



A comparative study of former and latest Turkish design guidelines for rolled I-shaped steel flexural members

Seval Pınarbaşı^{ID}, Mohammad Samim Nasrat^{ID}

Department of Civil Engineering, Kocaeli University, Kocaeli, 41380, Turkey

Highlights:

- Flexural and shear behavior of rolled I-shaped steel members
- Comparison of former and current Turkish steel design documents
- Does a rolled I-shaped flexural member designed based on TS648 need strengthening?

Keywords:

- Steel beam
- Specification for Design and Construction of Steel Structures
- Allowable Strength Design (ASD)
- Rolled I-shaped steel members
- TS648

Article Info:

Research Article
Received: 05.10.2018
Accepted: 02.12.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.467741

Correspondence:

Author: Seval Pınarbaşı
e-mail: sevalp@gmail.com
phone: +90 262 303 3277

Graphical/Tabular Abstract

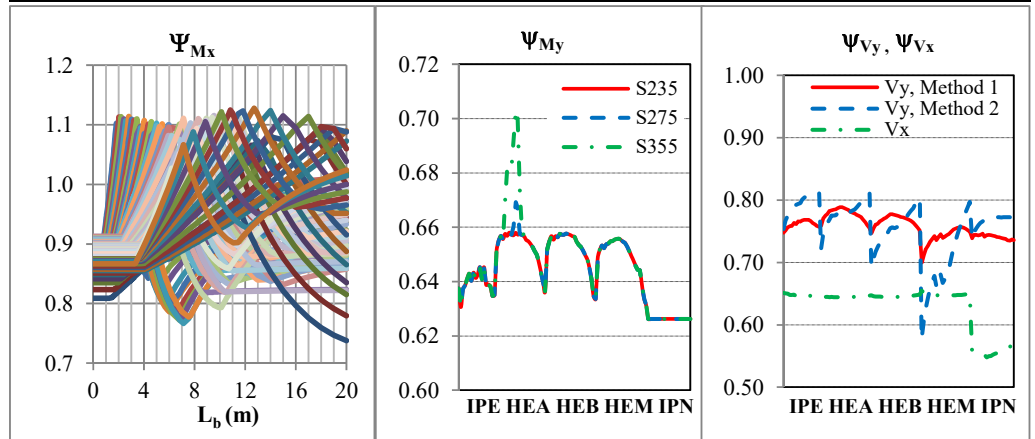


Figure A. Strength ratios for strong axis flexure (Ψ_{M_x}), weak axis flexure (Ψ_{M_y}), shear parallel to web (Ψ_{V_y}) and to flanges (Ψ_{V_x})

Purpose: Design guidelines for structural steel members have just changed in Turkey. The “Building Code for Steel Structures” (TS648) published in 1980 has been superseded by the “Specification for Design and Construction of Steel Structures (SDCSS)” published in 2016. Even though the design philosophies of the former and new codes are rather different, the “allowable” values of shear forces and bending moments for rolled I-shaped steel members under strong and weak axis bending can be computed using the provisions given in both codes and the related flexural and shear strength ratios (Ψ_{M_x} , Ψ_{M_y} and Ψ_{V_y} , Ψ_{V_x} given in Figure A) can be computed to evaluate whether the members that were designed based on TS648 have adequate level of safety according to SDCSS or need strengthening. The purpose of this study is, thus, to determine whether the strength and stability of a rolled I-shaped steel flexural member designed using TS648 is sufficient based on the SDCSS.

Theory and Methods:

The strength predictions of both codes for rolled I-shaped (IPE, HEA, HEB, HEM and IPN) members widely used in Turkey as flexural members under major/minor axis bending and shear in the plane of the web/flanges are computed for three different steel grades (S235, S275 and S355) and different member lengths. Then, the related strength ratios (Ψ_{M_x} , Ψ_{M_y} and Ψ_{V_y} , Ψ_{V_x} , respectively) are determined.

Results:

It is shown that, for all studied sections and steel grades, TS648 gives more conservative results than SDCSS (i.e., strength ratios (Ψ_{M_y} , Ψ_{V_y} , Ψ_{V_x}) < 1.0) in the design of members subjected to minor axis bending (M_y) and shear in the plane of the web/flanges (V_y and V_x). On the other hand, for members subjected to major axis bending (M_x), TS648 may remain on unconservative side for some member lengths. It is found that the range of lengths for which the predictions of TS648 are unconservative depends on both section type and steel grade.

Conclusion:

It is concluded that, for all studied sections and steel grades, the strength predictions of TS648 are at most 13% greater than those of SDCSS.



I-enkesitli çelik hadde eğilme elemanları için eski ve yeni Türk tasarım dokümanlarındaki esasların karşılaştırılması

Seval Pınarbaşı*^{ID}, Mohammad Samim Nasrat^{ID}

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli 41380 Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- I-enkesitli çelik hadde elemanların kesme ve eğilme davranışları
- Eski ve yeni Türk çelik tasarım dokümanlarının karşılaştırılması
- TS648'e göre tasarlanmış I-enkesitli bir hadde eğilme elemanının güçlendirilmesi gerekir mi?

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.10.2018

Kabul: 02.12.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.467741

Anahtar Kelimeler:

Çelik kiriş,
çelik yapıların tasarım hesap
ve yapım esaslarına dair
yönetmelik,
güvenlik katsayıları ile tasarım
(GKT),
I-enkesitli çelik hadde profil,
TS648

ÖZET

Ülkemizde çelik yapıların tasarım esasları iki yıl önce güncellenmiştir. TS648 standardı yerini Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik'e bırakmıştır. Bu çalışmanın amacı, I-enkesitli hadde çelik eğilme elemanları için bu iki tasarım dokümanında tanımlanan tasarım esaslarını karşılaştırarak, TS648'e göre tasarlanmış bir elemanın dayanımının "Yönetmelik"e göre yeterli olup olmadığını belirlemektir. Her ne kadar TS648'de kullanılan "Emniyet Gerilmeleri Yöntemi" ile Yönetmelik'te tanımlanan "Güvenlik Katsayılarına Göre Tasarım Yöntemi"nin tasarım felsefelerinde farklılıklar olsa da, "çalışma yükleri" altında, çelik yapı elemanlarının emniyetle taşıyabileceği kesit zorlarının "güvenli" değerlerinin her iki tasarım dokümanına göre hesaplanarak, TS648'e göre tasarlanan bir elemanın güçlendirilmesine gerek olup olmadığına karar verilebileceğine inanılmaktadır. Bu amaçla, ülkemizde eğilme elemanı olarak yaygın şekilde kullanılan I-enkesitli hadde elemanların, kuvvetli/zayıf eksende eğilme ve gövdeye/başlıklara paralel düzlemde kesme etkisindeki dayanımları, üç farklı çelik kalitesi ve farklı eleman boyları için, belirtilen tasarım dokümanları kullanılarak hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Çalışmada TS648'in, zayıf eksende eğilme ile gövdeye/başlıklara paralel düzlemde kesme etkisindeki elemanların tasarımında, incelenen bütün enkesit ve çelik kalitelerinde, Yönetmelik'ten daha güvenli sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Güçlü eksende eğilme etkisindeki elemanlarda ise, TS648 bazı eleman boylarında güvensiz tarafta kalabilmektedir. Bununla birlikte, incelenen bütün enkesit, çelik kaliteleri ve burkulma boyları için, TS648'e göre hesaplanan dayanımların en fazla %13 güvensiz tarafta kaldığı belirlenmiştir.

A comparative study of former and latest Turkish design guidelines for rolled I-shaped steel flexural members

H I G H L I G H T S

- Flexural and shear behavior of rolled I-shaped steel members
- Comparison of former and current Turkish steel design documents
- Does a rolled I-shaped flexural member designed based on TS648 need strengthening?

Article Info

Research Article

Received: 05.10.2018

Accepted: 02.12.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.467741

Keywords:

Steel beam,
specification for design and
construction of steel
structures,
allowable strength design
(ASD),
rolled I-shaped steel member,
TS648

ABSTRACT

In Turkey, steel design guidelines have been updated two years ago. Specification for Design and Construction of Steel Structures superseded TS648 standard. The objective of this study is to determine whether the strength of a rolled I-shaped steel flexural member designed using TS648 is sufficient based on the "Specification" by comparing the design guidelines in both design documents. Even though there are some differences in the design philosophies of "Allowable Stress Design" used in TS648 and "Allowable Strength Design" used in the Specification, it is believed that under "working loads", the "allowable" values of internal forces/moments in structural steel members can be computed using the provisions given in both design documents and the results can be compared to evaluate whether a member designed using TS648 needs strengthening. With this purpose, the strength predictions of both design documents for rolled I-shaped members widely used in Turkey as flexural members under major/minor axis bending and shear in the plane of the web/flanges are computed for three different steel grades and different member lengths and the results are compared. It is shown that, for all studied sections and steel grades, TS648 gives more conservative results than the Specification in the design of members subjected to minor axis bending and shear in the plane of the web/flanges. On the other hand, for members subjected to major axis bending, TS648 may remain on unconservative side for some member lengths. However, it is recognized that, for all studied sections and steel grades, the strength predictions of TS648 are at most 13% greater than those of the Specification.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: sevalp@gmail.com, samimnasrat90@gmail.com / Tel: +90 262 303 3277

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çelik eğilme elemanları, sık kullanılan ismiyle kirişler, çoğu çelik yapıda düşey yük taşıyan yapı sisteminin temel elemanlarıdır. Yatay yüklerin tamamının çerçeve elemanlarıyla taşındığı moment aktaran çelik çerçevelerde, kirişler yapıya etkiyen rüzgar ve deprem gibi yatay yüklerin güvenli bir şekilde temele aktarılmasını da sağlarlar. Benzer şekilde, özellikle dışmerkez çelik çaprazlı çerçevelerde, çaprazların bağlandığı kirişler, deprem yükleri etkisinde, oldukça büyük doğrusal olmayan şekil değiştirmeler yapacak şekilde tasarlanır ve yatay yük taşıma sisteminin birincil elemanlarından. Çapraz düzeni V ve ters-V şeklinde olan merkezi çelik çaprazlı çerçevelerde de, çaprazların bağlandığı kirişler, deprem etkisinde büyük dengelenmemiş zorlamaların etkisinde kalırlar; bu nedenle, özel tasarım esaslarına tabidirler.

Hemen hemen bütün çelik taşıyıcı sistemlerde temel yapı elemanları olarak kullanılmaları nedeniyle literatürde pek çok araştırmacı tarafından incelenen çelik eğilme elemanları üzerine yürütülen çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Rezaiee-Pajand vd. [1], açıklıkları boyunca sürekli burulma yayları tarafından desteklenen, derinlikleri doğrusal değişen I-enkesitli kirişlerin basit eğilme etkisinde yanal-burulmalı burkulma davranışlarını araştırmıştır. Grilo vd. [2], petek kirişlerin kesme davranışlarını hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiştir, bu tür kirişlerin tasarımında gövdenin burkulma sonrası dayanımını da dikkate alan yeni bir formülasyon önermiştir. Fang vd. [3], gövdelerinde boşluklar bulunan H-enkesitli yüksek dayanımlı çelik kirişlerin eğilme davranışını inceleyen deneysel bir çalışma yürütmüş, deney sonuçlarını farklı yönetmeliklerde sunulan tasarım denklemlerinin tahminleriyle karşılaştırmışlardır. Benzer şekilde, literatürde, çelik eğilme elemanlarının bulunduğu çelik taşıyıcı sistemler konusunda da pek çok çalışma yapılmıştır. Esen ve Ülker [4], deprem yükleri etkisindeki çok katlı çelik uzay çerçevelerin optimizasyonu üzerine çalışmışlar, kullandıkları sayısal modelde çerçevenin doğrusal olmayan davranışını da dikkate almışlardır. Özcelik vd. [5], ters-V çaprazlı çelik çerçevelerde, çaprazların bağlandığı kirişlerde oluşan dengelenmemiş kuvvetleri azaltmak amacıyla kullanılan ara kolonların, çerçevenin deprem etkisi altındaki davranışına etkilerini araştırmıştır. Shi vd. [6], deprem etkisi altındaki moment aktaran çelik çerçevelerin Avrupa, Amerika, Japonya ve Çin yönetmeliklerine göre boyutlandırılmasında kullanılan tasarım esaslarını karşılaştırarak, dünya genelinde pek çok ülkede kullanılan bu dört yönetmeliğin tasarım yaklaşımları arasındaki temel farkları belirlemiştir. Çelik kirişli taşıyıcı sistemler konusundaki çalışmaların da güncelliğini koruduğu görülmektedir. Zohra ve Nacer [7], Avrupa çelik yönetmeliğinde (Eurocode 3) yarı-rijit olarak sınıflandırılan kiriş-kolon birleşimlerinin etkinliğini sayısal yöntemle kontrol etmiş, çalışmalarının sonunda, yarı-rijit birleşimlerin sınıflandırılmasında kullanılabilecek alternatif bir yöntem sunmuştur. Akşar vd. [8], süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçevelerin depreme dayanıklı tasarımında kullanılan dayanım fazlalığı katsayısının kolonlardaki eksenel yük seviyesine bağlılığını araştırmışlardır. Lee vd.

