

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BASINÇ ETKİSİNDEKİ I-KESİTLİ ÇELİK HADDE ELEMANLARIN  
TASARIM KURALLARININ İNCELENMESİ VE TASARIM  
TABLOLARININ HAZIRLANMASI**

**EMİN ERGİN**

**KOCAELİ 2020**

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BASINÇ ETKİSİNDEKİ I-KESİTLİ ÇELİK HADDE ELEMANLARIN  
TASARIM KURALLARININ İNCELENMESİ VE TASARIM  
TABLOLARININ HAZIRLANMASI

EMİN ERGİN

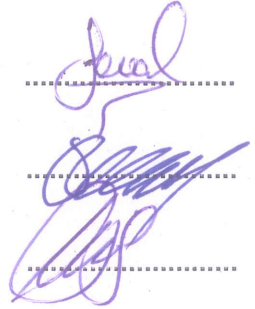
Doç. Dr. Seval PINARBAŞI ÇUHADAROĞLU  
Danışman, Kocaeli Üniv.

Doç. Dr. Fuad OKAY

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Dr. Öğr. Üyesi Melis TAŞKIN

Jüri Üyesi, Süleyman Demirel Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 24.01.2020

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tezde, basınç etkisindeki I-enkesitli çelik hadde elemanlar için, 2016 yılında yürürlüğe giren ve AISC 360-16 yönetmeliği temel alınarak hazırlanan “Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik” (ÇYTHYEY)’de tanımlanan tasarım kuralları, 2016 yılına kadar ülkemizde yürürlükte olan çelik yapı tasarım standardı (TS 648) ile Amerikan çelik yönetmeliğinin bir önceki baskısında (AISC 360-10) tanımlanan tasarım ilkeleriyle karşılaştırılarak aralarındaki benzerlik ve farklılıklar ortaya konmuştur. Ayrıca, ülkemizde çelik yapı tasarımı yapan mimar ve mühendislerin yenilenen yönetmelik çerçevesinde kolayca kullanabilecekleri pratik tasarım tabloları oluşturulmuştur.

Kocaeli Üniversitesi’nde başladığım tahsil hayatım boyunca ve bilhassa bu tez çalışmasında hiçbir yardımını esirgemeyen, çalışmalarıyla sadece bana değil derslerine katılan tüm öğrencilere azim aşıl原因an, saygıdeğer hocam Doç. Dr. Seval Pınarbaşı Çuhadaroğlu’na canı gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Ömrüm boyunca maddi ve manevi açıdan desteğini esirgemeyen, her daim yanımda olan değerli aileme ve sevgili eşim Merve Ergin’e sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Ocak – 2020

Emin ERGİN

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
GİRİŞ.....	1
1. EKSENEL BASINÇ ETKİSİNDEKİ ÇELİK YAPI ELEMANLARINDA EĞİLMELİ BURKULMA.....	5
1.1. Burkulma Teorisi.....	6
1.1.1. Elastik burkulma yükü ve gerilmesi.....	7
1.1.2. Elastik olmayan burkulma yükü ve gerilmesi.....	9
1.2. Kritik Burkulma Yükü ve Gerilmesi.....	11
1.3. Etkin Burkulma Boyu.....	12
1.4. Davranışa Etki Eden Diğer Faktörler.....	14
1.4.1. Artık gerilmelerin basınç davranışına etkisi.....	15
1.4.2. Başlangıç eğriliğinin basınç davranışına etkisi.....	16
1.4.3. Yükteki dış merkezliliğin basınç davranışına etkisi.....	17
2. ÇELİK BASINÇ ELEMANLARININ BAŞLICA SINIR DURUMLARI.....	19
2.1. Akma Sınır Durumu.....	19
2.2. Genel Burkulma Sınır Durumları.....	20
2.2.1. Eğilmeli burkulma sınır durumu.....	20
2.2.2. Burulmalı burkulma sınır durumu.....	21
2.2.3. Eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumu.....	22
2.3. Yerel Burkulma Sınır Durumu.....	23
3. I-KESİTLİ ÇELİK BASINÇ ELEMANLARI İÇİN ÇYTHYEV'DE TANIMLANAN TASARIM ESASLARI.....	26
3.1. Tasarım Yaklaşımları.....	26
3.2. Basınç Etkisindeki I-kesitli Hadde Profiller için Tasarım Kuralları.....	27
3.2.1. Akma sınır durumu.....	28
3.2.2. Genel burkulma sınır durumu.....	29
3.2.3. Yerel burkulma sınır durumu.....	31
4. I-KESİTLİ ÇELİK BASINÇ ELEMANLARI İÇİN AISC 360-10 VE AISC 360-16'DA TANIMLANAN TASARIM ESASLARI.....	35
5. I-KESİTLİ ÇELİK BASINÇ ELEMANLARI İÇİN TS 648'DE TANIMLANAN TASARIM ESASLARI.....	39
6. BASINÇ ETKİSİNDEKİ I-KESİTLİ ÇELİK HADDE ELEMANLARIN TASARIMI İÇİN FARKLI YÖNETMELİK VE STANDARTLARDA TANIMLANAN ESASLARININ KARŞILAŞTIRILMASI.....	42
6.1. Kesitlerin Sınıflandırılması.....	43
6.2. TS 648 ve ÇYTHYEV'ye Göre Hesaplanan Dayanımların Karşılaştırılması.....	47
6.3. AISC 360-10 ve AISC 360-16 Göre Hesaplanan Dayanımların Karşılaştırılması.....	59
7. BASINÇ ETKİSİNDEKİ I-KESİTLİ ÇELİK HADDE PROFİLLERİ İÇİN PRATİK TASARIM TABLOLARI.....	66
7.1. Örnek 1.....	79

7.2. Örnek 2 .....	82
7.3. Örnek 3 .....	83
7.4. Örnek 4 .....	85
7.5. Örnek 5 .....	87
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	90
KAYNAKLAR .....	93
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	95
ÖZGEÇMİŞ .....	96



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Eksenel yük etkisi altında çelik basınç elemanı (a) Uzun ve narin eleman (b) Kısa ve narin olmayan eleman.....	5
Şekil 1.2.	Eulerin çalışmasında incelediği kolonun mesnet koşulları.....	6
Şekil 1.3.	n'nin farklı değerleri için burkulma modları.....	8
Şekil 1.4.	Teğet modülü $E_T$ 'nin tanımı .....	10
Şekil 1.5.	Farklı L/i oranlarına sahip basınç elemanları için deneysel olarak elde edilen burkulma yüklerinin Euler yüklerinden sapma miktarları .....	11
Şekil 1.6.	Kritik burkulma gerilmesi ile narinlik ilişkisi.....	12
Şekil 1.7.	Farklı mesnet koşulları için etkili boy (KL) (a) İki ucu mafsallı (b) İki ucu ankastre (c) Bir ucu mafsallı diğer ucu ankastre (d) İki ucun hareketi kısmen kısıtlanmış (e) Bir ucu ankastre diğer ucu ötelemeye serbest (f) Bir ucu ankastre diğer ucu serbest (g) Bir ucun hareketi kısmen kısıtlanmış diğer uç serbest boşluk.....	13
Şekil 1.8.	Etkin burkulma boyu katsayısı (K) için nomogramlar .....	14
Şekil 1.9.	Çelik profillerde tipik artık gerilme dağılımları.....	15
Şekil 1.10.	Kısa ve tok kesitli bir çelik elemanın basınç davranışına artık gerilmelerin etkisi.....	16
Şekil 1.11.	Çelik basınç elemanında başlangıç eğriliğinin etkisi .....	17
Şekil 1.12.	Çelik basınç elemanında yükteki dış merkezliliğin etkisi .....	17
Şekil 2.1.	Yapısal çeliğin tipik gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	20
Şekil 2.2.	Çift simetri eksenli I-profilinde eğilmeli burkulma (a) Zayıf eksen etrafında eğilmeli burkulma (b) Güçlü eksen etrafında eğilmeli burkulma.....	21
Şekil 2.3.	+ enkesitli bir yapma profilde burulmalı burkulma .....	21
Şekil 2.4.	Basınç elemanlarında gözlenen genel burkulma şekillerinin karşılaştırılması (a) Eğilmeli burkulma sınır durumu (b) Burulmalı burkulma sınır durumu (c) Eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumu ...	22
Şekil 2.5.	Eksenel basınç kuvveti altında bir I profilde gözlenen yerel başlık burkulması.....	23
Şekil 2.6.	Rijitleştirilmemiş kesit parçaları.....	24
Şekil 2.7.	Rijitleştirilmiş kesit parçaları.....	25
Şekil 3.1.	I-enkesitli bir hadde elemanında (a) rijitleştirilmemiş başlık (b) rijitleştirilmiş gövde parçalarının genişlik ve kalınlıklarının tanımlanması .....	32
Şekil 6.1.	Tipik (a) narin olmayan (b) narin enkesitli basınç elemanları için dayanım eğrilerinin karşılaştırılması.....	47
Şekil 6.2.	Farklı çelik kalitelerine sahip (a) narin olmayan (b) narin enkesitli basınç elemanları için tipik dayanım oranı eğrileri.....	50
Şekil 6.3.	Farklı çelik kalitelerine sahip IPE ve IPN kesitli basınç elemanları için dayanım oranı eğrileri.....	53
Şekil 6.4.	Farklı çelik kalitelerine sahip HEA ve HEB kesitli basınç elemanları için dayanım oranı eğrileri.....	54
Şekil 6.5.	Farklı çelik kalitelerine sahip HEM ve HP kesitli basınç elemanları için dayanım oranı eğrileri.....	55
Şekil 6.6.	Farklı çelik kalitelerine sahip HD kesitli basınç elemanları için dayanım oranı eğrileri.....	56

Şekil 6.7.	Narin kesitli basınç elemanları için AISC 360-16 ve AISC 360-10'a göre belirlenen tipik dayanım eğrilerinin karşılaştırılması .....	61
Şekil 6.8.	Narin başlıklı iki profilin, AISC 360-16'ya göre hesaplanan etkin alanların narinlikle değişimi.....	62
Şekil 6.9.	Narin gövdeli iki profilin AISC 360-16 ve AISC 360-10'a göre hesaplanan etkin alanların karşılaştırılması .....	62
Şekil 6.10.	Narin başlıklı HP ve HD profillerin AISC 360-16 ve AISC 360-10'a göre hesaplanan dayanım oranlarının eleman narinliğiyle değişimi .....	63
Şekil 6.11.	Narin gövdeli IPE ve HEM profillerin AISC 360-16 ve AISC 360-10'a göre hesaplanan dayanım oranlarının eleman narinliğiyle değişimi .....	64
Şekil 6.12.	Narin gövdeli HEA ve HEB profillerin AISC 360-16 ve AISC 360-10'a göre hesaplanan dayanım oranlarının eleman narinliğiyle değişimi .....	65



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Sıcak haddelenmiş yapısal çeliklerde karakteristik akma gerilmesi ( $F_y$ ) ve çekme dayanımı ( $F_u$ ).....	28
Tablo 3.2. ÇYTHYEY Tablo 5.1A'da eksenel basınç kuvveti etkisindeki I-kesitli hadde profiller için tanımlanan sınır narinlikler .....	32
Tablo 3.3. ÇYTHYEY Tablo 8.2'ye göre, narin enkesit parçalarında etkin genişlik hata düzeltme katsayıları .....	34
Tablo 6.1. Tezde incelenen I-kesitli hadde profilleri .....	42
Tablo 6.2. TS EN 10025-2'de yapısal çelik elemanlar için akma gerilmeleri .....	43
Tablo 6.3. Tezde incelenen kesitlerin başlık ve gövde narinliklerinin ilgili kesit grubu içindeki en büyük değerleri ( $\lambda_{f,max}$ ile $\lambda_{w,max}$ ).....	44
Tablo 6.4. ÇYTHYEY'de eksenel basınç kuvveti etkisindeki I-kesitli hadde profillerin başlık ve gövdeleri için tanımlanan sınır narinliklerin farklı çelik sınıfları için değerleri.....	44
Tablo 6.5. ÇYTHYEY'ye göre kesiti narin olan profiller ve bu profillerin $L_c/i=1$ değeri için etkin kesit alanlarının kayıpsız kesit alanlarına oranı .....	45
Tablo 7.1. S235 çelik kalitesi için IPE ve IPN profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları.....	67
Tablo 7.2. S235 çelik kalitesi için HEA ve HEB profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları.....	68
Tablo 7.3. S235 çelik kalitesi için HEM ve HP profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları.....	69
Tablo 7.4. S235 çelik kalitesi için HD profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları.....	70
Tablo 7.5. S275 çelik kalitesi için IPE ve IPN profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları.....	71
Tablo 7.6. S275 çelik kalitesi için HEA ve HEB profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları.....	72
Tablo 7.7. S275 çelik kalitesi için HEM ve HP profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları.....	73
Tablo 7.8. S275 çelik kalitesi için HD profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları.....	74
Tablo 7.9. S355 çelik kalitesi için IPE ve IPN profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları.....	75
Tablo 7.10. S355 çelik kalitesi için HEA ve HEB profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları.....	76
Tablo 7.11. S355 çelik kalitesi için HEM ve HP profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları.....	77
Tablo 7.12. S355 çelik kalitesi için HD profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları.....	78
Tablo 7.13. HE 400 A profili için kesit özellikleri.....	79
Tablo 7.14. HE 400 A profili örnek 1 için karşılaştırma tablosu .....	81
Tablo 7.15. HE 400 A profili örnek 2 için karşılaştırma tablosu .....	83
Tablo 7.16. IPE 600 profili için kesit özellikleri .....	83
Tablo 7.17. IPE 600 profili örnek 3 için karşılaştırma tablosu.....	86
Tablo 7.18. IPE 600 profili örnek 4 için karşılaştırma tablosu.....	88
Tablo 7.19. HE 400 A profili örnek 5 için karşılaştırma tablosu .....	89



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Enkesit alanı
$A_e$	: Etkin alan
$A_{ew}$	: Gövdenin etkin alanı
$A_g$	: Kayıpsız enkesit alanı
$A_{gw}$	: Gövdenin kayıpsız enkesit alanı
$C_w$	: Çarpılma sabiti
D	: Çap
E	: Yapısal çeliğin elastisite modülü
$E_{cI_c}$	: Kolon enkesitinin eğilme rijitliği
$E_{gI_g}$	: Kiriş enkesitinin eğilme rijitliği
$E_T$	: Teğet modülü
$F_{artık}$	: Artık gerilmeler
$F_{cr}$	: Kritik burkulma gerilmesi
$F_e$	: Elastik burkulma gerilmesi
$F_{el}$	: Yerel elastik burkulma gerilmesi
$F_{ex}$	: x-ekseni etrafında elastik burkulma gerilmesi
$F_{ey}$	: y-ekseni etrafında elastik burkulma gerilmesi
$F_{ez}$	: z-ekseni etrafında elastik burkulma gerilmesi
$F_{pl}$	: Elastik sınır
$F_T$	: Elastik olmayan burkulma gerilmesi
$F_u$	: Yapısal çelik karakteristik çekme dayanımı
$F_u$	: Yapısal çelik karakteristik kopma gerilmesi
$F_y$	: Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi
G	: Yapısal çelik kayma modülü
G	: Kolonun uçlarına bağlanan elemanların rijitlik oranları
$G_A$	: Kolonun üst ucuna bağlanan elemanların rijitlik oranları
$G_B$	: Kolonun alt ucuna bağlanan elemanların rijitlik oranları
I	: Atalet momenti
$I_x, I_y$	: Asal eksenlere göre atalet momentleri
J	: Burulma sabiti
K	: Etkin burkulma boyu katsayısı
L	: Eleman boyu
$L_c$	: Etkin burkulma boyu, Etkili boy
$L_{cx}$	: x-ekseni etrafındaki etkin burkulma boyu
$L_{cy}$	: y-ekseni etrafındaki etkin burkulma boyu
$L_{cz}$	: z-ekseni etrafındaki etkin burkulma boyu
$L_g$	: Kiriş boyu
M	: Eğilme momenti
Q	: Net alan azaltma katsayısı
$Q_a, Q_s$	: Azaltma katsayıları
P	: Eksenel basınç kuvveti
$P_{cr}$	: Kritik burkulma yükü
$P_e$	: Elastik burkulma yükünü
$P_{em}$	: Emniyetli eksenel basınç kuvveti dayanımı
$P_{max}$	: Elemanın taşıyabileceği en büyük basınç kuvveti
$P_n$	: Karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı
$P_n/\Omega_c$	: Güvenli basınç kuvveti dayanımı

$P_T$	: Elastik olmayan burkulma yükü
$P_y$	: Akma yükü
$R_a$	: GKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanım
$R_n$	: Yapısal çelik elemanların karakteristik dayanımları
$R_n/\Omega$	: Güvenli dayanım
$R_u$	: YDKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanım
$b$	: Enkesitin basınç parçasının genişliği
$b_f$	: Başlık genişliği
$b_{fe}$	: Narin başlık parçasının etkin genişliği
$b_e$	: Narin enkesit parçasının etkin genişliği
$c_1, c_2$	: Etkin genişlik hata düzeltme katsayıları
$d$	: Enkesit yüksekliği
$e$	: Dış merkezlik
$h$	: Düz gövde yüksekliği
$h_e$	: Narin gövde parçasının etkin genişliği
$i$	: Atalet yarıçapı
$i_x$	: x-eksenine göre atalet yarıçapı
$i_y$	: y-eksenine göre atalet yarıçapı
$n$	: Burkulma modu sayısı
$n$	: Emniyet katsayısı
$r$	: Atalet yarıçapı
$t$	: Kalınlık
$t_f$	: Başlık kalınlığı
$t_w$	: Gövde kalınlığı
$\varepsilon$	: Birim şekil değiştirme
$\Omega_c$	: GKT için güvenlik katsayısı
$\lambda$	: Eleman parçasının narinliği
$\lambda$	: TS 648 için eleman narinliği
$\lambda_f$	: Enkesitin başlık parçasının narinliği
$\lambda_{f,max}$	: İncelenen enkesit grubu için en büyük başlık narinlik sınır değeri
$\lambda_p$	: TS 648 için narinlik sınır değeri
$\lambda_r$	: Enkesit sınıflandırılmasında kullanılan narinlik sınır değerleri
$\lambda_{rf}$	: Başlık parçası için narinlik sınır değeri
$\lambda_{rw}$	: Gövde parçası için narinlik sınır değeri
$\lambda_w$	: Enkesitin gövde parçasının narinliği
$\lambda_{w,max}$	: İncelenen enkesit grubu için en büyük gövde narinlik sınır değeri
$\sigma_a$	: Akma gerilmesi
$\sigma_{bem}$	: Basınç emniyet gerilmesi
$\sigma_{max}$	: Elemanda oluşan en büyük gerilme
$\sigma_{pl}$	: Plastik gerilme
$\sigma_{çem}$	: Çekme emniyet gerilmesi
$\phi_c$	: YDKT için dayanım katsayısı
$\phi R_n$	: Tasarım dayanımı
$\phi_c P_n$	: Tasarım basınç kuvveti dayanımı
$\Delta$	: Yer değiştirme
$\Delta_0$	: Yer değiştirme olmadan önceki durum

## Kısaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AISC	: American Institute of Steel Construction (Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü)
ASD	: Allowable Stress Design (Güvenlik Katsayıları ile Tasarım)
ÇYTHYAY	: Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik
EGT	: Emniyet Gerilmelerine Göre Tasarım
GKT	: Güvenlik Katsayılarına Göre Tasarım
LRFD	: Load and Resistance Factor Design (Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım)
SDCSS	: Specification for Design and Construction of Steel Structures (Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik)
TBDY	: Türk Bina Deprem Yönetmeliği - Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar
TS	: Türk Standartları
YDKT	: Yük ve Dayanım Katsayılarına Göre Tasarım

## **BASINÇ ETKİSİNDEKİ I-KESİTLİ ÇELİK HADDE ELEMANLARIN TASARIM KURALLARININ İNCELENMESİ VE TASARIM TABLOLARININ HAZIRLANMASI**

### **ÖZET**

Ülkemizde yapısal çelik tasarımında 36 yıl boyunca kullanılan, ancak geçen süre zarfında hiçbir güncelleme yapılmadığı için modern yönetmeliklerin gerisinde kalan “TS 648: Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları” başlıklı standart, üç yıl önce yerini aynı yıl Amerika’da yayımlanan “AISC 360-16: Specification for Structural Steel Buildings (Yapısal Çelik Binalar için Yönetmelik)” başlıklı yönetmeliğe dayandırılarak hazırlanan ulusal bir yönetmelik olan “Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik”e (ÇYTHYEY) bırakmıştır. Bu tezde, eksenel basınç kuvveti etkisindeki I-kesitli çelik hadde profiller için ÇYTHYEY ve TS 648’de tanımlanan tasarım esasları karşılaştırılarak, tasarımı TS 648’e göre yapılmış olan I-kesitli bir basınç elemanının ÇYTHYEY’ye göre uygunluğu ve yeterliliği kontrol edilmiştir. Tezde ayrıca, narin enkesitli basınç elemanlarının tasarım esaslarının yürürlükteki Amerikan çelik bina tasarım yönetmeliğinde tamamen yenilediği dikkate alınarak, AISC 360-16’a göre hesaplanan dayanımlar, bir önceki Amerikan yönetmeliği olan AISC 360-10’a göre hesaplanan dayanımlarla karşılaştırılmış; böylece, narin enkesitli basınç elemanlarının tasarımı açısından, iki yönetmelik arasındaki farklılıklar da ortaya konmuştur. Tezde, çelik yapı tasarımına yönelik mimar ve mühendislerin, ülkemizde yaygın şekilde kullanılan I-kesitli çelik hadde profillerin tasarımında kullanabilecekleri pratik tasarım tabloları da oluşturulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (ÇYTHYEY), I-Kesitli Hadde Profiller, Narin Enkesitli Basınç Elemanları, Tasarım Basınç Kuvveti Dayanımı Tabloları, TS 648.

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

### **ABSTRACT**

The standard "TS 648: Building Code for Steel Structures" had been used for structural steel design in our country for 36 years. However, this design standard has fallen behind most modern specifications since it was not updated after its publication. For this reason, three years ago, it was superseded by a national specification named Specification for Design and Construction of Steel Structures (SDCSS) prepared based on the specification published in United States (AISC 360-16: Specification for Structural Steel Buildings) in the same year. In this thesis, the design guidelines defined in SDCSS and TS 648 for rolled I-shaped steel members subject to axial compression are compared and the suitability and adequacy of an I-shaped compression member designed using TS 648 is examined according to SDCSS. Considering that the design rules for slender-element compression members have been completely changed in the current edition of American steel design specification, the design strengths computed using the current (AISC 360-16) and previous (AISC 360-10) editions of American specification are also compared in the thesis. Thus, as far as the design of slender-element I-shaped compression members are concerned, the differences in both specifications are identified. The thesis also presents practical design tables that architects and engineers oriented to structural steel design can use in the design of rolled I-shaped compression members.

**Keywords:** Design Compressive Strength Tables, Rolled I-Shaped Steel Profiles, Slender-Element Compression Members, Specification for Design and Construction of Steel Buildings, TS 648.

## GİRİŞ

Kolonlar, çelik çerçeve binalarda düşey yükleri taşıyan en temel basınç elemanlarından. Çaprazlı çelik çerçeve yapılarıdaki çelik çaprazlar ile kafes sistemlerin basınca çalışan çubukları da tipik çelik basınç elemanlarından. Bu tür yapılarda, çelik basınç elemanlarının başlıca görevi, yapının kendi ağırlığından kaynaklanan ve döşemelerden iletilen sabit ve hareketli yükleri güvenli bir şekilde temele aktarmaktır.

Düşey yüklere ek olarak, deprem ve rüzgar yükleri gibi yatay yüklerin de binaya etkimesi durumunda, çelik basınç elemanlarında eğilme ve/veya burulma momenti ile kesme kuvveti de oluşabilir. Benzer şekilde, elemana etkiyen aksel yükün elemanın enkesininin geometrik merkezinden geçmediği durumlarda da elemanda aksel yüke ek olarak eğilme momenti oluşur. Çelik bir yapı elemanında oluşan momentler, elemana etkiyen aksel yüke kıyasla ihmal edilemeyecek kadar büyükse, bu tür çelik yapı elemanları basınç elemanı olarak değil bileşik etkiler altındaki bir eleman olarak tasarlanmalıdır. Bununla birlikte, merkezi çelik çaprazlı çerçevelerin çaprazlarında olduğu gibi, dikkatli ve doğru bir tasarımla, elemana etkiyen basınç kuvvetindeki dış merkezlik yok edilebilir ya da azaltılabilir. Böyle bir durumda, ilgili eleman "aksel basınç kuvveti etkisindeki çelik yapı elemanı" olarak tasarlanabilir.

Aksel basınç kuvveti etkisi altındaki çelik yapı elemanlarının pek çoğu, aksellerine dik doğrultuda eğilmeli burkulma sonucu dayanımlarını kaybetmektedirler. Bununla birlikte, bazı basınç elemanları, akselleri etrafında burularak veyahut hem eğilip hem de burularak dayanım kaybına da uğrayabilmektedirler. Eleman boyunca oluşan bu burkulmalar, elemanın işlevini yitirmesine neden olmaktadır. Hammaddede kullanımını azaltmak amacıyla ince parçalardan üretilen çelik yapı elemanlarında gözlenebilen diğer bir stabilite problemi ise elemanı oluşturan parçaların burkularak kararlılıklarını kaybetmesidir. Yerel burkulma olarak bilinen bu sınır durum da elemanın işlevini yitirmesine neden olabilir. Bu nedenle, çelik basınç elemanlarının tasarımında hem genel hem de yerel burkulma sınır durumları mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

Ülkemizde 2016 yılına kadar çelik yapıların tasarımı için Aralık 1980 tarihli TS 648 : Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları [1] başlıklı standart kullanılmıştır. Bu standardın geçen zaman içerisinde yenilenmesi gerekliliği, gerek ülkemizde çelik yapıların betonarme yapılara göre daha az tercih ediliyor oluşu, gerekse yapısal tasarım ve analizleri yapan mimar ve mühendislerin daha güncel yurt dışı menşeli şartnameleri kullanıyor oluşları nedeniyle son beş yıl öncesine kadar pek gündeme gelmemiştir. Ancak deprem kuşağı üzerinde bulunan ülkemizde, konut ve sanayi yapılarına olan ihtiyacın artması, yüksek yapı inşasında daha ekonomik tasarımlar sağlanması ve inşaat süresinin kısıtlı olduğu durumlarda pratik çözümler sunması gibi nedenlerle çelik yapılara ihtiyaç günden güne artmıştır. Bu süreçte çelik yapı tasarımı yapan mimar ve mühendislerin kullandığı yurt dışı menşeli şartnamelerin ülkemizdeki çelik yapı uygulamalarında uyumsuzluklara ve zorluklara neden olduğu gözlenmiştir. Böylece, ülkemizde çelik yapı tasarım ilkelerinin güncellenmesi gerekliliği yeniden gündeme gelmiştir. Bu güncellenme ayrıca, ülkemizde kullanılan çelik yapı tasarım dokümanının geçtiğimiz yıl yayınlanan ve bulunduğumuz yıl yürürlüğe giren deprem yönetmeliğiyle [2] uyumlu olması amacıyla da büyük önem arz etmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD'de) 2016 yılında güncellenen "Specification for Structural Steel Buildings (Yapısal Çelik Binalar için Yönetmelik) (AISC 360-16)" [3] başlıklı yönetmelik temel alınarak hazırlanan ve aynı yıl ülkemizde yayınlanarak yürürlüğe giren "Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (ÇYTHYEY)" [4], 36 yıl önce yayınlanan TS 648 standardının yerini almıştır. Yayınlanmasından iki yıl sonra, 2018 yılında, ilk basımında gözlenen yazım hataları düzeltilerek ÇYTHYEY [5] güncellenmiştir. TS 648'den ÇYTHYEY'ye geçiş beraberinde, iki tasarım dokümanı arasındaki farkların farkındalığı, TS 648'e göre tasarlanmış yapıların ÇYTHYEY ilkelerine göre yeterli dayanım, rijitlik ve kararlılığa sahip olup olmadıklarının belirlenmesi gibi konuları gündeme getirmiştir.

TS 648 ve ÇYTHYEY'nin genel tasarım esasları benzer temellere dayanmakla birlikte, iki dokümanda kullanılan tasarım yöntemleri oldukça farklıdır; TS 648 Emniyet Gerilmelerine Göre Tasarım (EGT) yöntemini kullanırken, ÇYTHYEY taşıma gücü yöntemini temel alınarak, tasarımcıya iki seçenek sunmaktadır. Bunlardan ilki "Yük ve Dayanım Katsayılarına Göre Tasarım (YDKT)", ikincisi ise "Güvenlik Katsayılarına Göre Tasarım (GKT)" olarak isimlendirilmiştir. YDKT ve GKT yöntemleri arasındaki en belirgin fark, gerekli dayanımların hesaplamalarında kullanılan yük birleşimlerinde görülmektedir. YDKT yönteminde, gerekli dayanımlar

“artırılmış” yükler kullanılarak hesaplanırken, GKT yönteminde, TS 648'deki EGT yöntemine benzer şekilde, yükler artırılmadan kullanılmakta, aşırı yükleme ihtimali, dayanımların ciddi oranlarda azaltılmasıyla dikkate alınmaktadır.

Bu tezin temel amacı, basınç etkisindeki I-kesitli çelik hadde profilleri için, ÇYTHYEY'de tanımlanan tasarım esasları ile TS 648'de tanımlanan tasarım esaslarını karşılaştırarak, TS 648'e göre tasarlanmış bir çelik basınç elemanının ÇYTHYEY'ye göre yeterli dayanıma sahip olup olmadığını tespit etmektir. ÇYTHYEY'de tanımlanan GKT yönteminde kullanılan yük birleşimleri ile TS 648'de kullanılan yük birleşimlerinin benzer olması nedeniyle karşılaştırmalarda GKT yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca, ABD'de 2010 yılından 2016 yılına kadar kullanılan AISC 360-10 [6] yönetmeliğinde narin enkesitli basınç elemanları için tanımlanan tasarım esaslarının AISC 360-16'da tamamen değiştiği dikkate alınarak AISC 360-16'ya (yani, ÇYTHYEY'ye) göre hesaplanan dayanımlar, AISC 360-10'a göre hesaplanan dayanımlarla da karşılaştırılmıştır. Böylece, narin enkesitli basınç elemanlarının tasarım esasları açısından, iki Amerikan çelik bina tasarım yönetmeliği (AISC 360-16 ile AISC 360-10) arasındaki farklar belirlenmiştir. Tezde, çelik yapı tasarımına yönelen mimar ve mühendislerin, ülkemizde yaygın şekilde kullanılan I-kesitli çelik hadde profillerin tasarımında kullanabilecekleri pratik tasarım tabloları da oluşturulmuştur.

Tezin birinci bölümünde, çelik yapı elemanlarının aksel basınç kuvveti altındaki eğilmeli burkulma davranışı ile bu davranışı etkileyen temel parametreler (akma, mesnetler ve ara-destekler, artık gerilmeler, başlangıç eğriliği ve yükteki dış merkezlik) Euler'in elastik burkulma teorisi çerçevesinde ele alınarak özetlenmiştir. Bir sonraki bölümde ise, aksel basınç etkisi altındaki çelik yapı elemanlarının başlıca sınır durumları tanımlanmış; I-kesitli elemanların dayanımları belirlenirken hangi sınır durumların dikkate alınması gerektiği detaylıca açıklanmıştır. Tezin üçüncü, bölümünde, I-kesitli çelik hadde elemanları için ÇYTHYEY (2018)'de verilen tasarım esasları özetlenmiştir. Bir sonraki bölümde, AISC 360 yönetmeliğinin güncel ve bir önceki baskılarında (AISC 360-10 ve AISC 360-16'da) verilen ve ÇYTHYEY'den farklı olan tasarım esasları özetlenmiştir. Tezin beşinci bölümünde ise incelenen profillerin tasarımı için TS 648'de verilen denklemler sunulmuştur. Altıncı bölümde, ilk olarak; aksel basınç etkisindeki I-kesitli çelik hadde profillerin tasarımı açısından ÇYTHYEY ile TS 648 arasındaki temel farklılıklar ve benzerlikler ortaya koyularak, iki yönetmeliğe göre hesaplanan dayanımlar karşılaştırılmıştır. Ardından, narin enkesitli basınç elemanlarının AISC

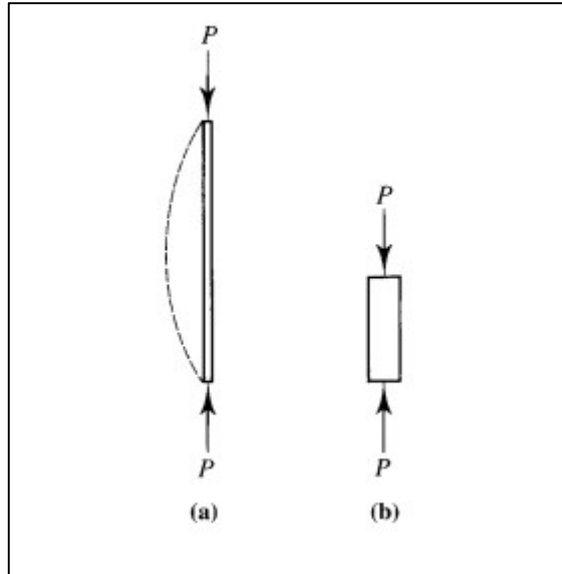


360-10 ve AISC 360-16 yönetmeliklerine göre hesaplanan dayanımları karşılaştırılarak, AISC 360'da yenilen tasarım esaslarının bu tür elemanların tasarımındaki güvenlik seviyesini ne ölçüde etkilediği belirlenmeye çalışılmıştır. Tezin yedinci bölümünde, tezin kapsamında incelenen bütün profil ve çelik kaliteleri için, ÇYTHY'ye göre hesaplanan tasarım aksenal basınç kuvveti dayanımları sunulmuştur. Dayanım tablolarında, elemanların farklı burkulma boylarındaki dayanımları listelenmiştir. Tezin bu bölümünde, tezde sunulan tasarım tabloları için kullanım örnekleri de sunulmuştur. Tezin sekizinci ve son bölümünde, tezin kapsamında elde edilen önemli sonuçlar özetlenmiş, gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

Tezde, ülkemizde çelik basınç elemanı olarak yaygın şekilde kullanılan 18'i IPE ve 21'i IPN olmak üzere toplam 39 I profil, her biri 24'er adet üç farklı tür HE profil (HEA, HEB ve HEM), ayrıca 31 adet HP ve 42 adet HD profili ele alınmıştır. Dayanım hesapları, üç farklı çelik sınıfı S235, S275 ve S355 için yapılmıştır. Dayanım tabloları, belirtilen üç farklı çelik sınıfı ve incelenen tüm profillerin farklı eleman boyları için ayrı ayrı hazırlanarak sunulmuştur. Tablolarda listelenen dayanımlar, YDKT yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Tasarımda GKT yönteminin kullanılması durumunda, güvenli dayanımlar, tasarım dayanımları 1,50'ye bölünerek hesaplanabilir. Ancak, iki yöntemde gerekli dayanımların farklı hesaplandığı unutulmamalıdır. Tezde sunulan dayanım karşılaştırmalarında ise dayanımlar GKT yöntemine göre hesaplanmıştır. Bunun en önemli nedeni, daha önce de belirtildiği gibi, TS 648'de kullanılan tasarım yöntemi olan EGT'nin YDKT'den daha çok GKT'ye benzemesidir. Ancak, bu durumda da iki yöntem arasında özellikle tasarımda kullanılan yük birleşimleri açısından farklılıklar olduğu unutulmamalıdır. Dayanım karşılaştırmalarında, elemanların etkin burkulma boylarının birbirlerine eşit olduğu kabul edilmiştir. Benzer şekilde tasarım tablolarında da, eğilmeli burkulmanın zayıf ekseninde olacağı kabulü yapılmıştır. Güçlü ekseninde burkulmanın kritik olması durumunda tabloların nasıl kullanılacağı örneklerde açıklanmıştır.

## 1. EKSENEL BASINÇ ETKİSİNDEKİ ÇELİK YAPI ELEMANLARINDA EĞİLMELİ BURKULMA

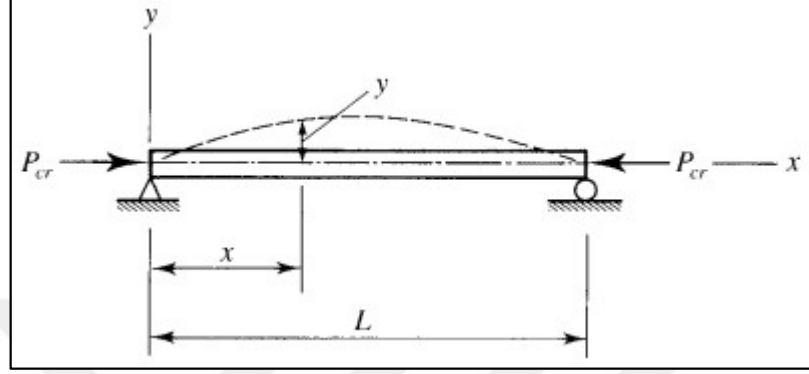
Çelik basınç elemanları, eksenleri doğrultusunda uygulanan basınç kuvveti etkisinde, eksenlerinin dışına doğru eğilme, yani burkulma eğiliminde olan çelik yapı elemanları olarak tanımlanabilir. Burkulma, hemen hemen bütün çelik basınç elemanlarının tasarımını doğrudan etkileyen bir sınır durumdur. Şekil 1.1(a)'da eksen doğrultusunda  $P$  basınç kuvvetine maruz kalan narin bir yapı elemanı gösterilmektedir.  $P$  kuvvetinin şiddeti yavaşça artırıldığında, eleman bu yük etkisi altında dengede kalamayıp, kesikli çizgiyle gösterilen hatta burkulur. Elemanın burkulmasına neden olan  $P$  basınç kuvvetinin şiddeti "kritik burkulma yükü" ( $P_{cr}$ ) olarak tanımlanmaktadır. Çoğu çelik basınç elemanının tasarımı, işte bu "kritik burkulma yükünün" hesabına dayanmaktadır. Aynı enkesit ve malzeme özelliklerine sahip olan ve Şekil 1.1(b)'de gösterilen basınç elemanının Şekil 1.1(a)'dakinden tek farkı boyunun daha kısa olmasıdır. Şekilden de görülebileceği gibi, aksenal basınç kuvveti etkisinde kaldığında, bu eleman taşıma gücüne burkulma ile değil akma ile ulaşır.



Şekil 1.1. Aksenal yük etkisinde çelik basınç elemanı (a) Uzun ve narin eleman (b) Kısa ve narin olmayan eleman [7]

## 1.1. Burkulma Teorisi

Ekseni doğrultusunda uygulanan basınç kuvvetinin bir kolon üzerindeki etkisini, 1759 yılında İsviçreli matematikçi Leonhard Euler çalışmıştır. Euler çalışmasında L boyuna sahip, mesnet koşulları Şekil 1.2'de gösterilen bir eleman ele almıştır.



Şekil 1.2. Eulerin çalışmasında incelediği kolonun mesnet koşulları [7]

Şekil 1.2'de, elemanın sağ ucundaki mesnet, elemanın x eksenine doğrultusunda ötelenmesine ve dönmesine izin vermekte ancak y eksenine doğrultusunda ötelenmesini engellemektedir. Elemanın sol ucundaki mesnet ise, hem x hem de y eksenine doğrultusunda ötelemeyi engellerken, dönmeye izin vermektedir. Şekil 1.1(a)'da gösterilen elemanda olduğu gibi, Şekil 1.2'de gösterilen elemanda da yeterince büyük P basınç kuvveti etkisi altında düzlem dışı hareket yani eğilmeli burkulma gözlenir. Euler'in çalışması pek çok kabule dayanır. Gerçek kolon davranışının Euler kolonundan farkını kavrayabilmek için bu kabuller dikkatlice incelenmelidir. Euler'in formülasyonunda kullandığı temel varsayımlar şu şekilde sıralanabilir:

- (1) Elemanın her iki ucu mafsallıdır.
- (2) Düzlem kesitler eğilmeden sonra da düzlem kalmaktadır.
- (3) Şekil değiştirmeler küçüktür ve ihmal edilebilir.
- (4) Kolon eğilirken kesitte burulma ya da çarpılma oluşmaz.
- (5) Malzeme homojen ve izotropdur.
- (6) Gerilme ile birim şekil değiştirme orantılıdır.
- (7) Malzemenin çekme etkisindeki elastisite modülü basınç etkisindekine eşittir.
- (8) Eleman boyunca kolon enkesitinde herhangi bir değişim söz konusu değildir.
- (9) Elemanda üretim, önyükleme vs. nedeniyle artık gerilme yoktur.
- (10) Kolonda başlangıç eğriligi yoktur, yani burkulana kadar düz durmaktadır.

(11)Kolon burkulana kadar P yükü kesitin geometrik merkezine etkimektedir.

