

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ ÇELİK C PROFİLLERİN EKSENEL
BASINÇ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

HALE YAĞMUR

KOCAELİ 2022

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ ÇELİK C PROFİLLERİN EKSENEL
BASINÇ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

HALE YAĞMUR

Doç. Dr. Fuad OKAY
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Prof. Dr. Seval PINARBAŞI ÇUHADAROĞLU
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Melis TAŞKIN
Jüri Üyesi, Süleyman Demirel Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 14.06.2022

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu, - Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

Hale YAĞMUR

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....

Hale YAĞMUR

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tezde soğuk şekillendirilmiş çelik C profillerin eksenel basınç davranışlarının incelenmesi amacıyla ülkemizde farklı firmalarda üretilmekte olan C kesitli profiller ele alınmış, profillerin dayanımları Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü tarafından 2016 yılında yayınlanan AISI S100-16 numaralı ve “Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Yapı Elemanlarının Tasarımı için Kuzey Amerika Yönetmeliği”nde tanımlanan tasarım esasları kullanılarak hesaplanmıştır. Tasarımlarında bu tür profiller kullanan mühendis ve mimarlara yol göstermesi amacıyla, elde edilen dayanımlar tablolar halinde sunulmuştur. Ayrıca, incelenen profillerin geometrik özelliklerinin oldukça yoğun hesap gerektiren çarpılmalı burkulma dayanımlarına etkileri de araştırılmıştır.

Tez dönemim boyunca yaşadığım sorunlar karşısında benden destek, anlayış ve hoşgörüsünü esirgemeyen, değerli yönlendirmeleriyle zorlukları kolaylığa çeviren, hem akademik anlamda hem hayat görüşleriyle bende unutulmayacak izler bırakan kıymetli tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Fuad Okay’a şükranlarımı sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, ilgi ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve bu tez çalışmasında çok kıymetli katkılarda bulunan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Seval Pınarbaşı Çuhadaroğlu’na teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca, öncelikle doğru insan olmak şiarını edindikleri eğitimimde, uzun soluklu, süregelen maddi ve manevi fedakarlıklarından hiçbir zaman ödün vermeyen sevgili babam Ahmet Yağmur’a, annem Leyla Yağmur’a, ablalarım Eda ve Esra’ya sonsuz teşekkür ederim.

Haziran-2022

Hale YAĞMUR

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. SOĞUK ŞEKİL VERİLMİŞ İNCE CİDARLI ÇELİK YAPI ELEMANLARI.....	4
2.1. İnce Cidarlı Çelik Yapı Elemanlarının Üretimi	4
2.1.2. Soğuk haddeleme (Sürekli şekil verme).....	4
2.1.3. Presle bükme	5
2.2. İnce Cidarlı Çelik Profil Tipleri ve Uygulama Alanları	5
2.3. Soğuk Haddelenmiş Çelik Yapı Elemanlarının Avantajları ve Dezavantajları	8
2.4. Hafif Çelik Yapıların Tasarımında Kullanılan Yönetmelikler	9
3. SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ ÇELİK YAPI ELEMANLARININ EKSENEL BASINÇ ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞLARI.....	11
3.1. Akma.....	12
3.2. Genel Burkulma	12
3.2.1. Çift simetri eksenli kesite sahip profiller	15
3.2.2. Tek simetri eksenli kesite sahip profiller	16
3.3. Yerel Burkulma.....	17
3.3.1. Düz genişlik (w)	19
3.3.2. Düz genişlik/kalınlık oranı (w/t).....	20
3.3.3. Etkin tasarım genişliği (b)	20
3.3.4. Burkulma sonrası dayanım	21
3.4. Çarpılmalı Burkulma.....	22
4. SOĞUK ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK C PROFİLLERİN KESİT ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ.....	24
4.1. Çalışmada İncelenen Profiller.....	24
4.2. İncelenen Profillerin Enkesit Özelliklerinin Belirlenmesi	29
4.3. Tipik Bir C Kesit İçin Enkesit Özelliklerinin Hesaplanması	32
4.4. Profil Tablolarının Oluşturulması	35
5. EKSENEL BASINÇ ETKİSİNDEKİ SOĞUK ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK C PROFİLLERİN AISI S100-16'YA GÖRE TASARIM İLKELERİ.....	39
6. SOĞUK ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK C PROFİLLERİN TASARIM EKSENEL BASINÇ KUVVETİ DAYANIMLARININ HESAPLANMASI.....	49
6.1. Profillerin Genel Burkulmanın Engellendiği Durumlar İçin Tasarım Eksenel Basınç Kuvveti Dayanımlarının Hesaplanması	50
6.2. Profillerin Genel Burkulmanın Mevcut Olduğu Durumlardaki Tasarım Eksenel Basınç Kuvveti Dayanımlarının Hesaplanması	66

6.3. Profillerin Çarpılmalı Burkulma Gerilmesindeki Tasarım Eksenel Basınç Kuvveti Dayanımlarının Hesaplanması	99
7. SOĞUK ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK C PROFİLLERİN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN EKSENEL BASINÇ KUVVETİ DAYANIMINA ETKİSİ.....	108
7.1. Geometrik Özelliklerin Akma Gerilmesindeki Dayanıma Etkisinin İncelenmesi	108
7.2. Çarpılmalı Burkulma Gerilmesindeki Tasarım Dayanımına Etkisinin İncelenmesi	125
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	139
KAYNAKLAR.....	141
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	144
ÖZGEÇMİŞ.....	145



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Sürekli şekil verme işlemiyle üretilen bir eleman	4
Şekil 2.2.	Pres makinesiyle şekil verme işlemi.....	5
Şekil 2.3.	Yaygın olarak kullanılan kesit tipleri	5
Şekil 2.4.	Soğuk şekillendirilmiş C profil örneği	6
Şekil 2.5.	Soğuk haddelenmiş çelik profillerle üretilen hafif çelik yapı örneği	6
Şekil 2.6.	Soğuk haddelenmiş çelik yassı elemanların kesit tipleri	7
Şekil 2.7.	Soğuk haddelenmiş çelik yassı elemanların (a) kompozit döşemede (b) endüstriyel yapılarda cephe kaplaması olarak kullanımı	7
Şekil 3.1.	Soğuk şekil verilmiş çelik C profillerin başlıca sınır durumları.....	12
Şekil 3.2.	Eğilmeli-burulmalı burkulma sırasında simetrik olmayan bir kesitin yer değiştirmesi.....	13
Şekil 3.3.	Çift simetri eksenine sahip kesitler.....	15
Şekil 3.4.	Tek simetri eksenli kesitler	16
Şekil 3.5.	Soğuk şekillendirilmiş çelik U kesitli bir profilde yerel burkulma	17
Şekil 3.6.	Rijitleştirilmemiş basınç elemanları	18
Şekil 3.7.	Rijitleştirilmiş basınç elemanları	18
Şekil 3.8.	Çoklu rijitleştirilmiş basınç elemanları.....	19
Şekil 3.9.	Rijitleştirilmemiş basınç elemanlarında düz genişlik	19
Şekil 3.10.	Rijitleştirilmiş basınç elemanlarında düz genişlik.....	19
Şekil 3.11.	Basınç elemanları için etkin tasarım genişlikleri.....	20
Şekil 3.12.	Rijitleştirilmiş basınç elemanlarında gerilme dağılımının ardışık aşamaları	21
Şekil 3.13.	Eksenel basınç kuvveti altındaki bir C profildeki etkin tasarım genişlikleri	21
Şekil 3.14.	Soğuk şekillendirilmiş çelik basınç elemanlarında çarpılmalı burkulma modunda a) kesitte b) eleman boyunca gözlenen şekil değiştirmeler	22
Şekil 4.1.	Soğuk şekillendirilmiş C profil ve temel boyutları	24
Şekil 4.2.	Tipik bir C profilin enkesit hesaplarında kullanılan simgeler	30
Şekil 5.1.	Tipik bir C profilin başlık ve tırnağının düz genişlikleri.....	43
Şekil 5.2.	Tipik bir C profilin başlık ve tırnağının etkin genişlikleri.....	44
Şekil 5.3.	Basit rijitleştiricili bir basınç başlığındaki gerilme dağılımları	44
Şekil 5.4.	Çarpılmalı burkulma dayanımı hesabında kullanılan başlık kesiti.....	47
Şekil 7.1.	ÜF1, ÜF2 ve ÜF3'e ait C profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının gövde yükseklikleri (H) ve başlık genişliklerine (B) bağlı değişimi.....	110
Şekil 7.2.	H=150 mm, C=15 mm olan C profillerin B=50 mm, B=100 mm ve B=150 mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına kalınlığın etkisi	112
Şekil 7.3.	B=100 mm, C=30 mm olan C profillerin H=100 mm, H=300 mm ve H=500 mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına kalınlığın etkisi	113
Şekil 7.4.	H=200 mm, B=80 mm olan C profillerin C=15 mm, C=30 mm ve C=45 mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına kalınlığın etkisi	114

Şekil 7.5.	B=50 mm, C=20 mm olan C profillerin $t=1,5$ mm, $t=3$ mm ve $t=5$ mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına gövde yüksekliğinin etkisi.....	114
Şekil 7.6.	B=75 mm, C=25 mm olan C profillerin $t=2$ mm, $t=3$ mm, $t=4$ mm ve $t=5$ mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına gövde yüksekliğinin etkisi.....	115
Şekil 7.7.	B=100 mm, C=30 mm olan C profillerin $t=2$ mm, $t=3$ mm, $t=4$ mm ve $t=5$ mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına gövde yüksekliğinin etkisi.....	116
Şekil 7.8.	H=150 mm, C=15 mm olan C profillerin $t=1,5$ mm ve $t=3$ mm için gerilmesindeki tasarım dayanımlarına başlık genişliğinin etkisi.....	117
Şekil 7.9.	H=300 mm, C=25 mm olan C profillerin $t=3$ mm ve $t=5$ mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına başlık genişliğinin etkisi	117
Şekil 7.10.	H=500 mm, C=30 mm olan C profillerin $t=3$ mm ve $t=5$ mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına başlık genişliğinin etkisi	118
Şekil 7.11.	H=150 mm, B=50 mm olan C profillerin $t=1,5$ mm ve $t=3$ mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına tırnak boyunun etkisi	119
Şekil 7.12.	H=300 mm, B=100 mm olan C profillerin $t=2$ mm ve $t=4$ mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına tırnak boyunun etkisi	119
Şekil 7.13.	H=500 mm, B=120 mm olan C profillerin $t=3$ mm ve $t=5$ mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına tırnak boyunun etkisi	120
Şekil 7.14.	Farklı boyutlara sahip C profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının kalınlığa (t) bağlı olarak artış oranı	121
Şekil 7.15.	Farklı boyutlara sahip C profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının gövde yüksekliğine (H) bağlı olarak artış oranı	122
Şekil 7.16.	Farklı boyutlara sahip C profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının başlık genişliğine (B) bağlı olarak artış oranı	122
Şekil 7.17.	Farklı boyutlara sahip C profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının tırnak boyuna (C) bağlı olarak artış oranı.....	123
Şekil 7.18.	Farklı boyutlara sahip C profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının içbüküm yarıçapına (R) bağlı olarak artış oranı	124
Şekil 7.19.	ÜF1, ÜF2 ve ÜF3'e ait C profillerin çarpılmalı burkulma gerilmesindeki mukavemetlerinin gövde yükseklikleri (H) ve başlık genişliklerine (B) bağlı değişimi	126
Şekil 7.20.	H=150 mm, C=15 mm olan C profillerin B=50 mm, B=100 mm ve B=150 m için çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına kalınlığın etkisi	127
Şekil 7.21.	B=100 mm, C=30 mm olan C profillerin H=100 mm, H=300 mm ve H=500 mm için çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına kalınlığın etkisi	128
Şekil 7.22.	H=200 mm, B=80 mm olan C profillerin C=15 mm, C=30 mm ve C=45 mm için çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına kalınlığın etkisi	128
Şekil 7.23.	B=50 mm, C=20 mm olan C profillerin $t=1,5$ mm, $t=3$ mm ve $t=5$ mm için çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına gövde yüksekliğinin etkisi	129

Şekil 7.24. B=75 mm, C=25 mm olan C profillerin t=2 mm, t=3 mm ve t=4 mm için çarpımlı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına gövde yüksekliğinin etkisi	130
Şekil 7.25. B=100 mm, C=30 mm olan C profillerin t=3 mm, t=4 mm ve t=5 mm için çarpımlı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına gövde yüksekliğinin etkisi	130
Şekil 7.26. H=150 mm, C=15 mm olan C profillerin t=1,5 mm ve t=3 mm için çarpımlı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına başlık genişliğinin etkisi.....	131
Şekil 7.27. H=300 mm, C=25 mm olan C profillerin t=3 mm ve t=5 mm için çarpımlı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına başlık genişliğinin etkisi.....	132
Şekil 7.28. H=500 mm, C=30 mm olan C profillerin t=3 mm ve t=5 mm için çarpımlı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına başlık genişliğinin etkisi.....	132
Şekil 7.29. H=150 mm, B=50 mm olan C profillerin t=1,5 mm ve t=3 mm için çarpımlı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına tırnak boyunun etkisi.....	133
Şekil 7.30. H=300 mm, B=100 mm olan C profillerin t=2 mm ve t=4 mm için çarpımlı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına tırnak boyunun etkisi.....	133
Şekil 7.31. H=500 mm, B=120 mm olan C profillerin t=3 mm ve t=5 mm için çarpımlı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına tırnak boyunun etkisi.....	134
Şekil 7.32. Farklı boyutlara sahip C profillerin çarpımlı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının kalınlığa (t) bağlı olarak artış oranı	135
Şekil 7.33. Farklı boyutlara sahip C profillerin çarpımlı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının gövde yüksekliğine (H) bağlı olarak artış oranı	135
Şekil 7.34. Farklı boyutlara sahip C profillerin çarpımlı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının başlık genişliğine (B) bağlı olarak artış oranı	136
Şekil 7.35. Farklı boyutlara sahip C profillerin çarpımlı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının tırnak boyuna (C) bağlı olarak artış oranı	137
Şekil 7.36. Farklı boyutlara sahip C profillerin çarpımlı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının içbükmü yarıçapına (R) bağlı olarak artış oranı	138

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Basınç başlıkları için w/t oranları	20
Tablo 4.1. ÜF1'e ait profillerin enkesit özellikleri ve boyutları	25
Tablo 4.2. ÜF2'ye ait profillerin enkesit özellikleri ve boyutları	26
Tablo 4.3. ÜF3'e ait profillerin enkesit özellikleri ve boyutları	27
Tablo 4.4. ÜF1'e ait C profillerin hesaplanan enkesit özellikleri	35
Tablo 4.5. ÜF2'ye ait C profillerin hesaplanan enkesit özellikleri	36
Tablo 4.6. ÜF3'e ait C profillerin hesaplanan enkesit özellikleri	37
Tablo 6.1. ÜF1'e ait C profillerin genel burkulmanın olmadığı durumlardaki tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları	51
Tablo 6.2. ÜF2'ye ait C profillerin genel burkulmanın olmadığı durumlardaki tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları	52
Tablo 6.3. ÜF3'e ait C profillerin genel burkulmanın olmadığı durumlardaki tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları	53
Tablo 6.4. ÜF1'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları	67
Tablo 6.5. ÜF2'ye ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları	70
Tablo 6.6. ÜF3'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları	75
Tablo 6.7. ÜF1'e ait C profillerin çarpılmalı burkulmaya ait hesaplanan değerleri	100
Tablo 6.8. ÜF2'ye ait C profillerin çarpılmalı burkulmaya ait hesaplanan değerleri	101
Tablo 6.9. ÜF3'e ait C profillerin çarpılmalı burkulmaya ait hesaplanan değerleri	102

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Çizgisel kesitte düz gövde yüksekliği, (mm)
$\bar{a}$	: Kare-köşeli çizgisel kesitin gövde yüksekliği, (mm)
A'	: Dıştan dışa gövde yüksekliği, (mm)
A, A_g	: Kayıpsız enkesit alan, (mm ²)
A_f	: Başlığın alanı, (mm ²)
A_e	: Etkin alan, (mm ²) d_s'
B	: Başlık genişliği, (mm)
B'	: Dıştan dışa başlık genişliği, (mm)
B	: Çizgisel kesitte düz başlık genişliği, (mm)
b_e	: Etkin başlık genişliği, (mm)
b_1, b_2	: Etkin başlık genişliği, (mm)
$\bar{b}$	: Kare-köşeli çizgisel kesitin başlık genişliği, (mm)
c	: Çizgisel kesitte düz tırnak (rijitleştirici) boyu, (mm)
$\bar{c}$	: Kare-köşeli çizgisel kesitin tırnak boyu, (mm)
C'	: Dıştan dışa tırnak boyu, (mm)
C_w	: Çarpılma sabiti, (mm ⁶)
C_{wf}	: Başlığın çarpılma sabiti, (mm ⁶)
D	: Dıştan dışa tırnak boyu, (mm)
d	: Düz tırnak boyu, (mm)
d_s	: Azaltılmış etkin tırnak boyu, (mm)
d_s'	: Tırnağın etkin boyu, (mm)
E	: Elastisite modülü (GPa)
e_x	: GM ile gövdenin dış yüzü arasındaki mesafe, (mm)
F_{cre}	: Elastik burkulma gerilmesi, (N/mm ²)
F_{crd}	: Elastik çarpılmalı burkulma gerilmesi, (N/mm ²)
F_n	: Karakteristik basınç gerilmesi (Genel burkulma gerilmesi)
F_u	: Çeliğin çekme gerilmesi, (MPa)
F_y	: Çeliğin karakteristik akma gerilmesi, (MPa)
G	: Birim boy kütle, (kg/m)
G	: Çeliğin kayma, modülü, (GPa)
H	: Gövde yüksekliği, (mm)
h_o	: Gövdenin dıştan dışa genişliği, (mm)
h_{xf}	: Başlığın geometrik merkezinden başlık/gövde birleşimine olan x eksenindeki mesafesi, (mm)
h_{yf}	: Başlığın geometrik merkezinden başlığın kayma merkezine olan y eksenindeki mesafesi, (mm)
I_a	: Rijitleştiricinin (tırnağın) yeterli atalet momenti, (mm ⁴)
I_s	: Rijitleştiricinin azaltılmamış atalet momenti, (mm ⁴)
I_x	: x eksenine göre atalet momenti, (mm ⁴)
I_{xf}	: Başlığın x eksenine göre atalet momenti, (mm ⁴)
I_y	: y eksenine göre atalet momenti, (mm ⁴)
I_{yf}	: Başlığın y eksenine göre atalet momenti, (mm ⁴)
I_{xyf}	: Başlığın çarpım atalet momenti, (mm ⁴)
i_x	: x eksenine göre asal atalet yarıçapı, (mm)
i_y	: y eksenine göre asal atalet yarıçapı, (mm)

i_0	: Kayma merkezine göre polar atalet yarıçapı, (mm)
J	: Burulma sabiti, (mm ⁴)
J_f	: Başlığın burulma sabiti, (mm ⁴)
K	: Plak burkulma katsayısı
K_t	: Burulma için etkin burkulma boyu katsayısı
K_x	: x eksenindeki etkin burkulma boyu katsayısı
K_y	: y eksenindeki etkin burkulma boyu katsayısı
k	: Plak burkulma katsayısı
k_ϕ	: Dönme rijitliği
$k_{\phi fe}$	: Başlığın başlık/gövde birleşimine sağladığı elastik dönme rijitliği
$\tilde{k}_{\phi fg}$	: Başlığın başlık/gövde birleşiminden talep ettiği geometrik dönme rijitliği
$k_{\phi we}$	: Gövdenin başlık/gövde birleşimine sağladığı elastik dönme rijitliği
$\tilde{k}_{\phi wg}$	: Gövdenin başlık/gövde birleşiminden talep ettiği geometrik dönme rijitliği
L_{crd}	: Kritik desteklenmemiş çarpılmalı burkulma boyu
L_m	: Çarpılmalı burkulmayı engellemek amacıyla yerleştirilen destekler arası mesafe
L_t	: Basınç elemanlarında burulma için desteksiz boy
L_x	: Basınç elemanlarında x eksenine göre eğilmede desteksiz burkulma boyu
L_y	: Basınç elemanlarında y eksenine göre eğilmede desteksiz burkulma boyu
M	: Merkez çizgi ile KM arası yatay mesafe, (mm)
P_u	: Gerekli eksenel basınç kuvveti dayanımı
P_d	: Tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı
P_n	: Karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı
P_y	: Basınç elemanının (soğuk şekillendirilmiş) akma yükü
P_{cr}	: Elastik burkulma yükü
P_{crd}	: Elastik çarpılmalı burkulma yükü
P_x	: x eksenine göre eğilmeli burkulma yükü
P_y	: y eksenine göre eğilmeli burkulma yükü
P_z	: z eksenine göre burulmalı-burkulma yükü
R	: İç büküm yarıçapı, (mm)
r_x	: x eksenine göre asal atalet yarıçapı, (mm)
r_y	: y eksenine göre asal atalet yarıçapı, (mm)
r_0	: Kayma merkezine göre polar atalet yarıçapı, (mm)
t	: Kalınlık, (mm)
u	: Merkez çizginin köşeler arası mesafesi, (mm)
u	: Kayma merkezinin x yönündeki yatay yerdeğiştirme
v	: Kayma merkezinin y yönündeki yatay yerdeğiştirme
W_{ex}	: x eksenine göre mukavemet momenti, (mm ³)
W_{ey}	: y eksenine göre mukavemet momenti, (mm ³)
w	: Düz genişlik, (mm)
x_0	: GM ile KM arası yatay mesafe, (mm)
$\bar{x}_c$	: Merkez çizgi ile GM arası yatay mesafe

x_{of}	: Başlığın geometrik merkezinden başlığın kayma merkezine olan x eksenindeki mesafesi, (mm)
y_0	: GM ile KM arası düşey mesafe, (mm)
y_{of}	: Başlığın geometrik merkezinden başlığın kayma merkezine olan y eksenindeki mesafesi, (mm)
θ	: Başlık ile tırnak (rijitleştirici) arasındaki açı
λ	: Narinlik katsayısı
μ	: Poisson oranı
ρ	: Yoğunluk
ρ	: Yerel azaltma katsayısı
σ_{ex}	: x ekseninde elastik eğilmeli burkulma gerilmesi
σ_{ey}	: y ekseninde elastik eğilmeli burkulma gerilmesi
σ_t	: Elastik burkulmalı burkulma gerilmesi
Ω	: Güvenlik katsayısı
ϕ	: Dayanım katsayısı
ϕ_c	: Dayanım katsayısı
$\phi_c P_n$	: Tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı

Kısaltmalar

AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASD	: Allowable Strength Design (Güvenlik Katsayıları ile Tasarım)
CFS	: Cold Formed Steel (Soğuk Şekillendirilmiş Çelik)
C.G.	: Center of Gravity (Ağırlık Merkezi)
GKT	: Güvenlik Katsayılarına Göre Tasarım
GM	: Geometrik Merkez
KM	: Kayma Merkezi
LRFD	: Load and Resistance Factor (Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım)
LSD	: Limit States Design (Sınır Durumlara Göre Tasarım)
S.C.	: Shear Center (Kayma Merkezi)
SDT	: Sınır Durumlarına Göre Tasarım
S.C.E.	: Stiffened Compression Element (Rijitleştirilmiş Basınç Elemanı)
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
U.C.E.	: Unstiffened Compression Element (Rijileştirilmemiş Basınç Elemanı)
ÜF1	: Üretici Firma 1
ÜF2	: Üretici Firma 2
ÜF3	: Üretici Firma 3
YDKT	: Yük ve Dayanım Katsayılarına Göre Tasarımı

SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ ÇELİK C PROFİLLERİN EKSENEL BASINÇ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanları, ince çelik levhaların oda sıcaklığında farklı kesitli elemanlar oluşturacak şekilde biçimlendirilmesiyle üretilen ve sıcak hadde profillere göre oldukça düşük kalınlıklara sahip taşıyıcı elemanlardır. Soğuk şekillendirilmiş elemanlar, hafif-çelik yapıların duvar, çatı ve normal kat döşemelerinde taşıyıcı elemanlar olarak sıkça kullanılmaktadır. Bu tür profillerin sıklıkla kullanılan türlerinden biri de başlık, gövde ve kenar rijitleştiricilerinden oluşan C kesitli profillerdir. Bu çalışmanın amacı, ülkemizde üretilen soğuk şekillendirilmiş çelik C profillerin eksenel basınç altındaki davranışlarını ve dayanımlarını incelemektir. Çalışmada, ilk olarak, ele alınan profillerin temel enkesit özellikleri, Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü tarafından 2013 yılında yayınlanan Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Tasarım Kılavuzu'nda tanımlanan formüllerle hesaplanarak tablolandırılmıştır. Ardından, eksenel basınç kuvveti etkisindeki ince cidarlı çelik C profillerin AISI-S100-16 yönetmeliğine göre tasarım esasları detaylı olarak anlatılmıştır. Daha sonra, incelenen profillerin basınç altındaki tasarım dayanımları, farklı burkulma boyları ele alınarak hesaplanmış ve elde edilen değerler tablolar halinde sunulmuştur. Dayanım tabloları hazırlanırken, kenar rijitleştiricisine sahip açık kesitli profillerde görülen ve bu tür profillerin basınç davranışını belirleyen önemli sınır durumlardan biri olan çarpılmalı (distorsiyonel) burkulma sınır durumu da dikkate alınmıştır. Çalışmada ayrıca, ele alınan profillerin dayanım değerleri karşılaştırılarak profillerin geometrik özelliklerinin dayanımlarına etkisi araştırılmıştır. Çalışmada sunulan tabloların tasarım hesaplamalarında mühendislere kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çarpılmalı Burkulma, Eksenel Basınç Kuvveti Dayanımı, Hafif Çelik, Kenar Rijitleştirici, Soğuk Şekillendirilmiş Çelik C Profil.

INVESTIGATION OF AXIAL COMPRESSIVE BEHAVIOR OF COLD FORMED STEEL C PROFILES

ABSTRACT

Cold-formed steel (CFS) structural members are load carrying elements that are produced by forming thin steel plates to produce members with various sections at room temperature and that have much smaller thickness than hot-rolled members. CFS members are often used as load carrying members of walls, roofs and floors light-gage steel structures. One of the most frequently used CFS sections is in C section which consists of web and flanges with edge stiffeners. The objective of this study is to investigate the behavior and strength of CFS C profiles commonly produced in our country, under axial compression. In the study, firstly the fundamental cross-sectional properties of the examined profiles are computed by using the formulas defined in the Cold Formed Steel Design Guide published by the American Iron and Steel Institute in 2013 and accordingly the related section tables are constructed. Then, the design criteria for CFS C profiles subjected to axial compressive force according to the AISI-S100-16 are presented in detail. The design compressive strengths of the examined profiles are then calculated by considering different buckling lengths and presented in tables. Distortional buckling limit state, which is one of the important limit states that govern the compressive behavior of CFS members with edge stiffeners, is also taken into account while preparing the strength tables. In the study, the effects of the geometric properties of the examined profiles on their strength are also investigated. It is thought that the tables presented in the study will provide guidance to engineers in design calculations.

Keywords: Distortional Buckling, Axial Compressive Strength, Light-Gage Steel, Edge Stiffener, Cold Formed Steel C Profile.

1. GİRİŞ

Soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanları; düşük maliyetle üretilmeleri, kolay ve seri monte edilebiliyor olmaları, yük taşıma kapasitelerinin kalınlıklarına oranla oldukça fazla olması gibi avantajları sayesinde, yapı sektöründe pek çok farklı uygulamada karşımıza çıkmaktadır. ABD, İngiltere ve diğer Avrupa ülkeleri başta olmak üzere dünyanın birçok yerinde kullanım hacmine sahip olan hafif çelik yapıların, ülkemizde de son yirmi senede üretimi artmış ve kullanım alanı genişlemiştir (URL-4, 2021). Ülkemizde özellikle hafif çelik yapılarda ana taşıyıcı, sanayi yapılarında ise yardımcı taşıyıcı eleman olarak yaygın şekilde kullanılan soğuk şekillendirilmiş çelik profiller, pek çok farklı enkesite sahip olacak şekilde üretilmektedir.

Soğuk şekillendirilmiş çeliğin kullanılmaya başlaması, 20.yy'nin ilk çeyreğinde uçak endüstrisinin hafif, ancak taşıma kapasitesi yüksek elemanlara ihtiyaç duymasına dayanmaktadır. Bu konu ile ilgili araştırmaların artmasına ve tekniğin gelişimine önayak olan diğer bir sektör de otomobil endüstrisidir. Çeliğin elde edilme yöntemlerinin geliştirilmesi ile birlikte mukavemeti yüksek ve hafif malzemeler üretilmiş, bu ürünler yapılarda da kullanılmaya başlanmıştır. Soğuk şekillendirilmiş çeliğin ilk kullanım alanları kaplama ve çatı imalatları olurken, ilerleyen zamanlarda ana taşıyıcı konstrüksiyon uygulamalarına geçilmiştir (URL-4, 2021). Soğuk şekillendirilmiş çeliğin yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlaması ise 1800'lü yıllara uzanmaktadır. Yaygın olarak kullanımı ise 1940'lı yıllardan sonra Amerika ve İngiltere'de görülmektedir. Cornell Üniversitesi'nde George Winter öncülüğünde yürütülen deneysel çalışmalar neticesinde bir standart yayınlanmıştır. Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institue, AISI) tarafından ilk baskısı 1946 yılında yayınlanan “Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Yapı Elemanlarının Tasarımı için Yönetmelik (Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members)” ince cidarlı çelik konstrüksiyonun kullanımına ve gelişmesine hız kazandırmıştır (Yu ve diğ., 2020).

Bu tez çalışmasının ana amacı, ülkemizde çeşitli firmalarca imal edilen soğuk şekillendirilmiş çelik C profillerin aksenal basınç altındaki tasarım dayanımlarını, Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü tarafından 2016 yılında yayınlanan AISI S100-16 numaralı ve “Kuzey Amerika Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Yapı Elemanlarının

Tasarımı için Yönetmelik”te (North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members) (AISI, 2016) tanımlanan tasarım ilkelerini kullanarak hesaplamak ve tasarımlarında bu tür profiller kullanan mühendis ve mimarlara yol gösteren kullanışlı tasarım tabloları meydana getirmektir. Tezin bir diğer amacı da, incelenen profillerin geometrik özelliklerinin oldukça yoğun hesap gerektiren çarpılmalı (distorsiyonel) burkulma dayanımlarına etkilerini araştırmaktır.

Bu amaçlarla tezde, ülkemizde soğuk şekillendirilmiş çelik C profil üretimi yapan üç firmaya ait ürün kataloglarında enkesit özellikleri ile birlikte yer alan 146 farklı C profil ele alınmıştır. Dayanım hesaplarına geçilmeden önce, ürün kataloglarında, profillerin genel tasarım hesaplarında kullanılan bütün enkesit özelliklerinin listelenmediği tespit edilmiştir. Bu nedenle çalışmada ilk olarak, incelenen profillerin temel enkesit özellikleri, Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü’nün 2014 yılında yayınlamış olduğu “Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Tasarım Kılavuzu”nda (Cold Formed Steel Design Manual) (AISI Manual, 2014) tanımlanan bağıntılar kullanılarak hesaplanıp tablolastırılmıştır.

Tezin ikinci kısmında, eksenel basınç kuvveti etkisindeki ince cidarlı çelik C profillerde basınç davranışını belirleyen sınır durumlar ile AISI S100-16 (AISI, 2016) yönetmeliğinde Bölüm E’de tanımlanan tasarım ilkeleri detaylı olarak anlatılmıştır. Ele alınan profillerin tasarım basınç kuvveti dayanımları, AISI S100-16 yönetmeliğindeki tasarım ilkelerine göre hesaplanmıştır. Dayanım hesaplamalarında, hesap adımlarını göstermek amacıyla örnek bir profil ele alınarak el hesabı detaylıca gösterilmiştir. Hesaplamalarda profillerin S235 çelik kalitesinde olduğu kabul edilmiştir. Profillerin eksenel basınç kuvveti dayanımları, genel burkulmanın engellendiği ve mevcut olduğu durumlar için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Genel burkulmanın engellendiği durumlarda, profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları; akma gerilmesi, başlığın, gövdenin ve rijitleştiricinin (tırnağın) tümüyle etkin olduğu en büyük gerilme değerlerine göre hesaplanmıştır. Genel burkulmanın mevcut olduğu durumda, profillerin tasarım dayanımları, farklı burkulma boyları ve beş farklı mesnetlenme durumu için elde edilmiş ve tablolar halinde sunulmuştur. Ayrıca, C profillerin basınç davranışını belirleyen sınır durumlarından biri olan çarpılmalı burkulma dikkate alınarak, incelenen profillerin çarpılmalı burkulma dayanımları hesaplanmış ve

tablolaştırılmıştır. Oluřturulan tablolar, “Soėuk şekillendirilmiş Ćelik Tasarım Kılavuzu”nda (AISI Manual, 2014) Bۆlüm 3’te yer alan tablolar ۆrnek alınarak hazırlanmıştır. Bununla birlikte, soğuk şekillendirilmiş Ćelik C profillerin geometrik ۆzelliklerinin eksenel basınĉ mukavemetine etkisi de araştırılmıştır. Ćalıřmada sunulan tabloların, hafif Ćelik elemanlarla tasarım yapan mۆhendis ve mimarlara kolaylık sağlayacağı dۆřүнۆlmektedir.



2. SOĞUK ŞEKİL VERİLMİŞ İNCE CİDARLI ÇELİK YAPI ELEMANLARI

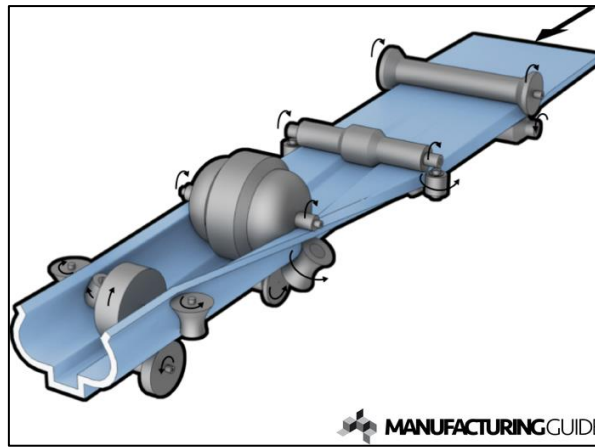
Çelik yapı elemanları, sıcak ve soğuk haddeleme olarak iki farklı yöntemle üretilmektedir. Sıcak haddelenmiş çelik yapı elemanları ülkemizde nispeten daha yaygın olarak kullanılan, ince cidarlı soğuk haddelenmiş çelik yapı elemanları ise daha az tanınmakla birlikte son yıllarda kullanım alanı genişleyen ve önemi artmakta olan yapı elemanları arasındadır. Her ne kadar malzeme çelik olsa da soğuk haddelenmiş çelik yapı elemanları; gerek şekillendirme, imalat ve montaj, gerek hesap ve tasarım bakımından sıcak haddelenmiş çelik yapı elemanlarından oldukça farklılık gösterir (Türker, 2020). Bu kısımda, ince cidarlı çelik yapı elemanlarına ait genel bilgiler sunulacaktır.

2.1. İnce Cidarlı Çelik Yapı Elemanlarının Üretimi

Soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanları, sürekli şekil verme ve presle bükme olmak üzere iki yöntemle üretilmektedir.

2.1.1. Soğuk haddeleme (Sürekli şekil verme)

Soğuk haddeleme, çelik levhaların silindirler arasından geçirilerek istenen şeklin verilmesi işlemidir. Silindir sayısı istenilen kesitin şekline göre değişmektedir. Yaygın olarak kullanılan bu yöntem, tek parçalı yapısal çelik elemanlarla bazı döşeme, duvar paneli ve panellerin üretiminde kullanılmaktadır (Yu ve diğ., 2020). Şekil 2.1.'de sürekli şekil verme makinesiyle üretilen ince cidarlı bir eleman görülmektedir.



Şekil 2.1. Sürekli şekil verme işlemiyle üretilen bir eleman (URL-5, 2021)

2.1.2. Presle bükme

Presle bükme, çelik levhayı istenen kesitin şekline uygun olarak seçilen kalıplar kullanılarak pres darbesiyle bükerek şekillendirme işlemidir. Bu yöntemde, hareketli bir üst kiriş ile sabit bir alt yatak üstüne monte edilmiş kalıplar kullanılmaktadır (Yu ve diğ., 2020). Şekil 2.2.'de pres makinesiyle çeliğe şekil verme işlemi görülmektedir.

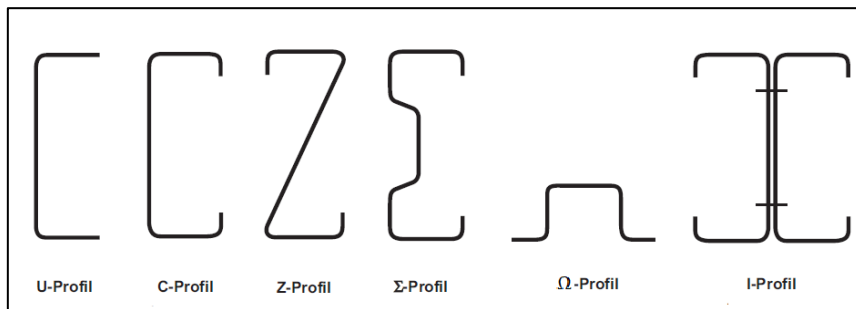


Şekil 2.2. Pres makinesiyle şekil verme işlemi (URL-6, 2021)

Presle bükme yöntemini kullanma kararı, parçanın şekline ve bu şekle ulaşmak için gereken takımın karmaşıklığına bağlıdır (Türker, 2020). Bu yöntem genellikle, fazla işlem gerektirmeyen, L, U ve Z enkesitli profiller gibi basit enkesite sahip profillerin üretiminde kullanılmaktadır.

2.2. İnce Cidarlı Çelik Profil Tipleri ve Uygulama Alanları

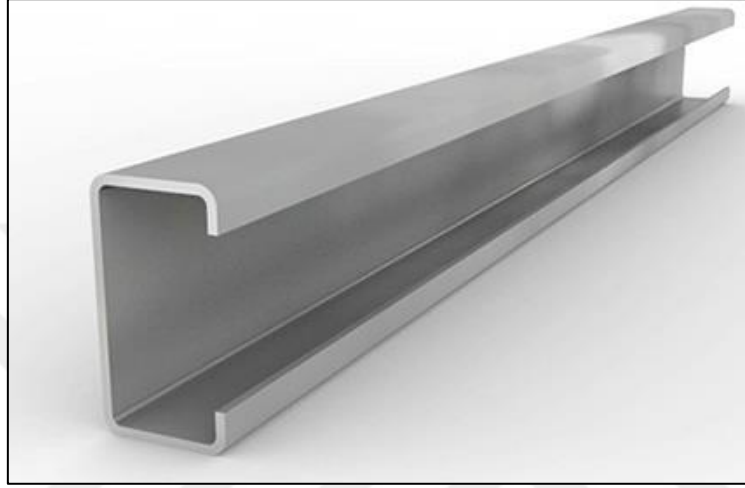
İnce cidarlı çelik yapısal elemanlar, ana taşıyıcı eleman olarak kullanılan soğuk haddelenmiş çelik profiller ve ikincil eleman olarak kullanılan soğuk haddelenmiş yassı elemanlar olarak iki temel grupta sınıflandırılabilir.



Şekil 2.3. Yaygın olarak kullanılan kesit tipleri (Stahl, 2002)

Ana taşıyıcı eleman olarak kullanılan ince cidarlı çelik profillerin çeşitli kesit tipleri mevcuttur. En yaygın kullanılan kesit tipleri Şekil 2.3'te yer alan C, Z, U, Σ , Ω ve I kesitli profillerdir.

Bu tez çalışmasında Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, başlık, gövde ve kenar rijitleştiricilerinden oluşan C profiller ele alınmaktadır.



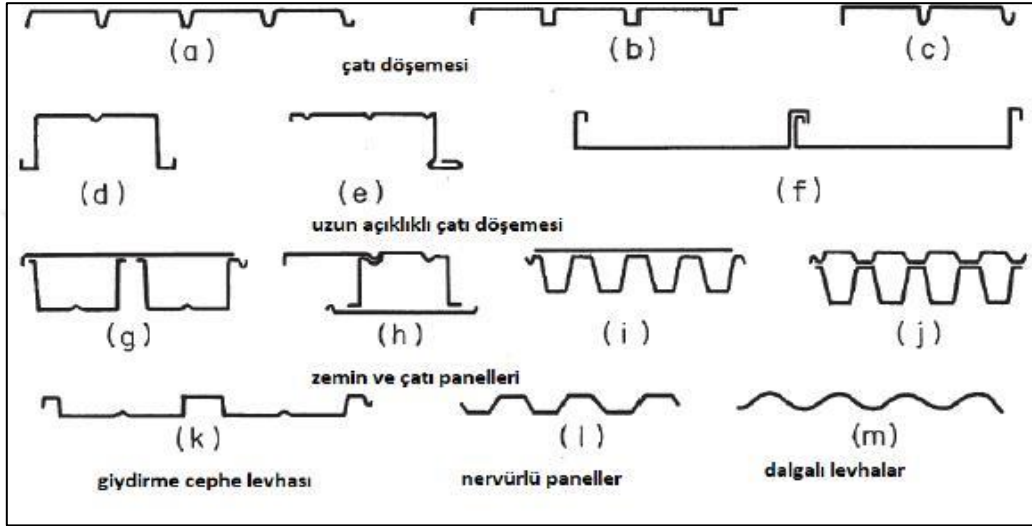
Şekil 2.4. Soğuk şekillendirilmiş C profil örneği (URL-10, 2021)

Soğuk haddelenmiş çelik profiller, hafif çelik yapılarda ana taşıyıcı elemanlar olarak kullanılabildiği gibi aşıklar, çatı makası elemanı ve destek kirişi olarak da kullanılabilmektedir. Şekil 2.5'te soğuk haddelenmiş çelik profillerle üretilen bir hafif çelik yapı örneği görülmektedir.



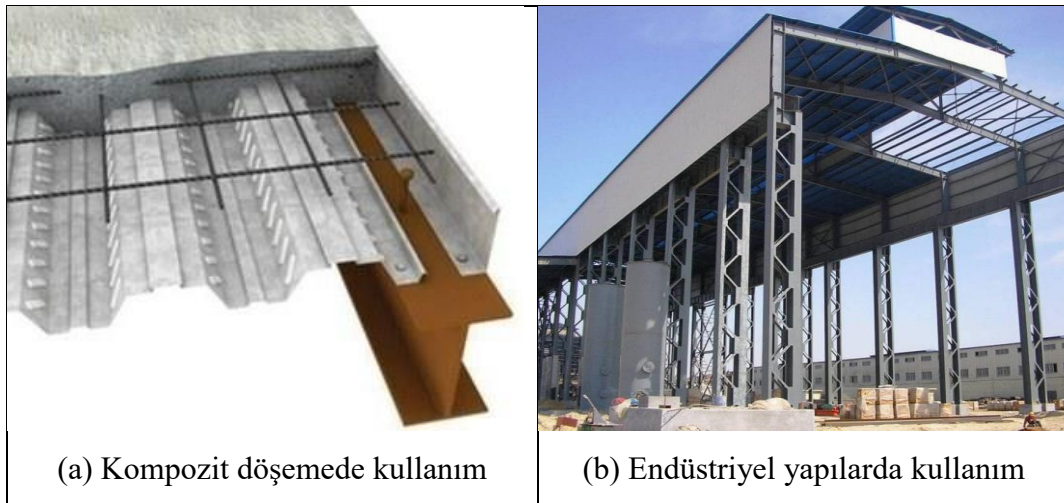
Şekil 2.5. Soğuk haddelenmiş çelik profillerle üretilen hafif çelik yapı örneği (URL-9, 2021)

Soğuk haddelenmiş çelik yassı elemanlar; sanayi yapısı, depo vb. yapılarda döşeme, çatı ve cephe kaplama malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Yassı elemanların betonla beraber kompozit olarak kullanıldığı uygulama alanları da mevcuttur. Soğuk haddelenmiş çelik elemanlar, kompozit bir döşemede sadece betona kalıp olarak değil, döşemenin donatısı olarak da kullanılmaktadır (Yu ve diğ., 2020). Şekil 2.6’da soğuk haddelenmiş çelik yassı elemanların farklı kesit tipleri yer almaktadır.



Şekil 2.6. Soğuk haddelenmiş çelik yassı elemanların kesit tipleri (Yu ve diğ., 2020)

Soğuk haddelenmiş çelik yassı elemanların betonla beraber kompozit döşemede kullanımı Şekil 2.7(a)’da, endüstriyel yapılarda cephe kaplaması olarak kullanımı ise Şekil 2.7(b)’de görülmektedir .



Şekil 2.7. Soğuk haddelenmiş çelik yassı elemanların (a) kompozit döşemede (URL-12, 2021) (b) endüstriyel yapılarda cephe kaplaması olarak kullanımı (URL-1, 2021)

2.3. Soğuk Haddelenmiş Çelik Yapı Elemanlarının Avantajları ve Dezavantajları

Yapı sistemlerinde kullanılan soğuk haddelenmiş çelik yapı elemanları sahip olduğu üstün özellikleri sayesinde birçok avantaj sağlamaktadır. Sağlamış olduğu bu avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- İnce cidarlı çelik yapı elemanlarının yük taşıma kapasitelerinin ağırlıklarına oranı çok yüksek olduğundan, yüksek olmayan yapılarda sıcak şekillendirilmiş çelik elemanlara göre oldukça ekonomiktir. Sıcak haddelenmiş çelik bir yapı elemanına gelen yük ne kadar küçük olursa olsun, sağlanması gereken narinlik koşulları nedeniyle belli bir mertebeden sonra kesit küçültülememekte ve gayri ekonomik sonuçlara ulaşılmaktadır. Bu tarz yapılarda ince cidarlı yapı elemanları, çelik malzeme sarfiyatını %10-20 mertebelerine dahi indirebilmektedir. Yapı ağırlığının bu denli düşmesi, deprem yüklerinin azalmasını ve bu sayede hem taşıyıcı sistemin hem de temelin maliyetinde ekonomi sağlamaktadır (Türker, 2020).
- Soğuk şekil verme yöntemiyle olağandışı kesitler üretilerek tasarım için en uygun dayanım/ağırlık oranı elde edilmektedir (Yu ve diğ., 2020).
- Yapı sistemi montaja hazır olacak şekilde hızlı ve istenen sayıda üretilip stoklanabilir (URL-7, 2021).
- İşçiliğin büyük bölümü fabrika ortamında yürütüldüğünden, montaj sahasında harcanan süre azalır, şantiye masrafları düşer, yapım işlerinin çevreye verdiği olumsuz etki en az düzeydedir. Çalışanların fabrika ortamında verimleri daha yüksek, çalışma ve iş sağlığı koşulları daha iyi ve sürdürülebilirdir. Üretim kalitesinin denetlenebilmesi, atölye ortamında daha kolay ve sürekli (Türker, 2020).
- Hafif çelik yapı elemanlarının, yapının kurulduğu sahaya nakledilmesi daha kolaydır. Elemanları kompakt paketler halinde sahaya sevk etme olanağı yüksektir (URL-8, 2021).
- Çelik, %100 geri dönüşümlü bir malzeme olduğundan, sürdürülebilirlik bakımından iyi bir performans sergilemektedir.
- Betonarme bir yapının yıkılmasının çevreye verdiği olumsuz etki, çelik yapının demontajı esnasında düşük düzeyde kalmaktadır.

- Özellikle betonarme yapıların inşasında meteorolojik durum büyük bir etkiye sahipken, çelik yapıların montajında bu etkiler genellikle çalışmaya engel değildir. Bu avantaj, hafif çelik yapı montajında daha da öne çıkmaktadır.
- Bazı birleşimlerin vidalı olması sayesinde, bulonlu (cıvatalı) birleşimlerin tolerans ve montaj sorunu, ince cidarlı çelik yapı elemanlarında görülmemektedir. Bu imkân, insan kaynaklı imalat ve montaj kusurlarının önlenmesini sağlar (Türker, 2020).

