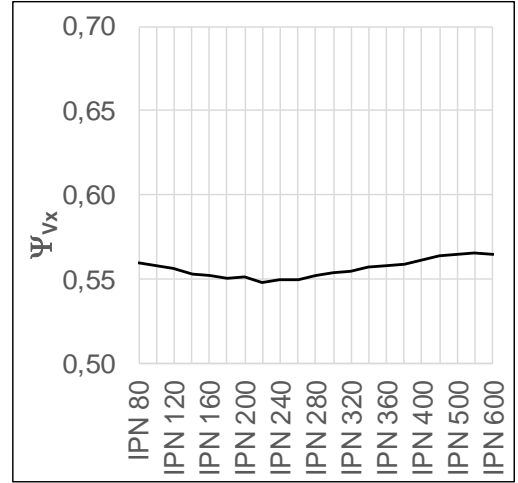
Bölüm 3.5'te belirtildiği gibi, başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli elemanlar için Standart'ta özel tasarım ilkeleri verilmemiştir. Ancak, Denklem (1.8)'de verilen genel elastik kayma gerilmesi denklemi uyarlanarak kesitteki en büyük kayma gerilmesi hesaplanıp kesme kuvvetinin yönünden bağımsız olarak tanımlanan kayma emniyet gerilmesine eşitlenerek Denklem (3.14)'te verilen emniyetli kesme kuvveti dayanımı ( $V_{x,all}$ ) elde edilebilmektedir. Böylece, emniyetli kesme kuvveti dayanımının, güvenli kesme kuvveti dayanımına ( $V_{nx}/\Omega_v$ ) oranı, yani "başlıklara paralel düzlemde kesme kuvveti dayanım oranı  $\Psi_{vx}$ ", aşağıdaki şekilde ifade edilebilir,

$$\Psi_{vx} = \frac{V_{x,all}}{V_{nx} / \Omega_v} = \frac{0,60F_y}{\sqrt{3}} \frac{8I_y}{(b_f^2 - t_w^2)} \cong 3,86 \frac{I_y}{(b_f^2 - t_w^2) b_f t_f} \quad (4.6)$$

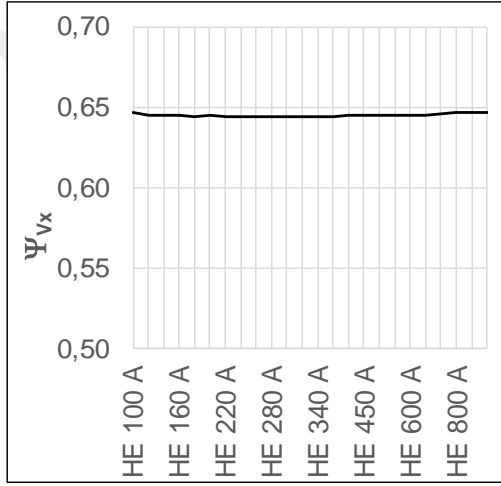
Denklem (4.6)'dan görülebileceği gibi, dayanım oranı malzeme özelliklerinden bağımsızdır. Denklem (4.6) kullanılarak elde edilen dayanım oranlarının enkesit numarasına göre değişimi incelenen bütün enkesit grupları için çizdirilerek ilgili grafikler Şekil 4.33'te sunulmuştur. Şekil 4.33'ten, IPN enkesitleri hariç tutulduğunda, başlıklara paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli bir hadde profili için dayanım oranının enkesit türünden ve numarasından bağımsız olduğu ve yaklaşık 0,65 değerine eşit olduğu görülmektedir. IPN enkesitlerinde ise bu oran ortalama 0,56 değerine eşittir.



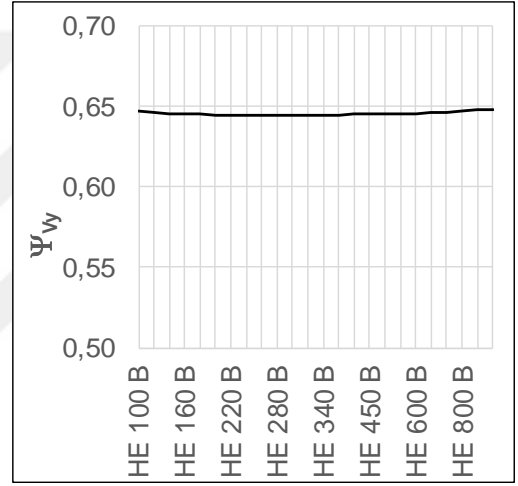
(a) IPE enkesitler



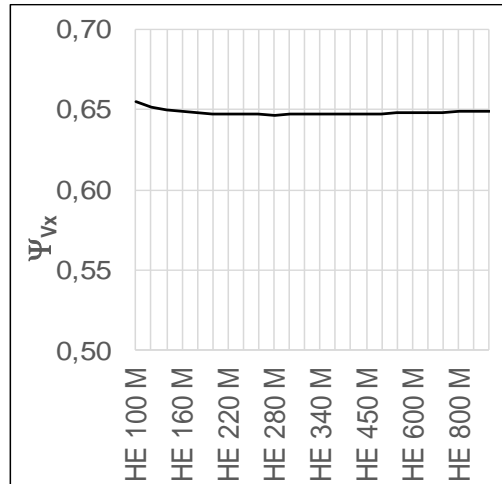
(b) IPN enkesitler



(c) HEA enkesitler



(d) HEB enkesitler



(e) HEM enkesitler

Şekil 4.33. I-enkesitli hadde profillerin başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti dayanım oranları

İncelenen bütün enkesitler için dayanım oranının 1'den küçük olduğu göz önünde bulundurulduğunda, başlıklarına paralel düzlemde kesme etkisindeki I-enkesitli hadde elemanlarının tasarımında da, incelenen tüm enkesit ve çelik kalitelerinde, Standart'ın Yönetmelik'ten daha güvenli tarafta kaldığı görülebilir.



## 5. I-ENKESİTLİ EĞİLME ELEMANLARI İÇİN PRATİK TASARIM TABLOLARI

Bu bölümde, Türkiye’de çelik yapı tasarımı yapan inşaat mühendislerinin eğilme momenti ve/veya kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli hadde profillerin tasarımında kullanabilecekleri pratik tasarım tabloları sunulmaktadır. Tasarım tablolarında sunulan dayanım değerleri, YDKT yöntemi için hesaplanmış olup; tasarımda GKT yönteminin kullanılması durumunda, güvenli dayanım ( $R_n/\Omega$ ), YDKT yöntemine göre belirlenen tasarım dayanımını ( $\phi R_n$ ), güvenlik katsayısı ( $\Omega$ ) ile dayanım katsayısının ( $\phi$ ) çarpımına eşit olan 1,5 değerine bölerek hesaplanmalıdır. Tablolarda verilen dayanım değerlerinin hesabında  $C_b=1$  olarak alınmıştır. Farklı bir  $C_b$  değeri için tabloların kullanımı konusunda Bölüm 5.3’te örnek sunulacaktır.

Tablolar, genel olarak her enkesit grubu için ayrı ayrı sunulmuştur. Tasarım dayanımı belirlenmesi istenen elemanın önce hangi gruba ait olduğu ve hangi çelik kalitesinden üretildiği belirlenmelidir. Ardından, elemanın (i) kuvvetli eksen etrafında eğilme/gövde düzleminde kesme (Bölüm 5.1) veya (ii) zayıf eksen etrafında eğilme/başlıklara paralel düzlemde kesme (Bölüm 5.2) etkilerinden hangisine maruz kaldığı belirlenip, ilgili bölümdeki tablolara gidilmelidir.

### 5.1. Kuvvetli Eksen Etrafında Eğilme/Gövde Düzleminde Kesme

Kuvvetli eksenleri etrafında eğilen, I-enkesitli hadde profillerin tasarım eğilme momenti dayanımı ( $\phi_b M_{nx}$ ), profilin  $L_b$  boyu  $L_r$  sınır değeri aşmadığı müddetçe, Tablo 5.1 – Tablo 5.5 kullanılarak belirlenebilir. İlgili tablolarda, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli hadde elemanlarının tasarım kesme kuvveti dayanımları ( $\phi_v V_{ny}$ ) da listelenmiştir. Kuvvetli eksen etrafında eğilme durumunda kullanılacak dayanım değerleri farklı enkesit grupları ve çelik kaliteleri için ayrı ayrı sunulmuştur. Örnek olarak, Tablo 5.1’de IPE enkesitli elemanların tasarım dayanımları, üç farklı çelik sınıfı için (sırasıyla, S235, S275 ve S355 için) üç ardışık çizelgede verilmiştir. Tablo 5.1 – Tablo 5.5’te sunulan tasarım tablolarının ilk sütununda profilin ismi ve numarası, ikinci sütunda birim boy kütlesi, üçüncü ve dördüncü sütunlarında ise yanal burkulma dayanımı hesabında kullanılan sınır boy değerleri ( $L_p$  ve  $L_r$ ) listelenmiştir.

Tablo 5.1. Kuvvetli eksen etrafında eğilen IPE enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ , DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S235								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
IPE 80	6,00	0,54	2,97	4,91	2,96	0,80	42,9	0,80
IPE 100	8,10	0,64	3,13	8,33	5,06	1,31	57,8	1,71
IPE 120	10,4	0,74	3,28	12,8	7,85	1,96	74,4	3,18
IPE 140	12,9	0,85	3,48	18,7	11,4	2,75	92,8	5,41
IPE 160	15,8	0,94	3,74	26,2	16,1	3,61	113	8,69
IPE 180	18,8	1,05	3,99	35,1	21,6	4,59	135	13,2
IPE 200	22,4	1,15	4,31	46,7	28,7	5,70	158	19,4
IPE 220	26,2	1,27	4,62	60,3	37,3	6,85	183	27,7
IPE 240	30,7	1,38	5,03	77,6	48,0	8,12	210	38,9
IPE 270	36,1	1,55	5,34	102	63,5	10,3	251	57,9
IPE 300	42,2	1,72	5,72	133	82,5	12,6	300	83,6
IPE 330	49,1	1,82	6,06	170	106	15,2	349	118
IPE 360	57,1	1,95	6,39	216	134	18,4	406	163
IPE 400	66,3	2,03	6,62	276	172	22,8	485	231
IPE 450	77,6	2,12	6,81	360	222	29,4	596	337
IPE 500	90,7	2,21	7,05	464	286	36,9	719	482
IPE 550	106	2,28	7,32	589	361	45,3	861	671
IPE 600	122	2,39	7,65	743	455	54,8	1020	921

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ , DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S275								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
IPE 80	6,0	0,50	2,56	5,7	3,5	1,11	50,2	0,801
IPE 100	8,1	0,59	2,71	9,8	5,9	1,80	67,7	1,71
IPE 120	10,4	0,69	2,86	15,0	9,2	2,69	87,1	3,18
IPE 140	12,9	0,78	3,04	21,9	13,4	3,75	109	5,41
IPE 160	15,8	0,87	3,27	30,7	18,9	4,92	132	8,69
IPE 180	18,8	0,97	3,51	41,1	25,3	6,23	157	13,2
IPE 200	22,4	1,06	3,79	54,7	33,6	7,72	185	19,4
IPE 220	26,2	1,18	4,08	70,5	43,7	9,26	214	27,7
IPE 240	30,7	1,28	4,44	90,8	56,1	11,0	246	38,9
IPE 270	36,1	1,43	4,74	120	74,3	13,8	294	57,9
IPE 300	42,2	1,59	5,10	155	96,5	16,8	351	83,6
IPE 330	49,1	1,68	5,39	199	124	20,3	408	118
IPE 360	57,1	1,80	5,70	252	157	24,5	475	163
IPE 400	66,3	1,87	5,91	323	201	30,3	568	231
IPE 450	77,6	1,96	6,09	421	260	39,0	698	337
IPE 500	90,7	2,05	6,32	543	334	48,8	842	482
IPE 550	106	2,11	6,57	690	423	59,9	1010	671
IPE 600	122	2,21	6,87	869	532	72,5	1190	921

Tablo 5.1.(devam) Kuvvetli eksen etrafında eğilen IPE enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S355								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
IPE 80	6,00	0,44	2,02	7,4	4,5	1,86	64,8	0,80
IPE 100	8,10	0,52	2,16	12,6	7,6	3,02	87,3	1,71
IPE 120	10,4	0,61	2,30	19,4	11,9	4,46	112	3,18
IPE 140	12,9	0,69	2,46	28,2	17,3	6,2	140	5,41
IPE 160	15,8	0,77	2,67	39,6	24,4	8,0	170	8,69
IPE 180	18,8	0,86	2,88	53,0	32,7	10,1	203	13,2
IPE 200	22,4	0,94	3,11	70,6	43,4	12,5	239	19,4
IPE 220	26,2	1,04	3,36	91,1	56,4	14,9	276	27,7
IPE 240	30,7	1,12	3,66	117	72,5	17,7	317	38,9
IPE 270	36,1	1,26	3,94	155	95,9	21,9	380	57,9
IPE 300	42,2	1,40	4,26	201	125	26,6	454	83,6
IPE 330	49,1	1,48	4,51	257	159	32,2	527	118
IPE 360	57,1	1,58	4,78	326	202	38,6	613	163
IPE 400	66,3	1,65	4,96	418	259	47,7	733	231
IPE 450	77,6	1,72	5,14	544	335	61,0	901	337
IPE 500	90,7	1,80	5,34	701	432	76,0	1090	482
IPE 550	106	1,86	5,56	890	546	93,3	1300	671
IPE 600	122	1,95	5,81	1120	687	113	1530	921

Tablo 5.2. Kuvvetli eksen etrafında eğilen IPN enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S235								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
IPN 80	5,94	0,47	2,92	4,82	2,89	0,79	44,0	0,80
IPN 100	8,34	0,55	3,14	8,42	5,06	1,29	63,0	1,70
IPN 120	11,1	0,63	3,41	13,5	8,10	1,92	86,0	3,30
IPN 140	14,3	0,72	3,70	20,2	12,1	2,70	113	5,70
IPN 160	17,9	0,80	4,00	28,8	17,3	3,57	142	9,40
IPN 180	21,9	0,88	4,30	39,6	23,8	4,60	175	14,5
IPN 200	26,2	0,96	4,61	52,9	31,7	5,80	212	21,4
IPN 220	31,1	1,04	4,93	68,5	41,2	7,03	251	30,6
IPN 240	36,2	1,13	5,25	87,1	52,4	8,43	294	42,5
IPN 260	41,9	1,19	5,57	109	65,4	9,89	345	57,4
IPN 280	47,9	1,26	5,86	134	80,2	11,6	399	75,9
IPN 300	54,2	1,31	6,14	161	96,7	13,4	457	98,0
IPN 320	61,0	1,37	6,43	193	116	15,3	519	125
IPN 340	68,0	1,44	6,70	228	137	17,4	585	157
IPN 360	76,1	1,49	7,04	270	161	19,5	660	196
IPN 380	84,0	1,55	7,36	313	187	21,8	734	240
IPN 400	92,4	1,61	7,62	363	216	24,4	812	292
IPN 450	115	1,76	8,34	508	302	31,3	1028	459
IPN 500	141	1,91	9,08	685	407	38,8	1269	687
IPN 550	166	2,06	9,61	897	534	48,0	1473	992
IPN 600	199	2,21	10,4	1153	685	57,1	1827	1390

Tablo 5.2.(devam) Kuvvetli eksen etrafında eğilen IPN enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ , DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S275								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
				IPN 80	5,9	0,43	2,5	
IPN 100	8,3	0,51	2,7	9,9	5,9	1,79	74	1,7
IPN 120	11,1	0,58	2,9	15,7	9,5	2,65	101	3,3
IPN 140	14,3	0,66	3,2	23,6	14,2	3,72	132	5,7
IPN 160	17,9	0,74	3,5	33,7	20,3	4,92	166	9,4
IPN 180	21,9	0,81	3,7	46,3	27,9	6,33	205	14,5
IPN 200	26,2	0,89	4,0	61,9	37,1	7,97	248	21,4
IPN 220	31,1	0,96	4,3	80,2	48,2	9,65	294	30,6
IPN 240	36,2	1,04	4,6	102	61,3	11,6	345	42,5
IPN 260	41,9	1,10	4,8	127	76,6	13,6	403	57,4
IPN 280	47,9	1,16	5,1	156	93,9	15,9	467	75,9
IPN 300	54,2	1,22	5,3	189	113	18,3	535	98,0
IPN 320	61,0	1,27	5,6	226	135	21,0	607	125
IPN 340	68,0	1,33	5,8	267	160	23,9	684	157
IPN 360	76,1	1,38	6,1	316	189	26,8	772	196
IPN 380	84,0	1,43	6,4	367	218	30,0	859	240
IPN 400	92,4	1,49	6,6	424	253	33,4	950	292
IPN 450	115	1,63	7,2	594	353	42,9	1203	459
IPN 500	141	1,77	7,9	802	476	53,2	1485	687
IPN 550	166	1,91	8,4	1049	625	65,7	1724	992
IPN 600	199	2,04	9,0	1349	802	78,3	2138	1390

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ , DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S355								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
				IPN 80	5,9	0,38	2,0	
IPN 100	8,3	0,45	2,1	12,7	7,6	3,01	96	1,70
IPN 120	11,1	0,51	2,3	20,3	12,2	4,46	130	3,30
IPN 140	14,3	0,58	2,5	30,5	18,3	6,24	170	5,70
IPN 160	17,9	0,65	2,7	43,5	26,2	8,22	215	9,40
IPN 180	21,9	0,71	3,0	59,7	36,0	10,6	265	14,5
IPN 200	26,2	0,78	3,2	79,9	47,9	13,3	320	21,4
IPN 220	31,1	0,84	3,4	104	62,2	16,0	380	30,6
IPN 240	36,2	0,92	3,6	132	79,2	19,2	445	42,5
IPN 260	41,9	0,97	3,9	164	98,9	22,5	521	57,4
IPN 280	47,9	1,02	4,1	202	121	26,4	602	75,9
IPN 300	54,2	1,07	4,3	243	146	30,4	690	98,0
IPN 320	61,0	1,12	4,5	292	175	34,9	784	125
IPN 340	68,0	1,17	4,7	345	206	39,7	884	157
IPN 360	76,1	1,21	4,9	408	244	44,5	997	196
IPN 380	84,0	1,26	5,1	473	282	49,7	1109	240
IPN 400	92,4	1,31	5,3	548	327	55,4	1227	292
IPN 450	115	1,43	5,8	767	456	71,1	1553	459
IPN 500	141	1,55	6,3	1035	615	88,2	1917	687
IPN 550	166	1,68	6,7	1355	807	109	2226	992
IPN 600	199	1,80	7,2	1742	1035	130	2760	1390



