

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

I-ENKESİTLİ AVRUPA ÇELİK HADDE PROFİLLERİ İÇİN
PRATİK TASARIM FORMÜLLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

HÜSEYİN ŞENLİ

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

I-ENKESİTLİ AVRUPA ÇELİK HADDE PROFİLLERİ İÇİN
PRATİK TASARIM FORMÜLLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

HÜSEYİN ŞENLİ

Doç. Dr. Fuad OKAY

Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Seval PINARBAŞI ÇUHADAROĞLU

Eş Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Salih Taner YILDIRIM

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Dr. Öğretim Üyesi Erkan AKPINAR

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Barlas Özden ÇAĞLAYAN

Jüri Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 28.06.2019

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

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışma, ülkemizde çelik yapı tasarımı yapan mühendis ve mimarların, I-enkesitli çelik hadde profillerinin temel enkesit özellikleri ile tasarım eğilme momenti ve basınç kuvveti dayanımlarını profil tablolarını ve nispeten karışık yönetmelik formüllerini kullanmadan kolayca hesaplayabilmelerini sağlayan basit ve pratik tasarım denklemleri geliştirmek ve böylece tasarımcılara özellikle tasarımlarının ilk aşamasında hız ve zaman kazandırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmamda bana yol ve anlayış gösteren, yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen kıymetli ve saygıdeğer danışman hocalarım Doç. Dr. Fuad OKAY ve Doç. Dr. Seval PINARBAŞI ÇUHADAROĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca emeği geçen tüm öğretmenlerime, hocalarıma ve görevlilere teşekkürü borç bilirim.

Daima yanımda olan, her türlü mutluluk ve dert ortağım çok değerli, canım aileme çok teşekkür ederim.

Haziran-2019

HÜSEYİN ŞENLİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
GİRİŞ	1
1. I-ENKESİTLİ AMERİKAN ÇELİK HADDE PROFİLLERİ İÇİN GELİŞTİRİLEN PRATİK TASARIM FORMÜLLERİNİN İRDELENMESİ	6
1.1. Pratik Tasarım Formüllerinin Kullanımının Önerildiği Amerikan Kiriş ve Kolon Kesitleri	8
1.2. Kiriş Derinliği için Pratik Tasarım Formülleri	10
1.3. Temel Enkesit Özellikleri için Pratik Tasarım Formülleri	11
1.3.1. Enkesit alanı	11
1.3.2. Kuvvetli eksen de atalet momenti	11
1.3.3. Kuvvetli eksen de elastik mukavemet momenti	14
1.3.4. Asal atalet yarıçapları	15
1.4. Kirişlerin Moment Kapasitesi	18
1.5. Kolonların Eksenel Kapasitesi	24
2. I-ENKESİTLİ AVRUPA ÇELİK HADDE PROFİLLERİ İÇİN PRATİK TASARIM FORMÜLLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ	28
2.1. Çalışmada Ele Alınan I-Enkesitli Avrupa Hadde Profiller	29
2.2. Kiriş Derinliği İçin Pratik Tasarım Formülleri	33
2.3. Temel Enkesit Özellikleri için Pratik Tasarım Formülleri	33
2.3.1. Enkesit alanı	34
2.3.2. Kuvvetli eksen de atalet momenti	34
2.3.3. Kuvvetli eksen de elastik ve plastik mukavemet momentleri	38
2.3.4. Zayıf eksen de atalet momenti	43
2.3.5. Zayıf eksen de elastik ve plastik mukavemet momentleri	49
2.3.6. Asal atalet yarıçapları	52
2.4. Kuvvetli Eksen de Eğilme Momenti Dayanımı için Pratik Formüller	59
2.5. Eksenel Basınç Kuvveti Dayanımı için Pratik Tasarım Formülleri	70
3. AMERİKAN PROFİLLER İÇİN ÖNERİLEN PRATİK FORMÜLLERLE AVRUPA PROFİLLERİ İÇİN GELİŞTİRİLEN PRATİK FORMÜLLERİN KARŞILAŞTIRILMASI	81
4. I-ENKESİTLİ AVRUPA HADDE PROFİLLERİ İÇİN HAZIRLANAN TASARIM KARTLARI VE KULLANIM ÖRNEKLERİ	83
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	91
KAYNAKLAR	95
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	97
ÖZGEÇMİŞ	98

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Socrates ve Ruddy tarafından hazırlanan tasarım kartı	7
Şekil 1.2.	T-enkesitlerin geometrik merkezlerinin I-enkesitin kuvvetli eksenine olan uzaklığı için yapılan kabul	12
Şekil 1.3.	Amerikan kiriş kesitleri için gerçek ve yaklaşık I_x değerlerinin karşılaştırılması	13
Şekil 1.4.	Amerikan kolon kesitleri için gerçek ve yaklaşık I_x değerlerinin karşılaştırılması	13
Şekil 1.5.	Ekonomik Amerikan kiriş kesitleri için gerçek ve yaklaşık S_x değerlerinin karşılaştırılması	14
Şekil 1.6.	Amerikan kolon kesitleri için gerçek ve yaklaşık S_x değerlerinin karşılaştırılması	15
Şekil 1.7.	Amerikan kolon kesitlerinin r_x/d oranları ile pratik formülün karşılaştırılması	16
Şekil 1.8.	Amerikan kolon kesitlerinin r_y/b oranları ile pratik formülün karşılaştırılması	16
Şekil 1.9.	Ekonomik Amerikan kiriş kesitlerinin r_x/d oranları ile pratik formülün karşılaştırılması	17
Şekil 1.10.	Ekonomik Amerikan kiriş kesitlerinin r_y/b oranları ile pratik formülün karşılaştırılması	18
Şekil 1.11.	AISC (1989) yönetmeliğinde basınç etkisi altındaki enkesit parçalarının genişlik/kalınlık oranları için verilen sınır değerler	20
Şekil 1.12.	$F_y=36$ ksi için, Amerikan çelik kirişlerde birim boy kütlenin, moment dayanımı ve kesit derinliğiyle ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle elde edilmesi ve pratik formülle karşılaştırılması	22
Şekil 1.13.	$F_y=50$ ksi için, Amerikan çelik kirişlerde birim boy kütlenin, moment dayanımı ve kesit derinliğiyle ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle elde edilmesi ve pratik formülle karşılaştırılması	23
Şekil 1.14.	$F_y=36$ ksi için kolon tasarım eğrisi ve bu eğri için doğrusal regresyon analizinden elde edilen eğilim çizgisi ve denklemi	26
Şekil 1.15.	$F_y=50$ ksi kolon tasarım eğrisi ve bu eğri için doğrusal regresyon analizinden elde edilen eğilim çizgisi ve denklemi	26
Şekil 2.1.	İncelenen tüm IPE, IPN, HEA, HEB, HEM ve HD profilleri için kuvvetli atalet momentinin, birim boy kütle ve enkesit derinliğiyle olan ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle elde edilmesi	35
Şekil 2.2.	‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin profil tablolarındaki I_x değerleri ile pratik formülle hesaplanan I_x değerleri arasındaki hata yüzdeleri	36
Şekil 2.3.	‘Kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin profil tablolarındaki I_x değerleri ile pratik formülle hesaplanan I_x değerleri arasındaki hata yüzdeleri	37

Şekil 2.4.	İncelenen tüm IPE, IPN, HEA, HEB, HEM ve HD profilleri için kuvvetli ekseninde plastik mukavemet momentlerinin, birim boy kütle ve enkesit derinlikleriyle olan ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle elde edilmesi	40
Şekil 2.5.	‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin profil tablolarındaki W_{px} değerleri ile pratik formülle hesaplanan W_{px} değerleri arasındaki hata yüzdeleri	41
Şekil 2.6.	‘Kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin profil tablolarındaki W_{px} değerleri ile pratik formülle hesaplanan W_{px} değerleri arasındaki hata yüzdeleri	42
Şekil 2.7.	U-enkesitlerin geometrik merkezlerinin I-enkesitin zayıf eksenine olan uzaklığı için yapılan kabul	44
Şekil 2.8.	‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin zayıf atalet momentlerinin, birim boy kütleleri ve başlık genişlikleriyle olan ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle belirlenmesi	45
Şekil 2.9.	‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, profil tablolarındaki I_y değerleriyle pratik formülle hesaplanan I_y değerleri arasındaki hata yüzdeleri	46
Şekil 2.10.	‘Kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin zayıf atalet momentlerinin, birim boy kütle ve başlık genişlikleriyle olan ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle belirlenmesi	47
Şekil 2.11.	‘Kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, profil tablolarındaki I_y değerleriyle pratik formülle hesaplanan I_y değerleri arasındaki hata yüzdeleri	48
Şekil 2.12.	‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin zayıf ekseninde plastik mukavemet momentlerinin, birim boy kütleleri ve başlık genişlikleriyle olan ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle elde edilmesi	51
Şekil 2.13.	‘Kolon’ enkesiti olarak önerilen profillerin zayıf ekseninde plastik mukavemet momentlerinin, birim boy kütleleri ve başlık genişlikleriyle olan ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle elde edilmesi	51
Şekil 2.14.	‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, profil tablolarındaki W_{py} değerleri ile pratik formülle hesaplanan W_{py} değerleri arasındaki hata yüzdeleri	53
Şekil 2.15.	‘Kolon’ enkesiti olarak önerilen profillerin, profil tablolarındaki W_{py} değerleri ile pratik formülle hesaplanan W_{py} değerleri arasındaki hata yüzdeleri	54
Şekil 2.16.	İncelenen tüm IPE, IPN, HEA, HEB, HEM ve HD profillerinin güçlü atalet yarıçapları ile enkesit derinlikleri arasındaki ilişkinin doğrusal regresyon analiziyle belirlenmesi	55
Şekil 2.17.	‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, profil tablolarındaki i_x değerleri ile pratik formülle hesaplanan i_x değerleri arasındaki hata yüzdeleri	56
Şekil 2.18.	‘Kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, profil tablolarındaki i_x değerleri ile pratik formülle hesaplanan i_x değerleri arasındaki hata yüzdeleri	57

Şekil 2.19. ‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin zayıf atalet yarıçaplarıyla başlık genişlikleri arasındaki ilişkinin doğrusal regresyon analiziyle belirlenmesi	58
Şekil 2.20. ‘Kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin zayıf atalet yarıçaplarıyla başlık genişlikleri arasındaki ilişkinin doğrusal regresyon analiziyle belirlenmesi	59
Şekil 2.21. ‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin profil tablolarındaki i_y değerleri ile pratik formülle hesaplanan i_y değerleri arasındaki hata yüzdeleri	60
Şekil 2.22. ‘Kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin profil tablolarındaki i_y değerleri ile pratik formülle hesaplanan i_y değerleri arasındaki hata yüzdeleri	61
Şekil 2.23. ÇYTHYFY Tablo 5.1B’ye göre, eğilme momenti sebebiyle oluşan basınç gerilmeleri etkisindeki enkesit parçaları için genişlik/kalınlık oranlarının sınır değerleri.....	63
Şekil 2.24. Çalışmadan incelenen her çelik kalitesi için, incelenen tüm profillerin $\phi_b M_{nx}$ değerleri ile G_d değerleri arasındaki ilişkilerin doğrusal regresyon analiziyle belirlenmesi	67
Şekil 2.25. ‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, gerçek $\phi_b M_{nx}$ değerleriyle, pratik formüllerden hesaplanan yaklaşık $\phi_b M_{nx}$ değerleri arasındaki hata yüzdeleri	68
Şekil 2.26. ‘Kolon’ enkesiti olarak önerilen profillerin, gerçek $\phi_b M_{nx}$ değerleriyle, pratik formüllerden hesaplanan yaklaşık $\phi_b M_{nx}$ değerleri arasındaki hata yüzdeleri	69
Şekil 2.27. ÇYTHYFY Tablo 5.1A’ya göre, eksenel basınç kuvveti etkisindeki enkesit parçaları için genişlik/kalınlık oranlarının sınır değerleri	72
Şekil 2.28. Çalışmada incelenen her çelik kalitesi için, $\phi_c F_{cr}$ ile L_c/i arasında tanımlanan tasarım eğrisinin ‘yaklaşık’ tasarım doğrusuna dönüştürülmesi	75
Şekil 2.29. $L_c/i \leq 160$ için, ‘gerçek’ $\phi_c F_{cr}$ değerleriyle yaklaşık $\phi_c F_{cr}$ değerleri arasındaki hata yüzdeleri	76
Şekil 2.30. Çalışmada incelenen çelik kaliteleri için, $\phi_c F_{cr}$ ile L_c/i arasındaki ilişki için elde edilen üçüncü dereceden eğilim çizgileri ve denklemleri.....	78
Şekil 2.31. ÇYTHYFY’de tanımlanan iki parçalı $\phi_c F_{cr} - L_c/i$ eğri yerine L_c/i ’nin üçüncü dereceden fonksiyonları şeklinde önerilen pratik formüllerle hesaplanan yaklaşık $\phi_c F_{cr}$ değerleriyle, gerçek $\phi_c F_{cr}$ değerleri arasındaki hata yüzdeleri	79
Şekil 4.1. Çalışmada ‘kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan Avrupa profiller için hazırlanan tasarım kartı	84
Şekil 4.2. Çalışmada ‘kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan Avrupa profiller için hazırlanan tasarım kartı	85

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Socrates ve Ruddy’de kullanılan ‘ekonomik’ Amerikan çelik kiriş kesitleri ve bazı geometrik özellikleri.....	8
Tablo 1.2. Socrates ve Ruddy’de kullanılan Amerikan çelik kolon kesitleri ve bazı geometrik özellikleri.....	9
Tablo 2.1. Tezde incelenen I-enkesitli Avrupa hadde profilleri ve bazı geometrik özellikleri	30
Tablo 2.2. ‘Kiriş’ kesiti olarak sınıflandırılan I-enkesitli Avrupa hadde profilleri	32
Tablo 2.3. ‘Kolon’ kesiti olarak sınıflandırılan I-enkesitli Avrupa hadde profilleri	32
Tablo 2.4. Eğilme momenti etkisindeki I-enkesitli hadde profillerin enkesit parçalarının λ_p ve λ_r değerleri.....	64
Tablo 2.5. Eğilme momenti etkisi altında göre başlıkları kompakt olmayan profiller	64
Tablo 2.6. Eksenel basınç kuvveti etkisindeki I-enkesitli hadde profillerin enkesit parçalarının λ_r değerleri	71
Tablo 2.7. Eksenel basınç kuvveti etkisi altında üç çelik kalitesine göre narin enkesitli profiller	73
Tablo 3.1. Amerikan ve Avrupa profilleri için önerilen pratik enkesit formüllerindeki hata yüzdelerinin karşılaştırılması.....	81
Tablo 3.2. Amerikan ve Avrupa profilleri için önerilen pratik eğilme momenti dayanımı formüllerindeki hata yüzdelerinin karşılaştırılması	82
Tablo 3.3. Amerikan profilleri için önerilen pratik basınç emniyet gerilmesi formülleri ile Avrupa profiller için önerilen pratik tasarım burkulma gerilmesi formüllerindeki hata yüzdelerinin karşılaştırılması	82

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Enkesit alanı, (mm ² , in ²)
A _e	: Etkin alan, (mm ²)
A _g	: Kayıpsız enkesit alanı, (mm ²)
C _c	: Elastik ve inelastik burkulmayı ayıran kolon narinlik oranı
C _w	: Çarpılma sabiti, (mm ⁶)
E	: Yapısal çelik elastisite modülü, (29000 ksi, 200000 MPa)
F _a	: Eksenel basınç emniyet gerilmesi, (ksi)
F _b	: Eğilme emniyet gerilmesi, (ksi)
F _{cr}	: Kritik burkulma gerilmesi, (MPa)
F	: Elastik burkulma gerilmesi, (MPa)
F _y	: Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi, (MPa)
G	: Birim boy kütle, (kg/m)
I _x	: Kuvvetli eksen etrafında atalet momenti, (mm ⁴)
I _y	: Zayıf eksen etrafında atalet momenti, (mm ⁴)
J	: Burulma sabiti, (mm ⁴)
K	: Burkulma boyu katsayısı
L	: Desteklenen noktalar arası uzunluk, (mm)
L _c	: Eleman burkulma boyu, (mm)
M	: Eğilme momenti kapasitesi, (kip.ft)
M _G	: Sabit yükler altında oluşan moment, (kNm)
M _d	: YDKT için tasarım eğilme momenti dayanımı, (kNm)
M _n	: Karakteristik eğilme momenti dayanımı, (kNm)
M _{nx}	: Kuvvetli eksen etrafında karakteristik eğilme momenti dayanımı, (kNm)
M _p	: Plastik eğilme momenti, (kNm)
M _u	: YDKT yük birleşimi için hesaplanan gerekli eğilme momenti dayanımı, (kNm)
P	: Eksenel yük kapasitesi, (kips)
P _n	: Narin olmayan enkesitli elemanların karakteristik basınç kuvveti dayanımları, (kN)
P _{ne}	: Narin enkesitli elemanların karakteristik basınç kuvveti dayanımları, (kN)
R ²	: Regresyon katsayısı
S _x	: Kuvvetli eksen etrafında elastik mukavemet momenti, (in ³)
Q _x	: x eksenine göre statik alan momenti
Q _y	: y eksenine göre statik alan momenti
W _{ex}	: Kuvvetli eksen etrafında elastik mukavemet momenti, (mm ³)
W _{ey}	: Zayıf eksen etrafında elastik mukavemet momenti, (mm ³)
W _{px}	: Kuvvetli eksen etrafında plastik mukavemet momenti, (mm ³)
W _{py}	: Zayıf eksen etrafında plastik mukavemet momenti, (mm ³)
W _t	: Birim boy kütle, (lb/ft)
ρ	: Yoğunluk, (kg/m ³ , pcf)
φ _b	: Eğilme etkisi için dayanım katsayısı
φ _c	: Basınç kuvveti etkisi için dayanım katsayısı

Ω_b	: Eğilme etkisi için güvenlik katsayısı
Ω_c	: Basınç kuvveti etkisi için güvenlik katsayısı
b	: Başlık genişliği, (mm, in)
d	: Enkesit derinliği, (mm, in)
h	: Düz gövde yüksekliği, (mm, in)
i	: Atalet yarıçapı, (mm)
i_x	: Kuvvetli eksen de atalet yarıçapı, (mm)
i_y	: Zayıf eksen de asal atalet yarıçapı, (mm)
r	: Atalet yarıçapı, (in)
r_x	: Kuvvetli eksen atalet yarıçapı, (in)
r_y	: Zayıf eksen de atalet yarıçapı, (in)
t_f	: Başlık kalınlığı, (mm, in)
t_w	: Gövde kalınlığı, (mm, in)
x^*	: U-enkesitlerin geometrik merkezlerinin zayıf eksene olan varsayılan uzaklığı
$\bar{x}$	: U-enkesitlerin geometrik merkezlerinin zayıf eksene olan uzaklığı
y^*	: T-enkesitlerin geometrik merkezlerinin kuvvetli eksene olan varsayılan uzaklığı
$\bar{y}$	: T-enkesitin geometrik merkezinin kuvvetli eksene olan uzaklığı, (mm)
λ_f	: Enkesitin başlık parçasının narinliği
$\lambda_{f,max}$	: İncelenen enkesit grubu için en büyük başlık parçası narinliği
λ_p	: Kompakt enkesit parçası için sınır narinlik değeri
λ_{pf}	: Kompakt başlık parçası için sınır narinlik değeri
λ_{pw}	: Kompakt gövde parçası için sınır narinlik değeri
λ_r	: Kompakt veya narin olmayan enkesit parçası için sınır narinlik değeri
λ_{rf}	: Kompakt veya narin olmayan başlık parçası için sınır narinlik değeri
λ_{rw}	: Kompakt veya narin olmayan gövde parçası için sınır narinlik değeri
λ_w	: Enkesitin gövde parçasının narinliği
$\lambda_{w,max}$	: İncelenen enkesit grubunda için en büyük gövde narinliği

Kısaltmalar

AISC	: American Institute of Steel Construction (Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü)
ANSI	: American National Standard Institute (Amerikan Ulusal Standart Enstitüsü)
ASD	: Allowable Stress Design (Emniyet Gerilmeleri Yöntemi)
ÇYTHYİY	: Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik
EGY	: Emniyet Gerilmeleri Yöntemi
LRFD	: Load and Resistance Factor Design (Yük ve Dayanım Katsayılarına göre Tasarım)
NASCC	: North American Steel Construction Conference (Kuzey Amerika Çelik Konferansı)
SDCSS	: Specification for the Design and Construction of Steel Structures (Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik)
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
YDKT	: Yük ve Dayanım Katsayılarına göre Tasarım

I-ENKESİTLİ AVRUPA ÇELİK HADDE PROFİLLERİ İÇİN PRATİK TASARIM FORMÜLLERİ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, ülkemizde çelik yapı tasarımıyla uğraşan mühendis ve mimarların, I-enkesitli çelik hadde profillerin alan, atalet momenti, mukavemet momenti, atalet yarıçapı gibi temel enkesit özelliklerinin yanı sıra, tasarım eğilme momenti ve basınç kuvveti dayanımlarını profil tablolarını ve nispeten karışık yönetmelik formüllerini kullanmadan kolayca hesaplayabilmelerini sağlayan basit ve pratik tasarım denklemleri geliştirmek ve böylece kendilerine özellikle tasarımlarının ilk aşamasında hız ve zaman kazandırmaktır.

Tasarım formülleri ülkemizde yaygın şekilde kullanılan I-enkesitli hadde profilleri için çıkarılmıştır. Dayanım formülleri, ülkemizin güncel çelik tasarım yönetmeliği olan “Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik” temel alınarak ve üç farklı çelik sınıfı için ayrı ayrı elde edilmiştir. Tezde önerilen tasarım formüllerinden, elemanın narinlik oranına da bağlı olan eksenel dayanım formüllerinin dışındaki bütün formüller; birim boy kütle, enkesit derinliği ve başlık genişliği olmak üzere yalnız üç parametreye bağlıdır. Dayanım formülleri, yönetmelikte tanımlanan Yük ve Dayanım Katsayılarına göre Tasarım yöntemi kullanılarak elde edilmiştir; ancak, tasarımda Güvenlik Katsayılarına göre Tasarım yönteminin kullanılması durumunda, tasarım dayanımları kolaylıkla güvenli dayanımlara dönüştürülebilmektedir.

Tezde önerilen tasarım formüllerindeki hata yüzdelерinin, incelenen profiller ve çelik kaliteleri için, yanal burulmalı burkulmanın eğilme davranışını, yerel burkulmanın da basınç davranışını kontrol etmediği durumlarda, oldukça makul olduğu, çoğu durumda üst sınır olarak belirlenen yüzde 20’nin çok altında kaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, I-Enkesitli Hadde Profiller, Pratik Enkesit Formülleri, Pratik Dayanım Formülleri, Yük ve Dayanım Katsayılarına Göre Tasarım.

DEVELOPMENT OF PRACTICAL DESIGN FORMULAS FOR I-SHAPED EUROPEAN ROLLED STEEL PROFILES

ABSTRACT

The aim of this study is to develop simple and practical design formulas for the computation of flexural and axial strengths as well as cross sectional properties of I-shaped European rolled steel profiles so that the engineers and architects that design steel structures can compute them easily, particularly in the initial stage of their design, without using section tables and rather complex code formulas; which, in turn, is believed to enable steel designers to save time, effort and money.

Design formulas are derived for I-shaped rolled sections widely used in Turkey. The strength formulas are developed based on the Specification for the Design and Construction of Steel Structures using three different steel grades. Except the axial strength formulas, which also depend on the slenderness ratio of the member, the design formulas proposed in the thesis depend only on three parameters; mass per unit length, section depth and section width. The strength formulas are derived using the Load and Resistance Factor Design approach; however, design strengths can easily be converted to allowable strengths.

It has been shown that, for the shapes and steel grades studied within the scope of the thesis, the percent errors in the proposed design formulas are reasonable and in most cases well below the upper limit (20 percent) provided that lateral torsional buckling does not control the flexural behavior and local buckling does not control the axial behavior.

Keywords: Specification for Design and Construction of Steel Structures, I-Shaped Rolled Steel Members, Practical Formulas for Cross Sectional Properties, Practical Strength Formulas, Load and Resistance Factor Design.

GİRİŞ

Yüksek dayanım, rijitlik, süneklik, kullanılabilirlik, elastiklik gibi onlarca üstün özelliğe doğal olarak sahip olan yapısal çeliğin, temel olarak yalnızca iki temel zaafiyete (korozyon ortamlarda sürekli bakım gerektirmesi ve yangına maruz kaldığında dayanımının ve rijitliğinin azalması) sahip olması, günümüzde yapı inşasında kullanılan malzemeler arasında yapısal çeliği ilk sıraya taşımaktadır. Sıcak veya soğuk şekil verilerek üretilen çelik elemanlarla, yüksek dayanımlı veya paslanmaz çelik elemanların kullanımı sadece inşaat sektörüyle sınırlı olmayıp, çeliğin üstün özelliklerinden özellikle makine ve havacılık sanayindeki uygulamalarda da yararlanılmaktadır.

Literatürde, yapısal çelik malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi, yapısal çelik elemanların farklı uygulamalarda kullanımı ve farklı yükler altındaki davranış ve göçme modları üzerine yapılan çalışmalar hız kesmeden devam etmektedir. Son iki yıl içinde yayınlanan yüzlerce çalışmadan yalnız birkaçına bu paragrafta değinilecektir. Gardner [1], bileşiminde yüksek korozyon direncine sahip krom bulunduran paslanmaz çelik malzeme kullanılarak inşa edilen yapıların tasarım ve stabilitesi üzerine yapılan çalışmaları derlemiş, paslanmaz çelik malzeme ile üç boyutlu yazıcı kullanımı hakkında bilgi vermiştir. Başka bir derleme çalışmada, Yu ve diğerleri [2], sıcak haddelenmiş ve soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların yangın sonrası mekanik özelliklerindeki değişimleri üzerine yürütülen deneysel çalışmalardan elde edilen verileri karşılaştırarak genel sonuçlar çıkarmaya çalışmıştır. Kodur ve Naser [3], yangın riski taşıyan çelik köprülerin belirlemesi için pratik bir yöntem geliştirerek, büyük yangınlarda kayıpların en aza indirgenebilmesi için öneriler sunmuşlardır. Odrobinak ve Gocal [4], farklı bölgelerde inşa edilmiş köprülerden alınan çelik numunelerde oluşan korozyonu ölçmüş, ayrıca korozyonun halen kullanımda olan köprülerden alınan üç farklı yapısal çelik elemanın eğilme kapasitelerine etkilerini incelemişlerdir. Wang ve diğerleri [5], Northridge depreminden önce Amerika'da inşa edilen moment aktaran çelik çerçevelerde kullanılan kiriş-kolon birleşimlerine sahip 35 katlı çelik bir binanın deprem etkisi altındaki performansını doğrusal olmayan

zaman tanım alanında analiz yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Benzer bir çalışmada, Hutt ve diğerleri [6], Amerika’da 1973 yılında yayınlanan bina yönetmeliğine göre tasarlanarak inşa edilen ve halen kullanımda olan çelik moment çerçeveli yüksek yapıların deprem etkisi altındaki davranışlarını güncel yönetmeliğe göre tasarlanan benzer taşıyıcı sisteme sahip yüksek yapıların davranışlarıyla karşılaştırmıştır. Abou-Elfath ve Elhout [7], farklı deprem seviyesi, taşıyıcı sistem davranış katsayısı ve yatay öteleme sınırına sahip 768 adet burkulması önlenmiş çelik çaprazlı çerçevenin hakim doğal titreşim periyodunu belirleyerek, bu tür yapıların hakim periyotlarının incelenen üç parametre ile değişimlerini ortaya koymuşlardır. Wang ve diğerleri [8], çelik levha perde duvarlarla çelik levha betonarme kompozit perde duvarların tersinir yükler altındaki şekil değiştirme kapasiteleri ile göçme modlarını deneysel olarak elde etmiş ve kompozit perdelerle çelik perdelerin deprem davranışlarını karşılaştırmışlardır. Bhowmick ve Grondin [9], çelik levhalarla güçlendirilmiş I-enkesitli çelik kolonların tasarımında kullanılacak kolon eğrisini belirlemek amacıyla sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sayısal bir çalışma gerçekleştirmiştir. Hadjipantelis ve diğerleri [10], doğrudan dayanım yöntemini kullanarak ve kiriş-kolon gibi modelleyerek, önerilmeli soğuk şekillendirilmiş çelik kirişler için tasarım kuralları önermişlerdir.

Yukarıda sadece örnek olarak değinilen çalışmaların amaçları ve kapsamaları dikkatle incelendiğinde, çelik yapı tasarımının ve uygulamalarının her geçen gün değiştiği ve geliştiği görülebilir. Teknolojideki gelişmeler ve literatürdeki araştırmaların ışığında, pek çok ülkede, çelik yapı tasarım yönetmelikleri de belirli aralıklarla güncellenmektedir.

Günümüz teknolojisinde oldukça karışık yapıların analiz ve tasarımları gelişmiş bilgisayar programları kullanılarak yapılabilmektedir. Ancak, bilgisayar programlarıyla yapılan tasarımlarda, yapıdaki herhangi bir elemanın üzerine etkiyen yükleri güvenli bir şekilde taşıyıp taşıyamadığına karar verebilmek için çoğu zaman programa yoğun ve detaylı bilgi girişi yapılması ve tüm yapının modellenmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra, herhangi bir çelik yapı elemanının bilgisayar programları kullanılmadan tasarımının yapıldığı durumlarda, yönetmeliklerdeki çoğu tasarım denkleminin uzun olup akılda kalıcı olmaması, tasarım denklemlerindeki onlarca farklı enkesit özelliğinin profil tablolarından tek tek okunma ihtiyacı, tasarım

hesaplarının ve tablodan değer okuma işlemlerinin her enkesit değişiminde tekrarlanması zorunluluğu, çoğu durumda enkesit belirleme sürecinin uzamasına sebep olmaktadır.

Socrates ve Ruddy, 2000 yılında “Modern Çelik Yapılar (Modern Steel Construction)” dergisinde yayınlanan “Çelik Tasarım için Pratik ve Yaklaşık Kurallar (Rules of Thumb for Steel Design)” başlıklı makalelerinde [11], çelik yapı elemanlarının o dönem yürürlükte olan Amerikan çelik yönetmeliğine göre tasarımlarında kullanılabilecek pratik formüller geliştirmişlerdir. Bu tezin amacı, benzer bir çalışmayı, ülkemizde ve Avrupa’da yaygın şekilde kullanılan I-enkesitli hadde profilleri ile ülkemizin güncel çelik tasarım yönetmeliği olan “Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik” (ÇYTHYİY) [12] için yürüterek, ülkemizdeki mühendis ve mimarların çelik yapı elemanlarının özellikle ön tasarımında kullanabilecekleri pratik formüller geliştirmektir. Bu amaçla, tezin ilk aşamasında, belirtilen çalışmada sunulan ve bu teze temel olan bazı tasarım formüllerinin nasıl çıkarıldığı ve o dönemki Amerikan profilleri için gerçek tasarım değerlerini en çok yüzde kaç hatayla tahmin ettikleri belirlenmiştir. Tezin ikinci aşamasında, benzer yöntemler kullanılarak, ülkemizde yaygın şekilde kullanılan I-enkesitli Avrupa hadde (IPE, IPN, HEA, HEB, HEM ve HD enkesitli) profiller için, ÇYTHYİY [12]’deki tasarım esasları ve üç çelik kalitesi (S235, S275, S355) dikkate alınarak pratik tasarım formülleri geliştirilmiş ve hata yüzdeleri tespit edilmiştir.

Tezde geliştirilen pratik formüllerde, Socrates ve Ruddy [11]’de olduğu gibi, profillerin yalnız üç temel enkesit özelliği kullanılmıştır. Formüllerin kullanımını kolaylaştırması amacıyla tezde önerilen yeni enkesit isimlendirilmesinde de kullanılan bu üç özellik, birim boy kütle G , yükseklik d ve başlık genişliği b ’dir. Tezin kapsamında incelenen bütün enkesitlerin alanları, asal atalet momentleri, elastik ve plastik mukavemet momentleri ile asal atalet yarıçapları için pratik formüller elde edilmiştir. Ayrıca, incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için, profillerin kuvvetli ekseninde eğilme momenti dayanımlarının yalnız G ve d ’ye bağlı olarak hesaplanmasını sağlayan basit formüller çıkarılmıştır. Çıkarılan bu formüller, yanal burkulma sınır durumunun elemanın davranışını belirlemediği durumlarda kullanılabilmektedir. Ayrıca, yine incelenen bütün enkesit ve çelik kaliteleri için, profillerin eksenel basınç kuvveti dayanımlarının hesabında kullanılan ve eleman

narınlığına bağılı olan kritik burkulma gerilmesi için ÇYTHYFY’de [12] önerilen iki-parçalı denklemden daha pratik, biri doğrusal iki farklı formül önerilmiştir.

Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü’nün (American Institute of Steel Construction, AISC) web sitesinde (www.aisc.org) sunulan bilgilere göre, Socrates ve Ruddy’nin çalışmalarının [11] yayınlandığı 2000 yılında ABD’de çelik yapı tasarımda kullanılmasına izin verilen iki yönetmelik bulunmaktadır. Bunlardan ilki, 1989 yılında yayınlanan “Çelik Yapılar için Yönetmelik - Emniyet Gerilmeleri ile Tasarım ve Plastik Tasarım” (Specification for Structural Steel Buildings - Allowable Stress Design and Plastic Design) [13] ikincisi ise 1999 yılında yayınlanan “Çelik Yapılar için Yük ve Dayanım Katsayılarına göre Tasarım Yönetmeliğı” (Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel) [14] isimli yönetmeliktir. Socrates ve Ruddy, makalelerinde [11], pratik tasarım kurallarını çıkarırken uygulamada kolaylık sağlaması amacıyla servis yüklerini baz aldıklarını ve Emniyet Gerilmeleri Yöntemi’ni (EGY) (Allowable Stress Design, ASD) kullandıklarını belirtmişlerdir. Bu nedenle, Socrates ve Ruddy’nin çalışmalarında [11], yukarıda bahsi geçen yönetmeliklerden ilkinin [13] kullandıkları düşünülmektedir.

Ülkemizde 2016 yılında yürürlüğe giren ve 2018 yılında güncellenen çelik yapılar yönetmeliğinde [12], çelik yapı elemanlarının tasarımında kullanılmak amacıyla iki tasarım yaklaşımı tanımlanmıştır. Bu yöntemlerden ilki Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT) yöntemi olup, gerekli dayanımların hesaplandığı yük birleşimlerinde “artırılmamış” yükleri kullanması nedeniyle bu yöntem kısmen EGY’ye benzemektedir. Buna karşın, Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) yönteminde, adından da fark edilebileceğı gibi, hem yük hem de dayanım katsayıları kullanılmaktadır. Her ne kadar, ÇYTHYFY’de [12], tasarımcıya iki yöntemden dilediğini kullanma şansı tanınıyor olsa da, 2018 yılında yayınlanan ve 2019 yılında yürürlüğe giren, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğı [15], bazı durumlarda yalnız YDKT’nin kullanılmasına izin vermektedir. Bu nedenle, bu tezde incelenen profillerin eğilme momenti ve eksenel basınç kuvveti dayanımları için sunulan formüller YDKT yöntemi kullanılarak çıkarılmıştır. Bununla birlikte, YDKT yöntemi kullanılarak hesaplanan “tasarım” dayanımları, GKT yöntemi kullanılarak hesaplanan “güvenli” dayanımlara kolayca çevrilebildiğinden, tezde sunulan formüllerin GKT yönteminde nasıl kullanılacağı da açıklanmıştır.

Bu tezde sunulan pratik formüllerin bazı kabullerden yararlanılarak çıkarıldığı, bunun doğal sonucu olarak formüllerin bazı profillerde/çelik kalitelerinde güvenli, bazılarında güvensiz tarafta kalacak şekilde yaklaşık sonuçlar verdiği; ancak, özellikle ön tasarımda mühendis ve mimara kolaylık sağlayarak zaman kazandıracağı, yine de, nihai tasarımda yük taşıma kapasitelerinin elemanların profil tablolarında listelenen “gerçek” enkesit değerleri ve yönetmeliklerde sunulan “gerçek” tasarım denklemleri kullanılarak hesaplanması gerektiği unutulmamalıdır.



1. I-ENKESİTLİ AMERİKAN ÇELİK HADDE PROFİLLERİ İÇİN GELİŞTİRİLEN PRATİK TASARIM FORMÜLLERİNİN İRDELENMESİ

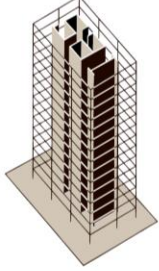
Bu bölümün amacı, Socrates ve Ruddy [11] tarafından önerilen pratik formüllerin nasıl elde edildiğini ve bu formüllerin belirtilen çalışmada ele alınan profillerin o dönem ABD’de yürürlükte olan AISC Çelik Yapılar Kılavuzu (AISC Manual of Steel Construction, ASD, 1989) [16] verilen enkesit özelliklerini ve çelik tasarım yönetmeliğine [13] göre hesaplanan eleman dayanımlarını ne kadar güvenli/güvensiz tarafta kalarak tahmin ettiklerini belirlemektir. Pratik formüllerle hesaplanan değerler ‘gerçek’ değerlerden küçük ise güvenli, büyük ise güvensiz kabul edilmiştir.

Bu bölümde, hem Socrates ve Ruddy [11]’nin 2000 yılında yayınlanan “Çelik Tasarım için Pratik ve Yaklaşık Kurallar (Rules of Thumb for Steel Design)” başlıklı makaleleri, hem de Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü’nün (AISC’nin) web sitesinde yayınlanan ve [17] numaralı kaynakta sunulan bağlantıdan ulaşılan, yazarların makaleleriyle aynı başlığa sahip sunumları referans alınmıştır. Ayrıca, yazarlar tarafından hazırlandığı tespit edilen ve Şekil 1.1’de sunulan tasarım kartı [18] da bu bölümdeki çalışmalara önemli bir kaynak olmuştur.

Socrates ve Ruddy’nin ilgili çalışmalarının [11] yayınlandığı 2000 yılında ABD’de çelik yapı tasarımı için kullanılan iki yönetmelikten ilki [13] emniyet gerilmeleri yöntemini, ikincisi [14] ise taşıma gücü yöntemini temel almaktaydı. Çalışmada emniyet gerilmeleri yöntemi kullanıldığı dikkate alındığında, önerilen pratik tasarım formüllerinin ilk yönetmelikteki (bu çalışmada, AISC (1989) yönetmeliği olarak atıfta bulunulacaktır.) tasarım esaslarına göre çıkartıldığı sonucuna varılmıştır.

Önerilen pratik formüllerde enkesit boyutları için inch (in) birim boy kütle için pound/foot (lb/ft) birimi kullanıldığında, enkesit alanı in^2 , atalet momentleri in^4 , mukavemet momentleri in^3 , atalet yarıçapları in, gerilme ksi, eğilme momenti dayanımı ft.kips, eksenel basınç kuvveti dayanımı ise kips cinsinden elde edilmektedir.

COLUMNS					BEAMS		SECTION PROPERTIES	
6.5"	W8	W10	W12	W14	W 8x10		$A = \frac{W_t}{3.4}$	
	24				W 10x22		$I_x \approx \frac{d^2 W_t}{20}$	
	28				W 12x14		$r_x \approx 45\% d$	
	31				W 12x16		$r_y \approx 26\% b$	
	35				W 12x19			
8"	40				W 12x22			
	48	33	40	43	W 12x26			
	58	39	45	48	W 12x30			
	67	45	50	53	W 14x22			
					W 14x26			
10"		49	53	61	W 14x30			
		54	58	68	W 14x34			
		60		74	W 16x26			
		68		82	W 16x31			
		77			W 16x40			
12"		88			W 18x35			
		100			W 18x40			
		112			W 18x50			
			65		W 18x55			
			72		W 21x44			
13"			79		W 21x50			
			87		W 21x68			
			96		W 21x84			
			106		W 24x55			
			120		W 24x62			
15"			136		W 24x68			
			152		W 24x76			
			170		W 24x84			
			190		W 27x84			
			210		W 30x90			
16"			230		W 30x99			
			252		W 30x108			
			279		W 30x116			
			305		W 33x118			
			336		W 33x130			
18"				90	W 33x141			
				99	W 33x201			
				109	W 33x221			
				120	W 36x135			
				132	W 36x150			
20"				145	W 36x160			
				159	W 36x170			
				176	W 36x182			
				193	W 36x194			
				211	W 36x210			
22"				233	W 36x230			
				257	W 36x245			
				283	W 36x260			
				311	W 36x280			
				342	W 36x300			
24"				370				



(www.saii.com)

BEAMS

Beam $W_t \approx \frac{5M}{d}$

Beam $W_t \approx \frac{3.5M}{d}$

Truss $W_t \approx \frac{6M}{d}$

Truss $W_t \approx \frac{4.5M}{d}$

$W_t \approx 70\%$ for Composite

100% Studs $\approx 1.1 W_t$

100% Studs $\approx 1.25 W_t$

COLUMNS

$P_a \approx A \left(22 - 0.10 \frac{KL}{r} \right)$

$P_a \approx A \left(30 - 0.15 \frac{KL}{r} \right)$

TONNAGE

$psf \approx \frac{\text{Stories}}{3} + 7$

SERVICEABILITY

Roof $B_m d \approx 0.5L$

Floor $B_m d \approx 0.6L$

Composite $B_m d \approx 0.55L$

NOTE: Typical $F_y = 36$ ksi
 Indicates $F_y = 50$ ksi

Şekil 1.1. Socrates ve Ruddy tarafından hazırlanan tasarım kartı

1.1. Pratik Tasarım Formüllerinin Kullanımının Önerildiği Amerikan Kiriş ve Kolon Kesitleri

Makalede [11], pratik tasarım formüllerinin geniş başlıklı I-enkesitli Amerikan hadde profilleri için çıkarıldığı belirtilmiştir. Ayrıca, moment kapasiteleri için önerilen formüllerin, yürürlükteki AISC yönetmeliğinde verilen ‘ekonomik’ kiriş kesitleri için, eksenel kapasitelerin ise kolon kesitleri için çıkarıldığı vurgulanmıştır. Ancak, o dönemde yayınlanan çelik tasarım kılavuzu [16] incelendiğinde ‘ekonomik’ Amerikan kiriş kesitlerine dair herhangi bir bilgiye ulaşılamamıştır. Bununla birlikte, çalışmada kullanıldığı düşünülen kesitler, çalışmayı yürüten araştırmacıların hazırlamış olduğu pratik tasarım kartından [18] tespit edilmiştir. Şekil 1.1’deki tasarım kartından belirlenen geniş başlıklı I-enkesitli ‘ekonomik’ Amerikan çelik kiriş kesitleri Tablo 1.1’de, geniş başlıklı I-enkesitli Amerikan çelik kolon kesitleri ise Tablo 1.2’de bazı geometrik özellikleri ile birlikte listelenmiştir.