Soğuk haddelenmiş çelik yapı elemanların dezavantajları ise şöyle sıralanabilir:

- Soğuk haddelenmiş çelik profillerin et kalınlıklarının çok küçük olması, yerel burkulmaların oluşmasına ve yangına karşı dirençlerinin çok düşük olmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte, taşıma, depolama ve montajlamada daha dikkatli ve hassas olunması gerekmektedir (URL-9, 2021).
- Büyük açıklıklar ve büyük yükler altında ekonomik sonuçlar elde edilmez (Genç, 2008).
- Şekil verme işleminde arka arkaya yapılan uygulama sayısı sınırlıdır. Birkaç işlemden sonra malzeme üzerinde büyük zorlamalar oluşabilir ve bu da malzemede kırılma ve çatlamalara sebep verebilir (Genç, 2008).
- Soğuk haddelenmiş çelik profillerin bir çoğu açık enkesitli olduğu için burulmaya karşı oldukça düşük dirence sahiptir. Bu sebeple, bu tür profillerin davranışlarını belirleyen sınır durumlardan biri de burulma içeren burkulma sınır durumu olabilmektedir (URL-9, 2021).
- Çeliğin yangına dayanma süresi gözetilerek, etkili düzenlemeler ve koruyucu duvar kaplamaları gerektirebilir, zira 600° C sıcaklıkta çelik, taşıyıcılık özelliğini kaybeder. Tehlikeli yanıcı maddelerin depolanacağı yapılarda uzman çözümler gerektirir (Türker, 2020).
- Soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların tasarımında, soğuk şekillendirme işlemi sebebiyle oluşan artık gerilmelerin profillerin dayanımlarına etkisi göz ardı edilmemelidir.

2.4. Hafif Çelik Yapıların Tasarımında Kullanılan Yönetmelikler

Soğuk şekillendirilmiş çelik yapıların tasarımı için birçok tasarım standardı geliştirilmiştir. ABD’de, bu tür elemanların tasarımına ilişkin ilk yönetmelik, Amerikan

Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute, AISI) tarafından 1946 yılında “Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Yapı Elemanlarının Tasarımı için Yönetmelik (Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members)” adıyla yayınlanmıştır (Yu ve diğ., 2020).

Avrupa’da, ECCS Komitesi ilk olarak 1987’de hafif çelik elemanların tasarımı için Avrupa Tavsiyeleri (European Recommendations)’ni üretmiştir. Bu Avrupa belgesi, daha da geliştirilmiş ve 2006 yılında “EN 1993-1-3: Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting” başlıklı yönetmelik olarak yayınlanmıştır (EN 1993-1-3, 2006). Eurocode 3, Avrupa ülkelerinin yanı sıra Afrika ve bazı Ortadoğu ülkelerinin referans kabul ettiği bir yönetmeliktir (Mojaddidy ve Göğüş, 2013).

Avustralya ve Yeni Zelanda’da hafif çelik yapılar oldukça yaygındır. Bu bölgelerde “Ulusal Çelik-Çerçevesel Konut Birliği” (National Association of Steel-Framed Housing, NASH) tarafından hazırlanan bir yönetmelik kullanılmaktadır. Ayrıca özellikle İskandinav ülkelerinde hafif çelik yapılar üzerine birçok çalışma yapıldığı ve standartlar geliştirildiği bilinmektedir (URL-9, 2021).

Ülkemizde soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının tasarımı için ilk olarak 1994 yılında, TS 11372 “Çelik Yapılar-Hafif-Soğukta Sekil Verilmiş Profillerle Oluşturulan-Hesap Kuralları” (TSE, 1994) adlı bir standart yayınlanmıştır. Bu standardın yayınlandığı tarihten itibaren üzerinde herhangi bir güncelleme ve düzenleme yapılmadığı için kullanılabilirliğini yitirdiği söylenebilir. Ülkemizde 2018 yılında yayınlanan ve en güncel yönetmelik olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının tasarımına ilişkin özel kurallar içermektedir (Çelik, 2020).

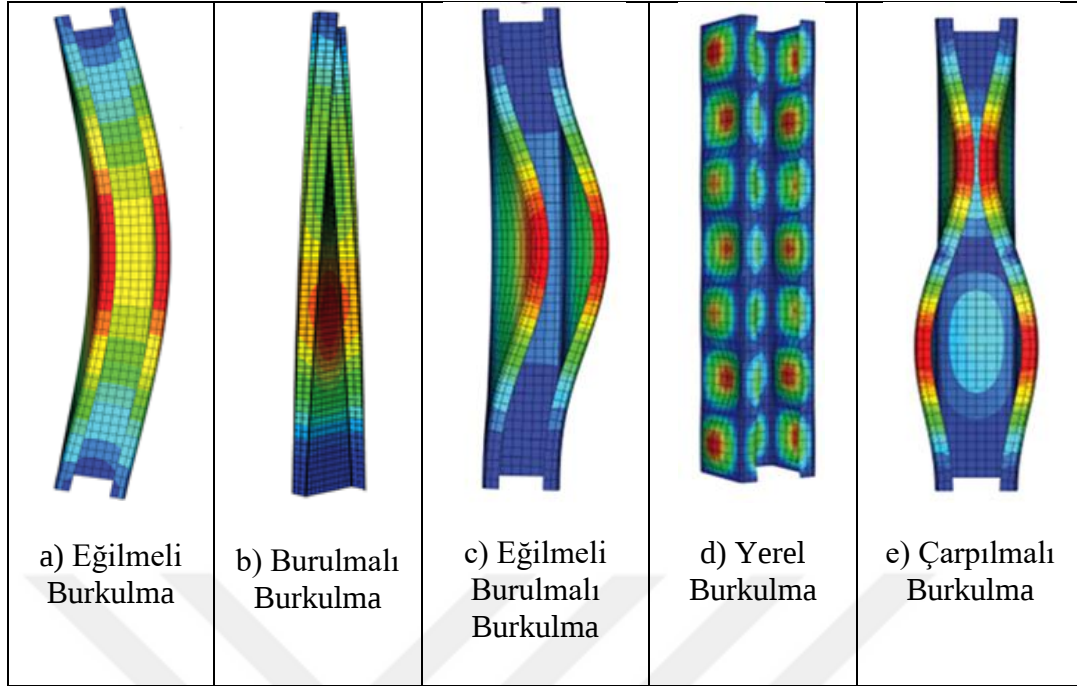
Bu çalışmada, soğuk şekillendirilmiş çelik C profillerin aksenal basınç kuvveti dayanımları, TBDY (2018) tarafından da atıfta bulunulan, AISI S100-16 (AISI, 2016) yönetmeliğinde Bölüm E’de tanımlanan tasarım ilkeleri kullanılarak elde edilmiştir.

3. SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ ÇELİK YAPI ELEMANLARININ EKSENEL BASINÇ ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞLARI

Sıcak şekillendirilmiş çelik basınç elemanlarına benzer şekilde, soğuk şekillendirilmiş çelik basınç elemanları da kesitlerinin geometrik merkezlerinden geçen basınç yüklerini taşımak için kullanılabilirler. Yapı sistemlerinde kullanılan soğuk şekillendirilmiş çelik basınç elemanlarının tasarımında elemanlardaki önemli sınır durumlara dikkat edilerek, bu elemanların yapısal davranışları hesaba katılmalıdır. Soğuk şekillendirilmiş çelik basınç elemanları ince levhalardan üretildiğinden çoğu kesitin geometrik merkezi ile kayma merkezi çakışmamaktadır. Bu tür elemanların tasarımında enkesitin şekline, malzemenin kalınlığına, desteklenmemiş boya ve uçlardaki mesnet koşullarına bağlı olarak dört temel sınır durumu tanımlanmaktadır: akma, kolon boyunca burkulma (eğilmeli burkulma, burulmalı burkulma ve eğilmeli burulmalı burkulma), kesiti oluşturan parçaların yerel burkulması ve kenar rijitleştiricili başlıklara sahip açık kesitli elemanlarda gözlenen çarpılmalı (distorsiyonel) burkulmadır.

Soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlarının davranışı, geleneksel sıcak haddelenmiş çelik elemanlardan daha karmaşıktır. 1940 ve 1950 yılları arasında yapılan araştırmalar, soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların, yerel, çarpılmalı ve genel burkulma modları dahil olmak üzere çeşitli burkulma modlarına maruz kaldığını ve nihai dayanımı belirleyen davranışların bu burkulma modları tarafından yönetildiğini vurgulamıştır. Örnek olarak, kısa boylu merkezi yüklü C kesitli bir eleman, enkesit parçalarının yerel burkulması ve kenar rijitleştiricilerinin çarpılmalı burkulmayla etkileşimiyle taşıma kapasitesine ulaşırken, daha uzun elemanların göçme modunun genellikle genel burkulma ile yerel burkulmanın veya çarpılmalı burkulmanın etkileşimiyle oluştuğu tespit edilmiştir (Ranawaka, 2006).

Tezde incelenen soğuk şekillendirilmiş C profillerin aksenal basınç kuvvetine maruz kaldıklarında taşıma güçlerine akma, eğilmeli (Şekil 3.1(a)), burulmalı (Şekil 3.1(b)) ve eğilmeli burulmalı (Şekil 3.1(c)) burkulma ile yerel (Şekil 3.1(d)) burkulma modlarının yanı sıra, başlık kenarlarında rijitleştirici bulunması nedeniyle çarpılmalı (Şekil 3.1(e)) burkulma sınır durumlarıyla ulaşabilir.



Şekil 3.1. Soğuk şekil verilmiş çelik C profillerin başlıca sınır durumları (Stahl, 2002)

3.1. Akma

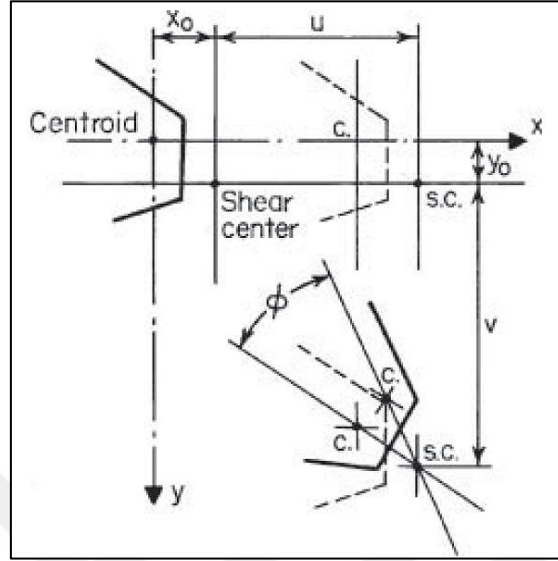
Eksenel basınç yükü altındaki ince cidarlı çelik elemanların davranışlarını belirleyen sınır durumlarından biri akmadır. Soğuk şekil verilmiş çelik basınç elemanlarının akma yüküne ulaşabilmesi için enkesiti oluşturan parçalarının genişlik/kalınlık (w/t) oranı düşük ve burkulma boyları oldukça küçük olmalıdır. Akma yükü P_y , kayıpsız enkesit alanı (A) ile çeliğin karakteristik akma gerilmesinin (F_y) çarpımına eşittir;

$$P_y = AF_y \quad (3.1)$$

3.2. Genel Burkulma

Çift simetri eksenli (I kesit gibi), kapalı (kare, dikdörtgen kutu kesit ile boru kesit), veya nokta simetrikli (Z kesit gibi) kesite sahip eksenel yüklü narin bir çelik yapı elemanının davranışını çoğu zaman genel burkulma belirler. Genel burkulma modu; eğilmeli burkulma, burulmalı burkulma ve eğilmeli burulmalı burkulma modu olarak üçe ayrılır. Eğilmeli burkulma, kapalı kesitli basınç elemanları için yaygın olarak görülen burkulma modlarından biridir. Açık kesitli basınç elemanların burulma rijitliği kapalı kesitli basınç elemanlarına kıyasla çok daha az olduğu için açık kesitli basınç elemanları

burularak veya eğilerek ve burularak da burkulabilir. Buna karşın, kapalı kesitli basınç elemanlarında burulmalı burkulma gözlenmez.



Şekil 3.2. Eğilmeli-burulmalı burkulma sırasında simetrik olmayan bir kesitin yer değiştirmesi (Yu ve diğ., 2020)

Açık kesitli bir kolon eğilmeli-burulmalı burkulma modunda burkulduğunda, kesitin eğilmesi ve dönmesi aynı anda gerçekleşir (Yu ve diğ., 2020). Şekil 3.2’de gösterildiği gibi, kesit x ve y doğrultusunda u ve v boyunca ötelenir ve kayma merkezi etrafında ϕ açısı kadar döner. Kesitinde simetri eksenini olmayan bir basınç elemanının eğilmeli-burulmalı burkulma davranışı Goodier (Goodier, 1941) ve Timoshenko (Timoshenko, 1945) tarafından araştırılmıştır. Bu tip bir kolonun aksenal yük (P) altındaki denge denklemleri yazıldığında, aşağıda verilen diferansiyel denklemler elde edilmektedir;

$$(1) EI_x v^{iv} + Pv'' - Px_0 \phi'' = 0 \quad (3.2)$$

$$(2) EI_y u^{iv} + Pu'' + Py_0 \phi'' = 0 \quad (3.3)$$

$$(3) EC_w \phi^{iv} - (GJ - Pr_0^2) \phi'' + Py_0 u'' - Px_0 v'' = 0 \quad (3.4)$$

Denklem (3.2)-(3.4)’te u ve v kayma merkezinin sırasıyla x ve y yönündeki yatay yerdeğiştirmeleri, ϕ dönme açısı, x_0 ve y_0 kayma merkezinin x ve y koordinatları, E ve G çeliğin sırasıyla elastisite ve kayma modülleri, I_x ve I_y kesitin x ve y eksenlerine göre atalet momentleri, r_x ve r_y kesitin x ve y eksenlerine göre atalet yarıçapları, r_0 kesitin

kayma merkezine göre atalet yarıçapı, J ve C_w kesitin St. Venant burulma katsayısı ve çarpılma katsayısıdır. r_0 aşağıdaki denklemle hesaplanabilir;

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} \quad (3.5)$$

Kolonun iki ucunun sabit olması durumunda, sınır koşulları;

$$z = 0 \text{ ve } L' \text{ de } u = v = \phi = 0 \quad u' = v' = \phi' = 0 \quad (3.6)$$

Kolonun iki ucunun mafsallı olması durumunda, sınır koşulları;

$$z = 0 \text{ ve } L' \text{ de } u = v = \phi = 0 \quad u'' = v'' = \phi'' = 0 \quad (3.7)$$

Denklem (3.6)'da z düşey eksen, L desteklenmemiş kolon boyudur. Yukarıdaki sınır koşullarıyla, ilgili diferansiyel denklemler çözüldüğünde aşağıdaki karakteristik denklem elde edilir;

$$r_0^2 (P_{cr} - P_x)(P_{cr} - P_y)(P_{cr} - P_z) - y_0^2 (P_{cr})^2 (P_{cr} - P_x) - x_0^2 (P_{cr})^2 (P_{cr} - P_y) = 0 \quad (3.8)$$

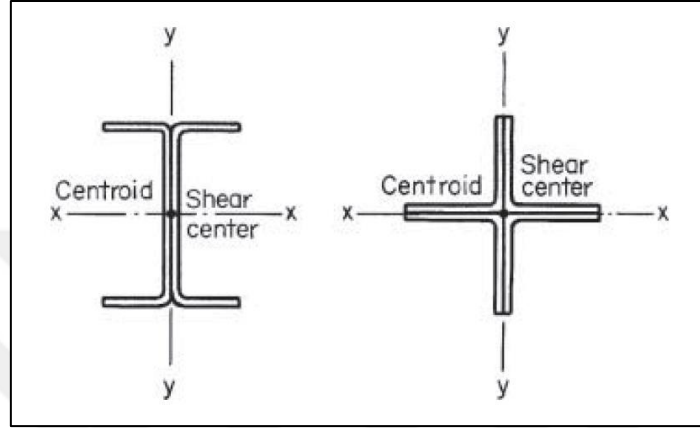
Elastik burkulma yükü P_{cr} , üçüncü dereceden bir denklem olan Denklem (3.8)'in üç kökünden en küçük olan belirlenerek elde edilir. Denklem (3.8)'de yer alan P_x , P_y ve P_z sırasıyla, x eksenine göre eğilmeli, y eksenine göre eğilmeli ve z-eksenine göre burulmalı burkulma yükleridir. P_x , P_y ve P_z Denklem (3.9) ile hesaplanabilir;

$$P_x = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2}, \quad P_y = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2}, \quad P_z = \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} + GJ \right] \left(\frac{1}{r_0^2} \right) \quad (3.9)$$

Denklem (3.9)'da, K_t burulma için etkin burkulma boyu katsayısı, K_x ve K_y sırasıyla, x ve y eksenindeki etkin burkulma boyu katsayılarıdır. L_t burulma için desteksiz boy, L_x ve L_y sırasıyla, x ve y eksenlerine göre eğilmede desteksiz burkulma boyudur. KL , etkin burkulma boyudur, teorik olarak, kolonun iki ucunun mafsallı olması durumunda $K=1,0$, sabit olması durumunda $K=0,5$ 'tir. Bu çalışmada dayanım hesaplarında etkin burkulma boyu katsayısı $K=1$ alınmıştır.

3.2.1. Çift simetri eksenli kesite sahip profiller

Çift simetri eksenli kesitlerde (I kesit veya + kesit) kayma merkezi (KM) ile geometrik merkez (GM) çakıştığı için x_0 ve y_0 mesafesi sıfıra eşittir. Şekil 3.3'te çift simetri eksenine sahip gövdelerinden birleştirilmiş iki U profil ile kollarından birleştirilmiş dört L profil gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Çift simetri eksenine sahip kesitler (Yu ve diğ., 2020)

Çift simetri eksenli kesitlerde $x_0=y_0=0$ olduğu için Denklem (3.8) aşağıdaki şekilde basitleştirilebilir;

$$r_0^2 (P_{cr} - P_x)(P_{cr} - P_y)(P_{cr} - P_z) = 0 \quad (3.10)$$

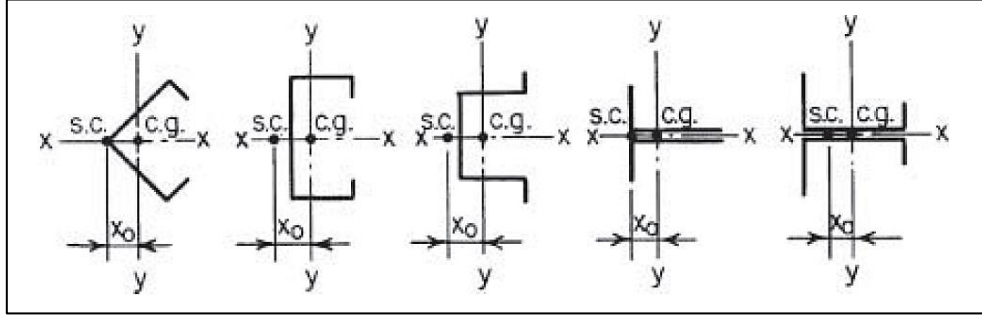
Bu durumda kökler;

$$\begin{aligned} (P_{cr})_1 &= P_x \\ (P_{cr})_2 &= P_y \\ (P_{cr})_3 &= P_z \end{aligned} \quad (3.11)$$

olarak bulunur. Denklem (3.11)'de olası burkulma yükleri incelendiğinde, çift simetri eksenli basınç elemanlarında, eğilmeli burkulma ya da burulmalı burkulma oluşacaktır. Eğilmeli burulmalı burkulma bu tip kesitlerde görülmez. Denklem (3.11)'de elde edilen burkulma yüklerinden en küçüğü, elemanın burkulma yüküdür.

3.2.2. Tek simetri eksenli kesite sahip profiller

Farklı başlık genişliklerine sahip I kesitler, C kesitler, Ω kesitler ve T kesitler tek simetri eksenli kesitlerdir (Şekil 3.4) (Yu ve diğ., 2020).



Şekil 3.4. Tek simetri eksenli kesitler (Yu ve diğ., 2020)

Eğer x eksen simetri eksen ise, y eksen yönünde kayma merkezi (KM) ile geometrik merkez (GM) arasındaki y_0 mesafesi sıfıra eşittir. Böylece Denklem (3.8) şu şekilde sadeleştirilebilir;

$$(P_{cr} - P_y) \left[r_0^2 (P_{cr} - P_x) (P_{cr} - P_z) - x_0^2 (P_{cr})^2 \right] = 0 \quad (3.12)$$

Bu durumda köklerden biri;

$$(P_{cr})_1 = P_y \quad (3.13)$$

Diğer kökler ise Denklem (3.12)'deki köşeli parantez içindeki ifade sıfıra eşitlenerek aşağıdaki şekilde bulunabilir;

$$\begin{aligned} (P_{cr})_2 &= \frac{1}{2\beta} \left[(P_x + P_z) + \sqrt{(P_x + P_z)^2 - 4\beta P_x P_z} \right] \\ (P_{cr})_3 &= \frac{1}{2\beta} \left[(P_x + P_z) - \sqrt{(P_x + P_z)^2 - 4\beta P_x P_z} \right] \end{aligned} \quad (3.14)$$

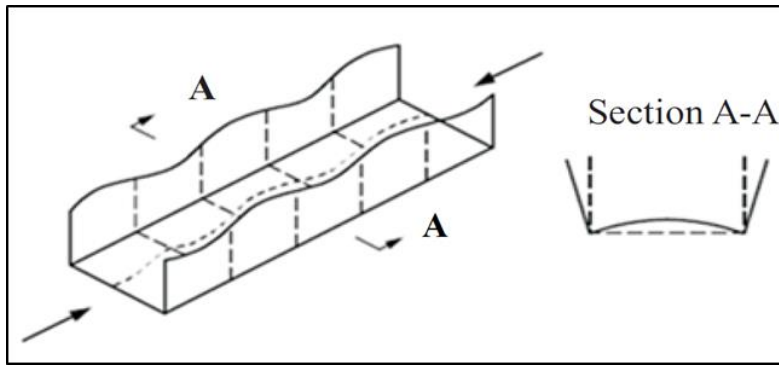
Denklem (3.14)'de yer alan β , Denklem (3.15) ile bulunabilir;

$$\beta = 1 - (x_0 / r_0)^2 \quad (3.15)$$

Denklem (3.14)'te yer alan $(P_{cr})_3$ ve $(P_{cr})_2$ kökleri karşılaştırıldığında, $(P_{cr})_3$ 'ün $(P_{cr})_2$ 'den daha küçük olduğu görülebilir. Bununla birlikte, $(P_{cr})_3$ 'ün (P_x) ve (P_z) 'den de küçük olduğu fark edilebilir. Burada $(P_{cr})_3$ kökü, x eksenini etrafında eğilmeli ve z eksenini etrafında burulmalı burkulma yüküne karşılık gelmektedir. Bu durumda, tek simetri eksenli kesite sahip basınç elemanlarının burkulma modu, simetri eksenine dik ekseninde eğilerek burkulma veya simetri ekseninde eğilerek ve burularak burkulma şeklinde olacağı söylenebilir (Çelik, 2020). Bu çalışmada ele alınan C profiller tek simetri eksenine sahip olduğu için, bu iki sınır durum da dayanım hesabına dahil edilmiştir.

3.3. Yerel Burkulma

Soğuk şekil verilmiş çelik yapı elemanlarının et kalınlıkları (t) genelde küçük ve genişlik/kalınlık oranları büyük olduğu için, bu tip elemanlar basınç, kesme eğilmeye veya ezilmeye maruz kaldıklarında akma gerilmesinden çok daha küçük gerilmelerde yerel olarak burkulurlar. Bu nedenle, bu tip yapı elemanlarının tasarımında dikkate alınması gereken önemli sınır durumlardan biri de yerel burkulmadır. Soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların enkesit parçalarının yerel burkulması çoğu zaman izin verilen bir sınır durum olduğu için, tasarım yükü, burkulma sonrası dayanım dikkate alınarak yerel burkulmadan kaynaklanan yük taşıma kapasitesindeki azalmaya karşı yeterli güvenlik sağlanacak şekilde belirlenmelidir (Yu ve diğ., 2020). Şekil 3.5'te U kesitli profilde gövde ve başlıklarda oluşan yerel burkulmalar gösterilmiştir.

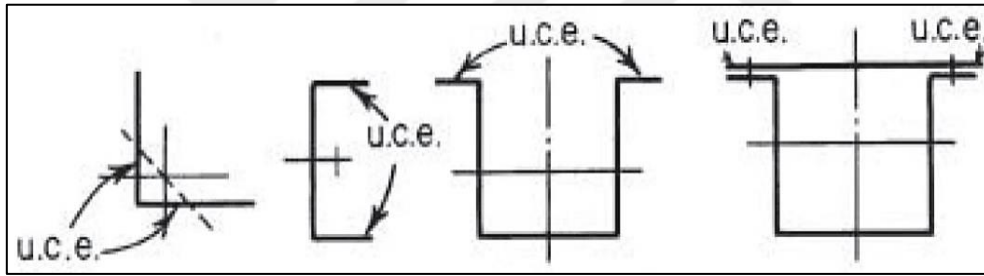


Şekil 3.5. Soğuk şekillendirilmiş çelik U kesitli bir profilde yerel burkulma (Macdonald ve Kulatunga, 2013)

İki boyutlu basınç altındaki bir plak elemanının burkulma davranışının, bir boyutlu (kolon gibi) yapısal elemanın burkulma davranışından farklı olduğu bilinmektedir. Plaklar, yerel burkulma meydana geldikten sonra gerilmelerin yeniden dağılımı

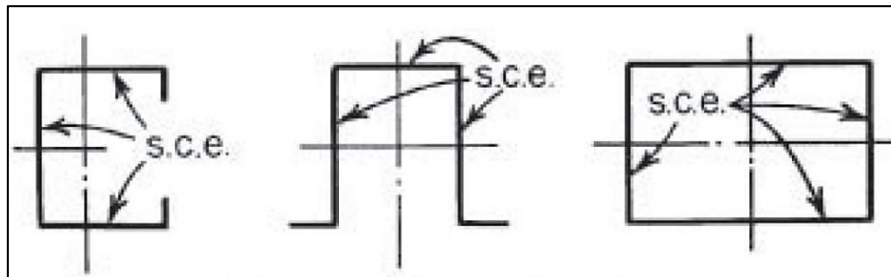
sayesinde burkulma yüklerinden daha büyük yükler taşıyabilirler. Bu yüklerle plakların ‘burkulma sonrası dayanımları’ denir. Bir plağın burkulma sonrası dayanımı, yerel burkulma dayanımının birkaç katı olabilir. Bu sebeple, soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının tasarımında, plakların burkulma sonrası dayanımı tasarıma dahil edilmektedir. Bu özellikle büyük genişlik/kalınlık oranlarına sahip elemanlar için geçerlidir.

Soğuk şekil verilmiş çelik basınç elemanlarında yerel burkulmayı daha iyi değerlendirebilmek amacıyla, elemanları oluşturan kesit parçaları, rijitleştirilmiş, rijitleştirilmemiş ve çoklu rijitleştirilmiş basınç elemanı (parçası) olarak üçe ayrılmıştır. Rijitleştirilmemiş basınç elemanı (parçası), gerilme yönüne paralel iki kenarından sadece bir kenarı rijitleştirilmiş olan düz kesit parçasıdır. Bir L profilin kolları, U profilin başlıkları, Ω profilin kenar başlıkları bu tip elemanlara örnektir (Şekil 3.6) (Yu ve diğ., 2020).



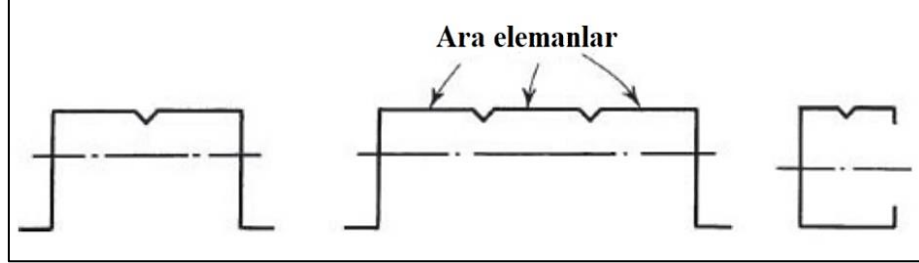
Şekil 3.6. Rijitleştirilmemiş basınç elemanları (Yu ve diğ., 2020)

Rijitleştirilmiş basınç elemanı ise gerilmenin doğrultusuna paralel iki kenarın her ikisi de başlık, gövde, kenar rijitleştiricisi, ara rijitleştirici vb. ile rijitleştirilen düz kesit parçasıdır. Şekil 3.7’de görüldüğü üzere, C profilin gövdesi ve basınç başlığı, Ω profilin gövdesi ve iç başlığı ile kutu profilin bütün parçaları, rijitleştirilmiş basınç elemanına örnektir.



Şekil 3.7. Rijitleştirilmiş basınç elemanları (Yu ve diğ., 2020)

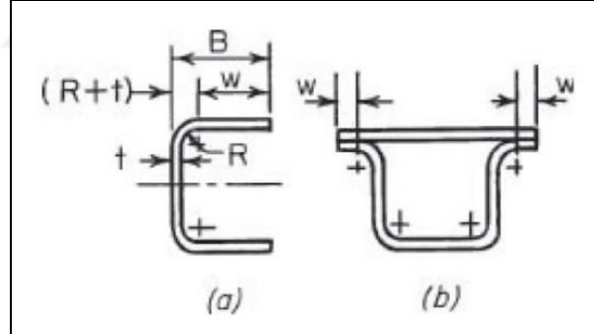
İki kenarındaki rijitleştiricilere ek olarak, iç açıklığında ara rijitleştiriciler içeren rijitleştirilmiş elemanlara çoklu rijitleştirilmiş basınç elemanı denir. İki rijitleştirici arasında kalan küçük parçalar, bu tip elemanlarda genellikle ara eleman olarak adlandırılır. Şekil 3.8’de çoklu rijitleştirilmiş basınç elemanları görülmektedir.



Şekil 3.8. Çoklu rijitleştirilmiş basınç elemanları (Yu ve diğ., 2020)

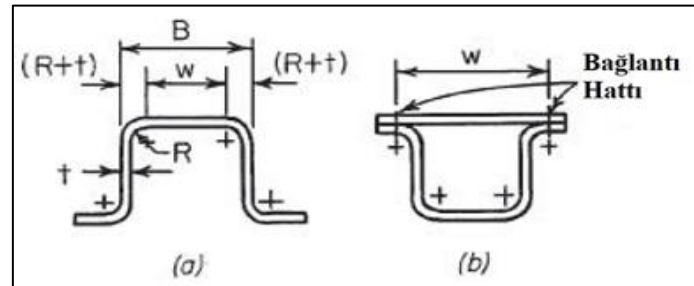
3.3.1. Düz genişlik (w)

Düz genişlik w , ele alınan kesit parçasının köşelerini içermeyen genişliğidir (Yu ve diğ., 2020). Şekil 3.9’da, U profilin basınç başlığının düz genişliği ve kapalı Ω kesitli profilin kenar başlıklarının düz genişlikleri gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Rijitleştirilmemiş basınç elemanlarında düz genişlik (Yu ve diğ., 2020)

Şekil 3.10’da, rijitleştirilmiş basınç elemanlarında düz genişlikleri gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Rijitleştirilmiş basınç elemanlarında düz genişlik (Yu ve diğ., 2020)

3.3.2. Düz genişlik/kalınlık oranı (w/t)

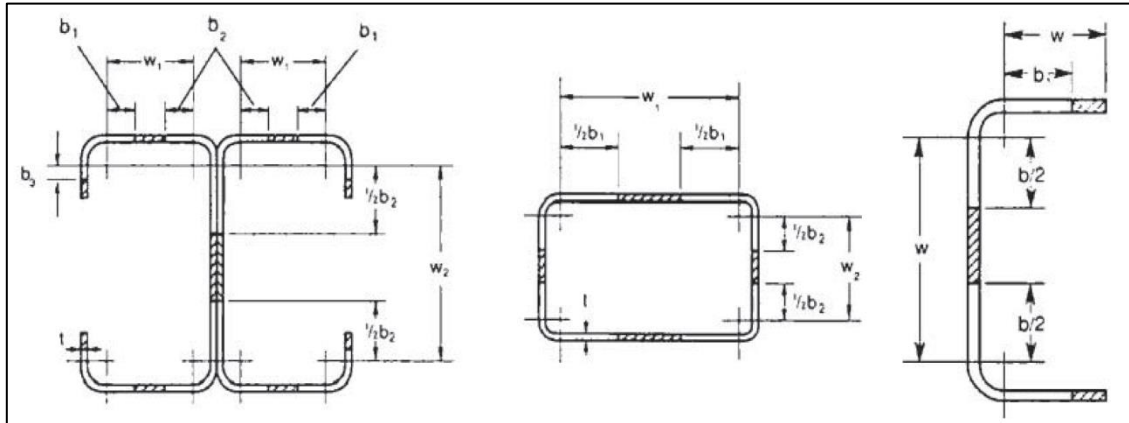
Soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların tasarımında, önemli tasarım parametrelerinden biri de elemanı oluşturan parçaların düz genişliklerinin elemanın kalınlığına bölünerek hesaplanan düz genişlik/kalınlık (w/t) oranıdır. AISI S100-16 (AISI, 2016) yönetmeliği, basınç elemanlarının başlıklarının ve eğilme elemanlarının gövdelerinin düz genişlik/kalınlık oranlarını sınırlandırmaktadır. Tablo 3.1’de basınç etkisindeki başlıkların tasarımı için AISI S100-16’da yer alan uygulanabilirlik sınırları verilmiştir.

Tablo 3.1. Basınç başlıkları için sınır w/t oranları

Koşul	w/t
Her iki kenarı da rijitleştirilmiş parçalara bağlanan rijitleştirilmiş basınç elemanı	≤ 500
Kenar rijitleştiricisi bulunan rijitleştirilmiş basınç elemanı	≤ 60
$I_s < I_a$ ise	≤ 60
$I_s \geq I_a$ ise	≤ 90
Rijitleştirilmemiş basınç elemanı	≤ 60

3.3.3. Etkin tasarım genişliği (b)

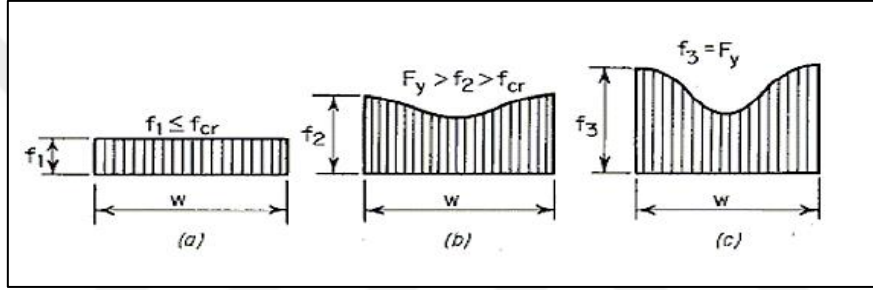
Etkin tasarım genişliği (b), w/t oranları önceden belirlenmiş sınırları aşan eğilme ve basınç elemanlarının enkesit özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan ‘azaltılmış tasarım genişliği’dir. Şekil 3.11’de basınç elemanları için etkin tasarım genişlikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Basınç elemanları için etkin tasarım genişlikleri (Yu ve diğ., 2020)

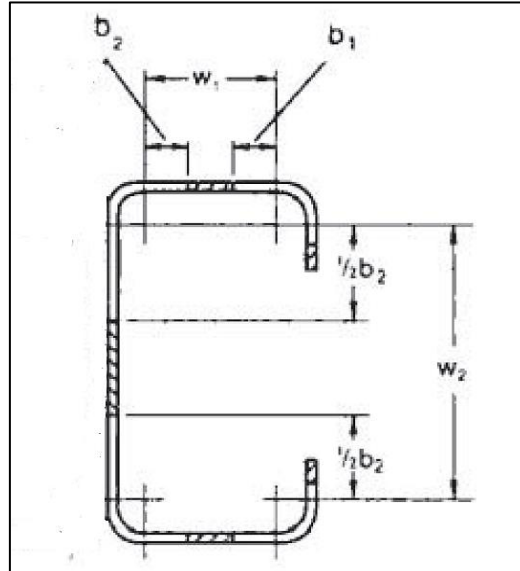
3.3.4. Burkulma sonrası dayanım

Şekil 3.12’de rijitleştirilmiş bir enkesit parçasının basınç etkisindeki gerilme dağılımının ardışık aşamaları gösterilmiştir. Şekil 3.12(a)’da gösterildiği gibi, burkulma öncesi gerilme düzgündür. Burkulma ile birlikte, burkulma öncesindeki yükün plağın burkulmadan en çok etkilenen orta bölgesindeki bölümü, burkulmadan nispeten daha az etkilenen kenar bölümlere aktarılır. Sonuç olarak, Şekil 3.12(b)’deki gibi düzgün olmayan bir gerilme dağılımı oluşur. Gerilmenin yeniden dağılımı, kenar bölgelerdeki gerilmenin akma gerilmesine ulaşmasına kadar devam eder ve nihayetinde plağın yük taşıma kapasitesi düşmeye başlar (Şekil 3.12(c)) (Yu ve diğ., 2020).



Şekil 3.12. Rijitleştirilmiş basınç elemanlarında gerilme dağılımının ardışık aşamaları (Yu ve diğ., 2020)

Şekil 3.13’te, bu çalışmada incelenen C profillerin eksenel basınç kuvveti altındaki etkin tasarım genişlikleri (b_1 , b_2) gösterilmiştir.



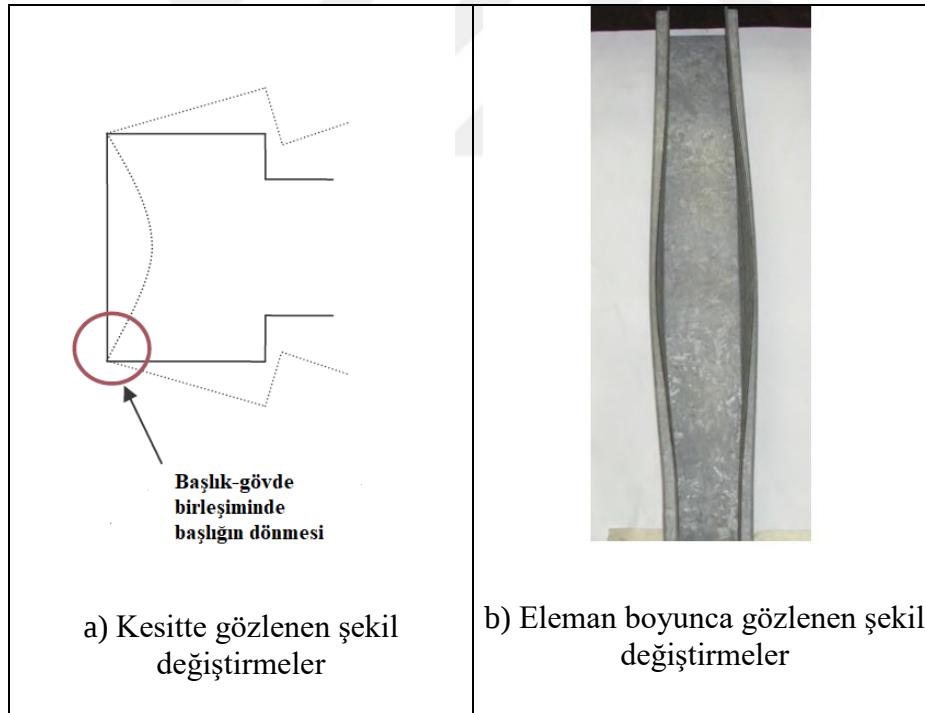
Şekil 3.13. Eksenel basınç kuvveti altındaki bir C profildeki etkin tasarım genişlikleri (Yu ve diğ., 2020)

C profillerin basınç kuvveti dayanımları hesaplanırken, AISI S100-16 (AISI, 2016)’da tanımlanan etkin genişlik yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, Şekil 3.13’te gösterilen etkin tasarım genişlikleri belirlenerek etkin alan hesaplanmaktadır.

3.4. Çarpımalı Burkulma

Açık kesitli ve başlıklarında kenar rijitleştiricisi olan soğuk şekil verilmiş çelik basınç elemanlarında dikkat edilmesi gereken önemli bir sınır durum da çarpımalı burkulmadır. Bu burkulma modu, her bir başlığın ve kenar rijitleştiricisinin, başlık-gövde birleşiminin etrafında dönmesini içermektedir (Yu ve diğ., 2020). Bu mod, diğer burkulma modlarına göre nispeten yeni ve daha az araştırılmış bir burkulma modudur (Ranawaka, 2006).

Şekil 3.14’te kenar rijitleştiriciye sahip açık kesitli bir basınç elemanın çarpımalı burkulma sınır durumunda gözlenen şekil değiştirmeler gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Soğuk şekillendirilmiş çelik basınç elemanlarında çarpımalı burkulma modunda a) kesitte b) eleman boyunca gözlenen şekil değiştirmeler (Ranawaka, 2006)

‘Rijitleştirici burkulması’ ya da ‘yerel-burulmalı burkulma’ olarak da bilinen çarpımalı burkulma, kenar rijitleştiricisine sahip elemanlarda başlık/rijitleştirici bağlantısında başlığın dönmesiyle oluşan bir moddur. Elemanlarda yerel burkulma gerilmesi,

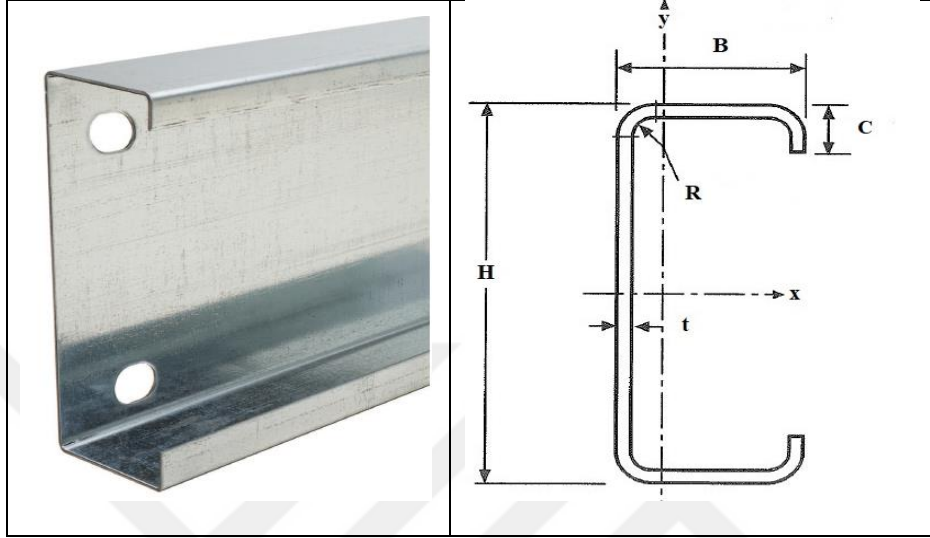
arpılmalı burkulma gerilmesinden önemli ölçüde düşükse çarpılmalı burkulma modunun güvenli bir şekilde göz ardı edilmesi mümkündür. Bununla birlikte, rutin tasarımda bile, çarpılmalı burkulmanın dikkate alınmasını gerektiren birçok durum mevcuttur (Schafer, 2006).

arpılmalı burkulma, rijitleştiricilerin varlığı ile ilişkilidir. Kenar rijitleştiricisi olmayan açık kesitli elemanlarda genellikle, yerel burkulma gözlenirken çarpılmalı burkulma gözlenmez. Diğer bir ifadeyle, kenar rijitleştiricilerinin mevcudiyeti, yapısal elemanın performansını geliştirir ancak çarpılmalı burkulma modunun ortaya çıkmasına neden olur (Pinto, 2010).

Bu tez çalışmasında incelenen C profillerde kenar rijitleştirici mevcut olduğu için, profillerin çarpılmalı burkulma dayanımı, AISI S100-16 (AISI, 2016) yönetmeliğinde Bölüm E.4’te tanımlanan formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

4. SOĞUK ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK C PROFİLLERİN KESİT ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

4.1. Çalışmada İncelenen Profiller



Şekil 4.1. Soğuk şekillendirilmiş C profil ve temel boyutları (URL-1, 2020)

Şekil 4.1’de tipik bir C profil ve C profiline ait temel boyutlar verilmiştir. Şekil 4.1’den de fark edilebileceği gibi, soğuk şekillendirilmiş bir C profil, kenarlarında rijitleştirici bulunan iki başlıkla, bu başlıkların bağlandığı gövdeden oluşmaktadır. Bu tür profiller genellikle dıştan dışa yükseklikleri H , dıştan dışa başlık genişlikleri B , tırnak (kenar rijitleştirici) boyları C ve et kalınlıkları t ile isimlendirilirler. Örnek olarak, $C100 \times 42 \times 15 \times 1,5$ profilinde $H=100$ mm, $B=42$ mm, $C=15$ mm ve $t=1,5$ mm’dir. Her ne kadar isimlerinde gözükmeseyse de, C profillerin bir diğer önemli boyutları da iç büküm yarıçaplarıdır. Şekil 4.1’de büküm yarıçapı R simgesiyle gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında, ülkemizde soğuk şekillendirilmiş çelik C profil üretimi yapan üç farklı firmaya ait web sitelerinde yer alan ürün kataloglarında enkesit özellikleri yer alan 146 farklı C profil ele alınmıştır. Bu üç üretici firma, ÜF1, ÜF2 ve ÜF3 olarak isimlendirilmiştir. ÜF1’e ait 24 adet, ÜF2’ye ait 33 adet ve ÜF3’e ait 89 adet C profil incelenmiştir. Firmalara ait profillerin boyutları ile enkesit özelliklerini içeren tablolar, Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’te yer almaktadır. ÜF1 ve ÜF2’nin kataloglarında, tırnak boyları L ile isimlendirilmiştir. ÜF3’ün katalogunda, başlık genişlikleri A ve B , tırnak boyları ise $C1$ ve $C2$ olarak isimlendirilmiştir.

