KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SICAK HADDELENMİŞ I VE H ENKESİTLİ ÇELİK BASINÇ ELEMANLARININ TASARIMLARININ TÜRKİYE VE AVRUPA YÖNETMELİKLERİNE GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI

TAYLAN GENÇ

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SICAK HADDELENMİŞ I VE H ENKESİTLİ ÇELİK BASINÇ ELEMANLARININ TASARIMLARININ TÜRKİYE VE AVRUPA YÖNETMELİKLERİNE GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI

TAYLAN GENÇ

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: 11.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez kapsamında, sıcak haddelenmiş I ve H enkesitli çelik basınç elemanlarının 2016'da yürürlüğe girip 2018 yılında güncelleştirilen "Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik" ile Avrupa Çelik Yönetmeliği'ne (EUROCODE 3) göre tasarım ilkeleri karşılaştırılmış, ayrıca ÇYTHYEY ve EC3'e göre hesaplanan eksenel yük taşıma kapasiteleri karşılaştırılarak iki tasarım dokümanının güvenlik seviyeleri kıyaslanmıştır.

Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun olduğum Kocaeli Üniversitesi'ne geldiğim ilk günden bu yana, gerek lisans gerekse yüksek lisans süreçlerimde her türlü desteği gösterip bilgi ve birikimini paylaşan, mesleğimi ve yapısal çelik sektörünü canı gönülden sevmemi sağlayan, aynı zamanda tez danışmanlığımı da yürüten saygıdeğer ve sevgili hocam Doç. Dr. Seval Pınarbaşı Çuhadaroğlu'na yürekten şükranlarımı sunarım.

Yüksek lisans eğitimimin ders aşamasında biz öğrencilerden ilgi ve alakalarını hiçbir zaman eksik etmeyen Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği öğretim üyeleri sayın Doç. Dr. Fuad Okay'a ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Erkan Akpınar'a teşekkür ederim.

Tüm hayatımda olduğu gibi yüksek lisans eğitimimde de maddi ve manevi hiçbir destekten beni mahrum bırakmayan annem Nurten Genç, babam Nedim Genç, kardeşim Barkın Genç ile değerli arkadaşım Simge Özkaraduman' a teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2019 Taylan GENÇ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ viii
ÖZET x
ABSTRACT xi
GİRİŞ 1
1. ÇELİK BASINÇ ELEMANLARININ TEMEL SINIR DURUMLARI 5
1.1. Akma Sınır Durumu 6
1.2. Genel Burkulma Sınır Durumları 7
1.2.1. Eğilmeli burkulma sınır durumu 8
1.2.2. Burulmalı ve eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumları 11
1.3. Yerel Burkulma Sınır Durumları 12
2. ÇYTHYEY'YE GÖRE SICAK HADDELENMİŞ I/H ENKESİTLİ ÇELİK BASINÇ ELEMANLARININ TASARIM İLKELERİ 14
2.1. Temel Tasarım Esasları 15
2.1.1. Yapısal çeliğin malzeme özellikleri 15
2.1.2. Dayanım katsayısı 18
2.1.3. Elemanın izin verilen en büyük narinlik oranı 18
2.2. Karakteristik Eksenel Basınç Kuvveti Dayanımlarının Belirlenmesi 18
2.2.1. Enkesit sınıfının belirlenmesi 18
2.2.2. Narin olmayan enkesite sahip elemanların karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımlarının belirlenmesi 21
2.2.3. Elastik burkulma gerilmelerinin belirlenmesi 22
2.2.3.1. Eğilmeli burkulma sınır durumu 23
2.2.3.2. Burulmalı burkulma sınır durumu 23
2.2.4. Narin enkesitli elemanların karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımlarının belirlenmesi 24
2.3. Tasarım Basınç Kuvveti Dayanımlarının Belirlenmesi 26
3. EC3'E GÖRE SICAK HADDELENMİŞ I/H ENKESİTLİ ÇELİK BASINÇ ELEMANLARININ TASARIM İLKELERİ 27
3.1. Temel Tasarım Esasları 28
3.1.1. Yapısal çeliğin malzeme özellikleri 28
3.1.2. Kısmi katsayılar 30
3.2. Enkesit ve Tasarım Burkulma Dirençlerinin Hesaplanması 31
3.2.1. Enkesit sınıfının belirlenmesi 31
3.2.2. Sınıf 4 enkesite sahip elemanların etkin enkesit alanlarının hesaplanması 34
3.2.3. Tasarım enkesit dirençlerinin belirlenmesi 36
3.2.4. Tasarım burkulma dirençlerinin belirlenmesi 36
3.2.4.1. Boyutsuz narinliklerin hesaplanması 41

4. EKSENEL BASINÇ ETKİSİNDEKİ I VE H ENKESİTLİ ÇELİK HADDE ELEMANLARININ ÇYTHYEY VE EC3'E GÖRE TASARIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI 43
4.1. Malzeme Özelliklerinin Karşılaştırılması 44
4.2. Dayanım Katsayısı İle Kısmi Katsayıların Karşılaştırılması 45
4.3. Tasarım Kapasitelerinin Hesap Adımlarının Karşılaştırılması 46
4.3.1. Enkesit sınıflandırmalarının karşılaştırılması 46
4.3.2. Narin ve Sınıf 4 enkesitli elemanların etkin enkesit alanlarının karşılaştırılması 55
4.3.3. Tasarım kapasitelerinin hesaplanması 59
4.4. Tasarım Kapasitelerinin Karşılaştırılması 60
4.4.1. Tasarım kapasitelerinin burkulma boylarına göre değişimlerinin karşılaştırılması 60
4.4.2. Tasarım kapasitelerinin eleman narinliklerine göre değişimlerinin karşılaştırılması 75
4.5. EC3'e Göre Sınıf 4 Enkesitli Elemanlar İçin Sınıf Değişimi Göz Ardı Edilerek Hesaplanan Tasarım Kapasiteleri Kullanılarak Yapılan Karşılaştırmalar 90
4.5.1. Sınıf değişimi yapılmadan hesaplanan tasarım dirençleriyle yapılarak hesaplanan dirençlerin karşılaştırılması 90
4.5.2. Sınıf değişimi yapılmadan hesaplanan tasarım dirençleriyle ÇYTHYEY'e göre hesaplanan tasarım basınç kuvveti dayanımlarının karşılaştırılması 94
4.6. HEB Enkesitli Elemanların Tasarım Basınç Kuvveti Dayanımları Hesaplanırken Şekil 2.1'de Yer Alan Karakteristik Akma Gerilmeleri Kullanılarak Yapılan Karşılaştırmalar 97
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 100
KAYNAKLAR 104
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 106
ÖZGEÇMİŞ 107

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kompakt enkesitli bir basınç elemanının kapasitesinin eleman boyuyla değişimi 5
Şekil 1.2. I enkesitli hadde profillerde üretim aşamasında oluşan artık gerilmelerin enkesitteki dağılımı 7
Şekil 1.3. Artık gerilmelerin I-enkesitli bir basınç elemanının başlığında oluşan gerilme dağılımına etkisi 7
Şekil 1.4. Eksenel basınç yükü etkisi altındaki bir elemanın eğilmeli burkulma davranışı 8
Şekil 1.5. "İdeal" ve "gerçek" kolon davranışlarının karşılaştırılması 9
Şekil 1.6. Farklı mesnet koşulları için K burkulma boyu katsayıları 10
Şekil 1.7. Burkulma boyları her iki yönde de eşit olan bir elemanın elastik burkulma yükünün burkulma boyuyla değişimi 11
Şekil 1.8. Basınç elemanının (a) burulmalı burkulması (b) eğilmeli-burulmalı burkulması 12
Şekil 1.9. Eksenel basınç etkisindeki (a) H enkesitli bir elemanın başlıklarında oluşan yerel burkulma (b) I enkesitli bir elemanın gövdesinde oluşan yerel burkulma 13
Şekil 2.1. ÇYTHYEY Tablo 2.1A'ya göre, sıcak haddelenmiş yapısal çeliklerin karakteristik akma gerilmeleri (F_y) ile çekme dayanımları (F_u) 16
Şekil 2.2. ÇYTHYEY Tablo 5.1A'da çift simetri eksenli I ve H enkesitli elemanların eksenel basınç altındaki parçaları için sınır narinlik değerleri 20
Şekil 2.3. Basınç elemanlarının narin enkesit parçaları için ÇYTHYEY Tablo 8.2'de verilen etkin genişlik hata düzeltme katsayıları 25
Şekil 3.1. EC3 Tablo 3.1'e göre sıcak haddelenmiş yapısal çeliklerin karakteristik akma ve çekme dayanımları (f_y ve f_u) 29
Şekil 3.2. EC3-1-1'de tanımlanan enkesit sınıflarına sahip elemanların eğilme davranışlarının karşılaştırılması 31
Şekil 3.3. EC3-1-1 Tablo 6.2'de I ve H enkesitli hadde profillerinin burkulma eğrilerinin belirlenebilmesi için verilen tablo 39
Şekil 3.4. Sıcak haddelenmiş I ve H enkesitli çelik yapı elemanları için Snijder ve diğerleri tarafından önerilen burkulma eğrileri 40
Şekil 3.5. EC3-1-1'e göre kusur katsayılarının değerleri 40
Şekil 3.6. EC3-1-1'de verilmiş olan azaltma katsayısı (χ) ve boyutsuz narinliğe ($\bar{\lambda}$) bağlı burkulma eğrileri grafikleri 40
Şekil 4.1. Tezin kapsamında incelenen bütün profillerin ÇYTHYEY ve EC3'e göre başlık ve gövde narinliklerinin karşılaştırılması 48
Şekil 4.2. S355 çelik kalitesine sahip HEA1000 enkesitli bir çelik basınç elemanının ÇYTHYEY ve EC3'e göre (EC3 için EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişimi göz ardı edilerek) hesaplanan etkin düz gövde yüksekliklerinin elemanının burkulma boyuyla değişimi 57

Şekil 4.3. S355 çelik kalitesine sahip HEA1000 enkesitli bir çelik basınç elemanının ÇYTHYEY ve EC3'e göre (EC3 için EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişimi uygulanarak) hesaplanan etkin düz gövde yüksekliklerinin elemanının burkulma boyuyla değişimi 57
Şekil 4.4. Bazı I-enkesitli profillerin kapasite-boy ve kapasite oranı-boy eğrileri 61
Şekil 4.5. Bazı HE-enkesitli profillerin kapasite-boy ve kapasite oranı-boy eğrileri 63
Şekil 4.6. Bazı HD-enkesitli profillerin kapasite-boy ve kapasite oranı-boy eğrileri 62
Şekil 4.7. Tezde incelenen tüm IPE ve IPN enkesitli profillerin direnç/dayanım oranlarının burkulma boyuyla değişimi 70
Şekil 4.8. Tezde incelenen tüm HEA ve HEB enkesitli profillerin direnç/dayanım oranlarının burkulma boyuyla değişimi 71
Şekil 4.9. Tezde incelenen tüm HEM ve HD enkesitli profillerin direnç/dayanım oranlarının burkulma boyuyla değişimi 72
Şekil 4.10. ÇYTHYEY'den elde edilen "boyutsuz kritik gerilme" eğrisinin EC3'te tanımlanan burkulma eğrileriyle karşılaştırılması 76
Şekil 4.11. ÇYTHYEY'ye göre belirlenen "azaltılmış boyutsuz kritik gerilme" eğrilerinin EC3'te tanımlanan burkulma eğrileriyle karşılaştırılması 77
Şekil 4.12. EC3'te tanımlanan üç farklı burkulma eğrisi için elde edilen kapasite azaltma katsayısı oranlarının boyutsuz narinlikle değişimi 78
Şekil 4.13. İki farklı çelik kalitesi için, EC3 ve ÇYTHYEY'de tanımlanan burkulma eğrilerinin L_c/i oranıyla değişimi 79
Şekil 4.14. Dört farklı çelik kalitesi için, EC3'te tanımlanan üç farklı burkulma eğrisi için elde edilen kapasite azaltma katsayısı oranlarının L_c/i oranıyla değişimi 80
Şekil 4.15. Bazı I, HE ve HD enkesitli profillerin kapasite-narinlik ve kapasite oranı-narinlik eğrileri 81
Şekil 4.16. ÇYTHYEY ve EC3'te elastisite modülünün farklı tanımlanmasının kapasite-narinlik ve kapasite oranı-narinlik eğrilerine etkisi 83
Şekil 4.17. Tezde incelenen tüm IPE ve IPN enkesitli profillerin direnç/dayanım oranlarının eleman narinlikleriyle değişimi 85
Şekil 4.18. Tezde incelenen tüm HEA ve HEB enkesitli profillerin direnç/dayanım oranlarının eleman narinlikleriyle değişimi 86
Şekil 4.19. Tezde incelenen tüm HEM ve HD enkesitli profillerin direnç/dayanım oranlarının eleman narinlikleriyle değişimi 87
Şekil 4.20. S355 çelik kaliteli ve HEA1000 enkesili profil için $N_{b,Rd}$ ve $N_{b,Rd}$* değerlerinin narinlikle değişimi 91
Şekil 4.21. S355 çelik kaliteli ve HEA1000 enkesitli profil için $N_{b,Rd}$ / $N_{b,Rd}$* oranının narinlikle değişimi 91
Şekil 4.22. Sınıf 4 enkesitli profillerin tezde incelenen en yüksek çelik sınıfı için $N_{b,Rd}$ / $N_{b,Rd}$* oranlarının narinlikle değişimleri 93

Şekil 4.23. S355 çelik kaliteli ve HEA1000 enkesitli bir basınç elemanında sınıf değişimi yapılarak ve yapılmadan hesaplanan dirençler kullanılarak elde edilen kapasite ve kapasite oranı eğrilerinin karşılaştırılması 95
Şekil 4.24. S355 çelik kaliteli Sınıf 4 enkesitli I ve HE profiller için sınıf değişimi yapılmadan hesaplanan dirençler kullanılarak elde edilen direnç/dayanım oranı eğrileri 95
Şekil 4.25. S460 çelik kaliteli Sınıf 4 enkesitli HD profiller için sınıf değişimi yapılmadan hesaplanan dirençler kullanılarak elde edilen direnç/dayanım oranı eğrileri 96
Şekil 4.26. Başlık kalınlıkları 16 mm'den büyük HEB enkesitli profiller için üç farklı çelik kalitesinde hesaplanan $(\phi_c P_n)^*/(\phi_c P_n)$ oranlarının eleman narinliğine bağlı değişimleri 98

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. TS EN 10025-2'ye göre alaşımsız yapısal çeliklerin karakteristik akma dayanımları (F_y) 17
Tablo 2.2. TS EN 10025-4'e göre kaynaklanabilir ince taneli yapısal çeliklerin karakteristik akma dayanımları (F_y) 17
Tablo 3.1. EN 10025-2'ye göre alaşımsız yapısal çeliklerin karakteristik akma dayanımları (f_y) 29
Tablo 3.2. EN 10025-4'e göre alaşımsız yapısal çeliklerin karakteristik akma dayanımları (f_y) 29
Tablo 4.1. Tez kapsamında incelenen profillerin numaraları 43
Tablo 4.2. Başlıklar için ÇYTHYEY ve EC3'e göre hesaplanan sınır narinlik değerleri 47
Tablo 4.3. Gövde için ÇYTHYEY ve EC3'e göre hesaplanan sınır narinlik değerleri 48
Tablo 4.4. Tezin kapsamında incelenen profil gruplarında ÇYTHYEY ve EC3'e göre hesaplanan en büyük ve en küçük başlık ve gövde narinlikleri 52
Tablo 4.5. ÇYTHYEY'e göre narin, EC3'e göre Sınıf 4 enkesite sahip profiller 53
Tablo 4.6. ÇYTHYEY'e göre narin, EC3'e göre Sınıf 4 enkesite sahip profillerin etkin alanları 58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	:	EC3 için kayıpsız enkesit alanı, (mm^2)
A_c	:	EC3 için enkesitin basınç bölgesinde kalan kayıpsız alanı, (mm^2)
A_e	:	ÇYTHYEY için enkesitin etkin alanı, (mm^2)
A_{eff}	:	EC3 için enkesitin etkin alanı, (mm^2)
A_g	:	ÇYTHYEY için kayıpsız enkesit alanı, (N/mm^2)
b	:	Başlık genişliği, (mm)
$\bar{b}$	:	EC3 için uygun genişlik, (mm)
b_e	:	ÇYTHYEY için etkin genişlik, (mm)
b_e	:	Narin başlıkların etkin enkesit genişliği, (mm)
b_f	:	Başlık genişliği, (mm)
c_f	:	Yarım başlığın düz genişliği, (mm)
c_w	:	EC3 için düz gövde yüksekliği, (mm)
C_w	:	ÇYTHYEY için çarpılma katsayısı, (mm^9)
d	:	ÇYTHYEY için kesit yüksekliği, (mm)
E	:	Yapısal çeliğin elastisite modülü, (N/mm^2)
F_{cr}	:	Kritik burkulma gerilmesi, (N/mm^2)
F_e	:	Elastik burkulma gerilmesi, (N/mm^2)
F_{el}	:	Yerel elastik burkulma gerilmesi, (N/mm^2)
F_{ey}	:	Zayıf eksen etrafındaki elastik eğilmeli burkulma gerilmesi, (N/mm^2)
F_{ez}	:	Burulmalı burkulma sınır durumu için elastik burkulma gerilmesi, (N/mm^2)
F_y	:	ÇYTHYEY için yapı çeliğinin karakteristik akma gerilmesi, (N/mm^2)
f_y	:	EC3 için yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesi, (N/mm^2)
G	:	Yapısal çeliğin kayma modülü, (N/mm^2)
h	:	ÇYTHYEY için düz gövde yüksekliği, (mm)
h	:	EC3 için kesit yüksekliği, (mm)
h_e	:	Narin gövdelerin etkin genişliği, (mm)
I	:	Atalet momenti, (mm^4)
I_T	:	EC3 için burulma sabiti, (mm^6)
I_w	:	EC3 için çarpılma sabiti, (mm^9)
I_x	:	ÇYTHYEY için güçlü eksendeki atalet momenti, (N/mm^2)
I_y	:	ÇYTHYEY için zayıf eksendeki atalet momenti, (N/mm^2)
i	:	Atalet yarıçapı, (mm)
i_y	:	EC3 için güçlü eksendeki atalet yarıçapı, (mm)
i_z	:	EC3 için zayıf eksendeki atalet yarıçapı, (mm)
J	:	ÇYTHYEY için burulma katsayısı, (mm^6)
K	:	Burkulma boyu katsayısı
k_σ	:	Burkulma katsayısı
L	:	Eleman boyu, (m)
L_c	:	ÇYTHYEY için burkulma boyu, (m)
L_{cr}	:	EC3 için burkulma boyu, (m)
M_{el}	:	Elastik moment kapasitesi, (kNm)
M_{pl}	:	Plastik moment kapasitesi, (kNm)

$N_{b,Rd}$: Sınıf değişimi yapılarak hesaplanan tasarım burkulma direnci, (kN)
$N_{b,Rd}$* : Sınıf değişimi yapılmadan hesaplanan tasarım burkulma direnci, (kN)
N_{cr} : İlgili burkulma modu için elemanın kayıpsız enkesit özellikleri kullanılarak hesaplanan kritik elastik kuvvet, (kN)
$N_{c,Rd}$: Enkesit tasarım direnci, (N/mm^2))
$N_{cr,T}$: Elastik burulmalı burkulma kuvveti, (kN)
$N_{cr,TF}$: Elastik eğilmeli-burulmalı burkulma kuvveti, (kN)
P : Eksenel yük taşıma kapasitesi, (kN)
P_n : Karakteristik basınç kuvveti dayanımı, (kN)
r : Eğrilik yarıçapı, (mm)
t : Kalınlık, (mm)
t_f : Başlık kalınlığı, (mm)
t_w : Gövde kalınlığı, (mm)
α : Kusur katsayısı
γ_M : Kısmi katsayı
γ_{M0} : Enkesit sınıfı gözetilmeksizin kesit direnci için kısmi katsayı
γ_{M1} : Ele alınan sınır durumuna göre belirlenen kesit direnci için kısmi katsayı
ε : Yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesine bağlı bir katsayı
$\bar{\lambda}$: Boyutsuz narinlik
λ_f : Başlık narinliği
$\lambda_{f,max}$: Hesaplanan en büyük başlık narinliği
$\lambda_{f,min}$: Hesaplanan en küçük başlık narinliği
λ_r : Narin enkesit parçaları için sınır narinlik
λ_{rf} : Narin başlıklar için sınır narinlik
λ_{rw} : Narin gövdeler için sınır narinlik
$\bar{\lambda}_T$: Burulmalı burkulma sınır durumu için boyutsuz narinlik
λ_w : Gövde narinliği
$\lambda_{w,max}$: Hesaplanan en büyük gövde narinliği
$\lambda_{w,min}$: Hesaplanan en küçük gövde narinliği
ρ : Plak burkulması için azaltma katsayısı
$\sigma_{com,Ed}$: En büyük tasarım basınç gerilmesi, (N/mm^2)
σ_{cr} : Elastik plak burkulma gerilmesi, (N/mm^2)
ϕ_c : ÇYTHYEY'ye göre basınç elemanları için dayanım katsayısı
ϕ_s : Dönme miktarı
χ : İlgili burkulma modu için azaltma katsayısı
ψ : EC3-1-5 Tablo 4.1'e göre belirlenen gerilme oranı

Kısaltmalar

BS : British Standards (İngiliz Standartları)
ÇYTHYEY : Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Yönetmelik
EC3 : Eurocode 3: Design of Steel Structures (Çelik Yapıların Tasarımı)
GKT : Güvenlik Katsayıları ile Tasarım
TS : Türk Standartları
YDKT : Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım

SICAK HADDELENMİŞ I VE H ENKESİTLİ ÇELİK BASINÇ ELEMANLARININ TASARIMLARININ TÜRKİYE VE AVRUPA YÖNETMELİKLERİNE GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Ülkemizde yıllarca çelik yapı tasarımında kullanılmış TS 648 standardı, 2016 yılında yerini daha güncel ve rasyonel bir yönetmelik olan Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik'e bırakmıştır. Geçtiğimiz üç yılda, ülkemizde uygulanan yapısal çelik projelerin pek çoğunda bu yeni yönetmelik kullanılmıştır. Bununla birlikte, özellikle yeni yönetmeliğin yürürlüğe girmesinden önce, ülkemizde ve Avrupa'da uygulanan özel projelerde Avrupa çelik yapı yönetmeliğinin (Eurocode3) de kullanıldığı bilinmektedir. Günümüzde de bazı özel projelerde, Eurocode3'ün kullanımı devam etmektedir. Bu tezin amacı, sıcak haddelenmiş I ve H enkesitli çelik basınç elemanlarının Türkiye ve Avrupa çelik yönetmeliklerinde tanımlanan tasarım esaslarını karşılaştırarak iki yönetmelik arasındaki temel farklılıkları ortaya koymak; ayrıca, ülkemizde yaygın şekilde kullanılan farklı çelik kalitelerine sahip I/H enkesitli çelik profillerin eksenel basınç kapasitelerini her iki yönetmelik esaslarına göre hesaplayarak yönetmeliklerin güvenlik seviyelerini karşılaştırmaktır. Bu amaçla, farklı çelik kalitelerine sahip 153 adet IPE, IPN, HEA, HEB, HEM ve HD profilin farklı burkulma boyları/narinlikleri için tasarım basınç kuvveti dayanımları ile tasarım burkulma dirençleri hesaplanmış; incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için direnç/dayanım (kapasite) oranları belirlenmiştir. Kapasite oranlarının, I ve HE enkesitli profillerde 0,90 ile 1,19, HD profillerde ise 0,89 ile 1,24 arasında değiştiği tespit edilmiştir. S235, S275 veya S355 çelik kalitesine sahip tüm I ve "büyük" enkesitli HE profiller ile S460 çelik kaliteli bütün HD profillerin kapasite hesaplarında hemen hemen bütün burkulma boylarında, diğer enkesit ve çelik kaliteleri için yapılan hesaplarda ise "kısa" ve "uzun" burkulma boylarında yönetmeliğimizin güvenlik seviyesinin daha yüksek olduğu; "orta" boy elemanlarda ise Avrupa yönetmeliğinin %10'u geçmeyecek şekilde daha güvenli sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (ÇYTHYEY), Eurocode 3 (EC3), I veya H Enkesitli Hadde Profil, Tasarım Basınç Kuvveti Dayanımı, Tasarım Burkulma Direnci.

COMPARISON OF DESIGN GUIDELINES FOR HOT-ROLLED I AND H-SHAPED STEEL COMPRESSION MEMBERS ACCORDING TO TURKISH AND EUROPEAN SPECIFICATIONS

ABSTRACT

Having been used in structural steel design for many years in our country, TS 648 standard was replaced in 2016 by a more up-to-date and rational specification named as Specification of Design and Construction of Steel Structures. Since then, many structural steel projects have been completed in Turkey using this new specification. European structural steel specification (Eurocode 3, EC3) has also been used and continues to be used in the design of special steel structures constructed in Turkey and Europe. The main objective of the thesis is to identify the major differences between these two steel design specifications as far as the design guidelines for rolled I/H-shaped steel compression members are concerned and to compare their safety levels for cross sections and steel grades widely used in our country. For this purpose, the design compressive strengths and design buckling resistances of steel members with 153 different IPE, IPN, HEA, HEB, HEM and HD sections and various steel grades have been calculated using Turkish and European specifications, respectively. Then, resistance/strength (capacity) ratios have been computed for all studied shapes and steel grades. It has been found that the capacity ratios vary between 0.90 and 1.19 for I and HE-shaped members and 0.89 and 1.24 for HD-shaped members. It is concluded that, for all studied sections and steel grades and for many buckling lengths, the safety level of Turkish specification is higher than the European specification. It is also found that the design compressive strengths exceed design buckling resistances at most 10%.

Keywords: Specification of Design and Construction of Steel Structures (SDCSS), Eurocode 3 (EC3), Hot-rolled I or H Shaped Members, Design Compressive Strength, Design Buckling Resistance.

GİRİŞ

Çelik basınç elemanları, eksenleri boyunca yalnızca eksenel basınç kuvveti taşıyan çelik yapı elemanlarıdır. Çaprazlı çerçevelerin kolonları, kafes sistemlerin basınca çalışan elemanları ve merkezi veya dış merkez çelik çaprazlı çerçevelerin çaprazları ülkemizde ve dünyada yaygın şekilde kullanılan çelik yapı sistemlerindeki tipik basınç elemanlarındandır. Bina tipi yapıların düşey yük taşıma sisteminin temel elemanlarından olan kolonlar, yapıda bulunan belki de en önemli basınç elemanlarıdır. Çünkü kolonlarda görülecek olası bir gevrek göçme modu, yapıda oluşacak hasarın beklenenin çok üzerinde olmasına, hatta yapının kararlılığını kaybetmesine neden olabilir. Bu nedenle kolonların tasarımı, diğer yapı elemanları gibi, olası tüm gevrek ve sünek göçme modları göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.

Kısa boylu kompakt enkesitli bir çelik basınç elemanının yük taşıma kapasitesi, akma yüküne eşit alınabilir. Buna karşın, boyu uzun ve/veya enkesiti narin olan bir çelik yapı elemanın basınç davranışını çoğu zaman burkulma belirler. Kompakt enkesitli basınç elemanları; burulurak, eğilerek veya eğilerek ve burularak burkulabilirler. Bu tür elemanların davranışını belirleyen genel burkulma modu enkesitin şekline bağlıdır. I veya H enkesitli elemanlarda, enkesitin kayma merkezi geometrik merkeziyle çakıştığı için, ya eğilmeli ya da burulmalı burkulma gözlenir. Narin enkesitli çelik basınç elemanlarında gözlenebilecek diğer bir burkulma modu elemanı oluşturan enkesit parçalarının burkulmasıdır. Yerel burkulma, narin enkesitli bir elemanın yük taşıma kapasitesini azaltacağından tasarımda mutlaka dikkate alınmalıdır.

Ülkemizde 1980 yılından 2016 yılına kadar çelik yapı tasarımında kullanılan "TS 648: Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları [1]" isimli tasarım standardı, kullanımda kaldığı süreçte teknoloji ve mühendislik dünyasındaki gelişmeler doğrultusunda güncellenmediğinden, pek çok modern yönetmeliğin gerisinde kalmıştır. TS 648, tasarımcılara sadece emniyet gerilmelerine göre tasarım yöntemini sunan bir standarttır ve bu yöntem ile çoğu zaman ekonomik olmayan tasarımlar elde edilmektedir. Ayrıca çelik basınç elemanları için tanımlanan olası tüm göçme modlarının TS 648 içerisinde yer almaması, bu standarda göre tasarlanan bir

elemanının yük taşıma kapasitesi açısından değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Örneğin güncel çelik yapı yönetmeliklerinde, çelik basınç elemanlarının tasarımında yerel burkulma göçme modunun tasarıma dahil edilebilmesi amacıyla yapılan enkesit sınıflandırması, TS 648'de yer almamaktadır. Dolayısıyla TS 648'e göre yapılan yük taşıma kapasitesi hesaplamalarında, yerel burkulma davranışı dikkate alınmadan, tüm çelik basınç elemanlarının kayıpsız enkesit alanı kullanılmaktadır. Fakat enkesitini oluşturan parçalar içerisinde en az bir "narin" parça bulunan çelik basınç elemanlarının yük taşıma kapasiteleri belirlenirken, diğer güncel yönetmeliklerde olduğu gibi yerel burkulma sınır durumunun dikkate alınabilmesi amacıyla belirli tasarım kuralları çerçevesinde enkesitin etkin alan hesabı yapılmalıdır.

2016 yılında yürürlüğe giren "Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (ÇYTHYEY) [2]" ile birlikte Türkiye'de de çelik yapı tasarımında, çoğu durumda daha ekonomik, daha gerçekçi ve daha güvenli tasarımlar sunan sınır durumlara göre tasarım yöntemine geçilmiştir. ÇYTHYEY kullanıldığında, basınç elemanlarında görülebilecek tüm sınır durumları tasarıma dahil edilebilmektedir. ÇYTHYEY'de tasarımcıya, ikisi de sınır durumlara göre tasarım felsefesine dayanan "Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım" (YDKT) ve "Güvenlik Katsayıları ile Tasarım" (GKT) yöntemleriyle tasarım imkanı sunulmuştur. Hangi yöntemin kullanılacağı, tasarımcının seçimine bırakılmıştır. Bu tezde ÇYTHYEY'ye göre yapılan tüm hesaplama ve değerlendirmelerde YDKT yöntemi göz önünde bulundurulmuştur. ÇYTHYEY'nin ilk baskısında yapılan bazı hatalar ve yazım yanlışları geçtiğimiz yıl düzeltilerek yönetmelik güncellenmiştir. Bu tez kapsamında, ÇYTHYEY'nin güncel baskısı [3] kullanılmıştır.

Eurocode 3: Çelik Yapıların Tasarımı (Design of Steel Structures) [4,5] ise Avrupa'da uzun süredir kullanılan, sınır durumlara göre tasarım yöntemini temel alan, her sınır durumu için detaylı tasarım kuralları içeren bir tasarım yönetmeliği olması nedeniyle çoğu ülkede kabul görmüştür. Özellikle ÇYTHYEY'nin yürürlüğe girmesinden önce, ülkemizde ve Avrupa'da inşa edilen birçok nitelikli çelik yapının tasarımında Eurocode 3'ün kullanıldığı bilinmektedir. Eurocode 3 (EC3), günümüzde de özellikle özel projelerde ülkemizde kullanılmaya devam etmektedir. EC3'te tanımlanan tasarım yöntemiyle ÇYTHYEY'de tanımlanan YDKT yönteminin tasarım felsefeleri oldukça benzer olmakla birlikte, iki yönetmeliğin tasarım esasları arasında dikkat çekici

farklılıklar vardır. Tasarımlarında her iki yönetmeliği de kullanan bir mühendisin, yönetmeliklerdeki temel farkları bilmesi daha bilinçli, daha ekonomik ve daha güvenli tasarımlar yapmasını sağlayacaktır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların iki temel amacı vardır. Birincisi, sıcak haddelenmiş I ve H enkesitli çelik yapı elemanları için ÇYTHYEY ve EC3'te tanımlanan tasarım esaslarını karşılaştırarak iki yönetmelik arasındaki temel farklılıkları ortaya koymaktır. İkincisi ise ülkemizde yaygın şekilde kullanılan farklı çelik kalitelerine sahip I ve H enkesitli çelik profillerin eksenel basınç kapasitelerini her iki yönetmelik esaslarına göre hesaplayarak yönetmeliklerin güvenlik seviyelerini karşılaştırmaktır. Ayrıca, tezde, ÇYTHYEY veya EC3'ten herhangi birini kullanan bir tasarımcının, elde ettiği eksenel basınç kapasitesinin diğer yönetmeliğe göre yeterli olup olmadığını, çalışmada hesaplanan kapasite oranlarını kullanarak ve ilave hesap yapmadan kolaylıkla belirlemesini sağlamak hedeflenmiştir.

Bu amaçla, tezin ilk bölümünde, eksenel basınç yükü etkisindeki çelik yapı elemanlarının davranışlarını belirleyen sınır durumlar özetlendikten sonra, ikinci ve üçüncü bölümde, basınç elemanlarının tasarımı için Türkiye ve Avrupa yönetmeliklerinde tanımlanan tasarım esasları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Tezin dördüncü bölümünde ise ilk olarak iki yönetmeliğin tasarım esaslarındaki temel farklılıklar listelenmiş, ardından ülkemizde yaygın şekilde kullanılan ve farklı çelik kalitelerine sahip I ve H enkesitli hadde profillerinin, farklı boy ve narinliklerdeki tasarım basınç kuvveti dayanımları ile tasarım burkulma dirençleri hesaplanmıştır. Bu bölümde, her enkesit grubundan seçilen belirli elemanlarda, dayanım ve dirençlerin eleman boy ve narinlikleriyle değişimlerini gösteren tipik grafikler sunulmuştur. İki yönetmeliğin güvenlik seviyelerini daha kolay kıyaslayabilmek amacıyla, EC3'e göre hesaplanan dirençler, ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan dayanımlara bölünerek direnç/dayanım (kapasite) oranları elde edilmiştir. Bu şekilde hesaplanan kapasite oranları hem boya hem de narinliğe göre çizdirlerek, incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için hangi yönetmeliğin hangi burkulma boylarında/narinliklerde daha güvenli sonuçlar verdiği ve kapasiteler arasındaki farkın hangi seviyelerde olduğu tespit edilmiştir.

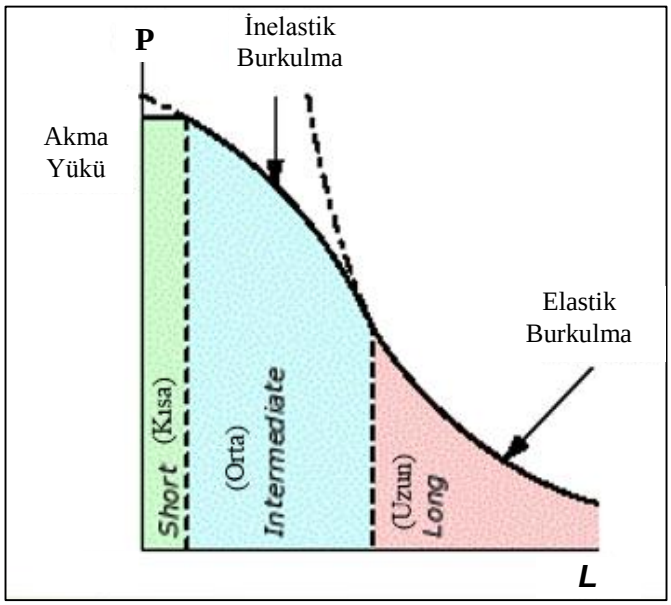
Kapasite hesapları, 18 adedi IPE, 21 adedi IPN olmak üzere toplam 39 I enkesitli profil, 24'er adedi HEA, HEB ve HEM ve 42 adedi HD olmak üzere toplam 114 adet H enkesitli profil için yapılmıştır. Eleman kapasiteleri; IPE, IPN, HEA, HEB ve HEM enkesitli profiller için S235, S275 ve S355; HD enkesitli profiller için ise S275, S355 ve S460 yapısal çelik kaliteleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ayrıca, tezin kapsamında yapılan bütün hesaplarda, genel burkulma modlarının tamamında, burkulma boyları, eleman boylarına eşit alınmıştır.

.

1. ÇELİK BASINÇ ELEMANLARININ TEMEL SINIR DURUMLARI

Çelik basınç elemanları, eksenel basınç yükü etkisindeki çelik yapı elemanlarıdır. Bu tür elemanlar akma yüküne, ancak ve ancak boyları yeterince kısa, kesitleri de yeterince kompaktsa ulaşabilirler. Buna karşın, çoğu orta-boy ve uzun çelik yapı elemanı, akma yüküne ulaşmadan çok önce kararlılığını kaybedip, düzlem dışına eğilerek ve/veya bulunduğu düzlemde burularak burkulur. Bununla birlikte, ince cidarlı, yani narin enkesitli bir çelik basınç elemanı, 'genel' burkulma yükünden çok daha küçük yüklerde, elemanı oluşturan parçaların 'yerel' burkulması nedeniyle de yük taşıma kapasitesini kaybedebilir. Diğer bir deyişle, burkulma basınç etkisindeki çelik yapı elemanlarının davranışını belirleyen temel sınır durumlardan biridir.

Şekil 1.1'de kompakt enkesitli bir çelik basınç elemanının eksenel yük taşıma kapasitesinin (P) elemanın boyuyla (L) değişimi gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, elemanın davranışını belirleyen sınır durum (akma, inelastik burkulma veya elastik burkulma), doğrudan elemanın boyuna bağlıdır.



Şekil 1.1. Kompakt enkesitli bir basınç elemanının kapasitesinin elemanın boyuyla değişimi [6]

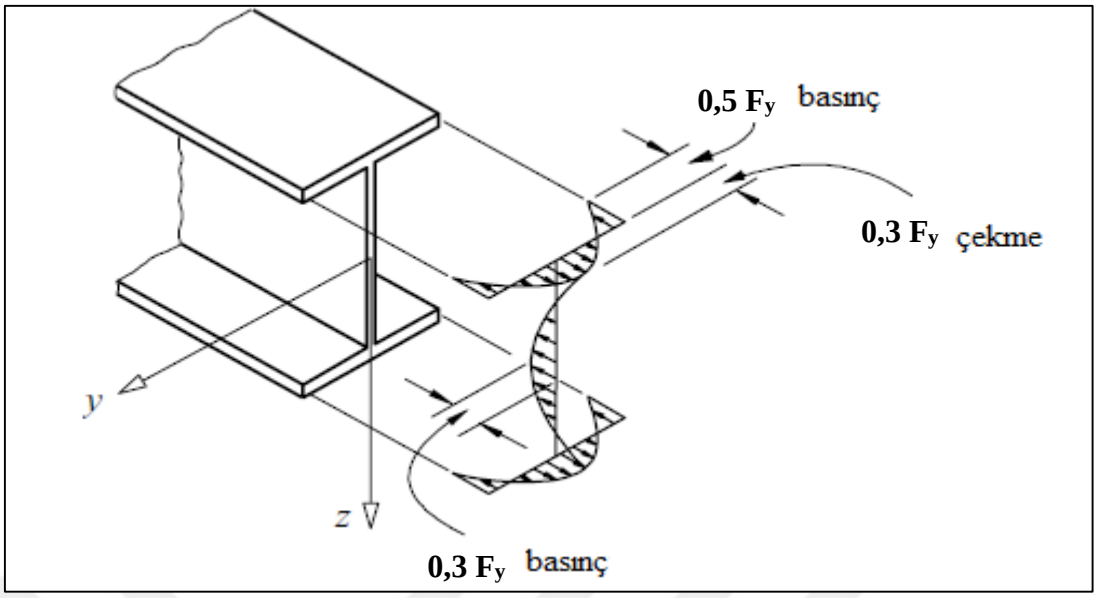
Kısa (ve kompakt enkesite sahip) elemanlarda, davranışı kontrol eden sınır durum akma iken; elemanın boyu uzadıkça (veya elemanın enkesitini oluşturan parçaların narinlikleri arttıkça) burkulma sınır durumları davranışı kontrol etmeye başlar (Şekil 1.1).

Çoğu zaman, düşey yük taşıyıcı sistemin temel elemanlarından olan kolonlar, diğer yapısal elemanlarla (döşeme, kiriş vb.) etkileşim halinde olmaları nedeniyle, servis yükleri altında yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek şekil ve yer değiştirmeleri sınırlandırmak amacıyla kullanılabilirlik sınır durumları da göz önünde bulundurularak tasarlanır. Bu tezde, çift simetri eksenli I ve H kesitli çelik basınç elemanlarının yalnız dayanım sınır durumlarına göre tasarımı dikkate alınmış olduğundan, bu bölümde yalnız dayanım sınır durumları özetlenecektir.

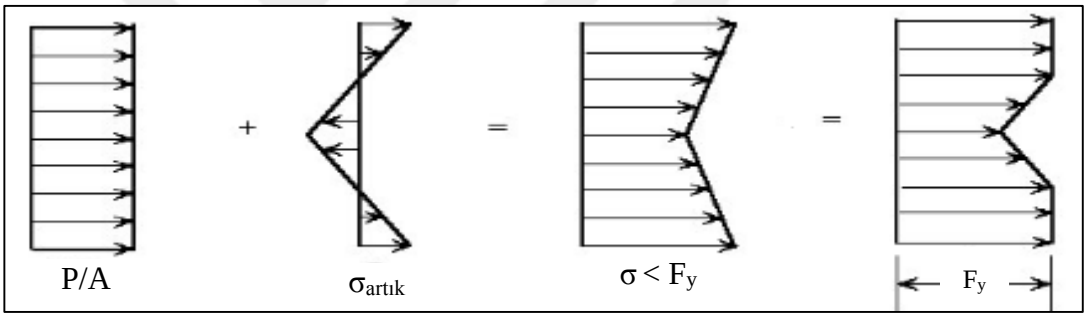
1.1. Akma Sınır Durumu

Boyu yeterince kısa olan ve kompakt kesite sahip bir çelik basınç elemanının yük taşıma kapasitesi enkesitin akma yükü P_y'ye eşittir (Şekil 1.1). Eksenel basınç kuvveti etkisindeki bir çelik yapı elemanının akma yüküne ulaşabilmesi için, elemanın tamamı akmadan önce elemanda veya elemanı oluşturan enkesit parçalarının herhangi birinde burkulma gözlenmemelidir.

Üretiminde artık gerilmelerin oluşmadığı kabul edilen bir çelik yapı elemanı, eksenel basınç yükü altında akma sınır durumuna, elemandaki liflerin tamamının aynı anda akmasıyla ulaşır. Artık gerilmeler, üretim esnasında elemanın bütün parçalarının aynı hızla soğumaması nedeniyle veya elemana uygulanan kesme, delme, ters sehim verilmesi gibi işlemler sonucunda elemanda oluşan gerilmelerdir. Şekil 1.2'de gösterildiği gibi, I enkesitli bir çelik yapı elemanında, elemanı oluşturan parçaların aynı anda soğumaması nedeniyle, başlık uçlarıyla gövdenin ortasında artık basınç gerilmeleri, başlık-gövde birleşimlerinde ise artık çekme gerilmeleri oluşur. Şekilden de görülebileceği gibi, bu tür elemanların tasarımında artık gerilmelerin etkisi göz ardı edilmemelidir, çünkü artık gerilmeler nedeniyle oluşan gerilmeler çeliğin karakteristik akma gerilmesi F_y'nin %50'lerine kadar ulaşabilmektedir. Şekil 1.3'te, I-enkesitli bir basınç elemanında oluşan artık gerilmelerin kesitteki 'gerçek' gerilme dağılımına etkisi gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, artık gerilmeler nedeniyle kesitte akma, akma yükünden daha küçük yüklerde başlayacaktır.



Şekil 1.2. I-enkesitli hadde profillerde üretim aşamasında oluşan artık gerilmelerin enkesitteki dağılımı [7]



Şekil 1.3. Artık gerilmelerin I-enkesitli bir basınç elemanının başlığında oluşan gerilme dağılımına etkisi [6]

Bununla birlikte, artık gerilmeler burkulma tehlikesi olmayan basınç elemanlarının yük taşıma kapasitesini azaltmaz; çünkü akma bazı liflerde daha erken başlasa bile, eleman basınç kapasitesine tüm lifler aktığında ulaşır. Buna karşın, akmanın gözlenmesiyle birlikte elemanın eksenel rijitliği azalmaya başlar. Akmanın enkesitte yayılmasıyla da, rijitlikteki düşüş artacağından, bu durum tasarımda mutlaka dikkate alınmalıdır.

