

**T. C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKSENEL BASINÇ KUVVETİ ETKİSİNDEKİ ENKESİT
PARÇALARI İÇİN GENİŞLİK/KALINLIK ORANLARINA
BAĞLI OLARAK KESİT DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynel AYAZ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Elif AĞCAKOCA

Şubat 2021

**T. C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKSENEL BASINÇ KUVVETİ ETKİSİNDEKİ ENKESİT
PARÇALARI İÇİN GENİŞLİK/KALINLIK ORANLARINA
BAĞLI OLARAK KESİT DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynel AYAZ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Anabilim Dalı : YAPI

Bu tez 07/02/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr.

Jüri Başkanı

Dr. Öğr.

Üye

Dr. Öğr.

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Zeynel AYAZ

31. 12. 2020

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Elif AĞCAKOCA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu zor süreçte maddi ve manevi desteklerini hissettiğim, her zaman yanımda olan, bana olan güvenlerini hiç kaybetmeyen Aileme çok teşekkür ederim.

Bu çalışmanın oluşmasına öncülük ettiklerinden dolayı Kocaeli Üniversitesi Öğretim Üyesi değerli Doç. Dr. Seval PINARBAŞI ÇUHADAROĞLU'na ve öğrencisi İnşaat Yüksek Mühendisi değerli Hilal ÇELİK 'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLOLAR LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
BÖLÜM 3.	
ÇELİĞİN YAPILARDA KULLANILMASI	15
3.1. Çelik Malzemesinin Genel Özellikleri	15
3.1.1. Çeliğin diğer yapı malzemelerine göre bazı avantajları	17
3.1.2. Çeliğin dezavantajları	18
3.2. Çelik Yapı Elemanları	19
3.2.1. Sıcakta şekillendirilmiş çelik yapı elemanları	19
3.2.2. Soğukta şekillendirilmiş çelik yapı elemanları.....	20
3.2.3. Sıcakta ve soğukta şekillendirilmiş çelik elemanlar arasındaki farklar	23
3.3. Soğuk Şekillendirme Yöntemleri	24
3.3.1. Presle soğukta şekil verme yöntemi	24

3.3.2. Soğuk haddeleme yöntemi	24
3.4. Soğukta Şekillendirme İşleminin Malzemenin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi	25
3.5. Soğukta Şekillendirilmiş Çelik Profillerin Kullanım Alanları	26

BÖLÜM 4.

SOĞUK ŞEKİLENDİRİLMİŞ Z PROFİLLERİN ENKESİT

ÖZELLİKLERİNİN HESAPLANMASI	29
4.1. İncelenen Profiller	29
4.1.1. Soğuk şekillendirilmiş elemanların tasarımı için kullanılan standartlar ve kesit özelliklerinin sınır şartları	33
4.2. Enkesit Özelliklerinin Hesaplanması İçin Farklı Yöntemler	37
4.2.1. Yöntem 1	37
4.2.2. Yöntem 2	47
4.2.3. Yöntem 3	53
4.3. Farklı Yöntemlere Göre Bulunan Enkesit Değerlerinin Karşılaştırılması ve Boyutlara Göre Değişimleri	57

BÖLÜM 5.

AISI S100-S16 'YA GÖRE EKSENEL BASINÇ ETKİSİNDEKİ

SOĞUK ŞEKİLENDİRİLMİŞ Z PROFİLLERİN TASARIM ESASLARI	61
5.1. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Profillerin LRFD Ve Eurocode3'e Göre Tasarımlarının Karşılaştırılması	62
5.2. Akma Sınır Durumu İçin Basınç Dayanımı	62
5.3. Genel Burkulma Sınır Durumu için Basınç Dayanımı	63
5.3.1. Nokta simetrisi bulunan çelik profiller	65
5.4. Yerel burkulma Sınır Durumu için Basınç Dayanımı	66
5.4.1. Rijitleştirilmiş ve rijitleştirilmemiş eleman parçaları	67
5.4.2. Uç rijitleştirici elemanlar	69
5.5. Çarpılmalı Burkulma	71
5.6. Z Profilleri İçin Eksenel Basınç Dayanımı Hesapları	72
5.6.1. Eğilmeli burkulma hesabı	75

5.6.2. Burulmalı burkulma hesabı	76
5.6.3. Yerel burkulma hesabı.....	77
5.6.4. Çarpılmalı burkulma hesabı	78

BÖLÜM 6.

SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ ÇELİK Z PROFİLLERİN TASARIM

EKSENEL BASINÇ DAYANIMLARININ HESAPLANMASI.....	81
---	----

6.1. Profillerin Genel Burkulma Davranışını Önlemek İçin Sürekli Desteklendiği Durumlardaki Tasarım Eksenel Basınç Dayanımı Hesapları.....	82
6.1.1. Tasarım akma dayanımı hesabı	85
6.1.2. Gövdenin tamamen etkin çalıştığı durum için tasarım eksenel basınç dayanımı hesabı	87
6.1.3. Başlıkların tamamen etkin çalıştığı durum için tasarım eksenel basınç dayanımı hesabı	88
6.1.4. Dudakların tamamen etkin çalıştığı durum için tasarım eksenel basınç dayanımı hesabı	89
6.2. Profillerin Genel Burkulma Davranışlarının Hâkim Olduğu Durumlarda Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları	93
6.2.1. $K_y L_y = 0$ durumunda profilin eksenel basınç dayanımı hesabı	94
6.2.2. $K_y L_y = K_x L_x / 3$ durumunda profilin eksenel basınç dayanımı hesabı.....	96
6.2.3. $K_y L_y = K_x L_x$ durumunda profilin eksenel basınç dayanımı hesabı.....	97
6.3. Çarpılmalı Burkulma Hesabı	112

BÖLÜM 7.

EKSENEL BASINÇ DAYANIMLARININ ENKESİT BOYUTLARIYLA

DEĞİŞİMİ.....	116
---------------	-----

7.1. Z Kesitli Çelik Elemanların Eksenel Basınç Dayanımlarının Atalet Momentleriyle Değişimlerinin İncelenmesi	118
--	-----

BÖLÜM 8.

SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ ÇELİK Z KESİTLERİN EĞİLME

DAYANIMLARININ BELİRLENMESİ 120

8.1. Z Kesitli Çelik Elemanların Eğilme Dayanımlarının Kesit

Boyutlarıyla Değişimlerinin İncelenmesi 126

BÖLÜM 9.

TARTIŞMA VE SONUÇ 131

KAYNAKÇA 135

ÖZGEÇMİŞ 139

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Profil yüksekliği
Af	: Basınca çalışan başlığın enkesit alanı
Ag	: Profiling brüt enkesit alanı
AISI	: Amerikan Demir Çelik Enstitüsü
ASD	: Allowable Stress Design
B	: Profiling başlık genişliği
C	: Profiling dudak uzunluğu
Cwf	: Başlığın çarpılma sabiti
ÇYTHYİY 2018	: Çelik Yapıların Tasarım, Hesap Ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik
EC3 1-3	: Eurocode 3 yönetmeliği bölüm 3
EC3	: Eurocode 3 yönetmeliği
Fd	: Elastic çarpılmalı burkulma dayanımı
Fy	: Akma dayanımı
G	: Kayma modülü
GKT	: Güvenlik Katsayılarına Göre Tasarım
GM	: Geometrik merkez
h _o	: Dıştan dışa gövde yüksekliği
h _{xf}	: Başlığın merkezinden köşeye olan x mesafesi
I	: Atalet momenti
I _{xf}	: Başlığın x eksenine göre atalet momenti
Jf	: Başlığın burulma sabiti
k	: Rijitlik katsayısı
K	: Burkulma katsayısı
KM	: Kayma merkezi

Lm	: Çarpılmalı burkulma davranışını kısıtlayan tutucular arasındaki mesafe
LRFD	: Load and Resistance Factor Design
P _{cr}	: Kritik elastik burkulma yükü
P _n	: Profiling eksenel basınç gerilmesi
R	: İç büküm yarıçapı
r _o	: Kutupsal atalet yarıçapı
t	: Et kalınlığı
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TS 11732	: Çelik Yapılar Hafif – Soğukta Şekillendirilmiş Profillerle Oluşturulan Hesap Kuralları
TS 2162	: Genel Yapı Çelikleri
TS 498	: Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri
TS 648	: Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları
w	: Başlık genişliği
W	: Mukavemet momenti
x _{of}	: Başlığın merkez noktasından kayma merkezine olan x mesafesi
YDKT	: Yük Ve Dayanım Katsayılarına Göre Tasarım
y _{of}	: Başlığın ağırlık merkezinden başlığın kayma merkezine olan y mesafesi
μ	: Poisson oranı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Çelik Gerilme ve Şekil Değiştirme Grafiği	16
Şekil 3.2. Sıcakta şekillendirilmiş Çelik Elemanın Kesiti (IPE).....	20
Şekil 3.3. Şerit veya levha çelikte gerilme-şekil değiştirme kesin akma diyagramı	21
Şekil 3.4. Şerit veya levha çelikte gerilme-şekil değiştirme yavaş akma diyagramı	21
Şekil 3.5. Yaygın Şekilde Kullanılan Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Profiller	22
Şekil 3.6. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Z Profil	23
Şekil 3.7. Çelik levhaların presle şekil verme yöntemiyle şekillendirilmesi	24
Şekil 3.8. Soğukta şekil verilmiş Z geometrili çelik levhanın şekil verilme öncesi ve sonrası	25
Şekil 3.9. Soğukta Şekil Verme Oranı ile Malzeme çekme Özelliklerinin Değişimi	26
Şekil 3.10. İnce cidarlı yapı elemanları.....	26
Şekil 3.11. Çatı Kaplaması ve Döşeme Panelleri.....	27
Şekil 3.12. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Elemanların Yapıda Kullanılması	28
Şekil 4.1. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Z Profili Kesit Görünüşü	30
Şekil 4.2. Kuzey Amerika, TS 11372 ve TS EN 1993-1-3 Yönetmelikleri.....	33
Şekil 4.3. TBDY 2019’da Şekil 10. 3. De Verilen Minimum Başlık Genişlikleri..	35
Şekil 4.4. Yöntem 1’de Kullanılan Simgeler	38
Şekil 4.5. Çarpılmalı Burkulma için Verilen Kesitte Gösterilen Simgeler	41
Şekil 4.6. Çelik Z profilin yuvarlak köşe kabulüyle çizgisel kesiti ve boyutları	47
Şekil 4.7. Çelik Z profilin köşeleri ve çeyrek çemberin bazı geometrik özellikleri [21]	48
Şekil 4.8. Çelik Z profilin kare köşe kabulüyle çizgisel kesiti ve boyutları	54
Şekil 5.1. Nokta Simetrisi Bulunan Z Profillerinin Genel Burkulma Davranışı.....	66
Şekil 5.2. Rijitleştirilmiş Ve Rijitleştirilmemiş Kesit Parçaları	67

Şekil 5.3. Soğuk Şekillendirilmiş Bir Z Profilinin Başlığı İçin Etkin Genişliğin Tanımlanması	68
Şekil 5.4. Basınç Elemanlarında Etkili Tasarım Genişlikleri	69
Şekil 5.5. Uç Rijitleştirici Eleman Çeşitleri	70
Şekil 5.6. Soğuk Şekillendirilmiş Z Profilinin Yerel Burkulma Davranışı	70
Şekil 5.7. Soğuk Şekillendirilmiş Z Profilinin Burkulma Davranışları (a: yerel burkulma, b: genel burkulma, c - d: çarpılmalı burkulma).....	70
Şekil 5.8. Soğuk Şekillendirilmiş Z Profilin Çarpılmalı Burkulma Davranışı	71
Şekil 5.9. Soğuk Şekillendirilmiş Z Profilinin Burkulma Davranışları (soldan sağa doğru; dört kesit genel burkulma, iki kesit çarpılmalı burkulma, altı kesit yerel burkulma).....	71
Şekil 5.10. Azaltma Katsayısı (ρ) ve Narinlik Katsayısı (λ) Arasındaki İlişkiyi Gösteren Grafik	77
Şekil 7.1. Profil Yüksekliğine göre Eksenel Basınç Değişim Grafiği	116
Şekil 7.2. Profilin Başlık Genişliklerine Göre Eksenel Basınç Dayanımı Değişim Grafiği	117
Şekil 7.3. Güçlü Eksende Atalet Momenti-Eksenel Basınç Dayanımları Grafiği ..	119
Şekil 7.4. Zayıf Eksende Atalet Momenti-Eksenel Basınç Dayanımları Grafiği ...	119
Şekil 8.1. Mesnet Şekillerine göre Burkulma Boyu Katsayıları	121
Şekil 8.2. Soğuk Şekillendirilmiş Z Kesitin Boyutlarının Girilmesi	122
Şekil 8.3. Tanımlanan Z Kesitin Görünüşü.....	123
Şekil 8.4. Analiz için Hesap Değerlerinin Girilmesi	123
Şekil 8.5. Moment Taşıma Kapasitelerinin (M_{max}) Okunması	124
Şekil 8.6. Güçlü Eksendeki Eğilme Dayanımı ile Kesit Yüksekliği Değişimi Grafiği.....	127
Şekil 8.7. Zayıf Eksendeki Eğilme Dayanımı ile Kesit Yüksekliği Değişimi Grafiği.....	127
Şekil 8.8. Güçlü Eksendeki Eğilme Dayanımı ile Başlık Genişliği Değişimi Grafiği.....	128
Şekil 8.9. Zayıf Eksendeki Eğilme Dayanımı ile Başlık Genişliği Değişimi Grafiği.....	129

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Çelik Z Profillerin Boyutlarının ve Bazı Enkesit Özelliklerinin Bulunduğu Katalog Listesi	31
Tablo 4.2. TBDY 2019’da Şekil 10. 3. De Verilen Minimum Başlık Genişlikleri	36
Tablo 4.3. Z Profillerin Yöntem 1’e Göre Hesaplanan Enkesit Değerleri.....	45
Tablo 4.4. Z Profillerin Yöntem 2’e Göre Hesaplanan Enkesit Değerleri.....	51
Tablo 4.5. Z Profillerin Yöntem 3’e Göre Hesaplanan Enkesit Değerleri.....	56
Tablo 4.6. Yöntem 2’de Hesaplanan Enkesit Değerleri İçin En Büyük Hata Oranları.....	58
Tablo 4.7. Yöntem 3’te Hesaplanan Enkesit Değerleri İçin En Büyük Hata Oranları.....	58
Tablo 5.1. LRFD ve EC3 Karşılaştırılması.....	62
Tablo 6.1. Z profillerin akma ve yerel burkulma sınır durumlarındaki tasarım eksenel basınç dayanımları.....	91
Tablo 6.2. Profillerin Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları ($KxLx = 500 \text{ mm}$)....	99
Tablo 6.3. Profillerin Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları ($KxLx = 1000 \text{ mm}$)....	101
Tablo 6.4. Profillerin Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları ($KxLx = 2000 \text{ mm}$)...	103
Tablo 6.5. Profillerin Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları ($KxLx = 4000 \text{ mm}$)...	104
Tablo 6.6. Profillerin Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları ($KxLx = 6000 \text{ mm}$)...	106
Tablo 6.7. Profillerin Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları ($KxLx = 8000 \text{ mm}$).....	108
Tablo 6.8. Profillerin Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları ($KxLx = 12000 \text{ mm}$)...	110
Tablo 6.9. Profillerin Çarpılmalı Burkulma Davranışına göre Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları	114
Tablo 8. 1. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Z Profillerin Eğilmede Taşıyabileceği Mmaks Momentler	124

ÖZET

Anahtar Kelime: Z Profil, Hafif Çelik Yapı, Eksenel Basınç Dayanımı, Soğukta Şekillendirilmiş Yapı Elemanları, Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YKDT), Burkulma

Yapı sistemlerinde kullanılan çelik, yüksek sıcaklıkta işlem görmüş veya soğukta şekil verilmiş (oda sıcaklığında) olmak üzere iki şekilde de üretilmektedir. Soğukta şekillendirilmiş çelik elemanlar, et kalınlıkları hadde profillere göre çok küçük olan, kullanım alanları ülkemizde de yaygınlaşan hafif çelik yapı elemanlarıdır. Hafif çelik yapı elemanları birçok nedenden dolayı tercih edilirler, bunları kısaca şöyle sıralayabiliriz; işlenmesi sırasında herhangi bir ısı gerektirmez, şekil verildikten sonra kaliteli parlak yüzey elde edilir, birbirlerine birçok noktadan kilitlendiklerinden dolayı yüksek dayanım sunarlar. Ülkemizde birçok alanda kullanılmalarına rağmen direk olarak ulusal bir yönetmelik bulunmamaktadır. Türk Standartları Enstitüsünün kabul ettiği TS EN 1993 Bölüm 1-3 “Soğukta Şekillendirilmiş Elemanlar için Ek Kurallar” ve deprem yönetmeliğimizin atıfta bulunduğu AISI S100-16 Ek-1 “Soğukta Şekillendirilmiş Çelik Elemanların Tasarımı” standartları, hafif çelik yapıların tasarımında ve elemanların dizaynında kullanılmaktadır. Bu çalışmada, TBDY 2019’un atıfta bulunduğu AISI S100-16 Ek-1 standardındaki dizayn esasları kullanılacaktır. Bu çalışmanın amacı, kullanacağımız standartta verilen esaslara göre soğukta şekillendirilmiş çelik profillerin, tasarım hesapları yapılarak, hafif çelik yapı elemanları kullanan tasarımcılara kolaylık sağlayacak tablolar sunmaktır. Bu kapsamda tezde, hafif çelik yapılarda yaygın şekilde kullanıldığı düşünülen farklı kesit boyutlarına sahip 90 adet soğukta şekillendirilmiş Z profil kullanılmıştır. İncelenen birçok firmanın üretim kataloglarında profillerin enkesit özelliklerinin sınırlı düzeyde verildiği ve burkulma hesaplarında kullanılan burulma ve çarpılma sabitleri ile ilgili herhangi bir bilgi verilmediği tespit edilmiştir. Bundan dolayı tezin ilk bölümünde, bu çalışma kapsamında incelenen profillerin enkesit özellikleri, AISI (Amerikan Demir Çelik Enstitüsü)’ın yayınladığı “Soğukta Şekillendirilmiş Çelik Elemanların Tasarımı” standardında verilen esaslara göre hesaplanmış ve tablolar halinde belirtilmiştir. Hesaplanan enkesit özellikleri, literatürde bulunan diğer yöntemlerle de hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Tezin diğer bölümünde ise, profillerin eksenel basınç dayanımları, AISI S100-16 standardına ve “Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım” (YKDT) yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Profillerin tasarım eksenel basınç dayanımları, hem farklı profil boyları için hesaplanarak tablolar halinde sunulmuş hem de farklı kesit boyutlarıyla değişimleri irdelenmiştir.

INVESTIGATION OF THE SECTION BEHAVIOR DEPENDING ON THE RATIOS OF WIDTH / THICKNESS FOR INCREDIT PARTS WITH AXIAL PRESSURE FORCE

SUMMARY

Keywords: Z Profile, Light Steel Structure, Axial Compressive Strength, Cold Formed Building Elements, Design with Load and Strength Coefficients (YKDT), Buckling.

The steel used in the building system is produced in two ways: processed at high temperatures or cold formed (room cold). Cold-formed steel elements are light steel construction elements with very small wall thicknesses compared to rolled profiles, which are widespread in our country. Light steel structure types are preferred for many reasons. It does not require any heat during processing, a bright surface is obtained after shaping, and as they are locked against each other from the point, they offer high strength in return. Although they are used in many areas in our country, there is no direct national information. TS EN 1993 Section 1-3 "Additional Rules for Cold Formed Elements" and the status of our earthquake regulation AISI S100-16 Annex-1 "Design of Cold Formed Steel Elements", accepted by the Turkish Standards Institute, are used in the design and design of the elements in light steel structures. This will use the design principles in the AISI S100-16 Annex-1 standard to which TBDY 2019 refers. This purpose of use is to provide tables that will provide convenience to designers of light steel building elements by making design calculations of cold-formed steel profiles according to the standard principles we will use. In this context, 90 cold-formed Z profiles with different cross-sectional dimensions, which are commonly thought in light steel structures, were used in the thesis. It has been determined that the cross-section properties of the profiles are given some plans in the production catalogs of many companies examined, and no information is given about the torsion and distortion used in the buckling calculations. Therefore, in the first part of the thesis, the cross-section properties of the profiles examined in this study were calculated according to the principles given in the "Design of Cold Formed Steel Elements" standard published by AISI (American Iron and Steel Institute) and stated in tables. The calculated cross section features were calculated and compared with other methods in the literature. In the other part of the thesis, the axial compressive strengths of the profiles are calculated according to the AISI S100-16 standard and "Design with Load and Strength Coefficients" (YKDT) under water. The design axial compressive strengths of the profiles are calculated and presented in tables for different profile lengths and their changes in different sections are examined.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Çelik malzemesi, demir ve karbonun istenen sertlik derecesine göre belirli oranlarda ve başka alaşım malzemelerinin karıştırılmasıyla üretilmektedir. Çelik malzemesinin, uzun ömrü ve dayanıklı olması, kolay şekillendirilebilir olması, tekrar kullanılmasının öğrenilmesinden sonra insanlık birçok alanda çelik malzemesini, hayatlarını kolaylaştırmak amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde geliştirilen yeni teknolojilerle dayanımı daha yüksek ve hafif çelikler üretilmekte, böylece kullanım alanları daha da genişlemektedir. Çelik yapı elemanları, üretim aşamaları bakımından sıcakta şekillendirilmiş ve soğukta şekillendirilmiş olarak ikiye ayrılmaktadır. Yapısal çelik olarak isimlendirilen sıcakta haddelenmiş çelik profil 19. yy ortalarında, dayanıklılığı, esnekliği ve korozyona dayanımı nedeniyle kullanılmaya başlanmıştır. Soğukta şekillendirilmiş çelik elemanların yapılarda kullanılması 19. yy sonların da başlamış olmasına rağmen, kullanımı sınırlı düzeyde kalmıştır. Gerek çelik elemanları soğukta işleyecek teknolojinin henüz gelişmemiş olması gerekse tasarımcılar için yeterli hesap ve yöntemlerin olmaması, kullanımının sınırlı kalması en büyük sebebidir. Soğukta şekillendirilmiş çelik elemanların ilk kullanılmaya başlanmasından günümüze kadar, üretim ve malzemenin işlenmesiyle ilgili birçok yeni teknolojiler geliştirilmiştir. Amerika Birleşik Devletlerinde (ABD), Amerikan Demir Çelik Enstitüsü (AISI) tarafından 1949 yılında “İnce Cidarlı Çelik Yapı Elemanlarının Tasarımı” ismiyle soğukta şekillendirilmiş yapı elemanlarının tasarım ve hesap esaslarını içeren ilk yönetmelik yayınlanmıştır [33].

Dünyada gittikçe kullanımı yaygınlaşan soğukta şekil verilmiş çelik yapı elemanları, ülkemizde de yapı alanında kullanılmaya başlanmış ve günümüzde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ülkemizde soğukta şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının ilk üretilmeye ve kullanılmaya başlandığı zamana bakıldığında en fazla 50 seneye dayandığı görülmektedir. Alp - Himalayalar deprem kuşağında yer alan Türkiye,

barındırdığı aktif fay hatları yüzünden geçmişten günümüze şiddetli depremlere maruz kalmıştır. Bilimsel çevreler fay hareketleri ve istatistiki yaklaşımlara bağlı olarak, Marmara Bölgesinde yakın tarihte şiddetli deprem beklemektedirler [18]. Ülkemizde bu alanda resmi olarak yayınlanan ilk yönetmelik 28 Nisan 1994 yılında Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından, TS 11732 “Çelik Yapılar Hafif – Soğukta Şekillendirilmiş Profillerle Oluşturulan Hesap Kuralları” yönetmeliğidir. TS 11372 standardına göre, temel malzeme özellikleri TS 2162 “Genel Yapı Çelikleri” standartlarına ve boyutlandırma yöntemi ise TS 648 “Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kurallarına” uygun olmalıdır. Ancak isimi geçen bu yönetmelikler herhangi bir güncelleme yapılmadığı için geçerliliklerini kaybetmişlerdir. Bundan dolayı ülkemizde, güncelliğini koruması itibariyle, Türk Standartları Enstitüsünün de kabul ettiği Avrupa Standardı ve yeni deprem yönetmeliğinde (TBDY 2018), atıfta bulunulan Kuzey Amerika Standardı kullanılmaktadır.

Bu tezin asıl amacı, ülkemizde yaygın şekilde kullanılan ve en çok tercih edilen firmaların kataloglarından seçilen soğukta şekillendirilmiş Z geometriye sahip çelik yapı elemanlarının, S100-16 Ek-1 yönetmeliğinde bulunan tasarım esaslarına göre, enkesit özelliklerini hesaplayarak tablolar haline getirmektir. Yaygın şekilde kullanılan diğer tasarım esaslarını da göz önünde bulundurarak enkesit özelliklerini farklı metotlara göre hesaplayarak tablolar haline getirmektir. Nihai olarak, seçilen profillerin enkesit özelliklerini, hazırlanan tablolarla karşılaştırmak oransal olarak yakınlıklarını incelemektir. İkinci olarak ise, seçilen soğukta şekillendirilmiş Z geometriye sahip elemanlarının tasarımı için gerekli olan aksenal basınç kuvveti dayanımlarını sonlu eleman ve yönetmelik değerleri karşılaştırılmıştır. Amerikan Demir Çelik Enstitüsünün yayınlandığı, en son 2018 yılında güncellenerek baskısı yapılan, AISI S100-16 yönetmeliğinde “Kuzey Amerika için Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Yapı Elemanlarının Tasarımı” (North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members) yönetmeliğinde tanımlanan tasarım esaslarına göre hesaplayarak tablolar halinde sunmaktır.

Bu tez kapsamında, ülkemizde çok tercih edilen firmaların katalogları internetten ve mail yoluyla iletişime geçilerek araştırılmıştır. Yaygın şekilde kullanıldığı düşünülen

soğuk şekillendirilmiş Z çelik yapı elemanlarının kesit boyutlarının bulunduğu kataloglar elde edilerek, 90 adet profil seçilmiştir. Üretimi yapılan profillerin tablolarına bakıldığında, enkesit özelliklerinin bir bölümünün verildiği görülmektedir. Ancak tasarımcı mühendislere gerekli olan çelik elemanın basınç etkisindeki tasarımları için kullanılan burulma ve çarpılma sabitlerinin tablolarda yer almadığı tespit edilmiştir. Bu amaçla ilk aşamada, seçilen profillerin gerekli olan tüm enkesit özellikleri, “Kuzey Amerika için Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Yapı Elemanlarının Tasarımı” yönetmeliğinin eki olarak sunulan ve ilk baskısının 2014 yılında yapıldığı, “Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Elemanların Tasarımı” (Cold-Formed Steel Design – Vol. 1) Bölüm 3.3.4. yönetmeliğinde verilen tasarım esaslarına göre hesaplanmıştır. Enkesit özellikleri bulunurken literatürde kullanılan birkaç farklı metotta kullanılmıştır. Bunlar; çizgisel yöntem ve yaklaşık çizgisel yöntemdir. Farklı yöntemlerle bulunan tüm enkesit özellikleri, ayrı ayrı tablolar haline getirilmiştir. Seçilen 90 adet profil için hesaplanan enkesit özellikleri karşılaştırılmıştır. Hata oranları incelenmiştir.

Tezde ikinci bölüm olarak, seçilen soğuk şekillendirilmiş çelik profiller için tasarım eksenel basınç dayanımlarının hesaplanması için gerekli olan bilgiler ve sınır koşulları sunulmuştur. AISI S100-16 yönetmeliğinde verilen tasarım esasları kısaca anlatılmıştır. Daha sonra, seçilen 90 adet çelik Z profillerden bir tanesi ele alınarak hesaplar açık olarak yapılmış, diğerler profiller için değerler ise tablolar halinde verilmiştir. Hesaplar, AISI S100-16 standardında verilen hesap esaslarına göre ve “Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım” (YDKT) yöntemine göre yapılmıştır.

Bu çalışmada, seçilen profillerin üretildiği plakaların çelik kalitesi S235 olarak alınmıştır. Hesaplar sırasında, soğuk şekillendirme yönteminden dolayı oluşan kusurlar göz önüne alınmamıştır. Soğuk şekillendirilmiş Z kesitli çelik elemanlarının, tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları hesaplanırken kritik burkulma yükü dikkate alınarak hesap yapılmıştır. Kritik burkulma yükü, genel burkulma ve yerel burkulma şartları göz önünde bulundurularak, genel, başlık ve gövde de ayrı ayrı tahkik edilerek en küçük değer olarak alınmıştır. Son olarak, farklı profil uzunluklarına

göre burkulma hesapları yapılarak tasarım eksenel basınç dayanımları hesaplanmıştır. Bulunan tüm değerler ayrı ayrı tablolar halinde hazırlanmıştır.



BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Durmaz ve Daloğlu (2015) yaptıkları çalışmada, 21 adet soğukta şekil verilmiş köşebent profillerden oluşturulan kolonların göçme yükleri, burkulma davranışları ve yük-deformasyon grafikleri incelenmiştir. Bunun için Young (2005) tarafından yapılan eksenel basınç yüküne maruz kalmış elemanların deney sonuçları, ABAQUS sonlu eleman programının doğrulanmasında kullanılmıştır. Sonlu eleman modeli doğrulaması sağlandıktan sonra, profillerin et kalınlıkları ve boyları değiştirilerek parametrik çalışma yapılmıştır. Bu araştırma sonucunda, deneysel sonuçlar ile sonlu eleman modelinin sonuçları birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca; farklı b/t oranlarına sahip 21 adet soğukta şekil verilmiş köşebent kolonların sonlu eleman modelindeki sonuçlarıyla TS-11372 “Çelik yapılar-hafif-soğukta şekil verilmiş profillerle oluşturulan-hesap kuralları” standardındaki hesap yöntemleriyle bulunan sonuçların karşılaştırılması ile kesit geometrisinin kapasite-davranış etkilerini incelemek amaçlanmıştır. Bu inceleme sonucunda, TS 11372’nin aşırı emniyetli yani ekonomik olmayan yükler önerdiği görülmüştür [1].

Mojaddidy ve Göğüş (2013) yaptıkları çalışmada, soğukta şekil verilmiş ince cidarlı kenarları rijitleştirilmiş C kesitli elemanların eksenel kuvvet etkisi altında TS 11372 “Çelik Yapılar Hafif-Soğukta Şekil Verilmiş Profillerle Oluşturulan-Hesap Kuralları” standardı, AISI – North American Standardı (NAS) ve Eurocode 3 şartnamelerine göre dayanımlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada aynı çelik kalitesine ve kesit özelliklerine sahip, boyu 2750 mm ve her iki ucu da ankastre olan C profilleri kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, çelik profillerin Eurocode 3 şartnamesine göre daha fazla kapasiteye sahip olduğu görülmüştür. Ancak ince cidarlı soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların tasarımında, Eurocode 3 şartnamesinin tercih edilmemesinin sebebi olarak; hesap zorluğu, karmaşıklığı ve kolay takip edilememesi olduğu ifade edilmiştir [2].

Aldemir ve Mangır (2014) yaptığı bu çalışmada, depolarda kullanılan çelik rafların kolonlarının yük taşıma kapasitelerini, farklı parametrelere göre, AISI S100-2007 standardında bulunan “Efektif Genişlik Yöntemi” ve “Doğrudan Dayanım Yöntemi” hesap yöntemlerine göre bulunan sonuçlarla ve “CUFSM” sonlu eleman programıyla bulunan sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu çalışma için, 120 adet farklı değişkenlere sahip C profilleri kullanılmıştır. Bu değişkenler; kolonların boyları(500mm, 1000mm, 1500mm), dudak büküm yönleri (içe-dışa doğru), dudak uzunlukları ve kolonların delikli – deliksiz olması durumlarıdır. Yapılan çalışmanın sonucunda; kolonlarda deliklerin olmasının, deliksiz olması durumuna göre taşıma kapasitesini % 37 oranda düşürdüğü tespit edilmiştir. 500 mm ve 1000 mm boyundaki deliksiz kolonlarda dudak uzunluğu arttıkça, dudak büküm yönü içe doğru olanların dayanımları, dudak büküm yönü dışa doğru olanların dayanımlarına göre % 7,1 oranında daha fazla olduğu görülmüştür. 1500 mm boyundaki deliksiz kolonlarda ise, dudak büküm yönü içe doğru olanların dayanımları, dışa doğru olanların dayanımlarına göre % 8,8 oranında daha az olduğu tespit edilmiştir. 500 mm ve 1000 mm boyundaki delikli kolonlarda dudak uzunluğu arttıkça, dudak büküm yönü içe doğru olanların dayanımları, dudak büküm yönü dışa doğru olanların dayanımlarına göre % 4,7 oranında daha fazla olduğu görülmüştür. 1500 mm boyundaki deliksiz kolonlarda ise, dudak büküm yönü içe doğru olanların dayanımları, dışa doğru olanların dayanımlarına göre % 30,4 oranında daha az olduğu tespit edilmiştir [3].

Durmaz ve Daloğlu (2016) yaptıkları çalışmada, eksenel basınç kuvveti uygulanan köşebent profillerin yük taşıma kapasitelerini doğru tahmin edebilmek amacıyla doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analitik model oluşturulmuş, bulunan sonuçlar TS 648’de verilen hesap yöntemleriyle bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Kitipornchai ve Lee (1986) tarafından eksenel basınç kuvvetine tabi tutulan uçları mafsallı soğukta şekil verilmiş tek parçalı eşit ve değişik kollu toplam 13 adet köşebent profil çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, sonlu eleman modeli ile modellenen Kitipornchai ve Lee’nin çalışmasındaki 13 adet köşebentin tahmin edilen göçme yükleri deneysel sonuçlara yeterince yakın çıkmıştır. Doğrulamadan sonraki parametrik çalışmada; TS 648 standardına göre tahkik edilen

köşebentlerin eksenel yük taşıma kapasitelerinin yaklaşık 2 kat daha emniyetli değerler verdiği ifade edilmiştir [4].

Dheyaa Albo Ishaq (2019) yaptığı çalışmada, hafif çelik yapılarda kullanılan farklı tipteki projelerin, TBDY 2019'da belirtilen enkesit özelliklerine göre performans değerlendirmesi, yapı güvenlik durumlarının belirlenmesi ve yapı maliyet değerlendirmesi yapılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada kat yüksekliği 4,3 m ve yapı boyutları 25m*20m olan 2 katlı bir yapı seçilmiştir. Yapıda kullanılacak eleman tipi olarak soğukta şekil verilmiş C tipi profil seçilmiştir. Panelli ve panelsiz olmak üzere toplam 8 modelin Sap 2000 sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur. Bu çalışmanın sonucunda, kullanılan eksenel yük etkisi altında bulunan C profillerin eğilmeli burulmalı burkulma davranışı gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, daha kısa aralıkla mesnetlenme durumunun olması gerektiğini ortaya koymuştur. Ayrıca yapılan analizlere göre panel duvar sisteminin yapı performansına katkısı % 10-25 oranında olduğu, kat yüksekliği arttıkça kazanılan katkının azaldığı görülmüştür [5].

Atasaral (2009) yaptığı bu çalışmada, soğukta şekillendirilmiş çelik profiller kullanılarak oluşturulan çok parçalı kolonların, eksenel basınç kuvveti etkisi altındaki davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Eksenel basınç kuvveti etkisi altında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, TS 11372 'de verilen bağıntılardan hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada, C profilleri ile farklı enleme bağlantı şekilleri kullanılarak 7 adet çok parçalı hafif çelik kolon hazırlanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, eksenel yükleme durumunda çok parçalı kolonların enleme levhası aralığının değişimi kolon kapasitesini değiştirmemiştir. Çünkü kolon profilleri ince cidarlı olduğundan yenilme olayı profillerin tekli ya da çoklu olarak yerel burkulmasıyla meydana geldiği görülmüştür. Yerel burkulmaların sebep olduğu yenilmelerden dolayı kolonların hiçbirinde genel burkulma olayı gözlenmemiştir [6].

Tama ve Kaplan (2015) yaptıkları çalışmada, ince cidarlı çelik kesitlerin soğukta şekillendirme yöntemi ile üretilme işleminden dolayı, çelik malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimlerin deneysel olarak incelenmesi

amaçlanmıştır. Bu çalışma için ilk olarak, 4 mm et kalınlığına sahip C, U ve Sigma profiller, sadece presle bükme yöntemine göre üretilmiştir. Presle bükme yöntemine göre, kesit boyunca ölçülen “Vickers” sertlik derecelerine bağlı olarak sertlik derecesi arttıkça dayanım artmakta fakat süneklik azalmaktadır. Diğer incelemede ise, köşe ve düzlem bölgelerinden parçalar alınarak çekme testlerine tabi tutulmuştur. Çekme testlerinin sonucunda, kesitlerin düzlem kısımlarından alınan parçaların tamamında akma platosu görülürken, köşe kısımlarından alınan parçalarda akma platosu gözlemlenmemiştir. Soğukta şekillendirme işleminden dolayı kesitlerin köşe bölgelerinde, düzlem kısımlara oranla, malzeme akma dayanımında ortalama % 50 oranında artış elde edilmiştir. Çekme dayanımında ise % 15 oranında bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, % 0,5 birim uzamanın olduğu andaki gerilme değeri, köşe bölgelerinden çıkartılan numunelerde, düzlem kısımlarından çıkartılan numunelere kıyasla, ortalama % 35 oranında artış göstermiştir [7].

Çelik (2020) yaptığı çalışmada, üç farklı firmanın ürün kataloğundan alınan 164 adet profilin enkesit özellikleri, AISI S100-16 yönetmeliğine göre ve literatürde yaygın şekilde kullanılan diğer yöntemlere göre hesaplanarak SAP2000 sonlu elemanlar programındaki enkesit özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları, AISI S100-16 yönetmeliği ve “Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım” (YDKT) yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve farklı burkulma boyları için hesaplanan dayanım değerleri incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, farklı enkesit ve burkulma boyları için hesaplanan dayanımlar karşılaştırıldığında, narin elemanlarda, zayıf eksendeki burkulma boyu azaltılarak elemanın dayanımının ciddi oranda arttırılabileceği gözlemlenmiştir. Yüksekliği ve genişliği hemen hemen aynı, fakat et kalınlıkları farklı olan profillerin dayanımları karşılaştırıldığında ise, levha kalınlığı arttıkça dayanımın arttığı görülmüştür [8].

Şenaysoy (2017) yaptığı bu çalışmasında, depolarda bulunan çelik raf sistemlerinde kullanılan soğukta şekillendirilmiş C kesitli kolon elemanların burkulma davranışı incelenmiştir. Çelik raf sistemlerinde kullanılan kolonların burkulma davranışı deneysel olarak, sonlu elemanlar yöntemiyle ve doğrudan dayanım yöntemiyle belirlenmiştir. Bu amaçla 4 farklı güçlendirme yöntemi kullanılarak maksimum kritik

burkulma yükünü veren kesit araştırılmıştır. Bu yöntemler kısaca şöyledir; orijinal kesitin başlıklarında açılı bulunan güçlendiricinin 90o olması, dikmenin sırt bölgesinde bulunan deliklerin açılı olması, dikme kesitinin sırt bölgesinde bulunan güçlendiricinin uzunluğunun arttırılması, başlık üzerinde bulunan 90o katlı kısmın sırttan farklı uzaklıklarda olması, başlık ucunda bulunan dudak kısmının 90o katlı olması durumlarıdır. Bu çalışma için 115x100 mm kesit ölçülerine sahip ve 2400 mm, 1300 mm ve 300 mm olmak üzere 3 farklı boy seçilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, boyu 2400 mm olan dikeme de analiz sonucu elde edilen değer, deneysel olarak bulunan değerden çok büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak kolon boyu arttıkça narinliğin artması gösterilmiştir. Diğer boylardaki deneysel ve teorik çalışma karşılaştırıldığında sonuçların birbirine uyumlu olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca alttan katlı olarak oluşturulan kesitlerde 1300 mm boyunda ki kolon elemanı en büyük kritik burkulma değerini vermiştir. Açılı delikli alttan katlı güçlendirilmiş geometri kullanılarak oluşturulmuş profil, en yüksek kritik değeri vermiştir. Sırt bölgesindeki güçlendiricinin uzunluğu arttıkça, kritik burkulma yükü değeri artmıştır. Ayrıca başlıkta açılı olarak yerleştirilen güçlendiricinin 90o katlı olması kritik burkulma yükünü arttırmıştır [9].

Tadaharu Adachi ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada (2004), eksenel basınç kuvveti altında yatay kuvvete maruz bırakılan bir kolonun burkulma davranışı araştırılmıştır. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçları doğru şekilde değerlendirmek için, deney elemanlarında farklı değişkenler seçilmiştir. Ayrıca yanal darbe yükünün farklı etkilerini görmek için, darbe kuvvetinin uygulandığı çekicin şekli ve malzemesi değiştirilerek deney numunesinin davranışı incelenmiştir. Eksenel kuvvete maruz kalmış deney elemanına darbe yükü etkisi çelik ve akrilik malzemeden yapılmış çekiç ile uygulanmış, deney elemanı olarak alüminyum alaşımlı kolona kullanılmıştır. Eksenel yük ve darbe etkisi altında bulunan kolon, Euler 'in kritik burkulma kuvvetinden daha düşük bir kuvvet altında göçme olduğu ifade edilmiştir. Çalışmanın sonunda elemanda oluşacak burkulmanın, eksenel kuvvetin etkisinden bağımsız olarak çarpma düzeneğinin kinetik enerjisi tarafından belirlendiği ifade edilmiştir. Bu nedenle, burkulma sonrası süreçteki elemanın göçme mekanizması ve deformasyonunda darbe kuvvetinin etkili olduğu deneysel olarak gösterilmiştir [10].

Pattamad Panedpojaman ve arkadaşları bu çalışmada (2019), eksenel yük kapasitelerini belirlemek için petek kirişe benzer şekilde gövdesinde dairesel açıklıklara sahip kolonlar için burkulma yükü hesapları yapılmıştır. Kolon geometrisinin ve kesme etkilerinin karmaşıklığı nedeniyle, burkulma yükünü analiz etmek için mevcut yöntemler sınırlı olduğu için bu tür bir çalışma yapıldığı ifade edilmiştir. Ayrıca, bir ucu sabit mesnetli kolonun eksenel kuvvet altında, kuvvetli ekseninde elastik burkulma yükünün hesaplanması için yeni bir yöntem önerilmesi amaçlanmıştır. Eksenel yük altında petek geometriye sahip kolonda oluşan kesme kuvveti etkilerine bağlı davranışını gözlemlemek için kesit boyutları, boşluk oranları, aralık oranları ve narinlik parametreleri kullanılmıştır. Hesap yöntemini belirlemek için altı adet H ve I kesite sahip profil kullanılmıştır. Petek geometriye sahip kolonlar oluşturmak için, profiller ortalarından kesilerek T şekli oluşturulmuş, daha sonra gövde kısımları yarım daire olacak şekilde kesilip, tekrar üst üste konularak gövdelerinden kaynakla birleştirilmiştir. Sonuçta, yeni oluşturulan geometri sayesinde kolonlardaki gövde yüksekliği artırıldığından dolayı elemanın kesme kapasitesi artmıştır. Ancak kolondaki kesme kuvveti, kolonların gövdesinde dairesel açıklıkların ortasında zayıf kısımda ve dairesel açıklıkların başlık kısmında ek deformasyonlara neden olmuştur. Önerilen burkulma yükü hesap yöntemi, sonlu elemanlar programı ANSYS ile analiz edilip karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Petek geometriye sahip kolonların kesme kuvvetinin etkili olduğu durumda, önerilen burkulma hesabı ile Euler burkulma hesabı karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda, petek geometriye sahip kesme kuvvetinin etkili olduğu elemanlarda, gövdedeki dairesel açıklıkların çapı ve aralıkları profillerin kritik burkulma yükünde etkili olduğu gözlenmiştir. Genel olarak, kesme etkileri, narinliği 75 veya 50'den büyük olan durumlarda, burkulma yükünü sırasıyla % 10 veya % 20'den daha az olduğu ifade edilmiştir [11].

Mehmet Avcı bu çalışmada(2014), kare, dikdörtgen ve daire kesitlere sahip kolonların elastik burkulma davranışını, bir ucu sabit diğer ucu serbest ve iki ucu da sabit mesnet olacak şekilde, eksenel basınç etkisi altındaki davranışları araştırılmıştır. Çelik kolonların burkulma yükleri, mesnet koşullarının, profil kesitlerinin ve narinlik oranlarının etkileri göz önüne alınarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan 12 adet deney elemanının kritik burkulma kuvveti ve birim deformasyon grafiği elde

edilmiştir. Analiz için Euler burkulma denklemleri ve sonlu eleman modellemesi olarak ANSYS programı kullanılmıştır ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kolon burkulmaya karşı en dayanıklı kesit kare kesit ve kolon burkulmaya karşı en dayanıksız kesit her iki mesnet koşulunda da dikdörtgen kesit olmuştur. Elemanın kritik burkulma yükü, kolonun uzunluğunun azalmasıyla artmıştır. Bir ucu sabit mesnet – diğer ucu serbest olan ve iki ucu da sabit mesnet olan kolonların uygun burkulma yükleri karşılaştırıldığında, iki ucu da sabit mesnet olan kolonun burkulma yükleri biri sabit mesnet - diğer ucu serbest olan kolondan daha yüksek olduğu ifade edilmiştir [12].

Xianlei Cao ve arkadaşları bu çalışmada (2019), çelik plakalardan üretilen kaynaklı T kesitli kolonun yerel burkulma davranışı araştırılmıştır. Eksenel basınç kuvveti altında, T kesitli kolonların, deneysel çalışması gerçekleştirilmiştir. Plakaların yerel burkulmaları dikkate alınarak elemanlar sınıflandırılmış ve elemanların yük - deplasman grafikleri elde edilmiştir. Çeşitli parametreler ve deneysel veriler göz önüne alınarak flanş ve gövde için genişlik-kalınlık oranlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, gövdenin yükseklik-kalınlık oranı ve profilin başlık genişlik-kalınlık oranı arttıkça kritik burkulma yükünün arttığı görülmüştür. Çin Şartnamesi (GB50017-2017) kritik burkulma yükünü aşırı güvenli tarafta kalarak hesapladığı ve Amerikan Yönetmeliğinin (AISC 360-10) ise güvenliği daha az gözönüne alarak hesapladığı görülmüştür. Eksenel basınç kuvveti etkisi altında kaynaklı T-kesitli kolonların kritik burkulma yükünü hesaplamak için yeni bir öneri sunulmuş ve önerilen model deneysel veriler ile desteklendiği ifade edilmiştir [13].

Tama yaptığı çalışmasında (2002), ince cidarlı çelik levha elemanlardan soğuk şekillendirme yöntemi ile üretilen değişik enkesitli kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışları araştırılmıştır. Dört farklı çelik kiriş modeli üretilmiş ve bu modeller 6 kN ve 90 kN arasında değişen 15 ayrı yük altında Sap2000 programında analiz edilmiştir. Daha sonra oluşturulan modeller, deney düzeneğinde test edilmişlerdir. Modellerin yük-deplasman grafikleri çıkarılmış ve karşılaştırılmıştır. Testler sonucunda, soğuk şekillendirme işlemi malzemenin akma sınır değerinde ortalama % 50 ve çekme dayanımında % 15 oranında bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. Plastik

deformasyonların olduğu köşe noktalarda % 100 oranında bir sertlik artışı gözlenmiştir [14].

Genç yaptığı çalışmada (2008), soğukta şekil verilmiş ince cidarlı ve kenarları rijitleştirilmiş C kesit elemanların eğilme ve kesme kuvveti etkisi altında davranışları ve dayanımları incelenmiştir. C kesitli elemanlar için, kesme ve eğilme dayanımları, AISI-96 ve TS 11372 yönetmeliklerine göre hesaplanmıştır. Hesaplarda kullanılan parametreler, farklı kesit boyutları ve elemanların delikli olup olmaması durumlarıdır. Sonuç olarak, eğilme momenti kapasitesi ile basınç baslığı narinlik değerleri arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu ve kapasitede AISI-96 da belirtilen $\lambda=0,673$ değerinden sonra beklendiği gibi azalma olduğu görülmüştür. İki standart için kesme dayanımı ile kesit derinliği ilişkileri birbirine çok yakın sonuçlar vermektedir. Gövdede delik açılması ile kesme dayanımında çok ciddi bir düşüş olduğu ve bu düşüşün kesit derinliğinin artmasıyla büyüdüğü saptanmıştır [15].

Kala yaptığı bu çalışmada (2010), bir hal yapısının sistem elemanları soğuk şekil verilmiş profiller kullanılarak Eurocode 3 ve LRFD'e göre boyutlandırılmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Binanın yapısal analizlerinde SAP2000, temel hesapları için ise SAFE bilgisayar programları kullanılmıştır. Bulonlu birleşimler tercih edilmiştir. Sonuç olarak, kapasite oranlarının genel olarak LRFD 'de daha düşük çıktığı görülmüştür. LRFD 'e göre hesaplarda kesit taşıma kapasiteleri daha fazla çıkmıştır [16].

Akar yaptığı çalışmasında (2010), soğukta şekillendirilen ve sıcak haddeleme yöntemiyle elde edilen çelik elemanların hesaplama yöntemlerine değinilerek, tek bir eleman ve sistem olarak hesaplamalar yapılmış ve bu hesap sonuçları ayrı durumlar için incelenmiştir. Çalışma sonucunda soğukta şekillendirilen çeliklerin yalnız başına veya sıcak hadde çeliği ile birlikte karma sistemler içerisinde kullanımının ağırlık ve maliyet açısından tasarruf sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada soğukta şekillendirilen çelikler ile sıcak hadde çeliklerinin taşıyıcı özellikleri arasındaki farklılıklar incelenmiş, üretim yöntemi farklı olan çeliklerin hangi yapı elemanı veya

sistemi olarak hangi şartlarda kullanılabileceği belirtilmektedir. Sistemde ağırlıktaki azalma deprem yüklerini de direkt olarak azaltmaktadır [17].

Evirgen yaptığı çalışmada (2012), malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi için beton basınç, elastisite modülü, çelik çekme ve sürtünme deneyleri yapılmıştır. 64 adet beton dolu çelik tüp numunesi üzerinde eksenel basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerdeki genişlik/kalınlık (b/t) oranı, beton basınç dayanımı ve kesit geometrik şekli değişkenlerinin; eksenel taşıma kapasitesi, maksimum yük, birim kısalma, süneklik ve burkulma üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda b/t oranları 18,75, 30, 50, 100; beton basınç dayanımları 10, 20, 30 MPa ve kesitler dairesel, düzgün altıgen, dikdörtgen ile kare seçilmiştir. Modeller ABAQUS programı kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuç olarak, eksenel yük altındaki CFST kısa kolonlarda tüm numunelerde beton çekirdek çelik tüpün içeri doğru bulkulmasını engellemekte ve aynı anda çelik tüp beton çekirdeğe sargı etkisi sağlamaktadır. Sadece beton veya sadece çelik boş kesitler ile karşılaştırıldığında, tüm CFST numunelerde maksimum eksenel yük, deformasyon, birim şekil değiştirme ve süneklik değerleri artmıştır. Daire kesitlerde sargı etkisi yatay kesite paralel tüm doğrultularda geçerli olduğundan dolayı en yüksek süneklik değeri görülmüştür [18].