Tablo 1.1. Socrates ve Ruddy [11]’de kullanılan ‘ekonomik’ Amerikan çelik kiriş enkesitleri ve bazı geometrik özellikleri

Kesit Adı	r_x/r_y	d/b	d/t _w	b/2t _f	Kesit Adı	r_x/r_y	d/b	d/t _w	b/2t _f
W 8 x 10	3,84	2,00	46,51	9,62	W 24 x 68	5,09	2,64	57,43	7,65
W 10 x 22	3,22	1,77	42,30	8,02	W 24 x 76	5,06	2,67	54,29	6,59
W 12 x 14	6,15	3,00	59,41	8,86	W 24 x 84	5,01	2,67	51,43	5,84
W 12 x 16	6,09	3,02	54,46	7,54	W 27 x 84	5,18	2,68	57,95	7,76
W 12 x 19	5,87	3,03	51,50	5,73	W 30 x 90	5,54	2,85	54,93	6,89
W 12 x 22	5,83	3,07	47,42	4,72	W 30 x 99	5,47	2,85	52,92	6,18
W 12 x 26	3,43	1,88	53,45	8,51	W 30 x 108	5,61	2,84	63,03	8,52
W 12 x 30	3,40	1,89	47,42	7,41	W 30 x 116	5,60	2,84	57,05	7,79
W 14 x 22	5,33	2,75	60,17	7,47	W 33 x 118	5,61	2,86	59,64	7,77
W 14 x 26	5,23	2,76	54,31	5,98	W 33 x 130	5,55	2,88	57,14	6,73
W 14 x 30	3,85	2,06	51,01	8,72	W 33 x 141	5,50	2,89	54,94	6,00
W 14 x 34	3,82	2,08	49,31	7,37	W 33 x 201	3,93	2,14	47,10	6,85
W 16 x 26	5,59	2,85	62,34	7,95	W 33 x 221	3,93	2,15	43,78	6,20
W 16 x 31	5,51	2,88	57,57	6,25	W 36 x 135	5,87	2,97	59,41	7,56
W 16 x 40	4,23	2,29	52,86	6,95	W 36 x 150	5,79	3,00	57,30	6,36
W 18 x 35	5,79	2,96	59,21	7,04	W 36 x 160	5,75	3,00	55,45	5,89
W 18 x 40	5,66	2,97	56,88	5,75	W 36 x 170	5,72	3,00	53,12	5,48
W 18 x 50	4,47	2,41	50,78	6,55	W 36 x 182	5,70	3,01	50,16	5,12
W 18 x 55	4,46	2,41	46,46	5,97	W 36 x 194	5,68	3,01	47,78	4,81
W 21 x 44	6,40	3,18	58,99	7,24	W 36 x 210	5,67	3,02	44,17	4,48
W 21 x 50	6,27	3,19	54,54	6,10	W 36 x 230	4,00	2,18	47,25	6,53
W 21 x 62	4,82	2,55	52,25	6,70	W 36 x 245	4,01	2,19	45,14	6,11
W 21 x 68	4,79	2,56	49,27	6,03	W 36 x 260	3,98	2,19	43,24	5,74
W 24 x 55	6,81	3,37	59,90	6,95	W 36 x 280	3,96	2,20	41,23	5,29
W 24 x 62	6,70	3,37	55,32	5,97	W 36 x 300	3,97	2,21	38,88	4,95

Tablo 1.2. Socrates ve Ruddy [11]'de kullanılan Amerikan çelik kolon kesitleri ve bazı geometrik özellikleri

Kesit Adı	r_x/r_y	d/b	d/t _w	b/2t _f	Kesit Adı	r_x/r_y	d/b	d/t _w	b/2t _f
W 8 x 6.5 x 24	2,12	1,22	32,42	8,09	W 12 x 12 x 152	1,77	1,10	15,75	4,45
W 8 x 6.5 x 28	2,13	1,23	28,47	7,03	W 12 x 13 x 170	1,78	1,12	14,59	4,03
W 8 x 8 x 31	1,72	1,00	28,19	9,23	W 12 x 13 x 190	1,79	1,13	13,57	3,65
W 8 x 8 x 35	1,72	1,01	26,08	8,10	W 12 x 13 x 210	1,80	1,15	12,47	3,36
W 8 x 8 x 40	1,73	1,02	23,08	7,22	W 12 x 13 x 230	1,80	1,16	11,72	3,12
W 8 x 8 x 48	1,74	1,05	21,18	5,92	W 12 x 13 x 252	1,81	1,18	11,05	2,89
W 8 x 8 x 58	1,74	1,06	17,08	5,07	W 12 x 13 x 279	1,82	1,21	10,36	2,66
W 8 x 8 x 67	1,76	1,09	15,79	4,43	W 12 x 13 x 305	1,84	1,23	10,04	2,45
W 10 x 8 x 33	2,16	1,22	33,38	9,18	W 12 x 13 x 336	1,85	1,26	9,48	2,26
W 10 x 8 x 39	2,15	1,24	31,50	7,52	W 14 x 8 x 43	3,08	1,71	45,06	7,52
W 10 x 8 x 45	2,16	1,26	28,88	6,50	W 14 x 8 x 48	3,06	1,72	40,70	6,75
W 10 x 10 x 49	1,71	1,00	29,42	8,94	W 14 x 8 x 53	3,06	1,73	37,66	6,10
W 10 x 10 x 54	1,71	1,00	27,23	8,17	W 14 x 10 x 61	2,44	1,39	37,16	7,74
W 10 x 10 x 60	1,72	1,02	24,30	7,40	W 14 x 10 x 68	2,44	1,40	34,00	6,97
W 10 x 10 x 68	1,72	1,03	22,18	6,56	W 14 x 10 x 74	2,44	1,41	31,58	6,43
W 10 x 10 x 77	1,72	1,04	19,93	5,86	W 14 x 10 x 82	2,44	1,41	27,92	5,92
W 10 x 10 x 88	1,72	1,05	17,86	5,20	W 14 x 15 x 90	1,66	0,96	31,79	10,25
W 10 x 10 x 100	1,73	1,07	16,30	4,63	W 14 x 15 x 99	1,66	0,97	29,27	9,34
W 10 x 10 x 112	1,74	1,09	15,05	4,17	W 14 x 15 x 109	1,67	0,98	27,37	8,51
W 12 x 8 x 40	2,65	1,49	40,40	7,75	W 14 x 15 x 120	1,67	0,99	24,53	7,80
W 12 x 8 x 45	2,65	1,50	36,00	6,99	W 14 x 15 x 132	1,67	0,99	22,68	7,14
W 12 x 8 x 50	2,65	1,51	32,98	6,29	W 14 x 16 x 145	1,59	0,95	21,68	7,11
W 12 x 10 x 53	2,10	1,20	34,77	8,70	W 14 x 16 x 159	1,59	0,96	20,11	6,54
W 12 x 10 x 58	2,11	1,22	34,07	7,79	W 14 x 16 x 176	1,60	0,97	18,34	5,98
W 12 x 12 x 65	1,75	1,01	31,11	9,90	W 14 x 16 x 193	1,60	0,98	17,39	5,45
W 12 x 12 x 72	1,75	1,02	28,53	9,00	W 14 x 16 x 211	1,61	1,00	16,02	5,06
W 12 x 12 x 79	1,75	1,02	26,39	8,21	W 14 x 16 x 233	1,61	1,01	14,96	4,62
W 12 x 12 x 87	1,75	1,03	24,27	7,48	W 14 x 16 x 257	1,62	1,02	13,96	4,23
W 12 x 12 x 96	1,76	1,05	23,07	6,75	W 14 x 16 x 283	1,63	1,04	12,96	3,89
W 12 x 12 x 106	1,76	1,05	21,10	6,18	W 14 x 16 x 311	1,64	1,06	12,15	3,59
W 12 x 12 x 120	1,76	1,06	18,50	5,57	W 14 x 16 x 342	1,65	1,07	11,41	3,32
W 12 x 12 x 136	1,77	1,08	16,97	4,95	W 14 x 16 x 370	1,65	1,09	10,83	3,09

Tablo 1.1'de verilen kiriş kesitleri W (d) x (W_t) şeklinde isimlendirilmektedir. Bu isimlendirmede, 'd' profilin 'in' cinsinden enkesit derinliğini, 'W_t' ise 'lb/ft' cinsinden birim boy kütlesini temsil etmektedir. Örnek olarak; W 16 x 40 profilinin enkesit derinliği 16 in, bir foot uzunluğunun kütlesi ise 40 lb'tur. Benzer şekilde, Tablo 1.2'de listelenen kolon kesitleri W (d) x (b) x (W_t) şeklinde isimlendirilmektedir. Kolon kesitlerinin isimlendirilmesine kiriş kesitlerinden farklı olarak başlık genişliği 'b' de dahil edilmiştir. Örnek olarak; W 10 x 8 x 33 profilinin enkesit derinliği 10 in, başlık genişliği 8 in olup, bir ft uzunluğunun kütlesi 33 lb'tur.

Tablo 1.1 ve Tablo 1.2'de, incelenen her kesit için asal atalet yarıçaplarının oranı (r_x/r_y), enkesit derinliğinin başlık genişliğine ve gövde kalınlığına oranları (sırasıyla,

d/b ve d/t_w ile yarım başlık genişliğinin başlık kalınlığına oranı ($b/2t_f$) sunulmuştur. Bu şekilde, kiriş kesitleriyle kolon kesitleri arasındaki temel farklar belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada, enkesitin geometrik merkezinden geçen asal eksenlerin, x ve y eksenleri olarak adlandırıldığı, başlıklara paralel (güçlü) eksen için x , dik (zayıf) eksen için ise y simgelerinin kullanıldığı belirtilmelidir.

Amerikan kiriş ve kolon kesitlerinin Tablo 1.1 ve Tablo 1.2’de verilen geometrik özellikleri karşılaştırıldığında, kesitlerin ‘kiriş’ ya da ‘kolon’ kesiti olarak sınıflandırılmasında r_x/r_y ve d/b oranlarının etkili olduğu belirlenmiştir. Kiriş kesitleri için r_x/r_y oranı en küçük 3,22 iken, kolon kesitleri için bu oran en büyük 3,08’dir. Benzer şekilde, kiriş kesitlerinin d/b oranlarının en az 1,77 olduğu, kolon kesitlerinde ise oranın 1,73’ü aşmadığı belirlenmiştir.

1.2. Kiriş Derinliği için Pratik Tasarım Formülleri

Bir eğilme elemanının tasarımına başlandığı zaman akla gelen sorulardan belki de ilki ‘Kiriş derinliği ne olmalı?’ sorusudur. Bu yüzden Socrates ve Ruddy [11], sık kullanılan kiriş türleri için, kiriş boyu (L) ile kiriş derinliği (d) arasında basit ilişkiler önermiştir. Elbette kiriş derinliği sadece kiriş boyuna değil; kirişe etkiyen yüklere, kiriş malzemesinin dayanımına, kirişin uçlarındaki ve açıklığındaki mesnet/destek koşullarına ve benzeri pek çok farklı etkene bağlıdır. Bununla birlikte önerilen derinlik formülleri, tasarımcıya ön tasarımda başlangıç noktası olarak güzel bir seçenek sunmaktadır.

Çatı, döşeme ve kompozit kirişlerin derinlikleri (sırasıyla, $d_{\text{çatı}}$, $d_{\text{döşeme}}$, d_{kompozit}) için Socrates ve Ruddy [11]’de önerilen formüller sırasıyla Denklem (1.1), Denklem (1.2), Denklem (1.3)’te sunulmuştur. Formüllerde kiriş boyu ft cinsinden girildiğinde, kesit derinliği in cinsinden elde edilmektedir.

$$d_{\text{çatı}} \approx 0,5 L \quad (1.1)$$

$$d_{\text{döşeme}} \approx 0,6 L \quad (1.2)$$

$$d_{\text{kompozit}} \approx 0,55 L \quad (1.3)$$

1.3. Temel Enkesit Özellikleri için Pratik Tasarım Formülleri

Socrates ve Ruddy [11], geniş başlıklı I-enkesitli Amerikan hadde profillerin bazı enkesit özelliklerinin, Amerikan kolon enkesitlerinin isimlendirilmesinde kullanılan üç parametre (d, b ve W_t) ile makul bir şekilde hesaplanabildiğini göstermiştir. Bu enkesit özellikleri; enkesit alanı (A), kuvvetli eksende atalet momenti (I_x) ile elastik mukavemet momenti (S_x) ve asal atalet yarıçapları (i_x ve i_y)'dir.

1.3.1. Enkesit alanı (A)

Enkesit alanının (A), birim boy kütle (W_t) ve yoğunlukla (ρ) olan ilişkisi Denklem (1.4)'te verilmiştir.

$$A = \frac{W_t}{\rho} \quad (1.4)$$

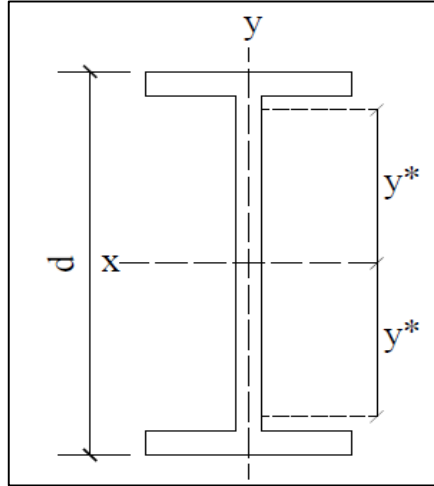
Birim boy kütle (lb/ft), değeri 490 pcf (lb/ft³)'e eşit olan yapısal çeliğin yoğunluğuna bölündüğünde ve ft² cinsinden elde edilen enkesit alanının birimi in²'ye çevrildiğinde [11]'de sunulan pratik formül (Denklem (1.5)) elde edilmektedir. Bu çevrimde, 1 ft = 12 in eşitliğinin kullanıldığı; 490/12² değerinin 3,4 olarak yuvarlandığı belirlenmiştir.

$$A = \frac{W_t}{3,4} \quad (1.5)$$

Denklem (1.5)'teki pratik formül kullanılırken W_t , lb/ft cinsinden yazılmalıdır. Bu durumda, enkesit alanının birimi in² olacaktır.

1.3.2. Kuvvetli eksende atalet momenti (I_x)

Socrates ve Ruddy [11], kuvvetli eksende atalet momenti I_x için pratik formül türetirken, inceledikleri I-enkesitli profillerin iki eşit alanlı T-enkesitten oluştuğunu, bu şekilde elde edilen T-enkesitlerin geometrik merkezlerinden ilgili I-enkesitin kuvvetli eksenine olan uzaklığın da, Şekil 1.2'de gösterildiği gibi, $y^*=0,4d$ olduğunu kabul etmişlerdir. Araştırmacılar formülasyonlarında T-enkesitlerin x eksenine paralel olan ve kendi geometrik merkezlerinden geçen eksene göre atalet momentlerini ihmal etmişlerdir.



Şekil 1.2. T-enkesitlerin geometrik merkezlerinin I-enkesitin kuvvetli eksenine uzaklığı için yapılan kabul

Böylece araştırmacılar, inceledikleri I-enkesitlerin kuvvetli ekseninde atalet momentlerini (I_x), paralel eksen teoremini kullanarak, enkesitleri oluşturan eş-alanlı T-enkesitlerin x eksenine göre ikinci alan momentlerinden aşağıdaki şekilde hesaplamışlardır.

$$I_x \approx 2 \frac{A}{2} (0,4d)^2 \quad (1.6)$$

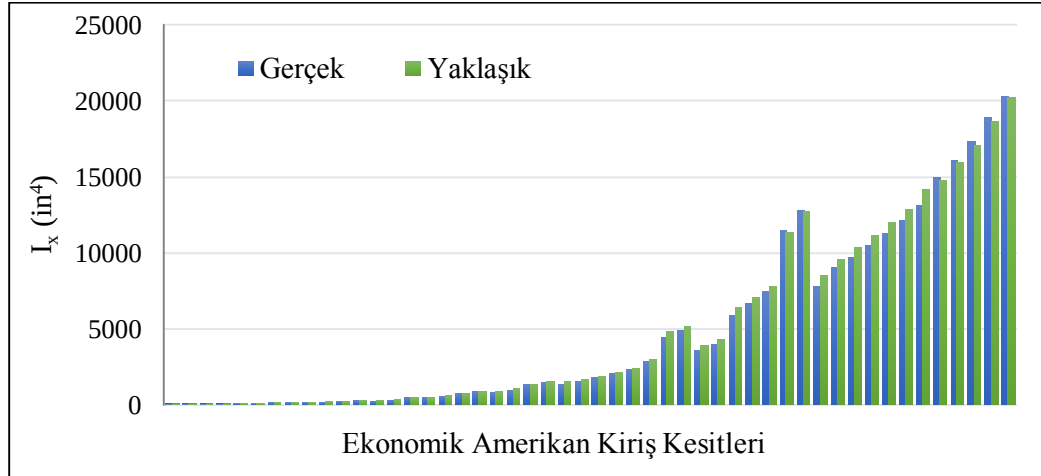
Enkesit alanı için Denklem (1.5)'te elde edilen eşitlik, Denklem (1.6)'da kullanıldığında; I_x , Denklem (1.7)'deki gibi, W_t ve d cinsinden ifade edilebilmektedir;

$$I_x \approx \left(\frac{W_t}{3,4} \right) 0,16d^2 = \frac{W_t d^2}{21,25} \quad (1.7)$$

Socrates ve Ruddy [11], Denklem (1.7) yerine daha akılda kalıcı olması nedeniyle aşağıdaki basit formülü önermişlerdir;

$$I_x \approx \frac{W_t d^2}{20} \quad (1.8)$$

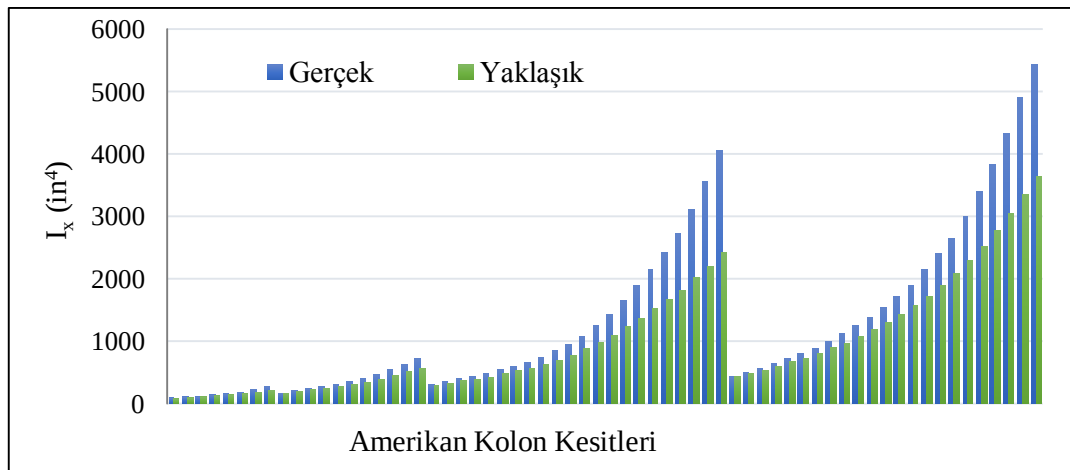
Tablo 1.1'deki Amerikan kiriş kesitlerinin Denklem (1.8)'deki pratik formül kullanılarak hesaplanan atalet momenti değerleriyle, tasarım kılavuzundaki [16] 'gerçek' değerler karşılaştırılarak Şekil 1.3'teki grafik çizdirilmiştir.



Şekil 1.3. Amerikan kiriş kesitleri için gerçek ve yaklaşık I_x değerlerinin karşılaştırılması

Gerçek atalet momenti değerleriyle Denklem (1.8)'den hesaplanan yaklaşık atalet momentleri arasındaki farklar incelendiğinde pratik formülün güvensiz yönde en fazla %17,7'lik (W 24 x 55) hata oranına sahip olduğu gözlenmiştir. Güvenli yönde ise hata oranı en fazla %9,50 (W 12 x 30) olmaktadır.

Socrates ve Ruddy [11]'nin, Denklem (1.8)'deki formülü, kirişler için çıkardığı [17]'de bahsedilmiştir. Bu çalışmada, enkesit formüllerinin hem kiriş hem de kolon kesitleri için çıkarılması hedeflendiğinden, Denklem (1.8)'in Tablo 1.2'deki Amerikan kolon kesitlerinin atalet momentlerini nasıl tahmin ettiği de araştırılmıştır. Şekil 1.4, gerçek değerlerle formülden elde edilen değerleri karşılaştırmaktadır.



Şekil 1.4. Amerikan kolon kesitleri için gerçek ve yaklaşık I_x değerlerinin karşılaştırılması

Kolon enkesitlerinde hata oranları güvenli yönde %1,61 ile %40,4 (W 12 x 13 x 336) arasında değişmektedir. Hataların bu kadar yüksek çıkmasının sebebinin profil ismindeki enkesit derinliği değerlerinin (Örnek:12) profil tablosundaki değerlerden (Örnek:16,8) genel olarak daha küçük olması ve formülde d'nin karesinin alınması olduğu düşünülmektedir.

1.3.3. Kuvvetli ekseninde elastik mukavemet momenti (S_x)

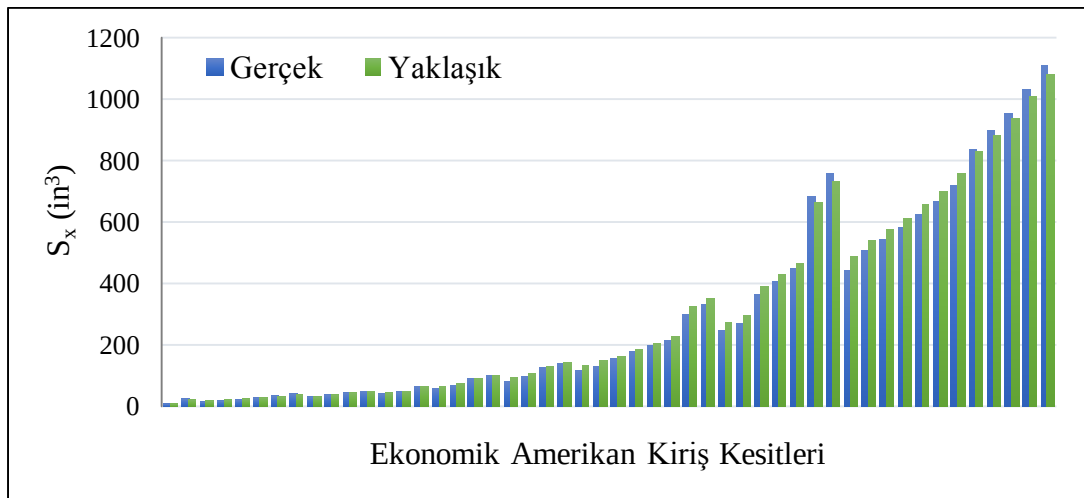
I-enkesitli bir hadde profilinin kuvvetli eksenine göre elastik mukavemet momenti (S_x), aynı eksene göre belirlenen atalet momenti (I_x) kesit derinliğinin yarısına ($d/2$) bölünerek elde edilir;

$$S_x = \frac{I_x}{d/2} \quad (1.9)$$

Denklem (1.8)'de elde edilen I_x formülü, Denklem (1.9)'da yerine koyulduğunda Socrates ve Ruddy [11]'de sunulan aşağıdaki pratik formül elde edilebilir;

$$S_x \approx \frac{2}{d} \frac{d^2 W_t}{20} \Rightarrow S_x \approx \frac{W_t d}{10} \quad (1.10)$$

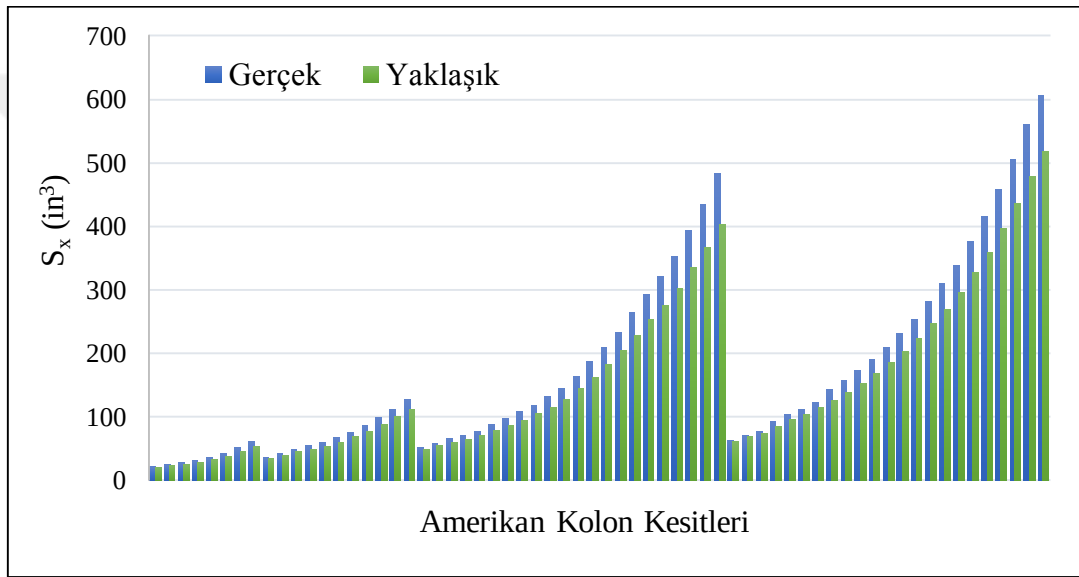
Tablo 1.1'deki Amerikan kiriş kesitlerinin Denklem (1.10) kullanılarak hesaplanan elastik mukavemet momenti değerleriyle, tasarım kılavuzundaki [16] 'gerçek' değerler karşılaştırılarak Şekil 1.5'teki grafik elde edilmiştir.



Şekil 1.5. Amerikan kiriş kesitleri için gerçek ve yaklaşık S_x değerlerinin karşılaştırması

‘Gerçek’ elastik mukavemet momentleriyle yaklaşık elastik mukavemet momentleri arasındaki farklar incelendiğinde pratik formülün en fazla %15,8 (W 24 x 55) güvensiz tarafta kaldığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, Denklem (1.10)’daki pratik formül %7,37’e (W 12 x 30) kadar güvenli sonuçlar vermektedir.

Her ne kadar bu pratik formül kiriş kesitleri için çıkarılmış olsa da, Şekil 1.6, gerçek değerlerle formülden kolon enkesitleri için elde edilen değerleri karşılaştırmaktadır. Kolon enkesitlerinde hata oranları güvenli yönde %3,40 ile %16,5 arasında tespit edilmiştir.



Şekil 1.6. Amerikan kolon kesitleri için gerçek ve yaklaşık S_x değerlerinin karşılaştırması

1.3.4. Asal atalet yarıçapları (r_x ve r_y)

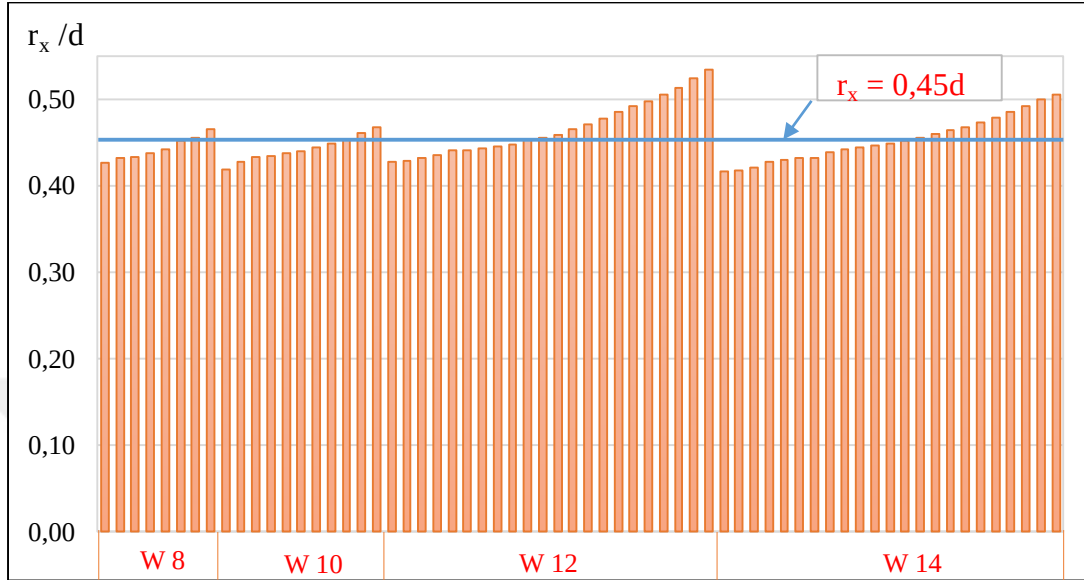
Socrates ve Ruddy [11]’de, Amerikan kolon kesitlerinin asal atalet yarıçapları r_x ile r_y ’yi sırasıyla enkesit derinliği (d) ve başlık genişliği (b) cinsinden ifade eden aşağıdaki pratik formüller sunulmuştur.

$$r_x = 0,45d \quad (1.11)$$

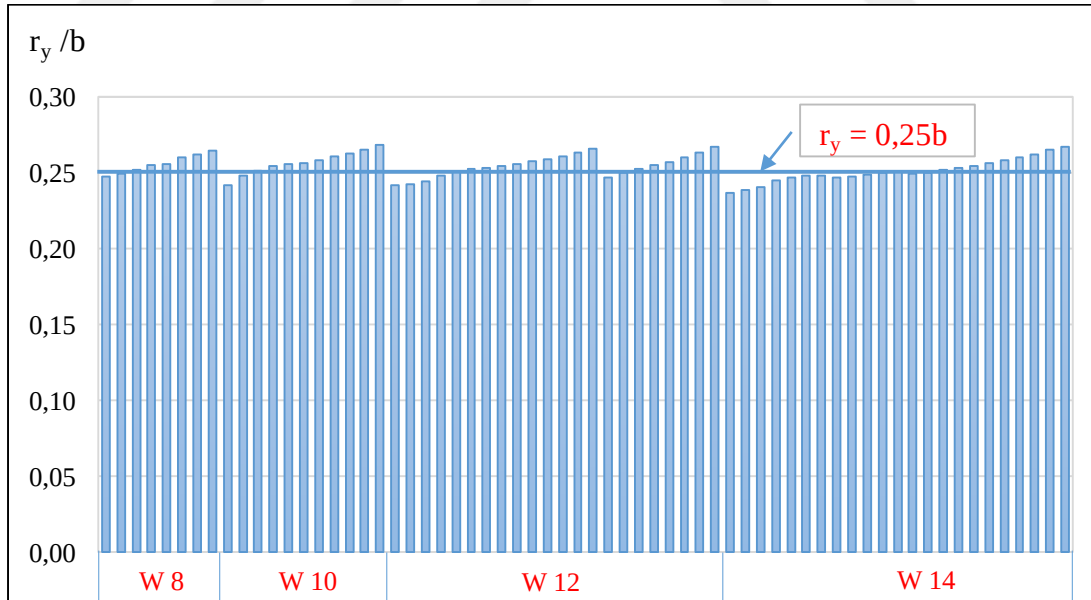
$$r_y = 0,25b \quad (1.12)$$

Şekil 1.7’de, Tablo 1.2’de listelenen Amerikan kolon kesitlerinin güçlü atalet yarıçaplarının enkesit derinliklerine oranları (r_x/d) çizdirilerek, Denklem (1.11)’den

elde edilen değerle (0,45) karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde, Tablo 1.2'deki Amerikan kolon kesitlerinin r_y/b oranları Şekil 1.8'de gösterilmiş, Denklem 1.12'de sunulan pratik formül de şekle eklenmiştir.



Şekil 1.7. Amerikan kolon kesitlerinin r_x/d oranları ile pratik formülün karşılaştırılması



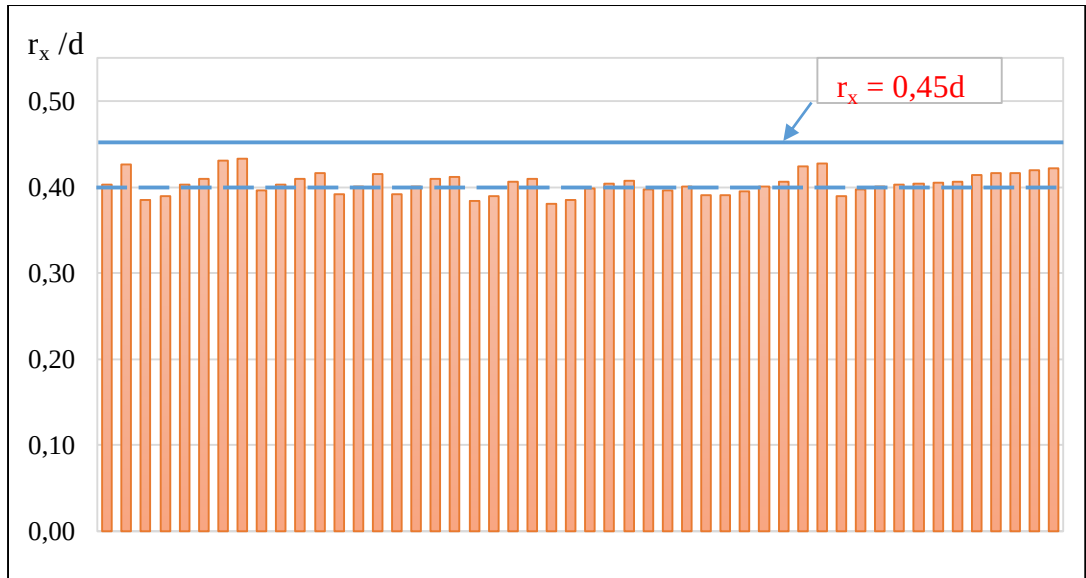
Şekil 1.8. Amerikan kolon kesitlerinin r_y/b oranları ile pratik formülün karşılaştırılması

Denklem (1.12)'deki formülün, Şekil 1.1'de verilen tasarım kartındaki formülden farklı olduğu görülebilir. Karttaki formülde katsayı 0,26 olarak verilmiştir.

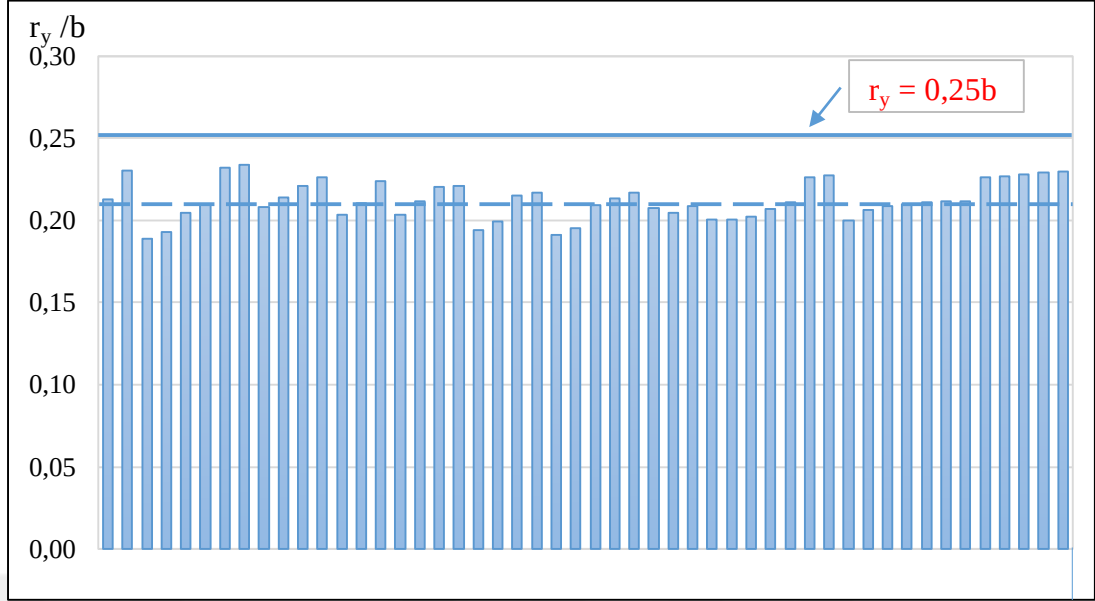
Denklem (1.12)'deki formül, yazarların sunumundan [17] alınmış olup, daha güvenli tarafta kaldığı için, bu çalışmada tercih edilmiştir.

Denklem (1.11)'in kolon enkesitlerinin kuvvetli ekseninde atalet yarıçaplarını güvenli tarafta en fazla %15,8'lik (W 12 x 13 x 336), güvensiz tarafta ise en fazla %8,12'lik (W 14 x 8 x 43) hatalarla hesapladığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Denklem (1.12), kolon enkesitlerinin zayıf ekseninde atalet yarıçaplarını güvenli yönde en büyük %6,75 (W 10 x 10 x 112), güvensiz tarafta ise en büyük %5,61'lük (W 14 x 8 x 43) hata oranlarıyla hesaplamaktadır.

Her ne kadar, Denklem (1.11) ve (1.12)'deki formüller kolon enkesitleri için çıkarılmış olsa da, özellikle zayıf eksenindeki atalet yarıçapının kirişlerin yanal burkulma dayanımlarının hesaplarında kullanıldığı bilinmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu çalışmada enkesit formüllerinin hem kiriş hem de kolon kesitleri için çıkarılması hedeflendiğinden, Denklem (1.11) ve D(1.12)'deki formüllerin Tablo 1.1'deki Amerikan kiriş kesitlerinin atalet yarıçaplarını nasıl tahmin ettiği de araştırılmıştır. Şekil 1.9 ve Şekil 1.10'da, gerçek değerlerle formüllerden elde edilen değerler karşılaştırmaktadır.



Şekil 1.9. Ekonomik Amerikan kiriş kesitlerinin r_x/d oranları ile pratik formülün karşılaştırılması



Şekil 1.10. Ekonomik Amerikan kiriş kesitlerinin r_y/b oranları ile pratik formülün karşılaştırılması

Denklem (1.11)'in kiriş enkesitlerinin kuvvetli eksende atalet yarıçaplarını güvensiz tarafta %3,83 ile %18,4 hatalarla hesapladığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Denklem (1.12), kiriş enkesitlerinin zayıf eksende atalet yarıçaplarını güvensiz tarafta %6,96 ile %32,2 arasındaki hatalar hesaplamıştır. Ekonomik Amerikan kiriş enkesitleri için $r_x=0,45d$ ve $r_y=0,25b$ formülleri yerine $r_x=0,4d$ ve $r_y=0,21b$ pratik formülleri kullanılabilir. Bu formüller güvenli yönde en büyük % 10,2 (r_y , W 12 x 30), güvensiz yönde en büyük % 11,1 (r_y , W 12 x 14) hata oranlarına sahiptir.

1.4. Kirişlerin Moment Kapasitesi (M)

Socrates ve Ruddy [11], karakteristik akma gerilmeleri $F_y=36$ ksi ve $F_y=50$ ksi olan iki farklı çelik kalitesi için, yönetmeliğe ya da kılavuza bağlı kalmadan kiriş kesiti seçimi sağlayan basit formüller de önermiştir. Bu formüller, kirişin taşıması gereken moment değeri (M) ile enkesit derinliğinin (d) belirlenmesi durumunda, profilin birim boy kütleini (W_t) vermektedir. Geniş başlıklı I-enkesitli Amerikan profilleri arasında, aynı derinliğe sahip farklı profiller olduğu fark edilebilir. I-enkesitli Avrupa profilleri bu bakımdan Amerikan profillerine pek benzememektedir. O nedenle bu çalışmada, Socrates ve Ruddy [11] tarafından çıkarılan formüller farklı bir bakış açısıyla ele alınmış; önerilen tasarım formülleri çelik kalitesinin ve kiriş enkesitinin (dolayısıyla

W_t ve d 'nin) belirlenmesi durumunda, kirişin taşıyabileceği en büyük eğilme momenti (moment kapasitesini) verecek şekilde ifade edilmiştir.

Socrates ve Ruddy [11]'nin, kiriş kapasiteleri için önerdikleri pratik tasarım formüllerini çıkarırken, AISC (1989) yönetmeliğinde [14] Bölüm F'de tanımlanan tasarım esaslarını dikkate aldıkları ve Tablo 1.1'de verilen Amerikan çelik kiriş enkesitlerini kullandıkları düşünülmektedir. Bu formüller kullanılarak, kiriş kapasiteleri (M), sadece enkesit adının (ve böylece d ve W_t değerlerinin) bilinmesiyle pratik ve yaklaşık bir şekilde hesaplanabilmektedir.

AISC (1989)'a göre, eğilme momenti etkisindeki bir çelik yapı elemanının tasarımında kullanılacak emniyet gerilmesinin hesabı için, ilk olarak enkesit sınıflandırılmalıdır. Bunun için, basınç etkisindeki enkesit parçalarının genişlik/kalınlık oranları, yönetmelikte verilen sınır değerlerle karşılaştırılmalıdır. AISC (1989)'da verilen sınır narinlikler, Şekil 1.11'de sunulmuştur. Şekil 1.11'den görülebileceği gibi, I-enkesitli kirişlerin başlıklarının genişlik/kalınlık oranları (λ_f);

$$\lambda_f = \frac{b}{t} = \frac{b/2}{t_f} < \frac{65}{\sqrt{F_y}} = \lambda_{pf} \quad (1.13)$$

ise kiriş başlıkları kompakttır. Benzer şekilde, I-enkesitli kirişlerin gövdelerinin genişlik/kalınlık oranları (λ_w);

$$\lambda_w = \frac{d}{t} = \frac{d}{t_w} < \frac{640}{\sqrt{F_y}} = \lambda_{pw} \quad (1.14)$$

ise kiriş kompakt gövdelidir. AISC (1989)'a göre, kompakt enkesitli elemanlar için eğilme emniyet gerilmesi (F_b), yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesi (F_y) cinsinden Denklem (1.15)'te verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmalıdır.

$$F_b = 0,66F_y \quad (1.15)$$

Description of Element	Width-Thickness Ratio	Limiting Width-Thickness Ratios	
		Compact	Noncompact ^e
Flanges of I-shaped rolled beams and channels in flexure ^a	b/t	$65/\sqrt{F_y}$	$95/\sqrt{F_y}$
Flanges of I-shaped welded beams in flexure	b/t	$65/\sqrt{F_y}$	$95/\sqrt{F_y/k_c}$ ^e
Outstanding legs of pairs of angles in continuous contact; angles or plates projecting from rolled beams or columns; stiffeners on plate girders	b/t	NA	$95/\sqrt{F_y}$
Angles or plates projecting from girders, built-up columns or other compression members; compression flanges of plate girders	b/t	NA	$95/\sqrt{F_y/k_c}$
Stems of tees	d/t	NA	$127/\sqrt{F_y}$
Unstiffened elements simply supported along one edge, such as legs of single-angle struts, legs of double-angle struts with separators and cross or star-shaped cross sections	b/t	NA	$76/\sqrt{F_y}$
Flanges of square and rectangular box and hollow structural sections of uniform thickness subject to bending or compression ^d ; flange cover plates and diaphragm plates between lines of fasteners or welds	b/t	$190/\sqrt{F_y}$	$238/\sqrt{F_y}$
Unsupported width of cover plates perforated with a succession of access holes ^b	b/t	NA	$317/\sqrt{F_y}$
All other uniformly compressed stiffened elements, i.e., supported along two edges	b/t h/t_w	NA	$253/\sqrt{F_y}$
Webs in flexural compression ^a	d/t	$640/\sqrt{F_y}$	—
	h/t_w	—	$760/\sqrt{F_b}$
Webs in combined flexural and axial compression	d/t_w	for $f_a/F_y \leq 0.16$ $\frac{640}{\sqrt{F_y}} \left(1 - 3.74 \frac{f_a}{F_y}\right)$	—
		for $f_a/F_y > 0.16$ $257/\sqrt{F_y}$	
	h/t_w	—	$760/\sqrt{F_b}$

Şekil 1.11. AISC (1989) yönetmeliğinde basınç etkisi altındaki enkesit parçalarının genişlik/kalınlık oranları için verilen sınır değerler

Kompakt olmayan başlığa sahip enkesitler için ise basınç emniyet gerilmesi, Denklem (1.16)'daki gibi tanımlanmıştır;

$$F_b = F_y \left[0,79 - 0,002 \frac{b}{2t_f} \sqrt{F_y} \right] \quad (1.16)$$

Çalışmada incelenen kiriş enkesitli profillerin başlık ve gövdelerinin genişlik/kalınlık oranları (narinlikleri), Tablo 1.1’de (d/t_w ve b/t_f) listelenmiştir. $F_y = 36$ ksi için sınır narinlikler $\lambda_{pf} = 10,83$, $\lambda_{pw} = 106,67$; $F_y = 50$ ksi için $\lambda_{pf} = 9,19$, $\lambda_{pw} = 90,50$ ’dir. Tablo 1.1’de verilen narinlikler, sınır narinliklerle karşılaştırıldığında, W 8 x 10 enkesitli kirişin haricindeki Amerikan çelik kirişlerin tamamının hem gövdelerinin hem de başlıklarının kompakt olduğu; sadece $F_y = 50$ ksi için W 8 x 10 enkesitli kirişin kompakt olmayan ($9,62 > 9,19$) başlıklara sahip olduğu görülmüştür. Ancak bu profil için de Denklem (1.16)’dan hesaplanan F_b değeriyle Denklem (1.15)’ten hesaplanan F_b değerinin birbirlerine çok yakın olduğu, bu nedenle, pratik tasarım formülü türetilirken Tablo 1.1’deki tüm kesitler için Denklem (1.15)’in kullanılmış olma ihtimalinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durumda, $F_y = 36$ ksi için; $F_b = 0,66F_y = 23,76 \approx 24$ ksi, $F_y = 50$ ksi için; $F_b = 0,66F_y = 33$ ksi olmaktadır.