1.2. Genel Burkulma Sınır Durumları

Burkulma, kritik yüküne ulaşan çelik bir basınç elemanının kararlılığını ani bir şekilde kaybederek büyük şekil değiştirmeler yapmasıdır. Başka bir deyişle, burkulma bir stabilite problemidir ve çelik bir basınç elemanının tasarımında dikkate alınması

gereken belki de en önemli sınır durum olarak göze çarpar; zira, bir basınç elemanı çoğu durumda akma dayanımına ulaşamadan burkulma sınır durumuna ulaşır.

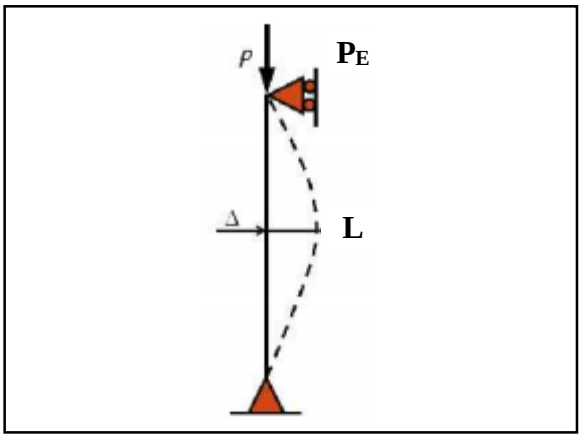
Burkulma sınır durumları temel olarak iki ana başlık altında toplanabilir. Bunlardan birincisi genel burkulma (eleman burkulması), ikincisi ise yerel burkulmadır (parça burkulması). En genel haliyle, üç çeşit eleman burkulması vardır; eğilmeli, burulmalı ve eğilmeli burulmalı burkulma.

1.2.1. Eğilmeli burkulma sınır durumu

Eksenel basınç yükü altındaki bir elemanın elastik eğilmeli burkulma yükünün (Şekil 1.4) hesaplanmasıyla ilgili ilk kayda değer çalışma 1744 yılında Leonhard Euler tarafından yürütülmüştür. Euler'in elastik burkulma yükü P_E;

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \tag{1.1}$$

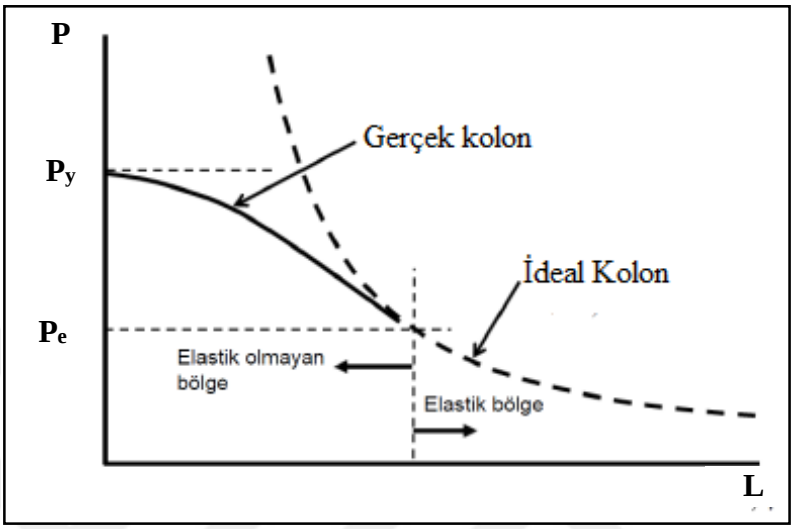
olarak ifade edilebilir. Denklem (1.1)'de, L elemanın boyu, E malzemenin elastisite modülü, I ise enkesitin zayıf eksene göre atalet momentidir. Denklem (1.1)'den de anlaşılacağı gibi, bir çelik basınç elemanının elastik burkulma yükü, yapısal çeliğin akma dayanımından bağımsızdır.



Şekil 1.4 Eksenel basınç yükü etkisindeki bir elemanın eğilmeli burkulma davranışı [8]

Denklem (1.1) pek çok kabule dayanmaktadır. Bu kabuller arasında belki de en önemlileri, elemanda artık gerilmelerin ve başlangıç eğriliğinin olmadığı, yükte dışmerkezlik bulunmadığı ve elemanın uçlarının mafsallı olduğu kabulleridir. Ancak,

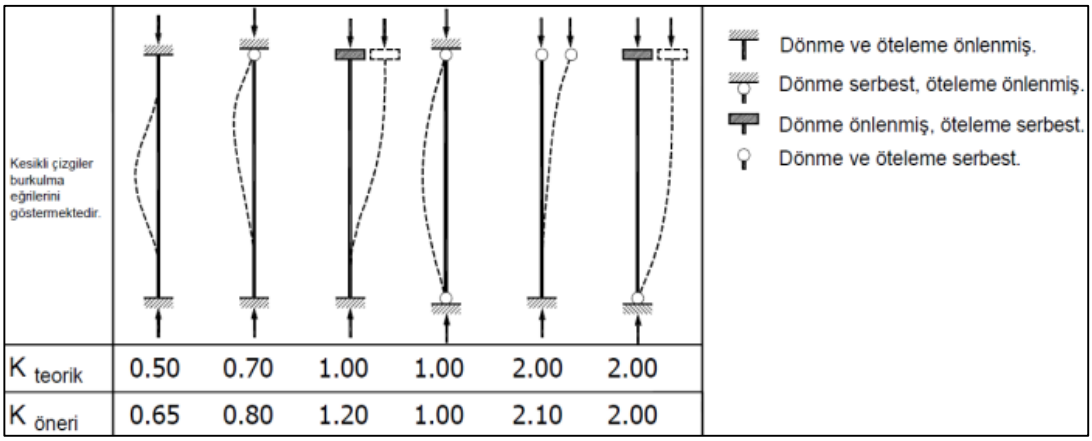
bu kabullerin çoğunun ‘gerçek’ basınç elemanları için geçerli olmadığı bilinmektedir. Şekil 1.5’te, deneysel çalışmalardan elde edilen ‘gerçek’ kolon eğrisinin, Euler’in ‘ideal’ kolon eğrisinden elemanın boyu azaldıkça uzaklaştığı görülmektedir. Bunun en önemli nedeninin, artık gerilmeler olduğu bilinmektedir.



Şekil 1.5. “İdeal” ve “gerçek” kolon davranışlarının karşılaştırılması [9]

Artık gerilmelerin etkisiyle kolonda akma gerçekleştiği andan itibaren eleman inelastik (elastik olmayan) bölgeye geçmektedir. Bu bölgede gerilme (σ) ile birim şekil değiştirme (ε) artık orantılı olmadığından, yani Hooke yasası ($\sigma=E\varepsilon$) geçerliliğini kaybettiğinden, elemanın elastisite modülü sabit değildir. Bu sebeple, Denklem (1.1)’in sabit elastisite modülüyle kullanıldığı durumlarda, hata oranları elastik olmayan bölgede burkulan bir kolon için kabul edilemeyecek seviyelere ulaşmaktadır. Yönetmeliklerde elastik olmayan bölgede burkulan kolonların yük taşıma kapasitelerinin hesabı için deneysel verilere dayanan ampirik denklemler sunulmaktadır.

Yapılan araştırmalar, Euler’in elastik eğilmeli burkulma formülünün, sadece iki ucu mafsallı basınç elemanları için değil, farklı sınır koşullarına sahip elemanlar için de kullanılabileceğini, ancak, bu tür durumlarda, formülde eleman boyu L yerine etkin burkulma boyu L_c’nin kullanılması gerektiğini ortaya koymuştur. Elemanın eğilmeli burkulmada etkin burkulma boyu, gerçek boyu ile burkulma boyu katsayısı (K) çarpılarak hesaplanır ($L_c=KL$). Şekil 1.6’da, farklı mesnet koşulları için belirlenen K değerleri verilmektedir.



K_{teorik}	0.50	0.70	1.00	1.00	2.00	2.00
$K_{öneri}$	0.65	0.80	1.20	1.00	2.10	2.00

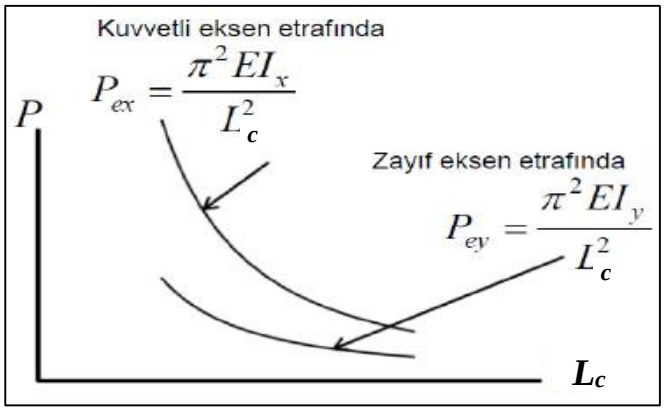
Şekil 1.6. Farklı mesnet koşulları için K burkulma boyu katsayıları [9]

Şekil 1.6'da verilen sınır koşullar çoğu zaman 'ideal' mesnet koşulları olup, 'gerçek' koşullara sahip çerçeve kolonları için K değerleri, ÇYTHYEY Bölüm 6.4.3'te tanımlanan formüller veya nomogramlar kullanılarak hesaplanabilir. Bu tezde K=1 kabul edilmiş, elemanların burkulma boyları gerçek boylarına eşit alınmıştır.

Euler'in formülünde, L yerine L_c kullanıldığında, farklı mesnet ve/veya ara destek koşullarına sahip bir basınç elemanının elastik burkulma yükü P_{cr} için Denklem (1.2)'de verilen formül yazılabilir;

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_c^{\,2}} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \tag{1.2}$$

Farklı sınır koşullarına sahip olması nedeniyle iki asal eksen etrafında eğilmeli burkulma sınır durumunda burkulma boyları farklı olan bir basınç elemanının hangi düzlemde burkulacağı baştan öngörülemeyebilir. Bu durumda, hesaplar her iki asal eksen için de ayrı ayrı yapılmalıdır. Ancak, bu tezde kabul edildiği gibi, burkulma boyları her iki asal eksende de aynıysa, elemanın davranışını kontrol eden eğilmeli burkulma sınır durumu, Şekil 1.7'de gösterildiği gibi, zayıf eksen etrafında eğilmeli burkulma olacaktır. Bu durumda, güçlü eksen etrafında eğilmeli burkulma için hesap yapmaya gerek yoktur.



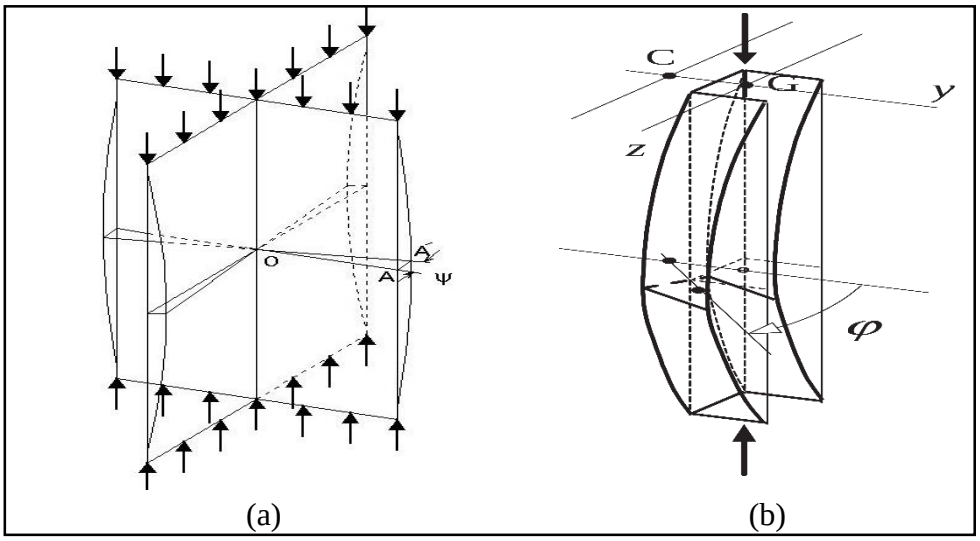
Şekil 1.7. Burkulma boyları her iki yönde eşit olan bir elemanın elastik burkulma yükünün burkulma boyuyla değişimi [9]

1.2.2. Burulmalı ve eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumları

Çoğu basınç elemanının yük taşıma kapasitesi belirlenirken, eğilmeli burkulma sınır durumlarının yanı sıra burulmalı veya eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumları da kontrol edilmelidir.

Burulmalı burkulma, kayma merkeziyle geometrik merkezi çakışan basınç elemanlarında gözlenen sınır durumlardan biridir. Şekil 1.8(a)'da gösterildiği gibi, burulmalı burkulma sınır durumunda eleman enkesitine dik eksen etrafında burularak burkulur. Bu tür elemanlarda, eğilmeli burulmalı burkulma gözlenmez. Diğer bir deyişle, elemanın genel burkulma davranışını ya eğilmeli burkulma ya da burulmalı burkulma belirler. Çift simetri eksenli açık enkesite sahip, burulma rijitliği düşük basınç elemanlarında burulmalı burkulma sınır durumu mutlaka kontrol edilmelidir. Tezin kapsamında incelenen I-enkesitli hadde profiller de bu gruba girdiğinden, profillerin basınç davranışı incelenirken bu sınır durum dikkate alınmıştır.

Eğilmeli burulmalı burkulma ise kayma merkeziyle geometrik merkezi çakışmayan, enkesitinde tek simetri ekseni bulunan ya da hiç simetri ekseni bulunmayan elemanlarda gözlenebilir. Şekil 1.8(b)'de gösterildiği gibi, eğilmeli burulmalı burkulmada, yük enkesitin kayma merkezinden geçmediğinden, eleman eğilerek burkulurken aynı zamanda burulur. Tezin kapsamında incelenen profillerin tamamı çift simetri eksenine sahip olduğundan, profillerin basınç kapasiteleri hesaplanırken bu sınır durum dikkate alınmamıştır.

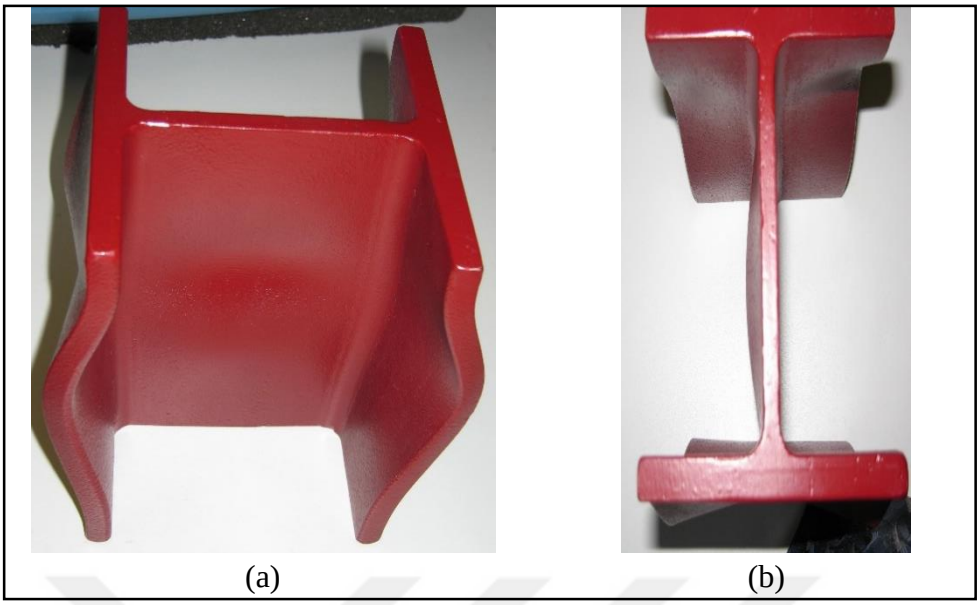


Şekil 1.8. Basınç elemanının (a) burulmalı [10] (b) eğilmeli burulmalı [7] burkulması

1.3. Yerel Burkulma Sınır Durumları

Yerel burkulma sınır durumu, çelik yapı elemanlarını oluşturan parçalarda gözlenen bir burkulma sınır durumudur. Elemanı oluşturan parçalardan en az birinin genişlik/kalınlık oranı (narinliği) belirli bir sınır değerden daha büyükse, o eleman yerel burkulma sınır durumuna, genel burkulma ya da akma sınır durumundan önce ulaşacaktır. Elemanın narin enkesit parçası içerip içermediği belirlenirken kullanılan sınır narinlikler tasarım yönetmeliklerinde tanımlanmaktadır. Yönetmelikler, çoğu zaman, narin enkesitli elemanların kullanılmasını yasaklamazlar. Buna karşın, bu tür elemanların dayanım hesaplarında enkesit alanının azaltılmasını ve etkin enkesit alanı hesabı yapılmasını isterler.

Şekil 1.9(a)'da eksenel basınç kuvveti etkisindeki H-enkesitli bir hadde profilinin başlıklarında gözlenen yerel burkulma (yerel başlık burkulması) gösterilmektedir. Şekil 1.9(b)'de ise nispeten dar başlıklı ama narin gövdeli I-enkesitli bir basınç elemanın gövdesinde gözlenen yerel burkulma (yerel gövde burkulması) gösterilmektedir. Her iki durumda da eleman boyunun kısa olması nedeniyle yerel burkulmanın genel burkulmadan önce gözlendiği fark edilebilir.



Şekil 1.9. Eksenel basınç etkisindeki (a) H enkesitli bir elemanın başlıklarında oluşan yerel burkulma [11] (b) I enkesitli bir elemanın gövdesinde oluşan yerel burkulma [12]

2. ÇYTHYEY'YE GÖRE SICAK HADDELENMİŞ I/H ENKESİTLİ ÇELİK BASINÇ ELEMANLARININ TASARIM İLKELERİ

Çelik yapılar, tüm dünyada olduğu gibi, ülkemizde de zaman geçtikçe daha fazla önem kazanmakta, geçmişe oranla daha fazla tercih edilmektedir. Üç yıl öncesine kadar, yapısal çelik sektörünün ülkemizde hızını kesen belki de en önemli etken, 1980 yılında yürürlüğe giren, fakat teknoloji, malzeme, literatür ve uygulamadaki gelişmeler ışığında belirli zamanlarda güncellenmediği için çoğu modern çelik tasarım yönetmeliğinin gerisinde kalmış olan Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları (TS 648) [1] başlıklı tasarım standardıdır. Hemen hemen tüm dünyada çoğu zaman daha ekonomik ve daha rasyonel tasarımlar sunan sınır durumlara göre tasarım yöntemlerine geçilirken, ülkemizde tam 36 yıl boyunca çelik yapı tasarımında Emniyet Gerilmelerine göre Tasarım (EGT) yöntemi kullanılmaya devam edilmiştir. EGT yönteminde, elemanlarda oluşan en büyük gerilmelerin, emniyet katsayılarına bölünerek azaltılan malzeme dayanımlarını (yani, emniyet gerilmelerini) aşmaması hedeflenir. Bu yöntemde tasarım, 'servis' yüklerine göre yapıldığından, yapıya etkiyen yüklerdeki belirsizlikler tasarımda dikkate alınmaz. Ayrıca, bu yöntemde, elemanların elastik ötesi veya plastik davranışları ile gerçek taşıma güçleri de çoğu zaman göz ardı edilir. 2016 yılında yayınlanarak yürürlüğe giren ve 2018 yılında güncellenen, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (ÇYTHYEY) [3] ile birlikte ülkemizde de daha rasyonel ve çoğu durumda daha ekonomik tasarımlara imkan sunan taşıma gücü yöntemine geçilmiştir.

ÇYTHYEY'de, her ikisi de sınır durumlar felsefesine dayanan iki tasarım yöntemi tanımlanmıştır; Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT) yöntemi ve Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) yöntemi. Her ne kadar bu yılın başında yürürlüğe giren deprem yönetmeliğimiz [13] bazı özel durumlarda (örnek olarak, temelllerin tasarımında) yalnız YDKT yönteminin kullanılmasına izin veriyorsa olsa da, en genel haliyle ÇYTHYEY yöntem seçimini tasarımcıya bırakmaktadır. Çoğu durumda, elemanların karakteristik dayanımları her iki yöntem için de aynıdır. Yöntemleri birbirinden ayıran temel fark, 'gerekli' dayanım hesabıdır. Gerekli dayanım, YDKT

yönteminde arttırılmış kesit zorları, GKT yönteminde ise arttırılmamış kesit zorları kullanılarak hesaplanmaktadır. YDKT yöntemi arttırılmış kesit zorlarıyla, "tasarım basınç kuvveti dayanımını" karşılaştırırken, GKT yöntemi "güvenli dayanımı" arttırılmamış kesit zorlarıyla kıyaslamaktadır.

Bu tezde, ÇYTHYEY ile EC3 karşılaştırılacağından ve EC3'te yalnız YDKT'ye benzer 'taşıma gücüne göre tasarım' yöntemi tanımlandığından, eleman kapasiteleri YDKT yöntemi kullanılarak hesaplanacaktır.

ÇYTHYEY'de, eksenel basınç kuvveti etkisi altındaki çelik basınç elemanlarının tasarım kuralları Bölüm 8'de tanımlanmaktadır. Tezin bu bölümünde, sıcak haddelenmiş I ve H enkesitlere sahip basınç elemanlarının tasarım basınç kuvveti dayanımlarının hesaplanması için ÇYTHYEY'de tanımlanan kurallar ve tasarım denklemleri sunulacaktır.

2.1. Temel Tasarım Esasları

ÇYTHYEY Bölüm 8.1'e göre, bir çelik yapı elemanının "karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı" (P_n), olası her bir sınır durum için ayrı ayrı hesaplanıp, elde edilen dayanımlardan en küçüğü alınarak belirlenmelidir. Sıcak haddelenmiş I ve H enkesitli çelik basınç elemanlarının tasarım esasları, eleman narin enkesit parçası içermiyorsa Bölüm 8.2'de, içeriyorsa Bölüm 8.5'te verilmektedir.

2.1.1. Yapısal çeliğin malzeme özellikleri

Ülkemizde yaygın şekilde kullanılan yapısal çelik malzemelerin karakteristik akma gerilmeleri F_y ile çekme dayanımları F_u, ÇYTHYEY Tablo 2.1A ve Tablo 2.1B'de sunulmuştur. ÇYTHYEY, Tablo 2.1A'da sunulan değerler "TS EN 10025'e uygun şekilde sıcak haddelenerek üretilmiş çelik profil ve levhalar" için, Tablo 2.1B'de sunulan değerler ise "EN 10210 ve EN10219'a uygun olarak üretilen yapısal boru ve kutu enkesitli elemanlar" için geçerlidir [3]. Şekil 1.1'de, ÇYTHYEY Tablo 2.1A'dan alıntı yapılmıştır.

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

Şekil 2.1. ÇYTHYEY Tablo 2.1A'ya göre, sıcak haddelenmiş yapısal çeliklerin karakteristik akma gerilmeleri (F_y) ile çekme dayanımları (F_u) [3]

Ülkemize ve dünyadaki pek çok ülkeye çelik profil temin eden bir firmanın ürün kataloğunda [14], I ve H enkesitli hadde profillerin, TS EN 10025-2 [15]'de "alaşımsız yapısal çelik" (non-alloy structural steel) olarak isimlendirilen S235, S275, S355 ve S450 çelik kalitelerinde ve TS EN 10025-4 [16]'te "kaynaklanabilir ince taneli yapısal çelik" (weldable fine grain structural steel) olarak isimlendirilen S275, S355 ve S460 çelik kalitelerinde üretildikleri belirtilmektedir. Şekil 2.1'den görülebileceği gibi, profillerin başlık kalınlıkları (t_f) 80 mm'yi geçmediği müddetçe, ilgili çelik sınıflarının karakteristik dayanımları için, ÇYTHYEY Tablo 2.1A'da verilen değerler kullanılabilir. Bu tezde incelenen IPE, IPN, HEA, HEB ve HEM profillerden hiç birinin başlık kalınlığı 40 mm'yi aşmamaktadır. Buna karşın, bazı HD profillerin başlık kalınlıklarının 80 mm'den daha büyük olduğu belirlenmiştir. Örneğin, HD 400x1086 profilinin başlık kalınlığı 125 milimetredir. Özellikle kalınlıkları 80 mm'yi aşan HD profillerin mekanik özellikleri için TS EN 10025-2 [15] ve TS EN 10025-4 [16]'e başvurulmuştur. Tablo 2.1'de, TS EN 10025-2 [15]' e göre alaşımsız yapısal çeliklerin mekanik özellikleri, Tablo 2.2'de ise TS EN 10025-4 [16]' e göre kaynaklanabilir ince taneli yapısal çeliklerin malzeme özellikleri sunulmuştur.

Tablo 2.1. TS EN 10025-2 [15] 'ye göre alaşımsız yapısal çeliklerin karakteristik akma dayanımları (F_y)

ÇELİK KALİTESİ	F_y (MPa)							
	t ≤16 mm	16< t ≤ 40 mm	40< t ≤ 63 mm	63< t ≤ 80 mm	80< t ≤ 100 mm	100< t ≤ 150 mm	150< t ≤ 200 mm	200< t ≤ 250 mm
S235	235	225	215	215	215	195	185	175
S275	275	265	255	255	235	225	215	205
S355	355	345	335	335	315	295	285	275

Tablo 2.2. TS EN 10025-4 [16]'e göre kaynaklanabilir ince taneli yapısal çeliklerin karakteristik akma dayanımları (F_y)

ÇELİK KALİTESİ	F_y (MPa)					
	t ≤16 mm	16< t ≤ 40 mm	40< t ≤ 63 mm	63< t ≤ 80 mm	80< t ≤ 100 mm	100< t ≤ 150 mm
S275M	275	265	255	245	245	240
S355M	355	345	335	325	325	320
S460M	460	440	430	410	400	385

ÇYTHYEY Tablo 2.1A (Şekil 2.1) ile Tablo 2.1 ve Tablo 2.2 karşılaştırıldığında, ÇYTHYEY'nin akma dayanımlarını 40 mm kalınlığa kadar sabit tuttuğu, buna karşın, TS EN 10025-2 ve TS EN 10025-4'ün 16 mm'yi aşan kalınlıklarda azalttığı gözlenmiştir. Benzer bir durum, kalınlığı 63 mm'yi geçen profillerde de söz konusudur.

Bu tezde, IPE, IPN, HEA, HEB ve HEM enkesitli profillerin dayanım hesapları, Şekil 2.1'de EN 10025-2 kaynak gösterilerek tanımlanan S235, S275 ve S355 alaşımsız yapısal çelikler için yapılmış; ilgili F_y değerleri Şekil 2.1'den alınmıştır. Belirtilen profillerin başlık kalınlıkları 40 mm'yi geçmediğinden F_y değerleri çelik sınıfının isimlendirilmesinde kullanılan rakamlara MPa cinsinden eşittir. Örnek olarak, S355 çeliği için F_y=355 MPa olarak alınmıştır. Tezde incelenen HD profillerin dayanım hesaplarında ise üç farklı çelik sınıfı dikkate alınmıştır; S275, S355 ve S460. Diğer profillerle karşılaştırılabilir değerler elde edebilmek amacıyla, ilk iki çelik sınıfı alaşımsız yapısal çeliklerden seçilmiş, ilgili F_y değerleri Tablo 2.1'den alınmıştır. Üçüncü çelik sınıfı ise kaynaklanabilir ince taneli bir yapısal çelik türü olan S460 olup, F_y değerleri için Tablo 2.2 kullanılmıştır.

Yapısal çeliğin dayanım hesaplarında kullanılan iki önemli mekanik özelliği de elastisite modülü E ile kayma modülü G'dir. ÇYTHYEY Bölüm 8'de E= 200000 MPa

(N/mm^2), G =77200 MPa (N/mm^2) değerlerinin tüm yapısal çelik elemanların tasarımında kullanılması gerektiği belirtilmektedir.

2.1.2. Dayanım katsayısı

ÇYTHYEY Bölüm 8.1.2'de YDKT yöntemine göre "tasarım basınç kuvveti dayanımı" ($\phi_c P_n$) hesaplanırken kullanılması gereken dayanım katsayısının (ϕ);

$$\phi_c = 0,90 \tag{2.1}$$

olarak alınması gerektiği belirtilmektedir.

2.1.3. İzin verilen en büyük narinlik oranı

ÇYTHYEY Bölüm 8.1.1'de, basınç elemanlarının narinliklerini 200 ile sınırlandırılmaktadır. Diğer bir ifadeyle;

$$\left(\frac{L_c}{i}\right) \leq 200 \tag{2.2}$$

olmalıdır. Burada (L_c/i) eleman narinliği, L_c burkulma boyu ($L_c=KL$), i ise ilgili eksendeki atalet yarıçapıdır. Bu tezin kapsamında incelenen bütün basınç elemanlarında, olası genel burkulma sınır durumlarının tamamında, burkulma boyu katsayısı K=1,0 olarak alınmıştır. Diğer bir deyişle, basınç elemanlarının etkili burkulma boylarının, eleman boylarına eşit olduğu kabul edilmiştir ($L_{cx}=L_{cy}=L_{cz}=L$).

2.2. Karakteristik Eksenel Basınç Kuvveti Dayanımlarının Belirlenmesi

Bu bölümde, sıcak haddelenmiş I ve H enkesitli çelik basınç elemanlarının karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımlarının (P_n) hesaplanabilmesi için ÇYTHYEY'de verilen tasarım esasları özetlenecektir.

2.2.1. Enkesit sınıfının belirlenmesi

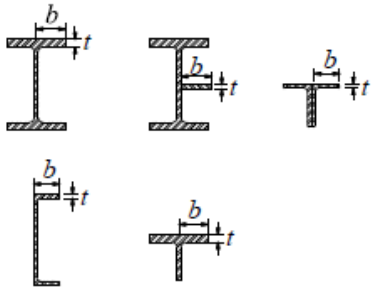
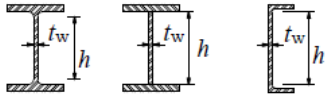
Basınç elemanlarının tasarım hesaplarındaki ilk adım, enkesit sınıflandırmasıdır. ÇYTHYEY Bölüm 5.4.1'de, eksenel yük altındaki çelik yapı elemanlarının enkesitleri narin ve narin olmayan enkesitler olarak iki gruba ayrılmaktadır.

ÇYTHYEY Bölüm 5.4.1'e göre, enkesiti oluşturan parçalardan hiçbirinin narinliği, yani genişlik/kalınlık oranı, ÇYTHYEY Tablo 5.1A'da verilen ilgili sınır narinlik değerini (λ_r) aşmıyorsa eleman "narin olmayan" enkesitli, en az bir enkesit parçasının narinliği, λ_r değerini aşıyorsa eleman "narin" enkesitli olarak sınıflandırılmaktadır. Enkesiti oluşturan parçalar rijitleştirilmiş ve rijitleştirilmemiş enkesit parçaları olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. ÇYTHYEY Bölüm 5.4.1'de rijitleştirilmiş ve rijitleştirilmemiş parçalar şu şekilde tanımlanmıştır;

> "Basınç kuvveti doğrultusuna paralel sadece bir kenarı boyunca enkesitin diğer bir parçası ile bağlanan, basınç etkisindeki enkesit parçaları, rijitleştirilmemiş enkesit parçaları olarak olarak tanımlanır. Basınç kuvveti doğrultusuna paralel iki kenarı boyunca enkesitin diğer parçaları ile bağlanan, basınç etkisindeki enkesit parçaları rijtleştirilmiş enkesit parçaları olarak tanımlanır"[3].

Yukarıda verilen tanıma göre, I veya H enkesitli bir çelik yapı elemanın başlıkları rijitleştirilmemiş, gövdesi ise rijitleştirilmiş enkesit parçasıdır. Şekil 2.2'de, I ve H enkesitli hadde profillerin başlık ve gövdelerinin sınıflandırılması amacıyla kullanılan sınır narinlikler yer almaktadır. Diğer güncel çelik tasarım yönetmeliklerinde olduğu gibi, ÇYTHYEY'de de rijitleştirilmiş ve rijitleştirilmemiş enkesit parçaları için tanımlanan sınır narinlikler farklıdır; başlıklar için tanımlanan değerler, gövdeler için tanımlananlardan daha küçüktür. Bunun en önemli sebebi, rijitleştirilmiş parçaların burkulma yüklerinin, rijitleştirilmemiş parçaların burkulma yüklerinden daha büyük olmasıdır. Şekil 2.2'ye göre, bu tez kapsamında incelenen profillerin başlık ve gövde narinlikleri için ÇYTHYEY'de tanımlanan sınır narinlikler, sırasıyla λ_{rf} and λ_{rw}, şu şekilde ifade edilebilir;

$$\lambda_{rf} = 0,56\sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad , \quad \lambda_{rw} = 1,49\sqrt{\frac{E}{F_y}} \tag{2.3}$$

Durum	Tanım	Genişlik / Kalınlık Oranı, λ	Genişlik / Kalınlık Oranı Sınır Değeri, λ_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	$1{,}49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Şekil 2.2. ÇYTHYEY Tablo 5.1A [3]'da çift simetri eksenli I ve H enkesitli elemanların eksenel basınç altındaki parçaları için sınır narinlik değerleri

Denklem 2.3'ten de görüldüğü gibi, sınır narinlikler yalnız yapısal çeliğinin karakteristik akma gerilmesine ve elastisite modülüne bağlıdır. İncelenen tüm yapısal çelikler için, E'nin sabit olduğu dikkate alındığında, enkesit sınıflarının belirlenmesinde kullanılan sınır narinliklerin F_y arttıkça azaldığı fark edilebilir. Diğer bir söylemle, akma dayanımı arttıkça elemanların başlık ve gövde narinlikleri sabit kalsa da, sınır narinlikler azaldığından enkesitler narinleşmektedir.

ÇYTHYEY Bölüm 5.4.1 uyarınca, I veya H enkesitli bir elemanın başlık ve gövde narinlikleri (sırasıyla, λ_f ve λ_w) Denklem (2.4)'ten hesaplanabilir;

$$\lambda_f = \left(\frac{b}{t}\right)_f = \frac{b_f/2}{t_f} \quad \text{ve} \quad \lambda_w = \left(\frac{b}{t}\right)_w = \frac{h}{t_w} \tag{2.4}$$

Denklem (2.4)'te b_f başlık genişliği, t_f başlık kalınlığı, h düz gövde yüksekliği, t_w ise gövde kalınlığını ifade etmektedir. ÇYTHYEY Bölüm 5.4.1'de, Şekil 2.1'den de görülebileceği gibi, başlık narinliği hesaplanırken başlık genişliğinin yarısının dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir. Gövde narinliği hesabında ise, düz gövde yüksekliği, yani iki başlık arası mesafeden eğrilik yarıçaplarının çıkarılmasıyla elde edilen boyut kullanılmalıdır. h değerleri, profil tablolarından okunabilir.

Özetle, eksenel yük etkisi altındaki sıcak haddelenmiş I ve H enkesitlerinin başlık narinlikleri λ_f, başlıklar için tanımlanan sınır narinlik λ_{rf}'den küçükse ve aynı zamanda

gövde narinlikleri λ_w sınır narinlik λ_{rw} 'den küçükse enkesit narin olmayan, herhangi bir tanesi, ilgili sınır narinlikten büyükse enkesit narin enkesit olarak sınıflandırılmaktadır.

2.2.2. Narin olmayan enkesite sahip elemanların karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımlarının belirlenmesi

ÇYTHYEY Bölüm 8.2'de narin olmayan enkesitli basınç elemanları için karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı P_n, Denklem (2.5) ile belirlenmelidir;

$$P_n = F_{cr} A_g \tag{2.5}$$

Denklem (2.5)'te F_{cr} kritik burkulma gerilmesi, A_g ise kayıpsız enkesit alanıdır. Enkesiti narin olmayan basınç elemanlarının karakteristik basınç kuvveti dayanımları hesaplanırken, enkesit alanlarında herhangi bir azalma yapılmamaktadır. Çünkü elemanın davranışını yerel burkulma sınır durumları değil, genel burkulma sınır durumlarından biri kontrol etmektedir.

F_{cr}, Denklem (2.6) veya (2.7) kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$F_{cr} = \left[0,658^{\frac{F_y}{F_e}} \right] F_y \quad , \quad \text{eğer} \quad \frac{F_y}{F_e} \leq 2,25 \tag{2.6}$$

$$F_{cr} = (0,877) F_e \quad , \quad \text{eğer} \quad \frac{F_y}{F_e} > 2,25 \tag{2.7}$$

Denklem (2.6) ve (2.7)'de görüldüğü gibi kritik burkulma gerilmesi F_{cr}, karakteristik akma gerilmesi F_y ve elastik burkulma gerilmesi F_e'nin oranına bağlıdır. Bu orandan, basınç elemanında gözlenecek genel burkulmanın elastik mi inelastik mi olacağı belirlenir. Eğer F_y'nin F_e'ye oranı 2,25 değerinden küçükse elemanda elastik olmayan burkulma, büyükse elastik burkulma gözlemlenecektir. Yani Denklem (2.6) elastik olmayan bölgede burkulacak basınç elemanları için tanımlanmıştır. Bu denklem ampirik bir denklem olup, deneysel verilere dayanmaktadır [17]. Denklem (2.7) ise burkulma sınır durumuna elastik bölgede ulaşacak basınç elemanları için tanımlanmıştır, bu nedenle, elastik burkulma gerilmesini doğrudan kullanmaktadır.

Ancak, bu durumda, F_{cr} hesaplanırken F_e'nin belirli bir katsayıyla azaltılması istenir. Bu azaltmanın en önemli nedeni, elemanlarda doğal olarak oluşan başlangıç eğriliği ve yükteki dış merkezlik nedeniyle, elastik burkulma yüküne ancak çok büyük şekil değiştirmeler sonucunda ulaşılabiliyor olmasıdır. ÇYTHYEY, burkulma sonrası elemanda oluşacak şekil değiştirmeleri sınırlamak için F_e'yi 0,877 katsayıyla çarparak azaltmaktadır.

ÇYTHYEY Bölüm 8.2'de, F_{cr} denklemleri Denklem (2.8) ve (2.9)'da gösterildiği gibi de tanımlanmıştır;

$$F_{cr} = \left[0,658^{\frac{F_y}{F_e}} \right] F_y \quad , \quad \text{eğer} \quad \frac{L_c}{i} \leq 4,71\sqrt{\frac{E}{F_y}} \tag{2.8}$$

$$F_{cr} = (0,877)F_e \quad , \quad \text{eğer} \quad \frac{L_c}{i} > 4,71\sqrt{\frac{E}{F_y}} \tag{2.9}$$

Denklem (2.8) ve (2.9), Denklem (2.6) ve (2.7) ile karşılaştırıldığında elastik bölgeden elastik olmayan bölgeye geçiş yapılan noktanın tanımının değiştiği görülmektedir. Denklem (2.8) ve (2.9)'da sınır değer elemanın eğilmeli burkulmadaki narinlik oranı cinsinden tanımlanmıştır. Ancak, bu denklem yalnız eğilmeli burkulma sınır durumu için geçerlidir. Bu tezde, eleman kapasiteleri hesaplanırken burulmalı burkulma sınır durumu da dikkate alındığından, F_{cr} hesaplarında Denklem (2.6) ve (2.7) kullanılacaktır.

2.2.3. Elastik burkulma gerilmelerinin belirlenmesi

Sıcak haddelenmiş I ve H enkesitli bir basınç elemanının tasarım basınç kuvveti dayanımı hesaplanırken, Denklem (2.6) ve (2.7)'den görülebileceği gibi, elastik burkulma gerilmesi F_e hesaplanmalıdır. F_e hesabında, elemanın davranışını kontrol eden olası bütün genel burkulma sınır durumları göz önünde bulundurulmalıdır. Tezde, genel burkulma sınır durumlarının tümünde, burkulma boyları eleman boylarına eşit alındığından, F_e hesabının yalnız zayıf eksende eğilmeli burkulma ve burulmalı burkulma sınır durumları için yapılması yeterlidir. F_{cr}, bu iki sınır durumdan elde edilen F_e değerlerinden küçüğü kullanılarak hesaplanmalıdır. Bu şekilde, basınç elemanının davranışını hangi burkulma sınır durumunun kontrol ettiği de belirlenebilir.

2.2.3.1. Eğilmeli burkulma sınır durumu

ÇYTHYEY Bölüm 8.2.1'e göre eğilmeli burkulma sınır durumu göz önünde bulundurulduğunda elastik burkulma gerilmesi F_e, Denklem (2.10) kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(L_c/i\right)^2} \tag{2.10}$$

Denklem (2.10)'da L_c burkulma boyu, E yapısal çeliğin elastisite modülü ve i ilgili yöndeki atalet yarıçapıdır. Denklem (2.10)'dan da anlaşılabileceği gibi, bir basınç elemanının eleman narinliği (L_c/i) ne kadar büyükse, elastik burkulma gerilmesi o kadar küçüktür.

Eğilmeli burkulma sınır durumu, eksenel yük altındaki basınç elemanları için hem başlıklarına hem gövdesine paralel iki eksen için de, diğer bir deyişle hem güçlü hem zayıf eksen için de kontrol edilmelidir. Ancak, daha önce de belirtildiği gibi, tezde burkulma boylarının eleman boylarına eşit alınması nedeniyle, F_e'nin yalnız zayıf eksende eğilmeli burkulma için hesaplanması yeterlidir. Bu tezde, eksen takımı, ÇYTHYEY'de tanımlandığı gibi kullanılmıştır. Diğer bir ifadeyle, x ekseni başlıklara paralel enkesit ekseni, y ekseni başlıklara dik enkesit ekseni, z ekseni ise enkesite dik eleman eksenidir. Bu durumda, elastik burkulma gerilmesi F_e, zayıf eksen etrafındaki elastik eğilmeli burkulma gerilmesi F_{ey}'ye eşit olacaktır;

$$F_e = F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(L_{cy}/i_y\right)^2} \tag{2.11}$$

Denklem (2.11) kullanılarak yapılan hesaplamalarda zayıf eksendeki eleman narinliği ($L_{cy}/i_y=L/i_y$) kullanılacaktır.

2.2.3.2. Burulmalı burkulma sınır durumu

Aslında, ÇYTHYEY Bölüm 8.2.2'de, burulmalı burkulma sınır durumunun dikkate alınması gerektiği belirtilen enkesitler arasında sıcak haddelenmiş I veya H enkesitli basınç elemanları bulunmamaktadır; fakat bu tez kapsamında burulmalı burkulma sınır durumu, F_e hesabında iki amaç gözetilerek göz önünde bulundurulacaktır. Birincisi,

tezin kapsamında yapılan çalışmalarda, çok kısa veya narinliği çok küçük olan sıcak haddelenmiş I ve H enkesite sahip elemanların (Örneğin HEB100 enkesite, S355 çelik kalitesine sahip ve burkulma boyu 300 mm olan bir basınç elemanı) basınç davranışlarını burulmalı burkulma sınır durumunun kontrol ettiği gözlemlenmiştir. Bu tezde, eleman kapasiteleri çok kısa elemanlar için de hesaplandığından, burulmalı burkulma sınır durumunun da hesaplara dahil edilmesine karar verilmiştir.

ÇYTHYEY Bölüm 8.2.2'ye göre burulmalı burkulma sınır durumu için elastik burkulma gerilmesi (F_{ez}) Denklem (2.12) kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$F_{ez} = \left(\frac{\pi^2 E C_w}{\left(L_{cz}\right)^2} + GJ \right) \frac{1}{I_x + I_y} \tag{2.12}$$

Denklem (2.12)'de, J ve C_w sırasıyla enkesitin burulma ve çarpılma katsayıları olup profil tablolarından okunabilmektedir; I_x ve I_y sırasıyla güçlü ve zayıf eksenlerdeki atalet momentleri, L_{cz} ise boyuna eksendeki burulmalı burkulma için burkulma boyudur. Daha önce de belirtildiği gibi, bu tez çalışmasında, L_{cz}=L_{cy} olarak alınmıştır.