[9], emniyet gerilmeleri yöntemine göre boyutlandırılmış kutu enkesitli kirişli bir kren yapısını sınır durumlara (taşıma gücüne) göre tasarım yöntemiyle yeniden boyutlandırmış, başlangıç tasarımındaki güvenlik seviyesi değiştirilmeksizin eleman kesitlerinin azaltılabileceğini göstermiştir. Basım aşamasında olan bu çalışmada, ele alınan çelik yapının boyutlandırılmasında, sınır durumlara göre tasarım yönteminin emniyet gerilmeleri yönteminden daha ekonomik bir tasarım sunduğu gösterilmiştir. Yapılarda çoğu zaman yatay konumda kullanılan eğilme elemanları (kirişler), eksenlerine dik yönde etkiyen ve enkesitlerinin kayma merkezinden geçen yüklerin etkisinde, kesme kuvveti ile eğilme momentinin ortak zorlaması altındadır. Çift simetri eksenli I-enkesitli bir döşeme kirişinde olduğu gibi, kirişe etkiyen yüklerin doğrultusunun enkesitin düşey asal eksenine çakışması durumunda, kirişte yalnız düşey kesme kuvveti ile kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti oluşur. Buna karşın, kirişe etkiyen yüklerin enkesitin asal eksenlerinden birine paralel olmaması durumunda, kiriş eğik eğilmeye ve eğik kesmeye maruz kalır [10]. Bu durumda, kirişin her iki asal eksen etrafındaki eğilme momenti dayanımları ile kesme kuvveti dayanımlarının belirlenmesi gerekir.

Türkiye’de çelik yapıların tasarım ilkeleri iki yıl önce yenilenmiştir. 1980 yılında yürürlüğe giren “TS 648: Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları” [11] isimli çelik yapı tasarım standardı (bu makalede “Standart” olarak atıfta bulunulacaktır), 2016 yılında yürürlüğe giren “Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik” [12] isimli çelik yapı tasarım yönetmeliğine (bu makalede “Yönetmelik” olarak atıfta bulunulacaktır) bırakmıştır. Yönetmelik’in kapsamı ve eki 15/02/2018 tarihinde yayınlanan Resmi Gazete’de güncellenmiştir. Standart’ta tanımlanan tasarım esasları Emniyet Gerilmeleri Yöntemi temel alınarak hazırlanmıştır. Bu yöntem, “çalışma” yükleri etkisinde yapısal çelik elemanlarda oluşan gerilmelerin, belirli emniyet katsayıları kullanılarak hesaplanan emniyet gerilmelerini aşmayacak şekilde tasarlanması ilkesine dayanmaktadır. Amerika Birleşik Devletlerinde, 2016 yılında yürürlüğe giren “Specification for Structural Steel Buildings (Yapısal Çelik Binalar için Yönetmelik)” [13] temel alınarak hazırlanan Yönetmelik’te tanımlanan tasarım esasları ise Sınır Durumlara Göre Tasarım yöntemine dayanmaktadır. Bu yöntemde ana felsefe, çelik yapı elemanlarının/birleşimlerinin “yapının işletme ömrü boyunca kendinden beklenen tüm fonksiyonları belirli bir güvenlik altında yerine getirebilecek düzeyde dayanım, kararlılık ve rijitliğe sahip olacak şekilde (Bölüm 5.2)” tasarlanmasıdır. Yönetmelik, çelik yapı elemanlarının tasarımında “Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT)” ve “Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT)” yöntemlerinden birinin kullanımına izin vermektedir. GKT yöntemi, yapısal çelik elemanların karakteristik dayanımlarının (R_n) ilgili güvenlik katsayılarına (Ω) bölünmesiyle elde edilen “güvenli dayanım”larının (R_n/Ω), bu yöntem için tanımlanan yük birleşimleri altında hesaplanan “gerekli dayanım”lara (R_a) eşit ya da daha büyük olması ilkesine dayanmaktadır:

$$R_a \leq \frac{R_n}{\Omega} \quad (1)$$

Her ne kadar temel tasarım felsefeleri farklı olsa da, GKT yöntemi yapısal güvenlik koşulunun uygulanışı yönünden Emniyet Gerilmeleri Yöntemi'ne benzemektedir; zira her iki yöntemde de yükler artırılmamakta, buna karşın, dayanımlar/gerilmeler ciddi oranlarda azaltılmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, çelik eğilme elemanları için, Yönetmelik'teki GKT yönteminde tanımlanan tasarım esaslarıyla Standart'ta tanımlanan tasarım esaslarını karşılaştırarak, Standart'a göre tasarlanmış bir çelik eğilme elemanının Yönetmelik'e göre yeterli dayanım ve kararlılığa sahip olup olmadığının belirlenmesidir. Her ne kadar Standart'la Yönetmelik'in temel tasarım felsefeleri farklıysa da, "çalışma" yükleri altında, çelik yapı elemanlarının emniyetle taşıyabileceği kesit zorlarının (diğer bir deyişle, iç kuvvet ve/veya momentlerin) "güvenli" değerlerinin her iki tasarım dokümanında verilen kurallar çerçevesinde hesaplanarak elde edilen sonuçların karşılaştırılıp, Standart'a göre tasarlanan bir çelik yapı elemanının güçlendirilmesine gerek olup olmadığına karar verilebileceği düşünülmektedir. Çalışmada, Türkiye'de eğilme elemanı olarak yaygın şekilde kullanılan 111 farklı Avrupa-tipi I-enkesitli (18 IPE, 21 IPN, 24 HEA, 24 HEB ve 24 HEM) hadde profilinin (Tablo 1) (i) kuvvetli ekseninde eğilme, (ii) zayıf ekseninde eğilme, (iii) gövde düzleminde kesme ve (iv) başlıklarına paralel düzlemde kesme dayanımları, karakteristik akma gerilmeleri 235, 275 ve 355 MPa olan ve sırasıyla Yönetmelik'te S235, S275 ve S355, Standart'ta ise St37, St44 ve St52 olarak isimlendirilen üç farklı çelik sınıfı ve farklı eleman boyları ($L_b \leq 20$ m) için hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

2. I-ENKESİTLİ HADDE EĞİLME ELEMANLARININ TASARIM ESASLARI (DESIGN GUIDELINES FOR ROLLED I-SHAPED FLEXURAL MEMBERS)

2.1. Yönetmelik'e Göre Tasarım (Design According to the Specification)

2.1.1. Kuvvetli ekseninde eğilme (Bending about major axis)

Yönetmelik'te Bölüm 9.1'e göre, kuvvetli eksen etrafında eğilen bir çelik yapı elemanının "karakteristik eğilme momenti dayanımı" (M_{nx}), olası her bir sınır durum için hesaplanacak dayanımların en küçüğü alınarak belirlenmeli; elemanın "güvenli eğilme momenti dayanımı" (M_{nx}/Ω_b)

hesabında güvenlik katsayısı olarak $\Omega_b=1,67$ kullanılmalıdır. Tasarımda esas alınacak Yönetmelik bölümü, elemanın basınç etkisindeki enkesit parçalarının genişlik/kalınlık oranlarına (b/t oranlarına, diğer bir deyişle, "narınlık"lerine) bağlıdır. I-enkesitli bir hadde profilin basınç başlığı ile gövdesinin genişlik/kalınlık oranları (sırasıyla, λ_f ve λ_w) aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir:

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

Eş. 2'de b_f başlık genişliği, t_f başlık kalınlığı, h düz gövde yüksekliği ve t_w gövde kalınlığıdır. Gövde ve basınç başlığının sınıfı, Yönetmelik Tablo 5.1B'de verilen sınır değerler kullanılarak belirlenmelidir. İlgili tabloda I-enkesitli hadde profilleri için verilen sınır genişlik/kalınlık oranları (başlık için λ_{pf} ve λ_{rf} , gövde için λ_{pw} ve λ_{rw} değerleri) şu şekildedir:

$$\lambda_{pf} = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \lambda_{rf} = 1,00 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{ve} \quad (3)$$

$$\lambda_{pw} = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \lambda_{rw} = 5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Eş. 3'te F_y yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesi, E ise elastisite modülüdür ($E=200$ GPa). Çalışmada incelenen bütün enkesitlerin başlık ve gövde narınlıkları hesaplanarak, her enkesit grubunda (IPE, IPN, HEA, HEB, HEM) elde edilen en büyük değerler (sırasıyla, $\lambda_{f,max}$ ve $\lambda_{w,max}$) Tablo 2'de sunulmuştur. Çalışmada incelenen üç çelik sınıfı için sınır narınlıklar ise Tablo 3'te sunulmuştur. Sınır narınlıklar enkesit özelliklerinden bağımsızdır. Yönetmelik'te, basınç etkisindeki bir enkesit parçası, parçanın narınlığı λ_p değerinden küçükse "kompakt", λ_r 'den büyükse "narın", iki sınır değer arasındaysa "kompakt olmayan" olarak sınıflandırılmaktadır. Enkesitin kompakt olarak sınıflandırılabilmesi için, basınç etkisindeki parçalarının tamamının kompakt olması gerekmektedir.

Tablo 2'de sunulan en büyük gövde narınlığı (52,6) olup incelenen en yüksek akma dayanımına sahip çelik sınıfı olan S355 çeliği için hesaplanan λ_{pw} değerini (89,3) aşmamaktadır. Diğer bir deyişle, bu çalışmada incelenen enkesitlerin tamamının gövdeleri kompakttır. Buna karşın, Tablo 2'de sunulan en büyük başlık narınlığının (10,8) yalnız S235 çelik sınıfı için hesaplanan λ_{pf} değerinden (11,1) küçük

Tablo 1. Çalışmada ele alınan I-enkesitli hadde elemanları (Rolled I-shaped members considered in the study)

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

Tablo 2. İncelenen enkesitlerin başlık ve gövdelerinin genişlik/kalınlık oranlarının enkesit grubu içindeki en büyük değerleri (Maximum values of width-to-thickness ratios for flanges and webs of studied cross sections in each section group)

	IPE	HEA	HEB	HEM	IPN
$\lambda_{rf,max}$	7,01 (IPE300)	10,8 (HE280A)	7,89 (HE300B)	4,36 (HE280M)	4,05 (IPN240)
$\lambda_{w,max}$	42,8 (IPE600)	52,6 (HE100A)	45,7 (HE1000B)	41,3 (HE1000M)	23,5 (IPN550)

olduğu; daha yüksek çelik kaliteleri için hesaplanan sınır değerlerden (10,2 ve 9,02) büyük olduğu görülebilir. Bununla birlikte, en büyük başlık narinliği, S355 çeliği için hesaplanan λ_{rf} değerinin (23,7) çok altındadır. Diğer bir ifadeyle, Tablo 1’de listelenen enkesitler arasında narin başlıklı enkesit bulunmamaktadır; ancak başlıkları kompakt olmayan enkesitler mevcuttur. Tablo 2’de HEA enkesitlerin haricindeki enkesitler incelendiğinde, en yüksek başlık narinliğinin (7,89) HEB enkesit grubunda olduğu; ancak bu değer S355 çeliği için hesaplanan λ_{pf} değerinden (9,02) küçük olduğu görülebilir. Sonuç olarak, incelenen bütün IPE, IPN, HEB ve HEM enkesitleri kompakttır. HEA enkesitlerde ise S275 çelik kalitesinde üç (HEA260, HEA280 ve HEA300), S355 çelik kalitesinde ise dokuz (numaraları 180 ila 340 arasında olan enkesitler) enkesitin başlıklarının kompakt olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 3. Eğilme etkisindeki I-enkesitli hadde elemanların gövde ve başlıkları için sınır genişlik/kalınlık oranları (Limiting width-to-thickness ratios for flanges and webs of rolled I-shaped members subject to flexure)

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

Yönetmelik’te Bölüm 9.2 uyarınca, kompakt I-enkesitli hadde elemanların karakteristik dayanımı, akma ve yanal burulmalı burkulma sınır durumları için hesaplanan değerlerden (bu çalışmada, sırasıyla, M_{nx1} ve M_{nx2} olarak adlandırılacaktır) küçüğüne eşittir. Akma sınır durumunda karakteristik dayanım, çeliğin karakteristik akma gerilmesi F_y ile enkesitin kuvvetli ekseninde plastik mukavemet momenti W_{px} ’in çarpılmasıyla elde edilen, plastik moment kapasitesine (M_{px}) eşittir.

$$M_{nx1} = M_{px} = F_y W_{px} \quad (4)$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda, karakteristik dayanım (M_{nx2}), Yönetmelik’te “basınç başlığında yanal yerdeğiştirmenin veya enkesit burulmasının önlediği noktalar arasındaki eleman uzunluğu” olarak tanımlanan L_b boyuna bağlıdır. L_b boyunun “akma sınır durumu için yanal olarak desteklenmeyen sınır uzunluk” olan L_p ’den (Eş. 5) küçük olması durumunda, bu sınır durumun tasarımda dikkate alınmasına gerek yoktur. Buna karşın, L_b boyunun “elastik olmayan yanal burulmalı burkulmada sınır uzunluk” olan L_r ’den (Eş. 5) büyük olması durumunda Eş. 6’da verilen elastik yanal burulmalı burkulma denklemi, iki sınır değer arasında kalması durumunda ise Eş. 7’de verilen elastik

olmayan yanal burulmalı burkulma denklemi kullanılmalıdır:

$$L_p = 1,76i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{ve} \quad L_r = 1,95i_{ts}$$

$$\frac{E}{0,7F_y} \sqrt{\frac{J}{W_{ex} h_o}} + \sqrt{\left(\frac{J}{W_{ex} h_o}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7F_y}{E}\right)^2}; \quad (5)$$

$$i_{ts} = \sqrt{\frac{I_y C_w}{W_{ex}}}$$

$$L_b > L_r \text{ ise } M_{nx2} = \frac{C_b \pi^2 E}{(L_b / i_{ts})^2} \sqrt{\frac{J}{W_{ex} h_o}} \left(\frac{L_b}{i_{ts}}\right)^2 W_{ex} \quad (6)$$

$$L_p < L_b \leq L_r \text{ ise } M_{nx2} = C_b \left[\frac{M_{px} - (M_{px} - 0,7F_y W_{ex})}{\left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)} \right] \quad (7)$$