Eğilme momenti kapasitesi (M), kuvvetli ekseninde elastik mukavemet momenti ile basınç emniyet gerilmesi çarpılarak hesaplanabilir.

$$M = F_b S_x \quad (1.17)$$

$F_y = 36$ ksi için elde edilen F_b değeri ve Denklem (1.10)’daki S_x formülü Denklem (1.17)’de kullanılıp enkesit derinliği in’ten ft’e dönüştürülürse, moment dayanımı;

$$M = 24S_x \approx 24 \frac{W_t d}{10} \frac{1}{12} = \frac{W_t d}{5} \quad (1.18)$$

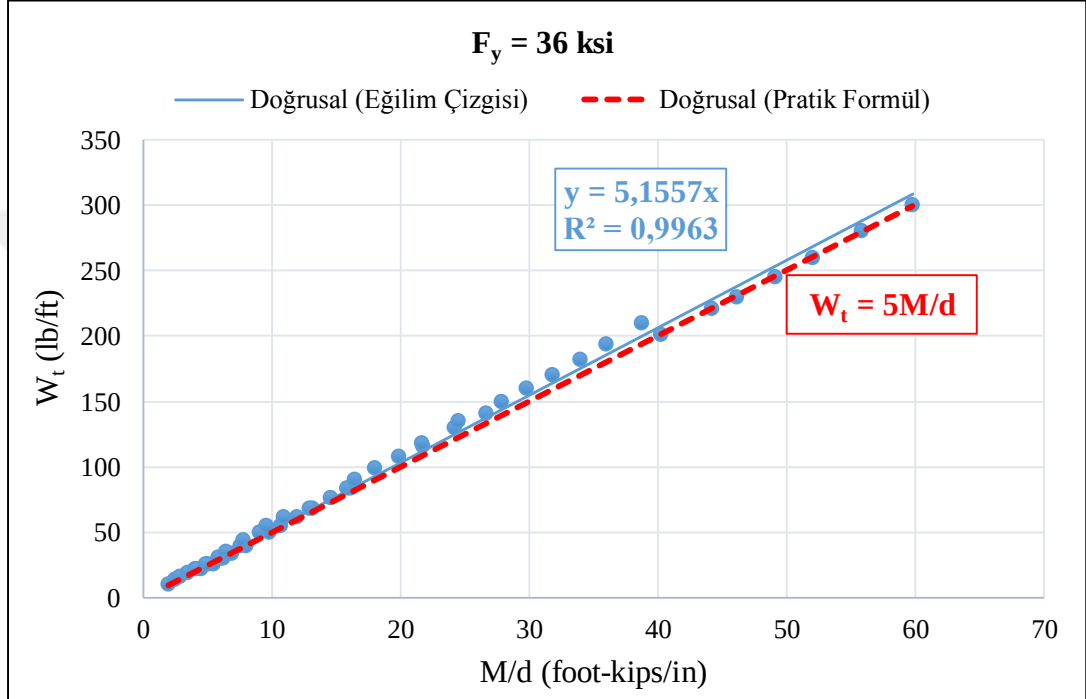
olarak elde edilir. Denklem (1.18)’de, G, M ve d cinsinden yazıldığında, Socrates ve Ruddy [11]’nin önerdiği formül elde edilir;

$$W_t \approx \frac{5M}{d} \quad (1.19)$$

Kirişe gelen momentin bilindiği durumlarda, o momenti taşıyabilecek kirişin yaklaşık birim boy kütle değeri Denklem (1.19) kullanılarak hesaplanabilir. Denklem (1.18) ve (1.19)’da, M ‘ft.kips’, W_t ‘lb/ft’, d ise ‘in’ cinsinden kullanılmalıdır.

Socrates ve Ruddy, makalede [11], Denklem (1.19)’daki formülü doğrusal regresyon analizi yaparak elde ettiklerini belirtmiştir. Ekonomik Amerikan kiriş kesitlerinin

‘gerçek’ moment kapasiteleri; ‘gerçek’ elastik mukavemet momentleri Denklem (1.15) ve Denklem (1.17) kullanılarak hesaplanmış; birim boy kütle (W_t) bağımlı değişken, ‘gerçek’ moment kapasitesinin enkesit derinliğine oranı (M/d) bağımsız değişken olacak Şekil 1.12’de çizdirilmiştir. Ayrıca, W_t ile M/d arasında doğrusal regresyon analizi yapılmış, elde edilen regresyon eğrisi (eğilim çizgisi) pratik tasarım formülüyle Şekil 1.12’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.12. $F_y=36$ ksi için, Amerikan çelik kirişlerde birim boy kütle, moment dayanımı ve kesit derinliğiyle ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle elde edilmesi ve pratik formülle karşılaştırılması

Şekil 1.12’deki grafikten görüldüğü gibi, W_t ile M/d arasındaki oran için 5,15 değerinin kullanılması durumunda daha isabetli sonuçlar elde edilebiliyor olmasına karşın, araştırmacılar akılda kalıcılığı kolaylaştırmak amacıyla oranı 5,0 olarak önermişlerdir.

Denklem (1.18)’deki pratik formülle hesaplanan moment dayanımlarıyla enkesitlerin Denklem (1.15) ve (1.17) kullanılarak elde edilen ‘gerçek’ dayanımları karşılaştırıldığında, hata oranlarının güvensiz yönde en fazla %16,8 ($W 24 \times 55$), güvenli yönde en fazla %6,13 ($W 12 \times 30$) olduğu tespit edilmiştir. $F_y = 50$ ksi için, moment kapasitesi benzer şekilde elde edilebilir;

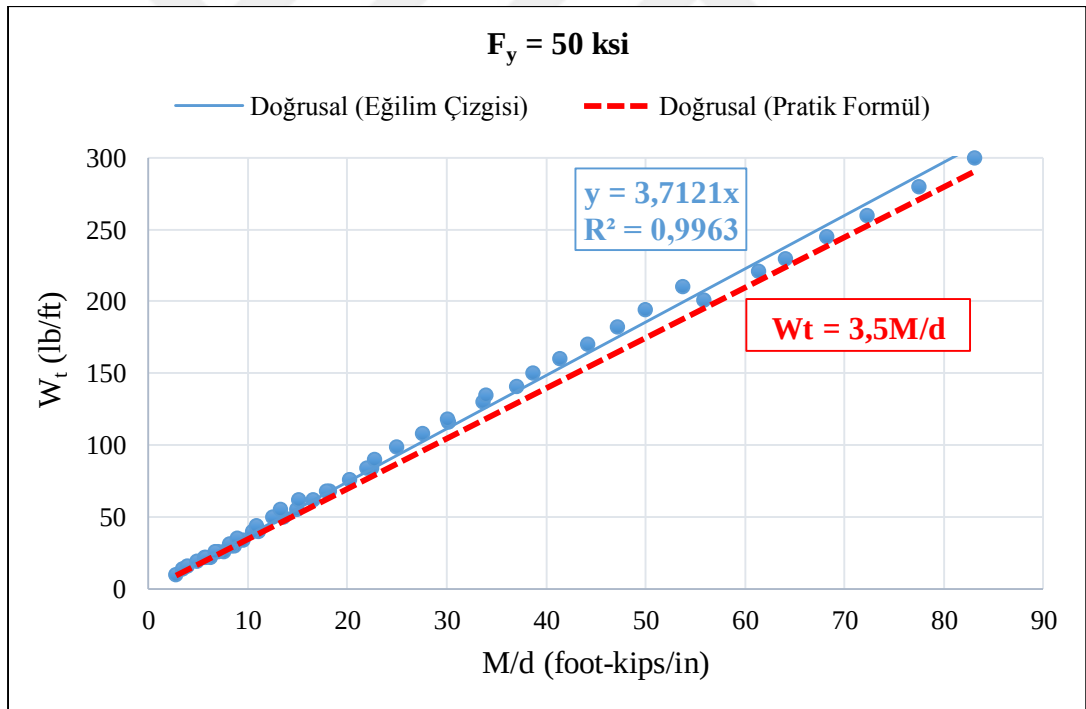
$$M = 33S_x = 33 \frac{W_t d}{10} \frac{1}{12} = \frac{W_t d}{3,63} \quad (1.20)$$

Hatırlamayı kolaylaştırmak amacıyla, Denklem (1.20)'de verilen formül düzenlendiğinde, Socrates ve Ruddy [11]'nin önerdiği pratik tasarım formülü elde edilebilir;

$$M \approx \frac{W_t d}{3,5} \Rightarrow W_t \approx \frac{3,5M}{d} \quad (1.21)$$

Bu formüller uygulanırken de M 'ft.kips', Wt 'lb/ft' ve d ise 'in' cinsinden kullanılması gerektiği unutulmamalıdır.

$F_y = 50$ ksi için de doğrusal regresyon analizi yapılarak, regresyon eğrisiyle pratik tasarım formülünden elde edilen eğri Şekil 1.13'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.13. $F_y=50$ ksi için, Amerikan çelik kirişlerde birim boy kütlenin, moment dayanımı ve kesit derinliğiyle ilişkisinin doğrusal regresyon analizi elde edilmesi ve pratik formülle karşılaştırılması

Grafikten de görülebileceği gibi, pratik formülde, daha isabetli sonuçlar veren bir katsayı seçmek yerine araştırmacıların akılda kalıcılığı kolaylaştırmak amacıyla ilgili katsayıyı 3,5 olarak aldıkları görülmektedir. Denklem (1.21)'deki pratik tasarım

formülü ile hesaplanan moment dayanımlarıyla ‘gerçek’ dayanımlar arasındaki farklar incelendiğinde, pratik formülün dayanımları güvensiz yönde en fazla %20,1 (W 24 x 55), güvenli yönde en fazla %3,45 (W 12 x 30) hata oranıyla tahmin ettiği gözlenmiştir. Oluşan hata oranları incelendiğinde hataların genel olarak güvensiz tarafta kaldığı görülmüştür ancak pratik formüllerin esas kullanım amacının elemene etkiyen moment değeri ile enkesit derinliğinin bilinmesi durumunda olası en küçük birim boy kütleyi hesaplayarak daha büyük bir kütleye sahip profili seçmek olduğu unutulmamalıdır.

1.5. Kolonların Eksenel Kapasitesi (P)

Socrates ve Ruddy [11], geniş başlıklı I-enkesitli Amerikan kolonlarının eksenel kapasitelerinin hesabı için de pratik tasarım formülleri geliştirmişlerdir. Bu formüllerde, eksenel kolon kapasitesi P ile kolon narinliği KL/r; (burada KL elemanın etkin burkulma boyu, r ise asal atalet yarıçapıdır.) arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu kabul etmişlerdir.

Socrates ve Ruddy [11]’nin, kolon kapasitesi için önerdiği pratik formülü çıkarırken, Tablo 1.2’de listelenen kolon enkesitlerini kullandıkları ve AISC (1989) yönetmeliğinde [14] Bölüm E’de tanımlanan tasarım esaslarını dikkate aldıkları düşünülmektedir. İlgili yönetmeliğin belirtilen bölümünde, kompakt ya da kompakt olmayan enkesitlere sahip, eksenel yüklü prizmatik elemanlar için tasarım esasları tanımlanmıştır. Şekil 1.11’den görülebileceği gibi, I-enkesitli bir kolonun başlık narinliği (λ_f);

$$\lambda_f = \frac{b/2}{t_f} < \frac{76}{\sqrt{F_y}} = \lambda_{rf} \quad (1.22)$$

ise başlıklar narin değildir. Benzer şekilde, aynı kolonun gövde narinliği (λ_w);

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w} = \frac{d - 2t_f}{t_w} < \frac{253}{\sqrt{F_y}} = \lambda_{rw} \quad (1.23)$$

ise gövde narin değildir. Çalışmada incelenen kolon enkesitli profillerin başlık ve gövdeleri için genişlik/kalınlık oranları hesaplanmıştır. Elde edilen en büyük değerler $\lambda_{f,max}=10,3$ (W14 x 15 x 90) ve $\lambda_{w,max}=36,3$ (W14 x 8 x 43)’tür.

$F_y=50$ ksi için sınır narinlikler, $\lambda_{rf}=10,8$, $\lambda_{rw}=35,8$ olup incelenen Amerikan kolon kesitleri arasında narin başlıklı kesit olmadığı görülmektedir. Yalnız bir kolon kesitinin gövde narinliği sınır değerden büyük çıkmıştır. Ancak, bu kesitin gövde narinliğinin de sınır değere çok yakın olduğu göz önünde bulundurulduğunda, AISC (1989) – Bölüm E’nin incelenen bütün kolon kesitleri için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Socrates ve Ruddy [11]’de verilen pratik formülde de, kolon kapasiteleri (P), basınç emniyet gerilmesi (F_a) ile kayıpsız enkesit alanı (A) çarpılarak hesaplanmaktadır. Buradan, araştırmacıların incelenen bütün kolon kesitlerinde, yerel burkulma sınır durumunu göz ardı ettiği sonucuna varılabilir.

AISC (1989) – Bölüm E.1, basınç elemanlarının narinlik oranlarının üst sınırı için Bölüm B7’yi işaret etmektedir. İlgili bölümde, basınç elemanlarının narinlik oranlarının 200’ü geçmemesi önerilmektedir.

$$\frac{KL}{r} \leq 200 \quad (1.24)$$

Narin enkesit parçası içermeyen eksenel yüklü basınç elemanları için basınç emniyet gerilmesi F_a ise Bölüm E2’de tanımlanmıştır. Yönetmelik’te F_a için iki farklı denklem sunulmuştur. Hangi denklemin kullanılacağı, kolonun en büyük KL/r değerinin, C_c sınır değerinden küçük ya da büyük olmasına bağlıdır. C_c aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır.

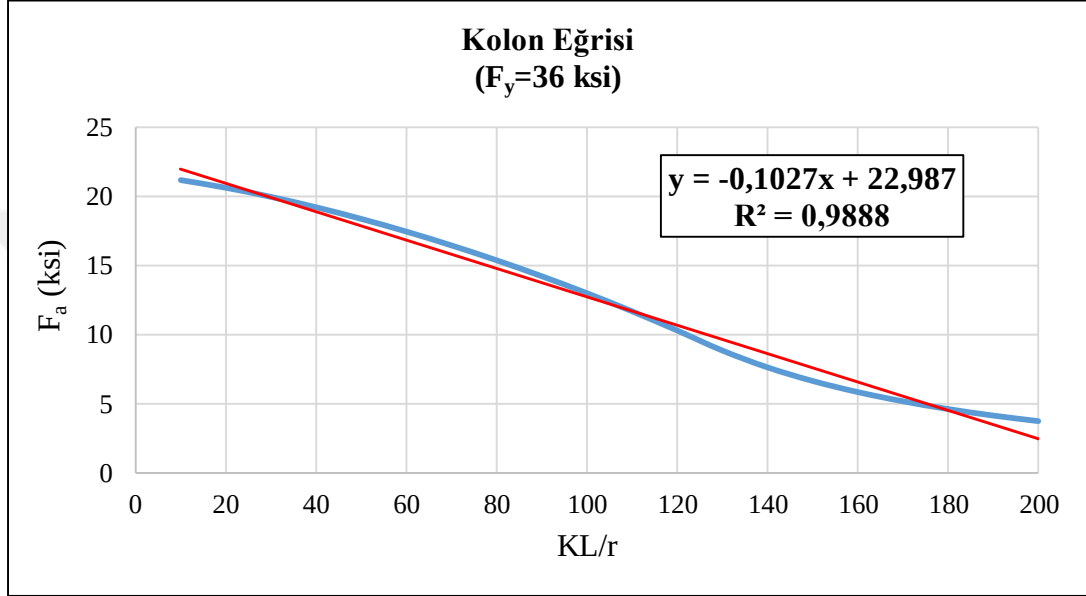
$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (1.25)$$

F_a , KL/r değerinin C_c ’den küçük olduğu durumlarda Denklem (1.26), büyük olduğu durumlarda ise Denklem (1.27) kullanılarak hesaplanmalıdır.

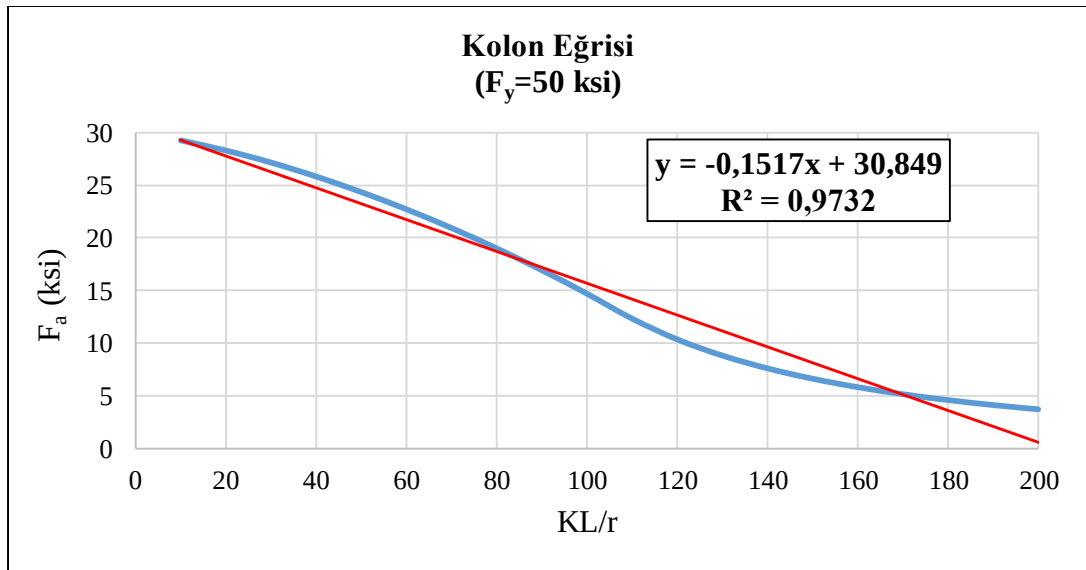
$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2} \right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}} \quad (1.26)$$

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(KL/r)^2} \quad (1.27)$$

Socrates ve Ruddy [11], F_a için, Denklem (1.26) ve Denklem (1.27)'de tanımlanan ve KL/r oranına bağlı olan iki parçalı eğri yerine, doğrusal bir ilişki önermişlerdir. Şekil 1.14 ve Şekil 1.15'te, sırayla $F_y = 36$ ksi ve $F_y = 50$ ksi için, Denklem (1.26) ve Denklem (1.27) kullanılarak hesaplanan F_a değerlerinin KL/r oranlarıyla değişimi gösterilmektedir. Grafiklere, doğrusal regresyon eğrileri ve denklemleri de eklenmiştir.



Şekil 1.14. $F_y=36$ ksi için kolon tasarım eğrisi ve bu eğri için doğrusal regresyon analizinden elde edilen eğilim çizgisi ve denklemi



Şekil 1.15. $F_y=50$ ksi için kolon tasarım eğrisi ve bu eğri için doğrusal regresyon analizinden elde edilen eğilim çizgisi ve denklemi

Socrates ve Ruddy [11]'nin, $F_y=36$ ksi çelik kaliteli kolonların kapasitesi ($P_{F_y=36\text{ksi}}$) için önerdikleri pratik formülde;

$$P_{F_y=36 \text{ ksi}} \approx A \left(22 - 0,10 \frac{KL}{r} \right) \quad (1.28)$$

Şekil 1.14'te gösterilen eğilim çizgisinin denklemini, $F_y = 50$ ksi çelik kaliteli kolonların kapasitesi ($P_{F_y=50 \text{ ksi}}$) için önerdikleri pratik formülde;

$$P_{F_y=50 \text{ ksi}} \approx A \left(30 - 0,15 \frac{KL}{r} \right) \quad (1.29)$$

ise Şekil 1.15'te gösterilen eğilim çizgisinin denklemini neredeyse hiç değiştirmeden kullandıkları görülmektedir.

Basınç emniyet gerilmesi için önerilen ve Denklem (1.28) ve Denklem (1.29)'de sunulan pratik formüllerden hesaplanan değerlerin, 'gerçek' kapasite değerlerinden sapmaları incelendiğinde, narinlik oranının 170'i aştığı durumlarda hata oranlarının çok büyük değerlere (%27'den %100'e varan) ulaştığı gözlenmiştir. KL/r oranının 170'ten büyük olduğu durumlarda bu denklemlerin kullanılmaması gerektiği düşünülmektedir. Ancak KL/r oranları 170'ten küçükken, $F_y = 36$ ksi için en büyük hata oranları güvensiz yönde %5,47, güvenli yönde %8,83, $F_y = 50$ ksi için ise güvensiz yönde %18,8, güvenli yönde %12,9 olarak tespit edilmiştir.

2. I-ENKESİTLİ AVRUPA ÇELİK HADDE PROFİLLERİ İÇİN PRATİK TASARIM FORMÜLLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Socrates ve Ruddy [11] tarafından önerilen pratik formüllerin nasıl elde edildiği ve bu formüllerin hangi oranda isabetli sonuçlar verdiği Bölüm 1’de bahsedilmişti. Bu bölümde ise ülkemizde yaygın şekilde kullanılan I-enkesitli Avrupa hadde profilleri için Bölüm 1’de uygulanan yöntemler kullanılarak benzer pratik formüller geliştirilmiş; geliştirilen pratik formüllerden hesaplanan değerlerin, “gerçek” değerlere göre ne kadar güvenli/güvensiz tarafta kaldığı belirlenmiştir. Bölüm 1’de olduğu gibi, pratik formüllerle hesaplanan değerlerin, “gerçek” değerlerden küçük olduğu durumlarda güvenli; büyük olduğu durumlarda ise güvensiz olduğu kabul edilmiştir.

Pratik dayanım formülleri çıkarılırken, ülkemizde 2016 yılında yürürlüğe giren ve 2018 yılında güncellenen Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (ÇYTHYAY) [12] kullanılmıştır. ÇYTHYAY [12]’de çelik yapı elemanlarının ve birleşimlerinin tasarımında Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) veya Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT) yöntemlerinden birinin kullanılabileceği belirtilmektedir. İki yöntem arasındaki en belirgin fark, ikinci yöntemde, emniyet gerilmeleri yönteminde olduğu gibi, yük katsayılarının kullanılmıyor olmasıdır. 2018 yılında yayınlanan ve 2019 yılında yürürlüğe giren, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) [15], moment aktaran kiriş-kolon birleşimlerinin, kompozit kolonlu taşıyıcı sistemlerin ve temellerin tasarımında yalnız YDKT yönteminin kullanılmasına izin vermektedir. Bu nedenle, bu tezde eğilme momenti ve eksenel basınç kuvveti dayanımları için pratik formüller çıkarılırken YDKT yöntemi kullanılmıştır. Bununla birlikte, GKT yöntemi kullanılarak hesaplanan “güvenli” dayanımların, YDKT yöntemi kullanılarak hesaplanan “tasarım” dayanımlarının, güvenlik katsayılarının dayanım katsayılarına oranı (Ω/ϕ) olan 1,5 değerine bölünmesiyle elde edilebildiği dikkate alındığında, çalışmada önerilen tasarım formüllerinin GKT yönteminde de kolaylıkla kullanılabileceği vurgulanmalıdır.

Bu bölümde elde edilen pratik formüller sadece I-enkesitli Avrupa hadde profilleri için geçerli olup, ilgili profiller ArcelorMittal firmasının ürün kataloglarında [19] listelenen IPE, IPN, HEA, HEB, HEM ve HD profillerden seçilmiştir. Ayrıca, pratik dayanım formülleri ÇYTHYEY [12]'de tanımlanan üç çelik kalitesi; S235, S275, S355, için ayrı ayrı elde edilmiştir.

Bu bölümde çıkarılan pratik formüller, Bölüm 1'den farklı olarak, SI birim sistemi kullanılmıştır. Enkesit boyutları mm, birim boy kütle kg/mm cinsinden kullanıldığında; enkesit alanı mm², atalet momentleri mm⁴, mukavemet momentleri mm³, atalet yarıçapları mm, kritik gerilme MPa, eğilme momenti dayanımı kNm, aksenal basınç kuvveti dayanımı ise kN cinsinden elde edilmektedir. Formülasyonlarda, SI birim sisteminin tercih edilmesinin nedeni, ÇYTHYEY [12]'nin de bu birim sistemini kullanıyor olmasındandır.

2.1. Çalışmada Ele Alınan I-Enkesitli Avrupa Hadde Profiller

Çalışmada, ArcelorMittal çelik kesitler ve çubuklar kataloğunda [19] sunulan ve ülkemizde yaygın şekilde kullanıldığı düşünülen I-enkesitli (IPE, IPN, HEA, HEB, HEM ve HD) profiller ele alınmıştır. İlgili profiller, Tablo 2.1'de sunulmuştur.

Tablo 2.1'de, çalışmada ele alınan profillerin asal atalet yarıçaplarının oranı (i_x/i_y), kesit derinliklerinin başlık genişliklerine oranı (d/b), düz gövde yüksekliklerinin gövde kalınlıklarına oranı (h/t_w) ve yarım başlık genişliklerinin başlık kalınlıklarına oranı ($b/2t_f$) da sunulmuştur. Tablo 2.1'de listelenen son iki oran, ÇYTHYEY [12]'de, yerel burkulma sınır durumu için kesitlerin sınıflandırılmasında kullanılan başlık ve gövde narinlikleridir. Bölüm 1'de olduğu gibi, kesitin geometrik merkezinden geçen asal eksenler, x ve y eksenleri olarak adlandırılmış, başlıklara paralel (güçlü) eksen için x, dik (zayıf) eksen için ise y simgeleri kullanılmıştır. ÇYTHYEY [12]'de de, kesitlerin asal eksenleri için aynı simgeler kullanılmaktadır.

Bölüm 1.1'de, geniş başlıklı I-enkesitli Amerikan profillerin 'kiriş' ve 'kolon' enkesiti olarak sınıflandırılmasında kesitlerin i_x/i_y ve d/b oranlarının etkili olduğu belirlenmişti. Kiriş kesitlerinde i_x/i_y oranının 3,22, d/b oranının ise 1,77 değerinin altına düşmediği, kolon kesitlerinde ise bu oranların sırayla 3,08 ve 1,73 değerlerini aşmadıkları gözlenmişti.

Tablo 2.1. Tezde incelenen I-enkesitli Avrupa hadde profilleri ve bazı geometrik özellikleri

Kesit Adı	i_x/i_y	d/b	h/t _w	b/2t _f	Kesit Adı	i_x/i_y	d/b	h/t _w	b/2t _f
IPE 80	3,09	1,74	15,68	4,42	IPN 80	3,52	1,90	15,13	3,56
IPE 100	3,28	1,82	18,20	4,82	IPN 100	3,75	2,00	16,82	3,68
IPE 120	3,38	1,88	21,23	5,08	IPN 120	3,91	2,07	18,12	3,77
IPE 140	3,48	1,92	23,87	5,29	IPN 140	4,01	2,12	19,14	3,84
IPE 160	3,58	1,95	25,44	5,54	IPN 160	4,13	2,16	19,97	3,89
IPE 180	3,62	1,98	27,55	5,69	IPN 180	4,21	2,20	20,64	3,94
IPE 200	3,69	2,00	28,39	5,88	IPN 200	4,28	2,22	21,21	3,98
IPE 220	3,67	2,00	30,10	5,98	IPN 220	4,36	2,24	21,70	4,02
IPE 240	3,71	2,00	30,71	6,12	IPN 240	4,36	2,26	22,13	4,05
IPE 270	3,71	2,00	33,27	6,62	IPN 260	4,48	2,30	22,22	4,01
IPE 300	3,73	2,00	35,01	7,01	IPN 280	4,53	2,35	22,29	3,91
IPE 330	3,86	2,06	36,13	6,96	IPN 300	4,65	2,40	22,37	3,86
IPE 360	3,96	2,12	37,33	6,69	IPN 320	4,76	2,44	22,43	3,79
IPE 400	4,20	2,22	38,49	6,67	IPN 340	4,82	2,48	22,48	3,74
IPE 450	4,49	2,37	40,30	6,51	IPN 360	4,90	2,52	22,32	3,67
IPE 500	4,73	2,50	41,76	6,25	IPN 380	4,97	2,55	22,39	3,63
IPE 550	5,03	2,62	42,13	6,10	IPN 400	5,02	2,58	22,42	3,59
IPE 600	5,21	2,73	42,83	5,79	IPN 450	5,16	2,65	22,44	3,50
					IPN 500	5,27	2,70	22,46	3,43
					IPN 550	5,37	2,75	23,45	3,33
					IPN 600	5,44	2,79	22,49	3,32
Kesit Adı	i_x/i_y	d/b	h/t _w	b/2t _f	Kesit Adı	i_x/i_y	d/b	h/t _w	b/2t _f
HD 260 x 54.1	1,69	0,94	27,23	13,68	HD 360 x 162	1,67	0,98	21,80	8,51
HD 260 x 68.2	1,69	0,96	23,60	10,40	HD 360 x 179	1,67	0,99	19,33	7,80
HD 260 x 93.0	1,71	1,00	17,70	7,43	HD 360 x 196	1,67	0,99	17,68	7,14
HD 260 x 114	1,71	1,02	14,16	6,09	HD 400 x 187	1,59	0,94	19,33	8,15
HD 260 x 142	1,72	1,05	11,42	5,00	HD 400 x 216	1,59	0,95	16,76	7,11
HD 260 x 172	1,73	1,08	9,83	4,12	HD 400 x 237	1,59	0,96	15,34	6,54
HD 260 x 225	1,77	1,14	7,38	3,23	HD 400 x 262	1,60	0,97	13,74	5,98
HD 260 x 299	1,80	1,21	5,71	2,53	HD 400 x 287	1,60	0,98	12,83	5,45
HD 320 x 74.2	1,82	1,00	28,13	13,64	HD 400 x 314	1,61	1,00	11,65	5,06
HD 320 x 97.6	1,81	1,03	25,00	9,68	HD 400 x 347	1,61	1,01	10,66	4,62
HD 320 x 127	1,83	1,07	19,57	7,32	HD 400 x 382	1,62	1,02	9,73	4,23
HD 320 x 158	1,83	1,09	15,52	5,94	HD 400 x 421	1,63	1,04	8,84	3,89
HD 320 x 198	1,84	1,12	12,50	4,78	HD 400 x 463	1,64	1,06	8,10	3,59
HD 320 x 245	1,86	1,16	10,71	3,86	HD 400 x 509	1,65	1,07	7,42	3,32
HD 320 x 300	1,88	1,20	8,33	3,26	HD 400 x 551	1,65	1,09	6,90	3,09
HD 360 x 134	1,66	0,96	25,89	10,25	HD 400 x 592	1,67	1,10	6,44	2,91
HD 360 x 147	1,66	0,97	23,58	9,34	HD 400 x 634	1,67	1,12	6,09	2,75

Tablo 2.1. (Devam) Tezde incelenen I-enkesitli Avrupa hadde profilleri ve bazı geometrik özellikleri

Kesit Adı	i_x/i_y	d/b	h/t _w	b/2t _f	Kesit Adı	i_x/i_y	d/b	h/t _w	b/2t _f
HE 100 A	1,62	0,96	11,20	6,25	HE 340 A	1,93	1,10	25,58	9,09
HE 120 A	1,62	0,95	14,80	7,50	HE 360 A	2,05	1,17	26,10	8,57
HE 140 A	1,63	0,95	16,73	8,24	HE 400 A	2,29	1,30	27,09	7,89
HE 160 A	1,65	0,95	17,33	8,89	HE 450 A	2,60	1,47	29,91	7,14
HE 180 A	1,65	0,95	20,33	9,47	HE 500 A	2,90	1,63	32,50	6,52
HE 200 A	1,66	0,95	20,62	10,00	HE 550 A	3,22	1,80	35,04	6,25
HE 220 A	1,66	0,95	21,71	10,00	HE 600 A	3,54	1,97	37,38	6,00
HE 240 A	1,68	0,96	21,87	10,00	HE 650 A	3,86	2,13	39,56	5,77
HE 260 A	1,69	0,96	23,60	10,40	HE 700 A	4,20	2,30	40,14	5,56
HE 280 A	1,69	0,96	24,50	10,77	HE 800 A	4,90	2,63	44,93	5,36
HE 300 A	1,70	0,97	24,47	10,71	HE 900 A	5,58	2,97	48,13	5,00
HE 320 A	1,81	1,03	25,00	9,68	HE 1000 A	6,29	3,30	52,61	4,84
HE 100 B	1,64	1,00	9,33	5,00	HE 340 B	1,95	1,13	20,25	6,98
HE 120 B	1,65	1,00	11,38	5,45	HE 360 B	2,06	1,20	20,88	6,67
HE 140 B	1,66	1,00	13,14	5,83	HE 400 B	2,31	1,33	22,07	6,25
HE 160 B	1,67	1,00	13,00	6,15	HE 450 B	2,61	1,50	24,57	5,77
HE 180 B	1,68	1,00	14,35	6,43	HE 500 B	2,91	1,67	26,90	5,36
HE 200 B	1,68	1,00	14,89	6,67	HE 550 B	3,24	1,83	29,20	5,17
HE 220 B	1,69	1,00	16,00	6,88	HE 600 B	3,56	2,00	31,35	5,00
HE 240 B	1,70	1,00	16,40	7,06	HE 650 B	3,88	2,17	33,38	4,84
HE 260 B	1,71	1,00	17,70	7,43	HE 700 B	4,22	2,33	34,24	4,69
HE 280 B	1,71	1,00	18,67	7,78	HE 800 B	4,91	2,67	38,51	4,55
HE 300 B	1,71	1,00	18,91	7,89	HE 900 B	5,59	3,00	41,62	4,29
HE 320 B	1,83	1,07	19,57	7,32	HE 1000 B	6,29	3,33	45,68	4,17
HE 100 M	1,69	1,13	4,67	2,65	HE 340 M	1,97	1,22	11,57	3,86
HE 120 M	1,70	1,11	5,92	3,00	HE 360 M	2,08	1,28	12,43	3,85
HE 140 M	1,69	1,10	7,08	3,32	HE 400 M	2,32	1,41	14,19	3,84
HE 160 M	1,70	1,08	7,43	3,61	HE 450 M	2,61	1,56	16,38	3,84
HE 180 M	1,70	1,08	8,41	3,88	HE 500 M	2,91	1,71	18,57	3,83
HE 200 M	1,71	1,07	8,93	4,12	HE 550 M	3,22	1,87	20,86	3,83
HE 220 M	1,71	1,06	9,81	4,35	HE 600 M	3,54	2,03	23,14	3,81
HE 240 M	1,73	1,09	9,11	3,88	HE 650 M	3,85	2,19	25,43	3,81
HE 260 M	1,73	1,08	9,83	4,12	HE 700 M	4,18	2,36	27,71	3,80
HE 280 M	1,73	1,08	10,59	4,36	HE 800 M	4,87	2,69	32,10	3,79
HE 300 M	1,75	1,10	9,90	3,97	HE 900 M	5,56	3,01	36,67	3,78
HE 320 M	1,86	1,16	10,71	3,86	HE 1000 M	6,25	3,34	41,33	3,78

Çalışmada, benzer bir sınıflandırmanın Tablo 2.1'deki profiller için de yapılabileceği fark edilmiştir. Ülkemizde 'kiriş' kesiti olarak sıkça kullanılan ve bu çalışmada incelenen IPE ve IPN kesitlerinde, i_x/i_y oranının 3,08'ten, d/b oranının ise 1,73'ten büyük olduğu belirlenmiştir. Bu değerler göz önünde bulundurularak, Tablo 2.1'deki enkesitlerden, $i_x/i_y > 3,08$ ve $d/b > 1,73$ olanlar 'kiriş' (Tablo 2.2); $i_x/i_y < 3,08$ ve $d/b < 1,73$ olanlar 'kolon' (Tablo 2.3) kesiti olarak sınıflandırılmıştır.

Tablo 2.2. 'Kiriş' kesiti olarak sınıflandırılan I-enkesitli Avrupa hadde profilleri

'Kiriş' Kesitleri ($i_x/i_y > 3,08$ ve $d/b > 1,73$)				
IPE 80	IPE 360	IPN 200	IPN 500	HE 650 B
IPE 100	IPE 400	IPN 220	IPN 550	HE 700 B
IPE 120	IPE 450	IPN 240	IPN 600	HE 800 B
IPE 140	IPE 500	IPN 260	HE 550 A	HE 900 B
IPE 160	IPE 550	IPN 280	HE 600 A	HE 1000 B
IPE 180	IPE 600	IPN 300	HE 650 A	HE 550 M
IPE 200	IPN 80	IPN 320	HE 700 A	HE 600 M
IPE 220	IPN 100	IPN 340	HE 800 A	HE 650 M
IPE 240	IPN 120	IPN 360	HE 900 A	HE 700 M
IPE 270	IPN 140	IPN 380	HE 1000 A	HE 800 M
IPE 300	IPN 160	IPN 400	HE 550 B	HE 900 M
IPE 330	IPN 180	IPN 450	HE 600 B	HE 1000 M

Tablo 2.3. 'Kolon' kesiti olarak sınıflandırılan I-enkesitli Avrupa hadde profilleri

'Kolon' Kesitleri ($i_x/i_y < 3,08$ ve $d/b < 1,73$)				
HE 100 A	HE 100 B	HE 100 M	HD 260 x 54.1	HD 360 x 162
HE 120 A	HE 120 B	HE 120 M	HD 260 x 68.2	HD 360 x 179
HE 140 A	HE 140 B	HE 140 M	HD 260 x 93.0	HD 360 x 196
HE 160 A	HE 160 B	HE 160 M	HD 260 x 114	HD 400 x 187
HE 180 A	HE 180 B	HE 180 M	HD 260 x 142	HD 400 x 216
HE 200 A	HE 200 B	HE 200 M	HD 260 x 172	HD 400 x 237
HE 220 A	HE 220 B	HE 220 M	HD 260 x 225	HD 400 x 262
HE 240 A	HE 240 B	HE 240 M	HD 260 x 299	HD 400 x 287
HE 260 A	HE 260 B	HE 260 M	HD 320 x 74.2	HD 400 x 314
HE 280 A	HE 280 B	HE 280 M	HD 320 x 97.6	HD 400 x 347
HE 300 A	HE 300 B	HE 300 M	HD 320 x 127	HD 400 x 382
HE 320 A	HE 320 B	HE 320 M	HD 320 x 158	HD 400 x 421
HE 340 A	HE 340 B	HE 340 M	HD 320 x 198	HD 400 x 463
HE 360 A	HE 360 B	HE 360 M	HD 320 x 245	HD 400 x 509
HE 400 A	HE 400 B	HE 400 M	HD 320 x 300	HD 400 x 551
HE 450 A	HE 450 B	HE 450 M	HD 360 x 134	HD 400 x 592
HE 500 A	HE 500 B	HE 500 M	HD 360 x 147	HD 400 x 634

Bu durumda Tablo 2.1’deki tüm IPE, IPN kesitleri ile numaraları 500’den büyük HEA, HEB ve HEM kesitleri ‘kiriş’, tüm HD kesitleri ile numaraları 500’e eşit veya küçük olan HEA, HEB ve HEM kesitleri ‘kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılmıştır. İncelenen kesitlerin arasında, tanımlanan iki koşuldan yalnız birini sağlayan herhangi bir kesite rastlanmamıştır. Bunun da çalışmada önerilen sınıflandırma yöntemini desteklediği düşünülmektedir.

2.2. Kiriş Derinliği İçin Pratik Tasarım Formülleri

Çelik kirişlerin ön tasarımında derinliğin öngörülmesi tasarımcıya önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Socrates ve Ruddy [11] tarafından Bölüm 1.2’de çatı ve döşeme kirişleriyle kompozit kirişler için sunulan kiriş boyuna bağlı enkesit derinliği formülleri, SI birim sistemine dönüştürülerek, sırayla Denklem (2.1), Denklem (2.2), Denklem (2.3)’te sunulmuştur.

$$d_{\text{çatı}} = \frac{L}{24} \quad (2.1)$$

$$d_{\text{döşeme}} = \frac{L}{20} \quad (2.2)$$

$$d_{\text{kompozit}} = \frac{L}{22} \quad (2.3)$$

2.3. Temel Enkesit Özellikleri İçin Pratik Tasarım Formülleri

Bölüm 1.3’ten hatırlanabileceği gibi, Socrates ve Ruddy [11] geniş başlıklı I-enkesitli Amerikan hadde profillerinin enkesit alanı, kuvvetli ekseninde atalet ve elastik mukavemet momentleri ile asal atalet yarıçaplarının, profillerin derinlik, genişlik ve birim boy kütleleri (d , b ve W_t) kullanılarak makul bir şekilde hesaplanabildiğini göstermişlerdir.