2.2.4. Narin enkesitli elemanların karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımlarının belirlenmesi

ÇYTHYEY Bölüm 8.5'te, narin bir enkesit parçasına sahip eksenel basınç kuvveti altındaki bir çelik yapı elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımı P_n'nin Denklem (2.13) kullanılarak hesaplanması gerektiği belirtilmektedir;

$$P_n = F_{cr} A_e \tag{2.13}$$

Burada F_{cr} Bölüm 2.2.2.'de anlatıldığı şekilde hesaplanmalıdır. A_e etkin alan olup; narin enkesit parçalarının azaltılmış etkin genişlikleri kullanılarak hesaplanan etkin alanların toplamına eşittir [3]. A_e, ÇYTHYEY Bölüm 8.5.1'de belirtildiği gibi, her bir narin enkesit parçası için, elemanın kayıpsız enkesit alanında $(b-b_e)t$ azaltması yapılarak belirlenmelidir. Burada b_e, narin enkesit parçasının etkin genişliğini ifade etmektedir. ÇYTHYEY'ye göre, I ve H enkesitli elemanların gövdelerinde b_e yerine h_e simgesi kullanılmalıdır. b_e ve h_e, sırasıyla, Denklem (2.14) ve (2.15) kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$b_e = b \quad , \quad \text{eğer} \quad \lambda \le \lambda_r \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \tag{2.14}$$

$$b_e = b\left(1 - c_1\sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}}\right)\sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} \quad , \quad \text{eğer} \quad \lambda > \lambda_r \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \tag{2.15}$$

Denklem (2.14) ve (2.15)'te b, λ ve λ_r, sıcak haddelenmiş I/H enkesitli elemanların narin başlıkları için sırasıyla $b_f/2$, λ_f ve λ_{rf}; narin gövdeleri için ise sırasıyla h, λ_w ve λ_{rw}'ye eşittir. Denklem (2.15)'te, yerel elastik burkulma gerilmesi F_{el} Denklem (2.16) kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$F_{el} = \left(c_2 \frac{\lambda_r}{\lambda}\right)^2 F_y \tag{2.16}$$

Denklem (2.15) ve (2.16)'da, c_1 ve c_2, ÇYTHYEY Tablo 8.2'de verilmiş olan etkin genişlik hata düzeltme katsayıları olup, Şekil 2.3'te sunulmuştur. Denklem (2.16)'da verilen denklemin, ÇYTHYEY'in ilk yayımlandığı 2016 yılındaki versiyonunda yanlış yazıldığı, 2018'de güncellenen baskısında düzeltildiği belirtilmelidir. Şekil 2.3'e göre narin enkesitli I/H profillerin etkin başlık genişliği hesabında c_1=0,22 ve c_2=1,49; etkin gövde hesabında ise c_1=0,18 ve c_2=1,31 kullanılmalıdır.

Narin enkesit parçası	c_1	c_2
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

Şekil 2.3. Basınç elemanlarının narin enkesit parçaları için ÇYTHYEY Tablo 8.2'de verilen etkin genişlik hata düzeltme katsayıları c_1 ve c_2 değerleri [3]

Denklem (2.14)'e göre eksenel basınç kuvveti altındaki sıcak haddelenmiş I/H enkesitli bir basınç elemanının başlıklarının ve/veya gövdesinin narin olması, her durumda etkin genişlik hesabı gerektirmeyebilir. Eğer ilgili enkesit parçasının narinliği, kullanılan yapı çeliğinin karakteristik akma gerilmesi ile elemanın kritik burkulma gerilmesi kullanılarak hesaplanan 'arttırılmış' sınır narinlikten daha küçükse, enkesit parçası ÇYTHYEY'nin sınıflandırmasına göre narin olmasına rağmen etkin genişlik toplam genişliğe eşit alınmaktadır. Bunun en önemli nedeni, narin enkesit parçalarına sahip basınç elemanlarında belirli bir boydan sonra eleman burkulmasının

yerel burkulmadan önce oluşmasıdır. Bu durumda, elemanın enkesit alanında azaltma yapmaya gerek yoktur. Fakat Denklem (2.15)'ten de farkedilebileceği gibi, narinliği 'arttırılmış' sınır narinliği dahi aşan bir enkesit parçasına sahip basınç elemanlarında, etkin alan hesabı yapılmalıdır.

2.3. Tasarım Basınç Kuvveti Dayanımlarının Belirlenmesi

Bölüm 2.2.2 ve 2.2.4'e göre, sıcak haddelenmiş I ve H enkesitli bir çelik basınç elemanının karakteristik basınç kuvveti dayanımı P_n hesaplandıktan sonra yapılması gereken son işlem, karakteristik dayanımı, dayanım katsayısıyla çarparak tasarım dayanımına çevirmektir. Tasarım basınç kuvveti dayanımı ($\phi_c P_n$) Denklem (2.17) kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$\phi_c P_n = 0,90 P_n \tag{2.17}$$

Diğer bir deyişle, ÇYTHYEY tasarımda YDKT yönteminin kullanılması durumunda, çelik basınç elemanlarının karakteristik basınç kuvveti dayanımlarının, davranışı hangi sınır durumunu kontrol ediyor olursa olsun, %10 azaltılarak kullanılmasını istemektedir.

3. EC3'E GÖRE SICAK HADDELENMİŞ I/H ENKESİTLİ ÇELİK BASINÇ ELEMANLARININ TASARIM İLKELERİ

Eurocode, Avrupa'daki çoğu ülke ile Avrupa dışındaki bazı ülkelerin kullanmak zorunda olduğu bir standartlar serisidir ve 9 ana parçadan oluşmaktadır. Tüm dünyanın geçerliliğini kabul ettiği ve globalleşen bir standartlar serisi olan Eurocode'un 3. bölümü, EUROCODE 3 olarak isimlendirilen kısım (diğer bir deyişle, EN-1993 ya da kısaca EC3) bu standartlar serisi içinde, çelik yapıların tasarımı ile ilgili bölümleri içermektedir.

EC3, ÇYTHYEY'de olduğu gibi sınır durumlar felsefesini temel alan bir standarttır. Çoğu durumda EC3'e göre hesap yapıldığında, elemanların 'direnç'leri azaltılmakta, yük 'etki'leri ise artırılmaktadır. Diğer bir deyişle, EC3'te kullanılan tasarım yöntemi, ÇYTHYEY'de tanımlanan YDKT yöntemine benzemektedir. EC3'te GKT yöntemine benzer bir yöntem bulunmamaktadır.

Basınç kuvveti etkisi altındaki çelik basınç elemanlarının tasarım kuralları, EC3 içerisinde yer alan EC3-1-1 [4] ve EC3-1-5 [5] standartlarında bulunmaktadır. Tasarım kurallarının çoğu EC3-1-1'de yer almakla birlikte, etkin alan hesapları EC3-1-5'te verilmektedir. Tezin bu bölümünde, Bölüm 1'de anlatılan basınç elemanlarının ulaşabileceği sınır durumlar dikkate alınarak, eksenel basınç kuvveti etkisindeki sıcak şekillendirilmiş I/H enkesitli çelik yapı elemanlarının tasarım dirençlerinin hesabında kullanılan ve EC3'te tanımlanan tasarım kuralları verilecektir.

ÇYTHYEY'den farklı olarak EC3-1-1, eksenel yükün ya da elemanın narinliğinin nispeten 'küçük' olduğu durumlarda, akma sınır durumunun elemanın davranışını belirleyen bir sınır durum olabileceğini belirtmektedir. Bu sebeple, tezin bu bölümünde, EC3'te akma, eğilmeli burkulma ve burulmalı burkulma sınır durumları için tanımlanmış tasarım esasları özetlenecektir. EC3'te Akma sınır durumu, burkulma sınır durumlarıyla ilişkili olarak tanımlandığından burkulma sınır durumları içerisinde bahsedilecektir. EC3 için de genel tasarım denkleminde, yük tarafındaki hesaplar yapılmayacak, yalnız elemanların eksenel basınç dirençleri belirlenecektir. Böylece,

EC3'e göre hesaplanan tasarım dirençleri, ÇYTHYEY'de tanımlanan YDKT yöntemine göre hesaplanan tasarım dayanımlarıyla karşılaştırılabilecektir.

3.1. Temel Tasarım Esasları

EC3-1-1'e göre eksenel basınç kuvveti etkisi altındaki basınç elemanlarının tasarımında, enkesit direnci $N_{c,Rd}$ ve burkulma direnci $N_{b,Rd}$ ayrı ayrı hesaplanmalıdır. $N_{c,Rd}$, enkesitin tasarım direnci olup, akma ve yerel burkulma sınır durumlarını dikkate alarak ve EC3-1-1 Bölüm 6.2.4'te verilen denklemler kullanılarak hesaplanmalıdır. $N_{b,Rd}$ ise elemanın genel burkulma sınır durumlarını göz önüne almaktadır. $N_{b,Rd}$ hesapları, EC3-1-1 Bölüm 6.3.1'te verilmektedir. Elbette, elemanın narin enkesit parçası veya parçaları içermesi durumunda, yerel burkulma sınır durumu, $N_{b,Rd}$ hesaplarında da dikkate alınmaktadır. Bu bölümde, $N_{c,Rd}$ ve $N_{b,Rd}$ değerlerinin hesaplanmasında kullanılan malzeme özellikleri ile kısmi (direnç) katsayılar hakkında bilgi verilecektir.

3.1.1. Yapısal çeliğin malzeme özellikleri

EC3-1-1 Bölüm 3.2.1'de, yapısal çeliğin akma dayanımı f_y ile çekme dayanımı f_u'nun ya ürün standartlarından doğrudan alınarak ya da yönetmelikte verilen Tablo 3.1'deki 'basitleştirme' kullanılarak elde edilebileceği belirtimektedir. Tablo 3.1'in bir bölümü, tezde, Şekil 3.1'de sunulmuştur. Şekil 3.1'de verilen değerlerin karakteristik değerler olduğu ve sıcak şekil verilmiş yapısal çelikler için geçerli olduğu belirtilmelidir. ÇYTHYEY Tablo 2.1A'da (tezde Şekil 2.1'de) verilen tablonun, gerek referans verilen EN yönetmelikleri gerekse çelik sınıfı isimlendirmesi açısından, EC3'te Tablo 3.1'de (tezde Şekil 3.1'de) verilen tabloyla aynı olduğu görülebilir. ÇYTHYEY'de olduğu gibi, EC3'de karakteristik dayanımları yalnız başlık kalınlıkları 80 mm'den küçük olan enkesitler için vermektedir. Bu tezde, kalınlığı 80 mm'yi aşan profillerin karakteristik malzeme dayanımları, EN 10025-2 [18] ve EN 10025-4 [19] yönetmeliklerinden alınmıştır. İlgili tablolar, Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de sunulmuştur.

Standard and steel grade	Nominal thickness of the element t [mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	f_y [N/mm^2]	f_u [N/mm^2]	f_y [N/mm^2]	f_u [N/mm^2]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530

Şekil 3.1. EC3-1-1 Tablo 3.1'e göre sıcak haddelenmiş yapısal çeliklerin karakteristik akma ve çekme dayanımları (f_y ve f_u) [4]

Tablo 3.1. EN 10025-2 [18]'ye göre alaşımsız yapısal çeliklerin karakteristik akma dayanımları (f_y)

ÇELİK KALİTESİ	**F_y (MPa)**							
	t ≤16 mm	16< t ≤ 40 mm	40< t ≤ 63 mm	63< t ≤ 80 mm	80< t ≤ 100 mm	100< t ≤ 150 mm	150< t ≤ 200 mm	200< t ≤ 250 mm
S235	235	225	215	215	215	195	185	175
S275	275	265	255	245	235	225	215	205
S355	355	345	335	325	315	295	285	275

Tablo 3.2. EN 10025-4 [19]'ye göre alaşımsız yapısal çeliklerin karakteristik akma dayanımları (f_y)

ÇELİK KALİTESİ	**F_y (MPa)**					
	t ≤16 mm	16< t ≤ 40 mm	40< t ≤ 63 mm	63< t ≤ 80 mm	80< t ≤ 100 mm	100< t ≤ 150 mm
S275M	275	265	255	245	245	240
S355M	355	345	335	325	325	320
S460M	460	440	430	410	400	385

Tablo 3.1 ile Tablo 2.1 karşılaştırıldığında, yalnız 63 mm < t ≤ 80 mm aralığındaki dayanım değerlerinde farklılık olduğu gözlenmiştir. Tablo 3.2'deki dayanım değerleri ise Tablo 2.2'dekilerle tamamen aynıdır.

ÇYTHYEY'ye göre yapılan hesaplarla karşılaştırılabilir değerler elde etmek amacıyla, IPE, IPN, HEA, HEB VE HEM enkesitli profillerin basınç dirençlerinin, Tablo 3.1'de verilen S235, S275 ve S355 alaşımsız yapısal çelikler için hesaplanmasına karar verilmiştir. HD enkesitli profillerde ise tasarım dirençleri, Tablo 3.2'de verilen S275 ve S355 alaşımsız yapısal çeliklerle, Tablo 3.3'te verilen S460 kaynaklanabilir ince taneli yapısal çelik için hesaplanmıştır.

EC3-1-1 Bölüm 3.2.6'da, tasarım hesaplarında yapısal çelik için kullanılması gereken temel malzeme katsayıları; elastisite modülü, kayma modülü, elastik bölgede Poisson oranı ve doğrusal ısıl genleşme katsayısı, için karakteristik değerler sunulmuştur. Belirtilen malzeme özelliklerinden, bu tezde kullanılan iki malzeme özelliği olan elastisite ve kayma modüllerinin değerleri, E=210000 MPa ve G=81000 MPa olarak verilmiştir.

3.1.2. Kısmi katsayılar

EC3-1-1 Bölüm 2.4.3'te tanımlanan ve genel çerçevede γ_M olarak isimlendirilen kısmi katsayılar, EC3'te belirtilen durumlara göre yanlarına alınan numaralarla tanımlanmaktadır. Örneğin EC3-1-1 Bölüm 6.1'e göre enkesit sınıfı gözetmeksizin kesit dirençlerinin hesaplanmasında kullanılan kısmi katsayı γ_{M0}, elemanların burkulma dirençlerinin hesabında kullanılan kısmi katsayı ise γ_{M1} simgeleriyle ifade edilmektedir.

EC3-1-1 Bölüm 6.1'de yapı elemanlarının tasarımlarında kullanılacak kısmi katsayı değerlerinin, ülkelerin ulusal eklerinden alınabileceği belirtilmektedir. Fakat ülkemiz için tanımlanmış olan herhangi bir ulusal ek bulunmamaktadır. Bu sebeple basınç elemanlarının uniform basınç altındaki kesit dirençlerinin ve tasarım burkulma dirençlerinin hesaplanmasında kullanılan kısmi katsayılar γ_{M0} ve γ_{M1} için, EC3-1-1 Bölüm 6.1'de binalar için önerilen aşağıdaki değerler kullanılmıştır;

$$\gamma_{M0} = 1,00 \tag{3.1}$$

$$\gamma_{M1} = 1,00 \tag{3.2}$$

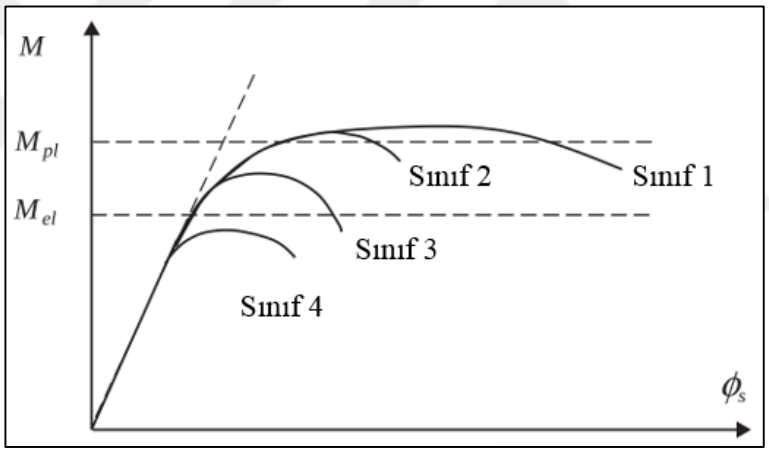
Diğer bir ifadeyle, bu tezde EC3'e göre yapılan kapasite hesaplarında, elemanın enkesit veya burkulma direnci azaltılmadan kullanılacaktır.

3.2. Enkesit ve Tasarım Burkulma Dirençlerinin Hesaplanması

Bu bölümde düzgün basınç etkisindeki sıcak haddelenmiş I ve H enkesitli çelik yapı elemanlarının tasarım enkesit dirençleri ($N_{c,Rd}$) ile tasarım burkulma dirençlerinin ($N_{b,Rd}$) hesaplanabilmesi için EC3-1-1 ve EC3-1-5'te verilen kurallar özetlenecektir.

3.2.1. Enkesit sınıfının belirlenmesi

EC3-1-1 Bölüm 5.5'e göre, çelik yapı elemanları enkesitlerine göre 4 farklı sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflar; Sınıf 1 (tam kompakt), Sınıf 2 (yarı kompakt), Sınıf 3 (kompakt olmayan) ve Sınıf 4 (narin) olarak isimlendirilmektedir. Farklı enkesit sınıflarına sahip elemanların moment-eğrilik ilişkileri Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Şekil 3.2'de M_{pl} ilgili enkesitin plastik moment kapasitesi, M_{el} elastik moment kapasitesi, ϕ_s ise dönme kapasitesidir.



Şekil 3.2 EC3-1-1'de tanımlanan enkesit sınıflarına sahip elemanların eğilme davranışlarının karşılaştırılması [20]

Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, Sınıf 1 enkesitli elemanlar, plastik moment kapasitelerine (M_{pl}) ulaşabilen ve plastik analiz için gerekli dönme kapasitelerine ulaşana kadar dirençleri bu kapasitelerin altında düşmeyen elemanlardır. Sınıf 2 enkesitli elemanlar, plastik moment kapasitelerine ulaşabilirler; fakat yerel burkulma sebebiyle dönme kapasiteleri kısıtlıdır. Sınıf 3 enkesitli elemanlar, elastik moment kapasitelerine (M_{el}) ulaşabilirler; fakat yerel burkulma sebebiyle plastik moment kapasitesilerine ulaşamadan kararlılıklarını kaybederler. Sınıf 4 enkesitli bir elemanda ise elemanı oluşturan enkesit parçalarından biri, eleman elastik moment kapasitesine ulaşamadan burkulur.

Şekil 3.2'den de görülebileceği gibi, Sınıf 1 ve Sınıf 2 enkesitli elemanlar plastik moment kapasitelerine ulaşabilmektedir. Sınıf 3 enkesitli elemanlarda akma başlasa bile, diğer bir deyişle elastik moment kapasitesine ulaşılsa bile, plastik kapasiteye ulaşılamamaktadır. Yerel burkulma, akmanın enkesitte ve elemanda yayılmasını engellediği için, bu tür elemanlarda şekil değiştirmeler sınırlı kalacaktır. Sınıf 4 enkesitler ise elastik moment kapasitesilerine bile ulaşamadan burkulmaktadır.

EC3'e göre, bir basınç elemanının enkesit sınıfını belirlemek için ilk olarak enkesiti oluşturan parçaların narinlikleri hesaplanmalıdır. EC3-1-1 Tablo 5.2'ye göre enkesit parçalarının narinlikleri (EC3'te enkesit parçalarının narinlikleri için herhangi bir özel simge kullanılmamıştır) başlıklar için Denklem (3.3) ve gövdeler için Denklem (3.4) kullanılarak belirlenmelidir;

$$\left(\frac{c}{t}\right)=\frac{c_f}{t_f} \tag{3.3}$$

$$\left(\frac{c}{t}\right)=\frac{c_w}{t_w} \tag{3.4}$$

Denklem (3.3) ve Denklem (3.4)'te c_f yarım başlığın düz genişliği, t_f başlık kalınlığı, c_w düz gövde yüksekliği, t_w ise gövde kalınlığıdır. 'Düz' genişlikler c_f ve c_w, Denklem (3.5) ve (3.6) kullanılarak hesaplanabilir;

$$c_f=\frac{1}{2}\left[b-\left(t_w+2r\right)\right] \tag{3.5}$$

$$c_w=\left[h-2\left(t_f+r\right)\right] \tag{3.6}$$

Denklem (3.5)'te görüldüğü gibi yarım başlığın düz genişliği c_f, başlık genişliği b'den gövde kalınlığı t_w ve iki tane eğrilik yarıçapı r çıkarılarak hesaplanmalıdır. Denklem (3.6)'ya göre ise düz gövde yüksekliği c_w, kesit yüksekliği h'den iki tane başlık kalınlığı t_f ve iki tane eğrilik yarıçapı r çıkarılarak belirlenmelidir. Kesit yüksekliği için EC3'te "h", ÇYTHYEY'de ise "d" simgelerinin kullanıldığı belirtilmelidir. I/H enkesitli bir çelik yapı elemanının başlık ve gövde sınıflarını belirlemek amacıyla EC3-1-1 Tablo 5.2'de tanımlanmış olan sınır narinlikler sırayla Denklem (3.7) ve Denklem (3.8)'de sunulmuştur;

$$\text{Sınıf 1: } \frac{c_f}{t_f} \le 9\varepsilon,\ \text{Sınıf 2: } 9\varepsilon < \frac{c_f}{t_f} \le 10\varepsilon,\ \text{Sınıf 3: } 10\varepsilon < \frac{c_f}{t_f} \le 14\varepsilon \tag{3.7}$$

$$\text{Sınıf 1: } \frac{c_w}{t_w} \le 33\varepsilon,\ \text{Sınıf 2: } 33\varepsilon < \frac{c_w}{t_w} \le 38\varepsilon,\ \text{Sınıf 3: } 38\varepsilon < \frac{c_w}{t_w} \le 42\varepsilon \tag{3.8}$$

Denklem (3.7) ve (3.8)'de yapısal çeliğinin karakteristik akma gerilmesi f_y'ye bağlı bir katsayı olup, Denklem (3.9) kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \tag{3.9}$$

Denklem (3.7) uyarınca, başlık narinlikleri (c_f/t_f), 9ε değerinden küçük enkesitlerin başlıkları Sınıf 1, 9ε değerinden büyük ancak 10ε değerinden küçük olanların Sınıf 2, 10ε ile 14ε değerleri arasında olanların Sınıf 3, 14ε değerinden de büyük olanlar ise Sınıf 4 olarak sınıflandırılmaktadır. Benzer şekilde, gövde narinlikleri (c_w/t_w), 33ε'dan küçük olan gövdeler Sınıf 1, 33ε ile 38ε arasında kalanlar Sınıf 2, 38ε ile 42ε arasında kalanlar Sınıf 3 ve 42ε'dan büyük olanlar Sınıf 4 olarak sınıflandırılmaktadır. EC3-1-1'de de gövdeler için verilen sınır narinlik değerlerinin başlıklar için verilen değerlerden daha büyük olmasının nedeni, gövdelerin rijitleştirilmiş, başlıkların ise rijitleştirilmemiş enkesit parçaları olmasıdır.

EC3'e göre tasarımda, elemanın enkesitini oluşturan parçaların her birinin sınıfı ayrı ayrı belirlenmelidir. Enkesitin sınıfı, sınıfı en yüksek olan enkesit parçasının sınıfı olarak alınmalıdır. Örneğin, başlıkları Sınıf 3, gövdesi Sınıf 2 olarak belirlenen bir basınç elemanının düzgün basınç altında kesit direnci ($N_{c,Rd}$) ve tasarım burkulma direnci ($N_{b,Rd}$), Sınıf 3 için verilen kurallar ve tasarım denklemleri kullanılarak hesaplanmalıdır.

EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da, Bölüm 5.5.1.(10)'da belirtilen durumların dışında, Sınıf 4 enkesitlere sahip elemanların sınıflarının, 'arttırılmış' ε değeri kullanılarak yapılan hesaplarda Sınıf 3 koşullarını sağlaması durumunda, Sınıf 3 olarak kabul edilebileceği belirtilmektedir. İlgili maddeye göre, Denklem (3.9) kullanılarak hesaplanan ε değeri, aşağıdaki artırma katsayısıyla çarpılarak büyütülebilir;

$$\sqrt{\frac{f_y / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}}} \tag{3.10}$$

Denklem (3.10)'da $\sigma_{com,Ed}$, elemana etkiyen en büyük tasarım basınç gerilmesi olup bir basınç elemanı için alabileceği en büyük değer f_y'ye eşittir. Bu sebeple Denklem (3.10)'da verilen ifade hiçbir zaman 1'den küçük olamayacaktır, yani ε hiçbir koşulda azalmayacaktır.

EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(10)'da, elemanların Bölüm 6.3'e göre tasarım burkulma direnci kontrolü yapılırken artırılmamış ε değerlerinin kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Bu durumda, EC3'e göre, bu ek madde incelenen profillerin yalnız enkesit dirençleri hesaplanırken kullanılabilir. Bu tezde, sıcak haddelenmiş I ve H enkesitlere sahip basınç elemanlarının hem enkesit hem de burkulma dirençleri, bu ek maddeyi hem göz önünde bulundurarak, hem de göz ardı ederek hesaplanmış; elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.2.2. Sınıf 4 enkesite sahip elemanların etkin enkesit alanlarının hesaplanması

Bu tez kapsamında incelenen IPE, IPN, HEA, HEB, HEM ve HD enkesit gruplarından Sınıf 4 olarak belirlenen profillerin $N_{c,Rd}$ ile $N_{b,Rd}$ değerlerinin hesaplanabilmesi için EC3-1-1'de verilen tasarım denklemleri uyarınca etkin alanlarının (A_{eff}) hesaplanması gerekmektedir. Elemanın kayıpsız alanından yerel burkulma sonrası yük taşımadığı kabul edilen parçaların enkesit alanı çıkarılarak belirlenen etkin alan, EC3-1-5 Bölüm 4.4'e göre, Denklem (3.11) kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$A_{eff} = \rho A_c \tag{3.11}$$

Denklem (3.11)'de ρ plak burkulması için azaltma katsayısı, A_c ise kesitin basınç bölgesinde kalan brüt alanıdır. Bu bölümde eksenel basınç altındaki basınç elemanları ele alındığından, kesitin tamamı basınç bölgesindedir; dolayısıyla A_c kayıpsız enkesit alanına (A) eşittir. Plak burkulması için azaltma katsayısı ρ, ilgili enkesitin Sınıf 4 olarak belirlenen parçası için hesaplanmalıdır. EC3-1-5 Bölüm 4.4'e göre, azaltma katsayısı ρ, soğuk şekillendirilmiş I/H enkesitli elemanların başlıklarında Denklem (3.12) veya Denklem (3.13);

$$\rho = 1,0 \quad , \quad \text{eğer} \quad \bar{\lambda}_p \le 0,748 \tag{3.12}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^{\,2}} \le 1,0 \quad , \quad \text{eğer} \quad \bar{\lambda}_p > 0,748 \tag{3.13}$$

gövdelerinde ise Denklem (3.14) ve (3.15);

$$\rho = 1,0 \quad , \quad \text{eğer} \quad \bar{\lambda}_p \le 0,673 \tag{3.14}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3+\psi)}{\bar{\lambda}_p^{\,2}} \le 1,0 \quad , \quad \text{eğer} \quad \bar{\lambda}_p > 0,673 \tag{3.15}$$

kullanılarak belirlenmelidir.

Yukarıdaki denklemlerde, $\bar{\lambda}_p$, aşağıdaki denklemden hesaplanmalıdır;

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \tag{3.16}$$

Denklem (3.15)'te ψ, I ve H enkesitli elemanların gövde parçası için EC3-1-5 Tablo 4.1'e göre belirlenen gerilme oranıdır. Bu çalışmada eksenel basınç kuvvetine maruz kalan elemanlar için tasarım kuralları özetlendiğinden, ψ değeri 1,0'a eşit alınmıştır. Denklem (3.16)'da, σ_{cr} elastik plak burkulma gerilmesidir. Yönetmelikte $\bar{b}$ 'uygun genişlik' şeklinde isimlendirilmiş olup, EC3-1-1 Tablo 5.2'ye göre I ve H enkesitli elemanların başlıkları için c_f, gövdeleri için ise c_w olarak alınmalıdır. Denklem (3.16)'da t başlıklarda t_f'ye gövdelerde ise t_w'ye eşit alınmalı; ε Denklem (3.9)'dan hesaplanmalıdır. Denklem (3.16)'da, k_σ burkulma katsayısıdır. k_σ enkesitte oluşan gerilme dağılımına bağlı olup, I ve H enkesitli elemanların gövde parçaları için EC3-1-5 Tablo 4.1 ve Tablo 4.2 kullanılarak belirlenmelidir. Bu tez kapsamında, ψ=1,0 olarak alınacağından, k_σ burkulma katsayısı, bahsedilen tablolardan, gövde için 4,0 ve başlıklar için 0,43 olarak belirlenmiştir. Burkulma katsayısının gövdede başlıklardan daha büyük olması, gövdenin rijitleştirilmiş başlıkların ise rijitleştirilmemiş enkesit parçaları olmasından kaynaklanmaktadır.

3.2.3. Tasarım enkesit dirençlerinin belirlenmesi

EC3-1-1 Bölüm 6.3'e göre, basınç elemanlarının tasarımında göz önünde bulundurulması gereken ana koşullardan biri;

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \tag{3.17}$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (3.17)'de, N_{Ed} elemana etkiyen eksenel basınç kuvvetinin tasarım değeri olup arttırılmış yük birleşimleri kullanılarak belirlenmelidir. Ancak bu tezde yalnız kapasite hesapları yapıldığından, N_{Ed} değerlerinin belirlenmesi için herhangi bir işlem yapılmamıştır. Denklem (3.17)'de, $N_{c,Rd}$ düzgün basınç etkisinde enkesitin tasarım direncidir ve EC3-1-1 Bölüm 6.2.4'e göre, aşağıdaki denklemlerden uygun olan kullanılarak hesaplanmalıdır;

Sınıf 1, Sınıf 2, Sınıf 3 Enkesitler İçin: $N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}$ (3.18)

Sınıf 4 Enkesitler İçin: $N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}}$ (3.19)

Denklem (3.18) ve (3.19)'da A kayıpsız enkesit alan, f_y yapısal çeliğinin karakteristik akma gerilmesi, A_{eff} etkin alan, γ_{M0} ise kısmi katsayıdır. Düzgün basınç etkisindeki bir çelik yapı elemanının enkesit tasarım direnci ($N_{c,Rd}$), Denklem (3.18) ve (3.19)'da görüldüğü gibi genel itibarıyla kesit kapasitesini içermekte, enkesiti Sınıf 4 olmayan bir elemanda elemanın akma yükünün bir kısmi katsayıya bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Diğer bir ifadeyle, $N_{c,Rd}$ genel burkulma sınır durumlarının elemanın tasarımına etkilerini içermemektedir.

3.2.4. Tasarım burkulma dirençlerinin belirlenmesi

EC3-1-1 Bölüm 6.3'e göre, basınç elemanlarının tasarımında göz önünde bulundurulması gereken ana koşullardan ikincisi;

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \tag{3.20}$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (3.20)'de, N_{Ed} elemana etkiyen eksenel basınç kuvvetinin tasarım değeri, $N_{b,Rd}$ elemanının tasarım burkulma direncidir. EC3-1-1 Bölüm 6.3.1'e göre basınç elemanlarının tasarım burkulma direnci ($N_{b,Rd}$), aşağıdaki denklemlerden uygun olan kullanılarak hesaplanmalıdır;

Sınıf 1, Sınıf 2, Sınıf 3 Enkesitler İçin: $$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \tag{3.21}$$

Sınıf 4 Enkesitler İçin: $$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \tag{3.22}$$

Denklem (3.21) ve (3.22)'de χ ilgili burkulma modu için azaltma katsayısı, γ_{M1} ise Denklem (3.2)'de verilen kısmi katsayıdır.

Denklem (3.21) ve (3.22)'den fark edilebileceği gibi, basınç elemanlarının tasarım burkulma dirençlerinin ($N_{b,Rd}$) hesabı, tasarım enkesit direnclerinin ($N_{c,Rd}$) hesabına çok benzemektedir. Aslında, $N_{b,Rd}$ değerleri, $N_{c,Rd}$ değerlerinin azaltma katsayısı (χ) ile çarpılarak azaltılmasıyla belirlenmektedir. χ, bir azaltma katsayısının alabileceği en büyük değer olan 1'e eşit olduğunda, basınç elemanının tasarım burkulma direnci, tasarım enkesit direncine eşit olur. Diğer bir deyişle, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da önerilen sınıf değişimi yapılmadığı müddetçe bir basınç elemanı için hiçbir koşulda $N_{b,Rd}$ değeri $N_{c,Rd}$ değerinden büyük olamayacaktır.

Denklem (3.21) ve (3.22)'de bulunan azaltma katsayısı (χ) sıcak haddelenmiş I ve H enkesitli basınç elemanları için güçlü ve zayıf eksen etrafındaki eğilmeli burkulma ve burulmalı burkulma sınır durumları için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Bu sınır durumlardan en düşük azaltma katsayısı (χ) değerini veren burkulma modu, ilgili basınç elemanı için elemanın davranışını kontrol eden sınır durum olup, elemanın tasarım burkulma direncinin hesabında o burkulma modu için hesaplanan azaltma katsayısı (χ) kullanılmalıdır. EC3-1-1 Bölüm 6.3.1.2'ye göre, χ aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \left(\bar{\lambda}\right)^2}} \tag{3.23}$$

Φ için EC3-1-1 Bölüm 6.3.1.2'de sunulan eşitlik şu şekildedir;

$$\Phi = 0,5\left[1+\alpha\left(\bar{\lambda}-0,2\right)+(\bar{\lambda})^2\right] \tag{3.24}$$

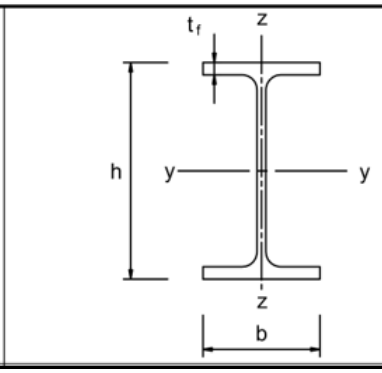
EC3-1-1 Bölüm 6.3.1.2'de, $\bar{\lambda}$ boyutsuz narinlik olarak adlandırılır ve Denklem (3.25) veya (3.26) kullanılarak belirlenmelidir;

Sınıf 1, Sınıf 2, Sınıf 3 Enkesitli Elemanlar İçin: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}}$ (3.25)

Sınıf 4 Enkesitli Elemanlar İçin: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}$ (3.26)

Denklem (3.24)'te α kusur katsayısı, N_{cr} ise ilgili burkulma modu için elemanın kayıpsız enkesit özellikleri kullanılarak hesaplanan kritik elastik kuvvettir.

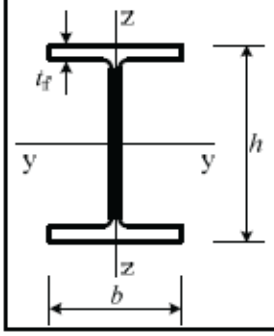
Kusur katsayısı (α), elemanın bazı enkesit özellikleri ve yapısal çelik kalitesi göz önünde bulundurularak, EC3-1-1 Tablo 6.2'den belirlenen burkulma eğrisine bağlıdır. EC3'te kullanılan eksen takımı, ÇYTHYEY'de tanımlanan eksen takımından farklıdır. EC3, I/H enkesitli profillerin enkesitlerine dik ekseni x, güçlü enkesit eksenini (başlıklarına dik ekseni) y, zayıf enkesit eksenini (başlıklarına dik ekseni) ise z ekseni olarak tanımlamaktadır. EC3-1-1 Bölüm 6.3.1.2'de, I/H enkesitli profillerin güçlü ve zayıf eksenlerdeki eğilmeli burkulma sınır durumları için kusur katsayıları farklı tanımlanmıştır. Tasarımda kullanılan burkulma eğrilerinin belirlenebilmesi için ilk olarak enkesit yüksekliği (h)'nin başlık genişliğine (b) oranı bulunmalıdır. h/b oranı 1,2'den büyük enkesitlerin burkulma eğrileri, bu değerden küçük olan enkesitlerin burkulma eğrilerinden farklıdır. EC3-1-1'e göre, 'uygun' burkulma eğrisi seçimini sağlayan ve Tablo 6.2'de sunulan tablonun I ve H enkesitli hadde profiller için olan bölümü Şekil 3.3'te sunulmuştur.

Enkesit		Sınırlar		Burkulma Ekseni	Burkulma Eğrisi	
					S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Hadde Profiller		h/b > 1,2	$t_f \leq 40$ mm	y – y z – z	a b	a_0 a_0
			40 mm < $t_f \leq 100$	y – y z – z	b c	a a
		h/b ≤ 1,2	$t_f \leq 100$ mm	y – y z – z	b c	a a
			$t_f > 100$ mm	y – y z – z	d d	c c

Şekil 3.3. EC3-1-1 Tablo 6.2'de I ve H enkesitli hadde profillerinin burkulma eğrilerinin belirlenebilmesi için verilen tablo [4]

Şekil 3.3'ten de anlaşılabileceği gibi, çelik basınç elemanlarının kusur katsayısının (α) belirlenmesi amacıyla seçilecek burkulma eğrileri, h/b oranı ve yapısal çelik kalitesiyle birlikte, başlık kalınlığına da (t_f) bağlıdır. Daha önce de belirtildiği gibi, tezde incelenenen profillerden, IPE, IPN, HEA, HEB ve HEM enkesitli profillerin hiçbirinin başlık kalınlığı 40 mm'yi aşmamaktadır. Fakat bazı HD enkesitli profillerin başlık kalınlığı 100 mm'den bile büyüktür. Bu tür profillerde, EC3-1-1 Tablo 6.2, mevcut haliyle kullanılamamaktadır. HD enkesitlerin burkulma eğrilerinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan literatür araştırması sonucu, Snijder ve diğerlerinin [21] başlık kalınlıkları 100 mm'yi aşan profilleri de kapsayacak şekilde oluşturdukları bir tasarım tablosuna ulaşılmıştır. Belirtilen tasarım tablosunun I/H enkesitli hadde profilleri için olan bölümü Şekil 3.4'te sunulmuştur. Bu tezde başlık kalınlığı 100 mm'den büyük olan profillerin direnç hesaplarında bu tablo kullanılmıştır.

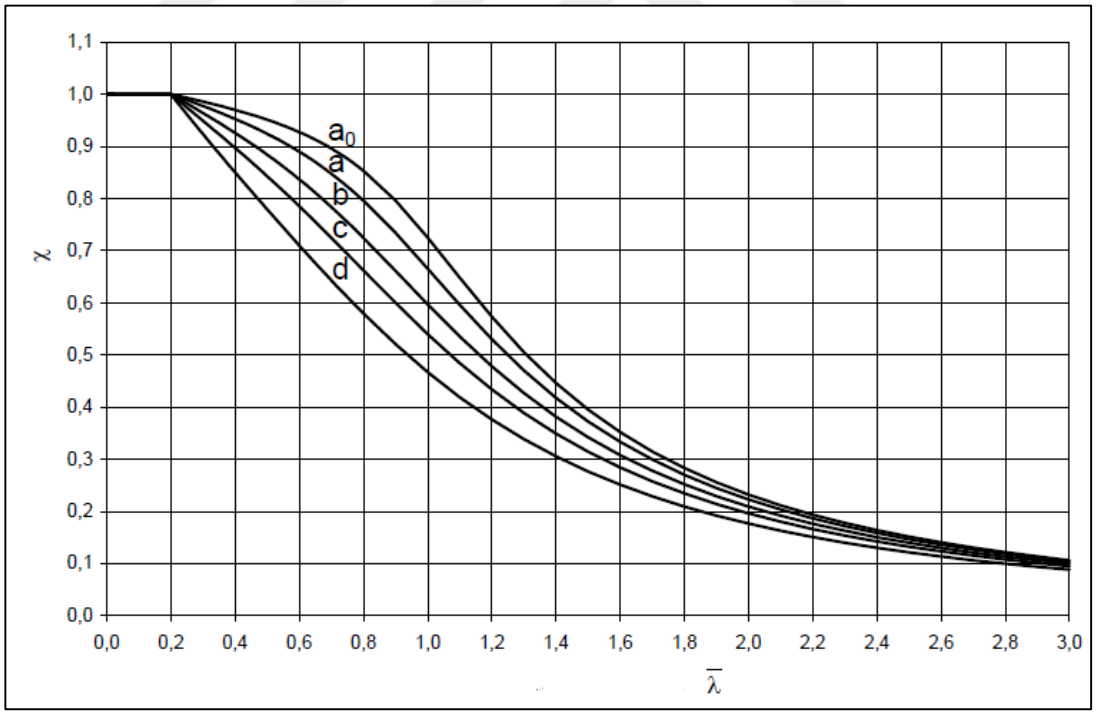
Şekil 3.3 ve 3.4'te görüldüğü gibi, I ve H enkesitli hadde profilleri için simgeleri a_0, a, b, c ve d olan beş farklı burkulma eğrisi tanımlanmıştır. Şekil 3.3 veya 3.4'ten ilgili burkulma moduna uyan burkulma eğrisi seçildikten sonra, EC3-1-1 Tablo 6.1'de bulunan ve Şekil 3.5'te verilen kusur katsayılarından (α) uygun olan belirlenip ilgili burkulma modu için azaltma katsayısı (χ) hesaplanabilir.

Haddelenmiş I ve H enkesitler	Sınırlar		Burkulma ekseni	Burkulma Eğrileri	
				S235 S275 S355 S420	S460 S500
	$h/b > 1.2$	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	a b	a_0 a_0
		$40 < t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c	a a
		$t_f > 100$ mm	y-y z-z	b c	a b
	$h/b \leq 1.2$	$t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c	a a
		$t_f > 100$ mm	y-y z-z	d d	c c

Şekil 3.4. Sıcak haddelenmiş I ve H enkesitli çelik yapı elemanları için Snijder ve diğerleri [21] tarafından önerilen burkulma eğrileri

Burkulma Eğrisi	a_0	a	b	c	d
Kusur katsayısı (α)	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Şekil 3.5. EC3-1-1'e göre kusur katsayılarının değerleri [4]



Şekil 3.6. EC3-1-1'de azaltma katsayılarının (χ) boyutsuz narinliğe ($\bar{\lambda}$) bağlı olarak tanımlandığı burkulma eğrileri [4]

Azaltma katsayısı (χ), Şekil 3.5'te sunulan grafik kullanılarak da belirlenebilir. Şekil 3.6'dan da görüldüğü gibi azaltma katsayısının (χ) grafik yoluyla belirlenmesinde

boyutsuz narinlik ($\bar{\lambda}$) bilinmelidir. Denklem (3.25) ve (3.26)'ya göre boyutsuz narinliğin belirlenebilmesi için ilgili burkulma modu için kritik elastik kuvvet (N_{cr}) hesaplanmalıdır.

3.2.4.1. Boyutsuz narinliklerin hesaplanması

EC3-1-1'de Bölüm 6.3.1.3'te, eğilmeli burkulma sınır durumları için, boyutsuz narinliklerin aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanabileceği belirtilmektedir;

Sınıf 1, Sınıf 2, Sınıf 3 Enkesitli Elemanlar İçin: $$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i}\frac{1}{\lambda_1} \tag{3.28}$$

Sınıf 4 Enkesitli Elemanlar İçin: $$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i}\frac{\sqrt{\frac{A_{eff}}{A}}}{\lambda_1} \tag{3.29}$$

Denklem (3.28) ve Denklem (3.29)'da λ_1 , aşağıdaki eşitlikten hesaplanmalıdır;

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{\frac{E}{f_y}} \tag{3.30}$$

Denklem (3.28) ve Denklem (3.29)'da, L_{cr} elemanın ele alınan burkulma düzlemindeki burkulma boyudur. Bu tezde, bütün genel burkulma modlarındaki burkulma boylarının eleman boyuna eşit olduğu kabul edildiğinden, $L_{cry}=L_{crx}=L_{crz}=L$ olarak alınmıştır.

EC3-1-1 Bölüm 6.3.1.4'te, burulmalı burkulma sınır durumu için boyutsuz narinlik ($\bar{\lambda}_T$) Denklem (3.31) ve (3.32)'deki gibi tanımlanmaktadır;

Sınıf 1, Sınıf 2, Sınıf 3 Enkesitli Elemanlar İçin: $$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \tag{3.31}$$

Sınıf 4 Enkesitli Elemanlar İçin: $$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \tag{3.32}$$

İlgili bölümde, N_{cr}'nin elastik eğilmeli-burulmalı burkulma kuvvetine ($N_{cr,TF}$) eşit olduğu, ancak elastik burulmalı burkulma kuvvetinden ($N_{cr,T}$) de küçük olması gerektiği belirtilmektedir. Ancak, ne $N_{cr,TF}$, ne de $N_{cr,T}$ için ilgili bölümde formül

verilmiştir. Tezde incelenen profillerin tamamının çift simetri eksenli enkesitlere sahip olması nedeniyle, direnç hesaplarında yalnız $N_{cr,T}$'ye gerek duyulmuş; ilgili formül, EC3-1-1 yönetmeliğinin uygulama örneklerini içeren bir kaynaktan [20] alınmıştır;

$$N_{cr,T} = \left(\frac{\pi^2 E I_w}{\left(L_{cr,z}\right)^2} + G I_T \right) \frac{1}{i_y^{\,2} + i_z^{\,2}} \tag{3.33}$$

Denklem (3.33)'te, I_w çarpılma sabiti, I_T burulma sabiti, i_y ve i_z sırasıyla güçlü ve zayıf eksendeki atalet yarıçaplarıdır.