Tablo 5.3. Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEA enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ , DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S235								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
HE 100 A	16,7	1,29	8,7	17,6	10,8	0,92	67,7	3,49
HE 120 A	19,9	1,55	8,4	25,3	15,7	1,38	80,4	6,06
HE 140 A	24,7	1,81	8,8	36,7	23,0	1,95	103	10,3
HE 160 A	30,4	2,04	9,7	51,8	32,6	2,53	129	16,7
HE 180 A	35,5	2,32	9,9	68,7	43,5	3,32	145	25,1
HE 200 A	42,3	2,56	10,8	90,8	57,5	4,05	174	36,9
HE 220 A	50,5	2,83	11,5	120	76,3	5,05	207	54,1
HE 240 A	60,3	3,08	12,6	157	99,9	6,02	243	77,6
HE 260 A	68,2	3,34	13,3	195	124	7,11	264	105
HE 280 A	76,4	3,59	13,8	235	150	8,37	305	137
HE 300 A	88,3	3,85	14,9	293	187	9,61	348	183
HE 320 A	97,6	3,85	15,0	344	219	11,2	393	229
HE 340 A	105	3,83	14,8	391	248	13,0	442	277
HE 360 A	112	3,81	14,7	442	280	14,8	494	331
HE 400 A	125	3,77	14,3	542	342	19,0	605	451
HE 450 A	140	3,74	13,8	680	429	25,0	713	637
HE 500 A	155	3,72	13,4	835	526	31,9	829	870
HE 550 A	166	3,67	12,8	978	614	39,8	952	1120
HE 600 A	178	3,62	12,3	1130	709	48,6	1080	1410
HE 650 A	190	3,58	11,9	1300	810	58,4	1220	1750
HE 700 A	204	3,51	11,6	1490	924	69,5	1410	2150
HE 800 A	224	3,41	10,9	1840	1140	93,6	1670	3030
HE 900 A	252	3,34	10,5	2290	1400	122	2010	4220
HE 1000 A	272	3,26	10,1	2710	1660	154	2300	5540

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ , DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S275								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
HE 100 A	16,7	1,19	7,45	20,5	12,6	1,27	79,2	3,49
HE 120 A	19,9	1,43	7,27	29,6	18,4	1,91	94,1	6,06
HE 140 A	24,7	1,67	7,63	42,9	26,9	2,69	121	10,3
HE 160 A	30,4	1,89	8,34	60,7	38,1	3,49	150	16,7
HE 180 A	35,5	2,15	8,62	80,4	50,9	4,56	169	25,1
HE 200 A	42,3	2,36	9,36	106	67,3	5,57	204	36,9
HE 220 A	50,5	2,62	10,0	141	89,3	6,93	243	54,1
HE 240 A	60,3	2,85	11,0	184	117	8,26	285	77,6
HE 260 A	68,2	3,16	11,6	227	145	9,75	309	105
HE 280 A	76,4	3,59	12,0	272	176	11,4	356	137
HE 300 A	88,3	3,82	13,0	339	218	13,1	407	183
HE 320 A	97,6	3,56	13,1	403	256	15,4	460	229
HE 340 A	105	3,54	13,0	458	291	17,7	517	277
HE 360 A	112	3,53	12,9	517	328	20,3	578	331
HE 400 A	125	3,48	12,5	634	400	25,9	708	451
HE 450 A	140	3,46	12,1	796	502	34,0	835	637
HE 500 A	155	3,44	11,8	977	615	43,3	970	870
HE 550 A	166	3,39	11,3	1140	718	53,7	1110	1120
HE 600 A	178	3,35	10,9	1320	829	65,3	1270	1410
HE 650 A	190	3,31	10,6	1520	948	78,2	1430	1750
HE 700 A	204	3,25	10,3	1740	1080	92,9	1650	2150
HE 800 A	224	3,16	9,78	2150	1330	124	1960	3030
HE 900 A	252	3,09	9,47	2680	1640	162	2350	4220
HE 1000 A	272	3,01	9,12	3170	1940	202	2700	5540

Tablo 5.3.(devam) Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEA enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S355								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
HE 100 A	16,7	1,05	5,81	26,5	16,3	2,15	102	3,49
HE 120 A	19,9	1,26	5,72	38,2	23,8	3,23	121	6,06
HE 140 A	24,7	1,47	6,04	55,4	34,8	4,53	156	10,3
HE 160 A	30,4	1,66	6,62	78,3	49,2	5,86	194	16,7
HE 180 A	35,5	2,04	6,90	103	65,7	7,61	219	25,1
HE 200 A	42,3	2,44	7,51	134	86,9	9,27	263	36,9
HE 220 A	50,5	2,69	8,09	177	115	11,5	313	54,1
HE 240 A	60,3	2,93	8,85	232	151	13,7	367	77,6
HE 260 A	68,2	3,34	9,34	284	187	16,1	399	105
HE 280 A	76,4	3,74	9,76	340	227	18,8	460	137
HE 300 A	88,3	3,98	10,5	423	282	21,7	525	183
HE 320 A	97,6	3,46	10,6	512	331	25,4	594	229
HE 340 A	105	3,15	10,5	590	375	29,2	668	277
HE 360 A	112	3,10	10,4	667	423	33,3	746	331
HE 400 A	125	3,07	10,2	819	517	42,5	914	451
HE 450 A	140	3,05	9,90	1030	648	55,4	1080	637
HE 500 A	155	3,02	9,69	1260	794	70,2	1250	870
HE 550 A	166	2,99	9,34	1480	927	86,5	1440	1119
HE 600 A	178	2,95	9,06	1710	1070	104	1630	1412
HE 650 A	190	2,91	8,84	1960	1220	124	1840	1752
HE 700 A	204	2,86	8,65	2250	1400	147	2130	2153
HE 800 A	224	2,78	8,24	2780	1720	194	2520	3034
HE 900 A	252	2,72	8,02	3450	2120	251	3030	4221
HE 1000 A	272	2,65	7,76	4100	2500	312	3480	5538

Tablo 5.4. Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEB enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S235								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
HE 100 B	20,4	1,30	10,4	22,0	13,3	1,0	84,6	4,50
HE 120 B	26,7	1,57	11,0	34,9	21,3	1,4	110	8,64
HE 140 B	33,7	1,84	11,7	51,9	31,9	2,0	138	15,1
HE 160 B	42,6	2,08	12,8	74,9	46,1	2,7	180	24,9
HE 180 B	51,2	2,35	13,6	102	63,0	3,5	216	38,3
HE 200 B	61,3	2,60	14,6	136	84,3	4,3	254	57,0
HE 220 B	71,5	2,87	15,3	175	109	5,3	295	80,9
HE 240 B	83,2	3,12	16,4	223	139	6,3	338	113
HE 260 B	93,0	3,38	16,9	271	170	7,5	367	149
HE 280 B	103	3,64	17,3	324	204	8,8	415	193
HE 300 B	117	3,89	18,4	395	248	10,1	465	252
HE 320 B	127	3,89	18,4	455	285	11,7	519	308
HE 340 B	134	3,87	18,0	509	319	13,5	575	367
HE 360 B	142	3,85	17,7	567	355	15,3	635	432
HE 400 B	155	3,80	16,9	684	427	19,6	761	577
HE 450 B	171	3,76	16,0	842	526	25,8	888	799
HE 500 B	187	3,73	15,4	1020	635	32,9	1020	1072
HE 550 B	199	3,68	14,5	1180	736	41,2	1160	1367
HE 600 B	212	3,64	13,8	1360	844	50,6	1310	1710
HE 650 B	225	3,59	13,2	1550	959	61,1	1470	2106
HE 700 B	241	3,53	12,8	1760	1090	73,0	1680	2569
HE 800 B	262	3,43	11,8	2160	1330	99,4	1970	3591
HE 900 B	291	3,35	11,3	2660	1630	130,0	2350	4941
HE 1000 B	314	3,28	10,7	3140	1910	166,0	2680	6447

Tablo 5.4.(devam) Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEB enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S275								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
HE 100 B	20,4	1,20	8,91	25,8	15,6	1,32	99	4,50
HE 120 B	26,7	1,45	9,41	40,9	25,0	2,00	129	8,64
HE 140 B	33,7	1,70	10,0	60,7	37,4	2,82	162	15,1
HE 160 B	42,6	1,92	11,0	87,6	54,0	3,70	211	24,9
HE 180 B	51,2	2,17	11,6	119	73,8	4,79	252	38,3
HE 200 B	61,3	2,41	12,5	159	98,7	5,96	297	57,0
HE 220 B	71,5	2,65	13,2	205	127	7,32	345	80,9
HE 240 B	83,2	2,89	14,1	261	163	8,73	396	113
HE 260 B	93	3,12	14,6	318	199	10,4	429	149
HE 280 B	103	3,37	15,0	380	238	12,2	485	193
HE 300 B	117	3,60	15,9	463	291	14,0	545	252
HE 320 B	127	3,59	15,9	532	334	16,2	607	308
HE 340 B	134	3,57	15,6	596	374	18,6	673	367
HE 360 B	142	3,56	15,3	664	416	21,1	743	432
HE 400 B	155	3,51	14,6	800	500	27,0	891	577
HE 450 B	171	3,48	13,9	986	615	35,4	1040	799
HE 500 B	187	3,45	13,4	1190	743	45,1	1200	1072
HE 550 B	199	3,40	12,7	1380	861	56,3	1360	1367
HE 600 B	212	3,36	12,1	1590	988	68,8	1530	1710
HE 650 B	225	3,32	11,6	1810	1120	82,8	1720	2106
HE 700 B	241	3,26	11,3	2060	1270	98,5	1960	2569
HE 800 B	262	3,17	10,5	2530	1560	133	2310	3591
HE 900 B	291	3,10	10,1	3110	1900	174	2750	4941
HE 1000 B	314	3,03	9,61	3680	2230	219	3140	6447

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S355								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
HE 100 B	20,4	1,06	6,93	33,3	20,1	2,24	128	4,50
HE 120 B	26,7	1,28	7,33	52,8	32,2	3,40	166	8,64
HE 140 B	33,7	1,50	7,82	78,4	48,2	4,77	209	15,10
HE 160 B	42,6	1,69	8,61	113	69,7	6,28	273	24,9
HE 180 B	51,2	1,91	9,13	154	95,2	8,11	326	38,3
HE 200 B	61,3	2,12	9,85	205	127	10,1	383	57,0
HE 220 B	71,5	2,34	10,4	264	164	12,4	445	80,9
HE 240 B	83,2	2,54	11,1	336	210	14,7	511	113
HE 260 B	93	2,75	11,5	410	257	17,5	554	149
HE 280 B	103	2,96	11,9	490	308	20,5	626	193
HE 300 B	117	3,17	12,6	597	375	23,5	703	252
HE 320 B	127	3,16	12,6	687	431	27,1	784	308
HE 340 B	134	3,15	12,4	769	482	31,1	869	367
HE 360 B	142	3,13	12,2	857	537	35,4	959	432
HE 400 B	155	3,09	11,7	1030	645	45,0	1150	577
HE 450 B	171	3,06	11,2	1270	794	58,8	1340	799
HE 500 B	187	3,04	10,8	1540	959	74,5	1540	1072
HE 550 B	199	3,00	10,3	1790	1110	92,3	1760	1367
HE 600 B	212	2,96	9,89	2050	1280	112	1980	1710
HE 650 B	225	2,92	9,56	2340	1450	134	2220	2106
HE 700 B	241	2,87	9,29	2660	1640	159	2530	2569
HE 800 B	262	2,79	8,74	3270	2010	212	2980	3591
HE 900 B	291	2,73	8,43	4020	2460	274	3550	4941
HE 1000 B	314	2,67	8,11	4750	2880	343	4050	6447

Tablo 5.5. Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEM enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S235								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
HE 100 M	41,8	1,41	20,5	49,9	28,2	1,1	203	11,4
HE 120 M	52,1	1,67	20,9	74,2	42,7	1,6	247	20,2
HE 140 M	63,2	1,94	21,4	104	60,9	2,2	293	32,9
HE 160 M	76,2	2,19	22,4	143	83,9	2,9	355	51,0
HE 180 M	88,9	2,45	23,0	187	111	3,7	409	74,8
HE 200 M	103	2,71	23,9	240	143	4,6	465	106
HE 220 M	117	2,97	24,6	300	180	5,6	525	146
HE 240 M	157	3,28	29,9	448	266	6,8	685	243
HE 260 M	172	3,54	30,2	534	320	8,0	736	313
HE 280 M	189	3,80	30,4	627	378	9,4	809	396
HE 300 M	238	4,11	35,7	862	516	11,0	1010	592
HE 320 M	245	4,08	34,1	938	562	12,5	1060	681
HE 340 M	248	4,06	32,0	998	600	14,2	1120	764
HE 360 M	250	4,02	30,1	1060	636	16,1	1170	849
HE 400 M	256	3,95	26,8	1180	714	20,3	1280	1040
HE 450 M	263	3,90	23,7	1340	814	26,4	1420	1320
HE 500 M	270	3,83	21,2	1500	915	33,6	1550	1620
HE 550 M	278	3,77	19,2	1680	1020	42,2	1690	1980
HE 600 M	285	3,71	17,6	1860	1130	52,1	1840	2370
HE 650 M	293	3,66	16,2	2040	1250	63,1	1980	2820
HE 700 M	301	3,60	15,1	2230	1360	75,4	2120	3290
HE 800 M	317	3,49	13,4	2640	1610	104	2410	4430
HE 900 M	333	3,39	12,2	3050	1860	136	2690	5700
HE 1000 M	349	3,31	11,4	3500	2120	172	2980	7220

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S275								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
HE 100 M	41,8	1,30	17,5	58,4	33,0	1,56	238	11,4
HE 120 M	52,1	1,54	17,8	86,8	49,9	2,26	289	20,2
HE 140 M	63,2	1,79	18,3	122	71,3	3,09	343	32,9
HE 160 M	76,2	2,02	19,1	167	98,1	4,02	416	51,0
HE 180 M	88,9	2,26	19,7	219	130	5,12	479	74,8
HE 200 M	103	2,50	20,5	281	168	6,31	545	106
HE 220 M	117	2,75	21,0	351	211	7,68	614	146
HE 240 M	157	3,03	25,6	524	312	9,42	802	243
HE 260 M	172	3,27	25,8	625	374	11,1	861	313
HE 280 M	189	3,51	26,0	734	442	13,0	946	396
HE 300 M	238	3,80	30,5	1010	603	15,2	1180	592
HE 320 M	245	3,77	29,2	1100	658	17,3	1240	681
HE 340 M	248	3,75	27,4	1170	702	19,7	1310	764
HE 360 M	250	3,72	25,8	1230	744	22,2	1370	849
HE 400 M	256	3,65	23,0	1380	835	28,1	1500	1040
HE 450 M	263	3,60	20,4	1570	953	36,6	1660	1320
HE 500 M	270	3,54	18,3	1760	1070	46,5	1820	1620
HE 550 M	278	3,49	16,6	1960	1200	58,3	1980	1980
HE 600 M	285	3,43	15,2	2170	1330	71,7	2150	2370
HE 650 M	293	3,38	14,1	2390	1460	86,6	2310	2820
HE 700 M	301	3,33	13,2	2610	1590	103	2480	3290
HE 800 M	317	3,22	11,8	3090	1880	141	2820	4430
HE 900 M	333	3,13	10,8	3570	2170	182	3150	5700
HE 1000 M	349	3,06	10,1	4100	2480	229	3490	7220

Tablo 5.5.(devam) Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEM enkesitli eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S355								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
HE 100 M	41,8	1,14	13,6	75,3	42,6	2,63	307	11,4
HE 120 M	52,1	1,36	13,8	112	64,5	3,81	373	20,2
HE 140 M	63,2	1,57	14,2	158	92,0	5,22	443	32,9
HE 160 M	76,2	1,78	14,9	216	127	6,79	537	51,0
HE 180 M	88,9	1,99	15,3	282	167	8,66	618	74,8
HE 200 M	103	2,20	15,9	363	216	10,7	703	106
HE 220 M	117	2,42	16,3	453	272	13,0	792	146
HE 240 M	157	2,67	19,8	676	402	16,0	1040	243
HE 260 M	172	2,88	20,1	806	483	18,8	1110	313
HE 280 M	189	3,09	20,2	948	571	22,0	1220	396
HE 300 M	238	3,34	23,7	1300	779	25,7	1520	592
HE 320 M	245	3,32	22,7	1420	849	29,4	1610	681
HE 340 M	248	3,30	21,3	1510	906	33,4	1690	764
HE 360 M	250	3,27	20,1	1590	961	37,7	1770	849
HE 400 M	256	3,22	18,0	1780	1080	47,6	1930	1040
HE 450 M	263	3,17	16,0	2020	1230	61,9	2140	1320
HE 500 M	270	3,12	14,4	2270	1380	78,5	2340	1620
HE 550 M	278	3,07	13,1	2530	1550	98,0	2560	1980
HE 600 M	285	3,02	12,1	2800	1710	120	2770	2370
HE 650 M	293	2,98	11,3	3090	1890	144	2990	2820
HE 700 M	301	2,93	10,6	3370	2060	170	3200	3290
HE 800 M	317	2,84	9,67	3990	2430	228	3640	4430
HE 900 M	333	2,76	8,96	4610	2800	292	4070	5700
HE 1000 M	349	2,69	8,47	5290	3200	362	4510	7220

Tablo 5.1 – Tablo 5.5'te sunulan değerlerin kullanılabilmesi için  $L_b$ 'nin ilgili  $L_r$  değerinden küçük olması gerektiği unutulmamalıdır. Örnek olarak, enkesiti IPE600, çelik kalitesi S235 olan bir eğilme elemanının tasarım eğilme momenti dayanımı,  $L_b < 7,65$  m olması koşuluyla, Tablo 5.1'deki ilk çizelgeden belirlenebilir.  $L_b$ 'nin  $L_r$ 'den büyük olduğu durumlarda, Tablo 5.6 – Tablo 5.10 kullanılabilir. Bu konu, ilerleyen paragraflarda daha detaylı olarak bahsedilecektir.

Tablo 5.1 – Tablo 5.5'te sunulan tasarım tablolarının 5. sütununda ise ilgili profillerin tasarım plastik moment dayanımları ( $\phi_b M_{px}$ ) listelenmiştir. Enkesitinde kompakt olmayan başlıklar içeren HEA profilleri için özel tablolar oluşturmak yerine, tablolarda listelenen  $\phi_b M_{px}$  değeri, Bölüm 4.4.3'te tanımlanan, "azaltılmış" tasarım plastik eğilme momentine ( $\phi_b M_{px}'$ ) eşit alınmıştır (Şekil 4.26). Benzer şekilde, bu tip elemanlarda,  $L_p$  sınır boyu yerine Denklem (4.2)'de tanımlanan  $L_p'$  sınır boyu (Şekil 4.26) kullanıldığı da belirtilmelidir. Bu nedenle, başlıkları kompakt olmayan enkesitli elemanların tasarım eğilme momenti dayanımlarının Tablo 5.1 – Tablo 5.5 kullanılarak belirlenmesi durumda yerel burkulma sınır durumuna bakılması gerekmemektedir. Örnek olarak, enkesiti HEA 300, çelik kalitesi S355 olan bir eğilme elemanı için,

$L_p=3,13$  m,  $L_p'=3,98$  m;  $\phi_b M_{px}=442$  kNm,  $\phi_b M_{px}'=423$  kNm'dir. Tablo 5.3'te verilen üçüncü çizelgede (S355 için),  $L_p$  değeri olarak 3,98 m,  $\phi_b M_{px}$  değeri olarak da 423 kNm kullanıldığı görülebilir.

Elemanın  $L_b$  boyunun  $L_p$ 'den küçük olduğu durumda, tasarım eğilme momenti dayanımı, tasarım plastik moment dayanımına eşittir ve ilgili değer ilgili tablonun 5. sütunundan doğrudan okunabilir. Diğer bir ifadeyle;

$$L_b \leq L_p \text{ ise, } \phi_b M_{nx} = \phi_b M_{px} \quad (5.1)$$

Örnek olarak, enkesiti IPE 500, çelik kalitesi S275 olan bir eğilme elemanının  $L_b$  boyunun 2,05 m'den küçük olduğu durumlarda, tasarım eğilme momenti dayanımı 543 kNm'dir (Tablo 5.1'de ikinci çizelge).