Tablo 4.1. ÜF1'e ait profillerin enkesit özellikleri ve boyutları (URL-1, 2020)

$$100 \leq H \leq 400$$

$$38 \leq B \leq 100$$

$$15 \leq L \leq 30$$

$$1.5 \leq t \leq 4$$

Ölçü Limitleri

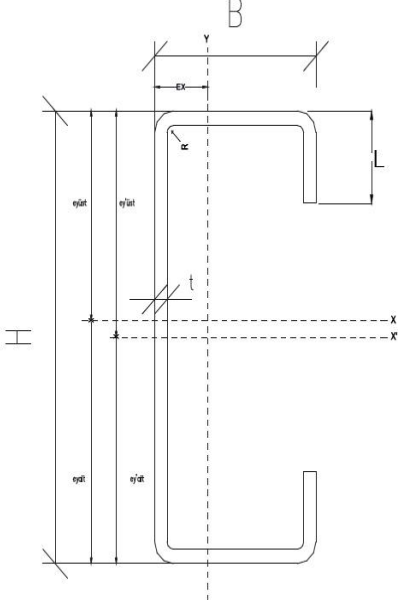
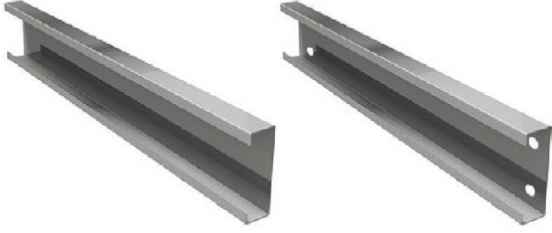
$$100 \leq H \leq 125 \quad (B/H)_{\max} = 0.5$$

$$125 < H \leq 150 \quad (B/H)_{\max} = 0.54$$

$$150 < H \leq 175 \quad (B/H)_{\max} = 0.58$$

Cee Profil	H mm	B mm	t mm	L mm	Açılım mm	Ağırlık kg/m	Alan F cm ²	Eğilme Eksen (x-x)			Eğilme Eksen (y-y)			Eksene olan uzaklık	
								I_{xeff} (cm ⁴)	W_{xeff} (cm ³)	r_x (cm)	I_y (cm ⁴)	W_y (cm ³)	r_y (cm)	e_x (cm)	e_y (cm)
C10015	100	42	1,50	15	200	2,36	3,00	45,48	9,10	3,89	7,19	2,56	1,55	1,39	5,00
C10020	100	43	2,00	16	200	3,14	4,00	60,69	12,14	3,90	10,09	3,56	1,59	1,46	5,00
C10025	100	44	2,50	17	200	3,93	5,00	75,91	15,18	3,90	13,27	4,63	1,63	1,53	5,00
C10030	100	45	3,00	17	199	4,69	5,97	90,32	18,06	3,89	16,28	5,57	1,65	1,58	5,00
C15015	150	65	1,50	17	300	3,54	4,50	151,90	19,61	5,81	23,07	5,02	2,26	1,90	7,50
C15020	150	65	2,00	19	300	4,72	6,00	212,17	28,29	5,95	34,26	7,75	2,39	2,08	7,50
C15025	150	65	2,50	20	300	5,90	7,50	262,71	35,03	5,92	42,68	9,72	2,39	2,11	7,50
C15030	150	65	3,00	22	300	7,07	9,00	314,24	41,90	5,91	52,10	12,03	2,41	2,17	7,50
C20015	200	85	1,50	22	400	4,72	6,00	333,78	31,70	7,46	53,53	9,02	2,99	2,57	10,00
C20020	200	85	2,00	24	400	6,29	8,00	489,36	47,76	7,83	74,15	12,48	3,04	2,56	10,00
C20025	200	85	2,50	25	400	7,86	10,00	630,28	63,03	7,94	98,86	17,06	3,14	2,71	10,00
C20030	200	85	3,00	27	400	9,43	12,00	754,60	75,46	7,93	120,15	20,95	3,16	2,76	10,00
C25020	250	65	2,00	19	400	6,29	8,00	666,20	53,30	9,13	39,41	8,12	2,22	1,65	12,50
C25025	250	65	2,50	20	400	7,86	10,00	875,85	70,07	9,36	50,01	10,24	2,24	1,62	12,50
C25030	250	65	3,00	22	400	9,43	12,00	1055,80	84,46	9,38	61,27	12,67	2,26	1,67	12,50
C25040	250	65	4,00	25	400	12,58	16,00	1400,51	112,04	9,36	82,92	17,44	2,28	1,74	12,50
C30020	300	90	2,00	19	500	7,86	10,00	1099,01	69,94	10,48	81,10	11,83	2,85	2,15	15,00
C30025	300	90	2,50	20	500	9,83	12,50	1518,60	99,41	11,02	106,06	15,53	2,91	2,17	15,00
C30030	300	90	3,00	22	500	11,79	15,00	1932,72	127,58	11,35	137,13	20,22	3,02	2,22	15,00
C30040	300	90	4,00	25	500	15,72	20,00	2621,31	174,75	11,45	195,27	29,44	3,12	2,37	15,00
C40020	400	90	2,00	19	600	9,43	12,00	1986,36	95,27	12,87	85,37	12,04	2,67	1,91	20,00
C40025	400	90	2,50	20	600	11,79	15,00	2750,52	135,28	13,54	111,77	15,82	2,73	1,93	20,00
C40030	400	90	3,00	22	600	14,15	18,00	3528,66	174,87	14,00	144,73	20,59	2,84	1,97	20,00
C40040	400	90	4,00	25	600	18,86	24,00	5191,57	259,58	14,71	210,55	30,15	2,96	2,02	20,00

Tablo 4.2. ÜF2'ye ait profillerin enkesit özellikleri ve boyutları (URL-2, 2020)

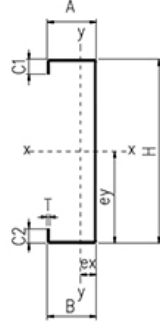



Cee Profil Cee profile	H mm	B mm	t mm	L mm	R mm	Açılım Serp Width	Ağırlık Weight	Alan (F) Area	Eğilme Eksenli x-x Bending Axis			Eğilme Eksenli y-y Bending Axis			Eksene olan uzaklık Center of Gravity				
									I_x (cm ⁴)	I_{xx} (cm ⁴)	W_x (cm ³)	I_y (cm ⁴)	I_{yy} (cm ⁴)	W_y (cm ³)	r_x (cm)	e_x (cm)	e_y (cm)	$e_{x^{90}}$ (cm)	$e_{y^{90}}$ (cm)
C10010	100	53	1.00	25	6	240	1.90	2.40	37.76	37.24	7.08	3.86	10.82	3.34	2.12	2.06	5.00	4.96	5.04
C10012	100	53	1.20	25	6	240	2.28	2.88	44.91	44.91	8.74	3.90	12.83	3.96	2.11	2.06	5.00	4.98	5.02
C10015	100	54	1.50	25	6	240	2.84	3.60	56.12	56.13	11.16	3.95	16.43	4.93	2.14	2.06	5.00	4.97	5.03
C10020	100	55	2.00	25	6	240	3.79	4.80	74.15	74.16	14.70	3.93	22.18	6.46	2.15	2.06	5.00	4.96	5.04
C10025	100	57	2.50	25	6	240	4.74	6.00	93.02	93.03	18.42	3.94	29.27	8.05	2.21	2.06	5.00	4.95	5.05
C10030	100	58	3.00	25	6	240	5.69	7.20	110.58	110.61	21.88	3.92	35.55	9.52	2.22	2.06	5.00	4.94	5.06
C15015	150	59	1.50	25	6	300	3.56	4.50	155.32	154.61	20.45	5.86	23.50	6.13	2.29	2.06	7.50	7.44	7.56
C15020	150	60	2.00	25	6	300	4.74	6.00	206.17	204.91	27.00	5.84	31.70	8.06	2.30	2.06	7.50	7.41	7.59
C15025	150	62	2.50	25	6	300	5.93	7.50	259.34	257.30	33.83	5.86	41.67	10.08	2.36	2.06	7.50	7.39	7.61
C15030	150	63	3.00	25	6	300	7.11	9.00	309.95	306.86	40.30	5.84	50.57	11.94	2.37	2.06	7.50	7.39	7.61
C20015	200	79	1.50	30	6	400	4.74	6.00	384.97	372.08	35.45	7.72	55.74	9.55	3.05	2.06	10.00	9.90	10.10
C20020	200	80	2.00	30	6	400	6.32	8.00	512.49	494.81	48.85	7.86	74.95	12.63	3.06	2.06	10.00	9.87	10.13
C20025	200	82	2.50	30	6	400	7.90	10.00	644.55	620.57	61.14	7.88	97.26	15.85	3.12	2.06	10.00	9.85	10.15
C20030	200	83	3.00	30	6	400	9.48	12.00	772.39	741.27	72.92	7.86	117.68	18.87	3.13	2.06	10.00	9.83	10.17
C25020	250	60	2.00	25	6	400	6.32	8.00	725.77	694.47	53.81	9.24	37.33	9.48	2.16	2.06	12.50	12.29	12.71
C25025	250	62	2.50	25	6	400	7.90	10.00	914.47	872.60	68.47	9.34	49.13	11.88	2.22	2.06	12.50	12.26	12.74
C25030	250	63	3.00	25	6	400	9.48	12.00	1096.95	1043.24	81.71	9.32	59.68	14.09	2.23	2.06	12.50	12.23	12.77
C25040	250	67	4.00	25	6	400	12.64	16.00	1480.71	1404.70	109.83	9.37	87.88	18.96	2.34	2.06	12.50	12.21	12.79
C25050	250	65	5.00	30	6	400	15.80	20.00	1830.64	1729.87	135.14	9.30	106.81	24.08	2.31	2.06	12.50	12.20	12.80
C30020	300	80	2.00	30	6	500	7.90	10.00	1372.15	1290.96	84.48	11.36	85.25	14.36	2.92	2.06	15.00	14.71	15.29
C30025	300	82	2.50	30	6	500	9.88	12.50	1726.20	1619.64	105.97	11.38	110.72	18.05	2.98	2.06	15.00	14.71	15.29
C30030	300	83	3.00	30	6	500	11.85	15.00	2071.47	1937.62	126.50	11.37	134.03	21.49	2.99	2.06	15.00	14.68	15.32
C30040	300	87	4.00	30	6	500	15.80	20.00	2788.26	2602.42	169.57	11.41	192.49	29.01	3.10	2.06	15.00	14.65	15.35
C30050	300	90	5.00	30	6	500	19.75	25.00	3495.99	3254.10	211.84	11.41	251.57	36.27	3.17	2.06	15.00	14.64	15.36
C40020	400	80	2.00	30	6	600	9.48	12.00	2826.39	2473.49	112.69	14.16	92.13	15.52	2.77	2.06	20.00	18.66	21.34
C40025	400	82	2.50	30	6	600	11.85	15.00	3554.84	3178.00	147.62	14.37	119.71	19.51	2.83	2.06	20.00	19.03	20.97
C40030	400	83	3.00	30	6	600	14.22	18.00	4268.44	3868.97	183.21	14.49	144.96	23.25	2.84	2.06	20.00	19.38	20.62
C40040	400	87	4.00	30	6	600	18.96	24.00	5743.54	5221.31	254.30	14.75	208.45	31.41	2.95	2.06	20.00	19.47	20.53
C40050	400	90	5.00	30	6	600	23.70	30.00	7205.13	6534.17	317.83	14.76	272.69	39.32	3.01	2.06	20.00	19.44	20.56
C50025	500	107	2.50	30	6	750	14.81	18.75	6873.54	6109.54	214.68	17.48	241.86	28.01	3.59	2.06	25.00	23.32	26.68
C50030	500	108	3.00	30	6	750	17.78	22.50	8249.97	7461.94	272.07	17.86	292.09	33.44	3.60	2.06	25.00	23.63	26.37
C50040	500	112	4.00	30	6	750	23.70	30.00	11078.66	10281.78	391.11	18.30	412.63	45.17	3.71	2.06	25.00	24.31	25.69
C50050	500	115	5.00	30	6	750	29.63	37.50	13884.66	12863.10	498.82	18.50	533.94	56.59	3.77	2.06	25.00	24.28	25.72

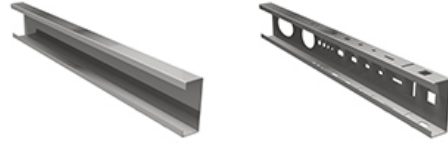
Tablo 4.3. ÜF3'e ait profillerin enkesit özellikleri ve boyutları (URL-3, 2020)

C Profil Kesiti

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



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



Profil	H	A	B	C ₁	C ₂	T	Radius	~Ağırlık	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)
C400x100x27x4	400	100	100	27	27	4	3	625	19,61	24,99	5635,3	281,76	14,96	286,98	37,57	3,38	2,36	0
C400x100x26x3,5	400	100	100	26	26	3,5	3	625	17,19	21,9	4949,47	247,47	14,98	251,78	32,84	3,38	2,33	0
C400x100x24x3	400	100	100	24	24	3	3	625	14,72	18,75	4239,79	211,99	15	212,94	27,59	3,36	2,28	0
C400x100x22x2,5	400	100	100	22	22	2,5	3	625	12,25	15,61	3530,39	176,52	15,01	174,94	22,52	3,34	2,23	0
C400x100x21x2	400	100	100	21	21	2	3	625	9,82	12,51	2834,51	141,73	15,03	140,23	17,99	3,34	2,2	0
C400x90x24x4	400	90	90	24	24	4	3	600	18,8	23,95	5248,57	262,43	14,75	209,78	29,93	2,95	1,99	0
C400x90x23x3,5	400	90	90	23	23	3,5	3	600	16,48	20,99	4609,66	230,48	14,77	184,04	26,16	2,95	1,96	0
C400x90x21x3	400	90	90	21	21	3	3	600	14,11	17,97	3946,66	197,33	14,78	155,27	21,91	2,93	1,91	0
C400x90x19x2,5	400	90	90	19	19	2,5	3	600	11,74	14,96	3284,55	164,23	14,79	127,22	17,83	2,91	1,86	0
C400x90x18x2	400	90	90	18	18	2	3	600	9,41	11,99	2637,01	131,85	14,81	101,96	14,23	2,91	1,84	0
C380x100x25x4	380	100	100	25	25	4	3	600	18,88	24,03	4938,82	259,94	14,28	274,37	38,03	3,37	2,38	0
C380x100x23x3,5	380	100	100	23	23	3,5	3	600	16,48	20,99	4318,95	227,31	14,3	236,72	30,87	3,35	2,33	0
C380x100x22x3	380	100	100	22	22	3	3	600	14,15	18,03	3716,16	195,59	14,32	203,33	26,42	3,35	2,3	0
C380x100x20x2,5	380	100	100	20	20	2,5	3	600	11,78	15,01	3094,22	162,85	14,33	166,88	21,53	3,33	2,25	0
C380x100x19x2	380	100	100	19	19	2	3	600	9,44	12,03	2484,62	130,77	14,35	133,72	17,19	3,33	2,22	0
C350x70x20x4	350	70	70	20	20	4	3	500	15,72	20,03	3245,73	185,47	12,67	99,16	17,95	2,22	1,48	0
C350x70x18x3,5	350	70	70	18	18	3,5	3	500	13,73	17,49	2835,1	162,01	12,68	85,01	15,26	2,2	1,43	0
C350x70x16x3	350	70	70	16	16	3	3	500	11,75	14,97	2425,25	138,59	12,69	71,27	12,68	2,18	1,38	0
C350x70x15x2,5	350	70	70	15	15	2,5	3	500	9,82	12,51	2029,35	115,96	12,71	59,52	10,54	2,18	1,35	0
C350x66x17x2	350	66	66	17	17	2	3	500	7,84	9,99	1612,17	92,12	12,68	44,33	8,34	2,1	1,28	0
C320x80x24x4	320	80	80	24	24	4	3	500	15,66	19,95	2864,8	179,05	11,93	147,49	24,37	2,71	1,95	0
C320x80x23x3,5	320	80	80	23	23	3,5	3	500	13,73	17,49	2518,82	157,43	11,95	129,54	21,31	2,71	1,92	0
C320x80x21x3	320	80	80	21	21	3	3	500	11,75	14,97	2157,82	134,86	11,97	109,29	17,83	2,69	1,87	0
C320x80x19x2,5	320	80	80	19	19	2,5	3	500	9,78	12,46	1796,75	112,3	11,98	89,54	14,48	2,67	1,82	0
C320x80x18x2	320	80	80	18	18	2	3	500	7,84	9,99	1444	90,25	12	71,82	11,57	2,68	1,79	0
C300x90x24x4	300	90	90	24	24	4	3	500	15,66	19,95	2627,19	175,15	11,42	194,34	29,21	3,11	2,35	0
C300x90x23x3,5	300	90	90	23	23	3,5	3	500	13,73	17,49	2310,42	154,03	11,45	170,58	25,54	3,11	2,32	0
C300x90x21x3	300	90	90	21	21	3	3	500	11,75	14,97	1980,38	132,03	11,46	144,05	21,39	3,09	2,27	0
C300x90x19x2,5	300	90	90	19	19	2,5	3	500	9,78	12,46	1649,9	109,99	11,48	118,14	17,4	3,07	2,21	0
C300x90x18x2	300	90	90	18	18	2	3	500	7,84	9,99	1326,26	88,42	11,5	94,72	13,89	3,07	2,18	0
C300x89x18x1,5	300	89	89	18	18	1,5	3	500	5,9	7,51	998,01	66,53	11,52	70,58	10,45	3,06	2,15	0
C280x100x24x4	280	100	100	24	24	4	3	500	15,66	19,95	2382,5	170,18	10,88	247,55	34,32	3,51	2,79	0
C280x100x23x3,5	280	100	100	23	23	3,5	3	500	13,73	17,49	2095,78	149,7	10,9	217,19	29,99	3,51	2,76	0
C280x100x21x3	280	100	100	21	21	3	3	500	11,75	14,97	1797,43	128,39	10,92	183,58	25,16	3,49	2,7	0
C280x100x20x2,5	280	100	100	20	20	2,5	3	500	9,82	12,51	1505,6	107,54	10,95	153,33	20,93	3,49	2,67	0
C250x75x22x4	250	75	75	22	22	4	3	414	13,02	16,59	1508,35	120,67	9,48	112,8	20,53	2,59	2,01	0
C250x75x21x3,5	250	75	75	21	21	3,5	3	414	11,42	14,55	1328,02	106,24	9,51	99,11	17,95	2,6	1,98	0
C250x75x19x3	250	75	75	19	19	3	3	414	9,77	12,45	1138,63	91,09	9,53	83,53	14,98	2,58	1,93	0
C250x75x17x2,5	250	75	75	17	17	2,5	3	414	8,13	10,38	948,78	75,9	9,54	68,34	12,14	2,56	1,87	0
C250x75x16x2	250	75	75	16	16	2	3	414	6,52	8,31	763,48	61,08	9,57	54,83	9,69	2,56	1,84	0
C250x75x15x1,5	250	75	75	15	15	1,5	3	414	4,91	6,25	575,92	46,07	9,59	41,23	7,25	2,57	1,81	0
C220x80x24x4	220	80	80	24	24	4	3	400	12,52	15,95	1171,28	108,48	8,52	132,21	23,52	2,86	2,38	0
C220x80x23x3,5	220	80	80	23	23	3,5	3	400	10,98	13,99	1032,24	93,84	8,55	116,21	20,57	2,87	2,35	0
C220x80x21x3	220	80	80	21	21	3	3	400	9,4	11,97	886,37	80,58	8,57	98,2	17,22	2,85	2,3	0
C220x80x19x2,5	220	80	80	19	19	2,5	3	400	7,81	9,96	739,68	67,24	8,59	80,57	13,99	2,84	2,24	0
C220x80x18x2	220	80	80	18	18	2	3	400	6,27	7,99	595,76	54,16	8,62	64,68	11,17	2,84	2,21	0
C220x80x16x1,5	220	80	80	16	16	1,5	3	400	4,7	5,98	447,19	40,65	8,64	47,67	8,15	2,82	2,15	0

Tablo 4.3. (Devam) ÜF3'e ait profillerin enkesit özellikleri ve boyutları (URL-3, 2020)

C Profil Kesiti

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

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

	H	A	B	C ₁	C ₂	T	Radius	~Açılım	Ağırlık	Alan	Kuvvetli Eksen (x-x)			Zayıf Eksen (y-y)			Ağırlık Merkezi	
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)
C200x80x22x4	200	80	80	22	22	4	3	375	11,76	14,99	926,31	92,63	7,81	123,84	22,23	2,85	2,44	0
C200x80x21x3,5	200	80	80	21	21	3,5	3	375	10,32	13,15	816,82	81,68	7,84	108,84	19,43	2,86	2,41	0
C200x80x19x3	200	80	80	19	19	3	3	375	8,83	11,25	701,61	70,16	7,86	91,69	16,23	2,84	2,35	0
C200x80x17x2,5	200	80	80	17	17	2,5	3	375	7,34	9,36	585,65	58,56	7,89	75,13	13,16	2,83	2,29	0
C200x80x16x2	200	80	80	16	16	2	3	375	5,9	7,51	471,93	47,19	7,91	60,29	10,51	2,83	2,26	0
C180x70x21x4	180	70	70	21	21	4	3	333	10,44	13,31	658,09	73,12	6,98	84,13	17,35	2,5	2,15	0
C180x70x20x3,5	180	70	70	20	20	3,5	3	333	9,17	11,68	580,91	64,55	7,01	73,99	15,17	2,5	2,12	0
C180x70x18x3	180	70	70	18	18	3	3	333	7,84	9,99	499,2	55,47	7,03	62,37	12,64	2,49	2,07	0
C180x70x16x2,5	180	70	70	16	16	2,5	3	333	6,52	8,31	416,83	46,31	7,06	51,02	10,22	2,47	2,01	0
C180x70x15x2	180	70	70	15	15	2	3	333	5,24	6,67	336,21	37,36	7,08	40,97	8,16	2,47	1,98	0
C180x80x21x4	180	80	80	21	21	4	3	333	10,44	13,31	547,31	68,41	6,37	112,57	21,12	2,89	2,67	0
C180x80x20x3,5	180	80	80	20	20	3,5	3	333	9,17	11,68	483,53	60,44	6,4	98,95	18,46	2,89	2,64	0
C180x80x18x3	180	80	80	18	18	3	3	333	7,84	9,99	416,15	52,02	6,42	83,53	15,41	2,88	2,58	0
C180x80x16x2,5	180	80	80	16	16	2,5	3	333	6,52	8,31	348	43,5	6,45	68,44	12,49	2,86	2,52	0
C150x80x24x3,5	150	80	80	24	24	3,5	3	333	9,12	11,61	424,41	56,59	6,01	103,89	20,13	2,97	2,84	0
C150x80x23x3	150	80	80	23	23	3	3	333	7,84	9,99	367,88	49,02	6,04	89,56	17,25	2,98	2,81	0
C150x80x21x2,5	150	80	80	21	21	2,5	3	333	6,52	8,31	308,22	41,1	6,07	73,74	14,05	2,97	2,75	0
C150x80x20x2	150	80	80	20	20	2	3	333	5,24	6,67	249,12	33,22	6,1	59,29	11,23	2,97	2,72	0
C150x80x18x1,5	150	80	80	18	18	1,5	3	333	3,92	4,99	187,79	25,04	6,13	43,86	8,21	2,96	2,66	0
C140x75x19x4	140	75	75	19	19	4	3	300	9,38	11,95	379,07	54,15	5,59	87,98	17,8	2,69	2,56	0
C140x75x16x3	140	75	75	16	16	3	3	300	7,04	8,97	288,82	41,26	5,64	65,17	12,94	2,68	2,46	0
C140x70x19x2,5	140	70	70	19	19	2,5	3	300	5,85	7,46	237,02	33,86	5,62	50,12	10,79	2,58	2,36	0
C140x70x18x2	140	70	70	18	18	2	3	300	4,7	5,99	191,74	27,39	5,64	40,32	8,83	2,59	2,33	0
C140x70x16x1,5	140	70	70	16	16	1,5	3	300	3,52	4,48	144,53	20,65	5,67	29,76	6,29	2,57	2,27	0
C120x60x16x3	120	60	60	16	16	3	3	250	5,86	7,47	172,08	28,68	4,77	35,46	8,88	2,17	2,01	0
C120x60x15x2,5	120	60	60	15	15	2,5	3	250	4,91	6,26	145,27	24,21	4,8	29,73	7,39	2,17	1,98	0
C120x57x16x2	120	57	57	16	16	2	3	250	3,92	4,99	115,14	19,19	4,79	22,2	5,82	2,1	1,89	0
C120x57x15x1,5	120	57	57	15	15	1,5	3	250	2,95	3,76	87,49	14,58	4,82	16,77	4,36	2,11	1,86	0
C120x55x16x1,2	120	55	55	16	16	1,2	3	250	2,36	3,01	69,6	11,6	4,81	12,85	3,48	2,07	1,81	0
C120x55x15x1	120	55	55	15	15	1	3	250	1,97	2,5	58,08	9,68	4,82	10,6	2,85	2,06	1,78	0
C100x65x19x4	100	65	65	19	19	4	3	240	7,49	9,55	155,56	31,11	4	54,46	13,52	2,37	2,47	0
C100x65x18x3,5	100	65	65	18	18	3,5	3	240	6,59	8,39	138,32	27,96	4,03	48	11,83	2,37	2,44	0
C100x65x17x3	100	65	65	17	17	3	3	240	5,67	7,23	120,45	24,09	4,05	41,43	10,13	2,38	2,41	0
C100x65x15x2,5	100	65	65	15	15	2,5	3	240	4,71	6,01	101,35	20,27	4,09	33,95	8,18	2,37	2,35	0
C100x60x18x2	100	60	60	18	18	2	3	240	3,76	4,79	79,36	15,87	4,06	24,67	6,54	2,26	2,23	0
C100x60x17x1,5	100	60	60	17	17	1,5	3	240	2,84	3,61	60,48	12,1	4,09	18,65	4,91	2,27	2,2	0
C100x60x15x1,2	100	60	60	15	15	1,2	3	240	2,25	2,87	48,43	9,69	4,11	14,5	3,75	2,25	2,14	0
C100x60x15x1	100	60	60	15	15	1	3	240	1,89	2,4	40,72	8,14	4,12	12,25	3,17	2,26	2,14	0
C100x50x15x2,5	100	50	50	15	15	2,5	3	212	4,13	5,26	83,52	16,7	3,96	17,8	5,42	1,83	1,72	0
C100x50x15x2	100	50	50	15	15	2	3	212	3,35	4,27	68,4	13,98	3,99	14,76	4,5	1,85	1,72	0
C100x50x15x1,5	100	50	50	15	15	1,5	3	217	2,55	3,25	52,51	10,5	4,01	11,48	3,5	1,88	1,72	0
C100x50x15x1,2	100	50	50	15	15	1,2	3	217	2,06	2,63	42,58	8,52	4,03	9,37	2,86	1,89	1,72	0

ÜF1 firmasına ait profillerin boyutları ve bazı enkesit özellikleri Tablo 4.1'den okunabilir. Bu firmanın ürettiği profillerin boyutları incelendiğinde, profillerin gövde yüksekliklerinin 100-400 mm, başlık genişliklerinin 42-90 mm, tırnak boylarının 15-25 mm, et kalınlıklarının ise 1,50-4,00 mm arasında değiştiği görülmektedir. Profillerin içbükmü yarıçapları (R) firmanın ürün kataloğunda belirtilmemiş olup kalınlığın 1,5 katı olduğu (1,5t) öğrenilmiştir.

ÜF2 firmasına ait profillerin bazı enkesit özellikleri ve boyutlarına ilişkin veriler Tablo 4.2'de verilmiştir. ÜF2 firmasındaki profillerin gövde yükseklikleri 100-500 mm, başlık genişlikleri 53-115 mm, tırnak (rijitleştirici) boyları 25-30 mm, et kalınlıkları 1,00-4,00 mm arasında değişmektedir. Profillerin içbükmü yarıçapları ise 6 mm'dir.

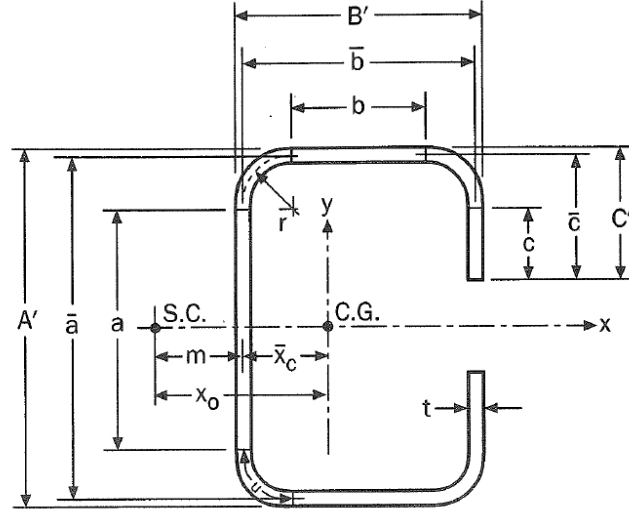
Boyutları ve bazı enkesit özellikleri Tablo 4.3'te verilen ÜF3 firmasına ait profillerin gövde yükseklikleri 100-400 mm, başlık genişlikleri 50-100 mm, tırnak (rijitleştirici) boyları 15-27 mm, et kalınlıkları (t) 1,00-4,00 mm arasında değişmektedir. Profillerin içbükmü yarıçapları ise 3 mm'ye eşittir.

4.2. İncelenen Profillerin Enkesit Özelliklerinin Belirlenmesi

Şekil 4.2'de tipik bir C profili oluşturan gövde, başlık ve tırnakların dıştan dışa (A', B' ve C'), kalınlık ortasından kalınlık ortasına tanımlanan “çizgisel” ($\bar{a}$, $\bar{b}$ ve $\bar{c}$) ve eğrilikler arasında tanımlanan “düz” (a, b ve c) genişlikleri ile bu genişlikler için Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Tasarım Kılavuzu'nda (AISI Manual, 2014) (kısaca, “Kılavuz” olarak adlandırılacaktır.) kullanılan simgeler gösterilmektedir. Şekil 4.1 ile Şekil 4.2 karşılaştırıldığında, Kılavuz'da (AISI Manual, 2014); H yerine A', B yerine B' ve C yerine C' simgelerinin kullanıldığı fark edilebilir. Kesitin geometrik merkezinden geçen asal eksenlerinden başlıklara paralel eksen x, dik eksen ise y eksenini olarak tanımlanmaktadır. Bu tanım, dayanım hesaplarında kullanılacak AISI S100-16 (AISI, 2016) yönetmeliğiyle de uyumludur.

Şekil 4.2'de C.G. (C.G.: Center of Gravity) ve S.C. (S.C.: Shear Center) olarak tanımlanan noktaların sırasıyla enkesitin geometrik ve kayma merkezleri olduğu gözlenebilir. Kesitin asal eksenlerinden yalnız biri (x eksenini) simetri eksenini olduğu için, kayma merkezi geometrik merkeziyle çakışmamaktadır. Geometrik merkez için GM,

kayma merkezi için KM simgesi kullanılmıştır. Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, kayma merkezi ile geometrik merkez arasındaki mesafe x_0 simgesiyle ifade edilmektedir. Geometrik merkezin ve kayma merkezinin çizgisel gövdeden dik uzaklıkları ise sırasıyla, $\bar{x}_c$ ve m simgeleriyle temsil edilmektedir.



Şekil 4.2. Tipik bir C profilin enkesit hesaplarında kullanılan simgeler (AISI Manual, 2014)

Çizgisel enkesitin boyutları;

$$a = A' - (2r + t), \quad b = B' - \left[r + t/2 + \alpha(r + t/2) \right], \quad c = \alpha \left[C' - (r + t/2) \right] \quad (4.1)$$

$$u = \pi r/2 \cong 1,57r \quad (4.2)$$

$$\bar{a} = A' - t, \quad \bar{b} = B' - (t/2 + \alpha t/2), \quad \bar{c} = \alpha(C' - t/2) \quad (4.3)$$

Denklem (4.2)’de, u köşelerin çizgisel uzunluğu olup; Kılavuz’da (AISI Manual, 2014) iç büküm yarıçapı için r simgesinin kullanıldığı fark edilebilir (Şekil 4.2). Denklem (4.1) ve (4.3)’te görünen α değeri, profilin başlıklarında kenar rijitleştiricisi bulunup bulunmadığına bağlı olarak Denklem (4.4)’teki gibi tanımlanmıştır.

$$\text{Kenar rijitleştirici varsa } \alpha=1,0; \text{ yoksa } \alpha=0 \quad (4.4)$$

Sonuç olarak, bu çalışmada ele alınan profillerde, α değeri 1’e eşittir. Soğuk şekillendirilmiş bir C profilin enkesit alanı (A), Denklem (4.5) ile hesaplanabilir;

$$A = t[a + 2b + 2u + \alpha(2c + 2u)] \quad (4.5)$$

Profilin KM ile GM konumlarını tanımlayan üç uzunluk; gövde kalınlığının orta noktası ile GM arası mesafe $\bar{x}_c$, gövde kalınlığının orta noktası ile KM arası mesafe m ve KM ile GM arasındaki mesafe x_o , sırasıyla Denklem (4.6), Denklem (4.7) ve Denklem (4.8) kullanılarak hesaplanabilir;

$$\bar{x}_c = \frac{2t}{A} \left\{ b \left(\frac{b}{2} + r \right) + u(0,363r) + \alpha [u(b + 1,637r) + c(b + 2r)] \right\} \quad (4.6)$$

$$m = \bar{b} \left[\frac{3\bar{a}^2\bar{b} + \alpha\bar{c}(6\bar{a}^2 - 8\bar{c}^2)}{\bar{a}^3 + 6\bar{a}^2\bar{b} + \alpha\bar{c}(8\bar{c}^2 - 12\bar{a}\bar{c} + 6\bar{a}^2)} \right] \quad (4.7)$$

$$x_o = \bar{x}_c + m \quad (4.8)$$

Kılavuz'da (AISI Manual, 2014), C profillerin geometrik merkezlerinden geçen asal eksenlere göre atalet momentleri, I_x ve I_y , için sırasıyla Denklem (4.9) ve (4.10)'da sunulan bağıntılar tanımlanmaktadır;

$$I_x = 2t \left\{ \begin{aligned} &0,0417a^3 + b \left(\frac{a}{2} + r \right)^2 + u \left(\frac{a}{2} + 0,637r \right)^2 + 0,149r^3 \\ &+ \alpha \left[0,0833c^3 + \frac{c}{4}(a - c)^2 + u \left(\frac{a}{2} + 0,637r \right)^2 + 0,149r^3 \right] \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

$$I_y = 2t \left\{ \begin{aligned} &b \left(\frac{b}{2} + r \right)^2 + \frac{b^3}{12} + 0,356r^3 \\ &+ \alpha [c(b + 2r)^2 + u(b + 1,637r)^2 + 0,149r^3] \end{aligned} \right\} - A\bar{x}_c^2 \quad (4.10)$$

Profillerin asal atalet yarıçapları (i_x ve i_y) Denklem (4.11), elastik mukavemet momentleri (W_{ex} ve W_{ey}) ise Denklem (4.12) kullanılarak hesaplanabilir;

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad \text{ve} \quad i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (4.11)$$

$$W_{ex} = \frac{2I_x}{A'} \quad \text{ve} \quad W_{ey} = \frac{I_y}{B' - e_x} \quad (4.12)$$

Denklem (4.12)'de, e_x

$$e_x = \bar{x}_c + 1/2 t \quad (4.13)$$

Son olarak, Kılavuz'da (AISI Manual, 2014) soğuk şekillendirilmiş C profillerin burulma içeren burkulma modlarında kullanılan iki önemli enkesit özelliği olan burulma ve çarpılma sabitleri (J ve C_w) için tanımlanan bağıntılar Denklem (4.14) ve Denklem (4.15)'te sunulmuştur;

$$J = \frac{t^3}{3} [a + 2b + 2u + \alpha(2c + 2u)] \quad (4.14)$$

$$C_w = \frac{\bar{a}^2 \bar{b}^2 t}{12} \left\{ \frac{2\bar{a}^3 \bar{b} + 3\bar{a}^2 \bar{b}^2 + \alpha \left[\begin{array}{l} 48\bar{c}^4 + 112\bar{b}\bar{c}^3 + 8\bar{a}\bar{c}^3 + 48\bar{a}\bar{b}\bar{c}^2 \\ + 12\bar{a}^2 \bar{c}^2 + 12\bar{a}^2 \bar{b}\bar{c} + 6\bar{a}^3 \bar{c} \end{array} \right]}{6\bar{a}^2 \bar{b} + (\bar{a} + \alpha 2\bar{c})^3 - \alpha 24\bar{a}\bar{c}^2} \right\} \quad (4.15)$$

4.3. Tipik Bir C Kesit İçin Enkesit Özelliklerinin Hesaplanması

Örnek olarak ÜF1 firmasına ait profillerden biri olan C300×90×19×2,0 profili ele alınmış ve enkesit özelliklerinin belirlenmesi için gerekli işlem adımlarına aşağıda yer verilmiştir.

$$A' = 300 \text{ mm}, B' = 90 \text{ mm}, t = 2 \text{ mm}, C' = 19 \text{ mm}, R = 3 \text{ mm}$$

Çizgisel kesitin boyutları;

$$a = A' - 2(R + t) = 300 - 2 \times (3 + 2) = 290 \text{ mm}$$

$$b = B' - [R + t + \alpha(R + t)] = 90 - [3 + 2 + 1,0 \times (3 + 2)] = 80,0 \text{ mm}$$

$$c = \alpha [C' - (R + t)] = 1,0 \times [19 - (3 + 2)] = 14,0 \text{ mm}$$

$$r = R + t/2 = 3 + 2/2 = 4 \text{ mm}, \quad u = \pi r/2 \cong 1,57r = 6,28 \text{ mm}$$

$$\bar{a} = A' - t = 298 \text{ mm}, \quad \bar{b} = B'(t/2 + \alpha t/2) = 90 \times (2/2 + 1,0 \times 2/2) = 88,0 \text{ mm}$$

$$\bar{c} = \alpha(C' - t/2) = 1,0 \times (19 - 2/2) = 18,0 \text{ mm}$$

Enkesit alanı ve birim boy kütle (G);

$$A = 2 \times [290 + 2 \times 80 + 2 \times 6,28 + 1,0 \times (2 \times 14 + 2 \times 6,28)] \cong 1010 \text{ mm}^2$$

$$G = \rho A = 7850 \times 1006 \times 10^{-6} \cong 7,90 \text{ kg/m}$$

Gövde kalınlığının orta noktası ile GM arası mesafe;

$$\bar{x}_c = \frac{2 \times 2}{1010} \left\{ 80 \left(\frac{80}{2} + 4 \right) + 6,28(0,363 + 4) \right. \\ \left. + 1,0 [6,28(80 + 1,637 \times 4) + 14(80 + 2 \times 4)] \right\} \cong 21,1 \text{ mm}$$

Gövdenin en dış noktasından GM'ye olan uzaklık;

$$e_x = \bar{x}_c + t/2 = 21,1 + 2/2 = 22,1 \text{ mm}$$

GM'den geçen x eksenine göre atalet momenti;

$$I_x = 2 \times 2 \left\{ \begin{aligned} &0,0417 \times 290^3 + 80 \left(\frac{290}{2} + 4 \right)^2 \\ &+ 6,28 \left(\frac{290}{2} + 0,637 \times 4 \right)^2 \\ &+ 0,149 \times 4^3 \\ &+ 1,0 \left[\begin{aligned} &0,0833 \times 14^3 + \frac{14}{4} (290 - 14)^2 \\ &+ 6,28 \left(\frac{290}{2} + 0,637 \times 4 \right)^2 + 0,149 \times 4^3 \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} \cong 13,3 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

GM'den geçen y eksenine göre atalet momenti;

$$I_y = 2 \times 2 \left\{ \begin{array}{l} 80 \left(\frac{80}{2} + 4 \right)^2 + \frac{80^3}{12} + 0,356 \times 4^3 \\ +1,0 \left[\begin{array}{l} 14(80+2 \times 4)^2 + 6,28(80+1,637 \times 4)^2 \\ +0,149 \times 4^3 \end{array} \right] \end{array} \right\} - 1010 \times 21,1^2$$

$$I_y = 964707,43 \cong 0,965 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

x ve y yönlerindeki atalet yarıçapları;

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{13,3 \times 10^6}{1010}} \cong 115 \text{ mm}, \quad i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{0,965 \times 10^6}{1010}} \cong 31,0 \text{ mm}$$

Çarpılma sabiti;

$$C_w = \frac{298^2 \times 88^2 \times 2}{12} \left\{ \begin{array}{l} 2 \times 298^3 \times 88 + 3 \times 298^2 \times 88^2 \\ +1,0 \left[\begin{array}{l} 48 \times 18^4 + 112 \times 88 \times 18^3 \\ +8 \times 298 \times 18^3 + 48 \times 298 \times 88 \times 18^2 \\ +12 \times 298^2 \times 18^2 + 12 \times 298^2 \times 88 \times 18 \\ +6 \times 298^3 \times 18 \end{array} \right] \\ \frac{6 \times 298^2 \times 88 + (298 + 1,0 \times 2 \times 18)^3}{-1,0 \times 24 \times 298 \times 18^2} \end{array} \right\} \cong 16,9 \times 10^9 \text{ mm}^6$$

Burulma sabiti;

$$J = \frac{2^3}{3} \left[290 + 2 \times 80 + 2 \times 6,28 + 1,0 (2 \times 14 + 2 \times 6,28) \right] = 1341,65 \cong 1,34 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

Mukavemet momentleri;

$$W_{ex} = \frac{I_x}{A'/2} = \frac{13,3 \times 10^6}{300/2} \cong 88,9 \times 10^3 \text{ mm}^3, \quad W_{ey} = \frac{I_y}{B' - e_x} = \frac{0,965 \times 10^6}{90 - 22,1} \cong 14,2 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

4.4. Profil Tablolarının Oluşturulması

İncelenen profillerin enkesit özellikleri, Denklem (4.1) – Denklem (4.15) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.4, Tablo 4.5 ve Tablo 4.6’da sunulmuştur. Tablolarda profillerin birim boy kütlelerine (G) de yer verilmiş ve hesaplanırken çeliğin yoğunluğu $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ olarak alınmıştır. Bu tablolarda ayrıca firmaların ürün kataloglarında yer almayan burulma (J) ve çarpılma (C_w) sabitleri de listelenmiştir.

Tablo 4.4. ÜF1’e ait C profillerin hesaplanan enkesit özellikleri

ÜF1 Profilleri	G kg/m	A mm ² (x10 ³)	e _x mm	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	x ₀ mm	J mm ⁴ (x10 ³)	C _w mm ⁶ (x10 ⁹)
C100×42×15×1,5	2,39	0,300	14,0	0,472	9,43	39,4	0,076	2,73	15,9	33,7	0,228	0,179
C100×43×16×2,0	3,19	0,400	14,6	0,621	12,4	39,1	0,105	3,71	16,1	34,7	0,542	0,254
C100×44×17×2,5	3,99	0,510	15,3	0,767	15,3	38,8	0,136	4,72	16,3	35,6	1,06	0,337
C100×45×17×3,0	4,75	0,600	15,6	0,902	18,0	38,6	0,163	5,55	16,4	35,9	1,82	0,406
C150×65×17×1,5	3,57	0,450	20,3	1,63	21,7	59,9	0,262	5,88	24,0	49,5	0,341	1,25
C150×65×19×2,0	4,76	0,610	20,9	2,15	28,7	59,6	0,352	7,98	24,1	50,3	0,808	1,74
C150×65×20×2,5	5,91	0,750	21,2	2,64	35,2	59,2	0,433	9,87	23,9	50,4	1,57	2,18
C150×65×22×3,0	7,11	0,900	21,6	3,13	41,7	58,8	0,522	12,0	24,0	51,1	2,72	2,73
C200×85×22×1,5	4,74	0,605	26,3	3,87	38,7	80,0	0,604	10,3	31,6	64,7	0,453	5,06
C200×85×24×2,0	6,33	0,810	26,9	5,12	51,2	79,7	0,809	13,9	31,7	65,5	1,07	6,97
C200×85×25×2,5	7,88	1,00	27,1	6,32	63,2	79,3	1,00	17,3	31,6	65,6	2,09	8,73
C200x85x27x3,0	9,46	1,20	27,6	7,51	75,1	79,0	1,20	21,0	31,6	66,3	3,62	10,8
C250×65×19×2,0	6,33	0,810	15,9	7,16	57,3	94,2	0,411	8,4	22,6	40,9	1,07	5,22
C250×65×20×2,5	7,88	1,00	16,2	8,84	70,7	93,9	0,507	10,4	22,5	40,9	2,09	6,53
C250×65×22×3,0	9,46	1,20	16,6	10,5	84,4	93,5	0,613	12,7	22,6	41,5	3,62	8,06
C250×65×25×4,0	12,6	1,60	17,3	13,8	110	92,8	0,811	17,0	22,5	42,1	8,54	11,0
C300×90×19×2,0	7,90	1,00	22,1	13,3	88,9	115	0,965	14,2	31,0	56,6	1,34	16,9
C300×90×20×2,5	9,84	1,20	22,3	16,5	110	115	1,19	17,6	30,9	56,6	2,61	21,2
C300×90×22×3,0	11,8	1,50	22,8	19,7	132	115	1,45	21,5	31,0	57,3	4,52	26,1
C300×90×25×4,0	15,7	2,00	23,5	25,9	173	114	1,92	28,9	31,0	58,0	10,7	35,6
C400×90×19×2,0	9,47	1,20	18,6	26,5	133	148	1,04	14,5	29,3	49,5	1,61	32,5
C400×90×20×2,5	11,8	1,50	18,8	32,9	164	148	1,29	18,1	29,2	49,6	3,13	40,7
C400×90×22×3,0	14,2	1,80	19,3	39,4	197	148	1,56	22,0	29,4	50,2	5,42	49,9
C400×90×25×4,0	18,8	2,40	19,9	51,9	260	147	2,08	29,6	29,4	50,8	12,8	67,9

Tablo 4.5. ÜF2'ye ait C profillerin hesaplanan enkesit özellikleri

ÜF2 Profilleri	G	A	e _x	I _x	W _x	i _x	I _y	W _y	i _y	x ₀	J	C _w
	kg/m	mm ² (x10 ³)	mm	mm ⁴ (x10 ⁶)	mm ³ (x10 ³)	mm	mm ⁴ (x10 ⁶)	mm ³ (x10 ³)	mm	mm	mm ⁴ (x10 ³)	mm ⁶ (x10 ⁹)
C100×53×25×1,0	1,89	0,240	21,1	0,378	7,55	39,6	0,108	3,40	21,2	51,0	0,080	0,365
C100×53×25×1,2	2,26	0,290	21,1	0,449	8,98	39,5	0,128	4,02	21,1	50,8	0,138	0,431
C100×54×25×1,5	2,83	0,360	21,5	0,561	11,2	39,5	0,164	5,06	21,4	51,4	0,270	0,548
C100×55×25×2,0	3,77	0,480	22,0	0,742	14,8	39,3	0,222	6,72	21,5	51,8	0,640	0,730
C100×57×25×2,5	4,74	0,600	22,9	0,930	18,6	39,3	0,292	8,56	22,0	53,2	1,26	0,950
C100×58×25×3,0	5,68	0,720	23,3	1,11	22,1	39,1	0,355	10,2	22,1	53,6	2,17	1,14
C150×59×25×1,5	3,54	0,450	19,9	1,55	20,6	58,6	0,235	6,02	22,8	49,3	0,338	1,36
C150×60×25×2,0	4,71	0,600	20,3	2,05	27,3	58,4	0,317	7,99	23,0	49,7	0,800	1,82
C150×62×25×2,5	5,92	0,750	21,1	2,57	34,3	58,4	0,416	10,2	23,5	50,9	1,57	2,37
C150×63×25×3,0	7,09	0,900	21,5	3,07	40,9	58,3	0,505	12,2	23,6	51,3	2,71	2,85
C200×79×30×1,5	4,71	0,600	26,0	3,73	37,3	78,8	0,557	10,5	30,5	64,6	4,50	5,40
C200×80×30×2,0	6,28	0,800	26,3	4,95	49,5	78,6	0,749	14,0	30,6	64,9	1,07	7,21
C200×82×30×2,5	7,88	1,00	27,1	6,20	62,0	78,6	0,972	17,7	31,1	66,2	2,09	9,29
C200×83×30×3,0	9,45	1,20	27,5	7,41	74,1	78,5	1,18	21,2	31,2	66,5	3,61	11,2
C250×60×25×2,0	6,28	0,80	15,5	6,94	55,5	93,2	0,373	8,38	21,6	40,2	1,07	5,16
C250×62×25×2,5	7,88	1,00	16,2	8,72	69,8	93,2	0,490	10,7	22,1	41,3	2,09	6,75
C250×63×25×3,0	9,45	1,20	16,5	10,4	83,4	93,1	0,595	12,8	22,2	41,5	3,61	8,15
C250×67×25×4,0	12,7	1,62	17,9	14,0	112	93,2	0,874	17,8	23,2	43,7	8,62	11,8
C250×65×30×5,0	15,9	2,03	18,4	17,3	138	92,3	1,06	22,7	22,8	43,8	16,9	14,9
C300×80×30×2,0	7,85	1,00	21,3	12,9	86,0	114	0,852	14,5	29,2	55,1	1,33	16,6
C300×82×30×2,5	9,84	1,25	22,0	16,2	108	114	1,11	18,4	29,7	56,2	2,61	21,5
C300×83×30×3,0	11,8	1,50	22,3	19,4	129	113	1,34	22,1	29,8	56,5	4,51	25,9
C300×87×30×4,0	15,8	2,02	23,7	26,0	173	114	1,92	30,3	30,8	58,7	10,8	36,8
C300×90×30×5,0	19,8	2,53	24,8	32,5	217	113	2,50	38,4	31,5	60,1	21,1	47,7
C400×80×30×2,0	9,42	1,20	17,9	25,9	129	147	0,921	14,8	27,7	48,1	1,60	31,1
C400×82×30×2,5	11,8	1,50	18,5	32,4	162	147	1,20	18,8	28,2	49,1	3,13	40,3
C400×83×30×3,0	14,2	1,80	18,9	38,8	194	147	1,45	22,6	28,3	49,4	5,41	48,6
C400×87×30×4,0	19	2,42	20,1	52,2	261	147	2,08	31,1	29,3	51,4	12,9	69,3
C400×90×30×5,0	23,8	3,03	21,1	65,3	326	147	2,71	39,4	29,9	52,6	25,2	90,0
C500×107×30×2,5	14,7	1,88	22,9	64,0	256	185	2,42	28,7	35,9	61,3	3,91	123
C500×108×30×3,0	17,7	2,25	23,2	76,6	306	184	2,92	34,4	36,0	61,6	6,76	148
C500×112×30×4,0	23,7	3,02	24,5	103	411	185	4,12	47,0	36,9	63,5	16,1	208
C500×115×30×5,0	29,6	3,77	25,5	128	514	184	5,32	59,4	37,5	64,7	31,5	267