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te, burulmalı burkulma için burkulma eğrileri tanımlanmadığı fark edilebilir. EC3-1-1 Bölüm 6.3.1.2.(3)'te burulmalı burkulma için, zayıf eksen etrafındaki eğilmeli burkulma için tanımlanan burkulma eğrilerinin kullanılabileceği belirtilmektedir.

EC3-1-1 Bölüm 6.3.1.2.(4)'te, Denklem (3.34)'te tanımlanan koşullardan en az birinin sağlanması durumunda, basınç elemanının tasarım direnci belirlenirken burkulma sınır durumlarının göz ardı edilebileceği ve yalnız enkesit kontrollerinin yapılmasının yeterli olacağı belirtilmektedir;

$$\bar{\lambda} \le 0,2 \quad \text{veya} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \le 0,04 \tag{3.34}$$

Şekil 3.5'ten de fark edilebileceği gibi, boyutsuz narinlik ($\bar{\lambda}$) 0,2'den küçük olduğunda, azaltma katsayısı (χ) 1,0'a eşit olmaktadır; yani genel burkulma sınır durumlarının elemanın eksenel basınç kuvveti direncine etkisi göz ardı edilmektedir. Denklem (3.34)'te tanımlanan ikinci koşul ise, elemana etkiyen basınç kuvvetinin tasarım değerinin (N_{Ed}), basınç elemanı için hesaplanan elastik kritik kuvvetin (N_{cr}) %4'üne eşit veya daha küçük olması durumunu ifade etmektedir. Bu durumda, elemana etkiyen yük çok küçük olduğundan, burkulma sınır durumlarının dikkate alınmasına gerek yoktur.

4. EKSENEL BASINÇ ETKİSİNDEKİ I VE H ENKESİTLİ ÇELİK HADDE ELEMANLARININ ÇYTHYEY VE EC3'E GÖRE TASARIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde, sıcak haddelenmiş I ve H enkesitli çelik basınç elemanları için Türkiye (ÇYTHYEY) ve Avrupa (EC3) çelik yönetmeliklerinde tanımlanan tasarım esasları karşılaştırılarak, iki yönetmelik arasındaki temel farklılıklar ortaya konulmuştur. Ayrıca, ülkemizde ve Avrupa'da yaygın şekilde kullanılan toplam 153 adet I ve H profilin (Tablo 4.1), farklı boy/narinlik ve çelik kalitelerindeki kapasiteleri, yani ÇYTHYEY'ye göre tasarım basınç kuvveti dayanımları ($\phi_c P_n$), EC3'e göre tasarım burkulma dirençleri ($N_{b,Rd}$), hesaplanarak, yönetmeliklerin güvenlik seviyeleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.1. Tez kapsamında incelenen profillerin numaraları

Enkesit Grubu	Profil Numarası
IPE	80, 100, 120,140, 160, 180, 200, 220, 240, 270, 300, 330, 360, 400, 450, 500, 550, 600
IPN	80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380, 400, 450, 500, 550, 600
HEA, HEB , HEM	100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 800, 900, 1000
HD	260x54,1; 260x68,2; 260x93,0; 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

Kapasite hesapları, Tablo 4.1'den de görülebileceği gibi, 18 adedi IPE, 21 adedi IPN olmak üzere toplam 39 I enkesitli profil, 24'er adedi HEA, HEB ve HEM ve 42 adedi HD olmak üzere toplam 114 adet H enkesitli profil için yapılmıştır.

Eleman kapasiteleri ($\phi_c P_n$ ve $N_{b,Rd}$) her iki yönetmelikte de eleman boyuna/narinliğine bağlı olduğu için, farklı eleman boy ve narinlikleri için kapasite hesapları ayrı ayrı yapılmış, incelenen her enkesit ve çelik kalitesi için kapasite-boy ve kapasite-narinlik

eğrileri çizdirilmiştir. Eleman boylarına göre çizdirilen grafikler için, eleman kapasiteleri 1 m'lik eleman boyundan başlayarak 15 m'lik eleman boyuna kadar birer metre arttırılarak hesaplanmıştır. Narinliklere göre çizdirilen grafiklerde ise eleman narinlikleri 5'ten 200'e kadar beşer beşer arttırılmıştır. Eleman kapasiteleri; IPE, IPN, HEA, HEB ve HEM enkesitli profiller için S235, S275 ve S355; HD enkesitli profiller için ise S275, S355 ve S460 yapısal çelik kaliteleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. İncelenen profillerden, enkesit sınıfı ÇYTHYEY'ye narin, EC3'e Sınıf 4 olan profillerin kapasite hesaplarında etkin alanlar kullanılmıştır.

İncelenen tüm profil ve çelik kaliteleri için tasarım basınç dayanımları ($\phi_c P_n$) ve tasarım burkulma dirençleri ($N_{b,Rd}$) hesaplandıktan sonra, tasarım dirençleri tasarım dayanımlarına oranlanarak "direnç/dayanım" oranları ($N_{b,Rd}/ \phi_c P_n$ oranları) elde edilmiştir. Bir basınç elemanın direnç/dayanım oranının (yani, "kapasite oranı"nın) 1'den büyük olması, ÇYTHYEY'nin incelenen enkesit, boy/narinlik ve çelik kalitesi için elemanın kapasitesini EC3'e kıyasla daha güvenli tarafta kalarak hesaplattığını; 1'den küçük olması ise kapasite hesaplarında EC3'ün daha güvenli tarafta kaldığını ifade etmektedir.

4.1. Malzeme Özelliklerinin Karşılaştırılması

Tezin kapsamında ele alınan yapısal çeliklerin malzeme özelliklerinden bazılarının ÇYTHYEY ile EC3'te farklı tanımlandığı görülmüştür. ÇYTHYEY'de yapısal çeliğin elastisite modülü (E) için verilen değer 200 GPa iken, EC3'te bu değer 210 GPa'dır. Bu durumda, aynı enkesit ve boya sahip iki basınç elemanı için, ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan elastik eğilmeli burkulma yükü ($F_e \times A$), EC3'e göre hesaplanan elastik eğilmeli burkulma kuvvetinden (N_{cr}) daha küçük olmaktadır. Örneğin, HEB220 enkesitinin L=3m boyundaki elastik burkulma gerilmesi (F_e) ile kayıpsız alanının (A) çarpılmasıyla ortaya çıkan değer 32050 kN iken, aynı enkesit ve eleman boyu için EC3'e göre hesaplanan N_{cr} değeri 33622 kN olmaktadır.

Benzer şekilde, ÇYTHYEY'de yapısal çeliğin kayma modülü G=77,2 GPa olarak tanımlanırken, EC3'te bu değer G= 81,0 GPa olarak verilmiştir. Eleman kapasiteleri belirlenirken, çeliğin kayma modülüne, burulmalı burkulma sınır durumu için yapılan hesaplarda ihtyaç duyulduğu hatırlandığında, ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan elastik

burulmalı burkulma yüklerinin, EC3'e göre hesaplananlardan daha küçük olacağı fark edilebilir.

Şekil 2.1, Tablo 2.1 ve Tablo 2.2 ile Şekil 3.1, Tablo 3.1 ve Tablo 3.2 karşılaştırıldığında, ÇYTHYEY'ye göre dayanım hesaplarında kullanılan karakteristik akma gerilmeleri (F_y) ile EC3'e göre direnç hesaplarında kullanılan karakteristik akma dayanımlarının (f_y) neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Yalnız, Tablo 2.1'de TS EN 10025-2'ye göre, enkesit kalınlığı 63 mm ile 80 mm arasında kalan profiller için tanımlanan akma dayanımlarının Tablo 3.1'de EN 10025-2'e göre tanımlanan akma dayanımlarından farklı olduğu belirlenmiştir. Örnek olarak, S275 çelik kalitesi için Tablo 2.1'de F_y= 255 MPa olarak tanımlanırken, Tablo 3.1'de f_y= 245 MPa olarak verilmektedir. Her ne kadar yalnız belirtilen kalınlık grubunda gözlenen bu farkın çeviri sırasında yapılan bir yazım hatası olduğu düşünülse de hesaplarda, tablolarda verilen değerler hiçbir değişiklik yapılmadan kullanılmıştır. Zaten bu farklılığın incelenen tüm enkesit grupları için değil, sadece HD enkesitler için yapılan hesaplamalarda önem kazanacağı unutulmamalıdır; çünkü tezde incelenen profiller arasında HD enkesitli profillerin haricinde, başlık kalınlığı 63 mm'yi geçen profil bulunmamaktadır. Ayrıca, belirtilen akma dayanımlarının arasındaki farkın da çok küçük (yaklaşık %4) olduğu unutulmamalıdır.

4.2. Dayanım Katsayısı İle Kısmi Katsayıların Karşılaştırılması

ÇYTHYEY'de, karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımları (P_n), değeri 0,90'a eşit olan bir dayanım katsayısıyla çarpılarak tasarım basınç kuvveti dayanımlarına ($\phi_c P_n$) dönüştürülmektedir. Diğer bir ifadeyle, ÇYTHYEY, tasarımda elemanların karakteristik basınç kapasitelerinin %10 azaltılarak kullanılmasını şart koşmaktadır. EC3'te ise direnç azaltma katsayısı olarak kısmi katsayılar (γ_{M0}, γ_M vb.) tanımlanmıştır. Aslında EC3, kısmı katsayıların tanımlarını ülkelere bırakmıştır; ancak, ülkemize ait, bu tür katsayıların tanımlandığı, bir milli ek bulunmadığından, bu tezde yapılan hesaplarda, EC3-1-1'de önerilen değerler; yani, $\gamma_{M0}=\gamma_{M1}=1{,}00$ kullanılmıştır. Bu durumda, EC3'e göre yapılan hesaplarda, karakteristik basınç dirençleri tasarım dirençlerine çevrilirken herhangi bir azaltma yapılmamıştır. İki yönetmeliğe göre hesaplanan eleman kapasiteleri karşılaştırılırken, bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

4.3. Tasarım Kapasitelerinin Hesap Adımlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, sıcak haddelenmiş I/H enkesitli bir basınç elemanının tasarım basınç kuvveti dayanımı ($\phi_c P_n$) ile tasarım burkulma direnci ($N_{b,Rd}$) hesabı için ÇYTHYEY ve EC3'te tanımlanan tasarım esasları karşılaştırılacaktır.

4.3.1. Enkesit sınıflandırmalarının karşılaştırılması

I veya H enkesitli bir çelik hadde profilinin eksenel basınç kuvveti kapasitesi belirlenirken yerel burkulma sınır durumunun tasarıma dahil edilebilmesi için, hem ÇYTHYEY'ye hem de EC3'e göre yapılan hesaplarda, elemanın enkesitinin sınıflandırılması gerekmektedir. İki yönetmelikte tanımlanan sınıflandırma esasları genel hatlarıyla aynı olmakla beraber, parça ve sınır narinliklerinin tanımlarında ufak farklılıklar göze çarpmaktadır.

ÇYTHYEY'de başlık narinlikleri (λ_f), başlık genişliklerinin yarısı ($b_f/2$) başlık kalınlıklarına (t_f) bölünerek hesaplanmaktadır. Buna karşın, EC3'te başlık narinlikleri (c_f / t_f) yarım başlığın düz genişliği başlık kalınlığına (t_f) bölünerek hesaplanmaktadır. Bu nedenle, tezde incelenen bütün profiller için, λ_f değerleri c_f / t_f değerlerinden büyüktür. Ancak, bu durum gövde narinlikleri için geçerli değildir. Denklem (2.4), (3.4) ve (3.6)'dan da görülebileceği gibi, gövde narinliklerinin hesabında kullanılan enkesit boyutlarından ÇYTHYEY'de h, EC3'te ise c_w simgeleriyle ifade edilen boyut enkesitin düz gövde yüksekliğine eşit olduğundan, ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan gövde narinlik değerleri ile EC3'e göre hesaplananlar aynı çıkmaktadır.

Sıcak haddelenmiş I veya H enkesitli bir çelik basınç elemanının enkesitinin ÇYTHYEY ve EC3'e göre sınıflandırılmasında kullanılan sınır narinlik değerleri, her iki yönetmelikte de yapısal çeliğinin karakteristik akma gerilmesine bağlı olmakla birlikte farklı denklemlerden hesaplandıkları için farklı değerler almaktadır. Bölüm 3'te belirtildiği gibi, EC3 1-1'e göre, Sınıf 1, 2 ve 3 enkesitli elemanların tasarım dirençleri hesaplanırken kullanılması gereken denklemler tamamen aynı olduğundan, bu tezde incelenen enkesitler için, sadece 'Sınıf 4 olmayan' ve Sınıf 4 olan enkesitlerin belirlenmesine karar verilmiştir. Bu amaçla, yalnız Sınıf 3 ile Sınıf 4 arasındaki sınır narinlikler hesaplanmış; ilgili sınır narinlikler başlıklar için "$(c_f / t_f)_{3,4}$" gövdeler için ise "$(c_w / t_w)_{3,4}$" simgeleriyle ifade edilmiştir. ÇYTHYEY ve EC3'te karakteristik akma

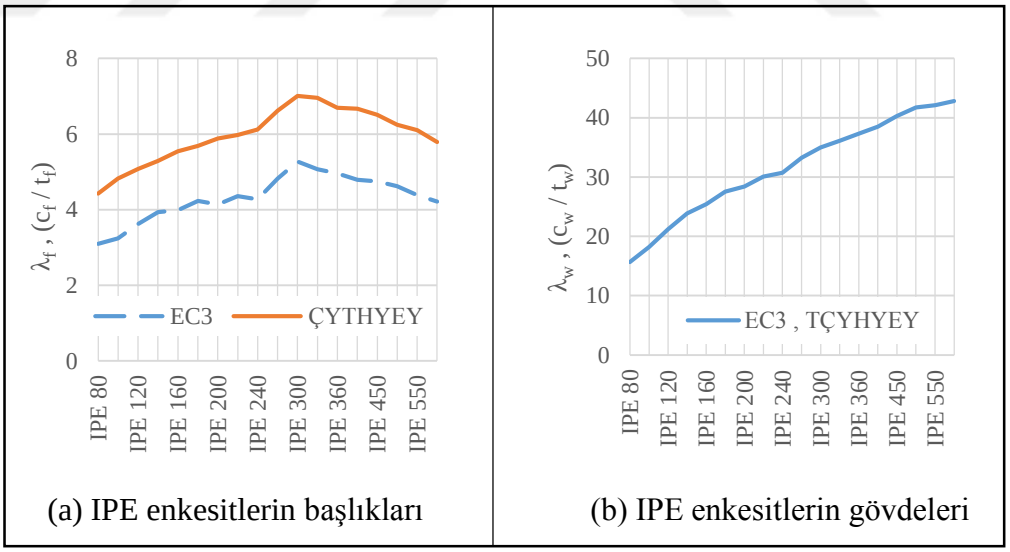
gerilmesi ve dayanımları (yani, F_y ve f_y değerleri) enkesit parçalarının kalınlıklarına bağlı olarak tanımlandığından, sınır değerler incelenen tüm enkesit kalınlıkları ve çelik kaliteleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu aşamada, F_y ve f_y değerleri belirlenirken, yalnız başlık kalınlıklarının dikkate alındığı belirtilmelidir. Yani, başlık kalınlığı farklı bir kalınlık grubunda, gövde kalınlığı farklı bir kalınlık grubunda olan profillerde, F_y ve f_y değerleri başlık ve gövde parçaları için farklı alınmamış, gövdeler için de başlıklar için belirlenen değerler kullanılmıştır. Tezin kapsamında kapasite hesapları yapılan enkesit kalınlıkları ve çelik kaliteleri için, Denklem (2.3), (3.7) ve (3.8) kullanılarak hesaplanan sınır narinlikler, başlıklar için Tablo 4.2'de ve gövdeler için Tablo 4.3'te sunulmuştur. S235 çelik kalitesi, bu tezde enkesit parçalarının kalınlığı 40 mm'yi aşan profillerde kullanılmadığından, bu çelik kalitesi için sınır narinlik değerleri hesaplanmamıştır. Tablo 4.1'de listelenen tüm enkesitlerin başlık narinlikleri (ÇYTHYEY için λ_f, EC3 için (c_f/t_f)) ve gövde narinlikleri (ÇYTHYEY için λ_w, EC3 için (c_w/t_w)) Denklem (2.4), (3.3) ve (3.4) kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.2. Başlıklar için ÇYTHYEY ve EC3'e göre hesaplanan sınır narinlik değerleri

Başlıklar İçin	$t \leq 40$ mm için			
Çelik Kalitesi	S235	S275	S355	S460
λ_{rf}	16,34	15,10	13,29	11,94
$(c_f/t_f)_{3,4}$	14,00	12,94	11,39	10,23
	$40< t \leq 63$ mm için			
λ_{rf}	-	15,68	13,68	12,08
$(c_f/t_f)_{3,4}$	-	13,44	11,73	10,35
	$63< t \leq 80$ mm için			
λ_{rf}	-	15,68	13,68	12,37
$(c_f/t_f)_{3,4}$	-	13,71	11,90	10,60
	$80< t \leq 100$ mm için			
λ_{rf}	-	16,34	14,11	12,52
$(c_f/t_f)_{3,4}$	-	14,00	12,09	10,73
	$100< t \leq 150$ mm için			
λ_{rf}	-	16,70	14,58	12,76
$(c_f/t_f)_{3,4}$	-	14,31	12,50	10,94

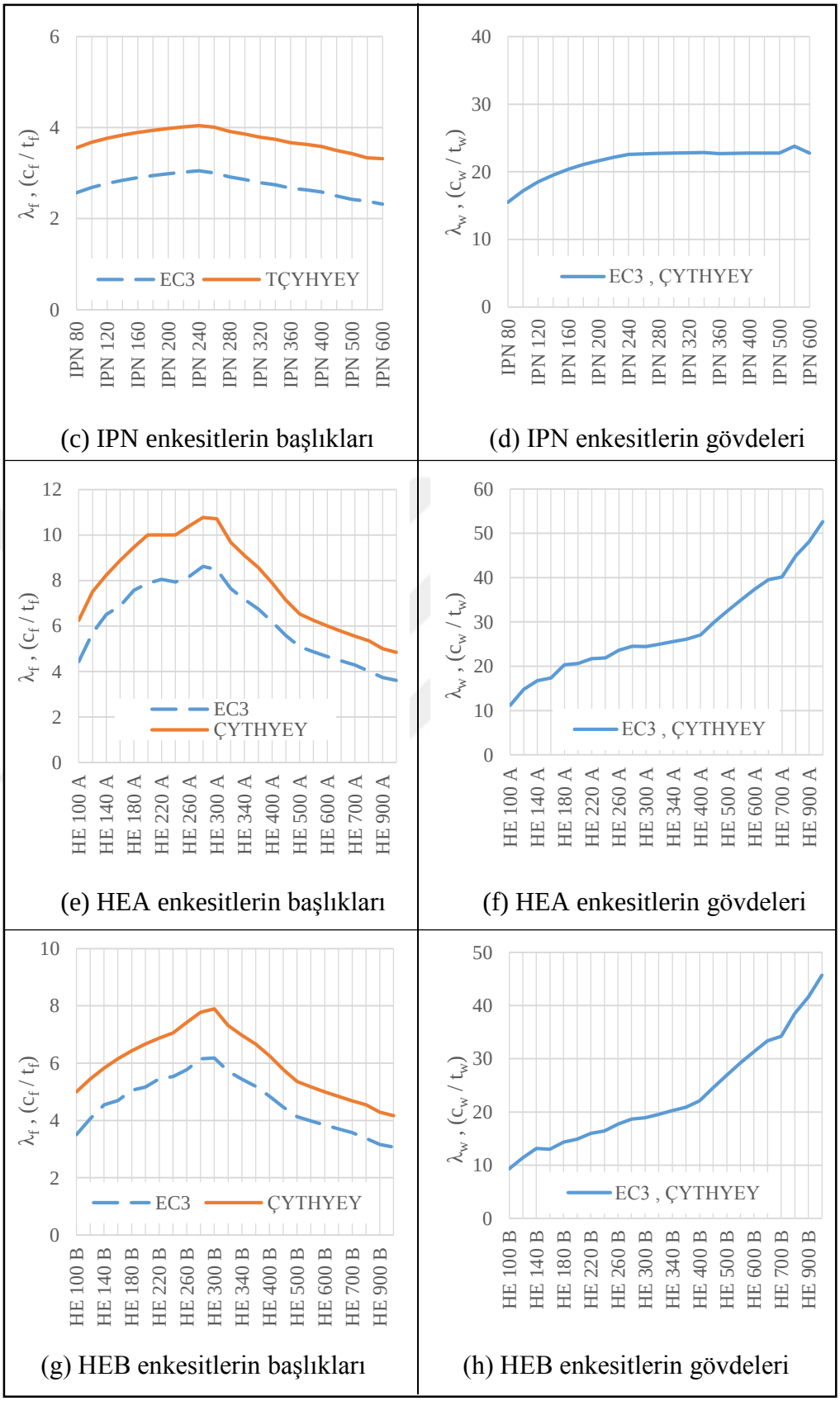
Tablo 4.3. Gövde için ÇYTHYEY ve EC3'e göre hesaplanan sınır narinlik değerleri

Gövde İçin	t ≤ 40 mm için			
Çelik Kalitesi	S235	S275	S355	S460
λ_{rw}	43,47	40,18	35,37	31,77
$(c_w/t_w)_{3,4}$	42,00	38,83	34,17	30,69
	40< t ≤63 mm için			
λ_{rw}	-	41,73	36,41	32,13
$(c_w/t_w)_{3,4}$	-	40,32	35,18	31,05
	63< t ≤80 mm için			
λ_{rw}	-	41,73	36,41	32,91
$(c_w/t_w)_{3,4}$	-	41,13	35,71	31,80
	80< t ≤100 mm için			
λ_{rw}	-	43,47	37,54	33,32
$(c_w/t_w)_{3,4}$	-	42,00	36,28	32,19
	100< t ≤150 mm için			
λ_{rw}	-	44,42	38,80	33,96
$(c_w/t_w)_{3,4}$	-	42,92	34,49	32,81



(a) IPE enkesitlerin başlıkları (b) IPE enkesitlerin gövdeleri

Şekil 4.1. Tezin kapsamında incelenen bütün profillerin ÇYTHYEY ve EC3'e göre başlık ve gövde narinliklerinin karşılaştırılması

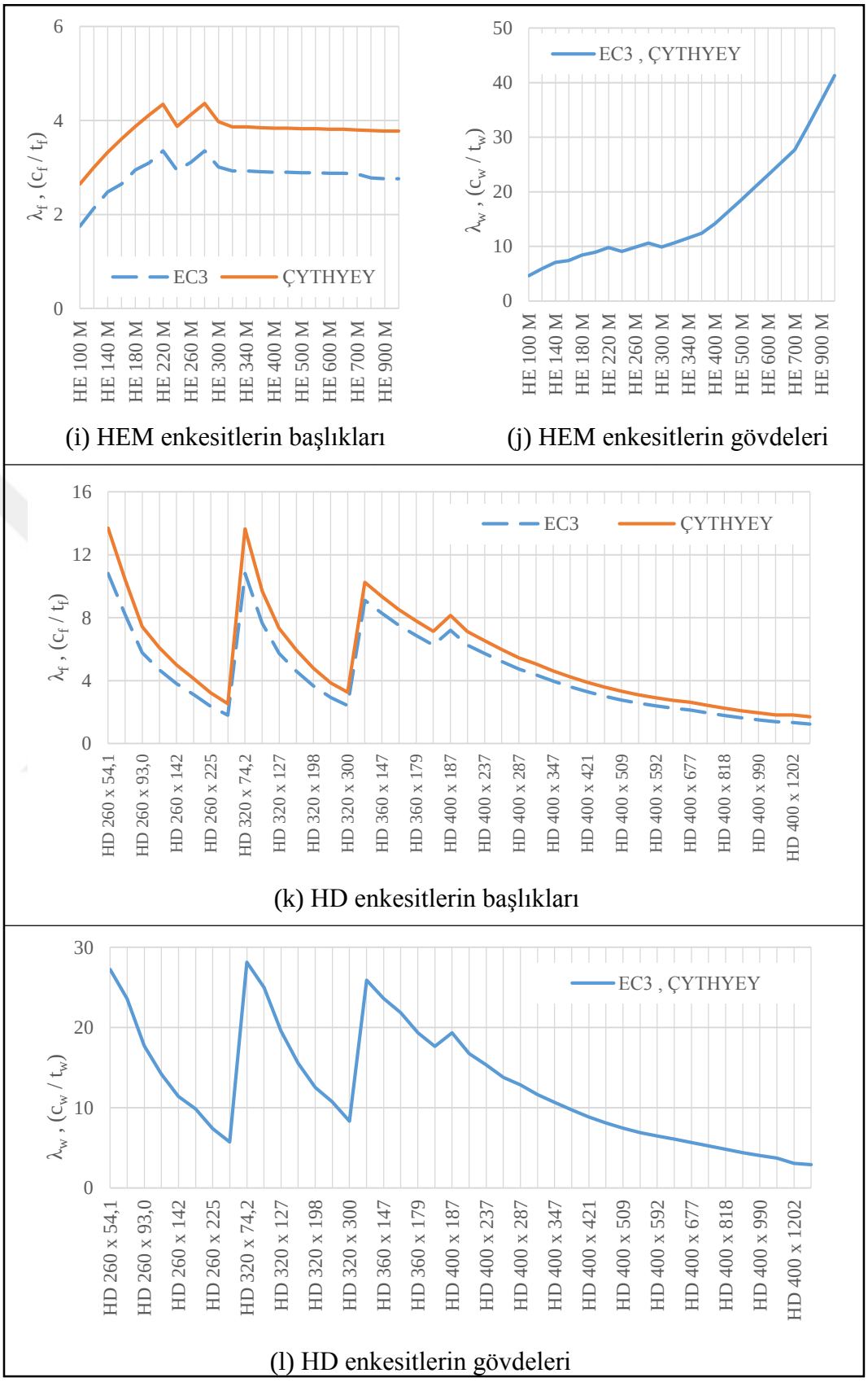


(c) IPN enkesitlerin başlıkları (d) IPN enkesitlerin gövdeleri

(e) HEA enkesitlerin başlıkları (f) HEA enkesitlerin gövdeleri

(g) HEB enkesitlerin başlıkları (h) HEB enkesitlerin gövdeleri

Şekil 4.1.(Devam) Tezin kapsamında incelenen bütün profillerin ÇYTHYEY ve EC3'e göre başlık ve gövde narinliklerinin karşılaştırılması



(i) HEM enkesitlerin başlıkları

(j) HEM enkesitlerin gövdeleri

(k) HD enkesitlerin başlıkları

(l) HD enkesitlerin gövdeleri

Şekil 4.1.(Devam) Tezin kapsamında incelenen bütün profillerin ÇYTHYEY ve EC3'e göre başlık ve gövde narinliklerinin karşılaştırılması

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, IPE enkesitlerin başlık narinlikleri IPE300 enkesitine kadar enkesit numarası arttıkça artarken, sonrasında azalmaktadır. IPN enkesitlerin başlık narinlerinde ise böyle bir durum söz konusu değildir ve incelenen tüm enkesit grupları içerisinde başlık narinlikleri en az değişkenlik gösteren enkesitler IPN enkesitlerdir; aldıkları değerler EC3 için 2,3 ile 3,1 arasında, ÇYTHYEY için ise 3,3 ile 4,1 arasında değişmektedir. HEA, HEB ve HEM enkesitler kendi aralarında değerlendirilebilirler çünkü profil numaraları birebir aynı şekilde artmaktadır. Aynı profil numaralarına sahip (Örneğin HEA100, HEB100, HEM100) HE enkesit grupları içerisinde başlık narinliği en küçük olanlar HEM, sonrasında HEB, en büyük başlık narinliğine sahip enkesitler ise HEA enkesitlerdir. Bunun sebebi HEA, HEB ve HEM'lerde aynı profil numarası göz önüne alındığında başlık kalınlıklarının (t_f) HEA'lardan HEM enkesitlere gidildikçe artmasıdır. HD enkesitler ise Şekil 4.1(k)'dan da anlaşılacağı gibi başlık narinlikleri en fazla olan enkesitlerdir. Tablo 4.1'de verilen diğer enkesit gruplarıyla karşılaştırıldığında HD enkesitlerin başlık genişlikleri (b_f) en büyük olan profillere sahip enkesit grubu olduğu söylenebilir. Bu sebeple en büyük başlık narinlikleri HD enkesitlerde görülmektedir. HD enkesitlerin başlık narinlikleri ÇYTHYEY'ye göre hesaplandığında 1,7 ile 13,7 arasında, EC3'e göre hesaplandığında ise 1,2 ile 10,9 arasında değişen değerler almaktadır.

Daha önce de belirtildiği gibi, her iki yönetmelik de gövde narinliklerini aynı şekilde tanımladıklarından, tezde incelenen enkesitlerin tamamının gövde narinlikleri her iki yönetmelik için de aynıdır. Genel olarak, IPE, HEA, HEB ve HEM enkesitlerin gövde narinlikleri, profil numaraları büyüdükçe artma eğilimindeyken, IPN ve HD enkesitlerde bu durum geçerli değildir. IPN enkesitler başlık narinliklerinde olduğu gibi gövde narinliklerinde de incelenen tüm enkesit grupları arasında enkesit numarasına göre değişkenliği en az olan enkesitlerdir ve gövde narinlikleri 15 ile 25 arasında değişen değerlere sahiptir. HD enkesitlerin gövde narinlikleri ise Şekil 4.1(l)'de de gösterildiği gibi, keskin geçişlere sahip artış ve azalışlar göstermektedir.

Şekil 4.1'den de anlaşılabileceği gibi istisnasız tüm enkesitlerin ÇYTHYEY ve EC3 için başlık narinlikleri, gövde narinliklerinden çok daha küçüktür. Aynı şekilde Tablo 4.2 ve 4.3'te de başlıklar için hesaplanan sınır narinlik değerleri gövdeler için hesaplananlardan daha küçüktür. Bunun sebebi, Bölüm 2 ile Bölüm 3'te de anlatıldığı gibi, rijitleştirilmiş enkesit parçaları olan gövdelerin burkulma dayanımlarının

rijtileştirilmemiş enkesit parçaları olan başlıkların burkulma dayanımlarından çok daha yüksek olmasıdır.

Tablo 4.1'de verilen tüm profiller için hesaplanan başlık ve gövde narinliklerinin her enkesit grubundaki en büyük ve en küçük değerleri Tablo 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.4. Tezin kapsamında incelenen profil gruplarında ÇYTHYEY ve EC3'e göre hesaplanan en büyük ve en küçük başlık ve gövde narinlikleri

	IPE	IPN	HEA	HEB	HEM	HD
$\lambda_{f,max}$	7,01	4,05	10,77	7,89	4,36	13,68
$(c_f/t_f)_{max}$	5,28	3,05	8,62	6,18	3,36	10,82
$\lambda_{f,min}$	4,42	3,32	4,84	4,17	2,65	1,70
$(c_f/t_f)_{min}$	3,10	2,32	3,60	3,07	1,75	1,24
$\lambda_{w,max}$	42,83	23,45	52,61	45,68	41,33	28,13
$(c_w/t_w)_{max}$	42,83	23,45	52,61	45,68	41,33	28,13
$\lambda_{w,min}$	15,68	15,13	11,20	9,33	4,67	2,90
$(c_w/t_w)_{min}$	1,68	15,13	11,20	9,33	4,67	2,90

Tablo 4.4'te verilen en büyük ve en küçük narinliklerin, her iki yönetmelikte de aynı enkesitlerde hesaplandığı belirlenmiştir. Kendi profil gruplarında, IPE300, IPN240, HEA280, HEB300, HEM280 ve HD320x74,2 profillerinin en büyük , IPE80, IPN600, HEA1000, HEB1000, HEM100 ve HD400x1299 profillerinin ise en küçük başlık narinliklerine sahip oldukları saptanmıştır. Gövde narinlikleri ise en büyük değerlerini IPE600, IPN550, HEA1000, HEB1000, HEM280 ve HD320×74,2 profillerinde, en küçük değerlerini ise IPE80, IPN80, HEA100, HEB100, HEM100 ve HD400x1299 profillerde almaktadır.

Tablo 4.2 ve 4.3'te yer alan sınır narinliklerle, Şekil 4.1'de verilen narinlikler karşılaştırılıp; ÇYTHYEY'ye göre narin, EC3'e göre Sınıf 4 enkesite sahip profiller belirlenerek Tablo 4.5'te listelenmiştir. Enkesit sınıflandırmalarında, IPE, IPN, HEA, HEB ve HEM enkesitler için S235, S275 ve S355 çelik kalitelerinin, HD enkesitler için ise S275, S355 ve S460 çelik kalitelerinin dikkate alındığı hatırlatılmalıdır. Tablo 4.5'te de gösterildiği gibi, S235, S275 ve S355 çelik kaliteleri arasından, en fazla narin/Sınıf 4 enkesit, S355 çelik kalitesinde hesaplanmıştır; çünkü her iki yönetmelik için de akma dayanımı arttıkça sınır narinlikler azalmaktadır.

Tablo 4.5 ÇYTHYEY'ye göre narin, EC3'e göre Sınıf 4 enkesite sahip profiller

	Çelik Kalitesi	PROFİLLER					
		IPE	IPN	HEA	HEB	HEM	HD
ÇYTHYEY (Narin enkestler)	S235	-	-	800 900 1000	1000	-	-
	S275	450 500 550 600	-	800 900 1000	900 1000	-	-
	S355	330 360 400 450 500 550 600	-	600 650 700 800 900 1000	800 900 1000	900 1000	*260×54,1* *320×74,2*
	S460	-	-	-	-	-	260×54,1 320×74,2
EC3 (Sınıf 4 enkesitler)	S235	*550* *600*	-	800 900 1000	1000	-	-
	S275	450 500 550 600	-	*650* *700* 800 900 1000	900 1000	*1000*	-
	S355	*300* 330 360 400 450 500 550 600	-	*550* 600 650 700 800 900 1000	*700* 800 900 1000	900 1000	-
	S460	-	-	-	-	-	260×54,1 320×74,2

İncelenen 6 enkesit grubu içerisinde narin/Sınıf 4 enkesite en fazla sahip olan profil grubu IPE ve HEA'lardır. IPN enkesitlerde, incelenen hiçbir çelik kalitesinde, narin/Sınıf 4 enkesite rastlanmamıştır. Diğer bir deyişle, her iki yönetmelik için de,

incelenen IPN profillerin hiç birinde davranışı yerel burkulma sınır durumu kontrol etmemektedir.

Tablo 4.5'e göre, S235 çelik kalitesi için yapılan sınıflandırmalarda, IPE profillerde narin enkesitli profile rastlanmamıştır; buna karşın, IPE550 ve IPE600 profillerinin Sınıf 4 enkesite sahip oldukları belirlenmiştir. Aynı çelik kalitesi için, HEA ve HEB profillerinde aynı profil numaralarına sahip dört enkesit (HEA800, HEA900, HEA1000 ve HEB1000) ÇYTHYEY'ye göre narin, EC3'e göre Sınıf 4 enkesitli olarak sınıflandırılmıştır. HEM enkesitli profillerde ise narin/Sınıf 4 enkesitli bir profil yer almamaktadır.

Tablo 4.5'e göre, S275 çelik kalitesi için yapılan sınıflandırmalarda, IPE ve HEB enkesitlerde ÇYTHYEY'ye göre narin olarak sınıflandırılan tüm enkesitler, EC3'e göre de Sınıf 4 enkesite sahiptir. HEA enkesitlerde HEA650 ve HEA700 ile HEM'lerde HEM1000 enkesitleri EC3'e göre Sınıf 4 olarak belirlenirken, ÇYTHYEY'ye göre bu enkesitler narin olmayan enkesitlerdir. Bu enkesitler Tablo 4.5'te italik karakter kullanılarak yazılmıştır. Aynı çelik kalitesinde, HD profiller arasında narin/Sınıf 4 enkesit bulunmamaktadır.

Tablo 4.5'ten de görülebileceği gibi, en fazla narin/Sınıf 4 enkesitin bulunduğu S355 çelik kalitesinde, incelenen IPE enkesitlerinin 7'si ÇYTHYEY'ye göre narin, 8'i EC3'e göre Sınıf 4, HEA enkesitlerinin 6'sı narin 7'si Sınıf 4 enkesit olarak belirlenmiştir. IPE300 enkesiti EC3'e göre Sınıf 4 iken, ÇYTHYEY'ye göre narin olmayan enkesit sınıfına dahildir; bu durum HEA enkesitlerde HEA550 ve HEB enkesitlerde ise HEB700 enkesiti için de geçerlidir. HD enkesit grubunda S355 çelik kalitesinde ise tam tersi bir durum söz konusudur; HD260×54,1 ve HD320×74,2 profiller EC3'e göre Sınıf 4 enkesite sahip olmamalarına rağmen, ÇYTHYEY'ye göre narin enkesitli olarak sınıflandırılmaktadırlar.

S460 çelik kalitesinin sadece HD enkesitlerde göz önünde bulundurulduğu unutulmamalıdır. Tablo 4.5'ten de anlaşılabileceği gibi HD enkesitli profillerde, S460 çelik kalitesinde, aynı iki enkesit, HD260×54,1 ve HD320×74,2, EC3'e göre Sınıf 4 ve ÇYTHYEY'ye göre narin enkesitli olarak sınıflandırılmaktadır.

Tablo 4.5'te yer alan ve HD profillerin dışında kalan tüm profiller, gövde narinlikleri ilgili sınır narinlikleri aştığı için narin/Sınıf 4 enkesitli olarak sınıflandırılmıştır. İncelenen çelik kaliteleri ve belirtilen profiller arasında aynı zamanda başlıkları narin/Sınıf 4 olan enkesite rastlanmamıştır. Buna karşın, Tablo 4.5'te narin/Sınıf 4 enkesitli olarak listelenen HD profillerin başlık narinliklerinin ilgili sınır değerleri aştığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, Tablo 4.1'de listelenen HD profillerin arasında ise gövde sınıfları narin/Sınıf 4 olan herhangi bir profile rastlanmamıştır. Diğer bir ifadeyle, Tablo 4.1'de listelenen profiller arasında hem başlıkları hem de gövdesi narin/Sınıf 4 olan herhangi bir profil yoktur.

Tablo 4.5'te narin enkesitli olarak sınıflandırılan tüm profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları hesaplanırken Denklem (2.13), Sınıf 4 enkesitli olarak sınıflandırılan tüm profillerin tasarım burkulma dirençleri hesaplanırken ise Denklem (3.22) kullanılmıştır. Diğer bir deyişle, Tablo 4.5'te listelenen profillerin kapasite hesaplarında, etkin enkesit alanları (ÇYTHYEY için A_e, EC3 için A_{eff}) kullanılmıştır.

4.3.2. Narin ve Sınıf 4 enkesitli elemanların etkin alanlarının karşılaştırılması

Eksenel basınç kuvveti etkisi altındaki narin/Sınıf 4 enkesitli sıcak haddelenmiş I/H profillerin etkin alanların (A_e ve A_{eff}) belirlenmesi amacıyla ÇYTHYEY ve EC3'te tanımlanan tasarım kuralları karşılaştırıldığında, göze çarpan ilk farklılık, ÇYTHYEY'de başlık ve gövdeler için ayrı tasarım denklemleri tanımlanmamış olmasına karşın, EC3'te tanımlanmış olmasıdır. ÇYTHYEY'ye göre yapılan etkin alan hesaplarında, enkesit parçasının türüne bakılmaksızın Denklem (2.14) veya Denklem (2.15)'ten uygun olan kullanılmaktadır. Enkesitin gövde ve başlık parçaları arasındaki ayrım c_1 ve c_2 katsayılarıyla sağlanmaktadır. Buna karşın, EC3'te etkin alan hesabı yaparken, başlıklar için Denklem (3.12) ve (3.13), gövdeler için Denklem (3.14) ve (3.15) kullanılmalıdır.

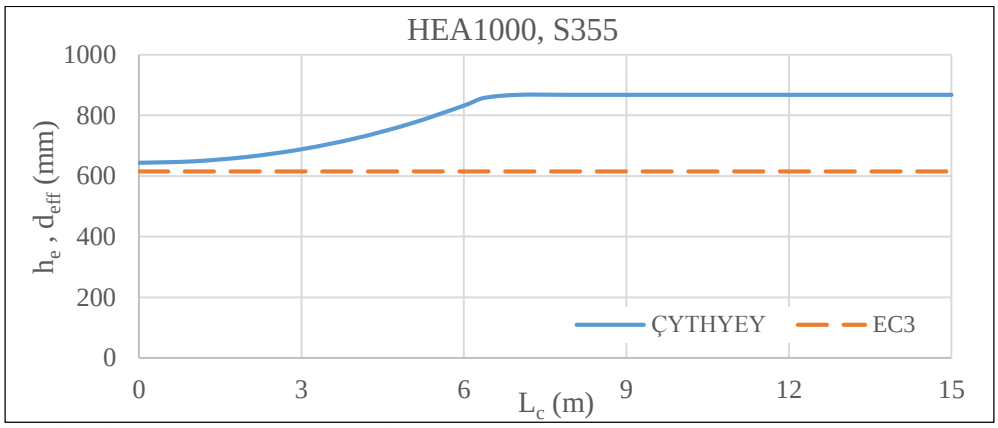
Yönetmelikler arasındaki diğer bir farklılık ise ÇYTHYEY'ye göre narin enkesit parçasının etkin genişliği (b_e) hesaplanırken, hem elemanın hem de narin enkesit parçasının elastik burkulma gerilmelerinin (sırasıyla, F_e ve F_{el}'in) kullanılıyor olmasına karşın, EC3'e göre yapılan hesaplarda yalnız parçanın elastik burkulma gerilmesinin kullanılıyor olmasıdır. Bu nedenle, bir basınç elemanının EC3'e göre

hesaplanan etkin alanı elemanın boyuna/narinliğine bağlı değilken, ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan etkin alanı elemanın boyu arttıkça artmaktadır.

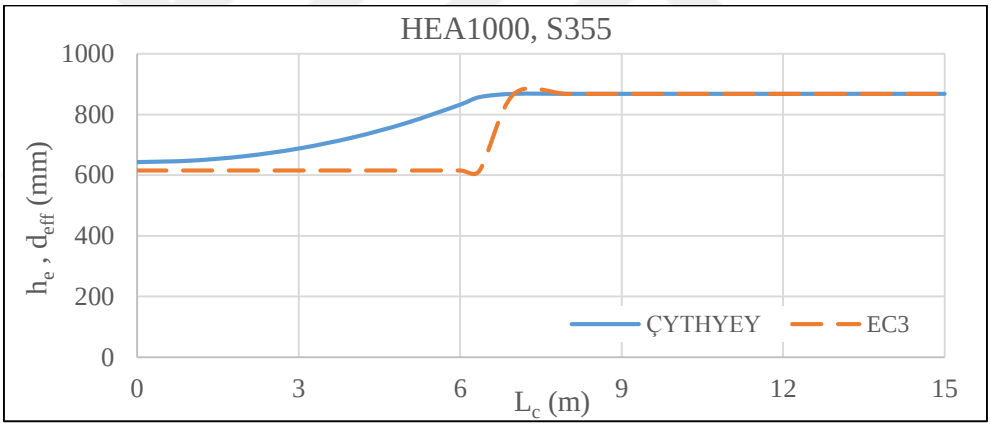
Sınıf 4 enkesitli profillerin EC3'e göre kapasite hesapları yapılırken, önce EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da belirtilen sınıf değişimi yapılmadan kapasiteler belirlenmiş, ardından ilgili değişim yapılarak kapasiteler tekrar hesaplanmıştır. EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9) gereğince Denklem (3.10)'da verilen büyütme katsayısı hesaplanırken gerekli olan en büyük tasarım basınç gerilmesi ($\sigma_{com,Ed}$) değeri, elemanın incelenen boy ve çelik kalitesinde, Sınıf 3 enkesite sahip olduğu kabul edilerek hesaplanan tasarım burkulma direnci kayıpsız enkesit alanına bölünerek elde edilmiştir. Daha gerçekçi bir gerilme değeri ancak iterasyonla hesaplanabileceğinden, güvenli tarafta kalarak, tezde yukarıda belirtilen kabul yapılmıştır. Bu durumda, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişimi uygulandığında, 'küçük' burkulma boylarında eleman Sınıf 4 enkesitli olarak sınıflandırılırken, belirli bir 'kritik' burkulma boyundan sonra eleman Sınıf 3 enkesitli olarak sınıflandırılabilmektedir. Diğer bir ifadeyle, burkulma boyu 'kritik' boydan büyük olan elemanlarda, etkin alan hesabı gerekmemektedir. Aslında, benzer bir durum, ÇYTHYEY'ye göre yapılan etkin alan hesaplarında da mevcuttur. ÇYTHYEY'ye göre narin enkesitli olduğu belirlenen bir elemanın narin parçasının genişlik/kalınlık oranının Denklem (2.14)'te belirtilen koşulu sağlaması durumunda, incelenen parça için etkin genişlik hesabı yapılmamaktadır.