Eş. 5, 6 ve 7’de, i_y zayıf eksene göre atalet yarıçapı, i_{ts} etkin atalet yarıçapı, J burulma sabiti, W_{ex} kuvvetli eksen etrafında elastik mukavemet momenti, h_o enkesit başlıklarının ağırlık merkezleri arasındaki uzaklık, I_y zayıf eksen etrafında atalet momenti, C_w çarpılma katsayısı, C_b moment düzeltme katsayısı olup, bu çalışmada güvenli tarafta kalarak, $C_b=1.0$ olarak alınmıştır. Yönetmelik’te Bölüm 9.3 uyarınca, kompakt gövdeli ve kompakt olmayan başlıklı I-enkesitli hadde elemanların karakteristik dayanımı (M_{nx}), yanal burulmalı burkulma ($L_b > L_p$ olması durumunda) ve yerel burkulma sınır durumları için hesaplanan değerlerden (bu çalışmada, M_{nx2} (Eş. 6 veya 7) ve M_{nx3} (Eş. 8) olarak adlandırılacaktır) küçüğüne eşittir. Başlıkları kompakt olmadığı için, bu tür elemanlar plastik moment dayanımlarına ulaşamaz. Eleman dayanımı, elastik olmayan başlık burkulmasıyla sınırlıdır ve en büyük karakteristik dayanım Eş. 7’ye benzer bir geçiş denklemi kullanılarak hesaplanmalıdır:

$$M_{nx3} = M_{px} - (M_{px} - 0,7F_y W_{ex}) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \quad (8)$$

2.1.2. Zayıf ekseninde eğilme (Bending about minor axis)

Yanal burulmalı burkulma ve yerel gövde burkulmasının, zayıf ekseni etrafında eğilen I-enkesitli bir çelik yapı

elemanın tasarımında göz önüne alınması gereken sınır durumlar olmadığı bilinmektedir. [14] Bu nedenle, zayıf ekseninde eğilen bir I-profilin dayanımını, ya akma sınır durumu ya da yerel başlık burkulması sınır durumu belirler. Yönetmelik'te Tablo 5.1B'de, zayıf eksenleri etrafında eğilen I-enkesitli hadde profillerin başlıklarının sınıflandırılması için verilen sınır narinlikler, ilgili profiller için güçlü eksen etrafında eğilme durumunda verilen sınır narinliklerle (Eş. 3) aynıdır. Bu durumda, çalışmada incelenen enkesitler arasında, kompakt olmayan HEA enkesitlerinin haricinde yerel başlık burkulması sınır durumunun kontrolü gerekmemektedir. Yönetmelik Bölüm 9.1 ve 9.6'ya göre, zayıf eksen etrafında eğilen I-enkesitli bir hadde profilinin güvenli eğilme momenti dayanımı (M_{ny}/Ω_b), kompakt başlıklı olması durumunda akma sınır durumu için belirlenen karakteristik dayanım (M_{ny1}), kompakt olmayan başlıklı olması durumunda akma ve yerel burkulma sınır durumları için belirlenen karakteristik dayanımlardan (sırasıyla, M_{ny1} ve M_{ny2}) küçüğü, $\Omega_b=1,67$ 'ye bölünerek hesaplanmalıdır.

$$M_{ny1} = M_{py} = F_y W_{py} \leq 1,6 F_y W_{ey} ;$$

$$M_{ny2} = M_{py} - (M_{py} - 0,7 F_y W_{ey}) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \quad (9)$$

Eş. 9'da M_{py} , W_{py} ve W_{ey} sırasıyla zayıf ekseninde eğilmede elemanın plastik momenti ile plastik ve elastik mukavemet momentleridir. Zayıf ekseninde eğilmede şekil faktörü yüksek enkesitli elemanların plastik eğilme momentine ulaşabilmesi için oldukça büyük doğrusal olmayan şekil değiştirmeler yapması gerektiği bilinmektedir. M_{ny1} için verilen eşitlikte, Yönetmelik'in, elemanda oluşacak aşırı büyük şekil değiştirmeleri engellemek amacıyla [15], elemanın dayanımını akma momentinin 1,6 katıyla sınırladığı görülmektedir.

2.1.3. Gövde düzleminde kesme (Shear in the plane of the web)

Gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki çift-simetri eksenli I-enkesitli bir çelik yapı elemanında kesme kuvvetinin neredeyse tamamı gövde tarafından taşınır. Bu nedenle, bu tür elemanların kesme davranışını, gövdenin kesme etkisinde akması ya da burkulması belirler [16]. Gövde narinliği (h/t_w) küçük olan elemanlar, kesmede karakteristik akma gerilmesi ($0,6F_y$) ile gövde alanı (A_w) çarpılarak hesaplanan plastik kesme kuvveti dayanımına (V_{py}) ulaşabilir. Buna karşın, narin gövdeli elemanlar plastik dayanıma ulaşmadan gövde burkulmasına maruz kalır ve dayanımları gövdenin burkulma dayanımına eşittir. Yönetmelik'te Bölüm 10.2'ye göre, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitlerde, karakteristik kesme kuvveti dayanımı (V_{ny}), aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmalıdır:

$$V_{ny} = V_{py} C_{v1} = 0,6 F_y A_w C_{v1} \quad (10)$$

Eş. 10'da, gövde alanı A_w , enkesit yüksekliği (d) ile gövde kalınlığı (t_w) çarpılarak hesaplanmalıdır. Yönetmelik'te "gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı" olarak tanımlanan C_{v1} katsayısının değerinin I-enkesitli hadde profillerin gövde narinliklerinin $2,24\sqrt{E/F_y}$ sınır değerden küçük olduğu durumlarda 1,0'e eşit olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, bu durumda, ilgili güvenlik katsayısı da $\Omega_v= 1,5$ olarak alınabilmektedir. İncelenen enkesitler arasında, gövde narinliği en yüksek olan enkesitin narinliğinin (52,6, Tablo 2), S355 için hesaplanan sınır değerden (53,2) küçük olduğu belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, çalışmada incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için, $C_{v1}=1,0$, $\Omega_v= 1,5$ 'tur ve karakteristik dayanım, plastik kesme kuvveti dayanımına eşittir ($V_{ny} = V_{py}$).

2.1.4. Başlıklara paralel düzlemde kesme (Shear in the weak axis)

Zayıf ekseninde eğilen çift-simetri eksenli I-enkesitli bir çelik yapı elemanı, çoğu zaman başlıklara paralel kesme kuvvetinin de etkisindedir. Bu tür bir elemanda, kesme kuvvetini başlıklar taşır ve elemanın kesme davranışını, başlıkların kesme etkisinde akması ya da burkulması belirler [13]. Yönetmelik'te Bölüm 10.6'da, tıpkı gövde düzleminde kesmede olduğu gibi, "zayıf ekseninde kesmede karakteristik kesme kuvveti dayanımı (V_{nx})" hesabı için yalnız bir denklem sunulmuş, yerel başlık burkulması sınır durumu C_{v2} katsayısıyla tasarıma dahil edilmiştir.

$$V_{nx} = V_{px} C_{v2} = 1,2 F_y b_f t_f C_{v2} \quad (11)$$

Eş. 11'de, V_{px} zayıf ekseninde kesmede enkesitin plastik kesme kuvveti dayanımıdır. Yönetmelik'e göre, başlık narinliğinin ($b_f/2t_f$), $1,10\sqrt{1,20(E/F_y)}$ sınır değerden küçük olması durumunda $C_{v2}=1,0$ olarak alınmalı, aksi takdirde C_{v2} değeri hesaplanmalıdır. Ayrıca, zayıf ekseninde kesmede $\Omega_v=1,67$ olarak hesaba katılmalıdır. İncelenen enkesitler arasında, başlık narinliği en yüksek olan enkesitin narinliğinin (10,8, Tablo 2), S355 için hesaplanan sınır değerden (35,2) küçük olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, çalışmada incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için, zayıf ekseninde kesme durumunda da karakteristik dayanım, plastik dayanıma eşittir ($V_{nx} = V_{px}$).

2.2. Standart'a Göre Tasarım (Design According to the Standard)

2.2.1. Kuvvetli ekseninde eğilme (Bending about major axis)

Standart'ta Bölüm 3.3.4.2'ye göre, "eksenel simetrisi olan ve gövde yönünde yüklenen kirişlerde", "daha kesin hesap yöntemleriyle belirlenmediği müddetçe", basınç emniyet gerilmesi (σ_{Bx}) Eş. 12'deki tasarım denklemlerinden uygun olan(lar) kullanılarak hesaplanmalıdır.

Eş. 12'de s "kirişin basınç başlığında dönmeye ve yanal deplasmana karşı mesnetleri arasındaki mesafe", i_y^* "basınç başlığı ve gövdenin basınç bölgesinin 1/3'ünün gövde

eksenine göre atalet yarıçapı”, d “başlıklararası dıştan dışa mesafe”, F_b ise “basınç başlığının enkesit alanı”dır.

$$\sigma_{Bx1} = \frac{840000}{s d / F_b} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} ;$$

$$\sigma_{Bx2} = \begin{cases} \left[\frac{s}{i_y^*} \leq \sqrt{\frac{30000000}{\sigma_a}} \text{ ise} \right. \\ \left. \frac{2}{3} - \sigma_a \frac{(s/i_y^*)^2}{90000000} \right] \sigma_a \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \\ \left[\frac{s}{i_y^*} > \sqrt{\frac{30000000}{\sigma_a}} \text{ ise} \right. \\ \left. \frac{10000000}{(s/i_y^*)^2} \right] \sigma_a \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \end{cases} \quad (12)$$

Standart'ta σ_{Bx1} 'in, enkesitin basınç başlığının dolu ve yaklaşık olarak dikdörtgen enkesite sahip olduğu, ayrıca basınç başlığının enkesitinin çekme başlığı enkesitinden daha ufak olmadığı durumlarda kullanılabilceği belirtilmiştir. Bu durumda, σ_{Bx} , σ_{Bx1} ve σ_{Bx2} değerlerinden büyüğü olarak alınabilir. Bu çalışmada ele alınan enkesitlerin tamamının Standart'ta belirtilen enkesit koşullarını sağladığı kabul edilerek, σ_{Bx} hesabında her iki tasarım denklemi de kullanılmıştır. Standart'ta ayrıca σ_{Bx} 'in değerinin, $0,60\sigma_a$ değerini aşmayacağı da vurgulanmıştır. Dolayısıyla, kuvvetli eksenleri etrafında eğilen I-enkesitli hadde profilleri için Standart'ta tanımlanan tasarım koşulu şu şekilde ifade edilebilir;

$$\sigma_{bx} \leq \sigma_{Bx} \leq 0,6\sigma_a \quad (13)$$

Eş. 13'te σ_{bx} , elemanın en çok zorlanan enkesitinde oluşan en büyük elastik basınç gerilmesi olup elastik eğilme denklemi ($\sigma_{bx} = M_x/W_{ex}$; burada M_x elemana etkiyen en büyük eğilme momentidir) kullanılarak hesaplanabilir. GKT yönteminden elde edilen güvenli eğilme momenti dayanımıyla (M_{nx}/Ω_b) karşılaştırabilmek amacıyla, Eş. 13'te verilen tasarım denkleminde ilgili kesit zorunun, yani eğilme momenti M_x 'in, en büyük değeri elde edilebilir. Bu çalışmada, Standart'a göre, elemanın taşıyabileceği en büyük moment, “kuvvetli ekseninde eğilmede emniyetli eğilme momenti dayanımı” olarak tanımlanmış ve “ $M_{x,em}$ ” sembolüyle gösterilmiştir. $M_{x,em}$, elemanda oluşan en büyük basınç gerilmesinin, basınç emniyet gerilmesine eşitlenmesiyle bulunabilir:

$$\frac{M_{x,em}}{W_{ex}} = \sigma_{Bx} \leq 0,6\sigma_a \rightarrow M_{x,em} = \sigma_{Bx} W_{ex} \leq 0,6\sigma_a W_{ex} \quad (14)$$

2.2.2. Zayıf ekseninde eğilme (Bending about minor axis)

Standart'ta zayıf eksenleri etrafında eğilen elemanlar için özel tasarım denklemleri bulunmamaktadır. Ancak, zayıf eksenlerinde eğilen I-enkesitli hadde elemanlarda yanal

burkulma tehlikesi olmadığı düşünüldüğünde, basınç emniyet gerilmesinin (σ_{By}) kuvvetli eksen etrafında eğilmede üst sınır olarak tanımlanan $0,6\sigma_a$ değerine eşit olduğu kabul edilebilir. Bu durumda, bu tür elemanların “emniyetli eğilme momenti dayanımı” ($M_{y,em}$), $0,6\sigma_a$ ile enkesitin zayıf eksen etrafında elastik mukavemet momenti (W_{ey}) çarpılarak elde edilebilir;

$$\frac{M_{y,em}}{W_{ey}} = 0,6\sigma_a \rightarrow M_{y,em} = 0,6\sigma_a W_{ey} \quad (15)$$