$L_b$ 'nin  $L_p$ 'den büyük (fakat  $L_r$ 'den küçük) olduğu durumda ise elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, Tablo 5.1 – Tablo 5.5'te sunulan tasarım tablolarının 5. ve 7. sütunlarındaki dayanım değerleri (sırasıyla,  $\phi_b M_{px}$  ve  $\phi_b BF$ ) ile Denklem (5.2) kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$\phi_b M_{nx} = C_b \left[ \phi_b M_{px} - \phi_b BF (L_b - L_p) \right] \leq \phi_b M_{px} \quad (5.2)$$

Denklem (5.2), Denklem (2.14) ile karşılaştırıldığında;

$$\phi_b BF = \frac{\phi_b M_{px} - \phi_b M_{rx}}{L_r - L_p} \quad (5.3)$$

olduğu görülebilir.

Örnek olarak, enkesiti IPE 500, çelik kalitesi S275 olan bir eğilme elemanının  $L_b$  boyunun 5 metreye eşit olduğu durumda ( $L_b=5$  m <  $L_r=6,32$  m), tasarım moment dayanımı hesabı için gerekli değerler Tablo 5.1'de sunulan ikinci çizelgeden  $\phi_b M_{px}=543$  kNm,  $\phi_b BF=48,8$  kN olarak okunabilir. Bu durumda, Denklem (5.2) kullanılarak ve  $C_b=1$  alınarak, tasarım eğilme momenti dayanımı şu şekilde hesaplanabilir.

$$\phi_b M_{nx} = 1,0 \left[ 543 - 48,8(5,0 - 2,05) \right] = 399 \text{ kNm} \quad (5.4)$$

Bu şekilde elde edilen değer, Tablo 5.6'da sunulan dördüncü tasarım tablosundan,  $L_b$  boyunun tamsayı olması nedeniyle, IPE500, S275 ve  $L_b=5$  m için doğrudan  $\phi_b M_{rx}=399$  kNm olarak okunabilmektedir.

Tablo 5.1 – Tablo 5.5'teki çizelgelerin 6. satırında tasarım ilk akma momentleri ( $\phi_b M_{rx}$ ) listelenmektedir.  $\phi_b M_{rx}$ 'in  $L_b=L_r$  değerindeki tasarım eğilme momenti dayanımı olduğu hatırlanırsa, Denklem 5.2 kullanılarak hesaplanan tasarım dayanımının bu değer altına düşmemesi gerektiği, bunun da hesaplarda bir kontrol değeri olarak kullanılabilmesi fark edilebilir. Örnek olarak, enkesiti IPE 500, çelik kalitesi S275 olan bir eğilme elemanının tasarım moment dayanımı  $L_b < L_r=6,32$  m olduğu müddetçe,  $\phi_b M_{rx}=334$  kNm değerinden daha küçük olamaz. Ayrıca, bu değer  $L_b=L_r=6,32$  m olduğu durumdaki tasarım dayanımı değeridir.

Tablo 5.1 – Tablo 5.5'teki çizelgelerin 8. sütununda ise gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli hadde elemanlarının tasarım kesme kuvveti dayanımları ( $\phi_v V_{ny}$ ) listelenmiştir.  $\phi_v V_{ny}$  değerleri elemanın boyundan bağımsız olduğu için, ilgili tablolarda listelenen kesme kuvveti dayanım değerleri bütün  $L_b$  değerleri için geçerlidir. Örnek olarak, enkesiti HEB500, çelik kalitesi S235 olan bir eğilme elemanının gövde düzleminde etkiyen kesme durumunda tasarım kesme kuvveti dayanımı (Tablo 5.4, birinci çizelge) 1020 kN'dur.

Son olarak, Tablo 5.1 – Tablo 5.5'te sunulan tasarım tablolarının son sütununda ilgili enkesitin kuvvetli eksen etrafında atalet momenti ( $I_x$ ) verilmiştir. Her ne kadar bu tezin kapsamında, kullanılabilirlik sınır durumları dikkate alınmadıysa da, tasarımcıya elemanın sehim kontrolünde kolaylık sağlaması amacıyla enkesitin ilgili atalet momenti tablolarda sunulmuştur.

$L_b$ 'nin  $L_r$ 'den büyük olduğu durumlarda, kuvvetli ekseninde tasarım eğilme momenti dayanımı ( $\phi_b M_{rx}$ ), Tablo 5.6 – Tablo 5.10'dan belirlenebilir. Bu tablolarda, ilgili enkesit tipi için önceden belirlenen en büyük eleman boyuna ( $L_{max}$ ) kadar 1'er metre aralıkla tasarım momenti dayanımları listelenmektedir.  $L_b=0$  değeri, yanal burkulma tehlikesi olmayan veya yanal harekete ve/veya burulmaya karşı sürekli desteklenmiş bir elemanı temsil etmektedir. Aslında, Tablo 5.6 – Tablo 5.10, ilgili enkesit tipi için önceden belirlenen en büyük eleman uzunluğunu (örnek olarak, IPE80 profili için 8 metre) aşmamak koşuluyla,  $L_b$ 'nin bütün tam sayı değerleri için (örnek olarak,  $L_b = 0, 1, 2, \dots, vb$ ) kullanılabilir. Ancak, elemanın boyunun tam sayıya eşit olmaması durumunda,  $L_b < L_r$  ise, Tablo 5.1 – Tablo 5.5'in kullanımı daha ekonomik tasarımlara

imkan sağlayacaktır. Aksi durumda, (yani,  $L_b > L_r$  durumunda), dayanım değerlerinin, güvenli tarafta kalacak şekilde, Tablo 5.6 – Tablo 5.10'da, bir üst tam sayıya yuvarlanarak kullanılması önerilir.

Tablo 5.6. Kuvvetli eksen etrafında eğilen IPE enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları

$L_b$ (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	IPE80			IPE100			IPE120			IPE140		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	4,91	5,74	7,41	8,33	9,75	12,6	12,8	15,0	19,4	18,7	21,9	28,2
1	4,54	5,19	6,37	7,86	9,01	11,1	12,3	14,2	17,6	18,3	21,0	26,3
2	3,74	4,08	4,51	6,55	7,21	8,12	10,4	11,5	13,2	15,5	17,3	20,1
3	2,93			5,24	5,30	5,30	8,41	8,68	8,68	12,8	13,5	13,6
4	2,17			3,91			6,33			9,77		
5	1,73			3,10			4,99			7,65		
6	1,44			2,57			4,13			6,30		
7	1,23			2,20			3,52			5,36		
8	1,08			1,92			3,07			4,67		

$L_b$ (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	IPE160			IPE180			IPE200			IPE220		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	26,2	30,7	39,6	35,1	41,1	53,0	46,7	54,7	70,6	60,3	70,5	91,1
1	26,0	30,1	37,8	35,1	40,9	51,6	46,7	54,7	69,8	60,3	70,5	91,1
2	22,4	25,1	29,7	30,8	34,7	41,5	41,9	47,5	57,3	55,3	62,9	76,7
3	18,8	20,2	21,0	26,2	28,5	30,9	36,2	39,7	44,8	48,4	53,7	61,8
4	14,9			21,5			30,5	31,5	31,5	41,6	44,4	44,7
5	11,6			16,6			24,1			33,9		
6	9,51			13,5			19,6			27,3		
7	8,07			11,4			16,5			23,0		
8	7,02			9,93			14,3			19,8		
9	6,21			8,77			12,6			17,4		
10	5,57			7,86			11,3			15,6		

$L_b$ (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	IPE240			IPE270			IPE300			IPE330		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	77,6	90,8	117	102	120	155	133	155	201	170	199	257
1	77,6	90,8	117	102	120	155	133	155	201	170	199	257
2	72,6	82,9	102	97,8	112	138	129	149	185	167	193	240
3	64,5	71,9	84,1	87,5	98,2	117	117	132	158	152	172	208
4	56,4	60,9	64,2	77,3	84,5	93,7	104	115	132	137	152	176
5	48,2	48,3	48,3	67,0	69,1	69,1	91,6	98,2	99,1	122	132	137
6	38,8			54,8			77,4			106	107	107
7	32,5			45,4			63,6			87,4		
8	28,0			38,9			54,0			74,0		
9	24,6			34,0			47,0			64,2		
10	22,0			30,2			41,6			56,8		
11	19,9			27,2			37,4			50,9		
12	18,1			24,8			33,9			46,2		



Tablo 5.6.(devam) Kuvvetli eksen etrafında eğilen IPE enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	IPE360			IPE400			IPE450			IPE500		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	216	252	326	276	323	418	360	421	544	464	543	701
1	216	252	326	276	323	418	360	421	544	464	543	701
2	215	247	309	276	320	401	360	420	527	464	543	686
3	196	223	271	254	289	353	334	381	466	435	496	610
4	178	198	232	232	259	305	305	342	405	398	448	534
5	159	174	189	209	229	256	275	303	344	361	399	458
6	141	146	146	186	197	197	246	264	266	324	350	361
7		119			159			213			288	
8		100			134			178			239	
9		86,5			115			153			205	
10		76,3			102			134			179	
11		68,3			90,7			119			159	
12		61,8			82,0			108			143	
13		56,5			74,9			98,1			130	
14		52,1			68,9			90,1			119	
15		48,3			63,9			83,4			110	

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)					
	IPE550			IPE600		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	589	690	890	743	869	1122
1	589	690	890	743	869	1122
2	589	690	877	743	869	1116
3	557	637	784	709	812	1003
4	512	577	691	655	740	891
5	466	517	598	600	667	778
6	421	457	484	545	595	652
7	376	385	385	490	517	517
8		319			426	
9		272			362	
10		237			315	
11		210			278	
12		189			250	
13		171			226	
14		157			207	
15		145			191	
16		135			177	
17		126			166	
18		118			155	

Tablo 5.7 Kuvvetli eksen etrafında eğilen IPN enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	IPN 80			IPN 100			IPN 120			IPN 140		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	4,82	5,64	7,28	8,42	9,85	12,7	13,5	15,7	20,3	20,2	23,6	30,5
1	4,40	5,02	6,14	7,84	8,97	11,1	12,7	14,6	18,2	19,4	22,4	27,9
2	3,61	3,93	4,28	6,54	7,19	8,04	10,8	12,0	13,7	16,7	18,6	21,6
3	2,80			5,25	5,31	5,31	8,90	9,28	9,28	14,0	14,9	15,2
4	2,09			3,95			6,86			11,2		
5	1,67			3,14			5,45			8,84		
6	1,39			2,61			4,52			7,33		
7	1,19			2,23			3,87			6,26		
8	1,04			1,95			3,38			5,46		

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	IPN 160			IPN 180			IPN 200			IPN 220		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	28,8	33,7	43,5	39,6	46,3	59,7	52,9	61,9	79,9	68,5	80,2	104
1	28,0	32,4	40,6	39,0	45,1	56,7	52,6	61,0	77,0	68,5	79,8	101
2	24,5	27,4	32,3	34,4	38,8	46,2	46,8	53,0	63,7	61,8	70,1	85,0
3	20,9	22,5	23,7	29,8	32,4	35,5	41,0	45,0	50,4	54,7	60,5	68,9
4	17,3			25,2	25,7	25,7	35,2	37,0	37,0	47,7	50,8	51,9
5	13,7			20,3			29,0			40,5		
6	11,3			16,7			23,9			33,3		
7	9,65			14,3			20,4			28,3		
8	8,42			12,4			17,7			24,6		
9	7,47			11,0			15,7			21,8		
10	6,71			9,90			14,1			19,6		

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	IPN 240			IPN 260			IPN 280			IPN 300		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	87,1	102	132	109	127	164	134	156	202	161	189	243
1	87,1	102	130	109	127	164	134	156	202	161	189	243
2	79,8	90,9	111	101	115	141	125	143	176	152	174	215
3	71,4	79,3	91,6	90,8	101	118	113	127	150	139	156	185
4	62,9	67,8	71,1	80,9	87,9	95,1	102	111	123	125	138	154
5	54,5	55,3	55,3	71,0	73,6	73,6	90,2	95,3	95,7	112	119	122
6	45,3			60,2			78,2			98,5	99,1	99,1
7	38,4			51,1			66,1			83,7		
8	33,4			44,3			57,4			72,6		
9	29,6			39,2			50,7			64,1		
10	26,5			35,1			45,5			57,5		
11	24,0			31,9			41,2			52,1		
12	22,0			29,1			37,7			47,6		

Tablo 5.7.(devam) Kuvvetli eksen etrafında eğilen IPN enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	IPN 320			IPN 340			IPN 360			IPN 380		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	193	226	292	228	267	345	270	316	408	313	367	473
1	193	226	292	228	267	345	270	316	408	313	367	473
2	184	211	261	219	251	312	260	299	373	304	350	437
3	168	190	226	201	227	272	240	272	328	282	320	387
4	153	169	191	184	203	233	221	245	284	260	290	337
5	138	148	154	166	179	190	201	219	238	238	260	288
6	122	125	125	149	154	154	182	192	193	216	230	234
7		105			130			162		194	197	197
8		91,4			113			140			170	
9		80,6			99,4			124			150	
10		72,2			88,9			111			134	
11		65,4			80,5			100			121	
12		59,8			73,6			91,6			111	
13		55,1			67,7			84,3			102	
14		51,0			62,8			78,1			94,6	
15		47,6			58,5			72,8			88,1	

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	IPN 400			IPN 450			IPN 500			IPN 550		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	363	424	548	508	594	767	685	802	1035	897	1049	1355
1	363	424	548	508	594	767	685	802	1035	897	1049	1355
2	353	407	509	500	578	726	682	789	996	897	1043	1320
3	329	374	454	469	535	655	643	736	908	852	978	1211
4	304	340	398	438	492	584	604	683	819	804	912	1102
5	280	307	343	406	449	513	565	630	731	756	846	994
6	255	273	282	375	407	438	527	577	643	708	780	885
7	231	237	237	344	364	367	488	523	545	660	715	768
8		205		313	316	316	449	468	468	612	649	657
9		180			278		410	411	411	564	575	575
10		161			248			366			511	
11		146			224			331			461	
12		133			204			301			420	
13		122			188			277			385	
14		113			174			256			356	
15		106			162			239			331	
16		98,8			152			223			310	
17		92,9			142			210			291	
18		87,6			134			198			274	

Tablo 5.7.(devam) Kuvvetli eksen etrafında eğilen IPN enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları

L <sub>b</sub> (m)	φ <sub>b</sub> M <sub>n</sub> (kNm)		
	IPN 600		
	S235	S275	S355
0	1153	1349	1742
1	1153	1349	1742
2	1153	1349	1716
3	1108	1274	1586
4	1051	1196	1456
5	994	1118	1327
6	937	1040	1197
7	880	961	1068
8	822	883	921
9	765	805	805
10	708	715	715
11	644		
12	586		
13	538		
14	497		
15	462		
16	432		
17	405		
18	382		
19	361		
20	343		

Tablo 5.8. Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEA enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları

L <sub>b</sub> (m)	φ <sub>b</sub> M <sub>n</sub> (kNm)											
	HE 100 A			HE 120 A			HE 140 A			HE 160 A		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	17,6	20,5	26,5	25,3	29,6	38,2	36,7	42,9	55,4	51,8	60,7	78,3
1	17,6	20,5	26,5	25,3	29,6	38,2	36,7	42,9	55,4	51,8	60,7	78,3
2	16,9	19,5	24,5	24,7	28,5	35,8	36,3	42,1	53,0	51,8	60,3	76,3
3	16,0	18,3	22,3	23,3	26,6	32,6	34,4	39,4	48,5	49,4	56,8	70,5
4	15,1	17,0	20,2	21,9	24,7	29,3	32,4	36,7	44,0	46,9	53,3	64,6
5	14,2	15,7	18,0	20,5	22,8	26,1	30,5	34,0	39,5	44,4	49,8	58,7
6	13,2	14,4	15,7	19,1	20,8	22,6	28,5	31,3	34,9	41,8	46,3	52,9
7	12,3	13,2	13,4	17,7	18,9	19,1	26,6	28,6	29,5	39,3	42,8	46,2
8	11,4	11,7	11,7	16,4	16,6	16,6	24,6	25,6	25,6	36,8	39,3	39,9

L <sub>b</sub> (m)	φ <sub>b</sub> M <sub>n</sub> (kNm)											
	HE 180 A			HE 200 A			HE 220 A			HE 240 A		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	68,7	80,4	102,6	90,8	106	133,9	120	141	177	157	184	232
1	68,7	80,4	102,6	90,8	106	133,9	120	141	177	157	184	232
2	68,7	80,4	102,6	90,8	106,3	133,9	120	141	177	157	184	232
3	66,5	76,5	95,3	89,0	102,8	128,7	119	138	174	157	183	231
4	63,1	71,9	87,7	85,0	97,2	119,4	114,3	131	162	152	175	217
5	59,8	67,4	80,1	80,9	91,6	110,2	109,3	124,2	150,7	146	167	204
6	56,5	62,8	72,5	76,9	86,0	100,9	104,2	117,3	139,2	140	158	190
7	53,2	58,3	64,6	72,8	80,5	91,6	99,2	110,3	127,7	134	150	176
8	49,9	53,7	55,3	68,8	74,9	80,6	94,1	103,4	116,2	128	142	163
9	46,6	48,4	48,4	64,7	69,3	70,3	89,1	96,5	101,3	122	133	148
10	43,1			60,7	62,5	62,5	84,1	89,6	89,6	116	125	130

Tablo 5.8. Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEA enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 260 A			HE 280 A			HE 300 A			HE 320 A		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	195	227	284	235	272	340	293	339	423	344	403	512
1	195	227	284	235	272	340	293	339	423	344	403	512
2	195	227	305	235	272	340	293	339	423	344	403	512
3	195	227	284	235	272	340	293	339	423	344	403	512
4	190	219	284	232	267	335	291	336	423	343	396	498
5	183	209	284	223	256	316	281	323	401	331	381	473
6	176	199	284	215	245	297	272	310	380	320	365	447
7	168	189	225	207	233	278	262	297	358	309	350	422
8	161	180	209	198	222	260	253	284	336	298	335	397
9	154	170	193	190	210	241	243	271	315	286	319	371
10	147	160	172	182	199	220	233	258	293	275	304	346
11	140	150	154	173	187	195	224	244	266	264	288	315
12	133	139	139	165	176	176	214	231	240	253	273	284

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 340 A			HE 360 A			HE 400 A			HE 450 A		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	391	458	590	442	517	667	542	634	819	680	796	1028
1	391	458	590	442	517	667	542	634	819	680	796	1028
2	391	458	590	442	517	667	542	634	819	680	796	1028
3	391	458	590	442	517	667	542	634	819	680	796	1028
4	389	450	565	439	507	637	537	621	779	674	778	975
5	376	432	536	424	487	604	518	595	736	649	744	919
6	363	414	507	409	467	571	499	569	694	624	710	864
7	350	396	478	394	446	537	480	543	652	599	675	808
8	337	379	448	380	426	504	461	517	609	574	641	753
9	324	361	419	365	406	471	442	491	567	549	607	697
10	311	343	390	350	386	437	423	465	524	524	573	639
11	298	326	354	335	365	395	404	439	468	499	539	565
12	285	308	318	320	345	356	385	413	420	474	505	507
13	272	290	290	305	323	323	366	382	382	448	460	460
14	259	266	266	291	296	296	347	350	350		421	
15		245			274			323			388	