Sonuç olarak, ÇYTHYEY'ye göre yapılan etkin alan hesaplarında, elemanın burkulma boyu arttıkça, narin başlıkların etkin genişlikleri kayıpsız başlık genişliklerine, narin gövdelerin etkin genişlikleri de düz gövde yüksekliklerine ulaşana kadar artarken; EC3'e göre yapılan etkin alan hesaplarında, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişiminin uygulanıp uygulanmamasına bağlı olarak, ya belirli bir burkulma boyundan büyük boylarda etkin alan hesabı terk edilmekte ya da burkulma boyundan bağımsız olarak tüm boylarda aynı etkin alan değeri kullanılmaktadır. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te, S355 çelik kalitesinde, ÇYTHYEY'ye göre narin, EC3'e göre Sınıf 4 enkesitli olan HEA1000 profilinin etkin düz gövde yüksekliğinin elemanın burkulma boyuyla değişimi gösterilmiştir. Etkin gövde yükseklikleri her iki yönetmelik için de hesaplanmıştır. Şekil 4.2'de, EC3'e göre yapılan hesaplarda, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişimi yapılmamış, eleman bütün burkulma boylarında

Sınıf 4 enkesitli kabul edilmiştir. Şekil 4.3'te ise EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişimi uygulanmıştır.



Şekil 4.2. S355 çelik kalitesine sahip HEA1000 enkesitli bir çelik basınç elemanının ÇYTHYEY ve EC3'e göre (EC3 için EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişimi göz ardı edilerek) hesaplanan etkin düz gövde yüksekliklerinin elemanın burkulma boyuyla değişimi



Şekil 4.3. S355 çelik kalitesine sahip HEA1000 enkesitli bir çelik basınç elemanının ÇYTHYEY ve EC3'e göre (EC3 için EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişimi uygulanarak) hesaplanan etkin düz gövde yüksekliklerinin elemanın burkulma boyuyla değişimi

Şekil 4.2 ile Şekil 4.3 kıyaslandığında, 'kısa' burkulma boylarında, her iki yönetmeliğin de, hemen hemen aynı değerleri verdiği, ancak, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişimi uygulanmadığında, özellikle büyük burkulma boylarında EC3'ün fazlasıyla güvenli tarafta kaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişiminin uygulanmasıyla, iki yönetmelik arasında gözlenen bu fark kaybolmaktadır. Şekil 4.3'ten, ÇYTHYEY için elde edilen eğride narin enkesitten narin olmayan enkesite geçişin daha yumuşak, EC3 için çizdirilen eğride ise geçişin ani olduğu gözlenebilir.

İki yönetmeliğe göre yapılan etkin alan hesaplarını daha detaylı bir şekilde karşılaştırmak amacıyla, ÇYTHYEY'ye göre narin enkesite sahip elemanların kısa burkulma boylarındaki (narinliklerinin 1'e eşit olduğu boylardaki) etkin alanları hesaplanarak kayıpsız enkesit alanlarına oranlanmış ve etkin alan oranları belirlenmiştir. Tablo 4.6'da listelenen etkin alan oranları, HD profillerin dışında tezde incelenen bütün narin enkesitli profiller için S355, narin enkesitli HD profiller için ise S460 çelik kalitesi için hesaplanmıştır. Diğer bir ifadeyle, Tablo 4.6'da listelenen değerler, her profil grubu için tezin kapsamında ele alınan en yüksek akma dayanımı kullanılarak belirlenmiştir. Diğer çelik sınıfları için hesaplanan etkin alan oranları tabloda listelenenlerden daha yüksektir. Tablo 4.6'da, Sınıf 4 enkesite sahip elemanların EC3'e göre hesaplanan etkin alan oranları ile iki yönetmeliğe göre hesaplanan etkin alanların oranları da sunulmuştur.

Tablo 4.6 ÇYTHYEY'ye göre narin, EC3'e göre Sınıf 4 enkesite sahip profillerin etkin alanları

Profil	Çelik Sınıfı	$A_{e,ÇYTHYEY}/A$ (%)	$A_{eff,EC3}/A$ (%)	$A_{eff,EC3} / A_{e,ÇYTHYEY}$
IPE300	S355	100	97,9	0,979
IPE330		99,6	97,4	0,978
IPE360		98,8	96,7	0,979
IPE400		98,1	96,1	0,980
IPE450		96,8	94,9	0,980
IPE500		95,8	93,9	0,980
IPE550		95,4	93,5	0,980
IPE600		94,9	93,0	0,980
HEA550	S355	100	98,3	0,983
HEA600		99,0	97,2	0,982
HEA650		97,7	96,1	0,984
HEA700		97,2	95,5	0,983
HEA800		94,3	92,8	0,984
HEA900		92,2	90,7	0,984
HEA1000		89,3	88,0	0,985
HEB700	S355	100	98,4	0,984
HEB800		98,0	95,9	0,979
HEB900		95,8	93,8	0,979
HEB1000		93,0	91,2	0,981
HEM900	S355	99,1	96,6	0,975
HEM1000		95,7	93,6	0,978
HD260×54,1	S460	94,0	96,9	1,03
HD340×74,2		94,3	96,7	1,03

Tablo 4.6'dan fark edilebileceği gibi, gövdeleri narin/Sınıf 4 olan enkesitlerde, EC3'e göre hesaplanan etkin alanlar ÇYTHYEY'ye göre hesaplananlardan yaklaşık %2 daha küçüktür. Buna karşın, başlıkları narin/Sınıf 4 olan enkesitlerin etkin alan hesaplarında, ÇYTHYEY %3 güvenli tarafta kalmaktadır. Tablo 4.6'da sunulan en küçük etkin alan yüzdeleri HEA1000 profiline aittir. İlgili profilde, gövde narinliği nedeniyle ÇYTHYEY'ye göre enkesit dayanımı %10,7, EC3'e göre enkesit direnci ise %12,0 azalmaktadır. Ancak, Şekil 4.3'ten de görülebileceği gibi, orta ve uzun boylu elemanlarda genel burkulma yerel burkulmadan önce oluşacağı için, dayanım hesaplarında kayıpsız enkesit alanı kullanılabilmektedir.

4.3.3. Tasarım kapasitelerinin hesaplanması

Tezin kapsamında incelenen tüm enkesitler (Tablo 4.1) sınıflandırıldıktan sonra, narin/Sınıf 4 enkesitli profiller için etkin alanlar, diğer profiller için kayıpsız enkesit alanlar kullanılarak, farklı çelik kaliteleri ve burkulma boyları için elemanların ÇYTHYEY'ye göre tasarım basınç kuvveti dayanımları ($\phi_c P_n$) ile EC3'e göre tasarım burkulma dirençleri ($N_{b,Rd}$) hesaplanmıştır.

İki yönetmelik arasında, kapasite hesaplamalarında da farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. ÇYTHYEY'ye göre karakteristik basınç kuvveti dayanımı (P_n) hesaplanırken akma sınır durumu göz ardı edilerek sadece genel burkulma sınır durumları dikkate alınmakta, elastik burkulma gerilmesinin akma gerilmesine oranına (F_e/F_y) bağlı olarak Denklem (2.6) ya da Denklem (2.7) kullanılarak belirlenen kritik burkulma gerilmesi (F_{cr}) enkesit narinse etkin alanla değilse kayıpsız alanla çarpılmaktadır. EC3'e göre basınç direnci hesabı yapılırken, akma ve yerel burkulma sınır durumları dikkate alınarak hesaplanan enkesit direnci, olası bütün genel burkulma sınır durumlarından hesaplanan en büyük azaltma katsayısı (χ) ile çarpılmaktadır.

Her iki yönetmelik de, kapasite hesaplarında eğilmeli burkulma ve burulmalı burkulma sınır durumlarını dikkate almaktadır. ÇYTHYEY'de, her ne kadar akma sınır durumu, doğrudan tasarıma dahil edilmese de, eleman narinliği küçüldükçe F_{cr}'nin F_y'ye yaklaştığı fark edilebilir. Teorik olarak, eleman narinliği 0'a eşit olan ve enkesiti narin olmayan bir basınç elemanında $F_{cr}=F_y$ olacağından, ÇYTHYEY'nin akma sınır durumunu dolaylı olarak tasarıma dahil ettiği söylenebilir. Buna karşın, EC3'te ise $\bar{\lambda}$ boyutsuz narinliğin 20'den küçük olduğu durumlarda, tasarım direncinin enkesit

direncine eşit alınabileceği belirtilmektedir. Diğer bir ifadeyle, EC3'e göre tasarım yapılırken, boyutsuz narinliği 20'den küçük olan ve enkesiti Sınıf 4 olmayan bütün basınç elemanlarının tasarım dirençleri akma yüklerine eşit alınabilmektedir.

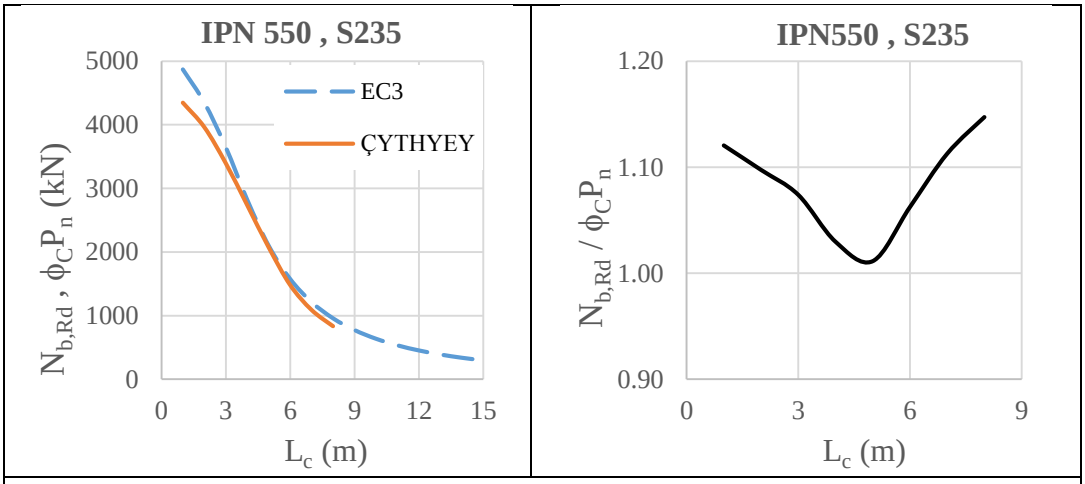
İki yönetmelik arasındaki bir diğer önemli fark da, ÇYTHYEY'de eleman narinliğinin 200 ile sınırlanması; buna karşın, EC3'te eleman narinliği için herhangi bir üst sınır tanımlanmamış olmasıdır. Bu tezde, narinliği 200'den büyük elemanlar için tasarım dayanımları hesaplanmamıştır. Buna karşın, tasarım dirençleri tezin kapsamında incelenen bütün boylar için hesaplanmıştır.

4.4. Tasarım Kapasitelerinin Karşılaştırılması

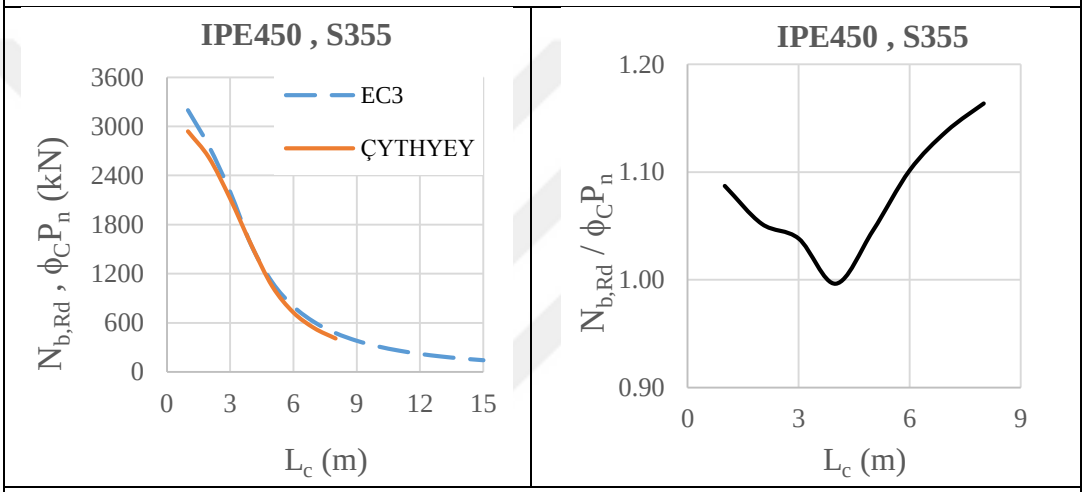
ÇYTHYEY için Bölüm 2'de, EC3 için Bölüm 3'de verilen tasarım kuralları kullanılarak Tablo 4.1'de listelenen profillerin farklı boy/narinlik ve çelik kalitelerindeki tasarım basınç kuvveti dayanımları ($\phi_c P_n$) ile tasarım burkulma dirençleri ($N_{b,Rd}$) hesaplanarak dayanım eğrileri çizdirilmiştir. Bu bölümde, ilk olarak, bazı enkesit ve çelik kaliteleri için, her iki yönetmeliğe göre çizdirilen tipik kapasite eğrileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ardından, tezin kapsamında incelenen bütün profil ve çelik kaliteleri için, iki yönetmeliğe göre hesaplanan kapasitelerin oranlanmasıyla elde edilen kapasite oranlarının burkulma boylarıyla/narinliklerle değişimlerini gösteren kapasite oranı eğrileri sunulmuştur.

4.4.1. Tasarım kapasitelerinin burkulma boylarına göre değişimlerinin karşılaştırılması

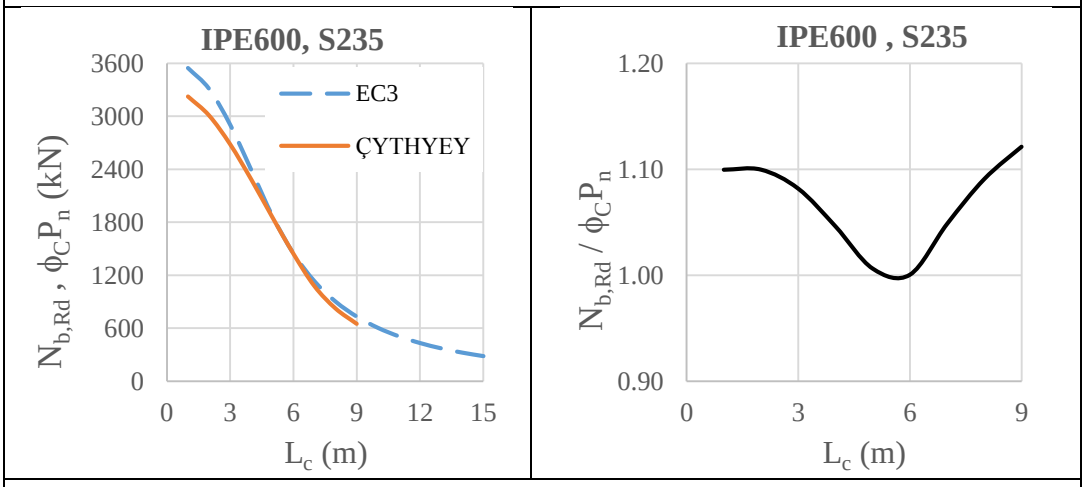
Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da sol tarafta sunulan grafikler, tezde incelenen profillerin arasından seçilen bazı I, HE ve HD profillerin farklı çelik kalitelerindeki tasarım burkulma dirençleri ($N_{b,Rd}$) ile tasarım basınç kuvveti dayanımlarının ($\phi_c P_n$) elemanların burkulma boylarıyla değişimlerini göstermektedir. Tezde "kapasite-boy" grafikleri olarak da isimlendirilen bu grafiklerden; farklı enkesit, çelik sınıfı ve eleman boyları için, EC3'ün mü ÇYTHYEY'nin mi eleman kapasitelerini daha güvenli tarafta kalarak hesaplattığı belirlenebilir.



(a) IPN550, S235

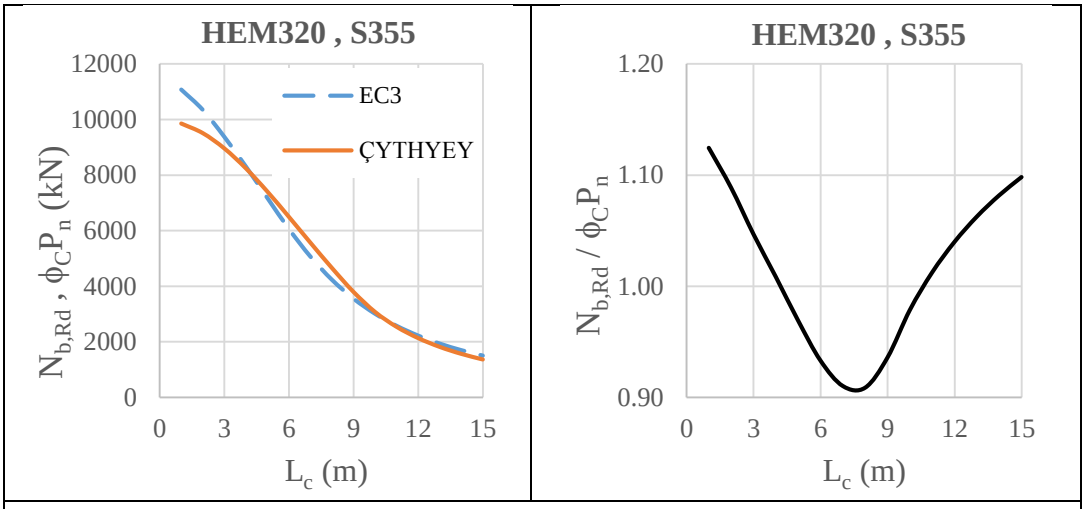


(b) IPE450, S355

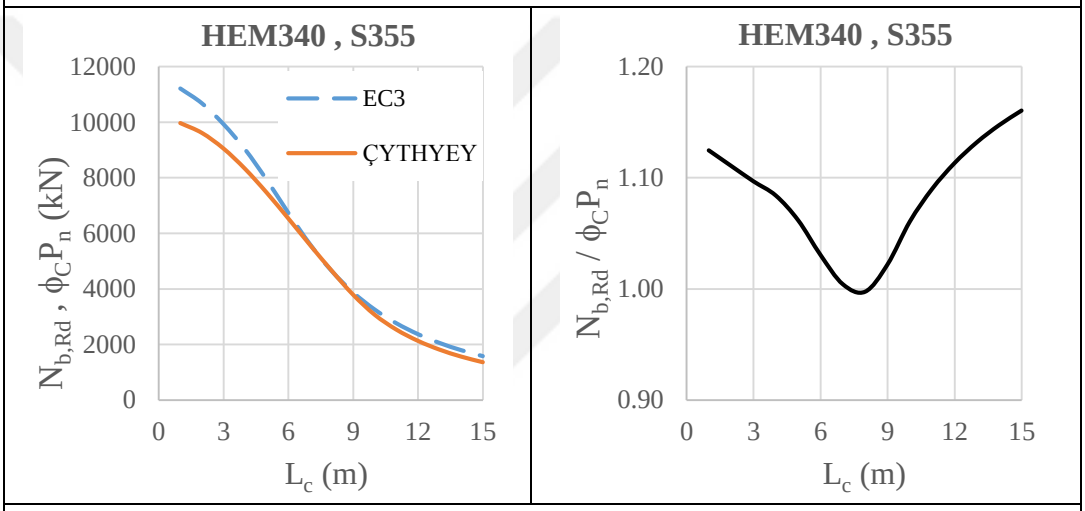


(c) IPE600, S235

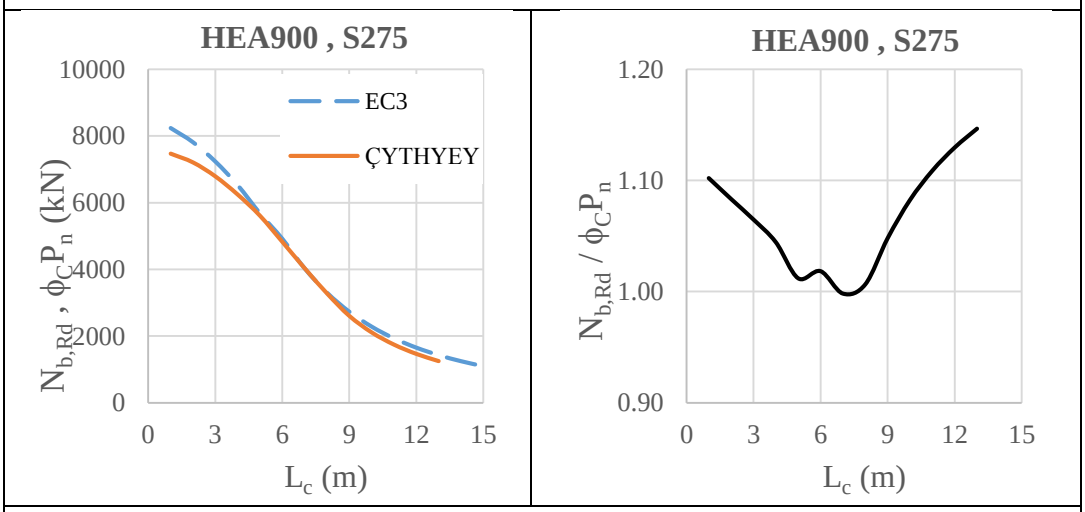
Şekil 4.4. Bazı I-enkesitli profillerin kapasite-boy ve kapasite oranı-boy eğrileri



(a) HEM320, S355

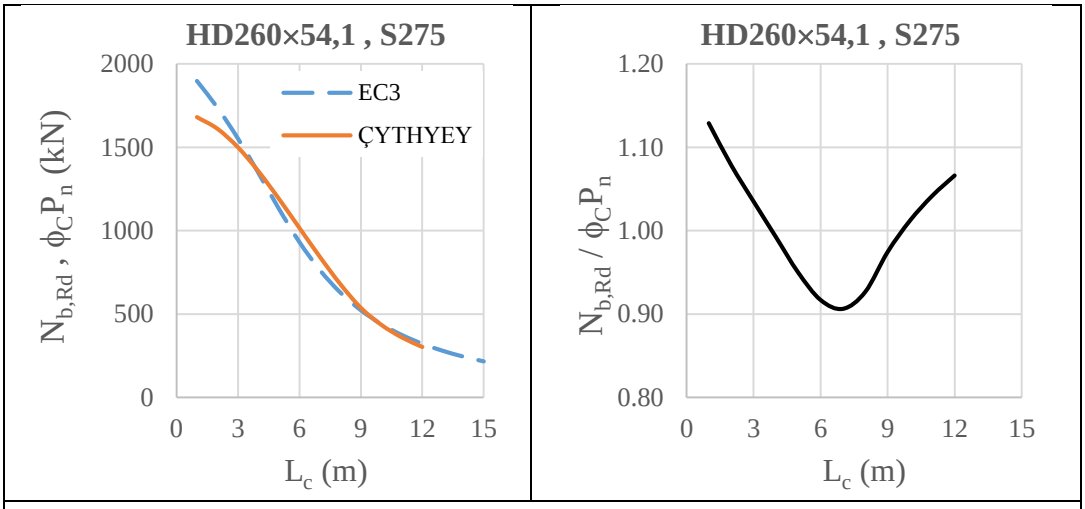


(b) HEM340, S355

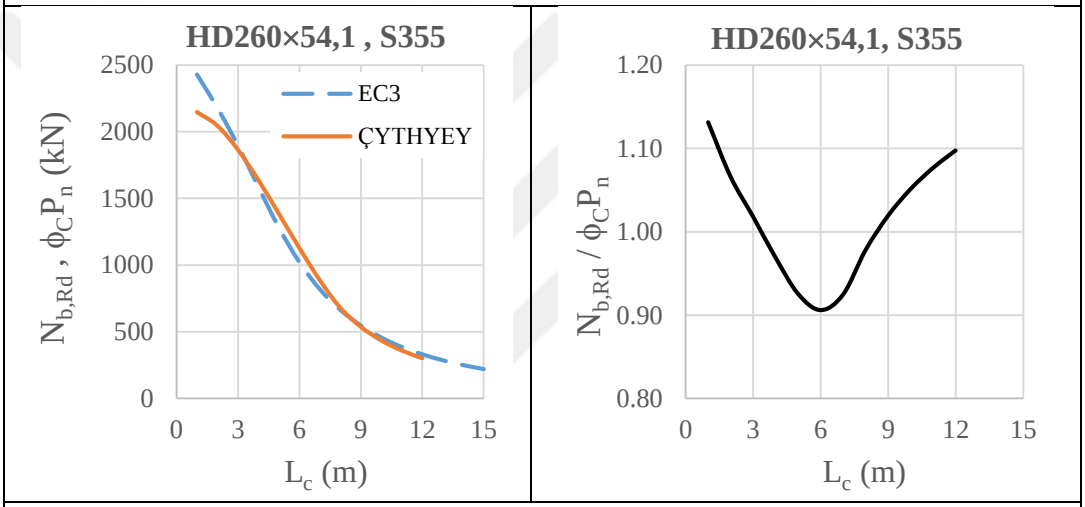


(c) HEA900, S275

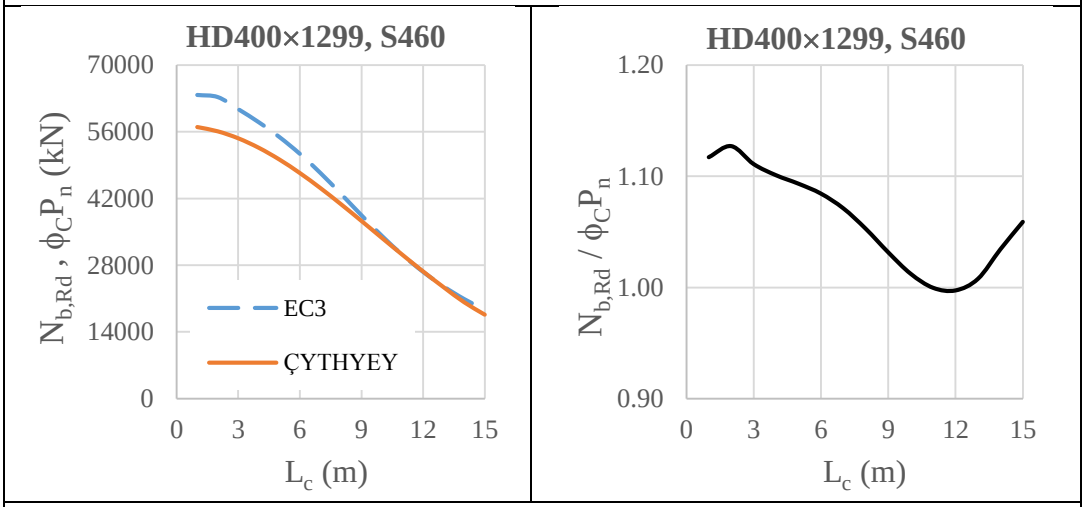
Şekil 4.5. Bazı HE-enkesitli profillerin kapasite-boy ve kapasite oranı-boy eğrileri



(a) HD260×54,1, S275



(b) HD260×54,1, S355



(c) HD400×1299, S460

Şekil 4.6. Bazı HD-enkesitli profillerin kapasite-boy ve kapasite oranı-boy eğrileri

Ancak, çoğu burkulma boyunda kapasite eğrilerinin birbirleriyle neredeyse örtüşüyor olması nedeniyle, kapasite karşılaştırmalarının "kapasite oranı-boy" grafikleri çizdirilerek daha kolay yapılabileceği fark edilmiştir. Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da sağ tarafta sunulan grafikler, sol taraflarında kapasite-boy grafiği çizdirilen profil ve çelik kaliteleri için, tasarım burkulma dirençlerinin tasarım basınç kuvveti dayanımlarına oranlanmasıyla hesaplanan direnç/kapasite oranlarının ($N_{b,Rd}$ / $\phi_c P_n$) burkulma boylarıyla değişimini göstermektedir. Grafiklerde, eleman narinliklerine bakılmaksızın tasarım dirençleri 15 m burkulma boyuna kadar çizdirilmiş, tasarım dayanımları ise narinlik oranının 200'ü geçtiği burkulma boylarında sonlandırılmıştır. Bu nedenle, direnç/dayanım oranı eğrileri, yalnız elemanların narinlik değerlerinin 200'e eşit olduğu boylara kadar çizdirilmiştir. Elemanların EC3'e göre tasarım dirençleri hesaplanırken, Bölüm 4.3.2'de bahsedildiği gibi, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişimi göz önünde bulundurulmuştur.

Şekil 4.4(a)'da grafikleri sunulan IPN 550 enkesiti, S235 çelik kalitesinde, ÇYTHYEY'ye göre narin olmayan, EC3'e göre de Sınıf 4 olmayan bir enkesittir. Bu nedenle, bu enkesit için hesaplanan dayanımlarda da dirençlerde de kayıpsız enkesit alan kullanılmıştır. Buna karşın, Şekil 4.4(b)'de grafikleri sunulan IPE 450 enkesitinin S 355 çelik kalitesindeki sınıfı ÇYTHYEY'ye göre narin EC3'e göre de Sınıf 4'tür. Dolayısıyla, S355 çelik kaliteli ve IPE 450 enkesitli basınç elemanın hem dayanım hem de direnç hesaplarında enkesitin etkin alanı kullanılmıştır. Son olarak, Şekil 4.4(c)'de grafikleri sunulan IPE 600 enkesitinin, S235 çelik kalitesindeki sınıfı ÇYTHYEY'ye göre narin olmayan, EC3'e göre ise Sınıf 4'tür. Bu nedenle, bu enkesit için dayanım hesaplarında kayıpsız alan, direnç hesaplarında ise etkin alan kulllanılmıştır. Şekil 4.4'te sunulan grafiklerden, incelenen I enkesitli basınç elemanlarının, incelenen çelik kalitelerindeki tasarım dirençlerinin hemen hemen bütün burkulma boylarında tasarım dayanımlarından daha büyük olduğu gözlenmektedir. Enkesiti narin/Sınıf 4 olmayan IPN 550 profilinin kapasite oranları, incelenen bütün burkulma boylarında 1,0 değerinin üzerindedir. Şekil 4.4(b)'de S355 çelik kalitesinde Narin/Sınıf 4 enkesite sahip IPE450 profilin için verilen kapasite oranları da hemen hemen tüm burkulma boylarında 1,0'in üzerindedir. Bu profil için çizdirilen kapasite oranı eğrisinde yaklaşık 3 metrelik burkulma boyunda gözlenen ani değişimin nedeni, bu burkulma boyundan daha büyük burkulma boylarında elemanın

enkesit sınıfının EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'e göre Sınıf 4'ten Sınıf 3'e dönüşüyor olmasıdır. S355 çelik kalitesi ve IPE450 enkesiti için yapılan hesaplar, enkesitteki sınıf değişiminin burkulma boyunun 2,55 m'ye eşit olduğu zaman gerçekleştiğini göstermiştir. Tablo 4.6'ya göre yerel burkulma sınır durumu göz önünde bulundurulduğunda, burkulma boyu 1 m olan IPE 450 enkesitli ve S355 çelik kaliteli bir basınç elemanının kayıpsız enkesit alanı yaklaşık %3 azalmaktadır. Aynı enkesit, çelik kalitesi ve burkulma boyu için EC3'e göre hesaplanan direnç hesaplarında ise enkesit alanındaki azalma yaklaşık %5 olarak belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, incelenen enkesit ve çelik kalitesi için, etkin alan hesapları açısından da iki yönetmelik arasında büyük bir fark bulunmamaktadır. Şekil 4.4(c)'de, S235 çelik kalitesinde ÇYTHYEY'ye göre narin olmayan ancak EC3'e göre Sınıf 4 enkesite sahip olan IPE 600 profili için çizdirilen eğriler incelendiğinde, kapasite eğrilerinin Şekil 4.4'teki diğer enkesitler için çizdirilen kapasite eğrilerine yakın olduğu gözlenmiştir. Küçük burkulma boylarında, kapasite oranlarının 1,10 değerine yaklaşmasının en önemli nedeninin, tasarım basınç dayanımı hesaplanırken kullanılan ve değeri ϕ_c=0,90 olan dayanım azaltma katsayısı olduğu düşünülmektedir. Tasarım dayanımlarının %10 azaltılması, dayanım oranlarında yaklaşık %11'lik bir artışa neden olmaktadır. Sınıf 4 enkesite sahip olmasına rağmen, IPE600 profilinin tasarım burkulma direncinin küçük burkulma boylarında çok da azalmadığı farkedilmiştir. Bunun en önemli nedeni, belirtilen profilin S235 çelik kalitesinde enkesit alanındaki azalmanın %3'ü geçmemesidir. Sonuç olarak, Şekil 4.4'te incelenen I enkesitli elemanların kapasite hesaplarında neredeyse bütün burkulma boylarında, ÇYTHYEY'nin daha güvenli sonuçlar verdiği söylenebilir. Kapasite oranları elemanın burkulma boyuna bağlı olup, nispeten kısa ve uzun elemanlarda oran büyümekte, orta boylu elemanlarda ise oran 1'e yaklaşmaktadır. Ancak, grafiklerden"orta boy"un tanımının enkesite bağlı olduğu gözlenebilir.

Şekil 4.5(a) ve (b)'de, sırasıyla, S355 çelik kalitesine sahip HEM320 ve HEM340 enkesitli basınç elemanlarının farklı burkulma boyları için hesaplanan tasarım burkulma dirençleri ile tasarım basınç kuvveti dayanımları ve direnç/dayanım oranları sunulmuştur. Her iki enkesit de, ÇYTHYEY'de narin olmayan, EC3'te Sınıf 4 olmayan enkesit olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 4.5(a)'dan görülebileceği gibi, HEM320 enkesitli elemanın burkulma boyu 4 ile 10 m arasındayken, EC3

ÇYTHYEY'ye kıyasla daha güvenli sonuç vermektedir; zira bu bölgede kapasite oranı eğrisi 1,0 değerinin altına düşmektedir. Buna karşın, daha kısa ya da daha uzun burkulma boylarında, ÇYTHYEY daha küçük dayanımlar hesaplatmaktadır. HEM profilleri numaralarına göre sıralandığında HEM 340, HEM 320 profilinin hemen ardından gelen profildir. Şekil 4.5(b) incelendiğinde, HEM340 enkesitli elemanın burkulma boyunun 1-6 m veya 9-15 m arasında kaldığı durumlarda ÇYTHYEY'in EC3'e kıyasla daha düşük kapasite değerleri hesaplattığı, 6-9 metrelik burkulma boylarında ise EC3 ile ÇYTHYEY'in hemen hemen aynı değerleri verdiği, diğer bir deyişle direnç/dayanım oranlarının bu burkulma boylarında 1'e oldukça yakın olduğu görülmektedir. Çelik kaliteleri aynı olan, enkesit özellikleri de birbirine bu kadar yakın iki profilin kapasite oranı eğrilerinde gözlenen bu fark ilk etapta şaşırtıcı gelebilir. Buna karşın, gözlenen davranış farkının en önemli nedeni, EC3'e göre tasarım burkulma direnci ($N_{b,Rd}$) hesabında kullanılan kusur katsayılarıdır (α). HEM320 enkesitinin h/b oranı 1,16 iken, yani Şekil 3.2'de burkulma eğrilerinin seçiminde verilen sınır h/b değeri olan 1,2'den küçükken, HEM340 enkesitinin h/b oranı 1,22 olup verilen sınır değerden büyüktür. Yani HEM320 enkesitli basınç elemanının tasarım burkulma direnci hesaplanırken S235, S275 ve S355 çelik kaliteleri göz önüne alındığında kullanılan burkulma eğrileri, güçlü eksendeki eğilmeli burkulma için "b" eğrisi" (α=0,34) ve zayıf eksendeki eğilmeli veya burulmalı burkulma için ise "c eğrisi" (α=0,49) olmaktadır. Buna karşın, HEM340 enkesitli basınç elemanın aynı çelik kalitelerindeki tasarım burkulma direnci hesaplanırken kullanılan burkulma eğrileri sırasıyla "a" (α=0,21) ve "b" (α=0,34) eğrileridir. Şekil 3.5'ten görülebileceği gibi, aynı boyutsuz narinlik değeri için, "a" eğrisine göre hesaplanan azaltma katsayısı (χ) "b" eğrisine göre hesaplanandan, "b" eğrisine göre hesaplanan ise "c" eğrisine göre hesaplanandan daha büyüktür. Diğer bir ifadeyle, dirençler "a" eğrisinden "c" eğrisine doğru inildikçe azalmaktadır. Bu nedenle, HEM 340 enkesitli profilin kapasite oranları özellikle burkulma boylarının orta değerlerinde daha yüksek çıkmaktadır.

Şekil 4.5(c)'de kapasite ve kapasite oranı eğrileri sunulan HEA900 enkesitli profil, S 275 çelik kalitesinde, ÇYTHYEY'ye göre narin, EC3'e göre Sınıf 4 enkesitlidir. Ancak, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'e göre, incelenen çelik kalitesi için, elemanın burkulma boyu 5,17 m'yi aştığında, enkesit sınıfı Sınıf 4'ten Sınıf 3'e dönüşmektedir. Bu nedenle, Şekil 4.4(b)'de verilen kapasite oranı eğrisinde görülen ani değişim, Şekil

4.5(c)'de de görülmektedir. Şekil 4.5(a) ve Şekil 4.5(b)'dekilerle karşılaştırıldığında, Şekil 4.5(c)'deki grafiklerin Şekil 4.5(b)'dekilere daha çok benzediği görülmektedir. Bunun da en önemli nedeni, HEA900 enkesitli elemanın direnç hesaplarında da HEM 340 enkesitli elemanın direnç hesaplarında kullanılan burkulma eğrilerinin kullanılıyor olmasıdır. ÇYTHYEY'ye göre yapılan dayanım hesaplarında yerel burkulma sınır durumu göz önünde bulundurulduğunda, burkulma boyu 1 m olan HEA 900 enkesitli ve S275 çelik kaliteli bir basınç elemanının kayıpsız enkesit alanının yaklaşık %4,5 azaldığı, bu azalmanın aynı enkesit, çelik kalitesi ve burkulma boyu için EC3'e göre hesaplanan direnç hesaplarında %6,2 olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.5(c)'de çizilen kapasite oranı eğrisinin hemen hemen bütün burkulma boylarında 1,0 değerinin üstünde olması, S275 çelik kaliteli, HEA900 enkesitli bir basınç elemanının tasarımında ÇYTHYEY'nin EC3'e göre neredeyse bütün burkulma boylarında daha güvenli sonuçlar verdiğini göstermektedir.

HD enkesitler ayrı tutularak, tezde incelenen profillerin EC3'e göre tasarım burkulma direnci ($N_{b,Rd}$) hesaplanırken kullanılan burkulma eğrileri için bir genelleştirme yapılacak olursa, incelenen bütün çelik kalitelerinde, profil numarası 340'dan küçük olan HEM ve 400'den küçük olan HEA ile HEB enkesitlerin h/b oranlarının 1,2'den küçük olması nedeniyle bu enkesitlere sahip elemanların tasarım hesaplarında güçlü eksende eğilmeli burkulma için "b" ve zayıf eksende eğilmeli burkulma ile burulmalı burkulma için "c" eğrilerinin; profil numaraları belirtilen değerlere eşit ya da daha büyük olan diğer HEA, HEB ve HEM profillerinin h/b oranlarının 1,2'den büyük olması nedeniyle büyük enkesitli HE profillerin tasarım hesaplarında ise güçlü eksende eğilmeli burkulma için "a" ve zayıf eksende eğilmeli burkulma ile burulmalı burkulma için "b" eğrilerinin kullanıldığı belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca IPE ve IPN enkesitlerin tamamı için h/b oranının 1,2'den büyük olması nedeniyle, eksenel basınç kuvveti etkisindeki tüm IPE ve IPN enkesitli profillerin tasarımında, büyük enkesitli H profiller için tanımlanan burkulma eğrilerinin (sırasıyla, "a" ve "b" eğrilerinin) kullanıldığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.6'da iki farklı enkesit ve üç farklı çelik kalitesi için HD profillerin kapasite ve kapasite oranı grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 4.6(a) ve Şekil 4.6(b)'de iki farklı çelik kalitesi için grafikleri verilen HD260×54,1 enkesitli profil, Tablo 4.5'ten görülebileceği gibi, S275 çelik kalitesinde ÇYTHYEY için narin olmayan enkesitler

arasındayken S355 çelik kalitesinde başlıklarından dolayı narin enkesitlidir. Ancak, ÇYTHYEY'ye göre yapılan hesaplarda, S355 çelik kalitesinde, 1 m burkulma boyunda, incelenen profilin enkesit alanındaki azalmanın %1'den az olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, Şekil 4.6(a) ve Şekil 4.6(b)'de verilen kapasite oranı-boy grafikleri hemen hemen aynıdır. EC3'e göre tasarımda, "b" ve "c" burkulma eğrileri kullanılarak hesap yapılan diğer profillerde olduğu gibi, HD260×54,1 enkesitli profilde de nispeten küçük veya büyük burkulma boylarında EC3'ün, orta seviyelerdeki burkulma boylarında ise ÇYTHYEY'nin daha güvenli sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Şekil 4.6(a) ve Şekil 4.6(b)'de verilen kapasite oranı eğrileri incelendiğinde, çelik kalitesinin eğrilerin en büyük ve en küçük değerlerini ve genel şeklini etkilemediği, ancak, kapasite oranın en küçük olduğu burkuma boyunu değiştirdiği belirlenmiştir.