Tablo 4.6. ÜF3'e ait C profillerin hesaplanan enkesit özellikleri

ÜF3 Profilleri	G	A	e _x	I _x	W _x	i _x	I _y	W _y	i _y	x ₀	J	C _w
	kg/m	mm ² (x10 ³)	mm	mm ⁴ (x10 ⁶)	mm ³ (x10 ³)	mm	mm ⁴ (x10 ⁶)	mm ³ (x10 ³)	mm	mm	mm ⁴ (x10 ³)	mm ⁶ (x10 ⁹)
C100×50×15×1,2	2,06	0,260	17,2	0,426	8,52	40,3	0,094	2,86	18,9	41,3	0,126	0,221
C100×50×15×1,5	2,56	0,320	17,2	0,525	10,5	40,1	0,115	3,50	18,7	40,9	0,245	0,269
C100×50×15×2,0	3,38	0,430	17,2	0,684	13,7	39,9	0,147	4,49	18,5	40,4	0,574	0,342
C100×50×15×2,5	4,17	0,530	17,2	0,835	16,7	39,6	0,178	5,41	18,3	39,8	1,11	4,07
C100×60×15×1,0	1,88	0,240	21,4	0,407	8,14	41,2	0,122	3,17	22,6	50,7	0,080	0,286
C100×60×15×1,2	2,25	0,290	21,4	0,484	9,69	41,1	0,145	3,76	22,5	50,5	0,138	0,338
C100×60×17×1,5	2,84	0,360	22,0	0,605	12,1	40,9	0,186	4,91	22,7	51,7	0,272	0,457
C100×60×18×2,0	3,79	0,480	22,3	0,793	15,9	40,6	0,246	6,54	22,6	51,8	0,643	0,616
C100×65×15×2,5	4,76	0,610	23,5	1,01	20,3	40,9	0,339	8,17	23,6	53,6	1,26	0,763
C100×65×17×3,0	5,75	0,730	24,1	1,20	24,1	40,5	0,413	10,1	23,8	54,6	2,20	0,975
C100×65×18×3,5	6,70	0,850	24,4	1,38	27,6	40,2	0,479	11,8	23,7	54,7	3,49	1,15
C100×65×19×4,0	7,64	0,970	24,7	1,55	31,1	39,9	0,543	13,5	23,6	54,9	5,19	1,33
C120×55×15×1,0	1,96	0,250	17,8	0,581	9,68	48,2	0,106	2,85	20,6	43,4	0,083	0,338
C120×55×16×1,2	2,36	0,300	18,1	0,696	11,6	48,1	0,129	3,48	20,7	43,9	0,145	0,418
C120×57×15×1,5	2,96	0,380	18,6	0,875	14,6	48,2	0,168	4,36	21,1	44,6	0,283	0,528
C120×57×16×2,0	3,94	0,500	18,9	1,15	19,2	47,9	0,222	5,82	21,0	44,8	0,670	0,709
C120×60×15×2,5	4,96	0,630	19,8	1,45	24,2	47,9	0,297	7,38	21,7	46,2	1,32	0,917
C120×60×16×3,0	5,94	0,760	20,1	1,72	28,7	47,7	0,354	8,86	21,6	46,3	2,27	1,11
C140×70×16×1,5	3,53	0,450	22,7	1,45	20,6	56,7	0,297	6,28	25,7	54,4	0,337	1,24
C140×70×18×2,0	4,73	0,600	23,3	1,92	27,4	56,4	0,403	8,62	25,9	55,3	0,803	1,72
C140×70×19×2,5	5,90	0,750	23,6	2,37	33,9	56,1	0,501	10,8	25,8	55,5	1,57	2,17
C140×75×16×3,0	7,12	0,910	24,6	2,89	41,2	56,4	0,651	12,9	26,8	57,1	2,72	2,63
C140×75×19×4,0	9,53	1,21	25,6	3,79	54,1	55,9	0,877	17,7	26,9	58,2	6,47	3,69
C150×80×18×1,5	3,93	0,500	26,6	1,88	25,0	61,3	0,438	8,21	29,6	63,6	0,375	2,11
C150×80×20×2,0	5,26	0,670	27,2	2,49	33,2	61,0	0,593	11,2	29,7	64,5	0,894	2,93
C150×80×21×2,5	6,57	0,840	27,5	3,08	41,1	60,7	0,737	14,0	29,7	64,7	1,74	3,69
C150×80×23×3,0	7,92	1,00	28,1	3,68	49,0	60,4	0,894	17,2	29,8	65,6	3,03	4,61
C150×80×24×3,5	9,23	1,18	28,4	4,24	56,6	60,1	1,04	20,1	29,7	65,7	4,80	5,42
C160×80×16×2,5	6,57	0,840	25,2	3,48	43,5	64,5	0,684	12,5	28,6	59,6	1,74	3,54
C160×80×18×3,0	7,92	1,00	25,8	4,16	52,0	64,2	0,834	15,4	28,8	60,5	3,03	4,41
C160×80×20×3,5	9,28	1,18	26,4	4,83	60,4	63,9	0,988	18,4	28,9	61,4	4,83	5,36
C160×80×21×4,0	10,6	1,35	26,7	5,47	68,4	63,7	1,12	21,1	28,8	61,6	7,20	6,15
C180×70×15×2,0	5,26	0,670	19,8	3,36	37,4	70,8	0,409	8,15	24,7	48,5	0,894	2,65
C180×70×16×2,5	6,57	0,840	20,1	4,17	46,3	70,6	0,510	10,2	24,7	48,6	1,74	3,32
C180×70×18×3,0	7,92	1,00	20,7	4,99	55,5	70,3	0,623	12,6	24,8	49,5	3,03	4,13
C180×70×20×3,5	9,28	1,18	21,2	5,81	64,5	70,1	0,738	15,1	25,0	50,3	4,83	5,00
C180×70×21×4,0	10,6	1,35	21,5	6,58	73,1	69,8	0,839	17,3	24,9	50,4	7,20	5,72
C200×80×16×2,0	5,92	0,750	22,6	4,72	47,2	79,1	0,602	10,5	28,3	55,6	1,01	4,76
C200×80×17×2,5	7,39	0,940	22,9	5,86	58,6	78,9	0,751	13,2	28,2	55,7	1,96	5,96
C200×80×19×3,0	8,91	1,13	23,5	7,01	70,1	78,6	0,916	16,2	28,4	56,6	3,40	7,39
C200×80×21×3,5	10,4	1,33	24,1	8,17	81,7	78,4	1,08	19,4	28,6	57,4	5,43	8,91
C200×80×22×4,0	11,9	1,52	24,4	9,26	92,6	78,1	1,23	22,2	28,5	57,5	8,09	10,2
C220×80×16×1,5	4,70	0,600	21,5	4,47	40,7	86,4	0,477	8,15	28,2	54,1	0,449	4,53
C220×80×18×2,0	6,30	0,800	22,1	5,96	54,2	86,2	0,646	11,2	28,4	54,9	1,07	6,24
C220×80×19×2,5	7,86	1,00	22,4	7,40	67,2	85,9	0,805	14,0	28,3	55,1	2,09	7,81
C220×80×21×3,0	9,47	1,21	23,0	8,86	80,6	85,7	0,981	17,2	28,5	55,9	3,62	9,66
C220×80×23×3,5	11,1	1,41	23,5	10,3	93,8	85,5	1,16	20,5	28,6	56,6	5,77	11,6
C220×80×24×4,0	12,7	1,61	23,8	11,7	10,6	85,2	1,32	23,5	28,6	56,7	8,61	13,3

Tablo 4.6. (Devam) ÜF3'e ait C profillerin hesaplanan enkesit özellikleri

ÜF3 Profilleri	G	A	e _x	I _x	W _x	i _x	I _y	W _y	i _y	x ₀	J	C _w
	kg/m	mm ² (x10 ³)	mm	mm ⁴ (x10 ⁶)	mm ³ (x10 ³)	mm	mm ⁴ (x10 ⁶)	mm ³ (x10 ³)	mm	mm	mm ⁴ (x10 ³)	mm ⁶ (x10 ⁹)
C250×75×15×1,5	4,92	0,630	18,1	5,76	46,1	95,9	0,412	7,25	25,7	46,7	0,470	5,03
C250×75×16×2,0	6,55	0,830	18,4	7,64	61,1	95,7	0,548	9,68	25,6	46,8	1,11	6,72
C250×75×17×2,5	8,18	1,04	18,7	9,49	75,9	95,4	0,683	12,1	25,6	47,0	2,17	8,40
C250×75×19×3,0	9,85	1,25	19,3	11,4	91,1	95,3	0,834	15,0	25,8	47,7	3,76	10,4
C250×75×21×3,5	11,5	1,47	19,8	13,3	106	95,1	0,989	17,9	25,9	48,4	6,00	12,5
C250×75×22×4,0	13,2	1,68	20,1	15,1	121	94,8	1,12	20,5	25,9	48,5	8,95	14,2
C280×100×20×2,5	9,87	1,25	26,7	15,1	108	110	1,53	20,9	34,9	66,5	2,62	23,4
C280×100×21×3,0	11,8	1,50	27,0	18,0	128	109	1,83	25,1	34,9	66,7	4,52	28,1
C280×100×23×3,5	13,8	1,76	27,6	21,0	150	109	2,17	30,0	35,1	67,5	7,20	33,6
C280×100×24×4,0	15,8	2,01	27,9	23,8	170	109	2,47	34,3	35,0	67,6	10,7	38,4
C300×89×18×1,5	5,91	0,750	21,5	9,98	66,5	115	0,706	10,4	30,6	55,7	0,564	12,4
C300×90×18×2,0	7,87	1,00	21,8	13,3	88,4	115	0,947	13,9	30,7	55,9	1,34	16,5
C300×90×19×2,5	9,83	1,25	22,1	16,5	110	115	1,18	17,4	30,7	56,0	2,61	20,7
C300×90×21×3,0	11,8	1,51	22,7	19,8	132	115	1,44	21,4	30,9	56,8	4,52	25,5
C300×90×23×3,5	13,8	1,76	23,2	23,1	154	114	1,70	25,5	31,1	57,5	7,20	30,4
C300×90×24×4,0	15,8	2,01	23,5	26,3	175	114	1,94	29,2	31,0	57,6	10,7	34,8
C320×80×18×2,0	7,87	1,00	17,9	14,4	90,3	120	0,718	11,6	26,8	46,7	1,34	14,5
C320×80×19×2,5	9,83	1,25	18,2	18,0	112	120	0,894	14,5	26,7	46,8	2,61	18,1
C320×80×21×3,0	11,8	1,51	18,7	21,6	135	120	1,09	17,8	26,9	47,5	4,52	22,2
C320×80×23×3,5	13,8	1,76	19,2	25,2	157	120	1,29	21,3	27,1	48,2	7,20	26,5
C320×80×24×4,0	15,8	2,01	19,5	28,6	179	119	1,47	24,3	27,0	48,3	10,7	30,3
C350×66×17×2,0	7,87	1,00	12,8	16,1	92,1	127	0,443	8,33	21,0	34,3	1,34	10,9
C350×70×15×2,5	9,87	1,26	13,5	20,3	116	127	0,594	10,5	21,7	35,5	2,62	14,5
C350×70×16×3,0	11,8	1,51	13,8	24,3	139	127	0,711	12,7	21,7	35,6	4,52	17,4
C350×70×18×3,5	13,8	1,76	14,3	28,4	162	127	0,848	15,2	21,9	36,2	7,20	20,8
C350×70×20×4,0	15,9	2,02	14,8	32,5	185	127	0,988	17,9	22,1	36,8	10,8	24,4
C380×100×19×2,0	9,47	1,21	22,2	24,9	131	144	1,34	17,2	33,3	58,2	1,61	37,3
C380×100×20×2,5	11,8	1,51	22,5	30,9	163	143	1,67	21,5	33,3	58,3	3,14	46,6
C380×100×22×3,0	14,2	1,81	23,0	37,2	196	143	2,03	26,4	33,5	59,0	5,44	57,1
C380×100×23×3,5	16,6	2,11	23,3	43,2	227	143	2,36	30,8	33,4	59,2	8,63	66,7
C380×100×25×4,0	19,0	2,42	23,8	49,4	260	143	2,74	36,0	33,6	59,9	12,9	77,8
C400×90×18×2,0	9,44	1,20	18,4	26,4	132	148	1,02	14,2	29,1	48,9	1,60	31,8
C400×90×19×2,5	11,8	1,50	18,6	32,9	164	148	1,27	17,8	29,1	49,0	3,13	39,8
C400×90×21×3,0	14,2	1,81	19,1	39,5	197	148	1,55	21,9	29,3	49,7	5,42	48,8
C400×90×23×3,5	16,6	2,11	19,6	46,1	231	148	1,84	26,1	29,5	50,4	8,63	58,2
C400×90×24×4,0	18,9	2,41	19,9	52,5	262	147	2,09	29,9	29,5	50,4	12,9	66,5
C400×100×21×2,0	9,85	1,25	22,0	28,4	142	150	1,40	18,0	33,4	58,1	1,67	43,6
C400×100×22×2,5	12,3	1,57	22,3	35,3	177	150	1,75	22,5	33,4	58,2	3,26	54,6
C400×100×24×3,0	14,8	1,88	22,8	42,4	212	150	2,13	27,6	33,6	58,9	5,65	66,8
C400×100×26×3,5	17,3	2,20	23,3	49,5	247	150	2,51	32,8	33,8	59,6	9,00	79,5
C400×100×27×4,0	19,8	2,52	23,6	56,4	282	150	2,87	37,5	33,7	59,6	13,4	90,8

Profillerin enkesit özellikleri Kılavuz'da (AISI Manual, 2014) sunulan formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Profillerin dayanımları hesaplanırken, Tablo 4.4, Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'da sunulan enkesit özellikleri kullanılmıştır.

5. EKSENEL BASINÇ ETKİSİNDEKİ SOĞUK ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK C PROFİLLERİN AISI S100-16'YA GÖRE TASARIM İLKELERİ

AISI S100-16 (AISİ, 2016) yönetmeliğinde soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının tasarımında kullanılabilecek üç yöntem tanımlanmaktadır: Güvenlik Katsayılarına Göre Tasarım (GKT) (Allowable Strength Design, ASD) yöntemi, Yük ve Dayanım Katsayılarına Göre Tasarım (YDKT) (Load and Resistance Factor Design, LRFD) yöntemi ve Sınır Durumlara Göre Tasarım (SDT) (Limit States Design, LSD) yöntemidir. ABD ve Meksika'da YDKT ve GKT yöntemi kullanılırken, Kanada'da SDT yöntemi kullanılmaktadır. GKT yönteminde elemanın güvenli dayanımı, karakteristik dayanımı güvenlik katsayısına (Ω_c) bölerek, YDKT yönteminde ise elemanın tasarım dayanımı, karakteristik dayanımı dayanım katsayısıyla (ϕ_c) çarpılarak elde edilmektedir. Bu çalışmada incelenen profillerin eksenel basınç kuvveti dayanımları YDKT yöntemi ile hesaplanmıştır.

Eksenel basınç etkisindeki soğuk şekillendirilmiş çelik profillerin tasarım esasları AISI S100-16 (AISİ, 2016) yönetmeliğinde Bölüm E'de tanımlanmaktadır. Bu bölümde, profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti mukavemetlerinin ($\phi_c P_n$), (i) akma veya genel burkulma, (ii) yerel burkulma ile akma veya genel burkulmanın etkileşimi ve (iii) çarpılmalı (distorsiyonel) burkulma sınır durumlarından, profilin enkesit tipine bağlı olarak, profilde gözlenme olasılığı bulunan sınır durumların dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir. C kesitli profiller, başlıklarında kenar rijitleştiricisi bulunan açık kesitli soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanları oldukları için, C profillerin basınç davranışını belirleyen önemli sınır durumlardan biri de çarpılmalı burkulmadır. Bu nedenle, bu çalışmada ele alınan profillerin eksenel basınç kuvveti mukavemetleri hesaplanırken, AISI S100-16 (AISİ, 2016)'da belirtilen üç sınır durumu da dikkate alınmıştır.

Bölüm E.2'de akma ve genel (eğilmeli, burulmalı, ya da eğilmeli-burulmalı) burkulma için hesaplanacak karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı P_n ile tasarım dayanımını hesaplamak için kullanılacak dayanım katsayısı (ϕ_c) şu şekildedir;

$$\phi_c = 0,85 \quad (5.1)$$

AISI S100-16 Bölüm E2’de akma ve genel burkulma sınır durumunda karakteristik aksenal basınç kuvveti mukavemetinin kayıpsız enkesit alanı (A_g) ile karakteristik burkulma gerilmesi (F_n)’nin çarpımından hesaplanması gerektiği belirtilmektedir.

$$P_n = A_g F_n \quad (5.2)$$

F_n genel burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesine eşittir ve narinlik katsayısı λ_c ’nin değerine göre aşağıdaki denklemlerden uygun olan belirlenerek hesaplanabilir;

$$\lambda_c \leq 1,5 \text{ ise } F_n = \left[0,658^{\lambda_c^2} \right] F_y, \quad \lambda_c > 1,5 \text{ ise } F_n = \left[\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right] F_y \quad (5.3)$$

Denklem (5.3)’te yer alan narinlik katsayısı λ_c , Denklem (5.4) ile hesaplanabilir;

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} \quad (5.4)$$

Denklem (5.4)’te F_y akma gerilmesi, F_{cre} ise elemanın olası genel burkulma sınır durumları için hesaplanan elastik burkulma gerilmelerinden en küçüğüne eşittir. Tek simetri aksenli basınç elemanları için, iki olası genel burkulma sınır durumu mevcuttur: Eleman enkesitinin simetri eksenine dik eksen (y eksen) etrafında eğilerek burkulması ve simetri eksen (x eksen) etrafında eğilip enkesite dik eksen (z eksen) etrafında burularak burkulmasıdır.

Bunlardan biri olan y eksen etrafında eğilmeli burkulma sınır durumu için, elastik burkulma gerilmesi hesabı için gerekli bağıntı Denklem (5.5)’te verilmiştir.

$$F_{cre} = \frac{\pi^2 E}{\left(K_y L_y / i_y \right)^2} \quad (5.5)$$

Denklem (5.5)’te yer alan $K_y L_y$, elemanın y eksen etrafındaki etkin eğilmeli burkulma boyu, E , çeliğin elastisite modülü (203 GPa), i_y enkesitin y eksen etrafındaki atalet yarıçapıdır.

AISI S100-16 Ek 2’de Bölüm 2.3.1.3’te, x eksenini etrafında eğilmeli ve z eksenini etrafında burulmalı burkulma sınır durumunda, elastik burkulma gerilmesi (F_{cre}) için verilen bağıntı Denklem (5.6)’da sunulmuştur.

$$F_{cre} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] \quad (5.6)$$

Denklem (5.6)’da σ_{ex} , x eksenini etrafında elastik eğilmeli burkulma gerilmesi, σ_t ise elastik burulmalı burkulma gerilmesidir ve Denklem (5.7)’deki formüllerle hesaplanmalıdır;

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2}, \quad \sigma_t = \frac{1}{A i_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad (5.7)$$

Denklem (5.7)’de, C_w çarpılma sabiti, J burulma sabiti, G kayma modülü (78 GPa), $K_x L_x$ ve $K_t L_t$, x eksenini etrafında eğilmeli burkulma ve burulmalı burkulma sınır durumlarında elemanın etkin burkulma boylarıdır. Denklem (5.6)’da yer alan β , aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanabilir;

$$\beta = 1 - (x_o / i_o)^2 \quad (5.8)$$

Denklem (5.8)’de x_o , kesitin kayma merkezi ile geometrik merkezi arasındaki mesafe, i_o ise kesitin kayma merkezine göre kutupsal atalet yarıçapı olup Denklem (5.9) ile hesaplanabilir;

$$i_o = \sqrt{i_x^2 + i_y^2 + x_o^2} \quad (5.9)$$

AISI-S100-16’da Bölüm E3’te yerel burkulma ile genel burkulma sınır durumları arasında etkileşim olduğu durumlarda, etkin genişlik ya da doğrudan dayanım yöntemlerinden birinin kullanılabileceği belirtilmektedir. Bu çalışmada, karakteristik dayanımlar etkin genişlik yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Etkin genişlik yöntemi ile yerel burkulma nedeniyle elemanda oluşan eksenel yük kapasitesindeki düşüş tasarımı, kritik burkulma gerilmesi F_n ’deki etkin enkesit alanı (A_e) ile dahil

edilmektedir. Karakteristik dayanım, etkin enkesit alanı ile kritik burkulma gerilmesi çarpılarak hesaplanmaktadır.

$$P_n = A_e F_n \quad (5.10)$$

AISI S100-16 Ek 1 Bölüm 1.1(a)'ya göre, rijitleştirilmiş bir enkesit parçasının etkin genişliği (b), düz genişliği (w) ile yerel azaltma katsayısı (ρ) çarpılarak hesaplanabilir;

$$b = \rho w \quad (5.11)$$

Yerel azaltma katsayısı ρ, aşağıda verilen denklemle hesaplanmalıdır;

$$\lambda \leq 0,673 \text{ ise } \rho = 1, \quad \lambda > 0,673 \text{ ise } \rho = \frac{1 - 0,22/\lambda}{\lambda} \quad (5.12)$$

Denklem (5.12)'deki narinlik katsayısı λ, Denklem (5.13) ile hesaplanmalıdır;

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} \quad (5.13)$$

Denklem (5.13)'te, f ele alınan elemandaki basınç gerilmesidir ve basınç elemanlarında, F_n 'ye eşittir. Ele alınan enkesit parçasının elastik burkulma gerilmesi olan F_{cr} plak burkulma denklemi ile elde edilebilir;

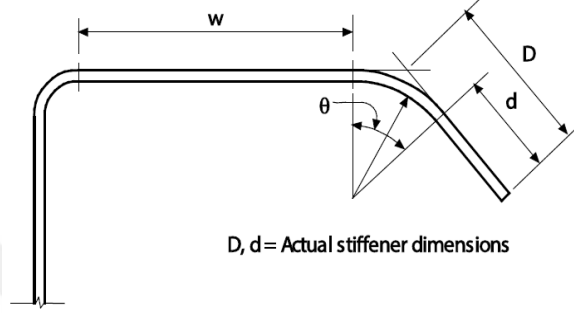
$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2) (w/t)^2} \quad (5.14)$$

Denklem (5.14)'te μ çeliğin Poisson oranı, t ele alınan enkesit parçasının et kalınlığı, k plak burkulma katsayısıdır. AISI S100-16 Ek 1 Bölüm 1.2.1'de, düzgün basınç etkisindeki rijitleştirilmemiş bir enkesit parçası için $k=0,43$, rijitleştirilmiş bir enkesit parçası için ise $k=4$ değerinin kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada C profillerin etkin gövde yükseklikleri hesaplanırken $k=4$, kenar rijitleştiricinin etkin genişliği (d'_s) hesaplanırken $k=0,43$ alınmıştır. C profillerin etkin başlık genişlikleri için ise kullanılacak k değerinin hesabı için AISI S100-16 Ek 1 Bölüm 1.3'te tanımlanan aşağıdaki denklemler sunulmaktadır;

$$\frac{D}{w} \leq 0,25 \text{ ise } k = 3,57(R_I)^n + 0,43 \leq 4 \quad (5.15)$$

$$0,25 < \frac{D}{w} \leq 0,8 \text{ ise } k = \left(4,82 - \frac{5D}{w}\right)(R_I)^n + 0,43 \leq 4 \quad (5.16)$$

Burada, D dıştan dışa tırnak boyu, w ise düz başlık genişliğidir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Tipik bir C profilin başlık ve tırnağının düz genişlikleri (AISI, 2016)

Denklem (5.15) ve (5.16)'da R_I ve n aşağıdaki bağıntılardan hesaplanmalıdır;

$$R_I = I_s / I_a \leq 1 \quad \text{ve} \quad n = \left(0,582 - \frac{w/t}{4S}\right) \geq \frac{1}{3} \quad (5.17)$$

Burada, I_s , I_a ve S değerleri, Denklem (5.18) ve Denklem (5.19)'da verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanmalıdır;

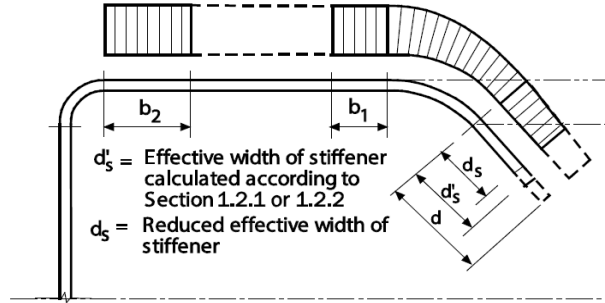
$$I_s = \frac{(d^3 t \sin^2 \theta)}{12}, \quad I_a = 399t^4 \left[\frac{w/t}{S} - 0,328 \right]^3 \leq t^4 \left[115 \frac{w/t}{S} + 5 \right] \quad (5.18)$$

$$S = 1,28 \sqrt{E/f} \quad (5.19)$$

Denklem (5.18)'de d , düz tırnak genişliğidir (Şekil 5.1). Denklem (5.19)'da f , basınç başlığındaki gerilmedir. Profilin etkin başlık genişlikleri b_1 ve b_2 ile azaltılmış etkin tırnak genişliği d_s (Şekil 5.2), Denklem (5.20) ve (5.21)'den uygun olan kullanılarak hesaplanır.

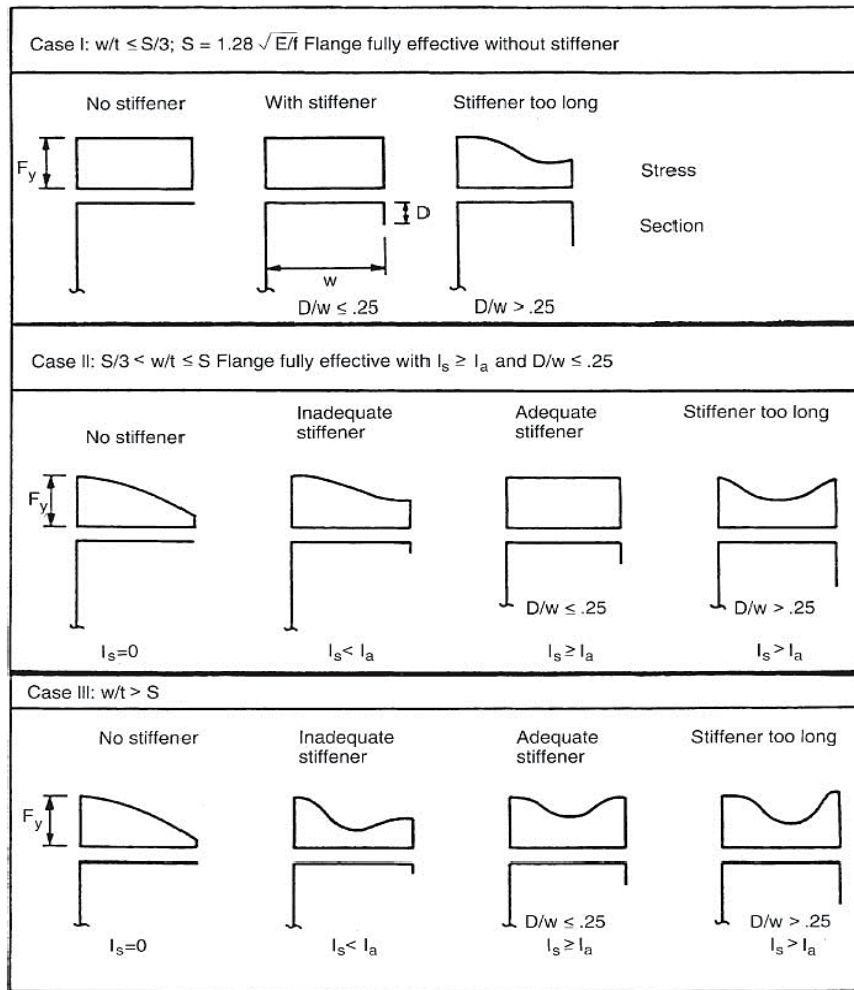
$$\frac{w}{t} \leq 0,328S \text{ ise } I_a = 0, \quad b = w, \quad b_1 = b_2 = w/2, \quad d_s = d'_s \quad (5.20)$$

$$\frac{w}{t} > 0,328S \text{ ise } b_1 = (b/2)(R_1), \quad b_2 = b - b_1, \quad d_s = d'_s(R_1) \quad (5.21)$$



Şekil 5.2. Tipik bir C profilin başlık ve tırnağının etkin genişlikleri (AISI, 2016)

Şekil 5.3'te basit rijitleştiriciye (tırnak) sahip bir basınç başlığındaki olası gerilme dağılımları verilmiştir.



Şekil 5.3. Basit rijitleştiricili bir basınç başlığındaki gerilme dağılımları (Yu ve diğ., 2020)

Gerilme dağılımlarından da fark edileceği gibi, rijitleştiricinin çok uzun ya da kısa olması ($I_s < I_a$ ve $I_s > I_a$), rijitleştiricinin etkisini azaltmakta ve davranışı olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, w/t (düz başlık genişlik/kalınlık) oranının S sayısından küçük olduğu durumlarda, başlık tamamen etkin olabilmektedir. Ancak, w/t oranının S sayısından büyük olduğu durumda, başlık yeterli rijitleştiriciye sahip ($D/w \leq 0,25$ ve $I_s < I_a$) olsa dahi, başlık kısmen rijitleştirilmiş durumdadır.

Çarpılmalı burkulma, AISI S100-16 Bölüm E.4'e göre başlıklarında kenar rijitleştiriciler olan I-, Z-, C-, şapka ve diğer açık kesitlere uygulanmalıdır. Bölüm E.4'te çarpılmalı (distorsiyonel) burkulma için hesaplanacak karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı P_n ile tasarım dayanımı ($\phi_c P_n$) hesaplamak için kullanılacak dayanım katsayısı (ϕ_c) şu şekildedir;

$$\phi_c = 0,85 \quad (5.22)$$

Çarpılmalı burkulma için karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı P_n , Denklem (5.23)'te verilen bağıntılardan uygun olan kullanılarak hesaplanmalıdır;

$$\lambda_d \leq 0,561 \text{ ise } P_n = P_y; \quad \lambda_d > 0,561 \text{ ise } P_n = \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} P_y \quad (5.23)$$

Denklem (5.23)'te yer alan narinlik katsayısı λ_d , Denklem (5.24) kullanılarak elde edilmelidir;

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crd}}} \quad (5.24)$$

Denk. (5.24)'teki akma yükü P_y , brüt enkesit alanı A_g 'nin akma dayanımı F_y ile çarpılmasıyla hesaplanmaktadır.

$$P_y = A_g F_y \quad (5.25)$$

AISI-S100-16 Ek 2’de Bölüm 2.3.1.3’e göre, elastik çarpılmalı burkulma yükü P_{crd} , elastik çarpılmalı burkulma gerilmesi F_{crd} ile kayıpsız enkesit alanı A_g ’nin çarpımına eşittir.

$$P_{crd} = A_g F_{crd} \quad (5.26)$$

Elastik çarpılmalı burkulma gerilmesi F_{crd} , Denk. (5.27) ile hesaplanmalıdır:

$$F_{crd} = \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{\tilde{k}_{\phi fg} + \tilde{k}_{\phi wg}} \quad (5.27)$$

Denklem (5.28)’de, başlığın başlık/gövde birleşimine sağladığı elastik dönme rijitliği $k_{\phi fe}$, aşağıda verilen formülle hesaplanmalıdır;

$$k_{\phi fe} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \left[EI_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + EC_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 GJ_f \quad (5.28)$$

Denklem (5.29)’da $k_{\phi we}$ gövdenin başlık/gövde birleşimine sağladığı elastik dönme rijitliği,

$$k_{\phi we} = \frac{Et^3}{6h_o(1-\mu^2)} \quad (5.29)$$

denkleminde hesaplanmalıdır. Bu denklemde h_o dıştan dışa gövde yüksekliği, μ çeliğin Poisson oranı olup değeri 0,3’e eşittir.

Denklem (5.27)’de yer alan k_{ϕ} çapraz, panel, kaplama gibi elemanların başlık/gövde birleşimine sağladığı dönme rijitliği olup başlık desteklenmemişse $k_{\phi}=0$ olarak alınmalıdır. Eğer iki başlık için dönme rijitlikleri farklıysa, dönme rijitliklerinden küçük olan kullanılmalıdır. Bu çalışmada, elemanların çarpılmalı burkulma dayanımları hesaplanırken $k_{\phi}=0$ olarak alınmıştır.

Başlığın başlık/gövde birleşiminden talep ettiği geometrik dönme rijitliği $\tilde{k}_{\phi fg}$, Denklem (5.30) ile hesaplanmalıdır;

$$\tilde{k}_{\phi fg} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \left\{ A_f \left[\left(x_{of} - h_{xf} \right)^2 \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right)^2 - 2y_{of} \left(x_{of} - h_{xf} \right) \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right) + I_{xf} + I_{yf} \right] + h_{xf}^2 + y_{of}^2 \right\} \quad (5.30)$$

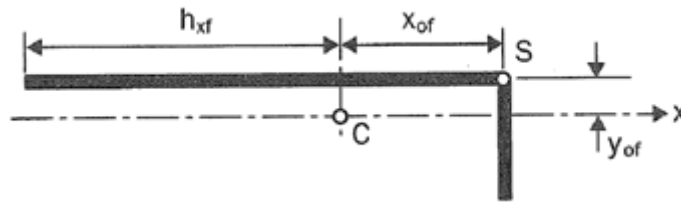
Gövdenin başlık/gövde birleşiminden talep ettiği geometrik dönme rijitliği $\tilde{k}_{\phi wg}$;

$$\tilde{k}_{\phi wg} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \frac{th_o^3}{60} \quad (5.31)$$

denklemleriyle hesaplanmalıdır. Rijitlik denklemlerinde L , hesaplanan L_{crd} ve L_m değerlerinden küçük olanına eşittir. L_m çarpımalı burkulmayı engellemek amacıyla yerleştirilen destekler arası mesafedir. Eğer sürekli destekleme varsa, $L_m = L_{crd}$ 'dir. L_{crd} ise aşağıdaki formülle hesaplanabilir;

$$L_{crd} = \left\{ \frac{6\pi^4 h_o (1 - \mu^2)}{t^3} \left[I_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] \right\}^{1/4} \quad (5.32)$$

Denklem (5.33)-(5.36)'da yer alan ve Şekil 5.4'te gösterilen kenar rijitleştiricili başlığa ait olan A_f , J_f , I_{xf} , I_{yf} , I_{xyf} , C_{wf} , x_{of} , y_{of} ve h_{xf} değerleri, AISI-S100-16 Ek 2'de Tablo 2.3.1.3-1'de sunulan bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir.



Şekil 5.4. Çarpımalı burkulma dayanımı hesabında kullanılan başlık kesiti (AISI Manual, 2014)

Şekil 5.4'te tanımlanan simgeler cinsinden ifade edildiğinde, başlığın geometrik merkezinin konumu Denklem (5.33)'te yer alan formüllerle hesaplanabilir;

$$x_{of} = \frac{b^2}{2(b+d)}, \quad h_{xf} = \frac{-(b^2 + 2bd)}{2(b+d)}, \quad h_{yf} = y_{of} = \frac{-d^2}{2(b+d)} \quad (5.33)$$

Denklem (5.33)'te yer alan h_{xf} başlığın geometrik merkezinden başlık/gövde birleşimine olan x eksenindeki mesafesi, x_{of} başlığın geometrik merkezinden başlığın kayma merkezine olan x eksenindeki mesafesi, y_{of} ve h_{yf} ise başlığın geometrik merkezinden başlığın kayma merkezine olan y eksenindeki mesafesidir. Denklem (5.33)'teki uzunlukların kare köşe kabulüyle “çizgisel” uzunluklar olduğu belirtilmelidir.

Denklem (5.34)'te başlığın ve kenar rijitleştiricinin enkesit boyutları;

$$b = B' - t, \quad d = C' - t/2 \quad (5.34)$$

ile hesaplanabilir. Denklem (5.34)'te verilen B' başlığın dıştan dışa genişliği, t kalınlık, C' kenar rijitleştiricinin dıştan dışa genişliğidir.

Başlığın alanı A_f , burulma sabiti J_f ve çarpılma sabiti C_{wf} , Denklem (5.35)'te verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir;

$$A_f = (b + d)t, \quad J_f = (1/3)bt^3 + (1/3)dt^3, \quad C_{wf} = 0 \quad (5.35)$$

Benzer şekilde, başlığın geometrik merkezinden geçen tırnağa dik (x) ve paralel (y) eksenine göre kartezyen ve çarpım atalet momentleri I_{xf} , I_{yf} ve I_{xyf} Denklem (5.36) kullanılarak hesaplanabilir;

$$I_{xf} = \frac{t(t^2b^2 + 4bd^3 + t^2bd + d^4)}{12(b + d)}, \quad I_{yf} = \frac{t(b^4 + 4db^3)}{12(b + d)}, \quad I_{xyf} = \frac{tb^2d^2}{4(b + d)} \quad (5.36)$$

C profillerin kenar rijitleştiricili başlıklarına ait geometrik özellikler, Denklem (5.33)-(5.36)'daki bağıntılar ile belirlendikten sonra çarpımalı burkulma dayanımları Denklem (5.23)-(5.32)'deki bağıntılar kullanılarak elde edilebilir.

6. SOĞUK ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK C PROFİLLERİN TASARIM EKSENEL BASINÇ KUVVETİ DAYANIMLARININ HESAPLANMASI

Bu tez çalışmasında incelenen profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları, iki farklı durum için hesaplanmıştır. AISI-S100-16 (AISI, 2016) yönetmeliğine göre, dayanım katsayısı ϕ_c incelenen bütün sınır durumlar için 0,85'e eşittir. Elde edilen sonuçlar üç anlamlı rakam ile gösterilmiştir ancak hesaplamalarda daha gerçekçi değerler kullanılmıştır. İlk durumda, profillerin genel burkulmanın engellendiği koşullardaki tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda S235 ($F_y=235$ MPa) çelik kalitesi kullanılmıştır. Elde edilen dayanım değerleri Tablo 6.1, Tablo 6.2 ve Tablo 6.3'te ikinci sütunda verilmiştir. Ardından profillerin başlık, gövde ve tırnaklarında yerel burkulma meydana gelmeden taşıyabilecekleri en büyük tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları ($(\phi_c P_n)_{f=fbaşlık}$, $(\phi_c P_n)_{f=fgövde}$, $(\phi_c P_n)_{f=ftırnak}$) hesaplanarak aynı tabloların sırasıyla üçüncü, dördüncü ve beşinci sütunlarında listelenmiştir.

İkinci durumda, profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları, farklı burkulma boyları için, Bölüm 5'te özetlenen tasarım esasları kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 6.4, Tablo 6.5 ve Tablo 6.6'da sunulmuştur. Profillerin burulmalı burkulma boylarının, y (zayıf) ekseninde eğilmeli burkulma boylarına eşit olduğu ($K_t L_t = K_y L_y$) kabul edilerek dayanımları hesaplanmıştır. Profillerin tasarım dayanımları zayıf ekseninde eğilmeli burkulmada 5 farklı desteklenme durumuna göre hesaplanmıştır. Öncelikle, elemanın zayıf eksenindeki eğilmesinin tamamen engellendiği ($K_y L_y = 0$) kabul edilerek profillerin tasarım dayanımları hesaplanmıştır. Daha sonra, zayıf eksenindeki eğilmeli burkulma boyu $K_y L_y$ 'nin, güçlü eksenindeki eğilmeli burkulma boyu $K_x L_x$ 'in sırasıyla 1/4, 1/3, 1/2'sine eşit olduğu durumlar için dayanım hesapları tekrarlanmıştır. Son durumda ise her iki eksenindeki burkulma boyları eşit alınarak ($K_y L_y = K_x L_x$) dayanım hesabı tekrarlanmıştır.

Her iki durum için de hesaplanması gereken, incelenen profillerin basınç davranışını belirleyen sınır durumlardan biri olan çarpılmalı burkulma için tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları hesaplanmıştır. Hesaplanan dayanım değerleri Tablo 6.7, Tablo 6.8 ve Tablo 6.9'da sunulmuştur. Bu tablolarda ayrıca profillerin, çarpılmalı burkulmaya ait

destekler arası gerekli mesafe değerleri (L_{cr}), rijitlik değerleri ($k_{\phi fe}$, $k_{\phi fg}$, $k_{\phi we}$, $k_{\phi wg}$) ve çarpılmalı burkulma gerilmelerine (F_d) yer verilmiştir.

6.1. Profillerin Genel Burkulmanın Engellendiği Durumlar İçin Tasarım Eksenel Basınç Kuvveti Dayanımlarının Hesaplanması

Bu çalışmada incelenen profillerin genel burkulmanın olmadığı durumlarda, tasarım akma dayanımı Denklem (6.1) ile hesaplanabilir;

$$(\phi_c P_n)_{f=F_y} = 0,85 F_y A_{e,f=F_y} \quad (6.1)$$

Burada, 0,85 dayanım katsayısı, F_y profillerin akma gerilmesi ($F_y=235$ MPa) ve A_e ise profillerin etkin alanıdır. Genel burkulma mevcut olmadığı için Denklem (6.1)'de karakteristik basınç gerilmesi (F_n) yerine F_y yazılarak hesaplanmıştır.

Profillerin her bir enkesit parçasının (gövde, başlıklar ve tırnaklar) yerel burkulma oluşmadan taşıyabilecekleri en büyük tasarım eksenel basınç kuvveti mukavemetleri Denklem (6.2)- Denklem (6.4) ile hesaplanabilir;

$$(\phi_c P_n)_{f=F_{gövde}} = 0,85 f_{gövde} A_{e,f=F_{gövde}} \quad (6.2)$$

$$(\phi_c P_n)_{f=F_{başlık}} = 0,85 f_{başlık} A_{e,f=F_{başlık}} \quad (6.3)$$

$$(\phi_c P_n)_{f=F_{tırnak}} = 0,85 f_{tırnak} A_{e,f=F_{tırnak}} \quad (6.4)$$

Denklem (6.2)'de $f_{gövde}$ gövdenin tamamının, Denklem (6.3)'te $f_{başlık}$ başlıkların tamamının, Denklem (6.4)'te $f_{tırnak}$ ise tırnakların tamamının etkin çalışacağı en büyük gerilme değeridir.

Profillerin enkesit parçalarının yerel burkulma meydana gelmeden taşıyabilecekleri en büyük basınç gerilmesinin hesaplanabilmesi için narinlik katsayısı 0,673'e eşitlenerek hesaplanabilir.

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} \leq 0,673 \rightarrow \frac{f_{max}}{F_{cr}} \cong 0,673^2 \quad (6.5)$$

Denklem (6.5)'te eşitliğin her iki tarafının karesi alınmıştır. Elastik burkulma gerilmesi F_{cr1} için Denklem (5.14)'te verilen eşitlik Denklem (6.5)'te yerine yazılırsa,

$$f_{\max} \cong 0,673^2 k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(w/t)^2} \quad (6.6)$$

eşitliğine ulaşılabilir. Burada, $f_{\max}$ enkesit parçasının yerel burkulma oluşmadan tümüyle etkin çalıştığı en büyük gerilme değerine eşittir (Çelik, 2020).