2.2.3. Gövde düzleminde kesme (Shear in the plane of the web)

Standart'ta Bölüm 4.1'e göre, kayma emniyet gerilmesi (τ_{em}), çekme emniyet gerilmesi ($\sigma_{çem}$) $\sqrt{3}$ 'e bölünerek hesaplanabilir. Bölüm 3.1.1'de, $\sigma_{çem}$ 'in çeliğin akma sınırının %60'ından daha büyük olamayacağı, ayrıca bu değer çeliğin çekme dayanımının (σ_d) yarısını da aşmaması gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışmada incelenen bütün çelik sınıfları için, $0,6\sigma_a < 0,5\sigma_d$ olduğu için, $\sigma_{çem} = 0,6\sigma_a$ 'dır. Bu durumda, kayma emniyet gerilmesi σ_a cinsinden şu şekilde ifade edilebilir;

$$\tau_{em} = 0,6\sigma_a / \sqrt{3} \quad (16)$$

Standart'ta Bölüm 2.3.5'te, “boyutlandırmaya esas olan enkesitler” başlığı altında gerilme kontrollerinde göz önünde tutulması gereken enkesit değerlerinin listelendiği çizelgede (Çizelge 2), zorlama çeşidinin kesme kuvveti olduğu durumda, kayma gerilmesi hesabında $F_{gövde}$ sembolüyle ifade edilen “gövde alanı” kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Bu durumda, kesitte oluşan ortalama kayma gerilmesi (τ_{ort}), kayma emniyet gerilmesine eşitlenerek, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki I-kesitli bir hadde profili için “emniyetli kesme kuvveti dayanımı ($V_{y,em}$)” aşağıdaki gibi elde edilebilir,

$$\frac{V_{y,em}}{F_{gövde}} = \frac{0,6\sigma_a}{\sqrt{3}} \text{ buradan } V_{y,em} = \frac{0,6\sigma_a}{\sqrt{3}} F_{gövde} \quad (17)$$

Ancak, yönetmelikte gövde alanı ($F_{gövde}$) açık bir şekilde tanımlanmamıştır. Pratikteki uygulamalara bakıldığında, gövde alanı olarak çoğunlukla başlıkların [17] ya da gövde eğriliklerinin [18] arasında kalan dikdörtgen alanın alındığı görülmektedir. Bu çalışmada gövde alanı, başlıkların arasındaki net gövde yüksekliğiyle gövde kalınlığı çarpılarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, pratikte, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli bir hadde profilinde oluşan en büyük kayma gerilmesinin hesabında genel elastik kayma gerilmesi denkleminin de yaygın olarak kullanıldığı [19] görülmektedir:

$$\tau = \frac{V_y Q_x}{I_x t} \quad (18)$$

Eş. 18'de V_y elemanın incelenen enkesitinde gövde düzleminde etkiyen kesme kuvvetinin şiddeti, Q_x , kayma

gerilmesi hesabı yapılan noktanın üstünde ya da altında kalan enkesit alanının kuvvetli eksene göre birinci alan momenti, I_x kuvvetli eksene göre atalet momenti, t enkesitin kayma gerilmesi hesabı yapılan noktasındaki kalınlığıdır. Gövde düzlemine paralel kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli hadde profillerde, en büyük kayma gerilmelerinin (τ_{max}) kuvvetli asal eksen üzerinde oluşacağı bilindiğine göre, elemanın emniyetli kesme kuvveti dayanımı, şu şekilde de ifade edilebilir,

$$\tau_{max} = \frac{V_{y,em} S_x}{I_x t_w} = \tau_{em} \quad (19)$$

$$\rightarrow V_{y,em} = \frac{0,6\sigma_a I_x t_w}{\sqrt{3} S_x} = \frac{1,2\sigma_a I_x t_w}{\sqrt{3} W_{px}}$$

Eş. 19'da, S_x , kuvvetli asal eksenin üstünde ya da altında kalan yarım enkesit alanın aynı eksene göre statik alan momenti olup I-enkesitli hadde profillerinde plastik mukavemet momentinin (W_{px}) yarısına eşittir.

2.2.4. Başlıklara paralel düzlemde kesme (Shear in the weak axis)

Gövde düzleminde kesme durumunda olduğu gibi, başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli elemanlar için Standart'ta özel tasarım ilkeleri verilmemiştir. Hatta bu durumda, kesme alanının tanımı da yapılmamıştır. Standart'ta, kesme kuvveti etkisindeki hadde elemanların tasarımında yerel burkulma sınır durumunun göz önünde bulundurulmadığı dikkate alınır, bu tür elemanlarda yapılacak gerilme kontrollerinin basit mukavemet temellerine dayanacağı fark edilebilir. Gövde düzleminde kesme durumunda anlatıldığı gibi, genel elastik kayma gerilmesi denklemi (Eş. 18) kullanılarak kesitteki en büyük kayma gerilmesi hesaplanıp, Eş. 16'de verilen kayma emniyet gerilmesine eşitlenirse, başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisindeki I-kesitli hadde profillerin "emniyetli kesme kuvveti dayanımı ($V_{x,em}$)" belirlenebilir;

$$\tau = \frac{V_x Q_y}{I_y t} \leq \tau_{em} \quad \rightarrow \quad V_{x,em} = \frac{0,6\sigma_a}{\sqrt{3}} \frac{8I_y}{b_f^2 - t_w^2} \quad (20)$$

Eş. 20'de, V_x , başlıklara paralel düzlemde etkiyen kesme kuvvetinin şiddeti; τ , V_x nedeniyle enkesitte oluşan en büyük kayma gerilmesi; Q_y , kayma gerilmesi hesabı yapılan nokta için hesaplanan statik alan momenti; I_y , enkesitin zayıf asal eksenine göre atalet momenti; b_f , başlık genişliği ve t_w , başlık kalınlığıdır. Bu tür elemanlarda, en büyük kayma gerilmelerinin başlıkların gövdeyle birleştiği kesitte oluştuğu kabul edilebilir. Bu durumda, eğrilikler ihmal edilirse, Q_y başlığın ucundan başlığın gövdeyle birleştiği kesite kadar olan yarım başlık alanının (yani, t_f kalınlıklı ($b_f - t_w$)/2 genişliğindeki dikdörtgen alanın) zayıf eksene göre momenti alınarak hesaplanabilir. Burada, moment kolu ($b_f + t_w$)/4'e eşit olup, $Q_y = t_f (b_f^2 - t_w^2) / 8$ 'dir

3. I-ENKESİTLİ HADDE EĞİLME ELEMANLARIN TASARIM ESASLARININ KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF DESIGN GUIDELINES FOR ROLLED I-SHAPED FLEXURAL MEMBERS)

Tablo 1'de belirtildiği gibi, çalışmada 18'i IPE ve 21'i IPN olmak üzere toplam 39 I-enkesiti ile her biri 24'er adet üç farklı tür HE-enkesiti (HEA, HEB ve HEM) ele alınmıştır. Karşılaştırmalarda, genel olarak, I- ve HE-enkesitli elemanlar ayrı iki grup halinde değerlendirilmiş; aynı gruptaki elemanlar ise enkesit numaralarına göre karşılaştırılmıştır. Örnek olarak, enkesit numarası 300 olan üç HE-enkesiti, HE300A, HE300B ve HE300M'dir ve grafikler bu üç enkesite sahip elemanlar için elde edilen değerleri birbirleriyle karşılaştırılabilir şekilde çizilmiştir. HE-enkesitlerinin aksine, bazı I-enkesitlerinin numaraları çakışmamaktadır. Örneğin, IPE330 ile aynı enkesit numarasına sahip bir IPN enkesiti yoktur. Bu nedenle, I-enkesitli elemanlar için çizilen karşılaştırmalı grafiklerde, yalnız numaraları ortak olan I-enkesitli (16 adet) elemanların değerleri sunulmaktadır.

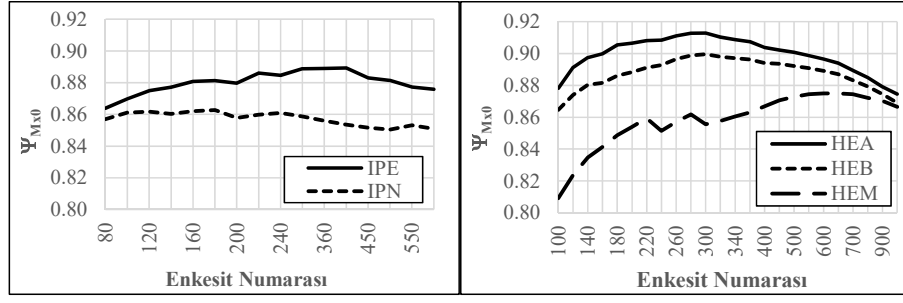
Elemanların dayanımları karşılaştırılırken, ilgili kesit zoru etkisinde elemanların Standart'a göre hesaplanan "emniyetli" dayanımları ile Yönetmelik'e göre hesaplanan "güvenli" dayanımları oranlanmıştır. En genel haliyle, bu oran "dayanım oranı" olarak adlandırılmış ve Ψ sembolüyle gösterilmiştir. Örnek olarak, kuvvetli ekseni etrafında eğilme momenti etkisindeki I-enkesitli bir hadde profilinin "emniyetli eğilme momenti dayanımı"nın ($M_{x,em}$), "güvenli eğilme momenti dayanımı"na (M_{nx}/Ω_b) oranı, "kuvvetli eksen etrafında eğilme momenti dayanım oranı" olarak adlandırılmış ve Ψ_{Mx} sembolüyle gösterilmiştir. Benzer şekilde, "gövde düzleminde kesme kuvveti dayanım oranı", $\Psi_{Vy} = V_{y,em} / (V_{ny}/\Omega_v)$ eşitliğinden hesaplanmıştır. Herhangi bir dayanım oranının 1'den küçük olması, elemanın ilgili kesit zoru etkisinde Standart'a göre yapılan tasarımının, Yönetmelik'e göre yapılan tasarımına göre daha güvenli tarafta kaldığını göstermektedir. Bu durumda, elemanın dayanımı (ve kararlılığı) yeterlidir ve güçlendirilmesine gerek yoktur. Ancak, bu çalışmada sadece dayanım sınır durumlarının ele alındığı ve nihai karardan önce kullanılabilirlik sınır durumlarının da kontrol edilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

3.1. Kuvvetli Eksende Eğilme (Bending about Major Axis)

3.1.1. Yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt enkesitli elemanlar

(Laterally-restrained members with compact cross sections)

Standart, burkulma tehlikesi olmayan elemanların emniyetli eğilme momenti dayanımını akma momentinin %60'yla sınırlarken; Yönetmelik güvenli eğilme momenti dayanımının üst sınırını plastik moment dayanımının yaklaşık %60'ı olarak belirlemiştir. Bu durumda, burkulma tehlikesi olmayan (yani, enkesiti kompakt ve $L_b < L_p$ olan) I-enkesitli bir hadde profilin kuvvetli eksende eğilme momenti dayanım oranı (Ψ_{Mx0}):



Şekil 1. Yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt enkesitli elemanlar için kuvvetli ekseninde eğilme momenti dayanım oranları (Strong axis flexural strength ratios for laterally-restrained members with compact cross sections)

$$\Psi_{M_{x,0}} = \frac{(M_{x,em})_{maks}}{(M_{nx}/\Omega_b)_{maks}} = \frac{0,6\sigma_a W_{ex}}{F_y W_{px}/1,67} \cong \frac{W_{ex}}{W_{px}} \quad (21)$$

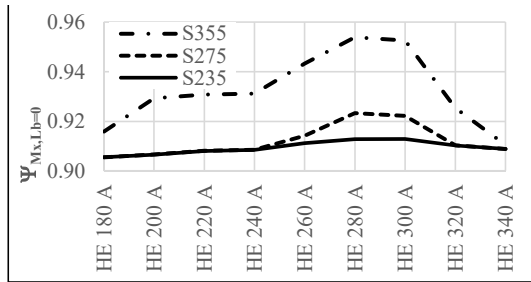
Eş. 21’de, dayanım oranı için kullanılan semboldeki 0 alt indisi, elemanda yerel/yanal burkulma tehlikesinin olmaması koşulunu ifade etmektedir. Çalışmada incelenen enkesitlerin $\Psi_{M_{x,0}}$ değerleri Şekil 1’de sunulmuştur.

$W_{ex} < W_{px}$ olduğu bilindiğine göre, incelenen bütün kompakt enkesitli elemanlar için $\Psi_{M_{x,0}} < 1,0$ ’dir. Diğer bir deyişle, kuvvetli eksenlerinde eğilen ve yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt I-enkesitli hadde profillerin dayanımlarını Standart Yönetmelik’ten daha güvenli tarafta kalacak şekilde hesaplatmaktadır. Şekil 1’den de görülebileceği gibi, dayanım oranının en büyük değeri yaklaşık 0,91 olup (HEA enkesitlerde), özellikle küçük numaralı HEM enkesitlerde bu oran 0,81’lere kadar düşmektedir.