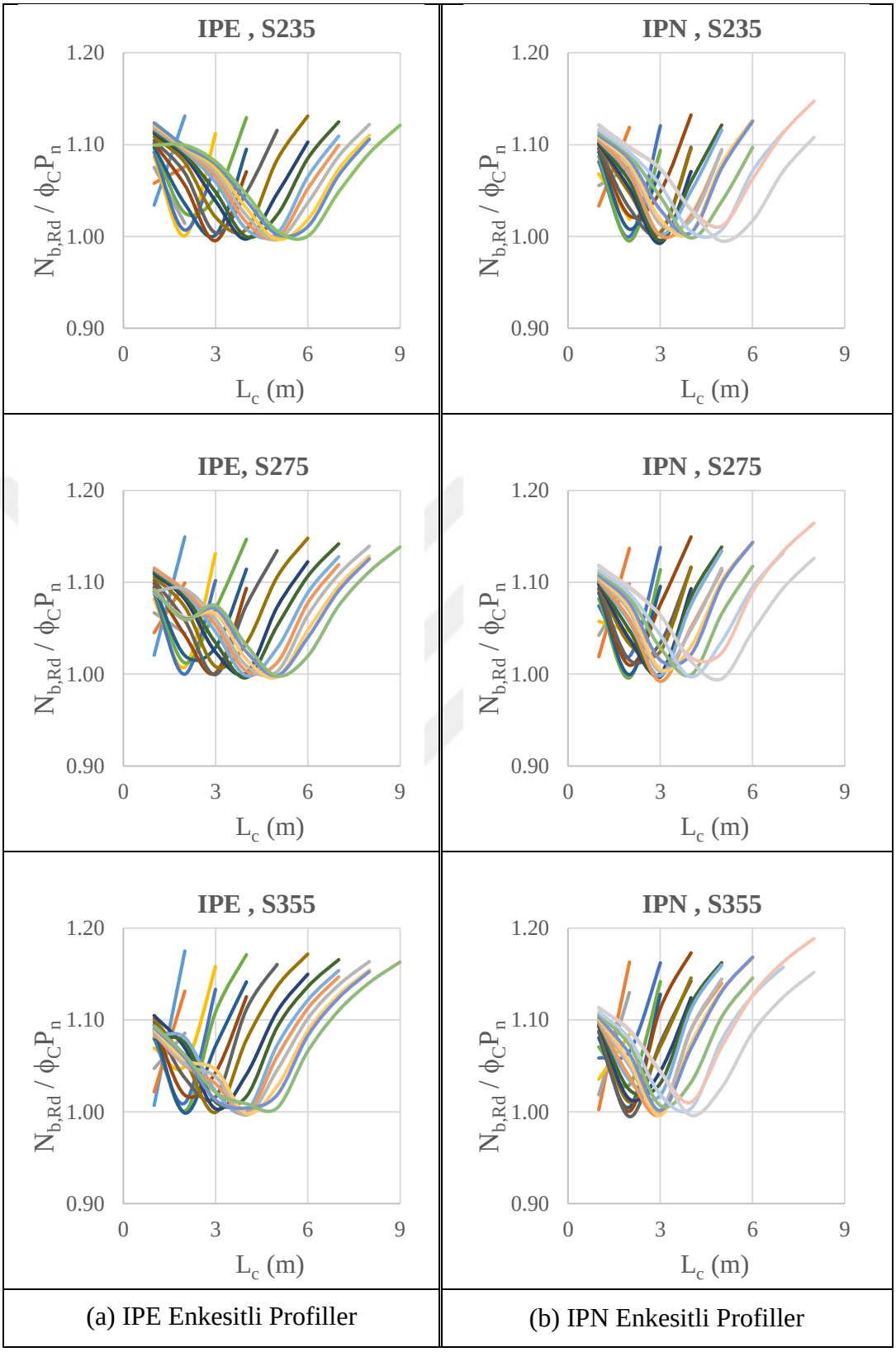
Şekil 4.6(c)' de ise başlık kalınlığı 140 mm, h/b oranı 4,28 olan HD400×1299 enkesitli S460 çelik kaliteli bir basınç elemanın kapasite ve kapasite oranı eğrileri verilmiştir. İncelenen enkesit belirtilen çelik kalitesinde, ÇYTHYEY'ye göre narin olmayan, EC3'e göre ise Sınıf 4 olmayan bir enkesittir. Kapasite oranı eğrisinden de fark edilebileceği gibi, bu elemanın direnç hesaplarında da "a" ve "b" eğrileri kullanılmıştır (Şekil 3.4). Aynı eğrilerin kullanıldığı diğer profillerde gözlendiği gibi, bu elemanın dayanım hesaplarında da ÇYTHYEY neredeyse bütün burkulma boylarında güvenli tarafta kalmıştır. Bu profilin kapasite oranı eğrisinde, küçük eleman boylarında, bundan önceki grafiklerde gözlenmeyen bir "tepe" fark edilmiştir. Burkulma boyu 1m'den 2 m'ye doğru artarken, kapasite oranında gözlenen artışın, EC3'e göre yapılan tasarımda boyutsuz narinliğin 0,2'den küçük olduğu durumlarda direncin enkesit direncine (bu profilde akma yüküne) eşit olarak alınıyor olmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. ÇYTHYEY'ye göre hesap yapıldığında ise tasarım dayanımları, ne kadar küçük olursa olsun, elemanın burkulma boyu arttıkça azalmaktadır.

Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da incelenen tüm grafikler dikkate alındığında, kapasite eğrilerinin enkesitin alanına bağlı olduğu, bazı burkulma boylarında karşılaştırmayı zorlaştırdığı, bu nedenle, iki yönetmeliğin karşılaştırılmasında kapasite oranı eğrilerinin daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır. Genel olarak, EC3'e göre yapılan tasarım burkulma direnci hesaplarında "b" ve "c" olarak isimlendirilen burkulma eğrileri kullanılan profillerde, orta boy elemanlarda EC3'ün, kısa ve uzun

elemanlarda ise ÇYTHYEY'nin güvenli kaldığı; direnç hesaplarında "a" ve "b" eğrileri kullanılan profillerde ise hemen hemen bütün burkulma boylarında ÇYTHYEY'nin güvenli sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için direnç/dayanım oranlarının 1,25'i aşmadığı, 0,9'un da altına düşmediği belirlenmiştir.

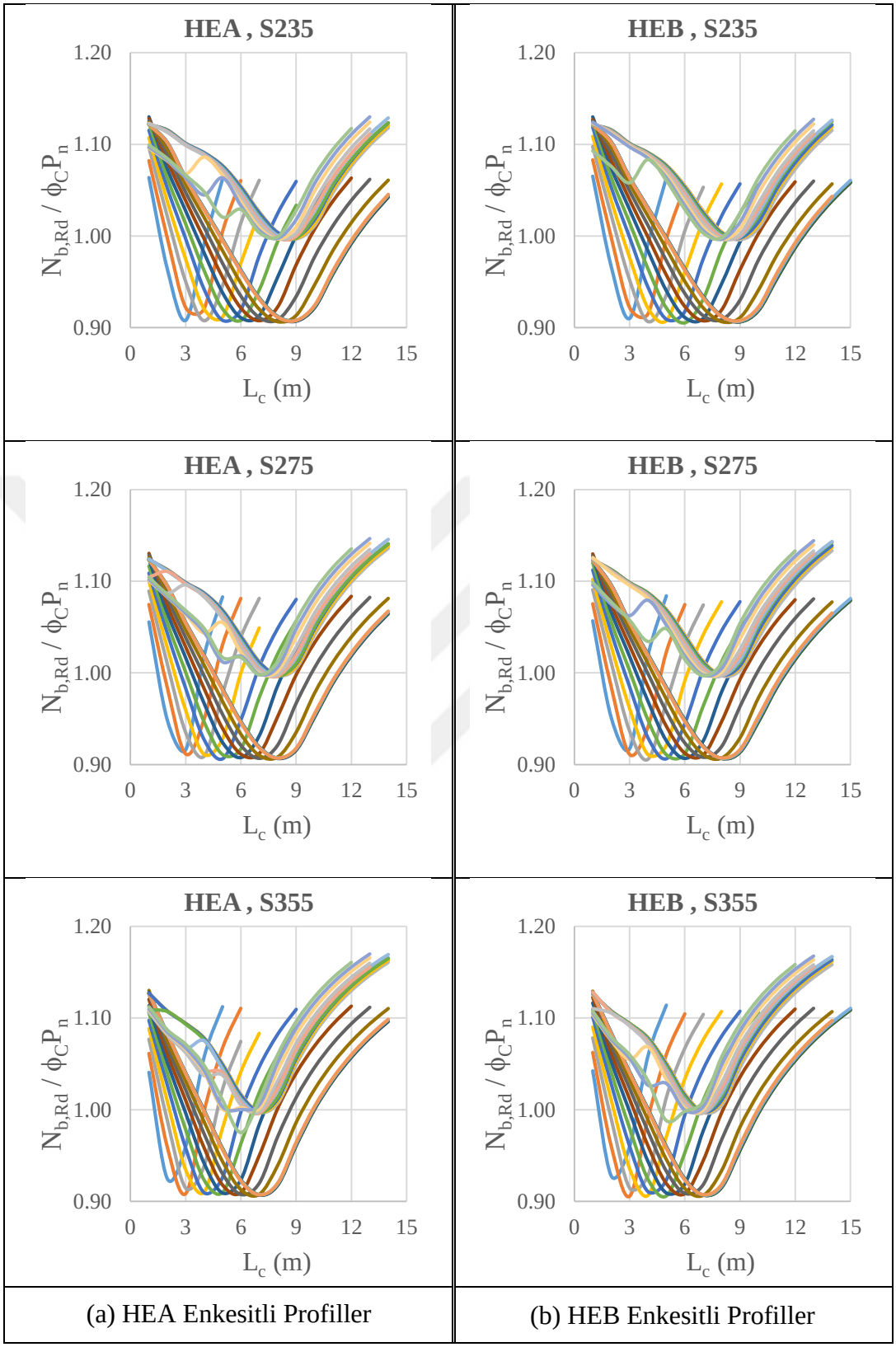
Sonuçları genelleştirmek amacıyla, tezin kapsamında incelenen tüm enkesit ve çelik kaliteleri için direnç/dayanım oranı ($N_{b,Rd}$ / $\phi_c P_n$) eğrileri çizdirilerek, IPE ve IPN enkesitli profiller için Şekil 4.7'de, HEA ve HEB enkesitli profiller için Şekil 4.8'de ve HEM ve HD enkesitli profiller için Şekil 4.9'da sunulmuştur. Grafikler yorumlanırken, direnç/dayanım, yani kapasite, oranlarının 1,0'den büyük olduğu durumlarda ÇYTHYEY'nin, küçük olduğu durumlarda ise EC3'ün daha güvenli sonuçlar verdiği göz önünde bulundurulmalıdır. Grafiklerde, kapasite oranı eğrileri, HD haricindeki enkesitler için, S235, S275 ve S355 çelik kaliteleri için, HD enkesitli elemanlar için ise S275, S355 ve S460 çelik kaliteleri için ayrı ayrı çizdirilmiştir. Elemanların EC3'e göre tasarım dirençleri hesaplanırken, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişimi uygulanmıştır.

Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da sunulan grafiklerden, çelik kalitesinin kapasite oranlarınının en küçük ve en büyük değerlerine etkisinin yaklaşık %5 mertebelerinde olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, kapasite oranlarının en küçük değerlerine ulaştığı burkulma boylarının çelik sınıfına bağlı olduğu, akma dayanımı arttıkça kritik burkulma boyun azaldığı gözlenmiştir. HD haricindeki enkesit gruplarında, kapasite oranlarının en küçük değerlerinin S235 çelik kalitesi için çizdirilen eğrilerde, en büyük değerlerinin ise S355 çelik kalitesi için çizdirilen eğrilerde oluştuğu gözlenmiştir. Kapasite oranlarının en büyük ve en küçük değerlerinin, IPE enkesitli profillerde sırasıyla 1,18 (IPE80) ve 0,99 (IPE220), IPN enkesitli profillerde ise sırasıyla 1,19 (IPN550) ve 0,99 (IPN340) olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir ifadeyle, ÇYTHYEY incelenen üç çelik kalitesinde de I-enkesitli profillerin eksenel basınç kapasitelerini EC3'e göre ya daha güvenli ya da hemen hemen aynı güvenlik seviyesiyle hesaplatmaktadır. I-enkesitli elemanlar için çizilen kapasite eğrilerinin ortak özelliği, kısa eleman boylarında boy azaldıkça, uzun eleman boylarında ise boy arttıkça oranın artmasıdır. L_c=1 m'de kapasite oranları 1,12 ile 1,00 arasında değişmekle birlikte, yaklaşık 1,10'a eşittir.



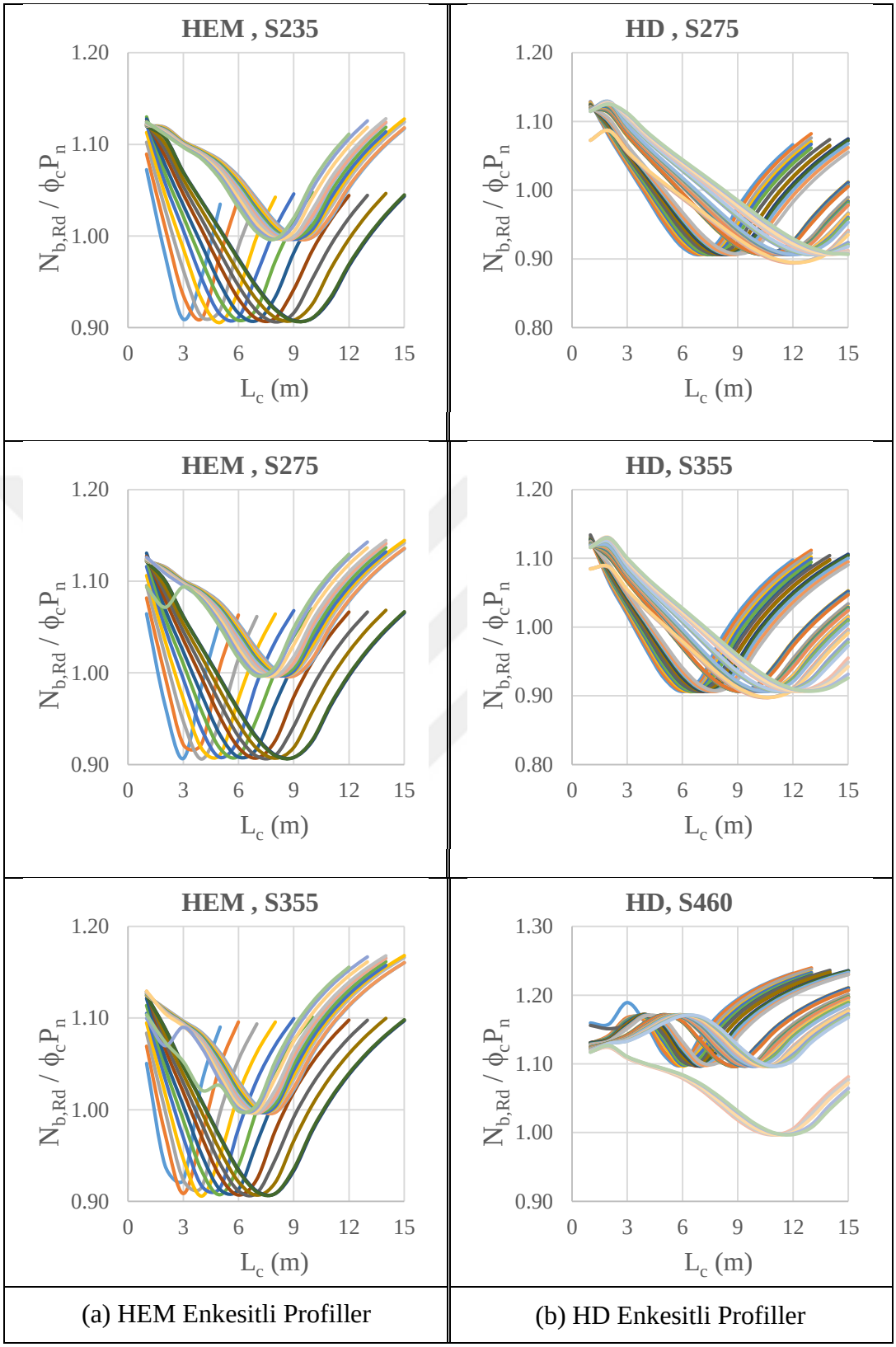
(a) IPE Enkesitli Profiller | (b) IPN Enkesitli Profiller

Şekil 4.7. Tezde incelenen tüm IPE ve IPN enkesitli profillerin direnç/dayanım oranlarının burkulma boyuyla değişimi



(a) HEA Enkesitli Profiller | (b) HEB Enkesitli Profiller

Şekil 4.8. Tezde incelenen tüm HEA ve HEB enkesitli profillerin direnç/dayanım oranlarının burkulma boyuyla değişimi



(a) HEM Enkesitli Profiller | (b) HD Enkesitli Profiller

Şekil 4.9. Tezde incelenen tüm HEM ve HD enkesitli profillerin direnç/dayanım oranlarının burkulma boyuyla değişimi

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da HE enkesitli elemanlar için sunulan eğrilerin, Şekil 4.7'dekilerden en belirgin farkı HE enkesitli bazı elemanlarda, kapasite oranlarının 0,90 değerine kadar azalmasıdır. Şekil 4.5(a) ve Şekil 4.5(b)'de çizilen kapasite grafiklerinde de gösterildiği gibi, bunun en önemli nedeni, profil numarası 360'dan büyük HEA ve HEB enkesitlerle 320'den büyük HEM enkesitlere sahip elemanların EC3'e göre tasarımlarında "a" ve "b" olarak isimlendirilen burkulma eğrilerinin, daha küçük profil numaralı enkesitlere sahip elemanların tasarımında ise "b" ve "c" eğrilerinin kullanılıyor olmasıdır. Bu durumda, ÇYTHYEY'nin büyük enkesitli HE profillerin kapasite hesaplarında hemen hemen incelenen bütün burkulma boylarında, küçük enkesitli HE profillerin hesaplarında ise yalnız "küçük" ve "büyük" burkulma boylarında EC3'e göre daha güvenli kaldığı sonucu çıkartılabilir. Ancak, "küçük" ve "büyük" burkulma boyu tanımının çelik kalitesine ve elemanın enkesitine bağlı olduğu fark edilebilir. HE profillerin kapasite oranlarının en büyük değerlerinin 1,17'ye eşit olduğu (HEA900, HEB900 ve HEM450), en küçük değerlerinin ise 0,90'a eşit olduğu (HEA280, HEB200 ve HEM160) belirlenmiştir.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da HE enkesitli elemanlar için sunulan kapasite oranı eğrilerinde dikkat çeken bir diğer özellik de, EC3'e göre enkesitleri Sınıf 4 olarak sınıflandırılmasına rağmen belirli bir burkulma boyundan sonra Sınıf 3 olarak kabul elemanların eğrilerinde Şekil 4.5'te gösterilene benzer bir dalgalanmanın gözlenmesidir. Aslında, benzer dalganmaların Şekil 4.7'de Sınıf 4 enkesitli IPE profillerde de oluştuğu gözlenebilir.

Çalışmada incelenen HD enkesitli basınç elemanlarının direnç/dayanım eğrileri S275, S355 ve S460 çelik kaliteleri için Şekil 4.9'da sağ tarafta gösterilen grafiklerde sunulmuştur. S275 ve S355 çelik kaliteleri için çizilen eğrilerin, Şekil 4.6(a) ve Şekil 4.6(b)'deki gibi, yaklaşık 0,9 ile 1,13 arasında değiştiği görülmektedir. Büyük numaralı HD profillerde, Şekil 4.6(c)'de gösterilen kapasite oranı eğrilerinde küçük burkulma boylarında gözlenen "tepe"nin oluştuğu fark edilebilir. Bu tür kapasite oranı eğrilerinin çoğunda en büyük değer bu "tepe"nin en üst noktasında oluşmaktadır ve aslında bu nokta EC3'e göre boyutsuz narinliğin 0,2'ye eşit olduğu burkulma boyuna karşılık gelmektedir. Daha önce de açıklandığı gibi, burkulma boyunun daha küçük değerlerinde elemanın tasarım burkulma direnci, enkesit direncine eşit alınmaktadır. Direnç hesaplarında "b" ve "c" olarak adlandırılan burkulma eğrilerinin kullanıldığı

profillerde olduğu gibi, HD enkesitli, S275 veya S355 çelik kaliteli "kısa" ve "uzun" burkulma boylarına sahip basınç elemanların kapasitelerini ÇYTHYEY EC3'e göre daha güvenli tarafta kalarak hesaplatmakta, "orta" boy kolonlarda ise EC3 daha güvenli sonuçlar vermektedir.

Şekil 4.9(b)'de HD enkesit ve S460 çelik kalitesi için sunulan direnç/dayanım oranı eğrileri S275 ve S355 çelik kaliteleri için verilenlere kıyasla daha düzensiz bir dağılım göstermesine karşın, kapasite oranları bu çelik kalitesinde 1,0'in altına düşmemektedir. Diğer bir ifadeyle, bu elemanların tasarımında ÇYTHYEY tüm burkulma boylarında daha güvenli sonuçlar vermektedir. Burkulma boyu 13 m'ye eşit HD260×68,2 enkesitli S460 çelik kaliteli elemanın direnç/dayanım oranı 1,24'e eşit olup, bu değer aynı zamanda tezin kapsamında incelenen tüm enkesit ve çelik kaliteleri için ele edilen en büyük kapasite oranına eşittir. Belirtilen elemanın EC3'e göre hesaplanan tasarım burkulma direnci $N_{b,Rd}$=419 kN iken, ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan tasarım basınç kuvveti dayanımı $\phi_c P_n$=338 kN'dur.

Şekil 4.9(b)'de görüldüğü gibi, S460 çelik kalitesinde 5 adet enkesit için (HD400×900, HD400×990, HD400×1086, HD400×1202 ve HD400×1299) çizdirilen kapasite oranı eğrileri, 1,00 ile 1,15 değerleri arasında değişerek diğerlerinden ayrışmaktadır. Bunun en önemli sebebi, belirtilen enkesitlerin hem h/b oranlarının 1,2'den büyük olması hem de başlık kalınlıklarının 100 mm'yi aşmasıdır. Bu nedenle belirtilen enkesitlere sahip basınç elemanlarının S460 çelik kalitesindeki tasarım burkulma dirençleri hesaplanırken tezde incelenen diğer enkesitlerden ayrı olarak Şekil 3.4'te tanımlanan burkulma eğrileri kullanılmıştır. Buna göre, S460 çelik kalitesinde, başlık kalınlığı 100 mm'yi aşan HD enkesitlere sahip elemanların direnç hesaplarında güçlü eksende "a" (α=0,21) ve zayıf eksende "b" (α=0,34) burkulma eğrileri kullanılmıştır. Buna karşın, belirtilen 5 enkesitin dışında kalan diğer tüm HD enkesitlerde h/b oranlarının 1,2'yi, başlık kalınlıklarının ise 100'ü aşmaması nedeniyle, Şekil 3.3'e göre, bu enkesitlerden herhangi birine sahip S460 çelik kaliteli bir elemanın tasarım direnci hesaplarında olası bütün genel burkulma modlarında "a" (α=0,21) eğrisi kullanılmıştır. Bu durum, tezde incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri arasında, güçlü ve zayıf eksende aynı burkulma eğrisinin kullanıldığı tek durum olup, S460 çelik kaliteli HD enkesitli elemanların kapasite oranı eğrilerindeki farklılığı da açıklamaktadır.

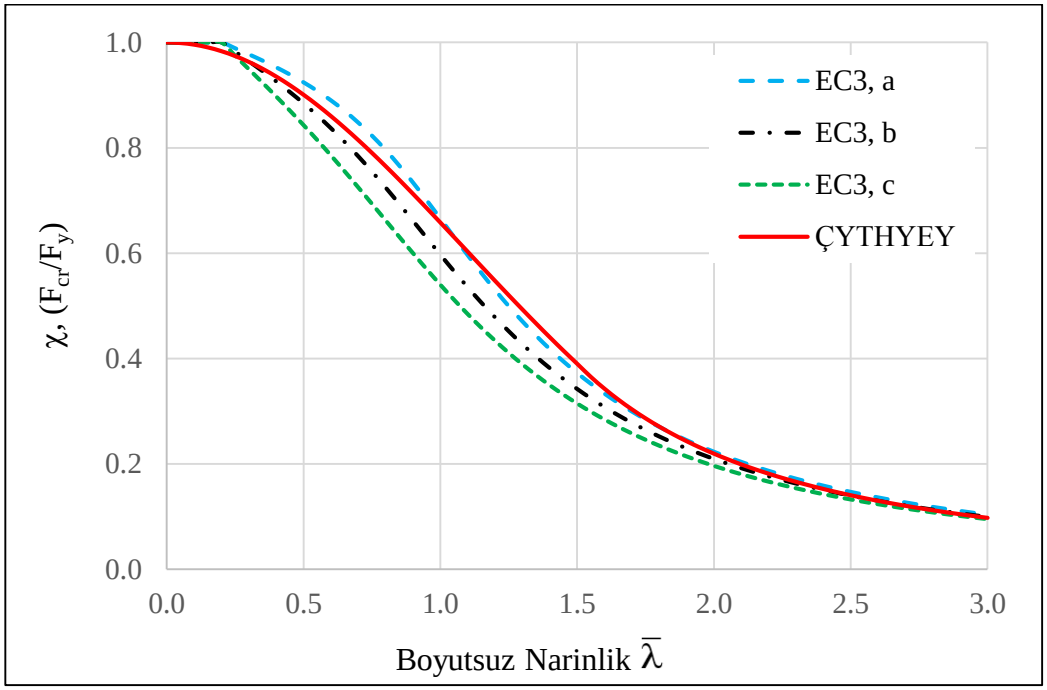
Sonuç olarak, incelenen tüm enkesit ve çelik kaliteleri dikkate alındığında, kapasite oranlarının 1,24'ü aşmadığı, aynı zamanda 0,89'un da altına da düşmediği belirlenmiştir. İncelenen tüm çelik kaliteleri için IPE ve IPN enkesitli profiller, profil numarası 360'dan büyük HEA ve HEB enkesitli profiller, profil numarası 320'den büyük HEM enkesitli profiller ile S460 kaliteli HD profillerin incelenen bütün burkulma boyları için ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan tasarım basınç kuvveti dayanımlarının EC3'e göre hesaplanan tasarım basınç dirençlerine ya hemen hemen eşit ya da bu dirençlerden daha küçük olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, "küçük" enkesitli HE profiller ile S275 veya S355 çelik kaliteli HD profillerin burkulma boylarının ara değerleri için hesaplanan tasarım dayanımları tasarım dirençlerinden büyük olabilmektedir. Ancak, incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için "orta" burkulma boylarının tanımlanma zorluğu nedeniyle tezin bir sonraki aşamasında kapasite oranı eğrilerinin eleman narinliklerine göre çizdirilmesine karar verilmiştir.

4.4.2. Tasarım kapasitelerinin eleman narinliklerine göre değişiminin karşılaştırılması

Şekil 3.6'dan görülebileceği gibi, EC3'te tanımlanan burkulma eğrileri, azaltma katsayılarının (χ) boyutsuz narinlikle ($\bar{\lambda}$) değişimini göstermektedir. Denklem (3.21), Denklem (2.5) ile karşılaştırıldığında, EC3'teki azaltma katsayısının aslında ÇYTHYEY'de F_{cr} kritik burkulma gerilmesinin F_y karakteristik akma gerilmesine oranına (F_{cr}/F_y) karşılık geldiği görülebilir. Bu tezde, bu oran "boyutsuz kritik gerilme" olarak adlandırılmıştır. EC3'te tanımlanan burkulma eğrilerini, ÇYTHYEY'de tanımlanan burkulma eğrileriyle karşılaştırmak amacıyla, dört farklı çelik sınıfı (S235, S275, S355 ve S460) ve farklı narinlik (L_c/i) değerleri için kritik burkulma gerilmeleri hesaplanmış, ilgili karakteristik akma gerilmesine oranlanarak boyutsuz kritik gerilmeler elde edilmiştir. Ardından, boyutsuz kritik gerilmelerin (F_{cr}/F_y) boyutsuz narinlikle ($\bar{\lambda}$) değişimleri çizdirilmiştir. ÇYTHYEY'de tanımlanan narinlik (L_c/i) değerleri, EC3'te tanımlanan boyutsuz narinlik ($\bar{\lambda}$) değerlerine, aşağıdaki denklem kullanılarak çevrilmiştir:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{f_y}{E}}\left(\frac{L_c}{i}\right) \tag{4.1}$$

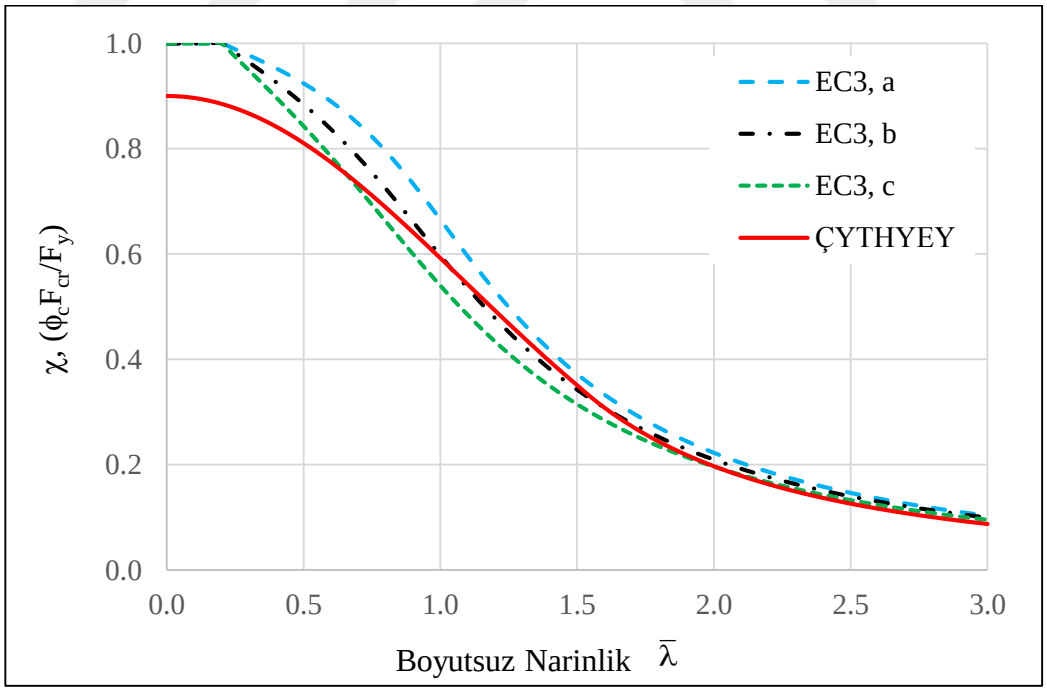
Denklem (4.1)'de ÇYTHYEY gereğince E=200 GPa alınmıştır. Denklem (4.1), Denklem (3.28) ve Denklem (3.30) kullanılarak elde edilmiş olup, enkesiti Sınıf 4 olmayan bütün elemanlar için geçerlidir. Sınıf 4 enkesitli elemanlar için, Denklem (3.28) yerine Denklem (3.29) kullanıldığında, boyutsuz narinlik hesabında Denklem (4.1)'in sağ tarafının A_{eff}/A oranının kareköküyle çarpılması gerektiği fark edilmiştir. Tablo (4.6)'dan, bu oranın en büyük değerinin HEA1000 profili için 0,88'e eşit olduğu; karekökü alındığında Denklem (4.1)'den elde edilen değeri %6,2 azaltacağı belirlenmiştir. Sınıf 4 enkesitler için yapılan azaltmanın çok yüksek olmaması nedeniyle ve enkesitten bağımsız eğriler elde etmek amacıyla, burkulma eğrileri yalnız Denklem (4.1) kullanılarak çizdirilmiştir. Denklem (4.1)'den fark edilebileceği gibi, ÇYTHYEY'ye göre enkesit ve burkulma boyları aynı, çelik kaliteleri farklı olan basınç elemanlarının boyutsuz narinlikleri farklıdır. Farklı çelik sınıfları için boyutsuz kritik gerilmeler boyutsuz narinliğe göre çizdirildiğinde, ÇYTHYEY eğrilerinin tek bir eğriye indirgendiği gözlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, ÇYTHYEY'de tanımlanan burkulma eğrileri, EC3'teki gibi tanımlandığında, aslında akma dayanımı F_y'den bağımsız hale gelmektedir. Boyutsuz kritik gerilmelerin (F_{cr}/F_y) boyutsuz narinlikle ($\bar{\lambda}$) değişimi Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Grafiğe, EC3'te tanımlanan ve bu tezde kullanılan üç 'burkulma eğrisi ("a", "b" ve "c") de eklenmiştir.



Şekil 4.10. ÇYTHYEY'den elde edilen "boyutsuz kritik gerilme" eğrisinin EC3'te tanımlanan burkulma eğrileriyle karşılaştırılması

Şekil 4.10 dikkatli incelendiğinde, ÇYTHYEY'den elde edilen burkulma eğrisinin boyutsuz narinlik değeri 1,05 ile 1,85 arasındayken "a" eğrisinin, 0,35 ile 2,55 arasındayken "b" eğrisinin, 0,25'ten büyükken "c" eğrisinin üstünde olduğu; $\bar{\lambda}$'ın diğer değerlerinde ilgili eğrilerin altında kaldığı belirlenmiştir. Şekil 4.10'dan, ÇYTHYEY eğrisinin yaklaşık olarak "a" ile "b" eğrisi arasında kaldığı ve eğrilerin şekillerinin oldukça benzer olduğu da söylenebilir.

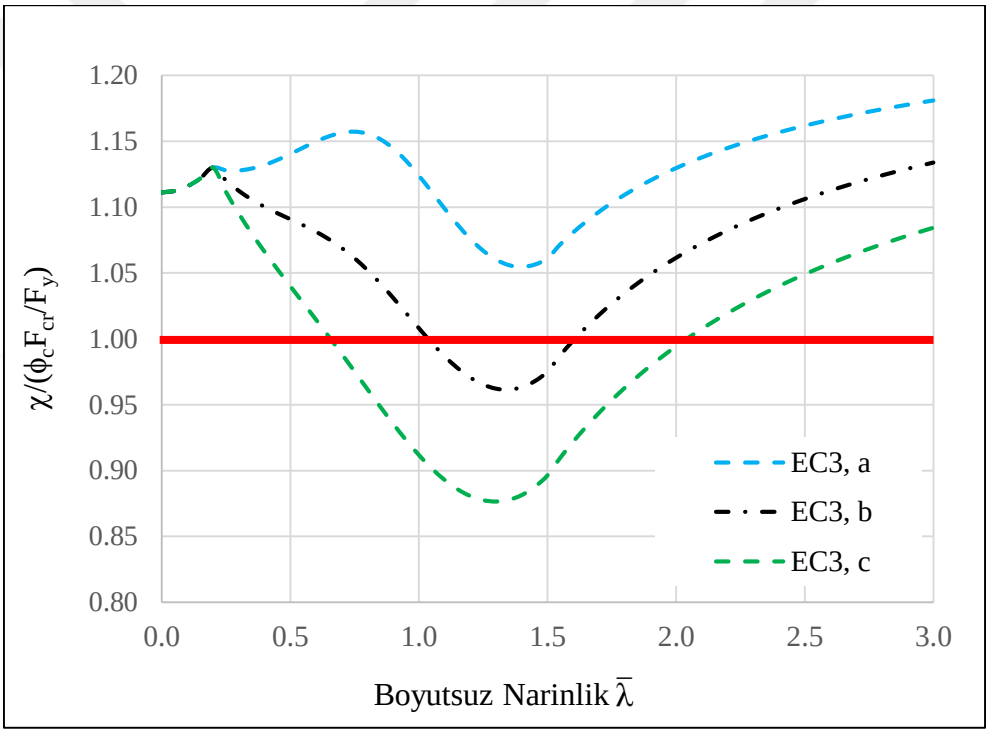
Ancak, boyutsuz kritik gerilmelerin burkulma eğrileriyle karşılaştırılması aslında iki yönetmeliğe göre hesaplanan "karakteristik" kapasiteler hakkında bilgi vermektedir. "Tasarım" kapasitelerinin karşılaştırılması için EC3'te kısmı katsayı, ÇYTHYEY'de dayanım katsayısı dikkate alınmalıdır. Bu tezde kısmi katsayının EC3 içerisinde önerildiği gibi 1,0 olarak alındığı hatırlanarak, EC3'te tanımlanan burkulma eğrilerinin, boyutsuz kritik gerilme (F_{cr}/F_y) eğrisi yerine, "azaltılmış" boyutsuz kritik gerilme ($\phi_c F_{cr}/F_y$) eğrisiyle karşılaştırılmasının daha gerçekçi olduğu düşünülmüştür. ÇYTHYEY kullanılarak çizdirilen azaltılmış boyutsuz kritik gerilme eğrisi, EC3 eğrileriyle birlikte Şekil 4.11'de sunulmuştur.



Şekil 4.11. ÇYTHYEY'ye göre belirlenen "azaltılmış boyutsuz kritik gerilme" eğrilerinin EC3'te tanımlanan burkulma eğrileriyle karşılaştırılması

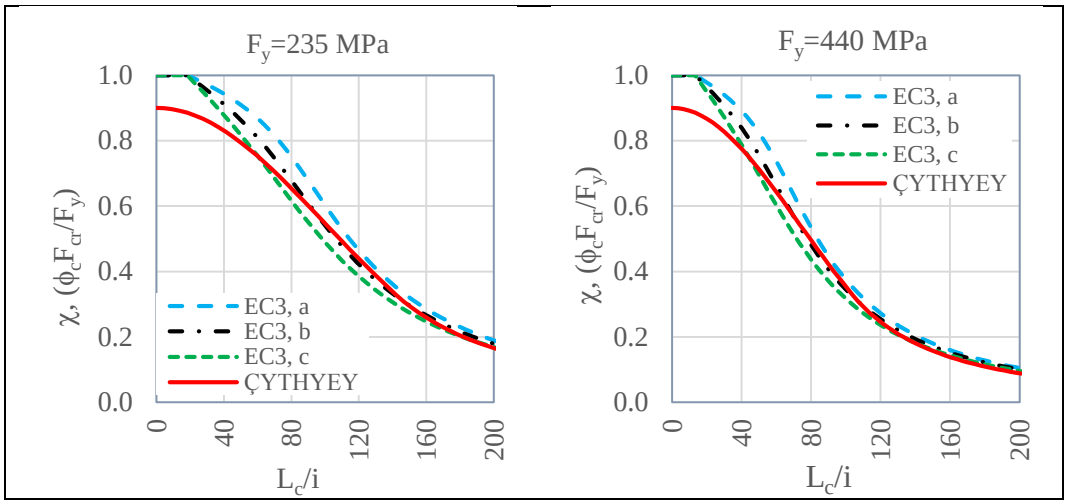
Şekil 4.11'den fark edilebileceği gibi, bu durumda, incelenen boyutsuz narinlik değerlerinin tamamında ÇYTHYEY eğrisi "a" eğrisinin altında kalmaktadır. Buna

karşın, ÇYTHYEY eğrisinin "b" ve "c" eğrilerinin üstünde olduğu boyutsuz narinlikler mevcuttur. Tasarım burkulma eğrilerini daha kolay karşılaştırabilmek amacıyla, Şekil 4.12'de EC3 eğrilerinin ÇYTHYEY eğrisine oranları çizdirilmiştir. Diğer bir ifadeyle, Şekil 4.12'de EC3'te verilen üç burkulma eğrisi için hesaplanan azaltma katsayılarının, azaltılmış boyutsuz kritik gerilmelere oranı ($\chi/(\phi_c F_{cr}/F_y)$) boyutsuz narinliğe göre çizdirilmiştir. Şekil 4.12'den, $\chi/(\phi_c F_{cr}/F_y)$ oranın (bu tezde, "azaltma katsayısı oranı" olarak adlandırılmıştır), boyutsuz narinlik değeri yaklaşık 1,0 ile 1,6 arasındayken "b" eğrisi için, 0,70 ile 2,0 arasındayken " c" eğrisi için, 1,0'den küçük değerler aldığı; yani, ÇYTHYEY eğrisinin belirtilen boyutsuz narinlik değerlerinde "b" ve "c" eğrilerinin üstünde kaldığı görülmektedir.



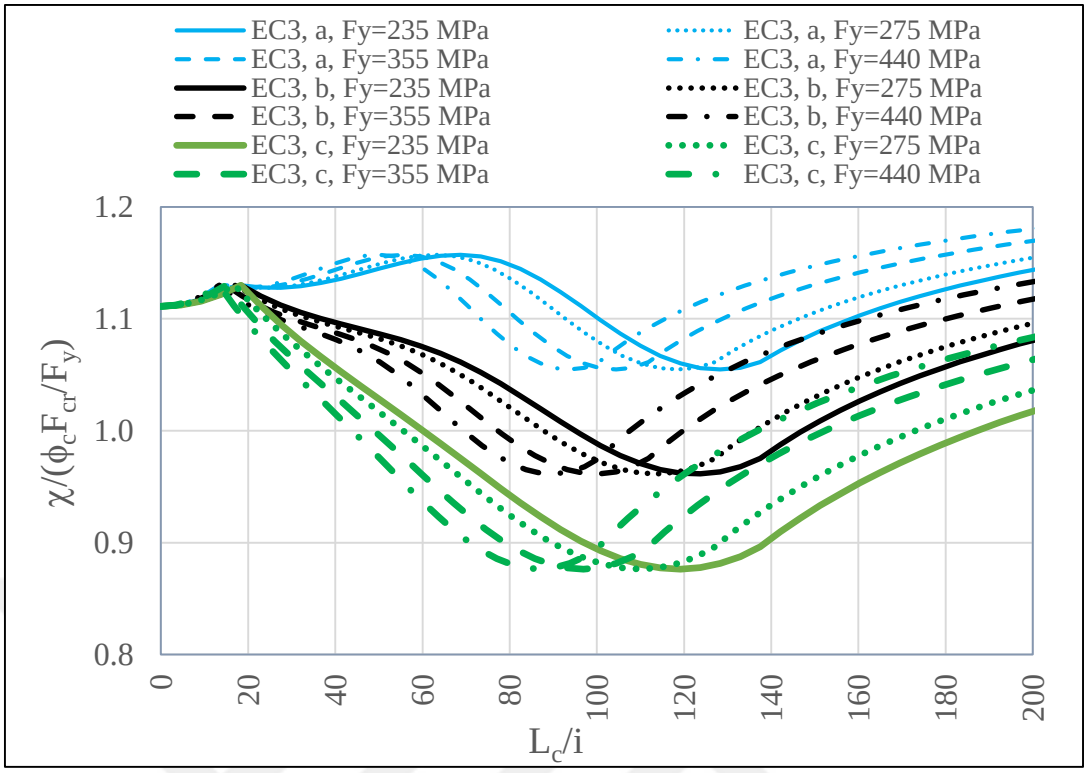
Şekil 4.12. EC3'te tanımlanan üç farklı burkulma eğrisi için elde edilen kapasite azaltma katsayısı oranlarının boyutsuz narinlikle değişimi

Elbette, boyutsuz narinliğe göre çizdirilen burkulma eğrileri, ÇYTHYEY'de tanımlanan narinliğe (L_c/i) göre de çizdirilebilir. Ancak, bu durumda, grafikler çelik kalitesine bağlı olacaktır. Şekil 4.13'te iki farklı akma dayanımı (F_y=235 MPa ve F_y=440 MPa) için çizdirilen grafikler sunulmuştur.



Şekil 4.13. İki farklı çelik kalitesi için, EC3 ve ÇYTHYEY'de tanımlanan burkulma eğrilerinin L_c/i oranıyla değişimi

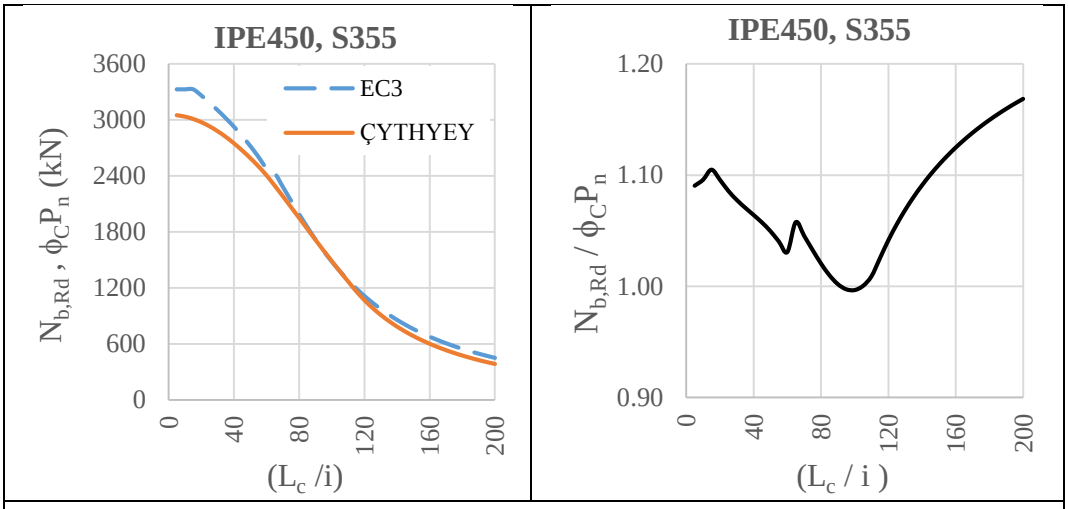
Şekil 4.13'ten görülebileceği gibi, aynı L_c/i değerine sahip olmasına karşın, akma dayanımları farklı iki basınç elemanının azaltma katsayıları her iki yönetmeliğe göre de farklıdır. Çelik sınıfının burkulma eğrilerine etkisini daha iyi inceleyebilmek amacıyla, dört farklı F_y değeri için (235, 275, 355 ve 440 MPa), azaltma katsayısı oranları ($\chi/(\phi_c F_{cr}/F_y)$) hesaplanarak L_c/i'ye göre değişimleri Şekil 4.14'te sunulmuştur. Şekil 4.14'ten de fark edilebileceği gibi, akma dayanımı, azaltma katsayısı oranının en küçük değerini değiştirmemekle birlikte, bu değerin gözlendiği L_c/i değerlerini değiştirmektedir. Örnek olarak, "b" eğrisi için hesaplanan en küçük değer 0,961 olup, bu değer F_y=235 MPa için $L_c/i \cong 125$, F_y=275 MPa için $L_c/i \cong 115$, F_y=355 MPa için $L_c/i \cong 100$ ve F_y=440 MPa için ise $L_c/i \cong 90$'da oluşmaktadır. Diğer bir ifadeyle, çeliğin akma dayanımı arttıkça, oranın en küçük değerine ulaştığı L_c/i değeri azalmaktadır. Şekil 4.14'ten, aynı L_c/i değerine sahip basınç elemanları için hesaplanan azaltma katsayısı oranlarının da akma dayanımına bağlı olarak bir miktar değiştiği gözlenmektedir. Örnek olarak, L_c/i=60 ve "b" eğrisi için hesaplanan $\chi/(\phi_c F_{cr}/F_y)$ oranları, yaklaşık olarak, F_y=235 MPa için 1,08, F_y=275 MPa için 1,07, F_y=355 MPa için 1,05 ve F_y=440 MPa için ise 1,03'tür. Buna karşın, aynı burkulm eğrisi ve L_c/i=140 için hesaplanan azaltma katsayısı oranları sırasıyla 0,98, 1,01, 1,05 ve 1,07'dir. Diğer bir ifadeyle, akma dayanımının azaltma katsayısına oranı hem EC3'te tanımlanan burkulma eğrisine hem de elemanın narinlik oranına bağlıdır.