Tezde incelenen profillerin genel burkulmanın engellendiği durumlardaki tasarım aksenal basınç kuvveti dayanımları Tablo 6.1, Tablo 6.2 ve Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.1. ÜF1'e ait C profillerin genel burkulmanın olmadığı durumlardaki tasarım aksenal basınç kuvveti dayanımları

ÜF1 Profilleri	$\phi_c P_n$ (kN)			
	$f=F_y$	$f=F_{\text{gövde}}$	$f=F_{\text{başlık}}$	$f=F_{\text{turnak}}$
C100×42×15×1,5	53,2	22,6	91,8	79,6
C100×43×16×2,0	77,6	56,7	200	155
C100×44×17×2,5	102	117	378	272
C100×45×17×3,0	121	213	619	415
C150×65×17×1,5	62,8	14,2	55,9	51,3
C150×65×19×2,0	102	35,0	126	105
C150×65×20×2,5	136	70,4	234	179
C150×65×22×3,0	173	126	412	304
C200×85×22×1,5	75,8	10,4	45,9	68,4
C200×85×24×2,0	114	25,2	108	102
C200×85×25×2,5	165	50,4	193	166
C200x85x27x3,0	210	89,5	328	268
C250×65×19×2,0	105	15,8	129	108
C250×65×20×2,5	143	31,4	240	185
C250×65×22×3,0	185	55,5	424	316
C250×65×25×4,0	276	137	1066	752
C300×90×19×2,0	108	13,5	86,5	69,0
C300×90×20×2,5	159	26,8	152	115
C300×90×22×3,0	211	47,1	262	191
C300×90×25×4,0	323	115	619	426
C400×90×19×2,0	109	9,00	87,5	70,0
C400×90×20×2,5	161	17,7	154	117
C400×90×22×3,0	214	31,0	265	194
C400×90×25×4,0	332	75,2	628	435

Tablo 6.2. ÜF2'ye ait C profillerin genel burkulmanın olmadığı durumlardaki tasarım aksenal basınç kuvveti dayanımları

ÜF2 Profilleri	$\phi_c P_n$ (kN)			
	$f=F_y$	$f=F_{gövde}$	$f=F_{başlık}$	$f=F_{turnak}$
C100×53×25×1,0	35,8	9,20	34,2	354
C100×53×25×1,2	47,5	16,0	60,0	233
C100×54×25×1,5	66,2	31,7	116	140
C100×55×25×2,0	93,9	76,9	237	213
C100×57×25×2,5	121	155	385	319
C100×58×25×3,0	145	274	591	453
C150×59×25×1,5	71,2	15,7	101	122
C150×60×25×2,0	103	37,8	207	187
C150×62×25×2,5	138	75,3	339	279
C150×63×25×3,0	174	132	521	399
C200×79×30×1,5	79,7	11,2	64,7	248
C200×80×30×2,0	125	26,7	154	155
C200×82×30×2,5	167	52,9	256	233
C200×83×30×3,0	211	92,4	390	328
C250×60×25×2,0	106	16,5	211	191
C250×62×25×2,5	145	32,7	345	286
C250×63×25×3,0	186	56,8	533	411
C250×67×25×4,0	280	138	1009	709
C250×65×30×5,0	381	275	2267	1639
C300×80×30×2,0	127	14,0	156	157
C300×82×30×2,5	171	27,6	260	238
C300×83×30×3,0	219	48,1	397	335
C300×87×30×4,0	326	116	760	572
C300×90×30×5,0	445	231	1279	898
C400×80×30×2,0	128	9,20	157	158
C400×82×30×2,5	173	18,1	262	240
C400×83×30×3,0	222	31,4	401	339
C400×87×30×4,0	335	75,7	768	580
C400×90×30×5,0	461	150	1296	914
C500×107×30×2,5	184	14,2	176	160
C500×108×30×3,0	246	24,7	271	226
C500×112×30×4,0	379	59,2	528	393
C500×115×30×5,0	520	117	897	624

Tablo 6.3. ÜF3'e ait C profillerin genel burkulmanın olmadığı durumlardaki tasarım aksenal basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$\phi_c P_n$ (kN)			
	$f=F_y$	$f=F_{gövde}$	$f=F_{başlık}$	$f=F_{turnak}$
C100×50×15×1,2	42,2	12,7	42,3	39,2
C100×50×15×1,5	57,9	25,1	72,6	60,3
C100×50×15×2,0	82,4	60,0	148	109
C100×50×15×2,5	106	119	261	179
C100×60×15×1,0	33,1	8,00	20,5	21,3
C100×60×15×1,2	42,2	13,9	32,2	29,6
C100×60×17×1,5	62,0	27,8	61,8	55,1
C100×60×18×2,0	92,8	67,3	131	105
C100×65×15×2,5	119	130	173	113
C100×65×17×3,0	146	230	303	198
C100×65×18×3,5	171	367	470	299
C100×65×19×4,0	195	554	692	434
C120×55×15×1,0	33,2	5,60	23,6	24,4
C120×55×16×1,2	43,4	9,80	39,5	38,1
C120×57×15×1,5	59,9	19,5	60,4	49,9
C120×57×16×2,0	91,0	46,9	130	98,6
C120×60×15×2,5	122	93,9	200	135
C120×60×16×3,0	151	165	335	222
C140×70×16×1,5	61,9	16,6	48,1	41,1
C140×70×18×2,0	99,9	40,3	107	86,3
C140×70×19×2,5	139	79,8	195	147
C140×75×16×3,0	172	141	244	158
C140×75×19×4,0	242	346	579	374
C150×80×18×1,5	66,1	16,0	44,5	41,0
C150×80×20×2,0	105	38,6	97,7	83,1
C150×80×21×2,5	148	76,5	176	139
C150×80×23×3,0	192	135	297	228
C150×80×24×3,5	233	217	451	334
C160×80×16×2,5	140	66,6	148	97,9
C160×80×18×3,0	183	117	247	169
C160×80×20×3,5	230	189	395	269
C160×80×21×4,0	270	286	576	386
C180×70×15×2,0	98,2	26,2	98,1	69,0
C180×70×16×2,5	135	51,7	174	122
C180×70×18×3,0	179	90,9	303	211
C180×70×20×3,5	221	147	486	338
C180×70×21×4,0	263	221	712	488

Tablo 6.3. (Devam) ÜF3'e ait C profillerin genel burkulmanın olmadığı durumlardaki tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$\phi_c P_n$ (kN)			
	$f=F_y$	$f=f_{gövde}$	$f=f_{başlık}$	$f=f_{turnak}$
C200×80×16×2,0	100	23,6	86,6	62,6
C200×80×17×2,5	144	46,6	158	109
C200×80×19×3,0	192	81,6	263	185
C200×80×21×3,5	240	132	418	294
C200×80×22×4,0	286	198	609	420
C220×80×16×1,5	64,1	8,60	42,8	35,3
C220×80×18×2,0	104	20,6	92,1	73,9
C220×80×19×2,5	148	40,5	167	126
C220×80×21×3,0	199	70,9	285	212
C220×80×23×3,5	246	114	451	331
C220×80×24×4,0	294	172	655	470
C250×75×15×1,5	62,6	6,90	44,6	35,4
C250×75×16×2,0	102	16,4	95,7	69,8
C250×75×17×2,5	143	32,2	169	122
C250×75×19×3,0	193	56,3	292	208
C250×75×21×3,5	240	90,5	466	332
C250×75×22×4,0	288	136	680	476
C280×100×20×2,5	157	30,7	136	101
C280×100×21×3,0	214	53,3	221	157
C280×100×23×3,5	271	85,6	336	244
C280×100×24×4,0	335	129	486	344
C300×89×18×1,5	68,2	5,60	41,6	37,0
C300×90×18×2,0	106	13,5	83,0	64,2
C300×90×19×2,5	156	26,5	151	109
C300×90×21×3,0	208	46,2	247	183
C300×90×23×3,5	268	74,1	390	285
C300×90×24×4,0	322	111	564	404
C320×80×18×2,0	106	11,8	93,8	75,6
C320×80×19×2,5	152	23,2	171	130
C320×80×21×3,0	205	40,4	291	217
C320×80×23×3,5	255	64,8	460	340
C320×80×24×4,0	308	97,2	668	484
C350×66×17×2,0	102	9,80	117	92,2
C350×70×15×2,5	140	19,3	172	119
C350×70×16×3,0	188	33,5	288	195
C350×70×18×3,5	236	53,7	467	318
C350×70×20×4,0	288	81,0	714	489

Tablo 6.3. (Devam) ÜF3'e ait C profillerin genel burkulmanın olmadığı durumlardaki tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$\phi_c P_n$ (kN)			
	$f=F_y$	$f=F_{gövde}$	$f=F_{başlık}$	$f=F_{tırnak}$
C380×100×19×2,0	110	10,0	76,3	60,7
C380×100×20×2,5	159	19,5	138	103
C380×100×22×3,0	219	34,0	233	170
C380×100×23×3,5	277	54,3	342	250
C380×100×25×4,0	346	81,7	510	369
C400×90×18×2,0	107	8,90	84,0	65,2
C400×90×19×2,5	158	17,5	152	111
C400×90×21×3,0	211	30,5	250	186
C400×90×23×3,5	273	48,8	395	291
C400×90×24×4,0	330	73,2	572	412
C400×100×21×2,0	114	9,30	82,5	69,8
C400×100×22×2,5	164	18,3	148	116
C400×100×24×3,0	224	31,8	240	189
C400×100×26×3,5	291	50,9	375	290
C400×100×27×4,0	350	76,4	540	405

Profillerin genel burkulmanın engellendiği durumlardaki dayanım hesaplamalarının daha iyi anlaşılabilmesi için ÜF1'e ait C300×90×19×2,0 (R=3 mm) profilinin dayanım hesabı aşağıda örnek olarak gösterilmiştir.

C300×90×19×2,0 profilinin başlık, gövde ve tırnaklarının düz genişlikleri;

$$w_{başlık} = B - 2(R + t) = 90 - 2 \times (3 + 2) = 80 \text{ mm}$$

$$w_{gövde} = H - 2(R + t) = 300 - 2 \times (3 + 2) = 290 \text{ mm}$$

$$d_{tırnak} = D - (R + t) = 19 - (3 + 2) = 14 \text{ mm}$$

i) $f=F_y$ durumu:

Bu koşulda, profile etki eden gerilme değeri akma gerilmesine (F_y) eşit alınarak profilin taşıyacağı tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı hesaplanacaktır.

İlk olarak, gövde, başlık ve tırnakların elastik burkulma gerilmesi (F_{cr1}) hesaplanacaktır. Gövdenin elastik burkulma gerilmesi Denklem (5.14) ile hesaplanabilir,

$$F_{\text{crl,gövde}} = 4 \times \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{12(1-0,3^2)(290/2)^2} = 34,9 \text{ MPa}$$

Başlıkların elastik burkulma gerilmesini hesaplayabilmek için öncelikle k burkulma katsayısı hesaplanacaktır.

$$w_{\text{başlık}}/t = 80/2 = 40$$

$$S = 1,28\sqrt{E/f} = 1,28\sqrt{\frac{203 \times 10^3}{235}} = 37,6 \rightarrow 0,328S = 0,328 \times 37,6 = 12,3$$

$$\frac{w_{\text{başlık}}}{t} = 40 > 0,328S = 12,3$$

Başlık düz genişliğinin ($w_{\text{başlık}}$) kalınlığa (t) oranının Denklem (5.21)'deki bağıntılar ile hesaplanan 12,3'ten büyük olduğu için I_a , I_s , n ve R_I değerleri ile azaltılmış etkin tırnak boyu (d_s) hesaplanmalıdır. I_a ve I_s değerleri Denklem (5.18) kullanılarak hesaplanabilir,

$$I_s = (14^3 \times 2,0)/12 = 457 \text{ mm}^4$$

I_s hesaplanırken başlık ile tırnak arasındaki açı 90° alınmıştır.

$$= 399 \times 2^4 \left[\frac{80/2}{37,6} - 0,328 \right]^3 \leq 2^4 \times \left[115 \times \frac{80/2}{37,6} + 5 \right]$$

$$= 2,54 \times 10^3 \leq 2,04 \times 10^3 \rightarrow I_a = 2,04 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

I_a hesaplanırken sol taraftaki denklemden elde edilen $2,54 \times 10^3$ değeri sağ taraftaki denklemden elde edilen $2,04 \times 10^3$ değerinden büyük olup koşulu sağlamamıştır ve $I_a = 2,04 \times 10^3 \text{ mm}^4$ olarak belirlenmiştir. Ardından R_I ve n değerleri Denklem (5.17) ile hesaplanabilir,

$$R_I = \frac{457,3}{2036,4} = 0,225 \leq 1 \rightarrow R_I = 0,225$$

Denklemden elde edilen R_I değeri 1'den küçük olup koşul sağlanmıştır.

$$n = \left(0,582 - \frac{40,0}{4 \times 37,6} \right) = 0,316 \geq \frac{1}{3} \rightarrow n = \frac{1}{3}$$

n değeri hesaplanırken sol tarafta elde edilen 0,316, 1/3'ten küçük olup koşul sağlanmadığı için, n=1/3 olarak belirlenmiştir.

Son olarak k plak/yerel burkulma katsayısını hesaplayabilmek için Denklem (5.15) ile Denklem (5.16)'dan uygun olan bağıntı belirlenmelidir.

$$\frac{D}{w_{\text{başlık}}} = \frac{19}{80} = 0,238 < 0,25$$

k katsayısı Denklem (5.15) ile hesaplanabilir,

$$k = 3,57 \times (0,225)^{1/3} + 0,43 = 2,60 \leq 4 \rightarrow k = 2,60$$

k plak/yerel burkulma katsayısı hesaplandıktan sonra, başlıkların elastik burkulma gerilmeleri Denklem (5.14) ile hesaplanabilir,

$$F_{\text{crl,başlık}} = 2,60 \times \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{12(1-0,3^2)(80/2)^2} = 298 \text{ MPa}$$

Tırnakların elastik burkulma gerilmeleri,

$$F_{\text{crl,tırnak}} = 0,43 \times \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{12(1-0,3^2)(14/2)^2} = 1,61 \times 10^3 \text{ MPa}$$

Her enkesit parçası için hesaplanan elastik burkulma gerilme değerlerine göre narinlik katsayıları Denklem (5.13) ile hesaplanabilir,

$$\lambda_{\text{gövde}} = \sqrt{\frac{f}{F_{\text{crl(gövde)}}}} = \sqrt{\frac{235}{34,9}} = 2,60 > 0,673$$

$$\lambda_{\text{başlık}} = \sqrt{\frac{f}{F_{\text{crl(başlık)}}}} = \sqrt{\frac{235}{298}} = 0,888 > 0,673$$

$$\lambda_{\text{tırnak}} = \sqrt{\frac{f}{F_{\text{crl(tırnak)}}}} = \sqrt{\frac{235}{1,61 \times 10^3}} = 0,382 < 0,673$$

Tırnakların narinlik katsayısı 0,673'ten küçük olduğu için etkin genişliklerinin hesaplanmasına gerek yoktur. Gövde ve başlıkların narinlik katsayısı 0,673'ten büyük olduğu için etkin genişlikleri hesaplanmalıdır. Gövde ve başlıkların etkin genişliklerini hesaplayabilmek için öncelikle yerel azaltma katsayıları ($\rho_{\text{gövde}}$ ve $\rho_{\text{başlık}}$) Denklem (5.12) ile hesaplanacaktır.

$$\rho_{\text{gövde}} = \frac{1 - 0,22/2,60}{2,60} = 0,353, \quad \rho_{\text{başlık}} = \frac{1 - 0,22/0,888}{0,888} = 0,847$$

Gövde ve başlıkların etkin genişlikleri, Denklem (5.11) kullanılarak hesaplanabilir,

$$b_{e(\text{gövde})} = w_{\text{gövde}} \times \rho_{\text{gövde}} = 290 \times 0,353 = 102 \text{ mm}$$

$$b_{e(\text{başlık})} = w_{\text{başlık}} \times \rho_{\text{başlık}} = 80 \times 0,847 = 67,8 \text{ mm}$$

Ardından, başlık düz genişliğinin ($w_{\text{başlık}}$) kalınlığa (t) oranı, Denklem (5.21) ile hesaplanan 12,3'ten büyük olduğu için azaltılmış etkin tırnak genişliği hesaplanacaktır. Tırnağın azaltılmış etkin boyu Denklem (5.21) kullanılarak hesaplanabilir,

$$\frac{w}{t} = \frac{80}{2} = 40 > 0,328S = 12,3 \text{ olduğundan}$$

$$d_s = 14 \times 0,225 = 3,14 \text{ mm}$$

Ayrıca, başlıklara ait b_1 ve b_2 etkin genişlikleri de Denklem (5.21) ile hesaplanabilir,

$$b_1 = (b_{e,\text{başlık}}/2)(R_1) = (67,8/2) \times (0,225) = 7,63 \text{ mm}$$

$$b_2 = b_{e,\text{başlık}} - b_1 = 67,8 - 7,63 = 60,2 \text{ mm}$$

Etkin genişlik hesabının ardından profilin etkin alanı hesaplanacaktır. Profilin etkin alanı, toplam enkesit alanından etkin olmayan alan çıkarılarak hesaplanabilir,

$$A_e = A - t \times \left[2 \times (w_{\text{başlık}} - b_{e,\text{başlık}}) + (w_{\text{gövde}} - b_{e,\text{gövde}}) + 2 \times (w_{\text{tırnak}} - b_{e,\text{tırnak}}) \right]$$

$$A_e = 1006 - 2,00 \times \left[2 \times (80 - 67,8) + (290 - 102) + 2 \times (14 - 3,14) \right] = 539 \text{ mm}^2$$

Profilin tasarım aksenal basınç kuvveti dayanımı Denklem (6.1) kullanılarak hesaplanabilir,

$$(\phi_c P_n)_{f=F_y} = 0,85 F_y A_e = 0,85 \times 235 \times 539 \times 10^{-3} = 108 \text{ kN}$$

C300×90×19×2,0 profiline ait elde edilen 108 kN değeri Tablo 6.1'in $f=F_y$ başlıklı ikinci sütunundan okunabilir.

ii) Gövdenin tamamının etkin olduğu durum ($f=F_{gövde}$):

Bu durumda, profilin gövdede yerel burkulma meydana gelmeden taşıyabileceği en büyük eksenel basınç kuvveti $((\phi_c P_n)_{f=F_{gövde}})$ hesaplanacaktır. Buna göre gövdede yerel burkulma meydana gelmeden taşıyabileceği en büyük gerilme değeri Denklem (6.6) ile hesaplanabilir,

$$F_{gövde} = 0,673^2 \times 4,0 \times \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{12(1-0,3^2)(290/2)^2} = 15,8 \text{ MPa}$$

Bu gerilmeye karşılık gelen eksenel kuvvet altında, profilin başlıklarının ve tırnaklarının etkin genişlikleri hesaplanacaktır.

Başlıkların etkin genişliklerini hesaplayabilmek için öncelikle Denklem (5.19)'da yer alan S değeri hesaplanmalıdır. S hesaplanırken f yerine başlıklara etki eden gerilme değeri olan $F_{gövde}=15,8 \text{ MPa}$ yazılarak S değeri hesaplanacaktır.

$$S = 1,28 \sqrt{E/f} = 1,28 \sqrt{\frac{203 \times 10^3}{15,8}} = 145, \quad 0,328S = 0,328 \times 145 = 47,6$$

Başlıkların etkin genişliklerini hesaplayabilmek için $w_{başlık}/t$ oranının 0,328S'ten büyük olup olmadığı kontrol edilecektir.

$$\frac{w_{başlık}}{t} = 40 \leq 0,328S = 47,6$$

$w_{başlık}/t$ oranı 47,6'dan küçük olduğu için düz başlık genişliği etkin başlık genişliğine, etkin tırnak genişliği de azaltılmış etkin tırnak genişliğine eşittir.

$$b_{e(başlık)} = w_{başlık} = 80 \text{ mm}, \quad d_s = d'_s = 14 \text{ mm}$$

Başlık ve tırnakların etkin genişlikleri, düz genişliklerine eşit olup profilin etkin alanı toplam alana eşittir. Buna göre gövdenin tamamen etkin olduğu en büyük gerilme değerine göre taşıyabileceği en büyük eksenel basınç kuvveti Denklem (6.2) ile hesaplanabilir,

$$(\phi_c P_n)_{f=F_{gövde}} = 0,85F_{gövde} A_e = 0,85 \times 15,8 \times 1006 \times 10^{-3} = 13,5 \text{ kN}$$

C300×90×19×2,0 profiline ait hesaplanan 13,5 kN değeri Tablo 6.1'in üçüncü sütunundan okunabilir.

iii) Başlıkların tamamının etkin olduğu durum ($f=F_{başlık}$):

Başlıkların tümüyle etkin çalışacağı en büyük tasarım eksenel basınç kuvvetini $((\phi_c P_n)_{f=F_{başlık}})$ hesaplayabilmek için ilk olarak başlıkların tümüyle etkin çalışacağı en büyük gerilme değeri ($F_{başlık}$) hesaplanmalıdır.

$F_{başlık}$ gerilmesi ile bu gerilmeye bağlı olarak elde edilecek k plak burkulma katsayısını hesaplayabilmek için aşağıdaki adımlar uygulanmalıdır. Denklem (6.5)'teki bağıntı aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\frac{F_{başlık}}{F_{crl}} = \frac{F_{başlık}}{k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(w/t)^2}} = 0,673^2 \quad (6.7)$$

$F_{başlık}$ ve k plak burkulma katsayısı haricinde diğer bilinen değerleri karşıya atılırsa,

$$\frac{F_{başlık}}{k} = 0,673^2 \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(w/t)^2} \quad (6.8)$$

denklemini elde edilir. Ardından bu profil için bilinen değerleri yerine yazılarak denklem şu şekilde sadeleştirilebilir,

$$\frac{w_{başlık}}{t} = \frac{80}{2} = 40, E=203 \times 10^3 \text{ MPa}, \mu=0,3$$

$$\frac{F_{\text{başlık}}}{k} = 0,673^2 \times \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{12(1-0,3^2)(40)^2} \cong 51,9 \text{ MPa}$$

Burada $F_{\text{başlık}}$ ile $F_{\text{başlık}}$ ' a bağlı olarak hesaplanacak k plak katsayısı oranının 51,9 MPa'a eşit olmalıdır. $F_{\text{başlık}}$ gerilmesi için yapılan sayısal çözümler neticesinde başlıkların tamamen etkin olduğu en büyük gerilme $F_{\text{başlık}}=159 \text{ MPa}$ olarak belirlenmiştir. Bu gerilme değerine bağlı olarak k plak katsayısı hesaplanacak ve $f_{\text{başlık}}/k$ oranının 51,9 MPa'a eşit olup olmadığı kontrol edilecektir. k katsayısı hesaplanması için öncelikle Denklem (5.19) ile S değeri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir,

$$S = 1,28\sqrt{E/f} = 1,28\sqrt{\frac{203 \times 10^3}{159}} = 45,7$$

$$0,328S = 15,0$$

$$w_{\text{başlık}}/t = 40 > 15,0$$

$w_{\text{başlık}}/t$ oranı 15,0'dan büyük olduğu için I_a , I_s , R_I ve n değerleri ile azaltılmış etkin tırnak genişliği (d_s) hesaplanacaktır. I_a ve I_s değerleri Denklem (5.18) kullanılarak hesaplanabilir,

$$= 399 \times 2^4 \left[\frac{40}{45,7} - 0,328 \right]^3 \leq 2^4 \left[115 \times \frac{40}{45,7} + 5 \right]$$

$$I_a = 1,05 \times 10^3 \leq 1,69 \times 10^3 \rightarrow I_a = 1,05 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

$$I_s = (14^3 \times 2,0)/12 = 457 \text{ mm}^4$$

R_I ve n değerleri Denklem (5.17) kullanılarak hesaplanabilir,

$$R_I = \frac{457}{1,05 \times 10^3} = 0,436 \leq 1 \rightarrow R_I = 0,436$$

$$n = \left(0,582 - \frac{40}{4 \times 45,7} \right) = 0,363 \geq \frac{1}{3} \rightarrow n = 0,363$$

Hesaplanan R_I ve n değerlerinin ardından k plak burkulma katsayısı hesaplanabilir. Tüm tırnak boyunun (D) düz başlık genişliğine ($w_{\text{başlık}}$) oranı 0,25'ten küçük olduğu için Denklem (5.15) ile k plak burkulma katsayısı hesaplanabilir,

$$k = 3,57 \times (0,436)^{0,363} + 0,43 = 3,07 < 4 \rightarrow k=3,07$$

Elde edilen $F_{\text{başlık}}$ gerilmesi ile k plak burkulma katsayısı oranlandığında,

$$\frac{F_{\text{başlık}}}{k} = \frac{159}{3,07} = 51,9 \text{ MPa}$$

elde edilir. Böylece Denklem (6.8) ile elde edilen 51,9 MPa'a ulaşılmış olup başlıkların taşıyabileceği en büyük gerilmenin ($F_{\text{başlık}}$) 159 MPa olduğu doğrulanmıştır. $F_{\text{başlık}}$ ve F_{crl} gerilmeleri Denklem (5.13)'te yerlerine yazılarak 0,673'ü aşmadığı ispatlanabilir,

$$F_{\text{crl}(\text{başlık})} = 3,07 \times \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{12(1-0,3^2)(80/2)^2} = 352 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{\text{başlık}} = \sqrt{\frac{F_{\text{başlık}}}{F_{\text{crl}(\text{başlık})}}} = \sqrt{\frac{159}{352}} = 0,673$$

Başlıkların tamamen etkin çalıştığı $F_{\text{başlık}}$ gerilmesinde gövde ve tırnakların etkin genişlikleri hesaplanacaktır.

Gövdenin etkin genişliğinin belirlenebilmesi için narinlik katsayısı,

$$\lambda_{\text{gövde}} = \sqrt{\frac{f}{F_{\text{crl}(\text{gövde})}}} = \sqrt{\frac{159}{34,9}} = 2,14 > 0,673$$

Başlıkların tamamen etkin çalıştığı durumda, gövdenin tamamen etkin çalışmadığı, λ sayısının 0,673'ü aştığı görülmektedir. Buna bağlı olarak gövdenin yerel azaltma katsayısı $\rho_{\text{gövde}}$ ve etkin genişliği $b_{\text{e}(\text{gövde})}$ Denklem (5.11) ve Denklem (5.12) ile hesaplanabilir,

$$\rho_{\text{gövde}} = \frac{1-0,22/2,14}{2,14} = 0,420 \quad b_{\text{e}(\text{gövde})} = w_{\text{gövde}} \times \rho_{\text{gövde}} = 290 \times 0,420 = 122 \text{ mm}$$

Etkin genişlik hesabında hesaplanması gereken diğer enkesit parçası tırnaklardır. Tırnakların etkin boylarının hesaplanması için öncelikle λ hesaplanmalıdır.

$$\lambda_{\text{tirnak}} = \sqrt{\frac{f}{F_{\text{crl(tirnak)}}}} = \sqrt{\frac{159}{1,61 \times 10^3}} = 0,315 < 0,673$$

λ_{tirnak} , 0,673'ten küçüktür ve etkin genişlik hesabına gerek yoktur. Tırnak etkin genişliği, tırnak düz genişliğine eşittir.

$$b_{\text{e(tirnak)}} = d_{\text{tirnak}} = 14 \text{ mm}$$

Bununla birlikte, tırnakların azaltılmış etkin genişliklerinin hesaplanıp hesaplanmayacağı Denklem (5.20) ve Denklem (5.21) ile kontrol edilecektir.

$$w_{\text{başlık}} / t = 40 > 0,328S = 15,0 \rightarrow d_s = d'_s(R_I)$$

$w_{\text{başlık}}/t$ oranı 15,0'dan büyük olduğu için tırnakların azaltılmış etkin genişlikleri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir,

$$d_s = d'_s(R_I) = 14 \times 0,436 = 6,10 \text{ mm}$$

Etkin genişliklerin hesabının ardından etkin alan ve başlıkların tamamının etkin çalıştığı en büyük tasarım eksenel basınç kuvveti Denklem (6.3) ile hesaplanabilir,

$$A_e = 1006 - 2,00 \times [(290 - 122) + 2 \times (14 - 6,10)] = 638 \text{ mm}^2$$

$$(\phi_c P_n)_{f=F_{\text{başlık}}} = 0,85 F_{\text{başlık}} A_e = 0,85 \times 159,47 \times 638 \times 10^3 = 86,5 \text{ kN}$$

C300×90×19×2,0 profiline ait hesaplanan 86,5 kN dayanım değeri Tablo 6.1'in dördüncü sütunundan okunabilir.

iv) Tırnakların tamamının etkin olduğu durum ($f=F_{\text{tirnak}}$):

Son olarak tırnağın tamamen etkin çalıştığı en büyük gerilme değerine göre tasarım eksenel basınç kuvveti hesaplanacaktır. İlk olarak, $\lambda_c \leq 0,673$ koşulu kontrol edilecektir.

$$F_{\text{tirnak}} = 0,673^2 \times 0,43 \times \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{12(1 - 0,3^2)(14/2)^2} = 729 \text{ MPa}$$

$$F_{crl(tırnak)} = 0,43 \times \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{12(1-0,3^2)(14/2)^2} = 1,61 \times 10^3 \text{ MPa}$$

Elde edilen $F_{tırnak}$ ve $F_{crl,tırnak}$ gerilmelerine göre narinlik katsayısı hesaplanabilir,

$$\lambda_{tırnak} = \sqrt{\frac{F_{tırnak}}{F_{crl(tırnak)}}} = \sqrt{\frac{729}{1,61 \times 10^3}} = 0,673$$

Buradan $\lambda_c \leq 0,673$ koşulu sağladığı görülebilir. Bununla birlikte, tırnağın tamamen etkin olduğu durumda, tırnağın etkin genişliği ile azaltılmış etkin genişliği birbirine eşit olmalıdır. Bu eşitliğin sağlanabilmesi için Denklem (5.21)'de yer alan R_I sayısı 1'e eşit olmalıdır.

$$d_s = d'_s(R_I)$$

Denklem (5.17) ile elde edilen R_I sayısının 1'e eşit olması için $I_s/I_a = 1$ olmalıdır,

$$R_I = \frac{I_s}{I_a} \leq 1$$

Burada I_s sabit olup Denklem (5.18) ile hesaplanabilir,

$$I_s = (d_{tırnak}^3 t) / 12 = (14^3 \times 2) / 12 = 457 \text{ mm}^4$$

R_I sayısının 1'e eşit olması için I_a , I_s 'ye eşit olmalıdır. ($I_a = I_s = 457 \text{ mm}^4$) Belirlenen I_a değeri Denklem (5.18)'de yerine konulduğunda,

$$457 = 399 \times 2^4 \left[\frac{40}{S} - 0,328 \right]^3 \leq 2^4 \times \left[115 \times \frac{40}{S} + 5 \right]$$

Bu denklemde gerekli sayısal çözümler yapılarak $S=53,8$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen S sayısı yukarıdaki denklemde yerine konularak kontrol edildiğinde,

$$457 = 399 \times 2^4 \left[\frac{40}{53,8} - 0,328 \right]^3 \leq 2^4 \times \left[115 \times \frac{40}{53,8} + 5 \right]$$

$$457 \leq 1450 \text{ koşul sağlanmıştır.} \rightarrow I_a = 457 \text{ mm}^4$$

Böylece hesaplanan S sayısının doğru olduğu ispatlanmıştır. Ardından Denklem (5.19) ile edilen S sayısı yerine yazıldığında $f_{\text{tırnak}}$ gerilmesine ulaşılabilir,

$$S = 1,28\sqrt{E/f} = 1,28\sqrt{203 \times 10^3 / F_{\text{tırnak}}} = 53,812 \rightarrow F_{\text{tırnak}} = 114,86 \cong 115 \text{ MPa}$$

Elde edilen $f_{\text{tırnak}}$ gerilmesi tırnağın tamamen etkin çalıştığı en büyük gerilmedir. Bu gerilme değeri altında başlıklardaki ve gövdedeki etkin genişlikler hesaplanacaktır.

Başlıkların etkin genişlikleri hesaplanırken öncelikle k katsayısı hesaplanmalıdır. k katsayısını hesaplayabilmek için R_I ve n sayıları belirlenmelidir. $R_I=1$ olduğu için yalnızca n sayısı hesaplanacaktır.

$$n = \left(0,582 - \frac{w/t}{4S} \right) \geq \frac{1}{3} \quad n = \left(0,582 - \frac{40}{4 \times 53,8} \right) = 0,396 \geq \frac{1}{3} \rightarrow n = 0,396$$

Ardından tüm tırnak boyunun düz başlık genişliğine oranı 0,25'ten küçük olduğu için Denklem (5.15) kullanılarak k katsayısı hesaplanabilir,

$$\frac{D}{w} = \frac{19}{80} = 0,238 < 0,25 \rightarrow k = 3,57 \times 1^{0,396} + 0,43 = 4,00 \leq 4 \rightarrow k = 4,00$$

Başlıkların elastik burkulma gerilmesi F_{crl} ile narinlik katsayısı Denklem (5.14) ve Denklem (5.13) ile hesaplanabilir,

$$F_{\text{crl}} = 4,00 \times \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{12(1 - 0,3^2)(40)^2} = 459 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{\text{başlık}} = \sqrt{\frac{f}{F_{\text{crl(başlık)}}}} = \sqrt{\frac{115}{459}} = 0,500 < 0,673$$

Elde edilen $\lambda_{\text{başlık}}$ 0,673'ten küçük olduğu için başlıkların tamamı etkindir.

Gövdenin etkin genişliği;

$$\lambda_{\text{gövde}} = \sqrt{\frac{f}{F_{\text{crl(gövde)}}}} = \sqrt{\frac{115}{34,9}} = 1,81 > 0,673$$

$$\rho_{\text{gövde}} = \frac{1 - 0,22/1,81}{1,81} = 0,484 \quad b_{e(\text{gövde})} = w_{\text{gövde}} \times \rho_{\text{gövde}} = 290 \times 0,484 = 140 \text{ mm}$$

Etkin genişlikler hesaplandıktan sonra etkin alan hesaplanabilir,

$$A_e = 1006 - 2,0 \times [(290 - 140)] = 706 \text{ mm}^2$$

Tırnakların tamamen etkin olduğu en büyük tasarım eksenel basınç kuvveti Denklem (6.4) ile hesaplanabilir,

$$(\phi P_n)_{f=F_{\text{tımak}}} = 0,85 f_{\text{tımak}} A_e = 0,85 \times 115 \times 706 \times 10^{-3} = 69,0 \text{ kN}$$

C300×90×19×2,0 profiline ait hesaplanan 69,0 kN değeri Tablo 6.1'in son sütunundan okunabilir.

6.2. Profillerin Genel Burkulmanın Mevcut Olduğu Durumlardaki Tasarım Eksenel Basınç Kuvveti Dayanımlarının Hesaplanması

Tez kapsamında ele alınan profillerin genel burkulmanın mevcut olduğu durumlardaki tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları Bölüm 5'te verilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen dayanım değerleri, ÜF1'e ait profiller için Tablo 6.4'te, ÜF2'ye ait profiller için Tablo 6.5'te ve ÜF3'e ait profiller için Tablo 6.6'da verilmiştir. Tablolarda yer alan dayanım değerleri, profillerin x eksenindeki (güçlü eksen) eğilmeli burkulma boylarının ($K_x L_x$) 6 farklı burkulma boyu değerine göre elde edilmiştir. Profillerin $K_x L_x$ burkulma boylarına ait alınan değerlere tabloların ikinci sütununda yer verilmiştir. Bununla birlikte, profillerin dayanım hesapları, y eksenindeki (zayıf eksen) eğilmeli burkulma boylarının ($K_y L_y$) 5 farklı desteklenme durumuna göre hesaplanmıştır. İlk durumda, zayıf eksenle tümüyle desteklendiği ($K_y L_y=0$) durum için dayanım hesabı yapılmış ve dayanım değerleri tablonun üçüncü sütununda verilmiştir. Ardından, profillerin dayanımları zayıf eksenindeki eğilmeli burkulma boylarının, güçlü eksenindeki eğilmeli burkulma boylarının 1/4'üne, 1/3'üne ve 1/2'sine eşitlenerek ($K_x L_x=1/4 K_y L_y$, $K_x L_x=1/3 K_y L_y$ ve $K_x L_x=1/2 K_y L_y$) hesaplanmıştır. Son durumda, zayıf eksenindeki eğilmeli burkulma boyunun, güçlü eksenindeki eğilmeli burkulma boyuyla eşit olduğu ($K_x L_x=K_y L_y$) durum için profillerin dayanımları elde edilmiş ve bu dayanım değerleri tabloların son sütunlarında sunulmuştur.

Tablo 6.4. ÜF1'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF1 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y=0$	$K_y L_y=K_x L_x/4$	$K_y L_y=K_x L_x/3$	$K_y L_y=K_x L_x/2$	$K_y L_y=K_x L_x$
C100×42×15×1,5	0,5	52,8	52,7	52,6	52,3	50,3
	1,0	51,7	51,4	51,0	49,8	43,0
	1,5	50,0	49,3	48,5	45,9	33,8
	2,0	47,7	46,5	45,2	41,1	25,1
	3,0	41,6	39,3	37,0	30,5	12,7
	4,0	34,4	31,1	28,1	20,4	
C100×43×16×2,0	0,5	77,1	77,0	76,8	76,4	73,6
	1,0	75,5	75,0	74,5	72,7	63,5
	1,5	72,9	71,8	70,8	67,2	50,3
	2,0	69,4	67,6	65,9	60,4	37,8
	3,0	60,3	57,0	53,5	44,2	17,5
	4,0	48,6	43,5	39,4	29,7	
C100×44×17×2,5	0,5	101	101	100	99,7	95,8
	1,0	98,3	97,6	96,9	94,4	81,9
	1,5	94,4	92,9	91,4	86,5	66,0
	2,0	89,2	86,7	84,3	77,1	48,6
	3,0	75,8	71,3	67,4	57,3	22,5
	4,0	60,3	54,4	50,0	40,1	
C100×45×17×3,0	0,5	120	120	119	119	114
	1,0	117	116	115	112	98,4
	1,5	112	110	109	103	80,2
	2,0	106	103	100	92,4	58,3
	3,0	89,9	84,7	80,5	70,1	27,0
	4,0	71,3	64,7	60,1	50,6	
C150×65×17×1,5	1,0	62,2	62,0	61,9	61,3	58,8
	1,5	61,5	61,2	60,9	59,9	54,1
	2,0	60,7	60,3	59,8	58,2	46,4
	3,0	58,7	57,8	56,9	52,5	29,1
	4,0	56,1	53,9	51,8	43,1	18,7
	5,0	51,8	48,1	44,2	33,3	
C150×65×19×2,0	1,0	101	100	100	98,9	92,2
	1,5	99,3	98,6	97,8	95,3	81,6
	2,0	114	96,0	94,8	90,4	69,5
	3,0	91,6	89,1	86,5	78,2	45,7
	4,0	84,3	80,3	76,3	64,3	29,5
	5,0	75,8	70,3	65,1	50,5	
C150×65×20×2,5	1,0	134	134	134	132	123
	1,5	132	131	131	127	110
	2,0	130	128	126	121	94,1
	3,0	122	119	115	105	63,7
	4,0	112	107	102	86,8	40,4
	5,0	101	93,5	86,9	68,8	
C150×65×22×3,0	1,0	171	170	170	168	157
	1,5	168	167	166	162	141
	2,0	165	163	161	154	121
	3,0	155	151	147	134	83,0
	4,0	142	135	129	110	48,7
	5,0	127	117	108	86,1	

Tablo 6.4. (Devam) ÜF1'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF1 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y=0$	$K_y L_y=K_x L_x/4$	$K_y L_y=K_x L_x/3$	$K_y L_y=K_x L_x/2$	$K_y L_y=K_x L_x$
C200×85×22×1,5	1,5	75,0	74,8	74,6	73,7	68,8
	2,0	74,4	74,0	73,6	72,1	67,0
	3,0	72,7	71,9	70,9	67,4	49,4
	4,0	70,4	68,9	66,9	61,0	33,7
	6,0	63,2	59,9	56,4	45,6	17,8
	8,0	54,4	49,2	43,8	29,4	
C200×85×24×2,0	1,5	113	113	113	112	107
	2,0	113	112	112	110	98,2
	3,0	111	110	109	105	74,5
	4,0	108	106	104	94,2	51,8
	6,0	97,5	91,6	85,5	67,9	28,1
	8,0	81,0	72,5	64,5	44,6	
C200×85×25×2,5	1,5	163	162	161	159	145
	2,0	161	160	158	154	132
	3,0	156	153	150	142	101
	4,0	148	144	140	126	72,5
	6,0	130	122	114	92,1	39,2
	8,0	108	96,8	86,7	61,4	
C200×85×27×3,0	1,5	207	206	205	202	186
	2,0	205	203	202	197	169
	3,0	198	195	192	181	132
	4,0	189	184	179	162	97,2
	6,0	165	155	146	119	50,0
	8,0	137	123	111	79,7	
C250×65×19×2,0	2,0	103	103	102	97,2	76,6
	3,0	101	100	97,1	88,0	51,8
	4,0	97,8	95,3	91,3	76,6	32,8
	6,0	89,3	84,4	76,6	51,8	
	8,0	78,6	71,3	60,0	32,8	
	10	66,8	57,7	44,0		
C250×65×20×2,5	2,0	140	139	138	132	104
	3,0	137	135	132	119	70,2
	4,0	133	129	124	104	44,2
	6,0	121	115	104	70,2	
	8,0	107	97,4	81,4	44,2	
	10	90,7	79,2	59,5		
C250×65×22×3,0	2,0	181	180	178	171	135
	3,0	177	175	171	155	91,2
	4,0	172	168	161	135	57,0
	6,0	157	149	135	91,2	
	8,0	138	127	106	57,0	
	10	117	103	77,2		
C250×65×25×4,0	2,0	271	270	267	255	201
	3,0	265	262	255	231	134
	4,0	257	251	240	201	75,7
	6,0	234	223	201	134	
	8,0	205	190	157	75,7	
	10	173	155	109		

Tablo 6.4. (Devam) ÜF1'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF1 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C300×90×19×2,0	2,0	107	106	106	104	95,3
	4,0	104	102	100	94,8	63,4
	6,0	99,0	96,7	93,3	81,1	33,1
	8,0	93,6	89,9	83,7	62,8	
	10	87,3	80,3	71,1	44,5	
	12	77,9	69,6	56,7	33,1	
C300×90×20×2,5	2,0	157	157	156	153	137
	4,0	152	150	147	136	85,6
	6,0	144	140	133	115	44,7
	8,0	134	127	118	85,6	
	10	122	113	98,0	60,2	
	12	108	94,8	78,2	44,7	
C300×90×22×3,0	2,0	209	208	207	204	184
	4,0	203	200	197	183	111
	6,0	193	188	178	149	57,8
	8,0	178	168	154	111	
	10	160	146	128	78,1	
	12	139	123	103	57,8	
C300×90×25×4,0	2,0	319	318	316	309	273
	4,0	308	303	297	273	165
	6,0	289	280	267	222	79,7
	8,0	265	251	232	165	
	10	237	218	195	115	
	12	207	184	159	79,7	
C400×90×19×2,0	3,0	107	106	105	100	80,0
	5,0	105	103	98,6	88,9	41,8
	7,0	101	97,8	91,1	70,8	
	9,0	97,4	92,1	80,0	49,4	
	12	90,5	80,0	59,7		
	15	80,6	65,3	41,8		
C400×90×20×2,5	3,0	159	157	154	146	112
	5,0	155	151	143	125	57,1
	7,0	149	142	129	96,5	
	9,0	141	131	112	67,4	
	12	128	112	81,2		
	15	113	88,8	57,1		
C400×90×22×3,0	3,0	211	210	206	198	146
	5,0	206	202	194	166	75,0
	7,0	200	192	172	126	
	9,0	190	175	146	88,5	
	12	170	146	106		
	15	147	116	75,0		
C400×90×25×4,0	3,0	326	323	317	299	221
	5,0	317	309	292	250	113
	7,0	303	289	259	191	
	9,0	286	264	221	134	
	12	255	221	161		
	15	221	176	113		

Tablo 6.5. ÜF2'ye ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF2 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y=0$	$K_y L_y=K_x L_x/4$	$K_y L_y=K_x L_x/3$	$K_y L_y=K_x L_x/2$	$K_y L_y=K_x L_x$
C100×53×25×1,0	0,5	35,6	35,5	35,5	35,4	34,7
	1,0	35,0	34,8	34,7	34,3	31,7
	1,5	34,0	33,7	33,4	32,5	27,4
	2,0	32,7	32,2	31,7	30,1	22,2
	3,0	29,2	28,1	27,2	24,3	12,0
	4,0	24,9	23,3	21,8	17,4	7,30
C100×53×25×1,2	0,5	47,3	47,2	47,2	47,0	46,1
	1,0	46,5	46,3	46,1	45,5	42,0
	1,5	45,1	44,7	44,3	43,0	36,0
	2,0	43,3	42,6	41,9	39,8	28,1
	3,0	38,6	37,1	35,7	31,2	15,2
	4,0	32,1	29,5	27,4	21,7	9,10
C100×54×25×1,5	0,5	65,8	65,7	65,6	65,3	63,8
	1,0	64,4	64,0	63,7	62,7	57,0
	1,5	62,2	61,4	60,8	58,7	47,7
	2,0	59,2	57,9	56,8	53,4	37,4
	3,0	51,4	49,0	47,0	41,1	19,9
	4,0	42,2	38,8	36,0	28,3	12,2
C100×55×25×2,0	0,5	93,2	93,1	93,0	92,6	90,4
	1,0	91,2	90,7	90,3	88,9	80,8
	1,5	88,0	86,9	86,0	83,0	66,8
	2,0	83,7	81,9	80,3	75,4	52,0
	3,0	72,0	68,3	65,2	56,5	28,7
	4,0	57,7	52,5	48,5	38,4	18,6
C100×57×25×2,5	0,5	120	120	119	119	116
	1,0	117	116	116	114	102
	1,5	112	111	109	105	84,9
	2,0	106	104	102	94,9	67,3
	3,0	90,5	85,8	82,0	71,6	39,6
	4,0	72,4	66,0	61,2	49,4	26,5
C100×58×25×3,0	0,5	143	143	143	142	138
	1,0	140	139	138	136	123
	1,5	134	133	131	126	103
	2,0	127	124	121	114	83,1
	3,0	108	103	98,1	86,3	52,3
	4,0	86,4	78,8	73,3	60,6	33,1
C150×59×25×1,5	1,0	70,4	70,2	69,9	69,2	64,8
	1,5	69,3	68,8	68,4	66,7	57,7
	2,0	67,8	67,0	66,2	63,5	49,3
	3,0	63,7	62,1	60,5	55,1	32,3
	4,0	58,4	55,9	53,3	45,4	20,7
	5,0	52,2	48,8	45,4	35,6	

Tablo 6.5. (Devam) ÜF2'ye ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF2 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C150×60×25×2,0	1,0	102	101	101	99,8	93,6
	1,5	99,9	99,3	98,7	96,3	83,7
	2,0	97,8	96,7	95,6	91,7	72,0
	3,0	91,9	89,7	87,4	79,8	48,7
	4,0	84,3	80,7	77,1	66,2	29,6
	5,0	75,4	70,5	65,8	52,5	
C150×62×25×2,5	1,0	136	136	135	134	126
	1,5	134	133	132	129	113
	2,0	131	130	128	123	97,7
	3,0	123	120	117	107	67,3
	4,0	113	108	103	89,4	38,8
	5,0	101	94,3	88,3	71,0	
C150×63×25×3,0	1,0	172	171	171	169	158
	1,5	169	168	167	163	142
	2,0	165	163	161	155	123
	3,0	155	151	147	135	81,8
	4,0	142	136	130	111	47,1
	5,0	126	117	108	87,3	
C200×79×30×1,5	1,5	78,7	78,5	78,2	77,3	72,0
	2,0	77,9	77,5	77,1	75,5	66,6
	3,0	75,8	74,9	74,0	70,6	52,9
	4,0	73,0	71,5	69,8	64,3	36,7
	6,0	65,3	62,3	59,0	47,9	19,2
	8,0	55,5	50,4	45,1	31,2	
C200×80×30×2,0	1,5	123	123	122	120	110
	2,0	122	121	120	117	100
	3,0	117	116	114	108	77,2
	4,0	112	109	106	95,9	54,8
	6,0	97,6	92,1	86,5	69,9	29,5
	8,0	80,6	72,8	65,4	46,3	
C200×82×30×2,5	1,5	165	164	163	161	148
	2,0	163	162	160	156	135
	3,0	157	155	152	144	105
	4,0	150	146	142	129	76,4
	6,0	131	123	116	94,9	40,3
	8,0	108	97,7	88,2	63,7	
C200×83×30×3,0	1,5	208	207	207	204	187
	2,0	206	204	203	198	171
	3,0	199	196	193	183	135
	4,0	189	185	180	164	99,9
	6,0	165	156	147	121	48,7
	8,0	136	123	112	81,0	

Tablo 6.5. (Devam) ÜF2'ye ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF2 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C250×60×25×2,0	2,0	104	104	102	97,3	75,0
	3,0	102	100	97,3	87,3	48,8
	4,0	98,5	96,2	91,0	75,0	30,6
	6,0	89,7	85,1	75,0	48,8	
	8,0	78,7	71,9	57,4	30,6	
	10	66,6	58,1	41,1		
C250×62×25×2,5	2,0	142	141	140	133	104
	3,0	139	137	133	120	69,2
	4,0	134	131	125	104	43,3
	6,0	122	117	104	69,2	
	8,0	108	98,8	80,8	43,3	
	10	91,2	80,3	58,5		
C250×63×25×3,0	2,0	182	181	179	171	135
	3,0	178	176	171	155	89,8
	4,0	173	169	161	135	55,5
	6,0	157	150	135	89,8	
	8,0	138	127	105	55,5	
	10	117	104	75,7		
C250×67×25×4,0	2,0	275	273	271	260	208
	3,0	268	265	260	237	142
	4,0	260	254	245	208	81,6
	6,0	237	226	208	142	
	8,0	208	193	164	81,6	
	10	176	158	117		
C250×65×30×5,0	2,0	374	372	368	352	278
	3,0	365	361	352	319	174
	4,0	353	346	331	278	98,7
	6,0	320	307	278	174	
	8,0	279	258	207	98,7	
	10	228	204	142		
C300×80×30×2,0	2,0	125	125	124	121	104
	4,0	121	119	116	104	58,6
	6,0	113	109	103	82,0	
	8,0	103	97,2	88,5	58,6	
	10	92,0	83,8	72,7	40,7	
	12	80,0	70,1	57,5		
C300×82×30×2,5	2,0	169	169	168	163	142
	4,0	163	160	157	142	81,9
	6,0	153	148	140	113	
	8,0	140	132	121	81,9	
	10	125	114	100	57,0	
	12	109	95,8	80,0		

Tablo 6.5. (Devam) ÜF2'ye ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF2 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C300×83×30×3,0	2,0	216	215	214	209	182
	4,0	208	205	200	182	106
	6,0	195	189	180	145	
	8,0	179	169	155	106	
	10	160	146	129	73,6	
	12	139	123	104		
C300×87×30×4,0	2,0	322	321	319	313	275
	4,0	310	306	300	275	165
	6,0	292	283	270	223	79,6
	8,0	267	253	235	165	
	10	239	220	198	115	
	12	208	186	161	79,6	
C300×90×30×5,0	2,0	439	437	435	427	377
	4,0	423	417	408	377	228
	6,0	397	385	369	307	104
	8,0	363	345	322	228	
	10	324	300	273	150	
	12	281	253	224	104	
C400×80×30×2,0	3,0	126	124	121	113	79,1
	5,0	122	118	110	91,5	38,3
	7,0	117	109	95,5	66,7	
	9,0	110	97,5	79,1	45,3	
	12	97,2	79,1	54,8		
	15	83,4	60,7	38,3		
C400×82×30×2,5	3,0	170	168	165	154	110
	5,0	165	160	150	126	54,4
	7,0	158	148	131	93,4	
	9,0	149	134	110	64,2	
	12	132	110	77,5		
	15	114	85,4	54,4		
C400×83×30×3,0	3,0	218	216	211	198	142
	5,0	212	205	193	163	71,0
	7,0	203	191	169	121	
	9,0	191	173	142	83,9	
	12	170	142	101		
	15	147	111	71,0		
C400×87×30×4,0	3,0	329	326	320	302	222
	5,0	320	312	295	252	113
	7,0	306	291	261	192	
	9,0	289	266	222	134	
	12	258	222	162		
	15	223	177	113		