Euler hipotezindeki kabullerden ilki elemanın mesnet koşulları ile alakalıdır. (2)'den (4)'e kadar listelenen kabuller ise elemanın burkulma (eğilme) davranışı ile ilgili kabulleri kapsar. (5) ve (7) arasındaki kabuller, elemanın üretildiği malzemenin özelliklerinden ileri gelmektedir. Kabullerden son dördü ise elemanın geometrik özellikleri ve yükleme koşulları ile ilgilidir.

### 1.1.1. Elastik burkulma yükü ve gerilmesi

İki ucu mafsallı bir kolonda “elastik burkulma yükünü” ( $P_e$ ) hesaplayabilmek için, Şekil 1.2'de gösterilen şekil değiştirmiş geometriye sahip elemanın x boyunda oluşan y yer değiştirmesini tanımlayan diferansiyel denklem, Euler ve Jacob Beurnolli tarafından birbirlerinden bağımsız olarak şu şekilde çözülmüştür [7];

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (1.1)$$

Denklem (1.1)'de, x noktasındaki eğilme momenti M, malzemenin elastisite modülü E ve kesitin eğildiği eksen etrafındaki atalet momenti I olarak tanımlanmaktadır. Burkulmanın olduğu yük ( $P_e$ ) düşünüldüğünde denklem şu şekilde yazılabilmektedir;

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{P_e}{EI}y = 0 \quad (1.2)$$

Denklem (1.2), ikinci dereceden doğrusal ve homojen bir diferansiyel denklemdir ve çözümünü şu şekilde ifade edilebilir;

$$y = A\cos kx + B\sin kx \text{ ve } k = \sqrt{\frac{P_e}{EI}} \quad (1.3)$$

Şekil 1.2'deki mesnet koşulları dikkate alındığında, Denklem (1.2)'nin çözümü için göz önünde bulundurulması gereken sınır koşullar;

(1)  $x = 0$  iken  $y = 0$

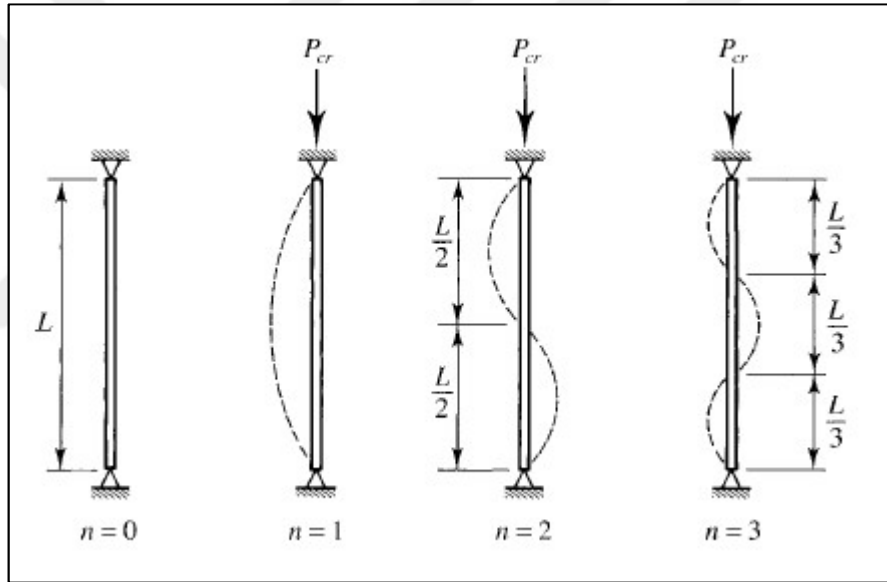
(2)  $x = L$  iken  $y = 0$

İlk sınır durumdan,  $A=0$  sonucuna ulaşılır. İkinci sınır koşulu ise  $B\sin(kL) = 0$  olmasını gerektirir.  $B = 0$  olması durumu, şekil değiştirmenin olmadığı duruma

karşılık geldiğinden aranan çözüm değildir. Bu durumda,  $\sin(kL)=0$  olmalıdır.  $kL = 0$  durumu,  $P = 0$  durumuna karşılık geldiğinden bu çözüm de elastik burkulma yükünü vermez. Sonuç olarak, aranan çözüm  $P \neq 0$  ve  $\sin(kL) = 0$  durumuna karşılık gelmektedir. Buradan,  $kL = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots, n\pi$  durumlarının hepsinin Denklem (1.2)'deki diferansiyel denklem için birer çözüm olacağı görülebilir. Buradan, eleman için olası elastik burkulma yükleri  $kL = n\pi$  eşitliğinden aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$kL = n\pi \Rightarrow \sqrt{\frac{P_e}{EI}}L = n\pi \Rightarrow P_e = \frac{n^2\pi^2EI}{L^2} \quad (1.4)$$

Denklem (1.4)'te  $n$ , burkulma modu sayısı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 1.3'te,  $n$ 'nin farklı değerleri için burkulma modları gösterilmektedir.



Şekil 1.3.  $n$ 'nin farklı değerleri için burkulma modları [7]

Şekil (1.3)'te,  $n = 0$  durumu burkulmanın oluşmadığı, yani basınç kuvveti olmayan durumdur.  $P$  basınç kuvvetinin etki ettiği  $n = 1$  burkulma modu, iki ucu mafsallı Euler kolonunun burkulma modu olarak tanımlanmaktadır.  $n = 1$  için Denklem (1.4) yeniden yazıldığında, Euler (elastik) burkulma formülü elde edilmiş olur;

$$P_e = \frac{\pi^2EI}{L^2} \quad (1.5)$$

Denklem (1.5), iki ucu mafsallı Euler kolonun elastik burkulma yükünü hesaplamaktadır. İki ve daha büyük burkulma modlarının oluşabilmesi için ise kolonun düzlem dışı hareketinin belirli noktalardan engellenmesi gerekmektedir. Bu

tez kapsamında yapılacak hesaplamalarda  $n = 1$  durumu göz önüne alınacaktır. Burkulma modu  $n$ 'nin farklı olduğu durumlar için, tasarımcının etkin boy hesabı yapması gerekmektedir. Denklem (1.5)'teki elastik burkulma yükünden "elastik burkulma gerilmesi ( $F_e$ )" aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$I = Ai^2 \Rightarrow P_e = \frac{\pi^2 EA}{L^2 / i^2} \Rightarrow F_e = \frac{\pi^2 E}{(L / i)^2} \quad (1.6)$$

Denklem (1.6)'da,  $A$  elemanın enkesit alanı  $i$  ise kesitin burkulmanın gözleendiği eksen etrafındaki atalet yarıçapıdır. Denklem (1.6)'da, elastisite modülü  $E$ , yapı çeliği için sabit bir değer olduğundan elastik burkulma gerilmesini etkileyen faktörlerin, elemanın boyu (veya daha genel bir ifadeyle elemanın etkin burkulma boyu) ile kesitin atalet yarıçapı ( $i$ ) olduğu görülmektedir. Dikkat edilirse, elemanın elastik burkulma gerilmesi, yapı çeliğinin akma mukavemetinden bağımsızdır.

Elastik burkulma, elemanın doğrusal elastik olarak davrandığı yani gerilme ile şekil değiştirmenin orantılı olduğu bölgede gözlenen burkulmadır. Yapılan araştırmalar, elastik sınır aşıldığında, gerilme ile şekil değiştirmenin orantılı kalmadığını ve Euler denkleminin doğru sonuçlar vermediğini göstermiştir. Dolayısıyla elastik sınırın aşıldığı durumlarda, burkulma yükü Denklem (1.5) kullanılarak hesaplanmamalıdır.

### 1.1.2. Elastik olmayan burkulma yükü ve gerilmesi

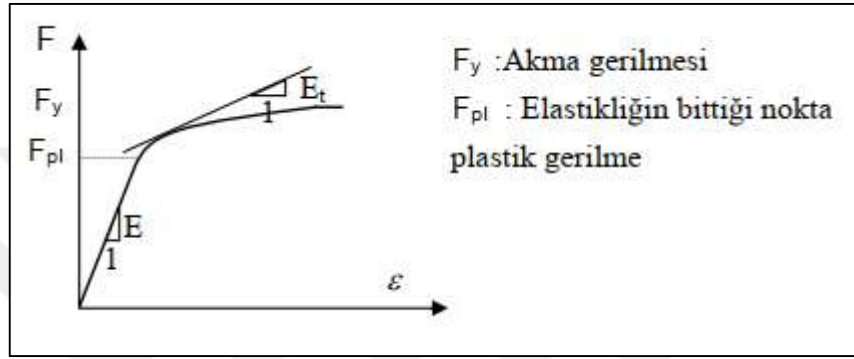
Elastik sınır aşıldığında, gerilme ve şekil değiştirmenin orantılı olmadığı durum için Euler'in burkulma teorisini geliştirilerek "teğet modülü" teorisini yayınlayan bilim insanı Engesser'dir [8]. Engesser'in 1889 yılında yayınlanan teorisi yoğun eleştiriler yüzünden 1895 yılında değiştirilse de, 1947 yılında Shanley tarafından doğruluğu ispatlanarak geliştirilmiştir. Engesser'in teorisine göre, Denklem (1.5)'te elastisite modülü yerine "teğet modül" ( $E_T$ ) kullanılarak, elastik olmayan burkulma yükü ( $P_T$ ) tanımlanabilir:

$$P_T = \frac{\pi^2 E_T I}{L^2} \quad (1.7)$$

Euler denkleminin doğru sonuç vermediği "elastik sınır" ( $F_{pl}$ ) ile elemanın akma sınırı ( $F_y$ ) arasındaki bölgede Denklem (1.7) devreye girmektedir. Denklem (1.7)'deki inelastik burkulma yükünden "inelastik burkulma gerilmesi ( $F_T$ )" aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$F_T = \frac{\pi^2 E_T}{(L/i)^2} \quad (1.8)$$

Şekil (1.4)'teki grafikte doğrusal olmayan davranışın en önemli sebebi, elemanların üretimleri aşamasında oluşan artık gerilmelerdir. Grafiğe dikkat edilirse “teğet modül” her zaman için elastisite modülünden küçüktür ve bu nedenle aynı (L/i) değeri için “teğet modül” ( $E_T$ ) kullanılarak hesaplanan burkulma yükü elastik burkulma yükünden daha küçük olacaktır.

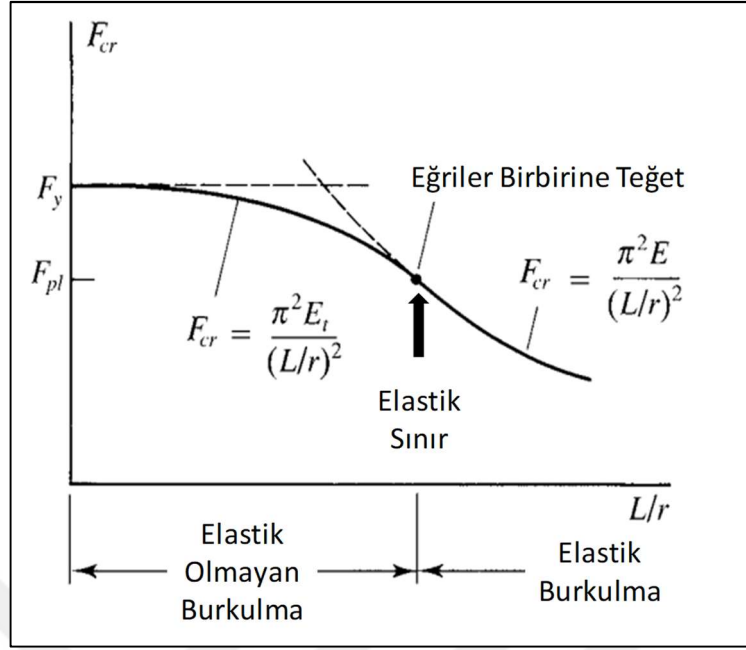


Şekil 1.4. Teğet modülü  $E_T$ 'nin tanımı [8]

Narin olmayan elemanlar için “teğet modülü”, deneysel çalışmalarla tespit edilebilmektedir. Elastik olmayan bölgede gerçekleşen burkulma durumunda, burkulma yükünün hesabı için, yönetmelikler, deneysel çalışmalar temel alınarak geliştirilen ampirik tasarım denklemleri sunmaktadırlar. Şekil 1.5'te, farklı L/i oranlarına (narinliklere) sahip basınç elemanları için deneysel olarak elde edilen burkulma yüklerinin Euler yüklerinden sapma miktarları gösterilmiştir. Şekil 1.5'teki deneysel sonuçların yığıldığı alan dikkate alındığında, “elastik sınır” aşıldıktan sonra elemanın basınç kuvveti etkisi altında “Euler burkulma yükü” çizgisinden uzaklaştığı, en büyük sapsmaların orta narinlikli kolonlarda olduğu gözlenmektedir. Şekil 1.5'te elastik bölgede burkulduğu bilinen, büyük narinlikli kolonların burkulma yüklerinin Euler yüklerinden sapsmasının en önemli nedenlerinin başlangıç eğriliği ve yükteki dış merkezlik olduğu da bilinmektedir.





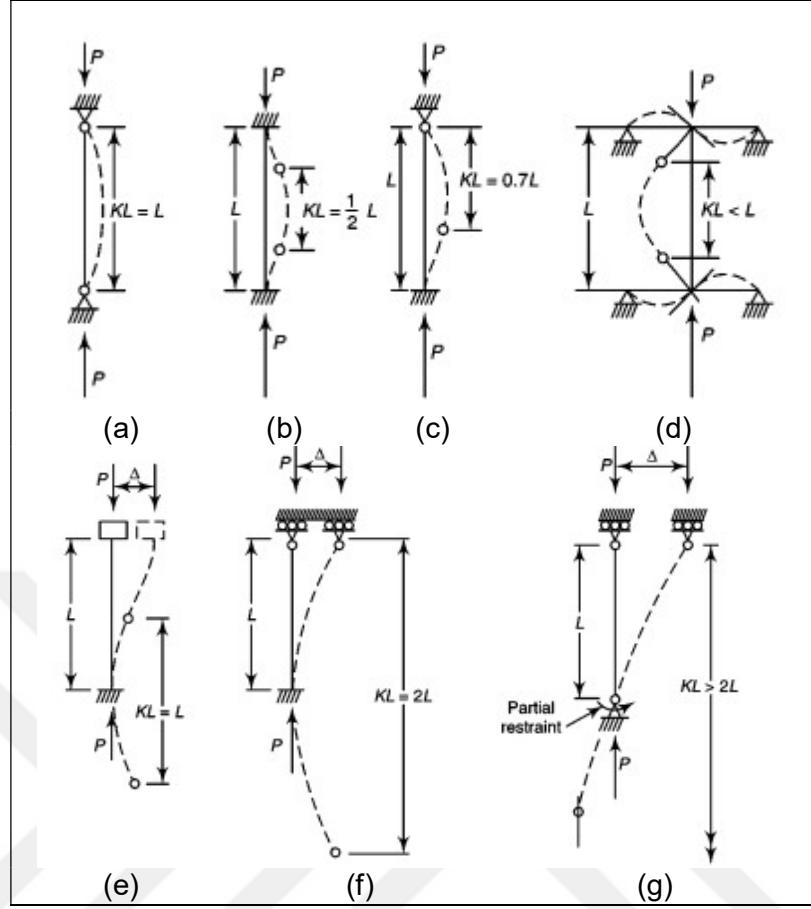


Şekil 1.6. Kritik burkulma gerilmesi ile narinlik ilişkisi [7]

### 1.3. Etkin Burkulma Boyu

Euler hipotezindeki “kolonun her iki ucu mafsallıdır” kabulü, bir yapıdaki kolonların farklı mesnet koşullarına sahip olması nedeniyle çoğu çelik basınç elemanı için doğru değildir. Farklı mesnet koşullarına sahip kolonlar üzerine yapılan araştırmalar, elemanın gerçek boyu  $L$  yerine “etkin burkulma boyu”  $L_c$ 'nin kullanılması koşuluyla elastik burkulma yüklerinin Euler formülünden hesaplanabileceğini göstermiştir.

Eleman burkulma boyu, bir çelik basınç elemanının burkulma şeklindeki iki büküm noktası arasındaki uzunluktur. Bu büküm noktalarında eleman üzerindeki eğilme momentleri sıfıra eşittir. Etkin burkulma boyu için, aynı elastik burkulma yüküne sahip eşdeğer iki ucu mafsallı Euler kolonu boyu kullanılır. Şekil (1.7)'de, farklı mesnet koşulları için, etkin burkulma boyunun eleman boyuna oranı olarak tanımlanan etkin burkulma boyu katsayıları ( $K=L_c/L$ ) gösterilmiştir. Daha çok tekil elemanların tasarımında kullanılan bu değerler, uçlarından diğer taşıyıcı elemanlara rijit ya da yarı-rijit bir şekilde bağlanan kolonlarda kullanılmamalıdır. Bu tip kolonların tasarımında kullanılan etkin burkulma boyu katsayıları, elemanın ucuna bağlanan elemanın göreceli rijitliğine bağlı olduğundan, ilgili  $K$  değerlerinin yönetmeliklerde verilen nomogramlar kullanılarak hesaplanması daha uygundur. Nomogramlar kullanılırken, ilk olarak, kolonun yanal ötelenmesinin önlenip önlenmediği belirlenmelidir.

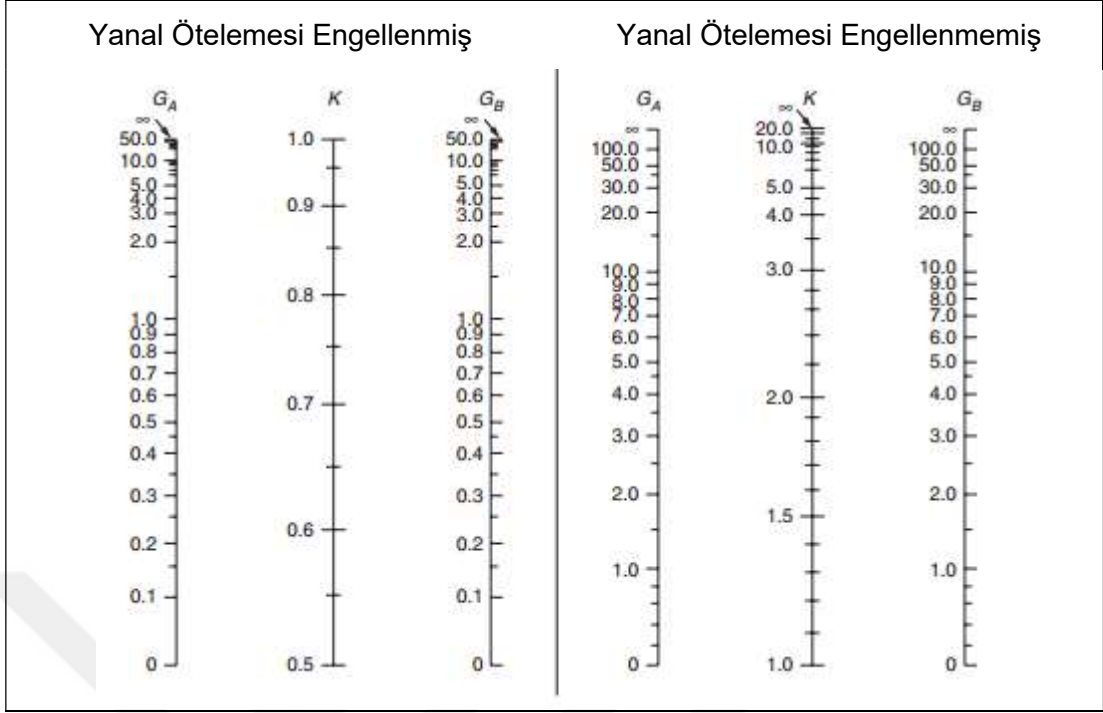


Şekil 1.7. Farklı mesnet koşulları için etkili boy (KL) (a) İki ucu mafsallı (b) İki ucu ankastre (c) Bir ucu mafsallı diğer ucu ankastre (d) İki ucun hareketi kısmen kısıtlanmış (e) Bir ucu ankastre diğer ucu ötelemeye serbest (f) Bir ucu ankastre diğer ucu serbest (g) Bir ucun hareketi kısmen kısıtlanmış diğer uç serbest boşluk [9]

Zira, yanal ötelemesi önlenmiş bir çerçeve kolonu için K değeri 0,5 ile 1 değeri arasında değişirken, yanal ötelemesi önlenmemiş bir çerçeve kolonu için K değeri 1 değerinden büyük olmaktadır. Ardından, kolonun üst ve alt uçlarında ilgili uçlara bağlanan elemanlarının eğilme rijitliği oranlarını temsil eden G değerleri

$$\text{hesaplanmalıdır. } G = \frac{\sum(E_c I_c / L_c)}{\sum(E_g I_g / L_g)} \quad (1.10)$$

Denklem (1.10)'da kolon enkesitinin eğilme rijitliği ( $E_c I_c$ ), kiriş enkesitinin eğilme rijitliği ( $E_g I_g$ ), kolon boyu ( $L_c$ ) ve kiriş boyu ( $L_g$ ) olarak ifade edilmektedir. Kolonun üst ve alt uçları için G değerleri ( $G_A$  ve  $G_B$ ) ayrı ayrı hesaplandıktan sonra, ilgili K değeri, Şekil 1.8'de verilen nomogramlardan uygun olan kullanılarak belirlenebilir.



Şekil 1.8. Etkin burkulma boyu katsayısı (K) için nomogramlar [10]

ÇYTHYEV Bölüm 6'da, kullanımı nomogramlara kıyasla daha kolay olan ve yine elemanın uç noktalarında hesaplanan  $G_A$  ve  $G_B$  değerlerine bağlı olan aşağıdaki ampirik denklemler sunulmuştur;

$$\text{Yanal Ötelemesi Önlenmiş Kolonlar : } K = \frac{3G_A G_B + 1.4(G_A + G_B) + 0.64}{3G_A G_B + 2.0(G_A + G_B) + 1.28} \quad (1.11)$$

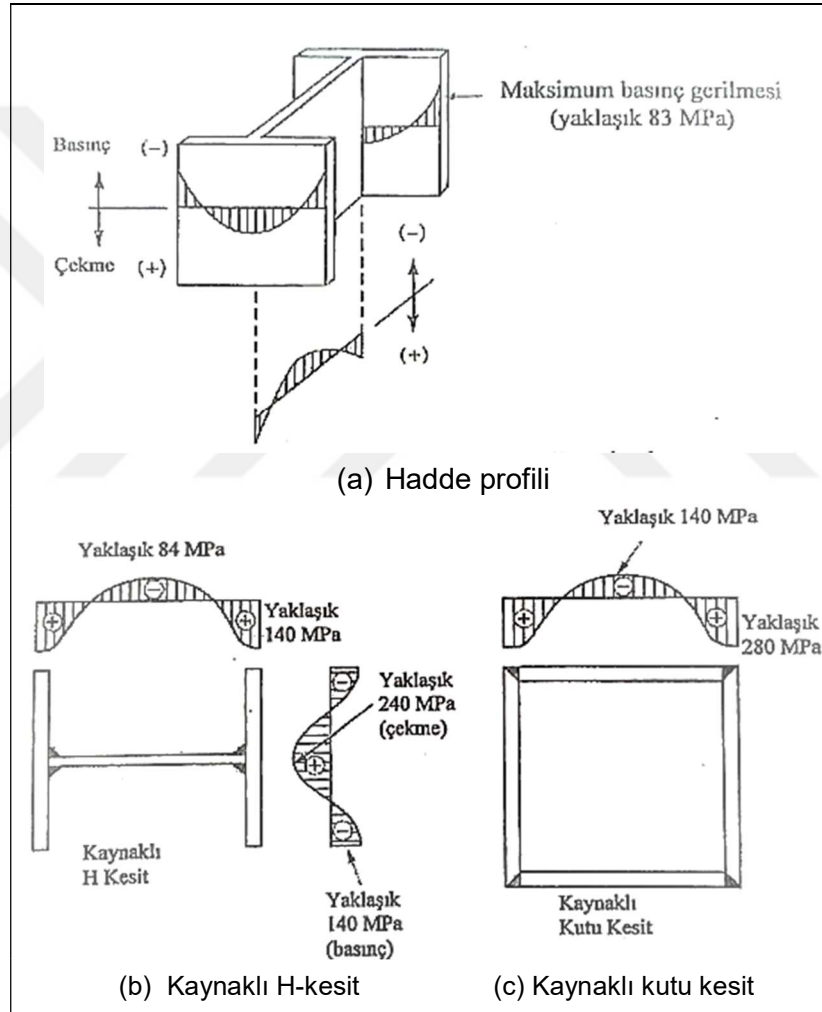
$$\text{Yanal Ötelemesi Önlenmemiş Kolonlar : } K = \sqrt{\frac{G_A(1.6G_B + 4.0) + (4G_B + 7.5)}{G_A + G_B + 7.5}} \quad (1.12)$$

#### 1.4. Davranışa Etki Eden Diğer Faktörler

Artık gerilmeler, başlangıç eğriliği ve yükteki dış merkezlik bir çelik basınç elemanın davranışını belirleyen önemli faktörlerdir. Bu faktörler elemanın üretim ve montaj aşamalarıyla doğrudan orantılı olduğundan, belirli sınırlamaları aşmadıkları müddetçe yapılan hesaplamalarda ayrıca ele alınmamaktadırlar. Bu tez kapsamında da, bu faktörlerin kolon davranışına etkilerinin yönetmeliklerin kabul ettiği sınırlar içinde kaldığı kabul edilmiş ve ilave hesap yapılmamıştır.

#### 1.4.1. Artık gerilmelerin basınç davranışına etkisi

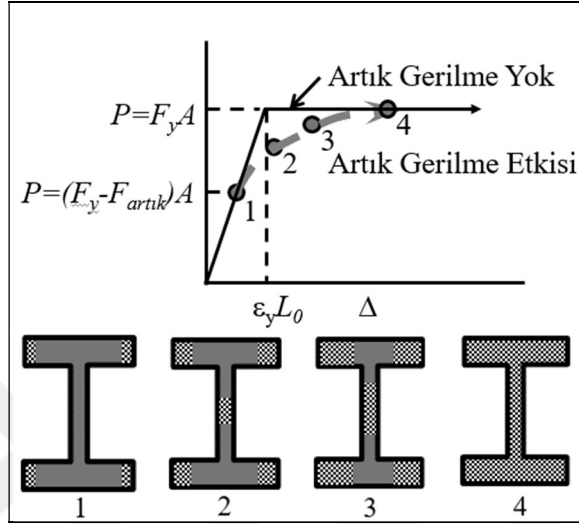
Bölüm 1.1.2'de, üretim sırasında elemanda oluşan artık gerilmelerin elemanın elastik olmayan bölgede burkulmasına neden olabildiği belirtilmişti. Artık gerilmeler çelik yapı elemanının üretimi esnasında oluşan ve enkesit içerisinde birbirlerini dengeleyen gerilmelerdir. Artık gerilmeler, üretim esnasında elemanlara uygulanan haddeleme, kaynaklama, şekil verme, düzleştirme, ters sehim verme, kesme, delik açma ve benzeri işlemler nedeniyle elemanı oluşturan parçaların aynı anda soğumaması sonucu elemanda oluşan gerilmelerdir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Çelik profillerde tipik artık gerilme dağılımları [11]

I-kesitli çelik yapı elemanında başlık uçları ve gövde ortası, başlıklarla gövdenin kesiştiği noktalara göre daha çabuk soğumaktadır. Bu durum başlık uçlarında ve gövdenin ortasında artık basınç gerilmeleri, başlıkla gövdenin birleştiği bölgelerde artık çekme gerilmeleri oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 1.9(a)).

Çelik basınç elemanlarının üzerlerine etkiyen aksenal basınç kuvvetinin oluşturacağı gerilmelere, oluşan bu artık gerilmeler de eklenmelidir. Bu nedenle, çelik basınç elemanlarının bazı bölümlerinde beklenenden daha önce akma gözlenir (Şekil 1.10). Bu durum orta boy kolonlarda burkulma yükünün ciddi oranda düşmesine neden olmaktadır.

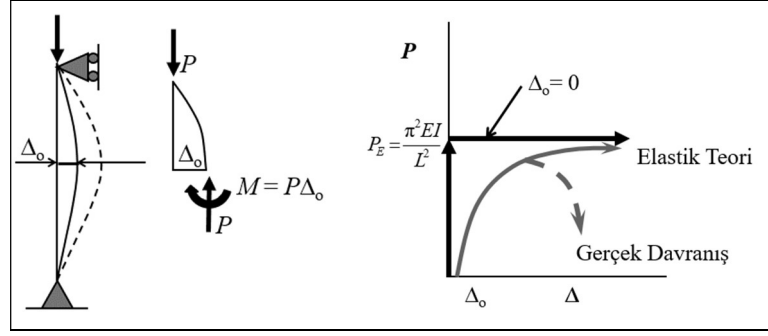


Şekil 1.10. Kısa ve tok kesitli bir çelik elemanın basınç davranışına artık gerilmelerin etkisi [12]

Yönetmeliklerde, artık gerilmelerin etkisi elastik bölgenin ötesinde burkulanan orta boy kolonların tasarımında dikkate alınmakta, kritik burkulma gerilmeleri için sunulan ampirik denklemler makul seviyelerdeki artık gerilmelerin etkisini de içerecek şekilde elde edilmektedir.

#### 1.4.2. Başlangıç eğriliğinin basınç davranışına etkisi

Çelik yapı elemanların dümdüz üretilmesi pratik olarak mümkün değildir. Tüm elemanlarda üretim sürecinden kaynaklı başlangıç eğrilikleri bulunmakta ve bu nedenle elemana etkiyen aksenal basınç kuvveti, Şekil 1.11'de gösterildiği gibi, elemanın enkesitinde eğilme momenti oluşmasına neden olmaktadır.

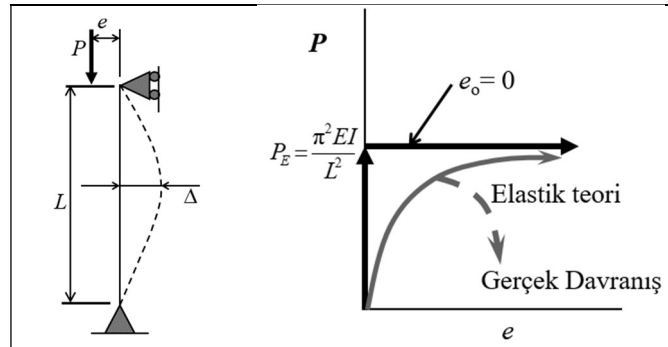


Şekil 1.11. Çelik basınç elemanında başlangıç eğriliğinin etkisi [12]

Elastik bölgede burkulan kolonların Euler yüküne ulaşabildiği gözlenmiştir (Şekil 1.11). Ancak, eleman bu yüke çok büyük yer değiştirmelerde ulaşabilmektedir. Güncel yönetmelikler elemanda oluşan yer değiştirmeleri kısıtladıkları için elastik bölgede burkulan kolonlar için bile başlangıç eğriliği nedeniyle dayanım azaltması yapmaktadırlar. İnelastik burkulmanın söz konusu olduğu orta boy kolonlarda ise başlangıç eğriliği Şekil 1.11’de gösterildiği gibi dayanım kaybına neden olmakta, başlangıç eğriliği arttıkça dayanım kaybı da artmaktadır. Bu sebeple, artık gerilmelerde olduğu gibi, orta boy kolonların tasarımında kullanılmak amacıyla yönetmeliklerde verilen ampirik denklemler, makul seviyelerdeki başlangıç eğriliğinin etkisi dikkate alınarak formüle edilmiştir.

#### 1.4.3. Yükteki dış merkezliliğin basınç davranışına etkisi

Şekil 1.12’de gösterildiği gibi, bir çelik basınç elemanına etkiyen yükün olası dış merkezliliğinin elemanın basınç davranışına olan etkisi başlangıç eğriliğinin etkisine (Şekil 1.11) benzemektedir. Yükteki dış merkezlik nedeniyle elemanda oluşacak eğilme momenti kabul edilemeyecek kadar büyük olduğunda eleman eğilmeli-basınç elemanı olarak tasarlanmalıdır.



Şekil 1.12. Çelik basınç elemanında yükteki dış merkezliliğin etkisi [12]

Bir basınç elemanına etkiyen basınç kuvvetinde dış merkezlik oluşması her ne kadar kaçınılmaz olsa da, yönetmelikler belirli bir miktarın altında kalması koşuluyla küçük dış merkezliklere izin vermekte, bunun olası etkilerini de tasarım denklemlerinde göz önünde bulundurmaktadırlar.



## 2. ÇELİK BASINÇ ELEMANLARININ BAŞLICA SINIR DURUMLARI

Çelik basınç elemanlarının tasarımında göz önünde bulundurulması gereken ve elemanın dayanımı ile ilgili olan sınır durumlar üç ana başlık altında toplanabilir: (i) akma sınır durumu, (ii) eleman boyunca gözlenen eğilmeli ve/veya burulmalı burkulma sınır durumu ve (iii) elemanı oluşturan parçalarda gözlenen yerel burkulma sınır durumu. Yapının kullanımı dikkate alındığında, bu sınır durumların haricinde, elbette yer değiştirme, titreşim ve benzeri kullanılabilirlik sınır durumları da kontrol edilmelidir. Bu tezde, yalnız I-kesitli hadde profillerle ilgili dayanım sınır durumları ele alınacaktır.

ÇYTHYEY (2018)'de I-kesitli elemanların kuvvetli eksen, yani başlıklarına paralel asal eksen, x eksen olarak tanımlanmaktadır. Benzer şekilde, zayıf eksen, yani başlıklara dik eksen, y eksen olarak isimlendirilmektedir. Bu nedenle, sağ el kuralına göre, enkesite dik eksen z eksen olmaktadır. Bu tezde, ÇYTHYEY (2018)'de tanımlanan bu eksen takımı kullanılacaktır.

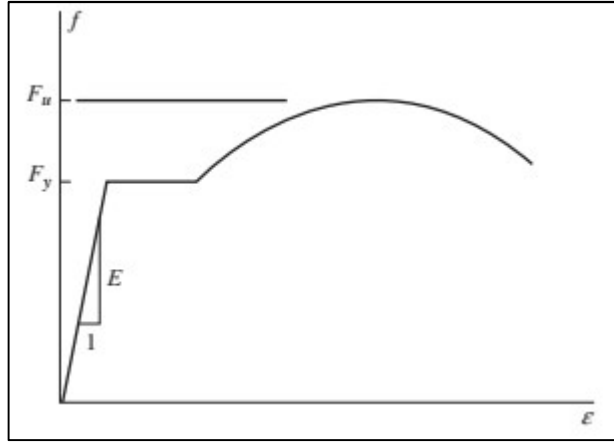
### 2.1. Akma Sınır Durumu

Şekil 2.1'deki gerilme-şekil değiştirme eğrisine sahip çelik malzemeden üretilen ve Şekil 1.1(b)'de gösterildiği gibi boyu oldukça kısa olan bir çelik basınç elemanı, elemanda akma gözlenene kadar kesiti oluşturan hiçbir parçada yerel burkulma oluşmayacak şekilde boyutlandırılırsa, elemanın üzerine etkiyen basınç kuvveti elemanın akma yüküne ( $P_y$ ) kadar arttırılabilir. Diğer bir ifadeyle, elemanın taşıyabileceği en büyük basınç kuvveti ( $P_{max}$ ), kesitin kayıpsız enkesit alanı ( $A$ ) ile akma gerilmesinin ( $F_y$ ) çarpımından hesaplanabilir;

$$P_{max} = P_y = F_y A \quad (2.1)$$

Her ne kadar teorik olarak kesitin akarak göçmesinin sağlanması mümkün olsa da, tasarımcı basınç elemanın kapasitesini mümkün olabildiğince kullanırken, bir yandan da yapıda çok kısa (veya sık aralıklarla desteklenmiş) kolonların bulunmasını tercih etmeyeceğinden, uygulamada basınç elemanlarının akma sınır durumuna ulaşması hemen hemen hiç mümkün olmamaktadır.





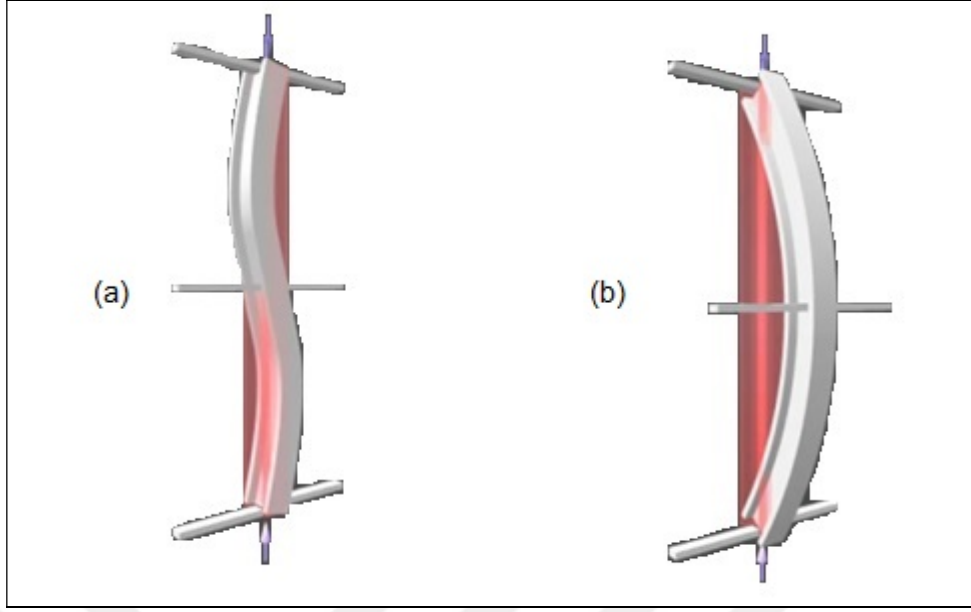
Şekil 2.1. Yapısal çeliğin tipik gerilme-şekil değiştirme diyagramı [7]

## 2.2. Genel Burkulma Sınır Durumları

Tasarımcının uygulayabileceği boya ve yerel burkulma göçmesi oluşmayacak kesite sahip bir çelik yapı elemanı, Şekil 1.1(a)'da gösterildiği gibi eksen dışına doğru hareket ederek burkulabilir. Genel burkulma, çoğu çelik basınç elemanı için en temel göçme modudur. Burkulan bir çelik basınç elemanının geometrisinde oluşan ani değişim, elemanın yük taşıma kapasitesinde ciddi azalmalara neden olur. Genel burkulma, elemanın kesit özelliklerine göre 3 farklı şekilde oluşabilmektedir: bunlar (i) eğilmeli burkulma, (ii) burulmalı burkulma, (iii) eğilmeli-burulmalı burkulmadır.

### 2.2.1. Eğilmeli burkulma sınır durumu

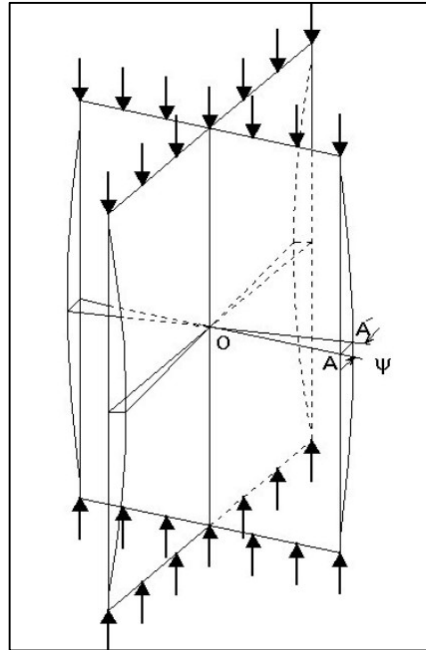
Eğilmeli burkulma, basınç elemanının kesitinin asal eksenlerinden biri etrafında ve tüm eleman boyunca eğilerek burkulmasıdır. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, elemanın sınır koşulları gereği bu burkulma her iki asal eksen de gözlenebilir. Ancak sınır koşullarının her iki asal eksen için de aynı olduğu durumlarda, eğilmeli burkulmanın her zaman zayıf asal eksen etrafında olacağı söylenebilir. Eğilmeli burkulmanın etkin olarak gözlemlenebileceği kesitler çift simetri eksenli I-profiller ile burulma rijitliği yüksek olan kutu ve boru profilleridir. Özellikle çift simetri eksenine sahip hadde profillerin tasarımında, kayma merkezi ile geometrik merkez çakıştığından, yalnız eğilmeli burkulma sınır durumlarının göz önünde bulundurulması çoğu zaman yeterli olmaktadır.



Şekil 2.2. Çift simetri eksenli I-profilinde eğilmeli burkulma (a) Zayıf eksen etrafında eğilmeli burkulma (b) Güçlü eksen etrafında eğilmeli burkulma [8]

### 2.2.2. Burulmalı burkulma sınır durumu

Burulmalı burkulma, basınç elemanının kayma merkezinden geçen boyuna dik eksen etrafında dönmesiyle burularak burkulmasıdır. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, burulmalı burkulmada eleman düzlem dışına doğru eğilmez.