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 500 A			HE 550 A			HE 600 A			HE 650 A		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	835	977	1262	978	1144	1477	1132	1324	1709	1298	1519	1960
1	835	977	1262	978	1144	1477	1132	1324	1709	1298	1519	1960
2	835	977	1262	978	1144	1477	1132	1324	1709	1298	1519	1960
3	835	977	1262	978	1144	1476	1132	1324	1704	1298	1519	1949
4	826	953	1193	964	1111	1389	1113	1281	1599	1273	1465	1825
5	794	910	1123	925	1058	1303	1064	1216	1495	1215	1386	1701
6	762	866	1053	885	1004	1216	1016	1151	1390	1156	1308	1577
7	730	823	983	845	950	1130	967	1085	1286	1098	1230	1453
8	699	780	913	805	896	1043	919	1020	1182	1040	1152	1328
9	667	737	842	765	843	957	870	955	1077	981	1074	1191
10	635	693	761	726	789	845	822	890	933	923	995	1027
11	603	650	672	686	735	744	773	821	821	865	902	902
12	571	602	602	646	666	666	724	733	733		803	
13	539	546	546		602			662			725	
14		499			550			604			660	
15		460			506			555			606	
16		427			469			514			561	
17		398			437			479			522	
18		373			410			448			488	

Tablo 5.8.(devam) Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEA enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 700 A			HE 800 A			HE 900 A			HE 1000 A		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	1487	1740	2247	1840	2153	2779	2286	2675	3454	2711	3173	4096
1	1487	1740	2247	1840	2153	2779	2286	2675	3454	2711	3173	4096
2	1487	1740	2247	1840	2153	2779	2286	2675	3454	2711	3173	4096
3	1487	1740	2226	1840	2153	2736	2286	2675	3382	2711	3173	3988
4	1453	1670	2079	1785	2048	2542	2205	2528	3131	2598	2974	3676
5	1384	1578	1932	1691	1924	2348	2083	2366	2880	2444	2771	3364
6	1314	1485	1785	1598	1800	2154	1960	2204	2629	2290	2569	3052
7	1245	1392	1638	1504	1676	1959	1838	2043	2377	2136	2367	2741
8	1175	1299	1491	1411	1552	1765	1715	1881	2126	1982	2165	2381
9	1106	1206	1316	1317	1428	1502	1593	1719	1772	1828	1963	1976
10	1036	1113	1133	1223	1287	1287	1471	1515	1515	1674	1683	1683
11	967	993	993	1125			1320			1462		
12	884			998			1169			1291		
13	797			897			1049			1155		
14	725			814			951			1044		
15	666			746			869			953		
16	616			688			801			877		
17	572			639			743			812		
18	535			596			693			756		
19	503			559			649			708		
20	474			527			611			665		

Tablo 5.9. Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEB enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 100 B			HE 120 B			HE 140 B			HE 160 B		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	22,0	25,8	33,3	34,9	40,9	52,8	51,9	60,7	78,4	74,9	87,6	113
1	22,0	25,8	33,3	34,9	40,9	52,8	51,9	60,7	78,4	74,9	87,6	113
2	21,4	24,7	31,2	34,3	39,8	50,3	51,6	59,9	76,0	74,9	87,3	111
3	20,4	23,4	28,9	32,9	37,8	46,9	49,5	57,1	71,2	72,4	83,6	105
4	19,5	22,1	26,7	31,4	35,8	43,5	47,5	54,3	66,4	69,7	79,9	98,6
5	18,5	20,8	24,4	30,0	33,8	40,1	45,5	51,4	61,7	67,1	76,2	92,3
6	17,5	19,4	22,2	28,5	31,8	36,8	43,4	48,6	56,9	64,4	72,5	86,1
7	16,6	18,1	19,9	27,1	29,8	33,4	41,4	45,8	52,1	61,7	68,8	79,8
8	15,6	16,8	17,4	25,6	27,8	29,4	39,4	43,0	47,1	59,0	65,1	73,5

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 180 B			HE 200 B			HE 220 B			HE 240 B		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	102	119	154	136	159	205	175	205	264	223	261	336
1	102	119	154	136	159	205	175	205	264	223	261	336
2	102	119	153	136	159	205	175	205	264	223	261	336
3	99,6	115	145	134	155	196	174	202	256	223	260	330
4	96,1	110	137	130	150	186	169	195	244	217	251	315
5	92,6	106	129	126	144	176	164	188	231	211	242	300
6	89,2	101	121	121	138	166	158	180	219	205	233	285
7	85,7	96	113	117	132	156	153	173	207	198	225	271
8	82,2	91,2	104	113	126	146	148	166	194	192	216	256
9	78,8	86,4	96,3	108	120	136	142	158	182	186	207	241
10	75,3	81,6	86,4	104	114	125	137	151	169	179	198	226

Tablo 5.9.(devam) Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEB enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 260 B			HE 280 B			HE 300 B			HE 320 B		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	271	318	410	324	380	490	395	463	597	455	532	687
1	271	318	410	324	380	490	395	463	597	455	532	687
2	271	318	410	324	380	490	395	463	597	455	532	687
3	271	318	406	324	380	489	395	463	597	455	532	687
4	267	308	388	321	372	469	394	457	578	453	525	664
5	259	298	371	312	360	448	384	443	554	441	509	637
6	252	288	353	304	348	428	374	429	531	430	493	610
7	244	277	336	295	335	407	364	415	507	418	477	582
8	237	267	318	286	323	387	354	401	484	406	461	555
9	229	257	301	277	311	366	344	387	460	395	445	528
10	222	246	283	268	299	346	333	373	437	383	428	501
11	214	236	266	260	287	326	323	359	413	371	412	474
12	207	226	245	251	274	304	313	345	390	360	396	447

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 340 B			HE 360 B			HE 400 B			HE 450 B		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	509	596	769	567	664	857	684	800	1033	842	986	1272
1	509	596	769	567	664	857	684	800	1033	842	986	1272
2	509	596	769	567	664	857	684	800	1033	842	986	1272
3	509	596	769	567	664	857	684	800	1033	842	986	1272
4	507	588	743	565	655	826	680	787	992	836	967	1217
5	494	570	712	550	633	791	660	760	947	810	932	1158
6	481	551	681	534	612	756	640	733	902	785	896	1100
7	467	532	649	519	591	720	621	706	857	759	861	1041
8	454	514	618	504	570	685	601	679	812	733	826	982
9	440	495	587	488	549	649	582	652	767	707	790	923
10	427	477	556	473	528	614	562	625	721	681	755	865
11	413	458	525	458	507	579	542	598	676	656	719	806
12	400	440	494	442	486	543	523	571	626	630	684	731
13	386	421	456	427	464	498	503	544	571	604	649	666
14	373	403	419	412	443	458	484	517	525	578	612	612
15	360	384	389	396	422	425	464	486	486	553	566	566

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 500 B			HE 550 B			HE 600 B			HE 650 B		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	1018	1192	1538	1182	1384	1786	1359	1590	2053	1548	1812	2339
1	1018	1192	1538	1182	1384	1786	1359	1590	2053	1548	1812	2339
2	1018	1192	1538	1182	1384	1786	1359	1590	2053	1548	1812	2339
3	1018	1192	1538	1182	1384	1786	1359	1590	2048	1548	1812	2328
4	1010	1167	1467	1169	1350	1694	1340	1546	1936	1523	1755	2194
5	977	1122	1392	1128	1294	1601	1290	1477	1824	1462	1672	2060
6	944	1077	1318	1087	1238	1509	1239	1409	1712	1401	1590	1926
7	911	1032	1243	1046	1181	1417	1189	1340	1600	1340	1507	1792
8	878	987	1169	1004	1125	1324	1138	1271	1487	1279	1424	1658
9	845	942	1094	963	1069	1232	1087	1202	1375	1218	1341	1524
10	812	897	1020	922	1013	1140	1037	1133	1256	1156	1259	1364
11	779	851	939	881	956	1023	986	1064	1112	1095	1176	1205
12	746	806	846	839	900	920	935	996	998	1034	1080	1080
13	713	761	770	798	836	836	885	906	906	973	979	979
14	681	706	706	757	767	767		830			895	
15	648	653	653		708			765			825	
16		608			658			711			766	
17		568			615			663			714	
18		533			577			622			670	

Tablo 5.9.(devam) Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEB enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 700 B			HE 800 B			HE 900 B			HE 1000 B		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	1761	2061	2660	2164	2532	3268	2661	3114	4019	3143	3678	4748
1	1761	2061	2660	2164	2532	3268	2661	3114	4019	3143	3678	4748
2	1761	2061	2660	2164	2532	3268	2661	3114	4019	3143	3678	4748
3	1761	2061	2640	2164	2532	3224	2661	3114	3945	3143	3678	4633
4	1727	1988	2481	2107	2421	3012	2576	2957	3671	3023	3465	4290
5	1654	1890	2323	2008	2288	2801	2446	2783	3396	2857	3245	3948
6	1581	1791	2164	1908	2155	2589	2315	2609	3122	2692	3026	3605
7	1508	1692	2005	1809	2022	2377	2185	2435	2848	2526	2807	3262
8	1435	1594	1847	1709	1889	2165	2055	2262	2574	2361	2587	2919
9	1362	1495	1688	1610	1755	1924	1924	2088	2229	2195	2368	2458
10	1289	1397	1485	1511	1622	1661	1794	1914	1918	2029	2107	2107
11	1216	1298	1311	1411	1460	1460	1664	1682	1682	1842		
12	1143	1173	1173	1303			1498			1635		
13	1062			1177			1350			1470		
14	971			1073			1229			1335		
15	894			986			1128			1223		
16	829			913			1043			1129		
17	773			850			970			1048		
18	724			795			907			979		
19	682			747			851			918		
20	644			705			803			865		

Tablo 5.10. Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEM enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 100 M			HE 120 M			HE 140 M			HE 160 M		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	49,9	58,4	75,3	74,2	86,8	112	104	122	158	143	167	216
1	49,9	58,4	75,3	74,2	86,8	112	104	122	158	143	167	216
2	49,2	57,3	73,1	73,6	85,7	110	104	122	156	143	167	214
3	48,1	55,7	70,5	72,0	83,5	106	102	118	150	140	163	207
4	46,9	54,1	67,8	70,3	81,2	102	100	115	145	137	159	200
5	45,8	52,6	65,2	68,7	79,0	98,1	97,6	112	140	134	155	194
6	44,7	51,0	62,6	67,1	76,7	94,3	95,3	109	135	132	151	187
7	43,5	49,5	59,9	65,4	74,4	90,5	93,1	106	129	129	147	180
8	42,4	47,9	57,3	63,8	72,2	86,7	90,9	103	124	126	143	173

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 180 M			HE 200 M			HE 220 M			HE 240 M		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	187	219	282	240	281	363	300	351	453	448	524	676
1	187	219	282	240	281	363	300	351	453	448	524	676
2	187	219	282	240	281	363	300	351	453	448	524	676
3	185	215	274	239	278	354	300	349	446	448	524	671
4	181	210	265	234	271	343	294	342	433	443	515	655
5	177	205	256	230	265	333	289	334	420	436	505	639
6	174	200	248	225	259	322	283	326	407	429	496	623
7	170	194	239	220	253	311	278	319	394	422	487	607
8	166	189	230	216	246	301	272	311	381	416	477	591
9	163	184	222	211	240	290	267	303	368	409	468	575
10	159	179	213	207	234	279	261	296	355	402	458	559



Tablo 5.10.(devam) Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEM enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 260 M			HE 280 M			HE 300 M			HE 320 M		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	534	625	806	627	734	948	862	1009	1303	938	1098	1417
1	534	625	806	627	734	948	862	1009	1303	938	1098	1417
2	534	625	806	627	734	948	862	1009	1303	938	1098	1417
3	534	625	804	627	734	948	862	1009	1303	938	1098	1417
4	530	617	785	625	728	928	862	1006	1286	938	1094	1397
5	522	606	767	616	715	906	853	991	1260	926	1076	1368
6	514	594	748	607	702	884	842	976	1235	914	1059	1338
7	506	583	729	597	689	862	831	961	1209	901	1042	1309
8	498	572	710	588	676	840	820	945	1183	889	1024	1280
9	490	561	691	579	663	818	809	930	1157	876	1007	1250
10	482	550	672	569	650	796	798	915	1132	864	990	1221
11	474	539	654	560	637	774	787	900	1106	851	972	1191
12	466	528	635	550	624	752	776	885	1080	839	955	1162

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 340 M			HE 360 M			HE 400 M			HE 450 M		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	998	1168	1507	1055	1235	1594	1178	1379	1780	1339	1567	2023
1	998	1168	1507	1055	1235	1594	1178	1379	1780	1339	1567	2023
2	998	1168	1507	1055	1235	1594	1178	1379	1780	1339	1567	2023
3	998	1168	1507	1055	1235	1594	1178	1379	1780	1339	1567	2023
4	998	1163	1484	1055	1228	1566	1177	1369	1743	1336	1552	1971
5	984	1143	1451	1039	1206	1529	1157	1341	1695	1310	1516	1909
6	970	1123	1417	1023	1184	1491	1137	1313	1647	1283	1479	1848
7	956	1104	1384	1007	1162	1453	1116	1285	1600	1257	1443	1786
8	942	1084	1351	991	1139	1416	1096	1257	1552	1231	1406	1724
9	927	1064	1317	975	1117	1378	1076	1229	1504	1204	1369	1662
10	913	1045	1284	959	1095	1340	1055	1201	1457	1178	1333	1600
11	899	1025	1250	943	1073	1303	1035	1172	1409	1151	1296	1538
12	885	1005	1217	927	1051	1265	1015	1144	1362	1125	1260	1476
13	871	986	1184	911	1028	1227	995	1116	1314	1098	1223	1414
14	856	966	1150	895	1006	1189	974	1088	1266	1072	1187	1352
15	842	946	1117	879	984	1152	954	1060	1219	1046	1150	1290

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 500 M			HE 550 M			HE 600 M			HE 650 M		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	1500	1756	2267	1678	1963	2535	1855	2171	2803	2042	2390	3085
1	1500	1756	2267	1678	1963	2535	1855	2171	2803	2042	2390	3085
2	1500	1756	2267	1678	1963	2535	1855	2171	2803	2042	2390	3085
3	1500	1756	2267	1678	1963	2535	1855	2171	2803	2042	2390	3082
4	1495	1734	2197	1668	1934	2444	1840	2130	2685	2021	2337	2939
5	1461	1688	2119	1626	1875	2346	1788	2058	2565	1958	2250	2795
6	1427	1641	2040	1584	1817	2248	1736	1987	2445	1895	2163	2651
7	1394	1595	1962	1542	1759	2150	1684	1915	2325	1832	2077	2507
8	1360	1548	1883	1499	1700	2052	1632	1843	2205	1769	1990	2364
9	1327	1502	1805	1457	1642	1954	1580	1771	2086	1705	1904	2220
10	1293	1456	1726	1415	1584	1856	1527	1700	1966	1642	1817	2076
11	1259	1409	1648	1373	1526	1758	1475	1628	1846	1579	1730	1932
12	1226	1363	1570	1330	1467	1660	1423	1556	1726	1516	1644	1760
13	1192	1316	1491	1288	1409	1562	1371	1484	1579	1453	1557	1603
14	1158	1270	1413	1246	1351	1442	1319	1413	1452	1390	1470	1473
15	1125	1223	1321	1204	1292	1337	1267	1341	1345	1327	1363	1363
16	1091	1177	1232	1161	1234	1247	1215	1253	1253	1264	1268	1268
17	1058	1130	1155	1119	1168	1168	1163	1173	1173		1187	
18	1024	1084	1088	1077	1099	1099		1103			1115	

Tablo 5.10.(Devam) Kuvvetli eksen etrafında eğilen HEM enkesitli elemanların tasarım eğilme moment dayanımları

L <sub>b</sub> (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 700 M			HE 800 M			HE 900 M			HE 1000 M		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	2229	2609	3368	2642	3091	3991	3054	3574	4614	3505	4101	5294
1	2229	2609	3368	2642	3091	3991	3054	3574	4614	3505	4101	5294
2	2229	2609	3368	2642	3091	3991	3054	3574	4614	3505	4101	5294
3	2229	2609	3355	2642	3091	3953	3054	3574	4543	3505	4101	5184
4	2199	2539	3186	2588	2982	3725	2971	3416	4251	3386	3886	4822
5	2124	2436	3016	2485	2841	3497	2836	3233	3960	3214	3657	4460
6	2048	2333	2846	2381	2700	3268	2700	3051	3668	3043	3427	4098
7	1973	2230	2676	2277	2560	3040	2564	2869	3377	2871	3198	3736
8	1897	2127	2507	2173	2419	2812	2429	2686	3085	2699	2969	3374
9	1822	2024	2337	2070	2278	2583	2293	2504	2785	2527	2740	2929
10	1747	1921	2167	1966	2138	2324	2158	2322	2410	2355	2510	2522
11	1671	1818	1975	1862	1997	2056	2022	2124	2124	2183	2213	2213
12	1596	1715	1778	1759	1845	1845	1887	1899	1899	1971		
13	1521	1612	1618	1655	1673	1673	1717			1777		
14	1445	1484	1484	1532			1568			1618		
15	1370	1372	1372	1413			1443			1486		
16	1276			1312			1337			1374		
17	1192			1224			1246			1278		
18	1120			1148			1167			1195		
19	1056			1081			1097			1123		
20	998			1022			1036			1058		

Tablo 5.6 – Tablo 5.10’da, sunum kolaylığı açısından, mümkün olduğu müddetçe, belirli bir enkesit grubunda numaraları art arda gelen dört profilin tasarım değerleri aynı çizelgede listelenmiştir. Bu tabloların önceki tablolardan (Tablo 5.1 – Tablo 5.5) diğer farkı da incelenen üç çelik kalitesi için ayrı ayrı hesaplanan dayanım değerlerinin aynı çizelgede sunulmuş olmasıdır.  $L_b > L_r$  durumunda, elemanın davranışını belirleyen sınır durum, elastik yanal burulmalı burkulma olacağı için, elemanın eğilme momenti dayanımı çelik kalitesinden bağımsızdır. Bu nedenle,  $L_b$ ’nin  $L_r$ ’den büyük herhangi bir değeri için, ilgili enkesitin incelenen üç farklı çelik kalitesi için sunulan dayanımlarının listelendiği üç sütunda, tek bir dayanım değeri verilmektedir. Bu durum, tasarımcıya ilave hesap yapmadan veya önceki tablolara (Tablo 5.1 – Tablo 5.5) bakmadan yaklaşık olarak enkesitin S235 çelik kalitesi için,  $L_r$  değerini belirleme imkanı da sunmaktadır. Aslında, benzer bir mantıkla, enkesitin  $L_p$  değeri de yaklaşık olarak bu tablolardan belirlenebilir. Belirli bir enkesit ve çelik kalitesi için,  $L_p$  boyu yaklaşık olarak, elemanın tasarım eğilme momenti dayanımının  $L_b=0$ ’da verilen dayanıma eşit olduğu en büyük  $L_b$  boyuna eşittir. Örnek olarak, enkesiti HEA 500 ve çelik kalitesi S235 olan bir eğilme elemanının  $L_p$  boyu 3,0 metre ile 4,0 metre arasındadır; zira, tasarım dayanımı  $L_b=3$  m’ye kadar sabit ve tasarım plastik moment dayanımına (1260 kNm) eşittir. Benzer şekilde, ilgili enkesitin  $L_b > 13$  m’den büyük değerleri için tasarım dayanımı çelik kalitesinden bağımsızdır; dolayısıyla, enkesitin

$L_r$  boyu 13 metre ile 14 metre arasındadır. Tablo 5.3'ten, S235 çelik kalitesi için, HEA500'ün  $L_p$  ve  $L_r$  değerlerinin sırasıyla, 3,72 m ve 13,4 m olduğu görülebilir.