Tablo 6.5. (Devam) ÜF2'ye ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF2 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C400×90×30×5,0	3,0	453	450	441	418	311
	5,0	440	430	408	351	160
	7,0	422	403	364	270	
	9,0	398	370	311	190	
	12	355	311	229		
	15	307	249	160		
C500×107×30×2,5	4,0	182	181	179	171	120
	6,0	180	177	171	149	67,4
	9,0	175	167	149	105	
	12	165	149	120	67,4	
	15	152	127	90,4		
	18	135	105	67,4		
C500×108×30×3,0	4,0	243	240	236	224	154
	6,0	238	233	224	192	87,8
	9,0	229	217	192	136	
	12	214	192	154	87,8	
	15	194	164	117		
	18	173	136	87,8		
C500×112×30×4,0	4,0	372	368	360	338	239
	6,0	364	355	338	292	139
	9,0	345	327	292	212	
	12	321	292	239	139	
	15	292	252	185		
	18	260	212	139		
C500×115×30×5,0	4,0	511	506	495	465	334
	6,0	499	489	465	405	196
	9,0	474	452	405	297	
	12	441	405	334	196	
	15	402	352	261		
	18	359	297	196		

Tablo 6.6. ÜF3'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C100×50×15×1,2	0,5	42,0	42,0	42,0	41,9	41,1
	1,0	41,6	41,5	41,3	40,7	36,1
	1,5	40,8	40,3	39,9	38,3	28,6
	2,0	39,5	38,6	37,5	34,4	21,0
	3,0	34,6	32,7	30,8	25,5	11,0
	4,0	28,7	26,0	23,5	17,1	
C100×50×15×1,5	0,5	57,6	57,5	57,4	57,0	55,1
	1,0	56,4	56,0	55,7	54,4	47,6
	1,5	54,6	53,8	53,0	50,4	37,9
	2,0	52,1	50,7	49,4	45,3	28,3
	3,0	45,6	43,0	40,6	33,8	14,8
	4,0	37,9	34,1	30,9	22,6	
C100×50×15×2,0	0,5	81,9	81,7	81,6	81,1	78,3
	1,0	80,2	79,7	79,1	77,4	67,8
	1,5	77,6	76,4	75,2	71,6	53,9
	2,0	74,0	72,0	70,1	64,3	40,2
	3,0	64,5	60,8	57,1	47,1	22,7
	4,0	52,4	46,7	42,1	31,3	
C100×50×15×2,5	0,5	105	105	105	104	100
	1,0	103	102	101	98,7	85,5
	1,5	99,0	97,3	95,6	90,5	68,3
	2,0	93,7	90,9	88,3	80,5	53,2
	3,0	80,2	75,0	70,7	59,5	29,5
	4,0	64,4	57,6	52,5	41,2	
C100×60×15×1,0	0,5	33,0	32,9	32,9	32,8	32,0
	1,0	32,5	32,4	32,2	31,7	28,9
	1,5	31,8	31,4	31,1	30,0	24,4
	2,0	30,8	30,2	29,6	27,8	18,9
	3,0	28,0	26,8	25,7	22,3	9,8
	4,0	24,5	22,6	21,0	15,2	6,0
C100×60×15×1,2	0,5	44,8	44,7	44,7	44,5	43,3
	1,0	44,1	43,8	43,6	42,8	38,6
	1,5	42,9	42,4	41,9	40,3	31,9
	2,0	41,4	40,5	39,6	36,9	23,8
	3,0	37,2	35,3	33,7	28,6	12,3
	4,0	32,0	29,0	26,2	19,1	7,50
C100×60×17×1,5	0,5	64,4	64,3	64,2	63,9	62,2
	1,0	63,3	62,9	62,6	61,4	54,5
	1,5	61,4	60,5	59,7	57,0	44,0
	2,0	58,7	57,1	55,8	51,5	33,2
	3,0	51,5	48,6	46,0	38,7	17,0
	4,0	42,9	38,7	35,2	26,1	10,7

Tablo 6.6. (Devam) ÜF3'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C100×60×18×2,0	0,5	92,2	92,1	91,9	91,4	88,7
	1,0	90,4	89,8	89,2	87,5	77,9
	1,5	87,4	86,1	85,0	81,3	63,1
	2,0	83,4	81,3	79,3	73,4	47,3
	3,0	73,0	68,8	65,0	54,4	25,5
	4,0	59,8	53,3	48,3	36,1	16,8
C100×65×15×2,5	0,5	120	120	120	119	115
	1,0	118	117	116	113	98,8
	1,5	113	111	110	104	78,7
	2,0	108	104	101	92,6	59,9
	3,0	93,0	86,7	81,5	68,0	34,3
	4,0	75,7	67,0	60,5	45,9	23,8
C100×65×17×3,0	0,5	145	145	145	144	139
	1,0	142	141	140	137	121
	1,5	137	134	132	126	98,0
	2,0	130	126	123	113	77,1
	3,0	112	105	98,7	84,1	47,4
	4,0	90,7	80,8	73,8	58,4	33,8
C100×65×18×3,5	0,5	169	169	169	168	162
	1,0	165	164	163	159	141
	1,5	159	156	154	147	117
	2,0	151	146	143	132	94,5
	3,0	130	121	115	99,7	62,5
	4,0	105	93,9	86,4	70,8	44,7
C100×65×19×4,0	0,5	193	193	192	191	185
	1,0	189	187	186	182	162
	1,5	181	178	176	168	136
	2,0	172	167	163	151	113
	3,0	147	138	132	116	79,7
	4,0	119	107	99,2	83,8	50,7
C120×55×15×1,0	1,0	32,7	32,6	32,5	32,0	29,6
	1,5	32,2	31,9	31,6	30,7	25,7
	2,0	31,4	31,0	30,5	28,9	20,6
	3,0	29,3	28,4	27,4	24,5	11,2
	4,0	26,6	25,1	23,7	18,2	7,14
	5,0	23,6	20,9	18,5	12,7	
C120×55×16×1,2	1,0	44,7	44,6	44,4	43,7	40,0
	1,5	43,9	43,5	43,1	41,7	34,0
	2,0	42,7	42,0	41,3	39,0	26,6
	3,0	39,5	38,1	36,6	31,6	14,8
	4,0	35,2	32,7	30,2	23,4	9,49
	5,0	29,8	26,6	23,6	16,5	

Tablo 6.6. (Devam) ÜF3'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C120×57×15×1,5	1,0	61,9	61,6	61,3	60,2	54,3
	1,5	60,5	59,8	59,2	56,9	45,4
	2,0	58,6	57,5	56,3	52,6	35,8
	3,0	53,5	51,2	49,0	42,3	20,4
	4,0	47,0	43,6	40,4	31,5	12,8
	5,0	39,9	35,5	31,6	22,3	
C120×57×16×2,0	1,0	89,4	88,9	88,5	87,0	78,7
	1,5	87,3	86,4	85,4	82,2	66,4
	2,0	84,5	82,9	81,3	76,1	53,4
	3,0	77,1	73,9	70,8	61,6	30,6
	4,0	67,7	62,8	58,4	46,5	20,2
	5,0	57,2	51,0	45,6	32,1	
C120×60×15×2,5	1,0	120	119	118	116	105
	1,5	117	116	114	110	88,6
	2,0	113	111	109	102	70,5
	3,0	103	98,5	94,3	81,1	42,7
	4,0	89,7	82,3	75,9	60,1	27,7
	5,0	74,0	65,0	58,0	42,5	
C120×60×16×3,0	1,0	148	147	146	143	129
	1,5	144	142	140	135	108
	2,0	139	136	133	124	88,2
	3,0	124	119	113	98,6	58,1
	4,0	107	98,5	91,5	74,6	33,0
	5,0	88,1	77,8	70,3	54,4	
C140×70×16×1,5	1,0	61,3	61,1	60,9	60,3	56,9
	1,5	60,5	60,1	59,7	58,4	52,1
	2,0	59,5	58,8	58,1	55,9	45,5
	3,0	56,6	55,2	54,1	50,4	28,6
	4,0	53,2	51,4	49,5	42,2	18,2
	6,0	43,8	39,3	34,6	23,8	
C140×70×18×2,0	1,0	98,8	98,6	98,3	97,3	91,8
	1,5	97,5	96,9	96,2	94,1	82,5
	2,0	95,7	94,6	93,5	90,1	69,5
	3,0	90,9	88,7	86,7	78,1	44,3
	4,0	84,4	79,8	75,5	62,9	27,8
	6,0	64,6	57,1	50,7	35,5	
C140×70×19×2,5	1,0	137	137	136	134	125
	1,5	135	134	133	129	110
	2,0	132	130	128	122	93,5
	3,0	123	119	115	104	60,3
	4,0	112	106	100	84,4	38,8
	6,0	85,0	74,6	65,9	46,6	

Tablo 6.6. (Devam) ÜF3'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C140×75×16×3,0	1,0	170	169	169	167	158
	1,5	167	166	165	162	139
	2,0	164	163	161	154	116
	3,0	156	150	146	130	75,9,
	4,0	141	132	124	103	51,0
	6,0	104	90,2	79,9	58,1	
C140×75×19×4,0	1,0	239	238	237	233	216
	1,5	234	232	230	223	190
	2,0	228	224	220	209	163
	3,0	210	203	196	177	117
	4,0	188	177	167	143	81,9
	6,0	138	121	110	86,7	
C150×80×18×1,5	1,0	65,6	65,4	65,3	64,8	61,8
	1,5	64,9	64,6	64,2	63,1	56,8
	2,0	64,0	63,4	62,8	60,8	50,5
	3,0	61,4	60,1	58,8	54,8	35,7
	4,0	57,9	55,7	53,7	47,7	22,5
	6,0	48,8	45,6	41,8	29,6	
C150×80×20×2,0	1,0	104	104	104	103	100
	1,5	103	103	103	101	91,0
	2,0	102	101	101	97,7	80,8
	3,0	98,4	96,2	94,1	87,6	54,2
	4,0	92,2	88,7	85,5	73,9	34,3
	6,0	75,8	67,9	61,2	44,2	
C150×80×21×2,5	1,0	147	147	146	145	139
	1,5	145	145	144	142	125
	2,0	143	142	141	136	108
	3,0	137	133	130	119	74,0
	4,0	126	120	115	98,6	46,6
	6,0	99,9	89,6	81,1	58,2	
C150×80×23×3,0	1,0	190	190	189	187	176
	1,5	187	186	185	181	159
	2,0	184	181	179	172	138
	3,0	173	168	164	151	94,4
	4,0	159	152	145	125	62,0
	6,0	124	110	99,3	73,4	
C150×80×24×3,5	1,0	230	229	229	226	213
	1,5	227	225	223	218	190
	2,0	222	219	216	207	164
	3,0	208	201	196	179	115
	4,0	189	179	170	147	79,3
	6,0	144	128	116	89,0	

Tablo 6.6. (Devam) ÜF3'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C160×80×16×2,5	1,0	139	138	138	137	129
	2,0	135	133	132	127	104
	3,0	129	126	123	113	73,5
	4,0	121	116	111	98,5	47,2
	5,0	111	105	99,3	79,8	33,9
	7,0	89,8	78,5	69,0	46,9	
C160×80×18×3,0	1,0	182	181	181	179	171
	2,0	177	176	174	169	136
	3,0	171	167	163	150	95,1
	4,0	160	153	146	126	63,1
	5,0	145	136	127	101	46,5
	7,0	112	97,0	84,9	60,0	
C160×80×20×3,5	1,0	228	227	226	224	211
	2,0	221	218	216	207	166
	3,0	209	204	199	182	118
	4,0	194	185	177	152	81,9
	5,0	175	162	151	122	59,0
	7,0	131	114	101	74,4	
C160×80×21×4,0	1,0	266	265	265	262	245
	2,0	257	254	250	240	192
	3,0	242	235	229	209	141
	4,0	222	211	202	175	103
	5,0	199	185	173	143	67,1
	7,0	149	130	117	89,4	
C180×70×15×2,0	1,5	96,5	96,0	95,4	93,4	82,7
	2,0	95,2	94,4	93,4	89,9	73,6
	3,0	91,6	89,9	87,9	81,1	51,9
	4,0	86,9	84,2	80,9	71,2	34,5
	6,0	75,5	70,7	64,8	47,2	
	8,0	61,4	53,4	45,5	30,6	
C180×70×16×2,5	1,5	133	133	132	130	116
	2,0	132	131	130	126	102
	3,0	128	126	123	114	72,6
	4,0	122	118	113	97,6	47,6
	6,0	104	95,9	87,6	65,7	
	8,0	82,2	71,8	62,1	42,1	
C180×70×18×3,0	1,5	176	175	174	170	150
	2,0	173	172	170	163	132
	3,0	166	163	159	146	97,3
	4,0	157	151	145	127	58,1
	6,0	133	123	113	86,8	
	8,0	105	91,7	79,1	55,0	

Tablo 6.6. (Devam) ÜF3'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C180×70×20×3,5	1,5	217	216	214	210	186
	2,0	214	212	209	202	165
	3,0	205	201	196	181	116
	4,0	193	186	179	157	68,9
	6,0	162	151	138	107	
	8,0	125	108	94,9	68,9	
C180×70×21×4,0	1,5	258	256	255	249	222
	2,0	254	251	249	240	195
	3,0	243	238	233	215	132
	4,0	228	220	211	184	78,3
	6,0	188	173	159	127	
	8,0	141	124	110	78,3	
C200×80×16×2,0	1,5	99,0	98,8	98,4	97,2	90,4
	2,0	98,3	97,8	97,2	95,0	82,6
	3,0	96,1	95,0	93,7	89,2	63,4
	4,0	93,2	91,3	89,1	80,1	43,1
	6,0	84,8	79,8	74,3	58,9	
	8,0	71,9	65,2	57,7	38,5	
C200×80×17×2,5	1,5	142	142	141	139	126
	2,0	141	140	139	135	115
	3,0	137	135	132	124	87,5
	4,0	131	128	124	112	61,0
	6,0	117	111	104	80,8	
	8,0	99,4	88,7	78,2	53,7	
C200×80×19×3,0	1,5	190	189	189	186	169
	2,0	188	187	186	181	152
	3,0	183	180	177	165	115
	4,0	175	170	164	146	83,1
	6,0	153	144	134	106	
	8,0	127	114	101	70,5	
C200×80×21×3,5	1,5	236	235	234	230	208
	2,0	234	232	230	223	188
	3,0	226	222	218	204	146
	4,0	215	209	203	181	101
	6,0	188	177	165	133	
	8,0	155	139	124	87,8	
C200×80×22×4,0	1,5	282	280	279	274	249
	2,0	278	276	274	266	225
	3,0	269	264	259	243	175
	4,0	256	249	241	217	115
	6,0	223	209	196	157	
	8,0	181	161	144	106	

Tablo 6.6. (Devam) ÜF3'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C220×80×16×1,5	1,5	63,5	63,3	63,1	62,3	57,8
	2,0	63,1	62,8	62,4	60,9	53,4
	3,0	61,8	61,1	60,2	57,2	43,4
	5,0	57,9	56,1	53,9	46,9	21,7
	7,0	52,4	49,3	46,0	34,9	
	9,0	46,1	42,4	36,9	23,4	
C220×80×18×2,0	1,5	103	103	103	102	95,4
	2,0	103	102	102	100	87,2
	3,0	101	100	99	94,3	68,6
	5,0	95,2	91,9	87,9	76,1	34,2
	7,0	84,8	79,6	73,9	53,3	
	9,0	73,6	65,0	55,9	36,3	
C220×80×19×2,5	1,5	147	146	146	144	133
	2,0	146	145	144	140	123
	3,0	142	141	139	132	94,0
	5,0	133	129	124	104	46,9
	7,0	118	110	100	73,9	
	9,0	98,9	87,7	76,2	51,0	
C220×80×21×3,0	1,5	197	196	195	192	175
	2,0	195	193	192	186	159
	3,0	189	187	183	172	124
	5,0	173	167	159	136	58,6
	7,0	151	141	129	98,1	
	9,0	127	113	99,0	68,3	
C220×80×23×3,5	1,5	243	242	241	237	217
	2,0	240	239	237	231	198
	3,0	234	231	227	213	156
	5,0	214	206	197	170	69,3
	7,0	187	174	160	125	
	9,0	156	139	123	85,5	
C220×80×24×4,0	1,5	290	289	288	283	259
	2,0	287	285	283	275	237
	3,0	279	275	271	255	186
	5,0	255	245	235	204	78,8
	7,0	222	207	192	150	
	9,0	184	164	145	97,3	
C250×75×15×1,5	2,0	61,8	61,5	61,1	59,7	51,9
	3,0	60,8	60,2	59,3	56,1	41,6
	4,0	59,4	58,4	56,8	51,6	28,3
	6,0	55,5	53,4	50,3	41,2	
	8,0	50,6	47,7	43,1	28,3	
	10	45,6	40,6	33,8	19,6	

Tablo 6.6. (Devam) ÜF3'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C250×75×16×2,0	2,0	100	100	99,4	97,3	83,0
	3,0	98,9	98,0	96,7	91,0	63,4
	4,0	96,9	95,3	92,2	82,6	41,9
	6,0	89,7	85,7	80,0	63,4	
	8,0	80,4	74,6	66,6	41,9	
	10	70,7	62,0	50,9	29,1	
C250×75×17×2,5	2,0	141	141	139	136	117
	3,0	139	137	135	128	86,0
	4,0	135	133	129	117	56,8
	6,0	126	121	112	86,0	
	8,0	113	103	91,2	56,8	
	10	96,1	84,4	70,5	39,3	
C250×75×19×3,0	2,0	190	188	187	181	151
	3,0	185	183	180	168	112
	4,0	180	176	170	151	74,0
	6,0	164	157	146	112	
	8,0	145	134	119	74,0	
	10	124	110	93,4	49,8	
C250×75×21×3,5	2,0	236	234	232	226	189
	3,0	230	228	223	210	140
	4,0	223	219	212	189	92,1
	6,0	204	195	183	140	
	8,0	180	167	150	92,1	
	10	154	137	118	59,1	
C250×75×22×4,0	2,0	283	281	279	271	226
	3,0	277	273	268	252	167
	4,0	268	262	255	226	105
	6,0	245	234	220	167	
	8,0	216	200	182	105	
	10	184	164	144	67,2	
C280×100×20×2,5	2,0	155	155	154	152	141
	3,0	153	152	151	147	121
	5,0	148	145	142	130	72,5
	7,0	140	136	128	106	
	9,0	129	120	109	78,6	
	11	114	103	89,8	57,9	
C280×100×21×3,0	2,0	211	211	210	206	186
	3,0	208	206	204	196	161
	5,0	198	194	188	170	96,2
	7,0	184	177	168	138	
	9,0	168	158	144	103	
	11	150	133	116	76,6	

Tablo 6.6. (Devam) ÜF3'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C280×100×23×3,5	2,0	268	267	266	262	241
	3,0	264	262	260	252	202
	5,0	253	249	243	217	122
	7,0	237	226	213	173	
	9,0	212	196	179	132	
	11	185	165	145	98,6	
C280×100×24×4,0	2,0	331	329	328	321	289
	3,0	325	322	318	305	244
	5,0	308	300	291	261	145
	7,0	283	270	255	210	
	9,0	253	235	215	161	
	11	221	198	175	121	
C300×89×18×1,5	2,0	67,6	67,4	67,1	66,0	60,1
	3,0	66,9	66,4	65,7	63,3	51,1
	5,0	64,5	63,3	61,5	55,4	29,4
	7,0	61,1	58,9	55,6	45,3	
	9,0	56,9	53,5	48,5	34,5	
	11	51,9	47,3	41,6	25,1	
C300×90×18×2,0	2,0	105	105	104	102	93,5
	3,0	104	103	102	98	80,6
	5,0	100	97,9	95,4	87,2	43,8
	7,0	94,8	91,8	87,3	70,7	
	9,0	88,9	84,4	76,0	52,0	
	11	81,8	73,6	63,4	37,5	
C300×90×19×2,5	2,0	154	154	153	151	135
	3,0	153	152	151	144	113
	5,0	147	144	139	123	59,4
	7,0	138	132	123	99,2	
	9,0	126	118	107	70,6	
	11	114	103	86,9	50,9	
C300×90×21×3,0	2,0	206	205	204	200	182
	3,0	203	202	199	192	148
	5,0	195	192	186	165	77,5
	7,0	185	177	165	129	
	9,0	168	156	140	92,1	
	11	149	133	114	66,3	
C300×90×23×3,5	2,0	265	264	262	256	227
	3,0	261	258	255	243	184
	5,0	248	242	234	206	96,8
	7,0	230	220	206	161	
	9,0	209	194	175	115	
	11	185	166	144	82,5	

Tablo 6.6. (Devam) ÜF3'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C300×90×24×4,0	2,0	318	316	315	308	272
	3,0	313	310	306	292	221
	5,0	298	291	281	248	115
	7,0	277	265	248	193	
	9,0	251	233	212	138	
	11	222	200	175	95,8	
C320×80×18×2,0	2,0	105	105	104	102	89,5
	4,0	103	102	99,1	89,5	47,8
	6,0	99,1	96,4	89,5	70,5	
	8,0	93,2	87,6	77,6	47,8	
	10	85,5	78,2	62,6	33,5	
	12	77,5	66,9	47,8		
C320×80×19×2,5	2,0	150	150	149	145	127
	4,0	146	144	140	127	65,3
	6,0	140	135	127	95,9	
	8,0	132	124	106	65,3	
	10	120	108	85,3	45,8	
	12	106	91,6	65,3		
C320×80×21×3,0	2,0	203	202	200	194	164
	4,0	196	193	186	164	85,8
	6,0	185	178	164	125	
	8,0	171	161	139	85,8	
	10	155	141	112	59,9	
	12	138	120	85,8		
C320×80×23×3,5	2,0	252	251	249	242	206
	4,0	244	240	232	206	108
	6,0	231	223	206	157	
	8,0	214	201	174	108	
	10	194	176	140	75,0	
	12	171	151	108		
C320×80×24×4,0	2,0	304	303	300	291	248
	4,0	294	289	280	248	130
	6,0	278	269	248	189	
	8,0	258	242	210	130	
	10	233	213	169	87,9	
	12	207	183	130		
C350×66×17×2,0	2,5	101	99,4	97,3	91,8	60,5
	4,0	99,0	96,3	90,1	73,8	30,4
	6,0	95,4	86,3	73,8	47,5	
	8,0	90,2	73,8	56,1	30,4	
	10	82,5	60,5	40,3		
	13	69,7	41,9			

Tablo 6.6. (Devam) ÜF3'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C350×70×15×2,5	2,5	138	136	133	125	86,8
	4,0	135	130	124	104	44,5
	6,0	130	120	104	69,5	
	8,0	123	104	81,0	44,5	
	10	114	86,8	59,0		
	13	96,5	61,4			
C350×70×16×3,0	2,5	185	182	178	165	113
	4,0	181	173	162	136	57,9
	6,0	172	156	136	90,6	
	8,0	161	136	105	57,9	
	10	148	113	76,9		
	13	125	80,0			
C350×70×18×3,5	2,5	232	229	223	208	144
	4,0	227	218	205	172	73,6
	6,0	216	197	172	115	
	8,0	202	172	134	73,6	
	10	186	144	98,1		
	13	158	102			
C350×70×20×4,0	2,5	284	279	273	255	177
	4,0	277	266	250	211	90,1
	6,0	264	241	211	142	
	8,0	247	211	165	90,1	
	10,0	227	177	121		
	13,0	193	126	78,6		
C380×100×19×2,0	2,5	109	108	107	105	92,4
	4,0	107	106	104	98,2	71,6
	6,0	104	102	98,2	85,9	39,9
	8,0	100	96,1	90,2	71,6	
	11	91,7	85,8	77,4	45,9	
	14	82,8	75,0	60,0		
C380×100×20×2,5	2,5	157	157	156	153	136
	4,0	155	154	152	144	101
	6,0	151	149	144	124	54,5
	8,0	146	141	132	101	
	11	135	124	108	62,6	
	14	118	105	81,5		
C380×100×22×3,0	2,5	217	216	214	209	181
	4,0	213	211	207	194	131
	6,0	206	201	194	168	71,3
	8,0	197	189	177	131	
	11	179	168	143	82,0	
	14	158	138	107		

Tablo 6.6. (Devam) ÜF3'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C380×100×23×3,5	2,5	274	273	271	265	229
	4,0	270	268	263	248	162
	6,0	262	257	248	208	88,4
	8,0	252	241	222	162	
	11	226	208	178	102	
	14	195	172	132		
C380×100×25×4,0	2,5	342	340	337	327	278
	4,0	335	331	325	301	198
	6,0	322	314	301	252	108
	8,0	305	292	270	198	
	11	273	252	216	124	
	14	236	209	162		
C400×90×18×2,0	3,0	105	105	103	98,5	78,5
	4,0	104	103	100	93,3	58,7
	6,0	102	98,5	93,3	78,5	
	9,0	95,8	90,3	78,5	48,6	
	12	88,9	78,5	58,7		
	15	79,5	64,3	41,0		
C400×90×19×2,5	3,0	156	155	153	145	111
	4,0	155	153	148	134	80,1
	6,0	150	145	134	111	
	9,0	139	129	111	66,5	
	12	126	111	80,1		
	15	112	87,7	56,4		
C400×90×21×3,0	3,0	208	207	203	194	145
	4,0	206	203	198	182	105
	6,0	200	194	182	145	
	9,0	188	173	145	87,7	
	12	169	145	105		
	15	146	115	74,3		
C400×90×23×3,5	3,0	269	266	361	247	182
	4,0	265	261	252	228	133
	6,0	256	247	228	182	
	9,0	236	217	182	111	
	12	211	182	133		
	15	182	145	93,9		
C400×90×24×4,0	3,0	324	321	315	298	220
	4,0	320	315	304	275	161
	6,0	309	298	275	220	
	9,0	285	262	220	134	
	12	255	220	161		
	15	220	176	113		

Tablo 6.6. (Devam) ÜF3'e ait C Profillerin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları

ÜF3 Profilleri	$K_x L_x$ (m)	$\phi_c P_n$ (kN)				
		$K_y L_y = 0$	$K_y L_y = K_x L_x / 4$	$K_y L_y = K_x L_x / 3$	$K_y L_y = K_x L_x / 2$	$K_y L_y = K_x L_x$
C400×100×21×2,0	3,0	112	112	111	107	89,1
	4,0	111	110	108	102	74,2
	6,0	108	106	102	89,1	40,7
	9,0	102	97,3	89,1	64,7	
	12	93,5	87,0	74,2	40,7	
	15	85,0	74,9	54,7		
C400×100×22×2,5	3,0	162	161	160	155	128
	4,0	160	159	157	149	102
	6,0	157	154	149	128	55,6
	9,0	149	142	128	87,9	
	12	135	124	102	55,6	
	15	120	104	74,4		
C400×100×24×3,0	3,0	221	220	217	210	170
	4,0	219	216	212	200	133
	6,0	212	208	200	170	72,8
	9,0	199	191	170	115	
	12	181	164	133	72,8	
	15	157	135	97,4		
C400×100×26×3,5	3,0	287	285	281	269	213
	4,0	283	280	274	253	167
	6,0	273	266	253	213	91,6
	9,0	252	239	213	144	
	12	226	205	167	91,6	
	15	196	170	123		
C400×100×27×4,0	3,0	345	343	338	324	256
	4,0	341	337	329	305	201
	6,0	329	321	305	256	110
	9,0	303	288	256	174	
	12	272	248	201	110	
	15	236	206	148		

Tablolarda, profillerin dayanım değerleri incelendiğinde zayıf ekseninde desteklenmemiş boy ($K_y L_y$) arttıkça dayanımın azaldığı görülebilir. Ayrıca, profillerin güçlü eksenindeki burkulma boyları ($K_x L_x$) daha yüksek olduğunda, y eksenindeki desteklenmemiş boyun dayanıma etkisi daha fazladır. Profillerin x eksenindeki burkulma boyları büyüdükçe profillerin y eksenindeki narinlikleri ($K_y L_y / i_y$) artış göstermektedir. Bu çalışmada profillerin narinlikleri için sınır değer 200 alınmış ve 200'ü aştığı durumlarda dayanımları hesaplanmamıştır.

Profillerin dayanım hesaplarını daha detaylı göstermek amacıyla ÜF1 firmasına ait C300×90×19×2,0 profilinin $K_x L_x = 6,0$ m ve i) $K_y L_y = 0$, ii) $K_y L_y = K_x L_x / 2$ ve iii) $K_y L_y = K_x L_x$ olduğu durumlardaki tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı hesaplanmış ve hesap adımları aşağıda gösterilmiştir.

$$A' = 300 \text{ mm}, B' = 90 \text{ mm}, t = 2 \text{ mm}, D = 19 \text{ mm}, R = 3 \text{ mm}$$

Bölüm 4.3'te hesaplanan C 300×90×19×2,0 profilinin düz genişlikleri;

$$w_{\text{başlık}} = 80 \text{ mm}, w_{\text{gövde}} = 290, w_{\text{turnak}} = 14 \text{ mm}$$

Profilin dayanım hesabı için gerekli diğer enkesit özellikleri ise Tablo 4.4'ten alınmıştır.

$$A = 1006 \text{ mm}^2, i_x = 115 \text{ mm}, i_y = 31,0 \text{ mm}, x_o = 56,6 \text{ mm}, \\ J = 1,34 \times 10^3 \text{ mm}^4, C_w = 16,9 \times 10^9 \text{ mm}^6$$

Dayanım hesaplamalarında kullanılmak üzere gerekli diğer parametreler Denklem (5.8) ve Denklem (5.9) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$r_o = \sqrt{i_x^2 + i_y^2 + x_o^2} = \sqrt{115^2 + 31,0^2 + 56,6^2} = 132 \text{ mm}$$

$$\beta = 1 - (x_o / r_o)^2 = 1 - (56,6 / 132)^2 = 0,816$$

i) Profilin zayıf (y) ekseninde tamamen desteklendiği durum ($K_y L_y = 0$);

İlk aşamada, zayıf (y) ekseninde burkulmanın gerçekleşmeyeceği, $K_y L_y = 0$ olduğu kabul edilerek profilin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı hesaplanacaktır. Ancak $K_y L_y = 0$ 'a eşit olduğunda y ekseninde elastik burkulma gerilmesi hesaplanırken paydanın sıfır olmaması için sıfıra çok yakın bir değer (0,1 m) ele alınmıştır. Zayıf ekseninde eğilmeli burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi Denklem (5.5) kullanılarak hesaplanabilir;

$$(F_{\text{cre}})_1 = \sigma_{\text{ey}} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{(0,1 / 31,0)^2} = 192 \times 10^9 \text{ MPa}$$

x ekseninde etrafında elastik eğilmeli burkulma gerilmesi ve z ekseninde etrafında burulmalı burkulma gerilmesi Denklem (5.7)'deki bağıntılar kullanılarak elde edilebilir;

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{(6000/115)^2} = 737 \text{ MPa}$$

$$\sigma_t = \frac{1}{1006 \times 132^2} \left[\frac{78 \times 10^3 \times 1,34 \times 10^3}{(0,1)^2} + \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3 \times 16,9 \times 10^9}{(0,1)^2} \right] = 194 \times 10^9 \text{ MPa}$$

x ekseninde etrafında eğilmeli ve z ekseninde etrafında burulmalı burkulma sınır durumunda, elastik burkulma gerilmesi (F_{cre}) Denklem (5.6) ile hesaplanabilir;

$$(F_{cre})_2 = \frac{1}{2 \times 0,816} \left[(737 + 194 \times 10^9) - \sqrt{(737 + 194 \times 10^9)^2 - 4 \times 0,816 \times 737 \times 194 \times 10^9} \right] = 737 \text{ MPa}$$

Elde edilen elastik burkulma gerilmeleri karşılaştırıldığında $(F_{cre})_2 < (F_{cre})_1$ olup elastik burkulma gerilmesi küçük olan değere, $F_{cre}=737 \text{ MPa}$ 'a eşittir. Kritik burkulma gerilmesi F_n hesabı için narinlik katsayısı λ_c belirlenerek Denklem (5.3)'teki bağıntılardan uygun olan kullanılarak kritik burkulma gerilmesi hesaplanabilir;

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} = \sqrt{\frac{235}{737}} = 0,565 < 1,5$$

$$F_n = \left[0,658^{\lambda_c^2} \right] F_y = \left[0,658^{0,565^2} \right] \times 235 = 206 \text{ MPa}$$

Kritik burkulma gerilmesi hesabının ardından etkin genişlikler hesaplanmalıdır. Öncelikle başlıkların etkin genişlikleri hesaplanacaktır.

$$w_{\text{başlık}}/t = 80/2 = 40$$

$$S = 1,28 \sqrt{\frac{203 \times 10^3}{206}} = 40,2 \rightarrow 0,328S = 0,328 \times 40,2 = 13,2$$

I_a ve I_s değerleri Denklem (5.18) kullanılarak hesaplanabilir;

$$I_a = 399 \times 2^4 \times \left[\frac{80/2}{40,2} - 0,328 \right]^3 \leq 2^4 \times \left[115 \frac{80/2}{40,2} + 5 \right]$$

$$I_a = 1,89 \times 10^3 \text{ mm}^4 \leq 1,91 \times 10^3 \text{ mm}^4 \quad \therefore I_a = 1,89 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

$$I_s (14^3 \times 2) / 12 = 457 \text{ mm}^4$$

Ardından Denklem (5.17)'deki bağıntılar kullanılarak R_I ve n değerleri hesaplanabilir;

$$R_I = I_s / I_a \leq 1 \rightarrow R_I = 457 / 1,89 \times 10^3 = 0,242 \leq 1 \quad \therefore R_I = 0,242$$

$$n = \left(0,582 - \frac{w_{\text{başlık}}/t}{4S} \right) = \left(0,582 - \frac{40}{4 \times 40,2} \right) = 0,333 \geq \frac{1}{3} \quad \therefore n = 0,333$$

Tırnak genişliğinin başlık düz genişliğine oranına göre Denklem (5.14) ile Denklem (5.15)'ten uygun olan bağıntı belirlenerek k değeri hesaplanabilir;

$$D = 19 \text{ mm}, \quad D/w_{\text{başlık}} = 19/80 = 0,237 \leq 0,25$$

$$k = 3,57(R_I)^n + 0,43 = 3,57 \times (0,242)^{0,333} + 0,43 = 2,65 \leq 4 \quad \therefore k = 2,65$$

Başlıkların kritik burkulma gerilmesi Denklem (5.14) ile elde edilebilir;

$$F_{\text{crl,başlık}} = 2,65 \times \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{12 \times (1 - 0,3^2)} \times \left(\frac{2}{80} \right)^2 = 304 \text{ MPa}$$

Başlıkların narinlik katsayısı elde edilen F_n ve $F_{\text{crl,başlık}}$ değerleri kullanılarak Denklem (5.13) ile hesaplanabilir;

$$\lambda_{\text{başlık}} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{\text{crl,başlık}}}} = \sqrt{\frac{206}{304}} = 0,822 > 0,673$$

Hesaplanan λ değeri 0,673 değerinden büyük olduğu için yerel azaltma katsayısı ρ Denklem (5.12) ile hesaplanmalıdır;

$$\rho_{\text{başlık}} = \frac{1 - 0,22/\lambda}{\lambda} = \frac{1 - 0,22/0,822}{0,822} = 0,891$$

Ardından, etkin başlık genişlikleri b_1 ve b_2 Denklem (5.20) ile elde edilebilir;

$$b_{e,\text{başlık}} = w_{\text{başlık}} \times \rho_{\text{başlık}} = 80 \times 0,891 = 71,3 \text{ mm}$$

$$b_1 = (b_{e,\text{başlık}}/2)(R_1) = (71,3/2) \times 0,242 = 8,62 \text{ mm}$$

$$b_2 = b_{e,\text{başlık}} - b_1 = 71,3 - 8,62 = 62,7 \text{ mm}$$

Başlıkların etkin genişlik hesabının ardından tırnakların etkin genişlikleri kontrol edilecektir. Etkin tırnak genişliği hesaplanırken $k=0,43$ alınmıştır. Tırnakların kritik burkulma gerilmesi Denklem (5.14) ile hesaplanabilir,

$$F_{\text{crl,tırnak}} = 0,43 \times \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{12 \times (1 - 0,3^2)} \times \left(\frac{2}{14}\right)^2 = 1,61 \times 10^3 \text{ MPa}$$

Tırnakların narinlik katsayısı,

$$\lambda_{\text{tırnak}} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{\text{crl,tırnak}}}} = \sqrt{\frac{206}{1,61 \times 10^3}} = 0,357 < 0,673$$

olarak hesaplanmış ve 0,673 değerinden küçük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla yerel azaltma katsayısı ρ , 1'e eşit olup etkin tırnak genişliği hesabına gerek yoktur.

$w_{\text{başlık}}/t$ oranı 0,328S'ten büyük olduğu için azaltılmış etkin tırnak genişliği hesaplanmalıdır. Azaltılmış etkin tırnak genişliği d_s ise Denklem (5.21) ile hesaplanabilir,

$$d_s = d'_s(R_1) = 14 \times 0,242 = 3,39 \text{ mm}$$

Son olarak etkin gövde yüksekliği hesabı yapılacaktır. Etkin gövde yüksekliği hesaplanırken $k=4$ alınmıştır. Gövdenin kritik burkulma gerilmesi;

$$F_{\text{cr1,gövde}} = 4 \times \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{12 \times (1 - 0,3^2)} \times \left(\frac{2}{290} \right)^2 = 34,9 \text{ MPa}$$

olarak hesaplanabilir. Gövdenin narinlik katsayısı,

$$\lambda_{\text{gövde}} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{\text{cr1,gövde}}}} = \sqrt{\frac{206}{34,9}} = 2,43 > 0,673$$

Narinlik katsayısı 0,673'ten büyük olduğu için yerel azaltma katsayısı hesaplanmalıdır. Gövdenin yerel azaltma katsayısı ve ile etkin gövde genişliği,

$$\rho_{\text{gövde}} = \frac{1 - 0,22/2,43}{2,43} = 0,375$$

$$b_{\text{e,gövde}} = \rho_{\text{gövde}} \times w_{\text{gövde}} = 0,375 \times 290 = 109 \text{ mm}$$

olarak hesaplanabilir. Profilin etkin alanı A_e ,

$$A_e = 1006 - 2,0 \times [2 \times (80 - 71,3) + (290 - 109) + 2 \times (14 - 3,39)] = 566 \text{ mm}^2$$

Profilin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı;

$$\phi_c P_n = 0,85 A_e F_n = 0,85 \times 566 \times 206 \times 10^{-3} \cong 99,0 \text{ kN}$$

C300×90×19×2,0 profiline ait elde edilen 99,0 kN değeri Tablo 6.4'teki üçüncü sütundan okunabilir.

$$\text{ii) } K_y L_y = K_x L_x / 2;$$

İkinci aşamada, y eksenindeki burkulma boyunun x eksenindeki burkulma boyunun yarısına eşit olduğu durum için profilin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı hesaplanacaktır.

Zayıf ekseninde (y) elastik eğilmeli burkulma gerilmesi,

$$(F_{cre})_1 = \sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2} = \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{((6000/2)/31,0)^2} = 213 \text{ MPa}$$

x eksenini etrafında elastik eğilmeli burkulma gerilmesi;

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2} = \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{(6000/115)^2} = 737 \text{ MPa}$$

z eksenini etrafında burulmalı burkulma gerilmesi;

$$\sigma_t = \frac{1}{1006 \times 132^2} \left[\frac{78 \times 10^3 \times 1,34 \times 10^3}{1} + \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3 \times 16,9 \times 10^9}{(6000/2)^2} \right] = 221 \text{ MPa}$$

x eksenini etrafında eğilmeli ve z eksenini etrafında burulmalı burkulma sınır durumunda, elastik burkulma gerilmesi (F_{cre});

$$(F_{cre})_2 = \frac{1}{2 \times 0,816} \left[(737 + 221) - \sqrt{(737 + 221)^2 - 4 \times 0,816 \times 737 \times 221} \right] = 206 \text{ MPa}$$

Elde edilen elastik burkulma gerilmeleri karşılaştırıldığında $(F_{cre})_1 > (F_{cre})_2$ olup elastik burkulma gerilmesi küçük olan değere, $F_{cre}=206 \text{ MPa}$ 'ya eşittir.

$$(F_{cre})_1 = 213 \text{ MPa} > (F_{cre})_2 = 206 \text{ MPa} \quad \therefore F_{cre} = (F_{cre})_2$$

Narinlik katsayısı ve kritik burkulma gerilmesi;

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} = \sqrt{\frac{235}{206}} = 1,07 < 1,5$$

$$F_n = \left[0,658^{\lambda_c^2} \right] F_y = \left[0,658^{1,07^2} \right] \times 235 = 146 \text{ MPa}$$

Etkin başlık genişliği hesabı;

$$w_{\text{başlık}}/t = 80/2 = 40$$

$$S = 1,28\sqrt{E/f} = 1,28\sqrt{203 \times 10^3 / 146} = 47,7 \rightarrow 0,328S = 15,6$$

$$(w_{\text{başlık}}/t) = 40 > 0,328S = 15,6$$

$w_{\text{başlık}}/t$ oranı 15,6'dan büyük olduğu için I_a , I_s , R_I , n ve k değerleri hesaplanmalıdır.

I_a ve I_s değerleri Denklem (5.18) ile hesaplanabilir,

$$I_a = 399 \times 2,0^4 \times \left[\frac{80/2}{47,7} - 0,328 \right]^3 \leq 2^4 \times \left[115 \frac{80/2}{47,7} + 5 \right]$$

$$I_a = 847 \text{ mm}^4 \leq 1622 \text{ mm}^4 \quad \therefore I_a = 847 \text{ mm}^4$$

$$I_s (14^3 \times 2,0) / 12 = 457 \text{ mm}^4$$

Ardından R_I ve n değerleri Denklem (5.17) ile hesaplanabilir,

$$R_I = I_s / I_a \leq 1 \rightarrow R_I = 457 / 847 = 0,540 \leq 1 \quad \therefore R_I = 0,540$$

$$n = \left(0,582 - \frac{40}{4 \times 47,7} \right) = 0,373 \geq \frac{1}{3} \quad \therefore n = 0,373$$

k plak burkulma katsayısı Denklem (5.15) ile hesaplanmalıdır.

$$k = 3,57 \times (0,540)^{0,373} + 0,43 = 3,27 \leq 4 \quad \therefore k = 3,27$$

Başlıkların kritik burkulma gerilmesi,

$$F_{\text{crl,başlık}} = 3,27 \times \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{12 \times (1 - 0,3^2)} \times \left(\frac{2}{80} \right)^2 = 375 \text{ MPa}$$

Başlıkların narinlik ve yerel azaltma katsayıları,

$$\lambda_{\text{başlık}} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{\text{crl,başlık}}}} = \sqrt{\frac{146}{375}} = 0,624 < 0,673$$

Başlıkların tamamı etkindir;

$$b_{e,b\ddot{a}şlık} = w_{b\ddot{a}şlık} = 80 \text{ mm}$$

Tırnakların etkin genişlik hesabı;

Tırnakların kritik burkulma gerilmesi ve narinlik katsayısı,

$$F_{crl,tırnak} = 1,61 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{tırnak} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{crl,tırnak}}} = \sqrt{\frac{146}{1,61 \times 10^3}} = 0,301 < 0,673$$

Narinlik katsayısı 0,673'ten küçük olduğu için etkin genişlik hesabına gerek yoktur.

Azaltılmış etkin tırnak genişliği d_s ;

$$d_s = d'_s(R_I) = 14 \times 0,540 = 7,56 \text{ mm}$$

Gövdenin etkin genişlik hesabı;

Gövdenin kritik burkulma gerilmesi Denklem (5.14) ile hesaplanabilir,

$$F_{crl,gövde} = 34,9 \text{ MPa}$$

Gövdenin narinlik katsayısı, yerel azaltma katsayısı ve etkin genişliği,

$$\lambda_{gövde} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{crl,gövde}}} = \sqrt{\frac{146}{34,9}} = 2,05 > 0,673 \text{ olduğundan}$$

$$\rho_{gövde} = \frac{1 - 0,22/\lambda}{\lambda} = \frac{1 - 0,22/2,05}{2,05} = 0,436$$

$$b_{e,gövde} = \rho_{gövde} \times w_{gövde} = 0,436 \times 290 = 126 \text{ mm}$$

Profilin etkin alanı A_e ,

$$A_e = 1006 - 2,0 \times [(290 - 126) + 2 \times (14 - 7,56)] = 654 \text{ mm}^2$$

Profilin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı;

$$\phi_c P_n = 0,85 A_e F_n = 0,85 \times 654 \times 146 \times 10^{-3} \cong 81,1 \text{ kN}$$

C300×90×19×2,0 profiline ait elde edilen 81,1 kN değeri Tablo 6.4'teki altıncı sütundan okunabilir.

$$\text{iii) } K_y L_y = K_x L_x;$$

Üçüncü aşamada, y eksenini ile x eksenini etrafındaki burkulma boylarının eşit olduğu (6,0 m) durum için işlem adımları tekrarlanacaktır. Hesaplanan elastik burkulma gerilmeleri;

x ve y eksenini etrafında elastik eğilmeli burkulma gerilmeleri,

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{(6000/115)^2} = 737 \text{ MPa}$$

$$(F_{cre})_1 = \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{(6000/31,0)^2} = 53,4 \text{ MPa}$$

z eksenini etrafında burulmalı burkulma gerilmesi,

$$\sigma_t = \frac{1}{1006 \times 132^2} \left[\frac{78 \times 10^3 \times 1,34 \times 10^3}{1} + \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3 \times 16,9 \times 10^9}{(6000)^2} \right] = 59,8 \text{ MPa}$$

x eksenini etrafında eğilmeli ve z eksenini etrafında burulmalı burkulma sınır durumunda, elastik burkulma gerilmesi (F_{cre}),

$$(F_{cre})_2 = \frac{1}{2 \times 0,816} \left[(737 + 59,8) - \sqrt{(737 + 59,8)^2 - 4 \times 0,816 \times 737 \times 59,8} \right] = 58,9 \text{ MPa}$$

Elde edilen elastik burkulma gerilmeleri karşılaştırıldığında $(F_{cre})_1 < (F_{cre})_2$ olup elastik burkulma gerilmesi küçük olan değere, $F_{cre}=53,4$ MPa'ya eşittir.

$$(F_{cre})_1 = 53,4 \text{ MPa} < (F_{cre})_2 = 58,9 \text{ MPa} \quad \therefore F_{cre} = (F_{cre})_1$$

Narinlik katsayısı ve kritik burkulma gerilmesi;

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} = \sqrt{\frac{235}{53,4}} = 2,10 > 1,5$$

$$F_n = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) F_y = \left(\frac{0,877}{2,10^2} \right) \times 235 = 46,8 \text{ MPa}$$

Etkin başlık genişliği hesabı;

$$S = 1,28 \sqrt{203 \times 10^3 / 46,8} = 84,3 \rightarrow 0,328S = 0,328 \times 84,3 = 27,7$$

$$I_a = 399 \times 2,0^4 \times \left[\frac{80/2}{84,3} - 0,328 \right]^3 \leq 2,0^4 \times \left[115 \frac{80/2}{84,3} + 5 \right]$$

$$I_a = 20,1 \text{ mm}^4 \leq 953 \text{ mm}^4 \quad \therefore I_a = 20,1 \text{ mm}^4$$

R_I , n ve k sayıları,

$$R_I = I_s / I_a \leq 1 \rightarrow R_I = 457 / 20,1 = 22,8 \leq 1 \quad \therefore R_I = 1,0$$

$$n = \left(0,582 - \frac{w_{\text{başlık}}}{4S} \right) = \left(0,582 - \frac{40}{4 \times 84,3} \right) = 0,463 \geq \frac{1}{3} \quad \therefore n = 0,333$$

$$k = 3,57(R_I)^n + 0,43 = 3,57 \times (1,0)^{0,333} + 0,43 = 4 \leq 4 \quad \therefore k = 4$$

Başlıkların elastik burkulma gerilmesi,

$$F_{\text{crl,başlık}} = 4 \times \frac{\pi^2 \times 203 \times 10^3}{12 \times (1 - 0,3^2)} \times \left(\frac{2}{80}\right)^2 = 459 \text{ MPa}$$

Başlıkların narinlik katsayısı,

$$\lambda_{\text{başlık}} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{\text{crl,başlık}}}} = \sqrt{\frac{46,8}{459}} = 0,319 > 0,673$$

Başlıkların tamamı etkindir,

$$b_{\text{e,başlık}} = w_{\text{başlık}} = 80 \text{ mm}$$

Tırnakların etkin genişlik hesabı;

Tırnakların elastik burkulma gerilmesi ve narinlik katsayısı,

$$F_{\text{crl,tırnak}} = 1,61 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{\text{tırnak}} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{\text{crl,tırnak}}}} = \sqrt{\frac{46,8}{1,61 \times 10^3}} = 0,170 < 0,673$$

Narinlik katsayısı 0,673'ten küçük olduğu için etkin genişlik hesabına gerek yoktur.