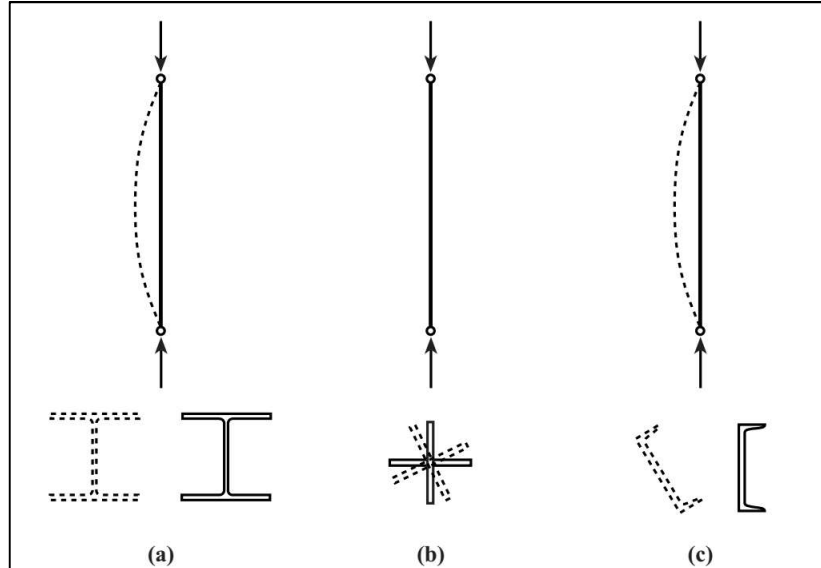


Şekil 2.3. + enkesitli bir yapma profilde burulmalı burkulma [13]

Burulmalı burkulmanın etkin olarak gözlenebileceği kesitler, kayma merkezi ile geometrik merkezi aynı noktada çakışan çift simetri eksenli I kesitler ile burulma rijitliği düşük olan + kesitlerdir. Tezin kapsamında incelenen I-kesitli profillerde hem eğilmeli, hem de burulmalı burkulma gözlenebileceğinden, dayanım hesaplarında her iki sınır durum da dikkate alınmıştır.

### 2.2.3. Eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumu

Eğilmeli-burulmalı burkulma, enkesitlerinde tek simetri eksenini bulunan veya hiç simetri eksenini bulunmayan elemanlarda gözlenir. Bu tür elemanlarda, kayma merkezi ile geometrik merkez çakışmadığından, eleman düzlem dışına doğru eğilerek burkulurken aynı zamanda kayma merkezinden geçen boyuna eksen etrafında da döner. Tek simetri eksenli kesitlerde, simetri eksenine dik eksen etrafında eğilmeli burkulma burulma olmaksızın gerçekleşirken, simetri eksenindeki burkulmada eğilmeli-burulmalı burkulma gözlenir. Kayma merkezleri ile geometrik merkezlerinin konumları göz önüne alındığında, çift simetri eksenli profillerle burulma rijitlikleri yüksek (kutu, boru ve benzeri) profillerin dışındaki tüm profillerde eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumu göz önüne alınmalıdır. Şekil 2.4'te basınç elemanlarında gözlenebilen üç genel burkulma modu; eğilmeli, burulmalı ve eğilmeli-burulmalı burkulma modları, karşılaştırılmıştır.

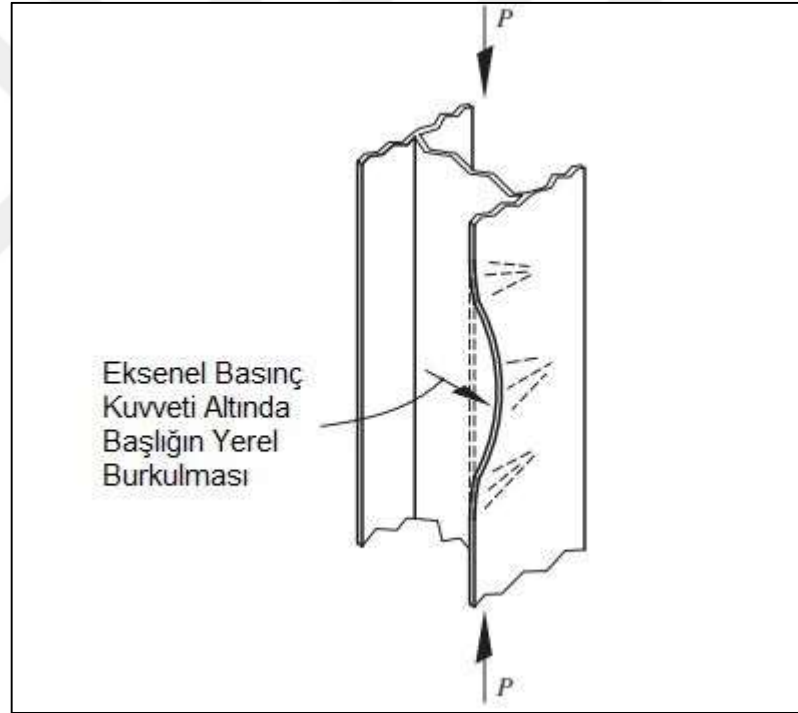


Şekil 2.4. Basınç elemanlarında gözlenen genel burkulma şekillerinin karşılaştırılması (a) Eğilmeli burkulma sınır durumu (b) Burulmalı burkulma sınır durumu (c) Eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumu [7]

Bu tezde incelenen I-kesitlerin tamamı çift simetri eksenine sahip olduğundan, dayanım hesaplarında eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumu dikkate alınmamıştır.

### 2.3. Yerel Burkulma Sınır Durumu

Çelik basınç elemanlarında gözlenen bir diğer göçme modu da yerel burkulmadır (Şekil 2.5). Çelik basınç elemanı ister hadde profili olsun, ister parçaların birbirine kaynaklanması ile oluşturulan yapma profil olsun, elemanı oluşturan parçalardan biri veya birkaçı yerel olarak burkulduğunda, yükün burkulan parçalar tarafından taşınan bölümü elemanın burkulmadan en az etkilenen veya henüz burkulmayan parçalarına aktarılacağından genel olarak elemanın yük taşıma kapasitesinde azalma gözlenir.



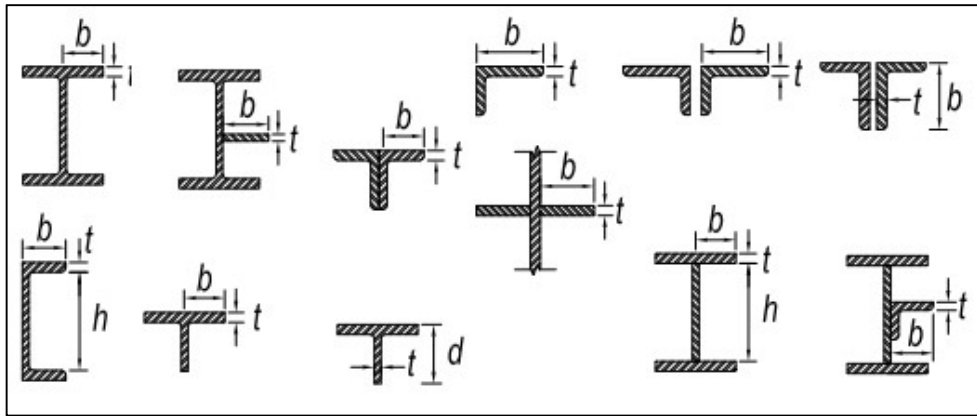
Şekil 2.5. Eksenel basınç kuvveti altında bir I profilde gözlenen yerel başlık burkulması [14]

Genel olarak, çelik basınç elemanlarının tasarımında eleman burkulmasının yerel burkulmadan önce gerçekleşmesi istenir. Ancak, bazı özel nedenlerden, yerel burkulma yükü genel burkulma yükünden daha küçük olan elemanların kullanımına çoğu modern yönetmelik engel olmamakta, bu tür elemanlar için tasarım kuralları tanımlamaktadırlar. Bu tezin kapsamında ele alınan dört yönetmelikten, üçünde (AISC 2010, AISC 2016, ve ÇYTHYAY 2018) “narin enkesitli” basınç elemanları için

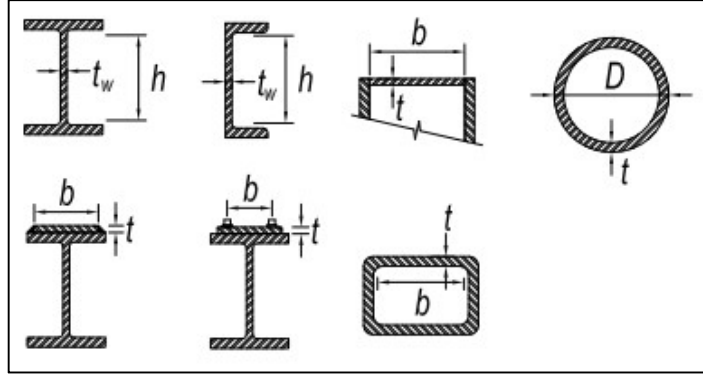
tasarım kuralları tanımlanmıştır. Güncelliğini çoktan yitirmiş TS 648 standardında ise basınç etkisindeki hadde profillerin tasarım esaslarında yerel burkulma sınır durumu göz ardı edilmiştir.

İster hadde ister yapma kesitli olsun, tüm çelik basınç elemanlarının, yalnız kenarlarından desteklenmiş plak elemanlarından bir araya geldiği kabul edilir. Örnek olarak, I profilinin bir gövde parçası ile ona bağlanan dört başlık parçasından, T veya U profilinin yine bir gövde parçası ile ona bağlanan iki başlık parçasından, köşebentlerin ise iki adet parçadan oluştuğu kabul edilir. Kesiti oluşturan parçaların yerel burkulma yükleri, genişlik/kalınlık ( $b/t$ ) oranlarıyla doğrudan ilgilidir. Bir çelik yapı elemanını oluşturan parçaların tamamının  $b/t$  oranları yönetmeliklerde tanımlanan sınır değerlerden küçük olduğu müddetçe, elemanda genel burkulma ya da akmanın, kesiti oluşturan parçalardan herhangi birinin burkulmasından önce oluşacağı kabul edilir. Bunun yanı sıra, kesiti oluşturan parçaların sınır koşulları da yerel burkulma sınır durumunda dikkate alınmalıdır. Yüke paralel kenarlardaki sınır koşullar dikkate alındığında, kesiti oluşturan parçalar iki gruba ayrılmaktadır: (i) rijitleştirilmemiş elemanlar, (ii) rijitleştirilmiş elemanlar.

Rijitleştirilmemiş kesit parçalarının, yüke paralel kenarlarından yalnızca biri, kesiti oluşturan diğer parçalar tarafından desteklenmektedir. Şekil 2.6'da gösterildiği gibi, I, T ve U profillerin başlıkları, köşebentlerin kolları ve T profillerin gövdeleri bu tür parçalara örnektir. Rijitleştirilmiş kesit parçalarının ise yukarıda tanımlanan iki paralel kenarlarının her ikisi de kesiti oluşturan diğer parçalar tarafından desteklenmektedir. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, I ve U profillerin gövdeleri, kutu profillerin duvarları ve boru profiller rijitleştirilmiş parçalara örnektir.



Şekil 2.6. Rijitleştirilmemiş kesit parçaları [5]



Şekil 2.7. Rijitleştirilmiş kesit parçaları [5]

Aynı  $b/t$  oranına sahip rijitleştirilmiş bir kesit parçasının burkulma yükünün rijitleştirilmemiş bir kesit parçasına göre daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, rijitleştirilmiş kesit parçalarının burkulma sonrası dayanımları da burkulma yüklerinden daha büyük olabilmektedir.

### 3. I-KESİTLİ ÇELİK BASINÇ ELEMANLARI İÇİN ÇYTHYEY'DE TANIMLANAN TASARIM ESASLARI

Eksenel basınç kuvveti etkisindeki çelik yapı elemanlarının tasarım kuralları ÇYTHYEY'de, Bölüm 8'de tanımlanmaktadır. Yönetmelikte, elemanın eksenel basınç kuvveti etkisinde olduğunun kabul edilebilmesi için, elemana etkiyen yükün elemanın kesitinin geometrik merkezinden geçecek şekilde uygulanması gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca, eksenel basınç kuvveti etkisindeki bir elemanın narinlik oranı ( $L_c/i$ ) 200 ile sınırlandırılmıştır. Narinlik oranı, yönetmelikte Bölüm 6 ve Bölüm 16'da verilen kurallar dikkate alınarak hesaplanmalıdır.

Tezin bu bölümünde, basınç etkisindeki I-kesitli çelik hadde elemanlarının bir önceki bölümde tanımlanan sınır durumlara göre dayanımlarının hesaplanması için ÇYTHYEY'de verilen denklemler ve kurallar sunulacaktır. Temel tasarım denklemlerinden önce yönetmelikte tanımlanan tasarım yaklaşımlarına da kısaca değinilecektir.

#### 3.1. Tasarım Yaklaşımları

ÇYTHYEY'de, çelik yapı elemanlarının tasarımı için iki farklı tasarım yaklaşımı tanımlanmıştır: (i) Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) ve (ii) Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT). Bu iki yaklaşımdan hangisinin kullanılacağı tasarımcıya bırakılmış olmakla birlikte; bir tasarım yaklaşımı seçildikten sonra, yalnızca seçilen yaklaşım için tanımlanan dayanım katsayıları ile yük birleşimlerinin kullanılması gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle, tasarım yaklaşımlarının birbirine karıştırılması, tasarımda güvensiz sonuçlara sebebiyet verebilmektedir.

YDKT yöntemi ile yapılacak olan tasarımda, tasarımcı yapısal çelik elemanların karakteristik dayanımlarının ( $R_n$ ), bu yöntem için tanımlanan dayanım katsayılarıyla ( $\phi$  katsayılarıyla) çarpılmasıyla elde edilen "tasarım dayanım"larının ( $\phi R_n$ ), yine bu yöntem için tanımlanan yük birleşimlerinden hesaplanan "gerekli dayanım"lardan ( $R_u$ ) daha küçük olmadığını, yani,  $R_u \leq \phi R_n$  olduğunu göstermelidir. Bu tezde, yalnız tasarım dayanımları hesaplandığından, gerekli dayanımlardan bahsedilmeyecektir.

GKT yöntemi ile yapılacak olan tasarımda ise, tasarımcı elemanların karakteristik dayanımlarını ( $R_n$ ), bu yöntem için verilen ilgili güvenlik katsayılarına ( $\Omega$  katsayılarına) bölerek “güvenli dayanım”ları ( $R_n/\Omega$ ) elde edip, yine bu yöntem için tanımlanan yük birleşimleri ile hesaplanan “gerekli dayanım”larla ( $R_a$ ) karşılaştırıp, daha küçük olmadığını, yani,  $R_a \leq R_n/\Omega$  olduğunu, göstermelidir.

GKT yöntemi, temelde tasarım felsefesi farklı olmasına rağmen pek çok açıdan TS 648 standardında kullanılan emniyet gerilmeleri (EG) yöntemine benzemektedir. Her iki yöntemde de yükler arttırılmamakta, buna karşın dayanımlar ciddi oranlarda azaltılmaktadır. Bu nedenle, tezde TS 648 ile ÇYTHYEEY’de tanımlanan tasarım esasları karşılaştırılırken, GKT yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Buna karşın, tasarım tabloları hazırlanırken, kullanım alanının daha geniş olduğu düşünülerek, YDKT yöntemi kullanılmıştır.

### 3.2. Basınç Etkisindeki I-kesitli Hadde Profiller için Tasarım Kuralları

ÇYTHYEEY Madde 8.1.2’de verilen tasarım esaslarına göre, eksenel basınç kuvveti etkisi altındaki bir çelik yapı elemanının “karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı” ( $P_n$ ), enkesitinin asal eksenlerinden herhangi biri etrafında eğilmeli burkulma, burulmalı burkulma ve/veya eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumlarına göre hesaplanan dayanımlardan en küçüğü olarak alınmalıdır. Eksenel basınç kuvveti etkisi altındaki çift simetri eksenli I-kesitli elemanlar için eğilmeli-burulmalı burkulma söz konusu olmadığından, eğilmeli burkulma ve burulmalı burkulma sınır durumlarının dikkate alınması yeterlidir.

Yönetmeliğin belirtilen maddesinde, eksenel basınç kuvveti etkisi altındaki bir çelik yapı elemanının “tasarım basınç kuvveti dayanımı” ( $\phi_c P_n$ ) veya “güvenli basınç kuvveti dayanımı” ( $P_n/\Omega_c$ ) hesaplanırken kullanılması gereken dayanım ve güvenlik katsayıları ( $\phi_c$  ve  $\Omega_c$ ) şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\phi_c = 0,90 \quad \text{ve} \quad \Omega_c = 1,67 \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)’den de görülebileceği gibi, dayanım ve güvenlik katsayılarının çarpımı yaklaşık 1,50’ye eşittir. Karakteristik dayanımların her iki yöntemde de aynı olduğu dikkate alındığında, tasarım dayanımlarının güvenli dayanımlara oranının;

$$\frac{\phi_c P_n}{P_n / \Omega_c} = \phi_c \times \Omega_c = 0,90 \times 1,67 \cong 1,50 \quad (3.2)$$



yaklaşık 1,50 değerine eşit olduğu fark edilebilir. Buradan, dayanımlardan herhangi birinin bilinmesi durumunda diğerinin kolayca hesaplanabildiği görülebilir.

İlerleyen bölümlerde, ÇYTHYEY’de verilen tasarım esasları Bölüm 2’de tanımlanan sınır durumlar çerçevesinde incelenecektir.

### 3.2.1. Akma sınır durumu

Eksenel basınç etkisindeki bir çelik yapı elemanının akma sınırı, üzerindeki aksel basınç kuvveti nedeniyle elemanda oluşan ve tüm enkesitte düzgün yayıldığı kabul edilen gerilmenin yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesine ( $F_y$ ) ulaştığı nokta olarak tanımlanabilir. Yalnızca boyu çok kısa olan ve aynı zamanda enkesiti narin olmayan, bu nedenle de hem genel hem de yerel burkulma tehlikesi bulunmayan, çelik basınç elemanları akarak geçebilmektedir. Bu durumda, Bölüm 2.1’de anlatıldığı gibi, çelik basınç elemanının karakteristik aksel basınç kuvveti dayanımı ( $P_n$ ) akma yüküne ( $P_y=F_yA$ ) eşit olmaktadır. Sıcak haddelenmiş yapısal çeliklerin karakteristik akma gerilmeleri ÇYTHYEY Tablo 2.1A’da verilmektedir. İlgili tablonun bir kısmı, Tablo 3.1’de sunulmuştur. Bu tezin kapsamında ele alınan çelik sınıfları için (S235, S275 ve S355) dayanım hesaplarında kullanılacak karakteristik akma gerilmesi değerleri MPa ( $N/mm^2$ ) cinsinden bu tablodan okunabilmektedir. Bölüm 2.1’de de belirtildiği üzere, pratikte çoğu çelik basınç elemanının akma sınırına ulaşması mümkün olmadığından, bu sınır durumu ÇYTHYEY’de dikkate alınmamıştır.

Tablo 3.1. Sıcak haddelenmiş yapısal çeliklerde karakteristik akma gerilmesi ( $F_y$ ) ve çekme dayanımı ( $F_u$ ) [5]

Standart ve Çelik Sınıfı	Karakteristik Kalınlık, $t$ (mm)			
	$t \leq 40\text{mm}$		$40\text{mm} < t \leq 80\text{mm}$	
	$F_y$ ( $N/mm^2$ )	$F_u$ ( $N/mm^2$ )	$F_y$ ( $N/mm^2$ )	$F_u$ ( $N/mm^2$ )
<b>EN 10025-2</b>				
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	470
S450	440	550	410	550

### 3.2.2. Genel burkulma sınır durumu

ÇYTHYEY Madde 8.2'ye göre, yerel burkulma tehlikesi olmayan, yani, enkesiti "narin olmayan" elemanların karakteristik aksenal basınç kuvveti dayanımı ( $P_n$ ) Denklem (3.3) kullanılarak hesaplanmalıdır.

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'te  $A_g$  elemanın toplam enkesit alanı,  $F_{cr}$  ise kritik burkulma gerilmesidir.  $F_{cr}$ , inelastik burkulma durumu için Denklem (3.4) ve elastik burkulma durumu için Denklem (3.5) kullanılarak hesaplanmalıdır.

$$F_{cr} = \left[ 0,658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y \quad (3.4)$$

$$F_{cr} = 0,877 F_e \quad (3.5)$$

Denklem (3.4) ve (3.5)'te,  $F_e$  elastik burkulma gerilmesi olup, tasarımı yapılan eleman için olası bütün genel burkulma sınır durumları dikkate alınarak hesaplanmalıdır. Bölüm 2'de detaylıca anlatıldığı gibi, aksenal basınç etkisindeki I-kesitli hadde profilleri için olası üç genel burkulma sınır durumu vardır: (i) Güçlü (x) eksen etrafında eğilmeli burkulma, (ii) zayıf (y) eksen etrafında eğilmeli burkulmalı ve (iii) boyuna (z) eksen etrafında burulmalı burkulma. ÇYTHYEY Madde 8.2.1 ve Madde 8.2.2'ye göre, belirtilen üç sınır durum için elastik burkulma gerilmeleri (bu çalışmada sırasıyla  $F_{ex}$ ,  $F_{ey}$  ve  $F_{ez}$  simgeleriyle ifade edilmiştir) Denklem (3.6), Denklem (3.7) ve Denklem (3.8) kullanılarak hesaplanabilir;

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(L_{cx} / i_x)^2} \quad (3.6)$$

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(L_{cy} / i_y)^2} \quad (3.7)$$

$$F_{ez} = \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(L_{cz})^2} + GJ \right] \frac{1}{I_x + I_y} \quad (3.8)$$

Yukarıdaki denklemlerde;  $L_{cx}$ ,  $L_{cy}$  ve  $L_{cz}$ , sırasıyla x, y ve z eksenleri etrafındaki etkin burkulma boyları,  $i_x$  ve  $i_y$  kesitin asal atalet yarıçapları,  $I_x$  ve  $I_y$  kesitin asal atalet momentleri, J ve  $C_w$  sırasıyla kesitin burulma ve çarpılma sabiti, E ve G sırasıyla yapısal çeliğin elastisite ve kayma modülleridir ( $E=200.000$  MPa ve  $G=77.200$  MPa). Yönetmelikte, z-ekseni etrafındaki burkulma durumunda burkulma boyunun ( $L_{cz}$ ), güvenli tarafta kalan bir yaklaşımla, eleman boyuna eşit alınabileceği belirtilmiştir.

Eğilmeli burkulma sınır durumlarında elemanın elastik bölgede mi elastik olmayan bölgede mi burkulduğunu belirlemek için, elemanın  $L_c/i$  oranı ( $L_{cx}/i_x$  ile  $L_{cy}/i_y$  oranlarından büyük olan) ÇYTHYEY Madde 8.2 gereğince Denklem (3.9)'da verilen sınır değerle karşılaştırılmalıdır;

$$\frac{L_c}{i} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ ise elastik olmayan burkulma, } \frac{L_c}{i} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ ise elastik burkulma (3.9)}$$

Yönetmeliğin aynı maddesinde, burulmalı burkulma sınır durumunda burkulma türüne  $F_y/F_e$  oranının 2,25 değerini geçip geçmediğine bakılarak karar verileceği belirtilmektedir. Buna göre,

$$\frac{F_y}{F_e} \leq 2,25 \text{ ise elastik olmayan burkulma, } \frac{F_y}{F_e} > 2,25 \text{ ise elastik burkulma (3.10)}$$

Denklem (3.10) Denklem (3.9)'dan daha genel olup, sadece burulmalı burkulma sınır durumu için değil, eğilmeli veya eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumları için de kullanılabilir. Bu tez kapsamında, ele alınan bütün genel burkulma sınır durumları için burkulmanın elastik bölgede oluşup oluşmadığı kontrolü Denklem (3.10) kullanılarak yapılmıştır.

ÇYTHYEY Madde 8.5'e göre, narin kesitli elemanların karakteristik aksenal basınç kuvveti dayanımı ( $P_n$ ) Denklem (3.11) kullanılarak hesaplanmalıdır.

$$P_n = F_{cr} A_e \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)'de,  $F_{cr}$  Denklem (3.4) ve Denklem (3.5)'ten uygun olan kullanılarak hesaplanmalıdır.  $A_e$ , etkin alan olup, yerel burkulma sınır durumuyla alakalı olduğu için, nasıl hesaplanacağı bir sonraki bölümde anlatılacaktır. Denklem (3.3) ile Denklem (3.11) karşılaştırıldığında, narin enkesitli elemanların dayanım hesaplarıyla

narin olmayan enkesitli elemanların dayanım hesapları arasındaki tek farkın narin enkesitli elemanlarda toplam alan yerine etkin alan kullanılması olduğu fark edilebilir.

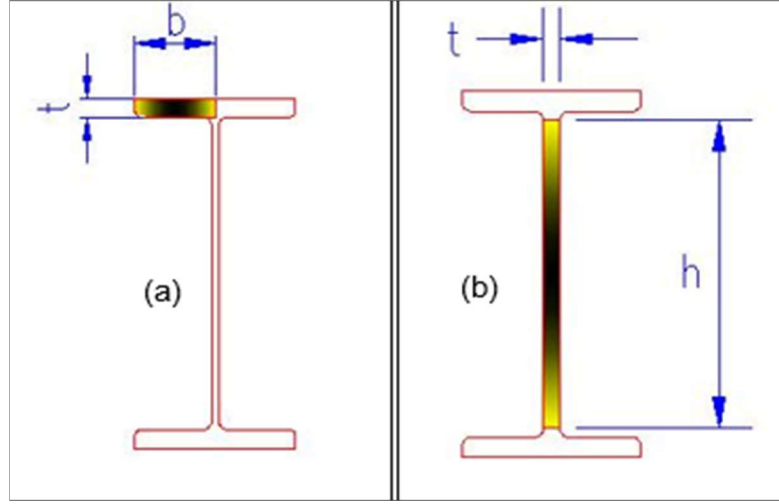
### 3.2.3. Yerel burkulma sınır durumu

ÇYTHYEY Madde 5.4.1'e göre, yerel burkulma sınır durumu dikkate alındığında, aksenal basınç kuvveti etkisi altında bulunan elemanların enkesitleri iki farklı sınıfa ayrılmaktadır: (a) narin enkesitler ve (b) narin olmayan enkesitler. Eleman enkesitinin narin olup olmadığının belirlenmesi için, önce enkesiti oluşturan tüm parçaların genişlik/kalınlık oranları (b/t oranları), yani narinlikleri ( $\lambda$ ), hesaplanmalı, ardından hesaplanan narinlikler ÇYTHYEY Tablo 5.1A'da verilen sınır narinliklerle karşılaştırılmalıdır. Kesiti oluşturan parçalardan birinin dahi narinliğinin sınır değeri aştığının, yani narin olduğunun, tespit edilmesi halinde, enkesit narin enkesit olarak sınıflandırılmaktadır. Ancak ve ancak, enkesiti oluşturan parçalardan hiçbirinin narin olmadığı belirlenirse, kesit narin olmayan enkesit olarak sınıflandırılabilir.

Bölüm 2.2'de belirtildiği gibi, enkesit sınıflandırması yapılırken, I-kesitli bir hadde profilinin, rijitleştirilmiş bir gövde parçasıyla dört adet rijitleştirilmemiş başlık parçasından oluştuğu kabul edilmektedir. ÇYTHYEY Madde 5.4.1.1'e göre başlık parçalarının narinliği ( $\lambda_f$ ), yarım başlık genişliği olan  $b_f/2$ 'nin başlık kalınlığı  $t_f$ 'ye oranına (Şekil 3.1(a)) eşittir, Madde 5.4.1.2'ye göre, gövde narinliği ( $\lambda_w$ ), düz gövde yüksekliği  $h$ 'nin gövde kalınlığı  $t_w$ 'ya oranına (Şekil 3.1(b)) eşittir;

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w} \quad \text{ve} \quad \lambda_f = \frac{b_f/2}{t_f} \quad (3.12)$$

ÇYTHYEY Madde 5.4.1.2'de, düz gövde yüksekliği ( $h$ ), başlıklar arasındaki uzaklıktan eğrilik yarıçaplarının çıkarılmasıyla bulunan yükseklik olarak tanımlanmaktadır. ÇYTHYEY Madde 5.4.1.1'de, başlık kalınlıkları değişken olan enkesitlerin narinlik hesaplarında ortalama başlık kalınlığının, başlıkların serbest uçlarıyla gövde levhasına birleşen kenarlarının arasındaki orta noktanın kalınlığı olarak alınması gerektiği belirtilmektedir.



Şekil 3.1. I-enkesitli bir hadde elemanında (a) rijitleştirilmemiş başlık (b) rijitleştirilmiş gövde parçalarının genişlik ve kalınlıklarının tanımlanması [15]

Daha önce de belirtildiği gibi, enkesit sınıflandırılmasında kullanılan sınır narinlikler ( $\lambda_r$ ) ÇYTHY EY Tablo 5.1.A'da verilmektedir. Tablonun I-kesitli hadde profillerini kapsayan kısmı Tablo 3.1'de sunulmuştur.

Tablo 3.2. ÇYTHY EY Tablo 5.1A'da aksenal basınç kuvveti etkisindeki I-kesitli hadde profiller için tanımlanan sınır narinlikler [5]

TABLO 5.1A – EKSENEL BASINÇ KUVVETİ ETKİSİNDEKİ ENKESİT PARÇALARI İÇİN GENİŞLİK / KALINLIK ORANLARI				
Durum	Tanım	Genişlik / Kalınlık Oranı, $\lambda$	Genişlik / Kalınlık Oranı Sınır Değeri, $\lambda_r$	Enkesit
1	Hadde I-profillerinin başlıkları, bu profillere bağlanan levhalar, boşluksuz olarak sürekli birleştirilen çift korniyerlerin dış kolları, U- ve T-profillerin başlıkları	$b/t$	$0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
5	U-profillerin ve çift simetri eksenli I-profillerin gövdeleri	$h/t_w$	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Tablo 3.1'e göre, I-kesitli hadde profillerinin gövde ve başlık narinlikleri için yönetmelikte belirlenen sınır değerler (sırasıyla  $\lambda_{rw}$  and  $\lambda_{rf}$ ), Denklem (3.13) kullanılarak hesaplanabilir;

$$\lambda_{rw} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ ve } \lambda_{rf} = 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3.13)$$

Denklem (3.13)'te E ve  $F_y$  sırasıyla yapısal çeliğin elastisite modülü ve karakteristik akma gerilmesidir.

Özet olarak, I-kesitli bir hadde profilinin gövde narinliği ( $\lambda_w$ ) sınır gövde narinliğini ( $\lambda_{rw}$ ) aşarsa ve/veya başlık narinliği ( $\lambda_f$ ) sınır başlık narinliğini ( $\lambda_{rf}$ ) aşarsa, profilin enkesiti narin olarak sınıflandırılır;

$$\text{Narin enkesitli: } \lambda_w = \frac{h}{t_w} > \lambda_{rw} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ ve/veya } \lambda_f = \frac{b_f/2}{t_f} > \lambda_{rf} = 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3.14)$$

Kesit sınıflandırması sonucunda, elemanın kesitinin narin olmadığı belirlenirse elemanın karakteristik aksenal basınç kuvveti dayanımı Denklem (3.3) kullanarak hesaplanmalıdır. Buna karşın, eleman narin bir enkesite sahipse karakteristik dayanım Denklem (3.11) kullanılarak hesaplanmalıdır. Her iki denklemde de görünen kritik burkulma gerilmesi  $F_{cr}$  enkesit sınıfından bağımsız olarak aynı şekilde hesaplanmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, narin enkesitli elemanların tasarımının narin olmayan enkesitli elemanların tasarımından tek farkı dayanım denkleminde kayıpsız alan  $A_g$  yerine etkin alan  $A_e$  kullanılmasıdır. Bir enkesitin etkin alanı, hem narin enkesit parçasının narinliğine hem de kritik burkulma gerilmesine ( $F_{cr}$ ) bağlıdır.

Narin enkesitli elemanların tasarım esasları, ÇYTHYKY Madde 8.5'te tanımlanmıştır. "Etkin alan"  $A_e$ , enkesitte bulunan her bir narin enkesit parçası için etkin olmayan alanın enkesit alanından çıkarılmasıyla bulunur. Genişliği  $b$ , kalınlığı  $t$  olan bir narin enkesit parçasının etkin olmayan alanı, parçanın kayıpsız genişliğinden etkin genişliği ( $b_e$ ) çıkarılıp kalınlığıyla çarpılarak, yani  $(b-b_e) \times t$  ifadesinden hesaplanabilir. ÇYTHYKY Madde 8.5'e göre, enkesit sınıfı narin olan I-kesitli bir hadde profilinin narin enkesit parçasının etkin genişliği ( $b_e$ ), (gövde için  $h_e$ , başlıklar için  $b_{fe}/2$ ) Denklem (3.15) kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$\lambda \leq \lambda_r \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \text{ ise } b_e = b \text{ ; } \lambda > \lambda_r \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \text{ ise } b_e = b \left( 1 - c_1 \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} \right) \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} \quad (3.15)$$

Burada,

$$F_{el} = \left( c_2 \frac{\lambda_r}{\lambda} \right)^2 F_y \quad (3.16)$$

Denklem (3.15) ve (3.16)'da, b enkesit parçasının genişliği (gövde için h, başlıklar için  $b_f/2$ ),  $\lambda$  enkesit parçasının b/t oranı (I-kesitli profillerin gövde ve başlıkları için Denklem (3.12)'de tanımlanan  $\lambda_w$  ve  $\lambda_f$ ),  $\lambda_r$  ÇYTHYEV Tablo 5.1A'da tanımlanan sınır narinlikler (I-kesitli profillerin gövde ve başlıkları için Denklem (3.13)'de tanımlanan  $\lambda_{rw}$  ve  $\lambda_{rf}$ ), ve  $F_{el}$  Denklem (3.16) ile hesaplanan yerel elastik burkulma gerilmesidir. Denklem (3.15) ve (3.16)'da bulunan  $c_1$  ve  $c_2$  katsayıları, etkin genişlik hata düzeltme katsayıları olup, değerleri farklı enkesit parçaları için ÇYTHYEV Tablo 8.2'de (Tablo 3.3'te) verilmiştir. Bu tabloya göre,  $c_1$  ve  $c_2$  katsayıları, I-kesitli bir hadde profilinin gövdesinin narin olması durumunda sırasıyla 0,18 ve 1,31 başlıklarının narin olması durumunda ise 0,22 ve 1,49 olarak alınmalıdır.

Tablo 3.3. ÇYTHYEV Tablo 8.2'ye göre, narin enkesit parçalarında etkin genişlik hata düzeltme katsayıları [5]

<b>TABLO 8.2 NARİN ENKESİT PARÇALARINDA <math>c_1</math> ve <math>c_2</math> KATSAYILARI</b>		
<b>Narin enkesit parçası</b>	<b><math>c_1</math></b>	<b><math>c_2</math></b>
Rijitleştirilmiş enkesit parçaları (Kutu enkesitlerin cidarları hariç)	0.18	1.31
Kutu enkesitlerin cidarları	0.20	1.38
Diğer tüm elemanlar	0.22	1.49

Denklem (3.15)'te verilen etkin genişlik hesaplarının enkesiti oluşturan parçalardan narin olarak sınıflandırılan bütün enkesit parçaları için ayrı ayrı yapılması gerektiği unutulmamalıdır.

Denklem (3.16)'da verilen ifadenin ÇYTHYEV'nin 2016 yılında yayınlanan ilk baskısında [4] hatalı yazıldığı, yapılan basım hatasının 2018 yılında güncellenen baskısında [5] düzeltildiği belirtilmelidir.

#### 4. I-KESİTLİ ÇELİK BASINÇ ELEMANLARI İÇİN AISC 360-10 VE AISC 360-16'DA TANIMLANAN TASARIM ESASLARI

ÇYTHYEY, AISC 360-16 temel alınarak hazırlanan bir yönetmelik olduğundan, basınç etkisindeki çelik yapı elemanlarının tasarım ilkeleri her iki yönetmelikte de hemen hemen aynıdır. AISC 360-16'da, çelik basınç elemanlarının tasarım esasları Bölüm E'de sunulmuştur. Enkesit sınıflandırmaları, iki yönetmelikte birebir aynı olup, AISC 360-16'da sınır narinlikler Tablo B4.1a'da verilmiştir. Basınç etkisindeki I-kesitli hadde elemanları ele alındığında, iki yönetmelik arasındaki dikkat çeken tek fark AISC 360-16'da eleman narinliği ( $L_c/i$ ) için bir sınır değeri tanımlanmamış olmasıdır. Bununla birlikte, bu yönetmelikte de, "kullanıcı notu" (user note) olarak, kullanıcılara eleman narinliğinin 200'ü aşmaması önerilmektedir.

ÇYTHYEY ile AISC 360-16 arasındaki diğer bir fark da malzeme özelliklerinde gözlenmektedir. AISC 360-16'da, çelik bina tasarımında kullanımına izin verilen çelik malzemeler Amerika'da çelik yapı imalatında yaygın şekilde kullanılan malzemeler olup, mekanik özellikleri ülkemizde kullanılan Avrupa menşeli ürünlerin mekanik özellikleriyle birebir örtüşmemektedir. Tablo 3.1'de sunulan yapısal çelikler, Avrupa profillerde kullanılan yapısal çeliklerdir ve bu tez çalışmasında yalnız bu tabloda listelenen çeliklerden I profillerin üretiminde sıkça kullanıldığı bilinen çelik sınıfları dikkate alınmıştır.

ABD'de 2010 yılında yayınlanan ve 2016 yılında AISC 360-16 yayınlanana kadar yürürlükte kalan AISC 360-10 yönetmeliğinde eksenel basınç kuvveti etkisindeki elemanlar için tanımlanan tasarım esasları, AISC 360-16'daki (ve dolayısıyla ÇYTHYEY'deki) tasarım esaslarıyla karşılaştırıldığında, enkesiti narin olmayan sıcak şekillendirilmiş I profillerin tasarım esaslarında bir güncelleme yapılmadığı, yalnız etkin burkulma boyu için 2010 baskısında kullanılan KL ifadesi yerine, 2016 baskısında  $L_c$  simgesinin kullanıldığı görülmektedir. AISC 360-16'da olduğu gibi, AISC 360-10'da da eksenel basınç kuvveti etkisindeki çelik basınç elemanlarının tasarım kuralları Bölüm E'de tanımlanmaktadır. AISC 360-10'daki tasarım kuralları dikkatlice incelendiğinde, Amerikan çelik bina yönetmeliğinin bu baskısında da, eleman narinliği için kesin bir sınırlandırma olmadığı, ancak, kullanıcıların 200 değerini aşmamaları için uyarıldığı görülmektedir.



Eksenel basınç kuvveti etkisindeki elemanların tasarımı dikkate alındığında, AISC 360-16 ile AISC 360-10 yönetmelikleri arasındaki en belirgin fark, narin enkesitli elemanların tasarım esaslarında gözlenmektedir. Bu tür elemanların tasarımında yönetmeliğin 2010 baskısında kullanılan “Q-katsayıları yöntemi” yerini, 2016 baskısında “etkin alan yöntemine” bırakmıştır. Tez kapsamında incelenen elemanların tasarımı açısından, AISC 360-16 ile AISC 360-10 arasındaki tek fark narin enkesitli elemanların tasarım esaslarında gözlemlendiğinden, tezin bu bölümünde yalnız bu esaslar irdelenecektir.

AISC 360-10 Bölüm E7’ye göre, narin enkesitli çelik yapı elemanlarının karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı ( $P_n$ ) Denklem (4.1) kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)’de  $A_g$  elemanın kayıpsız enkesit alanı olup, kritik burkulma gerilmesi ( $F_{cr}$ ), burkulma elastik olmayan bölgede gerçekleşiyorsa Denklem (4.2), elastik bölgede gerçekleşiyorsa Denklem (4.3) kullanılarak hesaplanmalıdır.

$$F_{cr} = \left[ 0,658 \frac{QF_y}{F_e} \right] QF_y \quad (4.2)$$

$$F_{cr} = 0,877F_e \quad (4.3)$$

Denklem (4.2) ve Denklem (4.3)’te, elastik burkulma gerilmesi  $F_e$ , Denklem (3.6), Denklem (3.7) veya Denklem (3.8)’den uygun olanlar kullanılarak hesaplanmalıdır. Denklem (4.3)’te, “net azaltma katsayısı” (“net reduction factor”) olarak isimlendirilen Q katsayısı ise, azaltma katsayıları  $Q_s$  ile  $Q_a$ ’nın çarpımına eşittir. AISC 360-10 Bölüm E7’deki kullanıcı notunda Q’nun, yalnız rijitleştirilmemiş narin parça(lar) içeren kesitlerde  $Q_s$ ’ye eşit ( $Q_a= 1,0$ ) olduğu, yalnız rijitleştirilmiş narin parça(lar) içeren kesitlerde  $Q_a$ ’ya eşit ( $Q_s= 1,0$ ) olduğu, rijitleştirilmiş ve rijitleştirilmemiş narin enkesit parçalarını bir arada içeren kesitlerde ise, her iki azaltma katsayısının ( $Q_s$  ve  $Q_a$ ) çarpımına eşit olduğu belirtilmektedir.