Tablo 5.1 – Tablo 5.5'te sunulan tasarım tablolarında olduğu gibi, Tablo 5.6 – Tablo 5.10'da sunulan tasarım tablolarında da başlıkları kompakt olmayan enkesitli eğilme elemanlarının tasarım moment dayanımı hesaplanırken  $L_p$ ' ve  $M_p$ ' değerlerinin kullanıldığı, bu nedenle, bu tip elemanların tasarım moment dayanımı belirlenirken yerel burkulma sınır durumunun ayrıca kontrol edilmesine gerek olmadığı vurgulanmalıdır.

## **5.2. Zayıf Eksen Etrafında Eğilme/Başlıklara Paralel Düzlemde Kesme**

Zayıf eksenleri etrafında eğilen, I-enkesitli hadde profillerin tasarım eğilme momenti dayanımları ( $\phi_b M_{ny}$ ) Tablo 5.11 – Tablo 5.15'te sunulmuştur. İlgili tablolarda, profillerin başlıklara paralel düzlemde kesme kuvveti etkisinde kalması durumundaki tasarım kesme kuvveti dayanımları ( $\phi_v V_{nx}$ ) da listelenmiştir. Tablolar her enkesit grubu (IPE, IPN, HEA, HEB ve HEM) için ayrı ayrı sunulmuş olup, dayanım değerleri üç farklı çelik kalitesi (S235, S275 ve S355) için aynı tabloda listelenmiştir. Örnek olarak, Tablo 5.11'de IPE enkesitli elemanların tasarım dayanımları üç çelik sınıfı için verilmiştir. Tablo 5.1 - Tablo 5.5'te sunulan tasarım tablolarındaki gibi, genel profil tablolarına bağımlılığı en aza indirmek için, Tablo 5.11 – Tablo 5.15'te sunulan tasarım tablolarının da ikinci sütunlarında birim boy kütleleri ve son sütunlarında zayıf eksende atalet momentileri listelenmiştir.

Tablo 5.11. Zayıf eksen etrafında eğilen IPE enkesitli çelik eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

ZAYIF EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / BAŞLIKLARA PARALEL DÜZLEMDE KESME								
Profil	G	S235		S275		S355		$I_y$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
		YDKT		YDKT		YDKT		
		$\phi_b M_{ny}$	$\phi_v V_{nx}$	$\phi_b M_{ny}$	$\phi_v V_{nx}$	$\phi_b M_{ny}$	$\phi_v V_{nx}$	
(kg/m)	(kNm)	(kN)	(kNm)	(kN)	(kNm)	(kN)		
IPE 80	6,00	1,23	60,7	1,4	71,0	1,9	91,7	0,08
IPE 100	8,10	1,95	79,6	2,3	93,1	2,9	120	0,16
IPE 120	10,4	2,88	102	3,4	120	4,3	155	0,28
IPE 140	12,9	4,08	128	4,8	150	6,2	193	0,45
IPE 160	15,8	5,52	154	6,5	180	8,3	233	0,68
IPE 180	18,8	7,32	185	8,6	216	11,1	279	1,01
IPE 200	22,4	9,43	216	11,0	252	14,2	326	1,42
IPE 220	26,2	12,3	257	14,4	301	18,6	388	2,05
IPE 240	30,7	15,6	298	18,3	349	23,6	451	2,84
IPE 270	36,1	20,5	349	24,0	409	31,0	528	4,20
IPE 300	42,2	26,4	407	30,9	477	39,9	615	6,04
IPE 330	49,1	32,6	467	38,1	546	49,2	705	7,88
IPE 360	57,1	40,4	548	47,3	641	61,0	828	10,4
IPE 400	66,3	48,4	617	56,7	722	73,2	932	13,2
IPE 450	77,6	58,4	704	68,3	824	88,2	1060	16,8
IPE 500	90,7	71,1	812	83,2	950	107	1230	21,4
IPE 550	106	84,8	917	99,2	1070	128	1380	26,7
IPE 600	122	103	1060	120	1240	155	1600	33,9

Tablo 5.12. Zayıf eksen etrafında eğilen IPN enkesitli çelik eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

ZAYIF EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / BAŞLIKLARA PARALEL DÜZLEMDE KESME								
Profil	G	S235		S275		S355		$I_y$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
		YDKT		YDKT		YDKT		
		$\phi_b M_{ny}$	$\phi_v V_{nx}$	$\phi_b M_{ny}$	$\phi_v V_{nx}$	$\phi_b M_{ny}$	$\phi_v V_{nx}$	
(kg/m)	(kNm)	(kN)	(kNm)	(kN)	(kNm)	(kN)		
IPN 80	41,8	24,6	538	28,8	630	37,2	813	3,99
IPN 100	52,1	36,3	672	42,5	786	54,8	1010	7,03
IPN 120	63,2	50,9	815	59,5	954	76,8	1230	11,4
IPN 140	76,2	68,8	969	80,6	1130	104	1460	17,6
IPN 160	88,9	89,9	1130	105	1330	136	1710	25,8
IPN 180	103	115	1310	134	1530	174	1970	36,5
IPN 200	117	144	1490	168	1750	217	2250	50,1
IPN 220	157	213	2010	249	2360	321	3040	81,5
IPN 240	172	252	2210	295	2590	381	3340	105
IPN 260	189	295	2410	346	2820	446	3640	132
IPN 280	238	405	3070	473	3590	611	4640	194
IPN 300	245	413	3140	483	3670	623	4740	197
IPN 320	248	413	3140	483	3670	624	4740	197
IPN 340	250	411	3130	481	3660	620	4720	195
IPN 360	256	409	3120	479	3650	618	4710	193
IPN 380	263	410	3120	480	3650	620	4710	193
IPN 400	270	409	3110	478	3640	617	4690	192
IPN 450	278	410	3110	479	3640	619	4690	192
IPN 500	285	408	3100	478	3620	617	4680	190
IPN 550	293	409	3100	479	3620	619	4680	190
IPN 600	301	408	3090	477	3610	616	4660	188

Tablo 5.13. Zayıf eksen etrafında eğilen HEA enkesitli çelik eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

ZAYIF EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / BAŞLIKLARA PARALEL DÜZLEMDE KESME								
Profil	G (kg/m)	S235		S275		S355		I <sub>y</sub> (x10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup> )
		YDKT		YDKT		YDKT		
		φ <sub>b</sub> M <sub>ny</sub> (kNm)	φ <sub>v</sub> V <sub>nx</sub> (kN)	φ <sub>b</sub> M <sub>ny</sub> (kNm)	φ <sub>v</sub> V <sub>nx</sub> (kN)	φ <sub>b</sub> M <sub>ny</sub> (kNm)	φ <sub>v</sub> V <sub>nx</sub> (kN)	
IPN 80	41,8	24,6	538	28,8	630	37,2	813	3,99
IPN 100	52,1	36,3	672	42,5	786	54,8	1010	7,03
IPN 120	63,2	50,9	815	59,5	954	76,8	1230	11,4
IPN 140	76,2	68,8	969	80,6	1130	104	1460	17,6
IPN 160	88,9	89,9	1130	105	1330	136	1710	25,8
IPN 180	103	115	1310	134	1530	174	1970	36,5
IPN 200	117	144	1490	168	1750	217	2250	50,1
IPN 220	157	213	2010	249	2360	321	3040	81,5
IPN 240	172	252	2210	295	2590	381	3340	105
IPN 260	189	295	2410	346	2820	446	3640	132
IPN 280	238	405	3070	473	3590	611	4640	194
IPN 300	245	413	3140	483	3670	623	4740	197
IPN 320	248	413	3140	483	3670	624	4740	197
IPN 340	250	411	3130	481	3660	620	4720	195
IPN 360	256	409	3120	479	3650	618	4710	193
IPN 380	263	410	3120	480	3650	620	4710	193
IPN 400	270	409	3110	478	3640	617	4690	192
IPN 450	278	410	3110	479	3640	619	4690	192
IPN 500	285	408	3100	478	3620	617	4680	190
IPN 550	293	409	3100	479	3620	619	4680	190
IPN 600	301	408	3090	477	3610	616	4660	188

Tablo 5.14. Zayıf eksen etrafında eğilen HEB enkesitli çelik eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

ZAYIF EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / BAŞLIKLARA PARALEL DÜZLEMDE KESME								
Profil	G (kg/m)	S235		S275		S355		I <sub>y</sub> (x10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup> )
		YDKT		YDKT		YDKT		
		φ <sub>b</sub> M <sub>ny</sub> (kNm)	φ <sub>v</sub> V <sub>nx</sub> (kN)	φ <sub>b</sub> M <sub>ny</sub> (kNm)	φ <sub>v</sub> V <sub>nx</sub> (kN)	φ <sub>b</sub> M <sub>ny</sub> (kNm)	φ <sub>v</sub> V <sub>nx</sub> (kN)	
HE 100 B	20,4	10,9	254	12,7	297	16,4	383	1,67
HE 120 B	26,7	17,1	335	20,0	392	25,9	506	3,18
HE 140 B	33,7	25,3	426	29,7	499	38,3	644	5,50
HE 160 B	42,6	36,0	528	42,1	618	54,3	797	8,89
HE 180 B	51,2	48,9	640	57,2	748	73,8	966	13,6
HE 200 B	61,3	64,7	761	75,7	891	97,7	1150	20,0
HE 220 B	71,5	83,3	893	97,5	1050	126	1350	28,4
HE 240 B	83,2	105	1040	123	1210	159	1560	39,2
HE 260 B	93,0	127	1150	149	1350	192	1740	51,4
HE 280 B	103	152	1280	178	1500	229	1930	66,0
HE 300 B	117	184	1450	215	1690	278	2190	85,6
HE 320 B	127	199	1560	232	1830	300	2360	92,4
HE 340 B	134	208	1640	244	1920	315	2470	96,9
HE 360 B	142	218	1710	255	2000	330	2590	101
HE 400 B	155	233	1830	273	2140	353	2760	108
HE 450 B	171	253	1980	297	2320	383	2990	117
HE 500 B	187	273	2130	320	2490	413	3220	126
HE 550 B	199	284	2210	332	2580	428	3340	131
HE 600 B	212	294	2280	344	2670	444	3450	135
HE 650 B	225	305	2360	357	2760	460	3570	140
HE 700 B	241	316	2440	370	2850	478	3680	144
HE 800 B	262	328	2510	384	2940	496	3800	149
HE 900 B	291	351	2660	410	3120	530	4030	158
HE 1000 B	314	363	2740	425	3210	548	4140	163

Tablo 5.15. Zayıf eksen etrafında eğilen HEM enkesitli çelik eğilme elemanlarının tasarım eğilme momenti ve kesme kuvveti dayanımları

ZAYIF EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / BAŞLIKLARA PARALEL DÜZLEMDE KESME								
Profil	G	S235		S275		S355		I <sub>y</sub>
		YDKT		YDKT		YDKT		
		$\phi_b M_{ny}$	$\phi_v V_{nx}$	$\phi_b M_{ny}$	$\phi_v V_{nx}$	$\phi_b M_{ny}$	$\phi_v V_{nx}$	
(kg/m)	(kNm)	(kN)	(kNm)	(kN)	(kNm)	(kN)	(x10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup> )	
HE 100 M	41,8	24,6	538	28,8	630	37,2	813	3,99
HE 120 M	52,1	36,3	672	42,5	786	54,8	1010	7,03
HE 140 M	63,2	50,9	815	59,5	954	76,8	1230	11,4
HE 160 M	76,2	68,8	969	80,6	1130	104	1460	17,6
HE 180 M	88,9	89,9	1130	105	1330	136	1710	25,8
HE 200 M	103	115	1310	134	1530	174	1970	36,5
HE 220 M	117	144	1490	168	1750	217	2250	50,1
HE 240 M	157	213	2010	249	2360	321	3040	81,5
HE 260 M	172	252	2210	295	2590	381	3340	105
HE 280 M	189	295	2410	346	2820	446	3640	132
HE 300 M	238	405	3070	473	3590	611	4640	194
HE 320 M	245	413	3140	483	3670	623	4740	197
HE 340 M	248	413	3140	483	3670	624	4740	197
HE 360 M	250	411	3130	481	3660	620	4720	195
HE 400 M	256	409	3120	479	3650	618	4710	193
HE 450 M	263	410	3120	480	3650	620	4710	193
HE 500 M	270	409	3110	478	3640	617	4690	192
HE 550 M	278	410	3110	479	3640	619	4690	192
HE 600 M	285	408	3100	478	3620	617	4680	190
HE 650 M	293	409	3100	479	3620	619	4680	190
HE 700 M	301	408	3090	477	3610	616	4660	188
HE 800 M	317	408	3080	478	3600	617	4650	186
HE 900 M	333	408	3070	477	3590	616	4630	185
HE 1000 M	349	410	3070	480	3590	620	4630	185

Yanal burulmalı burkulmanın zayıf eksenleri etrafında eğilen I profillerin tasarım eğilme momenti dayanımlarını belirleyen bir sınır durum olmaması nedeniyle listelenen dayanım değerleri profillerin boyundan bağımsızdır. Ancak, başlıkları kompakt olmayan enkesitlerin moment dayanımları hesaplanırken yerel burkulma sınır durumu dikkate alınmalıdır. Örnek olarak, HEA 300 enkesitli ve S355 çelik kaliteli bir eğilme elemanının zayıf ekseninde eğilmede akma sınır durumuna göre tasarım eğilme momenti dayanımı  $\phi_b M_{py} = 205$  kNm (ki bu değer  $\phi_b 1,6 F_y W_{ey} = 215$  kNm üst sınır değerinden küçüktür) olmasına karşın, yerel burkulma sınır durumuna göre tasarım dayanımı  $\phi_b M_{ny} = 192$  kNm olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda, elemanın tasarım dayanımını belirleyen sınır durum yerel burkulma olacağı için elemanın tasarım dayanımı 192 kNm'e eşittir. Tablo 5.11 – Tablo 5.15'te sunulan tasarım tablolarında kompakt olmayan enkesitli elemanların dayanımındaki bu düşüş dikkate alınmış, sunulan moment dayanımları yerel burkulma sınır durumuna göre hesaplanmıştır. Örnek olarak, Tablo 5.13'te HEA 300 ve S355 için  $\phi_b M_{ny}$  değeri 192 kNm olarak okunabilir. Sonuç olarak, kuvvetli eksenleri etrafında eğilen elemanlar için sunulan tasarım tablolarında olduğu gibi, zayıf eksenleri etrafında eğilen I-enkesitli hadde profillerin tasarım eğilme momenti dayanımı belirlenirken, Tablo 5.11 – Tablo

5.15'in kullanılması durumunda, yerel burkulma sınır durumunun ayrıca kontrol edilmesine gerek yoktur, tablodan okunan değerler tasarımda doğrudan kullanılabilir.

### 5.3. Pratik Tasarım Tablolarının Kullanılması ve Tablolardan Elde Edilen Değerlerin El Çözümleriyle Karşılaştırılması

Bu bölümde sunulan örneklerde, kuvvetli/zayıf eksende eğilme ve/veya gövde/başlıklara paralel düzlemde kesme etkisindeki, farklı enkesit grubu, çelik kalitesi, eleman boyu ve  $C_b$  değerine sahip I-enkesitli hadde profillerin tasarım dayanımları Bölüm 5.1 ve Bölüm 5.2'de sunulan tasarım tabloları kullanılarak belirlenecektir. Her bir örnekte, tablolardan elde edilen değerler, el çözümleriyle de karşılaştırılacaktır.

#### Örnek 1

Bu örnekte,  $C_b=1$  kabulüyle, HEA 300 enkesitli ve S355 çelik kaliteli bir eğilme elemanının üç farklı  $L_b$  boyu için; sırasıyla,  $L_{b1}= 3$  m,  $L_{b2}= 6$  m ve  $L_{b3}= 12$  m için, kuvvetli eksen etrafında tasarım eğilme momenti dayanımları ( $\phi_b M_{nx}$ ) Bölüm 5.1'de sunulan tasarım tabloları kullanılarak belirlenecektir.

Üç  $L_b$  değerinin de metre cinsinden tamsayı olması nedeniyle, dayanım değerleri doğrudan Tablo 5.8 /Çizelge 3'ten okunabilir. HEA 300 enkesiti ve S355 çelik kalitesi için ilgili tasarım moment dayanımları sırasıyla  $\phi_b M_{nx,Lb1} = 423$  kNm;  $\phi_b M_{nx,Lb2} = 380$  kNm ve  $\phi_b M_{nx,Lb3} = 240$  kNm olarak okunabilir (Şekil 5.1).

$L_b$ (m)	$\phi_b M_n$ (kNm)											
	HE 260 A			HE 280 A			HE 300 A			HE 320 A		
	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355
0	195	227	284	235	272	340	293	339	423	344	403	512
1	195	227	284	235	272	340	293	339	423	344	403	512
2	195	227	305	235	272	340	293	339	423	344	403	512
3	195	227	284	235	272	340	293	339	423	344	403	512
4	190	219	284	232	267	335	291	336	423	343	396	498
5	183	209	284	223	256	316	281	323	401	331	381	473
6	176	199	284	215	245	297	272	319	380	320	365	447
7	168	189	225	207	233	278	262	297	358	309	350	422
8	161	180	209	198	222	260	253	284	336	298	335	397
9	154	170	193	190	210	241	243	271	315	286	319	371
10	147	160	172	182	199	220	233	258	293	275	304	346
11	140	150	154	173	187	195	224	244	266	264	288	315
12	133	139	139	165	176	176	214	231	240	253	273	284

Şekil 5.1. Örnek 1 için tasarım eğilme momenti dayanımlarının Tablo 5.8'den okunması

İncelenen  $L_b$  boyunun ilgili  $L_r$  sınır değerini geçmediği durumlarda, elemanın dayanımı Tablo 5.3 / Çizelge 3 kullanılarak da hesaplanabilir. Bunun için, belirtilen tablodan ilk olarak  $L_r$  değeri okunmalıdır. Tablo 5.3 / Çizelge 3'ten HEA300 ve S355 için, sınır boy değerlerinin sırasıyla  $L_p= 3,98$  m ve  $L_r= 10,52$  m olduğu görülebilir (Şekil 5.2). Bu durumda,  $L_{b1}$  ve  $L_{b2}$  boyları  $L_r$ 'den küçük oldukları için elemanın tasarım moment dayanımları Tablo 5.3 kullanılarak da belirlenebilir.  $L_{b1}= 3$  m <  $L_p=3,98$  m olduğu için,  $\phi_b M_{nx,Lb1} = \phi_b M_{px} = 423$  kNm'dir. Buna karşın,  $L_p= 3,98$  m <  $L_{b2}= 6$  m <  $L_r= 10,52$  m olduğu için, tasarım moment dayanımı, Denklem (5.2) kullanılarak hesaplanmalıdır. Bunun için, ilgili tablodan  $\phi_b M_{px} = 423$  kNm ve  $\phi_b BF = 21,7$  kNm değerleri okunmalıdır. Böylece,  $L_{b2} = 6$  m için elemanın tasarım eğilme momenti dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\phi_b M_{nx,Lb2} = 1,0 \left[ 423 - 21,7(6,0 - 3,98) \right] = 379 \text{ kNm}$$

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S355								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6$ mm <sup>4</sup> )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
HE 100 A	16,7	1,05	5,81	26,5	16,3	2,15	102	3,49
HE 120 A	19,9	1,26	5,72	38,2	23,8	3,23	121	6,06
HE 140 A	24,7	1,47	6,04	55,4	34,8	4,53	156	10,3
HE 160 A	30,4	1,66	6,62	78,3	49,2	5,86	194	16,7
HE 180 A	35,5	2,04	6,90	103	65,7	7,61	219	25,1
HE 200 A	42,3	2,44	7,51	134	86,9	9,27	263	36,9
HE 220 A	50,5	2,69	8,09	177	115	11,5	313	54,1
HE 240 A	60,3	2,93	8,85	232	151	13,7	367	77,6
HE 260 A	68,2	3,34	9,34	284	187	16,1	399	105
HE 280 A	76,4	3,74	9,76	340	227	18,8	460	137
HE 300 A	88,3	3,98	10,5	423	262	21,7	525	183
HE 320 A	97,6	3,46	10,6	512	331	25,4	594	229