Azaltılmış etkin tırnak genişliği d_s ;

$$d_s = d'_s(R_I) = 14 \times 1,0 = 3,98 \text{ mm}$$

Gövdenin etkin genişlik hesabı;

Gövdenin narinlik katsayısı, yerel azaltma katsayısı ve etkin genişliği,

$$\lambda_{\text{gövde}} = \sqrt{\frac{F_n}{F_{\text{crl,gövde}}}} = \sqrt{\frac{46,8}{34,9}} = 1,16 > 0,673$$

$$\rho_{\text{gövde}} = \frac{1 - 0,22/\lambda}{\lambda} = \frac{1 - 0,22/1,16}{1,16} = 0,700$$

$$b_{\text{e,gövde}} = \rho_{\text{gövde}} \times w_{\text{gövde}} = 0,700 \times 290 = 203 \text{ mm}$$

Profilin etkin alanı A_e ,

$$A_e = 1006 - 2,0 \times [(290 - 203)] = 832 \text{ mm}^2$$

Profilin tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı;

$$\phi_c P_n = 0,85 A_e F_n = 0,85 \times 585 \times 46,8 \times 10^{-3} \cong 33,1 \text{ kN}$$

C300×90×19×2,0 profiline ait elde edilen 33,1 kN değeri Tablo 6.4'ün son sütunundan okunabilir.

6.3. Profillerin Çarpılgalı Burkulma Gerilmesindeki Tasarım Eksenel Basınç Kuvveti Dayanımlarının Hesaplanması

Çalışmada ele alınan profillerin çarpılgalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının hesaplanmasına ilişkin denklemler AISI S100-16 (AISI, 2016) yönetmeliğinde Bölüm E.4'te tanımlanmış, bu tez çalışmasında ise Bölüm 5'te özetlenmiştir. Bu denklemler kullanılarak incelenen C profillerin çarpılma burkulmaya ait rijitlik değeri ($k_{\phi fe}$, $k_{\phi we}$, $\tilde{k}_{\phi fg}$, $\tilde{k}_{\phi wg}$), kritik desteklenmemiş çarpılgalı burkulma boyu (L_{crd}), çarpılgalı burkulma gerilme değeri (F_d) ve tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları ($\phi_c P_n$) hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, Denklem (5.27)'de yer alan çapraz, panel, kaplama gibi elemanların başlık/gövde birleşimine sağladığı dönme rijitliği $k_{\phi}=0$ alınmıştır. Elde edilen değerler, Kılavuz (AISI Manual, 2014)'da yer alan çarpılgalı burkulma sınır durumuna ait hazırlanan tablolara benzer şekilde Tablo 6.7, Tablo 6.8 ve Tablo 6.9'da sunulmuştur. Tablolarda profillerin çarpılgalı burkulma gerilmesindeki tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımları ($\phi_c P_n$) son sütunda yer verilmiştir. Tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı hesaplanırken $\phi_c=0,85$ alınmıştır. Ayrıca, hazırlanan tablolarda profillerin rijitlik değeri ($k_{\phi fe}$, $k_{\phi we}$, $\tilde{k}_{\phi fg}$, $\tilde{k}_{\phi wg}$), kritik desteklenmemiş çarpılgalı burkulma boyu (L_{crd}) ve çarpılgalı burkulma gerilme değerlerine (F_d) yer verilmiştir.

Mühendislerin bu tablolardan faydalanabilmesi için, seçilen profilde genel burkulmanın mevcut olup olmadığı bilinmelidir. Eğer seçilen profilde genel burkulma engellendiyse, profilin tasarım dayanımı Tablo 6.1, Tablo 6.2 ve Tablo 6.3'ten, genel burkulma

mevcutsa Tablo 6.4, Tablo 6.5 ve Tablo 6.6'dan ve profilin çarpımalı burkulma dayanımı Tablo 6.7, Tablo 6.8 ve Tablo 6.9'dan okunabilir. Tablolardan okunan dayanım değerleri karşılaştırılarak, küçük olan dayanım değeri profilin tasarım dayanımı olarak belirlenebilir. Örnek olarak, genel burkulmanın mevcut olduğu, $K_x L_x$ boyu 3,0 m ve $K_x L_x = K_y L_y$ olan ÜF2'ye ait C400×80×30×2,0 profili seçilirse profilin tasarım dayanımı Tablo 6.5'ten 79,1 kN olarak okunabilir. Bu profilin çarpımalı burkulma dayanımı ise Tablo 6.8'den 103 kN olarak okunabilir. Profilin dayanımları karşılaştırıldığında, 79,1 kN değeri daha küçük olup C400×80×30×2,0 profilinin tasarım dayanımı 79,1 kN olarak belirlenebilir.

Tablo 6.7. ÜF1'e ait C profillerin çarpımalı burkulmaya ait hesaplanan değerleri

ÜF1 Profilleri	L_{crd} (mm)	$k_{\phi fe}$ (kN)	$\tilde{k}_{\phi fg}$ (mm ²)	$k_{\phi we}$ (kN)	$\tilde{k}_{\phi wg}$ (mm ²)	F_d (MPa)	$\phi_c P_n$ (kN)
C100×42×15×1,5	382	1,58	5,06	1,25	1,69	420	55,6
C100×43×16×2,0	345	3,94	8,82	2,97	2,76	597	79,9
C100×44×17×2,5	322	8,02	13,5	5,81	3,96	790	101
C100×45×17×3,0	294	14,6	19,8	10,0	5,70	969	121
C150×65×17×1,5	599	1,03	6,48	0,837	2,32	212	65,3
C150×65×19×2,0	554	2,53	10,5	1,98	3,62	319	102
C150×65×20×2,5	508	5,14	15,7	3,87	5,39	426	139
C150×65×22×3,0	490	9,07	21,1	6,69	6,94	562	176
C200×85×22×1,5	902	0,739	6,48	0,627	2,43	153	75,7
C200×85×24×2,0	821	1,81	10,7	1,49	3,90	225	119
C200×85×25×2,5	749	3,66	16,2	2,90	5,87	298	164
C200×85×27×3,0	715	6,48	22,0	5,02	7,72	387	215
C250×65×19×2,0	629	1,61	8,14	1,19	13,0	132	94,4
C250×65×20×2,5	577	3,30	12,2	2,32	19,3	179	134
C250×65×22×3,0	557	5,86	16,4	4,02	24,9	240	182
C250×65×25×4,0	517	14,7	26,6	9,52	38,5	372	282
C300×90×19×2,0	799	1,33	11,6	0,991	13,9	91,1	97,8
C300×90×20×2,5	734	2,73	17,2	1,94	20,6	123	141
C300×90×22×3,0	710	4,82	22,7	3,35	26,4	166	195
C300×90×25×4,0	662	12,0	36,0	7,93	40,6	260	312
C400×90×19×2,0	858	1,04	10,0	0,744	28,6	46,2	82,2
C400×90×20×2,5	788	2,14	14,9	1,45	42,3	62,7	121
C400×90×22×3,0	763	3,79	19,7	2,51	54,3	85,2	169
C400×90×25×4,0	711	9,49	31,2	5,95	83,3	135	282

Tablo 6.8. ÜF2'ye ait C profillerin çarpımalı burkulmaya ait hesaplanan değerleri

ÜF2 Profilleri	L_{crd} (mm)	$k_{\phi fe}$ (kN)	$\tilde{k}_{\phi fg}$ (mm ²)	$k_{\phi we}$ (kN)	$\tilde{k}_{\phi wg}$ (mm ²)	F_d (MPa)	$\phi_c P_n$ (kN)
C100×53×25×1,0	775	0,405	2,24	0,372	0,274	309	40,0
C100×53×25×1,2	704	0,711	3,22	0,642	0,398	374	50,9
C100×54×25×1,5	632	1,42	5,09	1,25	0,618	469	67,7
C100×55×25×2,0	547	3,50	9,15	2,97	1,10	632	95,2
C100×57×25×2,5	494	7,09	14,7	5,81	1,68	789	121
C100×58×25×3,0	451	12,7	21,3	10,0	2,42	957	145
C150×59×25×1,5	738	0,967	4,51	0,837	1,53	299	74,0
C150×60×25×2,0	638	2,40	8,10	1,98	2,73	404	109
C150×62×25×2,5	576	4,88	13,0	3,87	4,18	509	145
C150×63×25×3,0	526	8,79	18,9	6,69	6,03	620	179
C200×79×30×1,5	1069	0,708	4,79	0,627	1,73	205	85,0
C200×80×30×2,0	924	1,74	8,59	1,49	3,08	277	128
C200×82×30×2,5	832	3,53	13,7	2,91	4,76	348	173
C200×83×30×3,0	758	6,33	20,0	5,02	6,86	423	220
C250×60×25×2,0	725	1,51	6,28	1,19	9,78	168	104
C250×62×25×2,5	655	3,10	10,1	2,32	15,0	216	145
C250×63×25×3,0	597	5,64	14,7	4,02	21,6	266	190
C250×67×25×4,0	527	14,6	27,5	9,52	37,1	374	286
C250×65×30×5,0	516	29,1	37,8	18,6	48,3	554	394
C300×80×30×2,0	1023	1,20	7,02	0,991	8,49	141	120
C300×82×30×2,5	921	2,45	11,2	1,94	13,1	180	168
C300×83×30×3,0	839	4,41	16,3	3,35	18,9	220	219
C300×87×30×4,0	736	11,3	30,3	7,93	32,8	305	333
C300×90×30×5,0	662	23,7	48,9	15,5	50,6	394	454
C400×80×30×2,0	1099	0,925	6,08	0,744	17,4	71,0	103
C400×82×30×2,5	989	1,90	9,72	1,45	26,9	91,4	146
C400×83×30×3,0	902	3,43	14,1	2,51	38,8	112	194
C400×87×30×4,0	791	8,86	26,3	5,95	67,3	158	306
C400×90×30×5,0	712	18,7	42,3	11,6	104	208	431
C500×107×30×2,5	1226	1,52	12,0	1,16	34,2	58,0	145
C500×108×30×3,0	1117	2,75	17,4	2,01	49,4	71,2	193
C500×112×30×4,0	975	7,11	32,3	4,76	86,5	99,9	307
C500×115×30×5,0	875	15,1	51,9	9,30	134	131	438

Tablo 6.9. ÜF3'e ait C profillerin çarpımalı burkulmaya ait hesaplanan değerleri

ÜF3 Profilleri	L_{crd} (mm)	$k_{\phi fe}$ (kN)	$\tilde{k}_{\phi fg}$ (mm ²)	$k_{\phi we}$ (kN)	$\tilde{k}_{\phi wg}$ (mm ²)	F_d (MPa)	$\phi_c P_n$ (kN)
C100×50×15×1,2	479	0,765	4,00	0,642	0,861	289	42,7
C100×50×15×1,5	424	1,56	6,23	1,25	1,37	370	57,5
C100×50×15×2,0	362	3,95	11,0	2,97	2,51	512	82,5
C100×50×15×2,5	319	8,22	17,1	5,81	4,03	665	105
C100×60×15×1,0	587	0,426	3,52	0,372	0,477	200	33,6
C100×60×15×1,2	533	0,757	5,07	0,642	0,694	243	43,5
C100×60×17×1,5	516	1,50	7,15	1,26	0,927	341	62,2
C100×60×18×2,0	459	3,71	12,1	2,97	1,56	488	91,8
C100×65×15×2,5	375	7,98	24,3	5,81	2,92	506	116
C100×65×17×3,0	370	14,0	31,3	10,0	3,61	688	146
C100×65×18×3,5	353	22,8	40,3	15,9	4,63	862	171
C100×65×19×4,0	339	34,9	50,1	23,8	5,72	1051	195
C120×55×15×1,0	584	0,361	2,87	0,310	0,833	181	33,6
C120×55×16×1,2	554	0,635	3,92	0,535	1,11	233	45,0
C120×57×15×1,5	480	1,31	6,74	1,05	1,85	274	60,0
C120×57×16×2,0	429	3,26	11,3	2,48	3,09	398	90,1
C120×60×15×2,5	374	6,89	19,9	4,84	5,08	470	119
C120×60×16×3,0	353	12,3	26,9	8,37	6,84	614	150
C140×70×16×1,5	589	1,11	7,82	0,896	1,95	205	63,6
C140×70×18×2,0	548	2,71	12,5	2,13	3,01	311	100
C140×70×19×2,5	503	5,50	18,6	4,15	4,45	418	137
C140×75×16×3,0	421	10,6	34,1	7,17	7,65	425	167
C140×75×19×4,0	404	25,9	51,4	17,0	11,1	686	242
C150×80×18×1,5	704	1,00	8,20	0,837	1,68	186	68,0
C150×80×20×2,0	649	2,46	13,3	1,98	2,63	279	107
C150×80×21×2,5	595	4,97	19,8	3,87	3,92	372	148
C150×80×23×3,0	574	8,77	26,5	6,69	5,06	490	191
C150×80×24×3,5	542	14,3	34,7	10,6	6,61	604	231
C160×80×16×2,5	500	5,11	24,5	3,63	6,74	280	134
C160×80×18×3,0	491	8,96	31,5	6,27	8,38	382	179
C160×80×20×3,5	485	14,4	38,8	9,96	10,0	498	225
C160×80×21×4,0	466	22,1	48,4	14,9	12,4	607	266
C180×70×15×2,0	513	2,29	13,0	1,65	7,28	195	92,7
C180×70×16×2,5	475	4,69	19,0	3,23	10,6	267	132
C180×70×18×3,0	466	8,24	24,6	5,58	13,2	365	177
C180×70×20×3,5	460	13,3	30,6	8,86	15,9	476	223
C180×70×21×4,0	441	20,4	38,2	13,2	19,7	580	264

Tablo 6.9. (Devam) ÜF3'e ait C profillerin çarpımlı burkulmaya ait hesaplanan değerleri

ÜF3 Profilleri	L_{crd} (mm)	$k_{\phi fe}$ (kN)	$\tilde{k}_{\phi fg}$ (mm ²)	$k_{\phi we}$ (kN)	$\tilde{k}_{\phi wg}$ (mm ²)	F_d (MPa)	$\phi_c P_n$ (kN)
C200×80×16×2,0	597	2,02	14,1	1,49	7,39	164	96,9
C200×80×17×2,5	551	4,13	20,7	2,91	10,8	223	139
C200×80×19×3,0	539	7,27	26,8	5,02	13,6	304	187
C200×80×21×3,5	531	11,7	33,4	7,97	16,4	396	239
C200×80×22×4,0	509	18,0	41,7	11,9	20,4	482	287
C220×80×16×1,5	714	0,730	7,56	0,570	5,16	102	62,1
C220×80×18×2,0	664	1,79	12,0	1,35	7,95	158	101
C220×80×19×2,5	611	3,66	17,8	2,64	11,8	213	145
C220×80×21×3,0	592	6,47	23,5	4,56	15,0	287	196
C220×80×23×3,5	579	10,5	29,6	7,25	18,3	370	249
C220×80×24×4,0	554	16,1	37,2	10,8	22,9	447	300
C250×75×15×1,5	678	0,667	6,86	0,502	8,38	76,7	55,8
C250×75×16×2,0	607	1,68	11,5	1,19	13,9	113	90,1
C250×75×17×2,5	561	3,45	16,9	2,32	20,4	155	131
C250×75×19×3,0	548	6,08	21,9	4,02	25,7	212	180
C250×75×21×3,5	539	9,81	27,4	6,38	30,9	278	235
C250×75×22×4,0	517	15,1	34,3	9,52	38,5	338	287
C280×100×20×2,5	767	2,87	20,8	2,08	15,3	137	149
C280×100×21×3,0	719	5,15	28,5	3,59	20,9	177	201
C280×100×23×3,5	704	8,31	35,6	5,69	25,5	229	262
C280×100×24×4,0	674	12,8	44,6	8,50	31,8	278	322
C300×89×18×1,5	891	0,533	6,75	0,418	8,39	62,8	60,4
C300×90×18×2,0	769	1,36	12,2	0,991	15,0	86,2	94,4
C300×90×19×2,5	708	2,78	18,1	1,94	22,2	117	138
C300×90×21×3,0	687	4,91	23,7	3,35	28,2	159	191
C300×90×23×3,5	672	7,94	29,7	5,31	34,4	207	251
C300×90×24×4,0	643	12,2	37,2	7,93	43,0	251	309
C320×80×18×2,0	729	1,30	9,96	0,929	20,3	73,6	87,6
C320×80×19×2,5	671	2,67	14,8	1,82	30,0	100	128
C320×80×21×3,0	650	4,72	19,5	3,14	38,2	136	178
C320×80×23×3,5	636	7,64	24,5	4,98	46,6	177	235
C320×80×24×4,0	608	11,8	30,9	7,44	58,3	215	292
C350×66×17×2,0	639	1,25	7,67	0,850	34,5	49,8	71,1
C350×70×15×2,5	536	2,79	14,5	1,66	61,3	58,8	97,8
C350×70×16×3,0	507	5,06	19,5	2,87	82,2	77,9	135
C350×70×18×3,5	505	8,12	23,8	4,55	96,8	105	184
C350×70×20×4,0	504	12,2	28,4	6,80	111,0	136	239

Tablo 6.9. (Devam) ÜF3'e ait C profillerin çarpılmalı burkulmaya ait hesaplanan değerleri

ÜF3 Profilleri	L_{crd} (mm)	$k_{\phi fe}$ (kN)	$\tilde{k}_{\phi fg}$ (mm ²)	$k_{\phi we}$ (kN)	$\tilde{k}_{\phi wg}$ (mm ²)	F_d (MPa)	$\phi_c P_n$ (kN)
C380×100×19×2,0	901	1,08	12,0	0,783	22,2	54,3	89,3
C380×100×20×2,5	828	2,21	17,8	1,53	32,9	73,7	132
C380×100×22×3,0	802	3,91	23,4	2,64	42,1	100	184
C380×100×23×3,5	760	6,44	30,5	4,19	54,7	125	240
C380×100×25×4,0	748	9,75	36,9	6,26	64,5	158	306
C400×90×18×2,0	826	1,06	10,6	0,744	30,8	43,5	79,4
C400×90×19×2,5	760	2,18	15,6	1,45	45,5	59,4	117
C400×90×21×3,0	738	3,86	20,5	2,51	57,9	81,3	166
C400×90×23×3,5	723	6,26	25,7	3,99	70,6	106	222
C400×90×24×4,0	691	9,66	32,2	5,95	88,2	130	278
C400×100×21×2,0	979	0,996	10,6	0,744	22,0	53,4	92,7
C400×100×22×2,5	897	2,04	15,9	1,45	32,7	71,9	135
C400×100×24×3,0	863	3,62	21,1	2,51	42,4	96,6	189
C400×100×26×3,5	839	5,87	26,8	3,99	52,3	125	250
C400×100×27×4,0	800	9,05	33,8	5,95	65,8	151	311

Profillerin çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımlarının hesaplanmasına örnek olarak ÜF1'e ait C300×90×19×2,0 profiline ait hesap adımları aşağıda verilmiştir.

$$A' = h_o = 300 \text{ mm}, B' = 90 \text{ mm}, C' = 19 \text{ mm}, t = 2 \text{ mm}$$

Başlık ve tırnağın enkesit boyutları Denklem (5.34) ile hesaplanabilir;

$$b = B' - t = 90 - 2 = 88 \text{ mm}, d = C' - t/2 = 19 - 2/2 = 18 \text{ mm}$$

Başlığın geometrik merkezinin konumu Denklem (5.33)'te yer alan formüllerle elde edilir;

$$x_{of} = \frac{b^2}{2(b+d)} = \frac{88^2}{2 \times (88+18)} = 36,5 \text{ mm}$$

$$h_{xf} = \frac{-(b^2 + 2bd)}{2(b+d)} = \frac{-(88^2 + 2 \times 88 \times 18)}{2 \times (88+18)} = -51,5 \text{ mm}$$

$$h_{yf} = y_{of} = \frac{-b^2}{2(b+d)} = \frac{-88^2}{2 \times (88+18)} = -1,53 \text{ mm}$$

Başlığın alanı A_f ve burulma sabiti J_f Denklem (5.35)'te verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir;

$$A_f = (b+d)t = (88+18) \times 2 = 212 \text{ mm}^2$$

$$J_f = (1/3)bt^3 + (1/3)dt^3 = (1/3) \times 88 \times 2^3 + (1/3) \times 18 \times 2^3 = 283 \text{ mm}^4$$

Başlığın geometrik merkezinden geçen tırnağa dik (x) ve paralel (y) eksenine göre kartezyen ve çarpım atalet momentleri I_{xf} , I_{yf} ve I_{xyf} Denklem (5.36) kullanılarak hesaplanabilir;

$$I_{xf} = \frac{2(2^2 \times 88^2 + 4 \times 88 \times 18^3 + 2^2 \times 88 \times 18 + 18^4)}{12(88+18)} = 3,45 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

$$I_{yf} = \frac{2(88^4 + 4 \times 18 \times 88^3)}{12(88+18)} = 171 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

$$I_{xyf} = \frac{2 \times 88^2 \times 18^2}{4(88+18)} = 11,8 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

Çarpımalı burkulmayı engellemek amacıyla yerleştirilmesi gereken destekler arası mesafe;

$$L_{crd} = \left\{ \frac{6 \times \pi^4 \times 300 \times (1-0,3^2)}{2^3} \left[\frac{3,45 \times 10^3 \times (36,5 - (-51,5))^2 + 0}{171 \times 10^3} \times (36,5 - (-51,5))^2 \right] \right\}^{1/4} \cong 799 \text{ mm}$$

olarak hesaplanabilir. Sürekli desteklemenin olduğu kabul edilmiştir. ($L_m = L_{crd}$) Formülde yer alan h_o , gövdenin tüm yüksekliğidir. Elastik çarpımalı burkulma gerilmesi F_{crd} hesabı için gerekli rijitlikler;

Başlığın başlık/gövde birleşimine sağladığı elastik dönme rijitliği $k_{\phi fe}$:

$$k_{\phi fe} = \left(\frac{\pi}{799} \right)^4 \left[\begin{array}{l} 203 \times 10^3 \times 3,45 \times 10^3 \times (36,5 - (51,5))^2 \\ + 203 \times 10^3 \times 0 \\ - 203 \times 10^3 \times \frac{(11,8 \times 10^3)^2}{1,71 \times 10^3} (36,5 - (51,5))^2 \end{array} \right] + \left(\frac{\pi}{799} \right)^2 \times 78 \times 10^3 \times 283$$

$$k_{\phi fe} = 1,33 \text{ kN}$$

Gövdenin başlık/gövde birleşimine sağladığı elastik dönme rijitliği $k_{\phi we}$:

$$k_{\phi we} = \frac{Et^3}{6h_o(1-\mu^2)} = \frac{203 \times 10^3 \times 2^3}{6 \times 300(1-0,3^2)} = 991 \text{ N} = 0,991 \text{ kN}$$

Başlığın başlık/gövde birleşiminden talep ettiği geometrik dönme rijitliği $k_{\phi fg}$,

$$\tilde{k}_{\phi fg} = \left(\frac{\pi}{799} \right)^2 \left\{ 212 \left[\begin{array}{l} (36,5 - (-51,5))^2 \left(\frac{1,18 \times 10^3}{171 \times 10^3} \right)^2 \\ - 2(-1,53)(36,5 - (-51,5)) \left(\frac{1,18 \times 10^3}{171 \times 10^3} \right) \\ + (-51,5)^2 + (-1,53)^2 \end{array} \right] \right\} = 11,6 \text{ mm}^2$$

Gövdenin başlık/gövde birleşiminden talep ettiği geometrik dönme rijitliği $k_{\phi wg}$:

$$\tilde{k}_{\phi wg} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \frac{th_o^3}{60} = \left(\frac{\pi}{799} \right)^2 \frac{2 \times 300^3}{60} = 13,9 \text{ mm}^2$$

Elastik çarpılmalı burkulma gerilmesi F_{crd} , Denk. (5.27) ile hesaplanmalıdır;

$$F_{crd} = \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{\tilde{k}_{\phi fg} + \tilde{k}_{\phi wg}} = \frac{1,33 \times 10^3 + 0,991 \times 10^3 + 0}{11,6 + 13,9} = 91,1 \text{ MPa}$$

Elastik çarpımalı burkulma gerilmesi F_{crd} hesaplanırken başlığın desteklenmemiş olduğu kabul edilerek $k_{\phi}=0$ alınmıştır. Akma yükü P_y ile elastik çarpımalı burkulma yükü P_{crd} ,

$$P_y = A_g F_y = 1006 \times 235 \times 10^{-3} = 236 \text{ kN}$$

$$P_{crd} = A_g F_d = 1006 \times 91,1 \times 10^{-3} = 91,7 \text{ kN}$$

olarak hesaplanabilir. Ardından narinlik katsayısı λ_d Denklem (5.24) kullanılarak elde edilebilir;

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crd}}} = \sqrt{\frac{236}{91,7}} = 1,61 > 0,561$$

Narinlik katsayısı λ_d , 0,561'den büyük olduğu için Denklem (5.23)'te uygun olan bağıntı seçilerek çarpımalı burkulma için karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı P_n hesaplanabilir;

$$P_n = \left[1 - 0,25 \times \left(\frac{91,7}{236} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{91,7}{236} \right)^{0,6} \times 236 = 115 \text{ kN}$$

$$\phi_c P_n = 0,85 \times 115 = 97,8 \text{ kN}$$

ÜF1'e ait C300×90×19×2,0 profilinin çarpımalı burkulma gerilmesindeki tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı 97,8 kN olarak bulunmuş olup bu değer Tablo 6.7'nin son sütunundan okunabilir.

7. SOĞUK ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK C PROFİLLERİN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN EKSENEL BASINÇ KUVVETİ DAYANIMINA ETKİSİ

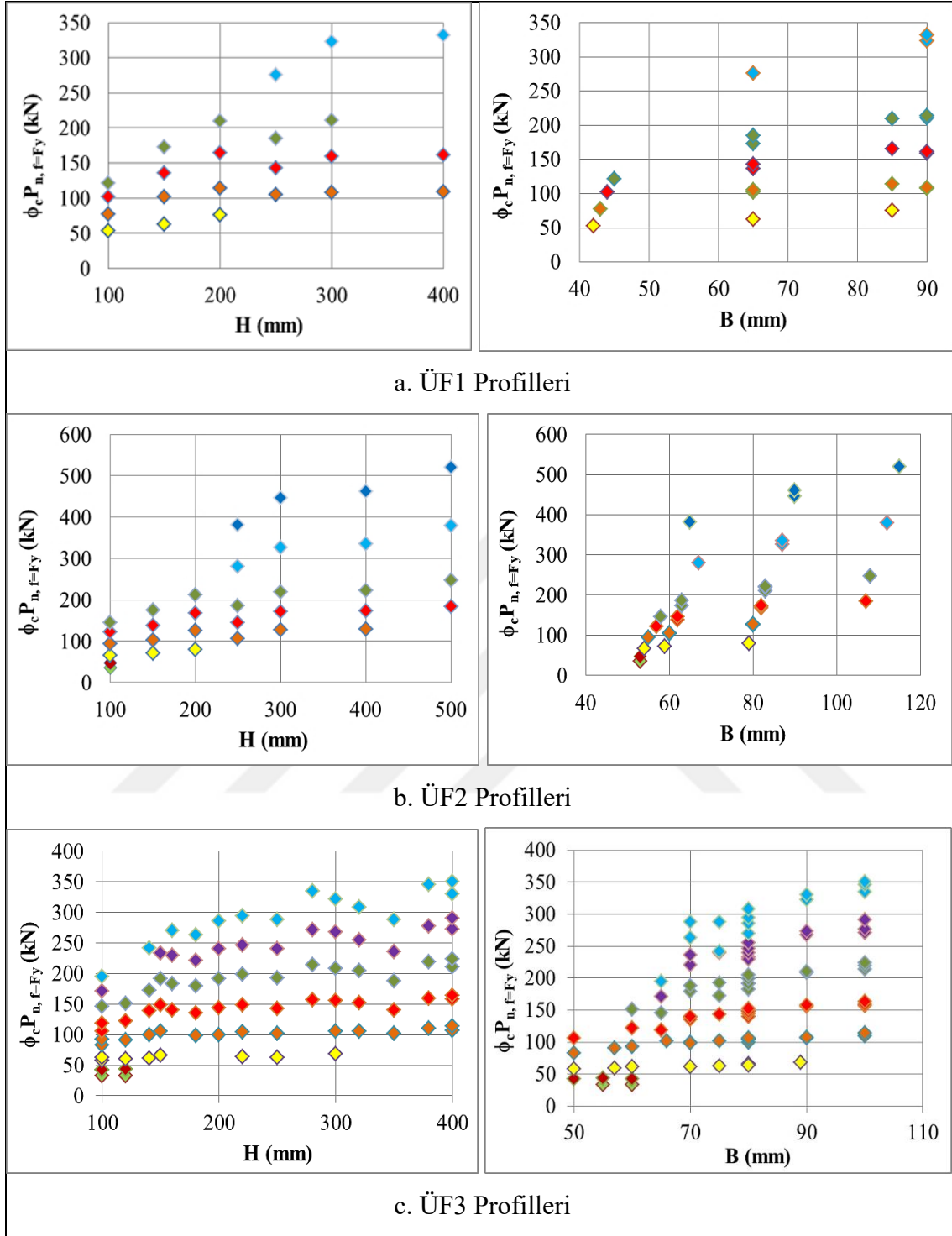
Bu bölümde, tez kapsamında ele alınan C profillerin geometrik özelliklerinin tasarım aksel basınç kuvveti dayanımına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla C profillerin başlık genişliği (B), gövde yüksekliği (H), tırnak (rijitleştirici) boyu (C), içbükmü yarıçapı (R) ve kalınlığı (t) değişken olarak ele alınmıştır. İncelenen profillerin ilk olarak, akma gerilmesindeki ($f=F_y$), ikinci olarak, çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım aksel basınç kuvveti dayanımlarının geometrik özelliklerle değişimleri araştırılmıştır. Yapılan araştırmada, C profillerin geometrik özelliklerinin dayanımlarına etkisinin daha detaylıca incelenebilmesi için incelenen profillerin haricinde farklı başlık, gövde, tırnak genişliklerine ve farklı kalınlıklara sahip profiller varsayımsal olarak oluşturulmuş ve farklı boyutlardaki bu profillerin akma ve çarpılmalı burkulma gerilmesindeki dayanımları karşılaştırılmıştır.

7.1. Geometrik Özelliklerin Akma Gerilmesindeki Dayanıma Etkisinin İncelenmesi

Bölüm 6’da yer alan ve Tablo 6.1, Tablo 6.2 ve Tablo 6.3’te sunulan C profillere ait akma gerilmesindeki ($f=F_y$) tasarım aksel basınç kuvveti mukavemetlerinin gövde yüksekliği ve başlık genişliğine bağlı olarak değişimi Şekil 7.1(a), Şekil 7.1(b) ve Şekil 7.1(c)’deki grafiklerle gösterilmiştir. Grafiklendirme yapılırken, farklı kalınlıklara sahip profiller farklı renkte sunulmuştur. Profillerin kalınlıkları, 1,0 mm ise açık yeşille, 1,2 mm ise bordoyle, 1,5 mm ise sarıyla, 2,0 mm ise turuncuyla, 2,5 mm ise kırmızıyla, 3,0 mm ise koyu yeşille, 3,5 mm ise morla, 4,0 mm ise açık maviyle ve 5,0 mm ise koyu maviyle gösterilmiştir. Grafiklerde görüldüğü üzere, aynı gövde yüksekliğine sahip profillerden kalınlığı daha büyük olan profilin dayanımı da daha yüksektir. Genel olarak kalınlık arttıkça profillerin dayanımlarında artış olduğu görülebilir. Örnek olarak, aynı gövde yüksekliğine sahip ve gövde yükseklikleri 150 mm olan, ÜF2’ye ait C150×59×25×1,5, C150×60×25×2,0, C150×62×25×2,5 ve C150×63×25×3,0 profillerinin başlık genişlikleri sırasıyla 59, 60, 62, 63 mm, kalınlıkları 1,5, 2,0, 2,5 ve 3,0 mm olup tırnak boyları eşit ve 25 mm’dir. Bu profillerin Tablo 6.2’de yer alan akma gerilmesindeki tasarım aksel basınç kuvveti dayanımları sırasıyla 71,2, 103, 138 ve 174 kN’dur. Bu profillerden kalınlığı 1,5 mm olan profil ile kalınlığı 3,0 mm olan

profilin dayanımları karşılaştırıldığında %144 oranında bir dayanım artışı olduğu görülmektedir. Bu profillerin başlık genişlikleri birbirine yakın olup kalınlıkların değişimi dayanımlarında önemli bir rol oynamaktadır. Kalınlığın dayanıma etkisini daha detaylı incelemek için ÜF3'e ait C100×50×15×1,2, C100×50×15×1,5, C100×50×15×2,0 ve C100×50×15×2,5 profillerinin dayanımları karşılaştırılabilir. Profillerin gövde yükseklikleri H=100 mm, başlık genişlikleri B=50 mm, tırnak boyları C=15 mm olup kalınlıkları 1,2 ve 2,5 mm arasındadır. Tablo 6.3'ten tasarım dayanımları sırasıyla 42,2, 57,9, 82,4 ve 106 kN olarak okunabilir. Kalınlığı 2,5 mm olan profilin dayanımı kalınlığı 1,2 mm olan profilin dayanımından 2,51 kat büyük olup dayanım artışı %151'dir. Bu iki profilin kalınlıkları oranı yaklaşık 2 iken dayanımları oranı 2,51 olmuştur. Buradan da anlaşılabileceği üzere kalınlıkların dayanıma etkisi oldukça fazla olabilmektedir. İncelenen tüm firmaların aynı gövde yüksekliğine sahip profillerinde kalınlık artışıyla dayanımın arttığı tespit edilmiştir. Şekil 7.1(a), Şekil 7.1(b) ve Şekil 7.1(c)'deki grafiklerde, aynı gövde yüksekliğine sahip profillerden kalınlıkları en büyük olanların en üstte, en küçük olanların ise en altta sıralandığı görülebilir.

Bir diğer karşılaştırma aynı başlık genişliklerine sahip profiller için yapılmıştır. Şekil 7.1'deki grafiklerden de fark edileceği gibi başlık genişlikleri aynı olan profillerin gövde yükseklikleri, tırnak boyları ve/veya kalınlıkları farklı olduğu için dayanımları değişkenlik göstermektedir. Örneğin ÜF1'e ait C150×65×19×2,0 profili ile C250×65×19×2,0 profilinin başlık genişlikleri, tırnak boyları ve kalınlıkları aynı olup gövde yükseklikleri 150 ve 250 mm'dir. Bu profillerin tasarım dayanımları Tablo 6.1'den, C150×65×19×2,0 profilinin tasarım dayanımı 102 kN, C250×65×19×2,0 profilinin tasarım dayanımı 105 kN olarak okunabilir. Bu iki profilin gövde yükseklikleri arasında 100 mm'lik fark olmasına rağmen dayanım artışı yalnızca %2,94 olmuştur. Benzer şekilde, ÜF2'ye ait C300×90×30×5,0 ve C400×90×30×5,0 profillerinin tasarım dayanımları 445 ve 461 kN'dur. Bu profillerin de gövde yükseklikleri arasındaki fark 100 mm olmasına rağmen dayanım artışı %3,60 olarak belirlenmiştir. Profillerin tasarım dayanımlarında gövde yüksekliğinin, kalınlığa nazaran çok daha az etki ettiği söylenebilir.



Şekil 7.1. ÜF1, ÜF2 ve ÜF3'e ait C profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının gövde yükseklikleri (H) ve başlık genişliklerine (B) bağlı değişimi

Tablo 6.1, Tablo 6.2 ve Tablo 6.3'teki profillerin akma gerilmesindeki dayanımları incelendiğinde, aynı gövde yüksekliğine sahip profillerin tümünde kalınlık arttığında tasarım dayanımları artmaktadır. ÜF1'deki profillerden en fazla dayanım artışı gövde

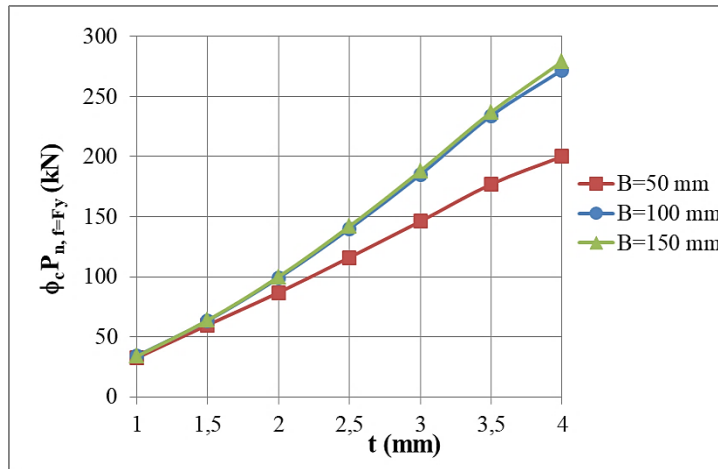
yüksekliği 400 mm olan profillerde olmuştur. Bu profillerin kalınlıkları 2 mm'den 4 mm'ye çıktığında dayanımdaki artış %205 olmuştur. Benzer şekilde ÜF2'deki profillerde dayanım artışı en çok 400 mm gövde yüksekliğindeki profillerde kalınlık 2 mm'den 5 mm'ye çıktığında gerçekleşmiş ve dayanım artışı %260 olarak belirlenmiştir. ÜF3'e ait profillerde ise dayanım artışı en çok 100 mm gövde yüksekliğine sahip profillerde olmuştur. Kalınlıkları 1,2 mm ile 4 mm arasında olan bu profillerin kalınlıkları 1,2 mm'den 4 mm'ye çıkarıldığında dayanımdaki artış %362 olarak belirlenmiştir.

Tırnak boyunun dayanıma etkisinin, incelenen profiller arasında karşılaştırılarak incelenebilmesi için diğer üç boyutun (H, B ve t) aynı olması gerekmektedir. Ancak H, B ve t boyutları aynı, tırnak boyları (C) farklı profiller hiçbir firmada mevcut olmadığı için karşılaştırma yapılamamıştır.

Bölüm 6'da yer alan Tablo 6.1, Tablo 6.2 ve Tablo 6.3'te profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarıyla birlikte her enkesit parçasının yerel burkulma olmadan taşıyabileceği en büyük tasarım dayanımları yer almaktadır. Profillerin her enkesit parçası için hesaplanan bu tasarım dayanımları incelendiğinde, genel olarak profillerin gövdelerinin tamamen etkin kaldığı yük değerleri, başlıkların ve tırnakların tamamen etkin kaldığı yük değerlerinden kıyasla daha düşüktür. Bu da, gövdenin başlık ve tırnaklardan daha küçük yük seviyelerinde yerel burkulmaya maruz kalacağı anlamına gelmektedir. Örnek olarak, ÜF1'e ait C200×85×25×2,5 profilinin Tablo 6.1'den gövde, başlık ve tırnaklar için hesaplanan tasarım dayanımları $((\phi_c P_n)_{f=F_{\text{başlık}}}, (\phi_c P_n)_{f=F_{\text{gövde}}}, (\phi_c P_n)_{f=F_{\text{tırnak}}})$ sırasıyla 50,4 kN, 193 kN ve 166 kN olarak okunabilir. 50,4 kN'a ulaşıldığında gövdede burkulma oluşurken başlık ve tırnaklarda hâlâ burkulma gözlenmemektedir. C200×85×25×2,5 profilinin akma gerilmesindeki tasarım dayanımı ise 165 kN'dir. C200×85×25×2,5 profili akma dayanımına varmadan önce gövde burkulacaktır. Başlıklar ve tırnaklar ise akma gerilmesinde hala etkin olarak çalışacaktır. ÜF3'e ait C280×100×20×2,5 profilinin gövde, başlık ve tırnaklarının tamamen etkin kaldığı yük değerleri, 30,7 kN, 136 kN ve 101 kN olarak Tablo 6.3'ten okunabilir. C200×85×25×2,5 profili ile benzer şekilde, C280×100×20×2,5 profilinin gövdesi, başlık ve tırnaklara göre daha narindir ve başlık ve tırnaklardan çok daha küçük yüklerde burkulacaktır. Ayrıca C280×100×20×2,5 profilinin $(\phi_c P_n)_{f=F_y}$ dayanımı 157 kN

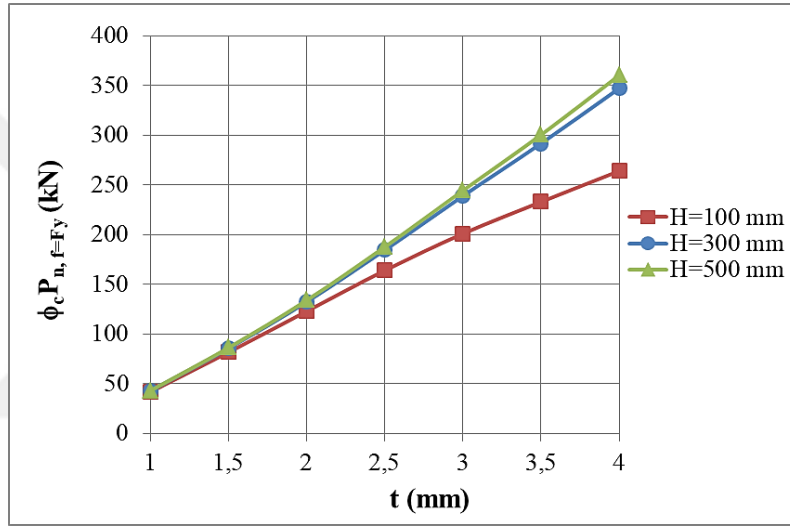
olup bu profilde sadece gövde değil, başlıklar ve tırnaklar da akma dayanımına ulaşmadan burkulmaktadır.

Tezde incelenen üç firmaya ait C profillerin haricinde enkesit özelliklerinin dayanıma etkisinin daha ayrıntılı irdelenebilmesi amacıyla farklı boyutlara sahip profiller varsayımsal olarak oluşturulmuştur. Oluşturulan bu profillerin tasarım dayanımları hesaplanırken, içbükmüm yarıçaplar $R=6,00$ mm, karakteristik akma gerilmesi ise S235 ($F_y=235$ MPa) olarak alınmıştır. İlk olarak, farklı kalınlıklardaki tasarım dayanımları hesaplanarak kalınlığın dayanıma etkisi incelenmiştir. Şekil 7.2, Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te farklı boyutlardaki profillerin kalınlığa bağlı olarak dayanımlarındaki değişimleri grafiklerle gösterilmiştir. Şekil 7.2'de başlık genişliği (B) 50 mm, 100 mm ve 150 mm olan, gövde yükseklikleri (H) 150 mm ve tırnak boyları (C) 15 mm olan C profillerin tasarım dayanımlarının ($(\phi_c P_n)_{f=F_y}$) kalınlıkla değişimi çizdirilmiştir. Başlık genişliği 50 mm olan profilin 4 mm kalınlıktaki tasarım dayanımı, 1 mm kalınlıktaki tasarım dayanımından 6,15 kat büyüktür. Benzer şekilde, 100 mm'lik başlık genişliğine sahip profilin tasarım dayanımı kalınlık arttıkça artmaktadır. 1 mm kalınlıkta tasarım dayanımı 34,1 kN, 4 mm kalınlıkta tasarım dayanımı 272 kN olarak elde edilmiştir. Dayanımda 6,98 kat artış olmuştur. $B=150$ mm ve $B=100$ mm olduğu durumlarda elde edilen dayanım değerleri birbirine oldukça yakındır. Bu üç profilde elde edilen dayanımlar 1,5 mm kalınlığa kadar benzerdir. 1,5 mm'den sonra $B=50$ mm olan profil ile $B=100$ ve $B=150$ mm olan profiller arasındaki dayanım farkının artmakta olduğu görülmektedir.



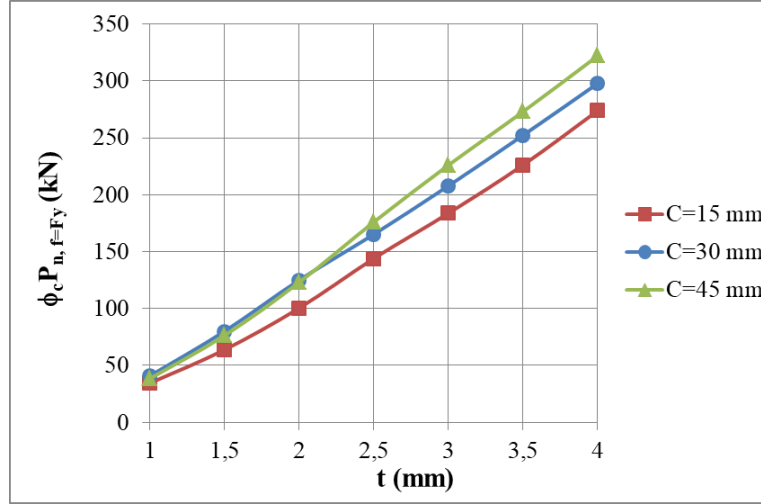
Şekil 7.2. H=150 mm, C=15 mm olan C profillerin B=50 mm, B=100 mm ve B=150 mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına kalınlığın etkisi

Başlık genişliği 100 mm, tırnak boyu 30 mm olan profilin 100 mm, 300 mm ve 500 mm gövde yükseklikleri için akma gerilmesindeki tasarım dayanımları, 1-4 mm arası kalınlıklar için hesaplanmış ve Şekil 7.3'teki grafikte gösterilmiştir. Kalınlık 1 mm'den 4 mm'ye çıkarıldığında dayanım H=100 mm olan profilde 6,30 kat, H=300 mm olan profilde 8,08 kat ve H=500 mm olan profilde 8,34 kat büyümektedir. Kalınlığın 2 mm'den sonraki değerlerinde H=300 mm ve H=500 mm olan profillerdeki dayanım artışı, H=100 mm olan profildeki dayanım artışına göre daha fazla olmuştur. Gövde yüksekliklerinin dayanıma etkisi, kalınlığın 2 mm'den sonraki değerleri için daha belirgin olduğu görülebilir.



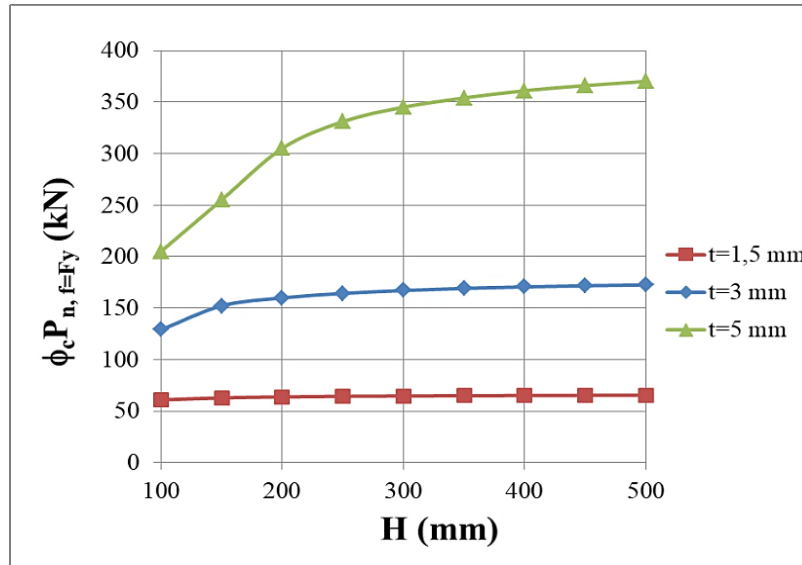
Şekil 7.3. B=100 mm, C=30 mm olan C profillerin H=100 mm, H=300 mm ve H=500 mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına kalınlığın etkisi

Şekil 7.4'te gövde yüksekliği 200 mm, başlık genişliği 80 mm olan profilin 15 mm, 30 mm ve 45 mm tırnak boylarındaki akma gerilmesindeki tasarım dayanımları grafiği verilmiştir. C=15 mm olan profilin, 4 mm kalınlıktaki tasarım dayanımı, 1 mm kalınlıktaki tasarım dayanımından 7,96 kat büyüktür. C=30 mm ve C=45 mm olan profillerde ise kalınlık 1 mm'den 4 mm'ye çıkarıldığında sırasıyla 7,30 ve 8,39 kat büyüdüğü belirlenmiştir. Şekil 7.4'te verilen grafik incelendiğinde, profillerin kalınlıkları arttıkça dayanımlarının neredeyse doğrusal olarak arttığı görülebilir. C=30 mm ve C=45 mm olan profillerin kalınlıkları 1,0 mm, 1,5 mm ve 2 mm olduğunda elde edilen dayanım değerleri birbirine oldukça yakındır. Kalınlığın 2 mm'den sonraki değerleri için C=30 mm ve C=45 mm olan profillerin dayanımları arasındaki farkın arttığı görülebilir.