Dönmez yaptığı bu çalışmada (2017), aynı boyutlara sahip hafif çelik bir yapının ve ağır çelik yapının tasarımları yapılmıştır. Tasarımlarda yeni deprem yönetmeliği kullanılmıştır. Eğdeğer deprem yükü hesabı yapılmıştır. Hafif çelik yapı sistemini oluşturan kolon elemanın, eğilme ve basınç altındaki tasarımı AISI standartlarına uygun bir biçimde yapılmıştır. LRFD ve ASD yöntemleri ayrı ayrı irdelenmiştir. Yapı analiz sonuçları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, AISI yönetmeliği kullanılarak hesaplanmış ve hafif çelik yapı tasarımı yapılırken, ASD ile LRFD yönetmeliği arasında oran olarak fazla farklar olmadığı anlaşılmıştır. LRFD yönetmeliğinin yük kombinasyonlarında daha çok veri ve katsayının olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden hafif çelik yapı tasarımında azaltma faktörleri ile birlikte LRFD yönteminin yapı analizi için daha uygun ve güncel olduğu söylenebilir [19].

Tüylüoğlu yaptığı çalışmada (2019), sırt sırta bağlanmış ince cidarlı C profilli elemanlarının birleşim hesapları yapılmış, basınç ve çekme testlerine tabi tutulmuştur. Üç farklı et kalınlığı, üç farklı bağlantı şekli ve üç farklı bulon çapı değişken parametreler olarak alınmıştır. Deney sonuçları karşılaştırılmıştır. 27 deneyden elde edilen verilerle EC ve AISI standartlarının farklılıkları irdelenmiştir. Sonuç olarak, AISI dayanımlarının EC dayanımlarına göre daha güvenli tarafta kaldığı, EC kopma modu öngörülerinin, AISI öngörülerine göre deneysel kopma modları ile sayıca daha fazla örtüştüğü tespit edilmiştir. Sac et kalınlıklarının doğrusal artırılmasına rağmen deneysel dayanım sonuçlarının doğrusal olmayan artış gösterdiği görülmüştür [20].



BÖLÜM 3. ÇELİĞİN YAPILARDA KULLANILMASI

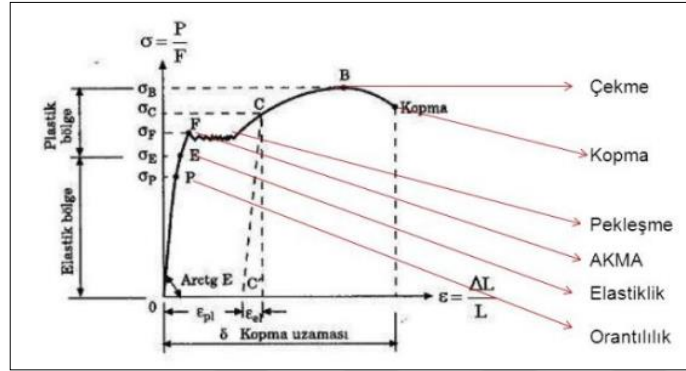
Tarihsel sürece bakıldığında, ilk başlarda silah ve eşya yapımında kullanılan demir malzemesi, işleminin kolay, daha ince, daha hafif ve işgücünün daha az olması nedeniyle yerini çeliğe bırakmıştır. Çelik malzemesini kısaca tanımlamak gerekirse, demir, karbon ve bazı elementlerin, kullanılacak yere göre istenen çeliğin özelliklerini barındırması için belli miktarlarda karıştırılması sonucu elde edilen bir alaşımdır.

Çelik malzemesi birçok farklı alanlarda kullanılan bir malzemedir. Ancak miktar olarak en fazla kullanılan alan çelik yapılardır. Dünyada üretilen çeliğin % 50'si inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Dayanımının oldukça yüksek olması, hafif olması ve ara kolonlar atmadan kullanılabilecek geniş açıklıklı alanlar sunması nedeniyle yapı sektöründe çoğunlukla tercih edilmektedir. Ayrıca çelik malzemesinin, büyük oranda şekil değiştirmeler yapma yeteneğinden dolayı sünek davranması, deprem durumlarında uygun çözümler sunmaktadır. Bunun yanında çeliğin, yangına ve korozyona karşı dayanıksız olması nedeniyle korunma tedbirlerinin alınması gerekmektedir.

3.1. Çelik Malzemesinin Genel Özellikleri

Çelik malzemesi mekanik olarak işlenebilen (dövülerek, preslenerek, haddeden geçirilerek) şekil alabilen demir alaşımlarına çelik denir. Çelik, ana bileşenleri demir ve karbon olan bir alaşımdır. Çeliğin yapısında %16-20 oranında karbon bulunmaktadır. Karbon miktarı arttıkça çeliğin dayanımı da artar. Ancak bu durumda çelik daha gevrek hale getirerek, kaynaklanabilirliği azaltmaktadır. Dolayısıyla hem yüksek dayanımlı hem de yeterli sünekliğe sahip çeliğin üretiminde karbon yüzdesi hassas ve önemli bir rol oynamaktadır. Çelik alaşımına ayrıca fosfor, kükürt, azot, silisyum, manganez, bakır, krom, nikel gibi elemanlar ilave edilerek kaliteli çelikler

elde edilir. Diğer elemanların çeliğin özelliklerine olan etkisi karbonun tek başına olan etkisinin bir fonksiyonu olarak “Karbon eşdeğeri”, CE ile ifade edilir. Çelik homojen bir yapıya sahip olmasında dolayı her yönde ve her noktada aynı özelliği gösterir.



Şekil 3.1. Çelik Gerilme ve Şekil Değiştirme Grafiği [39]

Şekil 3.1.’de çelik malzemesinin gerilme-şekil değiştirme grafiği verilmektedir. Grafiğe bakıldığında genel olarak çeliğin yükleme altındaki durumu şu şekilde ifade edilebilir. İlk olarak elastik davrandığını, akma platosunu ve yük artmaya devam ettikçe ise pekleşme davranışını ve kopması görülmektedir. Çelik elastik bölgedeyken, gerilme ve şekil değiştirme lineer bir şekilde artmaktadır. Bu lineer veya sabit eğimle artan çizginin eğimi, çelik malzemenin elastisite modülünü vermektedir. Yani özetle çeliğin gerilme-şekildeğiştirme grafiğinde elastik bölgede, gerilmenin şekil değiştirme değerine oranı elastisite modülü denmektedir. Gerilme armaya devam ettiğinde, malzeme elastik bölgeden çıkarak akma platosuna gelmektedir. Malzemenin kalıcı şekil değişimi yapmaya başladığı gerilme değerine akma gerilmesi denmektedir. Gerilme bu değere ulaştıncaya uzamaların artması için artık gerilmenin çoğalmasına gerek yoktur. Bu sınırdan sonra çelikte plastik davranışın başladığını belirtmektedir. Artık çelik elastik bölgede olduğu gibi yük kaldırılırsa da eski haline dönemez. Yük artmaya devam ettiğinde çeliğin plastik şekil değiştirme esnasında sertliğinin ve mukavemetinin artması olayına pekleşme denilmektedir. Grafikte verilen 3.bölge pekleşme bölgesidir. Son olarak ise yük artmaya devam etse bile, çelik malzemesinin gerilme azalma eğilimindedir. Ve belli bir şekil değiştirme değerine geldiğinde kopma meydana gelmektedir. Çelik malzemenin koptuğu gerilmeye kopma gerilmesi denilir.

3.1.1. Çeliğin diğer yapı malzemelerine göre bazı avantajları

- Yüksek dayanımlı olup, öz ağırlığının taşıdığı yüke oranı çok küçüktür; dolayısıyla, yapının tümsel ağırlığı azalmaktadır.
- Elastisite modülü, diğer yapı malzemelerinininki ile karşılaştırıldığında, çok yüksektir. Bu nedenle, stabilite sorunlarına, dinamik yüklere, titreşimlere uygun bir davranış göstermekte ve sehim problemi olan taşıyıcı elemanların boyutlandırılmasında daha ekonomik kesitler elde edilmektedir.
- Çekme dayanımı basınç dayanımına eşit, hatta burkulma olayı düşünülürse daha yüksektir. Bu niteliği, çeliğe mimari açıdan tasarımı özellik gösteren yapılarda bir avantaj sağlamaktadır.
- Sünek olduğu için büyük bir şekil değiştirme kapasitesi bulunmakta, dolayısıyla, beklenmeyen olağan dışı yük durumlarında, çürük zeminlerde oluşabilecek oturmalarda ve deprem bölgelerinde çok önem kazanmaktadır.
- Taşıyıcı elemanların atölyelerde işlenmeleri, inşaatın montaj aşamasında hava koşullarından fazla etkilenmemesine neden olmakta ve dolayısıyla yapım süresi kısalmaktadır.
- Değiştirme ve takviye olanağı çok kolay olduğu için, elemanlar söküldüklerinde yeniden az bir kayıpla, veya yeniden kullanılmaları önceden planlanmış ise hiç kayıpsız, kullanılabilir. Hatta yapının tümüyle sökülüp başka bir yere taşınması olanağı vardır. Restorasyona açıktır ve diğer tür yapıların restorasyonunda da pek çok olanaklar sunar.
- Elemanlar yerlerine monte edildiklerinde işletme yükü ile çalışabildiklerinden, yapım süresinin kısalmakta ve iyi bir planlama ile de az iskeleli inşaat mümkün olmaktadır.
- Çelik dünyanın en çok ve tam olarak geri dönüştürülen malzemesidir. Çelik hurda %100 çeliğe dönüşür ve doğru yapılırsa kalite ve güvenilirlik kaybı olmaz.
- Mimari açıdan çelik yapı tasarımı estetik ve yaratıcılığa açıktır. Kolon sayısı en aza indirilebilir; kiriş boyutları betonarmeye göre düşük olduğundan, geniş açıklıklara karşın döşemeler incedir. Aynı yapı yüksekliği için daha fazla kat yapılabileceği gibi, temiz kat yüksekliği de daha fazladır. Döşeme iç hacimleri

boş olduğundan bu boşluk, tüm tesisatı geçirmek için kullanılır ve böylece kullanılabilir kat yüksekliğinden kayıp olmaz.

- Çelik taşıyıcılı yapı yüksek kaliteli endüstriyel bir üründür. Taşıyıcı sistemin tüm parçaları fabrika ortamında üretilir ve endüstriyel kalite güvencesi içerir. Şantiye üretimleri ve tüm uygulamaları da benzer şekilde kontrol edilir.
- Dönüşümlü bir malzeme olması ve inşaat sırasında zararlı atıkların bulunmaması ve kuru yöntemlerle yapılması, küçük şantiye alanlarıyla ve hızlı temiz bir inşaatın gerçekleştirilebilmesi nedenleriyle çevreye zarar vermeyen bir malzeme konumundadır. Çelik yapı söküldüğü zaman bile geriye atık malzeme bırakmaz.

3.1.2. Çeliğin dezavantajları

Yorulma, çelik yapılar için önemli bir sorundur. Yorulma, tekrar eden yükleme ve yük boşalmaları sonucu zaman içerisinde mikro çatlakların makro çatlağa dönüşmesi sonucu oluşmaktadır. Yorulma çatlakları, tekrarlı yükler etkisindeki tüm çelik yapılarda (köprülerde) meydana gelebilir. Yorulma çatlaklarının oluşmasının en büyük sakıncası gevrek kırılmaya neden olmasıdır.

Diğer bir dikkat edilmesi gereken durum ise çelikte korozyon oluşmasıdır. Çelik malzemesi dış etkenlerden dikkatli bir şekilde korunmadığı durumlarda korozyona maruz kalmaktadır. Çelik malzemenin yüzeyi, su ve oksijenden uzak tutulduğu sürece korozyondan korunmuş olacaktır. Korozyonun (paslanmanın) önlenmesi için bazı yöntemler:

- Koruyucu kaplamalar (Epoksi kaplamalı çelikler)
- Galveniz kaplama (Çinko kaplama ile yapılır)
- Özel alaşımlı çelikler (Paslanmaz Çelik)
- Katodlama ile koruma (Genelde yer altı yapılarında kullanılır. Ters elektrik akımıyla çelik katoda dönüştürülür.)

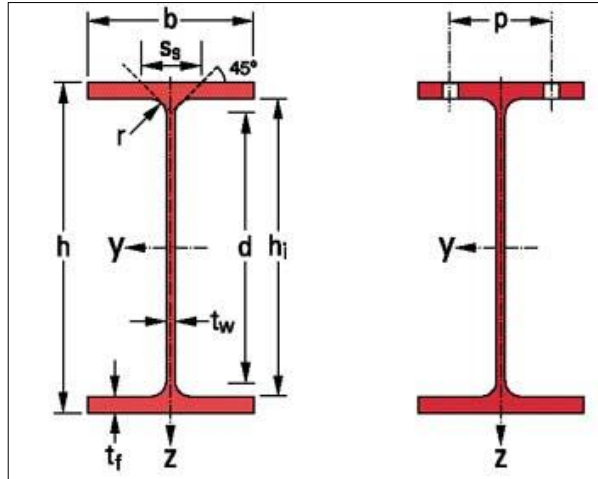
3.2. Çelik Yapı Elemanları

Çelik bir yapıda taşıyıcı sistemde bulunan kolon, kiriş gibi yapı elemanlarına çelik yapı elemanları denir. Çelik yapı elemanları, yapının şekline göre ve kullanım amacına göre çeşitlilik göstermektedir. Örnek olarak, endüstriyel yapılarda geniş açıklıklar istendiğinden dolayı, sıcak şekillendirilmiş hadde profil, yapma veya parçalı profil olarak büyük kesitli kolon ve kirişler kullanılırken, diğer yandan konut yapısında soğuk şekillendirilmiş daha ince, daha hafif ve küçük kesitler kullanılabilir. Örnekte de bahsedildiği üzere, çelik yapı elemanları şekillendirme yöntemleri bakımından iki çeşittir. Sıcak şekillendirilmiş ve soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarıdır. Bu tez kapsamında, soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının kesit özellikleri ve tasarım esasları anlatılacaktır.

3.2.1. Sıcakta şekillendirilmiş çelik yapı elemanları

Sıcak şekillendirilmiş çelik elemanların diğer bir adı da hadde elemanlarıdır. Bu tür yapı elemanları üretilirken, çeliğe yüksek sıcaklıklar verilerek plastik şekil değişime zorlayarak istenilen kesit oluşturulmaktadır. Bu işleme haddeleme işlemi denilmektedir. Haddeleme işleminin yapılacağı hadde makinelerinin merdaneleri, aynı hızda dönme sağlamakta olmasına karşın zıt yönde dönme sağlamaktadır. Bu iki merdane arasından geçen ürünler, plastik deformasyona uğramaktadır. İki merdane arasındaki ara açıklığı, metalin giriş sağladığı bölümdeki kalınlıktan az olduğundan dolayı, hadde işlemine uğrayan malzemenin çıkışındaki kalınlık daha az olacaktır. Haddeleme işlemini mekanik bir tabir ile açıklayacak olursak; bir basma (presleme) işlemi denebilir. Hadde makinelerinde sağlanan basınç sayesinde, çelik gerekli işlemi görmektedir.

Sıcak şekillendirilmiş çelik yapı elemanları, genellikle yüksek çelik yapılarında, uçak hangarlarında, depolarda, endüstriyel yapılarda ve geniş açıklıklı yapılarda tercih edilmektedirler. En çok tercih edilen kesitler ise, HEA, HEB, IPE vb. profillerdir. Kolonlarda, kirişlerde ve döşeme kirişlerinde, yapının ana taşıyıcı sistemini oluşturan elemanlarda kullanılmaktadırlar.

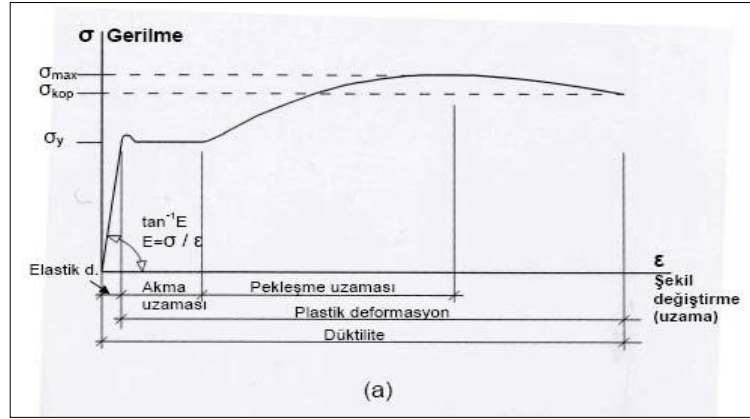


Şekil 3.2. Sıcakta şekillendirilmiş Çelik Elemanın Kesiti (IPE) [40]

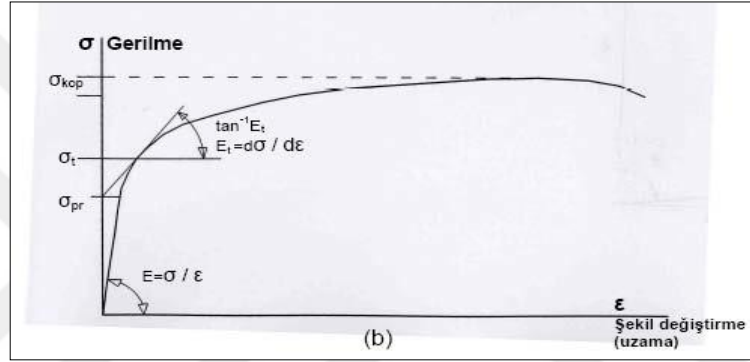
3.2.2. Soğukta şekillendirilmiş çelik yapı elemanları

Soğuk şekillendirme yöntemi, çelik malzemenin içyapısında herhangi bir değişiklik olmadan döner diskler yardımıyla ve yüksek basınçla kalıplardan geçirilerek şekil verilmesine denilmektedir. Bu yöntemde çelik, hiçbir şekilde ısıya tabi tutulmamakta ve tüm işlemler oda sıcaklığında yapılmaktadır. Soğuk şekillendirme yöntemleri ikiye ayrılmaktadır, bunları şu şekilde sıralayabiliriz; presle şekil verme ve sürekli formda şekil verme yöntemleridir. Soğukta şekillendirilmiş çelik elemanlar, rulo halindeki sac levhalardan kesilmiş çelik şeritlerin, bant boyunca silindirler arasından çekilmesi ya da presler ile bükülerek istenen kesitler haline getirilmesi işlemiyle imal edilmektedir.

Şekil 3.3’de görüldüğü üzere gerilme değeri akma değerine (σ_y) ulaşınca kadar doğrusal elastik davranış gösterir. Bu bölgede gerilme ortadan kaldırıldığında malzeme ilk boyutuna geri dönebilir. Gerilmenin orantılı olduğu bu bölgede bir orantılık sabiti mevcuttur ve elastisite modülü (E) olarak ifade edilmektedir. Bu bağıntıya, “Hooke Kanunu” denilmektedir. Formüle edilmiş hali şu şekildedir “ $E = \sigma / \epsilon$ ”. Akma gerilmesinin aşılmasının ardından malzemede akma ve plastik davranış görülür. Plastik şekil değiştirmenin ardından artık gerilme kaldırılrsa bile malzeme eski haline geri dönemez. Gerilme maksimuma ulaştığında (σ_{max}), yük artmaya devam etse de gerilme bir miktar azalarak kopma gerçekleşir.

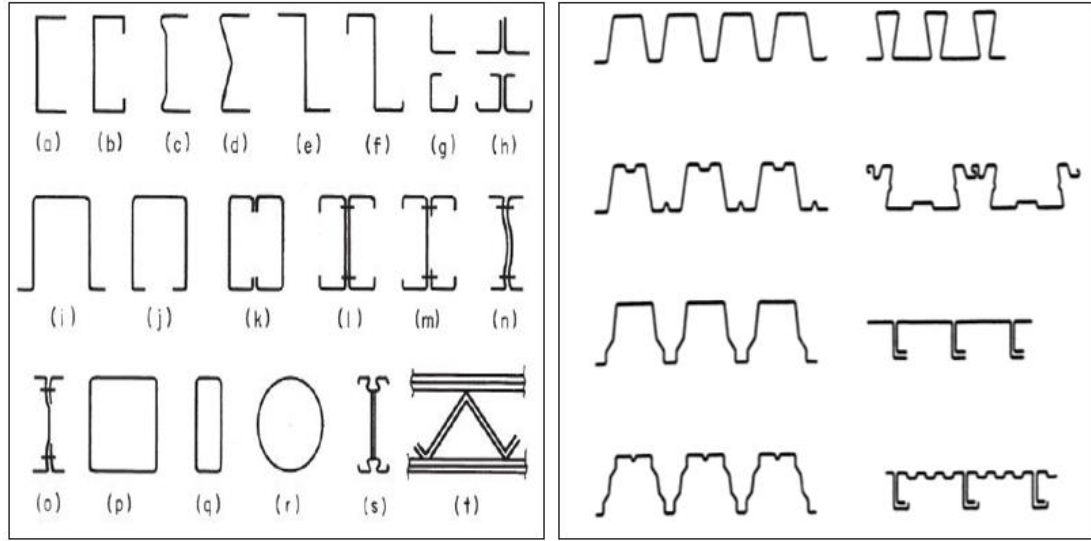


Şekil 3.3. Şerit veya levha çelikte gerilme-şekil değiştirme kesin akma diyagramı [41]



Şekil 3.4. Şerit veya levha çelikte gerilme-şekil değiştirme yavaş akma diyagramı [41]

Şekil 3.3.'de görüldüğü üzere, keskin akmanın gerçekleştiği diyagramda, akma noktası, gerilmenin bir plato oluşturduğu aşamadır. Yavaş akan çeliğin, akma dayanımı ise, orantılılığın bittiği gerilme değerinden (σ_{pr}) başlayan grafiğin büküldüğü kısımdır. Mukavemetinin burkulma tarafından belirlenen elemanlarda, sadece akma noktası değil, elastiklik modülü (E) ve tanjant modülü (E_t) de belirleyicidir. Şekil 3.4.'te görüldüğü gibi, herhangi bir gerilme değerinde, (σ_t) tanjant modülü (E_t), diyagram eğrisine çizilen teğet ile tanımlanır. Keskin akan çelikte, akma noktasına kadar $E_t = E$ 'dir. Fakat yavaş akan çelikte, orantılılık sınırına (σ_{pr}) kadar $E_t = E$ 'dir. Bu sınır aşıldıktan sonra başlangıçtaki elastiklik modülüne göre hızlı bir şekilde düşme görülmektedir.



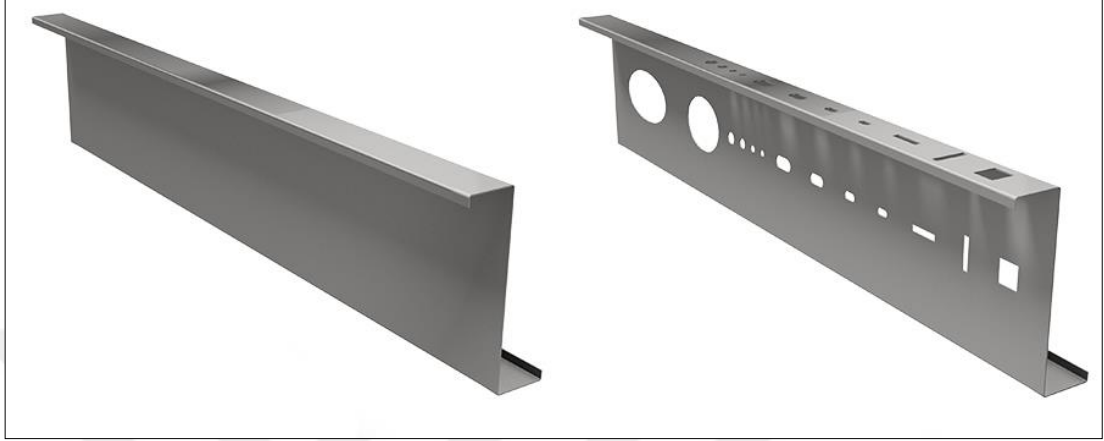
(a) (b)
Şekil 3.5. Yaygın Şekilde Kullanılan Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Profiller [45][15]

Ülkemizde ve dünyada yaygın olarak çeşitli çelik profiller ve soğuk şekillendirilmiş çelik yassı elemanlar kullanılmaktadır. Teknolojik gelişmeler sayesinde istenilen başka kesit şekilleri de üretilebilmektedir. Şekil 3.5.(a)'da, genel olarak çelik yapılarda taşıyıcı çerçeve sistemlerinde veya yardımcı eleman olarak kullanılan bazı soğuk şekillendirilmiş çelik kesitleri gösterilmektedir. Soğuk şekillendirilmiş çelik kesitlerin bazıları şu şekildedir; C kesitler, Z kesitler, köşebent kesitler, şapka kesitler, I kesitler, T kesitler ve boru kesitlerdir.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, standart C ve U kesitlere kıyasla sigma kesitler (Şekil 3.5.(a)c-d) yüksek yük taşıma kapasitesi, daha küçük boşluk boyutu, daha az ağırlık ve daha büyük burulma rijitliği gibi çeşitli avantajlara sahip olduğunu göstermiştir [45].

Soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının diğer bir kategorisi ise Şekil 3.5.(b)'de gösterilmiştir. Bu tür elemanlara soğuk şekillendirilmiş çelik yassı elemanlar denilmektedir. Çelik yassı elemanlar, genellikle çatı kaplamalarında, döşemelerde, duvar panellerinde, cephe kaplamalarında ve çeşitli köprü tasarımlarında kullanılmaktadırlar.

Bu tez kapsamında, soğuk şekillendirilmiş Z profiller ele alınmıştır. Şekil 3.6. 'da tipik bir soğuk şekillendirilmiş Z profili görülmektedir. Soğuk şekillendirme yöntemleriyle elde edilebilmektedir.



Şekil 3.6. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Z Profil [30]

3.2.3. Sıcakta ve soğukta şekillendirilmiş çelik elemanlar arasındaki farklar

Sıcak haddelenmiş ve soğuk haddelenmiş çelik arasındaki temel farkın işlemlerden biri olduğunu not etmek önemlidir. “Sıcak haddeleme”, ısı ile yapılan işlemleri ifade eder. “Soğuk haddeleme” oda sıcaklığında veya yakınında yapılan işlemleri ifade eder. Her ne kadar bu teknikler genel performansı ve uygulamayı etkilese de, metalürjik bileşim ve performans derecelendirmeleriyle ilgili olan resmi standartlar ve çelik kaliteleri ile karıştırılmamalıdır. Farklı derecelerde ve özelliklerde olan çelikler, hem temel karbon çelikleri hem de diğer alaşımlı çelikler de dâhil olmak üzere sıcak haddelenmiş veya soğuk haddelenmiş olabilir. Belli gözükebilir, ancak bazı çelik türleri belirli uygulamalar için daha uygundur. Hangisinin kullanılacağını bilmek, hammaddelere fazla harcama yapılmamasına yardımcı olabilir. Ayrıca ek işlemlerde zamandan ve paradan tasarruf edebilir. Sıcak ve soğuk çelik arasındaki farkları anlamak, birbirini seçmenin ayrılmaz bir parçasıdır.

3.3. Soğuk Şekillendirme Yöntemleri

3.3.1. Presle soğukta şekil verme yöntemi

Presle bükme yönteminde kullanılan baskı tezgâhı, hareketli üst kiriş ve istenilen kesit şeklini elde edebilecek şekilde ayarlanabilen alt yataktan oluşmaktadır. Elde edilecek kesite göre, bükülecek yerlerdeki açılar göz önüne alınarak alt yataktaki kalıp uygun şekilde değiştirilir. Elemanın üstteki hareketli kiriş çelik levhayı her köşesinden pres etkisiyle bükerek istenen forma dönüştürür. Bu yöntem sayesinde, baskı makinesinin boyutlarına göre değişmekle birlikte (genişliği genelde 3 m) kısa boylu ve eni dar olan elemanlar için kullanılmaktadır. Bu yöntem manuel olarak kontrol edilmektedir.



Şekil 3.7. Çelik levhaların presle şekil verme yöntemiyle şekillendirilmesi [43]

3.3.2. Soğuk haddeleme yöntemi

Bu yöntemde, en az iki veya daha fazla döner disk serisinin bulunduğu makineler kullanılmaktadır. Şerit halinde makineye verilen çelik levha, disk serilerinde bulunan silindirlere girerken adım adım değişmeye başlar ve son adımda istenilen kesit şeklini almış vaziyette makineden kesilerek çıkarılır. Levhanın, her silindirden geçtiğinde adım adım şeklinin değişmesine “pas” veya “istasyon” denilmektedir. Pas sayısı artırılarak, istenen karmaşık kesitler de üretilebilmektedir. Örneğin iki milimetreden daha kalın bir Z profili kesitinin oluşturulabilmesi için beş veya daha fazla pas gereklidir. [Uzgider ve Arda, 1989] Gerekli olan boylara göre, kesme boyları genellikle 6 m ve 12 m olmaktadır. Bu yöntemde özellikle, çatı kaplaması, döşeme,

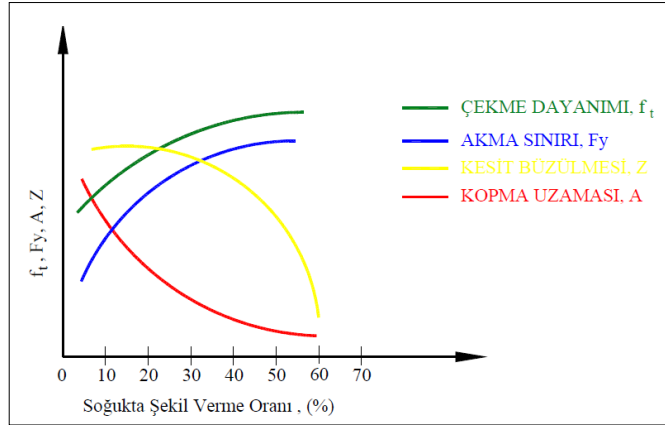
duvar panelleri, yağmur suyu olukları ve çelik yapı elemanlarının üretiminde kullanılmaktadır.



Şekil 3.8. Soğukta şekil verilmiş Z geometrili çelik levhanın şekil verilme öncesi ve sonrası [44]

3.4. Soğukta Şekillendirme İşleminin Malzemenin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi

Soğukta şekil verme işlemi sırasında kullanılan yöntemler, çelik malzemenin mekanik özellikleri üzerinde bazı değişiklikler meydana getirmektedir. Soğuk şekillendirme işleminin etkilerinin büyüklüğü, kullanılan çelik malzemenin türü, çeliğin üretim yöntemi ve kimyasal kompozisyonu ile kuvvetle değişimi etki etmektedir. Soğukta şekillendirme işlemi, eleman ekseninin enine ve boyuna doğrultuda plastik şekil değiştirmeler meydana getirmektedir. Soğukta şekillendirme işlemi genelde çelik malzemenin akma dayanımını ve çekme dayanımını artırırken sünekliği azaltır ve malzeme daha gevrek bir hal alır. Soğukta şekillendirme miktarının artması ile birlikte, çelik malzemenin dayanım ve sünekliğin değişimi Şekil 3.9.'da verilmiştir. Soğukta şekillendirilmiş çelik taşıyıcı elemanların yük taşıma kapasiteleri, elastik yerel burkulma veya genel burkulmanın kritik olduğu haller dışında, kullanılan malzemenin akma sınır gerilmesine bağlıdır.



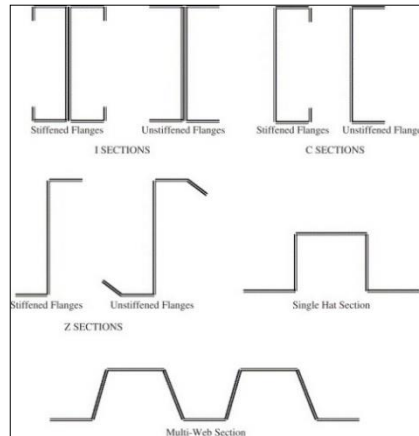
Şekil 3.9. Soğukta Şekil Verme Oranı ile Malzeme çekme Özelliklerinin Değişimi [15]

3.5. Soğukta Şekillendirilmiş Çelik Profillerin Kullanım Alanları

Soğukta şekil verilmiş ince cidarlı çelik elemanlar kullanım amacına uygun iki ana grup ta incelenebilir:

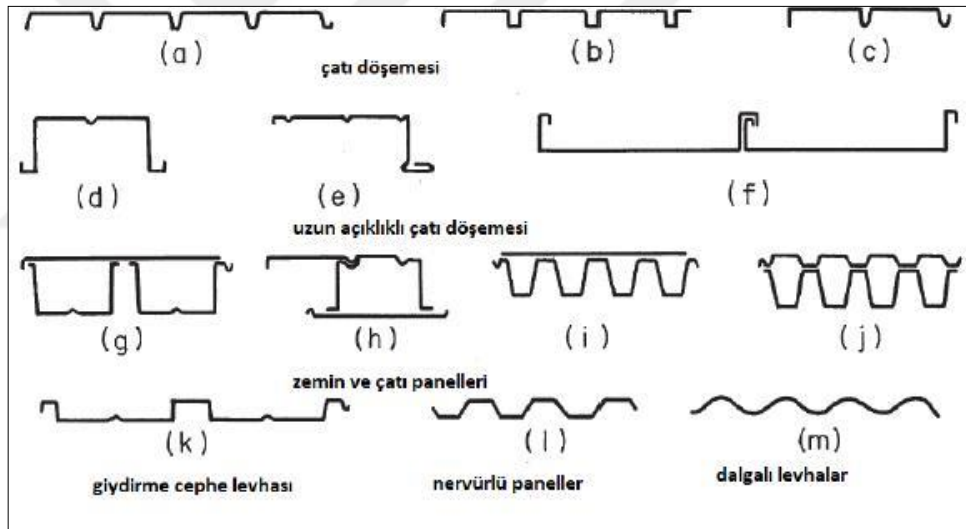
- Yapı sistemlerinin taşıyıcı elemanları
- Çatı ve Cephe kaplamaları

Yapı Sistemlerinin Taşıyıcı Elemanları: Şekil 3.10.'da yapıların ana taşıyıcı sistemlerinde kullanılan soğukta şekil verilmiş ince cidarlı kesitler görülmektedir. Bu kesit tipleri arasında en çok kullanılanlar U, C, sigma ve Z kesitlerdir. Genel olarak, soğukta şekil verilmiş ince cidarlı ana taşıyıcı elemanların yüksekliği, 50 mm ile 300 mm arasında; et kalınlıkları ise 2 mm ile 6 mm arasında değişmektedir.



Şekil 3.10. İnce cidarlı yapı elemanları [49]

Çatı ve yan duvar kaplaması olarak kullanılan taşıyıcı elemanlar iki amaçla kullanılırlar: Çatı kaplaması veya yan duvar kaplaması olarak aşık veya kuşaklar arasında, düzlemlerine dik etkiyen rüzgar veya kar yükü ve ölü yükleri; taşımak ve ayrıca yapının içini dış ortamdan ayırmak. Bunlar 0,3 mm den 1,20 mm ye kadar değişen kalınlıklarda alüminyum alarım malzemeden; galvanizlenmiş veya darbeye dayanıklı fırın boyayla boyanmış çelik malzemeden Sekil 3.10.'da görülen enkesit şekillerinde üretilirler. Ülkemizde bu elemanların belirli enkesit şekilleri için üretimi vardır. Çatı ve yan duvar paneli olarak kendi düzlemleri içinde kesme kuvveti taşıyarak yan duvar çaprazı veya çatı düzlemi çaprazı görevini görürler (Sekil 3.11). Böyle bir yük tasıma kapasitesine sahip olabilmeleri için; yan duvar veya çatı düzlemi aşıklarıyla, ana taşıyıcı çerçeve üst başlığına kesme kuvveti tasıma kapasitesine olan özel saç vidalarıyla bağlanmaları gerekir.



Şekil 3.11. Çatı Kaplaması ve Döşeme Panelleri [35]

Soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanları kullanılarak oluşturulan yapılara hafif çelik yapılar denilmektedir. Bölüm 3.2.'de verilen soğuk şekillendirme yöntemlerine göre hafif çelik yapıyı oluşturan kolon, kiriş, döşeme ve kaplama gibi elemanlar istenilen ölçülerde ve kesitlerde üretilmektedir. Türkiye bina deprem yönetmeliğinde bölüm 10 da verilen tanıma göre ise hafif çelik yapılar özetle şu şekilde tanımlanır: Cidar kalınlığı çoğunlukla 0,45 mm - 4 mm arası çelik sac elemanlarının soğukta şekil verilerek profil haline getirilmiş elemanlardan oluşan yapı sistemleridir. Yaygın olarak tek katlı, iki katlı ve üç katlı olarak inşa edilebilmektedirler.



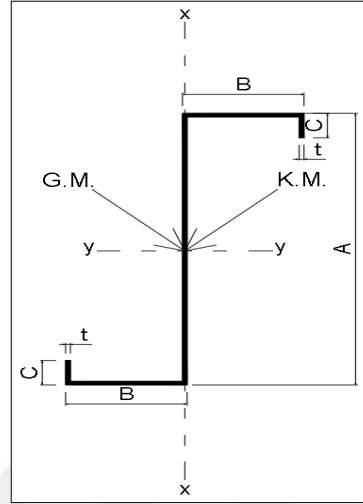
Şekil 3.12. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Elemanların Yapıda Kullanılması [50]

BÖLÜM 4. SOĞUK ŞEKİLENDİRİLMİŞ Z PROFİLLERİN ENKESİT ÖZELLİKLERİNİN HESAPLANMASI

4.1. İncelenen Profiller

Soğuk şekillendirilmiş çelik Z profil ebatları ve asal eksenleri, Şekil 4.1.'de sunulmuştur. Bu tez kapsamında incelenen Z profillerin alt ve üst başlık genişlikleri aynıdır. Diğer yandan alt ve üst dudak uzunlukları da aynı alınmıştır. Bu tür Z kesitlerde simetri ekseninin asal eksenler olmamasına rağmen, simetri eksenleri Z kesitin merkezinden geçmektedir. Bundan dolayı kesitin ağırlık merkezi tam ortadadır. Geometrik merkez ise, şekildeki tüm noktaların aritmetik ortalama konumu olarak ifade edilir [46]. Homojen bir cismin geometrik merkezi, ağırlık merkezi ile çakışmıştır [47]. Bu çalışmada incelenen Z profillerin geometrik merkezleri (G.M.), kesitin orta noktasına denk gelmektedir. Eğer yükün uygulanma noktası için burulma yaratmayacak, sadece eğilme ve düşey kesme yaratacak bir nokta bulunabilirse, bu durumda sadece düşeyde çökme olacaktır. İşte bu noktaya kayma merkezi (eğilme merkezi) adı verilmektedir. Tamamen kesit geometrisine bağlı olarak simetri eksenini üzerinde ve kesit alanı dışında veya içinde olabilir [48]. Soğuk şekillendirilmiş çelik Z profilin kayma merkezi (K.M.), kesit içinde ve geometrik merkez ile çakışmaktadır. İncelenen Z profillerin kayma ve geometrik merkezleri Şekil 4.1. 'de gösterilmiştir. Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi, profilin yüksekliği A simgesiyle, başlık genişlikleri ise alta ve üstte eşit olduğundan dolayı tek simge olacak şekilde B simgesiyle gösterilmiştir. Her iki başlıkta da rijitleştirici olarak ifade edilen, dudak (tırnak) uzunlukları, aynı ölçülerde olduklarından dolayı aynı C simgesiyle gösterilmiştir. Profilin asal eksenlerine bakıldığında, x eksenini güçlü eksen ve y eksenini ise zayıf eksen olarak ifade edilmiştir. Son olarak, profilin et kalınlığı t ve iç büküm yarıçapı ise R ile ifade edilmiştir. Bu tezde, çelik profil üretimi yapan sektörün önde gelen firmalarının ürettiği soğuk şekillendirilmiş çelik Z profillerinin katalogları incelenerek, yaygın

şekilde kullanıldığı düşünülerek seçilen Z profiller ele alınmıştır. Bu çalışmada ele alınan profiller Tablo 4.1.'de listelenmiştir. Toplam çelik Z profili sayısı 90 adettir.



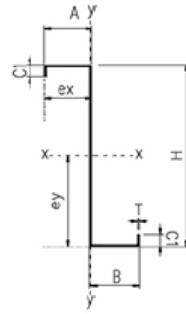
Şekil 4.1. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Z Profili Kesit Görünüşü[31]

Seçilen soğuk şekillendirilmiş çelik Z profillerin boyutlarına bakıldığında, yükseklik olarak en büyük uzunluğun 400 mm ve en küçük uzunluğun ise 100 mm olduğu görülmektedir. Başlık genişliklerine bakıldığında ise en büyük genişliğin 100 mm ve en küçük genişliğin ise 50 mm olduğu görülmektedir. Tüm çelik Z profillerin iç büküm yarıçapları aynı ve 3 mm olmasına rağmen, et kalınlıkları ise 1 mm ile 4 mm arasında değişmektedir. Kullanım yerine ve kullanım amacına göre küçük ve ince kesitli profillerin yanında büyük ve kalın kesitli profiller de üretilmektedir. Bu kesit ölçülerine bakıldığında, hafif çelik yapı tasarımı yapan mühendis ve tasarımcılara istenen kesit ölçülerine sahip profiller kolayca üretilip sunulmaktadır. Bu tezde daha kolay bir biçimde profillerin temel boyutlarını okuyabilmek amacıyla isimlendirme yapılırken, tüm profillerde belli bir uyum olması açısından aynı şekilde isimlendirme yapılmıştır. Tüm profil tablolarında ve tasarım esaslarında, Z A*B*C*t formatında olacak şekilde tekrar isimlendirilmiştir. Bu isimlendirmeye göre, A profil yüksekliğini, B başlık genişliğini, C dudak uzunluğunu ve t ise et kalınlığını ifade etmektedir. İç büküm yarıçapı tüm profillerde aynı olduğundan dolayı, isimlendirmeye dahil edilmemiştir. Tüm ölçüler milimetre cinsinden ifade edilmiştir. Örnek olarak, Z 300*88*26*4 olarak isimlendirilen profilde, 300 mm profil yüksekliği, 88 mm başlık genişliği, 26 mm dudak uzunluğu ve 4 mm et kalınlığıdır.

Tablo 4.1. Çelik Z Profillerin Boyutlarının ve Bazı Enkesit Özelliklerinin Bulunduğu Katalog Listesi [31]

Z Profil Kesiti

H	Yükseklik
A	Üst kenar yüksekliği
B	Alt kenar yüksekliği
C1	Üst tınak genişliği
C2	Alt tınak genişliği
T	Kalınlık



(mm)

H	100-400
A	50-100
B	50-100
C1	15-30
C2	15-30
T	1.00-4.00



Z Profil Teknik Detay Tablosu

Profil	H	A	B	C ₁	C ₂	T	Radius	~Açılım	Ağırlık	Alan	Kuvvetli Eksen (x-x)			Zayıf Eksen (y-y)			Ağırlık Merkezi	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kg/m	cm ²	I _x (cm ⁴)	S _x (cm ³)	r _x (cm)	I _y (cm ⁴)	S _y (cm ³)	r _y (cm)	e _x (cm)	e _y (cm)
Z400x100x27x4	400	100	100	27	27	4	3	625	19,81	24,99	5635,3	281,76	14,96	404,6	41,29	4,01	0	0
Z400x100x26x3,5	400	100	100	26	26	3,5	3	625	17,19	21,9	4949,47	247,47	14,98	354,55	36,09	4,01	0	0
Z400x100x24x3	400	100	100	24	24	3	3	625	14,72	18,75	4239,79	211,99	15	298,67	30,32	3,98	0	0
Z400x100x22x2,5	400	100	100	22	22	2,5	3	625	12,25	15,61	3530,39	176,52	15,01	244,42	24,75	3,95	0	0
Z400x100x21x2	400	100	100	21	21	2	3	625	9,82	12,51	2834,51	141,73	15,03	195,7	19,77	3,95	0	0
Z380x60x15x4	380	60	60	15	15	4	3	500	15,72	20,03	3576,51	188,24	13,3	74,23	12,8	1,92	0	0
Z380x58x15x3,5	380	58	58	15	15	3,5	3	500	13,73	17,49	3113,26	163,86	13,29	61,18	10,88	1,86	0	0
Z380x56x15x3	380	56	56	15	15	3	3	500	11,75	14,97	2654,54	139,71	13,27	49,32	9,05	1,81	0	0
Z380x55x15x2,5	380	55	55	15	15	2,5	3	500	9,82	12,51	2218,21	116,75	13,29	40,57	7,55	1,8	0	0
Z380x53x15x2	380	53	53	15	15	2	3	500	7,84	9,99	1765,17	92,9	13,27	30,46	5,86	1,74	0	0
Z360x70x15x4	360	70	70	15	15	4	3	500	15,72	20,03	3373,91	187,44	12,92	114,64	16,86	2,38	0	0
Z360x65x18x3,5	360	65	65	18	18	3,5	3	500	13,73	17,49	2927,86	162,66	12,89	91,99	14,54	2,28	0	0
Z360x65x17x3	360	65	65	17	17	3	3	500	11,8	15,03	2519,98	140	12,91	79	12,44	2,29	0	0
Z360x65x15x2,5	360	65	65	15	15	2,5	3	500	9,82	12,51	2095,04	116,39	12,91	63,99	10,04	2,26	0	0
Z360x60x18x2	360	60	60	18	18	2	3	500	7,84	9,99	1661,68	92,32	12,88	46,57	7,89	2,16	0	0
Z340x75x20x4	340	75	75	20	20	4	3	500	15,72	20,03	3134,92	184,41	12,45	159,53	21,85	2,81	0	0
Z340x75x18x3,5	340	75	75	18	18	3,5	3	500	13,73	17,49	2739,03	161,12	12,46	136,22	18,6	2,78	0	0
Z340x75x17x3	340	75	75	17	17	3	3	500	11,8	15,03	2357,82	138,7	12,48	116,88	15,9	2,78	0	0
Z340x70x20x2,5	340	70	70	20	20	2,5	3	500	9,82	12,51	1948,21	114,6	12,45	89,82	13,06	2,67	0	0
Z340x70x18x2	340	70	70	18	18	2	3	500	7,84	9,99	1556,33	91,55	12,46	70,17	10,17	2,65	0	0
Z320x85x20x4	320	85	85	20	20	4	3	500	15,72	20,03	2903,71	181,48	11,99	225,06	27,12	3,34	0	0
Z320x85x18x3,5	320	85	85	18	18	3,5	3	500	13,73	17,49	2538,36	158,65	12	192,45	23,12	3,3	0	0
Z320x80x22x3	320	80	80	22	22	3	3	500	11,8	15,03	2169,33	135,58	11,98	157,38	20,05	3,23	0	0
Z320x80x20x2,5	320	80	80	20	20	2,5	3	500	9,82	12,51	1806,62	112,91	11,99	128,4	16,3	3,2	0	0
Z320x80x18x2	320	80	80	18	18	2	3	500	7,84	9,99	1444	90,25	12	100,44	12,71	3,17	0	0
Z300x88x26x4	300	88	88	26	26	4	3	500	15,66	19,95	2617,14	174,48	11,4	281,54	32,74	3,74	0	0
Z300x88x25x3,5	300	88	88	25	25	3,5	3	500	13,73	17,49	2301,88	153,46	11,43	246,85	28,62	3,74	0	0
Z300x88x24x3	300	88	88	24	24	3	3	500	11,8	15,03	1983,18	132,21	11,45	212	24,51	3,74	0	0
Z300x88x22x2,5	300	88	88	22	22	2,5	3	500	9,82	12,51	1652,93	110,2	11,47	173,33	19,98	3,71	0	0
Z300x88x20x2	300	88	88	20	20	2	3	500	7,84	9,99	1322,23	88,15	11,49	135,91	15,62	3,68	0	0
Z300x88x19x1,5	300	88	88	19	19	1,5	3	500	5,9	7,51	996,52	66,43	11,51	102,04	11,7	3,68	0	0
Z280x65x17x4	280	65	65	17	17	4	3	414	13,02	16,59	1769,23	126,37	10,27	98,91	15,7	2,43	0	0
Z280x63x17x3,5	280	63	63	17	17	3,5	3	414	11,37	14,48	1540,23	110,02	10,26	81,95	13,38	2,37	0	0
Z280x62x17x3	280	62	62	17	17	3	3	414	9,77	12,45	1324,92	94,64	10,28	69,44	11,48	2,35	0	0
Z280x60x17x2,5	280	60	60	17	17	2,5	3	414	8,13	10,36	1098,41	78,46	10,27	54,7	9,31	2,29	0	0
Z280x59x17x2	280	59	59	17	17	2	3	414	6,52	8,31	881,86	62,99	10,28	43,24	7,46	2,28	0	0
Z260x75x17x4	260	75	75	17	17	4	3	414	13,02	16,59	1607,96	123,69	9,79	147,38	20,19	2,96	0	0
Z260x70x19x3	260	70	70	19	19	3	3	414	9,77	12,45	1200,54	92,35	9,78	102,1	14,9	2,85	0	0

Tablo 4.1. (Devamı)