Şekil 5.2. Örnek 1 için tasarım eğilme momenti dayanımlarının Tablo 5.3'ten okunan değerlerden belirlenmesi

Tablolardan elde edilen tasarım momenti değerleri el hesaplarıyla doğrulanabilir. Bunun için ilk olarak, HEA 300 enkesitinin geometrik özellikleri profil tablosundan okunmalıdır:



## Enkesit Özellikleri

HEA300		
$d = 290 \text{ mm}$	$h = 208 \text{ mm}$	$t_w = 8,50 \text{ mm}$
$b_f = 300 \text{ mm}$	$t_f = 14 \text{ mm}$	$W_{px} = 1383 \times 10^3 \text{ mm}^3$
$W_{ex} = 1260 \times 10^3 \text{ mm}^3$	$I_x = 18260 \times 10^4 \text{ mm}^4$	$I_y = 6310 \times 10^4 \text{ mm}^4$
$i_y = 74,90 \text{ mm}$	$J = 85,17 \times 10^4 \text{ mm}^4$	$C_w = 1,2 \times 10^{12} \text{ mm}^6$

S355 çeliği için karakteristik akma gerilmesinin  $F_y = 355 \text{ MPa}$  olduğu göz önünde bulundurularak, ilk olarak enkesit sınıflandırması yapılmalıdır:

Başlık için sınır narinlikler:

$$\lambda_{rf} = 1,0 \sqrt{\frac{E}{F}} = 1,0 \sqrt{\frac{200000 \text{ MPa}}{355 \text{ MPa}}} = 23,7$$

$$\lambda_{pf} = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F}} = 0,38 \sqrt{\frac{200000 \text{ MPa}}{355 \text{ MPa}}} = 9,02$$

Gövde için sınır narinlikler:

$$\lambda_{rw} = 5,70 \sqrt{\frac{E}{F}} = 5,70 \sqrt{\frac{200000 \text{ MPa}}{355 \text{ MPa}}} = 135$$

$$\lambda_{pw} = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F}} = 3,76 \sqrt{\frac{200000 \text{ MPa}}{355 \text{ MPa}}} = 89,3$$

Sınır narinlikler kullanılarak, enkesitin başlıklarının ve gövdesinin yerel burkulma sınıfları belirlenir;

$$\lambda_f = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{300}{2 \times 14} = 10,7 > \lambda_{pf} = 9,02 \text{ başlık kompakt olmayandır.}$$

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w} = \frac{208}{8,50} = 24,5 < \lambda_{pw} = 89,3 \text{ gövde kompakttır.}$$

Sonuç olarak, S355 çelik kalitesinde üretilmiş HEA300 enkesitli bir eğilme elemanının enkesiti kompakt olmayan başlıklı enkesit olarak sınıflandırılabilir.

TÇY (2016)'a göre, bu tip bir enkesitte hiç bir durumda, akma sınır durumu davranışı kontrol etmeyecek; yanal burkulma sınır durumunun etkin olmadığı durumlarda, yerel başlık burkulması sınır durumu davranışı belirleyecektir. Gövdesi kompakt ve başlıkları kompakt olmayan I-enkesitli hadde profillerin yerel burkulma sınır durumunda, karakteristik eğilme momenti dayanımı Denklem (2.7) kullanılarak hesaplanmalıdır. Bu için ilk olarak,  $M_{px}$  ve  $M_{rx}$  değerleri bulunur;

$$M_{px} = F_y W_{px} = 355 \times 1383 \times 10^{-3} = 491 \text{ kNm}$$

$$M_{rx} = 0,7 F_y W_{ex} = 0,7 \times 355 \times 1260 \times 10^{-3} = 313 \text{ kNm}$$

Buradan, karakteristik ve tasarım moment dayanımları  $M_{nx}$  ve  $\phi_b M_{nx}$  aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$M_{nx} = 491 - (491 - 313) \left( \frac{10,7 - 9,02}{23,7 - 9,02} \right) = 471 \text{ kNm}$$

$$\phi_b M_{nx} = 0,9 \times 471 = 424 \text{ kNm}$$

Ayrıca, elemanın boyuna bağlı olarak yanal burkulma sınır durumunun kontrolü gerekebilir. Bunun için ilk olarak  $L_p$  ve  $L_r$  sınır boyları hesaplanmalıdır;

$$L_p = 1,76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,76 \times 74,90 \times 23,74 / 1000 = 3,13 \text{ m}$$

$L_r$  değerinin hesabı için ilk olarak  $i_{ts}$  değeri hesaplanmalıdır.

$$i_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{I_y C_w}}{W_{ex}}} = \sqrt{\frac{\sqrt{6310 \times 10^4 \times 1,2 \times 10^{12}}}{1260 \times 10^3}} = 83,1 \text{ mm}$$

Buradan,  $L_r$  değeri;

$$L_r = 1,95 i_{ts} \frac{E}{0,7 F_y} \sqrt{\frac{J}{W_{ex} h_o} + \sqrt{\left( \frac{J}{W_{ex} h_o} \right)^2 + 6,76 \left( \frac{0,7 F_y}{E} \right)^2}} = 1,95 \times 83,1 \times \frac{200000}{0,7 \times 355}$$

$$\sqrt{\frac{85,17 \times 10^4}{1260 \times 10^3 \times 276} + \sqrt{\left( \frac{85,17 \times 10^4}{1260 \times 10^3 \times 276} \right)^2 + 6,76 \left( \frac{0,7 \times 355}{200000} \right)^2}} \times 10^{-3} = 10,5 \text{ m}$$

olarak hesaplanır. Şimdi, üç farklı boy için elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımını belirleyelim.  $L_{b1} = 3,0 \text{ m} < L_p = 3,13 \text{ m}$  olduğu için, TÇY (2016)'ya göre, yanal burulmalı burkulma sınır durumunun göz önüne alınmasına gerek yoktur. Dolayısıyla, elemanın tasarım eğilme momenti dayanımı yerel burkulma için hesapladığımız değere eşittir;  $\phi_b M_{nx, Lb1} = 424 \text{ kNm}$ .  $L_p = 3,13 \text{ m} < L_{b2} = 6,0 \text{ m} < L_r = 10,5 \text{ m}$  olduğu için, yanal burulmalı burkulma sınır durumu göz önüne alınmalı ve TÇY (2016)'da verilen inelastik yanal burulmalı burkulma formülü (Denklem (2.14)) kullanılmalıdır;

$$M_{nx} = 1 \times \left[ 491 - (491 - 313) \times \left( \frac{6,0 - 3,13}{10,5 - 3,13} \right) \right] = 422 \text{ kNm}$$

Bu değer, yerel burkulma sınır durumu için hesaplanan  $M_{nx} = 471 \text{ kNm}$  değerle kıyaslanarak,  $L_{b2} = 6,0 \text{ m}$  için tasarım moment dayanımı şu şekilde elde edilebilir;

$$\phi_b M_{nx, Lb2} = 0,9 \times \min(471 ; 422) = 0,9 \times 422 = 380 \text{ kNm}$$

Son olarak,  $L_r = 10,5 \text{ m} < L_{b3} = 12,0 \text{ m}$  olduğu için, yanal burulmalı burkulma sınır durumu göz önüne alınmalı ve TÇY (2016)'da verilen elastik yanal burulmalı burkulma formülü kullanılmalıdır. Denklem (2.15) kullanılarak  $L_b = 12 \text{ m}$  için tasarım eğilme momenti dayanımı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$M_{nx} = \frac{1 \times \pi^2 \times 200000}{\left( \frac{12000}{83,1} \right)^2} \sqrt{1 + 0,078 \frac{851700 \times 1}{1260 \times 10^3 \times 276} \left( \frac{12000}{83,1} \right)^2} \times 1260 \times 10^{-3}$$

$$M_{nx} = 266 \text{ kNm} \leq 491 \text{ kNm}$$

$$\phi_b M_{nx, Lb3} = 0,9 \times \min(266 ; 422) = 0,9 \times 266 = 240 \text{ kNm}$$

olarak bulunabilir.

Sonuç olarak, Bölüm 5.1'de önerilen tasarım tablolarından elde edilen tasarım momenti değerleri el hesaplarıyla doğrulanmıştır.

## Örnek 2

Bu örnekte, HEA 300 enkesitli ve S355 çelik kaliteli bir eğilme elemanının zayıf ekseninde tasarım eğilme momenti dayanımı Bölüm 5.2'de sunulan tasarım tabloları

kullanılarak belirlenecektir. HEA enkesitleri için tasarım dayanımları Tablo 5.13'te sunulmuştur. Bu tablodan, HEA 300 enkesiti ve S355 çelik kalitesi için,  $\phi_b M_{ny} = 192$  kNm olarak okunabilir (Şekil 5.3).

Tablodan elde edilen tasarım eğilme momenti değeri el hesaplarıyla doğrulanabilir. Bunun için ilk olarak, HEA 300 enkesitinin zayıf eksen etrafında elastik ve plastik mukavemet momentleri profil tablosundan okunmalıdır;  $W_{ey} = 420,6 \times 10^3 \text{ mm}^3$ ;  $W_{py} = 641,2 \times 10^3 \text{ mm}^3$ . S355 çelik kalitesi için HEA300 enkesitinin yerel burkulma sınıfı Örnek 1'de kompakt gövdeli fakat kompakt olmayan başlıklı enkesit olarak belirlenmişti. Ayrıca, Örnek 1'de  $\lambda_{rf} = 10,71$ ,  $\lambda_{pr} = 9,02$  ve  $\lambda_{rf} = 23,74$  olarak belirlenmişti. Zayıf eksende eğilmede tasarım eğilme momenti dayanımı, akma ve yerel başlık burkulması sınır durumları dikkate alınarak hesaplanmalıdır. Akma sınır durumuna göre karakteristik ve tasarım eğilme momenti dayanımları;

$$M_{ny} = 355 \times 641,2 \times 10^{-3} = 228 \text{ kNm} \leq 1,6 \times 355 \times 420,6 \times 10^{-3} = 239 \text{ kNm}$$

$$\phi_b M_{ny} = 0,9 \times 228 = 205 \text{ kNm}$$

olarak hesaplanabilir. Yerel burkulma sınır durumunda, karakteristik eğilme momenti dayanımı,  $M_{ny}$ , Denklem (2.18) kullanılarak belirlenir. Bunun için, önce  $M_{ry}$ 'yi hesaplayalım;

$$M_{ry} = 0,7 F_y W_{ey} = 0,7 \times 355 \times 420,6 \times 10^{-3} = 104 \text{ kNm}$$

Buradan, yerel başlık burkulması sınır durumu için karakteristik ve tasarım eğilme momenti dayanımları;

$$M_{ny} = 228 - (228 - 104) \left( \frac{10,71 - 9,02}{23,74 - 9,02} \right) = 214 \text{ kNm}$$

$$M_{ny} = 0,9 \times 214 = 192 \text{ kNm}$$

olarak hesaplanabilir. Bu değer, Bölüm 5.2'de önerilen tasarım tablolarından elde edilen tasarım momenti değerini doğrulamaktadır.

ZAYIF EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / BAŞLIKLARA PARALEL DÜZLEMDE KESME								
Profil	G	S235		S275		S355		I <sub>y</sub> (x10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup> )
		YDKT		YDKT		YDKT		
		$\phi_b M_{ny}$	$\phi_v V_{nx}$	$\phi_b M_{ny}$	$\phi_v V_{nx}$	$\phi_b M_{ny}$	$\phi_v V_{nx}$	
(kg/m)	(kNm)	(kN)	(kNm)	(kN)	(kNm)	(kN)		
HE 100 A	16,7	8,70	203	10,2	238	13,1	307	1,34
HE 120 A	19,9	12,4	244	14,6	285	18,8	368	2,31
HE 140 A	24,7	17,9	302	21,0	353	27,1	456	3,89
HE 160 A	30,4	24,9	365	29,1	428	37,6	552	6,16
HE 180 A	35,5	33,1	434	38,7	508	49,2	656	9,25
HE 200 A	42,3	43,1	508	50,4	594	62,8	767	13,4
HE 220 A	50,5	57,2	614	67,0	719	83,3	928	19,6
HE 240 A	60,3	74,4	731	87,0	855	108	1100	27,7
HE 260 A	68,2	91,0	825	106	965	130	1250	36,7
HE 280 A	76,4	110	924	126	1080	155	1400	47,6
HE 300 A	86,3	136	1070	156	1210	192	1610	63,1
HE 320 A	97,6	150	1180	176	1380	221	1780	69,9

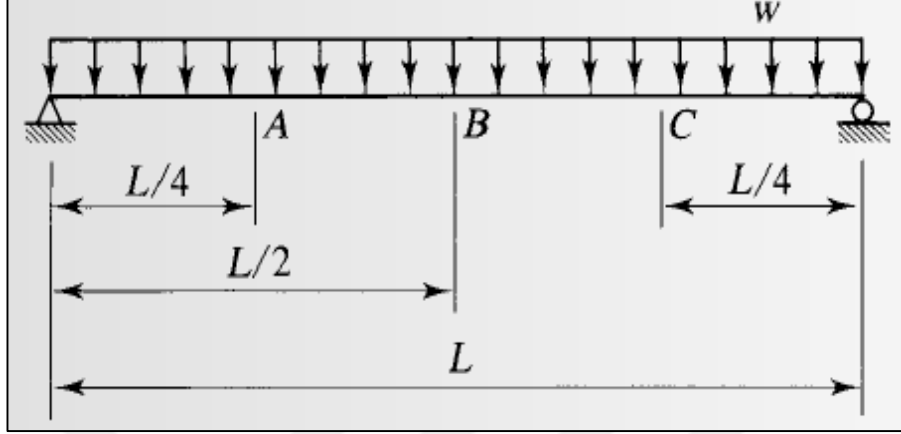
Şekil 5.3. Örnek 2 için tasarım eğilme momenti dayanımlarının Tablo 5.13'ten okunması

### Örnek 3

Bu örnekte, açıklığı boyunca düzgün yayılı yükü yüklenmiş basit mesnetli, IPE 300 enkesitli ve S355 çelik kaliteli bir eğilme elemanının üç farklı L<sub>b</sub> boyu için; L<sub>b1</sub>= 0,5 m, L<sub>b2</sub>= 2,0 m ve L<sub>b3</sub>= 6,0 m için, kuvvetli eksen etrafında tasarım eğilme momenti dayanımları Bölüm 5.1'de sunulan tasarım tabloları kullanılarak belirlenecektir. Yanal desteklerin yalnız mesnetlerde olduğu, L<sub>b</sub> boyunun mesnetler arası açıklığa eşit olduğu kabul edilecektir. Bu örneğin Örnek 1'den en önemli farkı, moment düzeltme katsayısının (C<sub>b</sub>'nin) 1'den farklı olmasıdır. Bu örnekte, C<sub>b</sub>=1 olmadığı durumlarda, kuvvetli eksen etrafında eğilme durumunda, tasarım eğilme momenti dayanımının tasarım tablolarındaki değerlerden nasıl elde edilebileceği gösterilmektedir.

İlk olarak, üç farklı boy için Bölüm 5.1'de verilen tasarım tablolarından tasarım eğilme momenti dayanımlarını okuyalım. Bu değerlerin C<sub>b</sub>=1 durumuna karşılık geldiğini ve C<sub>b</sub> değerinin bu örnekte 1 değerinden farklı olacağını aklımızda tutarak, ilgili tasarım tablolarını belirleyelim. IPE300 enkesiti ve S355 çelik kalitesi için, L<sub>p</sub> ve L<sub>r</sub> sınır değerleri, Tablo 5.1 / Çizelge 3'ten, sırasıyla, 1,40 ve 4,26 m olarak okunabilir. L<sub>b1</sub>= 0,5 m < L<sub>p</sub>=1,40 m olması nedeniyle,  $\phi_b M_{nx, Lb1, Cb=1,14} = \phi_b M_{px} = 201$  kNm olarak okunabilir. L<sub>b2</sub> ve L<sub>b3</sub> değerlerinin metre cinsinden tam sayı olmaları nedeniyle tasarım dayanımları Tablo 5.6 / Çizelge 3'ten hesap yapmaksızın elde edilebilir. İlgili çizelgeden, S355 çeliği ve IPE 300 enkesiti için, L<sub>b2</sub>= 2,0 m ve L<sub>b3</sub>= 6,0 m durumlarında, tasarım eğilme momenti dayanımlarının sırasıyla  $\phi_b M_{nx, Lb2, Cb=1,14} = 185$  kNm ve  $\phi_b M_{nx, Lb3, Cb=1,14} = 77,4$  kNm olduğu görülmektedir.

Şimdi moment düzeltme katsayısının 1'den büyük olmasının bu değerleri nasıl etkileyeceğini belirleyelim. Bunun için ilk olarak, verilen yükleme ve mesnetleme koşulları için (Şekil 5.1) moment düzeltme katsayısını, yani  $C_b$ 'yi hesaplayalım.



Şekil 5.4. Düzgün yayılı yük etkisindeki basit kiriş [6]

Bu tip bir eğilme elemanının moment diyagramı açıklık ortasına göre simetrik olacağı için,  $M_A = M_C$ 'dir. Elemandaki en büyük eğilme momenti ise açıklık ortasında oluşacaktır; bu nedenle,  $M_{maks} = M_B$  olacaktır. Bu durumda,  $C_b$  hesabı için yalnız açıklık ortasındaki ve mesnetlerden herhangi birinden çeyrek açıklık uzaklıktaki kesitteki moment değerlerinin belirlenmesi yeterlidir. Bu tip bir kirişte, en büyük momentin şiddetinin;

$$M_{maks} = M_B = \frac{1}{8} wL^2$$

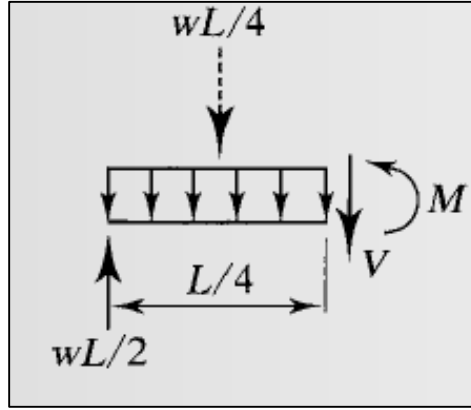
olduğu bilinmektedir.  $M_A$  momentinin şiddeti ise Şekil 5.2'de gösterilen serbest cisim diyagramı kullanılarak hesaplanabilir;

$$M_A = \frac{wL}{2} \left( \frac{L}{4} \right) - \frac{wL}{4} \left( \frac{L}{8} \right) = \frac{wL^2}{8} - \frac{wL^2}{32} = \frac{3}{32} wL^2$$

Buradan, moment düzeltme katsayısı;

$$C_b = \frac{12,5M_{maks}}{2,5M_{maks} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} = \frac{12,5(1/8)}{2,5(1/8) + 3(3/32) + 4(1/8) + 3(3/32)} = 1,14$$

olarak hesaplanabilir.