Bu bölümde, çalışma kapsamında incelenen I-enkesitli Avrupa hadde profillerin burulma sabitleri (J ve C_w) haricindeki temel enkesit özelliklerinin; yani, enkesit alanlarının (A), asal atalet momentlerinin (I_x ve I_y), asal atalet yarıçaplarının (i_x ve i_y) ve asal eksenlere göre elastik ve plastik mukavemet momentlerinin (W_{ex} ile W_{px} ve W_{ey} ile W_{py}), profillerin yalnız derinlikleri (d), başlık genişlikleri (b) ve birim boy

kütleleri (G) kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanmasını sağlayan pratik formüller elde edilmiştir. Özellikle zayıf eksen (y) etrafındaki enkesit özelliklerinde, ‘kiriş’ ve ‘kolon’ kesiti olarak sınıflandırılan enkesitlerin tamamı için geçerli olan tek bir denklem elde etmenin pratik olmadığı belirlenmiş; bu nedenle, belirtilen enkesit özellikleri için kiriş ve kolon kesitlerinde kullanılmak üzere ayrı formüller önerilmiştir. Ülkemizde kullanılan profil tablolarında birim boy kütleler için ‘G’ simgesinin kullanılması yaygın olduğundan, Bölüm 1’de W_t simgesiyle ifade edilen birim boy kütle için, bu bölümdeki formülasyonlarda G simgesi kullanılmıştır.

2.3.1. Enkesit alanı (A)

Bölüm 1.3.1’de, bir yapısal çelik elemanın enkesit alanının (A), elemanın birim boy kütlelerinin (G) çeliğin yoğunluğuna (ρ) bölünerek hesaplanabildiği gösterilmişti. SI birim sisteminde, $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ olup, A ile G arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilebilir;

$$A = \frac{G}{\rho} \Rightarrow A = \frac{1000G}{7,85} = 127,3885G \quad (2.4)$$

Akılda kalıcı olması amacıyla, en fazla %1,87 hata oranıyla, G’nin katsayısı 125 değerine yuvarlanarak, A ile G arasındaki aşağıdaki pratik formül elde edilebilir;

$$A = 125 G \quad (2.5)$$

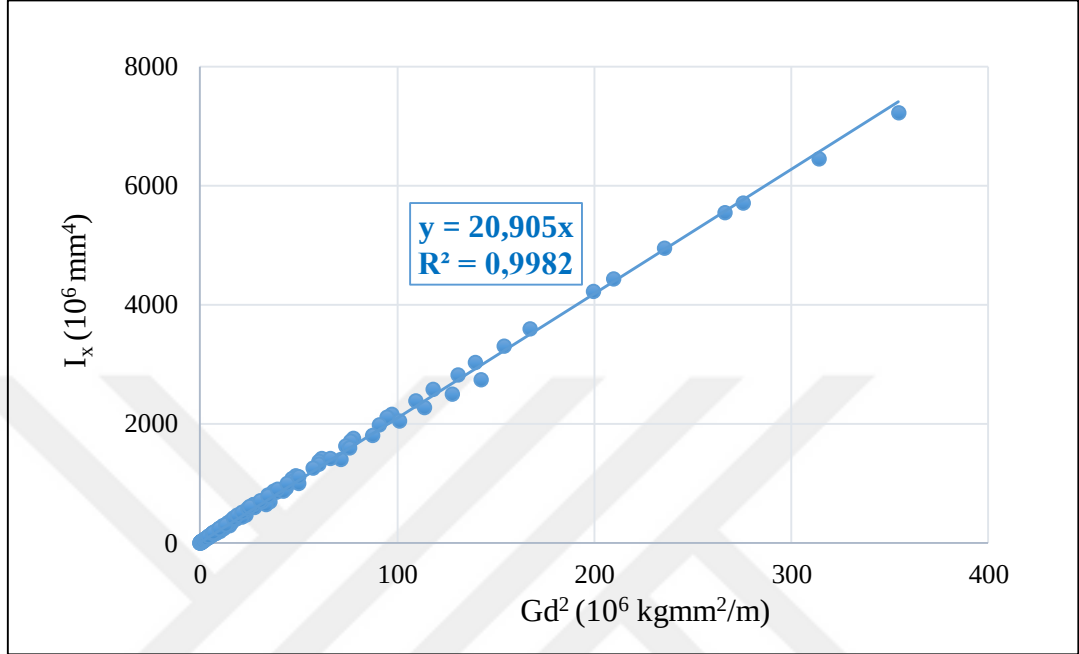
Denklem (2.5)’te, birim boy kütlenin biriminin ‘kg/m’ olması gerektiği unutulmamalıdır. Bu durumda enkesit alanı ‘mm²’ cinsinden elde edilecektir.

2.3.2. Kuvvetli ekseninde atalet momenti (I_x)

Çalışmada ele alınan profillerin kuvvetli ekseninde atalet momentleri (I_x) için pratik formül elde edilirken, ilk olarak Bölüm 1.3.2’de anlatılan yaklaşımdan yararlanılmış; I_x hesabı Denklem (1.6) kullanılarak yapılmıştır. Denklem (2.4), Denklem (1.6)’da yerine konulduğunda, I_x , G ve d cinsinden Denklem (2.6)’daki gibi elde edilebilir;

$$I_x \approx (127,3885G)0,16d^2 \approx 20,4Gd^2 \quad (2.6)$$

Çalışmada incelenen tüm IPE, IPN, HEA, HEB, HEM ve HD profilleri için, Gd^2 bağımsız değişken, I_x bağımlı değişken olacak şekilde doğrusal regresyon analizi yapılmış, eğilim çizgisi ve denklemi elde edilerek Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. İncelenen tüm IPE, IPN, HEA, HEB, HEM ve HD profilleri için kuvvetli atalet momentinin, birim boy kütle ve enkesit derinliğiyle olan ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle elde edilmesi

Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, eğilim çizgisinin eğiminin 20,905’e eşit olduğu ve bu değerın Denklem (2.6)’daki katsayıya (20,4) çok yakın olduğu dikkate alındığında, Socrates ve Ruddy [11]’nin Bölüm 1.3.2’de açıklanan kabulünün oldukça gerçekçi olduğu söylenebilir.

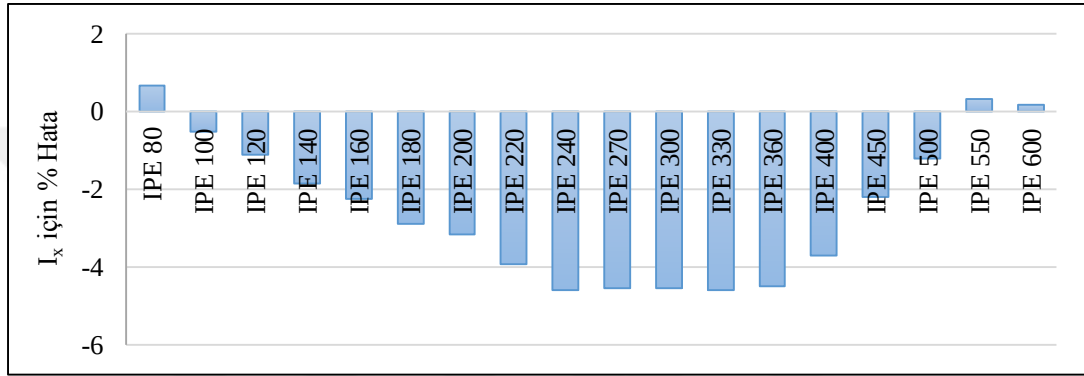
Akılda kalıcı olması amacıyla, Tablo 2.1’deki tüm enkesitlerin, ‘kiriş’ veya ‘kolon’ olarak sınıflandırılmalarına bakılmaksızın, kuvvetli eksenlerindeki atalet momentleri için aşağıdaki formül önerilmiştir;

$$I_x \approx 21Gd^2 \quad (2.7)$$

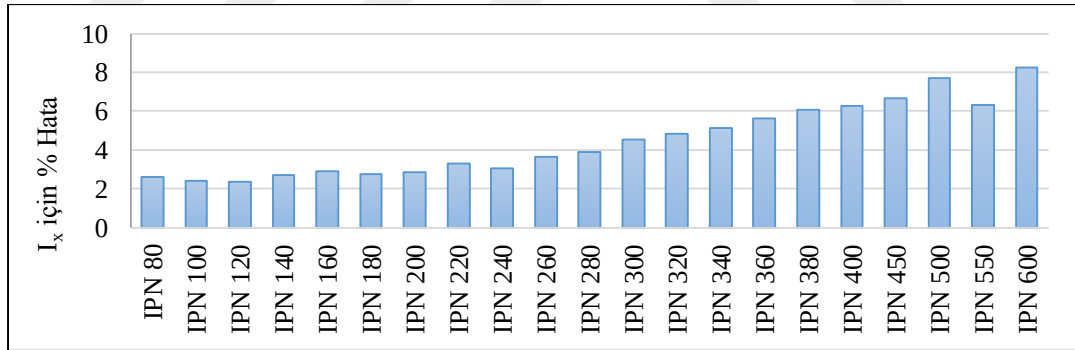
Bu pratik formül kullanılırken G kg/m, d ise mm cinsinden yazılmalıdır. Bu şekilde, I_x ’in birimi mm^4 olacaktır.

Tezde incelenen enkesitlerin Denklem (2.7) ile hesaplanan I_x değerleri, profil tablolarında verilen I_x değerleri ile karşılaştırılarak hata yüzdeleri belirlenmiş ve ‘kiriş’ enkesitleri için Şekil 2.2’de, ‘kolon’ enkesitleri için Şekil 2.3’te çizdirilmiştir.

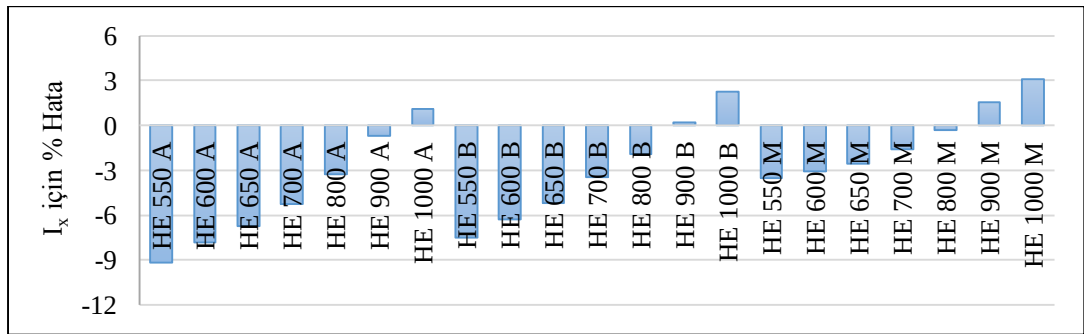
Kiriş enkesitlerinde, güvenli tarafta kalan en büyük hatanın %9,16 (HEA 550), güvensiz tarafta kalan en büyük hatanın ise %8,23 (IPN 600) olduğu tespit edilmiştir. Kolon enkesitlerinde ise güvenli ve güvensiz yöndeki en büyük hatalar sırayla %15,3 (HD 260 x 54,1) ve %10,6 (HEM 100) olarak belirlenmiştir.



a) IPE enkesitler

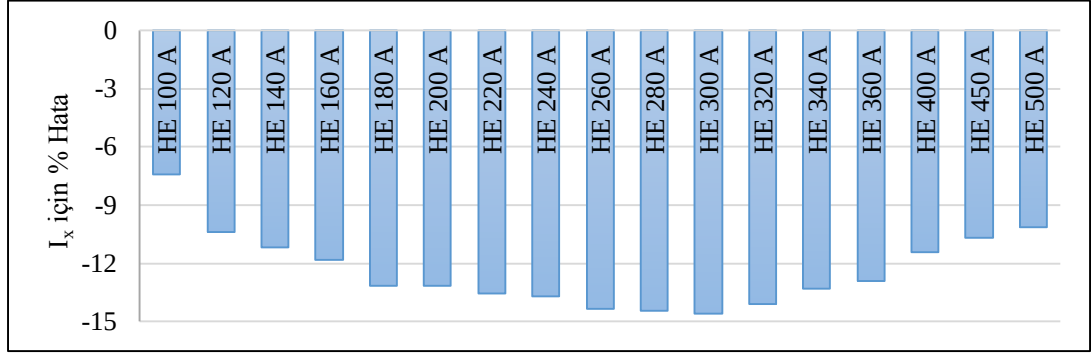


b) IPN enkesitler

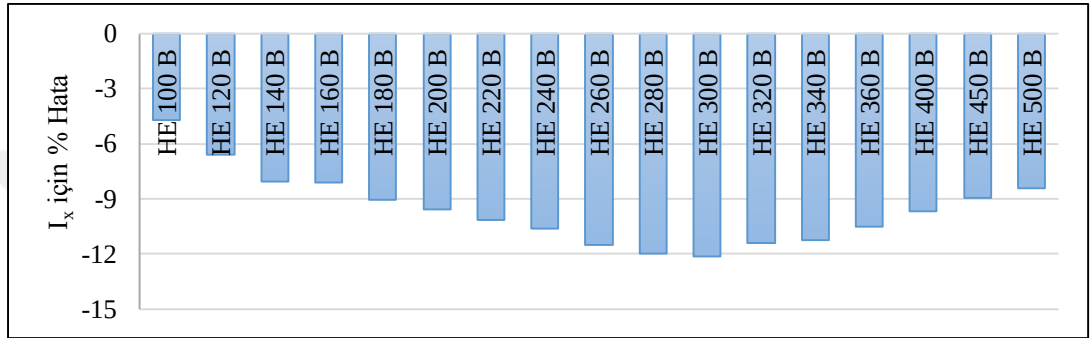


c) HE enkesitler

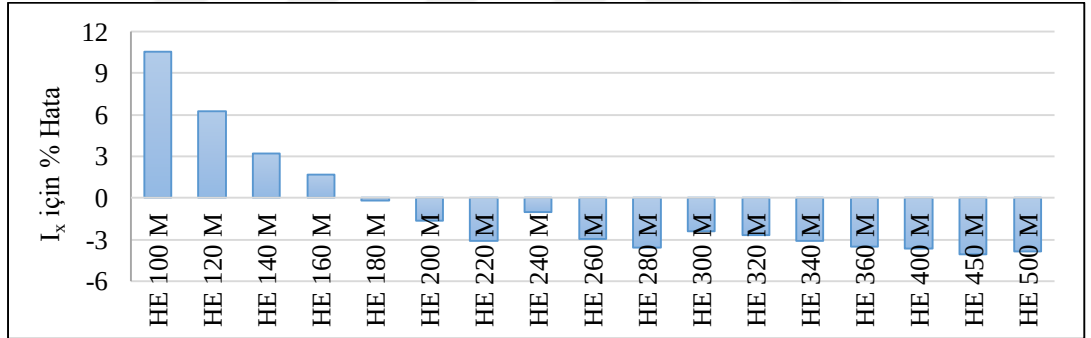
Şekil 2.2. Kiriş enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin profil tablolarındaki I_x değerleri ile pratik formülle hesaplanan I_x değerleri arasındaki hata yüzdeleri



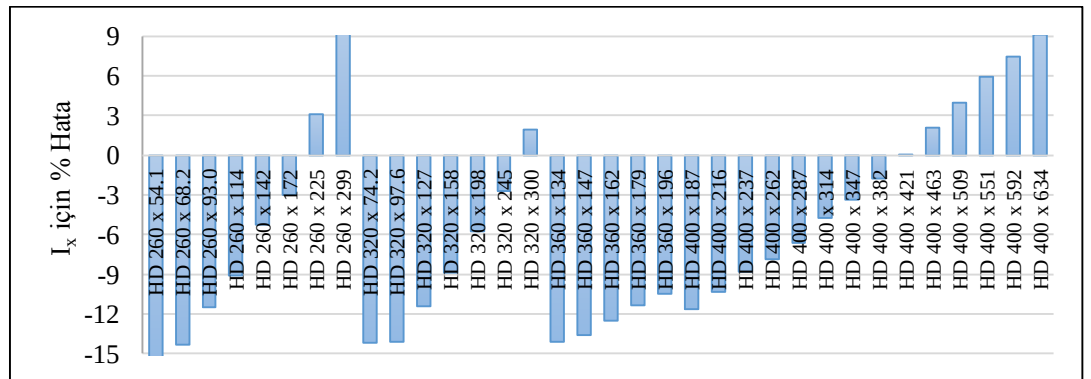
a) HEA enkesitler



b) HEB enkesitler



c) HEM enkesitler



d) HD enkesitler

Şekil 2.3. Kolon enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin profil tablolarındaki I_x değerleri ile pratik formülle hesaplanan I_x değerleri arasındaki hata yüzdeleri

2.3.3. Kuvvetli ekseninde elastik ve plastik mukavemet momentleri (W_{ex} ve W_{px})

Bölüm 1.3.3'te de bahsedildiği gibi, I-enkesitli hadde profillerin kuvvetli ekseninde elastik mukavemet momentleri (W_{ex}), ilgili atalet momentlerinin (I_x) profillerin derinliklerinin yarısına ($d/2$) bölünerek hesaplanabilmektedir. ÇYTHYAY [12]'de, mukavemet momentleri için 'W' simgesinin kullanıldığı dikkate alınarak, bu çalışmada enkesitlerin kuvvetli eksenlerine göre elastik mukavemet momentleri için Bölüm 1.3.3'te kullanılan S_x simgesi yerine W_{ex} simgesinin kullanımına karar verilmiştir. Bu durumda, I-enkesitli hadde profillerinde kuvvetli ekseninde elastik mukavemet momenti, Denklem (2.8) ile hesaplanabilir.

$$W_{ex} = \frac{I_x}{d/2} \quad (2.8)$$

I_x için Denklem (2.7)'de elde edilen formül, Denklem (2.8)'de yerine konulursa, W_{ex} için aşağıdaki pratik formül elde edilmiş olur;

$$W_{ex} \approx \frac{21Gd}{d/2} = 42Gd \quad (2.9)$$

Denklem (2.9)'da G kg/m, d ise mm cinsinden yazılmalıdır. Bu durumda, W_{ex} 'in birimi mm^3 olacaktır.

Tablo 2.1'deki tüm profillerin profil tablolarındaki W_{ex} değerleriyle Denklem (2.9) kullanılarak hesaplanan W_{ex} değerleri karşılaştırıldığında, I_x hata oranlarına çok benzer hata oranları elde edilmiştir. İncelenen tüm kesitler dikkate alındığında, güvensiz tarafta en büyük hata yüzdesi % 10,7 (HEM 100), güvenli tarafta en büyük hata yüzdesi ise % 15,2 (HD 260 x 54,1)'dir.

Socrates ve Ruddy [11]'de enkesitlerin plastik mukavemet momentleriyle ilgili herhangi bir formüle rastlanmamıştır. Bölüm 1.4'te anlatıldığı gibi, araştırmacılar, emniyet gerilmeleri yöntemini kullandıkları için, kirişlerin moment kapasitelerini hesaplarken elastik mukavemet momentlerini kullanmışlardır. Buna karşın, ÇYTHYAY [12]'de, burkulma tehlikesi olmayan I-enkesitli hadde profillerin eğilme momenti dayanımlarının hesabında plastik mukavemet momentleri kullanılmaktadır.

Bu nedenle, bu çalışmada elastik mukavemet momentlerinin yanı sıra plastik mukavemet momentleri için de pratik formüller çıkarılmıştır.

Homojen bir çelik yapı elemanının plastik mukavemet momenti, enkesitinin ilgili plastik tarafsız eksenin altında ve üstünde kalan alanlarının plastik tarafsız eksene göre statik momentlerinin toplamına eşittir. Plastik tarafsız eksen, en genel tanımıyla, enkesiti iki eşit alana bölen eksen olarak tanımlanabilir. Çift simetri eksenli I-enkesitli profillerde, plastik tarafsız eksen, elastik tarafsız eksenle çakıştığından, bu tür profillerin kuvvetli ekseninde plastik mukavemet momenti (W_{px}) Denklem (2.10) kullanılarak hesaplanabilir;

$$W_{px} = 2Q_x = 2\left(\frac{A}{2}\right)\bar{y} \quad (2.10)$$

Şekil 1.2'deki kabule paralel olarak, $\bar{y}$ değerinin incelenen tüm profiller için 0,4d'ye eşit olduğu kabul edilmiştir.(İncelenen bütün profillerde $\bar{y}$ değeri en büyük 0,36, en küçük 0,42 ve ortalama 0,40 olarak hesaplanmıştır.) Bu durumda, W_{px} , A ve d cinsinden aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilebilir;

$$W_{px} \approx 2\left(\frac{A}{2}\right)(0,4d) = A(0,4d) \quad (2.11)$$

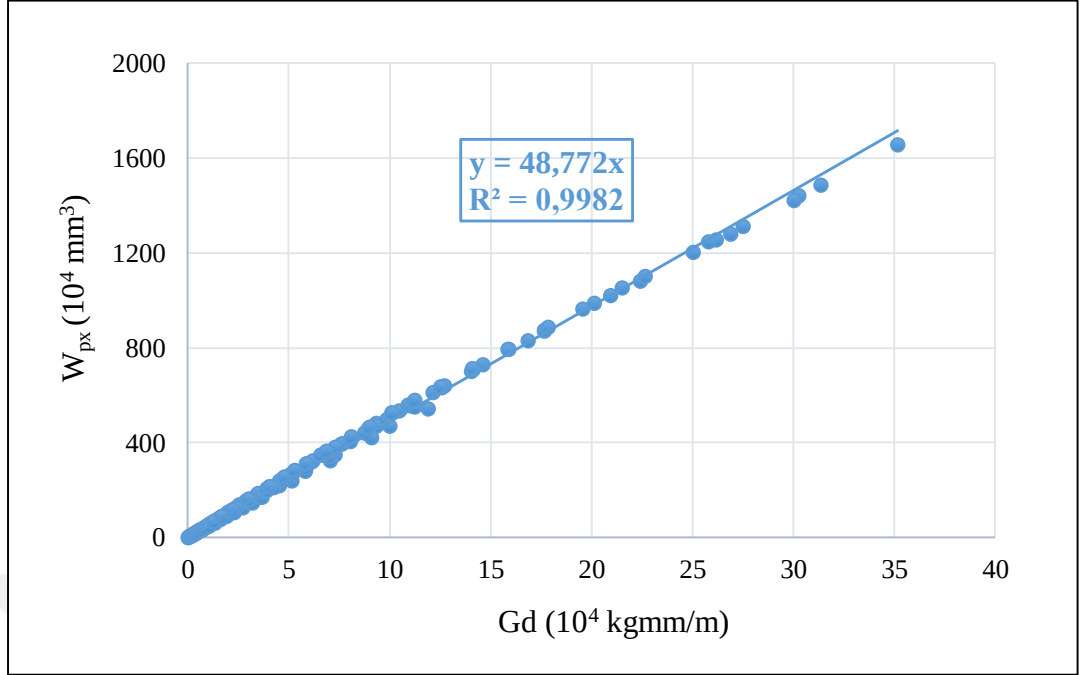
Denklem (2.4), Denklem (2.11)'de yerine konulduğunda; W_{px} , G ve d cinsinden Denklem (2.12)'deki gibi elde edilebilir;

$$W_{px} \approx 127,3885G(0,4d) = 50,96Gd \quad (2.12)$$

Tablo 2.1'deki tüm enkesitler için, W_{px} ve Gd arasında doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilerek, regresyon eğrisi ve denklemi Şekil 2.4'te gösterildiği gibi elde edilmiştir. Tablo 2.1'de verilen tüm profiller için W_{px} değerlerini mümkün olabildiğince güvenli ve 'gerçeğe' yakın tarafta tutmak amacıyla, kuvvetli ekseninde plastik mukavemet momenti için Denklem (2.13)'teki pratik formül önerilmiştir.

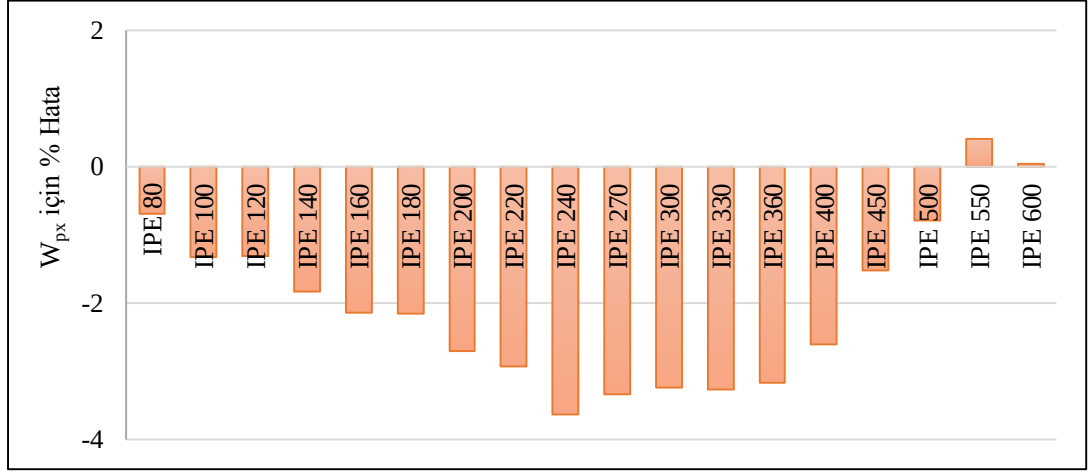
$$W_{px} \approx 48Gd \quad (2.13)$$

Formülde, G kg/m, d ise mm cinsinden yazıldığında, W_{px} mm³ cinsinden elde edilir.

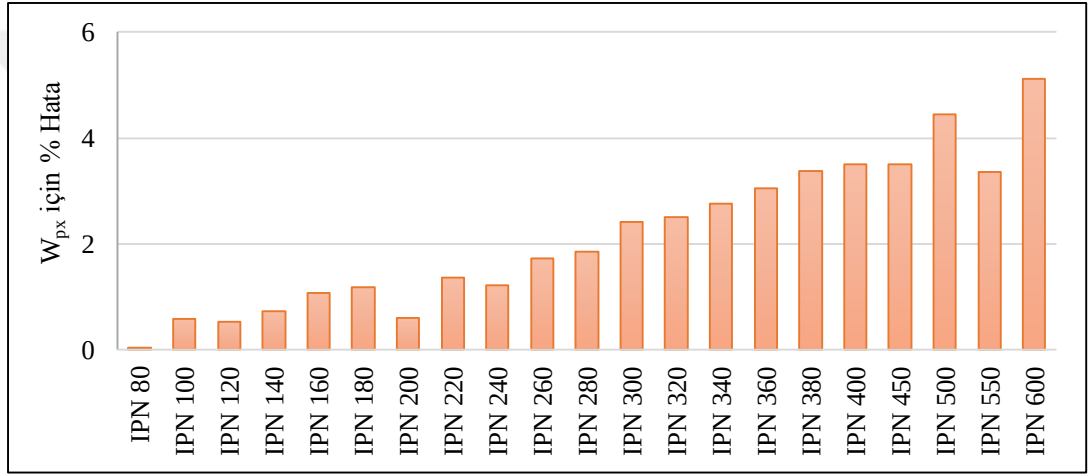


Şekil 2.4. İncelenen tüm IPE, IPN, HEA, HEB, HEM ve HD profilleri için kuvvetli ekseninde plastik mukavemet momentlerinin, birim boy kütle ve enkesit derinlikleriyle olan ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle elde edilmesi

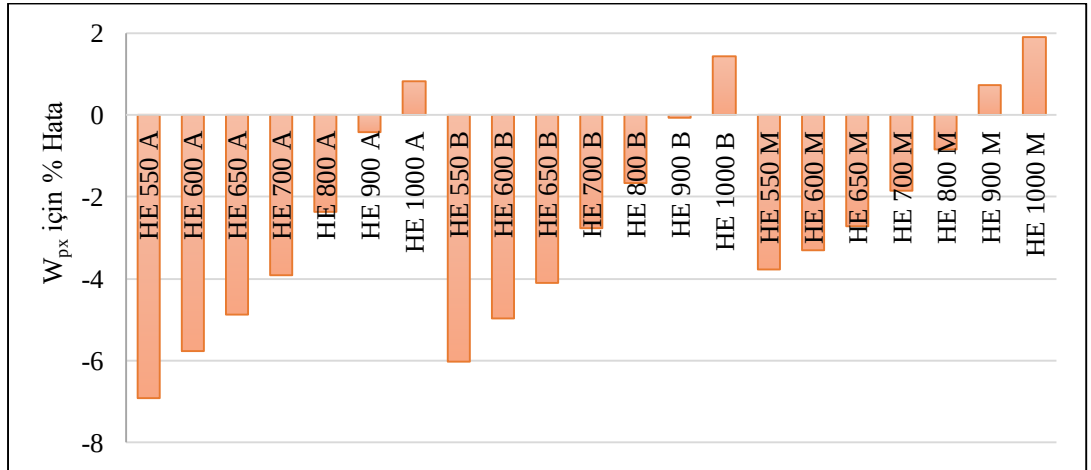
Denklem (2.13) ile hesaplanan W_{px} değerleri ile profil tablolarındaki W_{px} değerleri karşılaştırılmış ve hata oranları kiriş enkesitleri için Şekil 2.5'te, kolon enkesitleri için Şekil 2.6'da sunulmuştur. Kiriş enkesitlerinde belirlenen güvenli ve güvensiz tarafta kalan en büyük hata yüzdeleri sırayla %6,91 (HEA 550) ve % 5,12 (IPN 600)'dir. Kolon enkesitlerinde ise güvenli ve güvensiz yönde en büyük hata değerleri sırasıyla % 11,3 (HD 260 x 54,1) ve % 2,11 (HEM 100) olarak tespit edilmiştir.



a) IPE enkesitler

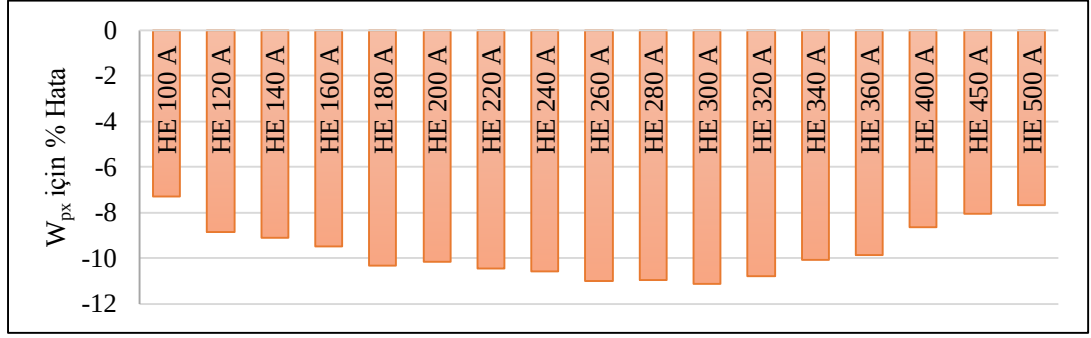


b) IPN enkesitler



c) HE enkesitler

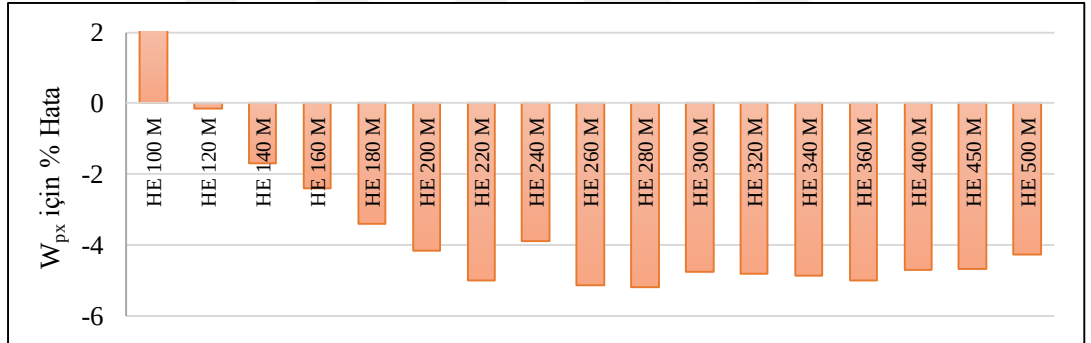
Şekil 2.5. Kiriş enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin profil tablolarındaki W_{px} değerleri ile pratik formülle hesaplanan W_{px} değerleri arasındaki hata yüzdeleri



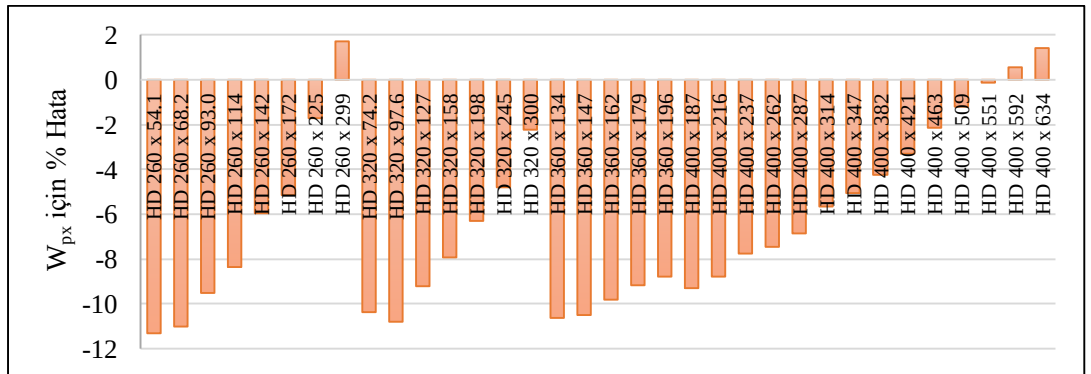
a) HEA enkesitler



b) HEB enkesitler



c) HEM enkesitler



d) HD enkesitler

Şekil 2.6. Kolon enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin profil tablolarındaki W_{px} değerleri ile pratik formülle hesaplanan W_{px} değerleri arasındaki hata yüzdeleri

2.3.4. Zayıf eksenle atalet momenti (I_y)

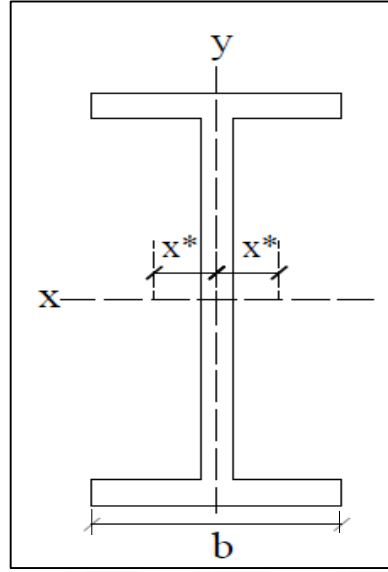
Socrates ve Ruddy [11], çalışmalarında ele aldıkları I-enkesitli Amerikan profillerinin zayıf eksen etrafında atalet ve mukavemet momentleri için basit formüller önermemişlerdir. Bu çalışmada, kuvvetli eksenle atalet momenti ve mukavemet momentleri için pratik formül türetilirken uygulanan yaklaşımlardan faydalanılarak zayıf eksenle atalet momenti (I_y) ile mukavemet momentleri (W_{ey} ve W_{py}) için de pratik formüller elde edilmiştir. İlk olarak, zayıf eksenle atalet momenti (I_y), enkesit alanı (A) ve başlık genişliği (b) ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Ancak, çalışmada incelenen enkesitlerin tümü için tek bir denklemin uygun olmadığı görülmüş ve Bölüm 2.1'deki eleman sınıflandırması göz önünde bulundurularak, 'kiriş' enkesitleri için ayrı ($I_{y,kiriş}$), 'kolon' enkesitleri için ayrı ($I_{y,kolon}$) iki denklem sunulmuştur.

I-enkesitli bir hadde profilinin sırt-sırtta duran iki U-enkesitten oluştuğu, U-enkesitlerinin geometrik merkezleriyle I-enkesitin zayıf eksenine arasındaki uzaklığın 'kiriş' kesitleri için $x^*=0,22b$ 'kolon' kesitleri için ise $x^*=0,25b$ 'ye olduğu kabul edilmiştir. I_y , enkesiti oluşturan U-enkesitlerin y eksenine (I-enkesitin zayıf eksenine) göre ikinci alan momentleri toplanarak elde edilmiştir;

$$I_{y(kiriş)} \approx 2 \left(\frac{A}{2} \right) (0,22b)^2 \quad (2.14)$$

$$I_{y(kolon)} \approx 2 \left(\frac{A}{2} \right) (0,25b)^2 \quad (2.15)$$

I_x hesabında yapıldığı gibi, I_y hesabında da enkesiti oluşturan iki yarım parçanın kendi geometrik merkezlerinden geçen ve alan momentlerinin alındığı eksene paralel olan eksenlere göre atalet momentleri ihmal edilmiştir. Yapılan yaklaşım Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



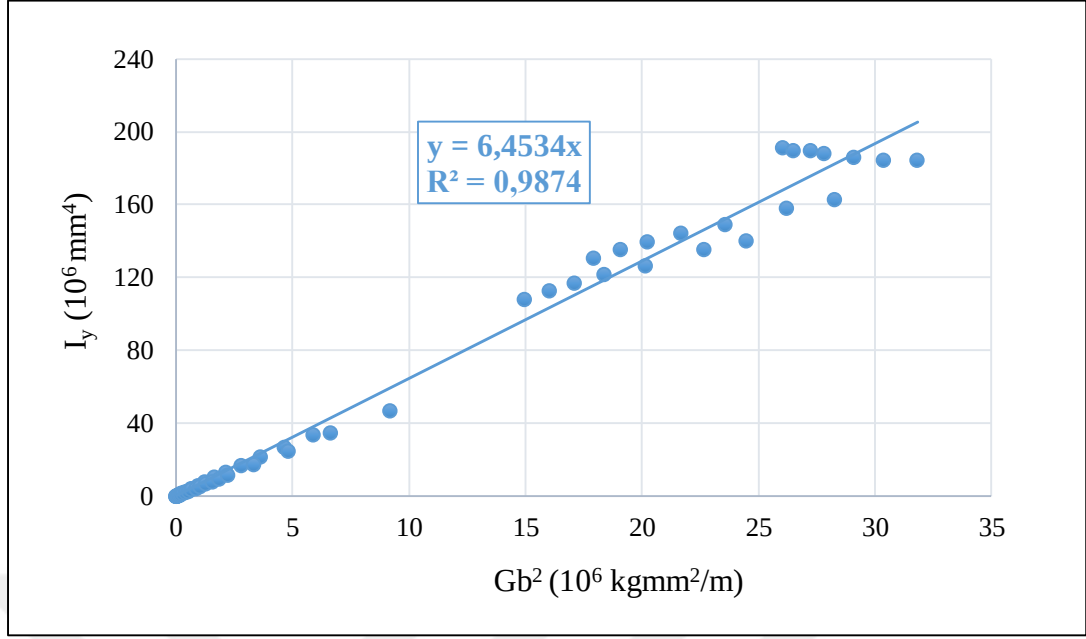
Şekil 2.7. U-enkesitlerin geometrik merkezlerinin I-enkesitin zayıf eksenine olan uzaklığı için yapılan kabul

Enkesit alanı için Denklem (2.4)'te elde edilen formül, Denklem (2.14) ve Denklem (2.15)'te yerine konulduğunda; I_y , G ve b cinsinden, kiriş kesitleri için Denklem (2.16)'da, kolon kesitleri için Denklem (2.17)'deki gibi ifade edilebilir;

$$I_{y,kiriş} \approx (127,3885G)0,0484b^2 = 6,16Gb^2 \quad (2.16)$$

$$I_{y,kolon} \approx (127,3885G)0,0625b^2 = 7,96Gb^2 \quad (2.17)$$

Tablo 2.2'de, 'kiriş' enkesiti olarak sınıflandırılan profiller için Gb^2 bağımsız değişken, I_y bağımlı değişken olacak şekilde doğrusal regresyon analizi yapılmış; eğilim çizgisi ve denklemi Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Şekil 2.8'deki grafikten görülebileceği gibi, 'kiriş' enkesiti olarak önerilen HE profillerin başlık genişliklerinin hemen hemen aynı olması ($b \cong 300$ mm), I_y ile Gb^2 arasındaki ilişkinin doğrusallıktan uzaklaşmasına neden olmuş ve R^2 değerinde düşüşe yol açmıştır.



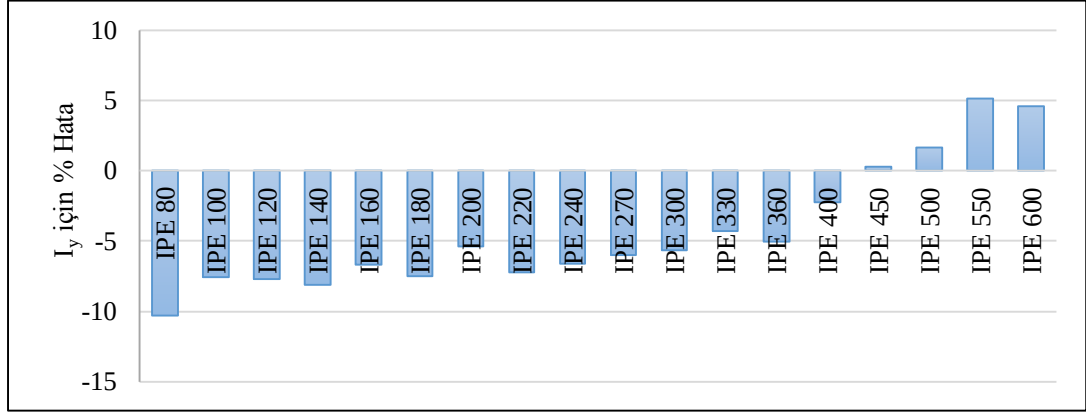
Şekil 2.8. ‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin zayıf atalet momentlerinin, birim boy kütleleri ve başlık genişlikleriyle olan ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle belirlenmesi

Güvenli tarafta kalan profil sayısını artırmak ve hatırlanması kolay bir formül elde etmek amacıyla, Denklem (2.16)’daki katsayı 6’ya yuvarlanarak ‘kiriş’ enkesitlerinin zayıf atalet momentleri için aşağıdaki basit formül önerilmiştir;

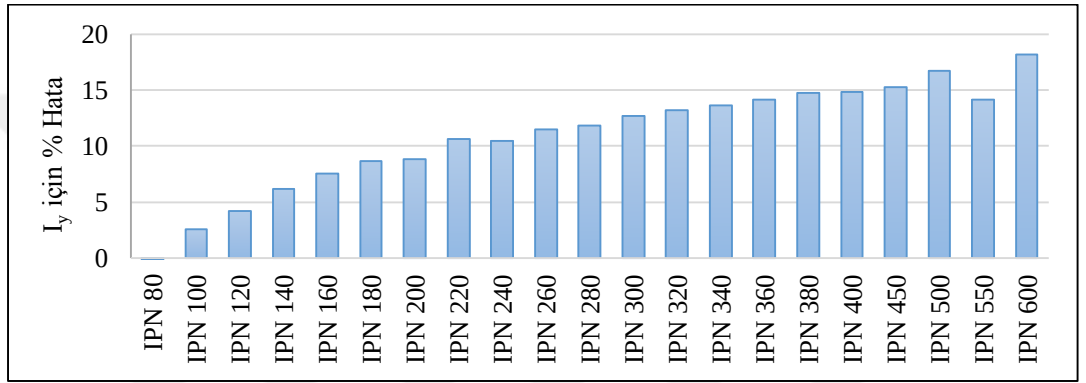
$$I_{y,kiriş} \approx 6Gb^2 \quad (2.18)$$

Bu pratik formül kullanılırken G kg/m, b ise mm cinsinden yazılmalıdır. Bu şekilde hesaplanan Iy değerinin birimi mm⁴ çıkacaktır.