Z260x70x17x2,5	260	70	70	17	17	2,5	3	414	8,13	10,36	999,97	76,92	9,8	82,97	12,07	2,82	0	0
Z260x70x15x2	260	70	70	15	15	2	3	414	6,49	8,27	799,29	61,48	9,81	84,62	9,37	2,79	0	0
Z260x65x19x1,5	260	65	65	19	19	1,5	3	414	4,88	6,22	597,06	45,93	9,79	45,71	7,11	2,71	0	0
Z240x73x21x4	240	73	73	21	21	4	3	400	12,52	15,95	1338,24	111,52	9,11	151,89	21,39	3,07	0	0
Z240x73x20x3,5	240	73	73	20	20	3,5	3	400	10,98	13,99	1178,52	98,21	9,13	133,18	18,69	3,07	0	0
Z240x70x21x3	240	70	70	21	21	3	3	400	9,4	11,97	1003,33	83,81	9,12	107,48	15,69	2,98	0	0
Z240x73x16x2,5	240	73	73	16	16	2,5	3	400	7,81	9,96	841,91	70,16	9,17	90,5	12,61	3,01	0	0
Z240x73x15x2	240	73	73	15	15	2	3	400	6,27	7,99	677,61	56,47	9,19	72,46	10,06	3,01	0	0
Z240x70x16x1,5	240	70	70	16	16	1,5	3	400	4,7	5,98	505,06	42,09	9,18	51,32	7,41	2,93	0	0
Z240x70x15x1,2	240	70	70	15	15	1,2	3	400	3,76	4,79	404,48	33,71	9,19	40,63	5,86	2,91	0	0
Z220x68x20x3	220	68	68	20	20	3	3	375	8,78	11,19	796,8	72,44	8,4	96,93	14,58	2,93	0	0
Z220x68x19x2,5	220	68	68	19	19	2,5	3	375	7,34	9,36	668,72	60,79	8,43	80,98	12,13	2,93	0	0
Z220x68x17x2	220	68	68	17	17	2	3	375	5,86	7,47	535,3	48,66	8,46	63,19	9,43	2,9	0	0
Z220x68x16x1,5	220	68	68	16	16	1,5	3	375	4,41	5,62	404,22	36,75	8,47	47,48	7,06	2,9	0	0
Z220x68x15x1,2	220	68	68	15	15	1,2	3	375	3,53	4,5	323,82	29,44	8,48	37,59	5,58	2,89	0	0
Z200x64x17x4	200	64	64	17	17	4	3	333	10,44	13,31	777,43	77,74	7,59	94,7	15,27	2,65	0	0
Z200x64x16x3,5	200	64	64	16	16	3,5	3	333	9,17	11,68	685,43	66,54	7,61	82,99	13,33	2,65	0	0
Z200x60x18x3	200	60	60	18	18	3	3	333	7,84	9,99	581,19	58,12	7,59	65,44	11,19	2,55	0	0
Z200x60x16x2,5	200	60	60	16	16	2,5	3	333	6,52	8,31	484,64	48,46	7,61	53,04	9,03	2,52	0	0
Z200x60x15x2	200	60	60	15	15	2	3	333	5,24	6,67	390,67	39,07	7,64	42,52	7,21	2,52	0	0
Z200x57x16x1,5	200	57	57	16	16	1,5	3	333	3,92	4,99	290,67	29,07	7,62	29,68	5,28	2,44	0	0
Z200x57x15x1,2	200	57	57	15	15	1,2	3	333	3,14	4	232,92	23,29	7,64	23,49	4,16	2,42	0	0
Z200x55x16x1	200	55	55	16	16	1	3	333	2,61	3,32	192,74	19,27	7,62	18,65	3,42	2,37	0	0
Z180x59x15x4	180	59	59	15	15	4	3	300	9,38	11,95	565,03	62,78	6,82	70,7	12,4	2,41	0	0
Z180x56x15x3	180	56	56	15	15	3	3	300	7,04	8,97	423,68	47,08	6,84	49,28	9,04	2,33	0	0
Z180x54x15x2,5	180	54	54	15	15	2,5	3	300	5,85	7,46	351,04	39	6,83	38,57	7,31	2,27	0	0
Z180x53x15x2	180	53	53	15	15	2	3	300	4,7	5,99	282,34	31,37	6,85	30,45	5,86	2,25	0	0
Z180x51x15x1,5	180	51	51	15	15	1,5	3	300	3,52	4,48	210,51	23,39	6,85	21,4	4,26	2,18	0	0
Z180x50x15x1,2	180	50	50	15	15	1,2	3	300	2,82	3,59	168,18	18,89	6,85	16,63	3,37	2,15	0	0
Z160x59x15x4	160	59	59	15	15	4	3	300	9,38	11,95	475,3	59,41	6,26	109,97	16,41	3,01	0	0
Z160x68x15x3,5	160	68	68	15	15	3,5	3	300	8,24	10,49	418,41	52,3	6,27	95,27	14,38	2,99	0	0
Z160x66x15x3	160	66	66	15	15	3	3	300	7,04	8,97	357,12	44,64	6,28	77,55	12,02	2,92	0	0
Z160x64x15x2,5	160	64	64	15	15	2,5	3	300	5,85	7,46	296,3	37,04	6,28	61,3	9,77	2,86	0	0
Z160x63x15x2	160	63	63	15	15	2	3	300	4,7	5,99	238,48	29,81	6,29	48,52	7,83	2,84	0	0
Z160x61x15x1,5	160	61	61	15	15	1,5	3	300	3,52	4,48	178,05	22,26	6,3	34,47	5,72	2,77	0	0
Z160x60x15x1,2	160	60	60	15	15	1,2	3	300	2,82	3,59	142,35	17,79	6,3	26,91	4,53	2,74	0	0
Z160x60x15x1	160	60	60	15	15	1	3	300	2,36	3	119,42	14,93	6,31	22,72	3,82	2,75	0	0
Z140x75x20x4	140	75	75	20	20	4	3	300	9,44	12,03	381,11	54,44	5,59	159,42	21,84	3,61	0	0
Z140x75x17x3	140	75	75	17	17	3	3	300	7,09	9,03	290,54	41,51	5,64	116,83	15,9	3,58	0	0
Z140x70x20x2,5	140	70	70	20	20	2,5	3	300	5,89	7,51	238,3	34,04	5,61	89,79	13,06	3,45	0	0
Z140x70x18x2	140	70	70	18	18	2	3	300	4,7	5,99	191,74	27,39	5,64	70,16	10,17	3,41	0	0
Z140x70x17x1,5	140	70	70	17	17	1,5	3	300	3,54	4,51	145,39	20,77	5,67	52,72	7,61	3,41	0	0
Z140x70x16x1,2	140	70	70	16	16	1,2	3	300	2,83	3,61	116,79	16,68	5,69	41,77	6,02	3,4	0	0
Z120x50x15x1,5	120	50	50	15	15	1,5	3	238	2,79	3,55	80,12	13,35	4,74	20,31	4,12	2,39	0	0
Z120x50x15x1,2	120	50	50	15	15	1,2	3	238	2,25	2,87	64,89	10,81	4,76	16,61	3,36	2,41	0	0
Z120x50x15x1	120	50	50	15	15	1,2	3	238	2,25	2,87	64,89	10,81	4,76	16,61	3,36	2,41	0	0
Z120x50x15x1	120	50	50	15	15	1	3	238	1,89	2,4	54,54	9,09	4,77	14,07	2,84	2,42	0	0
Z100x50x15x4	100	50	50	15	15	4	3	202	6,3	8,03	124,4	24,88	3,89	44,36	9,24	2,32	0	0
Z100x50x15x3,5	100	50	50	15	15	3,5	3	202	5,6	7,13	111,5	22,3	3,92	40,44	8,38	2,36	0	0
Z100x50x15x2,5	100	50	50	15	15	2,5	3	212	4,13	5,26	83,52	16,7	3,96	31,3	6,42	2,43	0	0
Z100x50x15x2	100	50	50	15	15	2	3	212	3,35	4,27	68,4	13,68	3,99	26,04	5,32	2,46	0	0
Z100x50x15x1,5	100	50	50	15	15	1,5	3	217	2,55	3,25	52,51	10,5	4,01	20,31	4,12	2,5	0	0
Z100x50x15x1,2	100	50	50	15	15	1,2	3	217	2,06	2,63	42,58	8,52	4,03	16,61	3,36	2,51	0	0
Profil	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kg/m	cm ²	I _x (cm ⁴)	S _x (cm ³)	r _x (cm)	I _y (cm ⁴)	S _y (cm ³)	r _y (cm)	e _x (cm)	e _y (cm)

4.1.1. Soğuk şekillendirilmiş elemanların tasarımı için kullanılan standartlar ve kesit özelliklerinin sınır şartları

Hafif çelik yapılarla ilgili ilk çalışmalar, 1939-1946 arasında Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI) tarafından Prof. George Winter önderliğinde yapıldı ve AISI – 1946 adı altında ilk yönetmelik ASD tasarım yöntemi olarak ortaya çıkarıldı. İlerleyen süreçlerde ise AISI - ASD standardı 1956, 1960, 1962, 1968, 1980 ve 1986 yıllarında güncellemeler yapılarak, 1991 yılında LRFD tasarım yöntemi eklendi ve AISI – 1996 yönetmeliğiyle birlikte iki tasarım yöntemi (ASD ve LRFD) tek standartta birleştirilmiş oldu. Bu yönetmelik daha sonra, 2001 yılında Kanada, Meksika ve ABD’yi kapsayarak birleştirildi ve Kuzey Amerika Standardı olarak (North American Specification NAS 2001 ve AISI-2001) yayınlandı. Kuzey Amerika yönetmeliği 2007, 2010, 2015, 2016, 2018 ve 2020 yıllarında güncellenerek tekrar yayınlandı. Sürekli güncelliği korunduğu için günümüzde en çok tercih edilen yönetmeliktir. Ülkemizde yayınlanan ilk yönetmelik ise 1994 yılında TS 11372 standardıdır. Güncelliğini koruyamayan bu standart 2014 yılında iptal edilerek, hafif çelik yapıların tasarım esaslarının yer aldığı TS EN 1993-1-3 adı altında Avrupa standardı kabul edilmiştir.



Şekil 4.2. Kuzey Amerika, TS 11372 ve TS EN 1993-1-3 Yönetmelikleri

Hafif çelik elemanlar, soğuk şekillendirilmiş çelik olarak da ifade edilen bu elemanlar İngilizce “Cold Formed Steel” teriminin baş harfleri alınarak oluşturulan CFS kısaltması ile tabir edilebilir ve bu ifade sıkça karşılaşılan bir ifadedir. Soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının ülkemizde kullanılmaya başlanması 1930’lu yıllara denk gelmesine rağmen, birçok alanda kullanımının yaygınlaşması, 1999’da Kocaeli ilinin Gölcük ilçesi merkezli meydana gelen Marmara depreminin ardından

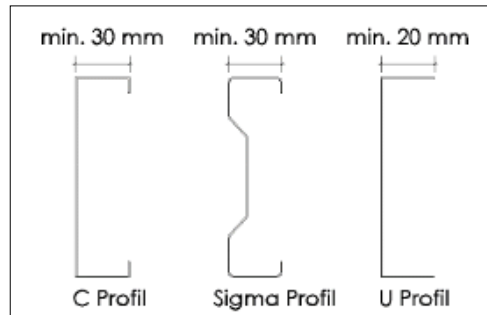
olmuştur. Gerçekleşen bu büyük depremten sonra, mevcut taşıyıcı sistemlere alternatif olabilecek, daha hafif, dayanıklı ve deprem davranışına karşı daha uygun çözümler sunan, soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının taşıyıcı sistem olarak kullanıldığı hafif çelik yapılar ön plana çıkmıştır. Ancak, ülkemizde hafif çelik yapıların kullanımı, başta ABD olmak üzere İngiltere, Kanada ve Japonya da olduğu kadar yaygın kullanılamamış ve sınırlı düzeyde kalmıştır.

Türkiye de, soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının tasarımıyla ve hesap kurallarıyla ilgili resmi olarak yayınlanan ilk standart, TS 11372 “Çelik Yapılar-Hafif-Soğukta Şekil Verilmiş Profillerle Oluşturulan-Hesap Kuralları” ismiyle 1994 yılında yayınlanmıştır. Bu standardın kapsamı şu şekilde ifade edilebilir; levha formundaki yapı çeliğinin soğukta şekillendirilme yöntemiyle elde edilen ince cidarlı elemanların, genelde darbeli yüklere maruz kalmayan taşıyıcı sistemlerin, taşıyıcı elemanı olarak kullanılmaları için boyutlandırılmasına ait bükme iç yarıçapları sınırları içinde kullanılabilen, elastik teoriye dayalı hesap kurallarını kapsamaktadır. Ancak, yayınlandığı tarihten itibaren günümüze kadar hiçbir güncellemenin yapılmamış olması nedeniyle, 18 Haziran 2014 tarihinde yayından kaldırılmıştır. Soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının hesap kurallarıyla ilgili ilk yayınlanan standardın iptal edildiği tarihten sonra, bu konuyla ilgili tasarım esaslarını içeren en güncel yönetmelik 2019 yılında resmi olarak yürürlüğe giren TBDY 2019 “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği” yönetmeliğidir. Bu yönetmeliğin 10. bölümünde, deprem etkisi altında hafif çelik bina taşıyıcı sistemlerinin tasarımı için özel kurallar yer almaktadır. Diğer yandan TSE’nin de kabul ettiği Avrupa yönetmeliği ve yardımcı kaynak olarak kullanımına izin verilen Kuzey Amerika yönetmeliği de kullanılabilir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde, bölüm 10.2.3’te soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının tanımı şu şekilde yapılmıştır. Soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanları, et kalınlıkları 0.45 mm ile 16 mm arasında değişen çelik yassı elemanların soğuk şekillendirme yöntemleriyle elde edilen yapı malzemesi olarak ifade edilmektedir. Aynı kısmın devamında ise, minimum malzeme özellikleri şöyle ifade edilmiştir. Minimum akma gerilmesi 235 MPa olacaktır. Kopma dayanımının akma

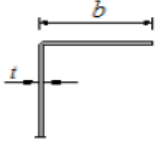
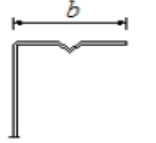
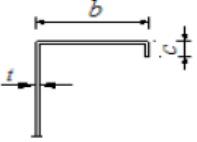
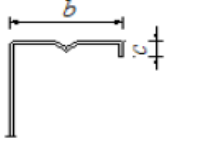
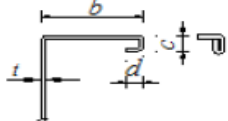
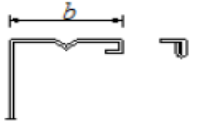
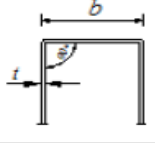
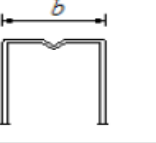
gerilmesine oranı en az 1.08 olacaktır. Kopma birim uzama oranı minimum % 10 olan malzemeler normal sünek malzeme, kopma birim uzama oranı minimum %16 olan malzemeler yüksek sünek malzeme olarak adlandırılırlar. Normal sünek malzemeler sadece aşıklar, cephe kuşakları ve taşıyıcı olmayan elemanlarda kullanılabilirler. Kopma dayanımı 550 MPa ve üzerinde olan malzemelerde deneylerle kontrol edilecektir [23].

TBDY 2019 yönetmeliğinde bölüm 10.2.4.1.'de, soğuk şekillendirilmiş çelik profillerden oluşan elemanlarda sağlanması gereken enkesit koşulları belirtilmiştir. Başlık genişliği/başlık et kalınlığı, gövde yüksekliği/gövde et kalınlığı ve kenar berkitmesi uzunluğu/kenar berkitmesi et kalınlığı oranlarına ilişkin sınır değerler Tablo 4.2.'de verilmiştir. Diğer yandan, kenar berkitmelerinin uzunluğu, etkin katkısının sağlanması için sınırlandırılmış ve yönetmelikte bölüm 10.2.4.2.'de koşulları verilmiştir. Profillerin içi büküm yarıçaplarıyla ilgili ise yarıçap değerlerinin, et kalınlığının 5 katından ve başlık genişliğinin 0.1 katından daha küçük olması durumunda, bu değerlerin enkesit özelliklerine katkısının ihmal edilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Yönetmeliğin bölüm 10.2.4.7.'de yer alan ifadede, soğuk şekillendirilmiş çelik profillerden bazılarının başlık genişlikleri için sınır değerler verilmiştir. Bu profiller, C,U ve Σ (sigma) kesitlerdir. Minimum değerler Şekil 4.3.'de verilmiştir [23].



Şekil 4.3. TBDY 2019'da Şekil 10. 3. De Verilen Minimum Başlık Genişlikleri [23]

Tablo 4.2. TBDY 2019'da Şekil 10. 3. De Verilen Minimum Başlık Genişlikleri [23]

ENKESİT ÖZELLİKLERİ		Sınır Değerler
		$b/t < 50$
		$b/t < 60$ $c/t < 50$
		$b/t < 90$ $c/t < 60$ $d/t < 50$
		$b/t < 500$
		$h_i/t < 500 \cdot \sin(\phi)$ $45 < \phi < 90$

Soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarından oluşan hafif çelik yapıların tasarımında seçilecek hesap yöntemleri ve yük bileşimleri, deprem yönetmeliğinin 10.2.5. bölümünde yer almaktadır. İnşa edilen hafif çelik bir yapının dayanıklılığının, stabilitesinin ve rijitliğinin, işletme ömrü boyunca güvenle sürdüreceği düzeyde olması istenmektedir. Hafif çelik yapıların tasarım ve boyutlandırılmasında, 2018 yılında güncellenen “Çelik Yapıların Tasarım, Hesap Ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik” (ÇYTHY 2018) te ifade edilen (YDKT) Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım veya (GKT) Güvenlik Katsayıları ile Tasarım yöntemlerinden birinin seçilerek kullanılması istenmiştir. Ancak, temellerin boyutlandırılmasında sadece YDKT yönteminin kullanılması ifade edilmiştir.

TBDY 2019 deprem yönetmeliğinde hafif çelik yapıların depremli durumda tasarlanabilmesi için izin verilen bina yükseklik sınıfları ve taşıyıcı sistem davranış katsayıları tablo olarak bölüm 4.'te sunulmuştur. Bu yapılara etkiyecek deprem hesabı yapılırken bu tabloya dikkat edilmesi gerekmektedir. Süneklik düzeyi yüksek olarak tasarlanacak hafif çelik bir yapıda izin verilen bina yükseklik sınıfı 8 ve taşıyıcı sistem

davranış katsayısı ise 4 olarak alınması gerektiği ifade edilmiştir. Yönetmelikte yer alan Tablo 3.2.’de verilen deprem tasarım sınıfları dikkate alınarak, hafif çelik yapılarda maksimum bina yükseklikleri yine yönetmelikte bulunan Tablo 3.3.’e göre, 7 m veya 10.5 m olarak seçilebilmektedir. Süneklik düzeyi sınırlı olarak tasarlanacak hafif çelik bir yapıda izin verilen bina yükseklik sınıfı 8 ve taşıyıcı sistem davranış katsayısı ise 3 olarak alınması gerektiği ifade edilmiştir. Bu koşullar dikkate alınarak yapılacak hafif çelik binalarda kat adetleri bina yükseklik sınıfları baz alındığında, deprem etkisi büyük olan yapılarda 2 kat ve deprem etkisi daha az olan yapılarda ise 2 kat olduğu söylenebilir.

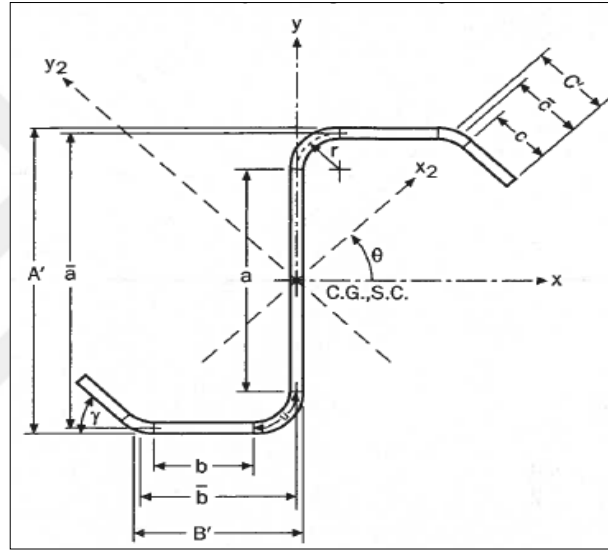
4.2. Enkesit Özelliklerinin Hesaplanması İçin Farklı Yöntemler

Bu tez kapsamında incelenen soğuk şekillendirilmiş çelik Z profillerin enkesit özellikleri dört farklı tip yöntemle hesaplanmıştır. Dört farklı şekilde hesaplanan enkesit değerleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Birinci olarak, Amerikan Demir Çelik Enstitüsünün (AISI) yayınladığı, “Soğuk şekillendirilmiş Çelik Elemanların Tasarımı” klavuzunda belirtilen hesap kuralları kullanılmıştır. Bu klavuzda, AISI S100-16 standardında belirtilen şartlara uygun olacak şekilde tasarım örnekleri verilmiştir. Bu tezde bu klavuzdan yararlanılmıştır. İkinci yöntem olarak ise, ince cidarlı çelik yapı elemanlarının tasarımında yaygın şekilde kullanılan “çizgisel yöntem” (linear method) kullanılarak hesaplar yapılmıştır. Lineer metod hesap yönteminde, köşelerin atalet momentleri ihmal edilmiştir. Üçüncü yöntem olarak, köşelerdeki eğriliklerin dikkate alınmadığı “yaklaşık çizgisel yöntem” kullanılarak profillerin enkesit özellikleri hesaplanmıştır. Profillerin üç yöntemle de bulunan enkesit özellikleri ayrı ayrı tablolar halinde sunulmuştur.

4.2.1. Yöntem 1

Yöntem 1’de kullanılan hesap kuralları, AISI’nın yayınladığı, “Soğuk şekillendirilmiş Çelik Elemanların Tasarımı” klavuzundan alınmıştır. Bu klavuzda bölüm 3.3.4.’te verilen formüller aynen kullanılarak hesaplar yapılmıştır. Hesaplarda kullanılan, Z profil için verilen simgeler Şekil 4.4.’de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere, A’

ifadesi profilin dıştan dışa yüksekliğini, B' ifadesi profilin dıştan dışa genişliğini ve C' ifadesi ise profilin başlığının dış kısmından dudağın ucuna kadar olan mesafe olacak şekilde dudak uzunluğunu göstermektedir. Şekilde gösterilen ve formüllerde de ifade edilen “ γ ” açısı, bu tezde incelenen tüm profilleride 90° dir. Diğer bir deyişle, profillerin dudakları, y eksenine paralel bulunmaktadır. Şekil 4.4.’de görülen diğer simgelerden olan $\bar{a}$, $\bar{b}$ ve $\bar{c}$ simgeleri, levha kalınlığının ortasından çizilen çizgiler referans alınarak oluşturulan enkesit boyutlarını ifade eder ve bunlar sırasıyla profil yüksekliğini, başlık genişliğini ve dudak uzunluğunu göstermektedir. Bu yöntemle de, kare-köşe kabulüyle enkesit boyutlarının gösterimi denilmektedir.



Şekil 4.4. Yöntem 1’de Kullanılan Simgeler [21]

Şekilde görülen ve kesit boyutlarını ifade eden üçüncü gösterim yöntemi ise şöyledir. Levha kalınlığının ortasından çizilen çizgilerin iç büküm yarıçaplarını ihmal ettiğimiz düz kısımlarının uzunluğu olarak ifade edilebilir. Bu şekilde gösterilen kesite “çizgisel kesit” ve bu metoda ise yuvarlak-köşe kabulüyle kesit boyutlarının gösterimi denilmektedir. Boyutları ifade eden simgeler, a , b ve c harfleriyle gösterilmektedir. Ayrıca, Z profilin Kayma Merkezi (KM) ve Geometrik Merkezi (GM) de gösterilmiştir. Şekilde C.G. ve S.C. diye sırasıyla (GM) ve (KM) olarak ifade edilen merkezler, profilin orta noktasında çakışmaktadır. Kayma merkezi ve geometrik merkezi bu şekilde orta noktada çakışan profillere, nokta simetrik profiller de denilmektedir. Son olarak, t et kalınlığını, r merkezi çizginin iç büküm yarıçapını, u

çizgisel kesitte düz uzunlukların sınır noktaları arasında kalan mesafeyi ve x , y ise asal eksenleri ifade etmektedir. x_2 ve y_2 , profilin simetrik eksenlerini ve Θ açısı ise bu eksenlerin asal eksenle yaptığı açığı göstermektedir.

AISI'nın yayınladığı Soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların tasarımı kılavuzunda verilen hesaplarda kullanılan boyutların dıştan dışa olduğu ve yuvarlak köşe kabulüyle çizgisel kesitin düz boyutlarının kullanıldığı görülmüştür. Çizgisel kesitin düz kısımlarının dikkate alındığı hesap esaslarında, çarpılma sabiti (C_w) hesabı hariç diğer enkesit özelliklerinin hesaplanmasında kullanıldığı görülmektedir. Çarpılma sabiti hesabında ise kare köşe kabulüyle bulunan enkesit boyutları kullanılmıştır.

Soğuk şekillendirilmiş Z profiller için, AISI'nın yayınladığı tasarım kılavuzunda enkesit özelliklerinin hesaplarıyla ilgili formüller aşağıda sırasıyla sunulmuştur.

- Yuvarlak Köşe Kabulüyle Elde Edilen Çizgisel Enkesitin Boyutları;

$$a = A' - (2r + t)$$

$$b = B' - \left[r + \frac{t}{2} + \alpha \left(r + \frac{t}{2} \right) \tan \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right]$$

$$c = \alpha \left[C' - \left(r + \frac{t}{2} \right) \tan \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right]$$

$$u_1 = \frac{\pi r}{2} = 1.57$$

$$u_2 = \gamma r (\gamma \text{ radyan})$$

- Kare Köşe Kabulüyle Elde Edilen Çizgisel Enkesitin Boyutları;

$$\bar{a} = A' - t,$$

$$\bar{b} = B' - \left[\frac{t}{2} + \left(\frac{\alpha t}{2} \right) \tan \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right]$$

$$\bar{c} = \alpha \left[C' - \left(\frac{t}{2} \right) \tan \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right]$$

- Profilin Enkesit Alanını Ve Birim Boy Kütlesini Veren Formüller;

$$\text{Alan} = t[a + 2b + 2u_1 + \alpha(2c + 2u_2)]$$

$$G = \rho(\text{Alan})$$

- GM ‘den Geçen Asal Eksenlere Göre Atalet Momentleri;

$$I_x = 2t \left[0.0417a^3 + b \left(\frac{a}{2} + r \right)^2 + u_1 \left(\frac{a}{2} + 0.637r \right)^2 + 0.149r^3 + \alpha \left[\left(\frac{\gamma + \sin \gamma \cos \gamma}{2} - \frac{\sin^2 \gamma}{\gamma} \right) r^3 + u_2 \left(\frac{a}{2} + \frac{r \sin \gamma}{\gamma} \right)^2 + \frac{c^3 \sin^2 \gamma}{12} + c \left(\frac{a}{2} + r \cos \gamma - \frac{c}{2 \sin \gamma} \right)^2 \right] \right]$$

$$I_y = 2t \left[b \left(\frac{b}{2} + r \right)^2 + \frac{b^3}{12} + 0.356r^3 + \alpha \left[c(b + r(1 + \sin \gamma) + c/2 \cos \gamma)^2 + \frac{c^3 \cos^2 \gamma}{12} + u_2 \left(b + r + \frac{r(1 - \cos \gamma)}{\gamma} \right)^2 + \left[\frac{\gamma - \sin \gamma \cos \gamma}{2} - \frac{(1 - \cos \gamma)^2}{\gamma} \right] r^3 \right] \right]$$

- Burulma Sabiti Ve Çarpılma Sabiti;

$$J = \frac{t^3}{3} [a + 2b + 2u_1 + \alpha(2c + 2u_2)]$$

$$C_w = t/12 [\bar{a}^2 \bar{b}^3 (2a + b) + \alpha [b^2 (4c^4 + 16bc^3 + 6a^3c + 4a^2bc + 8ac^3) + 6abc^2(a + b)(2b \sin \gamma + a \cos \gamma) + 4abc^3(2a + 4b + c) \sin \gamma \cos \gamma + c^3(2a^3 + 4a^2b - 8ab^2 + a^2c - 16b^3 - 4b^2c) \cos^2 \gamma] / (a + 2(b + \alpha c))]$$

Tipik bir Z profil kesiti verilen Şekil 4.1.’de bakıldığında, tasarım kılavuzunda Şekil 4.2.’de verilen bazı simgelerle uyuşmadığı görülmektedir. Ancak bunlar kolaylıkla birbirlerine basit bağıntılarla dönüşebilmektedir.

$$B = B', \quad A = A', \quad C = C', \quad R = r - t/2, \quad \gamma = 90^\circ$$

Yukarıda gösterilen enkesit özelliklerinin hesaplarına ilave olarak, “Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Elemanların Tasarımı” kılavuzunda bölüm 3.4.’te çarpılmalı

$$I_f = \left(\frac{1}{3}\right)bt^3 + \left(\frac{1}{3}\right)dt^3$$

$$I_{xf} = \frac{t(t^2b^2 + 4bd^3 + t^2bd + d^4)}{12(b + d)}$$

$$I_{yf} = \frac{t(b^4 + 4db^3)}{12(b + d)}$$

$$x_{of} = \frac{b^2}{2(b + d)}$$

$$h_{xf} = \frac{-(b^2 + 2db)}{2(b + d)},$$

$$h_{yf} = y_{of} = \frac{-d^2}{2(b + d)}$$

Bu çalışmada incelenen çelik elemanların enkesit özellikleri (Alan, I_x , I_y , J , C_w) Yöntem 1'de belirtilen formüller kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.3.'te sunulmuştur. Ayrıca, sunulan temel enkesit özelliklerine ek olarak tasarımcıya kolaylık sunması açısından çelik Z profillere ait, mukavemet momentleri (W_x , W_y) ve atalet yarıçapları da (i_x , i_y) Tablo 4.3.'te sunulmuştur. İlgili değerlere ait formüller şöyledir.

$$W_x = 2I_x / A, \quad W_y = I_y / B, \quad i_x = \sqrt{I_x / \text{Alan}}, \quad i_y = \sqrt{I_y / \text{Alan}}$$

Mukavemet momentlerinin hesaplarında, dıştan dışta enkesit boyutları kullanılmıştır. Profillerin birim ağırlıkları hesaplanırken $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ olarak alınmıştır. Profillerin Yöntem 1'e göre hesaplanan enkesit özellikleri Tablo 4.3.'te sunulmasına rağmen örnek bir profil seçilerek daha anlaşılır olması için açık hesap yapılmıştır.

Örnek olarak seçilen profil, Z 300*88*26*4 profilidir. Hesap adımları sırasıyla aşağıda sunulmuştur.

- Temel enkesit boyutları;

$$A' = 300 \text{ mm} \quad B' = 88 \text{ mm} \quad C' = 26 \text{ mm} \quad t = 4 \text{ mm} \quad R = 3 \text{ mm} \quad \alpha = 1$$

- Yuvarlak köşe kabulüyle çizgisel enkesit boyutlarının hesabı;

$$r = R + t/2 = 3 + 4/2 = 5 \text{ mm} \quad \gamma = 90\pi/180 = 1.57 \text{ radyan}$$

$$a = A' - (2r + t) = 300 - (2 \cdot 5 + 4) = 286 \text{ mm}$$

$$b = B' - \left[r + \frac{t}{2} + \alpha \left(r + \frac{t}{2} \right) \tan \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right] = 88 - (5 + 4/2 + 1(5 + 4/2) \tan(90/2)) = 74 \text{ mm}$$

$$c = \alpha \left[C' - \left(r + \frac{t}{2} \right) \tan \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right] = 1(26 - (5 + 4/2) \tan(45)) = 19 \text{ mm}$$

$$u_1 = \frac{\pi r}{2} = \pi \cdot 5/2 = 7.85 \text{ mm} \quad u_2 = \gamma r = 1.57 \cdot 5 = 7.85 \text{ rad (}\gamma \text{ radyan)}$$

- Kare köşe kabulüyle çizgisel enkesitin boyutlarının hesabı;

$$\bar{a} = 300 - 4 = 296 \text{ mm} \quad \bar{b} = 88 - \left[\frac{4}{2} + \left(\frac{1 \cdot 4}{2} \right) \tan \left(\frac{90}{2} \right) \right] = 84 \text{ mm}$$

$$\bar{c} = 1 \left[26 - \left(\frac{4}{2} \right) \tan \left(\frac{90}{2} \right) \right] = 24 \text{ mm}$$

- Enkesit Alanı;

$$\text{Alan} = t[a + 2b + 2u_1 + \alpha(2c + 2u_2)] = 4(286 + 2 \cdot 74 + 2 \cdot 7.85 + 1(2 \cdot 19 + 2 \cdot 7.85)) = 2013.60 \text{ mm}^2$$

- Birim Boy Kütlesi;

$$G = \rho(\text{Alan}) = 7850 \cdot 2013.60 \cdot 10^{-6} = 15.807 \text{ kg/m}$$

- x asal eksenine göre atalet momenti hesabı;

$$I_x = 2 \cdot 4 \left[0.0417(286)^3 + 74 \left(\frac{286}{2} + 5 \right)^2 + 7.85 \left(\frac{286}{2} + 0.637(5) \right)^2 + 0.149(5)^3 + \alpha \left[\left(\frac{1.57 + \sin 90 \cos 90}{2} - \frac{\sin^2 90}{1.57} \right) 5^3 + 7.85 \left(\frac{286}{2} + \frac{5 \sin 90}{1.57} \right)^2 + \frac{19^3 \sin^2 90}{12} + 19 \left(\frac{286}{2} + 5 \cos 90 - \frac{19}{2 \sin 90} \right)^2 \right] \right] = 26170549.377 \text{ mm}^4$$

- y asal eksenine göre atalet momenti hesabı;

$$I_y = 2 * 4 \left[74 \left(\frac{74}{2} + 5 \right)^2 + \frac{74^3}{12} + 0.356(5)^3 + 1 \left[19(74 + 5(1 + \sin 90)) + 19/2 \cos 90 \right)^2 + \frac{19^3 \cos^2 90}{12} + 7.85 \left(74 + 5 + \frac{5(1 - \cos 90)}{1.57} \right)^2 + \left[\frac{1.57 - \sin 90 \cos 90}{2} - \frac{(1 - \cos 90)^2}{1.57} \right] 5^3 \right] = 2811824.327 \text{ mm}^4$$

- x ve y eksenlerine göre atalet yarıçapları hesabı;

$$i_x = \sqrt{I_x / \text{Alan}} = \sqrt{26170549.377 / 2013.6} = 114.002 \text{ mm}$$

$$i_y = \sqrt{I_y / \text{Alan}} = \sqrt{2811824.327 / 2013.6} = 37.368 \text{ mm}$$

- x ve y eksenlerine göre mukavemet momentleri hesabı;

$$W_x = 2I_x / A' = 2(26170549.377) / 300 = 174470.329 \text{ mm}^3$$

$$W_y = I_y / B' = 2811824.327 / 88 = 31952.549 \text{ mm}^3$$

- Burulma sabiti ve Çarpılma sabiti hesabı;

$$J = \frac{t^3}{3} [a + 2b + 2u_1 + \alpha(2c + 2u_2)] = \frac{4^3}{3} [286 + 2(88) + 2(7.85) + 1(2(19) + 2(7.85))] = 10739.540 \text{ mm}^4$$

$$C_w = 4/12 [296^2 84^3 (2 * 296 + 84) + 1[84^2 (4 * 24^4 + 16 * 84 * 24^3 + 6 * 296^3 * 24 + 4 * 296^2 84 * 24 + 8 * 296 * 24^3) + 6 * 296 * 84 * 24^2 (296 + 84) (2 * 84 \sin 90 + 296 \cos 90) + 4 * 296 * 84 * 24^3 (2 * 296 + 4 * 84 + 24) \sin 90 \cos 90 + 24^3 (2 * 296^3 + 4 * 296^2 * 84 - 8 * 296 * 84^2 + 296^2 * 24 - 16 * 84^3 - 4 * 84^2 24) \cos^2 90] / (296 + 2(84 + 1 * 24))] = 47069263584 \text{ mm}^6$$

Elde edilmiştir.

- Çarpımlı burulma için verilen enkesit özelliklerinin hesabı;

Temel parametreler;

$$b = B' - t = 88 - 4 = 84 \text{ mm} \quad d = C' - t/2 = 26 - 4/2 = 24 \text{ mm}$$

Flanş kesiti için verilen enkesit boyutları;

$$A_f = (b+d)t = (84+24)4 = 432 \text{ mm}^2 \quad C_{wf} = 0$$

$$I_f = \left(\frac{1}{3}\right)bt^3 + \left(\frac{1}{3}\right)dt^3 = \left(\frac{1}{3}\right)84 * 4^3 + \left(\frac{1}{3}\right)24 * 4^3 = 2304 \text{ mm}^4$$

$$I_{xf} = \frac{t(b^2b^2+4bd^3+t^2bd+d^4)}{12(b+d)} = \frac{4(4^284^2+4*84*24^3+4^2*84*24+24^4)}{12(84+24)} = 15808 \text{ mm}^4$$

$$I_{yf} = \frac{t(b^4+4db^3)}{12(b+d)} = \frac{4(84^4+4*24*84^3)}{12(84+24)} = 329280 \text{ mm}^4$$

$$I_{xyf} = \frac{t(b^2d^2)}{4(b+d)} = \frac{4(84^224^2)}{4(84+24)} = 37632 \text{ mm}^4$$

$$x_{of} = \frac{b^2}{2(b+d)} = \frac{84^2}{2(84+24)} = 32.667 \text{ mm}$$

$$h_{xf} = \frac{-(b^2+2db)}{2(b+d)} = \frac{-(84^2+2*84*24)}{2(84+24)} = -51.333 \text{ mm}$$

$$h_{yf} = y_{of} = \frac{-d^2}{2(b+d)} = \frac{-24^2}{2(84+24)} = -2.667 \text{ mm}$$

Elde edilmiştir.

Tablo 4.3. Z Profillerin Yöntem 1'e Göre Hesaplanan Enkesit Değerleri

PROFİL ADI	G	Alan	I _x	W _x	i _x	I _y	W _y	i _y	J	C _w
	kg/m	mm ²	mm ⁴ (x10 ⁶)	mm ³ (x10 ³)	mm	mm ⁴ (x10 ⁶)	mm ³ (x10 ³)	mm	mm ⁴ (x10 ³)	mm ⁶ (x10 ⁹)
Z 100*50*15*1,2	2.06	262.82	0.43	8.52	40.26	0.17	3.32	25.15	0.13	0.28
Z 100*50*15*1,5	2.56	326.34	0.53	10.50	40.11	0.20	4.06	24.94	0.24	0.35
Z 100*50*15*2	3.38	430.27	0.68	13.68	39.87	0.26	5.20	24.59	0.57	0.44
Z 100*50*15*2,5	4.17	531.76	0.83	16.69	39.62	0.31	6.25	24.24	1.11	0.53
Z 100*50*15*3,5	5.71	727.46	1.11	22.27	39.12	0.40	8.07	23.55	2.97	0.67
Z 100*50*15*4	6.45	821.66	1.24	24.84	38.88	0.44	8.84	23.19	4.38	0.74
Z 120*50*15*1	1.88	239.99	0.55	9.09	47.67	0.14	2.81	24.21	0.08	0.36
Z 120*50*15*1,2	2.25	286.82	0.65	10.82	47.57	0.17	3.32	24.07	0.14	0.42
Z 120*50*15*1,5	2.80	356.34	0.80	13.35	47.42	0.20	4.06	23.87	0.27	0.52
Z 140*70*16*1,2	2.84	361.22	1.17	16.69	56.86	0.42	5.97	34.00	0.17	1.35
Z 140*70*17*1,5	3.55	452.34	1.45	20.77	56.69	0.53	7.53	34.14	0.34	1.71
Z 140*70*18*2	4.73	602.27	1.92	27.39	56.42	0.70	10.02	34.12	0.80	2.28
Z 140*70*20*2,5	5.94	756.76	2.38	34.04	56.11	0.90	12.82	34.43	1.58	2.94

Tablo 4.3. (Devamı)

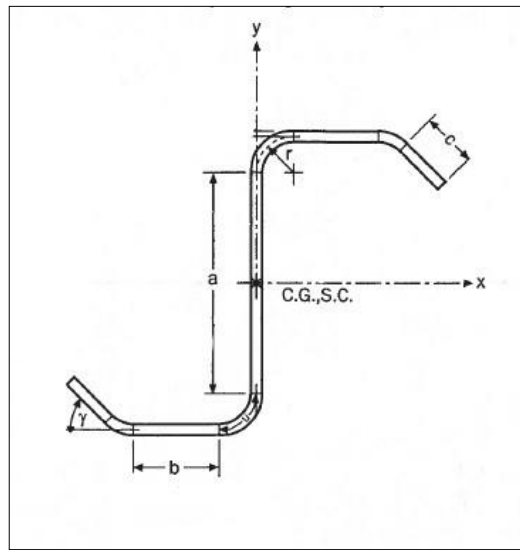
Z 140*75*17*3	7.17	912.82	2.90	41.49	56.41	1.17	15.56	35.76	2.74	3.66
Z 140*75*20*4	9.59	1221.66	3.81	54.40	55.83	1.59	21.22	36.10	6.52	5.03
Z 160*60*15*1	2.35	299.99	1.19	14.93	63.10	0.23	3.79	27.52	0.10	1.04
Z 160*61*15*1,2	2.82	358.82	1.42	17.80	62.99	0.27	4.48	27.38	0.17	1.23
Z 160*61*15*1,5	3.53	449.34	1.78	22.26	62.95	0.34	5.65	27.69	0.34	1.56
Z 160*63*15*2	4.73	602.27	2.38	29.81	62.93	0.48	7.70	28.38	0.80	2.17
Z 160*64*15*2,5	5.90	751.76	2.96	37.03	62.78	0.61	9.57	28.54	1.57	2.72
Z 160*66*15*3	7.12	906.82	3.57	44.63	62.75	0.77	11.74	29.23	2.72	3.41
Z 160*68*15*3,5	8.35	1063.46	4.18	52.28	62.71	0.95	13.99	29.91	4.34	4.13
Z 160*69*15*4	9.53	1213.66	4.75	59.37	62.56	1.10	15.90	30.07	6.47	4.74
Z 180*50*15*1,2	2.82	358.82	1.68	18.69	68.47	0.17	3.32	21.52	0.17	1.03
Z 180*51*15*1,5	3.53	449.34	2.11	23.39	68.45	0.21	4.19	21.82	0.34	1.32
Z 180*53*15*2	4.73	602.27	2.82	31.37	68.47	0.30	5.74	22.47	0.80	1.86
Z 180*54*15*2,5	5.90	751.76	3.51	39.00	68.33	0.39	7.13	22.64	1.57	2.35
Z 180*56*15*3	7.12	906.82	4.24	47.07	68.35	0.49	8.78	23.29	2.72	2.97
Z 180*59*15*4	9.53	1213.66	5.65	62.75	68.21	0.70	11.95	24.10	6.47	4.18
Z 200*55*16*1	2.61	331.99	1.93	19.28	76.20	0.19	3.39	23.70	0.11	1.43
Z 200*57*15*1,2	3.14	399.62	2.33	23.30	76.35	0.23	4.12	24.24	0.19	1.78
Z 200*57*16*1,5	3.93	500.34	2.91	29.07	76.23	0.30	5.20	24.35	0.38	2.25
Z 200*60*15*2	5.26	670.27	3.91	39.07	76.35	0.42	7.08	25.18	0.89	3.18
Z 200*60*16*2,5	6.57	836.76	4.85	48.46	76.10	0.53	8.83	25.16	1.74	3.97
Z 200*60*18*3	7.92	1008.82	5.81	58.11	75.90	0.65	10.89	25.45	3.03	4.90
Z 200*64*16*3,5	9.28	1182.46	6.85	68.53	76.13	0.83	12.94	26.47	4.83	6.08
Z 200*64*17*4	10.59	1349.66	7.77	77.71	75.88	0.94	14.76	26.45	7.20	6.94
Z 220*68*15*1,2	3.53	450.02	3.24	29.44	84.84	0.38	5.53	28.90	0.22	3.36
Z 220*68*16*1,5	4.42	563.34	4.04	36.75	84.71	0.47	6.98	29.03	0.42	4.24
Z 220*68*17*2	5.89	750.27	5.35	48.67	84.47	0.63	9.29	29.01	1.00	5.65
Z 220*68*19*2,5	7.39	941.76	6.69	60.79	84.27	0.81	11.90	29.31	1.96	7.25
Z 220*68*20*3	8.86	1128.82	7.97	72.43	84.01	0.97	14.24	29.29	3.39	8.68
Z 240*70*15*1,2	3,76	478,82	4,05	33,71	91,92	0,41	5,80	29,13	0,23	4,37
Z 240*70*16*1,5	4,70	599,34	5,05	42,10	91,81	0,51	7,33	29,26	0,45	5,52
Z 240*73*15*2	6,30	802,27	6,78	56,47	91,91	0,72	9,92	30,05	1,07	7,70
Z 240*73*16*2,5	7,86	1001,76	8,42	70,16	91,68	0,90	12,39	30,05	2,09	9,62
Z 240*70*21*3	9,47	1206,82	10,03	83,61	91,18	1,07	15,34	29,83	3,62	11,60
Z 240*73*20*3,5	11,10	1413,46	11,78	98,20	91,31	1,33	18,22	30,67	5,77	14,19
Z 240*73*21*4	12,67	1613,66	13,38	111,50	91,06	1,52	20,77	30,65	8,61	16,19
Z 260*65*19*1,5	4,89	623,34	5,97	45,94	97,88	0,46	7,03	27,08	0,47	5,99
Z 260*70*15*2	6,52	830,27	7,99	61,49	98,13	0,65	9,23	27,89	1,11	8,30
Z 260*70*17*2,5	8,18	1041,76	10,00	76,93	97,98	0,83	11,84	28,21	2,17	10,67
Z 260*70*19*3	9,85	1254,82	12,01	92,35	97,82	1,02	14,57	28,51	3,76	13,14
Z 260*75*17*4	13,17	1677,66	16,08	123,67	97,89	1,47	19,61	29,61	8,95	18,60
Z 280*59*17*2	6,55	834,27	8,82	63,00	102,82	0,43	7,32	22,76	1,11	6,83
Z 280*60*17*2,5	8,18	1041,76	10,99	78,47	102,69	0,55	9,11	22,90	2,17	8,61
Z 280*62*17*3	9,85	1254,82	13,25	94,64	102,76	0,69	11,18	23,50	3,76	10,85
Z 280*63*17*3,5	11,48	1462,46	15,40	110,02	102,63	0,82	12,98	23,64	5,97	12,77
Z 280*65*17*4	13,17	1677,66	17,69	126,36	102,69	0,99	15,17	24,25	8,95	15,31
Z 300*88*17*1,5	5,91	752,34	9,97	66,45	115,10	1,02	11,59	36,82	0,56	16,99
Z 300*88*20*2	7,87	1002,27	13,22	88,16	114,87	1,36	15,44	36,82	1,34	22,63
Z 300*88*22*2,5	9,87	1256,76	16,53	110,21	114,69	1,73	19,69	37,13	2,62	28,90
Z 300*88*24*3	11,88	1512,82	19,83	132,22	114,50	2,12	24,07	37,42	4,54	35,40
Z 300*88*25*3,5	13,84	1763,46	23,02	153,46	114,25	2,47	28,02	37,40	7,20	41,25
Z 300*88*26*4	15,81	2013,66	26,17	174,47	114,00	2,81	31,95	37,37	10,74	47,07
Z 320*80*18*2	7,87	1002,27	14,44	90,27	120,04	1,00	12,55	31,65	1,34	19,77
Z 320*80*20*2,5	9,87	1256,76	18,07	112,93	119,91	1,28	16,04	31,95	2,62	25,29
Z 320*80*22*3	11,88	1512,82	21,70	135,60	119,76	1,57	19,65	32,24	4,54	31,03
Z 320*85*18*3,5	13,84	1763,46	25,39	158,66	119,98	1,92	22,61	33,01	7,20	37,35
Z 320*85*20*4	15,87	2021,66	29,04	181,48	119,85	2,25	26,44	33,34	10,78	43,69
Z 340*70*18*2	7,87	1002,27	15,57	91,57	124,63	0,70	10,02	26,45	1,34	16,30
Z 340*70*20*2,5	9,87	1256,76	19,49	114,62	124,52	0,90	12,82	26,72	2,62	20,87
Z 340*75*17*3	11,88	1512,82	23,58	138,72	124,85	1,17	15,56	27,78	4,54	26,78
Z 340*75*18*3,5	13,84	1763,46	27,39	161,14	124,63	1,36	18,13	27,77	7,20	31,22
Z 340*75*20*4	15,87	2021,66	31,35	184,42	124,53	1,59	21,22	28,06	10,78	36,56
Z 360*60*18*2	7,87	1002,27	16,62	92,34	128,78	0,47	7,75	21,55	1,34	12,66
Z 360*65*15*2,5	9,87	1256,76	20,96	116,42	129,13	0,64	9,83	22,55	2,62	17,19
Z 360*65*17*3	11,88	1512,82	25,20	140,03	129,08	0,79	12,13	22,83	4,54	21,21
Z 360*65*18*3,5	13,84	1763,46	29,28	162,68	128,86	0,92	14,12	22,81	7,20	24,71
Z 360*70*15*4	15,87	2021,66	33,74	187,46	129,19	1,14	16,33	23,78	10,78	30,44

Tablo 4.3. (Devamı)

Z 380*53*15*2	7,87	1002,27	17,66	92,93	132,73	0,30	5,74	17,42	1,34	9,57
Z 380*55*15*2,5	9,87	1256,76	22,19	116,78	132,87	0,40	7,36	17,95	2,62	12,69
Z 380*56*15*3	11,83	1506,82	26,55	139,75	132,74	0,49	8,78	18,07	4,52	15,41
Z 380*58*15*3,5	13,84	1763,46	31,14	163,89	132,88	0,61	10,51	18,59	7,20	19,02
Z 380*60*15*4	15,87	2021,66	35,77	188,26	133,02	0,74	12,32	19,12	10,78	22,97
Z 400*100*21*2	9,85	1254,27	28,35	141,76	150,35	1,96	19,56	39,49	1,67	59,76
Z 400*100*22*2,5	12,30	1566,76	35,31	176,56	150,13	2,44	24,43	39,49	3,26	74,68
Z 400*100*24*3	14,80	1884,82	42,41	212,03	149,99	2,98	29,85	39,79	5,65	91,32
Z 400*100*26*3,5	17,30	2204,46	49,50	247,51	149,85	3,54	35,43	40,09	9,00	108,49
Z 400*100*27*4	19,76	2517,66	56,36	281,79	149,62	4,04	40,42	40,07	13,43	123,87

4.2.2. Yöntem 2

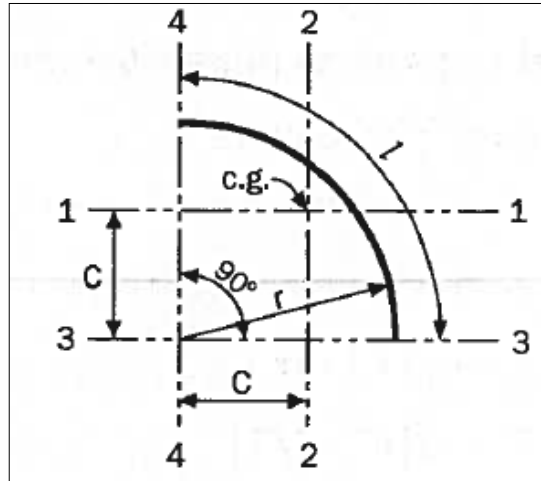
Soğuk şekillendirilmiş çelik bir kesit et kalınlığı boyunca homojen bir yapıya sahipse enkesit özelliklerini hesaplamak için çizgisel (doğrusal) yöntem veya “midline” yöntemi kullanılarak basitleştirilebilmektedir. Bu yönteme göre çelik malzemenin kesitin merkez çizgisi veya orta çizgisi boyunca yoğunlaştığı kabul edilir ve et kalınlığı görmezden gelinerek alan elemanları yerine düz veya eğimli “çizgi elemanları” ile değiştirilir [45]. Et kalınlığı (t) doğrusal hesaplamalar tamamlandıktan sonra hesaba dahil edilmektedir. Kısaca örneklemek gerekirse; “toplam alan= Lxt ” ve “ $I = I'xt$ ” şeklinde verilebilir. Burada “ L ” kesitin ortasından çizilen tüm çizgi elemanlarının toplam uzunluğu ve I' çelik kesitin merkez çizgisinin atalet momentidir. Enkesit özelliklerinin hesabı yapılırken çizgisel enkesit boyutlarına göre hesaplar yapılmaktadır.



Şekil 4.6. Çelik Z profilin yuvarlak köşe kabulüyle çizgisel kesiti ve boyutları

Soğuk şekillendirilmiş çelik bir profilin, enkesit özelliklerini hesaplamak için lineer (doğrusal) yöntemin doğruluğu, kullanılacak çelik malzemenin et kalınlığına ve kesitin şekline bağlıdır. Genellikle soğuk şekillendirilmiş çelik yapılarda kullanılan çelik malzemelerin kalınlıkları için, çizgisel yöntemle hesaplanan atalet momentindeki hata oranı, özellikle ince et kalınlığına sahip bir malzemedan üretilmiş nispeten derin kesitler için genellikle ihmal edilebilir düzeydedir. Örnek olarak; rastgele seçilen iki U kesitli çelik profilin hesaplanan atalet momentlerinde beklenen hata oranları, çelik kesitin et kalınlığı 6.35 mm veya daha ince ise %1'den az olmaktadır [45].