Burkulmanın elastik bölgede gerçekleşip gerçekleşmediği ise aşağıdaki denklemlerden uygun olan kullanılarak belirlenmelidir;

$$\text{Elastik olmayan burkulma: } \frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ veya } \frac{QF_y}{F_e} \leq 2,25 \quad (4.4)$$

$$\text{Elastik burkulma: } \frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ veya } \frac{QF_y}{F_e} > 2,25 \quad (4.5)$$

Denklem (4.1), Denklem (4.2) ve Denklem (4.3) sırasıyla Denklem (3.11), Denklem (3.4) ve Denklem (3.5) ile karşılaştırıldığında, AISC 360-16'da kritik burkulma gerilmesinin kesit sınıflandırmasından bağımsız olduğu, buna karşın, AISC 360-10'da narin enkesitli elemanların tasarımında kritik burkulma gerilmesinde karakteristik akma gerilmesi  $F_y$  yerine "azaltılmış" akma gerilmesi  $QF_y$ 'nin kullanıldığı, bu değişikliğin de yalnız elastik olmayan bölgede burkulan kolonlarda fark oluşturduğu görülebilir. Denklem (4.4) ve Denklem (4.5) ile Denklem (3.9) ve Denklem (3.10) karşılaştırıldığında, AISC 360-10'da narin enkesitli elemanların tasarımında, burkulma türünün belirlendiği sınır değerlerde de  $F_y$  yerine  $QF_y$ 'nin kullanıldığı, buna karşın, AISC 360-16'da sınır değerlerin, kritik burkulma gerilmesinde olduğu gibi, kesit sınıfından bağımsız olduğu görülmektedir. İki yönetmelikte tanımlanan tasarım esasları arasında dikkat çeken bir diğer fark da, karakteristik dayanım hesabında, kritik burkulma gerilmesinin AISC 360-16'da etkin enkesit alanı ile, AISC 360-10'da ise kayıpsız enkesit alanı ile çarpılmasıdır.

I-enkesitli bir hadde profilinin başlıklarının narin olması durumunda,  $Q_s$  azaltma katsayısı AISC 360-10 Bölüm 7.1'de verilen denklemler kullanılarak hesaplanmalıdır. Bu denklemler, Denklem (3.12)'deki simge ve tanımlar kullanılarak, Denklem (4.6) ve Denklem (4.7)'de yeniden yazılmıştır;

$$0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \lambda_f < 1,03 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ ise } Q_s = 1,415 - 0,74(\lambda_f) \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (4.6)$$

$$1,03 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \leq \lambda_f \text{ ise } Q_s = \frac{0,69E}{F_y(\lambda_f)^2} \quad (4.7)$$

AISC 360-10 Bölüm 7.2'ye göre, I-kesitli bir hadde profilinin gövdesinin narin olması durumunda,  $Q_a$  azaltma katsayısı gövdenin etkin alanı  $A_{ew}$ , kayıpsız enkesit alanı  $A_{gw}$ 'ye bölünerek hesaplanmalıdır;

$$Q_a = \frac{A_{ew}}{A_{gw}} = \frac{h_e t_w}{h t_w} = \frac{h_e}{h} \quad (4.8)$$

Denklem (4.8)'den fark edilebileceği gibi, I kesitli bir elemanın narin gövde parçası için bu oran, etkin düz gövde yüksekliğinin ( $h_e$ ), kayıpsız düz gövde yüksekliğine ( $h$ ) bölümüne eşittir. Bu durumda, AISC 360-10 Bölüm 7.2'de  $Q_a$  için tanımlanan genel tasarım denklemleri, I enkesitli elemanların narin gövdeleri için aşağıdaki denkleme indirgenebilir;

$$\lambda_w \geq 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ için } Q_a = \frac{1,92}{\lambda_w} \sqrt{\frac{E}{f}} \left[ 1 - \frac{0,34}{\lambda_w} \sqrt{\frac{E}{f}} \right] \leq 1,0 \quad (4.9)$$

Denklem (4.9)'da  $f$ ,  $Q=1,0$  alınarak hesaplanan kritik burkulma gerilmesine ( $F_{cr}$ 'ye) eşittir.



## 5. I-KESİTLİ ÇELİK BASINÇ ELEMANLARI İÇİN TS 648'DE TANIMLANAN TASARIM ESASLARI

TS 648'de tanımlanan tasarım esasları, sınır durumlara göre tasarım yönteminden önce çelik yapı tasarımında kullanılan emniyet gerilmeleri yöntemini temel alarak hazırlanmıştır. Bu yöntem, servis yüklerine maruz kalan bir çelik yapı elemanında oluşan gerilmelerin, önceden belirlenen emniyet gerilmelerini aşmayacak şekilde tasarlanması esasına dayanmaktadır [3]. Emniyet gerilmeleri, elemanın taşıdığı yük türüne bağlı olarak, elemanın üretildiği yapısal çelik malzemenin akma sınırı, çekme dayanımı ve/veya burkulma tehlikesi olan elemanlarda elemanın boyuna bağlı olarak belirlenen burkulma gerilmesinin önceden belirlenen emniyet katsayılarına bölünmesiyle elde edilmektedir. TS 648'de, elemanda oluşan gerilmeler hesaplanırken yük katsayılarıyla çarpılarak artırılmamış "çalışma" yükleri kullanılır. Bu açıdan TS 648'de kullanılan tasarım yönteminin, ÇYTHYEY'de tanımlanan GKT yöntemine benzediği söylenebilir.

TS 648'de, çelik basınç elemanlarının tasarım kuralları Bölüm 3.2'de tanımlanmıştır. Bölüm 3.2.2'de, bu tür elemanlarda yapılması gereken gerilme tahkiki için, iki farklı yöntem sunulmuştur: (i) burkulma sayıları metodu ile basınç tahkiki ve (ii) eleman narinliği göz önünde bulundurularak basınç emniyet gerilmelerinin tahkiki. Bu tezde, ikinci yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde göre, elemanda oluşan en büyük gerilme ( $\sigma_{max}$ ), basınç emniyet gerilmesini ( $\sigma_{bem}$ ) aşmamalıdır. TS 648'in ÇYTHYEY'den diğer bir farkı da, yapısal güvenlik koşulunun gerilmeler cinsinden ifade edilmiş olmasıdır. ÇYTHYEY'de tanımlanan esaslara göre hesaplanan dayanım değerleriyle karşılaştırılabilir değerler elde etmek amacıyla, basınç emniyet gerilmeleri ( $\sigma_{bem}$ ) kayıpsız enkesit alanlarla ( $A_g$ ) çarpılarak, elemanların TS 648'e göre emniyetle taşıyabilecekleri en büyük yük ( $P_{max}$ ) değerleri hesaplanmıştır;

$$P_{max} = P_{em} = \sigma_{bem} A_g \quad (5.1)$$

Bu tezde, Denklem (5.1) kullanılarak hesaplanan yük değerlerinin bir tür "emniyetli dayanım" değerleri olduğu düşünülerek, elemanın emniyetle taşıyabileceği en büyük değerleri için  $P_{max}$  yerine  $P_{em}$  simgesi kullanılmış ve ilgili yük değerleri "emniyetli eksenel basınç kuvveti dayanımı" değerleri olarak adlandırılmıştır.  $P_{em}$  değerlerinin

ÇYTHYEEY'deki GKT yönteminden elde edilen güvenli dayanım ( $P_n/\Omega_c$ ) değerleriyle karşılaştırılabileceği kabul edilmiştir.

Basınç etkisindeki hadde elemanları için tanımlanan tasarım esasları karşılaştırıldığında, TS 648 ile ÇYTHYEEY arasında gözlenen bir diğer fark da, TS 648'de yerel burkulma ve burulmalı burkulma sınır durumlarının tasarıma dahil edilmemesidir. TS 648'de yerel burkulma sınır durumu dikkate alınmadığından, kesit sınıflandırması da yapılmamaktadır. Tasarım esasları arasındaki bu fark, tasarım denklemlerinde kullanılan simgeleri de etkilemiştir.  $\lambda$  simgesi, ÇYTHYEEY'de elemanın kesitini oluşturan parçaların narinlikleri için kullanılırken, TS 648'de eleman narinliği için kullanılmaktadır.

TS 648 Bölüm 3.2.2.2'ye göre basınç emniyet gerilmesi ( $\sigma_{bem}$ ), elemanın narinliğine ( $\lambda=KL/i$ ) bağlı olarak Denklem (5.2), Denklem (5.3) veya Denklem (5.4)'ten uygun olan kullanılarak hesaplanmalıdır.

$$\text{Eğer } \lambda < 20 \text{ ise } \sigma_{bem} = 0,60F_y \quad (5.2)$$

$$\text{Eğer } 20 \leq \lambda < \lambda_p \text{ ise } \sigma_{bem} = \frac{[1-0,5(\lambda/\lambda_p)^2]F_y}{n}; \quad n = 1,5 + 1,2\left(\frac{\lambda}{\lambda_p}\right) - 0,2\left(\frac{\lambda}{\lambda_p}\right)^3 \geq 1,67 \quad (5.3)$$

$$\text{Eğer } \lambda_p \leq \lambda \text{ ise } \sigma_{bem} = \frac{2}{5} \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (5.4)$$

Denklem (5.3) veya Denklem (5.4)'te sınır narinlik  $\lambda_p$ , Denklem (5.5)'den hesaplanmalıdır;

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (5.5)$$

Denklem (5.2), Denklem (5.3) ve Denklem (5.4)'ten fark edilebileceği gibi, TS 648, eleman narinliği 20'den küçük olan çelik basınç elemanlarında eğilmeli burkulmayı ihmal ederek akma yüküne göre hesap yapmaktadır. Bu tür elemanların tasarımında kullanılan emniyet katsayısı yaklaşık 1,67'ye eşittir. Narinliği sınır narinlikten ( $\lambda_p$ ) büyük olan elemanlarda ise emniyet gerilmesi elastik burkulma gerilmesinin değeri 2,5 olarak alınan emniyet katsayısına bölünerek hesaplanmaktadır. Orta narinlikli elemanlarda basınç emniyet gerilmesi hesabı için Denklem (5.3)'te verilen ifade ampirik olup, bu tür elemanlar için tanımlanan emniyet katsayısı (n) elemanın

narınlığına bağlı olarak 1,67 ile 2,5 arasında değişmektedir. TS 648'de eleman narınlığı için herhangi bir sınırlandırma yapılmadığı da belirtilmelidir. Aslında TS 648'de sunulan tasarım denklemleri, Amerikan elik yapı yonetmeliğinin 1978 ve 1989 yıllarında yayınlanan ve emniyet gerilmeleri yontemi kullanılan baskılarında [16] yer alan tasarım denklemlerine çok benzemektedir.

TS 648 izelge 1'de, yapısal elik için elastisite modülü değerinin  $E=206182$  MPa olarak tanımlandığı görülmektedir. Ancak, bu tezde, TS 648'e göre hesaplanan dayanımların diğer yonetmeliklere göre hesaplanan dayanımlarla uyumlu olması amacıyla,  $E=200000$  MPa değerı kullanılmıştır. Benzer şekilde, TS 648 izelge 1'de, Fe 37 ve Fe 52 eliklerinin akma sınırları sırasıyla 235 ve 353 MPa olarak tanımlanmış olmakla birlikte, ÇYTHYEY'de S235 ve S355 olarak isimlendirilen bu yapısal elik türlerinin akma sınırları için ÇYTHYEY'de tanımlanan değerler, sırasıyla 235 ve 355 MPa, kullanılmıştır.

## 6. BASINÇ ETKİSİNDEKİ I-KESİTLİ ÇELİK HADDE ELEMANLARIN TASARIMI İÇİN FARKLI YÖNETMELİK VE STANDARTLARDA TANIMLANAN ESASLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Tezin bu bölümünde, aksenal basınç kuvveti etkisi altında kalan ve Tablo 6.1'de listelenen I-kesitli çelik hadde profilleri için ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan güvenli dayanımlar ile TS 648'e göre hesaplanan emniyetli dayanımlar karşılaştırılacaktır. Böylece üç yıl öncesine kadar ülkemizde kullanılan çelik tasarım standardına göre boyutlandırılmış, basınç etkisindeki I-kesitli bir çelik hadde elemanının dayanım ve kararlılığının güncel çelik tasarım yönetmeliğimize göre yeterliliği araştırılacaktır. AISC 360-16'ya göre hesaplanan dayanımların ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan dayanımlara eşit olduğu düşünüldüğünde, TS 648 ile ÇYTHYEY arasında yapılan karşılaştırma bu yönetmelik için de geçerli olacaktır. Bu bölümde ayrıca, narin enkesit parçası içeren I-kesitli hadde elemanları için, AISC 360-16'ya göre hesaplanan dayanımlar, AISC 360-10'a göre hesaplanan dayanımlarla karşılaştırılarak; Amerikan çelik bina tasarım yönetmeliğinin son baskısında narin kesitli elemanların tasarım esaslarında yapılan güncellemenin elemanların tasarımındaki güvenlik seviyesini ne ölçüde değiştirdiği araştırılacaktır.

Tablo 6.1. Tezde incelenen I-kesitli hadde profilleri

Kesit Türü	Kesit Numarası
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
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
HP	200x43, 200x53, 220x57, 260x75, 260x87, 305x79, 305x88, 305x95, 305x110, 305x126, 305x149, 305x180, 305x186, 305x223, 320x88, 320x103, 320x117, 320x147, 320x184, 360x109, 360x133, 360x152, 360x174, 360x180, 400x122, 400x140, 400x158, 400x176, 400x194, 400x213, 400x231
HD	260x54.1, 260x68.2, 260x93, 260x114, 260x142, 260x172, 260x225, 260x299, 320x74.2, 320x97.6, 320x127, 320x158, 320x198, 320x245, 320x300, 360x134, 360x147, 360x162, 360x179, 360x196, 400x187, 400x216, 400x237, 400x262, 400x287, 400x314, 400x347, 400x382, 400x421, 400x463, 400x509, 400x551, 400x592, 400x634, 400x677, 400x744, 400x818, 400x900, 400x990, 400x1086, 400x1202, 400x1299

Tablo 6.1’de belirtildiği gibi, tezin kapsamında her biri 24’er adet üç farklı tür HE (HEA, HEB ve HEM),18’i IPE ve 21’i IPN olmak üzere toplam 39 I kesiti, ayrıca 31 adet HP ve 42 adet HD kesiti ele alınmıştır. Karşılaştırmalarda, dayanım hesapları için üç farklı çelik sınıfı, S235, S275 ve S355 dikkate alınmıştır. Karakteristik akma gerilmesi ( $F_y$ ) değerleri için, başlık kalınlıklarının 40mm’den küçük ( $t \leq 40$ mm) veya 40mm ile 80mm arasında ( $40 \text{mm} < t \leq 80 \text{mm}$ ) olduğu durumlarda, Tablo 3.1’de verilen değerler kullanılmıştır. Kalınlıkların 80mm değerini geçtiği durumlarda ise, TS EN 10025-2’de [17] tanımlanan ve sıcak haddelenmiş yapısal çelik mamuller için verilen mekanik özellikler (Tablo 6.2’de sunulmuştur) kullanılmıştır.

Tablo 6.2. TS EN 10025-2’de yapısal çelik elemanlar için akma gerilmeleri [17]

Kısa gösteriliş		Asgari akma dayanımı $R_{eH}^a$ MPa <sup>b</sup> Anma kalınlığı Mm						
EN 10027-1 ve CR 10260’a göre	EN 10027- 2’ye göre	$\leq 16$	$> 16$ $\leq 40$	$> 40$ $\leq 63$	$> 63$ $\leq 80$	$> 80$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 150$	$> 150$ $\leq 200$
S235JR	1.0038	235	225	215	215	215	195	185
S235J0	1.0114	235	225	215	215	215	195	185
S235J2	1.0117	235	225	215	215	215	195	185
S275JR	1.0044	275	265	255	255	235	225	215
S275J0	1.0143	275	265	255	255	235	225	215
S275J2	1.0145	275	265	255	255	235	225	215
S355JR	1.0045	355	345	335	335	315	295	285
S355J0	1.0553	355	345	335	335	315	295	285
S355J2	1.0577	355	345	335	335	315	295	285
S355K2	1.0596	355	345	335	335	315	295	285
S450J0 <sup>d</sup>	1.0590	450	430	410	390	380	380	-

### 6.1. Kesitlerin Sınıflandırılması

Tablo 6.1’de listelenen kesitlerin başlık ve gövde narinlikleri ( $\lambda_f$  ve  $\lambda_w$  değerleri) Denklem (3.12) kullanılarak hesaplanmış, her enkesit grubu için elde edilen en büyük değerler ( $\lambda_{f,max}$  ile  $\lambda_{w,max}$ ) Tablo 6.3’te sunulmuştur. Tablodan görülebileceği gibi, gövde narinliği en yüksek olan kesit, HEA grubunda (HE 1000 A), başlık narinliği en yüksek olan kesit ise HP grubunda (HP 360 x 109) bulunmaktadır.



Tablo 6.3. Tezde incelenen kesitlerin başlık ve gövde narinliklerinin ilgili kesit grubu içindeki en büyük değerleri ( $\lambda_{f,max}$  ile  $\lambda_{w,max}$ )

	IPE	IPN	HEA	HEB	HEM	HP	HD
$\lambda_{f,max}$	7,01	4,05	10,77	7,89	4,36	14,38	13,68
$\lambda_{w,max}$	42,83	23,45	52,61	45,68	41,33	27,21	28,13

Tablo 6.4'te ise tezin kapsamında incelenen üç çelik sınıfı için Denklem (3.13) kullanılarak hesaplanan sınır narinlik değerleri listelenmiştir. Tablodan fark edilebileceği gibi,  $F_y$  arttıkça sınır narinlikler azalmaktadır. Bu nedenle, başlık kalınlıkları 80 mm'den büyük olan HD profillerde sınır narinlikler, kalınlıkları daha küçük olan HD profillere göre nispeten daha büyüktür. İncelenen  $F_y$  değerleri arasında,  $F_y = 355$  MPa için hesaplanan sınır narinlikler en küçüktür.

Tablo 6.4. ÇYTHYFY'de aksenal basınç kuvveti etkisindeki I-kesitli hadde profillerin başlık ve gövdeleri için tanımlanan sınır narinliklerin farklı çelik sınıfları için değerleri

Çelik Sınıfı	$F_y$ (MPa)	$\lambda_{rf}$	$\lambda_{rw}$
S235	235	16,34	43,47
	215	17,08	45,44
	195	17,93	47,72
S275	275	15,10	40,18
	255	15,68	41,73
	225	16,70	44,42
S355	355	13,29	35,37
	335	13,68	36,41
	315	14,11	37,54
	295	14,58	38,80

Tablo 6.3 ve Tablo 6.4 karşılaştırıldığında, incelenen tüm çelik sınıfları için, IPN profillerin tamamının, diğer kesit gruplarında ise S235 çelik kaliteli IPE, HEM, HP ve HD profiller ile S275 çelik kaliteli HP ve HD profillerin tamamının narin olmayan kesitlere sahip oldukları görülebilir. Tezin bu bölümünde incelenen çelik kaliteleri için, narin kesitli olduğu belirlenen profiller Tablo 6.5'te listelenmiştir.

Tablo 6.5. ÇYTHYEEY'ye göre kesiti narin olan profiller ve bu profillerin  $L_c/i=1$  değeri için etkin kesit alanlarının kayıpsız kesit alanlarına oranı

Çelik Sınıfı	Profil	Narin Parça	$A_{e,ÇYTHYEEY}/A_g$ (%)
S235	HE 800 A	Gövde	99,2
	HE 900 A	Gövde	97,4
	HE 1000 A	Gövde	94,7
	HE 1000 B	Gövde	98,6
S275	IPE 450	Gövde	100,0
	IPE 500	Gövde	99,0
	IPE 550	Gövde	98,8
	IPE 600	Gövde	98,3
	HE 800 A	Gövde	97,3
	HE 900 A	Gövde	95,3
	HE 1000 A	Gövde	92,6
	HE 900 B	Gövde	99,1
	HE 1000 B	Gövde	96,4
	HE 1000 M	Gövde	99,2
S355	IPE 330	Gövde	99,6
	IPE 360	Gövde	98,8
	IPE 400	Gövde	98,1
	IPE 450	Gövde	96,8
	IPE 500	Gövde	95,8
	IPE 550	Gövde	95,4
	IPE 600	Gövde	94,9
	HE 600 A	Gövde	99,0
	HE 650 A	Gövde	97,7
	HE 700 A	Gövde	97,2
	HE 800 A	Gövde	94,3
	HE 900 A	Gövde	92,2
	HE 1000 A	Gövde	89,3
	HE 800 B	Gövde	98,0
	HE 900 B	Gövde	95,8
	HE 1000 B	Gövde	93,0
	HE 900 M	Gövde	99,1
	HE 1000 M	Gövde	95,7
	HP 305x79	Başlık	98,8
	HP 360x109	Başlık	97,2
HP 400x122	Başlık	98,4	
HD 260x54,1	Başlık	99,0	
HD 320x74,2	Başlık	99,2	

Tablo 6.5'ten fark edilebileceği gibi, incelenen profiller arasında hem başlıkları hem de gövdesi narin olan herhangi bir profil bulunmamaktadır. Kesit narinliği, ya narin

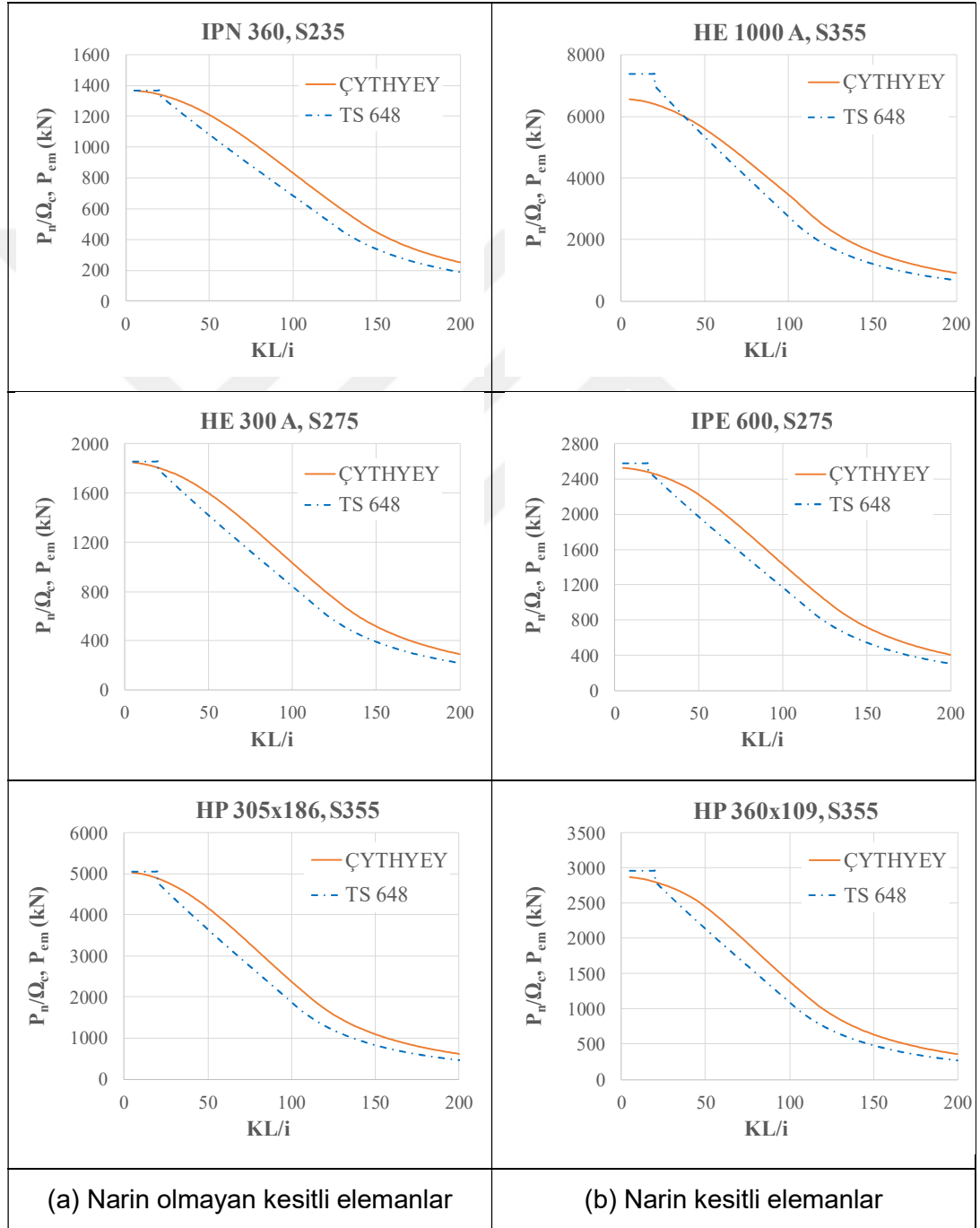
kesitli HP ve HD profillerde olduğu gibi başlıkların narin olması nedeniyle ya da narin kesitli I ve HE profillerde olduğu gibi gövdenin narin olması nedeniyle oluşmaktadır. Tablodan ayrıca, çelik kalitesi yükseldikçe narin kesitli profil sayısının arttığı da görülebilir.

Bölüm 3.2.2’de belirtildiği gibi, ÇYTHYCY’ye göre narin kesitli basınç elemanlarının dayanım hesaplarıyla, kesitleri narin olmayan basınç elemanlarının dayanım hesapları arasındaki tek fark, narin kesitli elemanlarda etkin, narin olmayan kesitli elemanlarda ise kayıpsız enkesit alanın kullanılmasıdır. Ancak, Bölüm 3.2.3’te verilen tasarım kuralları dikkatle incelendiğinde, etkin alan hesaplarının yalnız kesiti oluşturan parçaların narinliklerine değil, aynı zamanda elemanın kritik burkulma gerilmesine, dolayısıyla eleman narinliğine de bağlı olduğu görülebilir. Denklem (3.15)’ten fark edilebileceği gibi, burkulma boyu yeterince büyük, dolayısıyla kritik burkulma gerilmesi yeterince küçük olan bir profilin kesitini oluşturan parçalardan biri, Denklem (3.14)’e göre narin olarak sınıflandırılrsa bile, etkin genişliği kayıpsız genişliğine eşit olabilmektedir. Diğer bir ifadeyle, Denklem (3.14)’e göre narin kesitli olarak sınıflandırılan bir profil, Denklem (3.15)’e göre narin olmayan kesitli olabilmektedir. Kesit sınıflandırılmasında gözlenen bu değişimin temel nedeni, yeterince büyük burkulma boylarında, elemanın basınç davranışını belirleyen sınır durumun yerel burkulma değil de genel burkulma olmasıdır. Yerel burkulma yükü, genel burkulma yükünden daha büyük olduğu için, eleman burkulduğunda kesitin tamamı etkin çalışmaktadır.

Narin kesitli bir basınç elemanının etkin alanı, burkulma boyu azaldıkça artacağından, yerel burkulma nedeniyle narin kesitli profillerin aksel basınç kuvveti dayanımında gözlenebilecek olası en büyük azalmayı belirlemek amacıyla, küçük bir eleman narinliği değeri ( $L_c/i=1,0$ ) için, Tablo 6.5’te listelenen profillerin etkin alanları hesaplanarak kayıpsız enkesit alanlarına oranlanmış; elde edilen oranlar ( $A_{e,ÇYTHYCY} / A_g$ ) aynı tabloda son sütunda sunulmuştur. Tablodan fark edilebileceği gibi, etkin alanlar profillerin üretildiği yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesi arttıkça azalmaktadır. İncelenen profiller arasında,  $A_{e,ÇYTHYCY} / A_g$  oranı en küçük olan profil HE 1000 A profilidir. Bu profilin çok kısa burkulma boylarındaki etkin alanı kayıpsız enkesit alanının %89,3’üne eşittir. Diğer bir ifadeyle, incelenen profillerde, yerel burkulma nedeniyle eleman dayanımında oluşan en büyük azalma yaklaşık % 10 mertebelerindedir. Tablo 6.5’ten, narin başlıklı profillerin  $A_{e,ÇYTHYCY} / A_g$  oranlarının narin gövdelilere kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir.

## 6.2. TS 648 ve ÇYTHYEEY'ye Göre Hesaplanan Dayanımların Karşılaştırılması

Şekil 6.1'de, aksenal basınç kuvveti etkisinde olan I-kesitli çelik hadde profilleri için tipik dayanım eğrileri sunulmuştur. Grafiklerde, TS 648'e göre hesaplanan emniyetli yük ( $P_{em}$ ) ile ÇYTHYEEY'ye göre hesaplanan güvenli yük ( $P_n/\Omega_c$ ) değerlerinin eleman narinliğine ( $KL/i=L_c/i$ ) göre değişimleri çizdirilmiştir.



Şekil 6.1. Tipik (a) narin olmayan (b) narin kesitli basınç elemanları için dayanım eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.1'de, dayanımlar, narinlik değerleri 5'ten 200'e kadar 2,5 artırılarak hesaplanmıştır. Şekil 6.1(a)'da dayanım eğrileri çizdirilen profillerin enkesitleri ÇYTHYEY'ye göre, incelenen çelik kalitesinde, narin olmayan sınıfındadır. Buna karşın, Şekil 6.1(b)'da dayanım eğrileri çizdirilen profiller incelenen çelik kalitelerinde narin enkesitlidir.

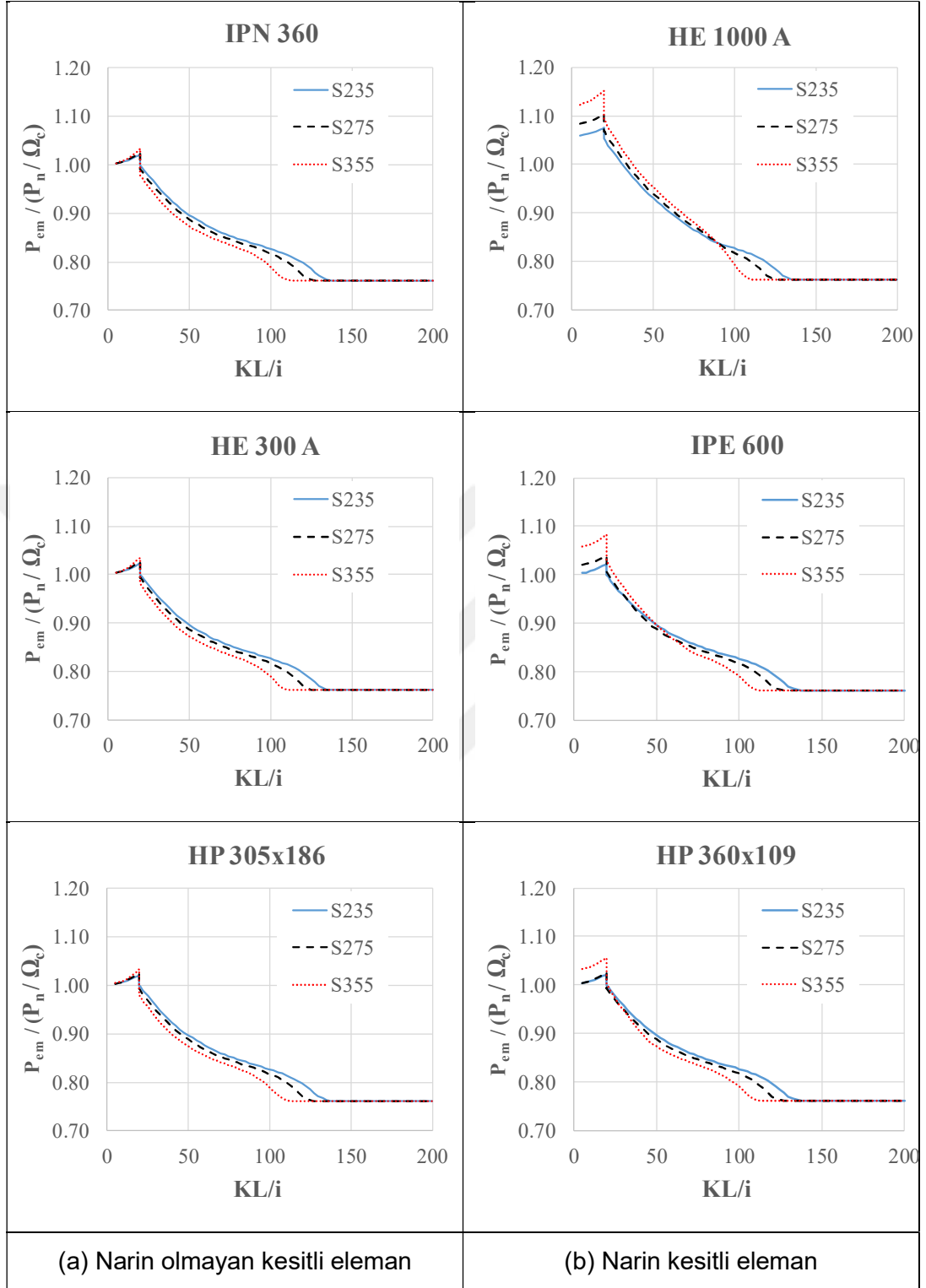
Şekil 6.1(a)'da enkesitleri narin olmayan elemanların dayanım eğrileri incelendiğinde, eğilmeli burkulması önlenmiş ya da boyu çok kısa olan basınç elemanlarının karakteristik dayanımlarının akma yüklerine eşit olduğu ve her iki tasarım dokümanının da bu yükleri doğru hesaplattığı ( $P_{em} = P_n/\Omega_c = 0.6F_yA_g$ ) görülmektedir. Bu tür elemanların enkesitleri narin olmadığı için yerel burkulma, burkulma boyları küçük olduğu için de eğilmeli burkulma, elemanların basınç davranışlarını belirleyen sınır durumlardan olmayıp, davranışı kontrol eden tek sınır durum akma sınır durumu olmaktadır. Bununla birlikte, Şekil 6.1(a)'dan da görülebileceği gibi, eleman narinliği arttıkça ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan dayanımlar azalmaktadır. Buna karşın, TS 648, eleman narinliği 20'yi aşmadığı müddetçe eğilmeli burkulma sınır durumunu dikkate almadığından, bu bölgede emniyetli dayanım eğrileri güvenli dayanım eğrilerinin üzerinde kalmaktadır. Diğer bir ifadeyle, burkulma boyu çok kısa olan elemanlarda ÇYTHYEY, TS 648'e göre daha güvenli sonuçlar vermektedir. Ancak, aradaki dayanım farkı oldukça küçüktür. Küçük narinliklerde gözlenen durumun aksine, orta (yaklaşık 22,5'tan büyük) ve yüksek narinlik değerlerinde, güvenli dayanım eğrilerinin emniyetli dayanım eğrilerinin üstünde kaldığı gözlenmektedir. Diğer bir deyişle, orta ve büyük narinlikli elemanların tasarım hesaplarında, TS 648 ÇYTHYEY'ye kıyasla daha güvenli tarafta kalmaktadır.

Şekil 6.1(b)'de verilen dayanım eğrileriyle Şekil 6.1(a)'da verilenler karşılaştırıldığında, en belirgin farkın S355 çelik kaliteli ve HE 1000 A kesitli elemanda olduğu görülebilir. Bu eleman için çizdirilen dayanım eğrileri çok küçük narinliklerde çakışmamakta, aksine, ÇYTHYEY'ye göre çizdirilen eğri, TS 648'e göre çizdirilen eğrinin altında kalmaktadır. Bunun en önemli nedeni, HE 1000 A enkesitli profilin ÇYTHYEY'ye göre S355 çelik kalitesinde narin enkesite sahip olması nedeniyle, eleman narinliğinin çok küçük olduğu durumlarda bile akma yüküne ulaşamıyor olmasıdır. ÇYTHYEY'nin tasarım esaslarına göre, bu tür elemanların basınç davranışını belirleyen sınır durum yerel burkulmadır ve elemanı oluşturan narin enkesit parçası eleman akma yüküne ulaşmadan burkulmaktadır. ÇYTHYEY bu tür elemanların tasarımında, kayıpsız enkesit alan yerine etkin alan kullanmaktadır. Tezin kapsamında incelenen tüm enkesit ve bu bölümde ele

alınan üç çelik kalitesi için, enkesit alanındaki azalmanın en büyük olduğu profilin S355 çelik kaliteli HE 1000 A profili olduğu belirlenmiştir. Bu profil için, çok küçük burkulma boylarında, etkin alanın kayıpsız alana oranı ( $A_e/A_g$ ) 0,893 olarak tespit edilmiştir. Şekil 6.1(b)'de HE 1000 A ve S355 için çizdirilen güvenli dayanım eğrisinin, emniyetli dayanım eğrisinin bu kadar altında olmasının nedeni budur. Aslında, Şekil 6.1(b)'de dayanım eğrileri sunulan diğer profiller de ÇYTHYEEY'ye göre narin enkesitlidir; ancak,  $A_e/A_g$  oranının IPE 600 ve S275 için 0,983, HP 360 x 109 ve S355 için ise 0,972 olduğu, o nedenle, dayanım eğrileri arasındaki farkın S355 çelik kaliteli HE 1000 A profiline kıyasla nispeten daha küçük olduğu görülmektedir. Şekil 6.1(b)'de verilen grafiklerden de fark edilebileceği gibi, narinlik değeri arttıkça TS 648'in dayanım eğrisi ile ÇYTHYEEY'nin dayanım eğrisi arasındaki fark azalmakta, tıpkı narin olmayan enkesitli elemanlarda olduğu gibi, orta ve büyük narinlikli elemanlarda güvenli dayanım eğrileri emniyetli dayanım eğrilerinin üstüne çıkmaktadır. Dayanım eğrilerinin aynı dayanımı hesaplattığı eleman narinliği değeri enkesite ve çelik kalitesine bağlı olmakla birlikte ilgili değer 40'dan daha büyük olmadığı tespit edilmiştir.

Şekil 6.1'de sunulan grafiklere benzer grafikler incelenen tüm enkesit ve çelik kaliteleri için oluşturulabilir. Ancak, elde edilen dayanımların oranlanarak dayanım oranı ( $P_{em}/(P_n/\Omega_c)$ ) grafiklerinin sunulmasının karşılaştırmalarda kolaylık sağlayacağı düşünülmüştür. Böylece, dayanım oranlarının 1'den küçük olması durumunda, TS 648'e göre hesaplanan dayanımın ÇYTHYEEY'ye göre hesaplanan dayanımdan daha küçük olduğu, diğer bir ifadeyle, TS 648'e göre boyutlandırılan I-kesitli bir basınç elemanının dayanımının ÇYTHYEEY esaslarına göre yeterli olduğu sonucuna kolayca varılabilir. Şekil 6.1'de incelenen profiller için hesaplanan dayanım oranı eğrileri, bu bölümde incelenen üç çelik kalitesi için Şekil 6.2'de sunulmuştur. Şekil 6.2'deki grafikler incelendiğinde dayanım oranlarının yalnızca enkesit özelliklerine bağlı olmadığı, çelik kalitesine de bir miktar bağlı olduğu görülmektedir.

Şekil 6.2'deki dayanım oranı eğrileri incelendiğinde, dayanım eğrilerinin üç genel bölgeden oluştuğu söylenebilir. Eleman narinliğinin 20'den küçük olduğu birinci bölgede, incelenen bütün elemanlar için, dayanım oranlarının artan narinlikle arttığı gözlenmektedir. Bunun temel nedeni, daha önce de belirtildiği gibi, bu bölgede, emniyetli dayanımların sabit kalmasına karşın, güvenli dayanımların artan narinlikle azalıyor olmasıdır. Narin olmayan enkesitli elemanlarda bu artış, yaklaşık 1,00'den başlayıp yaklaşık 1,057 değerine ulaşmaktadır.



Şekil 6.2. Farklı çelik kalitelerine sahip (a) narın olmayan (b) narın enkesitli basınç elemanları için tipik dayanım oranı eğrileri

Kesitleri narin olmayan elemanlarda ise, dayanım oranlarının bu bölgedeki başlangıç ve bitiş değerleri hem elemanın kesitine hem de çelik kalitesine bağlıdır. S355 çelik kaliteli HE 1000 A profilinde, dayanım oranının en büyük değerinin yaklaşık 1,12'ye eşit olduğu gözlenmiştir. Bu oran, bu eleman için kayıpsız enkesit alanın etkin alana oranına ( $A_g/A_e$ ) eşittir ( $1/0,893=1,12$ ). Aynı eleman için narinliğin 20'ye eşit olduğu durumda, dayanım oranının yaklaşık 1,09 olduğu tespit edilmiştir.