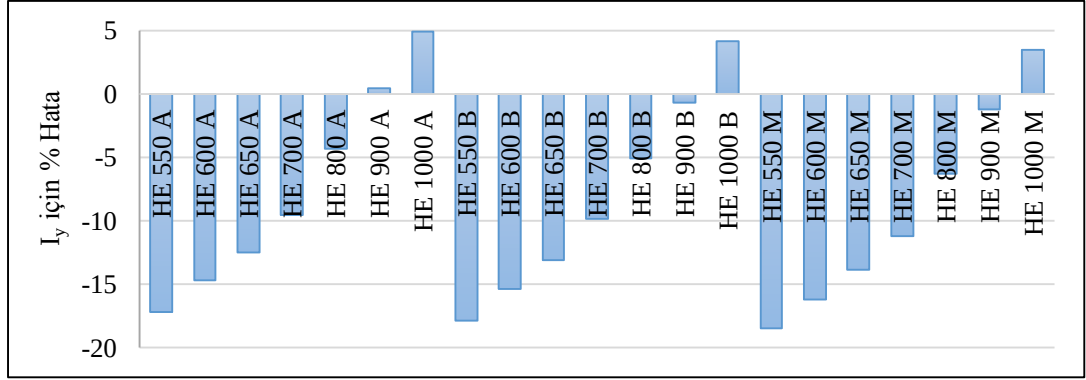
Tablo 2.2’deki ‘kiriş’ enkesitlerinin Denklem (2.18)’den hesaplanan Iy değerleri, profil tablolarındaki Iy değerleriyle karşılaştırılarak hata oranları belirlenmiş, yüzde hatalar Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Hata yüzdeleri incelendiğinde, ‘kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerde güvenli tarafta en büyük hata % 18,5 (HEM 550), güvensiz tarafta en büyük hata ise %18,2 (IPN 600) olarak belirlenmiştir. HE enkesitlerde değerlerin fazla güvenli tarafta kalmasının sebebi, başlık genişliklerinin kesit büyüdükçe sabit kalmasıdır. Nispeten küçük d/b oranlarına sahip IPN kesitlerin neredeyse tamamında pratik formül güvensiz sonuçlar vermiştir.



a) IPE enkesitler



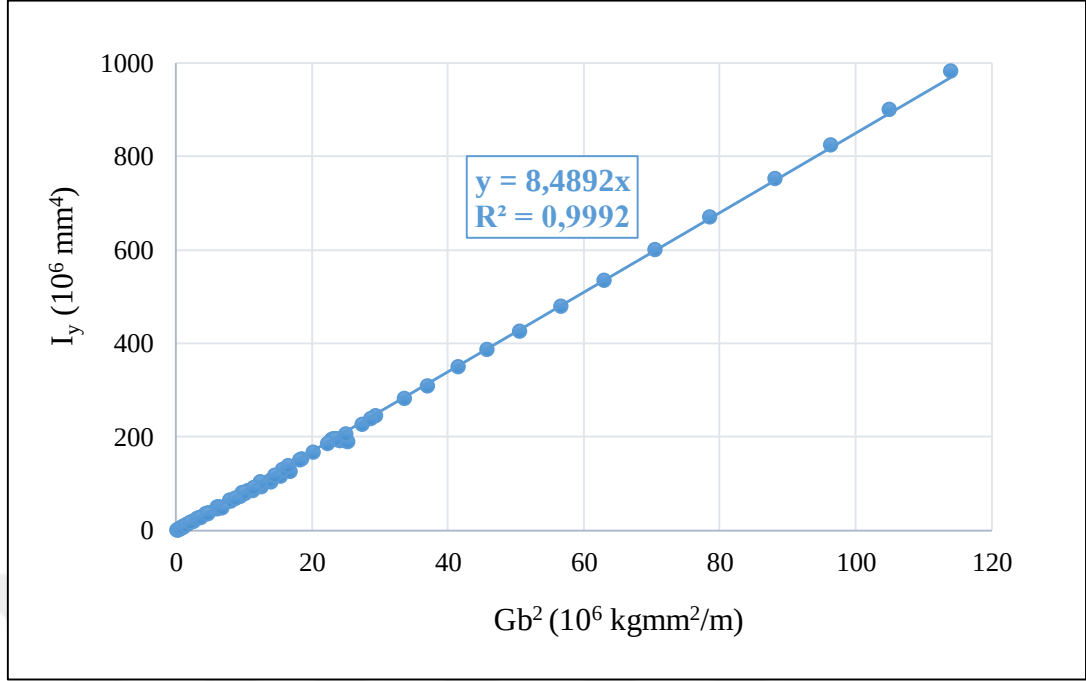
b) IPN enkesitler



c) HE enkesitler

Şekil 2.9. ‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, profil tablolarındaki I_y değerleriyle pratik formülle hesaplanan I_y değerleri arasındaki hata yüzdeleri

Tablo 2.3’te ‘kolon’ enkesiti olarak önerilen profiller için de, Gb^2 bağımsız değişken, I_y bağımlı değişken olacak şekilde doğrusal regresyon analizi yapılarak, Denklem (2.17)’deki katsayının geçerliliği araştırılmıştır. İlgili eğilim çizgisi ve denklemi, Şekil 2.10’da gösterilmiştir.



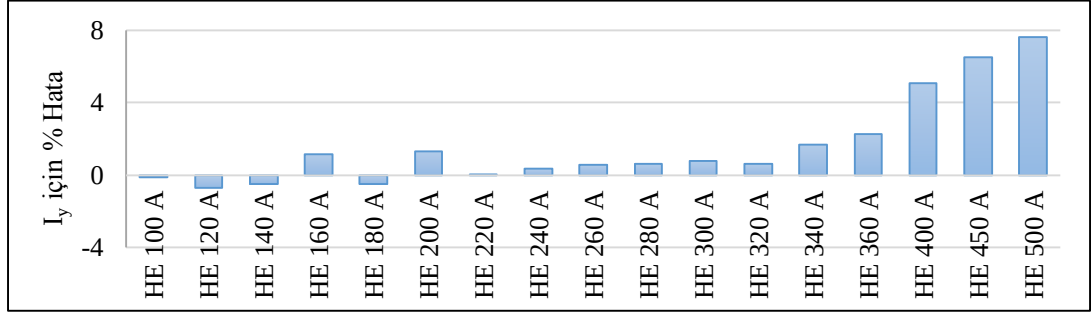
Şekil 2.10. ‘Kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin zayıf atalet momentlerinin, birim boy kütleleri ve başlık genişlikleriyle olan ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle belirlenmesi

Şekil 2.10’deki grafik, Şekil 2.8’deki grafikte karşılaştırıldığında, ‘kolon’ enkesitleri için hesaplanan I_y değerlerinin, ‘kiriş’ enkesitleri için hesaplanan I_y değerleri kadar dağınık olmadığı gözlenmektedir. Bunun en önemli nedeni, HE enkesitli ‘kolon’ların başlık genişliklerinin HE enkesitli ‘kiriş’lerde olduğu gibi sabit kalmamasıdır.

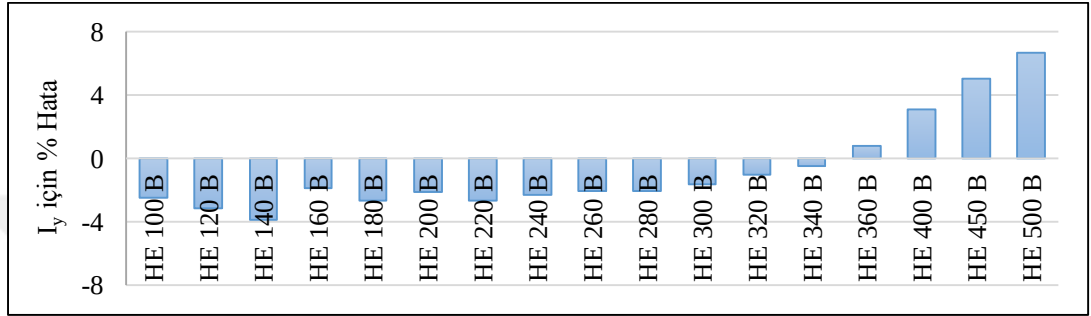
Daha fazla kesitin güvenli tarafta kalması ve akılda kalıcı olması açısından, ‘kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerinin zayıf atalet momentleri için aşağıdaki basit formül önerilmiştir;

$$I_{y,kolon} \approx 8Gb^2 \quad (2.19)$$

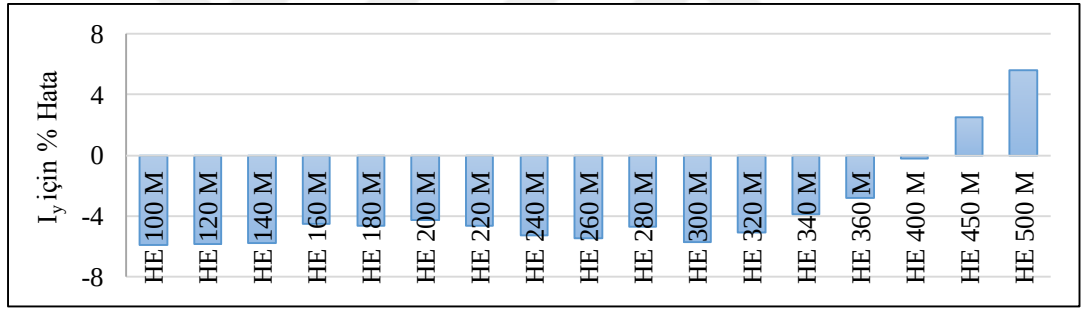
Denklem (2.19)’de, G kg/m, b mm cinsinden kullanılmalıdır. Bu şekilde elde edilecek I_y değerinin birimi mm⁴ olacaktır. Tablo 2.3’teki ‘kolon’ enkesitleri için Denklem (2.19) ile hesaplanan I_y değerleri, profil tablolarındaki I_y değerleriyle kıyaslanmış ve hata oranları Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



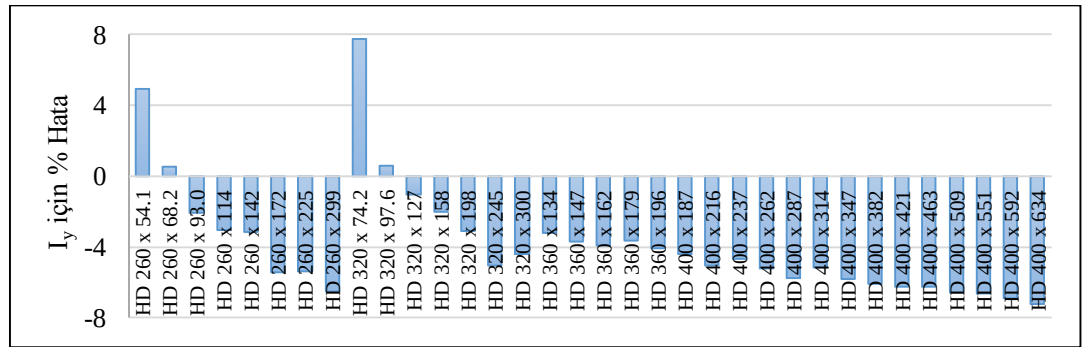
a) HEA enkesitler



b) HEB enkesitler



c) HEM enkesitler



d) HD enkesitler

Şekil 2.11. ‘Kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, profil tablolarındaki I_y değerleriyle pratik formülle hesaplanan I_y değerleri arasındaki hata yüzdeleri

Şekil 2.11’deki grafikler, Şekil 2.9’daki grafiklerle karşılaştırıldığında, ‘kolon’ enkesitleri için elde edilen I_y formülünün, ‘kiriş’ enkesitleri için elde edilen formüle göre daha doğru sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Tablo 2.3’te verilen ‘kolon’ enkesitleri için, en büyük hatanın güvenli yönde % 7,19 (HD 400 x 634), güvensiz yönde ise % 7,73 (HD 320 x 74,2) olduğu tespit edilmiştir.

2.3.5. Zayıf ekseninde elastik ve plastik mukavemet momentleri (W_{ey} , W_{py})

I-enkesitli bir hadde profilinin zayıf ekseninde elastik mukavemet momeni (W_{ey}), zayıf ekseninde atalet momenti (I_y) başlık genişliğinin yarısına ($b/2$) bölünerek hesaplanabilir;

$$W_{ey} = \frac{I_y}{b/2} \quad (2.20)$$

Bu durumda, Tablo 2.2’deki ‘kiriş’ enkesitleri için $W_{ey,kiriş}$ Denklem (2.21) kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanabilir;

$$W_{ey,kiriş} \approx \frac{6Gb}{b/2} = 12Gb \quad (2.21)$$

Benzer şekilde, Tablo 2.3’teki ‘kolon’ enkesitleri için ise $W_{ey,kolon}$, Denklem (2.23)’ten yaklaşık olarak hesaplanabilir;

$$W_{ey,kolon} \approx \frac{8Gb}{b/2} = 16Gb \quad (2.22)$$

Denklem (2.21) ve Denklem (2.22) ile hesaplanan W_{ey} değerleri profil tablolarındaki değerlerle karşılaştırılmış ve Denklem (2.18) ve (2.19) ile hesaplanan I_y değerlerindeki benzer hata oranları elde edilmiştir. ‘Kiriş’ enkesitleri için güvenli yönde en büyük hata %18,5 (HEM 550), güvensiz yönde en büyük hata %18,3 (IPN 600)’dir. ‘Kolon’ enkesitleri için ise güvenli yönde en büyük hata %7,18 (HD 400 x 634), güvensiz yönde en büyük hata %7,73 (HD 320 x 74.2) olarak tespit edilmiştir.

I-enkesitli hadde profillerin zayıf ekseninde plastik mukavemet momenti (W_{py}), y ekseninin sağında ve solunda kalan eş alanlı U enkesitlerinin y eksenine göre statik alan momentlerinin toplamına eşittir;

$$W_{py} = 2Q_y = 2\left(\frac{A}{2}\right)\bar{x} \quad (2.23)$$

Denklem 2.23'te $\bar{x}$, U-enkesitlerinin geometrik merkezleriyle I-enkesitin zayıf eksenindeki uzaklık olup, çalışmada ele alınan her enkesit için gerçek $\bar{x}$ değerleri $\bar{x} = W_{py}/A$ denkleminden hesaplanmış ve 'kiriş' enkesiti olarak sınıflandırılan profillerde 0,15b'ye, 'kolon' enkesiti olarak sınıflandırılan profillerde ise 0,2b'ye eşit olduğu kabul edilmiştir. ('Kiriş' enkesitlerinde $\bar{x}$ değerleri en büyük 0,18, en küçük 0,14 ve ortalama 0,15, 'kolon' enkesitlerinde en büyük 0,21, en küçük 0,18, ve ortalama 0,2 olarak hesaplanmıştır.) Bu durumda; W_{py} , A ve b cinsinden aşağıdaki denklemlerdeki gibi ifade edilebilir;

$$W_{py,kiriş} \approx 2 \left(\frac{A}{2} \right) (0,15b) = A(0,15b) \quad (2.24)$$

$$W_{py,kolon} \approx 2 \left(\frac{A}{2} \right) (0,2b) = A(0,2b) \quad (2.25)$$

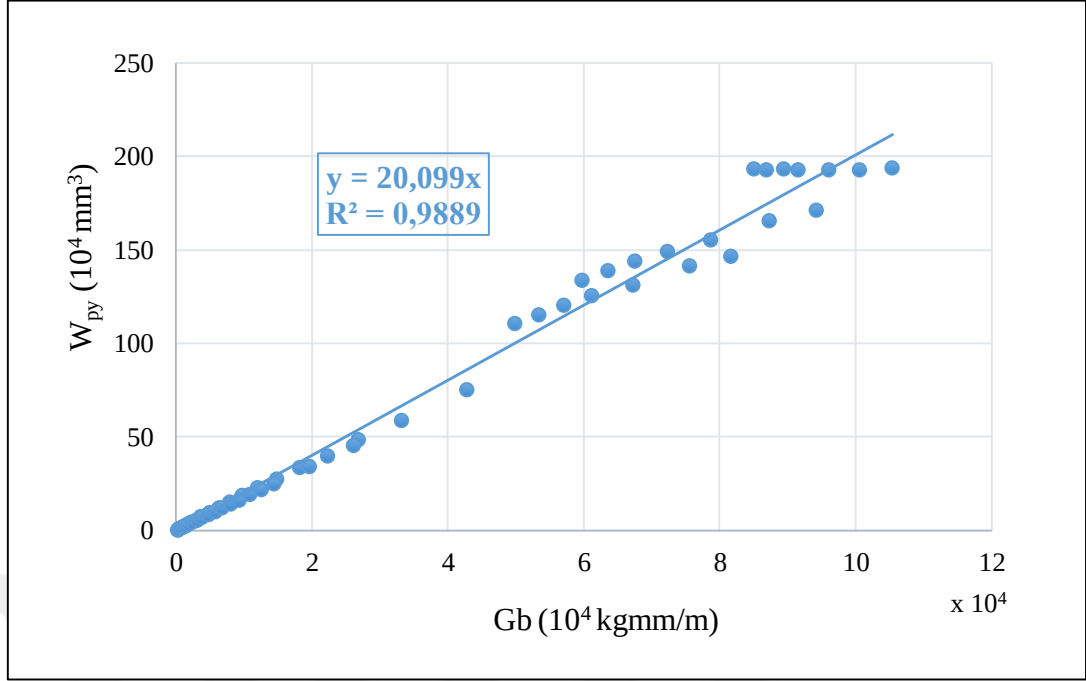
Enkesit alanı için Denklem (2.4)'te elde edilen ilişki, Denklem (2.24) ve Denklem (2.25)'te kullanıldığında; incelenen 'kiriş' ve 'kolon' enkesitlerinin zayıf ekseninde plastik mukavemet momentleri, G ve b cinsinden Denklem (2.26) ve Denklem (2.27)'deki gibi elde edilebilir;

$$W_{py,kiriş} \approx 127,3885G(0,15b) = 19,11Gb \quad (2.26)$$

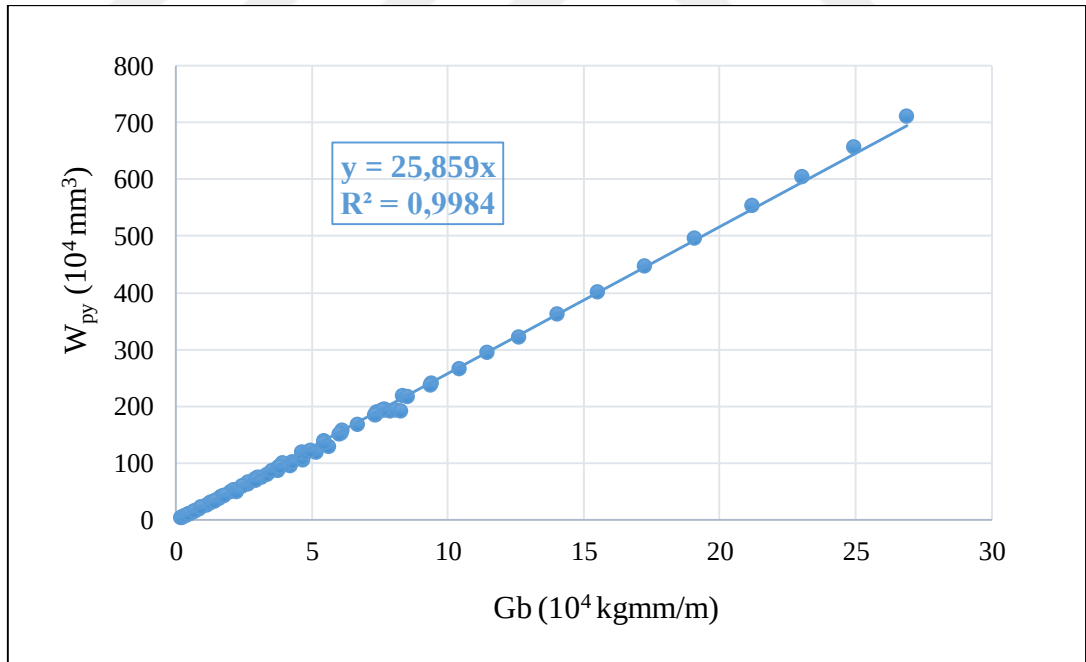
$$W_{py,kolon} \approx 127,3885G(0,2b) = 25,48Gb \quad (2.27)$$

Çalışmada 'kiriş' enkesiti olarak sınıflandırılan profiller için, W_{py} ile Gb arasındaki ilişki çizdirilmiş; doğrusal regresyon analizi yapılarak, eğilim çizgisi ve denklemi Şekil 2.12'teki gibi elde edilmiştir. Benzer doğrusal regresyon analizi, 'kolon' enkesitleri için de yapılmış; analiz sonuçları Şekil 2.13'te sunulmuştur.

Güvenli tarafta kalan profil sayısını artırmak ve hatırlanması kolay formüller elde etmek amacıyla, Denklem (2.26)'daki katsayı 19'a, Denklem (2.27)'deki katsayı 24'e yuvarlanarak, 'kiriş' ve 'kolon' enkesitlerinin zayıf ekseninde plastik mukavemet momentleri için aşağıdaki basit formüller önerilmiştir;



Şekil 2.12. ‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin zayıf eksende plastik mukavemet momentlerinin, birim boy kütle ve başlık genişlikleriyle olan ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle elde edilmesi



Şekil 2.13. ‘Kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin zayıf eksende plastik mukavemet momentlerinin, birim boy kütleleri ve başlık genişlikleriyle olan ilişkisinin doğrusal regresyon analiziyle elde edilmesi

$$W_{py,kiriş} \approx 19Gb \quad (2.28)$$

$$W_{py,kolon} \approx 24Gb \quad (2.29)$$

Denklem (2.28) ve Denklem (2.29)'da önerilen pratik fomüller kullanılırken G kg/m, b ise mm olarak kullanılmalıdır. Bu durumda, W_{py} değerlerinin birimi mm^3 olacaktır.

Denklem (2.28) kullanılarak hesaplanan $W_{py,kiriş}$ değerleriyle Denklem (2.29) kullanılarak hesaplanan $W_{py,kolon}$ değerleri, profil tablolarındaki “gerçek” W_{py} değerleri ile karşılaştırılmış; elde edilen hata yüzdeleri sırayla Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'te gösterilmiştir.

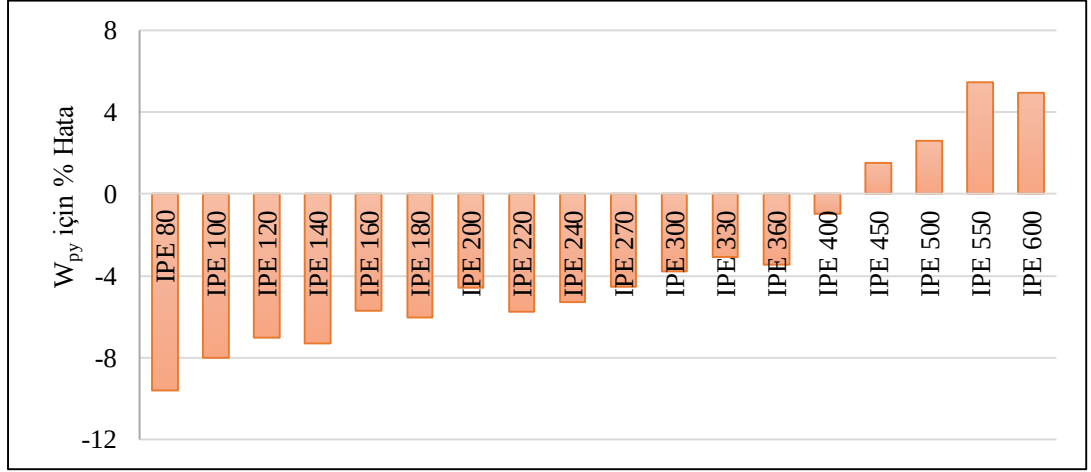
Çalışmada ‘kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin W_{py} değerleri için hesaplanan hata yüzdeleri (Şekil 2.14) incelendiğinde, en büyük hata oranlarının güvensiz yönde %8,69 (IPN 500), güvenli yönde ise %16,6 (HEM 550) olduğu tespit edilmiştir. ‘Kolon’ kesitleri için hata yüzdeleri (Şekil 2.15) ise güvensiz tarafta %5,64'yı (HD 320 x 74.2), güvenli tarafta ise %9,35'ü (HD 400 x 634) aşmamaktadır.

2.3.6. Asal atalet yarıçapları (i_x ve i_y)

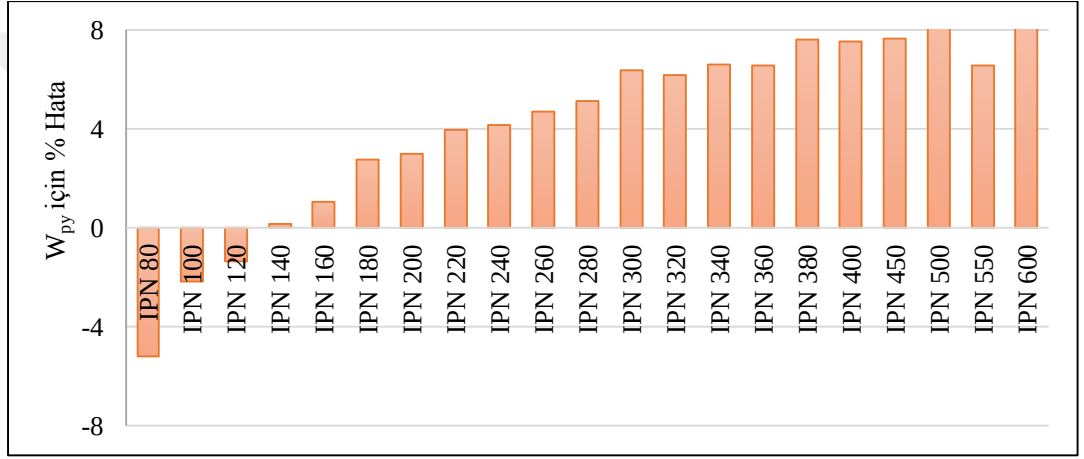
Bölüm 1.3.4'te anlatıldığı gibi, Socrates ve Ruddy [11], kuvvetli atalet yarıçapı i_x 'i enkesit derinliği d ile, zayıf atalet yarıçapı i_y 'yi ise başlık genişliği b ile ilişkilendirmiştir. Bu yaklaşımdan yola çıkarak, I-enkesitli Avrupa hadde profillerinin asal atalet yarıçaplarının, d ve b ile olan ilişkileri incelenmiş; i_x ve i_y 'nin yaklaşık olarak hesaplanmasını sağlayan pratik formüllere ulaşılmıştır.

Çalışmada, Tablo 2.1'de sunulan enkesitlerin kuvvetli atalet yarıçapları için, makul hata yüzdeleriyle tek formül elde edilebilmiştir. Şekil 2.16'da, çalışmada ele alınan profillerin i_x değerleriyle enkesit derinlikleri (d) arasındaki ilişki ve doğrusal regresyon analizi sonuçları gösterilmiştir. Şekil 2.16'ya göre, i_x ile d arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

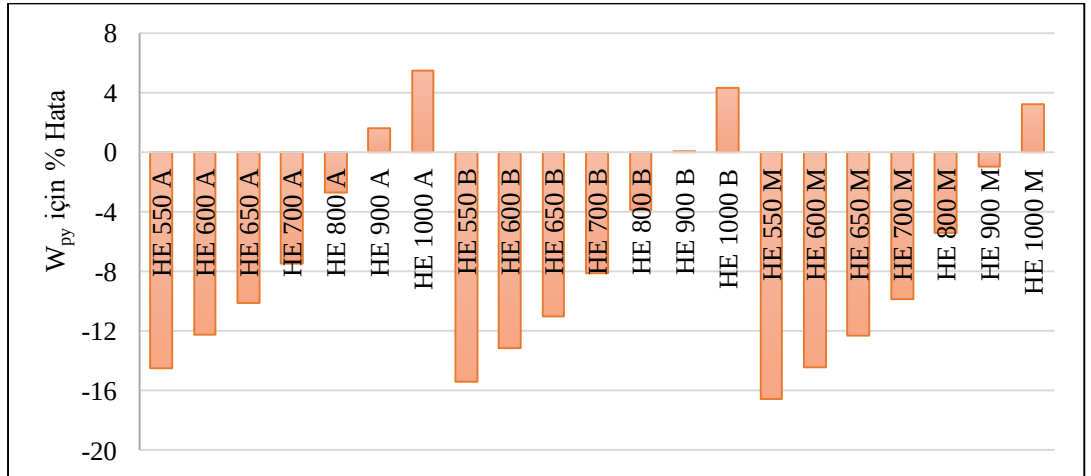
$$i_x \approx 0,41d \quad (2.30)$$



a) IPE enkesitler

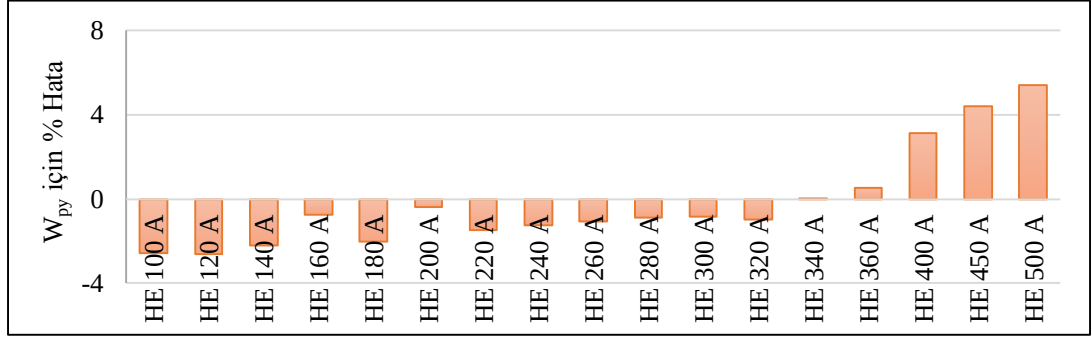


b) IPN enkesitler

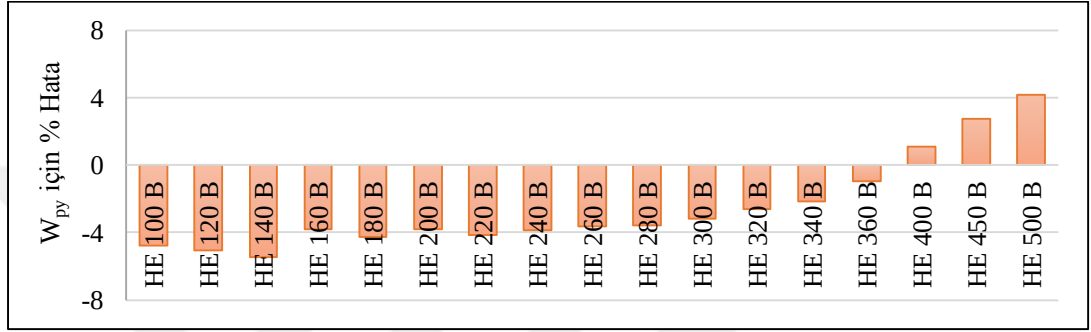


c) HE enkesitler

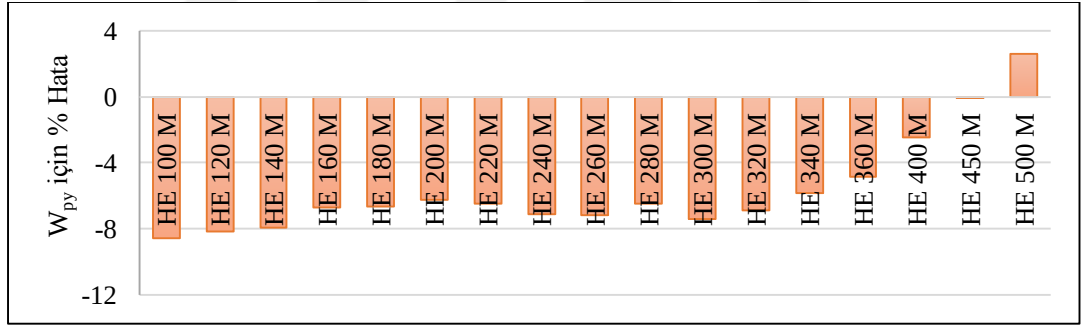
Şekil 2.14. ‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, profil tablolarındaki W_{py} değerleri ile pratik formülle hesaplanan W_{py} değerleri arasındaki hata yüzdeleri



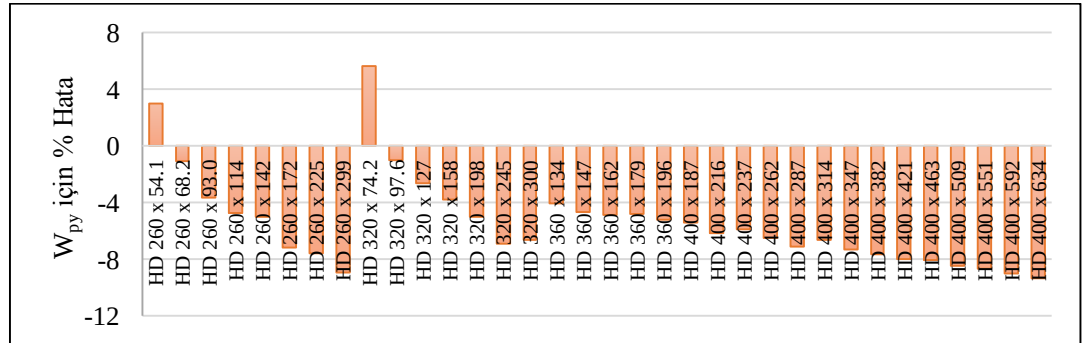
a) HEA enkesitler



b) HEB enkesitler

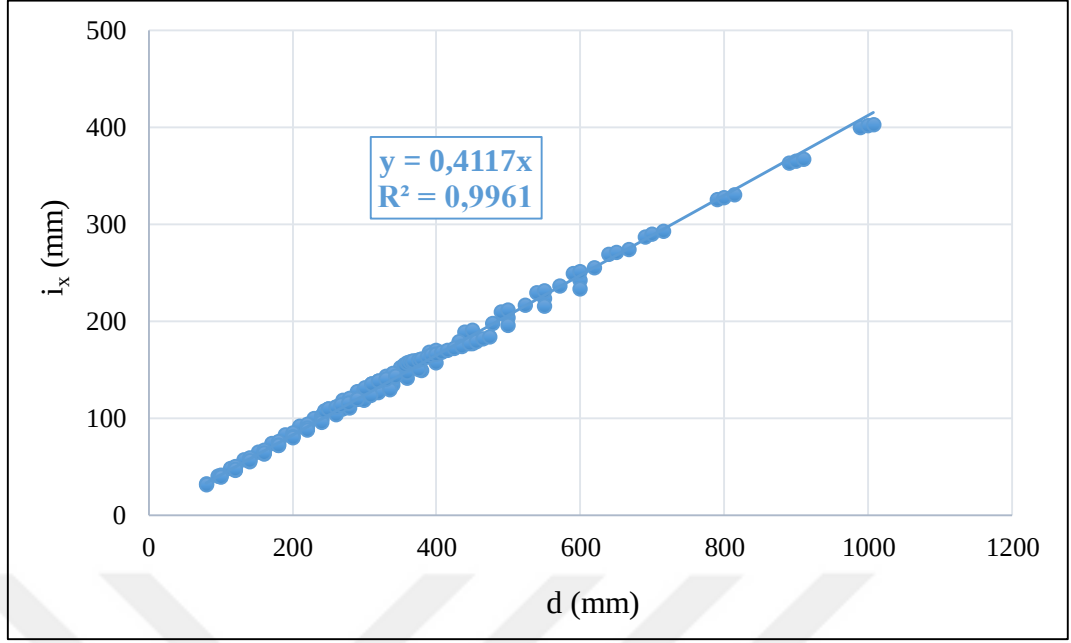


c) HEM enkesitler



d) HD enkesitler

Şekil 2.15. ‘Kolon’ enkesiti olarak önerilen profillerin, profil tablolarındaki W_{py} değerleri ile pratik formülle hesaplanan W_{py} değerleri arasındaki hata yüzdeleri



Şekil 2.16. İncelenen tüm IPE, IPN, HEA, HEB, HEM ve HD profillerinin kuvvetli atalet yarıçapları ile enkesit derinlikleri arasındaki ilişkinin doğrusal regresyon analiziyle belirlenmesi

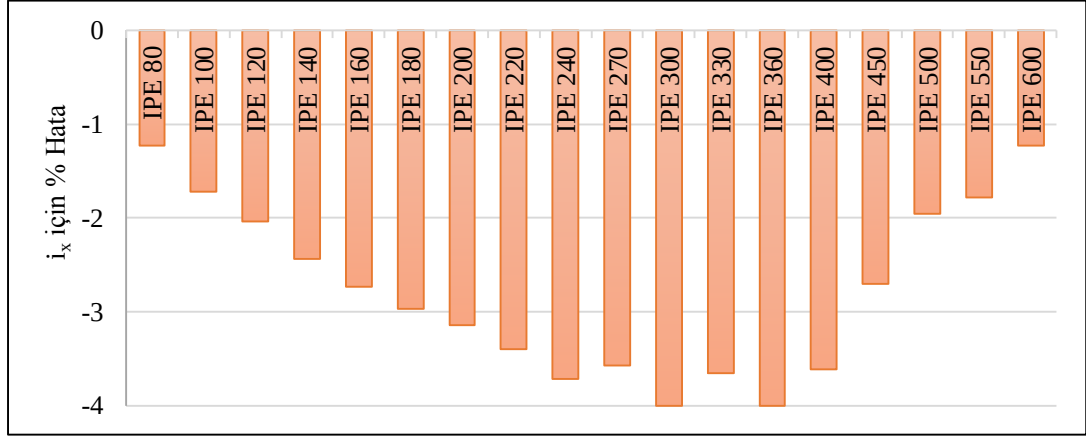
Daha güvenli tarafta kalacak ve akılda kalıcılığı arttıracak şekilde Denklem (2.30) yerine Denklem (2.31)’de sunulan pratik formül önerilmiştir;

$$i_x \approx 0,4d \quad (2.31)$$

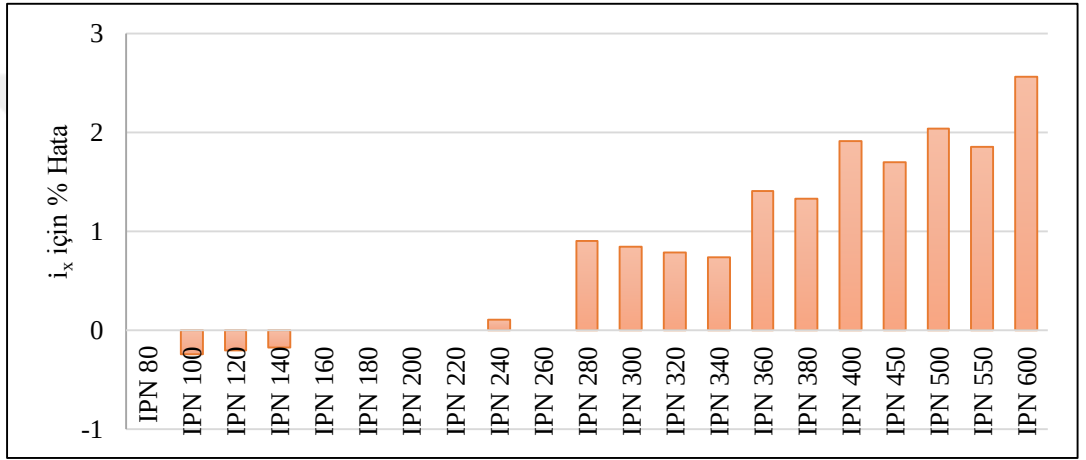
i_x için Denklem (2.31)’den hesaplanan değerlerle, enkesitlerin profil tablolarında listelenen değerler karşılaştırılarak ilgili hata oranları hesaplanmış; hata yüzdeleri ‘kiriş’ enkesitleri için Şekil 2.17, ‘kolon’ enkesitleri için Şekil 2.18’de gösterilmiştir.

Denklem (2.31) ile hesaplanan i_x değerlerinin profil tablolarındaki i_x değerleriyle karşılaştırılmasından elde edilen en büyük hata yüzdeleri ‘kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profiller için güvensiz yönde %2,56 (IPN 600), güvenli yönde ise %6,05 (HEA 550), kolon enkesiti olarak sınıflandırılan profiller için ise güvensiz yönde %3,67 (HEM 100), güvenli yönde %9,29 (HD 260 x 54.1) olarak tespit edilmiştir.