Tezin bu aşamasında, lineer metot kullanılarak yapılan hesaplarda, köşelerin atalet momentlerinin ihmal edilmesinin, profilin enkesit özelliklerine etkisini incelemek amaçlanmıştır. Bu nedenle, burulma davranışıyla ilgili özellikler olan (J ve C_w) burulma sabiti ve çarpılma sabiti hesapları hariç, diğer enkesit özelliklerinin hesabında yuvarlak köşe kabulüyle oluşturulan çizgisel enkesit boyutları kullanılmıştır. Atalet momentleri bulunurken, köşelerin kendi geometrik merkezlerine ait eksenlere göre atalet momentleri ihmal edilmesine rağmen, profilin kendi geometrik merkezine ait eksenlere göre ikinci alan momentleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.7. Çelik Z profilin köşeleri ve çeyrek çemberin bazı geometrik özellikleri [21]

Şekilde görülen çeyrek çemberin geometrik merkezinin (c.g.), 3 ve 4 numaralı eksenlere uzaklığı, $c = 0,637 \cdot R$ 'dir. Ancak, “Soğuk Şekillendirilmiş Çelik

Elemanların Tasarımı” kılavuzunda, köşe çizgisinin yarıçapının r ile gösterildiği düşünüldüğünde formül, $0,637*r$ olarak çevrilebilir.

Örnek olarak seçilen profil, Z 300*88*26*4 profilidir. Hesap adımları sırasıyla aşağıda sunulmuştur. Bulunan sonuçlar Tablo 4.4.’te verilmiştir.

- Temel enkesit boyutları;

$$A' = 300 \text{ mm} \quad B' = 88 \text{ mm} \quad C' = 26 \text{ mm} \quad t = 4 \text{ mm} \quad R = 3 \text{ mm} \quad \alpha = 1$$

- Çizgisel enkesit boyutlarının hesabı;

$$r = R + t/2 = 3 + 4/2 = 5 \text{ mm} \quad \gamma = 90\pi/180 = 1.57 \text{ radyan}$$

$$a = A' - (2r + t) = 300 - (2*5 + 4) = 286 \text{ mm}$$

$$b = B' - \left[r + \frac{t}{2} + \alpha \left(r + \frac{t}{2} \right) \tan \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right] = 88 - (5 + 4/2 + 1(5 + 4/2) \tan(90/2)) = 74 \text{ mm}$$

$$c = \alpha \left[C' - \left(r + \frac{t}{2} \right) \tan \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right] = 1(26 - (5 + 4/2) \tan(45)) = 19 \text{ mm}$$

$$u_1 = \frac{\pi r}{2} = \pi * 5/2 = 7.85 \text{ mm} \quad u_2 = \gamma r = 1.57 * 5 = 7.85 \text{ rad (}\gamma \text{ radyan)}$$

- Enkesit Alanı;

$$\text{Alan} = t[a + 2b + 2u_1 + \alpha(2c + 2u_2)] = 4(286 + 2*74 + 2*7.85 + 1(2*19 + 2*7.85)) = 2013.60 \text{ mm}^2$$

- Birim Boy Kütlesi;

$$G = \rho(\text{Alan}) = 7850 * 2013.60 * 10^{-6} = 15.807 \text{ kg/m}$$

- x eksenini ile başlıkların merkez çizgisi arasındaki mesafe (y_f) hesabı;

$$y_f = \frac{A'}{2} - \frac{t}{2} = \frac{300}{2} - \frac{4}{2} = 148 \text{ mm}$$

- x eksenini ile köşelerin geometrik merkezleri arasındaki mesafe (y_c) hesabı;

$$y_c = \frac{a}{2} + c = \frac{a}{2} + 0.637r = \frac{286}{2} + 0.637 * 5 = 146.185 \text{ mm}$$

- x asal eksenine göre atalet momenti hesabı;
1. Çizgisel kesitin x eksenine göre atalet momenti hesabı;

$$I'_x = 2b(y_f)^2 + 4u_1(y_c)^2 + \frac{a^3}{12} + 2(y_d)^2 + 2\frac{c^3}{12}$$

$$I'_x = 2 * 74 * (148)^2 + 4 * 7.85 * (146.185)^2 + \frac{286^3}{12} + 2 * 19 * (133.5)^2 +$$

$$2\frac{19^3}{12} = 6540671.703 \text{ mm}^3$$

- Profilin x eksenine göre atalet momenti hesabı;

$$I_x = I'_x * t = 6540671.703 * 4 = 26162686.81 \text{ mm}^4$$

- y asal eksenine göre atalet momenti hesabı;

1. Çizgisel kesitin y eksenine göre atalet moment hesabı;

$$I'_y = 2\left[\frac{b^3}{12} + b\left(\frac{b}{2} + r\right)^2\right] + 2u(r - 0.637r)^2 + 2c(B' - t)^2 + 2u\left(B' - \frac{t}{2} - 0.637r\right)^2$$

$$I'_y = 2\left[\frac{74^3}{12} + 74\left(\frac{74}{2} + 5\right)^2\right] + 2 * 7.85 * (5 - 0.637 * 5)^2 + 2 * 19 * (88 - 4)^2 + 2 * 7.85 * \left(88 - \frac{4}{2} - 0.637 * 5\right)^2 = 704464.743 \text{ mm}^3$$

- Profilin y eksenine göre atalet momenti hesabı;

$$I_y = I'_y * t = 704464.743 * 4 = 2817858.972 \text{ mm}^4$$

- x ve y eksenlerine göre atalet yarıçapları hesabı;

$$i_x = \sqrt{I_x / \text{Alan}} = \sqrt{26162686.81 / 2013.6} = 113.986 \text{ mm}$$

$$i_y = \sqrt{I_y / \text{Alan}} = \sqrt{2817858.972 / 2013.6} = 37.408 \text{ mm}$$

- x ve y eksenlerine göre mukavemet momentleri hesabı;

$$W_x = 2I_x / A' = 2(26162686.81) / 300 = 174417.912 \text{ mm}^3$$

$$W_y = I_y / B' = 2817858.972 / 88 = 32021.124 \text{ mm}^3$$

Elde edilmiştir.

Tablo 4.4. Z Profillerin Yöntem 2'e Göre Hesaplanan Enkesit Değerleri

PROFİL ADI	G	Alan	I _x	W _x	i _x	I _y	W _y	i _y
	kg/m	mm ²	mm ⁴ (x106)	mm ³ (x103)	mm	mm ⁴ (x106)	mm ³ (x103)	mm
Z 100*50*15*1,2	2.06	262.82	0.43	8.52	40.26	0.17	3.32	25.15
Z 100*50*15*1,5	2.56	326.34	0.53	10.50	40.11	0.20	4.06	24.94
Z 100*50*15*2	3.38	430.27	0.68	13.68	39.87	0.26	5.20	24.59
Z 100*50*15*2,5	4.17	531.76	0.83	16.69	39.62	0.31	6.25	24.24
Z 100*50*15*3,5	5.71	727.46	1.11	22.27	39.12	0.40	8.07	23.55
Z 100*50*15*4	6.45	821.66	1.24	24.84	38.88	0.44	8.84	23.19
Z 120*50*15*1	1.88	239.99	0.55	9.09	47.67	0.14	2.81	24.21
Z 120*50*15*1,2	2.25	286.82	0.65	10.82	47.57	0.17	3.32	24.07
Z 120*50*15*1,5	2.80	356.34	0.80	13.35	47.42	0.20	4.06	23.87
Z 140*70*16*1,2	2.84	361.22	1.17	16.69	56.86	0.42	5.97	34.00
Z 140*70*17*1,5	3.55	452.34	1.45	20.77	56.69	0.53	7.53	34.14
Z 140*70*18*2	4.73	602.27	1.92	27.39	56.42	0.70	10.02	34.12
Z 140*70*20*2,5	5.94	756.76	2.38	34.04	56.11	0.90	12.82	34.43
Z 140*75*17*3	7.17	912.82	2.90	41.49	56.41	1.17	15.56	35.76
Z 140*75*20*4	9.59	1221.66	3.81	54.40	55.83	1.59	21.22	36.10
Z 160*60*15*1	2.35	299.99	1.19	14.93	63.10	0.23	3.79	27.52
Z 160*61*15*1,2	2.82	358.82	1.42	17.80	62.99	0.27	4.48	27.38
Z 160*61*15*1,5	3.53	449.34	1.78	22.26	62.95	0.34	5.65	27.69
Z 160*63*15*2	4.73	602.27	2.38	29.81	62.93	0.48	7.70	28.38
Z 160*64*15*2,5	5.90	751.76	2.96	37.03	62.78	0.61	9.57	28.54
Z 160*66*15*3	7.12	906.82	3.57	44.63	62.75	0.77	11.74	29.23
Z 160*68*15*3,5	8.35	1063.46	4.18	52.28	62.71	0.95	13.99	29.91
Z 160*69*15*4	9.53	1213.66	4.75	59.37	62.56	1.10	15.90	30.07
Z 180*50*15*1,2	2.82	358.82	1.68	18.69	68.47	0.17	3.32	21.52
Z 180*51*15*1,5	3.53	449.34	2.11	23.39	68.45	0.21	4.19	21.82
Z 180*53*15*2	4.73	602.27	2.82	31.37	68.47	0.30	5.74	22.47
Z 180*54*15*2,5	5.90	751.76	3.51	39.00	68.33	0.39	7.13	22.64
Z 180*56*15*3	7.12	906.82	4.24	47.07	68.35	0.49	8.78	23.29
Z 180*59*15*4	9.53	1213.66	5.65	62.75	68.21	0.70	11.95	24.10
Z 200*55*16*1	2.61	331.99	1.93	19.28	76.20	0.19	3.39	23.70
Z 200*57*15*1,2	3.14	399.62	2.33	23.30	76.35	0.23	4.12	24.24
Z 200*57*16*1,5	3.93	500.34	2.91	29.07	76.23	0.30	5.20	24.35
Z 200*60*15*2	5.26	670.27	3.91	39.07	76.35	0.42	7.08	25.18
Z 200*60*16*2,5	6.57	836.76	4.85	48.46	76.10	0.53	8.83	25.16
Z 200*60*18*3	7.92	1008.82	5.81	58.11	75.90	0.65	10.89	25.45

Tablo 4.4. (Devamı)

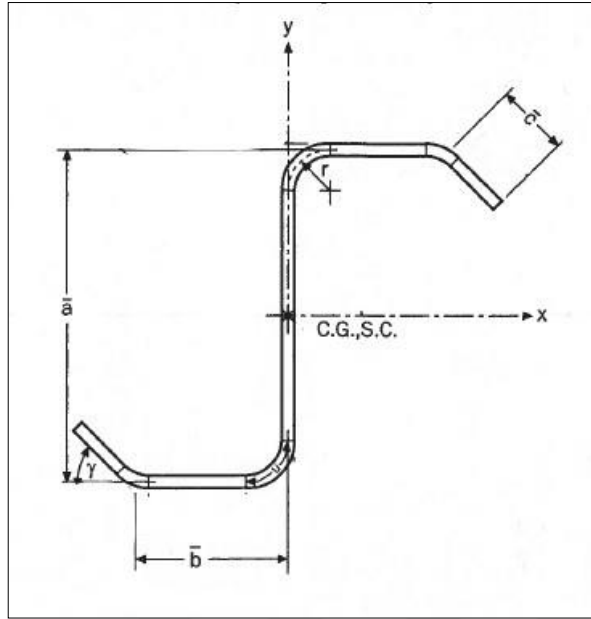
Z 200*64*16*3,5	9. 28	1182. 46	6. 85	68. 53	76. 13	0. 83	12. 94	26. 47
Z 200*64*17*4	10. 59	1349. 66	7. 77	77. 71	75. 88	0. 94	14. 76	26. 45
Z 220*68*15*1,2	3. 53	450. 02	3. 24	29. 44	84. 84	0. 38	5. 53	28. 90
Z 220*68*16*1,5	4. 42	563. 34	4. 04	36. 75	84. 71	0. 47	6. 98	29. 03
Z 220*68*17*2	5. 89	750. 27	5. 35	48. 67	84. 47	0. 63	9. 29	29. 01
Z 220*68*19*2,5	7. 39	941. 76	6. 69	60. 79	84. 27	0. 81	11. 90	29. 31
Z 220*68*20*3	8. 86	1128. 82	7. 97	72. 43	84. 01	0. 97	14. 24	29. 29
Z 240*70*15*1,2	3,76	478,82	4,05	33,71	91,92	0,41	5,80	29,13
Z 240*70*16*1,5	4,70	599,34	5,05	42,10	91,81	0,51	7,33	29,26
Z 240*73*15*2	6,30	802,27	6,78	56,47	91,91	0,72	9,92	30,05
Z 240*73*16*2,5	7,86	1001,76	8,42	70,16	91,68	0,90	12,39	30,05
Z 240*70*21*3	9,47	1206,82	10,03	83,61	91,18	1,07	15,34	29,83
Z 240*73*20*3,5	11,10	1413,46	11,78	98,20	91,31	1,33	18,22	30,67
Z 240*73*21*4	12,67	1613,66	13,38	111,50	91,06	1,52	20,77	30,65
Z 260*65*19*1,5	4,89	623,34	5,97	45,94	97,88	0,46	7,03	27,08
Z 260*70*15*2	6,52	830,27	7,99	61,49	98,13	0,65	9,23	27,89
Z 260*70*17*2,5	8,18	1041,76	10,00	76,93	97,98	0,83	11,84	28,21
Z 260*70*19*3	9,85	1254,82	12,01	92,35	97,82	1,02	14,57	28,51
Z 260*75*17*4	13,17	1677,66	16,08	123,67	97,89	1,47	19,61	29,61
Z 280*59*17*2	6,55	834,27	8,82	63,00	102,82	0,43	7,32	22,76
Z 280*60*17*2,5	8,18	1041,76	10,99	78,47	102,69	0,55	9,11	22,90
Z 280*62*17*3	9,85	1254,82	13,25	94,64	102,76	0,69	11,18	23,50
Z 280*63*17*3,5	11,48	1462,46	15,40	110,02	102,63	0,82	12,98	23,64
Z 280*65*17*4	13,17	1677,66	17,69	126,36	102,69	0,99	15,17	24,25
Z 300*88*17*1,5	5,91	752,34	9,97	66,45	115,10	1,02	11,59	36,82
Z 300*88*20*2	7,87	1002,27	13,22	88,16	114,87	1,36	15,44	36,82
Z 300*88*22*2,5	9,87	1256,76	16,53	110,21	114,69	1,73	19,69	37,13
Z 300*88*24*3	11,88	1512,82	19,83	132,22	114,50	2,12	24,07	37,42
Z 300*88*25*3,5	13,84	1763,46	23,02	153,46	114,25	2,47	28,02	37,40
Z 300*88*26*4	15,81	2013,66	26,17	174,47	114,00	2,81	31,95	37,37
Z 320*80*18*2	7,87	1002,27	14,44	90,27	120,04	1,00	12,55	31,65
Z 320*80*20*2,5	9,87	1256,76	18,07	112,93	119,91	1,28	16,04	31,95
Z 320*80*22*3	11,88	1512,82	21,70	135,60	119,76	1,57	19,65	32,24
Z 320*85*18*3,5	13,84	1763,46	25,39	158,66	119,98	1,92	22,61	33,01
Z 320*85*20*4	15,87	2021,66	29,04	181,48	119,85	2,25	26,44	33,34
Z 340*70*18*2	7,87	1002,27	15,57	91,57	124,63	0,70	10,02	26,45
Z 340*70*20*2,5	9,87	1256,76	19,49	114,62	124,52	0,90	12,82	26,72
Z 340*75*17*3	11,88	1512,82	23,58	138,72	124,85	1,17	15,56	27,78
Z 340*75*18*3,5	13,84	1763,46	27,39	161,14	124,63	1,36	18,13	27,77
Z 340*75*20*4	15,87	2021,66	31,35	184,42	124,53	1,59	21,22	28,06
Z 360*60*18*2	7,87	1002,27	16,62	92,34	128,78	0,47	7,75	21,55
Z 360*65*15*2,5	9,87	1256,76	20,96	116,42	129,13	0,64	9,83	22,55
Z 360*65*17*3	11,88	1512,82	25,20	140,03	129,08	0,79	12,13	22,83
Z 360*65*18*3,5	13,84	1763,46	29,28	162,68	128,86	0,92	14,12	22,81
Z 360*70*15*4	15,87	2021,66	33,74	187,46	129,19	1,14	16,33	23,78
Z 380*53*15*2	7,87	1002,27	17,66	92,93	132,73	0,30	5,74	17,42
Z 380*55*15*2,5	9,87	1256,76	22,19	116,78	132,87	0,40	7,36	17,95
Z 380*56*15*3	11,83	1506,82	26,55	139,75	132,74	0,49	8,78	18,07
Z 380*58*15*3,5	13,84	1763,46	31,14	163,89	132,88	0,61	10,51	18,59
Z 380*60*15*4	15,87	2021,66	35,77	188,26	133,02	0,74	12,32	19,12
Z 400*100*21*2	9,85	1254,27	28,35	141,76	150,35	1,96	19,56	39,49
Z 400*100*22*2,5	12,30	1566,76	35,31	176,56	150,13	2,44	24,43	39,49
Z 400*100*24*3	14,80	1884,82	42,41	212,03	149,99	2,98	29,85	39,79
Z 400*100*26*3,5	17,30	2204,46	49,50	247,51	149,85	3,54	35,43	40,09
Z 400*100*27*4	19,76	2517,66	56,36	281,79	149,62	4,04	40,42	40,07

4.2.3. Yöntem 3

Çizgisel kesitin enkesit hesap formülleri kesin sonuçlar vermektedir, çünkü çizginin kalınlık boyutu yoktur. Ancak çizgisel kesitin, hesaplarda et kalınlığının dâhil edildiği gerçek bir çelik elemanı temsil ettiği ve bu elemanın enkesit özelliklerini hesaplarken, enkesit değerleri yaklaşık çıkmaktadır. Enkesit özelliklerinin yaklaşık olarak çıkmasının nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Çelik bir elemanın boyuna eksenine etrafındaki atalet momenti çok küçük olduğundan dolayı ihmal edilmektedir.
2. Referans eksenlerine eğimli çelik bir kesitin atalet momenti, bu kesiti temsil eden çizgisel kesitin atalet momentinden biraz daha büyük olmaktadır, ancak benzer elemanlar için ilgili hata oranı, momentin ihmal edilmesinden kaynaklanan hata oranından daha azdır.
3. Doğrusal çeyrek bir yayın özelliklerinin, dik olarak birleşen bir köşenin özelliklerini bulmak için kullanılmasında bazı hatalar söz konusu olmaktadır, ancak küçük köşe yarıçapları ile köşenin ağırlık merkezinin yeri arasındaki mesafe çok küçük olduğundan dolayı, atalet momenti genellikle ihmal edilebilir [21].

Çalışmada incelenen çelik Z profillerin kesit özellikleri hesaplanırken kullanılan bir diğer yöntem ise köşelerdeki eğriliklerin dikkate alınmadığı “yaklaşık çizgisel yöntem” dir. Bu yöntemde, profilin kesit boyutları kare köşe kabulüyle hesaplanmaktadır. Köşelerdeki eğrilikler görmezden gelinerek, kesitin köşeleri doğrudan (dik olarak) birleşiyormuş gibi düşünülerek boyutlar hesaplanmaktadır. Soğuk şekillendirilmiş çelik profillerin çizgisel kesitleri, başlık ve gövdenin birleştiği köşelerde eğrilikler ihmal edilerek dik bir birleşim çizilmelidir.



Şekil 4.8. Çelik Z profilin kare köşe kabulüyle çizgisel kesiti ve boyutları

Diğer yöntemler de olduğu gibi bu yöntemde de seçilen Z 300*88*26*4 profili ile ilgili hesaplar örnek olması açısından açık hesap olarak verilmiştir. Yöntem 1’de hesaplanan çarpılma sabiti (C_w) için verilen hesap kurallarında da kare köşe kabulüyle belirlenen çizgisel enkesit boyutları kullanıldığı için, bu yöntemde hesaplanan C_w değerleriyle aynı sonuçlar çıkmıştır. Atalet momenti hesabı yapılırken, herhangi bir elemanın zayıf ekseninin ilgili eksene paralel olması durumunda, ilgili elemanın atalet momenti ihmal edilmiştir. Bu yöntemde kullanılan kesitte boyutları gösteren ifadeler Şekil 4.8.’de gösterilmiştir.

Yöntem 3’e göre yapılan hesap adımları aşağıda açık bir şekilde verilmiştir.

- Temel enkesit boyutları;

$$A' = 300 \text{ mm} \quad B' = 88 \text{ mm} \quad C' = 26 \text{ mm} \quad t = 4 \text{ mm} \quad R = 3 \text{ mm} \quad \alpha = 1$$

- Kare köşe kabulüyle çizgisel enkesitin boyutlarının hesabı;

$$\bar{a} = 300 - 4 = 296 \text{ mm} \quad \bar{b} = 88 - \left[\frac{4}{2} + \left(\frac{1 \cdot 4}{2} \right) \tan \left(\frac{90}{2} \right) \right] = 84 \text{ mm}$$

$$\bar{c} = 1 \left[26 - \left(\frac{4}{2} \right) \tan \left(\frac{90}{2} \right) \right] = 24 \text{ mm}$$

- Enkesit Alanı;

$$\text{Alan} = t(\bar{a} + 2\bar{b} + 2\bar{c}) = 4 * (296 + 2 * 84 + 2 * 24) = 2048 \text{ mm}^2$$

- Birim Boy Kütlesi;

$$G = \rho(\text{Alan}) = 7850 * 2048 * 10^{-6} = 16.077 \text{ kg/m}$$

- x asal eksenine göre atalet momenti hesabı;
 1. Çizgisel kesitin x eksenine göre atalet momenti hesabı;

$$\begin{aligned} I'_x &= 2\bar{b} \left(\frac{A'}{2} - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{\bar{a}^3}{12} + 2\frac{\bar{c}^3}{12} + 2\bar{c} \left(\frac{A'}{2} - \frac{\bar{c}}{2} \right)^2 \\ I'_x &= 2 * 84 \left(\frac{300}{2} - \frac{4}{2} \right)^2 + \frac{296^3}{12} + 2\frac{24^3}{12} + 2 * 24 \left(\frac{300}{2} - \frac{24}{2} \right)^2 \\ &= 6757482.667 \end{aligned}$$

- Profilin x eksenine göre atalet momenti hesabı;

$$I_x = I'_x * t = 6757482.667 * 4 = 27029930.67 \text{ mm}^4$$

- y asal eksenine göre atalet momenti hesabı;
 1. Çizgisel kesitin y eksenine göre atalet momenti hesabı;

$$\begin{aligned} I'_y &= 2 \left[\frac{\bar{b}^3}{12} + \bar{b} \left(\frac{\bar{b}}{2} \right)^2 \right] + 2\bar{c}\bar{b}^2 \\ I'_y &= 2 \left[\frac{84^3}{12} + 84 \left(\frac{84}{2} \right)^2 \right] + 2 * 24 * 84^2 = 733824 \\ I_y &= I'_y * t = 733824 * 4 = 2935296 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

- x ve y eksenlerine göre atalet yarıçapları hesabı;

$$\begin{aligned} i_x &= \sqrt{I_x / \text{Alan}} = \sqrt{27029930.67 / 2048} = 114.883 \text{ mm} \\ i_y &= \sqrt{I_y / \text{Alan}} = \sqrt{2935296 / 2048} = 37.858 \text{ mm} \end{aligned}$$

- x ve y eksenlerine göre mukavemet momentleri hesabı;

$$W_x = 2I_x / A' = 2(27029930.67) / 300 = 180199.538 \text{ mm}^3$$

$$W_y = I_y / B' = 2935296 / 88 = 33355.636 \text{ mm}^3$$

- Burulma sabiti ve Çarpılma sabiti hesabı;

$$J = \frac{t^3}{3} [\bar{a} + 2\bar{b} + \alpha(2\bar{c})] = \frac{4^3}{3} [296 + 2(84) + 1(2 * 24)] = 10922.667 \text{ mm}^4$$

$$C_w = 4/12[296^2 84^3 (2 * 296 + 84) + 1[84^2 (4 * 24^4 + 16 * 84 * 24^3 + 6 * 296^3 * 24 + 4 * 296^2 84 * 24 + 8 * 296 * 24^3) + 6 * 296 * 84 * 24^2 (296 + 84)(2 * 84 \sin 90 + 296 \cos 90) + 4 * 296 * 84 * 24^3 (2 * 296 + 4 * 84 + 24) \sin 90 \cos 90 + 24^3 (2 * 296^3 + 4 * 296^2 * 84 - 8 * 296 * 84^2 + 296^2 * 24 - 16 * 84^3 - 4 * 84^2 24) \cos^2 90] / (296 + 2(84 + 1 * 24))] = 47069263584 \text{ mm}^6$$

Elde edilmiştir.

Tablo 4.5. Z Profillerin Yöntem 3'e Göre Hesaplanan Enkesit Değerleri

PROFİL ADI	G kg/m	A mm ²	I _x mm ⁴ (x10 ⁶)	W _x mm ³ (x10 ³)	i _x mm	I _y mm ⁴ (x10 ⁶)	W _y mm ³ (x10 ³)	i _y mm	J mm ⁴ (x10 ³)	C _w mm ⁶ (x10 ⁹)
Z 100*50*15*1,2	2,121	270,240	0,45	8,92	40,632	0,18	3,51	25,467	0,13	0,28
Z 100*50*15*1,5	2,638	336,000	0,55	11,03	40,521	0,21	4,29	25,275	0,25	0,35
Z 100*50*15*2	3,485	444,000	0,72	14,45	40,334	0,28	5,53	24,954	0,59	0,44
Z 100*50*15*2,5	4,318	550,000	0,89	17,73	40,147	0,33	6,67	24,633	1,15	0,53
Z 100*50*15*3,5	5,935	756,000	1,20	23,91	39,770	0,44	8,70	23,992	3,09	0,67
Z 100*50*15*4	6,720	856,000	1,34	26,82	39,581	0,48	9,59	23,671	4,57	0,74
Z 120*50*15*1	1,931	246,000	0,57	9,48	48,076	0,15	2,96	24,533	0,08	0,36
Z 120*50*15*1,2	2,310	294,240	0,68	11,30	47,997	0,18	3,51	24,407	0,14	0,42
Z 120*50*15*1,5	2,873	366,000	0,84	13,98	47,879	0,21	4,29	24,217	0,27	0,52
Z 140*70*16*1,2	2,894	368,640	1,21	17,24	57,217	0,44	6,22	34,370	0,18	1,35
Z 140*70*17*1,5	3,627	462,000	1,51	21,50	57,081	0,55	7,86	34,508	0,35	1,71
Z 140*70*18*2	4,836	616,000	1,99	28,45	56,864	0,73	10,48	34,511	0,82	2,28
Z 140*70*20*2,5	6,084	775,000	2,48	35,49	56,615	0,94	13,42	34,822	1,61	2,94
Z 140*75*17*3	7,348	936,000	3,03	43,32	56,916	1,23	16,38	36,230	2,81	3,66
Z 140*75*20*4	9,860	1256,000	4,00	57,21	56,466	1,68	22,40	36,577	6,70	5,03
Z 160*60*15*1	2,402	306,000	1,23	15,43	63,523	0,24	3,96	27,881	0,10	1,04
Z 160*61*15*1,2	2,875	366,240	1,47	18,42	63,438	0,28	4,70	27,755	0,18	1,23
Z 160*61*15*1,5	3,603	459,000	1,85	23,08	63,427	0,36	5,93	28,083	0,34	1,56
Z 160*63*15*2	4,836	616,000	2,48	30,99	63,445	0,51	8,11	28,802	0,82	2,17
Z 160*64*15*2,5	6,045	770,000	3,09	38,62	63,344	0,65	10,12	29,003	1,60	2,72
Z 160*66*15*3	7,301	930,000	3,73	46,66	63,353	0,82	12,45	29,722	2,79	3,41
Z 160*68*15*3,5	8,572	1092,000	4,38	54,79	63,356	1,01	14,88	30,442	4,46	4,13
Z 160*69*15*4	9,797	1248,000	4,99	62,41	63,248	1,17	16,98	30,641	6,66	4,74
Z 180*50*15*1,2	2,875	366,240	1,75	19,39	69,031	0,18	3,51	21,876	0,18	1,03
Z 180*51*15*1,5	3,603	459,000	2,19	24,31	69,045	0,23	4,43	22,191	0,34	1,32
Z 180*53*15*2	4,836	616,000	2,94	32,69	69,115	0,32	6,09	22,882	0,82	1,86
Z 180*54*15*2,5	6,045	770,000	3,67	40,77	69,032	0,41	7,59	23,075	1,60	2,35
Z 180*56*15*3	7,301	930,000	4,44	49,33	69,092	0,53	9,38	23,766	2,79	2,97
Z 180*59*15*4	9,797	1248,000	5,95	66,12	69,055	0,76	12,85	24,649	6,66	4,18
Z 200*55*16*1	2,653	338,000	1,99	19,90	76,738	0,20	3,55	24,042	0,11	1,43
Z 200*57*16*1,2	3,195	407,040	2,41	24,07	76,900	0,25	4,33	24,614	0,20	1,78
Z 200*57*16*1,5	4,004	510,000	3,01	30,09	76,812	0,31	5,47	24,729	0,38	2,25
Z 200*60*15*2	5,369	684,000	4,05	40,53	76,975	0,45	7,48	25,608	0,91	3,18

Tablo 4.5. (Devamı)

Z 200*60*16*2,5	6,712	855,000	5,04	50,43	76,797	0,56	9,34	25,608	1,78	3,97
Z 200*60*18*3	8,101	1032,000	6,07	60,65	76,662	0,69	11,53	25,896	3,10	4,90
Z 200*64*16*3,5	9,506	1211,000	7,16	71,63	76,909	0,88	13,78	26,985	4,94	6,08
Z 200*64*17*4	10,864	1384,000	8,15	81,49	76,732	1,01	15,75	26,987	7,38	6,94
Z 220*68*15*1,2	3,591	457,440	3,33	30,29	85,347	0,39	5,77	29,299	0,22	3,36
Z 220*68*16*1,5	4,498	573,000	4,17	37,87	85,262	0,50	7,30	29,433	0,43	4,24
Z 220*68*17*2	5,997	764,000	5,53	50,28	85,082	0,66	9,74	29,439	1,02	5,65
Z 220*68*19*2,5	7,536	960,000	6,93	62,97	84,943	0,85	12,49	29,740	2,00	7,25
Z 220*68*20*3	9,043	1152,000	8,28	75,23	84,757	1,02	14,97	29,730	3,46	8,68
Z 240*70*15*1,2	3,817	486,240	4,16	34,63	92,452	0,42	6,06	29,534	0,23	4,37
Z 240*70*16*1,5	4,781	609,000	5,20	43,31	92,376	0,54	7,66	29,669	0,46	5,52
Z 240*73*15*2	6,406	816,000	6,98	58,20	92,518	0,76	10,40	30,509	1,09	7,70
Z 240*73*16*2,5	8,007	1020,000	8,70	72,49	92,347	0,95	13,02	30,527	2,13	9,62
Z 240*70*21*3	9,656	1230,000	10,40	86,66	91,948	1,13	16,10	30,266	3,69	11,60
Z 240*73*20*3,5	11,320	1442,000	12,23	101,96	92,112	1,40	19,18	31,163	5,89	14,19
Z 240*73*21*4	12,937	1648,000	13,93	116,07	91,932	1,60	21,91	31,156	8,79	16,19
Z 260*65*19*1,5	4,969	633,000	6,14	47,25	98,512	0,48	7,34	27,446	0,47	5,99
Z 260*70*15*2	6,625	844,000	8,24	63,36	98,789	0,68	9,69	28,347	1,13	8,30
Z 260*70*17*2,5	8,321	1060,000	10,33	79,44	98,708	0,87	12,45	28,672	2,21	10,67
Z 260*70*18*3	10,032	1278,000	12,43	95,60	98,613	1,07	15,33	28,974	3,83	13,14
Z 260*75*17*4	13,439	1712,000	16,70	128,47	98,770	1,56	20,79	30,180	9,13	18,60
Z 280*59*17*2	6,657	848,000	9,10	65,02	103,605	0,45	7,71	23,160	1,13	6,83
Z 280*60*17*2,5	8,321	1060,000	11,36	81,17	103,537	0,58	9,62	23,335	2,21	8,61
Z 280*62*17*3	10,032	1278,000	13,73	98,09	103,659	0,73	11,85	23,973	3,83	10,85
Z 280*63*17*3,5	11,704	1491,000	16,00	114,28	103,587	0,87	13,80	24,148	6,09	12,77
Z 280*65*17*4	13,439	1712,000	18,41	131,50	103,701	1,05	16,18	24,787	9,13	15,31
Z 300*88*17*1,5	5,982	762,000	10,19	67,95	115,659	1,06	12,01	37,242	0,57	16,99
Z 300*88*20*2	7,976	1016,000	13,55	90,34	115,485	1,41	16,02	37,255	1,35	22,63
Z 300*88*22*2,5	10,009	1275,000	16,97	113,14	115,371	1,80	20,46	37,575	2,66	28,90
Z 300*88*24*3	12,058	1536,000	20,40	136,01	115,247	2,20	25,04	37,877	4,61	35,40
Z 300*88*25*3,5	14,067	1792,000	23,73	158,17	115,066	2,57	29,20	37,869	7,32	41,25
Z 300*88*26*4	16,077	2048,000	27,03	180,20	114,883	2,94	33,36	37,858	10,92	47,07
Z 320*80*18*2	7,976	1016,000	14,81	92,56	120,733	1,05	13,08	32,093	1,35	19,77
Z 320*80*20*2,5	10,009	1275,000	18,56	116,02	120,662	1,34	16,74	32,405	2,66	25,29
Z 320*80*22*3	12,058	1536,000	22,33	139,58	120,580	1,64	20,53	32,699	4,61	31,03
Z 320*85*18*3,5	14,067	1792,000	26,16	163,50	120,824	2,02	23,75	33,563	7,32	37,35
Z 320*85*20*4	16,140	2056,000	29,98	187,39	120,759	2,36	27,79	33,894	10,97	43,69
Z 340*70*18*2	7,976	1016,000	15,98	94,00	125,411	0,73	10,48	26,872	1,35	16,30
Z 340*70*20*2,5	10,009	1275,000	20,04	117,89	125,374	0,94	13,42	27,148	2,66	20,87
Z 340*75*17*3	12,058	1536,000	24,28	142,85	125,737	1,23	16,38	28,282	4,61	26,78
Z 340*75*18*3,5	14,067	1792,000	28,26	166,26	125,589	1,43	19,13	28,292	7,32	31,22
Z 340*75*20*4	16,140	2056,000	32,41	190,66	125,557	1,68	22,40	28,588	10,97	36,56
Z 360*60*18*2	7,976	1016,000	17,08	94,90	129,666	0,49	8,15	21,936	1,35	12,66
Z 360*65*15*2,5	10,009	1275,000	21,57	119,81	130,054	0,68	10,39	23,017	2,66	17,19
Z 360*65*17*3	12,058	1536,000	25,99	144,38	130,076	0,83	12,83	23,304	4,61	21,21
Z 360*65*18*3,5	14,067	1792,000	30,26	168,09	129,938	0,97	14,97	23,301	7,32	24,71
Z 360*70*15*4	16,140	2056,000	34,90	193,89	130,288	1,22	17,42	24,356	10,97	30,44
Z 380*53*15*2	7,976	1016,000	18,17	95,61	133,712	0,32	6,09	17,817	1,35	9,57
Z 380*55*15*2,5	10,009	1275,000	22,87	120,35	133,919	0,43	7,83	18,379	2,66	12,69
Z 380*56*15*3	12,011	1530,000	27,42	144,30	133,862	0,53	9,38	18,529	4,59	15,41
Z 380*58*15*3,5	14,067	1792,000	32,21	169,51	134,060	0,65	11,26	19,092	7,32	19,02
Z 380*60*15*4	16,140	2056,000	37,06	195,03	134,252	0,79	13,24	19,657	10,97	22,97
Z 400*100*21*2	9,954	1268,000	28,92	144,61	151,026	2,02	20,23	39,945	1,69	59,76
Z400*100*22*2,5	12,442	1585,000	36,08	180,38	150,868	2,53	25,31	39,961	3,30	74,68
Z 400*100*24*3	14,978	1908,000	43,39	216,95	150,802	3,10	30,96	40,279	5,72	91,32
Z400*100*26*3,5	17,529	2233,000	50,73	253,65	150,726	3,68	36,78	40,582	9,12	108,49
Z 400*100*27*4	20,033	2552,000	57,85	289,25	150,561	4,20	42,02	40,580	13,61	123,87

4.3. Farklı Yöntemlere Göre Bulunan Enkesit Değerlerinin Karşılaştırılması ve Boyutlara Göre Değişimleri

Bu tezde ele alınan ve Tablo 4.1.'de listelenen soğuk şekillendirilmiş çelik profillerin, tasarımlarında kullanılan enkesit değerleri Bölüm 4.2.'de tanımlanan üç farklı hesap yöntemine göre hesaplanarak Tablo 4.3. - Tablo 4.4. ve Tablo 4.5. olmak üzere dört tabloda ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Ayrıca, tablolar verilmeden önce örnek

olarak seçilen Z profilinin enkesit özelliklerine ait formüller verilmiş ve daha iyi anlaşılabilmesi için hesaplar açık bir şekilde yapılmıştır. Gerçeğe yakın daha yakın olması ve daha az kabul içermesi nedeniyle Yöntem 1’den elde edilen enkesit değerleri referans alınarak, Yöntem 2 ve Yöntem 3’te hesaplanan değerlerle karşılaştırılarak hata yüzdeleri hesaplanmıştır. Hata yüzdeleri tüm profillerin tek tek değerlerinin karşılaştırılması karmaşık olacağından dolayı, enkesit değerleri gruplandırılarak hata yüzdeleri tablo şeklinde verilmiştir.

Tablo 4.6. Yöntem 2’de Hesaplanan Enkesit Değerleri İçin En Büyük Hata Oranları

Profil Listesi	En Büyük % Hatalar					
	I_x	W_x	i_x	I_y	W_y	i_y
Tablo 4.1.	0.04	0.04	0.02	0.36	0.36	0.18

Tablo 4.7. Yöntem 3’te Hesaplanan Enkesit Değerleri İçin En Büyük Hata Oranları

Profil Listesi	En Büyük % Hatalar							
	Alan	I_x	W_x	i_x	I_y	W_y	i_y	J
Tablo 4.1.	-1.10	-2.01	-2.01	-0.45	-3.42	-3.42	-1.08	-1.10

Enkesit değerlerinin karşılaştırılmasıyla ilgili olarak, yöntem 1 referans alınarak, yöntem 2’ye göre hesaplanan enkesit değerlerinin hata yüzdeleri, Tablo 4.6.’da verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere, yuvarlak köşe kabulüne göre oluşturulan çizgisel yöntemde, köşelerin atalet momentlerinin ihmal edilmesi medeniyle oluşan hata, incelenen profillerin güçlü (x) eksenlerine göre hesaplanan atalet ve mukavemet momentleriyle, atalet yarıçaplarında görmezden gelinecek kadar azdır. Hata oranları, % 0.05 ten daha küçük çıkmıştır. Tablo 4.6.’da incelenen profillerin zayıf (y) eksenlerine göre hata yüzdelerine bakıldığında ise, hesaplanan atalet ve mukavemet momentlerinde yaklaşık %0.4, atalet yarıçaplarında ise yaklaşık % 0.2 olduğu görülmektedir.

Diğer bir yöntem olan ve kare köşe kabulüyle oluşturulan çizgisel kesitin boyutları kullanılarak hesaplanan enkesit değerleri, yöntem 3’e göre hesaplanmış ve Tablo 4.5.’te sunulmuştur. Yöntem 3’te bulunan değerler ile Yöntem 1’e göre hesaplanan değerler karşılaştırılmış ve Tablo 4.7.’de en büyük hata yüzdeleri verilmiştir. Tablo 4.7.’ye bakıldığında, en büyük hata oranlarının, atalet ve mukavemet momentlerinde olduğu görülmektedir. Güçlü (x) eksene göre hesaplanan atalet ve mukavemet

momentlerinde hata oranları yaklaşık olarak %2, atalet yarıçapında ise yaklaşık % 0.5 tir. Zayıf (y) eksene göre hesaplanan atalet ve mukavemet momentlerinde hata oranları yaklaşık olarak %3.5, atalet yarıçapında ise % 1.08 dir. Alan ve burkulma sabitindeki hata oranlarına bakıldığında ikisinde de hata yüzdesi % 1.10 olarak belirlenmiştir. En büyük hata oranlarının, zayıf eksenindeki (I_y ve W_y) atalet ve mukavemet momentlerine olduğu görülmüştür. Kare köşe kabulüyle oluşturulan çizgisel kesitin, profillerin enkesit değerlerinin hesaplanmasında daha pratik olduğu görülmektedir. Ancak, hata oranlarına bakıldığında, kare köşe kabulüyle hesaplanan enkesit değerlerinin hata yüzdeleri, yuvarlak köşe kabulüyle hesaplanan enkesit değerlerinin hata yüzdelерinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise, kare köşe kabulünde çizgisel enkesit oluşturulurken, köşede ki eğriliklerin ihmal edilerek, köşelerin dik bir şekilde birleştirilmesi olduğu söylenebilir.

Bu tezde incelenen çelik profillerin Yöntem 2 ve Yöntem 3'e göre hesaplanan güçlü ve zayıf eksenler etrafındaki mukavemet momentlerindeki hata yüzdelерinin kesit yükseklikleri, başlık genişlikleri ve rijitleştiricinin uzunluğuyla değişimleri gösterilmiştir. Grafiklere bakıldığında, aynı kesit yüksekliğine sahip elemanlarda et kalınlığı arttıkça, hata oranlarının da arttığı gözlenmektedir. Aynı durum, başlık genişliklerinde de görülmektedir. Çelik profillerin dudak boyları uzadıkça, güçlü ve zayıf eksenindeki mukavemet momentlerindeki hata oranlarının arttığı tespit edilmiştir. Aynı başlık genişliğine sahip profillerin et kalınlığı arttıkça, hata oranları da artmaktadır. Genel olarak grafiklere bakıldığında, kesit yüksekliği arttıkça hata oranlarının azaldığı görülmektedir. Profillerin başlık genişlikleri arttıkça, hata oranlarının da azaldığı gözlenmiştir.

Bu tezde, Yöntem 1'e göre hesaplanan enkesit değerleri referans alındığında, yöntem 2'ye göre hesaplanan diğer bir ifadeyle yuvarlak köşe kabulüyle oluşturulan çizgisel kesitin boyutlarıyla hesaplanan enkesit değerlerinin, % 1'den daha küçük hata oranları ile birbirine yakın olduğu görülmüştür. Enkesit değerlerinin hesaplandığı bu dört yöntem içerisinde, diğerlerine göre daha pratik olan kare köşe kabulüyle çizgisel yöntemde (Yöntem 3) ise hata oranlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. En

büyük hata oranının % 3.42 ile zayıf eksendeki mukavemet momentinde olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, çalışmanın ilk aşaması olan bu bölümde, soğuk şekillendirilmiş çelik Z elemanlarının enkesit özelliklerinin tamamı, dört farklı hesap yöntemiyle bulunarak Tablo 4.3. , Tablo 4.4. ve Tablo 4.5.'te ayrı ayrı listelenerek tasarımcılara sunulmuştur. Tablolarda bulunmayan profillerin enkesit değerleri de, Bölüm 4'de verilen formüllerle bulunabilir.



BÖLÜM 5. AISI S100-S16 'YA GÖRE EKSENEL BASINÇ ETKİSİNDEKİ SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ Z PROFİLLERİN TASARIM ESASLARI

Çelik profillerin enkesit ağırlık merkezine (geometrik merkez) etkiyen eksenel basınç kuvvetini taşıyan yapısal elemanlar basınç elemanları olarak adlandırılırlar. Çelik yapılardaki kolonlar, kafes kirişlerdeki üst başlık, dikme ve diyagonal elemanları ve çerçevelerdeki çapraz elemanları eksenel basınç kuvveti etkisindeki elemanlara örnek olarak verilebilirler. Soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlardan oluşan hafif çelik yapılarda da, eksenel basınç kuvvetine maruz kalan birçok eleman mevcuttur. Bu elemanların basınç etkisine olan dayanımları, çelik yapının yük taşıma kapasitesini etkilemektedir. Çelik yapılarda çekme elemanlarının aksine, basınç elemanlarının dayanımı ve göçme şekli enkesit özellikleri ile beraber basınç elemanının uzunluğuna ve mesnet koşullarına da bağlıdır. Eksenel basınç kuvveti etkisindeki çelik yapı elemanlarında göçme, genelde burkulma sınır durumu ile belirlenmektedir. Ancak, bazı durumlarda eksenel basınç kuvveti etkisine maruz kalan elemanlarda burkulma meydana gelmeden, malzeme boyutları elemanın daha rijit davranmasına imkân veriyorsa örneğin elemanın boyu çok kısa ise, akma dayanımına ulaşıncaya kadar yüklenebilir. Bu durumda da elemanın yük taşıma sınır durumu, elemanın akma dayanımı olabilmektedir. Soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların et kalınlıkları sıcak şekillendirilmiş elemanlara göre çok küçük olduğundan, kısa boylu soğuk şekillendirilmiş elemanlar genellikle elastik bölgede yerel burkulma ile sınır durumlarına ulaşırlar. Kısaca ifade etmek gerekirse, soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının enkesitinin yetersiz olduğu durumlarda meydana gelen sınır durum, enkesit parçalarında oluşan bölgesel burkulmadır. Bu durum yerel buruşma olarak da ifade edilmektedir. Diğer taraftan basınç etkisinde çalışan soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının boyları yeterince arttırıldığında ise, eleman sınır durumuna genel burkulma durumlarından biriyle ulaşır. Diğer bir ifadeyle, elemanın enkesit yetersizliğinden dolayı, eleman boyunca gerçekleşen burkulma davranışıyla göçme

durumuna ulaşmaktadır. Genel burkulma ve yerel burkulma davranışlarından farklı olarak bir diğer burkulma davranışı ise, başlıkta dudakları (rijitleştiricileri) bulunan soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarında meydana gelen çarpılmalı burkulma davranışdır. Elemanın göçme sınır durumunun hangi burkulma davranışı olacağı, profilin et kalınlığına, kullanılan çelik malzemenin mekanik özelliklerine, elemanın simetri eksenlerinin nasıl olduğuna veya olmadığına, elemanın enkesit parçalarının genişlik/kalınlık oranlarına, profil başlığında dudak olup olmadığına, elemanın her iki ucundaki mesnet koşullarına ve elemanın burkulma boyuna bağlıdır.

5.1. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Profillerin LRFD Ve Eurocode3'e Göre Tasarımlarının Karşılaştırılması

Genel olarak LRFD'e göre boyutlandırmalarda kesit taşıma kapasiteleri daha fazla çıkmış ve boyutlandırma için kullanılan sayfa adetleri ise EC3'e göre daha az çıkmıştır. Boyutlandırma ve hesap uzunluğu ile ilgili sonuçlar Tablo 5.1.'de verilmiştir. Ayrıca hesapların takibi ve akışının LRFD 'de daha kolay olduğu görülmüştür [16].

Tablo 5.1. LRFD ve EC3 Karşılaştırılması [16]

No	Eleman	Kesit	Yönetmelik	Kapasite Oranı	LRFD EC3	Hesap İçin Sayfa Adedi	LRFD EC3
1	Kiriş	2C300-85-30-3	LRFD	0,839	0,88	10	0,63
			EC3-1. 3	0,957		16	
2	Kolon	2C300-85-30-3	LRFD	0,91	0,94	10	0,63
			EC3-1. 3	0,972		16	
3	Aşık-Kuşak	C160-73-20-2	LRFD	0,603	0,99	8	0,80
			EC3-1. 3	0,608		10	

Bu çalışma kapsamında, soğuk şekillendirilmiş çelik Z profillerin, eksenel basınç kuvveti dayanımları LRFD hesap yöntemine göre yapılmıştır.

5.2. Akma Sınır Durumu İçin Basınç Dayanımı

Soğuk şekillendirme yöntemleriyle veya sıcak haddeleme ile üretilmiş çelik bir eleman için göçme sınır durumlarından biri de fazla yükler altında akma dayanımını aşarak

aşırı şekil değiştirmesidir. Çelik elemanda akma başladıktan sonra plastik şekil değiştirme başlar. Bundan sonra artık yük kalktığında eski haline dönemez. Diğer taraftan yük uygulanmaya devam ettiğinde şekil değiştirme, elemanın dayanamayacağı duruma geldiğinde ise eleman göçer. Çelik elemanın akma sınır durumundan dolayı göçmemesi için kayıpsız enkesitteki gerilme, akma gerilmesinin (F_y) altında kalması gerekmektedir. Bu sayede aşırı şekil değişiminin önüne geçilmiş olacaktır. Buna göre akma sınır durumu için karakteristik dayanım (P_y), kayıpsız enkesit alanı (A_g) ile çelik malzemesinin karakteristik akma gerilmesi (F_y) çarpılarak bulunabilir.

$$P_y = A_g * F_y$$

5.3. Genel Burkulma Sınır Durumu için Basınç Dayanımı

Eksenel basınç etkisinde çalışan soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının boyları yeterince arttırıldığında, eleman sınır durumuna genel burkulma durumlarından biriyle ulaşır. Diğer bir ifadeyle, elemanın enkesit yetersizliğinden dolayı, eleman boyunca gerçekleşen burkulma davranışıyla göçme durumuna ulaşmaktadır. Bu durumda çelik elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi, ÇYTHYİY yönetmeliğinde bölüm 8.1.2’de tasarım esaslarında, şu şekilde ifade edilmektedir. “Karakteristik eksenel basınç dayanımı, eksenel basınç etkisindeki elemanın enkesit asal eksenlerinden herhangi biri etrafında eğilmeli burkulma, burulmalı burkulma ve eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumlarına göre hesaplanacak dayanımların en küçüğü olarak alınacaktır [25].”

Çelik yönetmeliğinde de ifade edilen genel burkulma davranışlarını kısaca özetlemek gerekirse; eğilmeli burkulma sınır durumu, enkesit özelliklerinden bağımsız olarak tüm basınç elemanlarında görülmektedir. Ancak özellikle çift simetri eksenli kesite sahip I profillerde, boru ve kutu profillerde kritik olan en basit burkulma sınır durumudur. Bu tür kesitlerde asal eksenlerden biri etrafındaki eğilme deformasyonları ile oluşan burkulma davranışdır. Burulmalı burkulma sınır durumu, eksenel basınç etkisine maruz kalan çelik elemanın boyuna eksen etrafında meydana gelen dönme

deformasyonuyl oluşur. Bu tür davranış gösteren çelik elemanlara örnek olarak, narin enkesit parçalarına sahip, çift simetri eksenli I kesitli, sırt sırta yerleştirilmiş dört korniyerden (+) oluşan açık enkesitli basınç elemanları gösterilebilir. Eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumu ise, enkesit kayma merkezi ile geometrik (ağırlık) merkezinin çakışmadığı elemanlarda eğilme ve burulma davranışlarının kombinasyonu şeklinde meydana gelmektedir. Bu tür davranışlara sahip profiller şu şekilde sıralanabilir, U profiller, T profiller, çift korniyerler ve eşit kollu tek korniyer gibi tek simetri eksenine sahip kesitler ve simetri eksenine sahip olmayan farklı kollu korniyerlerdir.