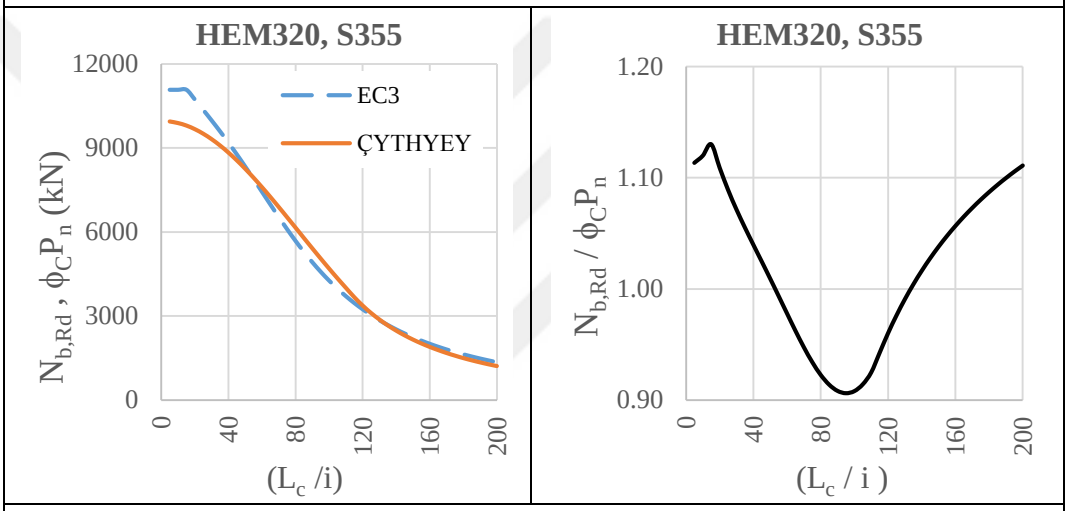
Şekil 4.14. Dört farklı çelik kalitesi için, EC3'te tanımlanan üç farklı burkulma eğrisi için elde edilen azaltma katsayısı oranlarının L_c/i oranıyla değişimi

Şekil 4.14'ten, azaltma katsayısı oranın en küçük değerinin "a" eğrisi için 1,06, "b" eğrisi için 0,961 ve "c" eğrisi için 0,876 olduğu belirlenmiştir. L_c/i oranı 200'ü geçmediği müddetçe, "c" eğrisi için kapasite azaltma oranının 1,13'ü geçmediği gözlenmiştir. Bu değer, boyutsuz narinliğin 0,2'ye eşit olduğu L_c/i oranında oluşmaktadır. "b" eğrisi için elde edilen en büyük değerin de yaklaşık 1,13'e eşit olduğu söylenebilir. Bu değer, ya "c" eğrisinde olduğu gibi, boyutsuz narinliğin 0,2'ye eşit olduğu L_c/i oranında oluşmakta, ya da ÇYTHYEY'de izin verilen en büyük narinlik değeri olan $L_c/i=200$'de oluşmaktadır. "a" eğrisinde ise en büyük değerin çelik kalitesine bağlı olarak, 1,18'e kadar arttığı gözlenmiştir. Bütün çelik kaliteleri ve burkulma eğrileri göz önünde bulundurulduğunda, kapasite azaltma katsayısı oranının en küçük değerinin 0,876, en büyük değerinin ise 1,18 tespit edilmiştir.

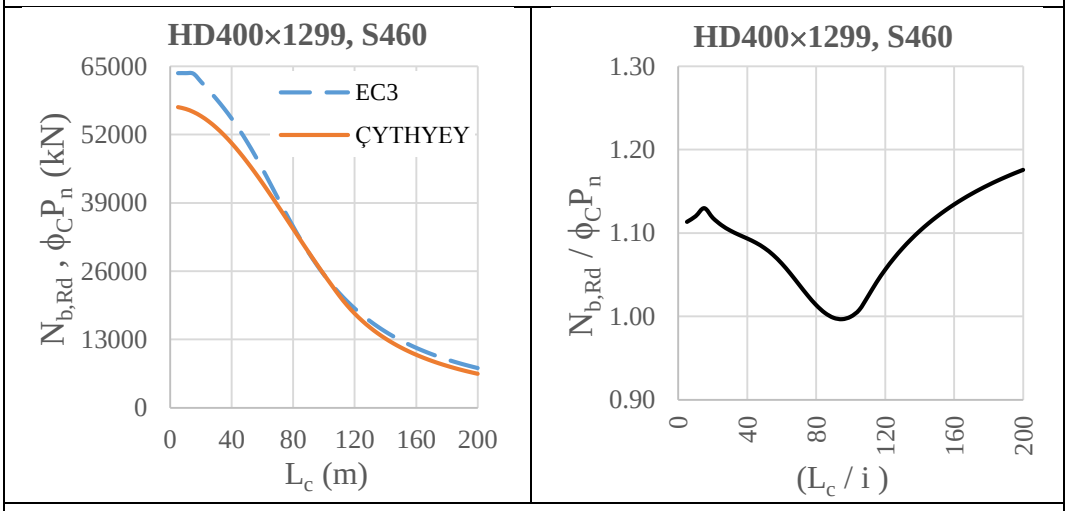
Şekil 4.15'te, tezde incelenen profillerin arasından seçilen bazı I, HE ve HD profillerin farklı çelik kalitelerindeki tasarım burkulma dirençleri ($N_{b,Rd}$) ile tasarım basınç kuvveti dayanımlarının ($\phi_c P_n$) eleman narinliğiyle (L_c/i oranıyla) değişimleri sağda, direnç/dayanım oranlarının ($N_{b,Rd} / \phi_c P_n$) narinlikle değişimleri ise solda sunulmuştur.



(a) IPE450, S355



(b) HEA900, S275



(c) HD400×1299, S460

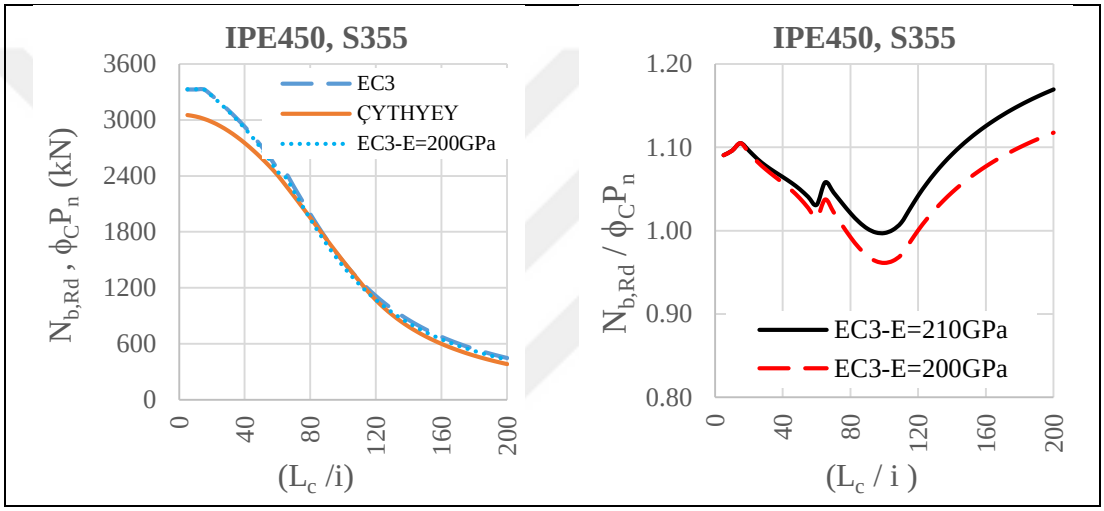
Şekil 4.15. Bazı I, HE ve HD enkesitli profillerin kapasite-narinlik ve kapasite oranı-narinlik eğrileri

Şekil 4.15'te verilen ve tezde "kapasite-narinlik" ve "kapasite oranı-narinlik" grafikleri olarak da isimlendirilen bu grafiklerden; farklı enkesit, çelik sınıfı ve eleman narinlikleri için, EC3'ün mü ÇYTHYEY'nin mi eleman kapasitelerini daha güvenli tarafta kalarak hesaplattığı belirlenebilir. Grafiklerde, EC3'e göre tasarım dirençleri hesaplanırken, Bölüm 4.3.2'de bahsedildiği gibi, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişimi göz önünde bulundurulmuştur.

Şekil 4.15'te sunulan grafiklerin, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da sunulan grafiklere oldukça benzediği ancak Şekil 4.15'teki grafiklerin iki yönetmelik arasındaki tasarım farklılıklarını daha kolay gözlemlemeyi sağladığı söylenebilir. Şekil 4.15'te verilen kapasite oranı-narinlik eğrilerinin en belirgin ortak özelliklerinden biri her üç eğrinin de çok küçük narinliklerde artan narinlikle artmasıdır. Bu durum, boya göre çizilen grafiklerde yalnız Şekil 4.6(c)'de gözlenmiştir ve nedeni EC3'te boyutsuz narinliğin 0,2'den küçük olduğu durumlarda azaltma katsayısının 1,0 olarak alınıyor olmasıdır. Enkesiti narin/Sınıf 4 olmayan elemanlarda (Şekil 4.15 (b) ve (c)), kapasite oranı, bu ilk tepeden sonra artan narinlikle azalarak orta narinliklerde en küçük değerine ulaşmaktadır.

Bölüm 4.4.1'de belirtildiği gibi, S355 çelik kalitesinde narin/Sınıf 4 enkesite sahip IPE450 profili için Şekil 4.4(b)'de verilen kapasite oranı-boy grafiğindeki dalgalanmanın nedeni EC3'e göre direnç hesapları yapılırken L_c=2,55 m'den büyük eleman boylarında enkesitin Sınıf 3 olarak kabul edilmesiydi. Şekil 4.15(a)'da verilen kapasite oranı-narinlik eğrisinde, bu geçiş daha belirgin bir şekilde gözlenmektedir. İlgili enkesitin en küçük atalet yarıçapının 41,2 mm olduğu dikkate alındığında, sınıf değişiminin gözlendiği eleman narinliği yaklaşık 62 olarak hesaplanabilir. Şekil 4.15(a)'da da ani zıplamanın bu narinlikte olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, F_y=355 MPa ve IPE450 enkesiti için çizdirilen kapasite oranı-narinlik eğrisinin en küçük değerinin L_c/i=100 değerinde oluştuğu ve yaklaşık 0,997'ye eşit olduğu belirlenmiştir. Bu profilin direnç hesaplarında "b" eğrisinin kullanıldığı hatırlandığında, Şekil 4.14'ten de görülebileceği gibi, kapasite oranının en küçük değeri azaltma katsayısı oranının en küçük değerine ulaştığı narinlikte oluşmaktadır. Buna karşın, kapasite oranının en küçük değeri, azaltma katsayısı oranının en küçük değerinden %3,7 daha büyüktür. Bu farkın, kapasite hesaplarında kullanılan elastisite modülü değerinin iki yönetmelikte farklı tanımlaması nedeniyle oluştuğu

düşünülmüştür. Dayanım hesaplarında E=200 GPa alınırken, direnç hesaplarında E=210 GPa alınmaktadır. Diğer bir ifadeyle, EC3 elastisite modülünü (ve kayma modülünü) ÇYTHYEY'ye göre yaklaşık %5 daha büyük almaktadır. Elastisite modülünün kapasite oranına etkisini daha yakından incelemek amacıyla, S355 çelik kalitesi ve IPE450 enkesiti için direnç hesapları E=200 GPa alınarak tekrarlanmış, elde edilen eğriler Şekil 4.15(a)'daki eğrilerle birlikte Şekil 4.16'da sunulmuştur. Kapasite oranı eğrilerinden görülebileceği gibi, her iki yönetmelikte de malzeme özellikleri aynı alınsaydı, kapasite oranının en küçük değeri 0,961'e eşit olacaktı. Bu değer, "b" eğrisi ve F_y=355 MPa için, Şekil 4.14'teki eğriden elde edilen değerle birebir örtüşmektedir.



Şekil 4.16. ÇYTHYEY ve EC3'te elastisite modülünün farklı tanımlanmasının kapasite-narinlik ve kapasite oranı-narinlik eğrilerine etkisi

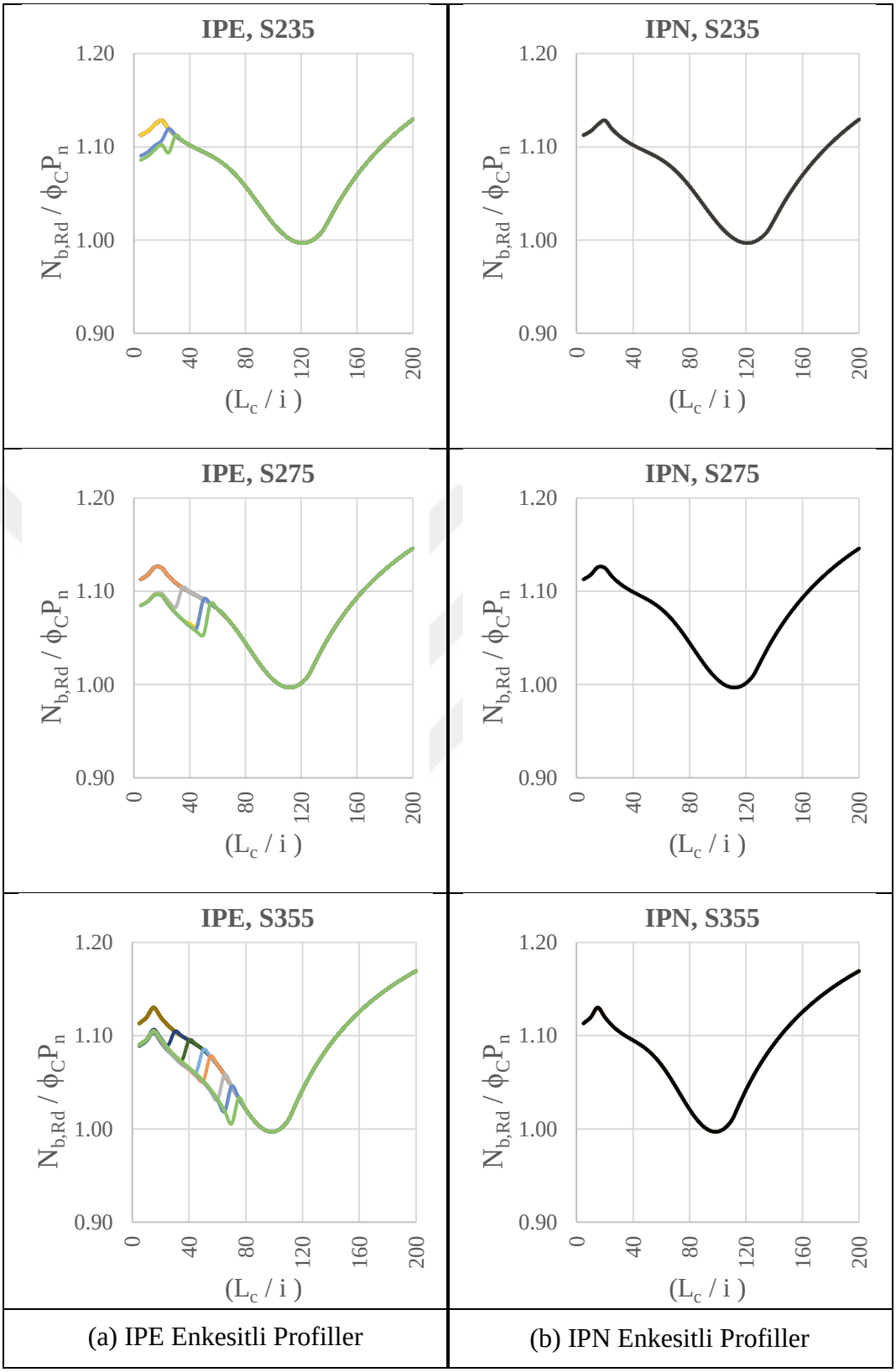
Şekil 4.15(b)'de, S355 çelik kalitesinde narin/Sınıf 4 olmayan bir enkesite sahip HEM320 enkesitli bir basınç elemanı için çizdirilen kapasite ve kapasite oranı grafikleri görülmektedir. Enkesitinin narin/Sınıf 4 olmaması nedeniyle, Şekil 4.15(a)'da gözlenen zıplama bu eleman için çizdirilen eğride gözlenmemiştir. Bu elemanının kapasite oranı-narinlik eğrisinin, Şekil 4.15(a)'da verilenden eğriden bir diğer farkı da kapasite oranının en küçük değerinin L_c/i=95'te oluşması ve değerinin 0,906'ya eşit olmasıdır. Kapasite oranı-boy grafiklerinde belirtildiği gibi, bunun en önemli nedeni, bu elemanın direnç hesaplarında "c" eğrisinin kullanılıyor olmasıdır. F_y=355 MPa ve"c" eğrisi için Şekil 4.14'te çizdirilen eğride, en küçük değerin yaklaşık L_c/i=95'te oluştuğu ve değerinin 0,877'ye eşit olduğu görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, en küçük değerler arasındaki fark, yönetmeliklerde E'nin farklı tanımlanmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.15(c)'de, başlık kalınlığı 120 mm olan HD400x1299 profilinin S460 çelik kalitesi için kapasite-narinlik ve kapasite oranı narinlik eğrileri sunulmuştur. Bu profilin direnç hesaplarında da "b" eğrisi kullanılmıştır. Bu profil için kapasite oranının en küçük değerinin yaklaşık L_c/i=95'te oluştuğu ve değerinin 0,997'ye eşit olduğu görülmektedir. Şekil 4.14'ten, "b" eğrisi ve F_y=440 MPa için, en küçük kapasite azaltma katsayısı oranı değerinin L_c/i=90'da oluştuğu ve değerinin 0,961'e eşit olduğu görülmektedir. Kapasite oranı ile azaltma katsayısı oranının en küçük olduğu L_c/i değerlerinin farklı olmasının nedeni bu profilin kapasite hesaplarında, başlık kalınlığının aşırı büyük olması nedeniyle, akma dayanımının 385 MPa alınıyor olmasıdır.

Sonuçları genelleştirmek amacıyla, tezin kapsamında incelenen tüm enkesit ve çelik kaliteleri için kapasite oranı-narinlik eğrileri çizdirilerek, IPE ve IPN enkesitli profiller için Şekil 4.17'de, HEA ve HEB enkesitli profiller için Şekil 4.18'de ve HEM ve HD enkesitli profiller için Şekil 4.19'da sunulmuştur.

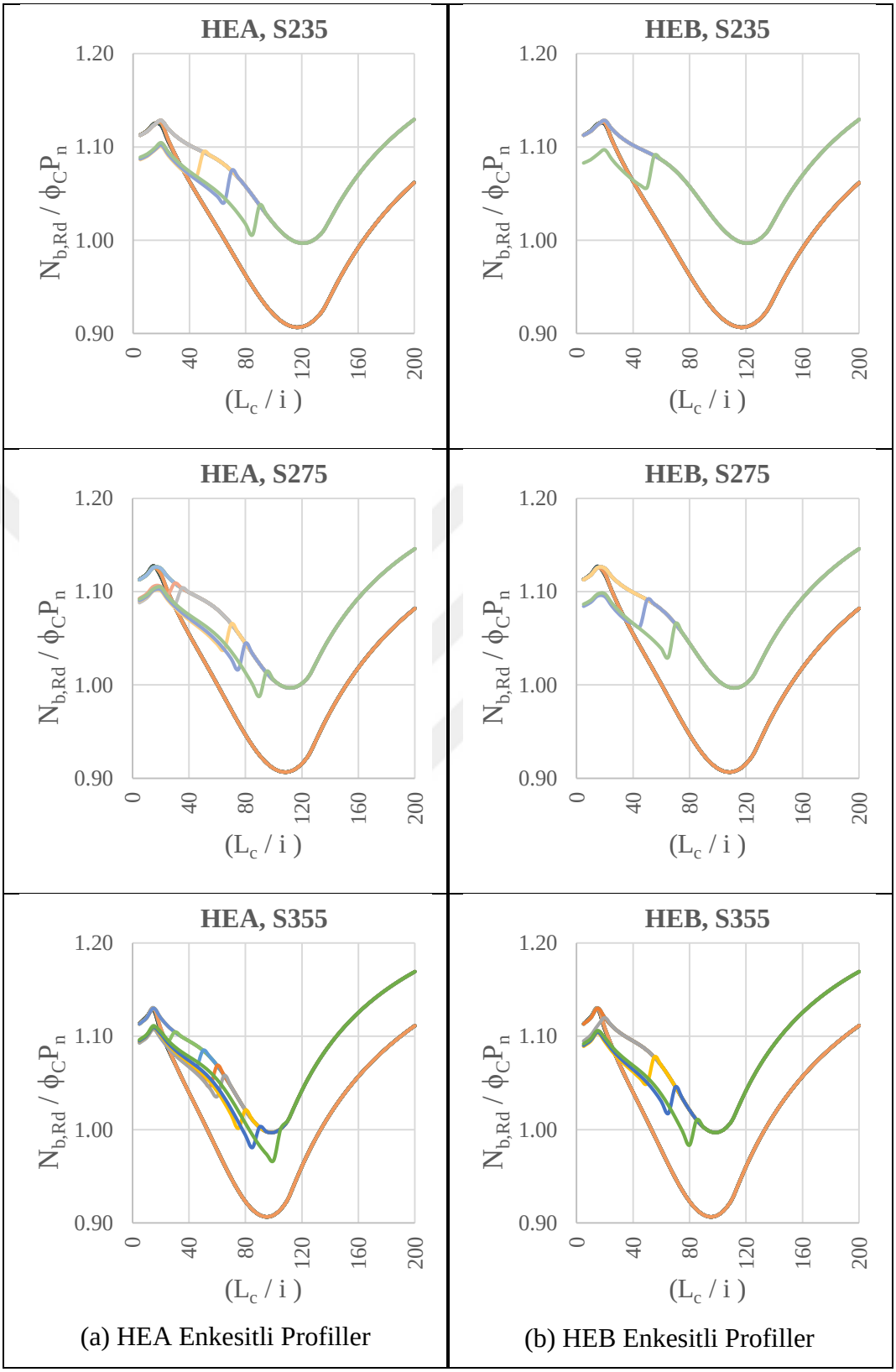
Şekil 4.17'de sağda verilen grafiklerden de görülebileceği gibi, IPN profillerin tamamı Sınıf 4/narin olmayan enkesite sahip olduklarından ve direnç hesaplarında daima "b" eğrisi kullanıldığından, kapasite oranı eğrileri aynı çelik kalitesine sahip bütün profiller için tek bir eğriye dönüşmektedir. IPN profiller için elde edilen eğriler, Şekil 4.14'te "b" eğrisi için elde edilen eğrilerle hemen hemen aynı olup, aynı L_c/i değerinde hesaplanan kapasite oranları ile azaltma katsayısı oranları arasında yönetmeliklerde E değerinin farklı alınması nedeniyle oluşan ufak farklılıklar vardır.

Şekil 4.17'de solda verilen grafikler incelendiğinde, narin ve/veya Sınıf 4 olmayan IPE profiller için elde edilen eğrilerin aynı çelik kalitelerinde IPN profiller için elde edilen eğrilerle örtüştüğü gözlenmiştir. Narin/Sınıf 4 enkesitli elemanların kapasite oranı eğrileri ise, EC3 hesaplarında enkesit sınıfı değişene kadar, narin/Sınıf 4 olmayan enkesitli elemanların eğrilerinin altında kalmaktadır. Bu eğriler sınıf değişimiyle birlikte narin ve/veya Sınıf 4 olmayan IPE profiller için elde edilen eğrilere ulaşmaktadır. HE enkesitli elemanların kapasite oranı eğrileri de IPE enkesitli elemanlarınki benzemektedir. Narin/Sınıf 4 enkesitli elemanlarda kapasite oranı eğrileri nispeten küçük değerlerle başlamakta, direnç hesaplarında sınıf değişimi yapıldığı an, narin/Sınıf 4 olmayan elemanlar için çizdirilen eğrilere ulaşmaktadır.



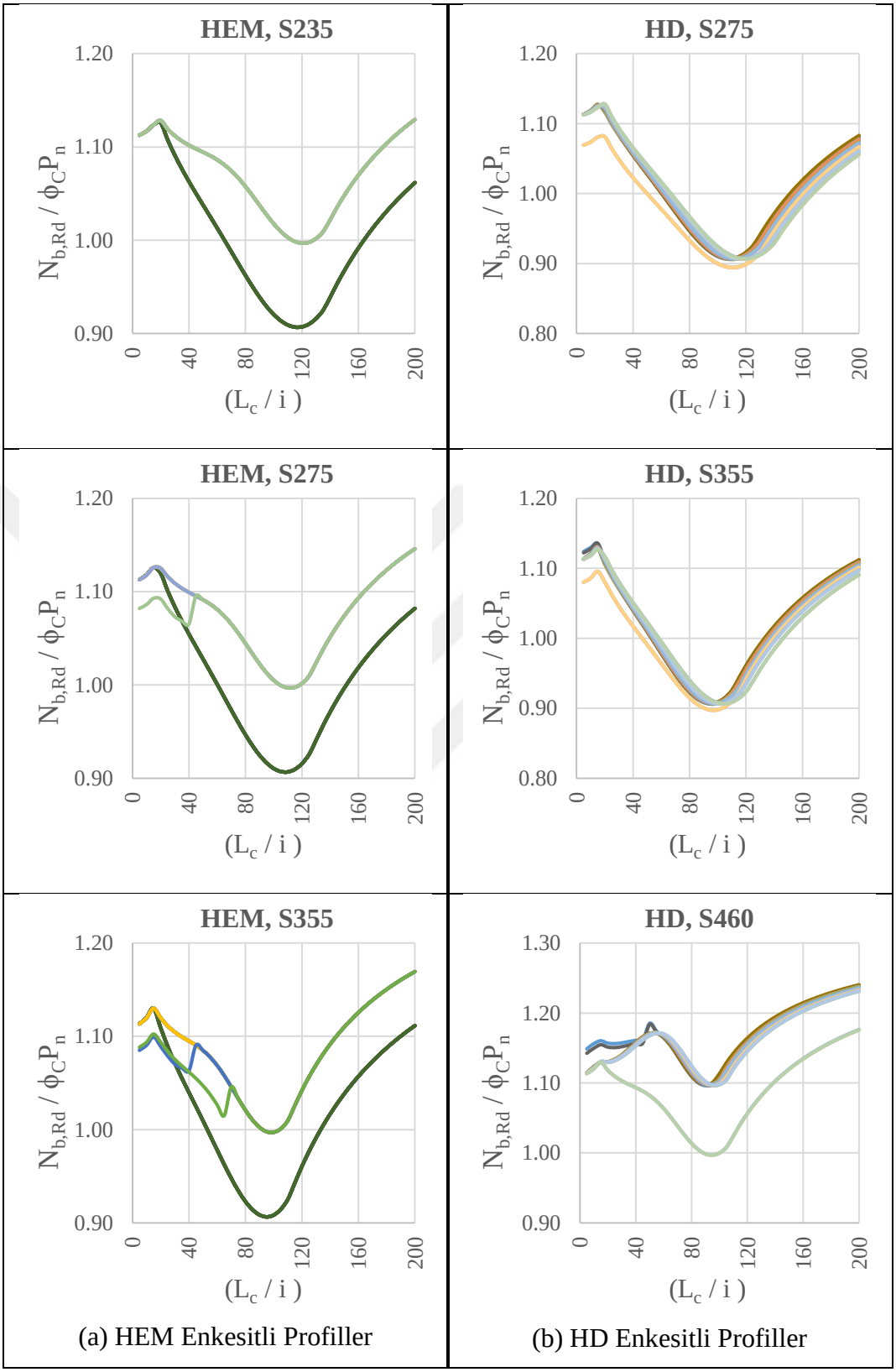
(a) IPE Enkesitli Profiller | (b) IPN Enkesitli Profiller

Şekil 4.17. Tezde incelenen tüm IPE ve IPN enkesitli profillerin direnç/dayanım oranlarının eleman narinlikleriyle değişimi



(a) HEA Enkesitli Profiller (b) HEB Enkesitli Profiller

Şekil 4.18. Tezde incelenen tüm HEA ve HEB enkesitli profillerin direnç/dayanım oranlarının eleman narinlikleriyle değişimi



Şekil 4.19. Tezde incelenen tüm HEM ve HD enkesitli profillerin direnç/dayanım oranlarının eleman narinlikleriyle değişimi

HE enkesitli elemanların direnç/dayanım oranı eğrileri IPE enkesitli elemanların eğrileriyle kıyaslandığından, narin/Sınıf 4 olmayan HE enkesitli elemanlar için iki ayrı eğri oluştuğu gözlenebilir. Bir önceki bölümde detaylıca anlatıldığı gibi, bunun nedeni, küçük enkesitli HE profillerin direnç hesaplarında "c" eğrisinin, "büyük" enkesitli HE profillerin hesaplarında ise "b" eğrisinin kullanılıyor olmasıdır. F_y=235 MPa için çizilen kapasite oranı eğrilerinden, "b" eğrisinin $L_c \cong 120$, "c" eğrisinin $L_c \cong 125$'te en küçük değerlerine ulaştığı, ilgili değerlerin sırasıyla 0,961 ve 0,876 olduğu bilinmektedir. S235 çelik kaliteli ve HE enkesitli elemanlarda, en küçük kapasite oranları aynı burkulma boylarında olmakla birlikte değerleri sırasıyla 0,996 ve 0,906'ya eşittir. Şekil 4.19'da HEM enkesitler için verilen grafikler incelendiğinde, HEM enkesitler için çizdirilen eğrilerin HEA ve HEB enkesitler için çizdirilenlere benzediği görülebilir. S235 çelik kalitesinde hiçbir HEM profilinin enkesiti Sınıf 4 ya da narin olmadığından, ilgili grafik yalnız iki eğriden oluşmaktadır.

Tablo 4.5'ten hatırlanabileceği gibi, HD profiller arasında S275 çelik kalitesinde narin/Sınıf 4 enkesitli profil bulunmamaktadır. Şekil 4.19'da S275 çelik kalitesindeki HD profiller için verilen grafik, IPN profiller için verilen grafiklerle karşılaştırıldığında, IPN enkesitlerde olduğu gibi, EC3'e göre yapılan hesaplarda aynı burkulma eğrisi kullanılıyor olmasına rağmen, HD profiller için çizdirilen kapasite oranı eğrilerinin tek bir eğriye indirgenmediği gözlenir. Bunun nedeni, kalınlıkları değişken HD profillerde, akma dayanımının, belirli aralıklarla, artan başlık kalınlığıyla azalmasıdır. Örnek olarak, incelenen HD profillerin arasında, S275 çelik kalitesinde üretilmiş olmalarına rağmen, akma dayanımı 225 MPa olan enkesit bulunmaktadır. Tablo 4.5'te belirtildiği gibi, S355 çelik kalitesinde, ÇYTHYEY'ye göre narin olmayan enkesit olarak sınıflandırılan iki HD enkesiti EC'e göre Sınıf 3 olarak sınıflandırılmaktadır. S355 çelik kalitesi ve HD profiller için çizdirilen ve diğer eğrilerin nispeten altında kalan eğriler bu enkesitlere sahip elemanların eğrileridir. Bu profillerin enkesitleri Sınıf 4 olmadığından, diğer narin enkesitli elemanların kapasite oranı eğrilerinde gözlenen zıplama bu eğrilerde görülmemektedir.

Şekil 4.19'da S460 çelik kalitesi ve HD enkesitler için çizdirilen grafikte ise önceki grafiklerde gözlenmeyen iki fark gözlenmektedir. Kapasite oranı-boy grafiklerinde detaylıca açıklandığı gibi, S460 çelik kalitesinde HD profilllerin çoğunun direnç hesaplarında "a" eğrisi kullanılmaktadır. Bu profiller için dayanım oranları 1,24'lere

kadar ulaşabilmektedir. Direnç hesaplarında "b" eğrisi kullanılan profillerin kapasite oranı eğrileri ise aynı eğriyi kullanılan ve Sınıf 4/narin enkesitli olmayan diğer profillerin kapasite oranı eğrilerine benzemektedir. Şekil 4.19'da S460 çelik kalitesi ve HD enkesitler için çizdirilen grafikte gözlenen diğer bir fark ise başlıkları narin/Sınıf 4 enkesitli elemanlar için çizdirilen eğrilerinin, olmayanlar için çizdirilen eğrilerin eğrisinin üstünde kalmasıdır. Bunun en önemli nedeni, Tablo 4.6'da listelendiği gibi, bu elemanların ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan etkin alanlarının, EC3'e göre hesaplanan etkin alanlarından daha küçük olmasıdır.

Bir önceki bölümde, kapasite oranı-boy grafiklerinde, EC3'ün ÇYTHYEY'den daha güvenli sonuçlar verdiği, yani, direnç/kapasite oranının 1,0 değerinin altında kaldığı, burkulma boylarının enkesitten enkesite değiştiği sonucuna varılmıştı. Bu bölümde çizdirilen kapasite oranı-narinlik grafiklerinde, "orta boy" daha doğrusu "orta narinlik" tanımının daha kolay yapılabileceği görülmüştür. Ancak, burkulma eğrileri çelik kalitesine bağlı olduğundan, EC3'ün ÇYTHYEY'den daha güvenli sonuçlar verdiği "orta narinlik"ler incelenen çelik kaliteleri için ayrı ayrı belirlenmelidir.

Buna göre, IPE ve IPN enkesitlerde, incelenen bütün çelik kalitelerinde, kapasite oranının en küçük değeri 0,997'ye eşit olduğundan I-enkesitli profillerin kapasite hesaplarında ÇYTHYEY'nin bütün burkulma boy ve narinliklerde güvenli tarafta kaldığı söylenebilir. Bu profiller için kapasite oranının en büyük değeri 1,17 olup, S355 çelik kaliteli profillerde $L_c/i=200$ değerinde elde edilmektedir. Direnç hesaplarında kullanılan burkulma eğrisi "c" olan enkesit numarası 400'den küçük HEA ve HEB profillerle enkesit numarası 340'dan küçük HEM profillerde ise kapasite oranının en küçük değerinin 0,906'ya eşit olduğu tespit edilmiştir. Enkesit numaraları daha büyük olan ve narin/Sınıf 4 enkesitli olmayan HE profillerde ise yaklaşık 0,997'ye eşit olduğu, ancak narin/Sınıf 4 enkesitli HEA profillerde bu değerin 0,968, HEB profillerde ise 0,983'e kadar inebildiği gözlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, "büyük" enkesitli HE profillerin hemen hemen tamamında da ÇYTHYEY'nin güvenli sonuçlar verdiği söylenebilir. "Küçük" enkesitli HE profillerde, narinlik değerinin S235 çelik kalitesinde 70-160, S275 çelik kalitesinde 65-150 ve S355 çelik kalitesinde 55-130 arasında kaldığı durumlarda, EC3'ün ÇYTHYEY'ye göre daha güvenli sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Kapasite oranının en büyük değeri küçük enkesitli HE profillerde 1,13; büyük enkesitli HE profillerde ise 1,17'ye ulaştığı belirlenmiştir. HD

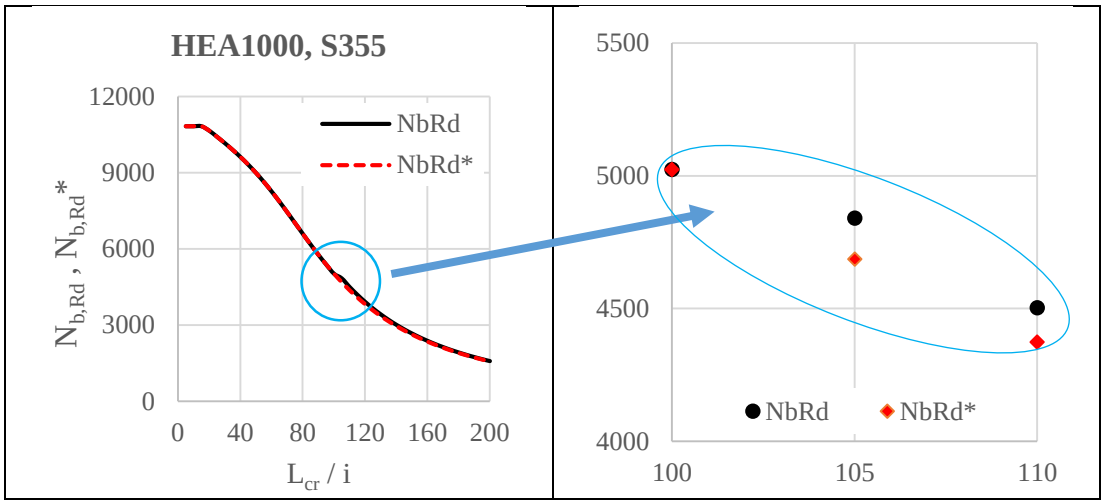
enkesitli elemanlarda ise narinlik değerinin S275 çelik kalitesinde 65-150, S355 çelik kalitesinde ise 55-130 aralıklarında bulunduğu durumlarda, kapasite oranının 1,0 değerinin altına düştüğü gözlenmiştir. HD profiller için hesaplanan en küçük kapasite oranı 0,894'tür. S460 çelik kalitesinde üretilen HD profiller için ise bu değer 0,997'ye eşittir. Diğer bir ifadeyle, S460 çelik kaliteli HD profillerin kapasite hesaplarında hemen hemen bütün eleman narinliklerinde ÇYTHYEY daha güvenli sonuçlar vermektedir. S275 ve S355 çelik kalitelerinde üretilen HD profiller için elde edilen en büyük kapasite oranı 1,14 iken, S460 çelik kaliteli HD profillerde bu değer 1,24'e kadar çıkmaktadır.

4.5. EC3'e Göre Sınıf 4 Enkesitli Elemanlar İçin Sınıf Değişimi Göz Ardı Edilerek Hesaplanan Tasarım Kapasiteleri Kullanılarak Yapılan Karşılaştırmalar

Bu bölümde yapılan karşılaştırmalarda, Tablo 4.5'te listelenen ve EC3'e göre Sınıf 4 enkesitli olduğu belirlenen profillerin tasarım burkulma dirençleri EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da belirtilen sınıf değişimi göz ardı edilerek hesaplanmış; sınıf değişimi yapılarak hesaplanan tasarım dirençleri ($N_{b,Rd}$) ve ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan tasarım dayanımlarıyla ($\phi_c P_n$) karşılaştırılmıştır. Bu tezde, sınıf değişimi göz ardı edilerek hesaplanan eleman dirençleri için "$N_{b,Rd}$*" simgesi kullanılmıştır. $N_{b,Rd*}$ değerleri hesaplanırken, incelenen bütün burkulma boylarında ve narinliklerde Bölüm 3.2.2'ye göre hesaplanan etkin enkesit alanlar (A_{eff}) kullanılmıştır.

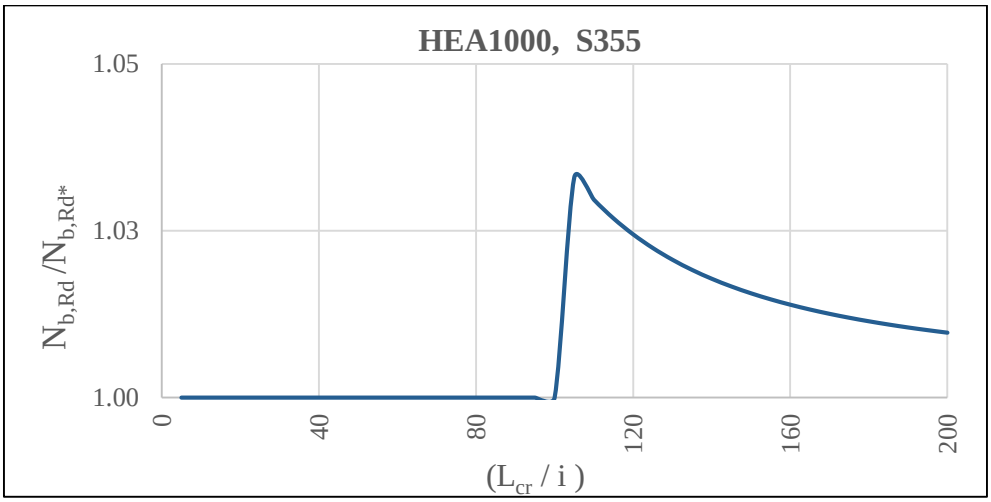
4.5.1. Sınıf değişimi yapılmadan hesaplanan tasarım dirençleriyle yapılarak hesaplanan dirençlerin karşılaştırılması

Tablo 4.6'ya göre, tezde incelenen profil ve çelik sınıfları için, EC3'e göre, etkin olmayan enkesit alanı en yüksek olan profil S355 çelik kalitesinde üretilen HEA1000 profilidir. Bu profilde, yerel burkulma sınır durumu nedeniyle enkesit direncinde yapılan azaltma %12'dir. HEA1000 profilinin S355 çelik kalitesindeki ve farklı narinliklerdeki tasarım dirençleri, hem EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da belirtilen sınıf değişimi göz ardı edilerek ($N_{b,Rd}$*) hem de göz önünde bulundurularak ($N_{b,Rd}$) hesaplanmış ve Şekil 4.20'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafikten de fark edilebileceği gibi, iki eğri belirli bir eleman narinliğine (yaklaşık L_{cr}/i=105 değerine) kadar çakışmaktadır; çünkü bu narinlik değerine kadar, her iki direnç hesabında da etkin enkesit alan kullanılmaktadır.



Şekil 4.20. S355 çelik kaliteli ve HEA1000 enkesitli profil için $N_{b,Rd}$ ve $N_{b,Rd}$* değerlerinin narinlikle değişimi

$L_{cr}/i=105$ değerinden büyük narinliklerde $N_{b,Rd}$ değerleri hesaplanırken profilin Sınıf 3 enkesitli olduğu kabul edilmiş, tasarım dirençleri kayıpsız alan kullanılarak belirlenmiştir. Bu nedenle, $L_{cr}/i=105$ değerinde, $N_{b,Rd}$ eğrisi $N_{b,Rd}$* eğrisinin üstüne çıkmıştır. Bu durum, Şekil 4.20'de solda verilen grafikte çok belirgin olarak görünmediğinden, narinliğin 100 ile 110 arasında olduğu durumlar için hesaplanan direnç değerleri aynı şeklin sağında büyütülerek çizdirilmiştir. Bu şekilden, $N_{b,Rd}$ eğrisindeki ani artış daha kolay gözlenebilmektedir. Farklı narinliklerdeki $N_{b,Rd}$ ve $N_{b,Rd}$* değerlerini daha kolay karşılaştırabilmek için, direnç oranları ($N_{b,Rd}$ /$N_{b,Rd*}$) hesaplanıp Şekil 4.21'de narinliğe göre çizdirilmiştir.