Şekil 5.5. Açıklığın dörtte birindeki kesit zorları [6]

$C_b$  katsayısının yanal burulmalı burkulma sınır durumunda elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımını nasıl etkilediği Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Buna göre,  $C_b$  katsayısı karakteristik dayanım formüllerinde dayanımı doğrusal olarak artıran bir çarpan olarak görülmektedir. Katsayı ne kadar büyükse dayanımdaki artış da o kadar fazladır. Ancak,  $C_b$  değerinin oldukça büyük olduğu durumlarda, kompakt enkesitli elemanlarda akma sınır durumunun kompakt olmayan başlıklı elemanlarda ise yerel başlık burkulması sınır durumunun davranışı kontrol edebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Diğer bir ifadeyle, kompakt enkesitli hadde profillerinde,  $C_b > 1$  durumunda tasarım eğilme momenti dayanımı ( $\phi_b M_{nx, C_b > 1}$ ),  $C_b = 1$  durumu için belirlenen tasarım eğilme momentinin ( $\phi_b M_{nx, C_b = 1}$ )  $C_b$  katına eşittir; ancak, bu değer enkesitin tasarım plastik eğilme momenti dayanımını aşamaz;

$$\phi_b M_{nx, C_b > 1} = C_b \times (\phi_b M_{nx, C_b = 1}) \leq \phi_b M_{px} \quad (5.4)$$

Benzer şekilde, kompakt olmayan başlıklı elemanlarda, tasarım tablolarından  $C_b = 1$  için okunan değerler ( $\phi_b M_{nx, C_b = 1}$ ),  $C_b$ 'nin olumlu etkisini tasarıma dahil etmek için,  $C_b$  kat artırılabilir ancak elde edilen dayanım  $\phi_b M'_{px}$  değerini aşmamalıdır;

$$\phi_b M_{nx, C_b > 1} = C_b \times (\phi_b M_{nx, C_b = 1}) \leq \phi_b M'_{px} \quad (5.5)$$

Bölüm 5.1'de belirtildiği gibi, Tablo 5.1 – Tablo 5.5'te listelenen  $\phi_b M_{px}$  değerleri kompakt olmayan başlıklı enkesitlerde  $\phi_b M'_{px}$  değerlerine eşittir. Benzer şekilde, Tablo 5.6 – 5.10'da  $L_b = 0$  için verilen değerler de kompakt başlıklı elemanlarda  $\phi_b M_{px}$ 'e, kompakt olmayan başlıklı elemanlarda ise  $\phi_b M'_{px}$ 'ne eşittir.

Özet olarak, moment düzeltme katsayısı  $C_b$ 'nin 1'den farklı olması durumunda, tasarım tablolarından okunan değerler  $C_b$  değeri ile çarpılarak büyütülebilir; ancak, elde edilen değer Tablo 5.1 – Tablo 5.5'in kullanılması durumunda ilgili enkesit ve çelik kalitesi için çizelgelerde  $\phi_b M_{px}$  olarak verilen değeri, Tablo 5.6 – Tablo 5.10'un kullanılması durumunda ise yine ilgili enkesit ve çelik kalitesi için  $L_b=0$  boyu için verilen  $\phi_b M_{nx}$  değerini aşmamalıdır.

Şimdi bu örnekte ele alınan eğilme elemanının üç farklı boyu için  $C_b$ 'nin elemanın tasarımına etkisini belirleyelim. Tablo 5.1 / Çizelge 3'ten IPE300 enkesiti (ve S355 çelik kalitesi) için,  $\phi_b M_{px}$  değerinin 201 kNm olduğu görülebilir. Benzer şekilde, Tablo 5.6 / Çizelge 3'ten IPE 300 enkesiti, S355 çelik kalitesi ve  $L_b=0$  değeri için  $\phi_b M_{nx}=201$  kNm olarak belirlenebilir. Diğer bir ifadeyle,  $C_b$  ile çarpılarak elde edilecek artırılmış eğilme momenti dayanımı 201 kNm'yi geçmemelidir.

Ele alınan örnekte,  $C_b= 1,14$  olduğunu göz önünde bulundurarak,  $L_{b1}= 0,5$  m durumunda  $C_b$ 'nin etkisini inceleyelim.  $C_b = 1,0$  olduğu durumda, elemanın dayanımı tasarım tablolarından  $\phi_b M_{nx} = 201$  kNm olarak belirlenmişti. Bu durumda,  $C_b$ 'nin 1'den farklı bir değer olması elemanın tasarım dayanımını etkilememektedir; çünkü yanal burulmalı burkulma sınır durumu elemanın davranışını belirleyen bir sınır durum değildir.

$L_{b2} = 2,0$  m durumunda ise, elemanın dayanımı tasarım tablolarından  $\phi_b M_{nx, Lb2, Cb=1} = 185$  kNm olarak belirlenmişti. Elemanın dayanımı  $C_b = 1,14$  kat artırılırsa;

$$\phi_b M_{nx, Lb2, Cb=1,14} = 1,14 \times (\phi_b M_{nx, Lb2, Cb=1}) = 1,14 \times 185 = 211 \text{ kNm}$$

değeri elde edilir, ancak, bu değer 201 kNm değerini aşamayacağına göre,  $L_{b2}=2,0$  m durumunda da tasarım eğilme momenti dayanımı  $\phi_b M_{nx, Lb2, Cb=1,14} = 201$  kNm'dur. Bu durumda, elemanda moment yayılışının olumlu etkisi nedeniyle dayanım %8,6 artmaktadır.

$L_{b3}=6,0$  m durumunda ise, elemanın dayanımı tasarım tablolarından  $\phi_b M_{nx, Lb3, Cb=1} = 77,4$  kNm olarak belirlenmişti. Elemanın dayanımı  $C_b = 1,14$  kat artırılırsa;

$$\phi_b M_{nx, Lb3, Cb=1,14} = 1,14 \times (\phi_b M_{nx, Lb3, Cb=1}) = 1,14 \times 77,4 = 88,2 \text{ kNm}$$



değeri elde edilir. Bu değer, üst sınır değer olan 201 kNm değerinden küçük olduğuna göre,  $L_{b3}=6$  m durumunda tasarım eğilme momenti dayanımı  $\phi_b M_{nx,Lb3,Cb=1,14} = 88,2$  kNm olacaktır. Bu durumda, elemenda moment yayılışının olumlu etkisi nedeniyle dayanım %14 artmaktadır.

Elde edilen dayanım değerlerinin el hesaplarıyla doğrulamasının yapılabilmesi için, ilk olarak IPE 300'ün enkesit özellikleri profil tablosundan okunur;

#### Enkesit Özellikleri

IPE 300		
$d = 248,6$ mm	$h = 300$ mm	$t_w = 7,10$ mm
$b_f = 150$ mm	$t_f = 10,7$ mm	$W_{px} = 628 \times 10^3$ mm <sup>3</sup>
$W_{ex} = 557 \times 10^3$ mm <sup>3</sup>	$I_x = 8356 \times 10^4$ mm <sup>4</sup>	$I_y = 604 \times 10^4$ mm <sup>4</sup>
$i_y = 33,5$ mm	$J = 20,1 \times 10^4$ mm <sup>4</sup>	$C_w = 126 \times 10^9$ mm <sup>6</sup>

Enkesit sınıfını belirlemek için başlık ve gövde narinliklerinin sınır değerleri hesaplanmalıdır;

Başlık için sınır narinlikleri:

$$\lambda_{rf} = 1,0 \sqrt{\frac{200000}{355}} = 23,7 ; \lambda_{pf} = 0,38 \sqrt{\frac{200000}{355}} = 9,02$$

Gövde için sınır narinlikleri:

$$\lambda_{rw} = 5,70 \sqrt{\frac{200000}{355}} = 135 ; \lambda_{pw} = 3,76 \sqrt{\frac{200000}{355}} = 89,3$$

Buradan, kesit başlığı ve gövdesinin yerel burkulma sınıfları belirlenir;

$$\lambda_f = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{150\text{mm}}{2 \times 10,7\text{mm}} = 7,01 < \lambda_{pf} = 7,12 \text{ başlık kompakttır.}$$

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w} = \frac{248,6\text{mm}}{7,10\text{mm}} = 35,0 < \lambda_{pw} = 89,3 \text{ gövde kompakttır.}$$

Dolayısıyla, enkesit kompakt enkesit olarak sınıflandırılabilir.

TÇY (2016)'ya göre, kompakt enkesitli elemanlarda yerel burkulma sınır durumunun kontrolüne gerek yoktur; yalnız akma ve yanal burulmalı burkulma sınır durumları tasarıma dahil edilmelidir. Akma sınır durumunda, enkesitin karakteristik ve tasarım eğilme momenti dayanımları;

$$M_{nx} = M_{px} = F_y W_{px} = 355 \times 39,4 \times 10^3 = 223 \text{ kNm}$$

$$\phi_b M_{nx} = 0,9 \times 223 = 201 \text{ kNm}$$

olarak belirlenebilir.

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunu kontrol etmek için,  $L_p$  ve  $L_r$  değerleri hesaplanmalıdır;

$$L_p = 1,76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,76 \times 33,5 \times 23,7 = 1400 \text{ mm} = 1,40 \text{ m}$$

$$i_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{I_y C_w}}{W_{ex}}} = \sqrt{\frac{\sqrt{604 \times 10^4 \times 126 \times 10^9}}{557 \times 10^3}} = 39,6 \text{ mm}$$

$$L_r = 1,95 i_{ts} \frac{E}{0,7 F_y} \sqrt{\frac{J}{W_{ex} h_o} + \sqrt{\left(\frac{J}{W_{ex} h_o}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7 F_y}{E}\right)^2}} = 1,95 \times 39,6 \times \frac{200000}{0,7 \times 355}$$

$$\sqrt{\frac{20,1 \times 10^4}{557 \times 10^3 \times 289,3} + \sqrt{\left(\frac{20,1 \times 10^4}{557 \times 10^3 \times 289,3}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7 \times 355}{200000}\right)^2}} \times 10^{-3} = 4,26 \text{ m}$$

$L_{b1} = 0,5 \text{ m} < L_p = 1,40 \text{ m}$  olduğu için, TÇY (2016)'ya göre, yanal burulmalı burkulma sınır durumunun göz önüne alınmasına gerek yoktur,  $\phi_b M_{nx, Lb1, Cb=1,14} = 201 \text{ kNm}$ 'dur.

$L_p = 1,40 \text{ m} < L_{b2} = 2,0 \text{ m} < L_r = 4,26 \text{ m}$  olduğu için, yanal burulmalı burkulma sınır durumu göz önüne alınmalı ve TÇY (2016)'da verilen inelastik yanal burulmalı burkulma formülü kullanılmalıdır. Bunun için önce ilk akma momenti hesaplanmalıdır.

$$M_{rx} = 0,7 F_y W_{ex} = 0,7 \times 355 \times 557 \times 10^{-3} = 138 \text{ kNm}$$

Denklem (2.14)'ten, karakteristik ve tasarım eğilme momenti dayanımları

$$M_{n_x, L_{b2}, C_b=1,14} = 1,14 \times \left[ 223 - (223 - 138) \times \left( \frac{2,00 - 1,40}{4,26 - 1,40} \right) \right] = 234 \text{ kNm}$$

$$\phi_b M_{n_x, L_{b2}, C_b=1,14} = 0,9 \times 234 = 201 \text{ kNm}$$

olarak elde edilir. Ancak, tasarım dayanımı, akma sınır durumundan elde edilen tasarım dayanımını aşamayacağına göre,  $\phi_b M_{n_x, L_{b2}, C_b=1,14} = 201 \text{ kNm}$  'dur.

$L_r=4,26 \text{ m} < L_{b3}=6,0 \text{ m}$  olduğu için, yanal burulmalı burkulma sınır durumu göz önüne alınmalıdır. Bu durumda elemanın karakteristik ve tasarım eğilme momenti dayanımı, Denklem (2.15)'ten;

$$M_{n_x} = \frac{1,14 \times \pi^2 \times 200000}{\left( \frac{6000}{39,6} \right)^2} \sqrt{1 + 0,078 \frac{20,1 \times 10^4 \times 1}{557 \times 10^3 \times 289,3} \left( \frac{6000}{39,6} \right)^2} \times 557 \times 10^{-3}$$

$$M_{n_x} = 98,2 \text{ kNm} \leq M_{p_x} = 223 \text{ kNm}$$

$$\phi_b M_{n_x, L_{b3}} = 0,9 \times 98,2 = 88,4 \text{ kNm}$$

olarak bulunabilir.

Sonuç olarak, Bölüm 5.1'de önerilen tasarım tablolarından elde edilen tasarım momenti değerleri el hesaplarıyla doğrulanmıştır.

#### Örnek 4

Bu örnekte, HEA 300 enkesitli ve S355 çelik kaliteli bir eğilme elemanın gövde düzleminde tasarım kesme kuvveti dayanımı ( $\phi_v V_{ny}$ ) Bölüm 5.1'de sunulan tasarım tabloları kullanılarak belirlenecektir. HEA enkesitler için tasarım dayanımları Tablo 5.3'te sunulmuştur. Tablo 5.3 / Çizelge 3'ten, HEA 300 enkesiti ve S355 çelik kalitesi için  $\phi_v V_{ny} = 525 \text{ kN}$  olarak okunabilir (Şekil 5.6).

KUVVETLİ EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / GÖVDE DÜZLEMİNDE KESME ( $L_b \leq L_r$ DURUMU İÇİN TASARIM TABLOLARI)								
S355								
Profil	G (kg/m)	$L_p$ (m)	$L_r$ (m)	YDKT				$I_x$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^4$ )
				$\phi_b M_{px}$ (kNm)	$\phi_b M_{rx}$ (kNm)	$\phi_b BF$ (kN)	$\phi_v V_{ny}$ (kN)	
HE 100 A	16,7	1,05	5,81	26,5	16,3	2,15	102	3,49
HE 120 A	19,9	1,26	5,72	38,2	23,8	3,23	121	6,06
HE 140 A	24,7	1,47	6,04	55,4	34,8	4,53	156	10,3
HE 160 A	30,4	1,66	6,62	78,3	49,2	5,86	194	16,7
HE 180 A	35,5	2,04	6,90	103	65,7	7,61	219	25,1
HE 200 A	42,3	2,44	7,51	134	86,9	9,27	263	36,9
HE 220 A	50,5	2,69	8,09	177	115	11,5	313	54,1
HE 240 A	60,3	2,93	8,85	232	151	13,7	367	77,6
HE 260 A	68,2	3,34	9,34	284	187	16,1	399	105
HE 280 A	76,4	3,74	9,76	340	227	18,8	460	137
HE 300 A	86,5	3,98	10,5	423	282	21,7	525	183
HE 320 A	97,6	3,46	10,6	512	331	25,4	594	229

Şekil 5.6. Örnek 4 için tasarım kesme kuvveti dayanımlarının Tablo 5.3'ten okunması

Tablodan elde edilen tasarım kesme kuvveti dayanımı değeri el hesaplarıyla doğrulanabilir. Bunun için ilk olarak, HEA 300 enkesitinin  $h/t_w$  oranının belirlenen  $2,24\sqrt{E/F_y}$  değerinden küçük olup olmadığı kontrol edilmeli, küçük olması durumunda,  $\phi_v = 1,0$  ve  $C_{v1} = 1,0$  olarak alınmalıdır. Aksi durumda,  $\phi_v = 0,9$  alınmalı ve  $C_{v1}$  hesaplanmalıdır. HEA 300 enkesitinin gövde narinliğinin ve gövde alanının hesabı için profil tablosundan gövde boyutları okunmalıdır.

Enkesit Özellikleri

HEA300

$d = 290 \text{ mm}$

$h = 208 \text{ mm}$

$t_w = 8,50 \text{ mm}$

HEA300 enkesitinin gövde narinliği;

$$\frac{h}{t_w} = \frac{208}{8,50} = 24,5$$

olup, akma sınır durumu için hadde profillerinin gövdeleri için izin verilen en büyük narinlik değeri;

$$2,24\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 2,24\sqrt{\frac{200000}{355}} = 53,2$$

$$\frac{h}{t_w} = 24,5 < 2,24\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 53,2 \text{ olduğuna göre, } \phi_v = 1,0 \text{ (YDKT) ve } C_{v1} = 1,0' \text{ dir.}$$

Bu durumda, elemanın gövde düzleminde karakteristik kesme kuvveti dayanımı, akma sınır durumundan hesaplanabilir.

$$V_{ny} = 0,6 \times 355 \times (290 \times 8,5) \times 1 = 525 \text{ kN}$$

$\phi_v = 1,0$  olduğu için, bu değer aynı zamanda elemanın tasarım kesme kuvveti dayanımına da eşittir;

$$\phi_v V_{ny} = 525 \text{ kN}$$

Hesaplanan değer, Bölüm 5.1'de önerilen tasarım tablolarından elde edilen tasarım kesme kuvveti değerini doğrulamaktadır.

#### Örnek 5

Bu örnekte, HEA 300 enkesitli ve S355 çelik kaliteli bir eğilme elemanın başlıklara paralel düzlemde tasarım kesme kuvveti dayanımı ( $\phi_v V_{nx}$ ) Bölüm 5.2'de sunulan tasarım tabloları kullanılarak belirlenecektir. HEA enkesitler için tasarım dayanımları Tablo 5.3'te sunulmuştur. HEA 300 enkesiti ve S355 çelik kalitesi için,  $\phi_v V_{nx} = 1610$  kN olarak okunabilir (Şekil 5.7).

Elde edilen değerlerin el hesaplarıyla kontrol edilebilmesi için ilk olarak başlık narinliği hesaplanarak akma sınır durumunun davranışı kontrol ettiği en büyük başlık narinliği olarak tanımlanan  $1,10\sqrt{1,2E/F_y}$  sınır narinlik değeriyle karşılaştırılmalıdır;

$$\frac{b}{t_f} = \frac{300/2}{14} = 10,7 \leq 1,10\sqrt{1,2 \times \frac{200000}{355}} = 28,6 \text{ olduğuna göre, } C_{v2} = 1,0' \text{ dir.}$$

ZAYIF EKSEN ETRAFINDA EĞİLME / BAŞLIKLARA PARALEL DÜZLEMDE KESME								
Profil	G (kg/m)	S235 YDKT		S275 YDKT		S355 YDKT		I <sub>y</sub> (x10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup> )
		φ <sub>b</sub> M <sub>ny</sub> (kNm)	φ <sub>v</sub> V <sub>nx</sub> (kN)	φ <sub>b</sub> M <sub>ny</sub> (kNm)	φ <sub>v</sub> V <sub>nx</sub> (kN)	φ <sub>b</sub> M <sub>ny</sub> (kNm)	φ <sub>v</sub> V <sub>nx</sub> (kN)	
		HE 100 A	16,7	8,70	203	10,2	238	
HE 120 A	19,9	12,4	244	14,6	285	18,8	368	2,31
HE 140 A	24,7	17,9	302	21,0	353	27,1	456	3,89
HE 160 A	30,4	24,9	365	29,1	428	37,6	552	6,16
HE 180 A	35,5	33,1	434	38,7	508	49,2	656	9,25
HE 200 A	42,3	43,1	508	50,4	594	62,8	767	13,4
HE 220 A	50,5	57,2	614	67,0	719	83,3	928	19,6
HE 240 A	60,3	74,4	731	87,0	855	108	1100	27,7
HE 260 A	68,2	91,0	825	106	965	130	1250	36,7
HE 280 A	76,4	110	924	126	1080	155	1400	47,6
HE 300 A	86,5	136	1070	156	1230	192	1610	63,1
HE 320 A	97,6	150	1180	176	1380	221	1780	69,9

Şekil 5.7. Örnek 5 için tasarım kesme kuvveti dayanımlarının Tablo 5.13'ten okunması

Bu durumda, kesme etkisi altında başlık burkulması bu elemanın kesme kuvveti dayanımını belirleyen bir sınır durum değildir. Diğer bir ifadeyle,  $C_{v2}=1,0$ 'dir. Başlıklara paralel düzlemde kesme durumunda, kesme alanının iki başlık alanının toplamına eşit olduğu hatırlanarak, elemanın karakteristik kesme kuvveti dayanımı aşağıdaki gibi belirlenebilir;

$$V_{nx} = 0,6 \times 355 \times (2 \times 300 \times 14) \times 1 \times 10^{-3} = 1789 \text{ kN}$$

Başlıklara paralel düzlemde kesme durumunda, dayanım katsayısı  $\phi_v$ 'nin 0,9'a eşit olduğu hatırlanarak, elemanın tasarım kesme kuvveti dayanımı;

$$\phi_v V_{nx} = 0,90 \times 1789 = 1610 \text{ kN}$$

olarak hesaplanabilir. Bu değer, Bölüm 5.2'de önerilen tasarım tablolarından elde edilen tasarım kuvveti değerini doğrulamaktadır.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Türkiye’de çelik yapıların tasarım ilkeleri iki yıl önce yenilenmiştir. 1980 yılında Türk Standartları tarafından yayınlanarak yürürlüğe giren “Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları” (TS 648) [2] isimli çelik yapı tasarım standardı, tam 36 yıl sonra, 2016 yılında, yerini Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından hazırlanan ve 01/09/2016 tarihinde Resmi Gazetede yayınlanarak yürürlüğe giren “Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik” (TÇY,2016) [3] isimli çelik yapı tasarım yönetmeliğine bırakmıştır.