Eksenel basınç etkisi altında bulunan uçları mafsallı, soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanının elastik burkulma yükü (P_{cr}), aşağıda verilen genel formülün en küçük köküyle hesaplanabilmektedir.

$$r_o^2 (P_{cr} - P_x)(P_{cr} - P_y)(P_{cr} - P_z) - y_o^2 (P_{cr})^2 (P_{cr} - P_x) - x_o^2 (P_{cr})^2 (P_{cr} - P_y) = 0$$

Yukarıda verilen formülde, P_x , P_y ve P_z sırasıyla güçlü (x) eksene göre eğilmeli, zayıf (y) eksene göre eğilmeli ve z eksenine göre burulmalı burkulma yükleridir ve şu şekilde hesaplanabilirler.

$$P_x = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2}, \quad P_y = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2}, \quad P_z = \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} + GJ \right] \left(\frac{1}{r_o^2} \right)$$

- E: elastisite modülü
- G: kayma modülü
- I_x ve I_y : güçlü ve zayıf eksenindeki atalet momentleri
- J: burulma sabiti
- C_w : çarpılma sabiti
- $K_x L_x$, $K_y L_y$ ve $K_t L_t$: x, y ve z eksenlerine göre elemanın etkin burkulma boyları
- r_o : kesitin kayma merkezi etrafındaki kutupsal atalet yarıçapıdır.

ve şu şekilde hesaplanabilir;

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2 + y_o^2}$$

r_x ve r_y , kesitin asal eksenleri etrafındaki atalet yarıçaplarıdır.

5.3.1. Nokta simetrisi bulunan çelik profiller

Nokta simetrisi bulunan profillere örnek olarak, eşit başlık genişliklerine sahip soğuk şekillendirilmiş çelik Z profilleri verilebilir. Kesitleri geometrik merkeze (GM) göre simetrik olan profillerde, kayma merkezi (KM) ve geometrik merkezi (GM) çakıştığından dolayı, x_o ve y_o değerleri sıfıra eşittir. Bu durumdan dolayı genel formülde yerlerine yazıldığında, formül aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$(P_{cr} - P_x)(P_{cr} - P_y)(P_{cr} - P_z) = 0$$

Bu denklemin kökleri ise şöyle hesaplanabilmektedir.

$$(P_{cr})_1 = P_x, \quad (P_{cr})_2 = P_y, \quad (P_{cr})_3 = P_z$$

Basınca çalışan çelik elemanın kritik burkulma yükü, hesaplanan üç kökten en küçüğü olarak ifade edilir. Yukarıdaki formüle bakıldığında, eksenel basınca çalışan bir eleman, kesit şekline ve kolon uzunluğuna bağlı olarak x veya y eksenleri etrafında (P_x veya P_y) eğilmeli burkulma veya z ekseninde (P_z) burulmalı burkulma davranışı göstererek göçme sınır durumuna ulaşmaktadır. X ve y eksenlerinin asal eksenler olduğuna dikkat edilmelidir. Özetlemek gerekirse, eksenel basınç etkisindeki soğuk şekillendirilmiş çelik profillerin kesitinde nokta simetrisi bulunuyorsa, asal eksenlerinin birinin etrafında eğilerek veya eleman boyunca burularak burkulma davranışı gösterirler. Ancak bu tür kesitlerde, eğilmeli burulmalı burkulma davranışı gözlenmez.

Bu tez kapsamında incelenen soğuk şekillendirilmiş çelik Z profilleri eşit başlık genişliklerine sahip olmasından dolayı, nokta simetrisi bulunan profillerdendir.



Şekil 5.1. Nokta Simetrisi Bulunan Z Profillerinin Genel Burkulma Davranışı

5.4. Yerel burkulma Sınır Durumu için Basınç Dayanımı

Soğuk şekillendirilmiş çelik basınç elemanları, uygulanan eksenel basınç yükü etkisinde toplam göçme yüküne ulaşmadan önce enkesit parçalarında oluşan bölgesel burkulma davranışına yerel burkulma davranışı denilmektedir. Lokal (yerel) burkulma, her zaman profilin sınır durumu olmamasına karşın, her durumda basınca çalışan elemanın genel mukavemetinde bir azalmaya neden olabilir.

Yerel burkulmanın, eksenel basınç kuvveti etkisindeki çelik elemanın dayanımı üzerindeki etkisi aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

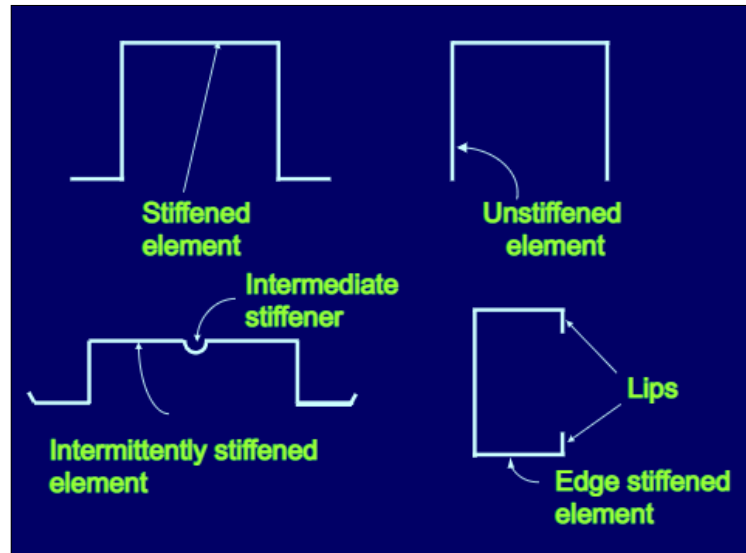
1. Kesitin şekline
2. Basınca çalışan çelik elemanın narinlik oranına
3. Elemanın genel burkulmasında hangi davranışın hakim olduğuna (eğilmeli burkulma, burulmalı burkulma veya eğilmeli burulmalı burkulma)
4. Profillerin üretildiği çeliğin türü ve mekanik özelliklerine bağlıdır.

Bu burkulma davranışının hesapları, genel burkulma davranışı hesaplarından farklıdır. Yerel burkulma hesabında, karakteristik dayanım hesabı yapılmaz. Enkesit narinlik oranları adı verilen enkesit özelliklerine bağlı koşullar ile yerel (lokal) burkulma

olmadan eleman, genel burkulma dayanımına ulaşılması sağlanır. Bunun için öncelikle elemanlar enkesit parçalarının özelliklerine göre narin ve narin olmayan kesitler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Narin ve narin olmayan kesitlerin karakteristik basınç dayanımları için farklı hesap kuralları vardır. Hiç bir enkesit parçasının genişlik / kalınlık oranı, sınır değerini aşmadığı (narin enkesit parçası bulunmayan) enkesitler narin olmayan enkesit ve en az bir enkesit parçasının genişlik / kalınlık oranının, sınır değerini aştığı enkesitler ise narin enkesit olarak sınıflandırılmaktadır.

5.4.1. Rijitleştirilmiş ve rijitleştirilmemiş eleman parçaları

Eksenel basınç kuvveti etkisi altında kalan soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarını oluşturan kesit parçaları, rijitleştirilmiş ve rijitleştirilmemiş basınç parçaları olarak iki gruba ayrılmaktadır. Rijitleştirilmemiş enkesit parçaları, basınç kuvveti doğrultusuna paralel sadece bir kenarı boyunca enkesitin diğer bir parçası ile bağlanan, basınç etkisindeki parçaları olarak tanımlanmaktadır. Basınç kuvveti doğrultusuna paralel iki kenarı boyunca enkesitin diğer parçaları ile bağlanan, basınç etkisindeki enkesit parçaları rijitleştirilmiş enkesit parçaları olarak tanımlanır.



Şekil 5.2. Rijitleştirilmiş Ve Rijitleştirilmemiş Kesit Parçaları

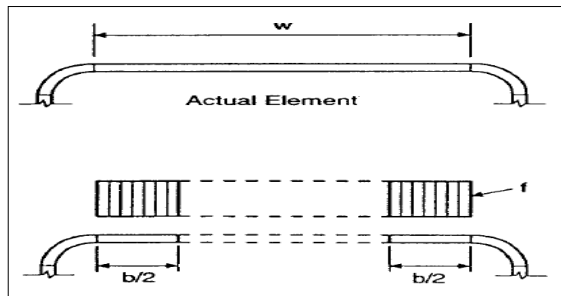
I ve T enkesitli elemanlarda yarım başlık genişliği, korniyerlerde kol boyu, U profiller için başlık genişliği ve T enkesitli elemanların gövdeleri rijitleştirilmemiş enkesit

parçalarına örnek olarak verilebilir. Rijitleştirilmiş enkesit parçalarına ise, I profillerin gövdeleri ve U ve C profillerin gövdeleri örnek olarak verilebilir. Şekil 5.2.'de bazı kesitlerin, rijitleştirilmemiş (unstiffened) ve rijitleştirilmiş (stiffened) enkesit parçaları verilmiştir.

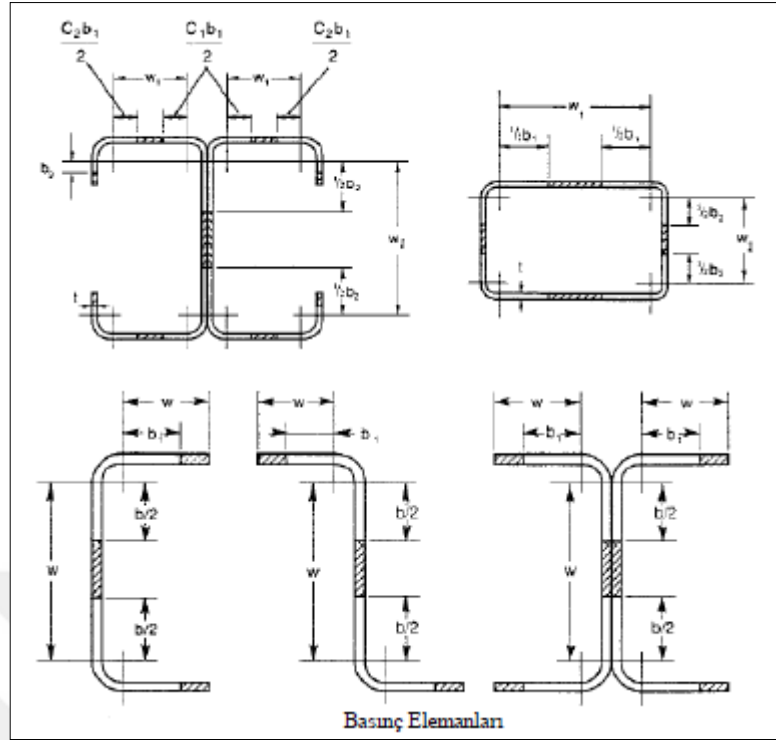
Yerel burkulma davranışının önlenmesi için enkesitin tüm parçalarının genişlik/kalınlık oranları, sınır değerinden küçük olması gerekmektedir. Tek bir enkesit parçasında bile bu koşul sağlanamıyorsa yani enkesit narin ise yerel burkulma gerçekleşiyor demektir.

Soğuk şekillendirilmiş çelik Z profillerde (bu tezde) rijitleştirilmiş bir enkesit parçası olan başlıkta burkulmada en çok etkilenen bölge, parçanın orta bölgesidir. Gövdeye bağlı kenardan ve dudağa bağlı kenardan başlığın ortasına doğru gidildikçe burkulmanın etkisi artmaktadır. Bu sebeple, etkin genişlik yöntemine göre etkin kesit özellikleri belirlenirken, başlıkta etkin olmayan bölgenin başlığın orta bölgesinde kaldığı kabul edilir.

F elastik burkulma gerilmesini hesaplamak genel olarak k levha burkulma katsayısına bağlıdır. k levha burkulma katsayısı eleman üzerindeki gerilme dağılımına ve rijitleştirilme dercesine göre değişir. LRFD'de rijitleştirilmiş elemanda uniform gerilme olması durumunda $k = 4$, rijitleştirilmemiş elemanlarda ise $k = 0,43$ alınmaktadır. [16]



Şekil 5.3. Soğuk Şekillendirilmiş Bir Z Profilinin Başlığı İçin Etkin Genişliğin Tanımlanması



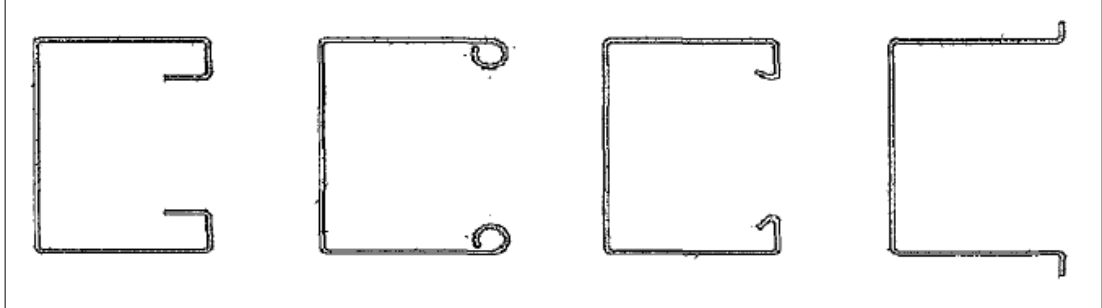
Şekil 5.4. Basınç Elemanlarında Etkili Tasarım Genişlikleri [15]

5.4.2. Uç rijitleştirici elemanlar

Yerel burkulma dayanımının ekonomik olarak artırılmasının etkili bir yolu, taşıyıcı kesiti oluşturan ince cidarlı elemanların düzlem kısımlarına boyuna rijitleştirici elemanlar ilave etmektir. [14]

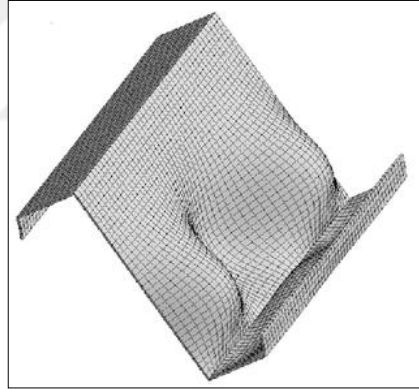
Soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının kesitleri rijitleştirilmiş ve rijitleştirilmemiş levha elemanların birleşiminden oluşur. Rijitlenmemiş elemanın uçlarındaki boyuna mesnetlenme gereksiniminden dolayı kritik burkulma dayanımı ve nihai dayanım aynı malzeme özelliklerine ve benzer boyutlara sahip rijitlenmiş bir elemanın kritik burkulma dayanımından ve nihai dayanımından çok daha küçüktür. Bu nedenle, rijitlenmemiş elemanın serbest ucuna düz bir kıvrım veya L şeklinde boyuna bir rijitleyici eleman ilave etmek faydalıdır. Böylece rijitlenmemiş eleman, rijitlenmiş eleman davranışına dönüştürülür. Bu tür rijitleştirici elemanlara uç rijitleştirici eleman, bu elemanlar kullanılarak rijitleştirilmiş elemanlara ise, uç rijitleştirilmiş elemanlar denilmektedir. [14]

Bu tez kapsamında, dudak diye isimlendirilen enkesit parçalarına, uç rijitleştirici elemanda denilmektedir.

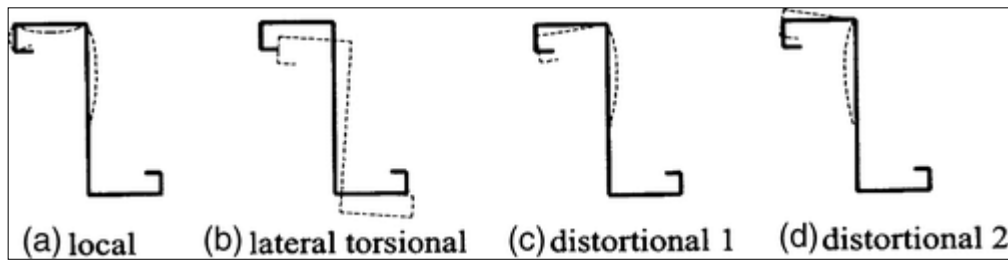


Şekil 5.5. Uç Rijitleştirici Eleman Çeşitleri [14]

Yerel burkulmanın bu çalışmada incelenen soğuk şekillendirilmiş Z profillerin basınç davranışına etkisi etkin genişlik yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Gerekli hesap esasları, AISI S100 – S16 yönetmeliğinden alınmıştır.



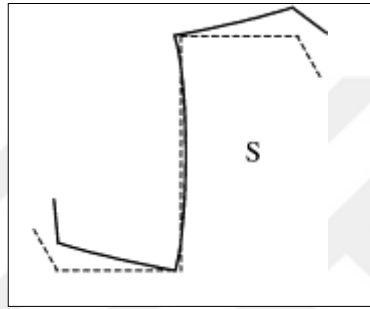
Şekil 5.6. Soğuk Şekillendirilmiş Z Profilinin Yerel Burkulma Davranışı



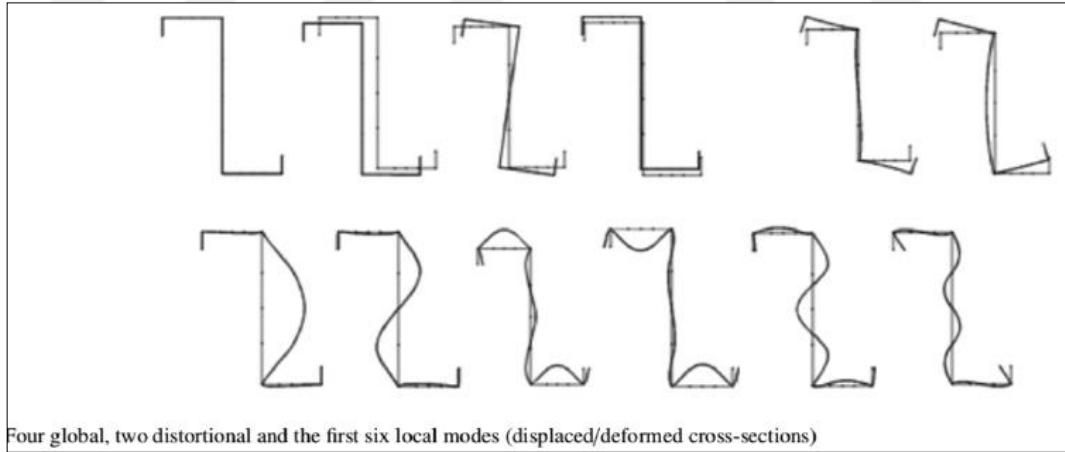
Şekil 5.7. Soğuk Şekillendirilmiş Z Profilinin Burkulma Davranışları (a: yerel burkulma, b: genel burkula, c - d: çarpılmalı burkulma)

5.5. Çarpılmalı Burkulma

"Rijitleştirici burkulma" veya "yerel burulma burkulması" olarak da adlandırılan çarpılmalı burkulma, kenar rijitleştirilmiş elemanlara sahip kesitlerde başlık - gövde bağlantısında başlığın dönüşü ile ifade edilen bir davranıştır. Z ve C profillerde olduğu gibi, başlıkta kenar rijitleştiricileri (dudakları) olan soğuk şekillendirilmiş basınç etkisine maruz kalan çelik yapı elemanlarının yük taşıma sınır durumlarını belirleyen bir burkulma davranışdır.



Şekil 5.8. Soğuk Şekillendirilmiş Z Profilin Çarpılmalı Burkulma Davranışı



Şekil 5.9. Soğuk Şekillendirilmiş Z Profilinin Burkulma Davranışları (soldan sağa doğru; dört kesit genel burkulma, iki kesit çarpılmalı burkulma, altı kesit yerel burkulma)

Soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının tasarımı için Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI) standardında, eksenel basınç kuvveti altındaki soğuk şekillendirilmiş çelik enkesit parçalarının gövdesi, genellikle tamamen rijitleştirilmiş olarak kabul edilir ve burkulma katsayısı 4 olarak alınır. Bununla birlikte, enkesit parçalarının başlıkları gövde için yeterli sınırlayıcı etki göstermezse bu kabul doğru olmayabilir.

Aynı zamanda, gövde elemanı dengesiz ise, başlık – dudak birleşiminde çarpılmalı burkulma davranışı görülebilir ve bu parçaların taşıma kapasitesini oldukça düşürebilir. Çok az burkulma yaparak göçmesine neden olabilir.

5.6. Z Profilleri İçin Eksenel Basınç Dayanımı Hesapları

Bu tez kapsamında incelenen soğuk şekillendirilmiş Z profillerin eksenel basınç etkisindeki tasarım esasları, TBDY 2019 güncel deprem yönetmeliğinde atıfta bulunulan, Amerikan Demir Çelik Enstitüsünün yayınladığı AISI S100 “Kuzey Amerika için Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Yapı Elemanlarının Tasarımı” yönetmeliğine göre yapılacaktır. TBDY 2019 yönetmeliğinde bölüm 10’da hafif çelik yapıların özel tasarım kurallarından bahsedilmektedir. Bu bölümde geçen ifade de “10.2.2.2 – Bu bölümde yer almayan ve deprem tasarımı dışındaki hususlar için, uluslararası düzeyde kabul görmüş standart ve yönetmeliklerden yararlanılabilir. ” denilmektedir. Yine deprem yönetmeliğindeki hafif çelik yapılar bölümü incelendiğinde bazı hesap esaslarında, AISI S100 yönetmeliğinden faydalandığı görülmektedir. Son güncellemeyle, soğuk şekillendirilmiş basınç elemanlarının tasarım kuralları AISI S100 yönetmeliğinde bölüm E4’te yer almaktadır. Soğuk şekillendirilmiş basınç elemanlarının tasarımında kullanılan bir diğer yönetmelik ise Avrupa yönetmeliğidir. Uluslararası kabul görmüş ve Türk Standartları Enstitüsü tarafından bu yönetmeliği ülkemizde kullanılabilmesi için kabul edilmiştir. TBDY 2019 yönetmeliğinde bazı tasarım kuralları için Avrupa yönetmeliğine atıfta bulunmaktadır. Avrupa yönetmeliği, EN 1993-1-3: Eurocode 3-Design of steel structures-Part1-3:General rules-Supplementary rules for cold-formed members and sheeting” olarak isimlendirilmektedir. TSE’nin kabul ettiği şekilde ülkemizde ise “TS EN 1993-1-3 Çelik Yapıların Projelendirilmesi-Bölüm 1-3: Genel Kurallar-Soğuk şekillendirilmiş İnce Ölçülü Elemanlar ve Saç Kaplama için “ olarak isimlendirilmektedir. Avrupa yönetmeliğinde, bölüm 6.2’de soğuk şekillendirilmiş profillerin basınç etkisinde tasarım esasları verilmektedir. 1994 yılından ülkemizde yayınlanan TS 11732 “Çelik Yapılar Hafif – Soğukta Şekillendirilmiş Profillerle Oluşturulan Hesap Kuralları” yönetmeliği, daha sonra gelişen yöntemler ve teknolojiler ışığında, güncellenmediğinden dolayı, geçerliliğini kaybetmiştir. Bu tez

kapsamında incelenen soğuk şekillendirilmiş Z profillerin eksenel basınç etkisindeki tasarım esasları, AISI S100 – 16 yönetmeliğine göre yapılmasına karar verilmiştir.

Bu yönetmeliğin en başında yer alan ve yönetmeliğin kapsamını belirten ifade şöyledir. Bu standart, karbon veya düşük alaşımlı çelik sac, şerit, levha veya çubuktan üretilmek üzere soğuk şekillendirilmiş, kalınlığı 25,4 mm fazla olmayan ve yük taşıma amacıyla kullanılan yapısal elemanların tasarımı için geçerlidir. Binalar ve dinamik etkiler için tahsis edilen binalar dışındaki yapılar, bu yönetmelik kapsamındadır. Bu yönetmelikte kullanılan tasarım yöntemleri şu şekildedir. Güvenlik Katsayılarına Göre Tasarım (GKT) (Allowable Strength Design ASD), Yük ve Dayanım Katsayılarına Göre Tasarımı (YDKT) (Load and Resistance Factor Design LRFD) ve Sınır Durumlara Göre Tasarımı (SDT) (Limit States Design LSD) yöntemleridir. Yönetmelikte hesap yöntemlerinin kullanılacağı ülkelerde belirtilmiştir. Bunlar, GKT ve YDKT - Amerika Birleşik Devletleri ve Meksika ve SDT – Kanada'dır. YDKT ve GKT hesap yöntemlerinde basınç elemanlarının karakteristik (nominal) dayanımları (R_n) aynı şekilde ifade edilir. Ancak, kullanılan katsayıları farklıdır. YDKT hesap yönteminde, elemanların tasarım dayanımları (ΦR_n), karakteristik dayanımla değeri 1'den küçük olan dayanım katsayılarıyla çarpılarak hesaplanmaktadır. GKT hesap yönteminde ise, elemanların güvenli dayanımları (R_n/Ω), karakteristik dayanımları değeri 1'den büyük olan güvenlik katsayılarına bölünerek hesaplanmaktadır. Bu çalışmada dayanım hesapları yapılırken, YDKT hesap yöntemi esas alınmıştır. Kuzey Amerika yönetmeliği Bölüm 3.2.2.'de yer alan güvenlik koşulu şu şekildedir.

$$R_u \leq R_a = \Phi R_n$$

R_u gerekli dayanımı, R_a tasarım dayanımını, R_n karakteristik dayanımı ve Φ ise dayanım katsayısını ifade etmektedir. Eksenel basınç etkisindeki elemanlar için dayanım katsayısı yönetmelikte,

$$\Phi_c = 0.85$$

olarak ifade edilmiştir.

Eksenel basınç kuvvetine maruz kalan soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının tasarım esasları AISI S100 – 16 yönetmeliğinde Bölüm E’de sunulmaktadır. Bu bölümde sunulan tasarım esasları dikkate alınarak, tez kapsamında incelenen soğuk şekillendirilmiş Z profillerin eksenel basınç dayanımı hesapları yapılmıştır. Tezin bu bölümünde, Z profillerin akma, genel burkulma, yerel burkulma ve çarpılmalı burkulma sınır durumları ele alınmıştır. Bu sınır durumlarından hepsinin ayrı ayrı hesaplanması sonucu bulundan dayanım değerlerinden en küçük olanı, basınç elemanının tasarım dayanımı olmaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen Z profiller için, bu bölümde önce akma ve genel burkulma sınır durumları için verilen esaslar özetlenecek, daha sonra yerel burkulmanın olması durumu ele alınacak ve son olarak ise çarpılmalı burkulma sınır durumu için hesap esasları anlatılacaktır.

Genel burkulma riski bulunan soğuk şekillendirilmiş Z profillerin tasarımında izlenecek yol kısaca şu şekildedir. İlk olarak profilin elastik burkulma gerilmesinin belirlenmesi, ardından elastik bölgede burkulmayan profillerde elastik ötesi davranışın etkisinin dâhil edilebilmesi için kritik burkulma gerilmesinin bulunması ve son kısımda ise yerel burkulma sınır durumuna önce ulaşılması durumunda kritik burkulma gerilmesinin etkidiği kesitin etkin alanının hesaplanması olarak sıralanabilir. Genel burkulma riski bulunmayan basınç elemanlarında ise tasarım dayanımı hesap esasları, akma sınır durumunun yerel burkulma sınır durumuyla etkileşiminin olmadığı durumlarda, karakteristik akma gerilmesi ve brüt kesit alanı kullanılarak, etkileşimin olduğu durumlarda ise karakteristik akma gerilmesiyle gerilmenin etkidiği kesitte etkin alan kullanılarak hesap yapılmasıdır.

$$P_n = A_g * F_n$$

Yukarıdaki bağıntı ile yerel burkulma ile akma veya genel burkulma etkileşiminin olmadığı durumlarda, soğuk şekillendirilmiş Z profilin karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı (P_n) hesaplanabilir. (A_g) profilin kayıpsız enkesit alanı, (F_n) karakteristik basınç gerilmesini ifade etmektedir. F_n genel burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesini göstermektedir.

Ve şu bağıntılarla bulunmaktadır.

$$\lambda_c \leq 1.5 \text{ ise } F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y, \quad \lambda_c > 1.5 \text{ ise } F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y$$

F_y basınç elemanının akma gerilmesi değeridir. λ_c ise aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}}$$

Eksenel basınca çalışan soğuk şekillendirilmiş Z profillerin, kesit şekline ve kolon uzunluğuna bağlı olarak x veya y eksenleri etrafında (P_x veya P_y) eğilmeli burkulma veya z ekseninde (P_z) burulmalı burkulma davranışı göstererek göçme sınır durumuna ulaşmaktadır. X ve y eksenlerinin asal eksenler olduğuna dikkat edilmelidir. Özetlemek gerekirse, eksenel basınç etkisindeki soğuk şekillendirilmiş çelik profillerin kesitinde nokta simetrisi bulunuyorsa, asal eksenlerinin birinin etrafında eğilerek veya eleman boyunca burularak burkulma davranışı gösterirler. Ancak bu tür kesitlerde, eğilmeli burulmalı burkulma davranışı gözlenmez. Bu tezde incelenen profiller için F_{cre} hesaplanırken, belirtilen genel burkulmanın iki modu için elastik burkulma gerilmeleri hesaplanarak küçük olanı F_{cre} olarak alınmıştır.

Verilecek olan genel burkulma hesapları, nokta simetrisi bulunan profiller için uygun olan hesap kurallarıdır. Z profilleri, nokta simetrisi bulunan profillerdendir. Genel burkulma davranışı olarak, eğilmeli burkulma ve burulmalı burkulma davranışı göstermektedirler.

5.6.1. Eğilmeli burkulma hesabı

AISI S100-16'da tanımlanan eğilmeli burkulma sınır durumu için elastik burkulma gerilmesi şu şekilde gösterilmiştir. X eksen etrafında eğilerek burkulma sınır durumu için,

$$F_{cre} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_x L_x}{i_x}\right)^2}$$

E çelik malzemenin elastisite modülü (203 GPa), $K_x L_x$ elemanın x eksenindeki burkulma boyu ve i_x ise x eksenindeki atalet yarıçapı olarak ifade edilir.

Soğuk şekillendirilmiş Z profilleri yukarıda da bahsedildiği gibi, hem x hem de y ekseninde eğilmeli burkulma davranışı gösterebilirler. X ekseninde eğilmeli burkulma için verilen bağıntı, aynı şekilde y ekseninde eğilmeli burkulma hesabı için de kullanılabilir.

5.6.2. Burulmalı burkulma hesabı

Soğuk şekillendirilmiş Z profillerinin z ekseninde elastik burulmalı burkulma gerilmesi için σ_t formülü kullanılabilir.

$$\sigma_t = \frac{1}{A i_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right]$$

Denklemden, G kayma modülü (78 GPa), J burulma sabiti, C_w çarpılma sabiti ve $K_t L_t$ elemanın burulmalı burkulma sınır durumlarında elemanın etkin boyunu ifade etmektedir. i_o , kesitin asal atalet yarıçapları i_x ve i_y aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır. Nokta simetrisi bulunan profillerde, x_o ve y_o mesafeleri sıfır olarak alınmıştır.

$$i_o = \sqrt{i_x^2 + i_y^2}$$

X ekseninde eğilmeli burkulma gerilmesi için,

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_x L_x}{i_x}\right)^2}$$

E çelik malzemenin elastisite modülü (203 GPa), $K_x L_x$ elemanın x eksenindeki burkulma boyu ve i_x ise x eksenindeki atalet yarıçapı olarak ifade edilir.

Bu tezde, elemanın x ve y ekseninde eğilmeli burkulma boyları ile burulmalı burkulma boyları eşit alınmıştır.

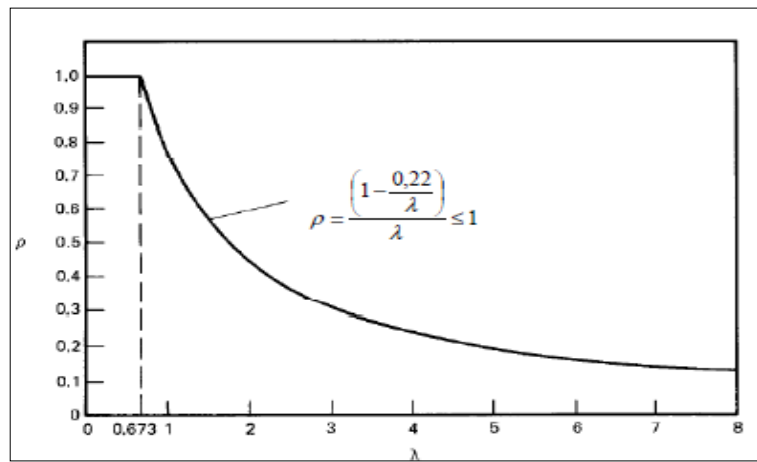
5.6.3. Yerel burkulma hesabı

Bu çalışmada yerel burkulma ile genel burkulma etkileşimi olduğunun anlaşılması durumunda, yönetmelikte belirtilen iki yöntemden biri olan etkin genişlik yöntemi kullanılarak hesaplar yapılmıştır. Bu yöntemle göre karakteristik eksenel basınç dayanımı bağıntısı şu şekildedir.

$$P_n = A_e * F_n$$

A_e , delik içermeyen Z profillerin etkin enkesit alanını ifade eder. Ve enkesiti oluşturan her parçanın etkin genişliği ile et kalınlığının çarpımının toplamına eşittir.

Dayanım hesaplarında, rijitleştirilmiş bir enkesit parçasının etkin genişliği(b), toplam başlık genişliği (w) ile yerel azaltma katsayısı (ρ) çarpılarak hesaplanmaktadır.



Şekil 5.10. Azaltma Katsayısı (ρ) ve Narinlik Katsayısı (λ) Arasındaki İlişkiyi Gösteren Grafik

$$b = \rho * w$$

Yerel azaltma katsayısı ρ ise (Şekil 6.1.),

$$\lambda \leq 0.673 \text{ ise } b = w$$

$$\lambda > 0.673 \text{ ise } b = \rho * w \quad \left(\rho = \frac{1 - 0.22}{\lambda} \right)$$

olarak hesaplanmaktadır. λ narinlik katsayısıdır. f ise elemanın basınç gerilmesi olup, basınç elemanlarında F_n 'ye eşit alınır.

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr1}}}$$

AISI S100-16 Ek 1'de yer alan yerel burkulma gerilmesi şöyle hesaplanmaktadır. f_{cr1} yerel burkulma gerilmesini ifade etmektedir. Bağıntısı şöyledir.

$$f_{cr1} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2$$

w elemanın başlık genişliğini, t et kalınlığını, μ elemanın poisson oranını ve k elemanın plaka burkulma katsayısını ifade etmektedir. Soğuk şekillendirilmiş çelik Z profilleri için k katsayıları, enkesit parçalarına göre şu şekilde sıralanabilir. Bu çalışmada incelenen profillerin mesnet koşulları her iki tarafta da mafsallı olarak alınmıştır.

Dudak: $k = 0.43$, başlık: $k = 4$, gövde: $k = 4$

5.6.4. Çarpılmalı burkulma hesabı

Başlıklarından kenar rijitleştiricisi bulunan kesitlerde görülen burkulma davranışdır. Bu tez de incelenen soğuk şekillendirilmiş Z profillerin başlıklarında dudaklar bulunduğundan dolayı, elemanın çarpılmalı burkulma davranışı kontrolü yapılacaktır. Çarpılmalı burkulma gerilmesi hesabı (F_d),

$$F_d = \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{\tilde{k}_{\phi fg} + \tilde{k}_{\phi wg}}$$

denklemleriyle yapılmaktadır.

$$k_{\phi fe} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \left(EI_{xf}(x_{of} - h_{xf})^2 + EC_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right) + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 GJ_f$$

$$k_{\phi we} = \frac{Et^3}{6h_o(1 - \mu^2)}$$

$k_{\phi} = 0$ alınmıştır.

$$\tilde{k}_{\phi fg} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \left[A_f \left((x_{of} - h_{xf})^2 \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right)^2 - 2y_{of}(x_{of} - h_{xf}) \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right) + h_{xf}^2 + y_{of}^2 \right) + I_{xf} + I_{yf} \right]$$

$$\tilde{k}_{\phi wg} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \frac{th_o^3}{60}$$

bağıntısıyla bulunur.

$$L_{cr} = \left[\frac{6\pi^4 h_o(1-\mu^2)}{t^3} \left(I_{xf}(x_{of} - h_{xf})^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right) \right]^{1/4}$$

L , L_{cr} ve L_m uzunluklarından minimum olanı alınır

$$P_{crd} = A_g * F_d$$

$$P_y = A_g * F_y$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crd}}}$$

Eğer $\lambda_d \leq 0,561$ ise $P_n = P_y$

$$\text{Eğer } \lambda_d > 0,561 \text{ ise } P_n = (1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6}) \left(\left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right) P_y$$

- P_n : profilin eksenel basınç gerilmesi
- F_d : elastik çarpılmalı burkulma dayanımı
- A_g : profilin brüt enkesit alanı
- L_m : çarpılmalı burkulma davranışını kısıtlayan tutucular arasındaki mesafe
- h_o : dıştan dışa gövde yüksekliği,
- t : et kalınlığı,
- μ : poisson oranı,
- I_{xf} : başlığın x eksenine göre atalet momenti,
- x_{of} : başlığın merkez noktasından kayma merkezine olan x mesafesi,
- h_{xf} : başlığın merkez noktasından başlık/gövde bağlantısına olan x mesafesi,
- C_{wf} : başlığın çarpılma sabiti,
- y_{of} : başlığın ağırlık merkezinden başlığın kayma merkezine olan y mesafesi,
- A_f : basınca çalışan başlığın enine kesit alanı, artı flanşın merkez noktasında yer alan bir x-y eksenini etrafındaki kenar sertleştiricisi, x eksenini merkezden sağa doğru pozitif ve y eksenini merkezden aşağıya doğru pozitif olarak ölçülmüştür.
- J_f : başlığın burulma sabiti,

olarak ifade edilmektedir.

BÖLÜM 6. SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ ÇELİK Z PROFİLLERİN TASARIM EKSENEL BASINÇ DAYANIMLARININ HESAPLANMASI

Tezin bu bölümünde, çalışma kapsamında incelenen farklı kesit boyutlarına sahip soğuk şekillendirilmiş Z profillerinin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları, AISI S100 yönetmeliğinde tanımlanan ve bir önceki bölümde kısaca açıklanan tasarım esasları ile YKDT hesap yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Eksenel basınç dayanım hesapları yerel burkulma, genel burkulma, ve çarpımalı burkulma hesapları olmak üzere üç burkulma davranışı için ayrı ayrı hesaplar yapılmıştır.

İlk olarak elemanda genel burkulma davranışının olmaması için sürekli desteklendiği durum ele alınmıştır. Bu durumda basınç elemanının tasarım dayanımı, önce tasarım akma yükleri hesaplanarak bulunmuştur. Daha sonra ise, profillerin yerel burkulma sınır durumu için hesap yapılmıştır. Soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların, başlıkta ve gövdesinde yerel burkulma olmasının istenilmediği göz önünde bulundurularak, yerel burkulma davranışı gözlenmeden elemanın maksimum taşıyacağı yükler enkesit parçaları için ayrı ayrı bulunmuş ve tablolar haline getirilmiştir.

Genel burkulma davranışlarının olduğu elemanların eksenel basınç dayanımı hesaplarında ise, eğilmeli burkulma ve burulmalı burkulma davranışları için hesap yapılmıştır. Başlık genişlikleri eşit olan Z profiller nokta simetrisi bulunan profiller olduklarından dolayı, eğilmeli burulmalı burkulma davranışı yapmazlar. Dayanım hesapları yapılırken, elemanın güçlü ve zayıf eksenleri yönündeki eğilmeli burkulma boyları için 5 farklı koşul göz önünde bulundurularak hesap yapılmıştır. Bunlar sırasıyla şu şekildedir:

$$(K_y L_y = 0), \quad (K_y L_y = K_x L_x / 2), \quad (K_y L_y = K_x L_x / 3), \quad (K_y L_y = K_x L_x / 4), \quad (K_y L_y = K_x L_x)$$

Eksenel basınç dayanımı hesaplarında, AISI S100-16 yönetmeliğinden ve “Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Elemanların Tasarımı” (Cold Formed Steel Design Vol 1) kılavuzundan faydalanılmıştır. Tasarım hesaplarında, çelik malzemenin kalitesi S235 olarak alınmıştır. Çelik malzemenin elastisite modülü $E = 203 \text{ GPa}$ ve kayma modülü $G = 78 \text{ GPa}$ olarak alınmıştır.

Bir önceki bölümde tasarım esasları özetlenmiş olmasına rağmen, bu bölümde hesapların daha iyi anlaşılabilmesi için örnek bir profil için açık hesap yapılmıştır. Enkesit değerlerinde de açık hesapları yapılan, Z 300*88*26*4 profili örnek olarak bu bölüm içinde seçilmiştir.

6.1. Profillerin Genel Burkulma Davranışını Önlemek İçin Sürekli Desteklendiği Durumlardaki Tasarım Eksenel Basınç Dayanımı Hesapları

Bu bölümde, ilk olarak profilin tasarım akma dayanımı hesaplanacak, daha sonra ise elemanın enkesit parçaları için ayrı ayrı hesap yapılmış ve enkesit parçalarının yerel burkulma davranışı göstermeden taşıyabileceği maksimum yük hesaplanmıştır. Son olarak, enkesit parçalarının ayrı ayrı tamamen etkin çalıştığı durumlar için, profilin tasarım eksenel basınç dayanımı hesaplanmıştır. Profillerin genel burkulmalarının engellendiği durumdaki dayanımları,

$$(\Phi_c P_n)_{f=F_y} = 0.85 F_y A_e$$

$$(\Phi_c P_n)_{f=f_{gövde}} = 0.85 f_{gövde} A_e$$

$$(\Phi_c P_n)_{f=f_{başlık}} = 0.85 f_{başlık} A_e$$

$$(\Phi_c P_n)_{f=f_{dudak}} = 0.85 f_{dudak} A_e$$

bağıntıları yardımıyla hesaplanacaktır. Açık hesap yapılması için seçilen örnek profil, Z 300*88*26*4 profilidir.

- Temel boyutlar,

$$A = 300 \text{ mm}, B = 88 \text{ mm}, C = 26 \text{ mm}, t = 4 \text{ mm}, R = 3 \text{ mm}$$

- Gövde, başlık ve dudakların düz genişlikleri,

$$r = R + t/2 = 3 + 4/2 = 5 \text{ mm} \quad \gamma = 90\pi/180 = 1.57 \text{ radyan}$$

$$w_{\text{gövde}} = A' - (2r + t) = 300 - (2 \cdot 5 + 4) = 286 \text{ mm}$$

$$w_{\text{başlık}} = B' - \left[r + \frac{t}{2} + \alpha \left(r + \frac{t}{2} \right) \tan \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right] = 88 - (5 + 4/2 + 1(5 + 4/2) \tan(90/2)) = 74 \text{ mm}$$

$$w_{\text{dudak}} = \alpha [C' - \left(r + \frac{t}{2} \right) \tan \left(\frac{\gamma}{2} \right)] = 1(26 - (5 + 4/2) \tan(45)) = 19 \text{ mm}$$

Bu bölümde gereken enkesit özellikleri, Tablo 4.3.'ten alınmıştır. Tablo 4.3.'teki değerler Yöntem 1 kullanılarak hesaplanan değerlerdir.

- Enkesit elemanları sınır koşulları;
1. Başlık enkesit parçası sınır koşulu,

$$w/t < 60$$

$$74/4 = 18,50$$

- Gövde enkesit parçası sınır koşulu,

$$D/t < 200$$

$$300/4 = 75$$

- Dudak enkesit parçası sınır koşulu,

$$w/t < 60$$

$$19/4 = 4,75$$

- Profilin gövdesinin, başlığının ve dudağının tamamen etkin olduğu gerilme değerlerinin hesabı

$$\text{Alan} = 2013,66 \text{ mm}^2$$

Başlık, gövde ve dudakların tamamen etkin olmaları için yerel azaltma katsayısı (ρ), 1 değerine eşit olmak zorundadır. Bu sebeple, narinlik katsayısı (λ)'nın değeri 0. 673 değerinden küçük çıkmalıdır.

- Narinlik şartı,

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr1}}} \leq 0.673$$

Bölüm 6'da yerel burkulma hesabında verilen formül, F_{cr1} 'de yerine yazılırsa, bir enkesit parçasının yerel burkulma göstermeden taşıyabileceği maksimum gerilme değeri elde edilmiş olur.

$$f_{maks} = 0.673^2 k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w}\right)^2$$

Yukarıdaki formülde, plak burkulma katsayısı (k) değerleri ve poisson oranı (μ) yerine yazılırsa enkesit parçaları için ayrı ayrı gerilme formülü elde edilmiş olur. Şekil 6.2.'ye bakılarak alınan k değerleri,

dudak: $k = 0.43$, başlık: $k = 4$, gövde: $k = 4$

$\mu = 0.3$ ve $E = 203000$ MPa alındı.

- Gövde enkesit parçası için taşıyabileceği en büyük gerilme hesabı,

$$f_{gövde} = 0.673^2 4 \frac{\pi^2 203000}{12(1 - 0.3^2)} \left(\frac{t}{w_{gövde}}\right)^2 = 1.638 (203000) \left(\frac{4}{286}\right)^2 = 65.042 \text{ MPa}$$

- Başlık enkesit parçası için taşıyabileceği en büyük gerilme hesabı,

$$f_{başlık} = 0.673^2 4 \frac{\pi^2 203000}{12(1 - 0.3^2)} \left(\frac{t}{w_{başlık}}\right)^2 = 1.638 (203000) \left(\frac{4}{74}\right)^2 = 971.553 \text{ MPa}$$

- Dudak enkesit parçası için taşıyabileceği en büyük gerilme hesabı,

$$f_{\text{dudak}} = 0.673^2 \cdot 0.43 \cdot \frac{\pi^2 203000}{12(1-0.3^2)} \left(\frac{t}{w_{\text{dudak}}} \right)^2 = 0.176 (203000) \left(\frac{4}{19} \right)^2 = 1583.512 \text{ MPa}$$

Hesaplardan da görüldüğü üzere, incelenen profilin önce gövdesi burkulacaktır. Enkesitin tamamen etkin olduğu gerilme değeri, 65 MPa'dır. Bu değer, profilin üretildiği çelik malzemesinin akma dayanımının % 27'sidir.

6.1.1. Tasarım akma dayanımı hesabı

Bu bölümde, elemanın diğer sınır durumlarından bağımsız olarak, akma sınır durumuna ulaşıncaya kadar taşıyacağı maksimum tasarım akma yükünü bulunması hedeflenmektedir. Profillerin tasarım akma dayanımı şu formülle hesaplanmaktadır.

$$(\Phi_c P_n)_{f=F_y} = 0.85 F_y A_e$$

Profilin tasarım akma dayanımının hesaplanabilmesi için, yukarıdaki formülden de görüldüğü gibi, etkin kesit alanının hesaplanması gerekmektedir. Bunun için ise $f=F_y$ durumunda, başlıkların, gövdenin ve dudakların etkin genişlikleri bulunmalıdır.

- Gövde enkesit parçasının elastik burkulma gerilmesi hesabı,

$$F_{\text{crl,gövde}} = 4 \cdot \frac{\pi^2 203000}{12(1-0.3^2)} \left(\frac{t}{w_{\text{gövde}}} \right)^2 = 733893.66 \left(\frac{4}{286} \right)^2 = 143.55 \text{ MPa}$$

- Başlık enkesit parçasının elastik burkulma gerilmesi hesabı,

$$F_{\text{crl,başlık}} = 4 \cdot \frac{\pi^2 203000}{12(1-0.3^2)} \left(\frac{t}{w_{\text{başlık}}} \right)^2 = 733893.66 \left(\frac{4}{74} \right)^2 = 2144.32 \text{ MPa}$$

- Dudak enkesit parçasının elastik burkulma gerilmesi hesabı,

$$F_{cr1,dudak} = 0.43 \frac{\pi^2 203000}{12(1-0.3^2)} \left(\frac{t}{w_{dudak}} \right)^2 = 78893.57 \left(\frac{4}{19} \right)^2 = 3496.668 \text{ MPa}$$

- Buradan narinlik katsayılarına geçilir

$$\lambda_{gövde} = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr1}}} = \sqrt{\frac{235}{143.55}} = 1.28 \geq 0.673$$

$$\lambda_{başlık} = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr1}}} = \sqrt{\frac{235}{2144.32}} = 0.33 \leq 0.673$$

$$\lambda_{dudak} = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr1}}} = \sqrt{\frac{235}{3496.67}} = 0.26 \leq 0.673$$

Gövde enkesit parçasının narinlik katsayısı, sınır değerden büyük olduğundan dolayı etkin genişlik hesabı yapılmalıdır.

- Yerel azaltma katsayısı ρ ise,

$$\lambda > 0.673 \text{ ise } \rho_{gövde} = \frac{1-0.22/1.28}{1.28} = 0.646972$$

$$b_{e,gövde} = \rho_{gövde} * w_{gövde} = 0.646972 * 286 = 185.034 \text{ mm}$$

- Profilin etkin alanı (A_e),

$$A_e = \text{Alan} - t (w_{gövde} - b_{e,gövde}) = 2013.66 - 4*(286 - 185.034) = 1609.796 \text{ mm}^2$$

- Profilin akma sınır durumunda tasarım eksenel basınç dayanımı,

$$(\Phi P_n)_{f=F_y} = 0.85 F_y A_e = 0.85 * 235 * 1609.796 * 10^{-3} = 321.55 \text{ kN}$$

6.1.2. Gövdenin tamamen etkin çalıştığı durum için tasarım eksenel basınç dayanımı hesabı

Gövdenin tamamen etkin olduğu durumda en büyük $f=f_{gövde} = 65.042$ MPa olarak daha önce bulunmuştu. Tasarım akma dayanımı hesabında, enkesit parçasının elastik burkulma gerilmesi $F_{cr1,başlık} = 2144.32$ MPa ve $F_{cr1,dudak} = 3496.668$ MPa olarak hesaplanmıştı. Bu durumda, gövdenin tamamen etkin çalıştığı göz önüne alınarak, sadece başlıkların ve dudakların etkin genişlikleri hesaplanması gerekmektedir.

- Başlık için narinlik katsayısı hesabı,

$$\lambda_{başlık} = \sqrt{\frac{f_{gövde}}{F_{cr1,başlık}}} = \sqrt{\frac{65.042}{2144.32}} = 0.174 < 0.673$$

Başlık enkesit parçasının narinlik katsayısı, sınır değerden küçük olduğundan dolayı yerel azaltma katsayısı 1 alınır.