Dayanım oranı eğrilerinin ikinci bölgesi, dayanım oranının artan narinlikle azaldığı bölgedir. Bu bölge dayanım oranının sabit olduğu üçüncü bölgeye kadar devam etmektedir. Kesiti narin olmayan elemanlar için, bu bölgenin neredeyse tamamında dayanım oranının değeri 1,0'den küçüktür. Diğer bir ifadeyle, bu bölgede TS 648 daha güvenli sonuçlar vermektedir. Hatta elemanın narinliği arttıkça TS 648'in güvenlik seviyesinin de arttığı görülmektedir. Narin kesitli elemanlar için de durum benzerdir; ancak, bu elemanlarda dayanım oranının 1,0'in altına düştüğü eleman narinliği değerinin elemanın kesitine ve çelik kalitesine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Bununla birlikte, kesiti "en narin" olan HE 1000 A profili için bile dayanım oranının 1,0 değerinin üzerinde olduğu eleman narinliklerinin çok yüksek olmadığı görülmektedir. S355 çelik kalitesinde ilgili değer 40'dan küçük olduğu tespit edilmiştir. Aslında, dayanım oranı eğrilerinin ikinci bölgesinin elastik olmayan bölgede eğilmeli burkulma yapan kolonları içerdiği söylenebilir. Bu bölge, her iki tasarım dokümanının da dayanım hesaplarında elastik burkulma gerilmesini kullandığı eleman narinliğinde sonlanmaktadır. Ancak, ilgili narinlik değeri de kesiti narin olmayan elemanlarda çelik kalitesine, kesiti narin olan elemanlarda ise hem çelik kalitesine hem de kesite bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak, çeliğin akma dayanımı arttıkça, dayanım oranının sabit kaldığı üçüncü bölgenin başladığı narinlik değeri azalmaktadır.

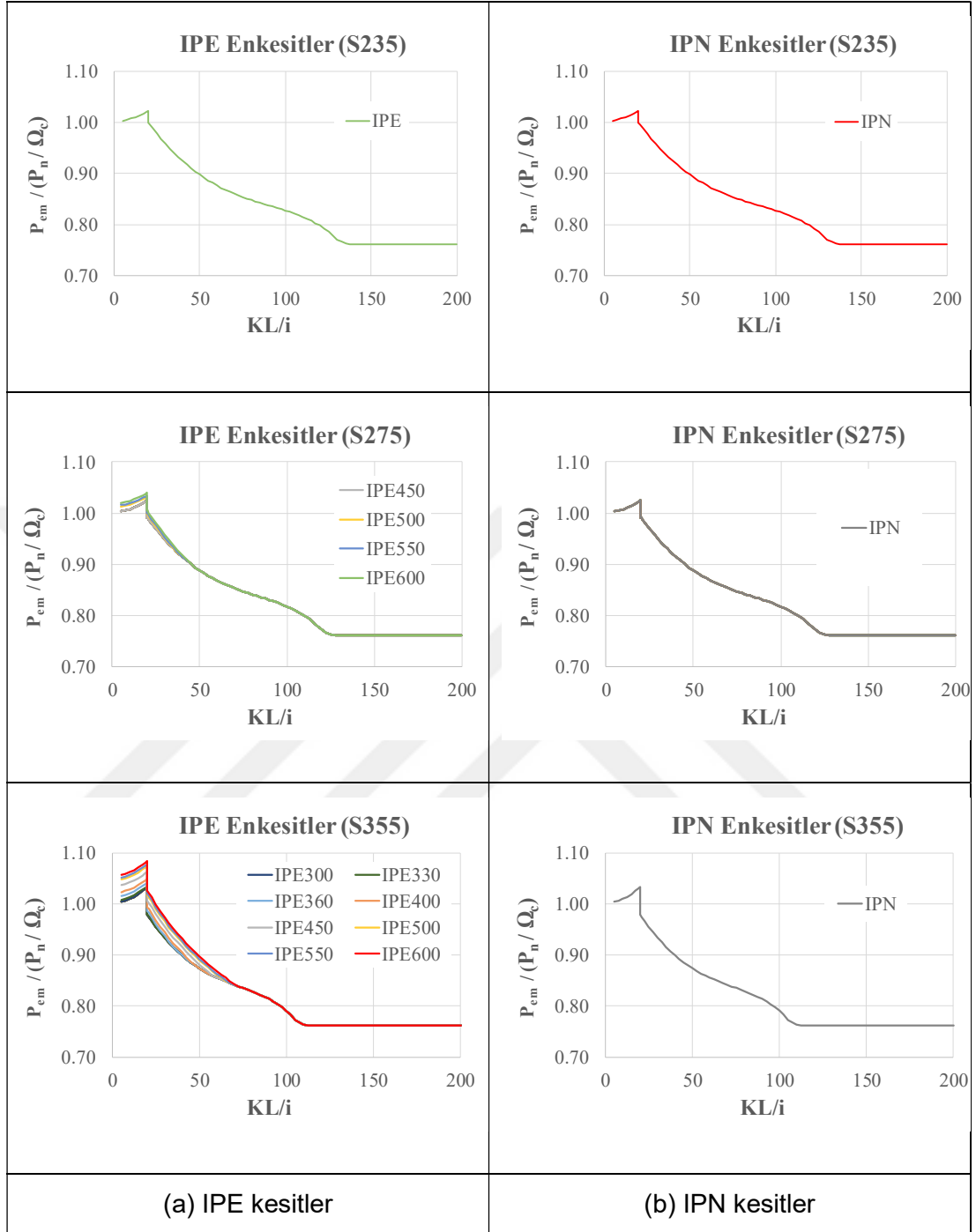
Dayanım oranının eleman narinliğinden bağımsız olduğu üçüncü bölgede ise, incelenen bütün profil ve çelik kaliteleri için dayanım oranının yaklaşık 0,762'ye eşit olduğu gözlenmektedir. Aslında bu değer, elastik bölgede eğilmeli burkulma yapan elemanlar için TS 648'de basınç emniyet gerilmesinin elastik burkulma gerilmesine oranı olan  $2/5$  değerinin (Denklem (5.4)) ÇYTHY'EY'de kritik gerilme hesabında bulunan 0,877 katsayısının (Denklem (3.5)) dayanım katsayısı  $\Omega_c=1,67$ 'na (Denklem (3.1)) oranının bölümüne eşittir ( $(2/5)/(0,877/1,67)=0,762$ ). Dolayısıyla, dayanım oranı eğrilerinin üçüncü bölgesinde, yani elastik bölgede burkulma yapan kolonların tasarımında, TS 648 ÇYTHY'EY'ye göre yaklaşık %25 daha güvenli sonuçlar vermektedir.



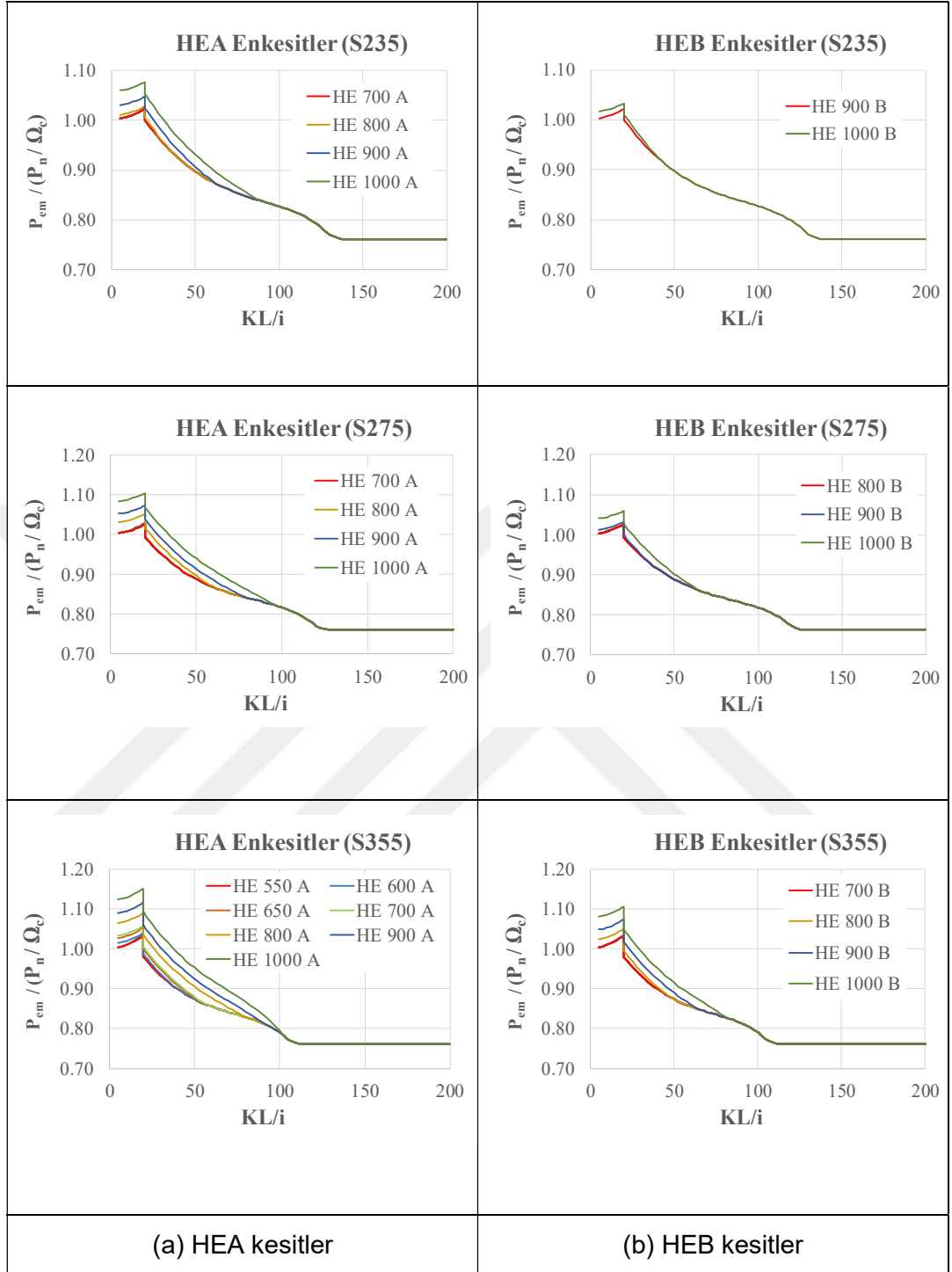
Daha genel sonuçlar elde edebilmek amacıyla, bu bölümde incelenen üç çelik kalitesi ve tezde incelenen profillerin tamamı için, Şekil 6.2'dekilere benzer dayanım oranı ( $P_{em}/(P_n/\Omega_c)$ ) eğrileri çizdirilerek; Şekil 6.3'te IPE ve IPN, Şekil 6.4'te HEA ve HEB, Şekil 6.5'te HEM ve HP, Şekil 6.6'da ise HD kesitli profiller için sunulmuştur.

Şekil 6.3'te S235 çelik kaliteli IPE ve IPN kesitli profiller için çizdirilen dayanım oranı eğrileri dikkatle incelendiğinde, dayanım oranı eğrilerinin iki enkesit grubu için de tek bir eğriye indirildiği görülmüştür. Diğer bir ifadeyle, belirtilen çelik kalitesinde, dayanım oranı eğrileri enkesit türünden bağımsızdır. Aslında bu durum, Şekil 6.3 ve Şekil 6.5'ten de görülebileceği gibi, S275 ve S355 çelik kaliteli IPN kesitler ile S235 ve S275 çelik kaliteli HEM ve HP kesitler için de geçerlidir. Tablo 6.4 göz önünde bulundurulduğunda, belirtilen profil gruplarının belirtilen çelik kalitelerinde narin kesit içermedikleri fark edilebilir. Şekil 6.3'te üç farklı çelik kalitesi ve IPN profiller için çizdirilen üç grafik, tek bir grafikte çizdirildiğinde, Şekil 6.2(a)'daki grafiklerin aynısının elde edildiği görülebilir. Dikkatle incelendiğinde, Şekil 6.2(a)'da farklı enkesitler için çizdirilen dayanım oranı eğrilerinin de aslında çakıştığı görülebilir. Buradan, kesiti narin olmayan profillerin dayanım oranı eğrilerinin kesit türünden bağımsız olduğu, çelik kalitesinden ise bir miktar etkilendiği söylenebilir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu tür profillerde dayanım oranları, narinliğin 22,5'un altında olduğu durumlarda 1,0'den büyük olmakta, ancak en büyük dayanım oranı değeri 1,022'yi aşmamaktadır. Narinliğin daha büyük değerlerinde, dayanım oranı değerleri 1,0'den küçük olup, büyük narinliklerde 0,762'ye kadar düşmektedir. Diğer bir ifadeyle, TS 648, yalnız çok küçük (yaklaşık 25'ten küçük) narinliklerde ÇYTHYEY'ye kıyasla güvensiz sonuçlar verebilmekte, ancak bu durumda dahi, emniyetli dayanımlar güvenli dayanımları en fazla %2,5 aşmaktadır.

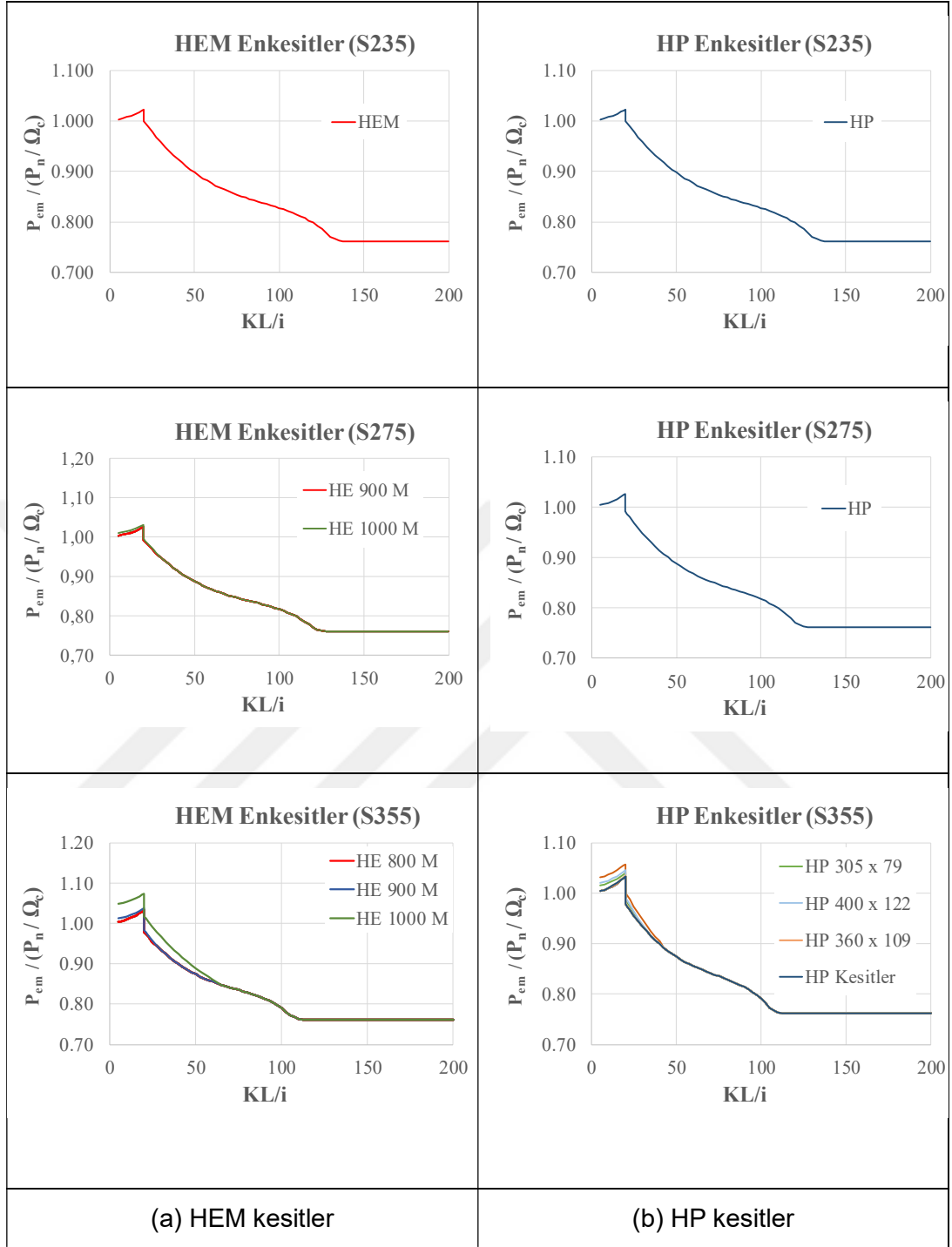
Şekil 6.3'te, S275 çelik kaliteli IPE profiller için çizdirilen dayanım oranı eğrileri incelendiğinde, grafikte dört farklı dayanım oranı eğrisi bulunduğu gözlenebilir. Bu eğrilerden en altta olan narin enkesit parçası içermeyen profillere aittir. Diğer üç eğri ise, Tablo 6.4'e göre, S275 çelik kalitesinde narin gövdeli olan dört IPE enkesitinden (IPE 600, IPE 550, IPE 500 ve IPE 450) üçüne (IPE 600, IPE 550 ve IPE 500) aittir. IPE 450 profilinin dayanım eğrisinin, narin olmayan IPE profillerinin dayanım eğrisiyle hemen hemen çakıştığı gözlenmiştir. Bunun nedeni, ilgili enkesit ve çelik kalitesi için  $A_e/A_g$  oranının yaklaşık 1,0'e eşit olmasıdır.



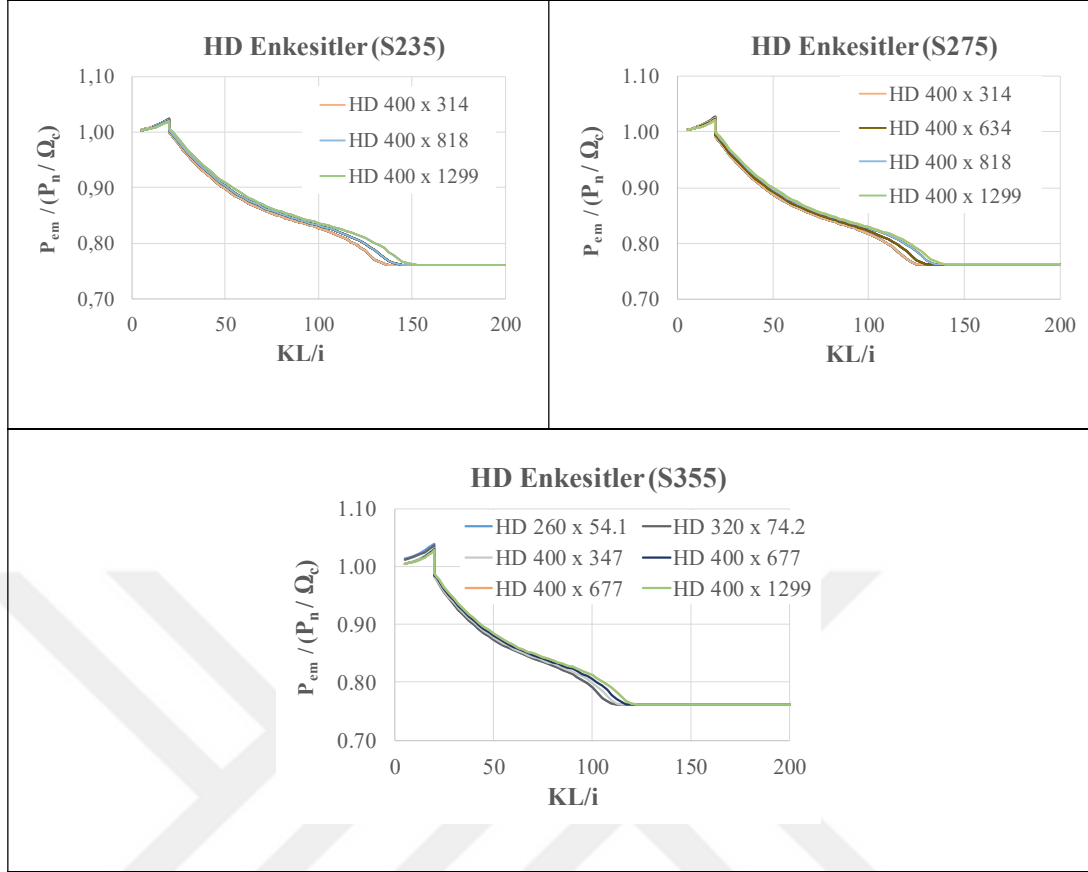
Şekil 6.3. Farklı çelik kalitelere sahip IPE ve IPN kesitli basınç elemanları için dayanım oranı eğrileri



Şekil 6.4. Farklı çelik kalitelerine sahip HEA ve HEB kesitli basınç elemanları için dayanım oranı eğrileri



Şekil 6.5. Farklı çelik kalitelere sahip HEM ve HP kesitli basınç elemanları için dayanım oranı eğrileri



Şekil 6.6. Farklı çelik kalitelerine sahip HD kesitli basınç elemanları için dayanım oranı eğrileri

S275 çelik kalitesi için,  $A_e/A_g$  oranının IPE 500 için 0,99, IPE 550 için 0,988 ve IPE 600 için 0,983 olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, enkesiti “daha narin” olan IPE 600 profili için çizdirilen dayanım oranı eğrisi, IPE profiller arasında en üstte olan eğridir. S275 ve IPE profiller için Şekil 6.3’te sunulan grafik dikkatle incelendiğinde, narin kesitli profiller için çizdirilen eğrilerin narinlik arttıkça narin olmayan kesitli profiller için çizdirilen eğrilere yaklaştığı, belirli bir narinlik değerinden sonra ise tek bir eğriye dönüştüğü gözlenebilir. Bunun en önemli nedeni, bir önceki bölümde detaylıca bahsedildiği gibi, Denklem (3.14)’e göre kesiti narin olarak sınıflandırılan bir profilin, yeterince büyük burkulma boylarında narin olmayan kesitli elemanlar gibi davranması nedeniyle dayanım hesaplarında etkin alan yerine kayıpsız alanın kullanılmaya başlanmasıdır. Diğer bir ifadeyle, belirtilen grafikte narin kesitli bir profil için çizdirilen dayanım oranı eğrisinin, narin olmayan kesitli profiller için çizdirilenlerle birleştiği eleman boyu, etkin alanının kayıpsız alana eşit olduğu burkulma boyudur. Bu durum, Şekil 6.3’te, S355 çelik kaliteli IPE kesitli profillerin dayanım oranı eğrilerinde daha net görülmektedir. Tablo 6.4’e göre, belirtilen çelik kalitesinde, 7 IPE profili (numarası 330’dan 600’ya kadar profiller) narin kesitli olarak

sınıflandırılmaktadır; bu nedenle, grafikte 7 farklı dayanım oranı eğrisi bulunmaktadır. Narin kesitli profiller için çizdirilen eğriler, yeterince büyük eleman narinliklerinde narin olmayan kesitli profiller için çizdirilen eğrilere indirgenmektedir. Kesit narinliği büyüdükçe, belirtilen eleman narinliği değeri de artmaktadır. Kesit narinliği en fazla olan ve dayanım eğrisi en üstte olan IPE 600 profili için, ilgili eleman narinliği değeri yaklaşık 70'dir. Şekil 6.3'te IPE profiller için sunulan grafikler dikkatle incelendiğinde, incelenen bütün profiller için dayanım oranlarının orta ve büyük narinliklerde 1,0'den küçük değerler aldığı, nispeten küçük narinliklerde ise 1,0'den büyük değerlere ulaştığı görülmektedir. IPE profillerde tespit edilen en büyük dayanım oranı değeri 1,084 olup, ilgili değer S355 çelik kaliteli IPE 600 kesitli profilde, eleman narinliğinin 20'ye eşit olduğu eleman boyunda oluşmaktadır. IPN kesitli profillerde olduğu gibi, dayanım oranları eleman narinliğinin 20'den küçük değerlerinde, narinlik arttıkça artarak en büyük değerine ulaşmakta, ardından artan narinlikle azalmaktadır. Büyük narinliklerde, oran narinlikten bağımsız olup, değeri 0,762'ye eşittir.

Tablo 6.4'e göre, HEA ve HEB kesitli profiller arasında incelenen çelik kalitelerinde narin kesitli en az bir profil olduğundan, Şekil 6.4'te sunulan grafiklerde dayanım oranı eğrileri en az iki adet olmaktadır. S355 çelik kalitesinde, 6 HEA ve 3 HEB profili narin enkesitli olduğundan, ilgili grafiklerde, sırasıyla 7 ve 4 farklı eğri görülmektedir. Şekil 6.4'te çizdirilen grafikler, Şekil 6.3'te narin kesitli profiller için çizdirilen grafiklere benzemekte, narin kesitli profillerin dayanım eğrileri, dayanım hesaplarında kayıpsız alanın kullanılmaya başlanmasıyla birlikte narin olmayan kesitli profillerin dayanım eğrilerine dönüşmektedir. İncelenen HEA kesitli profiller arasında, en büyük dayanım oranının 1,151 (S355, HE 1000 A), HEB kesitli profillerde ise 1,106 (S355, HE 1000 B) olduğu tespit edilmiştir. Narinlik oranlarının en küçük değeri ise IPE ve IPN kesitli profillerde de olduğu gibi, 0,762'ye eşittir.

Tablo 6.4'e göre, S235 çelik kaliteli HEM ve HP profiller ile S275 çelik kalitesi HP profiller arasında kesiti narin olan profil bulunmamaktadır. Bu nedenle, Şekil 6.5'te çizdirilen dayanım eğrileri, belirtilen profil grupları için tek bir eğriye indirgenmektedir. HEM kesitli profillerde, S275 çelik kalitesinde bir (HE 1000 M) ve S355 çelik kalitesinde iki (HE 900 M ve HE 1000 M) profil narin enkesitli olduğu için, bu profillerin dayanım eğrileri narin olmayan kesitli profillerin dayanım eğrilerinden küçük narinliklerde ayrılmaktadır. Benzer durum, S355 çelik kaliteli iki HP profilinde gözlenmektedir (HP 260x54,1 ve HP 230x74,2). Şekil 6.5'te narin olmayan kesitli profiller için verilen dayanım oranı eğrileriyle, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te aynı çelik kalitesi için verilen dayanım oranı eğrileri aslında çakışmaktadır. Narin olmayan

kesitli profiller için çizdirilen eğriler ise kesitin narinlik oranına bağlı olduğundan kesitten kesite değişmektedir. İncelenen HEM kesitli profiller arasında, en büyük dayanım oranınının 1,075 (S355, HE 1000 M), HP kesitli profillerde ise 1,057 (S355, HP 360x109) olduğu tespit edilmiştir. Narinlik oranlarının en küçük değeri kesit türü, numarası ve çelik kalitesinde bağımsız olup 0,762'ye eşittir.

Tablo 6.4'e göre, tezde incelenen HD kesitli profillerden yalnız S355 çelik kaliteli HD 260x54,1 ve HD 320x74,2 profilleri narin kesitlidir. Bu nedenle, S235 ve S275 çelik kaliteli HD profilleri için Şekil 6.6'da sunulan grafiklerde, diğer narin kesit içermeyen profil gruplarında olduğu gibi, dayanım oranı eğrilerinin tek bir eğriye indirgeneceği düşünülebilir. Ancak, Şekil 6.6'da sunulan grafikler dikkatle incelendiğinde, dayanım oranı eğrilerinin S235 ve S275 çelik kalitelerinde de farklılaştığı gözlenmektedir. Narin kesitli elemanların eğrilerinde gözlenen ayrılmadan farklı olarak, ilgili eğrilerdeki ayrılma, dayanım oranlarının sabit bir değere ulaştığı narinlik değerlerinde daha belirgindir. Narin kesitli olmamasına rağmen, bazı HD profillerin dayanım oranı eğriliğinde gözlenen bu fark, ilgili profillerin aynı çelik kalitesine sahip olmasına karşın, karakteristik akma gerilmelerinin farklı olmasıdır. Bunun da en önemli nedeni, profillerin et kalınlıklarının 40 mm'den büyük olmasıdır. Tablo 6.1'den görülebileceği gibi, profillerde et kalınlıkları arttıkça  $F_y$  azalmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, bu tez çalışmasında, et kalınlığı 80 mm'yi aşmayan profillerde,  $F_y$  Tablo 3.1 kullanılarak, aşarlarda ise Tablo 6.1 kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre, örnek olarak, S355 çelik kaliteli bir HD profilinde karakteristik akma dayanımı, profilin başlık kalınlığı 40 mm'den küçükse 355 MPa, 40 ile 80 mm arasındaysa 335 MPa, 80 ile 100 mm arasındaysa 315 MPa ve 100 ile 140 mm arasındaysa 295 MPa olarak alınmıştır.  $F_y$ 'nin dayanım oranı eğrilerine etkisi Şekil 6.2'de açıkça görülmektedir.  $F_y$  arttıkça elastik bölgenin başladığı eleman narinliği küçülmektedir. HD profillerin dayanım oranı eğrilerinde elastik bölgenin başlangıcında gözlenen farklılaşmanın nedeni de budur. Sabit dayanım oranına daha küçük narinliklerde ulaşan HD profiller et kalınlıkları daha küçük olanlardır. Bununla birlikte,  $F_y$  nedeniyle oluşan ayrımın en büyük olduğu narinliklerde, dayanım oranlarının değeri 1,0'den yeterince küçük olduğu için, kalın HD profillerinde dahi TS 648, ÇYTHYEY'ye göre daha güvenli tarafta kalmaktadır. İncelenen çelik kalitelerinde HD profillerde gözlenen en büyük dayanım oranınının 1,024 (S355, HD 360x134) olduğu tespit edilmiştir. En küçük dayanım oranı ise, diğer profil ve çelik kalitelerinde olduğu gibi, büyük narinliklerde, 0,762'ye eşittir.

Sonuç olarak, bu bölümde ele alınan üç çelik kalitesi ve tezde incelenen tüm enkesitler için, Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da gösterilen dayanım oranı eğrileri dikkate alındığında, kesiti narin olmayan profillerin eğrilerinin kesit türü ve numarasından bağımsız olduğu, ancak profillerin üretildiği çeliğin karakteristik akma gerilmesine bir miktar bağlı olduğu gözlenmiştir. Kesiti narin olmayan profillerin dayanım oranı eğrileri çok küçük narinliklerde yaklaşık 1,0 değerinden başlayıp narinlik oranı 20 değerine ulaşıncaya kadar artmakta, bu narinlik değerinde en büyük dayanım oranı değeri olan 1,02 değerine ulaşmakta, daha büyük narinliklerde ise artan narinlikle azalmakta, yeterince büyük narinliklerde ise 0,762 değerinde sabitlenmektedir. Eleman narinliği yaklaşık 22,5'tan büyük olan profillerde, TS 648'in ÇYTHYEY'ye göre, güvenli sonuçlar verdiği, küçük narinliklerde ise aradaki farkın ihmal edilebilecek kadar az (en fazla %2,2) olduğu gözlenmiştir. Kesitleri narin olan profillerde ise dayanım oranı eğrilerinin, hem kesit narinliğine hem de çelik kalitesine bağlı olduğu belirlenmiştir. Bu tür profillerde dayanım oranı eğrileri, 1,00 değerinden daha büyük değerlerden (en fazla 1,12'den) başlamakta ve artan narinlikle 1,02'den daha büyük değerlere ulaşabilmektedir. Bu bölümde incelenen profil ve çelik kaliteleri arasında, en büyük dayanım oranınının 1,15 (S355, HE 1000 A) olduğu belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, narinliği 20'ye eşit elemanlarda, TS 648, ÇYTHYEY'ye göre, %15'e kadar güvensiz sonuçlar verebilmektedir. Ancak, daha büyük narinliklerde dayanım oranı değerleri 1,0'in altına düşmektedir. Kesit narinliği en yüksek olan S355 çelik kaliteli HE 1000 A profilinde bile, dayanım oranı değerleri, eleman narinliği 40'tan küçük olmadığı müddetçe, 1,0'den küçük çıkmaktadır. Çoğu çelik basınç elemanının narinliğinin 40'dan yüksek olduğu düşünüldüğünde, aslında pratikte kullanılan eleman boyları için TS 648'in ÇYTHYEY'ye göre hep güvenli sonuçlar verdiği söylenebilir.

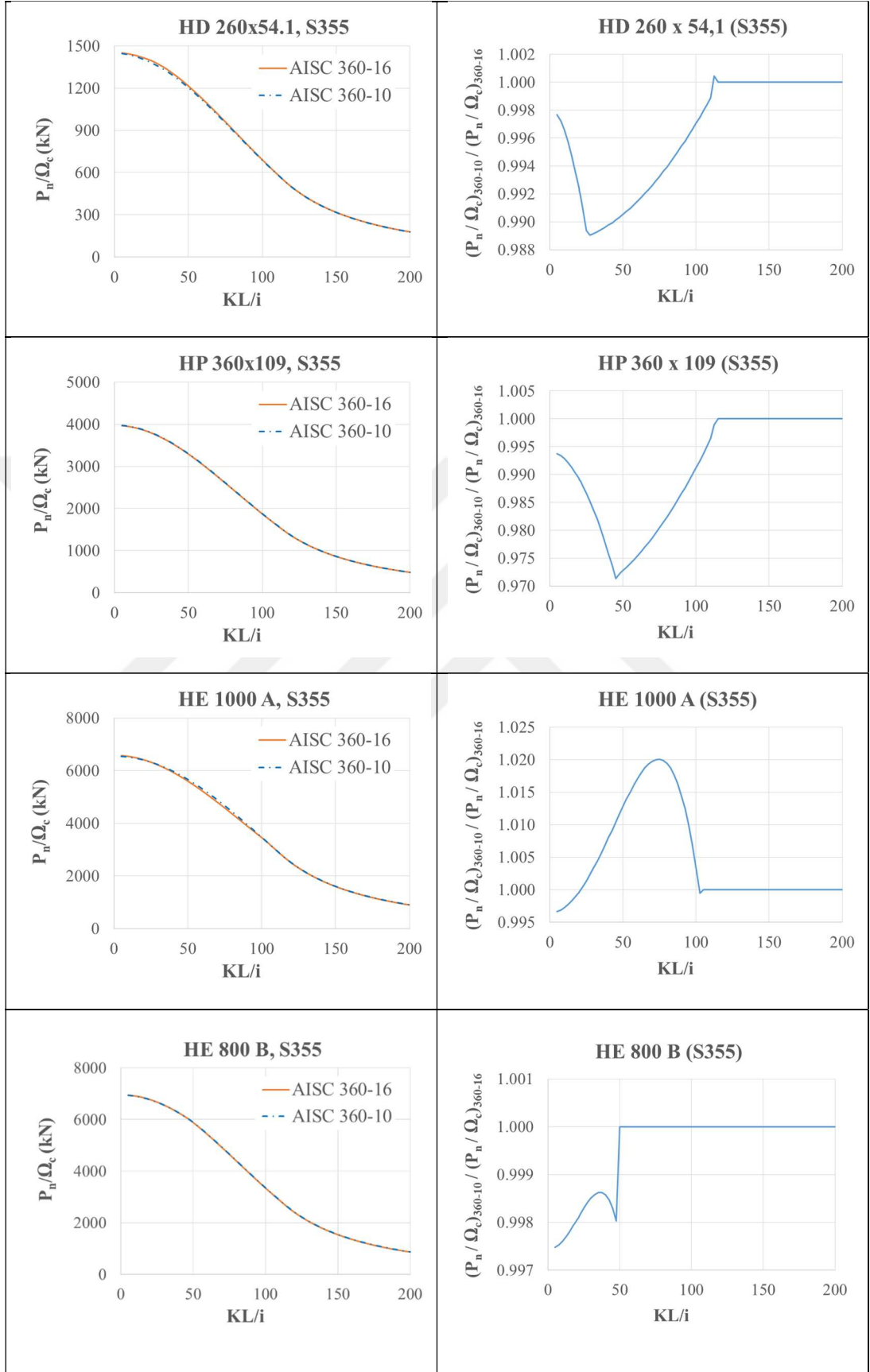
### **6.3. AISC 360-10 ve AISC 360-16 Göre Hesaplanan Dayanımların Karşılaştırılması**

Bölüm 4'te belirtildiği gibi, I-kesitli aksenal basınç kuvveti etkisindeki elemanların tasarım esasları dikkate alındığında, AISC 360-16 (ve dolayısıyla ÇYTHYEY) ile AISC 360-10 yönetmelikleri, yalnız narin kesitli elemanların dayanım hesaplarında birbirinden ayrılmaktadır. Bu nedenle, tezin bu bölümünde, yalnız Tablo 6.4'te listelenen narin kesitli profillerin dayanımları karşılaştırılacaktır. Bu aşamada, her iki yönetmelikte de kesit sınıflandırmasının aynı olduğunu, bu nedenle, AISC 360-16'ya göre narin olarak sınıflandırılan bir kesitin, AISC 360-10'a göre de narin olduğu belirtilmelidir.

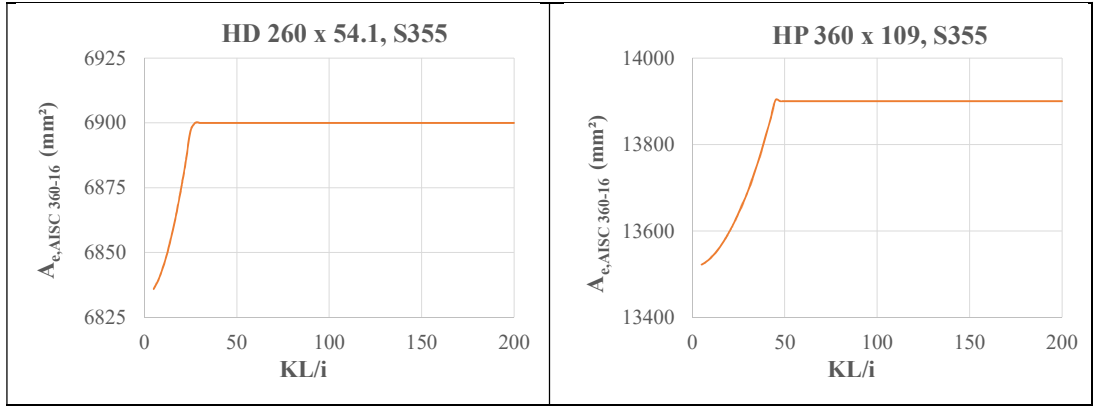


Şekil 6.7’de solda sunulan grafiklerde, S 355 çelik kalitesinde ikisi narin gövdeli, ikisi narin başlıklı olmak üzere dört adet narin kesitli profilin, AISC 360-10’a ve AISC 360-16’ya göre hesaplanan güvenli aksenal basınç kuvveti dayanımlarının ( $P_n/\Omega_c$ ) eleman narinliğine ( $KL/i=L_c/i$ ) göre değişimleri çizdirilmiştir. Grafiklerden fark edilebileceği gibi, iki farklı yönetmelik kullanılarak çizdirilen dayanım eğrileri hemen hemen bütün eleman narinliklerinde çakışmaktadır. Dayanım değerlerinin karşılaştırılmasında kolaylık sağlaması amacıyla, AISC 360-10’a göre hesaplanan güvenli dayanım değerleri ( $(P_n/\Omega_c)_{360-10}$ ), AISC 360-16’ya göre hesaplanan güvenli dayanım değerlerine ( $(P_n/\Omega_c)_{360-16}$ ) oranlanarak Şekil 6.7’de sağda sunulmuştur.

İncelenen dört profilin dayanım oranı eğrilerindeki en belirgin ortak özellik, belirli bir narinlik değerinden sonra dayanım oranlarının 1,0’e eşit olmasıdır. Dayanımların eşitlendiği narinlik değerinin narin başlıklı (HD 260x54,1 ve HP 360x109 kesitli) profillerde yaklaşık 112,5’a eşit olduğu görülmektedir. Belirtilen narinlik değeri, Denklem (3.10)’a göre hesaplanan ve burkulmanın elastik bölgede olduğu en küçük narinlik değerine eşit olup,  $F_y=355$  MPa için, 111,8’e eşittir. Narin başlıklı profillerde, dayanım oranının bu narinlik değerinden büyük narinliklerde 1,0’e eşit olmasının iki temel nedeni vardır. İlki, Bölüm 4’te de bahsedildiği gibi, AISC 360-10’a göre dayanım hesabı yapılırken, Q katsayısının yalnız elastik olmayan bölgede burkulma elemanlarda kullanılıyor olmasıdır. Denklem (4.3)’ten de fark edilebileceği gibi, bu tür elemanlarda kritik burkulma gerilmesi, AISC 360-16’da tanımlanan kritik burkulma gerilmesine (Denklem (3.5)) eşittir. İkinci neden ise, AISC 360-16’ya göre yapılan hesaplarda, elastik burkulma bölgesinde elemanların etkin alanlarının kayıpsız enkesit alanlarına eşit olmasıdır. Aslında bu durum, incelenen narin başlıklı (HD 260x54,1 ve HP 360x109 kesitli) profiller için Şekil 6.8’de verilen grafiklerden de görülebilir. Eleman narinliği 27,5’ten büyük S355 çelik kaliteli HD 260x54,1 profilinde ve eleman narinliği 47,5’ten büyük S355 çelik kaliteli HP 360x109 profilinde, etkin alan kayıpsız enkesit alanına eşit olmaktadır. Dikkatle incelendiğinde, dayanım oranı eğrilerinin de belirtilen narinliklerde en küçük değerlerine ulaştığı gözlenebilir. Her ne kadar AISC 360-10’a göre hesaplanan Q katsayısı, eleman narinliğine bağlı değilse de, kritik burkulma gerilmesinin Q katsayısına bağlı olduğu unutulmamalıdır.