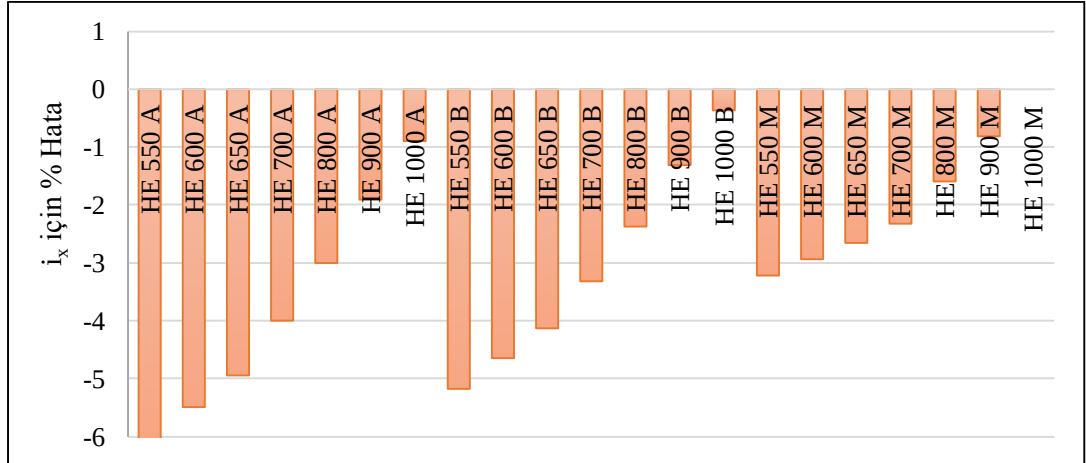
Zayıf ekseninde atalet ve mukavemet momentlerinde olduğu gibi, çalışmada incelenen enkesitlerin tamamı için, makul hata yüzdeleriyle tek bir i_y formülü elde edilemeyeceği belirlenmiştir. Bu nedenle, bu bölümde, ‘kiriş’ ve ‘kolon’ enkesitleri ayrı ayrı incelenmiştir.



a) IPE enkesitler

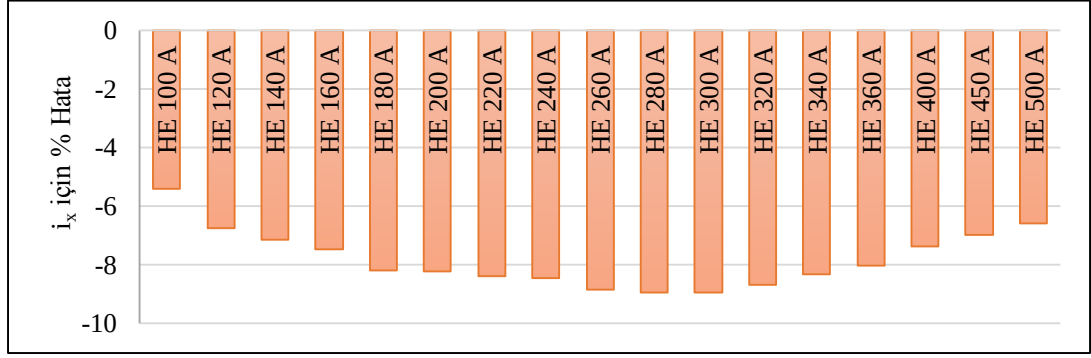


b) IPN enkesitler

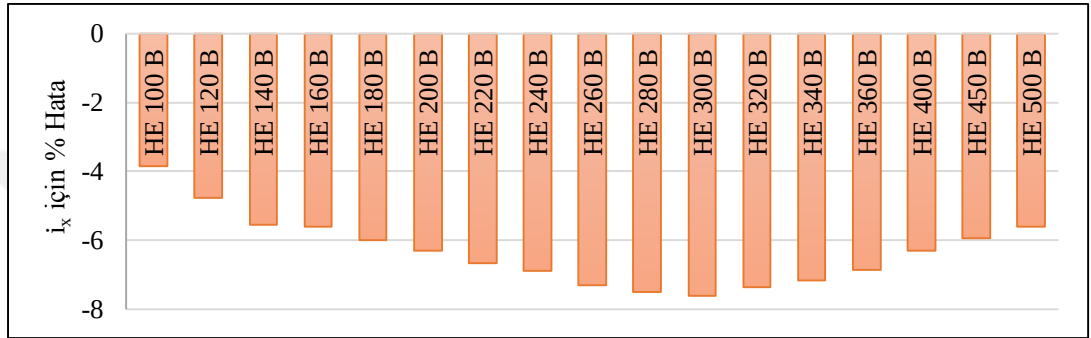


c) HE enkesitler

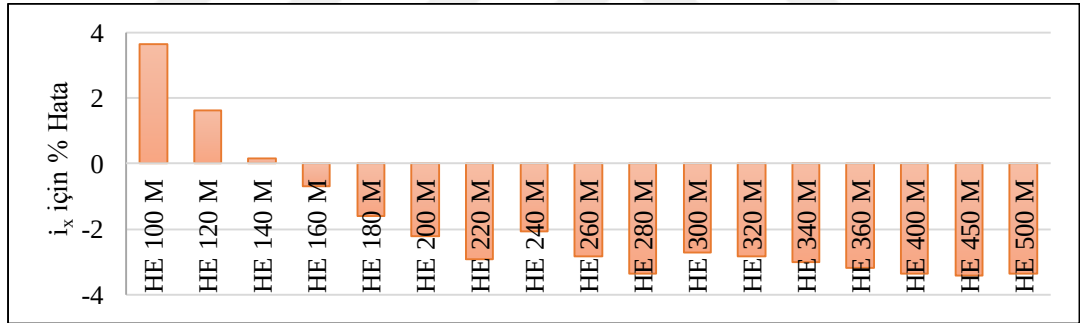
Şekil 2.17. ‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, profil tablolarındaki i_x değerleri ile pratik formülle hesaplanan i_x değerleri arasındaki hata yüzdeleri



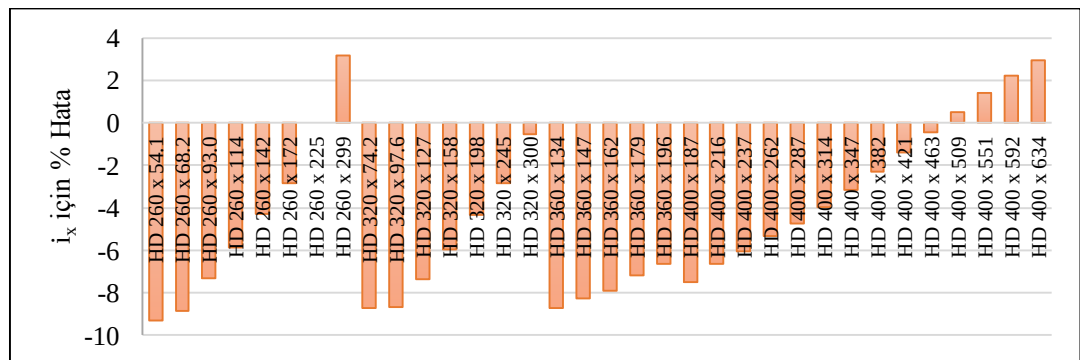
a) HEA enkesitler



b) HEB enkesitler



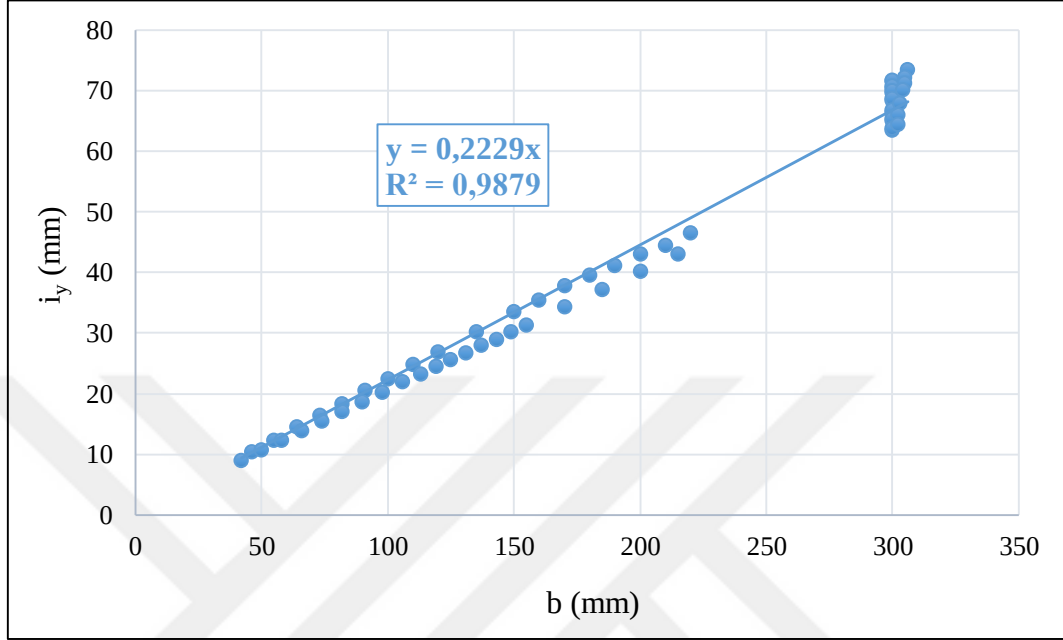
c) HEM enkesitler



d) HD enkesitler

Şekil 2.18. ‘Kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, profil tablolarındaki i_x değerleri ile pratik formülle hesaplanan i_x değerleri arasındaki hata yüzdeleri

Çalışmada ‘kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin (Tablo 2.2) i_y değerleriyle b değerleri arasında doğrusal regresyon analizi yapılmış, analiz sonuçları Şekil 2.19’deki grafikte sunulmuştur.



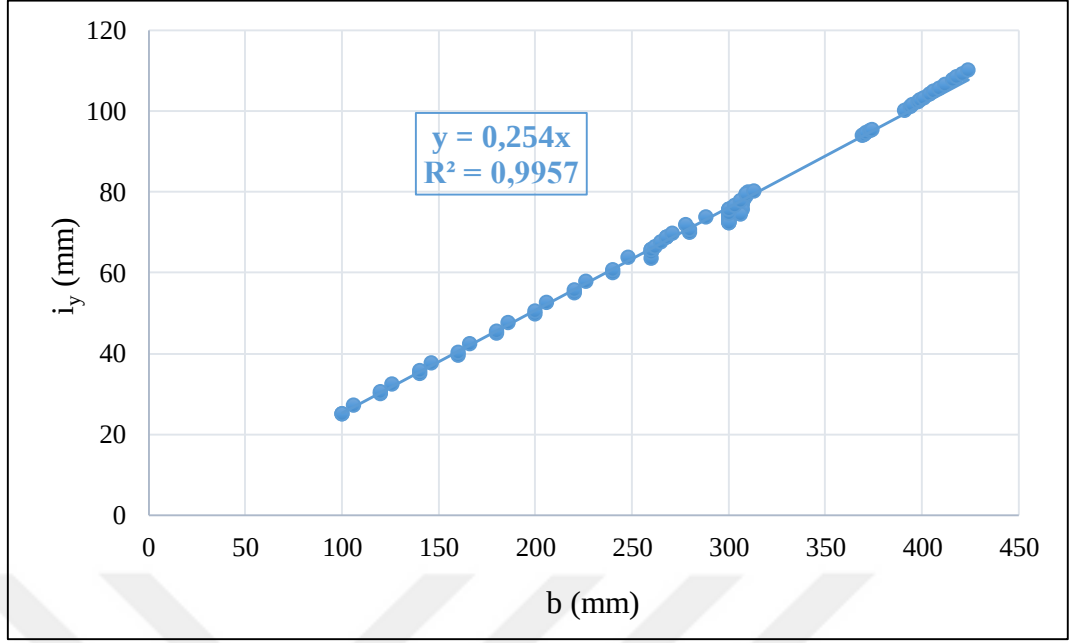
Şekil 2.19. ‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin zayıf atalet yarıçaplarıyla başlık genişlikleri arasındaki ilişkinin doğrusal regresyon analiziyle belirlenmesi

Grafikten de fark edilebileceği gibi, ‘kiriş’ enkesitleri arasında aynı başlık genişliğine ($b \approx 300$ mm) sahip buna karşın zayıf atalet yarıçapları farklı pek çok kesit bulunmaktadır. Bu da, R^2 ’nin düşmesine neden olmaktadır. Doğrusal regresyon analizinin sonucu, güvenli tarafta kalan profil sayısını artıracak şekilde yuvarlandığında, ‘kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin zayıf eksende atalet yarıçapları ($i_{y,kiriş}$) için aşağıdaki pratik formül önerilmektedir;

$$i_{y,kiriş} \approx 0,22b \quad (2.32)$$

Çalışmada ‘kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan enkesitler (Tablo 2.3) için de benzer bir çalışma yürütülmüş, doğrusal regresyon analizi sonuçları Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Analizden elde edilen katsayı yuvarlanarak, ‘kolon’ enkesitlerinin zayıf eksende atalet yarıçapları ($i_{y,kolon}$) için aşağıdaki pratik formül önerilmektedir;

$$i_{y,kolon} \approx 0,25b \quad (2.33)$$

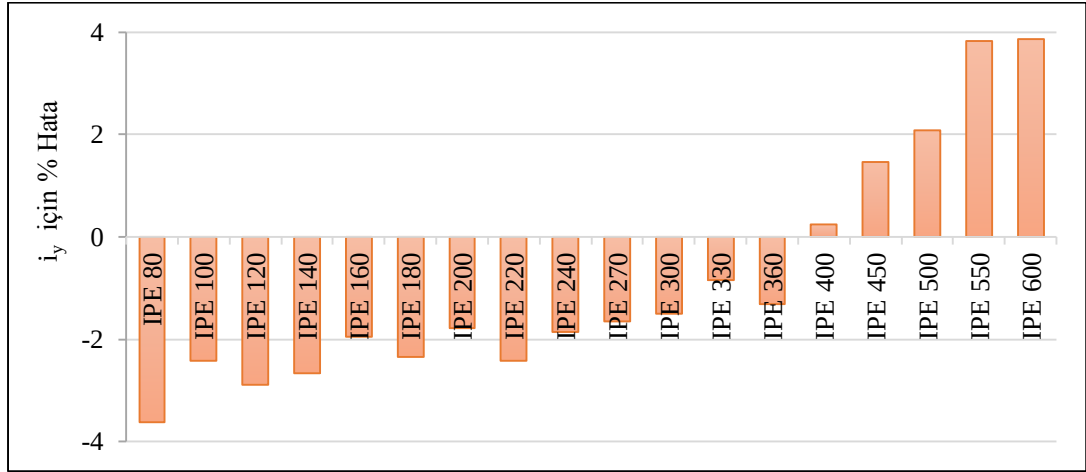


Şekil 2.20. ‘Kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin zayıf atalet yarıçaplarıyla başlık genişlikleri arasındaki ilişkinin doğrusal regresyon analiziyle belirlenmesi

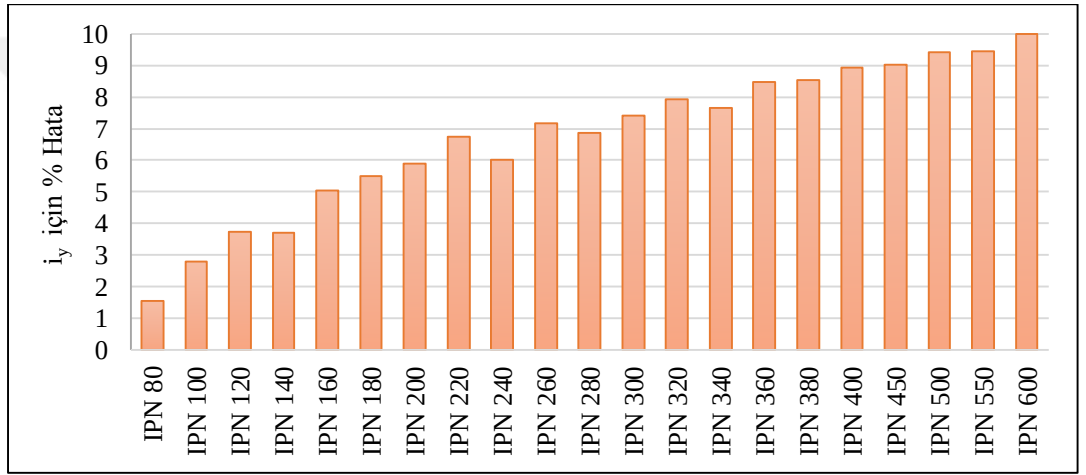
‘Kiriş’ enkesitleri için Denklem (2.32) ile, ‘kolon’ enkesitleri için Denklem (2.33) ile hesaplanan i_y değerleri, enkesitlerin ‘gerçek’ i_y değerleriyle karşılaştırılmış ve hata oranları hesaplanmıştır. Elde edilen hata yüzdeleri sırayla Şekil 2.21 ile Şekil 2.22’de sunulmuştur. Şekil 2.21’e göre, incelenen ‘kiriş’ enkesitlerinde, büyük numaralı enkesitlerde gözlenen sapmalara rağmen, güvensiz yönde en büyük hata %10,0 (IPN 600), güvenli yönde en büyük hata ise %8,41 (HEM 550) olarak belirlenmiştir. Şekil 2.22’ye göre, incelenen ‘kolon’ enkesitlerinde, güvensiz yönde en büyük hata % 3,59 (HEA 500, HD 320 x 74,2) , güvenli yönde en büyük hata ise % 3,90 (HD 400 x 634) olarak belirlenmiştir.

2.4. Kuvvetli Eksende Eğilme Momenti Dayanımı için Pratik Formüller

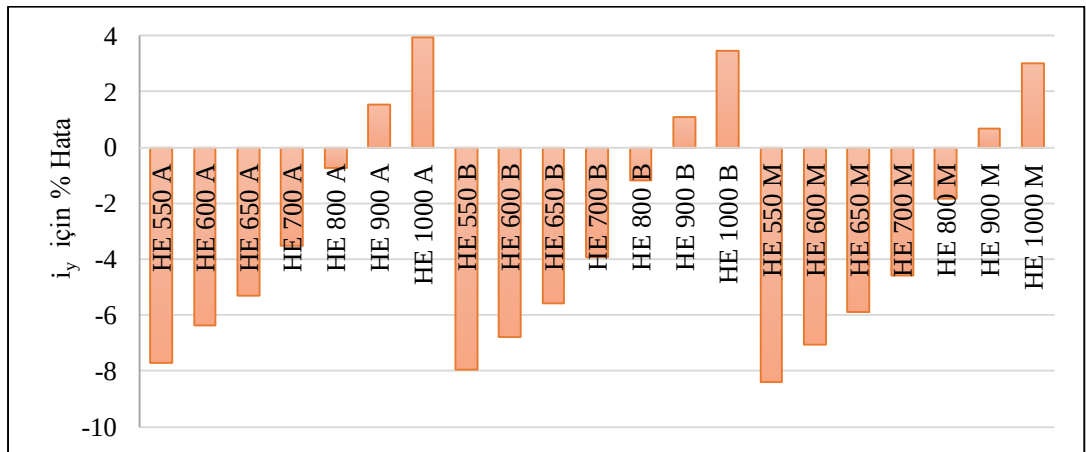
Bu bölümde, yanal burulmalı burkulma tehlikesi olmayan, kuvvetli ekseninde eğilen I-enkesitli Avrupa hadde profillerin moment dayanımları için pratik formüller elde edilmiştir. Açıklıkları boyunca pozitif (üst başlıkta basınç gerilmesine neden olan) moment etkisinde olan, döşemeye üst başlıklarından bağlı döşeme kirişleri bu tür elemanlara örnektir.



a) IPE enkesitler

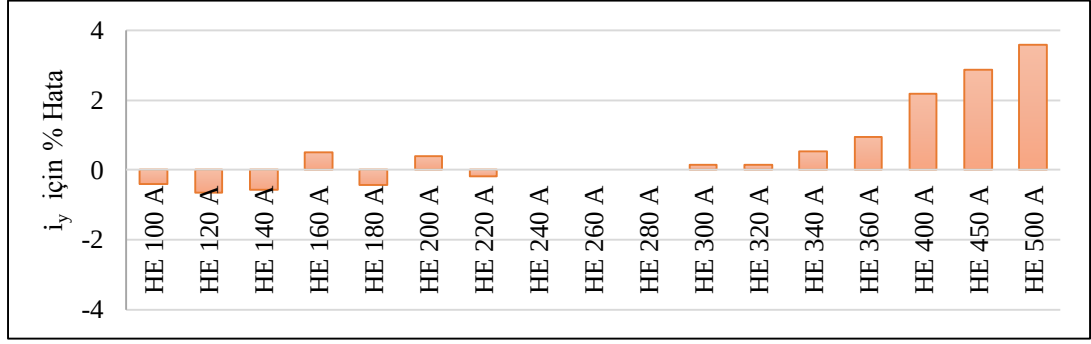


b) IPN enkesitler

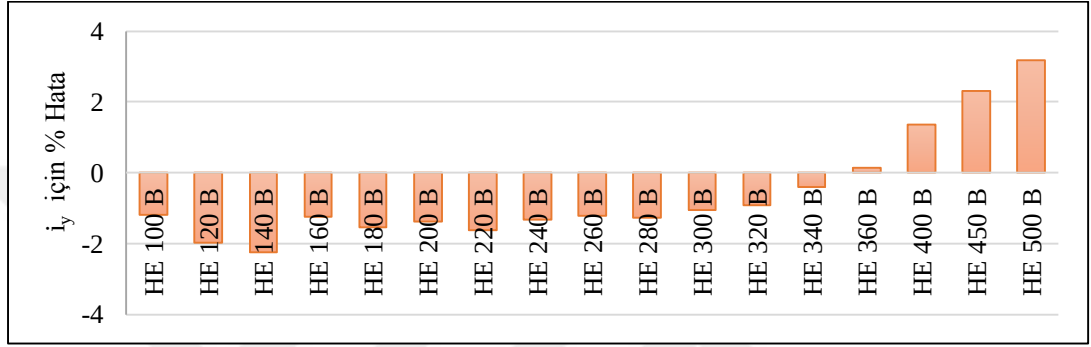


c) HE enkesitler

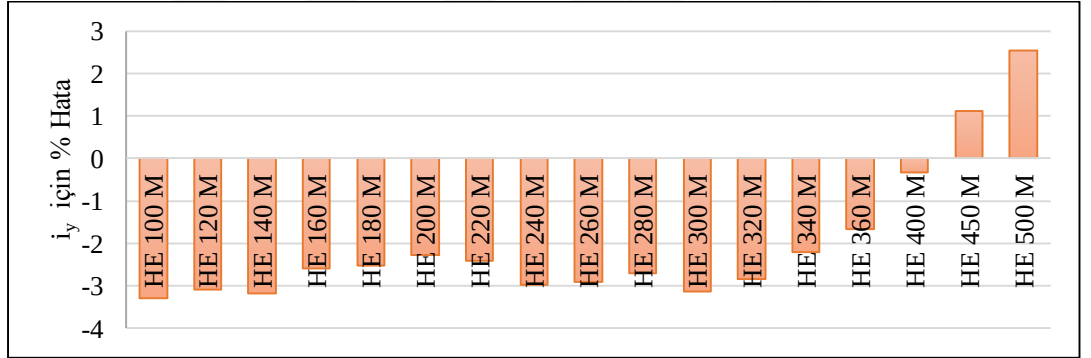
Şekil 2.21. ‘Kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, profil tablolarındaki i_y değerleri ile pratik formülle hesaplanan i_y değerleri arasındaki hata yüzdeleri



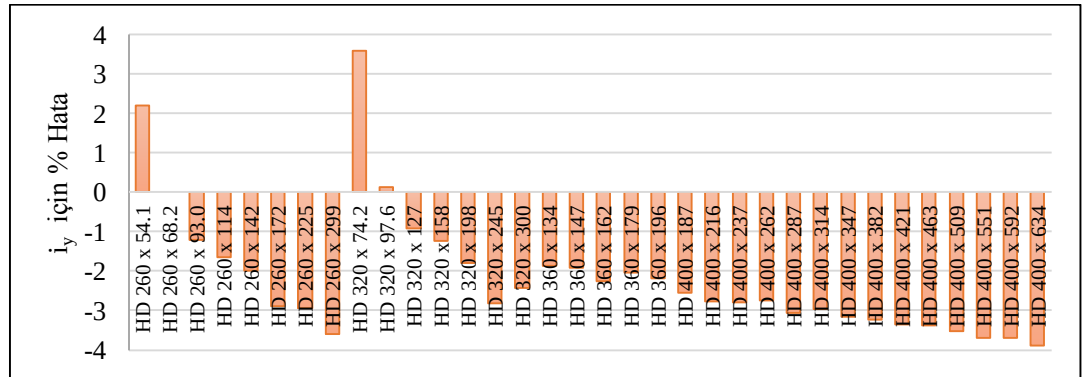
a) HEA enkesitler



b) HEB enkesitler



c) HEM enkesitler



d) HD enkesitler

Şekil 2.22. ‘Kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, profil tablolarındaki i_y değerleri ile pratik formülle hesaplanan i_y değerleri arasındaki hata yüzdeleri

Bu bölümde elde edilen formüller, burulma ve/veya yanal stabilite bağlantılarıyla, enkesitin burulması ya da yanal hareketi kiriş açıklığı boyunca yeterli sayıda noktada engellenen kirişlerde kullanılabilir. Eğilme momenti dayanımları hesaplanırken, ÇYTHYEY [12] Bölüm 9'daki tasarım ilkeleri esas alınmıştır. Yanal burulmalı burkulmanın elemanın davranışını belirleyen bir sınır durum olmadığı kabul edildiğinden, Tablo 2.1'de listelenen çift simetri eksenli I-enkesitli profillerin dayanım hesaplarında, yalnız akma ve yerel burkulma sınır durumları dikkate alınmıştır.

Hem akma hem de yerel burkulma sınır durumları, elemanların üretildiği çeliğin akma gerilmesi F_y 'ye bağlı olduğundan, pratik dayanım formülleri, ÇYTHYEY [12] Tablo 2.1A'da listelenen ve ülkemizde yaygın şekilde kullanılan hazır profillerin üretildiği üç çelik sınıfı (S235, S275, S355) için ayrı ayrı elde edilmiştir. Pratik formüller elde edilirken, Socrates ve Ruddy [11]'nin izlediği yol izlenmiş, moment dayanımlarının sadece G ve d cinsinden ifade edildiği basit ilişkiler elde edilmiştir.

ÇYTHYEY [12] Bölüm 5.4.1'de, eğilme momenti sebebiyle oluşan basınç gerilmeleri etkisindeki enkesit parçaları, kompakt, kompakt olmayan ve narin olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Eğilme elemanlarının dayanım hesaplarında kullanılacak tasarım formülleri enkesiti oluşturan parçaların sınıflarına doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, bu tür elemanların tasarımında yapılması gereken ilk işlem elemanın enkesitini sınıflandırmaktır. ÇYTHYEY [12] Bölüm 5.4.1'de, genişlik/kalınlık oranı (λ), λ_p sınırını aşmayan enkesit parçaları kompakt, λ_p 'yi aşır λ_r 'yi aşmayan enkesit parçaları kompakt olmayan, λ_r 'yi aşanlar ise narin olarak tanımlanmaktadır. ÇYTHYEY [12] Tablo 5.1B'de, λ_p ve λ_r için listelenen sınır değerler Şekil 2.23'te sunulmuştur.

Bölüm 2.1'de de belirtildiği gibi, çalışmada incelenen profillerin gövde ve başlıklarının λ değerleri (sırayla, $\lambda_f = b/2t_f$ ve $\lambda_w = h/t_w$) Tablo 2.1'de listelenmişti. I-enkesitli hadde profillerin başlık ve gövde narinlikleri için Şekil 2.23'te tanımlanan sınır değerler (λ_{pf} , λ_{rf} , λ_{pw} ve λ_{rw}), üç çelik kalitesi için hesaplanarak, Tablo 2.4'te sunulmuştur. Hesaplamalarda, yapısal çeliğin elastisite modülü, ÇYTHYEY [12]'ye uygun olarak, $E = 200000$ MPa olarak alınmıştır.

Tablo 2.1'de verilen genişlik/kalınlık oranları ($b/2t_f$ ve h/t_w değerleri), Tablo 2.4'te verilen sınır değerlerle karşılaştırıldığında, incelenen üç çelik kalitesi için de profillerin tamamının kompakt gövdeli olduğu belirlenmiştir.

	Durum	Tanım	Genişlik/ Kalınlık Oranı, λ	Genişlik / Kalınlık Oranı Sınır Değerleri		Enkesit
				λ_p (kompakt / kompakt olmayan)	λ_r (kompakt olmayan / narin)	
Rijitleştirilmemiş Enkesit Parçası	10	Hadde I-profiller, U-profiller ve T-enkesitli elemanların başlıkları	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	11	Tek ve çift simetri eksenli yapma I-enkesitli elemanların başlıkları	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.95 \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$ [a] [b]	
	12	Tek korniyerlerin kolları	b/t	$0.54 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.91 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	13	Zayıf eksen etrafında eğilme etkisindeki tüm I-enkesitli elemanlar ve U-profiller	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	14	T-enkesitli elemanların gövdeleri	d/t	$0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.03 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Rijitleştirilmiş Enkesit Parçası	15	U-profillerin ve çift simetri eksenli I-profillerin gövdeleri	h/t_w	$3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	16	Tek simetri eksenli I-enkesitli elemanların gövdeleri	h_c/t_w	$\frac{h_c}{h_y} \sqrt{\frac{E}{F_y}} \leq \lambda, \left(0.54 \frac{M_p}{M_y} - 0.09\right)^3 \leq \lambda$ [c]	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	17	Üniform cidar kalınlıklı kutu enkesitli elemanların başlıkları	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	18	Takviye levhaları ve birleşim araçları arasında kalan diyafram levhaları	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	19	Kutu enkesitli elemanların gövdeleri	h/t	$2.42 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	20	Boru enkesitli elemanlar	D/t	$0.07 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.31 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	21	Yapma kutu enkesitlerin başlıkları	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Şekil 2.23. ÇYTHY EY Tablo 5.1B'ye göre, eğilme momenti sebebiyle oluşan basınç gerilmeleri etkisindeki enkesit parçaları için genişlik/kalınlık oranlarının sınır değerleri

Tablo 2.4. Eğilme momenti etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli hadde profillerin enkesit parçaları için λ_p ve λ_r değerleri

F_y (MPa)	Başlık		Gövde	
	$\lambda_{pf} = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$\lambda_{rf} = 1,00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$\lambda_{pw} = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$\lambda_{rw} = 5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
235	11,09	29,17	109,69	166,29
275	10,25	26,97	101,40	153,72
355	9,02	23,74	89,25	135,29

İncelenen profiller arasında başlıkları narin enkesitli profil bulunmamakla birlikte, bazı profillerin başlıklarının kompakt olmayan sınıfına dahil olduğu görülmüştür. Başlıkları kompakt olmayan enkesitler Tablo 2.5’te listelenmiştir. Tablodan da fark edilebileceği gibi, bu kesitlerin tamamı, bu çalışmada “kolon” enkesiti olarak sınıflandırılan kesitlerdir.

Tablo 2.5. Eğilme momenti etkisi altında başlıkları kompakt olmayan profiller

S235	S275	S355
HD 260 x 54.1	HE 260 A	HE 180 A
HD 320 x 74.2	HE 280 A	HE 200 A
	HE 300 A	HE 220 A
	HD 260 x 54.1	HE 240 A
	HD 260 x 68.2	HE 260 A
	HD 320 x 74.2	HE 280 A
	HD 360 x 134	HE 300 A
		HE 320 A
		HE 340 A
		HD 260 x 54.1
		HD 260 x 68.2
		HD 320 x 74.2
		HD 320 x 97.6
		HD 360 x 134
		HD 360 x 147

ÇYTHYEV [12] Bölüm 9.2.1’e göre, kuvvetli eksen etrafında eğilen, yanal burulmalı burkulması önlenmiş, gövde ve başlıkları kompakt olan çift simetri eksenli I-enkesitli bir elemanın akma sınır durumundaki karakteristik eğilme momenti dayanımı (M_{nx}), kuvvetli eksene göre hesaplanan plastik eğilme momenti dayanımına (M_{px}) eşittir ve Denklem (2.34) ile hesaplanmalıdır.

$$M_{nx} = M_{px} = F_y W_{px} \quad (2.34)$$

ÇYTHYEY [12] Bölüm 9.3.2'ye göre, kuvvetli eksenleri etrafında eğilen, yanal burulmalı burkulması önlenmiş, gövdeleri kompakt, başlıkları kompakt olmayan çift simetri eksenli I-enkesitli elemanların, yerel burkulma sınır durumunda, karakteristik eğilme momenti dayanımları (M_{nx}), Denklem (2.35) ile hesaplanmalıdır.

$$M_{nx} = M_{px} - (M_{px} - 0,7F_y W_{ex}) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \quad (2.35)$$

Çalışmada, kompakt olmayan başlıklı enkesitlerin başlık narinliklerinin, ilgili λ_{pf} değerlerine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Örnek olarak, profiller arasında başlık narinliği en yüksek olan ($\lambda_f=13.68$) HD 260 x 54.1 kesitinin, S355 çelik kalitesi için, Denklem (2.34)'ten hesaplanan dayanımı 254 kNm olup, bu değer Denklem (2.35)'ten hesaplanan dayanım olan 225 kNm'ye oldukça yakındır (hata oranı %12.8'dir). Bu nedenle, pratik formüller çıkarılırken, Denklem (2.34) temel alınmış, ancak hata yüzdeleri belirlenirken, kompakt olmayan başlıklı elemanların “gerçek” dayanımları Denklem 2.35'ten hesaplanmıştır. M_{px} , akma gerilmesi F_y ile enkesitin kuvvetli ekseninde plastik mukavemet momenti W_{px} çarpılarak hesaplandığından, F_y değeri Denklem (2.34)'te yerine konulduğunda, M_{px} , G ve d cinsinden elde edilebilir.

W_{px} için Denklem (2.13)'te önerilen pratik formül, ilgili F_y değerleriyle birlikte Denklem (2.34)'te kullanılarak moment dayanımının birimi kNm'ye çevrildiğinde, incelenen üç çelik kalitesi için karakteristik eğilme momenti dayanımları ($M_{nx,S235}$, $M_{nx,S275}$ ve $M_{nx,S355}$) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$M_{nx,S235} \approx 235(48Gd)10^{-6} = 0,01128Gd = \frac{Gd}{88,7} \quad (2.36)$$

$$M_{nx,S275} \approx 275(48Gd)10^{-6} = 0,0132Gd = \frac{Gd}{75,8} \quad (2.37)$$

$$M_{nx,S355} \approx 355(48Gd)10^{-6} = 0,0170Gd = \frac{Gd}{58,7} \quad (2.38)$$

Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) yöntemine göre, bir çelik yapı elemanının tasarım dayanımı (ϕR_n), bu yöntem için belirlenen yük birleşimlerinden elde edilen gerekli dayanıma (R_u) eşit ya da daha büyük olmalıdır. Bu yöntemde,

elemanların tasarım dayanımları (ϕR_n), karakteristik dayanımları (R_n) ile dayanım katsayılarının (ϕ) çarpımından elde edilir. ÇYTHYİY [12] Bölüm 9.1’de, eğilme momenti etkisindeki bir çelik yapı elemanı için dayanım katsayısının $\phi_b=0,9$ alınması gerektiği belirtilmiştir. $\phi_b=0,9$ kullanılarak, Denklem (2.36), Denklem (2.37) ve Denklem (2.38)’de elde edilen karakteristik eğilme momenti dayanımları (M_{nx}) tasarım eğilme momenti dayanımlarına ($\phi_b M_{nx}$) çevrildiğinde, aşağıdaki basit ifadeler elde edilir;

$$\phi_b M_{nx,S235} \approx 0,9 \frac{Gd}{88,7} = \frac{Gd}{98,5} \quad (2.39)$$

$$\phi_b M_{nx,S275} \approx 0,9 \frac{Gd}{75,8} = \frac{Gd}{84,2} \quad (2.40)$$

$$\phi_b M_{nx,S355} \approx 0,9 \frac{Gd}{58,7} = \frac{Gd}{65,2} \quad (2.41)$$

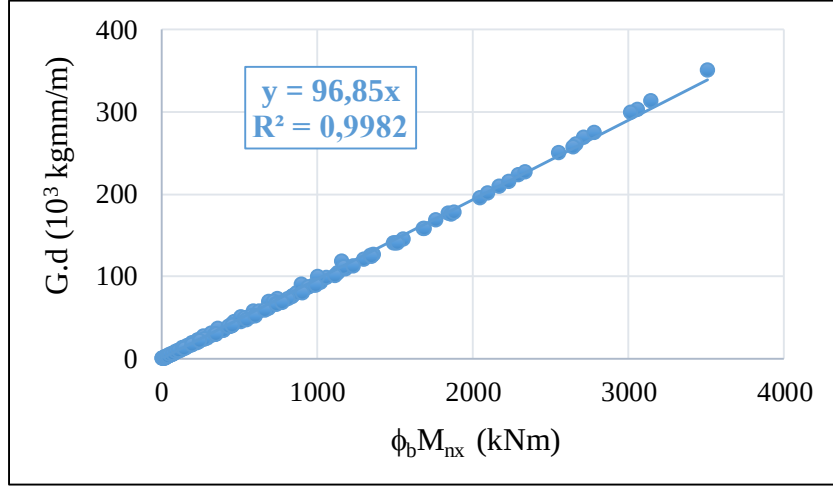
Tablo 2.1’de listelenen tüm profillerin tasarım eğilme momenti dayanımları ($\phi_b M_{nx}$), çalışmada incelenen üç çelik sınıfı için Denklem (2.39), Denklem (2.40) ve Denklem (2.41)’den uygun olan kullanılarak hesaplanmış, hesaplanan dayanımlarla Gd değerleri arasında doğrusal regresyon analizleri yapılarak analiz sonuçları Şekil 2.24’te sunulmuştur. Güvenli tarafta kalan profil sayısını artırmak ve hatırlamayı kolaylaştırmak amacıyla, tasarım dayanımları için aşağıdaki pratik formüller önerilmektedir;

$$\phi_b M_{nx,S235} \approx \frac{Gd}{100} \quad (2.42)$$

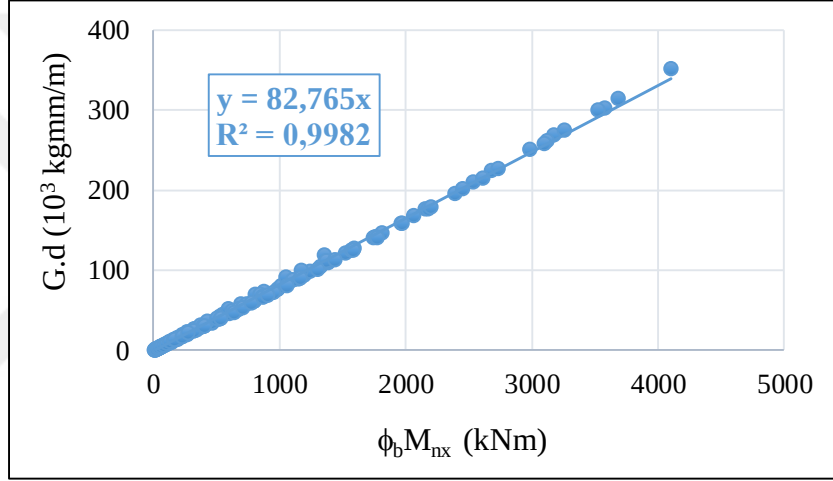
$$\phi_b M_{nx,S275} \approx \frac{Gd}{85} \quad (2.43)$$

$$\phi_b M_{nx,S355} \approx \frac{Gd}{65} \quad (2.44)$$

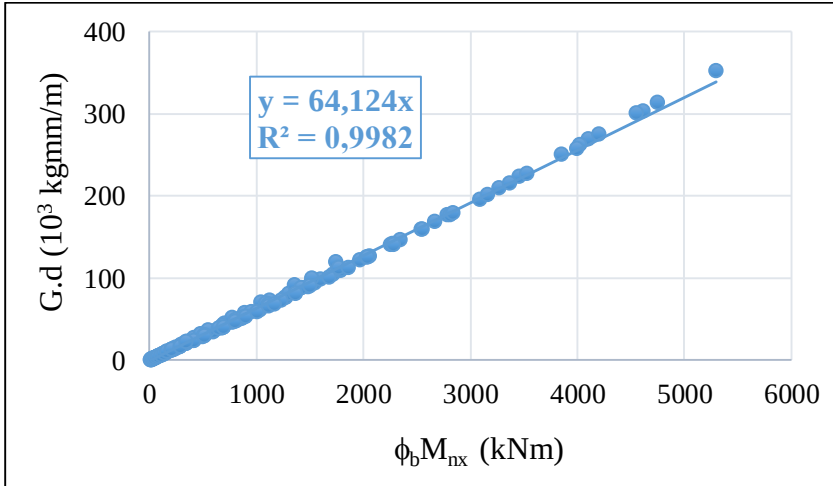
Denklem (2.42), Denklem (2.43) ve Denklem (2.44)’te verilen pratik dayanım formülleri kullanılırken G kg/m, d mm cinsinden yazılmalıdır. Bu şekilde, tasarım eğilme momenti dayanımı kNm cinsinden elde edilecektir.



a) $F_y = 235$ MPa



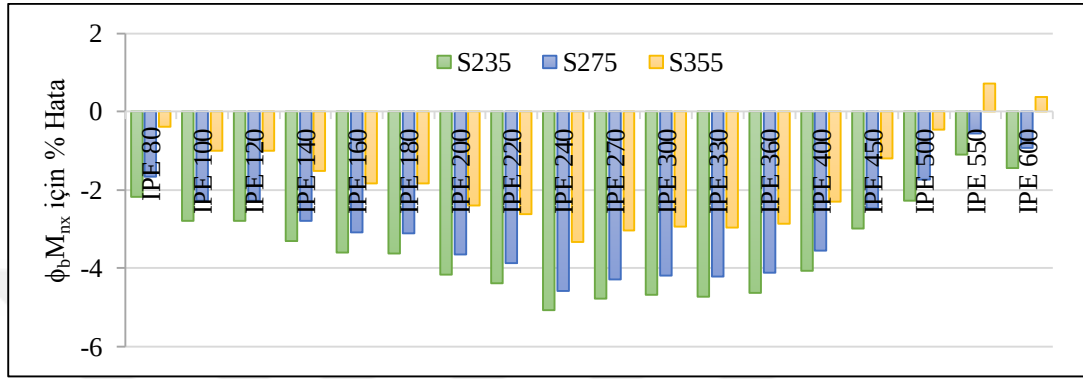
b) $F_y = 275$ MPa



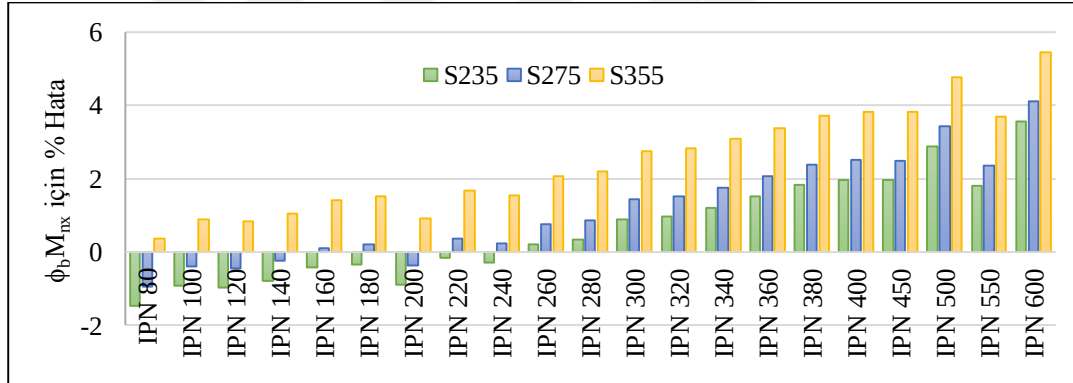
c) $F_y = 355$ MPa

Şekil 2.24. Çalışmada incelenen her çelik kalitesi için, incelenen tüm profillerin $\phi_b M_{nx}$ değerleri ile Gd değerleri arasındaki ilişkilerin doğrusal regresyon analiziyle belirlenmesi

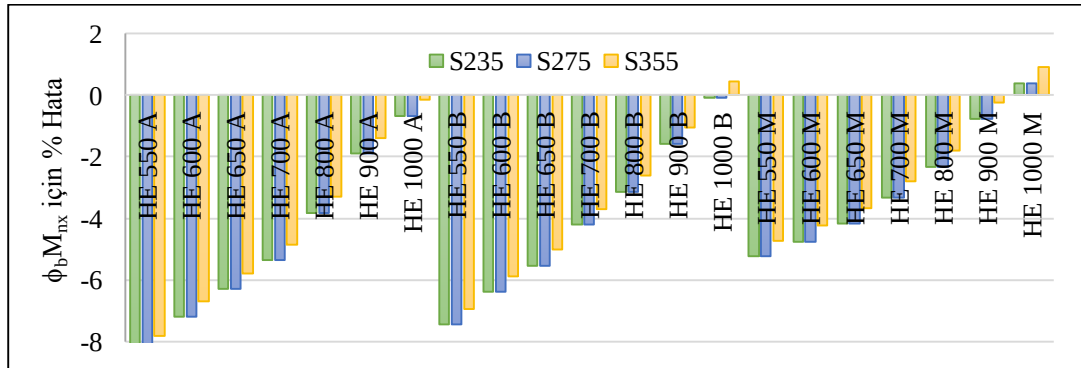
Tezin kapsamında incelenen üç çelik kalitesi ve tüm enkesitler için, Denklem (2.42), Denklem (2.43) ve Denklem (2.44)'te önerilen pratik formüllerle hesaplanan 'yaklaşık' tasarım eğilme momenti dayanımları, Denklem (2.34) veya Denklem (2.35) kullanılarak hesaplanan 'gerçek' dayanımlarla karşılaştırılmış; hata yüzdeleri Şekil 2.25 ve Şekil 2.26'da sunulmuştur.



a) IPE enkesitler

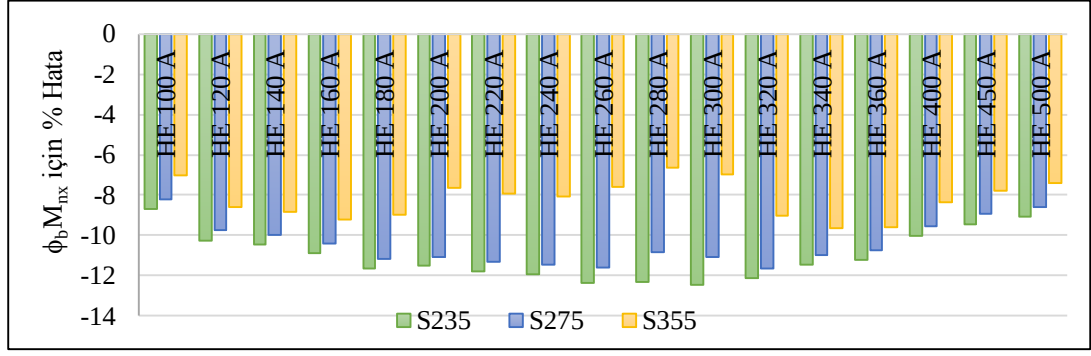


b) IPN enkesitler

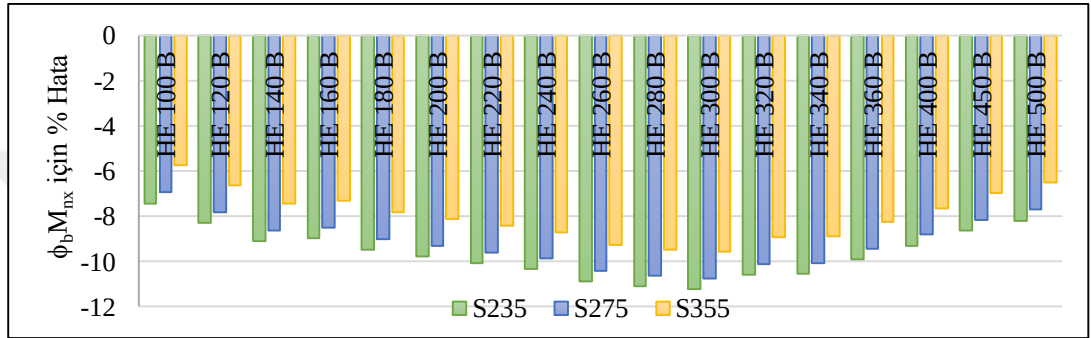


c) HE enkesitler

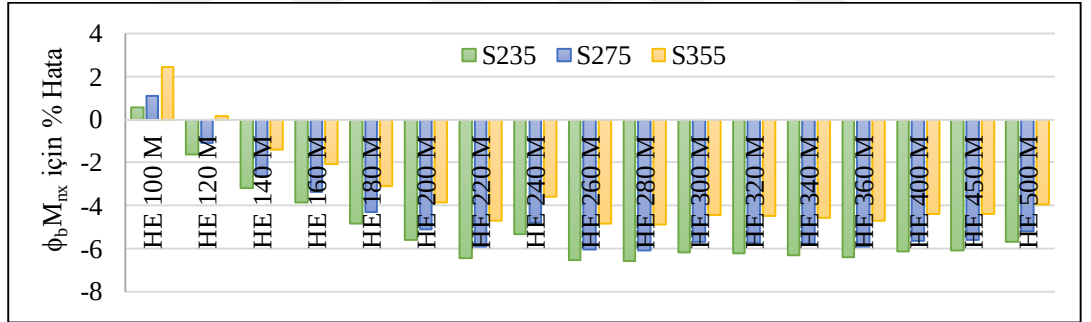
Şekil 2.25. 'Kiriş' enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, 'gerçek' $\phi_b M_{nx}$ değerleriyle, pratik formüllerden hesaplanan 'yaklaşık' $\phi_b M_{nx}$ değerleri arasındaki hata yüzdeleri



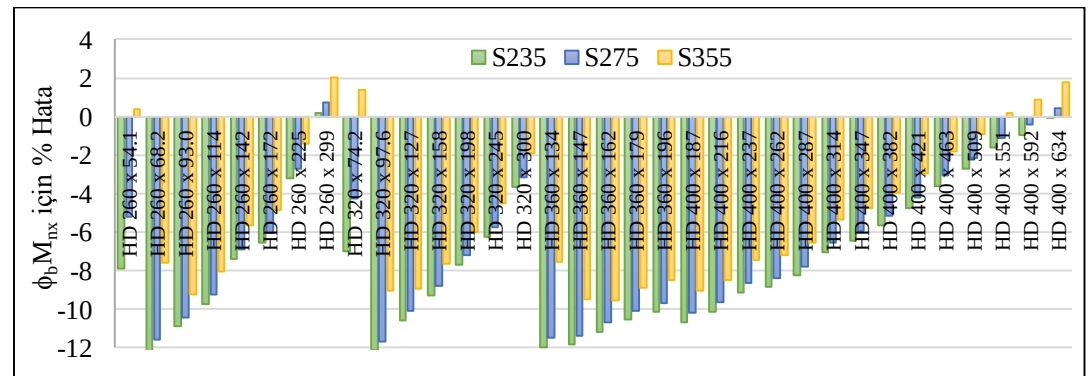
a) HEA enkesitler



b) HEB enkesitler



c) HEM enkesitler



d) HD enkesitler

Şekil 2.26. ‘Kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan profillerin, ‘gerçek’ $\phi_b M_{nx}$ değerleriyle, pratik formüllerden hesaplanan ‘yaklaşık’ $\phi_b M_{nx}$ değerleri arasındaki hata yüzdeleri

Şekil 2.25 ve 2.26’da verilen grafikler incelendiğinde, Denklem (2.41), Denklem (2.42) ve Denklem (2.43)’te önerilen pratik formüllerin, tezin kapsamında ele alınan tüm profil ve çelik kaliteleri için, tasarım eğilme momenti dayanımlarını güvenli yönde en fazla %12,5 (S235, HEA 300), güvensiz yönde ise en fazla %5,45 (S355, IPN 600) hatayla tahmin ettiği tespit edilmiştir.