- Yerel azaltma katsayısı ρ ,

$$\lambda < 0.673 \text{ ise } \rho_{başlık} = 1$$

$$b_{e,başlık} = \rho_{gövde} * w_{başlık} = 1 * 74 = 74 \text{ mm}$$

- Dudak için narinlik katsayısı hesabı,

$$\lambda_{dudak} = \sqrt{\frac{f_{gövde}}{F_{cr1,dudak}}} = \sqrt{\frac{65.042}{3496.668}} = 0.136 < 0.673$$

Dudak enkesit parçalarının narinlik katsayısı, sınır değerden küçük olduğundan dolayı yerel azaltma katsayısı 1 alınır.

- Yerel azaltma katsayısı ρ ,

$$\lambda < 0.673 \text{ ise } \rho = 1$$

$$b_{e,b\text{aşlık}} = \rho_{b\text{aşlık}} * w_{b\text{aşlık}} = 1 * 74 = 74 \text{ mm}$$

$$b_{e,dudak} = \rho_{dudak} * w_{dudak} = 1 * 19 = 19 \text{ mm}$$

- Profilin etkin alanı (A_e),

$$A_e = \text{Alan} - t (w_{b\text{aşlık}} - b_{e,b\text{aşlık}}) - t (w_{dudak} - b_{e,dudak}) = 2013.66 \text{ mm}^2$$

- Profilin tasarım eksenel basınç dayanımı ($f=f_{g\ddot{ö}vde}$),

$$(\Phi_c P_n)_{f=f_{g\ddot{ö}vde}} = 0.85 * f_{g\ddot{ö}vde} * A_e = 0.85 * 65.042 * 2013.66 * 10^{-3} = 111.327 \text{ kN}$$

6.1.3. Başlıkların tamamen etkin çalıştığı durum için tasarım eksenel basınç dayanımı hesabı

Başlıkların tamamen etkin olduğu durumda en büyük $f=f_{b\text{aşlık}} = 971.553 \text{ MPa}$ olarak daha önce bulunmuştu. Tasarım akma dayanımı hesabında, enkesit parçasının elastik burkulma gerilmesi $F_{cr1,g\ddot{ö}vde} = 143.55 \text{ MPa}$ ve $F_{cr1,dudak} = 3496.668 \text{ MPa}$ olarak hesaplanmıştı. Bu durumda, başlıkların tamamen etkin çalıştığı göz önüne alınarak, sadece gövdenin ve dudakların etkin genişlikleri hesaplanması gerekmektedir.

- Gövde için narinlik katsayısı hesabı,

$$\lambda_{g\ddot{ö}vde} = \sqrt{\frac{f_{b\text{aşlık}}}{F_{cr1,g\ddot{ö}vde}}} = \sqrt{\frac{971.553}{143.55}} = 2.601 \geq 0.673$$

Gövde enkesit parçasının narinlik katsayısı, sınır değerden büyük olduğundan dolayı yerel azaltma katsayısı hesabı yapılmalıdır.

- Yerel azaltma katsayısı ρ ,

$$\lambda \geq 0.673 \text{ ise } \rho_{g\ddot{ö}vde} = \frac{1 - 0.22/\lambda}{\lambda} = 0.352$$

$$b_{e,g\ddot{ö}vde} = \rho_{g\ddot{ö}vde} * w_{g\ddot{ö}vde} = 0.352 * 286 = 100.657 \text{ mm}$$

- Dudak için narinlik katsayısı hesabı,

$$\lambda_{dudak} = \sqrt{\frac{f_{başlık}}{F_{cr1,dudak}}} = \sqrt{\frac{971.553}{3496.668}} = 0.527 < 0.673$$

Dudak enkesit parçalarının narinlik katsayısı, sınır değerden küçük olduğundan dolayı yerel azaltma katsayısı 1 alınır.

- Yerel azaltma katsayısı ρ ,

$$\lambda < 0.673 \text{ ise } \rho = 1$$

$$b_{e,dudak} = \rho_{dudak} * w_{dudak} = 1 * 19 = 19 \text{ mm}$$

- Profilin etkin alanı (A_e),

$$A_e = \text{Alan} - t (w_{gövde} - b_{e,gövde}) - t (w_{dudak} - b_{e,dudak}) = 2013.66 - 4(286 - 100.657) = 1272.288 \text{ mm}^2$$

- Profilin tasarım eksenel basınç dayanımı ($f=f_{başlık}$),

$$(\Phi_c P_n)_{f=f_{başlık}} = 0.85 * f_{başlık} * A_e = 0.85 * 971.553 * 1272.288 * 10^{-3} = 1050.68 \text{ kN}$$

6.1.4. Dudakların tamamen etkin çalıştığı durum için tasarım eksenel basınç dayanımı hesabı

Dudakların tamamen etkin olduğu durumda en büyük $f=f_{dudak} = 1583.512 \text{ MPa}$ olarak daha önce bulunmuştu. Tasarım akma dayanımı hesabında, enkesit parçasının elastik burkulma gerilmesi $F_{cr1,gövde} = 143.55 \text{ MPa}$ ve $F_{cr1,başlık} = 2144.32 \text{ MPa}$ olarak hesaplanmıştı. Bu durumda, dudakların tamamen etkin çalıştığı göz önüne alınarak, sadece gövdenin ve başlıkların etkin genişlikleri hesaplanması gerekmektedir.

- Gövde için narinlik katsayısı hesabı,

$$\lambda_{gövde} = \sqrt{\frac{f_{dudak}}{F_{crl,gövde}}} = \sqrt{\frac{1583.512}{143.55}} = 3.321 \geq 0.673$$

Gövde enkesit parçasının narinlik katsayısı, sınır değerden büyük olduğundan dolayı yerel azaltma katsayısı hesabı yapılmalıdır.

- Yerel azaltma katsayısı ρ ,

$$\lambda \geq 0.673 \text{ ise } \rho_{gövde} = \frac{1-0.22/3.321}{3.321} = 0.282$$

$$b_{e,gövde} = \rho_{gövde} * w_{gövde} = 0.282 * 286 = 80.652 \text{ mm}$$

- Başlıklar için narinlik katsayısı hesabı,

$$\lambda_{başlık} = \sqrt{\frac{f_{dudak}}{F_{crl,başlık}}} = \sqrt{\frac{1583.512}{2144.32}} = 0.86 < 0.673$$

Başlık enkesit parçalarının narinlik katsayısı, sınır değerden büyük olduğundan dolayı yerel azaltma katsayısı hesabı yapılmalıdır.

- Yerel azaltma katsayısı ρ ,

$$\lambda \geq 0.673 \text{ ise } \rho_{başlık} = \frac{1-0.22/0.86}{0.86} = 0.865$$

$$b_{e,başlık} = \rho_{başlık} * w_{başlık} = 0.865 * 74 = 64.01 \text{ mm}$$

- Profilin etkin alanı (A_e),

$$A_e = \text{Alan} - t(w_{gövde} - b_{e,gövde}) - t(w_{başlık} - b_{e,başlık}) = 2013.66 - 4(286-80.652) - 4(74-64.01) = 1152.308 \text{ mm}^2$$

- Profilin tasarım eksenel basınç dayanımı ($f=f_{\text{dudak}}$),

$$(\Phi_c P_n)_{f=f_{\text{dudak}}} = 0.85 \cdot f_{\text{dudak}} \cdot A_e = 0.85 \cdot 1583.512 \cdot 1152.308 \cdot 10^{-3} = 1550.99 \text{ kN}$$

Tablo 6.1. Z profillerin akma ve yerel burkulma sınır durumlarındaki tasarım eksenel basınç dayanımları

PROFİL ADI	$\Phi_c P_n$ (kN)			
	$f = F_y$	$f = f_{\text{gövde}}$	$f = f_{\text{başlık}}$	$f = f_{\text{dudak}}$
Z 100*50*15*1,2	44,028	12,744	50,798	74,374
Z 100*50*15*1,5	57,947	25,053	101,263	151,656
Z 100*50*15*2	82,442	60,034	248,542	387,451
Z 100*50*15*2,5	106,219	118,549	617,373	819,129
Z 100*50*15*3,5	145,310	332,650	1839,174	2673,212
Z 100*50*15*4	164,127	502,226	2866,100	4389,875
Z 120*50*15*1	35,009	5,406	29,271	42,119
Z 120*50*15*1,2	44,492	9,370	51,262	74,838
Z 120*50*15*1,5	58,864	18,386	102,180	152,573
Z 140*70*16*1,2	52,341	8,486	31,773	75,304
Z 140*70*17*1,5	71,931	16,757	63,402	135,081
Z 140*70*18*2	104,573	40,276	154,980	302,455
Z 140*70*20*2,5	139,887	80,305	314,855	502,600
Z 140*75*17*3	177,148	141,674	489,784	1355,680
Z 140*75*20*4	244,027	347,867	1484,206	2503,665
Z 160*60*15*1	37,958	3,669	22,634	45,580
Z 160*61*15*1,2	48,956	6,352	39,527	81,004
Z 160*61*15*1,5	66,562	12,528	76,572	166,296
Z 160*63*15*2	97,709	30,252	177,663	430,651
Z 160*64*15*2,5	131,132	59,795	347,799	916,975
Z 160*66*15*3	167,877	105,275	588,476	1747,453
Z 160*68*15*3,5	206,370	170,335	915,349	3077,300
Z 160*69*15*4	242,429	257,392	1813,741	5093,221
Z 180*50*15*1,2	45,235	4,958	52,005	75,581
Z 180*51*15*1,5	60,928	9,769	100,525	155,236
Z 180*53*15*2	90,580	23,552	231,953	402,397
Z 180*54*15*2,5	122,848	46,480	454,322	856,683
Z 180*56*15*3	158,872	81,701	764,658	1633,594
Z 180*59*15*4	235,488	199,106	1771,256	4761,249
Z 200*55*16*1	37,266	2,545	26,123	38,921
Z 200*57*15*1,2	48,280	4,429	42,922	79,697
Z 200*57*16*1,5	65,406	8,719	86,097	142,016
Z 200*60*15*2	96,853	20,984	192,613	423,660
Z 200*60*16*2,5	131,182	41,366	390,431	770,829
Z 200*60*18*3	169,608	72,581	707,382	1093,572
Z 200*64*16*3,5	210,737	117,036	1024,025	2536,322
Z 200*64*17*4	252,363	176,361	1585,354	3510,423
Z 220*68*15*1,2	51,934	4,089	33,513	85,664
Z 220*68*16*1,5	71,816	8,044	66,900	152,571
Z 220*68*17*2	105,393	19,227	163,634	340,150
Z 220*68*19*2,5	143,254	38,072	332,697	559,024
Z 220*68*20*3	183,488	66,347	593,944	916,710
Z 240*70*15*1,2	52,640	3,632	32,294	86,790
Z 240*70*16*1,5	72,862	7,140	64,420	154,569
Z 240*73*15*2	108,245	17,140	145,997	460,784

Tablo 6.1. (Devamı)

Z 240*73*16*2,5	146,147	33,733	293,634	837,947
Z 240*70*21*3	188,646	59,034	574,389	839,191
Z 240*73*20*3,5	234,459	94,940	869,160	1585,240
Z 240*73*21*4	281,495	142,823	1338,156	2245,191
Z 260*65*19*1,5	72,578	6,290	73,496	106,892
Z 260*70*15*2	106,230	15,013	155,267	453,005
Z 260*70*17*2,5	144,902	29,671	315,257	719,173
Z 260*70*19*3	187,560	51,880	566,629	1037,757
Z 260*75*17*4	281,458	125,325	1247,503	3767,445
Z 280*59*17*2	99,364	12,934	202,989	322,648
Z 280*60*17*2,5	135,555	25,423	397,483	676,510
Z 280*62*17*3	176,690	44,426	671,433	1267,403
Z 280*63*17*3,5	220,165	71,003	1068,894	2175,572
Z 280*65*17*4	268,163	107,187	1560,395	3547,508
Z 300*88*17*1,5	82,197	5,648	48,516	120,767
Z 300*88*20*2	124,627	13,469	117,713	272,738
Z 300*88*22*2,5	169,065	26,572	236,894	463,728
Z 300*88*24*3	217,201	46,380	421,925	706,372
Z 300*88*25*3,5	267,843	74,100	686,494	1078,779
Z 300*88*26*4	321,608	111,290	1050,323	1550,168
Z 320*80*18*2	117,467	11,787	132,606	324,350
Z 320*80*20*2,5	159,558	23,243	267,744	540,123
Z 320*80*22*3	206,051	40,552	478,475	808,958
Z 320*85*18*3,5	255,196	64,760	690,820	2154,825
Z 320*85*20*4	309,233	97,604	1065,058	2679,973
Z 340*70*18*2	109,691	10,402	160,099	307,573
Z 340*70*20*2,5	149,992	20,503	324,961	512,705
Z 340*75*17*3	194,800	35,757	507,436	1373,331
Z 340*75*18*3,5	242,386	57,081	829,637	2044,347
Z 340*75*20*4	295,014	85,996	1285,422	2546,431
Z 360*60*18*2	101,891	9,247	200,679	289,726
Z 360*65*15*2,5	140,378	18,221	348,034	931,230
Z 360*65*17*3	183,464	31,765	627,631	1295,108
Z 360*65*18*3,5	229,440	50,690	1031,865	1928,665
Z 360*70*15*4	280,592	76,341	1373,630	5161,220
Z 380*53*15*2	94,071	8,274	235,444	405,887
Z 380*55*15*2,5	130,724	16,299	448,162	869,952
Z 380*56*15*3	170,859	28,294	776,645	1645,581
Z 380*58*15*3,5	216,382	45,316	1202,602	2897,278
Z 380*60*15*4	265,999	68,226	1751,508	4824,779
Z 400*100*21*2	133,067	9,320	100,675	262,287
Z 400*100*22*2,5	182,958	18,284	200,675	490,309
Z 400*100*24*3	234,899	31,837	355,954	746,710
Z 400*100*26*3,5	291,318	50,945	580,358	1056,189
Z 400*100*27*4	350,338	76,388	884,806	1521,061

6.2. Profillerin Genel Burkulma Davranışlarının Hâkim Olduğu Durumlarda Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları

Bu tez kapsamında incelenen profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları ($\Phi_c P_n$), profillerin genel burkulma davranışlarını önlemek için sürekli desteklendiği durumlar için tasarım eksenel basınç dayanımları, bölüm 6.1.'de verilmişti. Bu bölümde ise, profillerin genel burkulma davranışı yapmalarına izin verilen durumlardaki tasarım eksenel basınç dayanımları hesaplanmıştır.

Güçlü (x) eksenindeki burkulma boyu ($K_x L_x$), 2000 mm alınmıştır. Buna göre, $K_y L_y = 0$, $K_y L_y = K_x L_x / 3$ ve $K_y L_y = K_x L_x$ burkulma boyları arasındaki ilişki olmak üzere ayrı ayrı hesap yapılmıştır.

Diğer hesaplarda olduğu gibi örnek seçilen bir profilin açık hesabı yapılmıştır.

Z 300*88*26*4 Profili,

- Temel kesit özellikleri,

$$A = 300 \text{ mm}, B = 88 \text{ mm}, C = 26 \text{ mm}, t = 4 \text{ mm}, R = 3 \text{ mm}$$

$$\text{Alan} = 2013,66 \text{ mm}^2, i_x = 114 \text{ mm}, i_y = 37,37 \text{ mm}, J = 10740 \text{ mm}^4, C_w = 4,7 \cdot 10^{10} \text{ mm}^6$$

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2} = \sqrt{114^2 + 37,37^2} = 119,97 \text{ mm}$$

$$E = 203 \text{ GPa ve } G = 78 \text{ GPa}$$

- Bir önceki bölümde hesaplanan ve bu bölümde de kullanılacak değerler,

$$w_{\text{gövde}} = 286 \text{ mm}, w_{\text{başlık}} = 74 \text{ mm}, w_{\text{dudak}} = 19 \text{ mm}$$

$$F_{\text{crl,gövde}} = 143.55 \text{ MPa}, F_{\text{crl,başlık}} = 2144.32 \text{ MPa}, F_{\text{crl,dudak}} = 3496.668 \text{ MPa}$$

Porfillerin her iki ucu da mafsallı olarak hesap yapılmıştır. Açık hesapları verilen profilin burkulma boyları verilmiştir. X ekseninde eleman tutulma boyu, açık hesabı verilen üç durum içinde aynı alınmıştır. Y ve z eksenindeki eleman tutulma boyları eşit alınmıştır.

$$L_x = 2000 \text{ mm}, L_{y1} = L_{t1} = 0,1 \text{ mm}, L_{y2} = L_{t2} = 666,667 \text{ mm}, L_{y3} = L_{t3} = 2000 \text{ mm}$$

Elemanların her iki ucu da mafsallı olduğundan dolayı K katsayıları eşittir.

$$K_x = K_y = K_t = 1$$

Burkulma katsayıları belirlendiğine göre burkulma boyları hesaplanabilir.

$$K_x L_x = (2000)(1) = 2000, K_{y1} L_{y1} = (0,1)(1) = 0,1, 2000,$$

$$K_{y2} L_{y2} = (666,667)(1) = 666,667, 2000, K_{y3} L_{y3} = (2000)(1) = 2000$$

6.2.1. $K_y L_y = 0$ durumunda profilin aksenal basınç dayanımı hesabı

$K_y L_y = 0$ durumu, zayıf ekseninde burkulma gerilmesinde doğru sonuç vermeyeceğinden dolayı, sifıra yakın olan 0,1 mm değeri boy olarak alınmıştır.

- X ve y ekseninde etrafında eğilmeli burkulma gerilmesi,

$$(F_{cre})_1 = \sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2} = \frac{\pi^2 203000}{(0,1/37,37)^2} = 2,80 * 10^{11} \text{ MPa}$$

$$(F_{cre})_2 = \sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2} = \frac{\pi^2 203000}{(2000/114)^2} = 6509,47 \text{ MPa}$$

- z ekseninde burulmalı burkulma gerilmesi,

$$(F_{cre})_3 = \sigma_t = \frac{1}{A r_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] = \frac{1}{2013,66 * 119,97^2} \left[78000 * 10740 + \frac{\pi^2 203000 * 4,7 * 10^{10}}{(0,1)^2} \right] = 3,25 * 10^{11} \text{ MPa}$$

En küçük burkulma gerilmesi, elastik burkulma gerilmesi olarak alınır. Buradan $F_{cre} = 6509,47$ MPa alınmıştır.

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} = \sqrt{\frac{235}{6509,47}} = 0,19 < 1,5 \text{ olduğundan dolayı,}$$

$$F_n = (0,658^{\lambda_c^2})F_y = (0,658^{0,19^2})235 = 231,475 \text{ MPa}$$

Şimdiki adımda ise, yerel burkulmanın genel burkulmadan önce olup olmadığı kontrol edilecek ve olması durumunda kesitin etkin alanı hesaplanacaktır.

$$\lambda_{başlık} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{crl,başlık}}} = \sqrt{\frac{231,475}{2144,32}} = 0,328$$

Bu değer 0,673'ten küçük olduğundan dolayı etkin genişlik hesabında gerek yoktur.

$$\lambda_{gövde} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{crl,gövde}}} = \sqrt{\frac{231,475}{143,55}} = 1,27$$

Bu değer 0,673'ten büyük olduğundan dolayı etkin genişlik hesabı yapılmalıdır.

$$\rho_{gövde} = \frac{1-0,22/1,27}{1,27} = 0,65$$

$$b_{e,gövde} = \rho * w_{gövde} = 0,65 * 286 = 185,90 \text{ mm}$$

$$\lambda_{dudak} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{crl,dudak}}} = \sqrt{\frac{231,475}{3496,668}} = 0,257$$

Bu değer 0,673'ten küçük olduğundan dolayı etkin genişlik hesabında gerek yoktur.

Etkin genişlikler hesaplandıktan sonra etkin alan bulunur.

$$A_e = \text{Alan} - t (w_{gövde} - b_{e,gövde}) = 2013,66 - 4(286-185,90) = 1613,26 \text{ mm}^2$$

- Profilin tasarım eksenel basınç dayanımı ($f=f_{dudak}$),

$$(\Phi_c P_n) = 0.85 \cdot F_n \cdot A_e = 0.85 \cdot 231,475 \cdot 1613,26 \cdot 10^{-3} = 317,415 \text{ kN}$$

6.2.2. $K_y L_y = K_x L_x / 3$ durumunda profilin aksel basınç dayanımı hesabı

Bu bölümde, $K_y L_y = K_x L_x / 3$ durumu için dayanım hesabı yapılmıştır. Zayıf ekseninde burkulma boyu kuvvetli eksenindeki burkulma boyunun üçte birine eşit olduğu kabul edilerek hesap yapılmıştır. $K_x L_x = 2000 \text{ mm}$ ve $K_y L_y = 2000/3 \text{ mm}$ olarak alınmıştır. Zayıf eksenindeki eğilmeli burkulma boyu ve z eksenindeki burulmalı burkulma boyu eşit alınmıştır. ($K_y L_y = K_t L_t$)

- x ve y eksenleri etrafında eğilmeli burkulma gerilmesi,

$$(F_{cre})_1 = \sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2} = \frac{\pi^2 203000}{((\frac{2000}{3}) / 37,37)^2} = 6295.42 \text{ MPa}$$

$$(F_{cre})_2 = \sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2} = \frac{\pi^2 203000}{(2000 / 114)^2} = 6509,47 \text{ MPa}$$

- z ekseninde burulmalı burkulma gerilmesi,

$$(F_{cre})_3 = \sigma_t = \frac{1}{A r_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] = \frac{1}{2013,66 \cdot 119,97^2} \left[78000 \cdot 10740 + \frac{\pi^2 203000 \cdot 4,7 \cdot 10^{10}}{(2000/3)^2} \right] = 7310,46 \text{ MPa}$$

En küçük burkulma gerilmesi, elastik burkulma gerilmesi olarak alınır. Buradan

$$F_{cre} = 6295,42 \text{ MPa alınmıştır.}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} = \sqrt{\frac{235}{6295,42}} = 0,193 < 1,5 \text{ olduğundan dolayı,}$$

$$F_n = (0,658^{\lambda_c^2}) F_y = (0,658^{0,193^2}) 235 = 231,364 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{başlık} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{crl,başlık}}} = \sqrt{\frac{231,364}{2144,32}} = 0,33$$

Bu değer 0,673'ten küçük olduğundan dolayı etkin genişlik hesabında gerek yoktur.

$$\lambda_{gövde} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{crL,gövde}}} = \sqrt{\frac{231,364}{143,55}} = 1,27$$

Bu değer 0,673'ten büyük olduğundan dolayı etkin genişlik hesabı yapılmalıdır.

$$\rho_{gövde} = \frac{1-0,22/1,27}{1,27} = 0,65$$

$$b_{e,gövde} = \rho * w_{gövde} = 0,65 * 286 = 185,90 \text{ mm}$$

$$\lambda_{dudak} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{crL,dudak}}} = \sqrt{\frac{231,364}{3496,668}} = 0,257$$

Bu değer 0,673'ten küçük olduğundan dolayı etkin genişlik hesabında gerek yoktur.

Etkin genişlikler hesaplandıktan sonra etkin alan bulunur.

$$A_e = \text{Alan} - t (w_{gövde} - b_{e,gövde}) = 2013,66 - 4(286-185,90) = 1613,26 \text{ mm}^2$$

- Profilin tasarım eksenel basınç dayanımı ($f=f_{dudak}$),

$$(\Phi_c P_n) = 0,85 * F_n * A_e = 0,85 * 231,364 * 1613,26 * 10^{-3} = 317,263 \text{ kN}$$

6.2.3. $K_y L_y = K_x L_x$ durumunda profilin eksenel basınç dayanımı hesabı

Bu bölümde, $K_y L_y = K_x L_x$ durumu için dayanım hesabı yapılmıştır. Zayıf ekseninde burkulma boyu kuvvetli eksenindeki burkulma boyunun üçte birine eşit olduğu kabul edilerek hesap yapılmıştır. $K_x L_x = 2000 \text{ mm}$ ve $K_y L_y = 2000 \text{ mm}$ olarak alınmıştır. Zayıf eksenindeki eğilmeli burkulma boyu ve z eksenindeki burulmalı burkulma boyu eşit alınmıştır. ($K_y L_y = K_t L_t$)

- x ve y eksenleri etrafında eğilmeli burkulma gerilmesi,

$$(F_{cre})_1 = \sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2} = \frac{\pi^2 203000}{(2000/37,37)^2} = 699,490 \text{ MPa}$$

$$(F_{cre})_2 = \sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2} = \frac{\pi^2 203000}{(2000/114)^2} = 6509,47 \text{ MPa}$$

- z ekseninde burulmalı burkulma gerilmesi,

$$(F_{cre})_3 = \sigma_t = \frac{1}{A r_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] = \frac{1}{2013,66 * 119,97^2} \left[78000 * 10740 + \frac{\pi^2 203000 * 4,7 * 10^{10}}{(2000)^2} \right] = 841,18 \text{ MPa}$$

En küçük burkulma gerilmesi, elastik burkulma gerilmesi olarak alınır. Buradan

$F_{cre} = 699,490 \text{ MPa}$ alınmıştır.

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} = \sqrt{\frac{235}{699,490}} = 0,580 < 1,5 \text{ olduğundan dolayı,}$$

$$F_n = (0,658^{\lambda_c^2}) F_y = (0,658^{0,580^2}) 235 = 204,136 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{başlık} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{cr,başlık}}} = \sqrt{\frac{204,136}{2144,32}} = 0,308$$

Bu değer 0,673'ten küçük olduğundan dolayı etkin genişlik hesabında gerek yoktur.

$$\lambda_{gövde} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{cr,gövde}}} = \sqrt{\frac{204,136}{143,55}} = 1,192$$

Bu değer 0,673'ten büyük olduğundan dolayı etkin genişlik hesabı yapılmalıdır.

$$\rho_{gövde} = \frac{1 - 0,22 / 1,192}{1,192} = 0,684$$

$$b_{e,gövde} = \rho * w_{gövde} = 0,684 * 286 = 195,65 \text{ mm}$$

$$\lambda_{dudak} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{crL,dudak}}} = \sqrt{\frac{204,136}{3496,668}} = 0,241$$

Bu değer 0,673'ten küçük olduğundan dolayı etkin genişlik hesabında gerek yoktur.

Etkin genişlikler hesaplandıktan sonra etkin alan bulunur.

$$A_e = \text{Alan} - t (w_{gövde} - b_{e,gövde}) = 2013.66 - 4(286-195,65) = 1652,26 \text{ mm}^2$$

- Profilin tasarım eksenel basınç dayanımı,

$$(\Phi_c P_n) = 0.85 \cdot F_n \cdot A_e = 0.85 \cdot 204,136 \cdot 1652,26 \cdot 10^{-3} = 286,693 \text{ kN}$$

Tablolarda boş kalan hücreler, $KL/r > 200$ 'den büyük olan burkulma boyları olan elemanlar içindir.

Örnek olarak;

$$K_x L_x / r_x = 2000(1) / 114 = 17,54$$

$$K_y L_y / r_y = 8000(1) / 37,37 = 214,07 > 200$$

Hücre boş bırakılmıştır. Narinlik şartını sağlamıyor.

Tablo 6.2. Profillerin Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları ($K_x L_x = 500 \text{ mm}$)

PROFİL ADI	0,5				
	$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
Z 100*50*15*1,2	43,74	43,74	43,74	43,74	43,06
Z 100*50*15*1,5	57,56	57,56	57,56	57,56	56,67
Z 100*50*15*2	81,89	81,89	81,89	81,89	80,59
Z 100*50*15*2,5	105,39	105,39	105,39	105,39	103,48
Z 100*50*15*3,5	144,15	144,15	144,15	144,15	141,51
Z 100*50*15*4	162,80	162,80	162,80	162,80	159,82
Z 120*50*15*1	34,38	34,38	34,38	34,37	33,92
Z 120*50*15*1,2	44,28	44,28	44,28	44,26	43,59
Z 120*50*15*1,5	58,59	58,59	58,59	58,56	57,68
Z 140*70*16*1,2	49,67	49,67	49,67	49,67	49,30
Z 140*70*17*1,5	70,98	70,98	70,98	70,98	70,44
Z 140*70*18*2	104,22	104,22	104,22	104,22	103,31
Z 140*70*20*2,5	139,41	139,41	139,41	139,41	138,24

Tablo 6.2. (Devamı)

Z 140*75*17*3	176,55	176,55	176,55	176,55	175,05
Z 140*75*20*4	243,07	243,07	243,07	243,07	240,87
Z 160*60*15*1	36,02	36,02	36,02	35,99	35,67
Z 160*61*15*1,2	47,96	47,96	47,96	47,92	47,48
Z 160*61*15*1,5	66,39	66,39	66,39	66,32	65,62
Z 160*63*15*2	97,45	97,45	97,45	97,37	96,38
Z 160*64*15*2,5	130,79	130,79	130,79	130,69	129,37
Z 160*66*15*3	167,43	167,43	167,43	167,32	165,67
Z 160*68*15*3,5	205,81	205,81	205,81	205,69	203,70
Z 160*69*15*4	241,67	241,67	241,67	241,52	238,84
Z 180*50*15*1,2	45,13	45,13	45,12	44,98	44,22
Z 180*51*15*1,5	60,79	60,79	60,78	60,60	59,63
Z 180*53*15*2	90,38	90,38	90,38	90,13	88,78
Z 180*54*15*2,5	122,58	122,58	122,58	122,25	120,46
Z 180*56*15*3	158,53	158,53	158,53	158,13	155,94
Z 180*59*15*4	234,96	234,96	234,96	234,44	231,31
Z 200*55*16*1	36,07	36,07	36,06	35,98	35,56
Z 200*57*15*1,2	47,75	47,75	47,74	47,64	47,11
Z 200*57*16*1,5	65,29	65,29	65,28	65,12	64,27
Z 200*60*15*2	96,68	96,68	96,68	96,47	95,31
Z 200*60*16*2,5	130,95	130,95	130,95	130,66	129,11
Z 200*60*18*3	169,31	169,31	169,31	168,95	166,99
Z 200*64*16*3,5	210,37	210,37	210,37	209,98	207,71
Z 200*64*17*4	251,92	251,92	251,92	251,44	248,70
Z 220*68*15*1,2	49,68	49,68	49,68	49,62	49,24
Z 220*68*16*1,5	71,32	71,32	71,32	71,22	70,65
Z 220*68*17*2	105,24	105,24	105,24	105,07	104,11
Z 220*68*19*2,5	143,05	143,05	143,05	142,83	141,57
Z 220*68*20*3	183,23	183,23	183,23	182,95	181,34
Z 240*70*15*1,2	50,05	50,05	50,04	49,97	49,60
Z 240*70*16*1,5	72,03	72,03	72,03	71,92	71,37
Z 240*73*15*2	108,11	108,11	108,11	107,94	107,02
Z 240*73*16*2,5	145,97	145,97	145,97	145,74	144,52
Z 240*70*21*3	188,42	188,42	188,41	188,11	186,52
Z 240*73*20*3,5	234,18	234,18	234,18	233,83	231,97
Z 240*73*21*4	281,15	281,15	281,15	280,74	278,49
Z 260*65*19*1,5	72,50	72,50	72,46	72,32	71,55
Z 260*70*15*2	106,12	106,12	106,08	105,88	104,85
Z 260*70*17*2,5	144,75	144,75	144,70	144,45	143,08
Z 260*70*19*3	187,36	187,36	187,30	186,99	185,27
Z 260*75*17*4	281,17	281,17	281,10	280,66	278,29
Z 280*59*17*2	99,27	99,24	99,15	98,88	97,46
Z 280*60*17*2,5	135,43	135,40	135,27	134,92	133,04
Z 280*62*17*3	176,53	176,50	176,34	175,91	173,60
Z 280*63*17*3,5	219,96	219,93	219,74	219,21	216,38
Z 280*65*17*4	267,92	267,89	267,67	267,06	263,78
Z 300*88*17*1,5	77,73	77,73	77,73	77,66	77,30
Z 300*88*20*2	123,96	123,96	123,95	123,84	123,24
Z 300*88*22*2,5	168,93	168,93	168,93	168,75	167,81
Z 300*88*24*3	217,03	217,03	217,03	216,81	215,63
Z 300*88*25*3,5	267,64	267,64	267,63	267,36	265,92
Z 300*88*26*4	321,36	321,36	321,35	321,03	319,30
Z 320*80*18*2	117,38	117,38	117,33	117,16	116,26
Z 320*80*20*2,5	159,45	159,45	159,38	159,16	157,98
Z 320*80*22*3	205,91	205,91	205,83	205,56	204,08

Tablo 6.2. (Devamı)

Z 320*85*18*3,5	255,02	255,02	254,94	254,62	252,89
Z 320*85*20*4	309,02	309,02	308,93	308,55	306,50
Z 340*70*18*2	109,62	109,59	109,51	109,29	108,11
Z 340*70*20*2,5	149,90	149,86	149,76	149,47	147,92
Z 340*75*17*3	194,68	194,64	194,52	194,18	192,34
Z 340*75*18*3,5	242,23	242,19	242,05	241,62	239,35
Z 340*75*20*4	294,83	294,79	294,61	294,11	291,41
Z 360*60*18*2	101,83	101,75	101,65	101,35	99,73
Z 360*65*15*2,5	140,30	140,21	140,08	139,71	137,71
Z 360*65*17*3	183,36	183,25	183,09	182,62	180,11
Z 360*65*18*3,5	229,31	229,18	228,97	228,39	225,28
Z 360*70*15*4	280,43	280,30	280,07	279,42	275,93
Z 380*53*15*2	94,02	93,88	93,74	93,32	91,10
Z 380*55*15*2,5	130,65	130,48	130,29	129,76	126,91
Z 380*56*15*3	170,77	170,55	170,31	169,64	166,02
Z 380*58*15*3,5	216,27	216,03	215,76	214,99	210,88
Z 380*60*15*4	265,86	265,58	265,25	264,32	259,35
Z 400*100*21*2	129,52	129,52	129,49	129,39	128,86
Z 400*100*22*2,5	182,87	182,87	182,82	182,66	181,75
Z 400*100*24*3	234,79	234,79	234,73	234,52	233,40
Z 400*100*26*3,5	291,19	291,19	291,12	290,86	289,50
Z 400*100*27*4	350,18	350,18	350,10	349,80	348,18

Tablo 6.3. Profillerin Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları (KxLx =1000mm)

PROFİL ADI	1				
	KyLy = 0	KyLy = KxLx/4	KyLy = KxLx/3	KyLy = KxLx/2	KyLy = KxLx
Z 100*50*15*1,2	42,87	42,87	42,87	42,87	40,32
Z 100*50*15*1,5	56,43	56,43	56,43	56,43	53,10
Z 100*50*15*2	80,24	80,24	80,24	80,24	75,52
Z 100*50*15*2,5	102,95	102,95	102,95	102,95	96,24
Z 100*50*15*3,5	140,72	140,72	140,72	140,72	132,23
Z 100*50*15*4	158,88	158,88	158,88	158,88	149,81
Z 120*50*15*1	33,97	33,97	33,97	33,92	32,22
Z 120*50*15*1,2	43,66	43,66	43,66	43,59	41,04
Z 120*50*15*1,5	57,77	57,77	57,77	57,68	54,33
Z 140*70*16*1,2	49,27	49,27	49,27	49,27	47,82
Z 140*70*17*1,5	70,38	70,38	70,38	70,38	68,29
Z 140*70*18*2	103,18	103,18	103,18	103,18	99,65
Z 140*70*20*2,5	138,00	138,00	138,00	138,00	133,50
Z 140*75*17*3	174,76	174,76	174,76	174,76	169,06
Z 140*75*20*4	240,21	240,21	240,21	240,21	232,08
Z 160*60*15*1	35,78	35,78	35,78	35,67	34,42
Z 160*61*15*1,2	47,64	47,64	47,64	47,48	45,78
Z 160*61*15*1,5	65,86	65,86	65,86	65,62	62,89
Z 160*63*15*2	96,69	96,69	96,69	96,38	92,56
Z 160*64*15*2,5	129,76	129,76	129,76	129,37	124,34
Z 160*66*15*3	166,11	166,11	166,11	165,67	159,42
Z 160*68*15*3,5	204,16	204,16	204,16	203,70	196,19
Z 160*69*15*4	239,41	239,41	239,41	238,84	228,89
Z 180*50*15*1,2	44,83	44,83	44,78	44,22	41,33
Z 180*51*15*1,5	60,40	60,40	60,35	59,63	55,89

Tablo 6.3. (Devamı)

Z 180*53*15*2	89,80	89,80	89,78	88,78	83,61
Z 180*54*15*2,5	121,79	121,79	121,78	120,46	113,57
Z 180*56*15*3	157,50	157,50	157,50	155,94	147,46
Z 180*59*15*4	233,40	233,40	233,40	231,31	219,20
Z 200*55*16*1	35,90	35,90	35,87	35,56	33,92
Z 200*57*15*1,2	47,53	47,53	47,50	47,11	45,00
Z 200*57*16*1,5	64,94	64,94	64,90	64,27	60,99
Z 200*60*15*2	96,18	96,18	96,16	95,31	90,84
Z 200*60*16*2,5	130,27	130,27	130,26	129,11	123,10
Z 200*60*18*3	168,43	168,43	168,43	166,99	159,39
Z 200*64*16*3,5	209,27	209,27	209,27	207,71	198,89
Z 200*64*17*4	250,58	250,58	250,58	248,70	238,01
Z 220*68*15*1,2	49,51	49,51	49,51	49,24	47,74
Z 220*68*16*1,5	71,05	71,05	71,05	70,65	68,45
Z 220*68*17*2	104,79	104,79	104,79	104,11	100,37
Z 220*68*19*2,5	142,44	142,44	142,44	141,57	136,64
Z 220*68*20*3	182,44	182,44	182,44	181,34	175,04
Z 240*70*15*1,2	49,90	49,90	49,88	49,60	48,13
Z 240*70*16*1,5	71,81	71,81	71,78	71,37	69,20
Z 240*73*15*2	107,72	107,72	107,70	107,02	103,43
Z 240*73*16*2,5	145,44	145,44	145,42	144,52	139,74
Z 240*70*21*3	187,74	187,74	187,70	186,52	180,30
Z 240*73*20*3,5	233,33	233,33	233,33	231,97	224,65
Z 240*73*21*4	280,13	280,13	280,13	278,49	269,67
Z 260*65*19*1,5	72,26	72,26	72,12	71,55	68,56
Z 260*70*15*2	105,78	105,78	105,61	104,85	100,81
Z 260*70*17*2,5	144,30	144,30	144,09	143,08	137,77
Z 260*70*19*3	186,78	186,78	186,54	185,27	178,59
Z 260*75*17*4	280,29	280,29	280,04	278,29	268,98
Z 280*59*17*2	98,99	98,88	98,51	97,46	91,98
Z 280*60*17*2,5	135,05	134,92	134,43	133,04	125,77
Z 280*62*17*3	176,04	175,91	175,31	173,60	164,67
Z 280*63*17*3,5	219,36	219,21	218,48	216,38	205,42
Z 280*65*17*4	267,18	267,06	266,20	263,78	251,04
Z 300*88*17*1,5	77,58	77,58	77,56	77,30	75,87
Z 300*88*20*2	123,71	123,71	123,68	123,24	120,85
Z 300*88*22*2,5	168,54	168,54	168,51	167,81	164,10
Z 300*88*24*3	216,53	216,53	216,50	215,63	210,99
Z 300*88*25*3,5	267,02	267,02	266,99	265,92	260,23
Z 300*88*26*4	320,62	320,62	320,58	319,30	312,49
Z 320*80*18*2	117,13	117,13	116,93	116,26	112,73
Z 320*80*20*2,5	159,11	159,11	158,86	157,98	153,36
Z 320*80*22*3	205,48	205,48	205,17	204,08	198,28
Z 320*85*18*3,5	254,49	254,49	254,17	252,89	246,09
Z 320*85*20*4	308,38	308,38	308,02	306,50	298,45
Z 340*70*18*2	109,41	109,29	108,99	108,11	103,52
Z 340*70*20*2,5	149,61	149,47	149,07	147,92	141,87
Z 340*75*17*3	194,31	194,18	193,70	192,34	185,14
Z 340*75*18*3,5	241,78	241,62	241,03	239,35	230,48
Z 340*75*20*4	294,28	294,11	293,41	291,41	280,87
Z 360*60*18*2	101,65	101,35	100,92	99,73	93,53
Z 360*65*15*2,5	140,05	139,71	139,19	137,71	130,03
Z 360*65*17*3	183,04	182,62	181,96	180,11	170,42
Z 360*65*18*3,5	228,91	228,39	227,58	225,28	213,27
Z 360*70*15*4	279,95	279,42	278,51	275,93	262,41
Z 380*53*15*2	93,86	93,32	92,74	91,10	82,78
Z 380*55*15*2,5	130,44	129,76	129,01	126,91	116,17
Z 380*56*15*3	170,50	169,64	168,69	166,02	152,35
Z 380*58*15*3,5	215,93	214,99	213,92	210,88	195,23

Tablo 6.3. (Devamı)

Z 380*60*15*4	265,44	264,32	263,02	259,35	240,40
Z 400*100*21*2	129,37	129,37	129,25	128,86	126,77
Z 400*100*22*2,5	182,62	182,62	182,42	181,75	178,19
Z 400*100*24*3	234,48	234,48	234,23	233,40	228,96
Z 400*100*26*3,5	290,80	290,80	290,51	289,50	284,14
Z 400*100*27*4	349,72	349,72	349,38	348,18	341,77

Tablo 6.4. Profillerin Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları (KxLx = 2000mm)

PROFİL ADI	2				
	KyLy = 0	KyLy = KxLx/4	KyLy = KxLx/3	KyLy = KxLx/2	KyLy = KxLx
Z 100*50*15*1,2	39,60	39,60	39,60	39,60	31,54
Z 100*50*15*1,5	52,10	52,10	52,10	52,10	41,92
Z 100*50*15*2	73,96	73,96	73,96	73,96	60,56
Z 100*50*15*2,5	93,73	93,73	93,73	93,73	76,05
Z 100*50*15*3,5	127,81	127,81	127,81	127,81	101,96
Z 100*50*15*4	144,13	144,13	144,13	144,13	113,93
Z 120*50*15*1	32,37	32,37	32,37	32,22	25,88
Z 120*50*15*1,2	41,27	41,27	41,27	41,04	32,63
Z 120*50*15*1,5	54,62	54,62	54,62	54,33	43,52
Z 140*70*16*1,2	47,70	47,70	47,70	47,70	42,42
Z 140*70*17*1,5	68,05	68,05	68,05	68,05	59,95
Z 140*70*18*2	99,13	99,13	99,13	99,13	86,89
Z 140*70*20*2,5	132,50	132,50	132,50	132,50	117,28
Z 140*75*17*3	167,77	167,77	167,77	167,77	149,03
Z 140*75*20*4	229,13	229,13	229,13	229,13	204,75
Z 160*60*15*1	34,86	34,86	34,86	34,42	29,88
Z 160*61*15*1,2	46,38	46,38	46,38	45,78	39,61
Z 160*61*15*1,5	63,79	63,79	63,79	62,89	53,37
Z 160*63*15*2	93,69	93,69	93,69	92,56	79,42
Z 160*64*15*2,5	125,73	125,73	125,73	124,34	106,98
Z 160*66*15*3	160,90	160,90	160,90	159,42	137,98
Z 160*68*15*3,5	197,66	197,66	197,66	196,19	170,54
Z 160*69*15*4	230,56	230,56	230,56	228,89	194,91
Z 180*50*15*1,2	43,65	43,65	43,46	41,33	31,61
Z 180*51*15*1,5	58,83	58,83	58,63	55,89	43,23
Z 180*53*15*2	87,51	87,51	87,41	83,61	65,81
Z 180*54*15*2,5	118,69	118,69	118,64	113,57	89,74
Z 180*56*15*3	153,47	153,47	153,47	147,46	117,80
Z 180*59*15*4	227,22	227,22	227,22	219,20	172,88
Z 200*55*16*1	35,25	35,25	35,13	33,92	28,04
Z 200*57*15*1,2	46,67	46,67	46,55	45,00	36,63
Z 200*57*16*1,5	63,57	63,57	63,40	60,99	49,53
Z 200*60*15*2	94,19	94,19	94,13	90,84	75,00
Z 200*60*16*2,5	127,58	127,58	127,53	123,10	101,76
Z 200*60*18*3	164,93	164,93	164,93	159,39	132,24
Z 200*64*16*3,5	204,93	204,93	204,93	198,89	167,07
Z 200*64*17*4	245,29	245,29	245,29	238,01	199,38
Z 220*68*15*1,2	48,80	48,80	48,80	47,74	42,17
Z 220*68*16*1,5	70,00	70,00	70,00	68,45	59,21
Z 220*68*17*2	102,99	102,99	102,99	100,37	86,75
Z 220*68*19*2,5	140,01	140,01	140,01	136,64	118,61
Z 220*68*20*3	179,33	179,33	179,33	175,04	151,99
Z 240*70*15*1,2	49,30	49,30	49,21	48,13	42,64
Z 240*70*16*1,5	70,91	70,91	70,80	69,20	60,54
Z 240*73*15*2	106,16	106,16	106,08	103,43	90,28

Tablo 6.4. (Devamı)

Z 240*73*16*2,5	143,36	143,36	143,26	139,74	122,20
Z 240*70*21*3	185,03	185,03	184,89	180,30	157,46
Z 240*73*20*3,5	229,98	229,98	229,98	224,65	197,62
Z 240*73*21*4	276,07	276,07	276,07	269,67	237,03
Z 260*65*19*1,5	71,32	71,32	70,76	68,56	57,84
Z 260*70*15*2	104,44	104,44	103,78	100,81	86,22
Z 260*70*17*2,5	142,50	142,50	141,69	137,77	118,49
Z 260*70*19*3	184,46	184,46	183,52	178,59	154,22
Z 260*75*17*4	276,83	276,83	275,84	268,98	234,73
Z 280*59*17*2	97,87	97,46	96,01	91,98	73,10
Z 280*60*17*2,5	133,55	133,04	131,11	125,77	100,60
Z 280*62*17*3	174,10	173,60	171,24	164,67	133,39
Z 280*63*17*3,5	216,95	216,38	213,49	205,42	166,90
Z 280*65*17*4	264,25	263,78	260,41	251,04	205,88
Z 300*88*17*1,5	76,99	76,99	76,92	75,87	70,39
Z 300*88*20*2	122,72	122,72	122,62	120,85	110,72
Z 300*88*22*2,5	166,97	166,97	166,84	164,10	150,10
Z 300*88*24*3	214,52	214,52	214,42	210,99	193,44
Z 300*88*25*3,5	264,55	264,55	264,43	260,23	238,71
Z 300*88*26*4	317,66	317,66	317,52	312,49	286,69
Z 320*80*18*2	116,13	116,13	115,34	112,73	99,70
Z 320*80*20*2,5	157,77	157,77	156,77	153,36	136,24
Z 320*80*22*3	203,77	203,77	202,56	198,28	176,74
Z 320*85*18*3,5	252,40	252,40	251,11	246,09	220,73
Z 320*85*20*4	305,85	305,85	304,39	298,45	268,33
Z 340*70*18*2	108,55	108,11	106,90	103,52	87,12
Z 340*70*20*2,5	148,46	147,92	146,32	141,87	120,17
Z 340*75*17*3	192,85	192,34	190,44	185,14	159,06
Z 340*75*18*3,5	239,97	239,35	237,02	230,48	198,24
Z 340*75*20*4	292,08	291,41	288,64	280,87	242,43
Z 360*60*18*2	100,92	99,73	98,08	93,53	72,55
Z 360*65*15*2,5	139,07	137,71	135,67	130,03	103,54
Z 360*65*17*3	181,78	180,11	177,54	170,42	136,82
Z 360*65*18*3,5	227,35	225,28	222,10	213,27	171,46
Z 360*70*15*4	278,05	275,93	272,36	262,41	214,75
Z 380*53*15*2	93,24	91,10	88,86	82,78	56,77
Z 380*55*15*2,5	129,60	126,91	124,03	116,17	81,92
Z 380*56*15*3	169,41	166,02	162,35	152,35	108,39
Z 380*58*15*3,5	214,57	210,88	206,70	195,23	143,68
Z 380*60*15*4	263,78	259,35	254,29	240,40	177,64
Z 400*100*21*2	128,79	128,79	128,31	126,77	118,69
Z 400*100*22*2,5	181,62	181,62	180,82	178,19	164,65
Z 400*100*24*3	233,21	233,21	232,24	228,96	212,07
Z 400*100*26*3,5	289,24	289,24	288,10	284,14	263,68
Z 400*100*27*4	347,86	347,86	346,50	341,77	317,35

Tablo 6.5. Profillerin Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları (KxLx = 4000mm)

PROFİL ADI	4				
	KyLy = 0	KyLy = KxLx/4	KyLy = KxLx/3	KyLy = KxLx/2	KyLy = KxLx
Z 100*50*15*1,2	28,84	28,84	28,84	28,84	14,78
Z 100*50*15*1,5	37,86	37,86	37,86	37,86	18,95
Z 100*50*15*2	52,43	52,43	52,43	52,43	24,29
Z 100*50*15*2,5	64,40	64,40	64,40	64,40	29,18
Z 100*50*15*3,5	86,98	86,98	86,98	86,98	37,64
Z 100*50*15*4	97,60	97,60	97,60	97,60	41,26

Tablo 6.5. (Devamı)