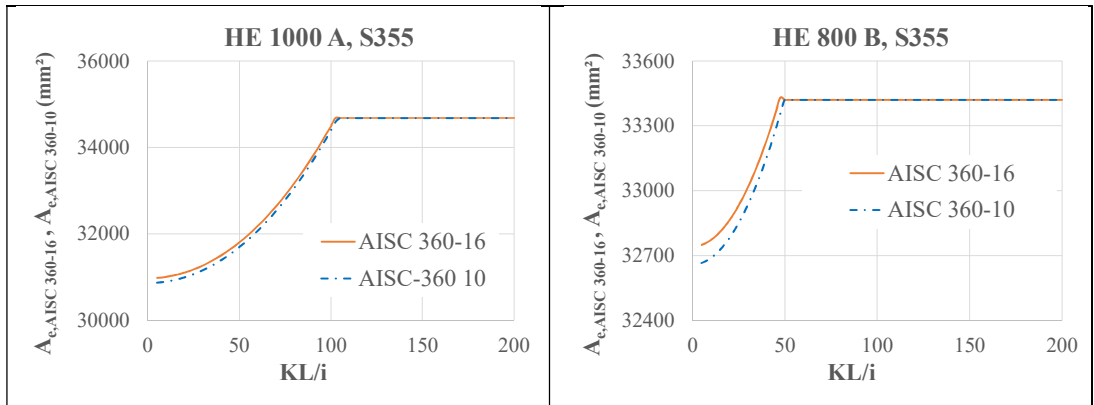


Şekil 6.7. Narin kesitli basınç elemanları için AISC 360-16 ve AISC 360-10'a göre belirlenen tipik dayanım eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.8. Narin başlıklı iki profilin, AISC 360-16'ya göre hesaplanan etkin alanların narinlikle değişimi

Şekil 6.7'de gösterilen narin başlıklı (HD 260x54,1 ve HP 360x109 kesitli) profillerin aksine, narin gövdeli (HE 1000 A ve HE 800 B kesitli) profillerde, dayanımların eşitlendiği narinlik değerinin narin başlıklı profiller için belirlenen 112,5 değerinden daha küçük olduğu ve incelenen iki profil için aynı olmadığı görülmektedir. Denklem (4.9)'dan fark edilebileceği gibi, narin başlıklı elemanlarda AISC 360-10'a göre hesaplanan Q katsayısı kritik gerilmeye dolaylı olarak da olsa bağlıdır. Bu nedenle, tıpkı AISC 360-16'ya göre hesaplanan etkin genişliklerde olduğu gibi, Q katsayısı eleman narinliği arttıkça azalmaktadır. Şekil 6.9'da, Şekil 6.7'de incelenen narin gövdeli profillerin, Denklem (4.8) kullanılarak AISC 360-10'a göre hesaplanan etkin gövde genişliğiyle belirlenen etkin alanları, AISC 360-16'ya göre hesaplanan etkin alanlarla karşılaştırılmıştır.

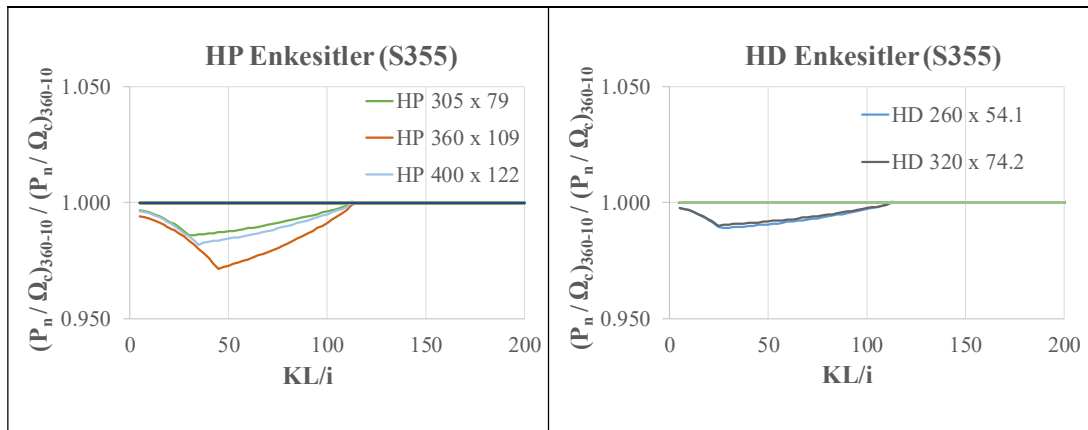


Şekil 6.9. Narin gövdeli iki profilin AISC 360-16 ve AISC 360-10'a göre hesaplanan etkin alanların karşılaştırılması

Şekil 6.9'da verilen grafiklerden fark edilebileceği gibi, her iki yönetmeliğe göre belirlenen alan değişimleri hemen hemen aynıdır. S355 çelik kaliteli HE 1000 A

profilinde 103'ten büyük eleman narinliklerinde, S355 çelik kaliteli HE 800 B profilinde ise 48'den büyük eleman narinliklerinde etkin alan kayıpsız enkesit alana eşit olmaktadır. Alanların eşitlendiği burkulma boyunun iki profilde farklı olmasının nedeni, profillerin gövde narinliklerinin farklı olmasıdır. Gövdesi HE 800 B profilinin gövdesine göre daha narin olan HE 1000 A profilinin dayanım hesaplarında, kayıpsız alanın kullanılabilmesi için eleman narinliği büyütülmelidir.

Narin gövdeli profiller için Şekil 6.7'de verilen grafiklerde, çok küçük narinliklerde, dayanım oranının 1,0'den küçük olduğu, artan narinlikle önce biraz artıp ardından azaldığı görülmektedir. HE 1000 A profilinde, dayanım oranının en büyük değeri 1,02'ye eşitken, HE 800 B profilinde bu değer 1,0'i aşmamaktadır. Şekil 6.7'de incelenen dört profil dikkate alındığında, dayanım oranının en küçük değerinin 0,971, en büyük değerinin ise 1,02 olduğu gözlenmiştir. Daha genel sonuçlar çıkarabilmek amacıyla, Tablo 6.5'te listelenen bütün narin kesitli profiller için dayanım oranı eğrileri çizdirilerek Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de sunulmuştur. Şekil 6.10'dan fark edilebileceği gibi, narin başlıklı profillerin dayanım oranı eğrileri, Şekil 6.7'de narin başlıklı elemanlar için sunulan eğrilere benzemektedir. Dayanım oranı değerleri, çok küçük narinliklerde, hemen hemen 1,0'e eşit olup, artan narinlikle önce azalıp sonra artmakta, 111,8'den daha büyük narinliklerde yeniden 1,0 eşit olmaktadır. Dayanım oranının en küçük değeri 0,971'e eşit olup, hiç bir profil için dayanım oranı 1,0 değerinin üzerine çıkmamaktadır. Diğer bir ifadeyle, AISC 360-10, narin başlıklı profillerin basınç dayanımlarını AISC 360-16'ya göre daha güvenli tarafta kalarak hesaplamaktadır.

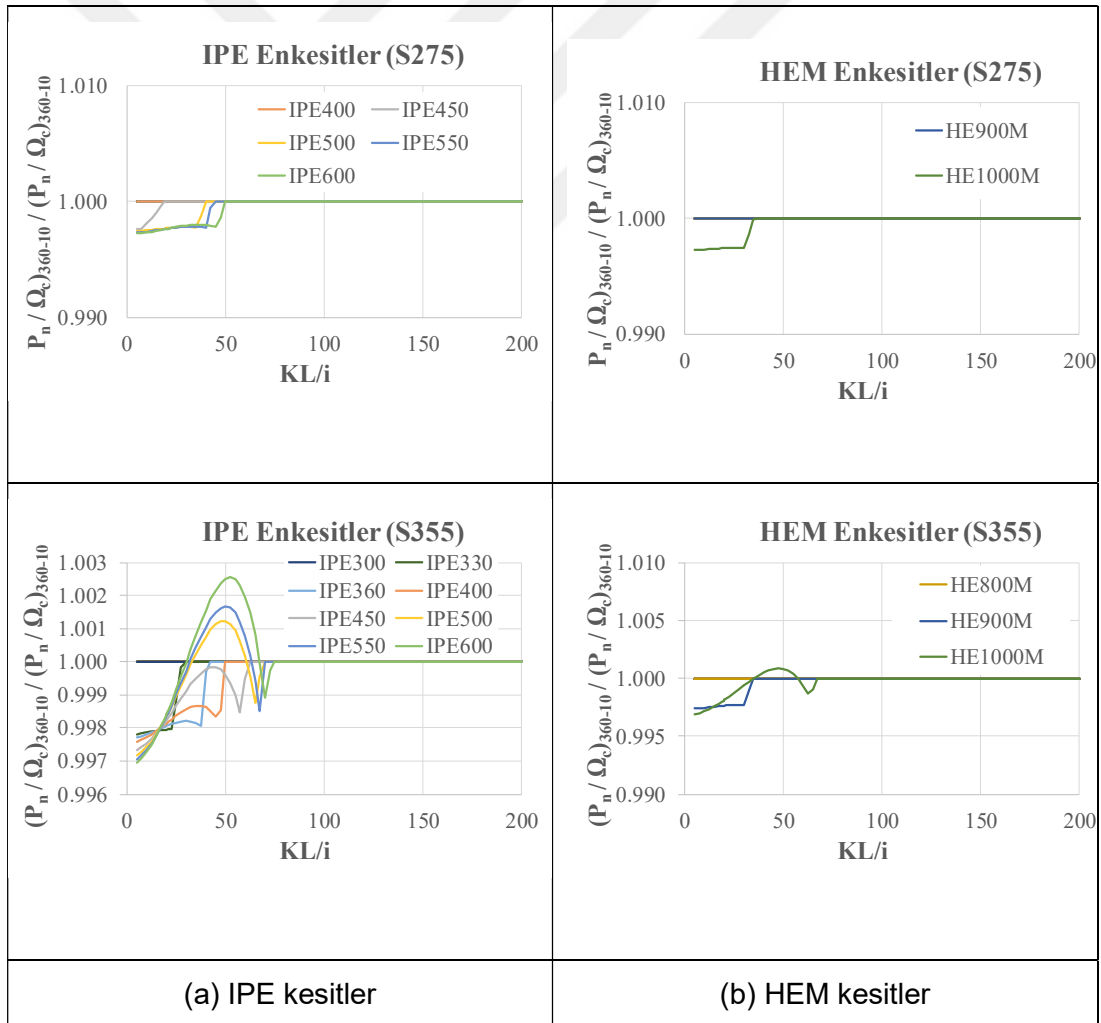


Şekil 6.10. Narin başlıklı HP ve HD profillerin AISC 360-16 ve AISC 360-10'a göre hesaplanan dayanım oranlarının eleman narinliğiyle değişimi

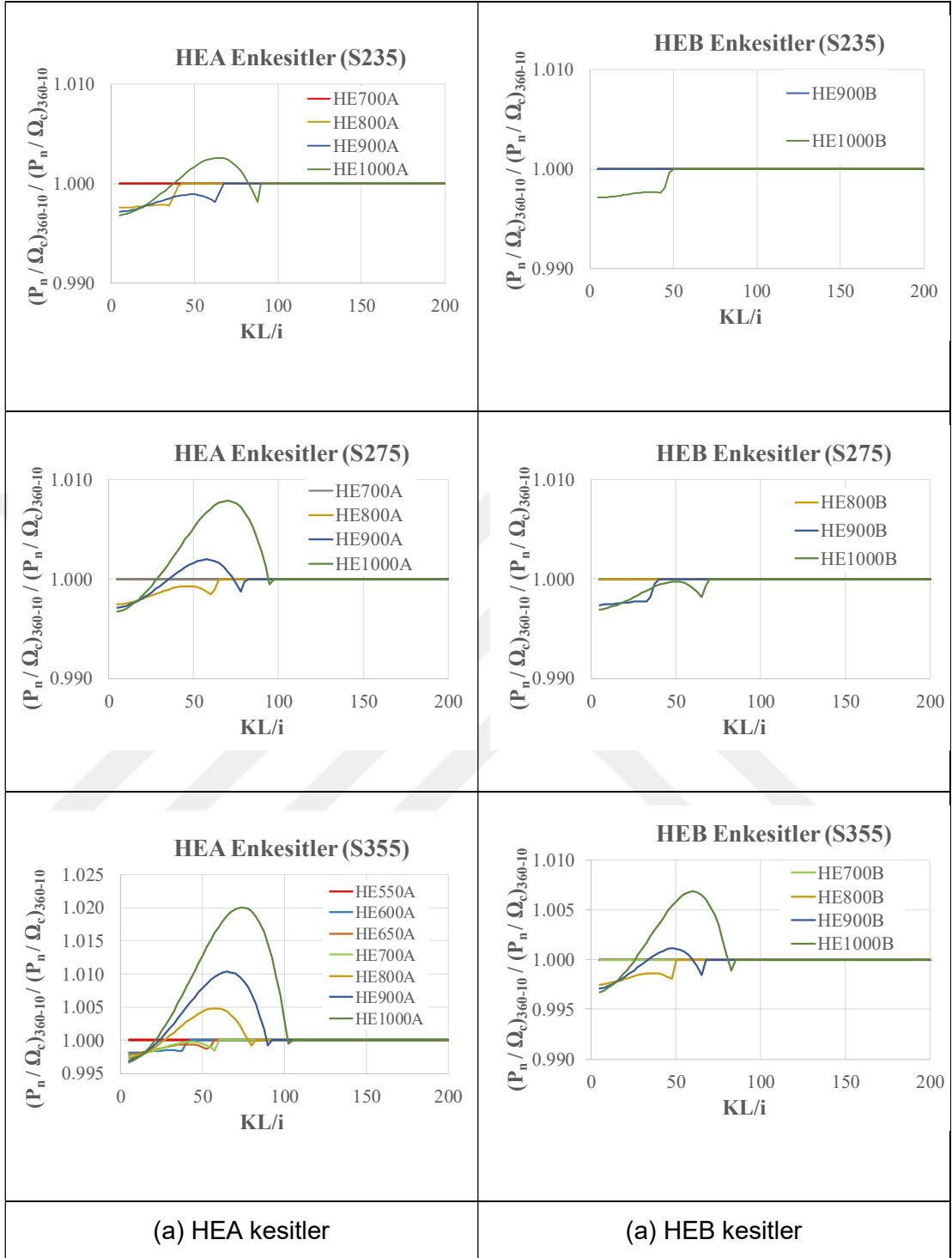
Narin gövdeli profiller için Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de verilen grafikler incelendiğinde, dayanım oranı eğrilerinin Şekil 6.7'de narin gövdeli elemanlar için sunulan eğrilere

benzediği, çok küçük eleman narinliklerinde, dayanım oranlarının yaklaşık 0,997'ye eşit olduğu, artan narinlikle artarak en büyük değerlerine ulaştıkları, ardından artan narinlikle azalarak etkin alanın kayıpsız alana eşit olduğu narinlikten başlamak üzere 1,0 değerine eşitlendiği gözlenmektedir. Gövde narinliği nispeten daha yüksek olan profillerde, dayanım oranlarının 1,0'den büyük değerler aldığı, ancak incelenen profil ve çelik kaliteleri için, en büyük dayanım oranının 1,02'ye eşit olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, Tablo 6.5'e göre başlıkları narin olan profillerin dayanım hesaplarında, incelenen bütün burkulma boylarında, AISC 360-10'nun, AISC 360-16'ya göre güvenli sonuçlar verdiği, gövdeleri narin olan profillerde ise AISC 360-10'nun bazı profil ve bazı burkulma boylarında güvensiz sonuçlar verebildiği, ancak AISC 360-10'a göre hesaplanan dayanımların AISC 360-16'ya göre hesaplanan dayanımlardan en fazla %2 büyük olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.11. Narin gövdeli IPE ve HEM profillerin AISC 360-16 ve AISC 360-10'a göre hesaplanan dayanım oranlarının eleman narinliğiyle değişimi



Şekil 6.12. Narin gövdeli HEA ve HEB profillerin AISC 360-16 ve AISC 360-10'a göre hesaplanan dayanım oranlarının eleman narinliğiyle değişimi

## 7. BASINÇ ETKİSİNDEKİ I-KESİTLİ ÇELİK HADDE PROFİLLERİ İÇİN PRATİK TASARIM TABLOLARI

Tezin bu bölümünde, tasarımcıya hem ön tasarımda hem de nihai tasarımda kolaylık, zaman ve hız kazandıracığına inanılan pratik tasarım tabloları oluşturulmuştur. Tezde incelenen bütün Avrupa profil ve çelik kaliteleri için, ÇYTHYEY’de tanımlanan YDKT yöntemi kullanılarak hesaplanan tasarım aksel basınç kuvveti dayanımları ( $\phi_c P_n$ ) Tablo 7.1’den Tablo 7.21’e kadar olan tablolarda sunulmuştur. Tasarımda, ÇYTHYEY’nin kullanımına izin verdiği diğer yöntem olan GKT yönteminin tercih edilmesi durumunda tasarımcı, ilgili çelik kalitesi ve profil için güvenli basınç kuvveti dayanımını ( $P_n/\Omega_c$ ), tablodan okuyacağı tasarım dayanımı değerini Denklem (3.2)’den belirlenen 1,50 değerine bölerek hesaplayabilir. Eleman dayanımları, burkulma boyu  $L_c$ ’ye bağlı olduğu için, tablolarda dayanımlar farklı burkulma boyları için listelenmiştir. Çoğu pratik uygulamada, I-kesitli bir basınç elemanının zayıf ekseninde eğilmeli burkulma sınır durumu için hesaplanan narinliği, güçlü ekseninde eğilmeli burkulma sınır durumu için hesaplanan narinliğinden daha küçük olduğundan, tablolardaki dayanımlar zayıf ekseninde eğilmeli burkulma sınır durumu için hesaplanmıştır. Diğer bir ifadeyle, tablolarda verilen  $L_c$  değerleri,  $L_{cy}$ ’ye eşittir. Bununla birlikte tasarımcı, gerekli hallerde, elemanın güçlü ekseninde eğilmeli burkulma sınır durumundaki tasarım dayanımını da bu bölümde verilen tabloları kullanarak hesaplayabilir. Bunun için,  $L_{cx}$  değeri Denklem (7.1) kullanılarak “eşdeğer”  $L_{cy}$  değerine (yani,  $L_{cy,eq}$  değerine) çevrilmelidir [18],

$$L_{cy,eq} = \frac{L_{cx}}{i_x / i_y} = L_{cx} \times \frac{i_y}{i_x} \quad (7.1)$$

Denklem (7.1)’den fark edilebileceği gibi,  $L_{cy,eq}$ , elemanın x-ekseni etrafındaki burkulma boyu olan  $L_{cx}$ ’in kesitin asal atalet yarıçaplarının oranına ( $i_x/i_y$ ) bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Tasarımcının ilgili hesabı profil tablolarına gereksinim duymadan kolayca yapabilmesi için tabloların son sütununda profillerin atalet yarıçaplarının oranları da listelenmiştir. Sonuç olarak, tasarımcının eğilmeli burkulmanın hangi asal eksen etrafında olacağını öngöremediği durumlarda, yapması gereken ilk işlem,  $L_{cy}$  ile  $L_{cy,eq}$  değerlerini karşılaştırarak büyüğünü almaktır.

Tablo 7.1. S235 çelik kalitesi için IPE ve IPN profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları

S235	$\Phi_c P_n$ (kN)										$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
IPE 80	161	102	32	-	-	-	-	-	-	-	0.324
IPE 100	217	157	61	-	-	-	-	-	-	-	0.305
IPE 120	279	220	108	-	-	-	-	-	-	-	0.296
IPE 140	346	288	166	77	-	-	-	-	-	-	0.287
IPE 160	425	366	235	117	-	-	-	-	-	-	0.280
IPE 180	505	448	314	173	97	-	-	-	-	-	0.276
IPE 200	602	545	405	246	139	-	-	-	-	-	0.271
IPE 220	706	651	510	340	200	-	-	-	-	-	0.272
IPE 240	826	771	627	444	275	176	-	-	-	-	0.270
IPE 270	970	919	780	593	405	260	181	-	-	-	0.270
IPE 300	1137	1088	952	763	559	376	261	-	-	-	0.268
IPE 330	1323	1272	1130	927	703	491	341	250	-	-	0.259
IPE 360	1537	1485	1338	1125	882	645	451	332	-	-	0.253
IPE 400	1787	1731	1572	1340	1072	804	570	419	-	-	0.238
IPE 450	2089	2029	1858	1604	1306	1003	725	533	408	-	0.223
IPE 500	2453	2388	2203	1927	1597	1254	932	685	524	-	0.211
IPE 550	2834	2763	2562	2259	1894	1510	1145	843	645	-	0.199
IPE 600	3299	3224	3010	2683	2285	1859	1444	1077	824	651	0.192
S235	$\Phi_c P_n$ (kN)										$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8		
IPN 80	160	87	-	-	-	-	-	-	-	-	0.284
IPN 100	224	145	47	-	-	-	-	-	-	-	0.267
IPN 120	300	216	83	-	-	-	-	-	-	-	0.256
IPN 140	384	298	138	-	-	-	-	-	-	-	0.250
IPN 160	482	391	210	94	-	-	-	-	-	-	0.242
IPN 180	590	497	298	141	-	-	-	-	-	-	0.238
IPN 200	706	612	399	202	-	-	-	-	-	-	0.234
IPN 220	835	739	512	279	156	-	-	-	-	-	0.230
IPN 240	975	879	645	386	217	-	-	-	-	-	0.229
IPN 260	1127	1027	778	489	279	-	-	-	-	-	0.223
IPN 280	1290	1187	925	611	356	-	-	-	-	-	0.221
IPN 300	1459	1352	1076	736	440	281	-	-	-	-	0.215
IPN 320	1643	1532	1242	876	539	345	-	-	-	-	0.210
IPN 340	1833	1720	1422	1034	661	423	-	-	-	-	0.207
IPN 360	2051	1933	1618	1203	794	508	-	-	-	-	0.204
IPN 380	2263	2142	1818	1384	944	608	422	-	-	-	0.201
IPN 400	2495	2371	2036	1579	1106	720	500	-	-	-	0.199
IPN 450	3109	2980	2624	2123	1578	1077	748	-	-	-	0.194
IPN 500	3785	3651	3278	2737	2127	1538	1072	787	-	-	0.190
IPN 550	4483	4347	3963	3397	2737	2074	1482	1089	834	-	0.186
IPN 600	5372	5229	4823	4215	3490	2738	2032	1493	1143	-	0.184



Tablo 7.2. S235 çelik kalitesi için HEA ve HEB profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları

S235	$\Phi_c P_n$ (kN)													$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HE 100 A	448	414	326	220	130	83	-	-	-	-	-	-	-	0.618
HE 120 A	535	506	430	327	223	143	99	-	-	-	-	-	-	0.618
HE 140 A	664	637	565	462	348	242	168	123	-	-	-	-	-	0.614
HE 160 A	820	795	723	618	496	373	265	195	-	-	-	-	-	0.606
HE 180 A	958	933	869	769	648	520	398	294	225	178	-	-	-	0.607
HE 200 A	1137	1113	1049	949	825	688	552	424	324	256	-	-	-	0.601
HE 220 A	1359	1335	1273	1173	1045	902	753	608	475	375	304	251	-	0.601
HE 240 A	1624	1599	1536	1434	1301	1149	986	824	669	531	430	356	299	0.597
HE 260 A	1835	1811	1751	1650	1520	1367	1200	1030	863	705	571	472	396	0.593
HE 280 A	2057	2034	1974	1877	1748	1595	1427	1250	1073	903	742	613	515	0.590
HE 300 A	2379	2355	2293	2196	2064	1905	1728	1539	1347	1158	978	812	682	0.588
HE 320 A	2631	2605	2539	2428	2282	2107	1910	1702	1490	1281	1082	898	755	0.552
HE 340 A	2823	2797	2724	2604	2446	2257	2045	1820	1591	1367	1153	956	803	0.518
HE 360 A	3020	2992	2913	2784	2614	2410	2182	1940	1694	1453	1224	1015	852	0.488
HE 400 A	3362	3331	3240	3094	2900	2668	2410	2137	1860	1589	1333	1103	926	0.436
HE 450 A	3764	3729	3626	3460	3240	2978	2686	2377	2065	1761	1474	1218	1023	0.385
HE 500 A	4177	4137	4021	3834	3587	3293	2966	2621	2273	1934	1612	1333	1120	0.345
HE 550 A	4479	4436	4308	4103	3832	3510	3153	2778	2400	2034	1686	1394	1171	0.311
HE 600 A	4790	4742	4602	4377	4080	3728	3339	2931	2521	2126	1753	1449	1218	0.282
HE 650 A	5109	5057	4904	4659	4336	3954	3532	3091	2650	2226	1828	1511	1269	0.259
HE 700 A	5509	5451	5279	5005	4646	4221	3754	3269	2786	2325	1898	1569	1318	0.238
HE 800 A	5998	5939	5765	5461	5047	4560	4029	3480	2938	2426	1969	1627	1367	0.204
HE 900 A	6599	6532	6335	6019	5604	5047	4433	3803	3186	2604	2109	1743	1465	0.179
HE 1000 A	6945	6872	6657	6315	5864	5332	4700	4003	3325	2689	2178	1800	1512	0.159
S235	$\Phi_c P_n$ (kN)													$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HE 100 B	549	508	402	272	162	103	-	-	-	-	-	-	-	0.608
HE 120 B	719	681	581	445	306	198	137	-	-	-	-	-	-	0.607
HE 140 B	909	874	778	640	488	343	238	175	-	-	-	-	-	0.604
HE 160 B	1148	1114	1017	873	706	537	385	283	216	-	-	-	-	0.597
HE 180 B	1381	1348	1255	1114	942	760	585	433	331	262	-	-	-	0.597
HE 200 B	1651	1619	1528	1387	1211	1017	822	638	488	386	312	-	-	0.594
HE 220 B	1924	1892	1805	1667	1491	1291	1084	881	692	546	443	366	-	0.593
HE 240 B	2241	2209	2124	1985	1806	1600	1379	1158	946	753	610	504	423	0.590
HE 260 B	2504	2473	2391	2257	2083	1878	1654	1424	1198	985	798	660	554	0.586
HE 280 B	2779	2749	2671	2541	2371	2169	1945	1709	1473	1245	1029	850	714	0.585
HE 300 B	3153	3123	3045	2916	2744	2538	2307	2061	1810	1562	1324	1103	926	0.584
HE 320 B	3411	3380	3294	3154	2968	2744	2494	2227	1955	1686	1429	1190	1000	0.548
HE 340 B	3614	3582	3489	3339	3140	2901	2634	2349	2059	1773	1501	1247	1048	0.514
HE 360 B	3819	3785	3686	3526	3313	3059	2774	2471	2163	1860	1571	1304	1096	0.484
HE 400 B	4183	4145	4033	3854	3616	3332	3014	2678	2336	2001	1684	1394	1171	0.433
HE 450 B	4610	4568	4442	4241	3974	3656	3301	2926	2546	2175	1823	1508	1267	0.383
HE 500 B	5046	4999	4859	4635	4339	3986	3594	3179	2760	2351	1964	1623	1364	0.343
HE 550 B	5374	5322	5169	4925	4602	4217	3791	3342	2890	2451	2035	1682	1413	0.309
HE 600 B	5710	5654	5487	5221	4870	4453	3992	3508	3022	2552	2108	1742	1464	0.281
HE 650 B	6055	5993	5813	5524	5143	4692	4194	3673	3152	2650	2179	1801	1513	0.258
HE 700 B	6480	6412	6212	5892	5473	4977	4431	3863	3297	2755	2253	1862	1564	0.237
HE 800 B	7068	6989	6759	6392	5911	5346	4728	4089	3458	2860	2323	1920	1613	0.204
HE 900 B	7852	7761	7494	7069	6513	5863	5156	4429	3717	3045	2466	2038	1713	0.179
HE 1000 B	8344	8257	8001	7577	6955	6229	5444	4643	3864	3131	2536	2096	1761	0.159

Tablo 7.3. S235 çelik kalitesi için HEM ve HP profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları

S235	$\Phi_c P_n$ (kN)													$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HE 100 M	1125	1052	862	619	388	248	-	-	-	-	-	-	-	0.592
HE 120 M	1404	1339	1162	918	660	437	303	-	-	-	-	-	-	0.590
HE 140 M	1704	1645	1481	1243	972	709	495	364	-	-	-	-	-	0.590
HE 160 M	2053	1998	1840	1604	1323	1033	762	560	428	-	-	-	-	0.588
HE 180 M	2396	2344	2195	1967	1687	1385	1089	819	627	495	-	-	-	0.587
HE 200 M	2776	2727	2584	2362	2084	1773	1455	1152	887	701	568	-	-	0.586
HE 220 M	3159	3113	2977	2764	2491	2179	1850	1525	1219	963	780	644	-	0.585
HE 240 M	4221	4170	4020	3782	3472	3111	2720	2321	1933	1567	1269	1049	881	0.579
HE 260 M	4644	4596	4454	4227	3928	3575	3186	2781	2377	1989	1628	1346	1131	0.578
HE 280 M	5080	5033	4898	4680	4391	4046	3661	3252	2837	2430	2044	1693	1423	0.577
HE 300 M	6410	6359	6213	5976	5659	5276	4843	4377	3894	3411	2942	2497	2098	0.572
HE 320 M	6598	6546	6393	6146	5816	5418	4968	4484	3984	3484	2999	2539	2133	0.538
HE 340 M	6679	6626	6469	6216	5878	5470	5010	4516	4006	3498	3005	2537	2132	0.508
HE 360 M	6742	6688	6526	6267	5920	5502	5032	4527	4007	3490	2991	2516	2114	0.480
HE 400 M	6890	6833	6662	6388	6023	5584	5091	4564	4024	3488	2973	2487	2089	0.431
HE 450 M	7093	7032	6852	6562	6176	5714	5195	4643	4078	3520	2986	2487	2090	0.383
HE 500 M	7281	7217	7025	6718	6310	5821	5275	4695	4105	3525	2974	2467	2073	0.344
HE 550 M	7495	7426	7224	6898	6467	5951	5377	4769	4153	3550	2980	2465	2071	0.311
HE 600 M	7692	7619	7403	7058	6601	6057	5452	4815	4172	3546	2953	2441	2051	0.283
HE 650 M	7903	7826	7599	7236	6756	6186	5553	4889	4220	3572	2959	2446	2055	0.260
HE 700 M	8100	8018	7778	7393	6887	6286	5623	4928	4233	3562	2932	2423	2036	0.239
HE 800 M	8550	8459	8189	7758	7193	6526	5794	5035	4281	3562	2904	2400	2016	0.205
HE 900 M	8959	8857	8558	8082	7460	6730	5934	5114	4308	3546	2874	2375	1996	0.180
HE 1000 M	9394	9282	8955	8434	7756	6963	6104	5223	4364	3554	2879	2379	1999	0.160
S235	$\Phi_c P_n$ (kN)													$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HP 200 x 43	1144	1120	1052	948	819	679	540	411	314	248	-	-	-	0.577
HP 200 x 53	1446	1417	1334	1205	1046	871	697	535	409	323	-	-	-	0.580
HP 220 x 57	1541	1514	1437	1317	1165	996	821	654	506	399	323	-	-	0.602
HP 260 x 75	2019	1993	1919	1800	1646	1468	1276	1081	892	717	581	480	403	0.592
HP 260 x 87	2347	2318	2233	2099	1924	1720	1500	1276	1059	855	692	572	481	0.595
HP 305 x 79	2136	2115	2057	1962	1837	1688	1522	1347	1170	997	834	689	579	0.569
HP 305 x 88	2368	2346	2282	2178	2040	1876	1693	1499	1304	1112	932	770	647	0.570
HP 305 x 95	2559	2535	2466	2355	2208	2032	1836	1628	1418	1212	1017	841	707	0.571
HP 305 x 110	2961	2933	2855	2729	2561	2361	2137	1900	1659	1422	1197	992	833	0.572
HP 305 x 126	3405	3374	3286	3143	2954	2727	2473	2203	1928	1658	1400	1162	977	0.574
HP 305 x 149	4018	3983	3881	3716	3497	3235	2940	2627	2306	1990	1688	1405	1181	0.574
HP 305 x 180	4843	4802	4682	4489	4232	3923	3576	3205	2824	2447	2085	1743	1465	0.575
HP 305 x 186	5012	4970	4848	4650	4386	4069	3712	3331	2939	2550	2177	1823	1532	0.576
HP 305 x 223	6006	5958	5816	5587	5281	4912	4496	4049	3589	3130	2686	2264	1903	0.578
HP 320 x 88	2389	2366	2296	2184	2037	1862	1669	1466	1262	1065	880	727	611	0.548
HP 320 x 103	2770	2743	2664	2537	2370	2171	1950	1718	1484	1258	1043	862	724	0.551
HP 320 x 117	3172	3142	3053	2911	2723	2499	2250	1988	1723	1465	1221	1009	848	0.554
HP 320 x 147	3955	3918	3812	3641	3415	3144	2842	2523	2198	1881	1580	1307	1098	0.557
HP 320 x 184	4970	4926	4799	4593	4319	3992	3625	3234	2836	2443	2068	1720	1445	0.561
HP 360 x 109	2939	2920	2864	2778	2658	2512	2344	2160	1965	1766	1567	1373	1188	0.599
HP 360 x 133	3574	3550	3485	3381	3238	3063	2862	2642	2408	2169	1929	1695	1471	0.600
HP 360 x 152	4103	4076	4004	3884	3722	3524	3296	3045	2779	2506	2232	1965	1708	0.601
HP 360 x 174	4695	4665	4584	4449	4267	4043	3786	3503	3202	2893	2582	2277	1985	0.601
HP 360 x 180	4864	4834	4749	4609	4420	4189	3922	3629	3318	2997	2675	2359	2056	0.601
HP 400 x 122	3299	3278	3221	3134	3015	2867	2695	2505	2303	2093	1881	1672	1469	0.631
HP 400 x 140	3785	3762	3698	3601	3465	3296	3102	2886	2656	2418	2177	1938	1706	0.632
HP 400 x 158	4251	4225	4155	4047	3895	3708	3492	3252	2996	2730	2461	2194	1935	0.632
HP 400 x 176	4737	4709	4633	4513	4345	4139	3901	3636	3354	3060	2762	2466	2178	0.633
HP 400 x 194	5245	5214	5132	4999	4816	4590	4329	4039	3729	3406	3078	2752	2435	0.633
HP 400 x 213	5731	5698	5611	5466	5268	5024	4742	4428	4092	3742	3386	3031	2686	0.633
HP 400 x 231	6218	6183	6090	5933	5721	5460	5156	4819	4458	4081	3697	3314	2941	0.634

Tablo 7.4. S235 çelik kalitesi için HD profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları

S235	$\Phi_c P_n$ (kN)													$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HD 260 x 54.1	1459	1439	1388	1306	1198	1072	936	798	663	536	434	359	301	0.591
HD 260 x 68.2	1835	1811	1751	1650	1520	1367	1200	1030	863	705	571	472	396	0.593
HD 260 x 93.0	2504	2473	2391	2257	2083	1878	1654	1424	1198	985	798	660	554	0.586
HD 260 x 114	3081	3045	2946	2785	2574	2327	2056	1777	1501	1240	1006	832	699	0.585
HD 260 x 142	3813	3771	3650	3456	3202	2903	2575	2234	1897	1576	1283	1060	891	0.582
HD 260 x 172	4644	4596	4454	4227	3928	3575	3186	2781	2377	1989	1628	1346	1131	0.578
HD 260 x 225	5545	5494	5341	5097	4774	4388	3959	3506	3047	2598	2175	1797	1510	0.565
HD 260 x 299	7362	7298	7108	6803	6398	5913	5369	4790	4200	3618	3063	2546	2140	0.555
HD 320 x 74.2	2000	1980	1926	1836	1718	1577	1420	1255	1088	926	772	638	536	0.549
HD 320 x 97.6	2631	2605	2539	2428	2282	2107	1910	1702	1490	1281	1082	898	755	0.552
HD 320 x 127	3411	3380	3294	3154	2968	2744	2494	2227	1955	1686	1429	1190	1000	0.548
HD 320 x 158	4255	4217	4113	3943	3716	3443	3136	2809	2474	2142	1824	1524	1280	0.546
HD 320 x 198	5336	5291	5163	4956	4679	4345	3970	3568	3154	2743	2347	1971	1656	0.543
HD 320 x 245	6598	6546	6393	6146	5816	5418	4968	4484	3984	3484	2999	2539	2133	0.538
HD 320 x 300	7393	7341	7186	6936	6600	6193	5728	5224	4697	4164	3639	3136	2659	0.532
HD 360 x 134	3608	3584	3520	3425	3296	3133	2945	2737	2515	2285	2052	1823	1601	0.603
HD 360 x 147	3974	3948	3878	3778	3633	3454	3248	3019	2776	2524	2269	2017	1773	0.601
HD 360 x 162	4363	4335	4260	4151	3993	3799	3575	3327	3062	2787	2509	2233	1966	0.600
HD 360 x 179	4828	4798	4718	4595	4421	4208	3961	3688	3396	3093	2786	2482	2187	0.600
HD 360 x 196	5293	5261	5175	5040	4851	4619	4350	4052	3734	3403	3068	2736	2414	0.600
HD 400 x 187	5025	4996	4917	4806	4642	4439	4204	3942	3660	3364	3062	2759	2462	0.630
HD 400 x 216	5826	5793	5706	5577	5391	5160	4892	4593	4270	3931	3585	3237	2895	0.630
HD 400 x 237	6364	6328	6235	6093	5891	5640	5348	5023	4672	4304	3927	3548	3175	0.628
HD 400 x 262	7076	7038	6939	6779	6557	6282	5962	5604	5217	4812	4395	3977	3565	0.626
HD 400 x 287	7747	7705	7601	7425	7185	6887	6539	6151	5732	5291	4839	4383	3934	0.624
HD 400 x 314	8443	8398	8286	8095	7835	7512	7136	6716	6261	5784	5292	4798	4309	0.622
HD 400 x 347	8552	8512	8410	8236	7998	7701	7355	6965	6540	6090	5624	5150	4677	0.620
HD 400 x 382	9425	9382	9270	9080	8820	8498	8119	7693	7230	6738	6228	5709	5190	0.616
HD 400 x 421	10392	10346	10224	10018	9737	9386	8975	8512	8008	7472	6916	6349	5781	0.614
HD 400 x 463	11406	11357	11225	11002	10697	10318	9872	9371	8823	8242	7637	7020	6401	0.610
HD 400 x 509	12558	12505	12362	12122	11794	11384	10904	10361	9769	9139	8483	7812	7138	0.607
HD 400 x 551	13572	13516	13363	13107	12756	12319	11805	11226	10592	9917	9214	8494	7770	0.604
HD 400 x 592	14607	14549	14386	14114	13742	13278	12732	12116	11442	10723	9973	9205	8431	0.601
HD 400 x 634	15634	15574	15402	15116	14724	14236	13661	13012	12300	11541	10748	9935	9114	0.599
HD 400 x 677	16706	16644	16462	16162	15751	15238	14633	13950	13200	12400	11562	10702	9834	0.598
HD 400 x 744	18345	18279	18083	17760	17318	16765	16114	15377	14568	13703	12796	11864	10921	0.592
HD 400 x 818	20182	20111	19900	19554	19080	18487	17787	16994	16123	15190	14210	13201	12178	0.588
HD 400 x 900	20164	20102	19916	19610	19189	18661	18035	17323	16536	15687	14790	13858	12905	0.584
HD 400 x 990	22148	22081	21883	21556	21106	20542	19873	19110	18267	17355	16390	15386	14357	0.578
HD 400 x 1086	24324	24253	24041	23693	23214	22611	21897	21081	20178	19201	18164	17084	15974	0.574
HD 400 x 1202	26851	26777	26555	26190	25687	25055	24303	23444	22490	21456	20357	19207	18022	0.587
HD 400 x 1299	28957	28879	28647	28265	27738	27074	26285	25382	24379	23289	22129	20914	19660	0.581

Tablo 7.5. S275 çelik kalitesi için IPE ve IPN profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları

S275	$\Phi_c P_n$ (kN)										$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
IPE 80	189	111	32	-	-	-	-	-	-	-	0.324
IPE 100	254	174	61	-	-	-	-	-	-	-	0.305
IPE 120	326	247	108	-	-	-	-	-	-	-	0.296
IPE 140	405	327	172	77	-	-	-	-	-	-	0.287
IPE 160	497	418	249	117	-	-	-	-	-	-	0.280
IPE 180	591	514	339	173	97	-	-	-	-	-	0.276
IPE 200	705	627	443	247	139	-	-	-	-	-	0.271
IPE 220	826	751	565	352	200	-	-	-	-	-	0.272
IPE 240	967	892	701	468	275	176	-	-	-	-	0.270
IPE 270	1136	1065	879	638	407	260	181	-	-	-	0.270
IPE 300	1331	1264	1081	834	579	376	261	-	-	-	0.268
IPE 330	1549	1479	1287	1021	738	491	341	250	-	-	0.259
IPE 360	1799	1727	1529	1248	939	650	451	332	-	-	0.253
IPE 400	2091	2014	1800	1494	1150	821	570	419	-	-	0.238
IPE 450	2444	2362	2131	1794	1411	1035	725	533	408	-	0.223
IPE 500	2843	2766	2532	2164	1737	1309	932	685	524	-	0.211
IPE 550	3276	3193	2947	2544	2070	1588	1148	843	645	-	0.199
IPE 600	3795	3708	3459	3032	2512	1973	1466	1077	824	651	0.192
S275	$\Phi_c P_n$ (kN)										$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8		
IPN 80	187	92	-	-	-	-	-	-	-	-	0.284
IPN 100	262	157	47	-	-	-	-	-	-	-	0.267
IPN 120	351	239	83	-	-	-	-	-	-	-	0.256
IPN 140	450	334	138	-	-	-	-	-	-	-	0.250
IPN 160	564	442	213	94	-	-	-	-	-	-	0.242
IPN 180	690	565	310	141	-	-	-	-	-	-	0.238
IPN 200	826	699	424	202	-	-	-	-	-	-	0.234
IPN 220	977	847	551	279	156	-	-	-	-	-	0.230
IPN 240	1140	1011	704	386	217	-	-	-	-	-	0.229
IPN 260	1319	1183	855	496	279	-	-	-	-	-	0.223
IPN 280	1509	1369	1023	629	356	-	-	-	-	-	0.221
IPN 300	1707	1562	1196	766	440	281	-	-	-	-	0.215
IPN 320	1923	1772	1386	921	539	345	-	-	-	-	0.210
IPN 340	2145	1992	1593	1098	661	423	-	-	-	-	0.207
IPN 360	2400	2239	1819	1286	794	508	-	-	-	-	0.204
IPN 380	2648	2484	2050	1489	950	608	422	-	-	-	0.201
IPN 400	2920	2751	2301	1709	1125	720	500	-	-	-	0.199
IPN 450	3638	3462	2983	2328	1646	1077	748	-	-	-	0.194
IPN 500	4430	4247	3743	3031	2257	1543	1072	787	-	-	0.190
IPN 550	5247	5061	4541	3792	2945	2128	1482	1089	834	-	0.186
IPN 600	6286	6091	5541	4733	3795	2857	2032	1493	1143	-	0.184

Tablo 7.6. S275 çelik kalitesi için HEA ve HEB profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları

S275	$\Phi_c P_n$ (kN)													$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HE 100 A	524	478	362	228	130	83	-	-	-	-	-	-	-	0.618
HE 120 A	626	587	484	352	224	143	99	-	-	-	-	-	-	0.618
HE 140 A	777	741	643	508	366	242	168	123	-	-	-	-	-	0.614
HE 160 A	960	925	828	689	532	382	265	195	-	-	-	-	-	0.606
HE 180 A	1121	1087	1000	867	710	549	400	294	225	178	-	-	-	0.607
HE 200 A	1331	1298	1212	1077	914	739	571	424	324	256	-	-	-	0.601
HE 220 A	1591	1558	1473	1338	1170	984	797	620	475	375	304	251	-	0.601
HE 240 A	1900	1867	1781	1642	1466	1267	1060	859	673	531	430	356	299	0.597
HE 260 A	2148	2115	2032	1897	1722	1521	1307	1092	888	705	571	472	396	0.593
HE 280 A	2408	2376	2293	2163	1990	1788	1569	1344	1124	917	742	613	515	0.590
HE 300 A	2784	2752	2667	2535	2357	2147	1915	1673	1431	1199	983	812	682	0.588
HE 320 A	3078	3044	2953	2803	2607	2374	2117	1850	1583	1326	1087	898	755	0.552
HE 340 A	3304	3268	3168	3006	2794	2542	2265	1977	1689	1414	1157	956	803	0.518
HE 360 A	3534	3496	3388	3213	2984	2714	2416	2106	1797	1502	1228	1015	852	0.488
HE 400 A	3935	3892	3768	3569	3309	3002	2665	2315	1968	1637	1334	1103	926	0.436
HE 450 A	4405	4357	4216	3991	3696	3348	2967	2573	2182	1811	1473	1218	1023	0.385
HE 500 A	4888	4834	4675	4422	4091	3701	3275	2834	2398	1985	1612	1333	1120	0.345
HE 550 A	5242	5182	5008	4730	4367	3941	3476	2997	2526	2080	1686	1394	1171	0.311
HE 600 A	5605	5540	5348	5044	4646	4180	3674	3154	2645	2165	1753	1449	1218	0.282
HE 650 A	5979	5908	5699	5367	4934	4429	3881	3320	2773	2257	1828	1511	1269	0.259
HE 700 A	6447	6367	6133	5763	5281	4721	4116	3500	2903	2344	1898	1569	1318	0.238
HE 800 A	6884	6805	6573	6204	5721	5087	4400	3707	3041	2431	1969	1627	1367	0.204
HE 900 A	7561	7471	7208	6790	6245	5608	4826	4033	3279	2604	2109	1743	1465	0.179
HE 1000 A	7946	7848	7562	7108	6518	5831	5088	4225	3401	2689	2178	1800	1512	0.159
S275	$\Phi_c P_n$ (kN)													$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HE 100 B	643	587	446	283	162	103	-	-	-	-	-	-	-	0.608
HE 120 B	841	790	655	480	310	198	137	-	-	-	-	-	-	0.607
HE 140 B	1064	1016	887	706	513	343	238	175	-	-	-	-	-	0.604
HE 160 B	1343	1296	1165	975	760	552	385	283	216	-	-	-	-	0.597
HE 180 B	1616	1571	1445	1257	1033	804	590	433	331	262	-	-	-	0.597
HE 200 B	1932	1888	1765	1576	1344	1096	854	638	488	386	312	-	-	0.594
HE 220 B	2252	2208	2090	1904	1670	1412	1150	902	692	546	443	366	-	0.593
HE 240 B	2623	2579	2463	2276	2038	1768	1486	1211	953	753	610	504	423	0.590
HE 260 B	2930	2888	2776	2595	2362	2092	1804	1514	1237	986	798	660	554	0.586
HE 280 B	3252	3211	3104	2929	2701	2433	2141	1842	1547	1270	1029	850	714	0.585
HE 300 B	3690	3649	3543	3368	3137	2863	2560	2244	1927	1621	1334	1103	926	0.584
HE 320 B	3992	3949	3832	3642	3392	3095	2767	2424	2081	1750	1440	1190	1000	0.548
HE 340 B	4229	4185	4059	3855	3588	3270	2920	2555	2190	1838	1509	1247	1048	0.514
HE 360 B	4469	4423	4287	4070	3785	3446	3074	2685	2298	1925	1578	1304	1096	0.484
HE 400 B	4895	4843	4691	4448	4128	3751	3336	2905	2476	2066	1687	1394	1171	0.433
HE 450 B	5395	5337	5166	4893	4535	4113	3650	3170	2693	2240	1824	1508	1267	0.383
HE 500 B	5905	5840	5650	5347	4949	4481	3969	3439	2914	2416	1964	1623	1364	0.343
HE 550 B	6288	6218	6010	5678	5245	4736	4180	3607	3043	2509	2035	1682	1413	0.309
HE 600 B	6682	6605	6378	6018	5547	4996	4396	3779	3174	2603	2108	1742	1464	0.281
HE 650 B	7085	7001	6755	6364	5854	5258	4611	3948	3301	2690	2179	1801	1513	0.258
HE 700 B	7583	7490	7217	6785	6223	5568	4860	4139	3439	2781	2253	1862	1564	0.237
HE 800 B	8271	8164	7850	7353	6710	5966	5167	4360	3584	2868	2323	1920	1613	0.204
HE 900 B	9107	9000	8686	8125	7383	6528	5616	4702	3830	3045	2466	2038	1713	0.179
HE 1000 B	9545	9429	9089	8548	7844	6919	5911	4906	3957	3131	2536	2096	1761	0.159

Tablo 7.7. S275 çelik kalitesi için HEM ve HP profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları

S275	$\Phi_c P_n$ (kN)													$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HE 100 M	1316	1218	965	654	388	248	-	-	-	-	-	-	-	0.592
HE 120 M	1643	1555	1317	999	679	437	303	-	-	-	-	-	-	0.590
HE 140 M	1994	1914	1692	1378	1034	713	495	364	-	-	-	-	-	0.590
HE 160 M	2403	2327	2113	1799	1437	1076	762	560	428	-	-	-	-	0.588
HE 180 M	2804	2733	2530	2226	1860	1477	1114	819	627	495	-	-	-	0.587
HE 200 M	3249	3182	2987	2690	2322	1922	1526	1159	887	701	568	-	-	0.586
HE 220 M	3697	3633	3449	3161	2799	2393	1976	1576	1219	963	780	644	-	0.585
HE 240 M	4940	4870	4665	4344	3931	3456	2954	2453	1980	1567	1269	1049	881	0.579
HE 260 M	5435	5368	5175	4867	4467	4001	3497	2982	2481	2011	1628	1346	1131	0.578
HE 280 M	5944	5880	5697	5401	5013	4555	4051	3528	3007	2509	2049	1693	1423	0.577
HE 300 M	7501	7432	7233	6911	6484	5973	5403	4800	4187	3586	3016	2497	2098	0.572
HE 320 M	7722	7651	7442	7106	6662	6131	5539	4913	4278	3657	3069	2539	2133	0.538
HE 340 M	7816	7743	7529	7185	6730	6187	5583	4944	4298	3667	3070	2537	2132	0.508
HE 360 M	7890	7815	7595	7242	6776	6220	5602	4951	4292	3651	3045	2516	2114	0.480
HE 400 M	8063	7984	7752	7380	6889	6305	5659	4980	4297	3635	3009	2487	2089	0.431
HE 450 M	8301	8217	7971	7578	7059	6445	5766	5055	4343	3656	3010	2487	2090	0.383
HE 500 M	8521	8432	8171	7754	7206	6557	5843	5099	4357	3646	2985	2467	2073	0.344
HE 550 M	8771	8677	8400	7959	7380	6696	5947	5168	4395	3659	2982	2465	2071	0.311
HE 600 M	9001	8901	8607	8139	7526	6805	6017	5203	4399	3637	2953	2441	2051	0.283
HE 650 M	9249	9143	8834	8341	7698	6943	6120	5272	4439	3652	2959	2446	2055	0.260
HE 700 M	9479	9367	9039	8519	7840	7045	6183	5299	4435	3620	2932	2423	2036	0.239
HE 800 M	10006	9880	9512	8929	8173	7293	6346	5384	4453	3585	2904	2400	2016	0.205
HE 900 M	10484	10344	9937	9294	8462	7502	6475	5440	4451	3549	2874	2375	1996	0.180
HE 1000 M	10910	10780	10398	9691	8785	7744	6637	5532	4483	3554	2879	2379	1999	0.160
S275	$\Phi_c P_n$ (kN)													$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HP 200 x 43	1338	1306	1214	1075	906	727	556	411	314	248	-	-	-	0.577
HP 200 x 53	1692	1653	1539	1367	1158	936	721	535	409	323	-	-	-	0.580
HP 220 x 57	1804	1767	1662	1500	1300	1082	864	660	506	399	323	-	-	0.602
HP 260 x 75	2363	2327	2226	2066	1861	1627	1380	1137	908	717	581	480	403	0.592
HP 260 x 87	2747	2706	2591	2409	2176	1909	1626	1346	1082	855	692	572	481	0.595
HP 305 x 79	2499	2471	2392	2264	2096	1898	1682	1458	1236	1025	833	689	579	0.569
HP 305 x 88	2772	2741	2653	2512	2327	2110	1871	1623	1378	1145	932	770	647	0.570
HP 305 x 95	2994	2961	2868	2717	2519	2286	2030	1764	1500	1249	1018	841	707	0.571
HP 305 x 110	3465	3427	3321	3149	2924	2658	2366	2062	1759	1469	1200	992	833	0.572
HP 305 x 126	3984	3943	3822	3628	3374	3072	2740	2394	2048	1716	1407	1162	977	0.574
HP 305 x 149	4702	4655	4515	4292	3997	3648	3263	2859	2456	2066	1700	1405	1181	0.574
HP 305 x 180	5667	5612	5448	5186	4840	4429	3974	3496	3015	2550	2109	1743	1465	0.575
HP 305 x 186	5865	5808	5641	5372	5017	4595	4128	3636	3141	2660	2206	1823	1532	0.576
HP 305 x 223	7029	6963	6769	6457	6046	5554	5008	4431	3847	3278	2741	2264	1903	0.578
HP 320 x 88	2796	2764	2669	2518	2320	2089	1837	1579	1325	1086	880	727	611	0.548
HP 320 x 103	3242	3205	3097	2925	2701	2437	2150	1854	1562	1287	1043	862	724	0.551
HP 320 x 117	3712	3671	3550	3357	3105	2808	2484	2149	1818	1504	1221	1009	848	0.554
HP 320 x 147	4628	4578	4433	4202	3897	3538	3144	2735	2328	1939	1582	1307	1098	0.557
HP 320 x 184	5816	5756	5582	5303	4935	4500	4020	3518	3016	2534	2081	1720	1445	0.561
HP 360 x 109	3440	3413	3336	3219	3057	2861	2639	2398	2147	1895	1647	1411	1191	0.599
HP 360 x 133	4182	4150	4061	3919	3726	3492	3225	2937	2635	2331	2032	1747	1477	0.600
HP 360 x 152	4801	4765	4666	4503	4284	4018	3715	3387	3044	2697	2356	2028	1719	0.601
HP 360 x 174	5494	5454	5342	5159	4912	4612	4271	3899	3511	3117	2729	2356	2002	0.601
HP 360 x 180	5692	5650	5535	5345	5089	4779	4425	4040	3638	3230	2828	2441	2074	0.601
HP 400 x 122	3861	3833	3753	3636	3475	3276	3047	2798	2535	2267	2001	1743	1497	0.631
HP 400 x 140	4430	4398	4310	4179	3994	3768	3509	3225	2927	2622	2318	2023	1743	0.632
HP 400 x 158	4974	4939	4843	4696	4491	4239	3951	3636	3304	2963	2624	2295	1981	0.632
HP 400 x 176	5544	5505	5401	5237	5011	4734	4416	4068	3701	3324	2948	2582	2233	0.633
HP 400 x 194	6138	6096	5984	5803	5555	5251	4903	4521	4118	3703	3290	2886	2500	0.633
HP 400 x 213	6707	6662	6543	6345	6077	5750	5373	4959	4522	4072	3622	3183	2762	0.633
HP 400 x 231	7276	7228	7101	6888	6601	6249	5845	5400	4929	4445	3960	3485	3029	0.634

Tablo 7.8. S275 çelik kalitesi için HD profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları

S275	$\Phi_c P_n$ (kN)													$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HD 260 x 54.1	1707	1680	1610	1499	1355	1190	1016	842	678	536	434	359	301	0.591
HD 260 x 68.2	2148	2115	2032	1897	1722	1521	1307	1092	888	705	571	472	396	0.593
HD 260 x 93.0	2930	2888	2776	2595	2362	2092	1804	1514	1237	986	798	660	554	0.586
HD 260 x 114	3606	3556	3421	3203	2922	2595	2246	1893	1554	1243	1006	832	699	0.585
HD 260 x 142	4462	4404	4240	3978	3638	3243	2818	2387	1971	1584	1283	1060	891	0.582
HD 260 x 172	5435	5368	5175	4867	4467	4001	3497	2982	2481	2011	1628	1346	1131	0.578
HD 260 x 225	6577	6504	6291	5952	5507	4983	4411	3818	3232	2677	2175	1797	1510	0.565
HD 260 x 299	8732	8642	8376	7952	7393	6732	6005	5245	4487	3760	3081	2546	2140	0.555
HD 320 x 74.2	2341	2313	2239	2118	1959	1772	1568	1357	1148	950	772	638	536	0.549
HD 320 x 97.6	3078	3044	2953	2803	2607	2374	2117	1850	1583	1326	1087	898	755	0.552
HD 320 x 127	3992	3949	3832	3642	3392	3095	2767	2424	2081	1750	1440	1190	1000	0.548
HD 320 x 158	4979	4928	4786	4554	4249	3886	3485	3063	2640	2231	1844	1524	1280	0.546
HD 320 x 198	6244	6183	6008	5727	5354	4910	4418	3899	3376	2867	2385	1971	1656	0.543
HD 320 x 245	7722	7651	7442	7106	6662	6131	5539	4913	4278	3657	3069	2539	2133	0.538
HD 320 x 300	8769	8695	8479	8130	7665	7107	6479	5808	5120	4438	3783	3164	2659	0.532
HD 360 x 134	4222	4190	4102	3973	3799	3580	3329	3055	2767	2474	2182	1900	1630	0.603
HD 360 x 147	4650	4615	4520	4384	4187	3947	3672	3372	3056	2734	2413	2103	1807	0.601
HD 360 x 162	5105	5068	4966	4816	4603	4342	4044	3717	3373	3022	2672	2332	2009	0.600
HD 360 x 179	5650	5609	5499	5332	5097	4810	4482	4122	3743	3355	2969	2594	2237	0.600
HD 360 x 196	6194	6150	6033	5849	5593	5281	4923	4531	4118	3694	3273	2862	2471	0.600
HD 400 x 187	5880	5840	5733	5581	5359	5087	4773	4426	4058	3677	3293	2916	2552	0.630
HD 400 x 216	6818	6773	6654	6478	6226	5915	5557	5161	4739	4303	3862	3428	3008	0.630
HD 400 x 237	7447	7398	7272	7078	6803	6466	6076	5646	5187	4712	4233	3759	3301	0.628
HD 400 x 262	8281	8228	8093	7876	7575	7204	6776	6302	5797	5273	4743	4219	3712	0.626
HD 400 x 287	9065	9009	8867	8627	8301	7899	7435	6921	6373	5803	5226	4656	4102	0.624
HD 400 x 314	9880	9819	9666	9406	9053	8618	8115	7559	6964	6346	5720	5100	4498	0.622
HD 400 x 347	10143	10087	9944	9700	9368	8958	8481	7951	7379	6781	6170	5559	4958	0.620
HD 400 x 382	11178	11118	10961	10695	10333	9886	9366	8786	8162	7508	6839	6168	5509	0.616
HD 400 x 421	12326	12261	12090	11802	11409	10924	10358	9728	9048	8335	7604	6870	6148	0.614
HD 400 x 463	13529	13459	13273	12961	12537	12011	11399	10715	9977	9202	8406	7607	6818	0.610
HD 400 x 509	14894	14820	14619	14283	13825	13258	12597	11858	11058	10217	9353	8482	7621	0.607
HD 400 x 551	16097	16019	15804	15445	14956	14350	13643	12853	11997	11096	10168	9233	8308	0.604
HD 400 x 592	17324	17243	17014	16633	16114	15471	14720	13878	12967	12007	11018	10019	9028	0.601
HD 400 x 634	18543	18458	18216	17816	17270	16593	15801	14914	13952	12937	11889	10830	9778	0.599
HD 400 x 677	18260	18186	17969	17611	17122	16513	15799	14994	14116	13183	12213	11223	10232	0.598
HD 400 x 744	20052	19973	19738	19354	18828	18172	17402	16534	15585	14576	13526	12452	11374	0.592
HD 400 x 818	22059	21975	21723	21311	20746	20043	19215	18281	17259	16170	15034	13871	12700	0.588
HD 400 x 900	23267	23184	22936	22530	21973	21277	20456	19527	18507	17415	16271	15094	13902	0.584
HD 400 x 990	25555	25466	25202	24768	24174	23430	22551	21556	20461	19288	18056	16786	15497	0.578
HD 400 x 1086	28066	27972	27690	27228	26593	25799	24860	23795	22622	21363	20038	18670	17278	0.574
HD 400 x 1202	30982	30883	30589	30104	29438	28604	27616	26492	25253	23918	22509	21048	19557	0.587
HD 400 x 1299	33412	33308	33000	32492	31794	30918	29881	28699	27394	25987	24499	22953	21372	0.581

Tablo 7.9. S355 çelik kalitesi için IPE ve IPN profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları

S355	$\Phi_c P_n$ (kN)										$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
IPE 80	244	123	32	-	-	-	-	-	-	-	0.324
IPE 100	329	201	61	-	-	-	-	-	-	-	0.305
IPE 120	421	294	108	-	-	-	-	-	-	-	0.296
IPE 140	523	397	173	77	-	-	-	-	-	-	0.287
IPE 160	642	514	263	117	-	-	-	-	-	-	0.280
IPE 180	763	638	373	173	97	-	-	-	-	-	0.276
IPE 200	910	783	499	247	139	-	-	-	-	-	0.271
IPE 220	1067	944	654	355	200	-	-	-	-	-	0.272
IPE 240	1249	1125	824	489	275	176	-	-	-	-	0.270
IPE 270	1466	1350	1054	697	407	260	181	-	-	-	0.270
IPE 300	1718	1607	1314	939	587	376	261	-	-	-	0.268
IPE 330	1991	1884	1575	1168	768	491	341	250	-	-	0.259
IPE 360	2295	2191	1883	1449	1004	650	451	332	-	-	0.253
IPE 400	2647	2537	2225	1748	1247	821	570	419	-	-	0.238
IPE 450	3056	2940	2617	2117	1552	1045	725	533	408	-	0.223
IPE 500	3550	3427	3083	2573	1937	1342	932	685	524	-	0.211
IPE 550	4085	3953	3582	3039	2330	1653	1148	843	645	-	0.199
IPE 600	4730	4590	4197	3614	2862	2095	1466	1077	824	651	0.192
S355	$\Phi_c P_n$ (kN)										$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8		
IPN 80	241	97	-	-	-	-	-	-	-	-	0.284
IPN 100	338	175	47	-	-	-	-	-	-	-	0.267
IPN 120	453	275	83	-	-	-	-	-	-	-	0.256
IPN 140	581	396	138	-	-	-	-	-	-	-	0.250
IPN 160	728	532	213	94	-	-	-	-	-	-	0.242
IPN 180	891	689	317	141	-	-	-	-	-	-	0.238
IPN 200	1067	860	451	202	-	-	-	-	-	-	0.234
IPN 220	1262	1049	603	279	156	-	-	-	-	-	0.230
IPN 240	1472	1260	790	386	217	-	-	-	-	-	0.229
IPN 260	1702	1480	973	496	279	-	-	-	-	-	0.223
IPN 280	1948	1719	1180	633	356	-	-	-	-	-	0.221
IPN 300	2204	1965	1392	782	440	281	-	-	-	-	0.215
IPN 320	2482	2233	1627	958	539	345	-	-	-	-	0.210
IPN 340	2770	2516	1886	1167	661	423	-	-	-	-	0.207
IPN 360	3099	2833	2166	1384	794	508	-	-	-	-	0.204
IPN 380	3418	3147	2457	1626	950	608	422	-	-	-	0.201
IPN 400	3770	3491	2772	1888	1125	720	500	-	-	-	0.199
IPN 450	4696	4405	3636	2640	1684	1077	748	-	-	-	0.194
IPN 500	5719	5416	4600	3505	2395	1543	1072	787	-	-	0.190
IPN 550	6773	6465	5621	4453	3214	2135	1482	1089	834	-	0.186
IPN 600	8115	7791	6895	5625	4230	2926	2032	1493	1143	-	0.184



Tablo 7.10. S355 çelik kalitesi için HEA ve HEB profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları

S355	$\Phi_c P_n$ (kN)													$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HE 100 A	677	601	419	231	130	83	-	-	-	-	-	-	-	0.618
HE 120 A	808	744	581	384	224	143	99	-	-	-	-	-	-	0.618
HE 140 A	1003	944	786	580	378	242	168	123	-	-	-	-	-	0.614
HE 160 A	1239	1181	1025	808	579	383	265	195	-	-	-	-	-	0.606
HE 180 A	1447	1391	1249	1038	802	576	400	294	225	178	-	-	-	0.607
HE 200 A	1718	1663	1522	1308	1057	804	577	424	324	256	-	-	-	0.601
HE 220 A	2054	1999	1860	1643	1381	1105	841	620	475	375	304	251	-	0.601
HE 240 A	2453	2398	2256	2032	1756	1454	1155	879	673	531	430	356	299	0.597
HE 260 A	2773	2718	2582	2362	2085	1776	1460	1158	892	705	571	472	396	0.593
HE 280 A	3108	3055	2919	2707	2431	2117	1788	1464	1160	917	742	613	515	0.590
HE 300 A	3594	3540	3400	3185	2899	2570	2217	1862	1522	1213	983	812	682	0.588
HE 320 A	3974	3917	3766	3522	3206	2841	2451	2059	1684	1342	1087	898	755	0.552
HE 340 A	4265	4205	4040	3776	3435	3041	2621	2198	1794	1429	1157	956	803	0.518
HE 360 A	4562	4499	4320	4035	3668	3244	2792	2339	1906	1516	1228	1015	852	0.488
HE 400 A	5080	5009	4803	4479	4062	3582	3072	2561	2077	1647	1334	1103	926	0.436
HE 450 A	5687	5607	5373	5006	4533	3991	3415	2840	2297	1819	1473	1218	1023	0.385
HE 500 A	6310	6220	5957	5545	5014	4406	3762	3122	2517	1991	1612	1333	1120	0.345
HE 550 A	6767	6668	6379	5927	5346	4683	3982	3288	2635	2082	1686	1394	1171	0.311
HE 600 A	7161	7064	6780	6314	5679	4955	4195	3445	2740	2165	1753	1449	1218	0.282
HE 650 A	7544	7440	7137	6658	6024	5240	4418	3612	2857	2257	1828	1511	1269	0.259
HE 700 A	8092	7977	7643	7116	6433	5566	4663	3783	2966	2344	1898	1569	1318	0.238
HE 800 A	8613	8485	8113	7529	6782	5929	4947	3965	3076	2431	1969	1627	1367	0.204
HE 900 A	9436	9291	8870	8210	7369	6414	5391	4277	3296	2604	2109	1743	1465	0.179
HE 1000 A	9895	9737	9279	8564	7656	6631	5562	4439	3404	2689	2178	1800	1512	0.159
S355	$\Phi_c P_n$ (kN)													$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HE 100 B	830	738	518	288	162	103	-	-	-	-	-	-	-	0.608
HE 120 B	1086	1002	787	526	310	198	137	-	-	-	-	-	-	0.607
HE 140 B	1373	1295	1086	809	536	343	238	175	-	-	-	-	-	0.604
HE 160 B	1734	1657	1443	1147	832	555	385	283	216	-	-	-	-	0.597
HE 180 B	2086	2012	1806	1508	1172	847	590	433	331	262	-	-	-	0.597
HE 200 B	2495	2422	2219	1917	1561	1199	868	638	488	386	312	-	-	0.594
HE 220 B	2907	2834	2640	2340	1977	1592	1221	904	692	546	443	366	-	0.593
HE 240 B	3386	3314	3121	2819	2445	2035	1627	1245	953	753	610	504	423	0.590
HE 260 B	3782	3712	3528	3234	2864	2449	2023	1613	1247	986	798	660	554	0.586
HE 280 B	4198	4129	3954	3668	3303	2887	2448	2015	1607	1270	1029	850	714	0.585
HE 300 B	4763	4695	4520	4233	3862	3433	2972	2506	2059	1647	1334	1103	926	0.584
HE 320 B	5153	5082	4889	4578	4176	3710	3211	2707	2223	1777	1440	1190	1000	0.548
HE 340 B	5460	5386	5177	4845	4415	3918	3385	2849	2334	1863	1509	1247	1048	0.514
HE 360 B	5770	5693	5468	5113	4655	4125	3559	2989	2444	1948	1578	1304	1096	0.484
HE 400 B	6319	6233	5981	5584	5071	4481	3852	3222	2621	2083	1687	1394	1171	0.433
HE 450 B	6965	6868	6585	6139	5566	4906	4206	3505	2841	2252	1824	1508	1267	0.383
HE 500 B	7623	7515	7201	6706	6069	5339	4565	3793	3063	2425	1964	1623	1364	0.343
HE 550 B	8118	8000	7656	7116	6422	5629	4792	3961	3180	2512	2035	1682	1413	0.309
HE 600 B	8626	8497	8123	7535	6784	5926	5024	4133	3294	2603	2108	1742	1464	0.281
HE 650 B	9147	9007	8600	7962	7148	6223	5253	4299	3405	2690	2179	1801	1513	0.258
HE 700 B	9789	9634	9184	8480	7584	6570	5513	4480	3520	2781	2253	1862	1564	0.237
HE 800 B	10460	10307	9859	9156	8151	7003	5817	4671	3630	2868	2323	1920	1613	0.204
HE 900 B	11362	11190	10688	9901	8896	7630	6283	4994	3854	3045	2466	2038	1713	0.179
HE 1000 B	11878	11692	11149	10300	9220	7995	6567	5164	3963	3131	2536	2096	1761	0.159

Tablo 7.11. S355 çelik kalitesi için HEM ve HP profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları

S355	$\Phi_c P_n$ (kN)													$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HE 100 M	1699	1537	1138	689	388	248	-	-	-	-	-	-	-	0.592
HE 120 M	2121	1975	1595	1117	682	437	303	-	-	-	-	-	-	0.590
HE 140 M	2575	2442	2083	1598	1103	713	495	364	-	-	-	-	-	0.590
HE 160 M	3102	2976	2628	2135	1597	1098	762	560	428	-	-	-	-	0.588
HE 180 M	3619	3502	3171	2687	2132	1583	1115	819	627	495	-	-	-	0.587
HE 200 M	4195	4082	3764	3286	2718	2130	1578	1159	887	701	568	-	-	0.586
HE 220 M	4773	4667	4363	3899	3332	2722	2126	1592	1219	963	780	644	-	0.585
HE 240 M	6377	6260	5923	5402	4748	4022	3284	2584	1984	1567	1269	1049	881	0.579
HE 260 M	7016	6906	6586	6085	5448	4725	3971	3233	2545	2011	1628	1346	1131	0.578
HE 280 M	7674	7567	7263	6781	6159	5442	4678	3913	3183	2530	2049	1693	1423	0.577
HE 300 M	9684	9568	9238	8711	8022	7217	6341	5442	4561	3731	3022	2497	2098	0.572
HE 320 M	9968	9850	9504	8955	8238	7401	6492	5561	4651	3792	3072	2539	2133	0.538
HE 340 M	10089	9968	9614	9051	8319	7463	6535	5587	4662	3790	3070	2537	2132	0.508
HE 360 M	10185	10061	9697	9120	8369	7493	6546	5580	4642	3759	3045	2516	2114	0.480
HE 400 M	10409	10277	9893	9285	8495	7578	6590	5587	4618	3715	3009	2487	2089	0.431
HE 450 M	10716	10576	10170	9527	8694	7729	6694	5648	4643	3716	3010	2487	2090	0.383
HE 500 M	11000	10852	10421	9739	8859	7844	6759	5669	4628	3685	2985	2467	2073	0.344
HE 550 M	11323	11166	10709	9988	9060	7992	6856	5720	4641	3682	2982	2465	2071	0.311
HE 600 M	11620	11453	10968	10204	9223	8099	6909	5726	4611	3646	2953	2441	2051	0.283
HE 650 M	11939	11764	11253	10450	9421	8245	7006	5779	4624	3654	2959	2446	2055	0.260
HE 700 M	12236	12050	11509	10660	9576	8343	7049	5776	4581	3620	2932	2423	2036	0.239
HE 800 M	12917	12708	12100	11152	9947	8588	7176	5804	4537	3585	2904	2400	2016	0.205
HE 900 M	13410	13211	12630	11584	10264	8786	7265	5803	4491	3549	2874	2375	1996	0.180
HE 1000 M	13579	13370	12762	11811	10595	9028	7398	5848	4498	3554	2879	2379	1999	0.160
S355	$\Phi_c P_n$ (kN)													$i_y/i_x$
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HP 200 x 43	1728	1674	1523	1302	1044	786	559	411	314	248	-	-	-	0.577
HP 200 x 53	2185	2119	1933	1659	1339	1017	728	535	409	323	-	-	-	0.580
HP 220 x 57	2329	2267	2095	1836	1526	1203	899	660	506	399	323	-	-	0.602
HP 260 x 75	3051	2991	2824	2565	2241	1884	1524	1186	908	717	581	480	403	0.592
HP 260 x 87	3546	3479	3289	2994	2625	2217	1803	1412	1082	855	692	572	481	0.595
HP 305 x 79	3187	3149	3042	2839	2570	2262	1935	1608	1300	1029	833	689	579	0.569
HP 305 x 88	3578	3527	3382	3152	2856	2516	2155	1794	1452	1151	932	770	647	0.570
HP 305 x 95	3865	3811	3656	3410	3093	2728	2341	1953	1584	1257	1018	841	707	0.571
HP 305 x 110	4473	4411	4234	3955	3594	3178	2734	2289	1864	1482	1200	992	833	0.572
HP 305 x 126	5143	5074	4875	4558	4150	3678	3173	2665	2179	1737	1407	1162	977	0.574
HP 305 x 149	6070	5991	5760	5395	4922	4375	3787	3194	2624	2099	1700	1405	1181	0.574
HP 305 x 180	7316	7224	6953	6524	5968	5322	4626	3921	3239	2604	2109	1743	1465	0.575
HP 305 x 186	7572	7477	7200	6760	6189	5526	4811	4084	3381	2723	2206	1823	1532	0.576
HP 305 x 223	9073	8964	8643	8133	7470	6696	5858	5002	4168	3383	2740	2264	1903	0.578
HP 320 x 88	3610	3556	3399	3152	2837	2477	2099	1726	1375	1086	880	727	611	0.548
HP 320 x 103	4185	4124	3946	3665	3306	2896	2463	2034	1630	1288	1043	862	724	0.551
HP 320 x 117	4792	4723	4524	4209	3806	3343	2853	2366	1906	1508	1221	1009	848	0.554
HP 320 x 147	5974	5892	5652	5274	4786	4225	3627	3029	2461	1953	1582	1307	1098	0.557
HP 320 x 184	7508	7409	7120	6664	6074	5392	4661	3924	3217	2569	2081	1720	1445	0.561
HP 360 x 109	4318	4283	4183	4028	3815	3501	3154	2787	2417	2056	1715	1417	1191	0.599
HP 360 x 133	5399	5346	5198	4965	4651	4277	3861	3421	2974	2539	2127	1758	1477	0.600
HP 360 x 152	6198	6138	5974	5706	5350	4925	4452	3950	3442	2944	2472	2045	1719	0.601
HP 360 x 174	7092	7025	6841	6539	6138	5659	5124	4556	3979	3413	2875	2382	2002	0.601
HP 360 x 180	7348	7279	7087	6774	6359	5863	5308	4720	4122	3536	2978	2468	2074	0.601
HP 400 x 122	4904	4867	4761	4604	4351	4031	3672	3289	2896	2507	2133	1782	1497	0.631
HP 400 x 140	5719	5666	5520	5304	5003	4640	4232	3797	3349	2906	2479	2075	1744	0.632
HP 400 x 158	6421	6363	6204	5962	5627	5224	4771	4285	3786	3290	2813	2360	1983	0.632
HP 400 x 176	7156	7093	6919	6650	6281	5837	5336	4800	4247	3698	3167	2663	2238	0.633
HP 400 x 194	7923	7854	7667	7369	6966	6479	5930	5340	4733	4128	3542	2986	2509	0.633
HP 400 x 213	8658	8583	8386	8060	7624	7097	6503	5864	5205	4547	3909	3303	2775	0.633
HP 400 x 231	9393	9313	9102	8752	8284	7718	7079	6392	5682	4972	4282	3628	3048	0.634

Tablo 7.12. S355 çelik kalitesi için HD profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları

S355	$\Phi_c P_n$ (kN)												$i_y/i_x$	
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		12
HD 260 x 54.1	2183	2147	2044	1864	1636	1384	1128	885	679	536	434	359	301	0.591
HD 260 x 68.2	2773	2718	2582	2362	2085	1776	1460	1158	892	705	571	472	396	0.593
HD 260 x 93.0	3782	3712	3528	3234	2864	2449	2023	1613	1247	986	798	660	554	0.586
HD 260 x 114	4655	4572	4349	3995	3548	3045	2526	2026	1573	1243	1006	832	699	0.585
HD 260 x 142	5760	5664	5393	4966	4425	3816	3183	2569	2005	1584	1283	1060	891	0.582
HD 260 x 172	7016	6906	6586	6085	5448	4725	3971	3233	2545	2011	1628	1346	1131	0.578
HD 260 x 225	8640	8515	8151	7578	6843	6001	5112	4229	3398	2685	2175	1797	1510	0.565
HD 260 x 299	11472	11316	10861	10144	9219	8152	7014	5872	4784	3804	3081	2546	2140	0.555
HD 320 x 74.2	2997	2960	2853	2656	2402	2110	1802	1495	1205	953	772	638	536	0.549
HD 320 x 97.6	3974	3917	3766	3522	3206	2841	2451	2059	1684	1342	1087	898	755	0.552
HD 320 x 127	5153	5082	4889	4578	4176	3710	3211	2707	2223	1777	1440	1190	1000	0.548
HD 320 x 158	6428	6343	6107	5729	5238	4668	4055	3434	2834	2276	1844	1524	1280	0.546
HD 320 x 198	8060	7959	7670	7209	6609	5911	5157	4389	3644	2944	2385	1971	1656	0.543
HD 320 x 245	9968	9850	9504	8955	8238	7401	6492	5561	4651	3792	3072	2539	2133	0.538
HD 320 x 300	11520	11393	11022	10430	9654	8740	7741	6705	5682	4709	3829	3164	2659	0.532
HD 360 x 134	5450	5397	5251	5040	4756	4405	4011	3590	3159	2733	2325	1940	1630	0.603
HD 360 x 147	6003	5945	5787	5563	5242	4858	4426	3965	3492	3024	2574	2151	1807	0.601
HD 360 x 162	6591	6528	6359	6113	5766	5348	4878	4376	3860	3349	2857	2392	2010	0.600
HD 360 x 179	7294	7226	7043	6768	6386	5926	5409	4855	4286	3722	3178	2664	2238	0.600
HD 360 x 196	7997	7923	7728	7425	7009	6508	5945	5341	4720	4103	3509	2945	2475	0.600
HD 400 x 187	7591	7525	7346	7096	6734	6296	5798	5261	4702	4140	3592	3069	2586	0.630
HD 400 x 216	8802	8727	8529	8239	7827	7327	6759	6144	5504	4858	4226	3623	3058	0.630
HD 400 x 237	9613	9533	9323	9003	8555	8011	7394	6725	6028	5325	4636	3978	3360	0.628
HD 400 x 262	10690	10602	10378	10020	9528	8931	8251	7515	6746	5969	5207	4477	3788	0.626
HD 400 x 287	11703	11608	11373	10977	10445	9797	9060	8260	7425	6579	5748	4951	4196	0.624
HD 400 x 314	12754	12653	12399	11969	11393	10692	9894	9027	8120	7202	6299	5432	4608	0.622
HD 400 x 347	13326	13229	12982	12565	12004	11319	10534	9677	8774	7852	6936	6047	5204	0.620
HD 400 x 382	14686	14581	14311	13857	13244	12497	11640	10703	9715	8706	7701	6724	5797	0.616
HD 400 x 421	16193	16081	15787	15294	14630	13817	12886	11865	10788	9685	8585	7513	6493	0.614
HD 400 x 463	17773	17654	17334	16801	16081	15202	14191	13084	11913	10712	9512	8342	7225	0.610
HD 400 x 509	19567	19440	19094	18519	17744	16794	15702	14502	13232	11926	10618	9339	8114	0.607
HD 400 x 551	21147	21013	20642	20029	19201	18186	17018	15734	14372	12971	11566	10189	8869	0.604
HD 400 x 592	22760	22619	22225	21574	20694	19616	18374	17007	15556	14060	12558	11084	9667	0.601
HD 400 x 634	24361	24214	23798	23114	22188	21052	19743	18299	16765	15181	13587	12019	10508	0.599
HD 400 x 677	24477	24343	23955	23317	22454	21390	20158	18794	17334	15815	14275	12747	11260	0.598
HD 400 x 744	26878	26736	26317	25631	24702	23556	22227	20753	19174	17529	15856	14193	12570	0.592
HD 400 x 818	29569	29417	28967	28232	27234	26003	24574	22986	21280	19500	17686	15876	14106	0.588
HD 400 x 900	30505	30363	29939	29245	28301	27131	25767	24243	22597	20865	19087	17297	15529	0.584
HD 400 x 990	33506	33353	32901	32160	31151	29900	28439	26804	25035	23170	21249	19311	17391	0.578
HD 400 x 1086	36798	36636	36153	35364	34287	32951	31388	29636	27736	25730	23658	21562	19479	0.574
HD 400 x 1202	40621	40451	39946	39118	37988	36582	34935	33083	31068	28933	26719	24469	22222	0.587
HD 400 x 1299	43807	43629	43100	42232	41046	39571	37839	35890	33765	31509	29165	26777	24385	0.581

Tablolardaki dayanımlar hesaplanırken, elemanın burulmalı burkulma boyunun zayıf ekseninde eğilmeli burkulma boyuna eşit olduğunun kabul edildiği belirtilmelidir. Tablolarda burkulma boyları ( $L_c$  değerleri) 0'dan başlayarak 1'er metre aralıklarla artırılmıştır.  $L_c=0$  durumu için listelenen dayanım değerleri, elemanların akma sınır durumundaki tasarım dayanımlarına, yani  $0,90F_yA_g$ 'ye eşittir. Güvenli tarafta kalan bir yaklaşımla, tablolar, dayanım değerlerinin virgülden sonraki haneleri aşağı yuvarlanarak oluşturulmuştur.  $L_c$  değerinin tablolarda verilen  $L_c$  değerlerinin arasında kaldığı durumlarda, tasarımcı güvenli tarafta kalarak,  $L_c$  değerini bir üst tamsayıya yuvarlayabilir. ÇYTHYEY, basınç etkisindeki elemanların narinliğini 200 ile sınırladığından, tablolarda  $L_c > 200i_y$  boyları için dayanım değeri sunulmamıştır.