GKT yönteminin kullanılacağı durumlarda ise, YDKT yöntemi için önerilen denklemler, denklemlerdeki sabitler (100, 85 ve 65), 1,5 ile çarpılarak (yani, 150, 127,5 ve 97,5 olarak alınarak) kullanılabilir; zira, ÇYTHYEEY [12]’ye göre, kuvvetli ekseninde eğilmede güvenli eğilme momenti dayanımı M_{nx}/Ω_b , karakteristik eğilme momenti dayanımının $\Omega_b=1,67$ değerine bölünmesiyle hesaplanır. Diğer bir ifadeyle, tasarım eğilme momenti dayanımı $\phi_b M_{nx}$, güvenli eğilme momenti dayanımı M_{nx}/Ω_b ’nin 1,5 katına eşittir.

Denklem (2.41), Denklem (2.42) ve Denklem (2.43)’teki formüller dayanım kontrollerinde doğrudan kullanılabilir. Ancak, dayanımlarının yeterliliği kontrol edilirken, tasarımda kullanılan yöntem (YDKT veya GKT) için ÇYTHYEEY [12]’de tanımlanan yük katsayıları ve birleşimlerinin kullanılması gerektiği unutulmamalıdır.

2.5. Eksenel Basınç Kuvveti Dayanımı için Pratik Tasarım Formülleri

Tezde ele alınan enkesitlere sahip elemanların eksenel basınç kuvveti dayanımları hesaplanırken, ÇYTHYEEY [12] Bölüm 8’de tanımlanan tasarım esasları kullanılmıştır. Dayanımlar belirlenirken eleman için tanımlı bütün (yerel ve genel) burkulma sınır durumları dikkate alınmalıdır. Eksenel basınç kuvveti etkisindeki I-enkesitli hadde profiller için üç genel burkulma sınır durumu vardır. Bunlardan ikisi eğilmeli burkulma, diğeri ise burulmalı burkulmadır. Genel burkulma modları, elemanın burkulma boylarına, burkulma boyları da elemanın mesnet ve ara destek koşullarına bağlıdır. Bu çalışmada, elemanların zayıf eksenlerinde eğilmeli burkulma boylarının burulmalı burkulma boylarına eşit olduğu kabul edilmiştir (yani, $L_{cy}=L_{cz}$). Bu durumda, tezde incelenen enkesit ve çelik kaliteleri için, elemanın boyu çok kısa olmadığı müddetçe, burulmalı burkulma sınır durumu hesaplarda göz ardı edilebilir. Bu nedenle, bu çalışmada genel burkulma sınır durumlarından yalnız eğilmeli burkulma sınır durumları dikkate alınmıştır.

Elemanın elastik olmayan bölgede gerçekleşen eğilmeli burkulma sınır durumundaki dayanımı, üretildiği çeliğin akma gerilmesine bağlı olduğundan, pratik basınç dayanımı formülleri, eğilme dayanımı formüllerinde olduğu gibi üç çelik sınıfı (S235, S275, S355) için ayrı ayrı elde edilmiştir. Pratik formüller elde edilirken, Socrates ve Ruddy [11]'nin izlediği yol izlenmiş, basınç dayanımları enkesit alanı (A) ve elemanın eğilmeli burkulma sınır durumlarındaki en büyük narinlik oranı (L_c/i) cinsinden ifade edilmeye çalışılmıştır.

Tıpkı eğilme elemanlarının tasarımında olduğu gibi, basınç elemanlarının ÇYTHYAY [12]'ye göre tasarımında da ilk olarak enkesit sınıflandırılması yapılmalıdır. ÇYTHYAY [12] Bölüm 5.4.1'e göre, eksenel basınç kuvveti etkisi altındaki enkesitler, yerel burkulma sınır durumu göz önüne alındığında narin ve narin olmayan enkesitler olarak ikiye ayrılır. Hiçbir enkesit parçasının genişlik/kalınlık oranı (λ), λ_r sınır değerini aşmayan enkesitler, narin olmayan enkesit; en az bir enkesit parçasının genişlik/kalınlık oranı, λ_r sınır değerini aşan enkesitler, narin enkesit olarak sınıflandırılır. λ_r hesabında kullanılacak tasarım denklemleri, ÇYTHYAY [12] Tablo 5.1A'da verilmiş olup, bu tablo tezde Şekil 2.27'de sunulmuştur.

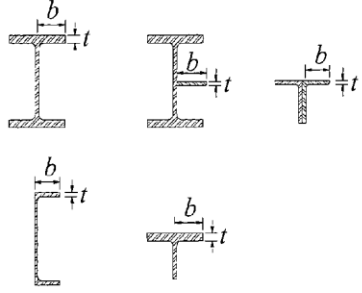
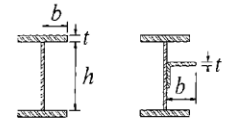
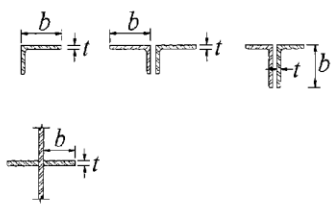
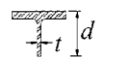
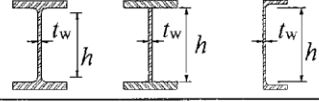
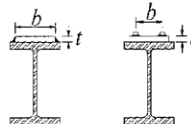
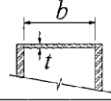
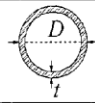
Çalışmada incelenen profillerin gövde ve başlıklarının λ değerleri (sırayla, $\lambda_f = b/2t_f$ ve $\lambda_w = h/t_w$) Tablo 2.1'de listelenmişti. I-enkesitli hadde profillerin başlık ve gövde narinlikleri için Şekil 2.27'de tanımlanan sınır değerler (λ_{rf} ve λ_{rw}), üç çelik kalitesi için hesaplanarak, Tablo 2.6'da sunulmuştur. Hesaplamalarda, ÇYTHYAY [12]'ye uygun olarak, $E = 200000$ MPa alınmıştır.

Tablo 2.6. Eksenel basınç kuvveti etkisindeki I-enkesitli hadde profillerin enkesit parçalarının λ_r değerleri

Akma dayanımı, F_y (MPa)	Başlık	Gövde
	$\lambda_r = 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$\lambda_r = 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
235	16,35	43,47
275	15,10	40,18
355	13,30	35,37

Çalışma kapsamında incelenen tüm profil ve çelik kaliteleri için, Tablo 2.1'de listelenen başlık ve gövde narinlikleri Tablo 2.6'da verilen λ_r değerleriyle

karşılaştırılmış; narin enkesitler belirlenerek Tablo 2.6’da sunulmuştur. Tablo 2.6’da listelenmeyen enkesitler incelenen çelik kalitelerinde narin olmayan enkesitlerdir.

	Durum	Tanım	Genişlik / Kalınlık Oranı, λ	Genişlik / Kalınlık Oranı Sınır Değeri, λ_r	Enkesit
Rijitleştirilmemiş Enkesit Parçası	1	Hadde I- profillerinin başlıkları, bu profillere bağlanan levhalar, boşluksuz olarak sürekli birleştirilen çift korniyerlerin dış kolları, U- ve T- profillerin başlıkları	b/t	$0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	2	Yapma I-profillerin başlıkları, bu profillere bağlanan levhalar ve korniyerlerin dış kolları	b/t	$0.64 \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$ [a]	
	3	Tek korniyerlerin kolları, birbirlerine boşluklu olarak bağlanan çift korniyerlerin kolları ve tüm rijitleştirilmemiş elemanlar	b/t	$0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	4	T-profillerin gövdeleri	d/t	$0.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Rijitleştirilmiş Enkesit Parçası	5	U-profillerin ve çift simetri eksenli I- profillerin gövdeleri	h/t_w	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	6	Üniform kalınlıklı dikdörtgen ve kare kutu enkesitlerin gövde ve başlıkları	b/t	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	7	Birleşim araçları arasında kalan takviye levhaları ve diyafram levhaları	b/t	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	8	Tüm diğer rijitleştirilmiş enkesit parçaları	b/t	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	9	Boru enkesitli elemanlar	D/t	$0.11 \frac{E}{F_y}$	

Şekil 2.27. ÇYTHYEEY Tablo 5.1A’ya göre, eksenel basınç kuvvet etkisindeki enkesit parçaları için genişlik/kalınlık oranlarının sınır değerleri

Tablo 2.7. Eksenel basınç kuvveti etkisi altında narin enkesitli profiller

S235	S275	S355
HE 800 A (Gövde)	IPE 450 (Gövde)	IPE 330 (Gövde)
HE 900 A (Gövde)	IPE 500 (Gövde)	IPE 360 (Gövde)
HE 1000 A (Gövde)	IPE 550 (Gövde)	IPE 400 (Gövde)
HE 1000 B (Gövde)	IPE 600 (Gövde)	IPE 450 (Gövde)
	HE 800 A (Gövde)	IPE 500 (Gövde)
	HE 900 A (Gövde)	IPE 550 (Gövde)
	HE 1000 A (Gövde)	IPE 600 (Gövde)
	HE 900 B (Gövde)	HE 600 A (Gövde)
	HE 1000 B (Gövde)	HE 650 A (Gövde)
	HE 1000 M (Gövde)	HE 700 A (Gövde)
		HE 800 A (Gövde)
		HE 900 A (Gövde)
		HE 1000 A (Gövde)
		HE 800 B (Gövde)
		HE 900 B (Gövde)
		HE 1000 B (Gövde)
		HE 900 M (Gövde)
		HE 1000 M (Gövde)
		HD 260 x 54.1 (Başlık)
		HD 320 x 74.2 (Başlık)

*Parantez içindeki ifadeler profilin hangi enkesit parçasının narin olduğunu belirtmektedir.

ÇYTHYFY [12]'de narin olmayan enkesitli basınç elemanlarının tasarım esasları Bölüm 8.2'de, narin enkesitli basınç elemanlarının tasarım esasları ise Bölüm 8.5'te tanımlanmıştır. Buna göre, narin olmayan enkesitli elemanların karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımları (P_n) Denklem (2.45) ile narin enkesitli elemanların eksenel basınç kuvveti dayanımları (P_{ne}) ise Denklem (2.46) ile hesaplanmalıdır;

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (2.45)$$

$$P_{ne} = F_{cr} A_e \quad (2.46)$$

Narin ve narin olmayan enkesitli elemanların tasarımlarındaki en belirgin fark, narin olmayan enkesitli elemanlarda kayıpsız alanın (A_g), narin enkesitli elemanlarda ise etkin alanın (A_e) kullanılmasıdır. Denklem (2.45) ve Denklem (2.46)'da, kritik burkulma gerilmesi F_{cr} ; elemanın en büyük narinliğine (L_c/i) bağlı olarak, Denklem (2.47) veya Denklem (2.48)'den uygun olan kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$\frac{L_c}{i} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ veya } \frac{F_y}{F_e} \leq 2,25 \text{ için; } F_{cr} = \left(0,658 \frac{F_y}{F_e} \right) F_y \quad (2.47)$$

$$\frac{L_c}{i} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ veya } \frac{F_y}{F_e} > 2,25 \text{ için; } F_{cr} = 0,877 F_e \quad (2.48)$$

Eğilmeli burkulma sınır durumunda, elastik burkulma gerilmesi F_e Denklem (2.49)'daki gibi tanımlanmaktadır.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{i} \right)^2} \quad (2.49)$$

ÇYTHYEEY [12] Bölüm 8.1.1'de, enkesit sınıfından bağımsız olarak, basınç elemanlarının narinlik oranı (L_c/i) 200 ile sınırlanmaktadır. Bölüm 8.1.2'de ise yine enkesit sınıfından bağımsız olarak, dayanım katsayısı $\phi_c=0,9$ olarak tanımlanmaktadır.

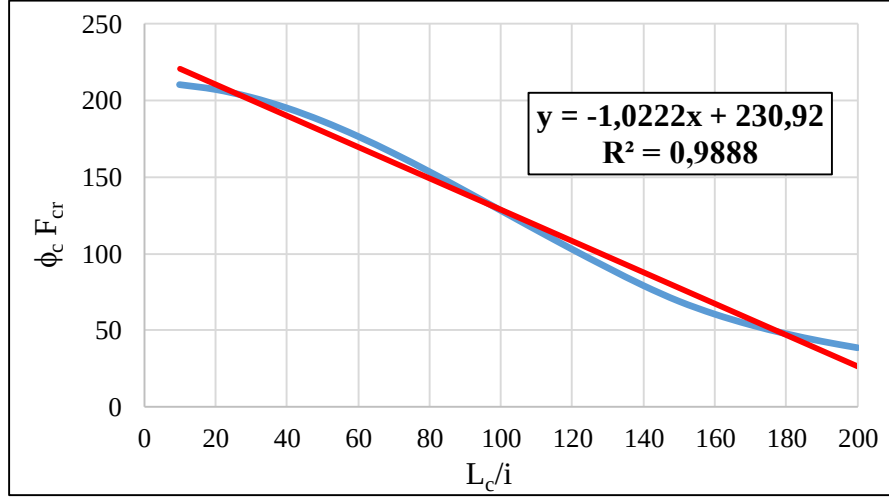
Denklem (2.47) ve Denklem (2.48)'den uygun olanla hesaplanıp dayanım katsayısıyla (ϕ_c) çarpılan kritik burkulma gerilmelerinin (diğer bir ifadeyle, “tasarım burkulma gerilmeleri” $\phi_c F_{cr}$ 'nin) narinlik oranına (L_c/i) göre değişimleri, incelenen üç çelik kalitesi için Şekil 2.28'de ayrı ayrı çizdirilmiştir. Şekil 2.28'de sunulan grafiklerde, ‘gerçek’ tasarım burkulma gerilmesi eğrilerinin doğrusal regresyon analizlerinden elde edilen eğilim çizgileri de görülmektedir. Güvenli tarafta kalan profil sayısını artırmak ve hatırlamayı kolaylaştırmak amacıyla, tasarım burkulma gerilmeleri $\phi_c F_{cr}$ için aşağıdaki pratik formüller önerilmektedir;

$$(\phi_c F_{cr})_{S235} \approx 230 - 1,10(L_c / i) \quad (2.50)$$

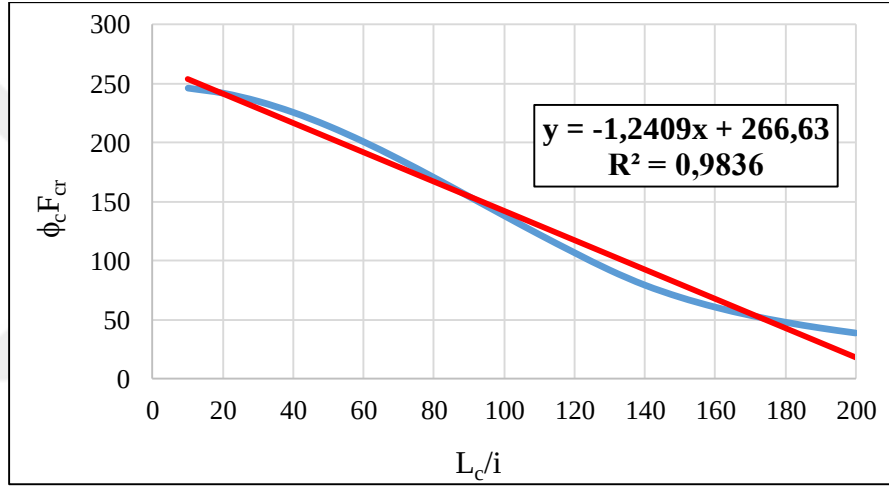
$$(\phi_c F_{cr})_{S275} \approx 270 - 1,35(L_c / i) \quad (2.51)$$

$$(\phi_c F_{cr})_{S355} \approx 330 - 1,80(L_c / i) \quad (2.52)$$

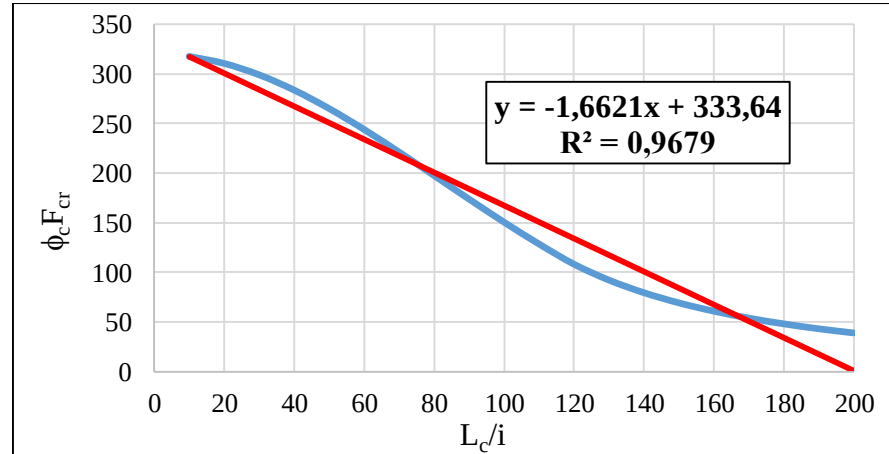
Denklem (2.50), Denklem (2.51) ve Denklem (2.52) kullanılarak, kolonun en büyük eğilmeli burkulma boyu denklemlere koyulduğunda, $\phi_c F_{cr}$ tasarım burkulma gerilmesi MPa cinsinden elde edilecektir.



a) $F_y = 235 \text{ MPa}$



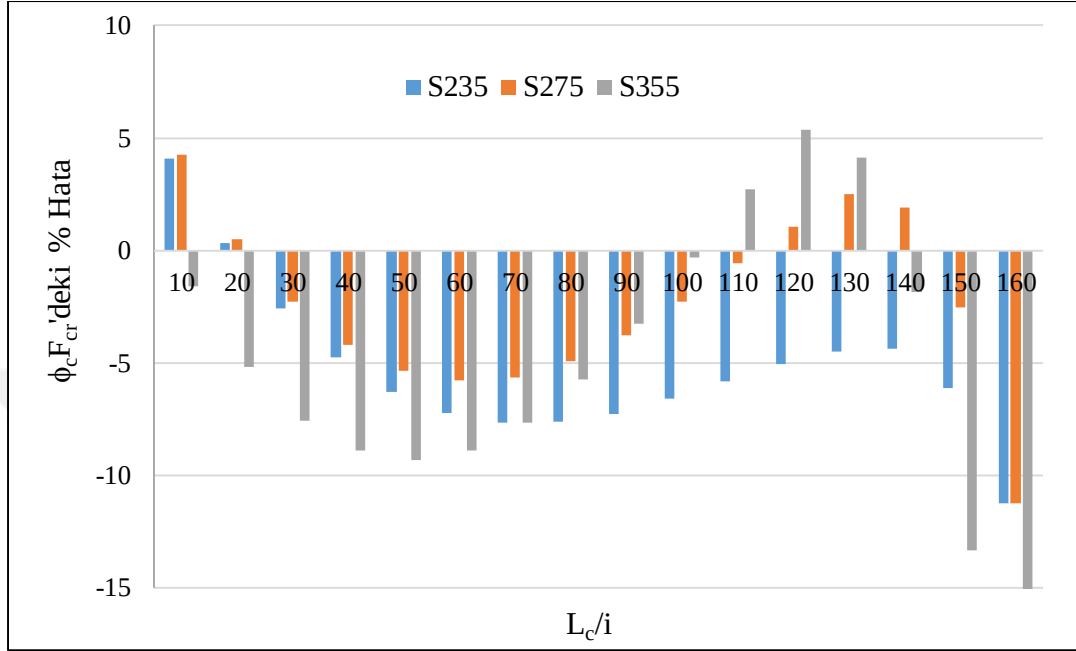
b) $F_y = 275 \text{ MPa}$



c) $F_y = 355 \text{ MPa}$

Şekil 2.28. Çalışmada incelenen her çelik kalitesi için, $\phi_c F_{cr}$ ile L_c/i arasında tanımlanan tasarım eğrisinin ‘yaklaşık’ tasarım doğrusuna dönüştürülmesi

Denklem (2.50), Denklem (2.51) ve Denklem (2.52) ile hesaplanan yaklaşık $\phi_c F_{cr}$ değerleriyle, Denklem (2.47) ve Denklem (2.48)'den ($\phi_c=0,90$ ile) hesaplanan $\phi_c F_{cr}$ değerleri Şekil 2.29'da karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.29. $L_c/i \leq 160$ için, ‘gerçek’ $\phi_c F_{cr}$ değerleriyle yaklaşık $\phi_c F_{cr}$ değerleri arasındaki hata yüzdeleri

Narinlik oranının S235 ve S275 için 160’dan, S355 için 150’den büyük olduğu durumlarda hata yüzdeleri kabul edilebilir sınırları (%20) aştığından, önerilen tasarım formülleri narin (narinlik oranı 150’den büyük) kolonlar için kullanılmamalıdır. Şekil 2.29’da, $L_c/i \leq 160$ olduğu durumlardaki hata yüzdeleri gösterilmiştir. $\phi_c F_{cr}$ için Şekil 2.29’da sunulan hata yüzdeleri incelendiğinde, narinlik oranı 150’yi aşmadığı müddetçe, hata oranlarının güvenli yönde %13,4’ü ($L_c/i=150$, S355), güvensiz yönde ise %5,36’ü ($L_c/i=120$, S355) geçmediği belirlenmiştir.

Denklem (2.50), Denklem (2.51) ve Denklem (2.52)’de tasarım burkulma gerilmesi ($\phi_c F_{cr}$) için sunulan pratik formüller enkesit sınıfına bakılmaksızın I-enkesitli hadde profillerin tamamında kullanılabilir. Narin olmayan enkesitli kolonlarda, tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı ($\phi_c P_n$), $\phi_c F_{cr}$ ile kayıpsız enkesit alanı çarpılarak hesaplanabilir. Diğer bir ifadeyle, tezde incelenen profillerden, enkesiti Tablo 2.7’de olmayan bütün profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları, narinlik oranları 150’yi aşmadığı müddetçe, aşağıdaki pratik tasarım formüllerinden hesaplanabilir.

$$(\phi_c P_n)_{S235} \approx \frac{A}{1000} \left(230 - 1,10 \frac{L_c}{i} \right) \quad (2.53)$$

$$(\phi_c P_n)_{S275} \approx \frac{A}{1000} \left(270 - 1,35 \frac{L_c}{i} \right) \quad (2.54)$$

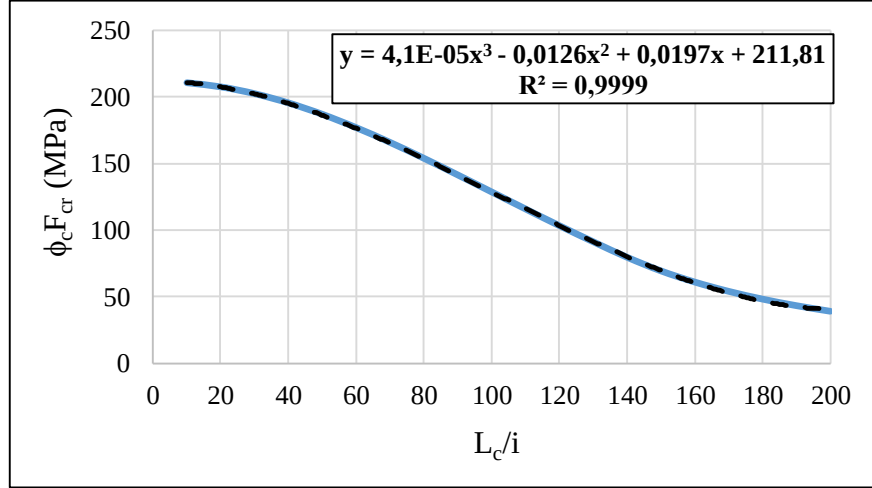
$$(\phi_c P_n)_{S355} \approx \frac{A}{1000} \left(330 - 1,80 \frac{L_c}{i} \right) \quad (2.55)$$

Denklem (2.53), Denklem (2.54) ve Denklem (2.55)'te verilen formüllerde enkesit alanı için Denklem (2.4)'te önerilen pratik formül ($A=127,3885$) kullanılabilir. Formüllerde A mm², dolayısıyla G kg/m, cinsinden yazılmalıdır. Bu durumda, tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı kN cinsinden elde edilecektir.

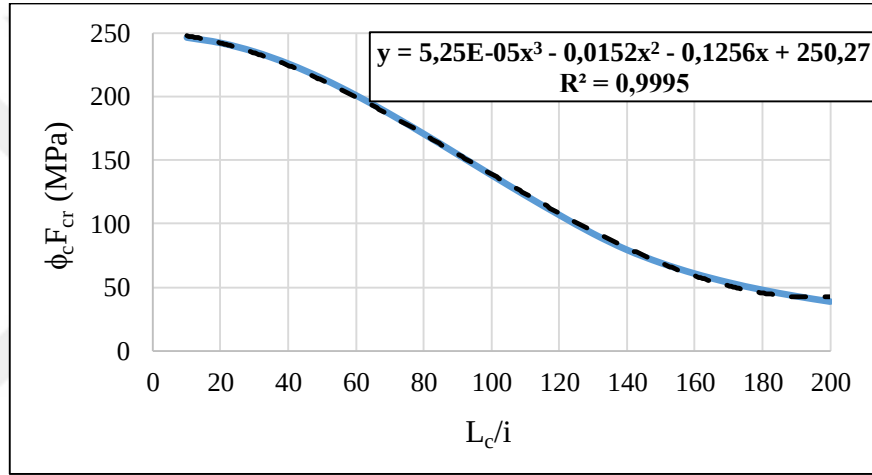
Tasarımda GKT yönteminin kullanılması durumunda, formüllerden hesaplanan tasarım dayanımları $(\phi_c P_n)$; 1,5 değerine bölünerek güvenli dayanımlara (P_n/Ω_c) çevrilebilir; zira, ÇYTHYAY [12]'ye göre, güvenli eksenel basınç kuvveti dayanımı P_n/Ω_c , karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımının $\Omega_c=1,67$ değerine bölünmesiyle hesaplanır.

Daha önce de belirtildiği gibi, narin enkesitli kolonların tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı $(\phi_c P_{ne})$, $\phi_c F_{cr}$ ile etkin enkesit alanı (A_e) çarpılarak hesaplanmalıdır. Etkin enkesit alanı, elemanın narinlik oranına bağlı olarak değiştiğinden narin enkesitli basınç elemanları bu tezin kapsamı dışında tutulmuştur.

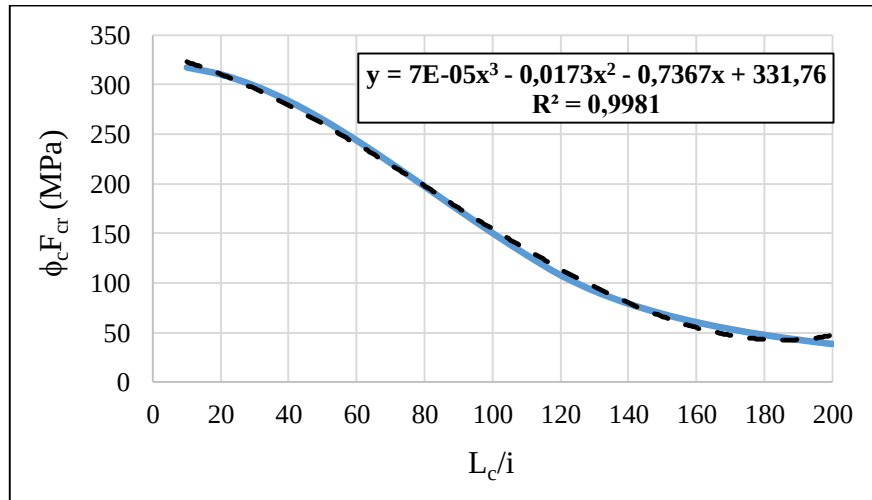
Narinlik oranının 150 ile 200 arasında olduğu durumlarda da kullanılabilecek tasarım formülleri elde etmek amacıyla, tasarım burkulma gerilmesi $\phi_c F_{cr}$, L_c/i 'nin üçüncü dereceden bir fonksiyonu olarak yazılmıştır. Bu işlem Microsoft Excel programında tanımlı LINEST fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır. Programın web sayfasında [20], bu fonksiyonun “en küçük kareler (least squares)” yöntemini kullandığı belirtilmektedir. LINEST fonksiyonu kullanılarak elde edilen kübik denklemler, tezde incelenen üç çelik kalitesi için Şekil 2.30'da gösterilmiştir. Şekil 2.30'daki denklemlerin katsayıları yuvarlanarak, Denklem (2.56), Denklem (2.57) ve Denklem (2.58) sunulmuştur.



a) $F_y = 235$ MPa



b) $F_y = 275$ MPa



c) $F_y = 355$ MPa

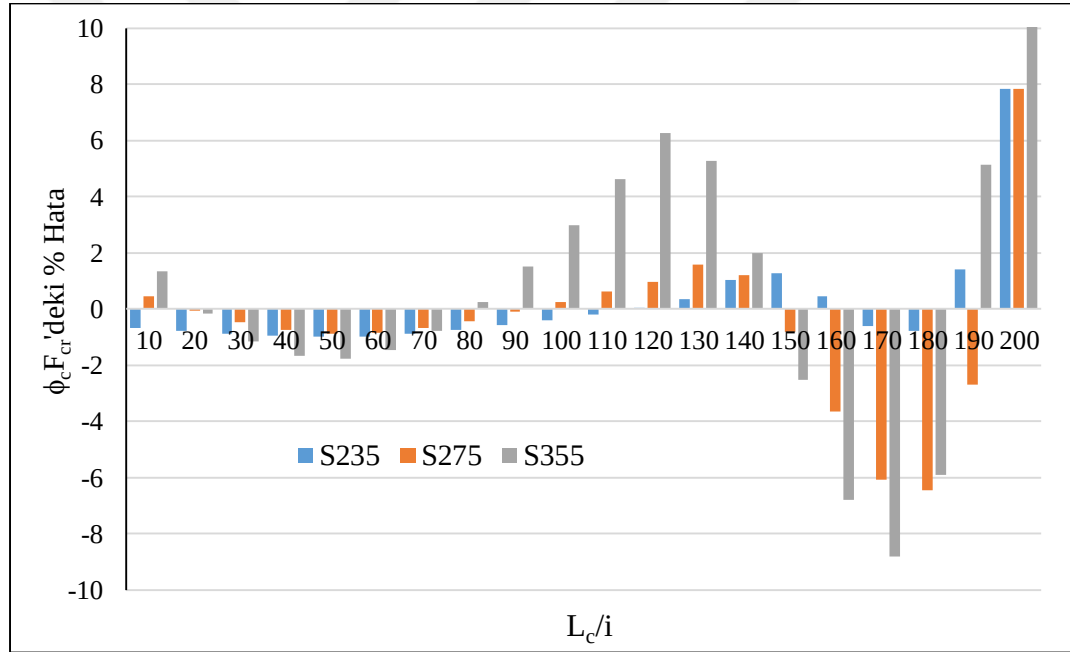
Şekil 2.30. Tezde incelenen çelik kaliteleri için, $\phi_c F_{cr}$ ile L_c/i arasındaki ilişki için elde edilen üçüncü dereceden eğilim çizgileri ve denklemleri

$$(\phi_c F_{cr})_{S235} \approx 210 + 0,02 \left(\frac{L_c}{i} \right) - 1,25 \times 10^{-2} \left(\frac{L_c}{i} \right)^2 + 4,10 \times 10^{-5} \left(\frac{L_c}{i} \right)^3 \quad (2.56)$$

$$(\phi_c F_{cr})_{S275} \approx 250 - 0,14 \left(\frac{L_c}{i} \right) - 1,50 \times 10^{-2} \left(\frac{L_c}{i} \right)^2 + 5,25 \times 10^{-5} \left(\frac{L_c}{i} \right)^3 \quad (2.57)$$

$$(\phi_c F_{cr})_{S355} \approx 330 - 0,70 \left(\frac{L_c}{i} \right) - 1,75 \times 10^{-2} \left(\frac{L_c}{i} \right)^2 + 7,00 \times 10^{-5} \left(\frac{L_c}{i} \right)^3 \quad (2.58)$$

Denklem (2.56), Denklem (2.57) ve Denklem (2.58) ile hesaplanan yaklaşık $\phi_c F_{cr}$ değerleri, Denklem (2.47) ve Denklem (2.48)'den ($\phi_c=0,90$ ile) hesaplanan $\phi_c F_{cr}$ değerleriyle karşılaştırılarak, ilgili hata oranları Şekil 2.31'de sunulmuştur.



Şekil 2.31. ÇYTHYFY'de tanımlanan iki parçalı $\phi_c F_{cr}$ - L_c/i eğri yerine L_c/i 'nin üçüncü dereceden fonksiyonları şeklinde önerilen pratik formüllerle hesaplanan yaklaşık $\phi_c F_{cr}$ değerleriyle, gerçek $\phi_c F_{cr}$ değerleri arasındaki hata yüzdeleri

Şekil 2.31'de sunulan hata oranları incelendiğinde, çelik kalitesinin S355 ve narinlik oranının da $L_c/i=200$ olduğu durum göz ardı edildiğinde, Denklem (2.56), Denklem (2.57) ve Denklem (2.58)'de önerilen formüllerin tasarım burkulma gerilmelerini güvenli yönde en büyük % 8,80 ($L_c/i=170$, S355), güvensiz yönde en büyük %7,80 ($L_c/i=200$, S275) hata oranlarıyla tahmin ettiği belirlenmiştir. Önerilen pratik formüllerden hesaplanan tasarım burkulma gerilmeleriyle gerçek değerlerin arasındaki

hata oranı, yalnızca, S355 ve $L_c/i=200$ olduğu durumda, güvensiz yönde %20'yi aşmaktadır. (%28,4) (Bu durum, Şekil 2.31'de gösterilmemiştir).

Kübik denklemle, doğrusal denklemin hata oranları karşılaştırıldığında $L_c/i \leq 150$ olduğu durumlarda S235 ve S275 için hata oranlarında %7'ye varan, S355 için $L_c/i < 100$ olduğunda %8'e varan azalmalar gözlemlenmiştir. $L_c/i \leq 190$, S235 ve $L_c/i \leq 150$, S275 olduğu durumlarda kübik denklemin hata oranları %2'yi aşmamaktadır.

GKT yönteminin kullanılacağı durumlarda sunulan pratik formüllerden elde edilen katsayılar ve sabitlerin 1,5'a bölünmesiyle elde edilip düzenlenen aşağıdaki denklemler kullanılabilir.

$$\left(\frac{F_{cr}}{\Omega_c} \right)_{S235} \approx 140 + 0,015 \left(\frac{L_c}{i} \right) - 8,4 \times (10)^{-3} \left(\frac{L_c}{i} \right)^2 + 2,75 \times (10)^{-5} \left(\frac{L_c}{i} \right)^3 \quad (2.58)$$

$$\left(\frac{F_{cr}}{\Omega_c} \right)_{S275} \approx 165 - 0,09 \left(\frac{L_c}{i} \right) - 1 \times (10)^{-2} \left(\frac{L_c}{i} \right)^2 + 3,5 \times (10)^{-5} \left(\frac{L_c}{i} \right)^3 \quad (2.59)$$

$$\left(\frac{F_{cr}}{\Omega_c} \right)_{S355} \approx 220 - 0,5 \left(\frac{L_c}{i} \right) - 1,15 \times (10)^{-2} \left(\frac{L_c}{i} \right)^2 + 4,65 \times (10)^{-5} \left(\frac{L_c}{i} \right)^3 \quad (2.60)$$

3. AMERİKAN PROFİLLER İÇİN ÖNERİLEN PRATİK FORMÜLLERLE AVRUPA PROFİLLERİ İÇİN GELİŞTİRİLEN PRATİK FORMÜLLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde, Amerikan profilleri için Socrates ve Ruddy [11]'de önerilen pratik formüllerle Avrupa profilleri için bu tezde geliştirilen pratik formüller karşılaştırılmıştır. Daha önceden de belirtildiği gibi, Socrates ve Ruddy [11]'de atalet momenti ve elastik mukavemet momenti için verilen formüller sadece kuvvetli eksen için çıkarılmış; plastik mukavemet momenti için ise herhangi bir formül sunulmamıştır. Bununla birlikte, I_x ve S_x için verilen formüller Amerikan kiriş kesitleri için, r_x ve r_y için verilen formüller ise Amerikan kolon kesitleri için geçerlidir. Benzer şekilde, eğilme momenti kapasitesi için verilen formüller de yine sadece kiriş kesiti olarak belirtilen Amerikan profilleri için çıkarılmıştır. Avrupa profilleri için bu tezde geliştirilen pratik enkesit formülleri ise hem kuvvetli hem de zayıf eksen için verilmiş olup, elastik mukavemet momentlerinin yanı sıra plastik mukavemet momentleri için de pratik formüller önerilmiştir. Zayıf eksen formülleri kiriş ve kolon enkesiti olarak sınıflandırılan profiller için ayrı ayrı elde edilmiştir. Avrupa profilleri için geliştirilen pratik dayanım formülleri enkesit ayrımı yapılmaksızın kullanılabilmektedir.