Z 120*50*15*1	26,26	26,26	26,26	25,88	11,62
Z 120*50*15*1,2	32,97	32,97	32,97	32,63	14,51
Z 120*50*15*1,5	43,66	43,66	43,66	43,52	18,88
Z 140*70*16*1,2	41,89	41,89	41,89	41,89	26,01
Z 140*70*17*1,5	58,72	58,72	58,72	58,72	35,98
Z 140*70*18*2	84,44	84,44	84,44	84,44	55,03
Z 140*70*20*2,5	112,55	112,55	112,55	112,55	77,94
Z 140*75*17*3	142,37	142,37	142,37	142,37	98,65
Z 140*75*20*4	189,67	189,67	189,67	189,67	133,55
Z 160*60*15*1	31,37	31,37	31,37	29,88	16,20
Z 160*61*15*1,2	41,62	41,62	41,62	39,61	20,33
Z 160*61*15*1,5	56,19	56,19	56,19	53,37	27,92
Z 160*63*15*2	82,63	82,63	82,63	79,42	42,79
Z 160*64*15*2,5	110,82	110,82	110,82	106,98	57,17
Z 160*66*15*3	141,62	141,62	141,62	137,98	72,21
Z 160*68*15*3,5	173,52	173,52	173,52	170,54	88,27
Z 160*69*15*4	198,34	198,34	198,34	194,91	101,29
Z 180*50*15*1,2	39,23	39,23	38,54	31,61	12,71
Z 180*51*15*1,5	52,96	52,96	52,28	43,23	17,71
Z 180*53*15*2	78,91	78,91	78,57	65,81	27,59
Z 180*54*15*2,5	107,04	107,04	106,85	89,74	35,95
Z 180*56*15*3	138,32	138,32	138,32	117,80	45,92
Z 180*59*15*4	203,98	203,98	203,98	172,88	65,80
Z 200*55*16*1	32,77	32,77	32,29	28,04	12,34
Z 200*57*15*1,2	43,35	43,35	42,91	36,63	16,49
Z 200*57*16*1,5	58,36	58,36	57,78	49,53	22,63
Z 200*60*15*2	86,63	86,63	86,43	75,00	35,70
Z 200*60*16*2,5	117,38	117,38	117,17	101,76	48,13
Z 200*60*18*3	151,66	151,66	151,66	132,24	60,99
Z 200*64*16*3,5	188,41	188,41	188,41	167,07	77,31
Z 200*64*17*4	225,16	225,16	225,16	199,38	88,17
Z 220*68*15*1,2	46,09	46,09	46,09	42,17	24,22
Z 220*68*16*1,5	65,78	65,78	65,78	59,21	32,97
Z 220*68*17*2	96,12	96,12	96,12	86,75	48,73
Z 220*68*19*2,5	130,73	130,73	130,73	118,61	67,48
Z 220*68*20*3	167,43	167,43	167,43	151,99	86,09
Z 240*70*15*1,2	46,97	46,97	46,65	42,64	24,99
Z 240*70*16*1,5	67,44	67,44	67,01	60,54	34,04
Z 240*73*15*2	100,15	100,15	99,84	90,28	52,77
Z 240*73*16*2,5	135,31	135,31	134,95	122,20	71,71
Z 240*70*21*3	174,60	174,60	174,08	157,46	91,54
Z 240*73*20*3,5	217,05	217,05	217,05	197,62	117,81
Z 240*73*21*4	260,42	260,42	260,42	237,03	139,70
Z 260*65*19*1,5	67,69	67,69	65,59	57,84	29,75
Z 260*70*15*2	99,28	99,28	96,79	86,22	46,51
Z 260*70*17*2,5	135,53	135,53	132,48	118,49	65,08
Z 260*70*19*3	175,48	175,48	171,92	154,22	85,72
Z 260*75*17*4	263,38	263,38	259,66	234,73	134,97
Z 280*59*17*2	93,53	91,98	86,64	73,10	32,12
Z 280*60*17*2,5	127,71	125,77	118,68	100,60	44,64
Z 280*62*17*3	166,57	164,67	155,90	133,39	60,46
Z 280*63*17*3,5	207,58	205,42	194,65	166,90	75,41
Z 280*65*17*4	252,83	251,04	238,47	205,88	92,05
Z 300*88*17*1,5	74,67	74,67	74,41	70,39	51,91
Z 300*88*20*2	118,84	118,84	118,42	110,72	76,88
Z 300*88*22*2,5	160,83	160,83	160,34	150,10	105,41
Z 300*88*24*3	206,70	206,70	206,29	193,44	136,99
Z 300*88*25*3,5	254,94	254,94	254,47	238,71	169,21
Z 300*88*26*4	306,10	306,10	305,59	286,69	203,08
Z 320*80*18*2	112,22	112,22	109,19	99,70	61,48

Tablo 6.5. (Devamı)

Z 320*80*20*2,5	152,54	152,54	148,71	136,24	85,37
Z 320*80*22*3	197,07	197,07	192,45	176,74	112,06
Z 320*85*18*3,5	244,21	244,21	239,24	220,73	143,14
Z 320*85*20*4	295,94	295,94	290,33	268,33	175,34
Z 340*70*18*2	105,20	103,52	98,97	87,12	44,56
Z 340*70*20*2,5	143,96	141,87	135,88	120,17	62,73
Z 340*75*17*3	187,11	185,14	177,98	159,06	87,12
Z 340*75*18*3,5	232,88	230,48	221,63	198,24	108,64
Z 340*75*20*4	283,47	280,87	270,34	242,43	134,14
Z 360*60*18*2	98,05	93,53	87,54	72,55	30,76
Z 360*65*15*2,5	135,22	130,03	122,53	103,54	46,10
Z 360*65*17*3	176,81	170,42	160,96	136,82	61,74
Z 360*65*18*3,5	221,18	213,27	201,51	171,46	77,14
Z 360*70*15*4	270,58	262,41	249,11	214,75	100,07
Z 380*53*15*2	90,80	82,78	75,00	56,77	
Z 380*55*15*2,5	126,28	116,17	106,04	81,92	
Z 380*56*15*3	165,14	152,35	139,41	108,39	
Z 380*58*15*3,5	209,24	195,23	180,27	143,68	
Z 380*60*15*4	257,24	240,40	222,24	177,64	
Z 400*100*21*2	126,48	126,48	124,63	118,69	89,15
Z 400*100*22*2,5	177,69	177,69	174,57	164,65	120,45
Z 400*100*24*3	228,22	228,22	224,45	212,07	156,53
Z 400*100*26*3,5	283,11	283,11	278,68	263,68	196,03
Z 400*100*27*4	340,53	340,53	335,26	317,35	236,32

Tablo 6.6. Profillerin Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları (KxLx = 6000mm)

PROFİL ADI	6				
	KyLy = 0	KyLy = KxLx/4	KyLy = KxLx/3	KyLy = KxLx/2	KyLy = KxLx
Z 100*50*15*1,2	17,02	17,02	17,02	17,02	
Z 100*50*15*1,5	21,78	21,78	21,78	21,78	
Z 100*50*15*2	28,37	28,37	28,37	28,37	
Z 100*50*15*2,5	34,63	34,63	34,63	34,63	
Z 100*50*15*3,5	46,20	46,20	46,20	46,20	
Z 100*50*15*4	51,52	51,52	51,52	51,52	
Z 120*50*15*1	18,09	18,09	18,09	18,01	
Z 120*50*15*1,2	22,74	22,74	22,74	22,74	
Z 120*50*15*1,5	30,06	30,06	30,06	30,06	
Z 140*70*16*1,2	33,60	33,60	33,60	33,60	14,04
Z 140*70*17*1,5	45,03	45,03	45,03	45,03	20,21
Z 140*70*18*2	64,62	64,62	64,62	64,62	29,10
Z 140*70*20*2,5	85,55	85,55	85,55	85,55	37,23
Z 140*75*17*3	104,62	104,62	104,62	104,62	48,43
Z 140*75*20*4	138,42	138,42	138,42	138,42	66,04
Z 160*60*15*1	26,28	26,28	26,28	23,69	
Z 160*61*15*1,2	33,93	33,93	33,93	30,01	
Z 160*61*15*1,5	45,53	45,53	45,53	40,78	
Z 160*63*15*2	67,04	67,04	67,04	61,49	
Z 160*64*15*2,5	89,74	89,74	89,74	82,85	
Z 160*66*15*3	114,24	114,24	114,24	107,64	
Z 160*68*15*3,5	135,53	135,53	135,53	129,62	
Z 160*69*15*4	154,33	154,33	154,33	148,38	
Z 180*50*15*1,2	32,88	32,88	31,61	20,34	
Z 180*51*15*1,5	44,51	44,51	43,23	28,31	
Z 180*53*15*2	66,46	66,46	65,81	44,21	
Z 180*54*15*2,5	90,09	90,09	89,74	60,41	

Tablo 6.6. (Devamı)

Z 180*56*15*3	116,21	116,21	116,21	80,21	
Z 180*59*15*4	165,82	165,82	165,82	113,29	
Z 200*55*16*1	28,98	28,98	28,04	19,55	
Z 200*57*15*1,2	37,61	37,61	36,63	25,78	
Z 200*57*16*1,5	50,66	50,66	49,53	35,15	
Z 200*60*15*2	75,41	75,41	75,00	54,61	
Z 200*60*16*2,5	102,17	102,17	101,76	74,08	
Z 200*60*18*3	131,84	131,84	131,84	96,64	
Z 200*64*16*3,5	163,68	163,68	163,68	124,41	
Z 200*64*17*4	194,98	194,98	194,98	143,39	
Z 220*68*15*1,2	41,86	41,86	41,86	34,18	
Z 220*68*16*1,5	58,55	58,55	58,55	46,31	
Z 220*68*17*2	85,70	85,70	85,70	68,15	
Z 220*68*19*2,5	116,64	116,64	116,64	93,77	
Z 220*68*20*3	149,33	149,33	149,33	120,08	
Z 240*70*15*1,2	43,31	43,31	42,64	34,74	
Z 240*70*16*1,5	61,56	61,56	60,54	47,54	
Z 240*73*15*2	90,90	90,90	90,28	72,09	27,38
Z 240*73*16*2,5	122,92	122,92	122,20	97,82	36,92
Z 240*70*21*3	158,52	158,52	157,46	125,67	
Z 240*73*20*3,5	197,09	197,09	197,09	159,51	55,17
Z 240*73*21*4	236,23	236,23	236,23	190,88	62,89
Z 260*65*19*1,5	62,06	62,06	57,84	43,72	
Z 260*70*15*2	91,25	91,25	86,22	66,60	
Z 260*70*17*2,5	124,68	124,68	118,49	92,31	
Z 260*70*19*3	161,49	161,49	154,22	120,85	
Z 260*75*17*4	242,39	242,39	234,73	186,82	
Z 280*59*17*2	86,74	83,56	73,10	50,12	
Z 280*60*17*2,5	118,57	114,57	100,60	69,57	
Z 280*62*17*3	154,75	150,81	133,39	93,99	
Z 280*63*17*3,5	192,87	188,39	166,90	117,91	
Z 280*65*17*4	234,89	231,15	205,88	147,44	
Z 300*88*17*1,5	70,95	70,95	70,39	62,07	29,51
Z 300*88*20*2	111,75	111,75	110,72	95,03	43,65
Z 300*88*22*2,5	151,12	151,12	150,10	129,47	60,46
Z 300*88*24*3	194,31	194,31	193,44	167,47	79,01
Z 300*88*25*3,5	239,70	239,70	238,71	206,79	97,23
Z 300*88*26*4	287,78	287,78	286,69	248,35	115,85
Z 320*80*18*2	106,00	106,00	99,70	81,39	32,71
Z 320*80*20*2,5	144,21	144,21	136,24	112,00	45,70
Z 320*80*22*3	186,41	186,41	176,74	146,08	60,03
Z 320*85*18*3,5	231,15	231,15	220,73	184,24	77,05
Z 320*85*20*4	280,13	280,13	268,33	224,78	93,23
Z 340*70*18*2	99,87	96,32	87,12	65,59	
Z 340*70*20*2,5	136,78	132,37	120,17	91,40	
Z 340*75*17*3	177,94	173,77	159,06	123,74	
Z 340*75*18*3,5	221,53	216,43	198,24	154,40	
Z 340*75*20*4	269,68	264,15	242,43	189,75	
Z 360*60*18*2	93,47	84,10	72,55	47,88	
Z 360*65*15*2,5	129,06	118,21	103,54	71,23	
Z 360*65*17*3	168,85	155,48	136,82	95,23	
Z 360*65*18*3,5	211,28	194,70	171,46	119,40	
Z 360*70*15*4	258,58	241,37	214,75	153,75	
Z 380*53*15*2	86,89	70,66	56,77	32,66	
Z 380*55*15*2,5	120,96	100,35	81,92	48,15	
Z 380*56*15*3	158,27	132,12	108,39	64,07	
Z 380*58*15*3,5	200,66	171,76	143,68	87,55	
Z 380*60*15*4	246,71	211,91	177,64	108,26	
Z 400*100*21*2	122,71	122,71	118,69	106,24	53,29
Z 400*100*22*2,5	171,32	171,32	164,65	144,45	72,63

Tablo 6.6. (Devamı)

Z 400*100*24*3	220,15	220,15	212,07	186,76	95,43
Z 400*100*26*3,5	273,19	273,19	263,68	232,94	120,46
Z 400*100*27*4	328,66	328,66	317,35	280,58	145,22

Tablo 6.7. Profillerin Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları (KxLx=8000mm)

PROFİL ADI	8				
	KyLy = 0	KyLy = KxLx/4	KyLy = KxLx/3	KyLy = KxLx/2	KyLy = KxLx
Z 100*50*15*1,2	9,94	9,94	9,94	9,94	
Z 100*50*15*1,5	12,25	12,25	12,25	12,25	
Z 100*50*15*2	15,96	15,96	15,96	15,96	
Z 100*50*15*2,5	19,48	19,48	19,48	19,48	
Z 100*50*15*3,5	25,99	25,99	25,99	25,99	
Z 100*50*15*4	28,98	28,98	28,98	28,98	
Z 120*50*15*1	11,32	11,32	11,32	11,32	
Z 120*50*15*1,2	14,21	14,21	14,21	14,21	
Z 120*50*15*1,5	18,66	18,66	18,66	18,66	
Z 140*70*16*1,2	23,42	23,42	23,42	23,42	
Z 140*70*17*1,5	31,04	31,04	31,04	31,04	
Z 140*70*18*2	44,21	44,21	44,21	44,21	
Z 140*70*20*2,5	55,60	55,60	55,60	55,60	
Z 140*75*17*3	67,78	67,78	67,78	67,78	
Z 140*75*20*4	88,87	88,87	88,87	88,87	
Z 160*60*15*1	20,05	20,05	20,05	16,20	
Z 160*61*15*1,2	25,26	25,26	25,26	20,33	
Z 160*61*15*1,5	33,97	33,97	33,97	27,92	
Z 160*63*15*2	50,01	50,01	50,01	42,79	
Z 160*64*15*2,5	66,56	66,56	66,56	57,17	
Z 160*66*15*3	81,55	81,55	81,55	72,21	
Z 160*68*15*3,5	95,55	95,55	95,55	88,27	
Z 160*69*15*4	108,62	108,62	108,62	101,29	
Z 180*50*15*1,2	25,74	25,74	24,02	12,71	
Z 180*51*15*1,5	34,95	34,95	33,20	17,71	
Z 180*53*15*2	52,28	52,28	51,38	27,59	
Z 180*54*15*2,5	70,70	70,70	70,21	35,95	
Z 180*56*15*3	90,78	90,78	90,78	45,92	
Z 180*59*15*4	123,40	123,40	123,40	65,80	
Z 200*55*16*1	24,08	24,08	22,49	12,34	
Z 200*57*15*1,2	30,81	30,81	29,42	16,49	
Z 200*57*16*1,5	41,61	41,61	39,99	22,63	
Z 200*60*15*2	62,14	62,14	61,55	35,70	
Z 200*60*16*2,5	84,14	84,14	83,53	48,13	
Z 200*60*18*3	108,27	108,27	108,27	60,99	
Z 200*64*16*3,5	134,13	134,13	134,13	77,31	
Z 200*64*17*4	156,22	156,22	156,22	88,17	
Z 220*68*15*1,2	36,54	36,54	36,54	24,22	
Z 220*68*16*1,5	49,81	49,81	49,81	32,97	
Z 220*68*17*2	73,04	73,04	73,04	48,73	
Z 220*68*19*2,5	99,46	99,46	99,46	67,48	
Z 220*68*20*3	127,21	127,21	127,21	86,09	
Z 240*70*15*1,2	38,62	38,62	37,56	24,99	
Z 240*70*16*1,5	53,63	53,63	52,07	34,04	
Z 240*73*15*2	79,43	79,43	78,47	52,77	
Z 240*73*16*2,5	107,51	107,51	106,38	71,71	
Z 240*70*21*3	138,48	138,48	136,85	91,54	
Z 240*73*20*3,5	172,15	172,15	172,15	117,81	

Tablo 6.7. (Devamı)

Z 240*73*21*4	205,96	205,96	205,96	139,70
Z 260*65*19*1,5	54,99	54,99	48,58	29,75
Z 260*70*15*2	81,14	81,14	73,40	46,51
Z 260*70*17*2,5	110,99	110,99	101,42	65,08
Z 260*70*19*3	143,79	143,79	132,51	85,72
Z 260*75*17*4	215,72	215,72	203,70	134,97
Z 280*59*17*2	78,09	73,10	57,76	32,12
Z 280*60*17*2,5	106,89	100,60	79,95	44,64
Z 280*62*17*3	139,63	133,39	107,28	60,46
Z 280*63*17*3,5	174,01	166,90	134,51	75,41
Z 280*65*17*4	211,86	205,88	167,38	92,05
Z 300*88*17*1,5	66,03	66,03	65,10	51,91
Z 300*88*20*2	102,33	102,33	100,67	76,88
Z 300*88*22*2,5	138,54	138,54	136,89	105,41
Z 300*88*24*3	178,24	178,24	176,83	136,99
Z 300*88*25*3,5	219,91	219,91	218,31	169,21
Z 300*88*26*4	263,97	263,97	262,19	203,08
Z 320*80*18*2	97,90	97,90	87,86	61,48
Z 320*80*20*2,5	133,35	133,35	120,58	85,37
Z 320*80*22*3	172,49	172,49	156,96	112,06
Z 320*85*18*3,5	214,07	214,07	197,24	143,14
Z 320*85*20*4	259,42	259,42	240,33	175,34
Z 340*70*18*2	92,88	87,12	72,98	44,56
Z 340*70*20*2,5	127,36	120,17	101,32	62,73
Z 340*75*17*3	165,89	159,06	136,02	87,12
Z 340*75*18*3,5	206,59	198,24	169,67	108,64
Z 340*75*20*4	251,52	242,43	208,16	134,14
Z 360*60*18*2	87,44	72,55	55,98	30,76
Z 360*65*15*2,5	120,92	103,54	81,98	46,10
Z 360*65*17*3	158,33	136,82	109,16	61,74
Z 360*65*18*3,5	198,19	171,46	136,88	77,14
Z 360*70*15*4	242,69	214,75	174,47	100,07
Z 380*53*15*2	81,70	56,77	38,98	
Z 380*55*15*2,5	113,90	81,92	57,41	
Z 380*56*15*3	149,15	108,39	76,40	
Z 380*58*15*3,5	189,25	143,68	104,53	
Z 380*60*15*4	232,70	177,64	129,55	
Z 400*100*21*2	117,61	117,61	110,80	89,15
Z 400*100*22*2,5	162,81	162,81	151,76	120,45
Z 400*100*24*3	209,36	209,36	195,93	156,53
Z 400*100*26*3,5	259,91	259,91	244,09	196,03
Z 400*100*27*4	312,76	312,76	293,92	236,32
Z 280*59*17*2	68,28	61,64	42,78	75,92
Z 280*60*17*2,5	93,61	85,19	59,50	91,07
Z 280*62*17*3	122,37	113,95	80,90	
Z 280*63*17*3,5	152,44	142,80	101,51	
Z 280*65*17*4	185,45	177,29	127,74	
Z 300*88*17*1,5	60,16	60,16	58,84	39,90
Z 300*88*20*2	91,43	91,43	89,13	58,71
Z 300*88*22*2,5	123,95	123,95	121,66	81,09
Z 300*88*24*3	159,57	159,57	157,61	105,90
Z 300*88*25*3,5	196,88	196,88	194,65	130,70
Z 300*88*26*4	236,22	236,22	233,74	156,51
Z 320*80*18*2	88,43	88,43	74,76	43,77
Z 320*80*20*2,5	120,63	120,63	103,17	61,15
Z 320*80*22*3	156,15	156,15	134,83	80,54
Z 320*85*18*3,5	193,99	193,99	170,73	103,77
Z 320*85*20*4	235,05	235,05	208,58	127,25
Z 340*70*18*2	84,64	76,63	58,26	31,41
Z 340*70*20*2,5	116,24	106,20	81,51	44,25

Tablo 6.7. (Devamı)

Z 340*75*17*3	151,62	142,03	111,35	61,34
Z 340*75*18*3,5	188,90	177,13	138,96	76,19
Z 340*75*20*4	229,97	217,13	171,07	93,49
Z 360*60*18*2	80,28	60,13	40,68	
Z 360*65*15*2,5	111,25	87,43	60,93	
Z 360*65*17*3	145,80	116,18	81,70	
Z 360*65*18*3,5	182,58	145,68	102,36	
Z 360*70*15*4	223,71	184,80	133,24	
Z 380*53*15*2	75,52	42,96	27,91	
Z 380*55*15*2,5	105,46	63,23	41,14	
Z 380*56*15*3	138,23	84,15	54,69	
Z 380*58*15*3,5	175,56	114,26	74,61	
Z 380*60*15*4	215,87	141,52	91,99	
Z 400*100*21*2	111,32	111,32	101,34	70,44
Z 400*100*22*2,5	152,52	152,52	136,72	95,59
Z 400*100*24*3	196,29	196,29	177,05	124,97
Z 400*100*26*3,5	243,82	243,82	221,10	157,24
Z 400*100*27*4	293,49	293,49	266,40	189,65

Tablo 6.8. Profillerin Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları (KxLx=12000mm)

PROFİL ADI	12				
	KyLy = 0	KyLy = KxLx/4	KyLy = KxLx/3	KyLy = KxLx/2	KyLy = KxLx
Z 100*50*15*1,2	4,42	4,42	4,42		
Z 100*50*15*1,5	5,45	5,45	5,45		
Z 100*50*15*2	7,09	7,09	7,09		
Z 100*50*15*2,5	8,66	8,66	8,66		
Z 100*50*15*3,5	11,55	11,55	11,55		
Z 100*50*15*4	12,88	12,88	12,88		
Z 120*50*15*1	5,63	5,63	5,63		
Z 120*50*15*1,2	6,73	6,73	6,73		
Z 120*50*15*1,5	8,31	8,31	8,31		
Z 140*70*16*1,2	11,60	11,60	11,60	11,60	
Z 140*70*17*1,5	15,08	15,08	15,08	15,08	
Z 140*70*18*2	19,88	19,88	19,88	19,88	
Z 140*70*20*2,5	24,71	24,71	24,71	24,71	
Z 140*75*17*3	30,12	30,12	30,12	30,12	
Z 140*75*20*4	39,50	39,50	39,50	39,50	
Z 160*60*15*1	10,28	10,28	10,28		
Z 160*61*15*1,2	13,01	13,01	13,01		
Z 160*61*15*1,5	17,48	17,48	17,48		
Z 160*63*15*2	24,73	24,73	24,73		
Z 160*64*15*2,5	30,72	30,72	30,72		
Z 160*66*15*3	37,03	37,03	37,03		
Z 160*68*15*3,5	43,38	43,38	43,38		
Z 160*69*15*4	49,26	49,26	49,26		
Z 180*50*15*1,2	13,98	13,98	12,71		
Z 180*51*15*1,5	19,05	19,05	17,71		
Z 180*53*15*2	28,32	28,32	27,59		
Z 180*54*15*2,5	36,40	36,40	35,95		
Z 180*56*15*3	43,93	43,93	43,93		
Z 180*59*15*4	58,57	58,57	58,57		
Z 200*55*16*1	13,85	13,85	12,34		
Z 200*57*15*1,2	17,87	17,87	16,49		
Z 200*57*16*1,5	24,26	24,26	22,63		
Z 200*60*15*2	36,33	36,33	35,70		

Tablo 6.8. (Devamı)

Z 200*60*16*2,5	48,80	48,80	48,13	
Z 200*60*18*3	60,27	60,27	60,27	
Z 200*64*16*3,5	71,07	71,07	71,07	
Z 200*64*17*4	80,60	80,60	80,60	
Z 220*68*15*1,2	23,34	23,34	23,34	
Z 220*68*16*1,5	31,51	31,51	31,51	
Z 220*68*17*2	46,35	46,35	46,35	
Z 220*68*19*2,5	62,98	62,98	62,98	
Z 220*68*20*3	79,96	79,96	79,96	
Z 240*70*15*1,2	26,93	26,93	24,99	
Z 240*70*16*1,5	36,34	36,34	34,04	
Z 240*73*15*2	54,22	54,22	52,77	27,38
Z 240*73*16*2,5	73,43	73,43	71,71	36,92
Z 240*70*21*3	94,04	94,04	91,54	
Z 240*73*20*3,5	116,52	116,52	116,52	55,17
Z 240*73*21*4	137,41	137,41	137,41	62,89
Z 260*65*19*1,5	39,10	39,10	29,75	
Z 260*70*15*2	58,20	58,20	46,51	
Z 260*70*17*2,5	79,77	79,77	65,08	
Z 260*70*19*3	103,23	103,23	85,72	
Z 260*75*17*4	154,07	154,07	134,97	
Z 280*59*17*2	58,01	50,12	32,12	
Z 280*60*17*2,5	79,65	69,57	44,64	
Z 280*62*17*3	104,16	93,99	60,46	
Z 280*63*17*3,5	129,62	117,91	75,41	
Z 280*65*17*4	157,41	147,44	92,05	
Z 300*88*17*1,5	53,62	53,62	51,91	29,51
Z 300*88*20*2	79,73	79,73	76,88	43,65
Z 300*88*22*2,5	108,26	108,26	105,41	60,46
Z 300*88*24*3	139,44	139,44	136,99	79,01
Z 300*88*25*3,5	172,01	172,01	169,21	97,23
Z 300*88*26*4	206,19	206,19	203,08	115,85
Z 320*80*18*2	78,15	78,15	61,48	32,71
Z 320*80*20*2,5	106,78	106,78	85,37	45,70
Z 320*80*22*3	138,33	138,33	112,06	60,03
Z 320*85*18*3,5	172,02	172,02	143,14	77,05
Z 320*85*20*4	208,34	208,34	175,34	93,23
Z 340*70*18*2	75,60	65,59	44,56	
Z 340*70*20*2,5	104,01	91,40	62,73	
Z 340*75*17*3	135,90	123,74	87,12	
Z 340*75*18*3,5	169,35	154,40	108,64	
Z 340*75*20*4	206,13	189,75	134,14	
Z 360*60*18*2	72,37	47,88	30,76	
Z 360*65*15*2,5	100,53	71,23	46,10	
Z 360*65*17*3	131,88	95,23	61,74	
Z 360*65*18*3,5	165,20	119,40	77,14	
Z 360*70*15*4	202,52	153,75	100,07	
Z 380*53*15*2	68,64	32,66		
Z 380*55*15*2,5	96,03	48,15		
Z 380*56*15*3	126,01	64,07		
Z 380*58*15*3,5	160,20	87,55		
Z 380*60*15*4	196,97	108,26		
Z 400*100*21*2	104,04	104,04	89,15	53,29
Z 400*100*22*2,5	140,87	140,87	120,45	72,63
Z 400*100*24*3	181,47	181,47	156,53	95,43
Z 400*100*26*3,5	225,55	225,55	196,03	120,46
Z 400*100*27*4	271,58	271,58	236,32	145,22

6.3. Çarpımlı Burkulma Hesabı

Başlıklarından kenar rijitleştiricisi bulunan kesitlerde görülen burkulma davranışdır. Bu tez de incelenen soğuk şekillendirilmiş Z profillerin başlıklarında dudaklar bulunduğundan dolayı, elemanın çarpımlı burkulma davranışı kontrolü yapılacaktır.

- Temel parametreler;

$$b = B' - t = 88 - 4 = 84 \text{ mm} \quad d = C' - t/2 = 26 - 4/2 = 24 \text{ mm}$$

- Flanş kesiti için verilen enkesit boyutları;

$$A_f = (b+d)t = (84+24)4 = 432 \text{ mm}^2 \quad C_{wf} = 0$$

$$I_f = \left(\frac{1}{3}\right)bt^3 + \left(\frac{1}{3}\right)dt^3 = \left(\frac{1}{3}\right)84 * 4^3 + \left(\frac{1}{3}\right)24 * 4^3 = 2304 \text{ mm}^4$$

$$I_{xf} = \frac{t(t^2b^2 + 4bd^3 + t^2bd + d^4)}{12(b+d)} = \frac{4(4^284^2 + 4*84*24^3 + 4^2*84*24 + 24^4)}{12(84+24)} = 15808 \text{ mm}^4$$

$$I_{yf} = \frac{t(b^4 + 4db^3)}{12(b+d)} = \frac{4(84^4 + 4*24*84^3)}{12(84+24)} = 329280 \text{ mm}^4$$

$$I_{xyf} = \frac{t(b^2d^2)}{4(b+d)} = \frac{4(84^2*24^2)}{4(84+24)} = 37632 \text{ mm}^4$$

$$x_{of} = \frac{b^2}{2(b+d)} = \frac{84^2}{2(84+24)} = 32.667 \text{ mm}$$

$$h_{xf} = \frac{-(b^2 + 2db)}{2(b+d)} = \frac{-(84^2 + 2*84*24)}{2(84+24)} = -51.333 \text{ mm}$$

$$h_{yf} = y_{of} = \frac{-d^2}{2(b+d)} = \frac{-24^2}{2(84+24)} = -2.667 \text{ mm}$$

Yukarıda verilen enkesit özellikleri bölüm 4'te hesaplanmıştır.

- Çarpımlı burkulma gerilmesi hesabı (F_d),

$$L_{cr} = \left[\frac{6\pi^4 h_0 (1-\mu^2)}{t^3} \left(I_{xf}(x_{of} - h_{xf})^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right) \right]^{1/4} =$$

$$\left[\frac{6\pi^4 300(1-0.3^2)}{4^3} \left(15808(32.667 - 51.333)^2 + 0 - \frac{37632^2}{329280} (32.667 - 51.333)^2 \right) \right]^{1/4} =$$

$$670.76 \text{ mm}$$

L , L_{cr} ve L_m uzunluklarından minimum olanı alınır. $L = L_{cr}$ alınmıştır.

$$k_{\Phi fe} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \left(EI_{xf}(x_{of} + h_{xf})^2 + EC_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} + h_{xf})^2 \right) + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 GJ_f =$$

$$\left(\frac{\pi}{670,76}\right)^4 \left(203000 * 15808(32,667 + 51,333)^2 + 0 - 203000 \frac{37632^2}{329280} (32,667 + 51,333)^2 \right) + \left(\frac{\pi}{670,76}\right)^2 78000 * 2304 = 4333,95 \text{ Nmm/mm}$$

$$k_{\Phi we} = \frac{Et^3}{6h_o(1 - \mu^2)} = \frac{203000 * 4^3}{6 * 300(1 - 0,3^2)} = 7931,624 \text{ Nmm/mm}$$

$k_{\Phi} = 0$ alınmıştır.

$$\tilde{k}_{\Phi fg} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \left[A_f \left((x_{of} - h_{xf})^2 \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right)^2 - 2y_{of}(x_{of} - h_{xf}) \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right) + h_{xf}^2 + y_{of}^2 \right) + \right.$$

$$I_{xf} + I_{yf} \left. \right] = \left(\frac{\pi}{670,76}\right)^2 \left[432 \left((32,667 - 51,333)^2 \left(\frac{37632}{329280} \right)^2 - 2(-2,667)(32,667 - 51,333) \left(\frac{37632}{329280} \right) + 51,333^2 + 2,667^2 \right) + 15808 + 329280 \right] = 33,7 \text{ Nmm/mm}$$

$$\tilde{k}_{\Phi wg} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \frac{th_o^3}{60} = \left(\frac{\pi}{670,76}\right)^2 \frac{4 * 300^3}{60} = 12,57 \text{ Nmm/mm}$$

bağıntısıyla bulunur.

$$F_d = \frac{k_{\Phi fe} + k_{\Phi we} + k_{\Phi}}{\tilde{k}_{\Phi fg} + \tilde{k}_{\Phi wg}} = \frac{4333,95 + 7931,624 + 0}{33,7 + 12,57} = 265,17 \text{ MPa}$$

$$P_{crd} = A_g * F_d = 2013,66 * 265,17 = 533963,05$$

$$P_{crd} = 0,85 * 2013,66 * 265,17 * 10^{-3} = 453,87 \text{ kN}$$

$$P_y = A_g * F_y = 2013,66 * 235 = 473210,97$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crd}}} = \sqrt{\frac{473210,97}{533963,05}} = 0,94$$

Eğer $\lambda_d \leq 0,561$ ise $P_n = P_y$

$$\text{Eğer } \lambda_d > 0,561 \text{ ise } P_n = (1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y}\right)^{0,6}) \left(\left(\frac{P_{crd}}{P_y}\right)^{0,6}\right) P_y$$

Eğer $0,94 > 0,561$ olduğu için

$$P_n = \left(1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y}\right)^{0,6}\right) \left(\left(\frac{P_{crd}}{P_y}\right)^{0,6}\right) P_y = \left(1 - 0,25 \left(\frac{533963,05}{473210,97}\right)^{0,6}\right) \left(\left(\frac{533963,05}{473210,97}\right)^{0,6}\right) 473210,97(10^{-3}) = 372,023 \text{ kN}$$

Tablo 6.9. Profillerin Çarpılmalı Burkulma Davranışına göre Tasarım Eksenel Basınç Dayanımları

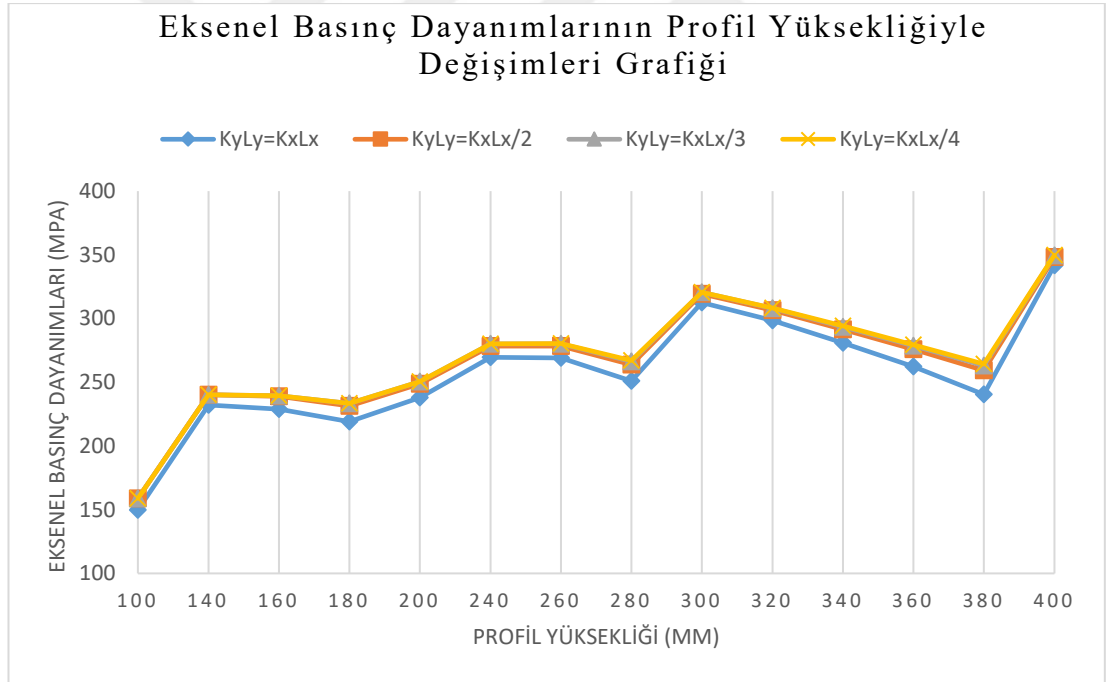
PROFİL ADI	Fd Mpa	Pcrd kN	Pn kN
Z 100*50*15*1,2	188,311	42,07	42,24
Z 100*50*15*1,5	245,184	68,01	58,49
Z 100*50*15*2	349,784	127,93	87,62
Z 100*50*15*2,5	467,639	211,37	117,50
Z 100*50*15*3,5	748,072	462,56	170,95
Z 100*50*15*4	913,343	637,89	193,09
Z 120*50*15*1	134,863	27,51	33,18
Z 120*50*15*1,2	166,573	40,61	43,68
Z 120*50*15*1,5	217,359	65,84	60,85
Z 140*70*16*1,2	103,892	31,90	44,05
Z 140*70*17*1,5	141,317	54,34	63,91
Z 140*70*18*2	208,122	106,54	101,00
Z 140*70*20*2,5	294,255	189,28	145,29
Z 140*75*17*3	306,516	237,83	177,82
Z 140*75*20*4	498,181	517,32	273,80
Z 160*60*15*1	87,238	22,25	33,53
Z 160*61*15*1,2	107,842	32,89	44,56
Z 160*61*15*1,5	138,302	52,82	62,85
Z 160*63*15*2	190,901	97,73	97,37
Z 160*64*15*2,5	251,205	160,52	136,03
Z 160*66*15*3	310,916	239,65	177,53
Z 160*68*15*3,5	373,593	337,70	221,08
Z 160*69*15*4	447,625	461,78	265,33
Z 180*50*15*1,2	112,530	34,32	45,50
Z 180*51*15*1,5	145,280	55,49	64,30
Z 180*53*15*2	202,738	103,79	99,89
Z 180*54*15*2,5	268,425	171,52	139,53
Z 180*56*15*3	334,952	258,18	182,08
Z 180*59*15*4	487,254	502,66	270,70
Z 200*55*16*1	78,323	22,10	35,14
Z 200*57*15*1,2	89,564	30,42	45,27
Z 200*57*16*1,5	123,290	52,43	66,29
Z 200*60*15*2	161,907	92,24	100,78
Z 200*60*16*2,5	226,943	161,41	145,42
Z 200*60*18*3	312,170	267,69	197,78
Z 200*64*16*3,5	342,300	344,04	239,13
Z 200*64*17*4	429,473	492,70	291,94
Z 220*68*15*1,2	69,145	26,45	44,67
Z 220*68*16*1,5	95,356	45,66	65,84
Z 220*68*17*2	142,698	91,00	106,48
Z 220*68*19*2,5	205,219	164,28	157,01
Z 220*68*20*3	269,331	258,42	209,78
Z 240*70*15*1,2	60,735	24,72	44,42
Z 240*70*16*1,5	83,910	42,75	65,69
Z 240*73*15*2	110,615	75,43	100,88

Tablo 6.9. (Devamı)

Z 240*73*16*2,5	155,547	132,45	147,91
Z 240*70*21*3	246,025	252,37	216,60
Z 240*73*20*3,5	283,575	340,70	267,76
Z 240*73*21*4	351,115	481,59	329,02
Z 260*65*19*1,5	91,062	48,25	71,20
Z 260*70*15*2	103,088	72,75	100,86
Z 260*70*17*2,5	151,526	134,18	151,99
Z 260*70*19*3	208,600	222,49	210,64
Z 260*75*17*4	278,226	396,75	315,59
Z 280*59*17*2	108,847	77,19	104,08
Z 280*60*17*2,5	144,860	128,27	148,88
Z 280*62*17*3	183,617	195,85	199,48
Z 280*63*17*3,5	226,725	281,84	254,06
Z 280*65*17*4	272,024	387,91	312,95
Z 300*88*17*1,5	61,158	39,11	70,05
Z 300*88*20*2	90,404	77,02	114,06
Z 300*88*22*2,5	128,547	137,32	169,85
Z 300*88*24*3	172,614	221,96	234,06
Z 300*88*25*3,5	216,705	324,83	300,74
Z 300*88*26*4	265,170	453,87	372,02
Z 320*80*18*2	80,944	68,96	107,87
Z 320*80*20*2,5	116,879	124,86	162,30
Z 320*80*22*3	158,882	204,31	225,53
Z 320*85*18*3,5	164,784	247,00	267,25
Z 320*85*20*4	212,724	365,55	342,14
Z 340*70*18*2	76,401	65,09	104,73
Z 340*70*20*2,5	110,699	118,25	158,08
Z 340*75*17*3	122,915	158,06	200,14
Z 340*75*18*3,5	158,566	237,68	262,66
Z 340*75*20*4	205,174	352,57	337,01
Z 360*60*18*2	67,611	57,60	98,33
Z 360*65*15*2,5	78,842	84,22	133,46
Z 360*65*17*3	111,327	143,16	190,82
Z 360*65*18*3,5	143,794	215,54	251,17
Z 360*70*15*4	155,798	267,73	298,73
Z 380*53*15*2	48,369	41,21	82,40
Z 380*55*15*2,5	66,303	70,83	122,06
Z 380*56*15*3	86,090	110,26	167,32
Z 380*58*15*3,5	108,899	163,23	220,06
Z 380*60*15*4	134,279	230,75	278,90
Z 400*100*21*2	57,848	61,67	113,41
Z 400*100*22*2,5	79,479	105,85	167,06
Z 400*100*24*3	107,477	172,19	233,70
Z 400*100*26*3,5	139,396	261,20	309,48
Z 400*100*27*4	170,744	365,39	387,65

BÖLÜM 7. EKSENEL BASINÇ DAYANIMLARININ ENKESİT BOYUTLARIYLA DEĞİŞİMİ

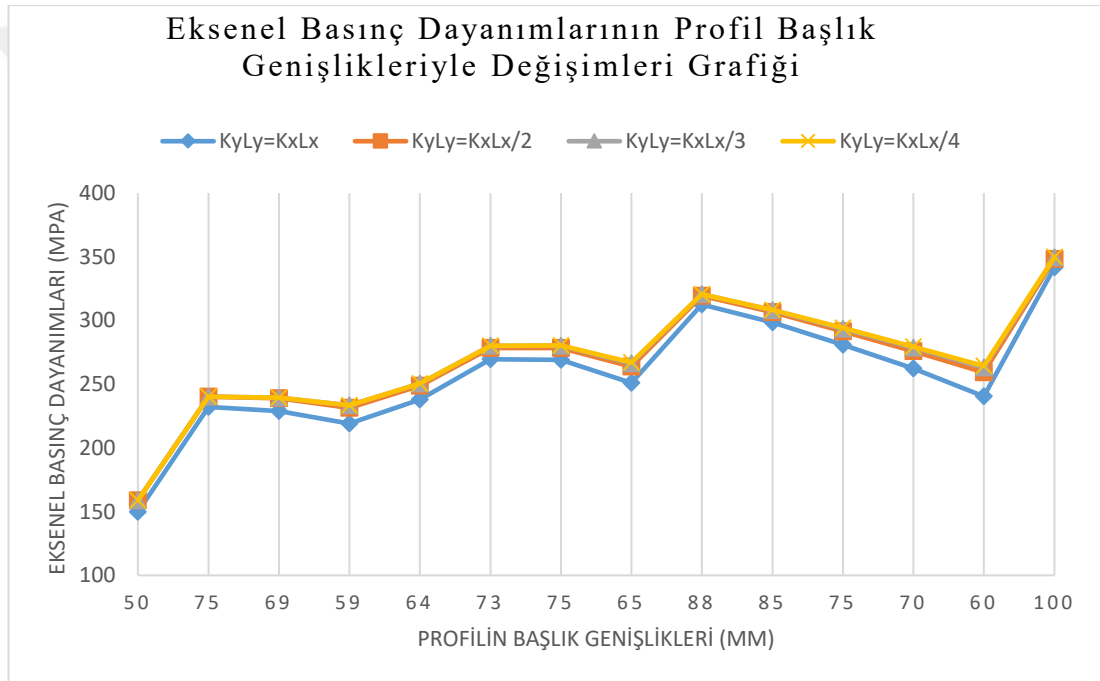
Bu bölümde, bölüm 6’da bulunan eksenel basınç dayanımlarının kesit boyutlarına göre değişimleri incelenmiştir. Genel burkulma davranışlarına göre hesaplanan eksenel basınç dayanımları, x ve y eksenindeki farklı burkulma boyları değerlerine göre, profilin yüksekliğine ve başlık genişliğine göre değişimleri grafiklerle gösterilmiştir. Profillerin grafiklerde de görüldüğü gibi et kalınlıkları sabit tutulmuş ve 4 mm alınmıştır.



Şekil 7.1. Profil Yüksekliğine göre Eksenel Basınç Değişim Grafiği

Şekil 7.1.’deki grafikte görüldüğü gibi, noktalar arasından doğrusal bir çizgi çizilmek istendiğinde, profil yüksekliği arttıkça, eksenel basınç dayanımlarının da genel anlamda arttığı görülmektedir. Bazı kısımlarda profil yüksekliğinin artmasına rağmen basınç dayanımlarının azalmış olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni ise narinlik

faktöründen dolayıdır. Elemanların yükseklik / genişlik oranlarının artmasıyla, kesit daha da narin hale gelmektedir. Bu sebepten dolayı bazı kısımlarda, profil yüksekliği artmasına rağmen, eksenel basınç dayanımlarında azalmalar olmuştur. Diğer taraftan, çelik elemanların kesit yüksekliği ve başlık genişliği oranları azaldıkça eksenel basınç dayanımları arttığı gözlenmiştir. Örnek olarak, profil yüksekliği 300 mm olan bir profilin yükseklik / genişlik oranı, 3,41 iken eksenel basınç dayanımı 312,49 MPa'dır. Profil yüksekliği 380 mm olan bir elemanın yükseklik / genişlik oranı, 6,33 iken eksenel basınç dayanımı 240,40 MPa olmaktadır. Bu örnekten de görüldüğü gibi mutlak surette, kesitin yüksekliği arttıkça, eksenel basınç dayanımı artar denemez.



Şekil 7.2. Profilin Başlık Genişliklerine Göre Eksenel Basınç Dayanımı Değişim Grafiği

Şekil 7.2.'deki grafiğe bakıldığında, Şekil 7.1.'deki grafiğe göre daha doğrusal bir grafik görülmektedir. Profilin başlık genişliği arttıkça, eksenel basınç dayanımları artmaktadır denilebilir. Başlık genişliği 75 mm olan üç farklı kesiti grafikte incelemek gerekirse, sırasıyla profil yükseklikleri, 140 mm, 260 mm ve 340 mm'dir. Başlık genişlikleri aynı olmasına rağmen, profil yükseklikleri farklı olduğu için eksenel basınç dayanımları da farklı sonuçlar vermiştir. Grafiğe bakıldığında, profil yüksekliklerinin verildiği sırayla eksenel basınç dayanımları; 232,08- 268,98 ve 280,87 MPa'dır. Görüldüğü gibi, et kalınlıkları sabit olan ve başlık genişlikleri eşit

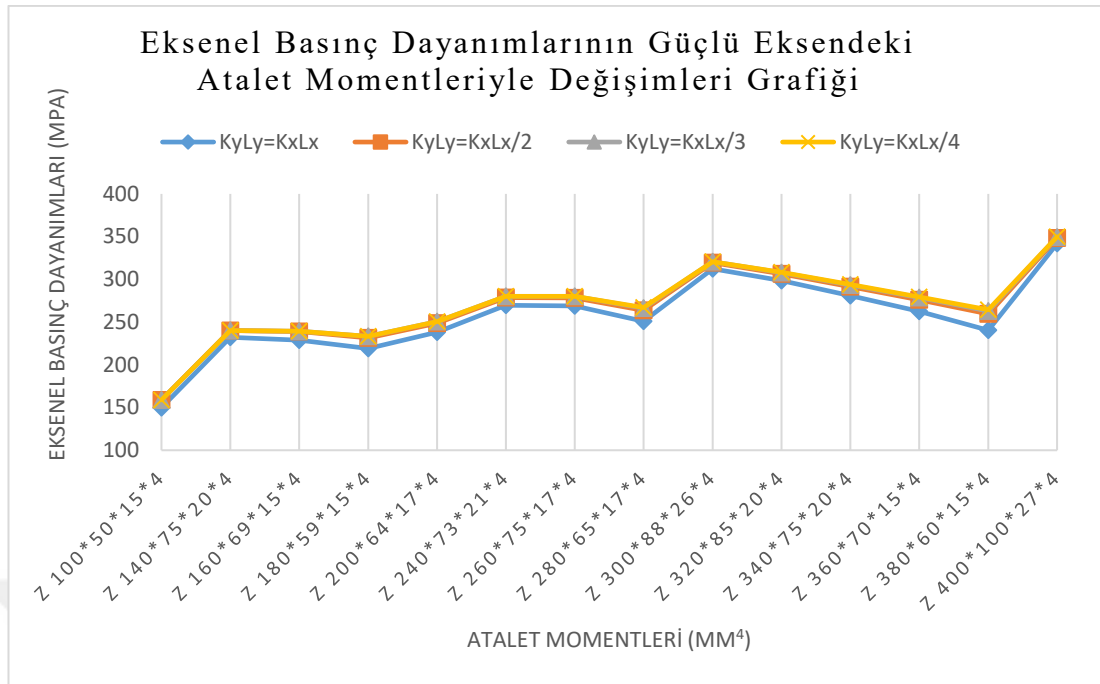
olan profillerde, kesit yüksekliği arttığında eksenel basınç dayanımlarının da arttığı gözlenmektedir.

7.1. Z Kesitli Çelik Elemanların Eksenel Basınç Dayanımlarının Atalet Momentleriyle Değişimlerinin İncelenmesi

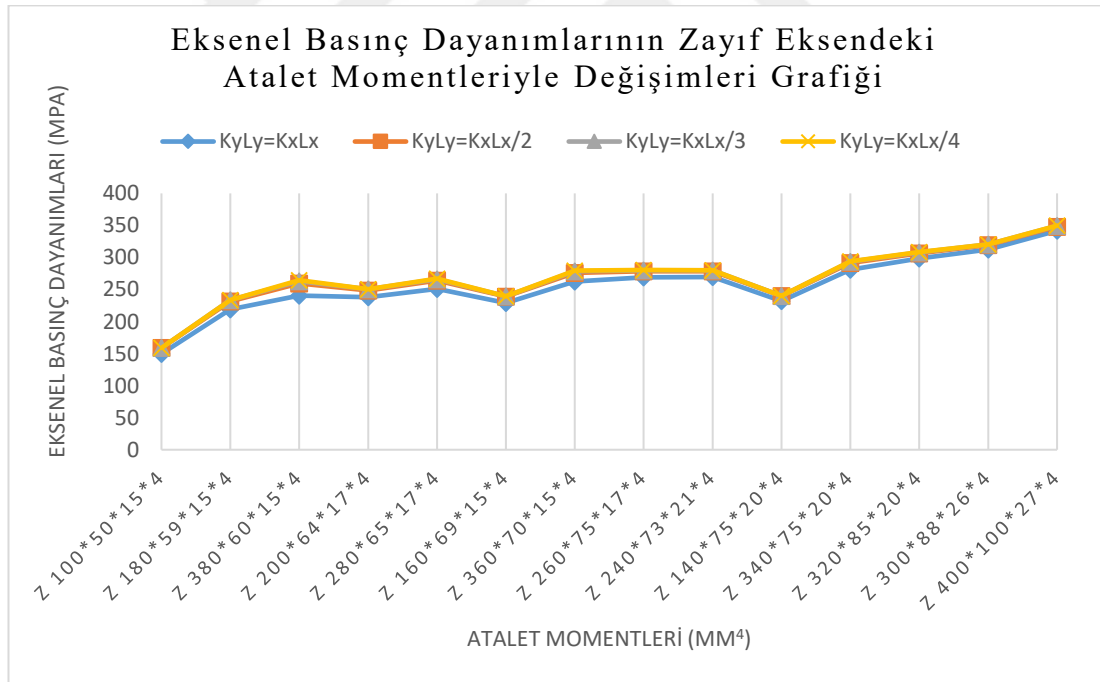
Bu bölümde ise soğuk şekillendirilmiş çelik Z profillerin eksenel basınç dayanımlarının, atalet momentleriyle değişimleri incelenmiştir. İncelenen kesitleri atalet momentleri, bu tez de bölüm 4 'te bulunan enkesit özelliklerinin hesaplanması yöntemlerinden olan yöntem 1 'e göre hesaplanan atalet moment değerleri alınmıştır. Çelik elemanların eksenel basınç dayanımlarının hesaplanmasında, kesitlerin atalet momentleri ve çelik malzemenin elastisite (E) modülü kullanılmaktadır. Bu çalışmada tüm hesaplarda çelik malzemesi ve kalitesi aynı olarak alınmıştır. Ancak atalet momentleri her kesite göre değiştiğinden dolayı farklılık göstermektedir. Bundan dolayı, atalet momentinin, eksenel basınç dayanımlarına etkisini incelemek amacıyla grafikler oluşturulmuştur. Aşağıda güçlü ve zayıf eksenlere göre eksenel basınç dayanımı ve atalet momentleri değişim grafikleri verilmiştir.