Hem tasarım tablolarında listelenen değerleri doğrulamak, hem de tasarım tablolarının farklı durumlardaki kullanımlarına örnek vermek amacıyla, ilerleyen bölümlerde farklı kesit ve çelik kalitesine sahip I-kesitli Avrupa hadde elemanları için hem ÇYTHYEY'deki tasarım denklemleri kullanılarak, hem de bu bölümde sunulan tasarım tabloları kullanılarak, tasarım dayanımları ayrı ayrı belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

### 7.1. Örnek 1

İlk örnekte, S235 çelik kalitesinde narin olmayan enkesite sahip HE 400 A profili ele alınmıştır. Elemanın burkulma boyu ( $L_c=1$  m) nispeten küçük seçilmiştir. İncelenen  $L_c$  değerinin  $L_{cy}$  ile  $L_{cy,eq}$  değerlerinden büyük olana eşit olduğu unutulmamalıdır.  $L_{cy,eq}$ 'nin hesabı ve kullanımı başka bir örnekte gösterilecektir. HE 400 A profilinin enkesit özellikleri aşağıda verilmektedir.

Tablo 7.13. HE 400 A profili için kesit özellikleri

$A = 15900 \text{ mm}^2$	$b_f = 300 \text{ mm}$	$J = 193,17 \times 10^4 \text{ mm}^4$
$d = 390 \text{ mm}$	$t_f = 19 \text{ mm}$	$C_w = 2942 \times 10^9 \text{ mm}^6$
$h = 298 \text{ mm}$	$i_x = 168,4 \text{ mm}$	$I_x = 45070 \times 10^4 \text{ mm}^4$
$t_w = 11 \text{ mm}$	$i_y = 73,4 \text{ mm}$	$I_y = 8564 \times 10^4 \text{ mm}^4$

Burada,  $A$  enkesit alanı,  $d$  enkesit yüksekliği,  $h$  düz gövde yüksekliği,  $t_w$  gövde kalınlığı,  $b_f$  başlık genişliği,  $t_f$  başlık kalınlığı,  $i_x$  ve  $i_y$  asal atalet yarıçapları,  $J$  ve  $C_w$  burulma sabitleri,  $I_x$  ve  $I_y$  ise asal atalet momentleridir.

Tablo 3.1 gereği elemanı oluşturan parçaların kalınlıkları ( $t_w = 11$  mm,  $t_f = 19$  mm) 40mm değerini aşmadığından hesaplamalarda akma dayanımı ( $F_y$ ) değeri 235 MPa olarak kullanılmalıdır. İlk olarak, elemanın enkesitini oluşturan parçaların narinlikleri hesaplanarak Denklem (3.14) kullanılarak enkesitin narin olup olmadığı belirlenmelidir.

$$\lambda_{rf} = 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,56 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 16,33 > \frac{b_f}{2t_f} = \frac{300}{2 \times 19} = 7,89$$

$$\lambda_{rw} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,49 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 43,47 > \frac{h}{t_w} = \frac{298}{11} = 27,09$$

Hesaplanan her iki değer de, ilgili akma dayanımı için belirlenen sınır değerlerden küçük olduğundan eleman narin olmayan enkesitlidir ve dayanım hesaplarında yerel burkulma sınır durumunun dikkate alınmasına gerek yoktur. Diğer bir ifadeyle, karakteristik dayanım, Denklem (3.3) kullanılarak hesaplanabilir.

Eleman için elastik burkulma gerilmesi, Denklem (3.7) ve Denklem (3.8) kullanılarak hesaplanan değerlerden küçüğü alınarak belirlenebilir,

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(L_{cy} / i_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(1000 / 73,4)^2} = 10634,62 \text{ MPa}$$

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

$$= \left[ \frac{\pi^2 \times 200000 \times 2942 \times 10^9}{(1000)^2} + 77200 \times 193,17 \times 10^4 \right] \times \frac{1}{45070 \times 10^4 + 8564 \times 10^4}$$

$$= 11105,65 \text{ MPa}$$

$$F_e = \min(10634,62 \text{ MPa}, 11105,65 \text{ MPa}) = 10634,62 \text{ MPa}$$

Fark edilebileceği gibi, elemanın burkulma boyu çok küçük olduğu için, elastik burkulma gerilmeleri çok küçük çıkmıştır. Ardından, kritik gerilme hesabı için burkulmanın elastik bölgede mi elastik olmayan bölgede mi gözleneceği tespit edilmelidir. Bu tespit Denklem (3.10) kullanılarak yapılabilir,

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{235}{10634,62} = 0,02 \leq 2,25 \text{ olduğundan elastik olmayan burkulma}$$

Bu durumda,  $F_{cr}$  hesabı Denklem (3.4) kullanılarak yapılmalıdır,

$$F_{cr} = \left[ 0,658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y = \left[ 0,658 \frac{235}{10634,62} \right] \times 235 = 232,84 \text{ MPa}$$

Buradan, Denklem (3.3) kullanılarak karakteristik aksenal basınç kuvveti dayanımı ( $P_n$ ) hesaplanıp, hesaplanan değer 0,9 katsayısı ile çarpılarak tasarım basınç kuvveti dayanımı ( $\phi_c P_n$ ) belirlenebilir,

$$P_n = F_{cr} A_g = 232,84 \times 15900 / 1000 = 3702,16 \text{ kN}$$

$$\rightarrow \phi_c P_n = 0,9 \times 3702,16 = 3331,94 \text{ kN}$$

S235 çelik kalitesi ve HEA profiller için Tablo 7.3'te sunulan tasarım tablosu kullanılarak  $L_c=1\text{m}$  ve HE 400 A için tasarım dayanımı değeri aşağıda gösterildiği gibi  $\phi_c P_n=3331\text{kN}$  olarak okunabilir. Elle yapılan çözümlle ulaşılan 3331,94 kN değeri ile tablodan okunan değer örtüşmektedir.

Tablo 7.14. HE 400 A profili örnek 1 için karşılaştırma tablosu

S235	$\Phi_c P_n$ (kN)													iy/ix
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
HE 100 A	448	414	326	220	130	83	-	-	-	-	-	-	-	0.618
HE 120 A	535	506	430	327	223	143	99	-	-	-	-	-	-	0.618
HE 140 A	664	637	565	462	348	242	168	123	-	-	-	-	-	0.614
HE 160 A	820	795	723	618	496	373	265	195	-	-	-	-	-	0.606
HE 180 A	958	933	869	769	648	520	398	294	225	178	-	-	-	0.607
HE 200 A	1137	1113	1049	949	825	688	552	424	324	256	-	-	-	0.601
HE 220 A	1359	1335	1273	1173	1045	902	753	608	475	375	304	251	-	0.601
HE 240 A	1624	1599	1536	1434	1301	1149	986	824	669	531	430	356	299	0.597
HE 260 A	1835	1811	1751	1650	1520	1367	1200	1030	863	705	571	472	396	0.593
HE 280 A	2057	2034	1974	1877	1748	1595	1427	1250	1073	903	742	613	515	0.590
HE 300 A	2379	2355	2293	2196	2064	1905	1728	1539	1347	1158	978	812	682	0.588
HE 320 A	2631	2605	2539	2428	2282	2107	1910	1702	1490	1281	1082	898	755	0.552
HE 340 A	2823	2797	2724	2604	2446	2257	2045	1820	1591	1367	1153	956	803	0.518
HE 360 A	3020	2992	2913	2784	2614	2410	2182	1940	1694	1453	1224	1015	852	0.488
HE 400 A	3362	3331	3240	3094	2900	2668	2410	2137	1860	1589	1333	1103	926	0.436
HE 450 A	3764	3729	3626	3460	3240	2978	2686	2377	2065	1761	1474	1218	1023	0.385

## 7.2. Örnek 2

İkinci örnekte, Örnek 1’de incelenen enkesit (HE 400 A) ve çelik kalitesine (S235) sahip elemanın burkulma boyunun  $L_c=11,0$  m olduğu durum incelenmiştir. İncelenen profilin enkesit sınıfı elemanın boyuna bağlı olmadığından, enkesit sınıflandırılmasının tekrarlanmasına gerek yoktur. Eleman narin enkesitli olmadığı için, bu örnekte de etkin alan hesabı gerekmemektedir.

İncelenen burkulma boyu için, elastik burkulma gerilmeleri yeniden hesaplandığında,

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(L_{cy} / i_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(11000 / 73,4)^2} = 87,89 \text{ MPa}$$

$$F_{ez} = \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(L_{cz})^2} + GJ \right] \frac{1}{I_x + I_y}$$
$$= \left[ \frac{\pi^2 \times 200000 \times 2942 \times 10^9}{(11000)^2} + 77200 \times 193,17 \times 10^4 \right] \times \frac{1}{45070 \times 10^4 + 8564 \times 10^4}$$
$$= 367,53 \text{ MPa}$$

$$F_e = \min(87,89 \text{ MPa}, 367,53 \text{ MPa}) = 87,89 \text{ MPa}$$

elde edilir. Buradan,

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{235}{87,89} = 2,67 > 2,25 \text{ olduğundan elastik burkulma}$$

Buna göre, kritik burkulma gerilmesi Denklem (3.5) kullanılarak hesaplanmalıdır.

$$F_{cr} = 0,877 F_e = 0,877 \times 87,89 = 77,08 \text{ MPa}$$

Buradan, tasarım basınç kuvveti dayanımı ( $\phi_c P_n$ ),

$$P_n = F_{cr} A_g = 77,08 \times 15900 / 1000 = 1225,57 \text{ kN}$$

$$\rightarrow \phi_c P_n = 0,9 \times 1225,57 = 1103,01 \text{ kN}$$

olarak hesaplanabilir. Örnek 1’de kullanılan tablodan, bu sefer  $L_c=11,0$  m için dayanım değeri okunduğunda 1103kN değerine ulaşılır. Elle yapılan çözüm neticesinde ulaşılan 1103,01kN değeri ile tabloda verilen değer örtüşmektedir.

Tablo 7.15. HE 400 A profili örnek 2 için karşılaştırma tablosu

S235	ΦcPn (kN)												iy/ix	
	Farklı Lc (m) Burkulma Boyları İçin													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		12
HE 100 A	448	414	326	220	130	83	-	-	-	-	-	-	-	0.618
HE 120 A	535	506	430	327	223	143	99	-	-	-	-	-	-	0.618
HE 140 A	664	637	565	462	348	242	168	123	-	-	-	-	-	0.614
HE 160 A	820	795	723	618	496	373	265	195	-	-	-	-	-	0.606
HE 180 A	958	933	869	769	648	520	398	294	225	178	-	-	-	0.607
HE 200 A	1137	1113	1049	949	825	688	552	424	324	256	-	-	-	0.601
HE 220 A	1359	1335	1273	1173	1045	902	753	608	475	375	304	251	-	0.601
HE 240 A	1624	1599	1536	1434	1301	1149	986	824	669	531	430	356	299	0.597
HE 260 A	1835	1811	1751	1650	1520	1367	1200	1030	863	705	571	472	396	0.593
HE 280 A	2057	2034	1974	1877	1748	1595	1427	1250	1073	903	742	613	515	0.590
HE 300 A	2379	2355	2293	2196	2064	1905	1728	1539	1347	1158	978	812	682	0.588
HE 320 A	2631	2605	2539	2428	2282	2107	1910	1702	1490	1281	1082	898	755	0.552
HE 340 A	2823	2797	2724	2604	2446	2257	2045	1820	1591	1367	1153	956	803	0.518
HE 360 A	3020	2992	2913	2784	2614	2410	2182	1940	1694	1453	1224	1015	852	0.488
HE 400 A	3362	3331	3240	3094	2900	2668	2410	2137	1860	1589	1333	1103	926	0.436
HE 450 A	3764	3729	3626	3460	3240	2978	2686	2377	2065	1761	1474	1218	1023	0.385

### 7.3. Örnek 3

Üçüncü örnekte, S355 çelik kalitesinde enkesiti narin olarak sınıflandırılan IPE 600 profili ele alınmıştır. Bu örnekte, elemanın burkulma boyu ( $L_c=1$  m) Örnek 1'deki gibi, nispeten küçük seçilmiştir. IPE 600 profilinin enkesit özellikleri aşağıda verilmektedir.

Tablo 7.16. IPE 600 profili için kesit özellikleri

$A = 15600 \text{ mm}^2$	$b_f = 220 \text{ mm}$	$J = 1652,1 \times 10^3 \text{ mm}^4$
$d = 600 \text{ mm}$	$t_f = 19 \text{ mm}$	$C_w = 2846 \times 10^9 \text{ mm}^6$
$h = 514 \text{ mm}$	$i_x = 243 \text{ mm}$	$I_x = 92080 \times 10^4 \text{ mm}^4$
$t_w = 12 \text{ mm}$	$i_y = 46,6 \text{ mm}$	$I_y = 3387 \times 10^4 \text{ mm}^4$

Tablo 3.1 gereği elemanı oluşturan parçaların kalınlıkları ( $t_w = 12 \text{ mm}$ ,  $t_f = 19 \text{ mm}$ ) 40mm değerini aşmadığından, hesaplamalarda akma dayanımı  $F_y=355 \text{ MPa}$  alınmıştır. Örnek 1'de olduğu gibi, profilin incelenen çelik kalitesinde ilk olarak enkesit sınıfı belirlenmelidir,

$$\lambda_{rf} = 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,56 \sqrt{\frac{200000}{355}} = 13,29 > \frac{b_f}{2t_f} = \frac{220}{2 \times 19} = 5,79$$



$$\lambda_{rw} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,49 \sqrt{\frac{200000}{355}} = 35,37 < \frac{h}{t_w} = \frac{514}{12} = 42,83$$

Profilin başlık narinliği, ilgili akma dayanımı için belirlenen sınır değerden küçük olduğundan profil narin başlık parçası içermemektedir. Buna karşın, profilin gövde narinliği sınır değerden büyük olduğundan profil narin gövdeli, daha genel bir ifadeyle narin enkesitlidir. Bu durumda, dayanım hesabında yerel burkulma sınır durumu dikkate alınmalı, enkesitin etkin alanı hesaplanmalıdır. Denklem (3.15) incelendiğinde,  $A_e$  hesabı için  $F_{cr}$  bilinmelidir. Dolayısıyla öncelikle Örnek 1'deki işlem adımları takip edilerek kritik burkulma gerilmesi hesaplanmalıdır. Elastik burkulma gerilmesi,

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(L_{cy} / i_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(1000 / 46,6)^2} = 4286,49 \text{ MPa}$$

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

$$= \left[ \frac{\pi^2 \times 200000 \times 2846 \times 10^9}{(1000)^2} + 77200 \times 1652,1 \times 10^3 \right] \times \frac{1}{92080 \times 10^4 + 3387 \times 10^4}$$

$$= 6018,12 \text{ MPa}$$

değerlerinden elverişsiz olan 4286,49MPa değerine eşittir. Burkulmanın elastik bölgede mi, elastik olmayan bölgede mi oluştuğunu belirlemek için,  $F_y/F_e$  oranı kontrol edilmelidir.

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{355}{4286,49} = 0,08 \leq 2,25 \text{ olduğundan elastik olmayan burkulma}$$

Buradan, kritik burkulma gerilmesi,

$$F_{cr} = \left[ 0,658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y = \left[ 0,658 \frac{355}{4286,49} \right] \times 355 = 341,91 \text{ MPa}$$

olarak hesaplanabilir. Kritik gerilme hesaplandıktan sonra yapılması gereken ilk işlem, profilin gövdesinin gerçekten narin olup olmadığını belirlemektir. Diğer bir ifadeyle, profilde yerel burkulmanın genel burkulmadan önce olup olmadığına karar vermektir. Bunun için, Denklem (3.15)'teki "ikinci" narinlik kontrolü yapılır,

$$\lambda_{rw} \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = 35,37 \times \sqrt{\frac{355}{342,91}} \Rightarrow 42,83 > 35,94$$

İkinci kontrolde de profilin gövdesi narin olarak sınıflandırıldığından, etkin alan hesabı yapılmalıdır. Bunun için, ilk olarak Denklem (3.16) kullanılarak gövdenin elastik burkulma gerilmesi hesaplanmalıdır.

$$F_{el} = \left( c_2 \frac{\lambda_{rw}}{\lambda_w} \right)^2 F_y = \left( 1,31 \frac{35,37}{42,83} \right)^2 355 = 415,48 \text{ MPa}$$

Tablo 3.3'e göre,  $c_1$  ve  $c_2$  katsayılarının, gövdesi narin I-kesitli bir hadde profilinde sırasıyla 0,18 ve 1,31 olduğu hatırlanarak ve Denklem (3.15) kullanılarak profilin etkin gövde yüksekliği  $h_e$  hesaplanabilir,

$$h_e = h \left( 1 - c_1 \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} \right) \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} = h_e = 514 \times \left( 1 - 0,18 \sqrt{\frac{415,48}{342,91}} \right) \times \sqrt{\frac{415,48}{342,91}} = 453,68 \text{ mm}$$

Buradan, profilin etkin alanı  $A_e$ , profilin enkesit alanından etkin olmayan gövde alanı çıkarılarak hesaplanabilir,

$$A_e = A_g - (h - h_e)t_w = 15600 - (514 - 453,68) \times 12 = 14876 \text{ mm}^2$$

Profilin tasarım aksenal basınç kuvveti dayanımı ( $\phi_c P_n$ ), Denklem 3.11 kullanılarak belirlenebilir,

$$\phi_c P_n = 0,90 F_{cr} A_e = 0,90 \times 342,91 \times 14876 / 1000 = 4591,02 \text{ kN}$$

S355 çelik kaliteli IPE profiller için tasarım dayanımı değerleri Tablo 7.15'te verilmektedir. IPE 600 profili ve  $L_c=1\text{m}$  için, tasarım dayanımı ilgili tablodan aşağıda gösterildiği gibi, 4590kN olarak okunabilir. Bu değer, tasarım denklemlerinden elde edilen sonuçla (4591,02kN) örtüşmektedir.

#### 7.4. Örnek 4

Bu örnekte, Örnek 3'te incelenen enkesit (IPE 600) ve çelik kalitesine (S235) sahip elemanın burkulma boyunun  $L_c=8,0 \text{ m}$  olduğu durum incelenmiştir. İncelenen profilin enkesit sınıfı elemanın boyuna bağlı olmadığından, enkesit sınıflandırılmasının

tekrarlanmasına gerek yoktur. İncelenen burkulma boyu için, elastik burkulma gerilmeleri yeniden hesaplanmalıdır,

Tablo 7.17. IPE 600 profili örnek 3 için karşılaştırma tablosu

S355	ΦcPn (kN)										iy/ix
	Farklı Lc (m) Burkulma Boyları İçin										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
IPE 80	244	123	32	-	-	-	-	-	-	-	0.324
IPE 100	329	201	61	-	-	-	-	-	-	-	0.305
IPE 120	421	294	108	-	-	-	-	-	-	-	0.296
IPE 140	523	397	173	77	-	-	-	-	-	-	0.287
IPE 160	642	514	263	117	-	-	-	-	-	-	0.280
IPE 180	763	638	373	173	97	-	-	-	-	-	0.276
IPE 200	910	783	499	247	139	-	-	-	-	-	0.271
IPE 220	1067	944	654	355	200	-	-	-	-	-	0.272
IPE 240	1249	1125	824	489	275	176	-	-	-	-	0.270
IPE 270	1466	1350	1054	697	407	260	181	-	-	-	0.270
IPE 300	1718	1607	1314	939	587	376	261	-	-	-	0.268
IPE 330	1991	1884	1575	1168	768	491	341	250	-	-	0.259
IPE 360	2295	2191	1883	1449	1004	650	451	332	-	-	0.253
IPE 400	2647	2537	2225	1748	1247	821	570	419	-	-	0.238
IPE 450	3056	2940	2617	2117	1552	1045	725	533	408	-	0.223
IPE 500	3550	3427	3083	2573	1937	1342	932	685	524	-	0.211
IPE 550	4085	3953	3582	3039	2330	1653	1148	843	645	-	0.199
IPE 600	4730	4590	4197	3614	2862	2095	1466	1077	824	651	0.192

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(L_{cy} / i_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(8000 / 46,6)^2} = 66,98 \text{ MPa}$$

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

$$= \left[ \frac{\pi^2 \times 200000 \times 2846 \times 10^9}{(8000)^2} + 77200 \times 1652,1 \times 10^3 \right] \times \frac{1}{92080 \times 10^4 + 3387 \times 10^4}$$

$$= 225,54 \text{ MPa}$$

Hesaplanan değerlerden küçük olan 66,98MPa değeri ile işlemlere devam edilirse,

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{355}{66,98} = 5,3 > 2,25 \text{ olduğundan elastik burkulma}$$

Buna göre kritik burkulma gerilmesi Denklem (3.5) ile hesaplanmalıdır.

$$F_{cr} = 0,877F_e = 0,877 \times 66,98 = 58,74 \text{ MPa}$$

Kritik burkulma gerilmesinin hesaplanmasının ardından yerel burkulma sınır durumu için Denklem (3.15)'teki ikinci kontrol yapılmalıdır.

$$\lambda_{rw} \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = 35,37 \times \sqrt{\frac{355}{58,74}} = 42,83 < 86,95$$

Denklem (3.15)'te yapılan ikincil narinlik kontrolüne göre IPE 600 profilin enkesit alanı incelenen burkulma boyunda yerel burkulma nedeniyle herhangi bir kayba uğramamaktadır. Bu nedenle, dayanım hesabında, kayıpsız enkesit alanı kullanılabilir. Bundan sonra Denklem (3.11) ile "karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı" ( $P_n$ ) hesaplanarak YDKT için ( $\phi_c P_n$ ) 0,9 katsayısı ile çarpılmalıdır.

$$\phi_c P_n = 0,90 F_{cr} A_e = 0,90 \times 58,74 \times 15600 / 1000 = 824,71 \text{ kN}$$

S355 çelik kaliteli IPE profiller için Örnek 3'te kullanılan profil tablosu kullanılarak tasarım dayanımı 824kN olarak okunabilir. Elle yapılan çözüm neticesinde ulaşılan 824,71kN değeri ile tabloda verilen değer örtüşmektedir.

## 7.5. Örnek 5

Beşinci ve son örnekte, tasarım tablolarının güçlü eksen etrafında burkulma durumunda nasıl kullanıldığı gösterilmiştir. Bu durumda, tabloların son sütunundaki  $i_y/i_x$  oranları kullanılarak eşdeğer burkulma boyu ( $L_{cy,eq}$ ) hesabı yapılmalıdır. Bu örnekte, malzeme ve enkesit özellikleri Örnek 2'de verilen S235 çelik kaliteli HE 400 A profil ele alınmıştır. İncelenen çelik kalitesinde, HE 400 A profilinin enkesiti narin olmadığından, etkin alan hesabı gerekmemektedir. Elemanın x eksen etrafında genel burkulma sınır durumunun kritik olduğu düşünüldüğünden, elastik burkulma gerilmesi  $F_{ex}$ 'e eşit olacaktır,

$$F_e = F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(L_{cx} / i_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(4796 / 73,4)^2} = 462,34 \text{ MPa}$$

Buradan, kritik burkulma gerilmesi

Tablo 7.18. IPE 600 profili örnek 4 için karşılaştırma tablosu

S355	$\Phi_c P_n$ (kN)										i <sub>y</sub> /i <sub>x</sub>
	Farklı L <sub>c</sub> (m) Burkulma Boyları İçin										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
IPE 80	244	123	32	-	-	-	-	-	-	-	0.324
IPE 100	329	201	61	-	-	-	-	-	-	-	0.305
IPE 120	421	294	108	-	-	-	-	-	-	-	0.296
IPE 140	523	397	173	77	-	-	-	-	-	-	0.287
IPE 160	642	514	263	117	-	-	-	-	-	-	0.280
IPE 180	763	638	373	173	97	-	-	-	-	-	0.276
IPE 200	910	783	499	247	139	-	-	-	-	-	0.271
IPE 220	1067	944	654	355	200	-	-	-	-	-	0.272
IPE 240	1249	1125	824	489	275	176	-	-	-	-	0.270
IPE 270	1466	1350	1054	697	407	260	181	-	-	-	0.270
IPE 300	1718	1607	1314	939	587	376	261	-	-	-	0.268
IPE 330	1991	1884	1575	1168	768	491	341	250	-	-	0.259
IPE 360	2295	2191	1883	1449	1004	650	451	332	-	-	0.253
IPE 400	2647	2537	2225	1748	1247	821	570	419	-	-	0.238
IPE 450	3056	2940	2617	2117	1552	1045	725	533	408	-	0.223
IPE 500	3550	3427	3083	2573	1937	1342	932	685	524	-	0.211
IPE 550	4085	3953	3582	3039	2330	1653	1148	843	645	-	0.199
IPE 600	4730	4590	4197	3614	2862	2095	1466	1077	824	651	0.192

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{235}{462,34} = 0,51 \leq 2,25 \text{ olduğundan } F_{cr} = \left[ 0,658^{\frac{235}{462,34}} \right] 235 = 189,97 \text{ MPa}$$

olarak hesaplanabilir. Böylece, elemanın tasarım aksenal basınç kuvveti dayanımı

$$\phi_c P_n = 0,90 F_{cr} A_g = 0,90 \times 189,97 \times 15900 / 1000 = 2718,47 \text{ kN}$$

olarak elde edilir.

Tasarım dayanımını tasarım tablolarından okuyabilmek için ilk olarak ilgili profil için i<sub>y</sub>/i<sub>x</sub> oranı okunmalıdır. Tablo 7.3'ten bu oran, 0,436 olarak okunabilir. Bu durumda, eşdeğer burkulma boyu L<sub>cy,eq</sub>, Denklem (7.1) kullanılarak

$$L_{cy,eq} = L_{cx} \frac{i_y}{i_x} = 11000 \times 0,436 = 4796 \text{ mm}$$

olarak hesaplanabilir. S235 çelik kalitesine sahip HEA profiller için dayanım değerleri Tablo 7.3'te verilmektedir. L<sub>cy,eq</sub>=4796mm değeri tabloda ara bir değer

olduğundan güvenli bir yaklaşımla  $L_c=5\text{m}$  için tabloda verilen değer (2668kN) okunabilir. Bu değer, tasarım denklemleri kullanılarak hesaplanan değere (2718,76kN) oldukça yakındır.

Tablo 7.19. HE 400 A profili örnek 5 için karşılaştırma tablosu

S235	$\Phi cP_n$ (kN)														iy/ix
	Farklı $L_c$ (m) Burkulma Boyları İçin														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
HE 100 A	448	414	326	220	130	83	-	-	-	-	-	-	-	-	0.618
HE 120 A	535	506	430	327	223	143	99	-	-	-	-	-	-	-	0.618
HE 140 A	664	637	565	462	348	242	168	123	-	-	-	-	-	-	0.614
HE 160 A	820	795	723	618	496	373	265	195	-	-	-	-	-	-	0.606
HE 180 A	958	933	869	769	648	520	398	294	225	178	-	-	-	-	0.607
HE 200 A	1137	1113	1049	949	825	688	552	424	324	256	-	-	-	-	0.601
HE 220 A	1359	1335	1273	1173	1045	902	753	608	475	375	304	251	-	-	0.601
HE 240 A	1624	1599	1536	1434	1301	1149	986	824	669	531	430	356	299	-	0.597
HE 260 A	1835	1811	1751	1650	1520	1367	1200	1030	863	705	571	472	396	-	0.593
HE 280 A	2057	2034	1974	1877	1748	1595	1427	1250	1073	903	742	613	515	-	0.590
HE 300 A	2379	2355	2293	2196	2064	1905	1728	1539	1347	1158	978	812	682	-	0.588
HE 320 A	2631	2605	2539	2428	2282	2107	1910	1702	1490	1281	1082	898	755	-	0.552
HE 340 A	2823	2797	2724	2604	2446	2257	2045	1820	1591	1367	1153	956	803	-	0.518
HE 360 A	3020	2992	2913	2784	2614	2410	2182	1940	1694	1453	1224	1015	852	-	0.488
HE 400 A	3362	3331	3240	3094	2900	2668	2410	2137	1860	1589	1333	1103	926	-	0.436
HE 450 A	3764	3729	3626	3460	3240	2978	2686	2377	2065	1761	1474	1218	1023	-	0.385

Örnek 2'den hatırlanabileceği gibi, incelenen elemanın zayıf ekseninde burkulma boyunun  $L_{cy}=11,0$  m olduğu durumda, tasarım dayanımı 1103kN'a eşittir. Bu örnekten de görülebileceği gibi,  $L_{cx}=L_{cy}$  olduğu durumda, x ekseninde eğilmeli burkulma sınır durumunun kontrolüne gerek yoktur. Aslında, incelenen profil ve çelik kalitesi için,  $L_{cy}>L_{cy,eq}=4796$  mm olduğu müddetçe, x-eksenine göre eğilmeli burkulma, elemanın davranışını belirleyen bir sınır durum olmamaktadır.

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Deprem kuşağı üzerinde bulunan ülkemizde, konut ve sanayi yapılarına olan ihtiyacın artması, yüksek yapı inşasında daha ekonomik tasarımlar sağlanması ve inşaat süresinin kısıtlı olduğu durumlarda pratik çözümler sunması nedenleriyle çelik yapılara ihtiyaç günden güne artmıştır. Bu artışa paralel olarak, 2016 yılında, 1980 yılında yayınlanan ve geçen zaman içinde yenilenmediği için güncelliğini yitiren TS 648 standardı [1] yürürlükten kaldırılmış, yerine “Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik” (ÇYTHYEY) yürürlüğe konmuştur. Bu yönetmelik, 2018 yılında yayınlanan güncel deprem yönetmeliğiyle [2] de nispeten çok daha uyumlu bir yönetmeliktir. TS 648’den ÇYTHYEY’ye geçiş beraberinde, iki tasarım dokümanı arasındaki farklılıkların farkındalığı, TS 648’e göre tasarlanmış yapıların ÇYTHYEY ilkelerine göre yeterli dayanım, rijitlik ve kararlılığa sahip olup olmadıklarının belirlenmesi gibi konuları gündeme getirmiştir.

Bu tezin temel amaçlarından biri, basınç etkisindeki I-enkesitli çelik hadde profilleri için, ÇYTHYEY’de tanımlanan tasarım esasları ile TS 648’de tanımlanan tasarım esaslarını karşılaştırarak, TS 648’e göre tasarlanmış bir çelik basınç elemanının ÇYTHYEY’ye göre yeterli dayanıma sahip olup olmadığını tespit etmektir. ÇYTHYEY’de tanımlanan GKT yönteminde kullanılan yük birleşimleri ile TS 648’de kullanılan yük birleşimlerinin benzer olması nedeniyle karşılaştırmalarda GKT yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla, ülkemizde çelik basınç elemanı olarak yaygın şekilde kullanılan 39 I profil (IPE ve IPN), 72 HE profil (HEA, HEB ve HEM), ayrıca 31 HP ve 42 HD profil ele alınmıştır. Çalışmada, üç farklı çelik sınıfı S235, S275 ve S355 incelenmiştir. İncelenen bütün çelik sınıfları ve profiller için, ÇYTHYEY’ye göre hesaplanan güvenli dayanımlar ile TS 648’e göre hesaplanan emniyetli dayanımlar karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra, tasarım dokümanlarındaki farklılıklar da ilgili bölümlerde irdelenmiştir. İncelenen çelik kaliteleri ve profillerle sınırlı olmak üzere, elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Kesiti narin olmayan profillerin dayanım oranı eğrileri profil türü ve numarasından bağımsızdır. Bununla birlikte, dayanım oranı eğrilerinin profillerin üretildiği çeliğin karakteristik akma gerilmesine bir miktar bağlı olduğu görülmüştür.

- Kesiti narin olmayan profillerin dayanım oranı eğrileri çok küçük narinliklerde yaklaşık 1,0 değerinden başlayıp narinlik oranı 20 değerine ulaşıncaya kadar artmakta, bu narinlik değerinde en büyük dayanım oranı değeri olan 1,02 değerine ulaşmaktadır. Daha büyük narinliklerde ise artan narinlikle azalarak, yeterince büyük narinliklerde 0,762 değerine ulaşip narinlikten bağımsız hale gelmektedir. Eleman narinliği yaklaşık 22,5'tan büyük olan profillerde, TS 648'in ÇYTHYEEY'ye göre daha güvenli sonuçlar verdiği, küçük narinliklerde ise aradaki farkın ihmal edilebilecek kadar az (en fazla %2,2) olduğu gözlenmiştir.
- Kesitleri narin olan profillerde ise dayanım oranı eğrilerinin, hem kesit narinliğine hem de çelik kalitesine bağlı olduğu belirlenmiştir. Bu tür profillerde, dayanım oranı eğrileri, 1,00 değerinden daha büyük değerlerden (en fazla 1,12'den) başlamaktadır. İncelenen profil ve çelik kaliteleri arasında, en büyük dayanım oranının 1,15 (S355, HE 1000 A) olduğu belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, narinliği 20'ye eşit olan elemanlarda TS 648, ÇYTHYEEY'ye göre %15'e kadar güvensiz sonuçlar verebilmektedir. Ancak, daha büyük narinliklerde dayanım oranı değerleri 1,0'in altına düşmektedir. Kesit narinliği en yüksek olan S355 çelik kaliteli HE 1000 A profilinde bile, dayanım oranı değerleri, eleman narinliği 40'tan küçük olmadığı müddetçe, 1,0'den küçük çıkmaktadır. Çoğu çelik basınç elemanının narinliğinin 40'tan yüksek olduğu düşünüldüğünde, aslında pratikte kullanılan eleman boyları için her durumda TS 648'in ÇYTHYEEY'ye göre güvenli sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Çalışmanın temel amaçlarından ikincisi, ABD'de 2010 yılından 2016 yılına kadar kullanılan AISC 360-10 [6] yönetmeliğinde narin enkesitli basınç elemanları için tanımlanan tasarım esaslarının AISC 360-16'da tamamen değiştiği dikkate alınarak AISC 360-16'ya (yani, ÇYTHYEEY'ye) göre hesaplanan dayanımların, AISC 360-10'a göre hesaplanan dayanımlarla karşılaştırılmasıdır. Böylece, narin enkesitli basınç elemanlarının tasarım esasları açısından, iki Amerikan çelik bina tasarım yönetmeliği (AISC 360-16 ile AISC 360-10) arasındaki farklar belirlenmiştir. Her iki yönetmelikte de kesit sınıflandırması aynı olduğundan, AISC 360-16'ya göre narin olarak sınıflandırılan bir kesit, AISC 360-10'a göre de narin olarak sınıflanmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde, elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Başlıkları narin olan profillerin dayanım hesaplarında, incelenen bütün burkulma boylarında, AISC 360-10'nun, AISC 360-16'a göre daha güvenli sonuçlar verdiği belirlenmiştir.



- Gövdeleri narin olan profillerde ise AISC 360-10'nun bazı profil ve bazı burkulma boylarında güvensiz sonuçlar verebildiği, ancak AISC 360-10'a göre hesaplanan dayanımların AISC 360-16'ya göre hesaplanan dayanımlardan en fazla %2 büyük olduğu belirlenmiştir.

Tezin üçüncü amacına paralel olarak, çelik yapı tasarımına yönelik mimar ve mühendislerin, ülkemizde yaygın şekilde kullanılan I-kesitli Avrupa çelik hadde profillerin tasarımında kullanabilecekleri pratik tasarım tabloları oluşturulmuştur. Tabloların, tasarımcının yapmış olduğu analizler neticesinde elde ettiği sonuçlara göre kolaylıkla en ekonomik kesiti belirleyebilmesini, karmaşık hesaplamalar yapmadan doğrudan sonuca gitmesini ve zamandan tasarruf etmesini sağlayacağı düşünülmektedir. Tablolar, tezin kapsamında incelenen tüm profiller ve üç farklı çelik sınıfı için farklı eleman boyları dikkate alınarak hazırlanmıştır. Tasarım tablolarında, yalnızca Yük ve Dayanım Katsayılarına göre Tasarım (YDKT) ile ilgili tasarım dayanımları verilmiş; dayanımlar elemanın zayıf ekseninde eğilmeli burkulma boyu için listelenmiştir. Bununla birlikte tablolar, güçlü ekseninde eğilmeli burkulma sınır durumunun kontrolü için de kullanılabilir. Bunun için, güçlü ekseninde burkulma boyu, "eşdeğer" zayıf ekseninde burkulma boyuna dönüştürülmelidir. Tasarım tablolarında sunulan dayanım değerleri, elemanların zayıf ekseninde eğilmeli burkulma boyları ile burulmalı burkulma boylarının eşit olduğu kabulüne dayanmaktadır. Tablolarının tasarımcıya sağladığı kolaylıklardan biri de, tablolar oluşturulurken enkesitlerin narinlik durumları dikkate alındığından, tasarımcının ayrıca enkesit sınıflandırması yapma zorunluluğunun ortadan kalkmış olmasıdır.

Bu çalışmada, yalnız I-kesitli Avrupa hadde profilleri ele alınmıştır. Benzer çalışmalar, U, L, T ve yapma profiller için yapılabilir. Çalışmada, yalnız aksenal basınç kuvveti etkisindeki elemanlar ele alınmıştır. Farklı kesit zorları (eğilme momenti, kesme kuvveti, burulma momenti, veya bunların birleşik etkileri) için benzer karşılaştırmalar ve çalışmalar yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] TS 648, Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, 1. Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1980.
- [2] TBDY, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar, *T.C. İç İşleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, Ankara, 2018.
- [3] AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-16, *American Institute of Steel Construction*, Chicago, 2016.
- [4] ÇYTHYEY (2016), Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, 2016.
- [5] ÇYTHYEY (2018), Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, 2018.
- [6] AISC 360-10, Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-10, *American Institute of Steel Construction*, Chicago, 2010.
- [7] Segui W. T., *Steel Design 5th Edition*, Cengage Learning, Stamford, 2013.
- [8] Özhendekci D., Çelik Yapılar I, Lisans Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [9] Subramanian N., *Steel Structures: Design and Practice*, 1st Edition, Oxford University Press, Oxford, 2011.
- [10] Williams A., *Steel Structure Design: ASD/LRFD*, 1st Edition, McGraw-Hill Education, New York, 2011.
- [11] Çuhadaroğlu S. P., Çelik Yapılar I, Lisans Ders Notları, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2009.
- [12] American Institute of Steel Construction, Core Teaching Aids for Structural Steel Design Courses, Chicago, <https://www.aisc.org/education/university-programs/ta-core-teaching-aids-for-structural-steel-design-courses/>, (Ziyaret tarihi: 27 Mayıs 2019).
- [13] Memorial University of Newfoundland, Faculty of Engineering And Applied Science, Newfoundland, <https://www.engr.mun.ca/~adluri/courses/steel/ppt%20files1/Topic%20-Compression.pdf>, (Ziyaret tarihi: 08 Mart 2019).
- [14] Aghayere A., Vigil J., *Structural Steel Design: A Practice-Oriented Approach*, 1st Edition, Pearson Education, New Jersey, 2009.

- [15] 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: 24 Haziran 2019).
- [16] AISC (1989), Specification for Structural Steel Buildings: Allowable Stress Design and Plastic Design, *American Institute of Steel Construction*, Chicago, 1989.
- [17] TS EN 10025-2, Sıcak Haddelenmiş Yapı Çelikleri - Bölüm 2: Alaşimsız Yapı Çeliklerinin Genel Teknik Teslim Şartları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2006.
- [18] Steel Construction Manual 14, *American Institute of Steel Construction*, Chicago, Illinois, 60601-6204, 2014.



## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Çuhadaroğlu S. P., **Ergin E.**, Eksenel Basınç Kuvveti Etkisindeki I-Enkesitli Çelik Hadde Profillerin TS 648 ve Güncellenen Türkiye Çelik Yönetmeliği'ne Göre Tasarım İlkelerinin Karşılaştırılması, *4. Uluslararası Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, İstanbul, 23-24 Nisan 2019.



## ÖZGEÇMİŞ

21 Kasım 1988 tarihinde Adapazarı'nda doğdu. 2002 yılında Figen Sakallıoğlu Anadolu Lisesi'ni kazanıp 2006 yılında mezun oldu. 2006 yılında Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazanıp lisans derecesini 2012 yılında aldı. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doç. Dr. Seval Pınarbaşı Çuhadaroğlu yönetiminde yüksek lisans çalışmasına başladı. Aynı yıl maden, inşaat ve çevre alanında faaliyet gösteren uluslararası inşaat firması Yesti İnşaat'ta inşaat mühendisi olarak çalışmaya başladı. Ardından Cengiz İnşaat firması bünyesinde Kuzey Marmara Otoyolu projesinde çalıştı. Bu süre zarfında, kalite güvence ve kalite kontrol mühendisi, teknik ofis ve planlama mühendisi olarak birçok yurt içi ve yurtdışı projelerinde aktif rol oynadı. 5c Koridoru Otoyol Yapım İşi kapsamında Cengiz İnşaat Bosna-Hersek Zenica şantiyesinde teknik ofis mühendisi olarak görevine devam etmektedir.