Çalışmanın kapsamında incelenen Amerikan ve Avrupa profilleri için önerilen/geliştirilen pratik enkesit formüllerindeki en büyük hata yüzdeleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Amerikan ve Avrupa profilleri için önerilen pratik enkesit formüllerindeki en büyük hata yüzdelerinin karşılaştırılması

	Güvenli (-) ve güvensiz (+) yönde en büyük hata yüzdeleri							
	Amerikan Kiriş		Amerikan Kolon		Avrupa Kiriş		Avrupa Kolon	
I_x	17,7	-9,50	-	-	8,23	-9,16	10,6	-15,3
I_y	-	-	-	-	18,2	-18,5	7,73	-7,19
W_{ex}, S_x	15,8	-7,37	-	-	8,31	-9,19	10,65	-15,24
W_{px}	-	-	-	-	5,12	-6,91	2,11	-11,32
W_{ey}	-	-	-	-	18,3	-18,5	7,73	-7,18
W_{py}	-	-	-	-	8,59	-16,6	5,64	-9,35
r_x, i_x	-	-	8,12	-15,8	2,56	-6,05	3,67	-9,29
r_y, i_y	-	-	5,61	-6,75	10,0	-8,41	3,59	-3,90

Denklem (1.19) ve Denklem (1.20) ile hesaplanan Amerikan kirişlerinin moment kapasiteleri ile Denklem (2.42), Denklem (2.43) ve Denklem (2.44) ile hesaplanan Avrupa profillerinin tasarım eğilme momenti dayanımlarındaki en büyük hata yüzdeleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Tabloda, $F_y=36$ ksi olan çelik sınıfı ile S235, $F_y=50$ ksi olan çelik sınıfı ile S355 karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.2. Amerikan ve Avrupa profilleri için önerilen pratik eğilme momenti dayanımı formüllerindeki en büyük hata yüzdelerinin karşılaştırılması

	Güvenli (-) ve güvensiz (+) yönde en büyük hata yüzdeleri						
	F _y =36 ksi		S235		F _y =50 ksi		S355
M	16,78	-6,13			20,1	-3,45	
ϕ _b M _n			3,55	-12,5			5,45 -9,65

$L_c/i \leq 150$ (veya $KL/r \leq 150$) olduğu durumlarda Denklem (1.28) ve Denklem (1.29) ile hesaplanan basınç emniyet gerilmeleri (F_a) ile Denklem (2.50), Denklem (2.51) ve Denklem (2.52) ile hesaplanan tasarım burkulma gerilmelerindeki ($\phi_c F_{cr}$) en büyük hata yüzdeleri Tablo 3.3’te gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Amerikan profilleri için önerilen pratik basınç emniyet gerilmesi formülleri ile Avrupa profiller için önerilen pratik tasarım burkulma gerilmesi formüllerindeki en büyük hata yüzdelerinin karşılaştırılması

	Güvenli (-) ve güvensiz (+) yönde en büyük hata yüzdeleri						
	F _y =36 ksi		S235		F _y =50 ksi		S355
F _a	5,47	-8,83			18,8	-7,60	
ϕ _c F _{cr}			4,06	-7,65			5,36 -13,4

Ortak olan dört enkesit özelliği (I_x , W_{ex} veya S_x , i_x veya r_x ile i_y veya r_y) ve dayanım formüllerinin hata yüzdeleri incelendiğinde Avrupa profilleri için geliştirilen pratik formüllerin daha isabetli ve güvenli sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

4. I-ENKESİTLİ AVRUPA HADDE PROFİLLERİ İÇİN HAZIRLANAN TASARIM KARTLARI VE KULLANIM ÖRNEKLERİ

Bu tezde elde edilen pratik enkesit ve tasarım formüllerinin, profil tablolarına ihtiyaç duyulmadan kullanımını sağlamak amacıyla, Şekil 1.1'dekine benzer bir tasarım kartının hazırlanmasının uygun olacağı düşünülmüştür. Ancak, tezde ele alınan Avrupa profillerin sayısının Şekil 1.1'de listelenen Amerikan profillerin sayısından daha fazla olması ve bazı formüllerin tezde 'kiriş' ve 'kolon' enkesiti olarak sınıflandırılan enkesitler için farklı olması nedeniyle, iki ayrı tasarım kartı hazırlanmıştır. Şekil 4.1'de Tablo 2.2'de listelenen Avrupa 'kiriş' kesitleri ($i_x/i_y > 3,08$ ve $d/b > 1,73$), Şekil 4.2'de Tablo 2.3'te listelenen Avrupa 'kolon' kesitleri ($i_x/i_y < 3,08$ ve $d/b < 1,73$) için hazırlanan tasarım kartları sunulmuştur.

Pratik enkesit ve tasarım formülleri, profillerin üç temel enkesit özelliği (d, b ve G) kullanılarak hesaplandığından, tasarım kartlarında listelenen profiller için Amerikan kolon kesitleri için kullanılan isimlendirmeye (Tablo 1.2) benzer bir isimlendirme kullanılmıştır. Bu isimlendirmede, sırasıyla profilin türü (IPE, IPN, HEA vb.), mm cinsinden enkesit derinliği (d) ile başlık genişliği (b) ve kg/m cinsinden birim boy kütlesi (G) yazılmaktadır. Örnek olarak, d, b ve G değerleri sırayla, 300 mm, 150 mm ve 42,2 kg/m olan IPE 300 profili bu sisteme göre isimlendirildiğinde; IPE 300 x 150 x 42,2 ismini almaktadır. Profillerin pratikte kullanılan isimleri de yeni isimlerinin yanında parantez içinde verilmiştir.

Tasarım kartlarında, moment dayanımları için sunulan formüllerin, yanal burulmalı burkulma sınır durumunun elemanın davranışını belirleyen bir sınır durum olmadığı durumlar için; basınç dayanımları için sunulan doğrusal formüllerin de narinlik oranı 160'yi aşmayan ve enkesiti narin olmayan profiller için önerildiği unutulmamalıdır. Narin enkesitli olan profiller kartta '*' işareti kullanılarak belirtilmiştir. '*' olan profiller sadece S355 için, '**' olan profiller S355 ve S275 için, '***' olan profiller ise S355, S275 hem de S235 için narin enkesitlerdir. Örnek olarak, HEA 790 x 300 x 224 enkesiti, ya da bilinen ismiyle HEA 800 enkesiti, S355, S275 ve S235 çelik kalitelerinde narin enkesitlidir.

‘KİRİŞ’ ENKESİTLİ AVRUPA PROFİLLER

IPE (d x b x G)	IPN (d x b x G)	HE (d x b x G)
IPE 80 x 46 x 6 (IPE 80)	IPN 80 x 42 x 5,94 (IPN 80)	HEA 540 x 300 x 166 (HEA 550)
IPE 100 x 55 x 8,1 (IPE 100)	IPN 100 x 50 x 8,34 (IPN 100)	HEA 590 x 300 x 178 (HEA 600)*
IPE 120 x 64 x 10,4 (IPE 120)	IPN 120 x 58 x 11,1 (IPN 120)	HEA 640 x 300 x 190 (HEA 650)*
IPE 140 x 73 x 12,9 (IPE 140)	IPN 140 x 66 x 14,3 (IPN 140)	HEA 690 x 300 x 204 (HEA 700)*
IPE 160 x 82 x 15,8 (IPE 160)	IPN 160 x 74 x 17,9 (IPN 160)	HEA 790x300x224 (HEA 800)***
IPE 180 x 91 x 18,8 (IPE 180)	IPN 180 x 82 x 21,9 (IPN 180)	HEA 890x300 x 252 (HEA 900)***
IPE 200 x 100 x 22,4 (IPE 200)	IPN 200 x 90 x 26,2 (IPN 200)	HEA 990x300 x 272 (HEA 1000)***
IPE 220 x 110 x 26,2 (IPE 220)	IPN 220 x 98 x 31,1 (IPN 220)	HEB 550 x 300 x 199 (HEB 550)
IPE 240 x 120 x 30,7 (IPE 240)	IPN 240 x 106 x 36,2 (IPN 240)	HEB 600 x 300 x 212 (HEB 600)
IPE 270 x 135 x 36,1 (IPE 270)	IPN 260 x 113 x 41,9 (IPN 260)	HEB 650 x 300 x 225 (HEB 650)
IPE 300 x 150 x 42,2 (IPE 300)	IPN 280 x 119 x 47,9 (IPN 280)	HEB 700 x 300 x 241 (HEB 700)
IPE 330 x 160 x 49,1 (IPE 330)*	IPN 300 x 125 x 54,2 (IPN 300)	HEB 800x300x 262 (HEB 800)*
IPE 360 x 170 x 57,1 (IPE 360)*	IPN 320 x 131 x 61 (IPN 320)	HEB 900x300x291 (HEB 900)**
IPE 400 x 180 x 66,3 (IPE 400)*	IPN 340 x 137 x 68 (IPN 340)	HEB 1000x300x314 (HEB 1000)***
IPE 450 x 190 x 77,6 (IPE 450)**	IPN 360 x 143 x 76,1 (IPN 360)	HEM 572 x 306 278 (HEM 550)
IPE 500 x 200 x 90,7 (IPE 500)**	IPN 380 x 149 x 84 (IPN 380)	HEM 620 x 305 x 285 (HEM 600)
IPE 550 x 210 x 106 (IPE 550)**	IPN 400 x 155 x 92,4 (IPN 400)	HEM 668 x 305 x 293 (HEM 650)
IPE 600 x 220 x 122 (IPE 600)**	IPN 450 x 170 x 115 (IPN 450)	HEM 716 x 304 x 301 (HEM 700)
-	IPN 500 x 185 x 141 (IPN 500)	HEM 814 x 303 x 317 (HEM 800)
-	IPN 550 x 200 x 166 (IPN 550)	HEM 910 x 302 x 333 (HEM 900)*
-	IPN 600 x 215 x 199 (IPN 600)	HEM 1000x302x349 (HEM 1000)**

ENKESİT ÖZELLİKLERİ

$I_x \approx 21Gd^2 \text{ (mm}^4\text{)}$	$A \approx 125G \text{ (mm}^2\text{)}$	$W_{px} \approx 48Gd \text{ (mm}^3\text{)}$
$I_y \approx 6Gb^2 \text{ (mm}^4\text{)}$	$W_{ex} \approx 42Gd \text{ (mm}^3\text{)}$	$W_{py} \approx 19Gb \text{ (mm}^3\text{)}$
$i_x \approx 0,4d \text{ (mm)}$	$W_{ey} \approx 12Gb \text{ (mm}^3\text{)}$	
	$i_y \approx 0,22b \text{ (mm)}$	

TASARIM MOMENT (kNm) ve BASINÇ (kN) DAYANIMLARI

S235	S275	S355
$\phi_b M_{nx} \approx \frac{Gd}{100}$	$\phi_b M_{nx} \approx \frac{Gd}{85}$	$\phi_b M_{nx} \approx \frac{Gd}{65}$
$\phi_c P_n \approx \frac{A}{1000} \left(230 - 1,1 \frac{L_c}{i} \right)$	$\phi_c P_n \approx \frac{A}{1000} \left(270 - 1,35 \frac{L_c}{i} \right)$	$\phi_c P_n \approx \frac{A}{1000} \left(330 - 1,8 \frac{L_c}{i} \right)$

Şekil 4.1. Çalışmada ‘kiriş’ enkesiti olarak sınıflandırılan Avrupa profiller için hazırlanan tasarım kartı

‘KOLON’ ENKESİTLİ AVRUPA PROFİLLER

HEA (d x b x G)	HEB (d x b x G)	HEM (d x b x G)	HD (d x b x G)	
HEA 96 x 100 x 16,7 (HEA 100)	HEB 100 x 100 x 20,4 (HEB 100)	HEM 120 x 106 x 41,8 (HEM 100)	HD 244 x 260 x 54,1*	HD 364 x 371 x 162
HEA 114 x 120 x 19,9 (HEA 120)	HEB 120 x 120 x 26,7 (HEB 120)	HEM 140 x 126 x 52,1 (HEM 120)	HD 250 x 260 x 68,2	HD 368 x 373 x 179
HEA 133 x 140 x 24,7 (HEA 140)	HEB 140 x 140 x 33,7 (HEB 140)	HEM 160 x 146 x 63,2 (HEM 140)	HD 260 x 260 x 93	HD 372 x 374 x 196
HEA 152 x 160 x 30,4 (HEA 160)	HEB 160 x 160 x 42,6 (HEB 160)	HEM 180 x 166 x 76,2 (HEM 160)	HD 268 x 262 x 114	HD 368 x 391 x 187
HEA 171 x 180 x 35,5 (HEA 180)	HEB 180 x 180 x 51,2 (HEB 180)	HEM 200 x 186 x 88,9 (HEM 180)	HD 278 x 265 x 142	HD 375 x 394 x 216
HEA 190 x 200 x 42,3 (HEA 200)	HEB 200 x 200 x 61,3 (HEB 200)	HEM 220 x 206 x 103 (HEM 200)	HD 290 x 268 x 172	HD 380 x 395 x 237
HEA 210 x 220 x 50,5 (HEA 220)	HEB 220 x 220 x 71,5 (HEB 220)	HEM 240 x 226 x 117 (HEM 220)	HD 309 x 271 x 225	HD 387 x 398 x 262
HEA 230 x 240 x 60,3 (HEA 240)	HEB 240 x 240 x 83,2 (HEB 240)	HEM 270 x 248 x 157 (HEM 240)	HD 335 x 278 x 299	HD 393 x 399 x 287
HEA 250 x 260 x 68,2 (HEA 260)	HEB 260 x 260 x 93 (HEB 260)	HEM 290 x 268 x 172 (HEM 260)	HD 301 x 300 x 74,2*	HD 399 x 401 x 314
HEA 270 x 280 x 76,4 (HEA 280)	HEB 280 x 280 x 103 (HEB 280)	HEM 310 x 288 x 189 (HEM 280)	HD 310 x 300 x 97,6	HD 407 x 404 x 347
HEA 290 x 300 x 88,3 (HEA 300)	HEB 300 x 300 x 117 (HEB 300)	HEM 340 x 310 x 238 (HEM 300)	HD 320 x 300 x 127	HD 416 x 406 x 382
HEA 310 x 300 x 97,6 (HEA 320)	HEB 320 x 300 x 127 (HEB 320)	HEM 359 x 309 x 245 (HEM 320)	HD 330 x 303 x 158	HD 425 x 409 x 421
HEA 330 x 300 x 105 (HEA 340)	HEB 340 x 300 x 134 (HEB 340)	HEM 377 x 309 x 248 (HEM 340)	HD 343 x 306 x 198	HD 435 x 412 x 463
HEA 350 x 300 x 112 (HEA 360)	HEB 360 x 300 x 142 (HEB 360)	HEM 395 x 308 x 250 (HEM 360)	HD 359 x 309 x 245	HD 446 x 416 x 509
HEA 390 x 300 x 125 (HEA 400)	HEB 400 x 300 x 155 (HEB 400)	HEM 432 x 307 x 256 (HEM 400)	HD 375 x 313 x 300	HD 455 x 418 x 551
HEA 440 x 300 x 140 (HEA 450)	HEB 450 x 300 x 171 (HEB 450)	HEM 478 x 307 x 263 (HEM 450)	HD 356 x 369 x 134	HD 465 x 421 x 592
HEA 490 x 300 x 155 (HEA500)	HEB 500 x 300 x 187 (HEB 500)	HEM 524 x 306 x 270 (HEM 500)	HD 360 x 370 x 147	HD 474 x 424 x 634

ENKESİT ÖZELLİKLERİ

$A \approx 125G \text{ (mm}^2\text{)}$		
$I_x \approx 21Gd^2 \text{ (mm}^4\text{)}$	$W_{ex} \approx 42Gd \text{ (mm}^3\text{)}$	$W_{px} \approx 48Gd \text{ (mm}^3\text{)}$
$I_y \approx 8Gb^2 \text{ (mm}^4\text{)}$	$W_{ey} \approx 16Gb \text{ (mm}^3\text{)}$	$W_{py} \approx 24Gb \text{ (mm}^3\text{)}$
$i_{max} \approx 0,4d \text{ (mm)}$	$i_{min} = 0,25b \text{ (mm)}$	

TASARIM MOMENT (kNm) ve BASINÇ (kN) DAYANIMLARI

S235	S275	S355
$\phi_b M_{nx} \approx \frac{Gd}{100}$	$\phi_b M_{nx} \approx \frac{Gd}{85}$	$\phi_b M_{nx} \approx \frac{Gd}{65}$
$\phi_c P_n \approx \frac{A}{1000} \left(230 - 1,1 \frac{L_c}{i} \right)$	$\phi_c P_n \approx \frac{A}{1000} \left(270 - 1,35 \frac{L_c}{i} \right)$	$\phi_c P_n \approx \frac{A}{1000} \left(330 - 1,8 \frac{L_c}{i} \right)$

Şekil 4.2. Çalışmada ‘kolon’ enkesiti olarak sınıflandırılan Avrupa profiller için hazırlanan tasarım kartı

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de sunulan tasarım kartlarının kullanımı basit örneklerle anlatılmıştır. İlk örnekte, IPE 450 enkesitli profilin yaklaşık enkesit özellikleri belirlenmiştir. Ardından, sabit yükler altında $M_G=150$ kNm momente maruz kalan, yanal burulmalı burkulması önlenmiş S355 çelik kalitesine sahip IPE 330 enkesitli bir kirişin hem YDKT hem de GKT yöntemlerine göre dayanım kontrolleri yapılmıştır. Daha sonra YDKT yöntemine göre $M_u=90$ kNm olan ve enkesit derinliği 300 mm’yi geçmeyecek S235 çelik kalitesine sahip IPE enkesitli kiriş enkesiti seçimi yapılmıştır. Son olarak, her iki asal eksen etrafındaki burkulma boyları $L_c=6$ m’ye eşit olan S355 çelik kaliteli, HEM 300 enkesitli kolonun tasarım ve güvenli basınç kuvveti dayanımları hesaplanmıştır.

Örnek 1: IPE 450 profilinin enkesit özelliklerinin belirlenmesi;

Bu tezde önerilen sınıflandırmaya göre IPE 450 enkesiti, bir ‘kiriş’ enkesiti olduğu için Şekil 4.1’de sunulan tasarım kartı kullanılmalıdır. İlk olarak, üç temel enkesit özelliği olan G , d ve b değerlerini belirlemek için, tasarım kartından profilin yeni ismi (IPE 450 x 190 x 77,6) okunur. Buna göre, IPE 450 profilinin birim boy kütlesi $G=77,6$ kg/m, enkesit derinliği $d=450$ mm ve başlık genişliği $b=190$ mm’dir. Bu üç değer ve karttaki formüller kullanılarak, profilin enkesit alanı (A), asal atalet momentleri (I_x ve I_y), plastik mukavemet momentleri (W_{px} ve W_{py}) ve atalet yarıçapları (i_x ve i_y) aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$A \approx 125G = 125 \times 77,6 = 9700 \text{ mm}^2 \quad (A_{\text{'gerçek'}}=9880 \text{ mm}^2) \quad (4.1)$$

$$I_x \approx 21Gd^2 = 21 \times 77,6 \times 450^2 = 33000 \times 10^4 \text{ mm}^4 \quad (I_{x, \text{'gerçek'}}=33740 \times 10^4 \text{ mm}^4) \quad (4.2)$$

$$I_y \approx 6Gb^2 = 6 \times 77,6 \times 190^2 = 1680 \times 10^4 \text{ mm}^4 \quad (I_{y, \text{'gerçek'}}=1676 \times 10^4 \text{ mm}^4) \quad (4.3)$$

$$W_{px} \approx 48Gd = 48 \times 77,6 \times 450 = 1676 \times 10^3 \text{ mm}^3 \quad (W_{px, \text{'gerçek'}}=1702 \times 10^3 \text{ mm}^3) \quad (4.4)$$

$$W_{py} \approx 19Gb = 19 \times 77,6 \times 190 = 280 \times 10^3 \text{ mm}^3 \quad (W_{py, \text{'gerçek'}}=276 \times 10^3 \text{ mm}^3) \quad (4.5)$$

$$i_x \approx 0,4d = 0,4 \times 450 = 180 \text{ mm} \quad (i_{\text{max}, \text{'gerçek'}}=185 \text{ mm}) \quad (4.6)$$

$$i_y \approx 0,22b = 0,22 \times 190 = 41,8 \text{ mm} \quad (i_{\text{min}, \text{'gerçek'}}=41,2 \text{ mm}) \quad (4.7)$$

Pratik enkesit formülleri kullanılarak hesaplanan değerlerin, profil tablosundan okunan değerlere ne kadar yakın sonuçlar verdiğini göstermek amacıyla, hesaplanan değerlerin yanında ‘gerçek’ değerler de parantez içinde verilmiştir. Hesaplanan değerlerdeki en büyük hata yüzdesi %2,7’dir(i_x).

Örnek 2: Yanal burkulma tehlikesi olmayan, S355 çelik kaliteli, IPE 300 enkesitli kirişin eğilme momenti dayanımının yeterliliğinin kontrolü;

Bu örnekte, sabit yükler altında $M_G=150$ kNm momente maruz kalan, yanal burulmalı burkulması önlenmiş S355 çelik kalitesine sahip IPE 330 enkesitli bir kiriş ele alınacaktır. IPE 330 enkesiti, bir ‘kiriş’ enkesiti olduğu için, bu profilin tasarımında Şekil 4.1’de sunulan tasarım kartı kullanılabilir. Kirişin yanal burkulma tehlikesi olmadığı bilindiğine göre, kirişin tasarım (ve güvenli) eğilme momenti dayanımı belirtilen tasarım kartında S355 çelik kalitesi için verilen tasarım formülü kullanılarak hesaplanabilir. Ancak, bunun için ilk olarak profilin üç temel enkesit özelliği belirlenmelidir. Tasarım kartında ilgili profil, IPE 330 x 160 x 49,1 olarak isimlendirilmektedir. Bu durumda, bu profil için $G=49,1$ kg/m, $d=330$ mm, $b=160$ mm’dir. Buradan, kartta S355 çelik kalitesi için verilen formül kullanılarak, YDKT yöntemine göre, kirişin tasarım eğilme momenti dayanımı ($\phi_b M_{nx}$) hesaplanabilir;

$$\phi_b M_{nx} \approx \frac{Gd}{65} = \frac{49,1 \times 330}{65} = 249,3 \text{ kNm} \quad (\phi_b M_{nx, \text{'gerçek'}}=256,9 \text{ kNm}) \quad (4.8)$$

Kirişe yalnız $M_G=150$ kNm sabit yük etkidiğinden, ÇYTHYEEY [12]’ye göre, kirişin gerekli eğilme momenti dayanımı (M_u), ‘1,4G’ yük birleşimi kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$M_u = 1,4M_G = 1,4 \times 150 = 210 \text{ kNm} \quad (4.9)$$

Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımı, gerekli eğilme momenti dayanımından büyük olduğundan ($\phi_b M_{nx}=249,3 \text{ kNm} > M_u=210 \text{ kNm}$), YDKT yöntemine göre tasarımda dayanım yeterlidir.

Tasarımda GKT yönteminin kullanılması durumunda, kirişin güvenli eğilme momenti dayanımı (M_{nx}/Ω_b), tasarım eğilme momenti dayanımı 1,5 değerine bölünerek hesaplanabilir;

$$\frac{M_{nx}}{\Omega_b} = \frac{\phi_b M_{nx}}{1,5} = \frac{249,3}{1,5} = 166,2 \text{ kNm} \quad (4.10)$$

GKT yöntemine göre, gerekli dayanım $M_a=150 \text{ kNm}$ 'dur [12]. Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımı, gerekli eğilme momenti dayanımından büyük olduğundan ($M_{nx}/\Omega_b=166,2 \text{ kNm} > M_a=150 \text{ kNm}$), GKT yöntemine göre tasarımda da profilin eğilme momenti dayanımı yeterlidir.

Örnek 3: Yanal burkulma tehlikesi olmayan, S235 çelik kaliteli, en ekonomik IPE enkesitli kiriş seçimi;

YDKT yöntemine göre $M_u=90 \text{ kNm}$ olan ve enkesit derinliği 300 mm 'yi geçmeyecek S235 çelik kalitesine sahip IPE kiriş seçimi yapılacaktır. Bu kiriş enkesitinin seçiminde Şekil 4.1'deki tasarım kartı kullanılabilir. Yanal burkulma tehlikesi bulunmadığına göre kirişlerin tasarım eğilme momenti dayanımları belirtilen tasarım kartında S235 için sunulan formül kullanılarak hesaplanabilir. Buna göre $d_{max}=300$ için;

IPE 300 x 150 x 42,2 (IPE 300) kullanılırsa; $d=300 \text{ mm}$, $G=42,2 \text{ kg/m}$

$$\phi_b M_{nx} \approx \frac{Gd}{100} = \frac{42,2 \times 300}{100} = 126,6 \text{ kNm} > 90 \text{ kNm} \text{ (Seçilebilir.)} \quad (4.11)$$

IPE 270 x 135 x 36,1 (IPE 270) kullanılırsa; $d=270 \text{ mm}$, $G=36,1 \text{ kg/m}$

$$\phi_b M_{nx} \approx \frac{Gd}{100} = \frac{36,1 \times 270}{100} = 97,5 \text{ kNm} > 90 \text{ kNm} \text{ (Seçilebilir.)} \quad (4.12)$$

IPE 240 x 120 x 30,7 (IPE 240) kullanılırsa; $d=240 \text{ mm}$, $G=30,7 \text{ kg/m}$

$$\phi_b M_{nx} \approx \frac{Gd}{100} = \frac{30,7 \times 240}{100} = 73,7 \text{ kNm} < 90 \text{ kNm} \text{ (Sağlamadı.)} \quad (4.13)$$

$d=300 \text{ mm}$ 'yi aşmayacak şekilde IPE 300 x 150 x 42,2 (IPE 300) ve IPE 270 x 135 x 36,1 (IPE 270) kirişlerinin tasarım eğilme momenti dayanımları, gerekli eğilme momenti dayanımından büyük olduğu için tasarımda bu kiriş enkesitleri kullanılabilir. Ancak; IPE 270 x 135 x 36,1 (IPE 270) profili daha ekonomik bir seçim olacaktır. IPE 270'den küçük profiller enkesit derinliği şartını sağlasa da dayanım olarak yetersiz kalmaktadır.

Örnek 4: Burkulma boyu $L_c=6m$ 'ye eşit olan, S275 çelik kaliteli, HEM 300 enkesitli kolonun eksenel basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi;

Bu örnekte, her iki asal eksen etrafında da burkulma boyu $L_c=6 m$ olan S275 çelik kaliteli, HEM 300 enkesitli bir kolon ele alınacaktır. Bu tezde önerilen sınıflandırmaya göre HEM 300 enkesiti, bir 'kolon' enkesiti olduğu için Şekil 4.2'de sunulan tasarım kartı kullanılmalıdır. Profilin karttaki ismi HEM 340 x 310 x 238 olduğundan, birim boy kütlesi $G=238 \text{ kg/m}$, enkesit derinliği $d=340 \text{ mm}$ ve başlık genişliği $b=310 \text{ mm}$ 'dir. Enkesitin isminin yanında '*' işareti bulunmadığından, dayanım hesabında kayıpsız enkesit alanı kullanılabilir;

$$A \approx 125G = 125 \times 238 = 29750 \text{ mm}^2 \quad (4.14)$$

Elemanın asal eksenlerindeki eğilmeli burkulma boyları aynı olduğundan, narinlik oranı hesabı için yalnız zayıf eksenle atalet yarıçapını hesaplamak yeterlidir;

$$i_y \approx 0,25b = 0,25 \times 310 = 77,5 \text{ mm} \quad (4.15)$$

Buradan, kolonun en büyük narinlik oranı

$$\frac{L_c}{i} = \frac{L_c}{i_y} = \frac{6000}{77,5} = 77,4 \leq 200 \quad (4.16)$$

olarak bulunur. Narinlik oranı, sınır değer olan 200'den küçük olduğu için uygundur. $L_c/i \leq 160$ olduğundan doğrusal olan pratik formül kullanılabilir. Hesaplanan enkesit alanı ve narinlik oranı değerleri, S275 çelik kalitesi için Şekil 4.2'deki kartta verilen formülde kullanıldığında, kolonun YDKT yöntemine göre tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı;

$$\phi_c P_n \approx \frac{A}{1000} \left(270 - 1,35 \frac{L_c}{i} \right) = \frac{29750}{1000} \times (270 - 1,35 \times 77,4) = 4924 \text{ kN} \quad (4.17)$$

olarak hesaplanabilir. Kolonun ÇYTHYEEY [12]'ye göre hesaplanan 'gerçek' dayanımı, 5285 kN olup, hata oranı güvenli yönde %6,8'dir.

Tasarımda GKT yönteminin kullanılması durumunda, kolonun güvenli eksenel basınç kuvveti dayanımı (P_n/Ω_c), tasarım dayanımı ($\phi_b P_n$) 1,5 değerine bölünerek bulunabilir;

$$\frac{P_n}{\Omega_b} = \frac{\phi_b P_n}{1,5} = \frac{4924}{1,5} = 3283 \text{ kN} \quad (P_n/\Omega_{c(\text{gerçek})}=3523 \text{ kN}) \quad (4.18)$$



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ülkemizde çelik yapı tasarımıyla uğraşan mühendis ve mimarların, çelik yapı elemanlarının ön tasarımında kullanabilecekleri pratik ('parmak hesabı') formüller (%20 hata oranını aşmayan) geliştirilmiştir. Formüller ülkemizde ve Avrupa'da yaygın şekilde kullanılan I-enkesitli hadde profilleri (IPE, IPN, HEA, HEB, HEM, HD) için geçerli olup, dayanımla ilgili kararlarda ülkemizin güncel çelik tasarım yönetmeliği olan "Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik" (ÇYTHYKY) [12] temel alınmıştır.

Çalışmada önerilen pratik formüller, profillerin üç temel enkesit özelliğine bağlıdır: Enkesit derinliği (d), başlık genişliği (b) ve birim boy kütle (G). Bu nedenle, çalışmada, incelenen enkesitler için bu üç değeri sırayla içeren yeni bir isimlendirme yöntemi önerilmiştir. Örnek olarak, IPE 300 enkesiti için önerilen yeni isim IPE 300 x 150 x 42,2'dir.

Çalışmada elde edilen pratik enkesit formülleri kullanılarak, I-enkesitli Avrupa hadde profillerin burulma sabitleri (J ve C_w) haricindeki temel enkesit özellikleri; yani, enkesit alanları (A), asal atalet momentleri (I_x ve I_y), asal atalet yarıçapları (i_x ve i_y) ve asal eksenlere göre elastik ve plastik mukavemet momentleri (W_{ex} ile W_{px} ve W_{ey} ile W_{py}), üç temel enkesit özelliği (G , d ve b) kullanılarak, ön tasarım için oldukça makul hata oranlarıyla kolayca hesaplanabilmektedir.

Çalışmada ele alınan profillerin özellikle zayıf asal eksenlerine göre tanımlanan enkesit özellikleri (I_y , W_{ey} , W_{py} ve i_y) için pratik formüller geliştirilirken, hata yüzdelerini makul seviyelerde tutulabilmek amacıyla, profillerin iki gruba ayrılmasının uygun olacağına karar verilmiştir. Bu ayrım, profillerin asal atalet yarıçaplarının oranları (i_x/i_y) ile derinlik/genişlik oranlarına (d/b) göre yapılmıştır. $i_x/i_y > 3,08$ ve $d/b > 1,73$ olan kesitler 'kiriş' kesiti, $i_x/i_y < 3,08$ ve $d/b < 1,73$ olan kesitler 'kolon' kesiti olarak sınıflandırılmıştır. İncelenen kesitlerin arasında, tanımlanan iki koşuldan yalnız birini sağlayan herhangi bir kesite rastlanmamıştır.

Çalışmada pratik enkesit formüllerinin yanı sıra, pratik dayanım formülleri de sunulmuştur. Dayanım formülleri çıkarılırken ülkemizde 2016 yılında yürürlüğe giren ve 2018 yılında güncellenen çelik yapı yönetmeliğinde [12] tanımlanan tasarım esasları dikkate alınmıştır. Pratik dayanım formülleri, ülkemizde yaygın olarak kullanılan üç çelik sınıfı (S235, S275 ve S355) için ayrı ayrı elde edilmiştir. İlk olarak, çalışmada ele alınan bütün profillerin kuvvetli ekseninde tasarım eğilme momenti dayanımlarının ($\phi_b M_{nx}$) hesabı için yalnız G ve d'ye bağlı pratik formüller elde edilmiştir. Formüller, yanal burulmalı burkulma tehlikesi olmayan I-enkesitli hadde profiller için geçerli olup, tasarımın YDKT yöntemine göre yapılması durumunda doğrudan kullanılabilirler. Tasarımın GKT yöntemine göre yapılması durumunda, güvenli dayanımlar (M_{nx}/Ω_b), tasarım dayanımları %33 azaltılarak hesaplanabilmektedir.

Ayrıca çalışmanın kapsamında ele alınan profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları ($\phi_c P_n$) için de pratik formüller geliştirilmiştir. Eğilme dayanımı formüllerinde olduğu gibi, basınç dayanımı formülleri de üç çelik kalitesi (S235, S275 ve S355) için ayrı ayrı çıkarılmıştır. Basınç dayanımı formülleri, elemanın en büyük narinlik oranı L_c/i 'ye bağlıdır. Formüller çıkarılırken yalnız eğilmeli burkulma sınır durumları dikkate alınmıştır. Formüllerde, kritik burkulma gerilmesi (F_{cr}) için yönetmelikte [12] verilen iki parçalı denklem yerine bir doğru denklemi kullanılmıştır. Doğrusal formüller, narinlik oranı 150'yi aşmayan I-enkesitli hadde profillerinde makul hata oranlarıyla kullanılabilir. Çalışmada narinliği 150'den büyük olan kolonlar için de tasarım formülleri çıkarılmıştır. Bu formüllerde, kritik burkulma gerilmesi, L_c/i 'nin üçüncü dereceden bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Kübik denklemler, yalnız uzun ve narin kolonlarda değil, orta boy ve kısa kolonlarda da kullanılabilir. Basınç dayanımı formülleri enkesiti narin olmayan elemanlar için geçerli olup, narin enkesitli elemanlarda kayıpsız enkesit alanı yerine etkin enkesit alanı kullanılmalıdır. Bu amaçla narin enkesitli profiller tasarım kartında işaretlenmiştir.

Çalışmada tasarımcıların kolayca kullanabilecekleri bir tasarım kartı da hazırlanmıştır. Kartın bir yüzünde 'kiriş', diğer yüzünde 'kolon' enkesitleri için çıkarılan pratik formüller bulunmaktadır. Tasarım kartında profiller hem bu çalışmada önerilen yeni isimleriyle, hem de profil tablolarında verilen isimleriyle listelenmişlerdir. Böylece,

çelik yapı tasarımı yapan mimar ve mühendisler, ön tasarımda, profil tablolarından enkesit özelliklerini okumadan ve Yönetmelik'teki nispeten karışık formülleri kullanmadan profilin temel enkesit özellikleriyle eğilme ve basınç dayanımlarını hesaplayabilmektedir.

Bu tezde önerilen pratik formüllerin, tasarım kartlarında listelenen I-enkesit hadde profilleri ve üç çelik sınıfı (S235, S275 ve S355) için geçerli olduğu unutulmamalıdır. Formüller belli kabullerle elde edildiğinden, formüllerden hesaplanan değerler yaklaşık değerlerdir. Formüllerin ön tasarımda tasarımcılara kolaylık sağlayacağı ve zaman kazandıracağı düşünülmektedir. Bununla birlikte, nihai tasarımda, gerekli tasarım kontrollerinin Yönetmelik [12] esasları ve 'gerçek' enkesit değerleri kullanılarak yapılması gerektiği unutulmamalıdır.

Bu çalışmaya esin kaynağı olan benzer bir çalışma, 2000 yılında Socrates ve Ruddy [11] tarafından Amerika'da yaygın şekilde kullanılan geniş başlıklı I profiller ve o dönem yürürlükte olan Amerikan çelik yönetmeliği için yapılmıştır. Ancak, Socrates ve Ruddy [11] enkesit özelliklerinden yalnız A , I_x , W_{ex} , i_x ve i_y için formüller sunmuşlardır. Bu formüllerden, kuvvetli ekseninde atalet ve elastik mukavemet momenti için önerilen denklemlerin "ekonomik" Amerikan kiriş kesitleri için, atalet yarıçaplarının ise Amerikan kolon kesitleri için çıkarıldığı fark edilmiştir. Benzer şekilde, Socrates ve Ruddy [11], "ekonomik" Amerikan kiriş kesitleri için geçerli olan moment kapasitesi formülleri ile Amerikan kolon kesitleri için geçerli basınç kapasitesi formülleri çıkarmışlardır. Kapasite formüllerinin çalışmada incelenen bütün enkesitler için geçerli olup olmadığı bilinmemektedir. Ayrıca, Socrates ve Ruddy [11], kapasite hesaplarında emniyet gerilmeleri yöntemini kullandıkları için enkesitlerin plastik mukavemet momentleriyle ilgili herhangi bir çalışma yapmamışlardır. Ülkemizin güncel çelik tasarım yönetmeliğinin [12] güncel Amerikan çelik tasarım yönetmeliği (ANSI/AISC 360-16 Specification for Structural Steel Buildings) [21] temel alınarak hazırlandığı ve her iki yönetmelikte de artık emniyet gerilmeleri yöntemine göre tasarıma izin verilmediği dikkate alındığında, bu çalışmada önerilen pratik dayanım formüllerinin Amerikan profilleri için Socrates ve Ruddy [11]'nin önerdiği kapasite formüllerine kıyasla daha güncel olduğu düşünülmektedir. Yine de, bu çalışmada çıkarılan pratik tasarım formüllerin güncel geniş başlıklı Amerikan

hadde profilleri için de kullanılabilmesi için, benzer bir çalışmanın Amerikan profilleri ve çelik sınıfları için de yapılması gerektiği düşünülmektedir.

İleriki çalışmalarda, bu çalışmada ele alınmayan burulma sabitleri (J ve C_w) içerecek için de pratik formüller elde edilebilir. Ayrıca, bu çalışmada önerilen pratik eğilme formülleri kirişlerin yanal burulmalı burkulma dayanımlarının hesabını da içerecek şekilde geliştirilebilir. Benzer şekilde, basınç formülleri, narin enkesitli basınç elemanlarında gözlenen dayanım azalmasını dikkate alacak şekilde güncellenebilir. Bu çalışmada, ele alınmayan diğer konulardan biri de profillerin kesme kuvveti dayanımlarıdır. Profillerin gövde alanlarıyla ilgili bir formül elde edilmesi durumunda, tasarım kesme kuvveti dayanımları için pratik formüllerin elde edilebileceği düşünülmektedir. Çalışmada yalnız I-enkesitli hadde profiller ele alınmış olup, ülkemizde sık kullanılan U, T, kutu ve boru profiller için de benzer çalışmalar yapılarak çelik yapı elemanlarının ön tasarımında kullanılabilecek pratik formüller elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Gardner L., Stability and Design of Stainless Steel Structures-Review and Outlook, *Twin-Walled Structures*, 2019, **141**, 208-216.
- [2] Yu Y., Lan L., Ding F., Wang L., Mechanical Properties of Hot-Rolled and Cold-Formed Steels After Exposure to Elevated Temperature: A Review, *Construction and Building Materials*, 2019, **213**, 360-376.
- [3] Kodur V. K. R., Naser M. Z., Designing Steel Bridges for Fire Safety, *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, **156**, 46-53.
- [4] Odrobinak J., Gocal J., Experimental Measurement of Structural Steel Corrosion, *Procedia Structural Integrity*, 2018, **13**, 1947-1954.
- [5] Wang S., Lai J. W., Schoettler M. J., Mahin S. A., Seismic Assessment of Existing Tall Buildings: A Case Study of a 35-Story Steel Building with Pre-Northridge Connection, *Engineering Structures*, 2017, **141**, 624-633.
- [6] Hutt C. M., Rossetto T., Deierlein G. G., Comparative Risk-Based Seismic Assessment of 1970s vs Modern Tall Steel Moment Frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, **159**, 598-610.
- [7] Abou-Elfath H., Elhout E., Periods of BRB Steel Buildings Designed with Variable Seismic-Force Demands, *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, **156**, 192-201.
- [8] Wang A., Ren Y., Lu Z., Song J., Han B., Zhou Y., Experimental Study of the Hysteretic Behaviour of Corrugated Steel Plate Shear Walls and Steel Plate Reinforced Concrete Composite Shear Walls, *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, **160**, 136-152.
- [9] Bhowmick A. K., Grondin G. Y., Limit State Design of Steel Columns Reinforced with Welded Steel Plates, *Engineering Structures*, 2017, **141**, 624-633.
- [10] Hadjipantelis N., Gardner L., Wadee M. A., Design of Prestressed Cold-Formed Steel Beams, *Thin-Walled Structures*, 2019, **140**, 565-578.
- [11] Socrates A. I., Ruddy J. L., Rules of Thumb for Steel Design, *North American Steel Construction Conference*, Las Vegas, USA, 23-26 February 2000.
- [12] ÇYTHY 2018, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, 2018.

- [13] AISC Specification for Structural Steel Building-Allowable Stress Design and Plastic Design, *American Institute of Steel Construction*, Chicago, IL 60601-2001, June 1, 1989.
- [14] AISC Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, *American Institute of Steel Construction*, Chicago, IL 60601-2001, December 27, 1999.
- [15] TBDY 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, Ankara, 2018.
- [16] AISC 316-89, AISC Manual of Steel Construction-Allowable Stress Design 9th Edition, *American Institute of Steel Construction*, Chicago, IL 60601-2001, 1989.
- [17] Socrates A. I., Rules of Thumb for Steel Design, NASCC, <https://www.aisc.org/education/continuingeducation/education-archives/rules-of-thumb-for-steel-design2/#.XPJrBo-hlPY> (Ziyaret tarihi:12 Mart 2018).
- [18] Socrates A. I., Ruddy J. L., Rules of Thumb Card, Structural Affiliates International, <http://www.saii.com/pubs/pubs.htm> (Ziyaret tarihi: 15 Şubat 2018).
- [19] Arcelor Mittal, Sections and Merchant Bars v2018-1, 2018.
- [20] <https://support.office.com/en-us/article/linest-function-84d7d0d9-6e50-4101-977a-fa7abf772b6d> (Ziyaret tarihi:12 Nisan 2019).
- [21] ANSI/AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings, *American Institute of Steel Construction*, Chicago, IL 60601, 2016.
- [22] Çuhadaroğlu S., Yüksek Lisans Çelik Yapılar Ders Notları III-IV, Kocaeli Üniversitesi, 2018.
- [23] Korelasyon ve Regresyon Analizi, Başkent Üniversitesi, http://baskent.edu.tr/~matemel/courses/veri_analizi_regresyon_analizi.ppt (Ziyaret tarihi: 17 Şubat 2018).

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Şenli H., Okay F., Çuhadaroğlu S., I-Enkesitli Çelik Yapı Elemanları İçin Pratik Tasarım Formüllerinin Geliştirilmesi, *Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 04-05 Mayıs 2018, ISBN:978-605-68150-5-8.



ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin Şenli, 1993 tarihinde Alanya’da doğdu. Lise hayatını 2012 yılında Alanya Hasan Çolak Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği kazanıp, 2016 yılında onur öğrencisi (3,48/84,8) olarak mezun oldu. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitime başladı. I-enkesitli Avrupa çelik hadde profilleri için pratik tasarım formülleri üzerine çalışmaları bulunmaktadır.