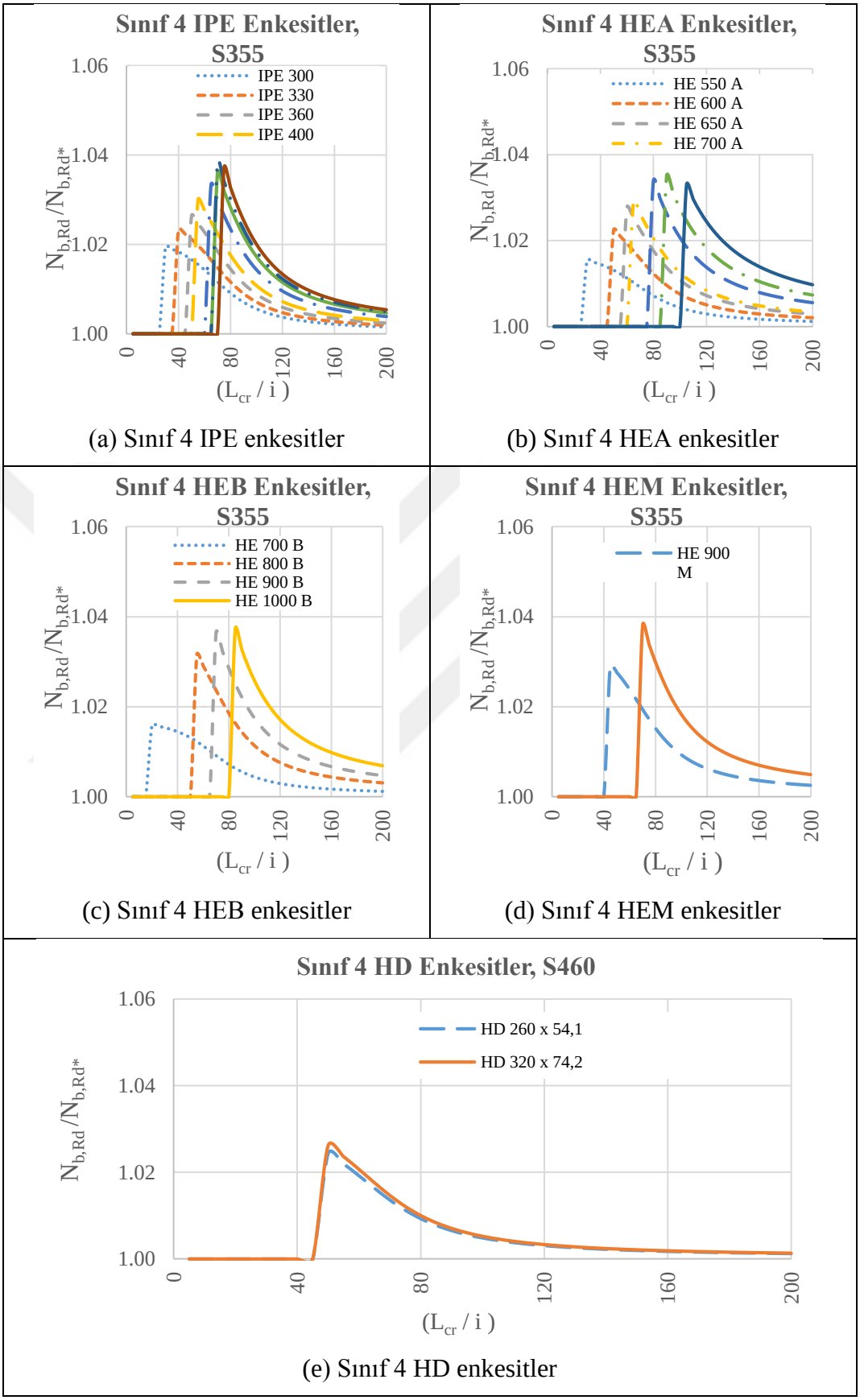


Şekil 4.21. S355 çelik kaliteli ve HEA1000 enkesitli profil için $N_{b,Rd}$ / $N_{b,Rd*}$ oranının narinlikle değişimi

Şekil 4.21'den de görülebileceği gibi, direnç oranı, $L_{cr}/i=105$'te aniden 1,034 değerine çıkmaktadır. Kayıpsız enkesit alanın etkin enkesit alanından %13,6 fazla olduğu dikkate alındığından, direnç oranındaki artışın (%3,4'ün) beklenenden küçük olduğu düşünülebilir. Ancak, burkulma direnci hesaplarında etkin alanın boyutsuz narinliği de etkilediği unutulmamalıdır. S355 çelik kalitesi ve $L_{cr}/i=105$ değeri için, Denklem (3.28) ve Denklem (3.30) kullanılarak hesaplanan boyutsuz narinlik değeri 1,374'tür. Bu değer, ele alınan profilin $L_{cr}/i=105$'te $N_{b,Rd}$ hesabında kullanılan boyutsuz narinlik değeridir. Aynı çelik kalitesi ve eleman narinliği için, $N_{b,Rd}$* hesabında kullanılan boyutsuz narinlik değeri, Denklem (3.29) ve Denklem (3.30)'dan 1,289 olarak bulunmuştur. Aslında bu değer, $N_{b,Rd}$ hesabı için elde edilen boyutsuz narinlik değerinin A_{eff}/A oranının (yani, 0,88'in) kareköküyle çarpımına eşittir. Elde edilen boyutsuz narinlik değerlerinden fark edilebileceği gibi, direnç hesaplarında etkin alan kullanılması boyutsuz narinliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, $N_{b,Rd}$* hesabında kullanılan χ değeri, $N_{b,Rd}$ hesabında kullanılandan daha büyük olmaktadır. HEA1000 enkesitinin tasarımında burkulma eğrilerinden "b" eğrisinin kullanıldığı dikkate alındığında, $N_{b,Rd}$* hesabında kullanılan χ değeri 0,432, $N_{b,Rd}$ hesabında kullanılan χ değeri ise 0,393 olarak elde edilmiştir. Bu durumda, $L_{cr}/i=105$'te $N_{b,Rd}$ / $N_{b,Rd}$* oranında görünen artış A/A_{eff} oranıyla χ değerleri arasındaki oran çarpılarak, $(1/0,880)\times(0,393/0,432)=1,034$ olarak hesaplanabilir. Bu değer, Şekil 4.21'den elde edilen değere eşittir.

Şekil 4.21 dikkatlice incelendiğinde, $L_{cr}/i=105$'ten daha büyük narinliklerde, $N_{b,Rd}$ / $N_{b,Rd}$* oranının artan narinlikle azaldığı gözlenmektedir. Bunun nedeni, kayıpsız enkesit alan kullanılarak hesaplanan χ değeriyle etkin alan kullanılarak hesaplanan χ değerinin arasındaki farkın L_{cr}/i arttıkça artmasıdır. Örnek olarak, $L_{cr}/i=200$ için, $N_{b,Rd}$ ve $N_{b,Rd}$* hesaplarında kullanılan χ değerleri sırasıyla 0,128 ve 0,144'tür. Bu durumda, $L_{cr}/i=200$ için, $N_{b,Rd}$ / $N_{b,Rd}$* oranı $(1/0,880)\times(0,128/0,144) = 1,01$'e eşit olmaktadır.

Tablo 4.5'te listelenen ve EC3'e göre Sınıf 4 enkesitli olduğu belirlenen bütün profiller için Şekil 4.21'dekine benzer $N_{b,Rd}$ /$N_{b,Rd*}$ oranı eğrileri çizdirilerek Şekil 4.22'de sunulmuştur. Sınıf 4 enkesitli profillerin etkin alanları çeliğin akma dayanımıyla azaldığından, en büyük $N_{b,Rd}$ / $N_{b,Rd}$* oranları her bir enkesit grubu için ele alınan en yüksek çelik kalitesi için, diğer bir ifadeyle, IPE, HEA, HEB ve HEM profillerde S355, HD profillerde ise S460 çelik kalitesi için çizdirilmiştir.



(a) Sınıf 4 IPE enkesitler

(b) Sınıf 4 HEA enkesitler

(c) Sınıf 4 HEB enkesitler

(d) Sınıf 4 HEM enkesitler

(e) Sınıf 4 HD enkesitler

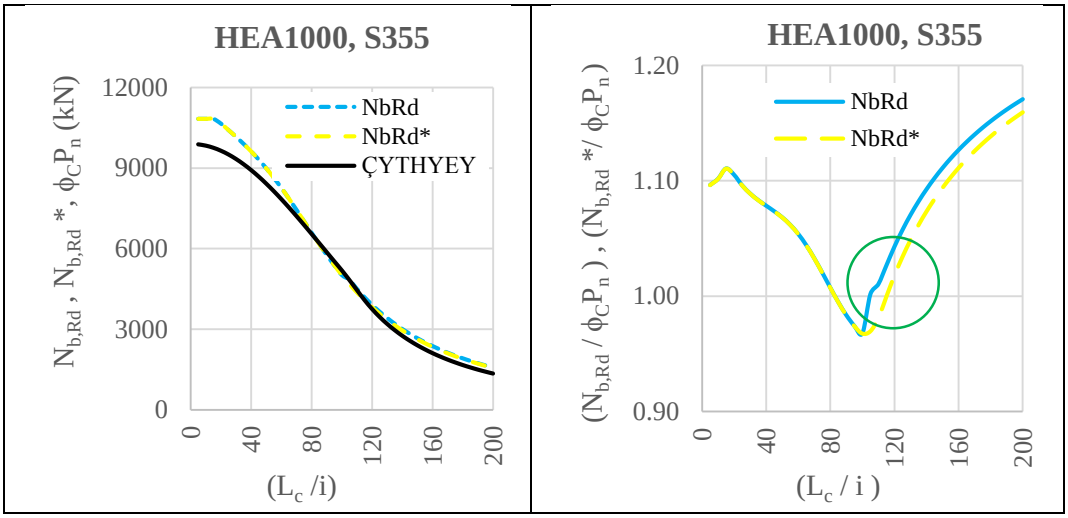
Şekil 4.22. Sınıf 4 enkesitli profillerin tezde incelenen en yüksek çelik sınıfı için hesaplanan $N_{b,Rd}$ / $N_{b,Rd*}$ oranlarının narinlikle değişimleri

Şekil 4.22'de verilen tüm grafikler incelendiğinde, tezin kapsamında ele alınan tüm enkesit ve çelik kaliteleri için, $N_{b,Rd}$ /$N_{b,Rd*}$ oranının en büyük değerinin 1,038'e eşit olduğu belirlenmiştir. Bu değer, S355 çelik kaliteli IPE550 profilinde gözlenmiştir. Bu elemanın narinliği 70 olduğunda, kayıpsız enkesit alanı kullanılarak hesaplanan tasarım burkulma direnci $N_{b,Rd}$ = 3109 kN , etkin enkesit alanı kullanılarak hesaplanan tasarım burkulma direnci ise $N_{b,Rd}$*= 2994 kN olmaktadır. Sonuç olarak, incelenen enkesit ve çelik kalitelerinde, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da belirtilen sınıf değişiminin dikkate alınması nedeniyle eleman dirençlerinde gözlenen direnç artışı %4'ten küçüktür.

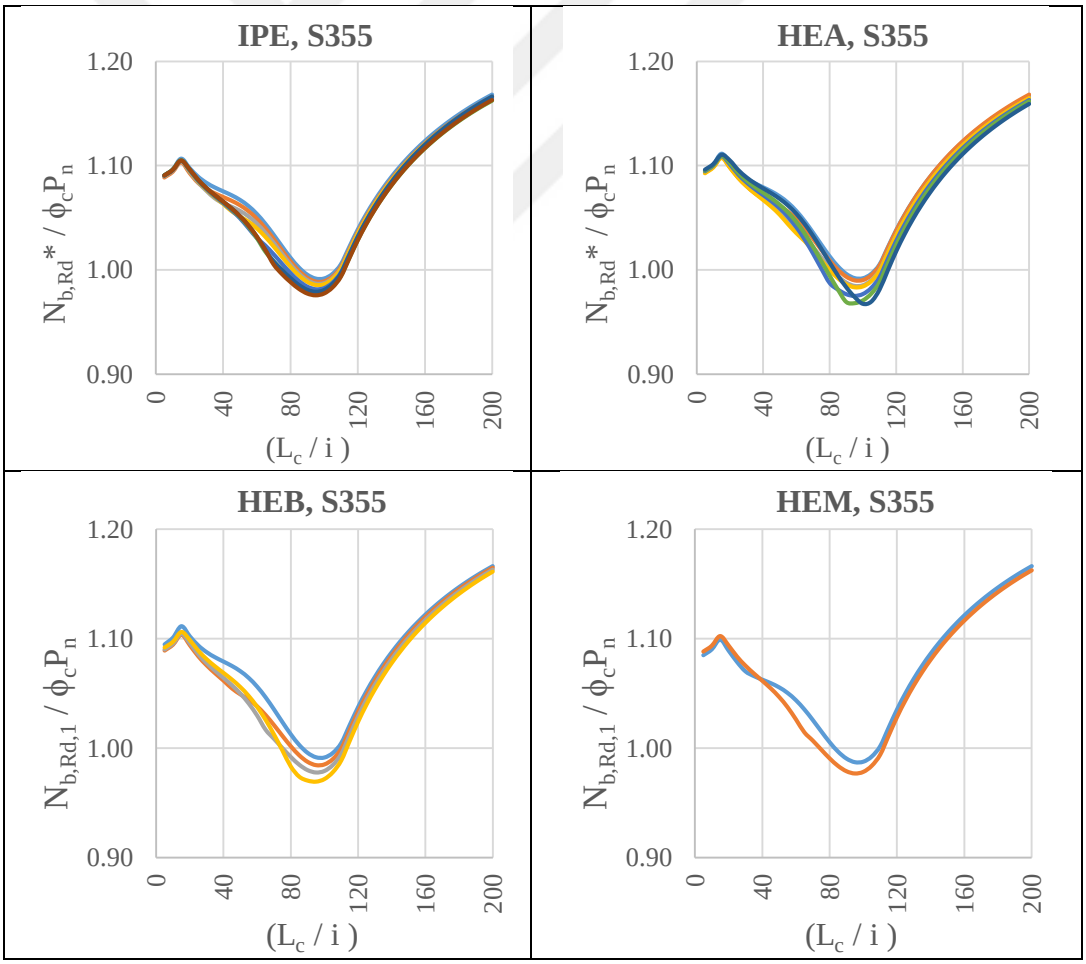
4.5.2. Sınıf değişimi yapılmadan hesaplanan tasarım dirençleriyle ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan tasarım basınç kuvveti dayanımlarının karşılaştırılması

Bölüm 4.4'te sunulan direnç/dayanım oranı eğrileri çizdirilirken, tasarım burkulma dirençleri ($N_{b,Rd}$) EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da belirtilen sınıf değişimi dikkate alınarak hesaplanmıştı. Bu bölümde, EC3'e göre Sınıf 4 enkesitli olan elemanlarda, tasarım burkulma dirençleri belirtilen sınıf değişimi yapılmadan hesaplanmış ve ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan tasarım basınç kuvveti dayanımlarına oranlanarak kapasite oranı-narinlik eğrileri yeniden çizdirilmiştir. Şekil 2.23'te S355 çelik kaliteli HEA1000 enkesitli bir elemanın direnç ve dayanım eğrileri ile direnç/dayanım oranı eğrileri hem sınıf değişimi yaparak hem de yapmadan hesaplanan dirençler kullanılarak çizdirilmiştir. Bir önceki bölümde belirtildiği gibi, bu elemanda sınıf değişimi yapıldığında L_{cr}/i=105'te tasarım direncinde ani bir değişim oluşmaktadır. Şekil 4.23'te sağda gösterilen kapasite oranı eğrileri, bu narinlik değerine kadar çakışmakta, bu narinlik değeriyle birlikte $N_{b,Rd}/\phi_c P_n$ eğrisi $N_{b,Rd*}/\phi_c P_n$ eğrisinin üstüne çıkmaktadır. Direnç/dayanımı oranı eğrisinde gözlenen "zıplama" bu profil için, oranın en küçük değerini (0,968) değiştirmemekte, en büyük değerini ise 1,171'den 1,159'a düşürmektedir.

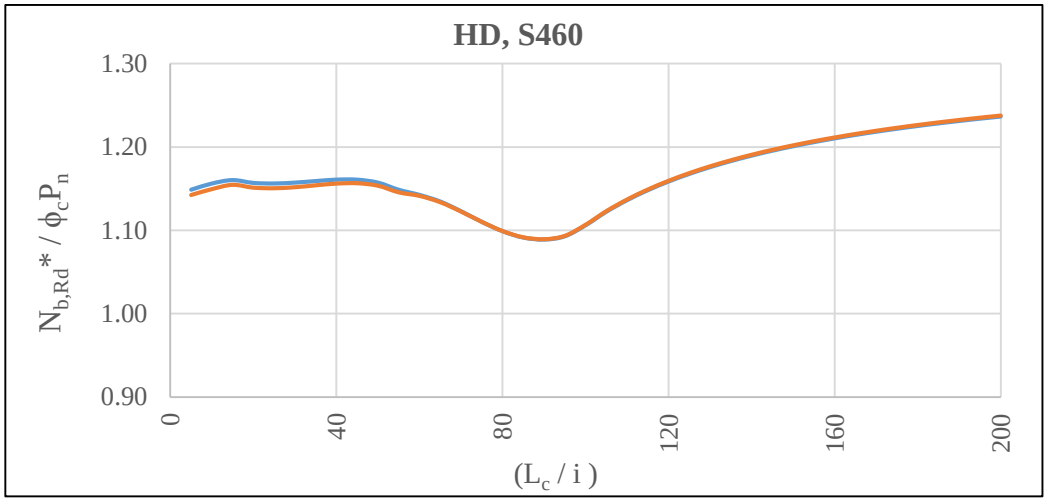
Şekil 4.24'te tezin kapsamında incelenen, S355 çelik kalitesinde Sınıf 4 enkesite sahip bütün I ve HE profillerin $N_{b,Rd*}/\phi_c P_n$ eğrileri her enkesit grubu için ayrı ayrı sunulmuştur. Benzer eğriler, S460 çelik kalitesinde Sınıf 4 enkesite sahip olan HD profiller için de Şekil 4.25'te verilmiştir.



Şekil 4.23. S355 çelik kaliteli ve HEA1000 enkesitli bir basınç elemanında sınıf değişimi yapılarak ve yapılmadan hesaplanan dirençler kullanılarak elde edilen kapasite ve kapasite oranı eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.24. S355 çelik kaliteli Sınıf 4 enkesitli I ve HE profilleri için sınıf değişimi yapılmadan hesaplanan dirençler kullanılarak elde edilen direnç/dayanım oranı eğrileri



Şekil 4.25. S460 çelik kaliteli Sınıf 4 enkesitli HD profiller için sınıf değişimi yapılmadan hesaplanan dirençler kullanılarak elde edilen direnç/dayanım oranı eğrileri

Bölüm 4.4.2'de, direnç hesaplarında sınıf değişimi dikkate alındığında, kapasite oranlarının en küçük değerlerinin IPE enkesitli elemanlarda 0,997, "büyük" numaralı HEA enkesitli elemanlarda 0,968, "büyük" numaralı HEB enkesitli elemanlarda 0,983, "büyük" numaralı HEM enkesitli elemanlarda ise 0,996'ye eşit olduğu belirlenmişti. Şekil 4.24'te verilen kapasite oranı eğrilerinden, Sınıf 4 enkesitli profillerin direnç hesaplarında sınıf değişimi göz ardı edildiğinde, kapasite oranlarının en küçük değerlerinin IPE, HEA, HEB ve HEM profiller için sırayla 0,976, 0,968, 0,968 ve 0,977'ye eşit olduğu tespit edilmiştir. En küçük kapasite oranları yaklaşık $L_c/i=100$ değerinde olmakla birlikte, incelenen bütün Sınıf 4 enkesitli IPE ve HE profiller dikkate alındığında, narinliğin 75'ten küçük veya 115'ten büyük olduğu durumlarda, kapasite oranlarının 1,0 değerinin altına inmediği belirlenmiştir. Buradan, direnç hesaplarında sınıf değişimi göz ardı edildiğinde, bazı narinlik değerlerinde, Sınıf 4 enkesitli IPE ve HE profillerin EC3'e göre hesaplanan tasarım burkulma dirençlerinin ÇYTHYEY'ye göre hesaplanan tasarım basınç kuvveti dayanımlarından küçük olabileceği ancak aradaki farkın % 4'ü geçmediği sonucuna varılabilir.

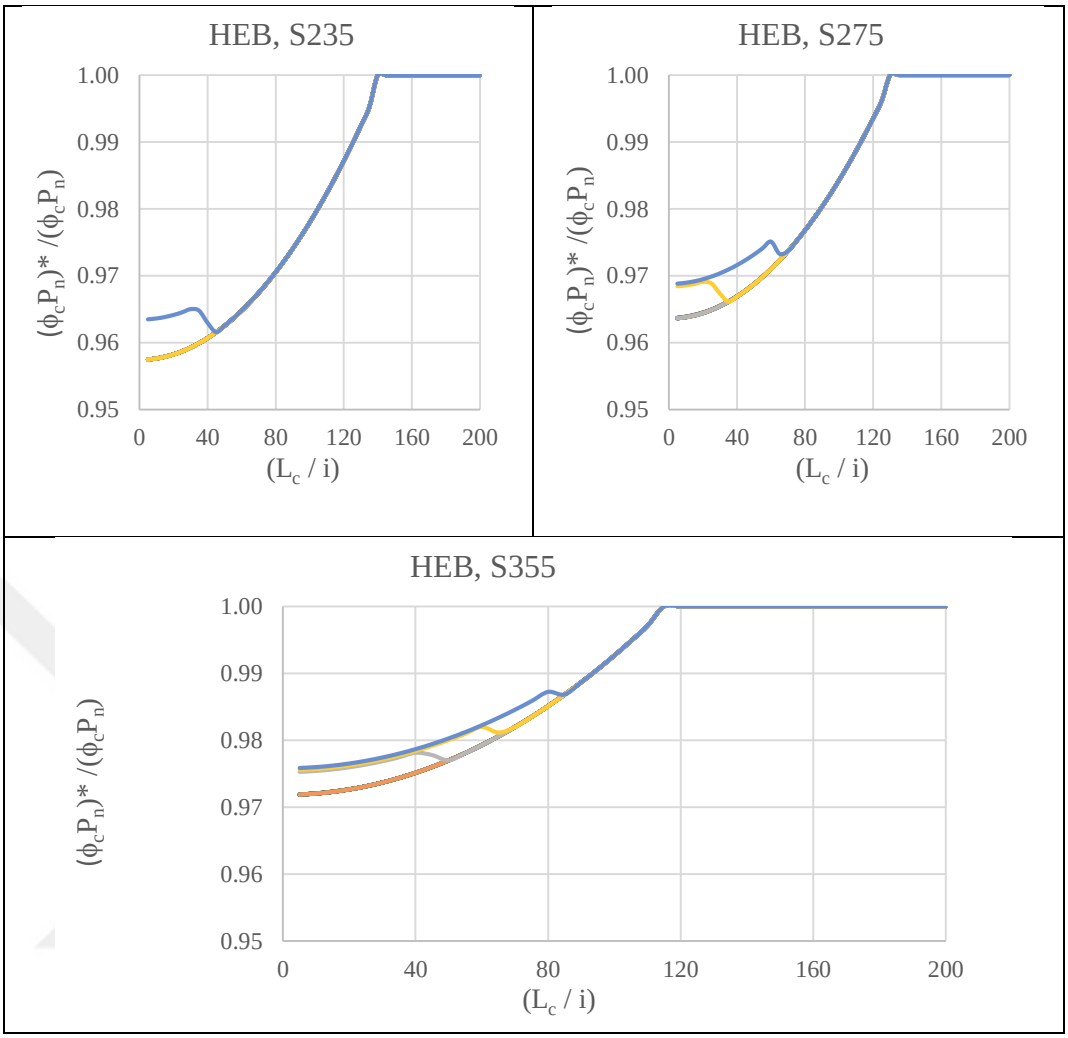
Şekil 4.25'ten fark edilebileceği gibi, ÇYTHYEY, S460 çelik kaliteli Sınıf 4 enkesitli HD profillerin incelenen bütün narinliklerde yapılan tasarım basınç kapasitesi hesaplarında, tasarım dirençlerinin enkesit sınıfı değişimi göz ardı edilerek yapıldığında dahi, EC3'ten daha güvenli sonuçlar vermektedir.

4.6. HEB Enkesitli Elemanların Tasarım Basınç Kuvveti Dayanımları Hesaplanırken Şekil 2.1'deki Karakteristik Akma Gerilmeleri Kullanılarak Yapılan Karşılaştırmalar

Bölüm 2'de belirtildiği gibi, tez kapsamında incelenen HD haricindeki bütün profillerin S235, S275 ve S355 çelik kalitelerindeki tasarım basınç kuvveti dayanımları ($\phi_c P_n$) hesaplanırken karakteristik akma gerilmesi (F_y) değerleri Şekil 2.1'den alınmıştır. Bu profillerin tamamının başlık kalınlıkları 40 mm'den küçük olduğundan, belirtilen çelik sınıfları için, hesaplarda kullanılan F_y değerleri sırayla 235 MPa, 275 MPa ve S355 MPa olmuştur. Buna karşın, HD profillerin hesaplarında yapıldığı gibi, F_y değerlerinin Tablo 2.1'den alınması durumunda, başlık kalınlığı 16 mm'den büyük profillerin dayanım hesaplarında F_y değerleri Şekil 2.1'de verilen değerlerden 10 MPa daha küçüktür. F_y değerinde yapılan bu azalma, incelenen çelik kalitelerinde sırasıyla %4,25, %3,64 ve %2,82'lik azalmaya karşılık gelmektedir. Diğer bir ifadeyle, tasarım dayanımları hesaplanırken F_y değerlerinin Tablo 2.1'deki gibi azaltılması durumunda, en büyük etkinin S235 çelik kaliteli profillerde gözlenmesi beklenmektedir.

Bu bölümde, başlık kalınlığı 16 mm'den büyük olan HEB profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları, F_y'deki bu azalma göz önünde bulundurularak tekrar hesaplanmış, ve azaltılmamış F_y değerleri kullanılarak hesaplanan dayanımlarla karşılaştırılmıştır. Benzer bir çalışma, elbette, başlık kalınlıkları 16 mm'yi geçen IPN, IPE, HEA ve/veya HEM enkesitli profiller için de yapılabilir. Bu bölümde, sadece ülkemizde kolon kesiti olarak yaygın şekilde kullanılan HEB profiller için hesaplar yapılmış ve F_y değerlerindeki azalmanın dayanım hesaplarındaki etkisinin yaklaşık mertebesi belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu amaçla, numarası 220'nin üzerinde olan HEB enkesitli profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları üç farklı çelik kalitesi için azaltılmış F_y değerleri kullanılarak hesaplanmış ve Bölüm 4.4'te azaltılmamış F_y değerleri kullanılarak hesaplanan dayanımlara oranlanmıştır. Bu tezde, azaltılmış F_y değerleriyle hesaplanan tasarım dayanımları için $(\phi_c P_n)^*$ simgesi kullanılmıştır. Şekil 4.26'da ilgili dayanım oranlarının $((\phi_c P_n)^* / (\phi_c P_n))$ eleman narinlikleriyle değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Başlık kalınlıkları 16 mm'den büyük HEB enkesitli profiller için üç farklı çelik kalitesinde hesaplanan $(\phi_c P_n)^*/(\phi_c P_n)$ oranlarının eleman narinliğine bağlı değişimleri

Şekil 4.26'da verilen grafiklerden, S235 çelik kalitesinde 140, S275 çelik kalitesinde 130, S355 çelik kalitesinde ise 115'ten büyük narinliklerde dayanım oranlarının 1,0'e eşit olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, belirtilen narinlik değerlerinde elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının F_y'den bağımsız olmasıdır. Denklem (2.9) uyarınca, kritik burkulma gerilmesi (F_{cr}), elemanın elastik burkulma gerilmesinin %87,7'sine eşittir.

Şekil 4.26'da sunulan grafiklerden çıkarılabilecek bir diğer sonuç da enkesiti narin olmayan elemanlar için hesaplanan dayanım oranlarının belirtilen narinliklerden küçük narinliklerde azalan narinlikle azalmasıdır. F_y'deki yüzde azalma çelik kalitesi arttıkça azaldığından, aynı enkesit ve narinlik değeri için, dayanım oranlarının en küçük değerleri S235 çelik kalitesi için çizdirilen eğrilerde oluşmaktadır.

Narin enkesitli HEB profiller için çizdirilen dayanım oranı eğrilerinde gözlenen anlık zıplamaların nedeni ÇYTHYEY Tablo 5.1A'ye göre sınıflandırıldığında narin enkesitli olan ancak belirli bir eleman narinliğinde Denklem (2.14) uyarınca etkin alanı kayıpsız enkesit alanına eşit olan profillerde ilgili sınır narinlik değerinin F_y'ye bağlı olmasıdır.

Tablo 4.26'da gösterilen başlık kalınlığı 16 mm'den büyük HEB enkesitlerin incelenen üç çelik kalitesindeki tasarım dayanımlarının Tablo 2.1'de verilen azaltılmış F_y değerleri kullanılarak yapılması durumunda dayanımlarda gözlenen en büyük azalma %4,3 mertebesindedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezin temel amacı, sıcak haddelenmiş I ve H enkesitli çelik basınç elemanları için, ülkemizde 2016 yılında yürürlüğe giren ve 2018 yılında güncellenen "Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik" (ÇYTHYEY) [3] ile yine yine ülkemizde yaygın şekilde kullanılan diğer bir çelik tasarım dokümanı olan EUROCODE 3 (EC3) [4,5] yönetmeliğinde tanımlanan tasarım esaslarını detaylıca inceleyerek farklılıkları ortaya koymak, ayrıca ülkemizde sık kullanılan farklı çelik kalitelerine sahip sıcak şekil verilmiş I/H enkesitli çelik profillerin her iki yönetmeliğe göre eksenel basınç kapasitelerini hesaplayarak yönetmeliklerin güvenlik seviyelerini karşılaştırmaktır. Bu amaçla, ilk olarak, belirtilen yönetmeliklerdeki temel tasarım esasları detaylı bir şekilde incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Ardından, Tablo 4.1'de listelenen enkesitlere ve farklı çelik kalitelerine sahip 153 adet IPE, IPN, HEA, HEB, HEM ve HD profilin farklı burkulma boyları/narinlikleri için ÇYTHYEY'de tanımlanan Yük ve Dayanım Katsayılarına Göre Tasarım (YDKT) yöntemi kullanılarak tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları ($\phi_c P_n$) ile EC3 yönetmeliği kullanılarak tasarım burkulma dirençleri ($N_{b,Rd}$) hesaplanmıştır. Son olarak, tasarım dirençlerinin tasarım dayanımlarına bölünmesiyle elde edilen kapasite oranlarının elemanların burkulma boyları ve narinlikleriyle değişimleri çizdirilerek yönetmeliklerin güvenlik seviyeleri karşılaştırılmıştır. Genel olarak, elemanların EC3'e göre tasarım dirençleri hesaplanırken, Bölüm 4.3.2'de bahsedildiği gibi, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişimi göz önünde bulundurulmuştur. Ancak, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(10) gereği sınıf değişiminin yapılmaması durumu da ayrıca incelenmiştir. Direnç/dayanım oranları IPE, HEA, HEB, HEM enkesitli elemanlarda S235, S275 ve S355 çelik kaliteleri için, HD enkesitli elemanlarda ise S275, 355 ve S460 çelik kaliteleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Yapılan tez çalışmasında, incelenen enkesit, çelik kalitesi ve boy/narinlikler için geçerli olmak üzere, elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- ÇYTHYEY ve EC3 içerisinde verilen malzeme özelliklerinde bazı farklılıklar belirlenmiştir. Elastisite modülü ÇYTHYEY'de 200 GPa olarak tanımlanırken,

EC3'te 210 GPa olarak tanımlanmaktadır. Benzer şekilde, kayma modülü (G) için incelenen yönetmeliklerde verilen değerler ÇYTHYEY ve EC3 için sırasıyla, 77,2 ve 81,0 GPa'dır.

- ÇYTHYEY'de tanımlanan dayanım katsayısı (ϕ_c) ve EC3'te tanımlanan kısmi katsayılar (γ_{M0}, γ_{M1}) arasında da önemli fark tespit edilmiştir. ÇYTHYEY, basınç elemanlarının karakteristik basınç kuvveti dayanımlarını (P_n) %10 azaltarak tasarım dayanımlarına çevirirken, kısmi katsayılar için EC3'te önerilen değerler kullanıldığında, tasarım burkulma dirençleri karakteristik dirençlere eşit olmaktadır.
- Her iki tasarım yönetmeliği de eleman kapasitelerinin hesabında enkesit sınıflandırması yapıyor olmasına karşın, sınır narinlik değerleriyle enkesitlerin başlık narinliklerinin tanımlarının iki yönetmelikte farklı olması nedeniyle ÇYTHYEY'ye göre narin enkesitli olan ve etkin alan hesabı gerektiren bir profil, EC3'e göre Sınıf 4 enkesite sahip olmayabilmekte ve direnç hesaplarında kayıpsız enkesit alan kullanılabilmektedir.
- İki tasarım yönetmeliğinin etkin alan hesaplarında da farklılık olduğu belirlenmiştir. ÇYTHYEY'de elemanın etkin alanı, kayıpsız enkesit alanı kullanılarak hesaplanan kritik burkulma gerilmesine, diğer bir ifadeyle, elemanın narinliğine bağlıdır. Buna karşın, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişimi göz önünde bulundurulmadığında, EC3'e göre hesaplanan etkin alan eleman narinliğinden bağımsız olmaktadır. Bununla birlikte, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(10) maddesinde Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişiminin burkulma direnci hesaplarında kullanılamayacağı belirtilmiş olmasına karşın EC3'e göre hazırlanan bazı tasarım tablolarında sınıf değişiminin dikkate alındığı fark edilmiştir. Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişiminin, elemanın davranışını daha gerçekçi bir şekilde ifade ettiği düşünüldüğünden, bu tezde EC3'e göre yapılan hesaplarda uygun burkulma boylarında sınıf değişimi yapılmıştır. Sınıf değişimi yapılacak eleman boyu, kayıpsız enkesit alan kullanılarak hesaplanan tasarım burkulma dayanımından belirlenen gerilme değeri kullanılarak belirlenmiştir.
- İncelenen yönetmelikler arasındaki en önemli farklılıklardan biri de, ÇYTHYEY'nin akma sınır durumunu dayanım hesaplarında doğrudan dikkate almamasıdır. EC3 Sınıf 4 enkesitli olmayan basınç elemanlarında, burkulma

boyunun yeterince kısa ve/veya elemana etkiyen eksenel basınç yükünün yeterince küçük olduğu durumlarda, elemanın tasarım direncinin enkesitin akma yüküne eşit olduğunu kabul etmektedir.

- Yönetmeliklerin arasındaki diğer bir fark ise, ÇYTHYEY'de eleman narinliği için bir üst sınır (200) tanımlanırken, EC3'te herhangi bir sınır bulunmamasıdır.
- Tezin dördüncü bölümünde sunulan direnç/dayanım oranı eğrilerinden, S235, S275 ve S355 çelik kalitelerinde, incelenen tüm IPE ve IPN enkesitli profiller, 360 ve daha büyük enkesit numarasına sahip HEA ve HEB enkesitli profiller, 320 ve daha büyük HEM enkesitli profiller ile S460 çelik kalitesinde incelenen bütün HD profillerin basınç kapasitesi hesaplarında, ÇYTHYEY'nin hemen hemen bütün burkulma boylarında EC3'e göre daha güvenli tarafta kaldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, belirtilen enkesit ve/veya çelik kalitelerinin haricinde, burkulma boylarının nispeten küçük ve büyük değerlerinde de ÇYTHYEY'nin EC3'e göre güvenli tarafta kaldığı tespit edilmiştir. Buna karşın, aynı profillerin, orta değerlerdeki burkulma boylarında ise direnç/dayanım oranları 1'in altına düşmekte; diğer bir deyişle, EC3 ÇYTHYEY'ye göre daha güvenli kapasiteler hesaplatmaktadır.
- Direnç/dayanım oranı eğrilerinin şekilleri ile en büyük ve en küçük değerlerini etkileyici temel faktörlerin direnç hesaplarında kullanılan burkulma eğrileri, enkesit sınıfının narin/Sınıf 4 olup olmadığı, hesaplarda uygun boylarda Sınıf 4 enkesitten Sınıf 3 enkesite dönüşüme izin verilip verilmediği ve EC3'e göre boyutsuz narinlik değerinin 20'nin altına inip inmediği olduğu tespit edilmiştir.
- Dayanım oranı eğrilerinden, EC3'e göre yapılan hesaplarda eleman narinliklerinin yaklaşık 5-20 arası değerlerinde direnç/dayanım oranlarının eleman narinliğine bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, kapasite oranlarının 1'den küçük olduğu, yani EC3'ün ÇYTHYEY'ye göre daha güvenli sonuçlar verdiği narinlik aralıklarının incelenen çelik kaliteleri ve profiller için yaklaşık olarak şu şekilde özetlenebileceği belirlenmiştir:
    - IPE ve IPN enkesitli profillerde, S235 ve 275 çelik kalitelerinde 110-130, S355 çelik kalitesinde 90-110;
    - Enkesit numarası 360'a eşit ya da daha küçük HEA ve HEB enkesitli profillerle enkesit numarası 320'ye eşit ya da daha küçük HEM enkesitli profillerde, S235

çelik kalitesinde eleman narinliğinin 70-160, S275 çelik kalitesinde 65-150, S355 çelik kalitesinde 55-130;

- Büyük HE enkesitli profillerde, S235 çelik kalitesinde 115-125, S275 çelik kalitesinde 110-115 ve S355 çelik kalitesinde 95-100,
- HD enkesitlerde S275 çelik kalitesinde genel olarak 65-150, S355 çelik kalitesinde 55-130, S460 çelik kalitesinde ise başlık kalınlığı (t_f) 100 milimetreyi aşan enkesitlerde 90-95 arası eleman narinliklerinde EC3'ün, ÇYTHYEY'ye göre güvenli tarafta kaldığı belirlenmiştir. Başlık kalınlığı 100 milimetreyi aşmayan HD enkesitlerde S460 çelik kalitesinde tüm eleman narinliklerinde ÇYTHYEY, EC3'e göre daha güvenli sonuçlar vermiştir.

- Sınıf 4 enkesitli elemanların direnç hesaplarında, EC3-1-1 Bölüm 5.5.1.(9)'da tanımlanan sınıf değişiminin göz ardı edilmesinin kapasite oranlarına etkisinin en fazla %4 olduğu tespit edilmiştir.
- Tez kapsamında incelenen tüm enkesit ve çelik kaliteleri dikkate alındığında, elde edilen en büyük direnç/dayanım oranı 1,24 ile HD enkesitlerde gözlenmiştir. Diğer enkesit gruplarında göz önünde bulundurulan çelik kalitelerine göre direnç/dayanım oranlarının 1,20'yi aştığı herhangi bir burkulma boyu veya eleman narinliği bulunmamaktadır.

Bu tezde yürütülen çalışmada, yalnız Tablo 4.1'de listelenen I ve H enkesitler ile tezde belirtilen çelik kaliteleri kullanılmıştır. Benzer bir çalışma farklı enkesit (T, U, L vb.) ve çelik kaliteleri için de yapılabilir. Ayrıca, çalışmada yalnız eksenel yük etkisi altındaki basınç elemanları incelenmiştir. Benzer bir çalışmanın, farklı zorlamaların (eğilme, kesme, burulma veya eğilmeli basınç gibi bileşik zorlamaların) etkisinde kalan diğer yapısal çelik elemanlar için de yapılmasının, ÇYTHYEY'ye göre tasarlanan çelik binalarla, çoğu Avrupa ülkesinde kullanımı zorunlu olan EC3'e göre tasarlanan çelik binaların güvenlik seviyelerindeki farklılıkları ortaya koyması açısından literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] TS 648, Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, 1. Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara, 1980.

[2] ÇYTHYEY, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, 2016.

[3] ÇYTHYEY, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, 2018.

[4] EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, *European Committee for Standardisation*, Brussels, 2005.

[5] EN 1993-1-5, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated Structural Elements, *European Committee for Standardisation*, Brussels, 2006.

[6] Adluri S., Structural Steel Design Compression Members, Memorial University, New Foundland & Labrador, Canada, https://www.engr.mun.ca/~adluri/courses/ steel/ppt%20files1/Topic%20-Compression.pdf, (Ziyaret tarihi:15 Mayıs 2019).

[7] Trahair N.S., Bradford M.A., Nethercot D.A., Gardner L., *The Behaviour And Design Of Steel Structures Of EC3*, 4th Edition, Taylor & Francis, 2 Park Square Milton Park Abingdon Oxon, 2008.

[8] Taşkın K., Çelik Yapılar: Eksenel Basınç Kuvveti Etkisi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi,Bilecik,http://w3.bilecik.edu.tr/insaat/wpcontent/uploads/sites/28/2018/10/2.EKSENEL-BASIN%C3%87KUVVET%C4%B0-ETK%C4%B0S%C4%B0_.pdf, (Ziyaret tarihi: 16 Mayıs 2019).

[9] Dumlupınar Üniversitesi, Eksenel Basınç Kuvveti Etkisindeki Elemanlar, Kütahya,http://birimler.dpu.edu.tr/app/views/panel/ckfinder/userfiles/75/files/Gokhan/Celik_Yapilar_2019/Celik_Yap_lar_2019_Sunum-6_v3.pdf, (Ziyaret tarihi: 16 Mayıs 2019).

[10] ESDEP Courses, University Of Ljubljana, Ljubljana, http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~/pmoze/esdep/master/wg06/l0620.htm, (Ziyaret tarihi: 16 Mayıs 2019).

[11] Lowery L.L., Texas A&M University, Collage Station, https://ceprofs.civil.tamu.edu/llowery/cven446/Photos/lowery%20STEEL%20003.jpg, (Ziyaret tarihi:16 Mayıs 2019).

[12] Lowery L.L., Texas A&M University, Collage Station, https://ceprofs.civil.tamu.edu/llowery/cven446/Photos/lowery%20STEEL%20004.jpg, (Ziyaret tarihi:16 Mayıs 2019).

[13] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, Ankara, 2018.

[14] Arcelormittal,London,https://sections.arcelormittal.com/repo/Sections/Sections%20and%20Merchant%20Bars-ArcelorMittal_V2019-1.xlsx (Ziyaret tarihi: 16 Mart 2019)

[15] TS EN 10025-2, Sıcak Haddelenmiş Yapı Çelikleri - Bölüm 2: Alaşımsız Yapı Çeliklerinin Genel Teknik Teslim Şartları, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara, 2006.

[16] TS EN 10025-4, Sıcak Haddelenmiş Yapı Çelikleri - Bölüm 4: Termomekanik Olarak Haddelenmiş, İnce Taneli, Kaynak Edilebilir Yapı Çeliklerinin Teknik Teslim Şartları, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara, 2006.

[17] Çuhadaroğlu S.P., Çelik Yapılar 1, Lisans Ders Notları, *Kocaeli Üniversitesi*, Kocaeli, 2017. [18] TS 648, Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, 1. Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara, 1980.

[18] EN 10025-2, Hot Rolled Products of Structural Steels- Part 2: Technical Delivery Conditions foR Non-alloy Structural Steels, *European Committee for Standardisation*, Brussels, 2004.

[19] EN 10025-4, Hot Rolled Products of Structural Steels - Part 4: Technical Delivery Conditions For Thermomechanical Rolled Weldable Fine Grain Structural Steels, *European Committee For Standardisation*, Brussels, 2004.

[20] Da Silva L.S., Simoes R., Gervasio H., *Design of Steel Structures*, Second Edition, European Conventional for Constructional Steelwork (ECCS), (2016)..

[21] Snijder H.H., Cajot L.G., Popa N., Spoorenberg R.C., Buckling Curves for Heavy Wide Flange Steel Columns, *Romanian Journal of Technical Science: Applied Mechanics*, 2014, **59**(1/2), 178-204.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Genç T., Çuhadaroğlu S.P., H Enkesitli Çelik Hadde Kolonların Türkiye ve Avrupa Çelik Yönetmeliklerine Göre Tasarımlarının Karşılaştırılması, *4. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, İstanbul, 23-24 Nisan 2019.

ÖZGEÇMİŞ

24 Haziran 1993 tarihinde Silivri/İstanbul'da doğdu. Hasan-Sabriye Gümüş Anadolu Lisesi'nde 2007 yılında lise eğitimine başlayıp 2011 yılında mezun oldu. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde üniversite hayatına başladı ve 2016 yılında İnşaat Mühendisi ünvanıyla mezun oldu. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim Dalı'nda Doç. Dr. Seval Pınarbaşı Çuhadaroğlu danışmanlığında yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılından itibaren Silivri/İstanbul'da Karadağlar Organik Tarım Ürünleri Gıda Paz. Nakl. Tahm. firmasının inşa ettiği konut projesinde iş hayatına başladı ve halen şantiye şefi olarak görevine devam etmektedir.