Şekil 7.3.'te bulunan soğuk şekillendirilmiş Z profillerin güçlü eksenindeki atalet momentleriyle eksenel basınç değişimlerini gösteren grafiğe bakıldığında, genel olarak artış olmakla birlikte yerel olarak, eksenel basınç dayanımlarında düşüşler görülmektedir. Dayanımlardaki bu düşüşlerin sebebi, kesitler x ekseninde kesit yüksekliğine bağlı olarak atalet momentleri sürekli artma eğiliminde olsa da, basınç dayanımlarını etkileyen diğer parametrelere bakıldığında ve profillerin kesit parçalarının boyutları yüksekliğe göre sürekli artmadığından dolayı basınç dayanımlarında düşüşler görülmektedir.

Zayıf eksene göre ise Şekil 7.4.'teki grafikte, incelenen profilleri listelediğimizde, kesit boyutlarında ve kesit parçalarında düzenli uyumlu bir artış gözlenmediğinden dolayı atalet momenti değerlerinde bazen artış bazen de azalma olduğu görülmüştür. Eksenel basınç dayanımı değerleri de, buna bağlı olarak grafikte görüldüğü gibi artış ve azalışlar olmuştur.



Şekil 7.3. Güçlü Eksende Atalet Momenti-Eksenel Basınç Dayanımları Grafiği



Şekil 7.4. Zayıf Eksende Atalet Momenti-Eksenel Basınç Dayanımları Grafiği

BÖLÜM 8. SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ ÇELİK Z KESİTLERİN EĞİLME DAYANIMLARININ BELİRLENMESİ

Bu bölümde, tezde incelenen soğuk şekillendirilmiş çelik Z profillerin, güçlü ve zayıf eksenlerdeki eğilme dayanımları alınarak, eğilme değerlerinin kesitlerin başlık genişlikleriyle değişimleri incelenmiştir. Güçlü ve zayıf eksende olmak üzere ayrı ayrı bulunan eğilme dayanımı değerleri ile Z kesitlerin başlık genişlikleri grafikler çizilerek karşılaştırılmıştır. Profillerin moment taşıma kapasiteleriyle başlık genişliklerinin karşılaştırılmasının sebebi, genel olarak diğer çelik profillerde olduğu, çelik bir kesitte başlıkların moment taşımasıdır.

Soğuk şekillendirilmiş çelik Z profillerin güçlü ve zayıf eksenlerdeki eğilme dayanımları veya moment taşıma kapasiteleri bulunurken, sonlu elemanlar yöntemiyle eleman tasarımı yapan CFS programından yararlanılmıştır. Kısa adıyla “CFS” olarak bilinen tasarım programı, İngilizce açılımı ile “Cold - Formed Steel Design Software” yani soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların tasarımı için yazılım denilmektedir. CFS programı, sadece soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların tasarımında kullanılmaktadır.

Amerikan Demir Çelik Enstitüsü (AISI), soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının tasarım için birçok yönetmelik yayınlamıştır. 1986 yılında yayınladığı yönetmelikte, çelik bir elemanın yerel burkulma dayanımının hesaplanmasında “Unified Approach” (Birleşik Yaklaşım) olarak adlandırılan hesap yöntemini ilave etmiştir. Bu hesap yöntemiyle, çelik kesitin narinliğine, elemandaki gerilmeye ve kenar rijitleştirme derecesine bağlı olarak, kesitin her bir parçasının etkin genişliklerinin hesaplanmasını gerektirmektedir. Etkili kesit özellikleri daha sonra dayanımı hesaplamak için kullanılmaktadır [51]. CFS programı, mühendis ve

tasarımcıların bu hesaplamaları hızlı ve kolay bir şekilde yapmasına yardımcı olmaktadır.

CFS soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların tasarımı programı, Amerikan Demir Çelik Enstitüsü 'nün yayınladığı güncel standartları takip etmekte ve sürekli kendisini güncellenmektedir. "Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Yapı Elemanlarının Tasarımı Standardı" 1996 yılında, Yük Ve Dayanım Katsayılarına Göre Tasarım (LRFD) ve Güvenlik Katsayılarına Göre Tasarım (ASD) yöntemlerini tek bir standartta birleştirmiştir. Daha sonra AISI, soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının tasarımı için Kuzey Amerika Yönetmeliğini geliştirmek için 2001 yılında Kanada (Kanada Standartlar Birliği) ve Meksika (CANACERO) ile birlikte çalıştı. Sonraki yayınlar ise 2007, 2010, 2012 ve 2016'da yayınlanmıştır. CFS programı, ASD ve LRFD yöntemleri (ABD ve Meksika) ve LSD yöntemi (Kanada) dahil olmak üzere farklı hesap yöntemleri için çözümler sunmaktadır. Diğer geçmiş yıllara ait standartlarda programda varlığını devam ettirmekte ve analizler yapılabilir. Bu tezde incelenen soğuk şekillendirilmiş çelik Z profillerin, eğilme dayanımları CFS programında hesaplanırken şu parametreler dikkate alınarak hesaplar yapılmıştır. Çelik Z profillerin boyları 1000 mm olarak alınmıştır. Her iki ucu mafsallı olduğundan dolayı burkulma katsayısı (K) 1.0 olarak alınmıştır. Güçlü ve zayıf eksenlerde burkulma boyları eşit olarak alınmış ve profil boyunca her iki yönde de hiçbir yerden tutulmamıştır.

Kesikli çizgiler burkulma eğrilerini göstermektedir.						
K teorik	0.50	0.70	1.00	1.00	2.00	2.00
K öneri	0.65	0.80	1.20	1.00	2.10	2.00

Şekil 8.1. Mesnet Şekillerine göre Burkulma Boyu Katsayıları

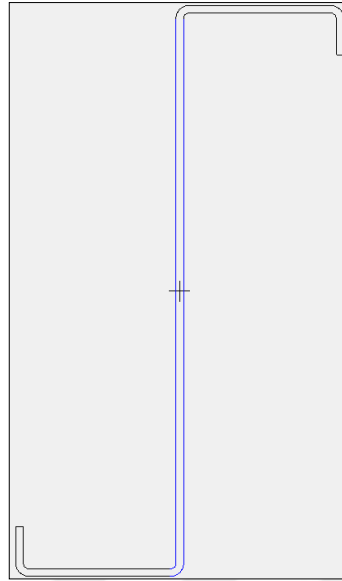
Çelik malzeme kalitesi diğer hesaplarda olduğu gibi 203 GPa ve kayma modülü ise 78 GPa olarak alınmıştır. Çelik Z profillere ait enkesit özellikleri ise bölüm 4'te yöntem 1'e göre hesaplanan değerler alınmıştır.

Tez de önceki bölümlerde enkesit değerlerinin hesaplanmasında ve eksenel basınç dayanımlarının hesaplanmasında örnek olarak, açık hesapları gösterilen Z 300*88*26*4 profilinin daha iyi anlaşılabilmesi için CFS programında modellenmesi ve dayanım değerlerinin okunması gösterilmiştir.

The image shows a software window titled "Section Wizard (2 of 2)". It contains a "Stiffened Zee" section type. The "Thickness" is set to 4 mm. The "Section Depth" is 300 mm, "Flange Width" is 88 mm, "Lip Length" is 26 mm, and "Inside Radius" is 3 mm. The "Web Angle" and "Lip Angle" are both set to 90 deg. The "Rib Spacing" and "Number of Spacings" fields are empty. At the bottom, there are buttons for "Help", "< Back", "Finished", and "Cancel".

Şekil 8.2. Soğuk Şekillendirilmiş Z Kesitin Boyutlarının Girilmesi

CFS programında, birçok farklı soğuk şekillendirilmiş çelik kesit için analiz ve tasarım yapmak mümkündür. Bu çalışmada incelenen soğuk şekillendirilmiş dudakları olan Z profiller ise programda, "Stiffened Zee" yani rijitleştirilmiş Z profil olarak adlandırılmıştır. Şekil 8.2.'de tanımlanan boyutlara bakıldığında, "section depth" kesit yüksekliğini, "flange width" başlık genişliğini, "lip length" dudak uzunluğunu, "inside radius" iç köşe yarıçapını ve "thickness" ise kesitin et kalınlığını ifade etmektedir. Diğer yandan "web angle" ve "lip angle" ise sırasıyla gövde-başlık bağlantı köşesinde açığı, diğeri ise başlık-dudak arasındaki köşenin bükme açısını vermektedir. İncelenen kesitlerde, her iki köşelerinde büküm açıları dik olduğundan dolayı 90 derece olarak girilmiştir. Şekil 8.3.'te girilen boyutlara göre kesit görünüşü verilmektedir.



Şekil 8.3. Tanımlanan Z Kesitin Görünüşü

Member Parameters: Section 1.sct

Unbraced Lengths		Coefficients		Internal Forces	
L _x	1 m	C _{bx}	1	P	0 kN
L _y	1 m	C _{by}	1	e _x	0 mm
L _t	1 m	C _{mx}	1	e _y	0 mm
K _x	1	C _{my}	1	M _x	0 kN-m
K _y	1	Braced Flange	None	V _y	0 kN
K _t	1	Red. Factor, R	0	M _y	0 kN-m
L _m	1 m	Stiffness, K _φ	0 kN	V _x	0 kN

OK Cancel Help

Şekil 8.4. Analiz için Hesap Değerlerinin Girilmesi

Güçlü ve zayıf eksenlerde eğilme dayanımlarının program da hesaplanması için belirlenen parametrelerin doğru bir şekilde programa girilmesi gerekmektedir. Şekil 8.4.'te daha önce belirlenerek programa girilen parametreler gösterilmektedir. Şekilde gösterilen “Unbraced Lengths” desteklenmemiş uzunluk olarak adlandırılan ilk sütunda, profilin boyu (L), mesnet şartlarına göre burkulma boyu katsayısı (K) tanımlanmaktadır. “Coefficients” yani katsayılar olarak adlandırılan ikinci sütunda ise, yanal burulmalı burkulma sınır durumunda moment düzeltme katsayısı (C_b), eşdeğer sabit moment yayılışına dönüştürme katsayısı (C_m) tanımlanmaktadır. C_b ve C_m

değerleri, “Çelik Yapıların Tasarım Hesap Ve Yapımına Dair Esaslar” yönetmeliğinde bölüm 9.1’de de geçen ifadeye göre “tüm yükleme durumları için güvenli bir tarafta kalan bir yaklaşımla 1.0 alınabilir” denildiğinden dolayı, 1.0 olarak girilmiştir.

Computation Results: Section 1.sct

Member Check - 2007 North American Specification - US (LRFD)

Material Type: [S235], Fy=235 MPa

Design Parameters:

Lx	1,0000 m	Ly	1,0000 m	Lt	1,0000 m
Kx	1,0000	Ky	1,0000	Kt	1,0000
Cbx	1,0000	Cby	1,0000	ex	0,0000 mm
cmx	1,0000	cmx	1,0000	ey	0,0000 mm

Braced Flange: None kφ 0 kN

Red. Factor, R: 0 Lm 1,0000 m

Loads:

	P	Mx	Vy	My	Vx
(kN)	(kN-m)	(kN)	(kN-m)	(kN)	(kN)
Entered	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
Applied	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
Strength	302,09	36,902	145,56	6,924	79,30

Select OK to create a report. OK Cancel Help

Şekil 8.5. Moment Taşıma Kapasitelerinin (Mmax) Okunması

Son olarak, soğuk şekillendirilmiş çelik elemanın kesitinin tanımlanması ve hesap için gerekli parametrelerin girilmesiyle analiz yapılmıştır. Şekil 8.5.’te girilen değerlere göre çelik elemanın analiz sonuçları gösterilmektedir. Tasarım parametreleri olarak girilen değerler ilk kısımda kısaca gösterilmiştir. Alt kısımda ise, moment taşıma kapasiteleri (M_{max}) verilmiştir. M_x ve M_y olmak üzere, güçlü ve zayıf eksenlerde elemanın eğilmede taşıyacağı moment değerleri gösterilmektedir. Birimler kN ve metre olarak verilmiştir. Soğuk şekillendirilmiş çelik Z profilin güçlü (M_x) ekseninde eğilmede taşıyabileceği maksimum moment değeri, 36,902 kNm ve zayıf (M_y) ekseninde taşıyabileceği maksimum moment değeri ise 6,924 kNm olarak hesaplanmış ve tablo halinde sunulmuştur.

Tablo 8. 1. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Z Profillerin Eğilmede Taşıyabileceği Mmaks Momentler

PROFİL ADI	A'	B'	C'	t	Mx	My
	mm	mm	mm	mm	kNm	kNm
Z 100*50*15*1,2	100	50	15	1,2	1,7034	0,7119
Z 100*50*15*1,5	100	50	15	1,5	2,2211	0,8722
Z 100*50*15*2	100	50	15	2	2,8934	1,1241
Z 100*50*15*2,5	100	50	15	2,5	3,5329	1,4332
Z 100*50*15*3,5	100	50	15	3,5	4,9787	1,8709
Z 100*50*15*4	100	50	15	4	5,5547	2,0632

Tablo 8.1. (Devamı)

Z 120*50*15*1	120	50	15	1	1,652	0,597
Z 120*50*15*1,2	120	50	15	1,2	2,0967	0,7119
Z 120*50*15*1,5	120	50	15	1,5	2,7836	0,8722
Z 140*70*16*1,2	140	70	16	1,2	2,7749	1,0562
Z 140*70*17*1,5	140	70	17	1,5	3,8191	1,3675
Z 140*70*18*2	140	70	18	2	5,6281	2,1105
Z 140*70*20*2,5	140	70	20	2,5	7,2	2,7622
Z 140*75*17*3	140	75	17	3	8,7785	3,3619
Z 140*75*20*4	140	75	20	4	11,515	4,875
Z 160*60*15*1	160	60	15	1	2,3609	0,7292
Z 160*61*15*1,2	160	60	15	1,2	3,0282	0,8318
Z 160*61*15*1,5	160	61	15	1,5	4,1015	1,1114
Z 160*63*15*2	160	63	15	2	6,0232	1,6238
Z 160*64*15*2,5	160	64	15	2,5	7,8335	2,0661
Z 160*66*15*3	160	66	15	3	9,4414	2,5429
Z 160*68*15*3,5	160	68	15	3,5	11,062	3,211
Z 160*69*15*4	160	69	15	4	12,566	3,664
Z 180*50*15*1,2	180	50	15	1,2	3,2926	0,7119
Z 180*51*15*1,5	180	51	15	1,5	4,4637	0,8947
Z 180*53*15*2	180	53	15	2	6,5574	1,2384
Z 180*54*15*2,5	180	54	15	2,5	8,2493	1,6323
Z 180*56*15*3	180	56	15	3	9,9564	2,0185
Z 180*59*15*4	180	59	15	4	14,016	2,769
Z 200*55*16*1	200	55	16	1	3,0012	0,7146
Z 200*57*15*1,2	200	57	15	1,2	3,8032	0,7889
Z 200*57*16*1,5	200	57	16	1,5	5,2751	1,116
Z 200*60*15*2	200	60	15	2	7,6853	1,5243
Z 200*60*16*2,5	200	60	16	2,5	10,25	1,909
Z 200*60*18*3	200	60	18	3	12,292	2,497
Z 200*64*16*3,5	200	64	16	3,5	14,497	2,976
Z 200*64*17*4	200	64	17	4	16,443	3,41
Z 220*68*15*1,2	220	68	15	1,2	4,3549	0,9623
Z 220*68*16*1,5	220	68	16	1,5	6,0929	1,2646
Z 220*68*17*2	220	68	17	2	9,1927	1,9549
Z 220*68*19*2,5	220	68	19	2,5	12,696	2,566
Z 220*68*20*3	220	68	20	3	15,32	3,083
Z 240*70*15*1,2	240	70	15	1,2	4,7853	0,9935
Z 240*70*16*1,5	240	70	16	1,5	6,7205	1,3095
Z 240*73*15*2	240	73	15	2	9,8759	1,9446
Z 240*73*16*2,5	240	73	16	2,5	13,645	2,597
Z 240*70*21*3	240	70	21	3	17,684	3,319
Z 240*73*20*3,5	240	73	20	3,5	20,771	4,173
Z 240*73*21*4	240	73	21	4	23,586	4,776
Z 260*65*19*1,5	260	65	19	1,5	7,6456	1,4785
Z 260*70*15*2	260	70	15	2	10,678	1,777
Z 260*70*17*2,5	260	70	17	2,5	15,049	2,552
Z 260*70*19*3	260	70	19	3	19,532	3,152
Z 260*75*17*4	260	75	17	4	26,16	4,507
Z 280*59*17*2	280	59	17	2	11,505	1,577
Z 280*60*17*2,5	280	60	17	2,5	15,646	1,93
Z 280*62*17*3	280	62	17	3	20,016	2,562
Z 280*63*17*3,5	280	63	17	3,5	23,269	2,987
Z 280*65*17*4	280	65	17	4	26,728	3,505
Z 300*88*17*1,5	300	88	19	1,5	9,4457	2,02
Z 300*88*20*2	300	88	20	2	14,438	2,773
Z 300*88*22*2,5	300	88	22	2,5	20,26	4,077
Z 300*88*24*3	300	88	24	3	26,497	5,184
Z 300*88*25*3,5	300	88	25	3,5	32,457	6,053
Z 300*88*26*4	300	88	26	4	36,902	6,924
Z 320*80*18*2	320	80	18	2	14,569	2,393

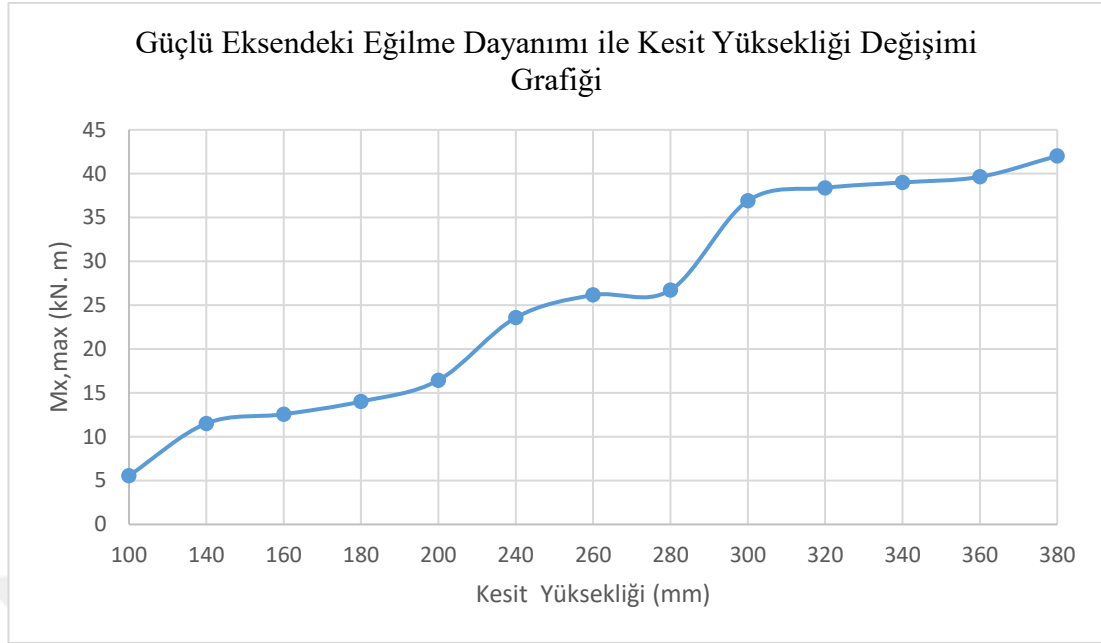
Tablo 8.1. (Devamı)

Z 320*80*20*2,5	320	80	20	2,5	20,594	3,195
Z 320*80*22*3	320	80	22	3	27,074	4,24
Z 320*85*18*3,5	320	85	18	3,5	31,98	4,889
Z 320*85*20*4	320	85	20	4	38,383	5,735
Z 340*70*18*2	340	70	18	2	14,974	1,707
Z 340*70*20*2,5	340	70	20	2,5	21,174	2,489
Z 340*75*17*3	340	75	17	3	26,481	3,363
Z 340*75*18*3,5	340	75	18	3,5	33,108	3,933
Z 340*75*20*4	340	75	20	4	39,002	4,879
Z 360*60*18*2	360	60	18	2	15,067	1,261
Z 360*65*15*2,5	360	65	15	2,5	20,158	1,92
Z 360*65*17*3	360	65	17	3	27,005	2,631
Z 360*65*18*3,5	360	65	18	3,5	33,767	3,247
Z 360*70*15*4	360	70	15	4	39,643	3,764
Z 380*53*15*2	380	53	15	2	14,235	0,967
Z 380*55*15*2,5	380	55	15	2,5	20,093	1,685
Z 380*56*15*3	380	56	15	3	26,338	2,02
Z 380*58*15*3,5	380	58	15	3,5	33,123	2,428
Z 380*60*15*4	380	60	15	4	42,024	2,857
Z 400*100*21*2	400	100	21	2	20,238	3,044
Z 400*100*22*2,5	400	100	22	2,5	28,325	4,579
Z 400*100*24*3	400	100	24	3	37,663	6,2
Z 400*100*26*3,5	400	100	26	3,5	47,636	7,632
Z 400*100*27*4	400	100	27	4	57,46	8,732

8.1. Z Kesitli Çelik Elemanların Eğilme Dayanımlarının Kesit Boyutlarıyla Değişimlerinin İncelenmesi

Bu bölümde soğuk şekillendirilmiş çelik Z kesitlerin, asal eksenlerine göre güçlü ve zayıf eksenlerde taşıyabileceği maksimum momentlerin, kesit boyutlarıyla değişimleri grafikler halinde sunulmaktadır. Basit eğilme durumundaki çelik elemanların eğilme dayanımları CFS sonlu elemanlar yöntemiyle tasarım programından alınarak, bir önceki bölümde tablo halinde sunulmuştur. Bu kısımda grafikler oluşturulurken bu tablolardan yararlanılmıştır.

Soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların eğilme dayanımları ile kesit boyutları değişimleri ile ilgili grafikler oluşturulurken ilk olarak kesit yüksekliği ele alınmıştır. Daha sonra ise kesitin başlık genişlikleri dikkate alınarak grafikler oluşturulmuştur. Daha düzgün grafikler elde etmek için et kalınlıkları sabit tutulmuştur. İlk olarak, Z kesitli çelik elemanların güçlü ve zayıf eksenlerindeki eğilme dayanımlarının, kesit yüksekliği ile değişimleri grafikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 8.6. Güçlü Eksendeki Eğilme Dayanımı ile Kesit Yüksekliği Değişimi Grafiği

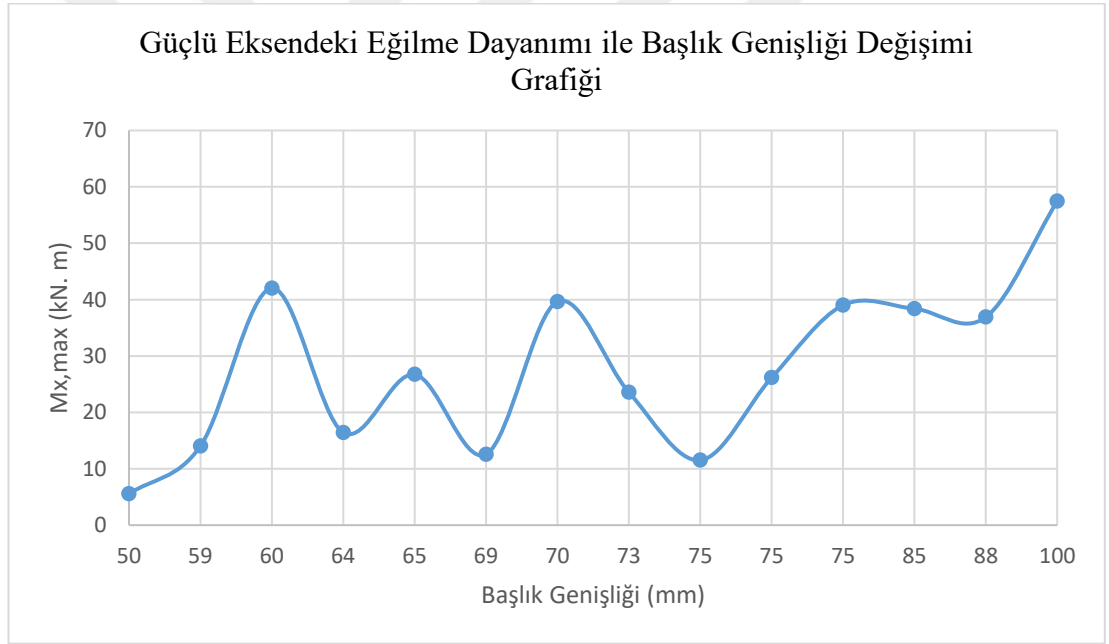


Şekil 8.7. Zayıf Eksendeki Eğilme Dayanımı ile Kesit Yüksekliği Değişimi Grafiği

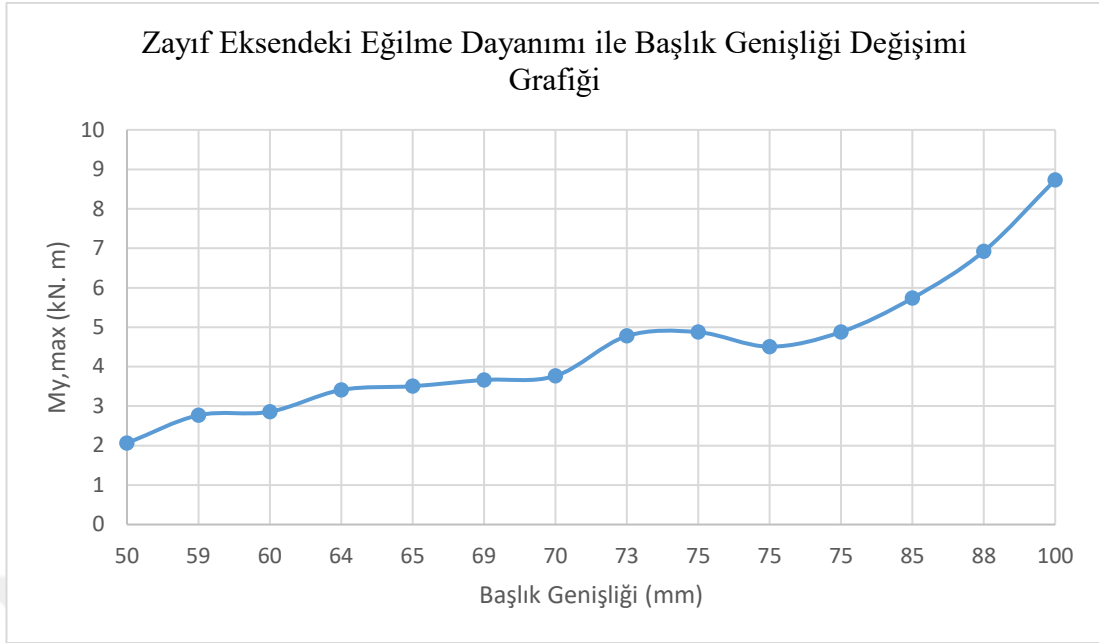
Güçlü (x) eksenindeki eğilme dayanımı ile kesit yüksekliği arasındaki değişime bakıldığında, kesit yüksekliği arttığında, çelik Z elemanın x ekseninde taşıyabileceği maksimum momentinde arttığı gözlenmiştir. Bunun sebebi, eğilme dayanımına etki eden değerlerin, x eksenine bağlı olarak kesit yüksekliği arttıkça artmasından kaynaklanmaktadır. Soğuk şekillendirilmiş çelik Z profillerin, güçlü (x) ekseninde

alışan kesit boyutu y doğrultusundaki boyutu olan, kesit yüksekliğidir. Bundan dolayı kesit yüksekliği arttığında, eğilme dayanımı artmış olacaktır.

Şekil 8.7.'deki zayıf (y) eksenindeki eğilme dayanımı ile kesit yüksekliği arasındaki değişim grafiğine bakıldığında doğrusal ve sürekli bir artış veya azalış görülmemektedir. Bunun en önemli nedeni ise, soğuk şekillendirilmiş Z profillerin, zayıf (y) ekseninde, x doğrultusundaki kesit boyutunun çalışmasıdır. Özetle, zayıf eksenindeki eğilme dayanımının belirlenmesinde, profilin başlık genişlikleri etki etmektedir. elik elemanların güçlü ve zayıf eksenlerdeki eğilme dayanımlarının başlık genişlikleriyle değişimleri ile ilgili grafikleri daha iyi anlaşılabilmesi açısından ayrı olarak verilmiştir.



Şekil 8.8. Güçlü Eksendeki Eğilme Dayanımı ile Başlık Genişliği Değişimi Grafiği



Şekil 8.9. Zayıf Eksendeki Eğilme Dayanımı ile Başlık Genişliği Değişimi Grafiği

Şekil 8.8. ve Şekil 8.9.'da bu tez kapsamında incelenen çelik Z profillerin güçlü ve zayıf eksenlerde eğilme dayanımlarının, başlık genişlikleriyle değişimleri grafikler halinde sunulmuştur. Eğilme dayanımlarının başlık genişlikleriyle değişimlerini daha doğru inceleyebilmek için diğer grafiklerde olduğu gibi et kalınlıkları sabit olan kesitler dikkate alınmıştır. Grafiklerde, et kalınlıkları 4 mm olan profiller alınmıştır ve incelenen boyutlar küçükten büyüğe sıralanarak verilmiştir. Güçlü eksene göre eğilme dayanımlarının başlık genişlikleriyle değişimi grafiğine bakıldığında, parabolik olarak ve eğilme dayanımının sürekli arttığı ve azaldığı görülmektedir. Yaygın olarak kullanıldığı düşünülen ve bu çalışmada incelenen Z profillerin, kesit yüksekleriyle başlık genişlikleri arasında doğru bir orantı yoktur. Örneğin, Tablo 4.2. incelendiğinde, kesit yüksekliklerinin, küçükten büyüğe doğru sıralandığı ve sürekli arttığı görülebilir. Ancak bu durum diğer kesit parçalarının boyutları için böyle değildir. Birçok profil incelendiğinde kesit yükseklikleri arttığı halde, başlık genişliklerinin bazılarında arttığı bazılarında ise azaldığı görülebilir. Bu durum aynı şekilde dudak uzunlukları içinde geçerlidir. Bundan güçlü eksenindeki eğilme dayanımlarının başlık genişlikleriyle değişimi grafiğinde doğrusal sürekli bir artış gözlenmemiştir. Diğer yandan, güçlü (x) ekseninde hesaplar yapılırken, sonuca büyük oranda etki eden kesit boyutunun kesit yüksekliği olduğu unutulmamalıdır.

Şekil 8.9.'a bakıldığında, zayıf ekseninde Z kesitlerinin taşıyabileceği maksimum eğilme momentinin, başlık genişlikleri arttıkça attığı gözlenmektedir. Zayıf ekseni asal eksenlerden y ekseni olan çelik elemanlarda, zayıf eksene göre yapılan hesaplarda sonuca, x doğrultusundaki kesit boyutu etki etmektedir. Bu çalışmada, zayıf eksenindeki eğilme dayanımı hesabını, başlık genişlikleri büyük oranda etkilemektedir. Bundan dolayı, zayıf ekseninde başlık genişliği arttıkça eğilme dayanımları artmaktadır.



BÖLÜM 9. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez kapsamında, soğuk şekillendirilmiş çelik Z profillerin, enkesit özellikleri ve eksenel basınç dayanımları hesaplanmıştır. Bulunan değerler tablo haline getirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, çelik malzemesiyle ve soğuk şekillendirme yöntemleri hakkında bilgilendirme yapılmıştır. Çelik malzemesinin gelişim sürecinden, iyi yönlerinden bahsedilmiştir. Ardından soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanları, kullanım alanları ve üretim aşamaları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Tezin ikinci aşamasında ise, soğuk şekillendirilmiş çelik Z profillerinin enkesit değerleri için, AISI S100 Kuzey Amerika yönetmeliğinde verilen hesap kuralları kısaca özetlenmiş ve hesapları yapılmıştır. Enkesit değerleri bulunurken, AISI S100 yönetmeliğinin yanı sıra üç yöntem daha kullanılarak değerler hesaplanmıştır. Bunlar kısaca, çizgisel yöntem, yaklaşık çizgisel yöntem ve yaygın şekilde kullanılan sonlu eleman programı Sap2000'den sonuçların direkt alınması yöntemleridir. Yöntemler bölüm 4'te ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Tezin son ve üçüncü aşamasında ise, soğuk şekillendirilmiş çelik Z profillerinin, eksenel basınç dayanımları hesaplanmıştır. Hesaplar YDKT (Yük ve Dayanım Katsayılarına göre Tasarım) hesap yöntemine göre yapılmıştır. Öncelikle, profillerin eksenel basınç dayanımlarını belirlemek için sınır koşulları kısaca anlatılmıştır. Ardından, soğuk şekillendirilmiş çelik Z profiller için AISI S100 yönetmeliğinde verilen eksenel basınç dayanımı için hesap kuralları sunulmuştur. Z profillerin eksenel basınç dayanımları hesabı şu dört adım izlenerek yapılmıştır. İlk adımda, profillerin üretildiği çelik malzemesinin akma dayanımına göre hesap yapılmıştır. Akma değeri sınır kabul edilmiş ve profillerin eksenel basınç değerleri buna göre bulunmuştur. İkinci adım, yerel burkulma sınır durumudur. Çelik profillerin, genel burkulma davranışı göstermediği kabulü yapılarak, enkesit parçalarının bölgesel burkulma davranışı yaptığı düşünülerek, profillerin basınç dayanımları belirlemiştir. Üçüncü adımda, profillerin farklı burkulma boylarında ve farklı mesnet koşullarında genel burkulma davranışı yaptığı durumlar için basınç

dayanımı hesabı yapılmıştır. Son olarak ise dördüncü adımda, profillerin başlıklarında kenar rijitleştirici, uç rijitleştirici denilen bu tezde dudak diye isimlendirilen enkesit parçaları bulunan profillerde görülen çarpımalı burkulma sınır durumu için eksenel basınç dayanımı hesabı yapılmıştır.

Bu çalışma varılan sonuçlarda, enkesit değerlerinin karşılaştırılmasıyla ilgili olarak, yöntem 1 referans alınarak, yöntem 2'ye göre hesaplanan enkesit değerlerinin hata yüzdeleri, yuvarlak köşe kabulüne göre oluşturulan çizgisel yöntemde, köşelerin atalet momentlerinin ihmal edilmesi medeniyle oluşan hata, incelenen profillerin güçlü (x) eksenlerine göre hesaplanan atalet ve mukavemet momentleriyle, atalet yarıçaplarında hata oranları, % 0.05 ten daha küçük çıkmıştır. İncelenen profillerin zayıf (y) eksenlerine göre hata yüzdelerine bakıldığında ise, hesaplanan atalet ve mukavemet momentlerinde yaklaşık % 0.4, atalet yarıçaplarında ise yaklaşık % 0.2 olduğu görülmektedir.

Kare köşe kabulüyle oluşturulan çizgisel kesitin boyutları kullanılarak hesaplanan enkesit değerleri, yöntem 3'te bulunan değerler ile Yöntem 1'e göre hesaplanan değerler karşılaştırılmış ve en büyük hata oranlarının, atalet ve mukavemet momentlerinde olduğu görülmüştür. Güçlü (x) eksene göre hesaplanan atalet ve mukavemet momentlerinde hata oranları yaklaşık olarak %2, atalet yarıçapında ise yaklaşık % 0.5 tir. Zayıf (y) eksene göre hesaplanan atalet ve mukavemet momentlerinde hata oranları yaklaşık olarak %3.5, atalet yarıçapında ise % 1.08 dir. Alan ve burkulma sabitindeki hata oranlarına bakıldığında ikisinde de hata yüzdesi % 1.10 olarak belirlenmiştir. En büyük hata oranlarının, zayıf eksenindeki (I_y ve W_y) atalet ve mukavemet momentlerine olduğu görülmüştür.

Kare köşe kabulüyle oluşturulan çizgisel kesitin, profillerin enkesit değerlerinin hesaplanmasında daha pratik olduğu görülmektedir. Ancak, hata oranlarına bakıldığında, kare köşe kabulüyle hesaplanan enkesit değerlerinin hata yüzdeleri, yuvarlak köşe kabulüyle hesaplanan enkesit değerlerinin hata yüzdelerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise, kare köşe kabulünde çizgisel enkesit

oluşturulurken, köşede ki eğriliklerin ihmal edilerek, köşelerin dik bir şekilde birleştirilmesi olduğu söylenebilir.

Genel burkulma davranışının olmadığı, çelik yapı elemanının sürekli desteklendiği durumlar düşünüldüğünde, akma sınır durumundaki eksenel basınç dayanımının enkesit alanı arttıkça arttığı gözlenmiştir. Enkesit boyutlarına bakıldığında ise diğer enkesit parçalarına göre profilin üretildiği plakanın et kalınlığı arttıkça, profilin yük taşıma kapasitesinde büyük artışlar olduğu tespit edilmiştir. Akma sınır durumunda profilin eksenel basınç kapasitesinin, enkesitin tüm alanına bağlı olduğu ve enkesit parçalarının beraber çalıştığı görülmüştür.

Ayrı ayrı etki alanları dahil edilerek profilin eksenel basınç dayanımının hesaplandığı yerel burkulma davranışında, profilin genel burkulma davranışında ve akma sınır durumunda geçmediği varsayılmıştır. Soğuk şekillendirilmiş çelik Z profilin her bir enkesit parçası (gövde, başlık, dudak) için ayrı ayrı basınç dayanım hesabı yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, çelik Z profilin en çok gövdesinde yerel burkulmadan dolayı sınır durum olduğu belirlenmiştir. Diğer enkesit parçalarına göre bakıldığında, eksenel basınç kuvvetine maruz kalan bir Z profilde, eğer yerel burkulmadan dolayı yenilme meydana gelecekse, gövde bölgesinde meydana gelme olasılığı diğerlerine göre daha yüksektir. Yerel burkulma davranışının en az meydana gelme olasılığı ise dudak parçaları olduğu tespit edilmiştir.

Genel burkulma davranışının meydana geldiği sınır durumlardaki basınç dayanımı hesaplarında, Z profilde oluşabilecek genel burkulma davranışları için ayrı ayrı hesap yapılarak en küçük olan değer profilin eksenel basınç dayanımı olarak alınmıştır. Profilin yük taşıma kapasitesi buna göre belirlenmiştir. Elde edilen dayanım sonuçlarına göre, profil yüksekliği arttıkça, eksenel basınç dayanımlarının da genel anlamda arttığı görülmektedir. Ancak bazı durumlarda, profil yüksekliğinin artmasına rağmen basınç dayanımlarının azalmış olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni ise, elemanların profil yüksekliği / başlık genişliği oranlarının artmasıdır. Bu sebepten dolayı bazı kesitlerde, profil yüksekliği artmasına rağmen, eksenel basınç dayanımlarında azalmalar olmuştur. Diğer taraftan, çelik elemanların kesit yüksekliği

ve başlık genişliği oranları azaldıkça eksenel basınç dayanımları arttığı gözlenmiştir. Sonuç olarak bu durumda, mutlak surette, kesitin yüksekliği arttıkça, eksenel basınç dayanımı da artar denemez.

Profilin başlık genişliği arttıkça, eksenel basınç dayanımları artmaktadır denilebilir. Başlık genişliği 75 mm olan üç farklı kesiti incelemek gerekirse, sırasıyla profil yükseklikleri, 140 mm, 260 mm ve 340 mm'dir. Profil yüksekliklerinin verildiği sırayla eksenel basınç dayanımları; 232,08- 268,98 ve 280,87 MPa'dır. Görüldüğü gibi, et kalınlıkları sabit olan ve başlık genişlikleri eşit olan profillerde, kesit yüksekliği arttığında eksenel basınç dayanımlarının da arttığı gözlenmektedir.

Son olarak, kesitlerine dudakları olan profillere özgü olan çarpılmalı burkulma sınır durumu için profilin eksenel basınç dayanımı hesapları yapılmıştır. Eksenel basınç dayanımı değerlerine bakıldığında, et kalınlığı arttığında basınç dayanımlarının da arttığı tespit edilmiştir. Ancak profillerin yüksekliği arttıkça, başlık genişliklerine bağlı olarak bölgesel azalmalar görülmüştür. Üreten firmaya göre değişmekle birlikte, bu tez de incelenen Z profillerde, örneğin profil yüksekliği 300 mm'den 400 mm'ye kadar artmaya devam etmekte ancak başlık genişlikleri azalmaktadır. Yükselik/genişlik oranındaki bu artış, basınç dayanımlarında düşmeye neden olmaktadır.

Hesaplar sonucu bulunan değerlerin tamamı tablolar halinde sunulmuştur. Bu tezde incelenen soğuk şekillendirilmiş çelik Z profillerin, her iki başlık genişlikleri de eşit uzunlukta alınmıştır. Tüm profillerin üretildiği çelik malzeme kalitesi aynıdır. Dudakların, başlıklarla yaptığı açı hepsinde dik açıdır, tam bükme yapılmıştır. Diğer farklı kesitlerde ve boyutlardaki çelik yapı elemanlarının hesapları için araştırmalar yapılmalıdır. Ancak yaygın şekilde kullanılan Z profillerin seçildiği bu çalışmanın tasarımcılara destek olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Durmaz M. ve Daloğlu A. (2015), Soğukta Şekil Verilmiş Korniyer Kolonların Davranışı, 6. Çelik Yapılar Sempozyumu, 373-384.
- [2] Mojaddidy K. ve Göğüş T. (2013), Eksenel Yüklü Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Elemanların Dayanımlarının Farklı Şartnamelere Göre İncelenmesi.
- [3] Aldemir Ü. ve Mangır A. (2014), İnce Cidarlı Çelik Depo Raf Sistemleri Kolonlarının Dayanım Ve Stabilitesi , 10041484.
- [4] Durmaz M. ve Daloğlu A. (2015), Nonlinear finite element analysis of cold-formed steel plain angle columns.
- [5] Dheyaa Albo Ishaq (2019), Hafif Çelik Bir Yapının Yeni Türk Deprem Yönetmeliğine Göre Performansının Değerlendirilmesi.
- [6] Atasarl H. (2009), Soğuk Şekillendirilmiş Çok Parçalı Hafif Çelik Kolonların Merkezi Yükleme Altında Davranışı.
- [7] Tama ve Kaplan (2015), Soğuk Şekillendirme Yöntemleri Ve Soğuk Şekillendirme İşinin Çelik Malzeme Mekanik Özelliklerine Etkisi.
- [8] Çelik H. (2020), Soğuk Şekillendirilmiş Çelik U Profillerin Enkesit Özelliklerinin Ve Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi (Determination Of Cross Sectional Properties And Axial Compressive Strengths Of Cold Formed Steel U Profiles).
- [9] Şenaysoy (2017), Çelik Depo Raf Sistemlerinde Kullanılan Dikme Ve Ayakların Burkulma Davranışlarının İncelenmesi Ve Optimizasyonu.
- [10] Tadaharu Adachi (2004), Effect Of Transverse Impact On Buckling Behavior Of A Column Under Static Axial Compressive Force Statik Eksenel (Basınç Kuvveti Altında Bir Kolonun Burkulma Davranışına Enine Etkinin Etkisi).
- [11] Panedpojaman P. (2019), Elastic Buckling Of Cellular Columns Under Axial Compression (Eksenel Sıkıştırma Altında Hücresel Kolonların Elastik Burkulması).
- [12] Avcar M. (2004), Çelik Kolonların Eksenel Basınç Altında Elastik Burkulması.

- [13] Xianlei Cao (2019), Local Buckling Of 800 Mpa High Strength Steel Welded T-Section Columns Under Axial Compression (Eksenel Sıkıştırma Altında 800 Mpa Yüksek Mukavemetli Çelik Kaynaklı T-Kesitli Kolonların Yerel Burkulması).
- [14] Tama Y. S. (2002), Soğuk Şekillendirilmiş Açık Kesitli Çelik Kirişlerin İncelenmesi.
- [15] Genç F. (2008), Soğukta Şekil Verilmiş İnce Cidarlı C Kesit Eğilme Elemanlarının Davranış Ve Dayanımı.
- [16] Kala G. (2010), Soğuk Şekil Verilmiş Çelik Profillerle Teşkil Edilen Bir Hal Yapısının Ec 3 Ve Lrfd'e Göre Karşılaştırmalı Boyutlandırılması.
- [17] Akar M. C. (2010), Sıcak Hadde Çeliği İle Soğukta Şekillendirilen Çeliklerin Özelliklerinin Ve Taşıyıcı Farklılıklarının İncelenmesi.
- [18] Evirgen B. (2012), Soğukta Şekil Verilmiş İnce Cidarlı Çelik Malzemede Üretilen Tüp Kesitli (CFST) Yapı Elemanlarının Eksenel Basınç Altındaki Davranışı (DeneySEL Ve Analitik).
- [19] Dönmez İ. (2017), Soğukta Şekil Verilmiş Profil Kullanarak Endüstriyel Yapı Tasarımı Ve Hesap Metotlarının Değerlendirilmesi.
- [20] Tüylüoğlu O. (2019), Soğukta Şekillendirilmiş Çelik Profillerin Bulon İle Bağlantı Hesapları.
- [21] AISI S100-16/S1-18: North American Specification (NAS) for the Design of Cold-formed Steel Structural Members, American Iron and Steel Institute, 2016 Edition, 3rd Printing, USA, 2018.
- [22] EN 1993-1-3: Eurocode 3 – Design of Steel Structures – Part 1. 2: General Rules for Cold-Formed Members and Sheeting, European Committee for Standardization, Brussels, 2006.
- [23] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, T. C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2019.
- [24] Computers and Structures Inc. (CSI), SAP 2000 Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures (Advanced 21. 0. 0).
- [25] ÇYTHY, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2016.
- [26] TS EN 1993-1-3: Çelik Yapıların Projelendirilmesi – Bölüm 1-3: Genel Kurallar – Soğukta Biçimlendirilmiş İnce Ölçülü Elemanlar ve Saçla Kaplama İçin”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2007.

- [27] ANSI/AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA, 2016.
- [28] APEC Çelik Yapı Sistemleri Sanayi ve Ticaret A. Ş. (<https://apc.com.tr/sogukta-sekil-verilmis-ince-cidarli-celik-profiller/>) Erişim Tarihi: 08. 12. 2020.
- [29] TS 11372: Çelik Yapılar-Hafif-Soğukta Şekil Verilmiş Profillerle Oluşturulan Hesap Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1994.
- [30] Almetan Yapı Elemanları Sanayi A. Ş. http://www.almetan.com/en/tr/urunler/yapi/tablo/ZED_tablo.pdf Erişim Tarihi: 03. 09. 2020.
- [31] Hekim Profil (<http://www.hekimprofil.com/z-profil>) Erişim Tarihi: 03. 09. 2020.
- [32] Uslular Hadde (<https://uslularhadde.com/hafif-celik-yapilar>). Erişim Tarihi: 04. 12. 2020.
- [33] Ümit Paslanmaz Çelik Ltd. Şti (<https://www.umitpaslanmaz.com/paslanmaz-celik-kullanim-alanlari/>) Erişim Tarihi: 04. 12. 2020.
- [34] Çelik Yapıların 150 Yıllık Tarihi (<https://www.insaatim.com/celik-yapilarin-150-yillik-tarihi/>) Erişim Tarihi: 04. 12. 2020.
- [35] Hafif Çelik-Soğukta Şekil Verilmiş Çelik-Hafif Çelik Yapılar (<https://insapedia.com/hafif-celik-nedir-hafif-celik-yapilar/>) Erişim Tarihi: 30. 11. 2020.
- [36] Steelin Hafif Çelik Yapı Sistemleri (https://www.steealin.com/celik-yapi.html?gclid=Cj0KCQiA2afBRDzARIsAIVQUOfIn_Wf5cf138g2swLx8ZVzWkmpkb4Nn8l5OvAcPAMtFu1RDF2O8YaAlHkEALw_wcB) Erişim Tarihi: 04. 12. 2020.
- [37] Soğuk şekillendirme Nedir? Yöntemleri Nelerdir? (<https://www.maktoloji.com/2018/05/soguk-sekillendirme-nedir-yontemleri.html#:~:text=Haddeleme%2C%20ekstr%C3%BCzyon%2C%20d%C3%B6vmeyen%2C%20tel,%C3%A7atlaklar%20olu%C5%9Fturmadan%20malzemeye%20%C5%9Fekil%20vermektedir.>) Erişim Tarihi: 30. 11. 2020.
- [38] Mühendis Gelişim / Dislokasyon Nedir? (<https://muhendisgelisim.com/dislokasyon-nedir/>) Erişim Tarihi: 23. 12. 2020
- [39] Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Betonarmade Kullanılan Malzemeler Ders Notları, Betonarmade Kullanılan Malzemeler Yrd. Doç. Dr. Hüseyin Kasap - Ppt İndir (Slideplayer. Biz. Tr) Erişim Tarihi: 06. 02. 2021

- [40] Şendemir Çelik Yapı Profiller (sendemir. com. tr) Erişim Tarihi: 06. 02. 2021
- [41] Geldimurat Annageldiyev (2019), Soğukta Şekil Verilmiş Çelik Çerçevesi Duvar Panellerinin Diyagonalli Ve Diyagonalsız Yatay Yük Kapasiteleri Ve Davranışı.
- [42] Cold Formed Steel Sections - CivilEngineeringBible. com Erişim Tarihi: 07. 02. 2021
- [43] Kocadağ Metal San. İnş. Nak. ve Tic. Ltd. Şti. BOLU - 0 374 217 2. . . / Demir Ve Demir Ürünleri / boludabolu. com | Boludabolu Erişim Tarihi: 04. 12. 2020
- [44] [http://www. metalroofingrollformingmachine. com/buy-c-z-purlin-roll-forming-machine. html](http://www.metalroofingrollformingmachine.com/buy-c-z-purlin-roll-forming-machine.html) Erişim Tarihi: 07. 02. 2021
- [45] Cold-Formed Steel Design Cold-Formed Steel Design Cover design: Holly Wittenberg Cover photographs: Steel Deck Institute, Fox River Grove, IL ((PDF) Cold-Formed Steel Design Cold-Formed Steel Design Cover design: Holly Wittenberg Cover photographs: Steel Deck Institute, Fox River Grove, IL | miguel Ledezma - Academia. edu) Erişim Tarihi: 06. 02. 2021
- [46] Centroid - Wikipedia Erişim Tarihi: 09. 02. 2021
- [47] Ağırlık Merkezi (Erbakan. Edu. Tr) Erişim Tarihi: 09. 02. 2021
- [48] İnce kayma akısı yatay kayma gerilmesi ve kayma merkezi - PDF Free Download (docplayer. biz. tr) Erişim Tarihi: 09. 02. 2021
- [49] [https://www. indiamart. com/proddetail/solar-cold-form-sections-11725143512. html](https://www.indiamart.com/proddetail/solar-cold-form-sections-11725143512.html) Erişim Tarihi: 09. 02. 2021
- [50] [https://www. simplytoughmetalbuildings. com/the-value-of-cold-formed-steel-in-todays-market/](https://www.simplytoughmetalbuildings.com/the-value-of-cold-formed-steel-in-todays-market/) Erişim Tarihi: 09. 02. 2021
- [51] [https://www. rsgsoftware. com/index. html?about](https://www.rsgsoftware.com/index.html?about) Erişim Tarihi: 20. 02. 2021

ÖZGEÇMİŞ

Zeynel Ayaz, 1985 yılında Sakarya'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2012 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2017 yılında bitirdi. 2017 yılında başladığı, Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. 2019 yılından beri Kocaeli Büyükşehir Belediyesi'nde, İnşaat Mühendisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.