3.1.2. Yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt olmayan başlıklı elemanlar

(Laterally-restrained members with noncompact flanges)

Yönetmelik’e göre, yanal burkulma tehlikesi bulunmayan, kompakt olmayan başlıklı HEA enkesitli elemanların kuvvetli ekseninde güvenli eğilme momenti dayanımı (M_{nx}/Ω_b) Eş. 8 kullanılarak hesaplanmalıdır. Standart, yerel burkulma sınır durumunu tasarıma dahil etmediği için, bu tür elemanlarda emniyetli eğilme momenti dayanımı $M_{x,em} = 0,6\sigma_a W_{ex}$ ’e eşittir. S355 çelik sınıfında kompakt olmayan başlıklı olarak sınıflandırılan dokuz HEA enkesitin dayanım oranları ($\Psi_{M_{x,L_b=0}}$) incelenen üç çelik kalitesi için hesaplanarak Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Yanal burkulma tehlikesi olmayan kompakt olmayan başlıklı elemanlar için kuvvetli ekseninde eğilme momenti dayanım oranları (Strong axis flexural strength ratios for laterally-restrained members with noncompact flanges)

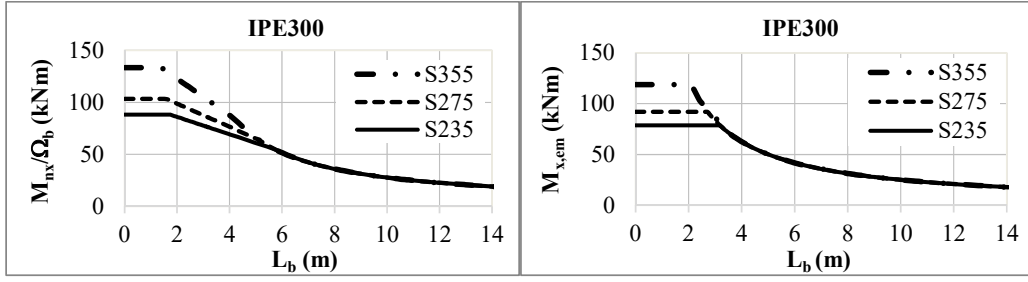
$\Psi_{M_{x,L_b=0}}$ sembolündeki “ $L_b=0$ ” alt indisi, elemanda yanal burkulma tehlikesinin olmaması koşulunu ifade etmektedir. Şekil 2’den görülebileceği gibi, S355 çelik kalitesinde dayanım oranları daha yüksektir. Dayanım oranındaki en büyük artış başlık narinliği en yüksek olan HE280A enkesitinde gözlenmektedir. Ancak, bu durumda dahi, dayanım oranının değeri 1,0’i aşmamaktadır. Diğer bir deyişle, kuvvetli ekseninde eğilen ve yanal burkulma tehlikesi olmayan elemanların tasarımında, incelenen tüm enkesit ve çelik kalitelerinde, Standart Yönetmelik’ten daha güvenli tarafta kalmaktadır.

3.1.3. Yanal burkulma tehlikesi olan elemanlar

(Laterally-urestrained members)

Standart ve Yönetmelik’teki tasarım esaslarını karşılaştırmak amacıyla, pratikte yaygın şekilde kullanılan IPE300 enkesitli bir çelik yapı elemanın farklı burkulma boylarındaki (L_b) güvenli eğilme momenti dayanımları (M_{nx}/Ω_b) Yönetmelik’ten verilen tasarım denklemleri kullanılarak üç farklı çelik kalitesi (S235, S275 ve S355) için hesaplanmış ve “güvenli” dayanım eğrileri çizdirilerek Şekil 3’te solda sunulmuştur. Aynı enkesit, çelik sınıfı ve burkulma boyları ($s=L_b$) için, Standart’ta verilen tasarım denklemleri kullanılarak emniyetli eğilme momenti dayanımları ($M_{x,em}$) hesaplanarak “emniyetli” dayanım eğrileri çizdirilmiş ve Şekil 3’te sağda sunulmuştur.

IPE300 enkesitinin kompakt olması nedeniyle, Şekil 3’te çizilen güvenli dayanım eğrilerinde yerel burkulma sınır durumu dikkate alınmamıştır. Güvenli dayanım eğrileri, Yönetmelik’in tanımına uygun olarak, üç bölgeden oluşmaktadır. L_b ’nin L_p ’den küçük olduğu ilk bölgede güvenli dayanım, elemanın burkulma boyundan bağımsız olup, şiddeti $M_{nx}/\Omega_b = M_{px}/1,67$ ’ye eşittir. Bu bölgede, F_y arttıkça elemanın dayanımı artmakta ancak sabit-dayanım bölgesinin uzunluğu, yani, L_p azalmaktadır. Bu da, aynı burkulma boyuna ve enkesitine sahip ancak farklı çelik kalitelerinde üretilmiş iki elemanın, Yönetmelik’e göre eğilme davranışını belirleyen sınır durumların farklı olabileceği anlamına gelmektedir. Örnek olarak, IPE 300 için L_p değerleri, S235, S275 ve S355 çelik sınıfları için sırasıyla, 1,72 m, 1,59 m ve 1,4 m’dir. $L_b=1,5$ m olan IPE300 enkesitli bir çelik yapı elemanın kuvvetli ekseninde eğilme davranışını çelik kalitesi S235 veya S275 ise akma, S355 ise inelastik yanal burkulmalı burkulma sınır durumu



Şekil 3. IPE 300 enkesitli bir eğilme elemanının kuvvetli ekseninde eğilmede güvenli (M_{nx}/Ω_b) ve emniyetli ($M_{x,em}$) dayanım eğrileri (Allowable strong axis flexural strength curves for a flexural member with IPE300 cross section)

belirlemektedir. Güvenli dayanım hesabında doğrusal geçiş denkleminin kullanıldığı ikinci bölgede, elemanın davranışını elastik olmayan yanal burkulma sınır durumu belirler. Şekil 3'ten görülebileceği gibi, bu bölgede çelik kalitesinin dayanımdaki etkisi L_b arttıkça azalmaktadır. İkinci bölgeyle üçüncü bölge arasındaki sınırı belirleyen L_r değerleri de tıpkı L_p değerleri gibi akma dayanımı arttıkça azalmaktadır. Örnek olarak, IPE 300 için L_r değerleri, S235, S275 ve S355 çelik sınıfları için sırasıyla, 5,72 m, 5,10 m ve 4,26 m'dir. Aynı enkesit ve çelik kaliteleri için L_r-L_p değerleri, yani, elastik olmayan burkulma bölgesinin uzunlukları, sırasıyla 4,00 m, 3,51 m ve 2,86 m olarak hesaplanmıştır. Bu da demektir ki, çelik sınıfı yükseldikçe, ikinci bölgenin uzunluğu da azalmaktadır. S275 ve S355 çelik kaliteleri için elde edilen L_r-L_p değerleri, S235 için elde edilen değere oranlanırsa, bu oranın sırasıyla 0,878 ve 0,715 olduğu belirlenebilir. İncelenen tüm enkesitler için ilgili oran hesaplandığında, S275 için ortalama değer 0,85 (en büyük 0,89, en küçük 0,86) ve S355 için ortalama değer 0,67 (en büyük 0,64, en küçük 0,75) olarak belirlenmiştir. $L_b > L_r$ durumunda, yani elemanın eğilme momenti dayanımının elastik yanal burkulma burkulma sınır durumuyla belirlendiği burkulma boylarında, dayanım çelik kalitesinden bağımsızdır. Bu nedenle, belirli bir burkulma boyundan sonra üç farklı çelik kalitesi için çizilmiş güvenli dayanım eğrileri tek bir eğriye indirgenmektedir.

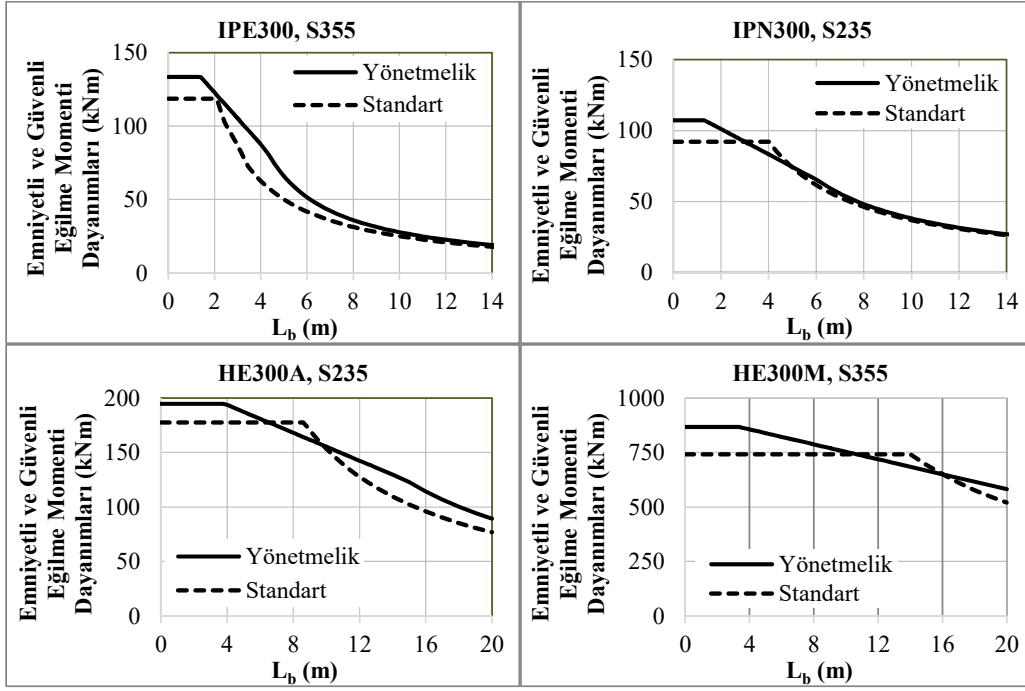
Güvenli dayanım eğrilerinden farklı olarak, emniyetli dayanım eğrilerinin (Şekil 3, sağ) iki bölgeden oluştuğu görülmektedir. Her ne kadar yanal burkulma emniyet gerilmesi hesabında kullanılan denklemlerden biri, elemanın narınlığına göre (s/i_y^*) değişiyor olsa da ilgili grafiklerde bu değişim görünmemektedir. Bunun en önemli nedeni, incelenen enkesitlerin çoğunda, kiriş narınlığına bağlı olarak hesaplanan emniyet gerilmesinin (σ_{Bx2}), narınlıktan bağımsız olan emniyet gerilmesinden (σ_{Bx1}) küçük çıkması nedeniyle dayanım hesabına katılmamasıdır. S235 çelik kalitesinde, incelenen enkesitlerin tamamında, $\sigma_{Bx} = \sigma_{Bx1}$ olduğu gözlenmiştir. S275 çeliğinde IPE500, IPE550, IPE600 ve HEA1000 enkesitli elemanların bazı burkulma boylarında, S355 çeliğinde ise enkesit numarası 300 ve üstü IPE profiller, enkesit numarası 800 ve üstü HEA profiller ile HEB1000 profilinin bazı burkulma boylarında $\sigma_{Bx} = \sigma_{Bx2}$ olmaktadır. Ancak bu durumlarda da (örneğin, Şekil 3 sağda, S355 çelik kalitesi durumunda), iki denklemden elde edilen değerlerin birbirine oldukça yakın olmasından dolayı

grafiklerde gözle görülebilir düzensizlikler oluşmadığı gözlenmiştir. Bu nedenle, incelenen enkesit ve çelik kaliteleri için Standart'ta verilen tasarım esaslarının iki bölgeyi dayanım eğrileri oluşturduğu kabul edilmiştir. Bu kabulle, Standart'a göre, sabit moment bölgesinin sınırı (bu çalışmada " s_p " sembolüyle gösterilecektir), basınç emniyet gerilmesi çekme emniyet gerilmesine eşitlenerek bulunabilir:

$$\sigma_{Bx} = \frac{840000}{sd / F_b} \leq 0,6\sigma_a \rightarrow s_p = \frac{1400000}{\sigma_a d / F_b} \quad (22)$$

IPE300 enkesiti ve S235, S275 ve S355 çelik kaliteleri için s_p değerleri sırayla 3,19 m, 2,72 m ve 2,11 m olarak belirlenmiştir. Bu değerler, aynı enkesit ve çelik kaliteleri için belirlenen L_p değerleriyle karşılaştırıldığında, emniyetli dayanım eğrisinde sabit dayanım bölgesinin güvenli dayanım eğrisinden daha uzun olduğu görülmüştür. İncelenen tüm enkesit ve çelik kaliteleri için bu sonucun geçerli olduğu belirlenmiştir. Emniyetli dayanımın elemanın burkulma boyundan bağımsız olduğu ilk bölgede ($s \leq s_p$), $M_{x,em} = 0,6\sigma_a W_{ex}$ 'tir. Şekil 3'te, sağ ve soldaki grafiklerde S235 çelik kalitesi için verilen dayanım eğrileri karşılaştırıldığında, en büyük emniyetli eğilme momenti dayanımının (78,5 kNm) en büyük güvenli eğilme momenti dayanımına (88,4 kNm) oranının yaklaşık 0,9'a eşit olduğu, bu değer de aslında IPE300 için hesaplanan Ψ_{Mx0} değerine eşit olduğu belirlenmiştir. Standart'la Yönetmelik'in dayanım eğrileri arasındaki bir diğer önemli fark da, Standart'a göre tasarımıda, $s > s_p$ olduğu durumda, dayanımın çelik kalitesinden bağımsız oluşudur. İncelenen bütün enkesit ve çelik kalitelerinde, Standart, yanal burkulmanın elastik bölgede oluşacağını kabul etmektedir. Buna karşın, Yönetmelik'te $L_p < L_b \leq L_r$ durumunda, dayanım çelik kalitesine bağlıdır.