Bu tezin temel amaçlarından biri, TÇY (2016)’nın çelik yapı elemanlarının tasarımında kullanılmasına izin verdiği iki yaklaşımdan biri olan Güvenlik Katsayılarına göre Tasarım (GKT) yönteminde çelik eğilme elemanları için tanımlanan tasarım ilkeleriyle TS 648’de tanımlanan tasarım ilkelerinin karşılaştırılarak, TS 648’e göre tasarlanmış bir çelik eğilme elemanının TÇY (2016)’ya göre yeterli dayanım ve kararlılığa sahip olup olmadığının belirlenmesidir. Her ne kadar Standart ile Yönetmelik’in temel tasarım felsefeleri farklı ise de, “çalışma” yükleri altında, çelik yapı elemanlarının emniyetle taşıyabileceği kesit zorlarının “güvenli” değerlerinin her iki tasarım dokümanında verilen kurallar çerçevesinde hesaplanarak elde edilen sonuçların karşılaştırılarak TS 648’e göre tasarlanan bir çelik eğilme elemanının güçlendirilmesine gerek olup olmadığına karar verilebileceği düşünülmüştür.

Bu amaçla, 111 farklı Avrupa-tipi I-enkesitli (18 IPE, 24 HEA, 24 HEB, 24 HEM ve 21 IPN) hadde profilin (i) kuvvetli eksenleri etrafındaki eğilme momenti dayanımları, (ii) zayıf eksenleri etrafındaki eğilme momenti dayanımları, (iii) gövde düzleminde kesme kuvveti dayanımları ve (iv) başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti dayanımları, üç farklı çelik sınıfı (S235, S275 ve S355) ve farklı eleman boyları için her iki tasarım dokümanı kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Ayrıca, tasarım dokümanlarındaki temel benzerlikler ve farklılıklar da ilgili bölümlerde irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Kuvvetli eksen etrafında eğilmede, TS 648 ile TÇY (2016) arasındaki en önemli fark, TS 648’de yerel burkulma ve akma (plastik dayanıma ulaşma) sınır durumlarının tasarıma dahil edilmemesidir. I-enkesitli hadde profillerinin

hesabında, TS 648'de enkesit sınıflandırması yapılmamaktadır. Buna karşın, TÇY (2016)'da tasarım dayanımının belirlenebilmesi için ilk olarak enkesit sınıflandırılması yapılmalıdır. Tezin kapsamında incelenen bütün enkesitlerin TÇY (2016)'ya göre sınıflandırması yapıldığında, hiç bir enkesitin gövdesinin incelenen hiç bir çelik kalitesinde narin hatta kompakt olmayan çıkmadığı görülmüştür; diğer bir ifadeyle, incelenen enkesitlerin tamamının gövdeleri kompakttır. Benzer şekilde, S235 çelik kalitesinde, incelenen bütün enkesitlerin başlıkları da kompakt olarak belirlenmiştir. Diğer çelik kaliteleri de dikkate alındığında, ele alınan enkesitlerin hiç birinin narin başlıklı olmadığı; ancak S275 ve S355 çelik kalitelerinde üretilen bazı HEA enkesitlerinin başlıklarının kompakt olmayan sınıfına dahil olduğu görülmüştür. S275 çelik kalitesi için, üç (numaraları 260, 280 ve 300 olan) HEA enkesitinin, S355 çelik sınıfı için ise dokuz (numaraları 180 ila 340 arasında olan) HEA enkesitinin başlıkları kompakt olmayan sınıfındadır. Bu tip elemanlarda, yanal burkulma tehlikesinin olmadığı durumlarda, elemanın davranışını elastik olmayan yerel başlık burkulması belirlemektedir.

- Yanal burkulma tehlikesi olmayan elemanlarda, kuvvetli ekseninde eğilme momenti dayanımı açısından, tezin kapsamında incelenen kompakt olmayan başlıklı enkesitler de dahil olmak üzere tüm enkesit ve çelik kalitelerinde, TS 648 daha güvenli tarafta kalmaktadır. Yanal burkulma tehlikesi olan elemanlarda ise, TS 648'in çoğu eleman boylarında güvenli kaldığı ancak bazı eleman boylarında TÇY (2016)'dan daha büyük emniyetli dayanımlar hesaplattığı belirlenmiştir. TS 648'in TÇY(2016)'ya kıyasla güvensiz tarafta kaldığı eleman boyları, enkesit türüne ve çelik kalitesine bağlıdır. Bununla birlikte, tezin kapsamında incelenen bütün enkesit, çelik kaliteleri ve eleman burkulma boyları ( $L_b \leq 20$  m) için, TS 648'e göre hesaplanan emniyetli eğilme momenti dayanımının, TÇY (2016)'ya göre hesaplanan güvenli eğilme momenti dayanımından en çok %13 fazla olduğu belirlenmiştir.
- Zayıf ekseninde eğilme etkisindeki elemanlar için, TS 648'de özel tasarım kriterleri bulunmamaktadır. Buna karşın, bu tip elemanların tasarımında TÇY (2016)'da iki sınır durum dikkate alınmaktadır: "sınırlandırılmış" akma ve yerel başlık burkulması. Güçlü ekseninde eğilmede olduğu gibi, TÇY (2016)'ya göre tasarım yapabilmek için ilk olarak enkesitin başlıklarının sınıflandırılması gerekmektedir. Enkesit sınıflandırmasında kullanılan sınır değerler karşılaştırıldığında, zayıf ekseninde eğilme durumu için tanımlanan değerlerin güçlü ekseninde eğilme durumundakilerle aynı olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, zayıf ekseninde eğilme etkisindeki elemanların başlık sınıfları güçlü ekseninde eğilme durumuna göre



belirlenen sınıflarla aynıdır. Diğer bir ifadeyle, zayıf ekseninde eğilme durumunda, incelenen hiç bir çelik kalitesinde, narin başlıklı enkesit olmamakla birlikte, S275 ve S355 çelik kalitelerinde bazı HEA enkesitleri kompakt olmayan sınıfındadır. TÇY (2016)'da, kompakt enkesitli elemanlarda her ne kadar enkesitin plastik moment dayanımına ulaşacağı kabul edilse de, elemandaki şekil değiştirmeleri sınırlandırmak amacıyla elde edilen dayanım değerinin akma momentinin 1,6 katının üstüne çıkması engellenmiştir. İncelenen enkesitler arasında yalnız IPN enkesitlerin şekil faktörleri 1,6'dan büyük olduğu için, akma sınır durumunda eleman dayanımı bu üst sınır değerle belirlenmektedir. Zayıf ekseninde eğilme momenti dayanımı açısından, tezin kapsamında incelenen, kompakt olmayan başlıklı enkesitler de dahil olmak üzere, bütün enkesit ve çelik kalitelerinde, TS 648'in TÇY (2016)'ya göre daha güvenli tarafta kaldığı belirlenmiştir.

- TS 648'de gövde düzleminde kesme etkisindeki I-enkesitli hadde profilleri için özel tasarım kriterleri tanımlanmamıştır. Genel mukavemet ilkeleri kullanılarak, elemandaki en büyük kayma gerilmesinin hesaplanıp kayma emniyet gerilmesiyle karşılaştırılması istenmektedir. Pratikte, Türkiye'de I-enkesitli hadde elemanlarında TS 648'e göre kesme kontrolü yapılırken kayma gerilmelerinin iki farklı yöntemle hesaplandığı belirlenmiştir. Bu yöntemlerden ilki gövde alanı kullanılarak ortalama kayma gerilmesi hesabıdır. Diğerinde ise genel kayma gerilmesi formülü kullanılmasıdır. Bu tezde eleman dayanımları her iki yöntem kullanılarak da hesaplanmıştır. Diğer taraftan, TÇY (2016)'da gövde düzlemindeki kesme kuvveti etkisindeki elemanlarda iki sınır durum dikkate alınmaktadır: akma ve gövdenin burkulması. Tezin kapsamında incelenen tüm enkesit ve çelik kalitelerinde, hiç bir enkesitin gövde narinliğinin TÇY (2016)'da verilen sınır narinlikten büyük çıkmadığı dikkate alındığında, incelenen bütün enkesitlerin kesme kuvveti dayanımlarının akma sınır durumundan ( $C_{v1}=1$ ) hesaplandığı belirlenmiştir. İncelenen tüm enkesit ve çelik kalitelerinde, TS 648'den elde edilen emniyetli kesme kuvveti dayanımları TÇY (2016)'dan elde edilen güvenli kesme kuvveti dayanımlarıyla karşılaştırıldığında, farklı kayma gerilmesi tanımları kullanıldığında dahi, gövde düzleminde kesme etkisindeki I-enkesitli hadde elemanlarının tasarımında, TS 648'in daha güvenli tarafta kaldığı belirlenmiştir.
- Başlıklarına paralel düzlemde kesme etkisindeki elemanlar için de TS 648'de özel tasarım kriterleri bulunmamaktadır. Buna karşın, TÇY (2016)'da tasarım hesaplarında iki sınır durum dikkate alınmaktadır: akma ve başlıkların burkulması. Gövde düzleminde kesme durumunda olduğu gibi, elemanın kesme davranışını hangi sınır durumunun belirlediğini bulmak için ilk olarak enkesitin başlık narinliği

hesaplanarak ilgili çelik kalitesi için hesaplanan sınır narinlik değeriyle karşılaştırılmalıdır. Tezin kapsamında incelenen tüm enkesit ve çelik kalitelerinde, hiç bir enkesitin başlık narinliği TÇY (2016)'da verilen sınır narinlikten büyük çıkmadığı için, incelenen bütün enkesitlerin kesme kuvveti dayanımlarının akma sınır durumundan ( $C_{v2}=1$ ) hesaplandığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, incelenen tüm enkesit ve çelik kalitelerinde, TS 648'den elde edilen emniyetli kesme kuvveti dayanımları TÇY (2016)'dan elde edilen güvenli kesme kuvveti dayanımlarıyla karşılaştırıldığında, başlıklarına paralel düzlemde kesme etkisindeki I-enkesitli hadde elemanların tasarımında, TS 648'in daha güvenli tarafta kaldığı belirlenmiştir.

Bu tezin ikinci temel amacı, Türkiye'de çelik yapı tasarımı yapan yapı mühendislerinin çelik eğilme elemanlarının TÇY (2016)'ya göre tasarımında kullanabilecekleri pratik tasarım tabloları oluşturmaktır. Tasarımcıların yönetmelikte tanımlanan ve oldukça yoğun işlem gerektiren tasarım denklemlerini kullanmaksızın uygun ve ekonomik kesitler seçmesini sağlayacak bu tabloların çelik eğilme elemanlarının tasarımını oldukça kolaylaştıracağı düşünülmektedir. Bu amaçla, içerikleri ve kullanımları farklı üç grup tasarım tablosu oluşturulup tezde sunulmuştur. Tablolarda yalnız Yük ve Dayanım Katsayılarına göre Tasarım (YDKT) için gerekli tasarım dayanımları listelenmiş olup, GKT yöntemine göre tasarım yapılacağı durumda, tasarım dayanımları 1,50 değerine bölünerek güvenli dayanımlar elde edilebilmektedir. Birinci grup tasarım tablolarında, kuvvetli eksenleri etrafında eğilme ve/veya gövde düzleminde kesme etkisindeki I-enkesitli Avrupa hadde profillerin tasarım eğilme momenti ( $\phi_b M_{nx}$ ) dayanımlarının hesabı için gerekli iki değerle ( $\phi_b M_{nx}$  ve  $\phi_b BF$ ) tasarım kesme kuvveti ( $\phi_b V_{ny}$ ) dayanımları listelenmektedir. Ayrıca, bu tablolarda, ilgili enkesit ve çelik kalitesi için,  $L_r$  ve  $L_p$  sınır değerleri de sunulmuştur. Ancak, bu tablolar, sadece  $L_b \leq L_r$  durumunda kullanılabilir.  $L_b > L_r$  olan eğilme elemanlarının tasarımı,  $L_b$  değerinin metre cinsinden tam değer olması koşuluyla, önceden belirlenen üst sınır boy değerine kadar boyda sınırlama olmaksızın her boydaki eleman için hazırlanan ikinci grup tasarım tabloları kullanılarak yapılabilir. Elemanın boyunun tam değer olmadığı durumlarda,  $L_b$  değerinin bir üst tam sayıya yuvarlanarak kullanılması önerilmektedir. Elemanın boyunun metre cinsinden tam değer olduğu durumlarda, bu tablolardan eğilme momenti dayanımı belirlenmesi birinci grup tablolara kıyasla daha kolaydır. Üçüncü ve son grup tablolarda ise zayıf eksenleri etrafında eğilme ve/veya başlıklarına paralel düzlemde kesme etkisindeki I-enkesitli Avrupa hadde profillerin tasarım eğilme momenti ( $\phi_b M_{ny}$ ) dayanımlarıyla tasarım kesme kuvveti ( $\phi_b V_{nx}$ )

dayanımları listelenmektedir. Sunulan tasarım tablolarının tasarımcıya sağladığı önemli kolaylıklardan biri de, tasarımcının enkesit sınıflandırması yaparak yerel burkulma sınır durumunu ayrıca kontrol etmesine gerek olmamasıdır. Kuvvetli eksen etrafında tasarım eğilme momenti dayanımı belirlenirken, tablolardan okunan değerlerde momentin elemandaki yayılışının elemanın dayanımına olan olumlu katkısının dahil edilmediği, yani  $C_b=1$  kabul edildiği, unutulmamalıdır. Tablolardan okunan değerlere  $C_b$ 'nin etkisinin nasıl dahil edileceği tezin son bölümünde verilen bir örnekte gösterilmiştir. Aynı bölümde, tasarım tablolarından okunan değerlerin el hesaplarıyla doğrulamaları da yapılmıştır.



## KAYNAKLAR

- [1] TS 648, Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, 1. Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1980.
- [2] TÇY (2016), Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, 2016.
- [3] AISC (1989), Specification for Structural Steel Buildings: Allowable Stress Design and Plastic Design, *American Institute of Steel Construction*, Chicago, 1989.
- [4] DBYBHY (2007), Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2007.
- [5] AISC (2016), Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-16, *American Institute of Steel Construction*, Chicago, 2016.
- [6] Williams A., *Steel Structure Design: ASD/LRFD*, 1st Edition, McGraw-Hill Education, New York, 2011.
- [7] Albaine J. M., *Design of Beams and Other Flexural Members per AISC LRFD 3rd Edition (2001)*, PDH Online | PDH Center, Virginia, 2012.
- [8] Martin L. H., Purkiss J. A., *Structural Design of Steelwork to EN1993 and EN1994*, 3rd Edition, Elsevier, Oxford, 2008.
- [9] ESDEP Courses, University of Ljubljana, Ljubljana, <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/esdep/media/wg07/f0510012.jpg> (Ziyaret Tarihi: 04 Temmuz 2017).
- [10] Galambos T. V., Surovek A. E., *Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineering*, 1st Edition, John Wiley and Sons Inc, New Jersey, 2008.
- [11] Akkaş N., Yılmaz Ç., *Analysis and Design of Steel Structures*, 1st Edition, Middle East Technical University, Ankara, 1985.
- [12] Aghayere A. O., Vigil J., *Structural Steel Design: A Practive-Oriented Approach*, 1st Edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2009.
- [13] Mississippi State University, Department of Aerospace Engineering, Tutorial Page of Aerospace Structures (TuPAS), Mississippi, [http://www.ae.msstate.edu/tupas/SA2/chA14.6\\_text.html](http://www.ae.msstate.edu/tupas/SA2/chA14.6_text.html), (Ziyaret Tarihi: 01 Haziran 2017).
- [14] Subramanian N., *Steel Structures: Design and Practice*, 1st Edition, Oxford University Press, Oxford, 2011.

- [15] Kulak G. L., Grondin G. Y., *Limit States Design in Structural Steel*, 8th Edition, Canadian Institute of Steel Construction, Ontario, 2006.
- [16] Quimby T. B., A Beginner's Guide to the Steel Construction Manual: Designing with the 14th Edition, August 2011, <http://www.bgstructuralengineering.com/BGSCM14/BGSCM006/BGSCM00603.htm>, (Ziyaret Tarihi: 04 Haziran 2017).
- [17] Çuhadaroğlu S. P., Çelik Yapılar I, Lisans Ders Notları, *Kocaeli Üniversitesi*, Kocaeli, 2017.
- [18] TS 498, Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, 2. Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1997.
- [19] Aydınoğlu N., Özer E., Sucuoğlu H., *Yeni Deprem Yönetmeliği ve Uygulamalı Çözümler*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Antalya Şubesi, Yayın No: 3, 2007.
- [20] Steel Construction Manual 14, *American Institute of Steel Construction*, Chicago, 2014.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Çuhadaroğlu S. P., **Nasrat M. S.**, A Comparative Study on Former and New Turkish Design Guidelines for Steel Flexural Members, *III. International Construction Engineering Conference*, Istanbul, 03-04 Kasım 2016.



## ÖZGEÇMİŞ

13 Ekim 1989 tarihinde Herat'ta doğdu. 2002 yılında Aryana Lisesi okulunu kazanıp 2007 yılında mezun oldu. 2008 yılında Türkiye Bursları sınavını geçip %100 burslu ve birincilikle Türkiye'de üniversite okumaya hak kazandı. 2008 yılının sonunda Türkiye'ye gelip Bursa şehrinde bir sene Türkçe hazırlık (TÖMER) okuduktan sonra 2009 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Bölümünü kazanıp lisans derecesini 2014 yılında aldı. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Anabilim Dalı'nda Doç. Dr. Seval Pınarbaşı Çuhadaroğlu yönetiminde yüksek lisans çalışmasına başladı. Aynı yıl birçok dalda faaliyet gösteren uluslararası inşaat firması State Corps Turkey'de inşaat mühendisi olarak çalışmaya başladı. Bu süre zarfında, teklif ve ihale mühendisi, teknik ofis ve planlama mühendisi olarak birçok İstanbul projeleri ve yurtdışı projelerinde aktif rol oynadı.