Farklı enkesit ve çelik kalitesine sahip elemanların dayanım eğrileri Şekil 4'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. IPE300 ve S355 için, incelenen bütün burkulma boylarında, emniyetli dayanım eğrisi güvenli dayanım eğrisinin altında kalmaktadır. Diğer bir ifadeyle, Standart'a göre tasarlanan, IPE 300 enkesitli S355 çelik kalitesinden üretilen bir eğilme elemanı, incelenen bütün burkulma boylarında Yönetmelik'e göre güvenli tarafta kalmaktadır. Ancak, Şekil 4'te sunulan diğer grafikler, bu sonucun bütün enkesit ve çelik kaliteleri için genelleştirilemeyeceğini göstermektedir; zira, bu



Şekil 4. Farklı enkesit ve çelik kalitelere sahip eğilme elemanlarının kuvvetli eksende eğilmede güvenli ve emniyetli dayanım eğrilerinin karşılaştırılması

(Comparison of allowable strong axis flexural strength curves for flexural members with different cross sections and steel grades)

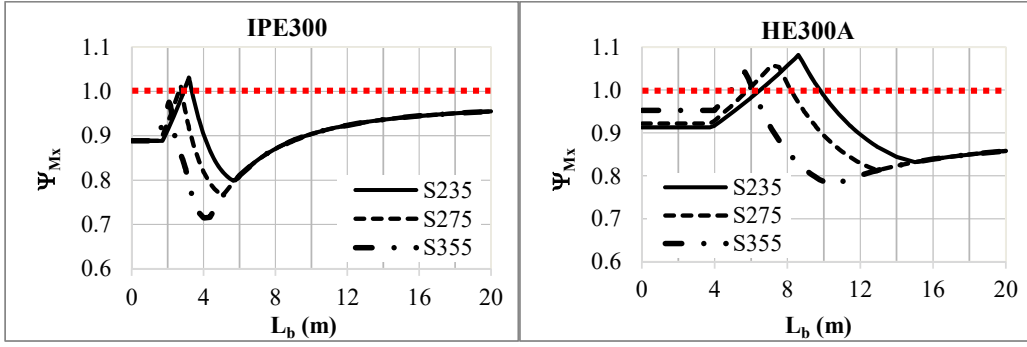
grafiklerde emniyetli dayanım eğrilerinin o enkesit ve çelik kalitesi için belirlenen s_p değerine yakın burkulma boylarında güvenli dayanım eğrilerinin üzerine çıktığı görülmektedir. Standart'ın güvensiz kaldığı eleman boylarının enkesit türü ile numarasına ve çelik kalitesine bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, Standart ve Yönetmelik'te verilen tasarım ilkelerinin 111 farklı enkesit ve 3 farklı çelik kalitesi için karşılaştırılması hedeflendiği için, "dayanım eğrileri" yerine, "dayanım oranı eğrileri" çizmenin daha pratik ve uygun olacağına karar verilmiştir. Örnek olarak, kuvvetli eksen etrafında eğilen IPE300 enkesitli bir çelik yapı elemanın, üç farklı çelik sınıfı ve $0 \leq L_b = s \leq 20$ m için, Standart'a göre hesaplanan emniyetli eğilme momenti dayanımları Yönetmelik'e göre hesaplanan güvenli eğilme momenti dayanımlarına oranlanarak "kuvvetli eksende eğilme momenti dayanım oranları" (Ψ_{Mx}) belirlenmiş ve Şekil 5'te solda sunulmuştur.

Benzer bir grafik, HE300A enkesiti için Şekil 5'te sağda verilmiştir. İlgili profillerin Standart'a göre tasarımlarının güvensiz tarafta kalıp kalmadığı (yani, dayanım oranının 1,0 değerini aşıp aşmadığı), kalıyorsa hangi burkulma boylarında kaldığı ve en fazla ne kadar güvensiz tarafta kaldığı Şekil 5'teki grafiklerden görülebilir. Örneğin, Şekil 4'ten fark edildiği gibi, IPE300 enkesiti ve S355 çelik kalitesi için Şekil 5'te çizilen dayanım oranı eğrisinin en büyük değeri 1,0'den küçüktür; diğer bir deyişle, bu özel durumda, incelenen hiç bir burkulma boyunda Standart güvensiz tarafta sonuç vermemektedir. Şekil 5'te IPE300 enkesiti ve S235 çelik kalitesi için sunulan dayanım oranı

eğrisi incelendiğinde, dayanım oranının $0 \leq L_b \leq 1,72$ m arasında sabit ve değerinin yaklaşık 0,9'a eşit olduğu, bu bölgenin Yönetmelik'e göre hesaplanan L_p değerinde sonlandığı belirlenmiştir. Eleman burkulma boyunun $L_p = 1,72 \text{ m} < L_b \leq 3,19 \text{ m}$ arasında olduğu bölgede ise dayanım oranının artan L_b ile arttığı, en büyük değerine (1,07) Standart'a göre hesaplanan s_p boyunda ulaştığı gözlenmiştir. $s_p = 3,19 \text{ m} \leq L_b \leq 5,72 \text{ m}$ olduğu üçüncü bölgede, dayanım oranı azalarak, Yönetmelik'e göre hesaplanan L_r boyunda en küçük değerine (0,798) ulaşmaktadır. $L_r = 5,72 \text{ m} \leq L_b$ durumunda ise dayanım oranının asimptotik olarak artarak $L_b = 20$ m'de 0,955 değerine kadar yükseldiği görülmüştür. IPE 300 ve S235 için çizilen dayanım eğrisinde belirlenen bu değişimin, S275 ve S355 için de geçerli olduğu görülmüştür. Şekil 5'te verilen grafiklerde, dayanım oranlarının çeliğin akma gerilmesiyle değişimi de incelenebilir. IPE300 enkesiti kompakt olduğu için, birinci bölgede, yani $L_b < L_p$ durumunda, dayanım oranı ($\Psi_{Mx} = \Psi_{Mx0}$) çelik kalitesinden bağımsızdır. Benzer şekilde, $L_b > L_r$ olan dördüncü bölgede de dayanım oranı çelik kalitesinden bağımsızdır. Çelik kalitesi, IPE 300 için çizilen dayanım oranı eğrilerinde, yalnız $L_p \leq L_b \leq L_r$ olduğunda etkindir. L_p ve L_r sınır eleman uzunlukları çelik kalitesine bağlı olduğu için, dayanım oranı eğrilerinde her bir bölgeyi belirleyen sınır uzunluklar da farklı olmaktadır. Genel olarak, $L_p \leq L_b \leq L_r$ durumunda, çeliğin akma gerilmesi arttıkça dayanım oranının en büyük değerinin azaldığı en küçük değerinin de arttığı söylenebilir.

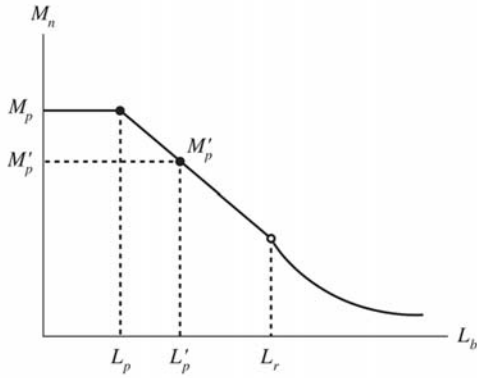
Şekil 5'te sağda HE300A enkesiti için çizilen dayanım oranı eğrileri, solda IPE300 için çizilenlerle karşılaştırıldığında, HE300A için çizilen eğrilerde dayanım oranının birinci



Şekil 5. Farklı çelik kaliteli, IPE300 ve HE300A enkesitli eğilme elemanlarının kuvvetli eksende eğilme momenti dayanım oranları

(Strong axis flexural strength ratios for flexural members with IPE300 and HE300A cross sections for various steel grades)

bölgede de akma dayanımına bağlı olduğu görülür. Bunun nedeni HE300A enkesitinin başlıklarının S275 ve S355 çelik kalitelerinde kompakt olmayan sınıfına dahil olmasıdır. En genel haliyle, başlıkların kompakt olmaması nedeniyle karakteristik eğilme momenti dayanımı eğrisinde gözlenen temel değişim Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Kompakt olmayan başlıklı elemanlar için tanımlanan “azaltılmış” plastik moment (M'_p) ve ilgili sınır uzunluk (L'_p) [15] (“Reduced” plastic moment (M'_p) and related limiting length (L'_p) for members with noncompact flanges)

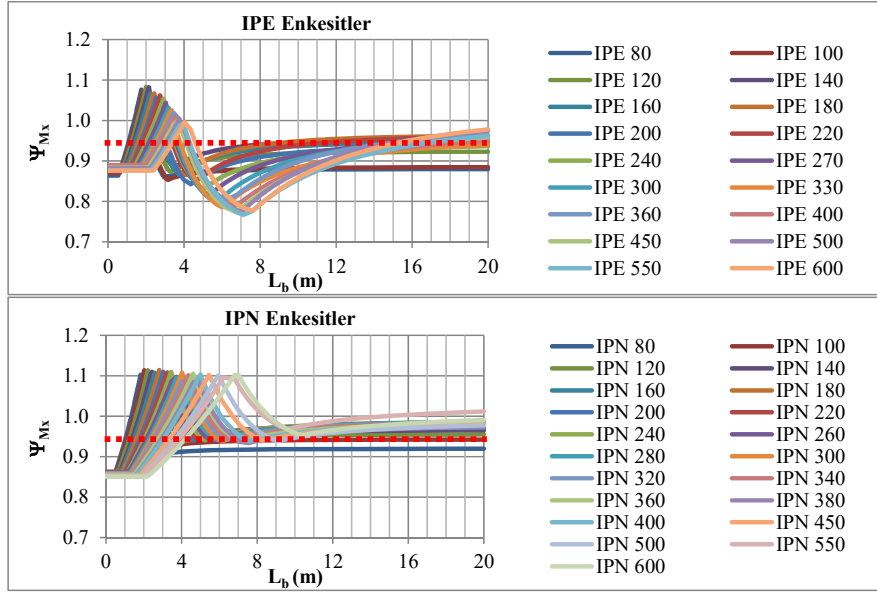
Kompakt enkesitli elemanlarda, sabit dayanım bölgesinde, karakteristik eğilme momenti dayanımı plastik eğilme momentine (M_p) eşitken, kompakt olmayan başlıklı elemanlarda Eş. 8'de verilen “azaltılmış” plastik momente (Şekil 6'da M'_p olarak adlandırılmaktadır) eşittir. Bir diğer önemli fark ise dayanımın sabit kaldığı en büyük burkulma boyunda gözlenmektedir. Kompakt enkesitli elemanlarda sınır boy Eş. 5'te tanımlanan L_p değerine eşitken, kompakt olmayan başlıklı elemanlarda sınır boy (Şekil 9'da L'_p olarak adlandırılmaktadır) L_p değerinden daha büyüktür. Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü (American Institute of Steel Construction, AISC) tarafından yayımlanan Çelik Yapı Kılavuzunun (Steel Construction Manual) 14. Baskısında [20], L'_p aşağıdaki denklemle tanımlanmaktadır;

$$L'_p = L_p + (L_r - L_p) \left(\frac{M_{px} - M'_{px}}{M_{px} - M_{rx}} \right) \quad (23)$$

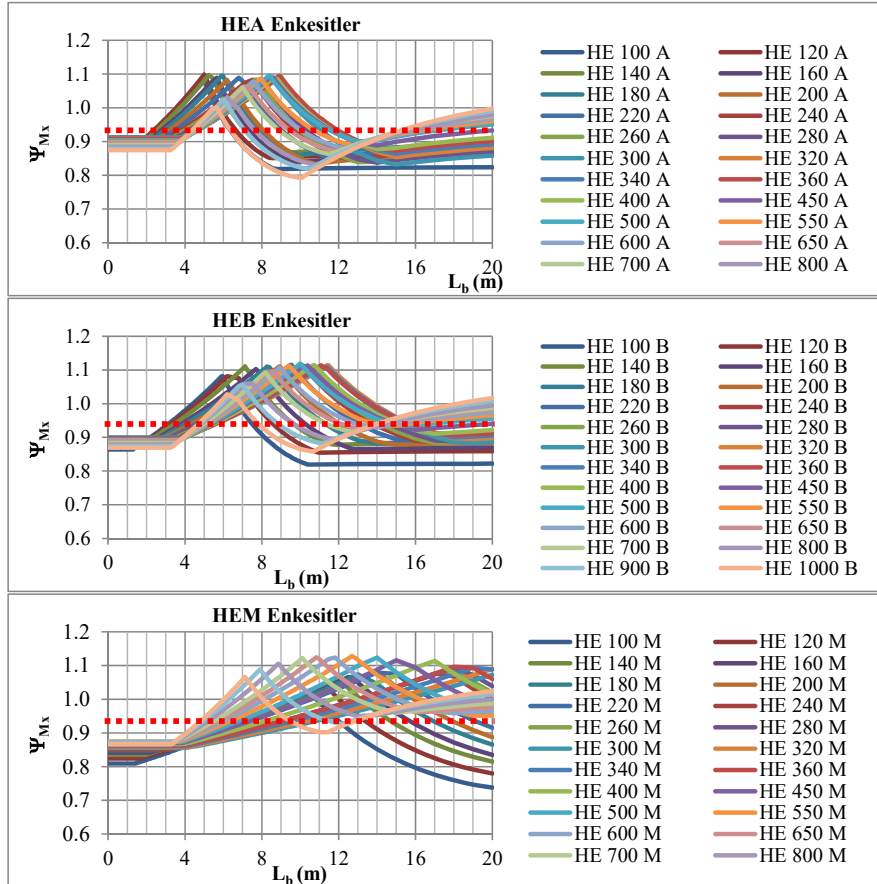
Eş. 23'te, $M_{rx} = 0,7F_yW_{cx}$, $M'_{px} = M_{nx3}$ 'tür. S355 çelik kaliteli, HE300A enkesitli bir eğilme elemanı için, $M_{px} = 491$ kNm, $M'_{px} = 471$ kNm, $M_{rx} = 313$ kNm, $L_p = 3,13$ m, $L'_p = 3,98$ m ve $L_r = 10,5$ m olarak belirlenmiştir. Şekil 5'ten fark edilebileceği gibi, başlıkların kompakt olmaması, sabit moment bölgesinin dışında güvenli dayanım oranı eğrisini değiştirmemektedir. Şekil 5'te HE300A için verilen eğriler, IPE300 için verilen eğrilerle karşılaştırıldığında, eğrilerin burkulma boyuyla değişimlerinin oldukça benzer olduğu görülür. HE300A enkesiti için çizilen eğrilerde, birinci ve ikinci bölge arasındaki sınır boy L'_p 'ye eşittir. Ayrıca, HE300A enkesitinin L_r değerleri oldukça yüksek olduğu için eğrilerdeki son bölge nispeten daha kısadır. HE300A enkesiti için, dayanım oranının en yüksek değeri, 1,08 olarak tespit edilmiştir.

Çalışmada incelenen bütün IPE enkesitleri için kuvvetli eksende eğilme momenti dayanım oranları (Ψ_{Mx}) S235 çeliği için hesaplanarak Şekil 7'de üstte sunulmuştur. Benzer grafikler, IPN enkesitler için Şekil 7'de altta, HE-enkesitler için ise Şekil 8'de sunulmuştur.

Şekil 7 ve Şekil 8'deki grafiklerden gözlenebileceği gibi, farklı enkesitler için çizilen dayanım oranı eğrilerinin genel şekli, Şekil 5'teki eğrilere benzemektedir. Şekil 7 ve Şekil 8'deki grafiklerin detaylı incelenmesinden, dayanım oranı eğrilerinin, kompakt enkesitlerde L_p kompakt olmayan başlıklı enkesitlerde L'_p sınır boyuna kadar sabit gittiği, sonra artarak s_p değerinde en yüksek değerine ulaştığı, ardından L_r değerine kadar azaldığı ve son olarak L_r değerinden büyük L_b değerlerinde artan L_b değeriyle asimptotik olarak arttığı dört bölgeden oluştuğu görülmüştür. Özellikle numaraları küçük enkesitlerde, dördüncü bölgede de dayanım oranı neredeyse sabit kalmaktadır. S235 çeliği için, incelenen bütün IPE enkesitleri dikkate alındığında, dayanım oranlarının en büyük değerinin 1,08 olduğu görülmüştür. Bu değer IPN enkesitler için 1,11, HEA enkesitler için 1,10, HEB enkesitler için 1,12 ve HEM enkesitler için 1,13 olarak belirlenmiştir. S275 çeliği için dayanım oranlarının en büyük değerleri, IPE, IPN, HEA, HEB ve HEM enkesitlerinde, sırasıyla, 1,07, 1,10, 1,09, 1,11 ve 1,12; S355 çeliği için ise, sırasıyla, 1,05, 1,08, 1,08, 1,09 ve 1,11 olarak tespit edilmiştir. Değerler karşılaştırıldığında, en büyük değerlerin



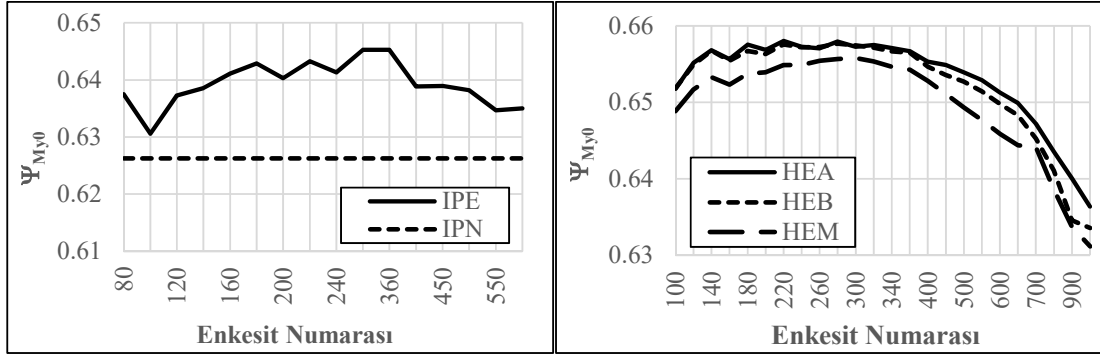
Şekil 7. S235 çelik kaliteli, I-enkesitli hadde profillerin kuvvetli eksende eğilme momenti dayanım oranları
(Strong axis flexural strength ratios for rolled I-shaped members with S235 steel grade)



Şekil 8. S235 çelik kaliteli, HE-enkesitli hadde profillerin kuvvetli eksende eğilme momenti dayanım oranları
(Strong axis flexural strength ratios for rolled HE-shaped members with S235 steel grade)

akma dayanımı en küçük olan S235 çelik kalitesinde gözlendiği ancak diğer çelik kaliteleri için elde edilen değerlerin de çok da farklı olmadığı görülmektedir. Sonuç

olarak, kuvvetli eksen etrafında eğilme etkisinde, çalışmada incelenen bütün enkesit, çelik kaliteleri ve eleman burkulma boyları için, Standart'a göre hesaplanan emniyetli dayanım,



Şekil 9. Kompakt enkesitli eğilme elemanlarının zayıf eksende eğilme momenti dayanım oranları
(Weak axis flexural strength ratios for flexural members with compact cross sections)

Yönetmelik'e göre hesaplanan güvenli dayanımından en çok %13 fazladır. Dayanım oranının 1,0'in üstünde olduğu boy aralığı enkesitin türüne, numarasına ve çelik kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Belirli bir çelik kalitesi ve enkesit için, dayanım oranının en büyük değeri $L_b=s_p$ 'de oluşmaktadır.

3.2. Zayıf Eksende Eğilme (Bending about Minor Axis)

Zayıf eksenlerinde eğilen I-enkesitli hadde profillerinin emniyetli eğilme momenti dayanımı, elemanın zayıf eksenle göre akma momentinin %60'ına eşittir. Buna karşın, kompakt enkesitli olması durumunda, aynı elemanın güvenli eğilme momenti dayanımı, akma momentinin 1,6 katını geçmemek koşuluyla plastik momentinin yaklaşık %60'ına eşittir. Diğer bir deyişle, zayıf ekseninde eğilen kompakt I-enkesitli bir hadde profilin moment dayanım oranı (Ψ_{My0}) 0,626 değerinden küçük olmamak koşuluyla, yaklaşık olarak enkesitin zayıf eksen etrafında elastik mukavemet momentinin (W_{ey}) plastik mukavemet momentine (W_{py}) oranına eşittir;

$$\Psi_{My0} = \frac{(M_{y,em})_{maks}}{(M_{ny} / \Omega_b)_{maks}} = \frac{0,6\sigma_a W_{ey}}{\min(F_y W_{py}; 1,6F_y W_{ey}) / 1,67} \quad (24)$$

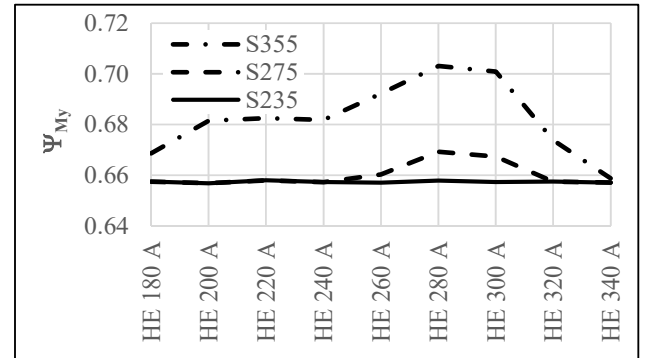
$$\cong \frac{W_{ey}}{W_{py}} \geq 0,626$$

Eş. 24'te dayanım oranı için kullanılan semboldeki 0 alt indisi, elemanda yerel burkulma tehlikesinin olmaması, yani, enkesitin kompakt başlıklı olması, koşulunu ifade etmektedir. Ψ_{My0} aynı zamanda elemanın zayıf eksende eğilmedeki şekil faktörünün tersine eşit olduğu için, değeri daima 1,0'den küçük olacaktır. Bu durumda, incelenen bütün kompakt enkesitli elemanlarda, $0,626 \leq \Psi_{My0} < 1,0$ 'dir. Diğer bir deyişle, I-enkesitli hadde profillerin zayıf eksende eğilme momenti dayanımlarını hesaplarırken Standart incelenen tüm kompakt başlıklı enkesitlerde Yönetmelik'ten daha güvenli tarafta kalmaktadır. Çalışmada incelenen bütün enkesitler için Ψ_{My0} değerleri hesaplanarak Şekil 9'da sunulmuştur. Başlıkları kompakt olmayan HEA enkesitleri için Şekil 9'da çizilen eğrinin yalnız S235 çelik kalitesinde geçerli olduğu unutulmamalıdır. Diğer enkesitlerin eğrileri, çelik kalitesinden bağımsızdır. Şekil 9'dan, IPN enkesitlerde

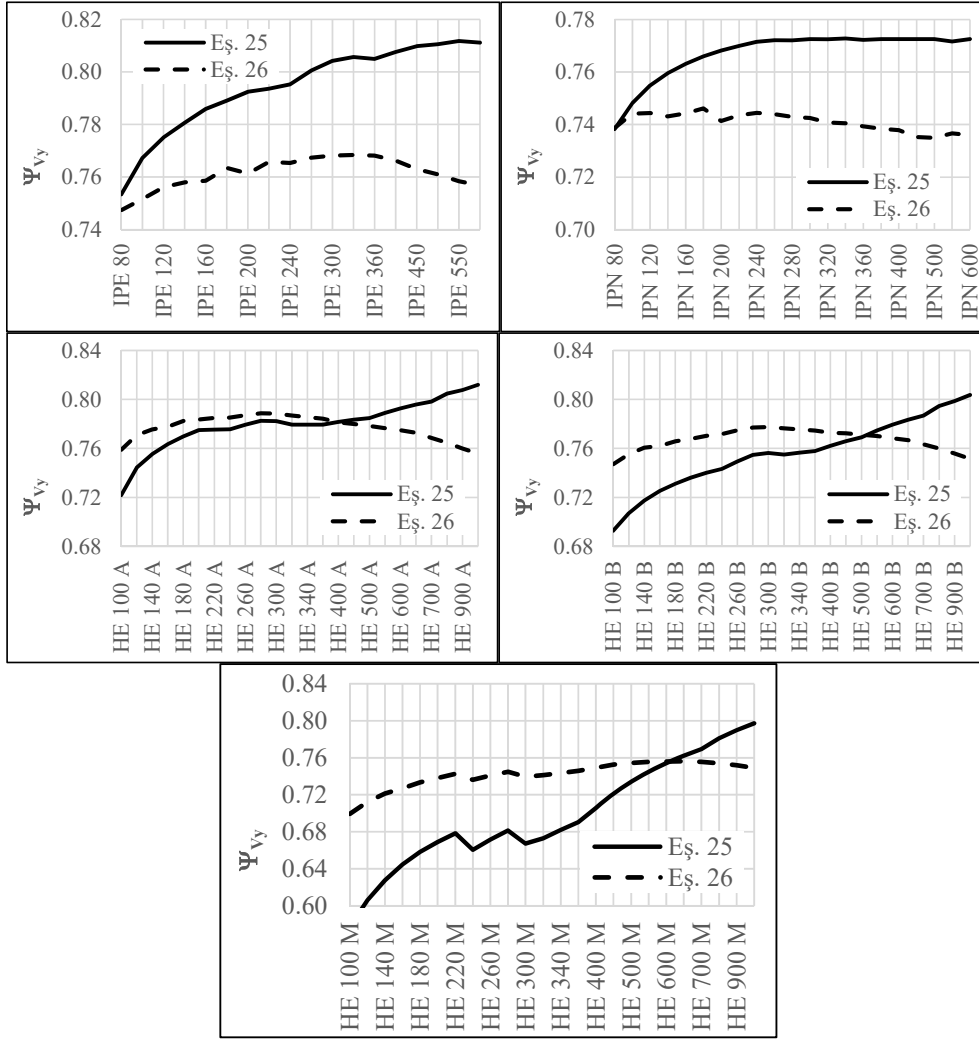
dayanım oranının enkesit numarasından bağımsız olduğu ve değerinin alt sınır değere (0,626) eşit olduğu görülmektedir; zira, incelenen enkesitler arasında yalnız IPN enkesitlerin zayıf eksenle göre eğilmede şekil faktörleri 1,6'dan büyüktür. Diğer bir ifadeyle, IPN enkesitlerin zayıf eksenle güvenli eğilme momentleri, Yönetmelik'te tanımlanan üst sınır olan $1,6F_y W_{ey}$ 'ye eşittir. İncelenen enkesitler arasında, dayanım oranı 0,66'yı geçen enkesit bulunmamaktadır.

Zayıf ekseninde eğilen kompakt olmayan başlıklı I-enkesitli bir hadde elemanın Yönetmelik'e göre tasarımında elastik olmayan yerel başlık burkulması sınır durumu dikkate alınmalıdır. Standart, yerel burkulma sınır durumunu tasarıma dahil etmediği için, bu tür elemanlarda emniyetli eğilme momenti dayanımı akma momentinin %60'ına eşittir. Kompakt olmayan başlıklı HEA enkesitlerin zayıf eksenle eğilme momenti dayanım oranları (Ψ_{My}) hesaplanarak Şekil 10'da sunulmuştur. Başlıkların dayanım oranına etkisini daha iyi görebilmek için, S235 için çizilen eğri de grafiğe eklenmiştir.

Şekil 10'dan görülebileceği gibi, başlıkların kompakt olmaması nedeniyle dayanım oranı artmaktadır. Ancak, yine de, Ψ_{My} , 0,72'yi geçmemektedir. Diğer bir deyişle, zayıf eksenle eğilme momenti dayanımı açısından, çalışmada incelenen *bütün* enkesit ve çelik kalitelerinde, Standart Yönetmelik'ten daha güvenli tarafta kalmaktadır.



Şekil 10. Kompakt olmayan başlıklı eğilme elemanlarının zayıf eksenle eğilme momenti dayanım oranları
(Weak axis flexural strength ratios for flexural members with noncompact flanges)



Şekil 11. I-enkesitli hadde profillerin gövde düzleminde kesme kuvveti dayanım oranları
(Strong axis shear strength ratios for rolled I-shaped members)

3.3. Gövde Düzleminde Kesme (Shear in the Plane of the Web)

Bölüm 2.1.3'te özetlendiği gibi, incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli hadde elemanların Yönetmelik'e göre tasarımını belirleyen sınır durum gövdenin kesme etkisinde akmasıdır. Bu tür elemanlarda güvenlik katsayısının 1,5'a eşit olduğu hatırlanırsa, güvenli dayanımın $V_{ny}/\Omega_v = 0,4F_y d t_w$ 'ya eşit olduğu görülebilir. Bölüm 2.2.3'te, gövde düzleminde kesme etkisindeki I-enkesitli hadde profillerin emniyetli dayanımlarının iki farklı eşitlikle (Eş. 17 ve Eş. 19) hesaplanabildiği gösterilmiştir. Eş. 17 ve Eş. 19'da verilen emniyetli kesme kuvveti dayanımı, güvenli kesme kuvveti dayanımına bölünerek ilgili dayanım oranları (Ψ_{vy}) aşağıdaki gibi belirlenebilir:

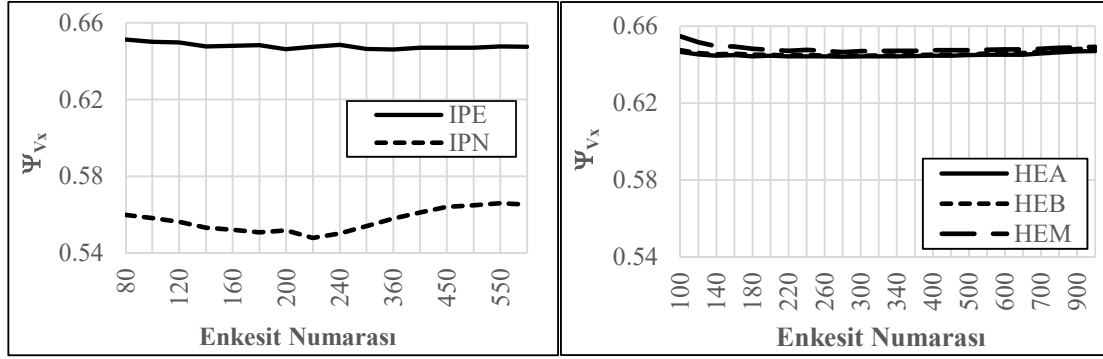
$$\Psi_{vy} = \frac{V_{y,em}}{V_{ny}/\Omega_v} = \frac{0,6\sigma_a (d - 2t_f) t_w}{\sqrt{3} \cdot 0,4F_y d t_w} \cong 0,866 \left(1 - 2 \frac{t_f}{d}\right) \quad (25)$$

veya

$$\Psi_{vy} = \frac{V_{y,em}}{V_{ny}/\Omega_v} = \frac{1,2\sigma_a I_x t_w}{\sqrt{3} W_{px}} = \frac{1,2\sigma_a I_x t_w}{0,4F_y d t_w} \quad (26)$$

$$\sqrt{3} \frac{I_x}{W_{px} d} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{W_{ex}}{W_{px}} \cong 0,866 \frac{W_{ex}}{W_{px}}$$

Eş. 26 çıkarılırken $W_{ex} = 2I_x/d$ bağıntısı kullanılmıştır. Her iki eşitlikten de elde edilecek değerlerin 0,866'dan büyük olamayacağı kolaylıkla görülebilir. Diğer bir deyişle, incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli bir hadde profilinin tasarımında, Standart Yönetmelik'ten daha güvenli tarafta kalmaktadır. Eş. 25 ve Eş. 26 kullanılarak hesaplanan dayanım oranları bütün enkesit grupları için Şekil 11'de sunulmuştur. IPE ve IPN enkesitli elemanlarda, Eş. 25'ten elde edilen değerlerin, Eş. 26'dan elde edilen



Şekil 12. I-enkesitli hadde profillerin başlıklara paralel düzlemde kesme kuvveti dayanım oranları
(Weak axis shear strength ratios for rolled I-shaped members)

değerlerden daha büyük çıktığı görülmektedir. HE-enkesitli elemanlarda ise bu durum yalnız büyük numaralı enkesitler için geçerlidir. İncelenen enkesitler arasında, dayanım oranı için Eş. 25 ve Eş. 26'dan elde edilen en büyük değerler sırasıyla 0,812 (IPE550) ve 0,789 (HEA280) olarak bulunmuştur. Her iki değer de 1,00'den küçük olması, farklı kayma gerilmesi tanımları kullanıldığında dahi, gövde düzleminde kesme etkisindeki I-enkesitli hadde elemanlarının tasarımında, Standart'ın güvenli tarafta kaldığını göstermektedir.

3.4. Başlıklara Paralel Düzlemde Kesme (Shear in the Weak Axis)

Bölüm 2.1.4'te özetlendiği gibi, incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için, zayıf eksende kesme kuvveti etkisindeki I-enkesitli hadde elemanların Yönetmelik'e göre tasarımını belirleyen sınır durum başlıkların kesme etkisinde akmasıdır. Güvenlik katsayısının 1,67'ye eşit olduğu hatırlanırsa, güvenli dayanımın $V_{nx}/\Omega_v = 1,2F_y b_f t_f / 1,67$ 'ye eşit olduğu görülebilir. Bölüm 2.2.4'te, bu tür elemanların emniyetli dayanımlarının Eş. 20 kullanılarak hesaplanabileceği gösterilmişti. Eş. 20'den elde edilen emniyetli dayanım güvenli dayanıma bölünerek, başlıklara paralel düzlemde kesme kuvveti dayanım oranı Ψ_{vx} Eş. 27'deki gibi ifade edilebilir,

$$\Psi_{vx} = \frac{V_{x,em}}{V_{nx} / \Omega_v} = \frac{0,6\sigma_a}{\sqrt{3}} \frac{8I_y}{(b_f^2 - t_w^2)} \cong 3,86 \frac{I_y}{(b_f^2 - t_w^2) b_f t_f} \quad (27)$$

Eş. 27 kullanılarak elde edilen dayanım oranları incelenen bütün enkesit grupları için Şekil 12'de sunulmuştur. Şekil 12'den, IPN enkesitlerin haricindeki enkesitlerin dayanım oranlarının enkesit türünden ve numarasından hemen hemen bağımsız olduğu ve değerinin yaklaşık 0,65 değerine eşit olduğu görülmektedir. IPN enkesitlerde dayanım oranının ortalama değeri nispeten daha küçüktür (0,56). Şekil 12'de sunulan dayanım oranlarının 0,66'dan küçük olduğu göz önünde bulundurulduğunda, başlıklarına paralel düzlemde kesme etkisindeki I-enkesitli hadde elemanlarının tasarımında da, incelenen tüm enkesit ve çelik kalitelerinde,

Standart'ın Yönetmelik'ten daha güvenli tarafta kaldığı sonucuna ulaşılabilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmanın amacı, ülkemizde iki yıl önce yürürlükten kaldırılan TS648 standartına göre tasarlanmış I-enkesitli bir çelik hadde eğilme elemanının, şu an yürürlükte olan çelik tasarım yönetmeliğine göre yeterli dayanım ve kararlılığa sahip olup olmadığını belirlemektir. Bu amaçla, 111 farklı Avrupa-tipi I-enkesitli (18 IPE, 24 HEA, 24 HEB, 24 HEM ve 21 IPN) hadde profilin kuvvetli/zayıf ekseninde eğilmede güvenli/emniyetli eğilme momenti ile kesme kuvveti dayanımları, üç farklı çelik sınıfı (S235, S275 ve S355) ve farklı eleman boyları ($L_b = s \leq 20$ m) için her iki tasarım dokümanı kullanılarak hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca, tasarım dokümanlarındaki temel benzerlikler ve farklılıklar da ilgili bölümlerde irdelenmiştir. Çalışmadan elde edilen ana sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

İncelenen bütün enkesit ve çelik sınıfları için, TS648'e göre tasarlanmış (i) güçlü ekseninde eğilen ve yanal burkulma tehlikesi olmayan, (ii) zayıf ekseninde eğilen, (iii) gövde düzleminde kesme etkisinde olan ve/veya (iv) başlıklara paralel düzlemde kesme etkisinde olan I-enkesitli bir hadde profilinin mevcut dayanımı yeni çelik yönetmeliğine göre yeterlidir ve güçlendirilmesine gerek yoktur.

TS648'e göre tasarlanmış, güçlü ekseninde eğilen ve yanal burkulma tehlikesi olan I-enkesitli bir hadde profilin bazı burkulma boylarındaki mevcut dayanımı, yeni çelik yönetmeliğine göre yetersiz kalabilmektedir. Bu durumda, elemanın güçlendirilmesi gerekebilir. Ancak, elemanın güvensiz kaldığı burkulma boyları, enkesit türü, enkesit numarası ve çelik kalitesine bağlıdır; bu nedenle, belirlenebilmesi için Şekil 5'teki gibi elemana özel dayanım oranı eğrileri çizdirilmelidir. Bununla birlikte, bu tür bir elemanın dayanımının herhangi bir burkulma boyunda yetersiz olup olmadığını ve yetersizse en fazla % kaç yetersiz olduğunu belirlemenin pratik bir yöntemi, elemanın burkulma boyunun Eş. 22'den elde edilecek s_p değerine eşit olduğu durumdaki dayanım oranını hesaplamaktır; zira, iki yöntem arasındaki güvensiz yöndeki en büyük farklar belirtilen burkulma boyunda oluşmaktadır. Bu çalışmada,

incelenen bütün enkesit, çelik kaliteleri ve eleman burkulma boyları için, TS 648'e göre tasarlanmış bir elemanın Yönetmelik'e göre en fazla %13 güvensiz tarafta kaldığı belirlenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Rezaiee-Pajand M., Masoodi A.R., Alepaighambar A., Lateral-torsional buckling of functionally graded tapered I-beams considering lateral bracing, *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 28 (4), 403-414, 2018.
2. Grilo L.F., Fakury R.H., Silva A.L.R.C., Verissimo G.S., Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 148, 525-541, 2018.
3. Feng R., Zhan H., Meng S., Zhu J., Experiments on H-shaped high-strength steel beams with perforated web, *Engineering Structures*, 177, 374-398, 2018.
4. Esen Y., Ülker M., Malzeme ve geometrik özellikler bakımından lineer olmayan çok katlı çelik uzay çerçevelerin optimizasyonu, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23(2), 485-494, 2013.
5. Ozcelik Y., Saritas A., Clayton P.M., Comparison of chevron and suspended-zipper braced steel frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 119, 169-175, 2016.
6. Shi G., Hu F., Shi Y., Comparison of seismic design for steel moment frames in Europe, the United States, Japan and China, *Journal of Constructional Steel Research*, 127, 41-53, 2016.
7. Zohra F.D., Nacer I.T.A., Dynamic analysis of steel frames with semi-rigid connections, *Structural Engineering and Mechanics, An International Journal*, 65 (3), 327-334, 2018.
8. Akşar B., Doğru S., Akbaş B., Çelik moment çerçevelerde kuvvetli deprem yer hareketi altında arttırılmış deprem etkileri, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(2), 441-457, 2018.
9. Lee D.H., Kim J.S., Lee M.S., Paik J.K., Ultimate limit state based design versus allowable working stress based design for box girder crane structures, *Thin-Walled Structures*, 134, 491-507, 2019.
10. Trahair N.S., Non-linear biaxial bending of steel Z-beams, *Thin-Walled Structures*, 129, 317-326, 2018.
11. TSE, TS 648: Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, 1. Baskı, Ankara, 1980.
12. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, Ankara, 2016.
13. AISC, ANSI/AISC 360-16: Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, 2016.
14. Williams A., *Steel Structures Design: ASD/LRFD*, McGraw-Hill, New York, 2011.
15. Segui W.T., *Steel Design*, 5th Edition, Cengage Learning, 2013.
16. Salmon C.G., Johnson, J.E., Malhas, F.A., *Steel Structures, Design and Behavior: Emphasizing Load and Resistance Factor Design*, 5th Edition, Pearson Prentice Hall, 2008.
17. Akbaş N., Yılmaz Ç., *Analysis and Design of Steel Structures*, Middle East Technical University, Ankara, 1985.
18. Odabaşı Y., *Ahşap ve Çelik Yapı Elemanları*, 3. Baskı, Beta Basım, 2000.
19. Aydınoglu N., Özer E., Sucuoğlu H., *Yeni Deprem Yönetmeliği ve Uygulamalı Çözümler*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Antalya Şubesi, Yayın No: 3, 2007.
20. AISC, *Steel Construction Manual 14*, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, 2014.