Şekil 7.4. H=200 mm, B=80 mm olan C profillerin C=15 mm, C=30 mm ve C=45 mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına kalınlığın etkisi

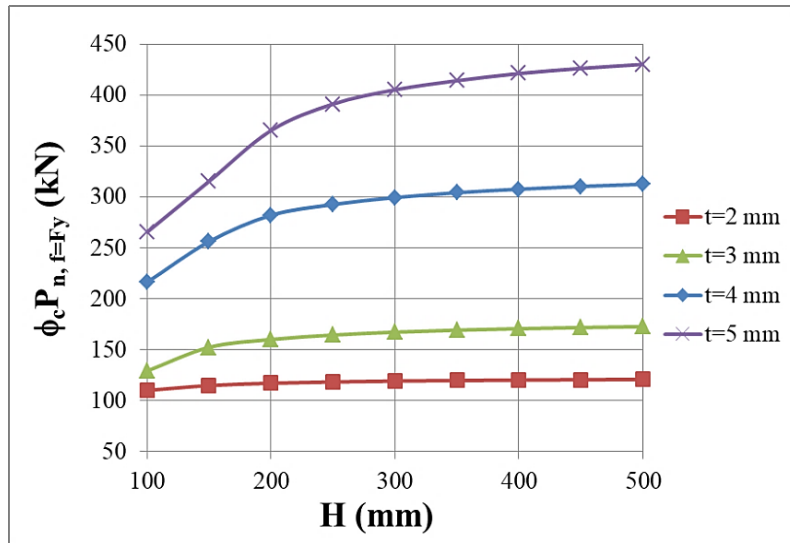
Şekil 7.5, Şekil 7.6 ve Şekil 7.7’de profillerin gövde yüksekliğine bağlı olarak tasarım dayanımlarındaki değişimi grafiklerle gösterilmiştir. Profillerin 100-500 mm aralığındaki gövde yükseklikleri için akma gerilmesindeki tasarım dayanımları elde edilmiştir. Profillerin gövde yükseklikleri arttıkça tasarım dayanımlarında artış görülmektedir. Kalınlığı daha yüksek olan profillerde, gövde yüksekliğinin artmasıyla tasarım dayanımındaki artış daha fazla olmaktadır. Başlık genişliği 50 mm, tırnak boyu 20 mm olan profilin Şekil 7.5’te t=1,5 mm, t=3 mm ve t=5 mm kalınlığındaki tasarım dayanımlarının gövde yüksekliklerine bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.



Şekil 7.5. B=50 mm, C=20 mm olan C profillerin t=1,5 mm, t=3 mm ve t=5 mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına gövde yüksekliğinin etkisi

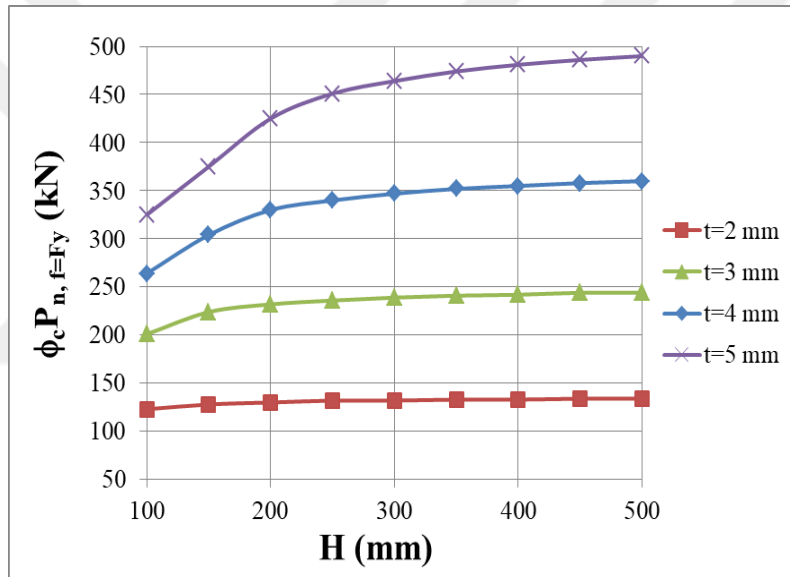
Şekil 7.5'te yer alan 1,5 mm kalınlığındaki profilin gövde yüksekliği 100 mm'den 500 mm'ye çıkarıldığında dayanımda %7,40 oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Gövde yüksekliği 500 mm'ye çıkarıldığında 3 mm kalınlığa sahip profilin dayanımında %33,9, 5 mm kalınlığa sahip profilin dayanımında %80,5 artış olduğu belirlenmiştir. Kalınlığı 1,5 ve 3 mm olan profillerde dayanımlarındaki artış daha azdır. Şekil 7.5'teki grafikte, kalınlığı 5 mm olan profil için, küçük H değerlerinde H arttıkça hızla artan, büyük H değerlerinde ise daha yavaş artan bir eğrinin olduğu görülebilir. Yüksek t ve küçük H değerine sahip profile H değerinin artırılmasının profilin dayanımında oldukça etkili olduğu söylenebilir.

Şekil 7.6'da başlık genişliği 75 mm, tırnak boyu 25 mm olan profilin t=2 mm, t=3 mm, t=4 mm ve t=5 mm kalınlıklarındaki tasarım dayanımı hesaplanarak grafikte gösterilmiştir. H değeri arttıkça dayanım artmakta olup profillerin tasarım dayanımlarındaki artış t=2 mm'de %9,83, t=3 mm'de %26,7, t= 4 mm'de %44,6 ve t=5 mm'de 62,3'tür. En yüksek dayanım artışı kalınlığı en yüksek olan profile gerçekleşmiştir. 4 ve 5 mm kalınlıktaki profillerin H değerinin 100 mm'den 300 mm'ye çıkarıldığında dayanımın daha hızlı arttığı, 300 mm'den sonra ise daha yavaş arttığı görülebilir. 3 mm kalınlığındaki profilin dayanımında en büyük artış H değeri 100 mm'den 150 mm'ye çıkarıldığında gerçekleşmiştir. 2 mm kalınlığındaki profile ise H'nin tüm değerlerinde dayanımdaki artış birbirine yakındır.



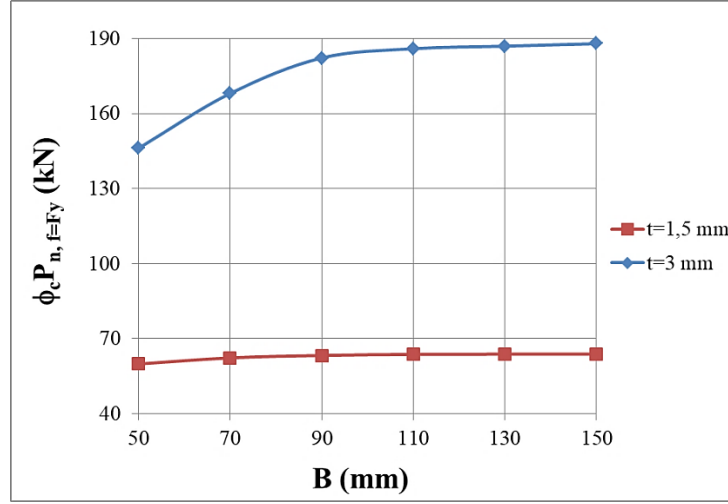
Şekil 7.6. B=75 mm, C=25 mm olan C profillerin t=2 mm, t=3 mm, t=4 mm ve t=5 mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına gövde yüksekliğinin etkisi

Şekil 7.7’de başlık genişliği 100 mm, tırnak boyu 30 mm olan profilin tasarım dayanımının gövde yüksekliğiyle değişimi gösterilmiştir. Bu profillerde dayanımdaki artış en fazla $t=5$ mm olan profilde gerçekleşmiş olup tasarım dayanımındaki artış %50,9 olarak elde edilmiştir. 4 mm ve 5 mm kalınlıklarındaki profillerin dayanım eğrileri benzerdir. Bu profillerin eğrileri incelendiğinde, en hızlı dayanım artışı en küçük H değerlerinde gözlenmiştir. 3 mm kalınlıktaki profilde H’nin 150 mm’den sonraki değerleri için dayanım artışı daha azdır. Kalınlığı 2 mm olan profilde ise H’nin tüm değerleri için dayanım artışının birbirine yakın ve az olduğu görülebilir. Düşük kalınlıktaki profillerde H artışının daha az etki ettiği, yüksek kalınlıklardaki profillerde ise daha fazla etki ettiği oluşan dayanım eğrilerinden de anlaşılabılır.



Şekil 7.7. B=100 mm, C=30 mm olan C profillerin $t=2$ mm, $t=3$ mm, $t=4$ mm ve $t=5$ mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına gövde yüksekliğinin etkisi

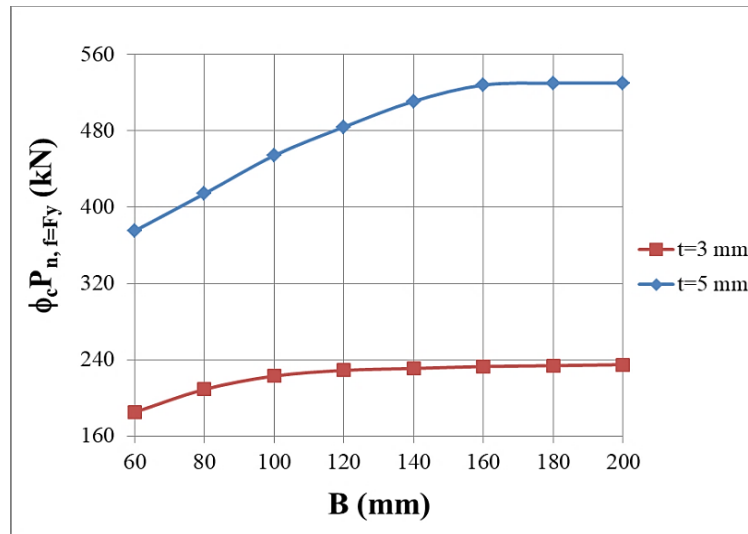
Şekil 7.8, Şekil 7.9 ve Şekil 7.10’da profillerin başlık genişliğine bağlı olarak tasarım dayanımlarındaki değişimine ait grafikler yer almaktadır. Grafikler incelendiğinde, başlık genişliği arttıkça tasarım dayanımlarında genel olarak artış olduğu görülmektedir. Şekil 7.8’de Gövde yüksekliği 150 mm, tırnak boyu 15 mm olan $t=1,5$ mm ve $t=3$ mm kalınlıklarındaki profilin 50-150 mm aralığındaki başlık genişlikleri için tasarım dayanımı grafiği çizdirilmiştir. Her iki kalınlıkta da başlık genişliği arttıkça dayanımda artış görülmektedir. 1,5 mm kalınlıktaki profilin başlık genişliği 50 mm’den 150 mm’ye çıkarıldığında dayanımda %6,60, 3 mm kalınlıktaki profilde %28,6 artış olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.8. H=150 mm, C=15 mm olan C profillerin t=1,5 mm ve t=3 mm için gerilmesindeki tasarım dayanımlarına başlık genişliğinin etkisi

Şekil 7.8'deki grafikten de görüleceği gibi, kalınlığı az olan profilde B değerinin artışının dayanıma etkisi, kalınlığı fazla olan profile göre daha azdır. 3 mm kalınlıktaki profilde B'nin 50 mm'den 90 mm'ye çıkarılmasıyla dayanımda hızlı bir artış, 90 mm'den sonra ise dayanımdaki artışın daha az olduğu görülebilir.

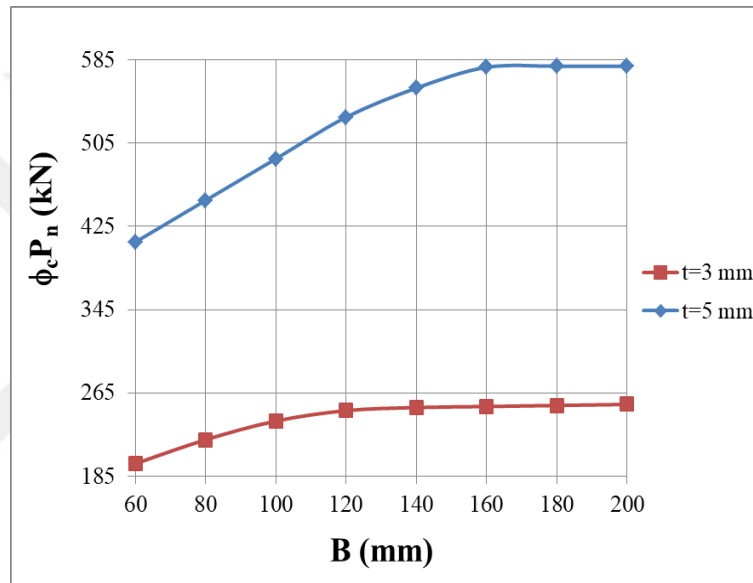
Şekil 7.9'da H=300 mm, C=25 mm olan profilin t=3 mm ve t=5 mm kalınlıkları için tasarım dayanımlarının 60-200 mm arasındaki B değerine bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Kalınlığı 3 mm olan kesitin dayanımındaki en büyük artış, B değeri 60 mm'den 80 mm'ye çıkarıldığında olmuştur.



Şekil 7.9. H=300 mm, C=25 mm olan C profillerin t=3 mm ve t=5 mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına başlık genişliğinin etkisi

Şekil 7.9’da 5 mm kalınlıktaki profilin B değeri 160 mm oluncaya kadar dayanımında neredeyse doğrusal bir artışın olduğu görülebilir. B’nin 160 mm’den sonraki değerleri içinse dayanımın hemen hemen aynı olduğu tespit edilmiştir.

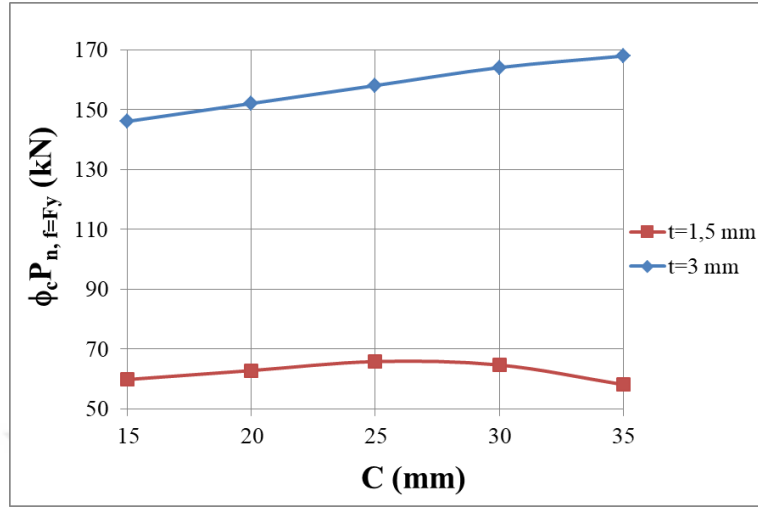
Şekil 7.10’da gövde yüksekliği 500 mm, tırnak boyu 30 mm olan profilin 3 ve 5 mm kalınlıklarındaki tasarım dayanımlarının başlık genişliğiyle değişimi gösterilmiştir. Kalınlığı 3 mm olan kesitin B değeri 120 mm’ye kadar, kalınlığı 5 mm olan kesitin B değeri 160 mm’ye kadar çıkartıldığında, dayanımda hemen hemen doğrusal bir artış olduğu görülebilir.



Şekil 7.10. H=500 mm, C=30 mm olan C profillerin t=3 mm ve t=5 mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına başlık genişliğinin etkisi

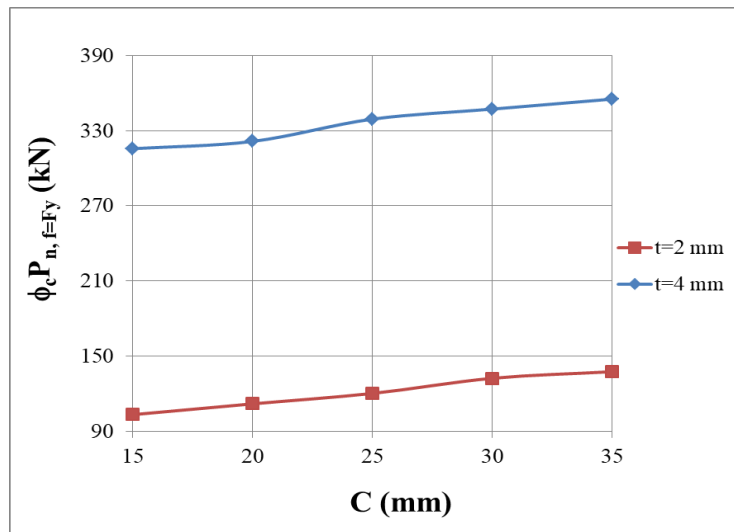
Şekil 7.11, Şekil 7.12 ve Şekil 7.13’te profillerin tırnak boyunun tasarım dayanımına etkisini incelemek amacıyla, profillerin 15-35 mm arasındaki tırnak boylarına bağlı olarak dayanımlarındaki değişimler gösterilmiştir. Tırnak boyları belirlenirken, ÜF1, ÜF2 ve ÜF3’teki profillerin tırnak boyları ile benzer boyutlar seçilmiştir. Şekil 7.11’de gövde yüksekliği 150 mm, başlık genişliği 50 mm olan profilin 1,5 ve 3 mm kalınlıklardaki tasarım dayanımı grafiği verilmiştir. Şekil 7.11’de 1,5 mm kalınlığa sahip kesitin C değeri 15 mm iken tasarım dayanımı 59,9 kN, 25 mm iken 65,9 kN ve 35 mm iken 58,1 kN olarak hesaplanmıştır. Bu profilin tasarım dayanımı, tırnak boyu takriben 25 mm oluncaya kadar artmış, 25 mm’den sonra azalmıştır. 3 mm kalınlığa sahip kesitin tasarım dayanımı tırnak boyu arttıkça artış göstermiştir. Profillerin tırnak

boyları 15 mm'den 35 mm'ye yükseltildiğinde dayanım sürekli artarak %16,4 oranında artış olduğu belirlenmiştir.



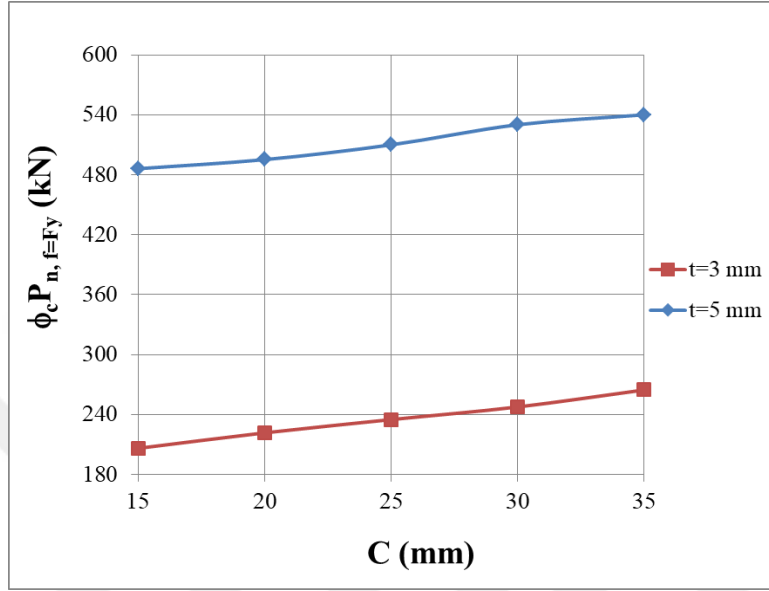
Şekil 7.11. H=150 mm, B=50 mm olan C profillerin t=1,5 mm ve t=3 mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına tırnak boyunun etkisi

Şekil 7.12'de gövde yüksekliği 300 mm, başlık genişliği 100 mm olan profilin t=2 mm ve t=4 mm kalınlıklarında tasarım dayanımları grafiği verilmiştir. 2 mm kalınlığa sahip kesitin C=35 mm ikenki tasarım dayanımı, C=15 mm ikenki tasarım dayanımıyla karşılaştırıldığında, dayanımda %33,2 oranında artış olduğu belirlenmiştir. 4 mm kalınlığa sahip kesitte ise dayanım artışı %12,5 olarak elde edilmiştir. Kalınlığı daha az olan kesitin, kalınlığı daha fazla olana göre dayanımında daha fazla artış olmuştur.



Şekil 7.12. H=300 mm, B=100 mm olan C profillerin t=2 mm ve t=4 mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına tırnak boyunun etkisi

Şekil 7.13'te gövde yüksekliği 500 mm, başlık genişliği 120 mm olan profilin $t=3$ mm ve $t=5$ mm kalınlıklarında elde edilen tasarım dayanımları grafiklerle gösterilmiştir. Kesitlerin dayanımlarındaki artış $t=3$ mm için %28,3, $t=5$ mm için %11,1 olarak hesaplanmıştır. Bu iki profilde de tırnak boyu arttıkça dayanımın arttığı görülebilir.

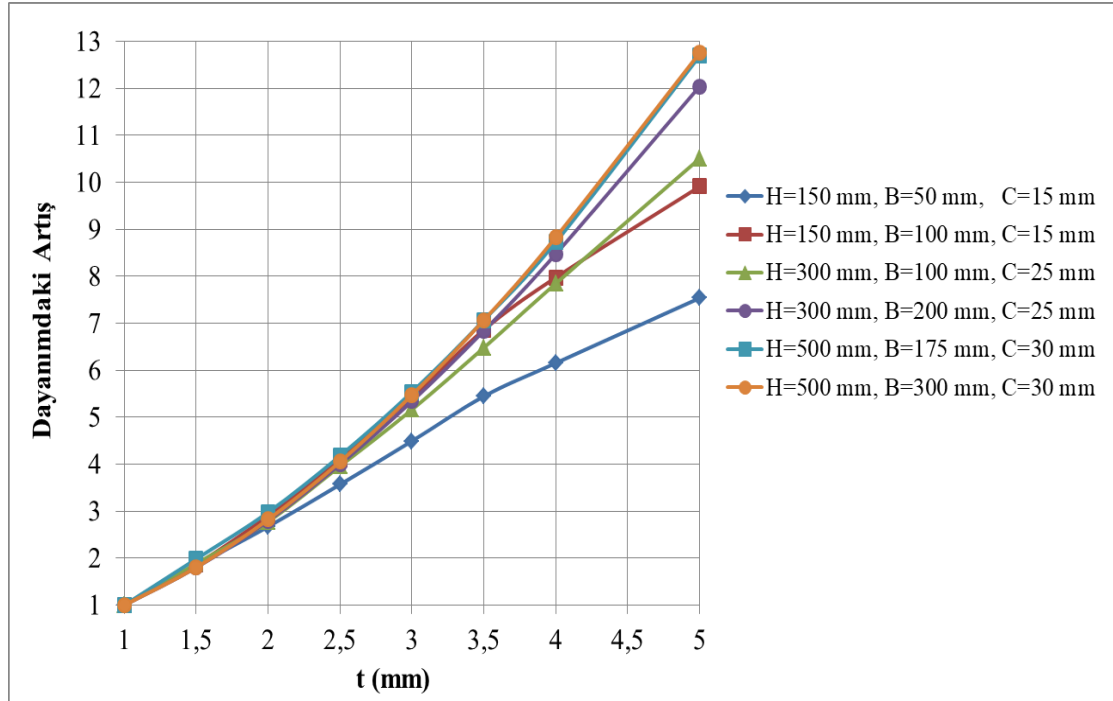


Şekil 7.13. $H=500$ mm, $B=120$ mm olan C profillerin $t=3$ mm ve $t=5$ mm için akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına tırnak boyunun etkisi

Şekil 7.12 ve Şekil 7.13'te yer alan başlık genişliği 100 ve 120 mm olan profillerin kalınlıklarının daha küçük olduğu değerlerde tırnak boyunun etkisi daha fazla olmuştur. Kalınlığın fazla olduğu profillerde ise tırnak boyu dayanıma daha az etki etmiştir.

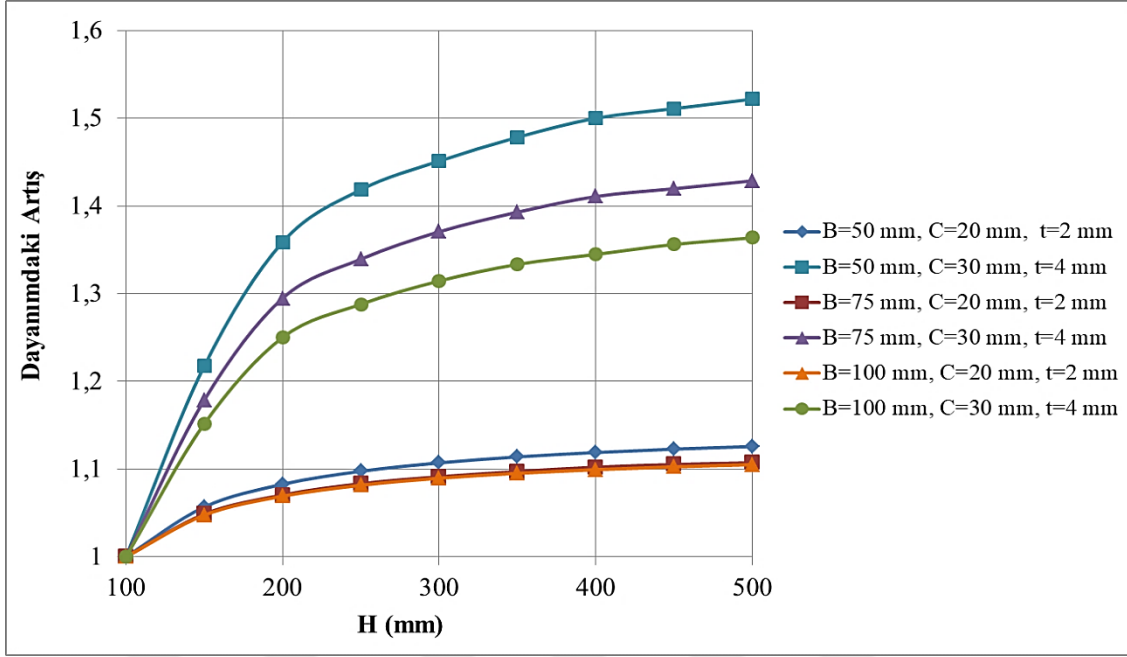
Şekil 7.14'te farklı gövde yüksekliği, başlık genişliği ve tırnak boyuna (H , B ve C) sahip profillerin kalınlığa bağlı olarak tasarım dayanımlarındaki artışı gösterilmiştir. Her profil için farklı kalınlıklarda elde edilen dayanım değerleri 1 mm kalınlıktaki dayanımına oranlanarak dayanımdaki artış oranı elde edilmiştir. Örnek olarak, $H=150$ mm, $B=50$ mm ve $C=15$ mm olan profil için 1 mm kalınlıktaki tasarım dayanımı 32,5 kN, 5 mm kalınlıktaki tasarım dayanımı 245 kN olup dayanım artış oranı 7,54 olarak elde edilebilir. Farklı boyutlara sahip bu profillerin 5 mm kalınlıktaki dayanım artış oranları 7,54 ile 12,8 arasında değişmektedir. Profillerin kalınlıkları arttıkça dayanımlarında da artış olduğu görülebilir. Dayanımdaki artış oranı en yüksek H ve B değerine sahip profilde olmuştur. Dayanım artış oranı en yüksek olan $H=500$ mm, $B=300$ mm, $C=30$ mm ve $t=5$ mm olan profili ile $H=500$ mm, $B=175$ mm, $C=30$ mm

$t=5$ mm olan profilin dayanımlarındaki artış oranları oldukça birbirine yakındır. Dayanımdaki artış oranı 7,54 ile en az olan profil ise en küçük H, B ve C değerlerine sahip profildedir.



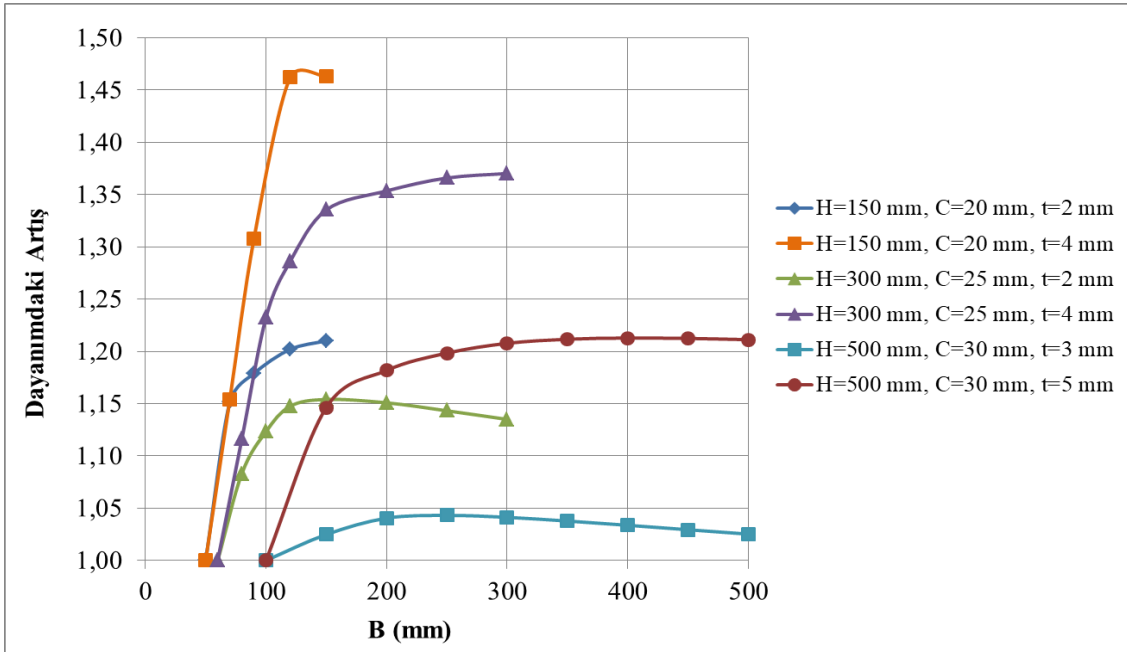
Şekil 7.14. Farklı boyutlara sahip C profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının kalınlığa (t) bağlı olarak artış oranı

Şekil 7.15'te farklı boyutlara sahip altı profilin gövde yüksekliğine bağlı olarak tasarım dayanımlarındaki artış oranları grafikte gösterilmiştir. Profillerin 100-500 mm arasındaki gövde yüksekliklerine göre tasarım dayanımları elde edilmiştir. Dayanımdaki artış oranı profillerin farklı gövde yüksekliklerindeki tasarım dayanımlarının 100 mm'lik gövde yüksekliğindeki tasarım dayanımına oranlanarak belirlenmiştir. Farklı boyutlardaki bu profillerin gövde yüksekliğine bağlı olarak dayanımdaki artış oranı 1,11 ile 1,52 arasında değişmektedir. Grafiklerden de fark edileceği gibi, dayanımdaki artış oranı en yüksek profil başlık genişliği 50 mm, tırnak boyu 30 mm ve kalınlığı 4 mm olan profildir. Kalınlıkları 2 mm, tırnak boyları 20 mm olan başlık genişlikleri 75 ve 100 mm olan profillerin dayanımdaki artış oranları eşit ve 1,11'dir. Kalınlığı büyük olan kesitlerin tümünde dayanım artış oranı daha fazla, kalınlıkların daha az olduğu kesitlerde ise dayanım artışı oranı daha az olduğu görülebilir. 4 mm kalınlığa sahip profillerde ise dayanımdaki artış oranı başlık genişliği en küçük profilde olduğu görülebilir.



Şekil 7.15. Farklı boyutlara sahip C profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının gövde yüksekliğine (H) bağlı olarak artış oranı

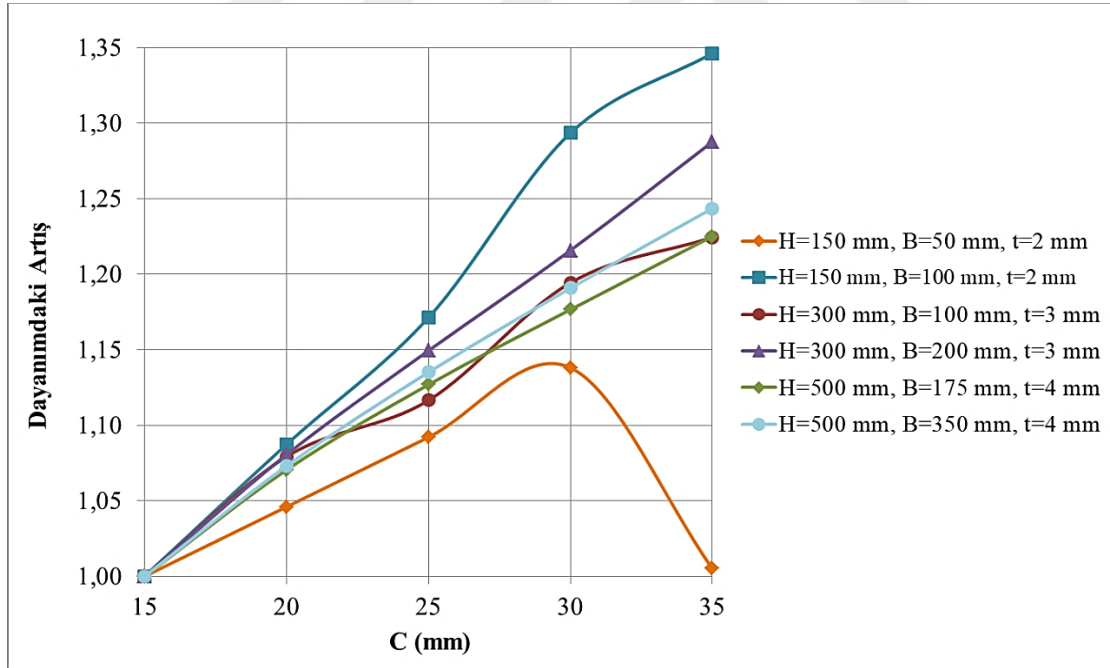
Profillerin tasarım dayanımına başlık genişliğinin etkisini daha detaylı incelemek amacıyla altı profilin farklı başlık genişliklerindeki tasarım dayanımları hesaplanmıştır. Profillerin dayanımları en küçük B değerindeki dayanımlarına oranlanarak dayanımlarındaki artış oranı belirlenmiş ve Şekil 7.16'daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 7.16. Farklı boyutlara sahip C profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının başlık genişliğine (B) bağlı olarak artış oranı

Şekil 7.16'daki grafikte yer alan $H=150$ mm, $C=20$ mm boyutlarındaki profilin $t=2$ mm ve $t=4$ mm kalınlıklarındaki tasarım dayanımları, 50-150 mm arasındaki B değerleri için hesaplanmıştır. Dayanım artış oranı, hesaplanan dayanımların $B=50$ mm'deki hesaplanan dayanıma oranlanarak elde edilmiştir. $H=300$ mm, $C=25$ mm olan profilin 2 ve 4 mm kalınlıklarındaki tasarım dayanımları, 60-300 mm arasındaki B değerleri için hesaplanmıştır. $H=500$ mm ve $C=30$ mm boyutlu profilde 100-500 mm arasındaki B değerleri için tasarım dayanımları hesaplanmıştır. Bu altı profilin dayanım artış oranları incelendiğinde en büyük artış oranı 1,46, en küçük artış oranı ise 1,03'tür. Dayanım artış oranı en yüksek $H=150$ mm, $C=20$ mm ve $t=4$ mm olan profildedir. Kalınlığı daha büyük profillerde dayanım artış oranı daha fazladır.

Profillerin farklı tırnak boylarına bağlı olarak dayanımdaki artış oranları Şekil 7.17'de gösterilmiştir. Profillerin dayanımdaki artış oranı, farklı tırnak boylarındaki tasarım dayanımlarının 15 mm tırnak boyundaki tasarım dayanımlarına oranlanmasıyla elde edilmiştir.

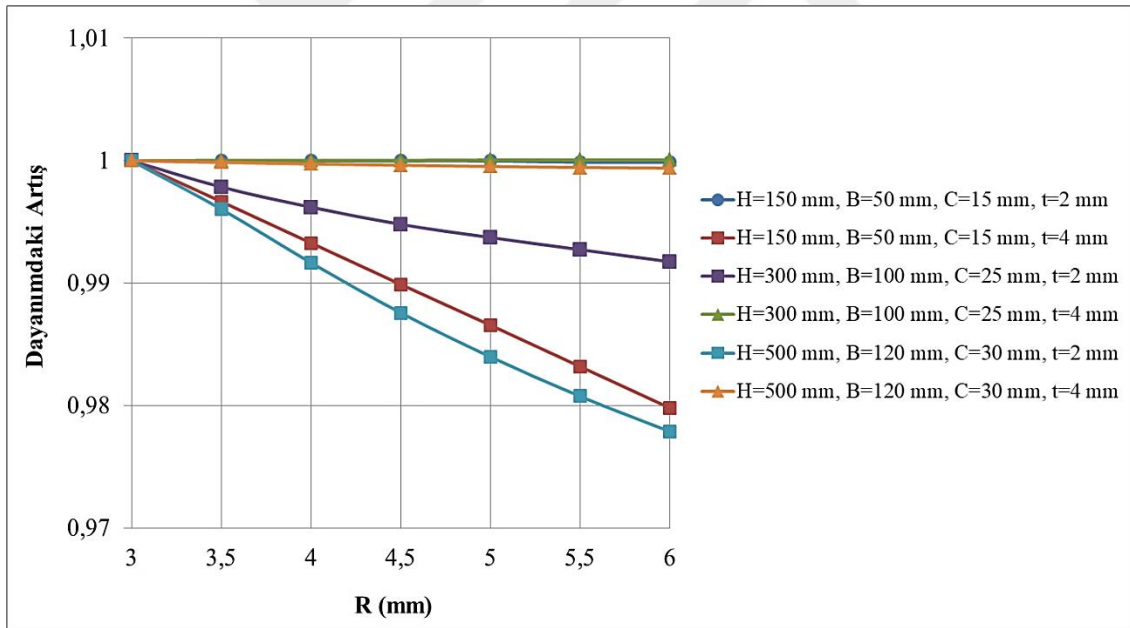


Şekil 7.17. Farklı boyutlara sahip C profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının tırnak boyuna (C) bağlı olarak artış oranı

Örneğin, $H=150$ mm, $B=100$ mm, $t=2$ mm olan profilin 35 mm tırnak boyundaki tasarım dayanımı 133 kN, 15 mm tırnak boyundaki tasarım dayanımı 99,0 kN'dur. Dayanımlar oranlandığında dayanımdaki artış oranı 1,35 olarak hesaplanmıştır.

Profillerin dayanımlarındaki artış oranı 1,35 ile 1,01 arasında değişmektedir. H=150 mm, B=50 mm ve t=2 mm olan profilin tırnak boyu 30 mm'ye kadar artırıldığında dayanımında artış görülmektedir. 35 mm'de ise elde edilen dayanım 15 mm'deki dayanıma çok yakın bir değer olarak belirlenmiştir. Bu profilin başlık genişliğinin küçük olması sebebiyle, D/w oranı oldukça yüksek olup tırnak boyunun rijitleştirici etkisi azalmaktadır.

Şekil 7.18'deki, profillerin 3-6 mm aralığındaki içbüküm yarıçaplarına göre dayanım artışının içbüküm yarıçapıyla değişim grafiği gösterilmiştir. Grafikte, 4 mm kalınlıktaki H=500 mm, B=120 mm, C=30 mm ile H=150 mm, B=50 mm, C=15 mm profillerinde ve 2 mm kalınlıktaki H=300 mm, B=100 mm, C=25 mm profilinde yarıçap arttıkça dayanım azalmıştır, diğer profillerde ise dayanımda çok az değişim olmuştur. Profillerde içbüküm yarıçaplarına bağlı dayanımdaki azalma oldukça düşük olduğu görülebilir.



Şekil 7.18. Farklı boyutlara sahip C profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının içbüküm yarıçapına (R) bağlı olarak artış oranı

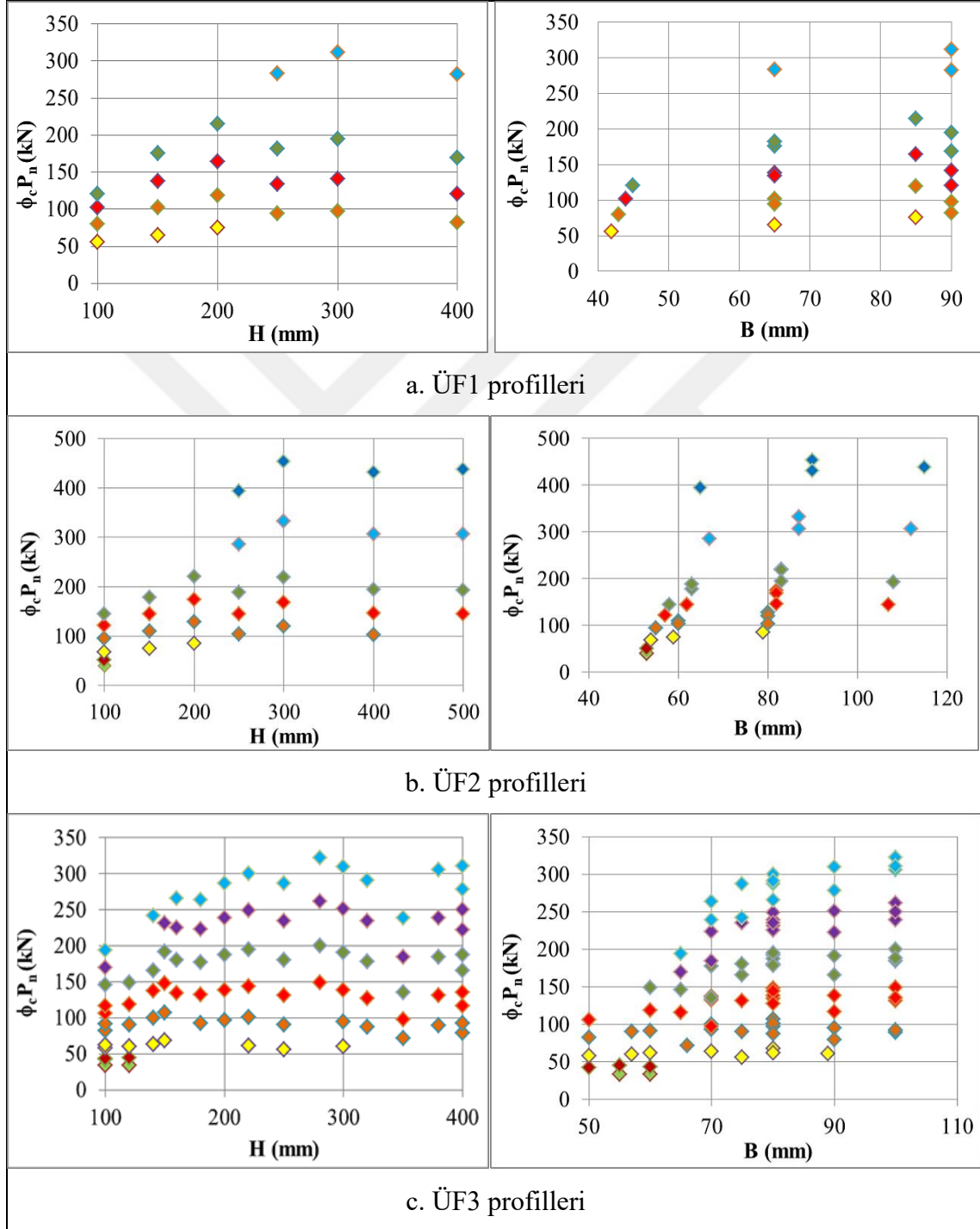
Bu kısımda incelenen farklı boyutlardaki C profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına en çok etki eden boyutun kalınlık (t) olduğu belirlenmiştir. Diğer boyutlara (H, B, C, R) nazaran kalınlıkla dayanım artışı çok daha fazladır. Bununla birlikte, artan gövde yüksekliği, başlık genişliği ve tırnak boyuyla genellikle dayanımda artış gözlenmiştir.

7.2. Çarpılmalı Burkulma Gerilmesindeki Tasarım Dayanımına Etkisinin İncelenmesi

Bu kısımda, tez kapsamında incelenen profillerin çarpılmalı burkulma dayanımına etkisini incelemek amacıyla, Tablo 6.7, Tablo 6.8 ve Tablo 6.9’da yer alan çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının gövde yüksekliği ve başlık genişliğiyle değişimi Şekil 7.17(a), Şekil 7.17(b) ve Şekil 7.17(c)’de yer alan grafiklerde sunulmuştur. Grafiklerde profillerin kalınlıkları, 1,0 mm için açık yeşil, 1,2 mm için bordo, 1,5 mm için sarı, 2,0 mm için turuncu, 2,5 mm için kırmızı, 3,0 mm için koyu yeşil, 3,5 mm için mor, 4,0 mm için açık mavi ve 5,0 mm için koyu mavi renk ile gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, aynı gövde yüksekliğine sahip profillerin çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımları farklılık göstermekte ve daha büyük kalınlığa sahip olanlar daha yüksek dayanımlara ulaşmıştır. Örnek olarak, ÜF2’ye ait C200×79×30×1,5 ile C200×83×30×3,0 profilleri sırasıyla 85,0 ve 220 kN’luk tasarım dayanımına sahiptir. C200×83×30×3,0 profilinin kalınlığı, C200×79×30×1,5 profilinin kalınlığına oranı 2 iken dayanımları oranı ise 2,59’dur. Profillerin kalınlıkların tasarım dayanımları üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir.

Profillerin çarpılma burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının gövde yüksekliğiyle değişimini incelemek için ÜF2’ye ait C300×83×30×3,0 ile C400×83×30×3,0 profilleri karşılaştırılabilir. Bu profillerin adlarından da fark edileceği üzere, B, C ve t boyutları aynıdır (B=83 mm, C=30 mm, t=3,0 mm). Gövde yükseklikleri ise 300 ve 400 mm’dir. Bu profillerin tasarım dayanımları Tablo 6.8’den 219 ve 194 kN olarak elde edilebilir. Gövde yüksekliği 300 mm olan profilin tasarım dayanımı, gövde yüksekliği 400 mm olan profilin tasarım dayanımından fazladır. Ancak ÜF2’ye ait C150×63×25×3,0 ile C250×63×25×3,0 profillerin tasarım dayanımları karşılaştırılırsa, C150×63×25×3,0 profilinin tasarım dayanımı 179 kN, C250×63×25×3,0 profilinin tasarım dayanımı ise 190 kN’dur. Gövde yüksekliği 150 mm olan C150×63×25×3,0 profilinin tasarım dayanımı, 250 mm olan C250×63×25×3,0 profilinin tasarım dayanımından daha azdır. Buradan, profillerin gövde yüksekliklerinin tasarım dayanımlarına etkisinin değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Aynı başlık genişliklerine sahip profillerin tasarım dayanımları kalınlık arttıkça artmaktadır.

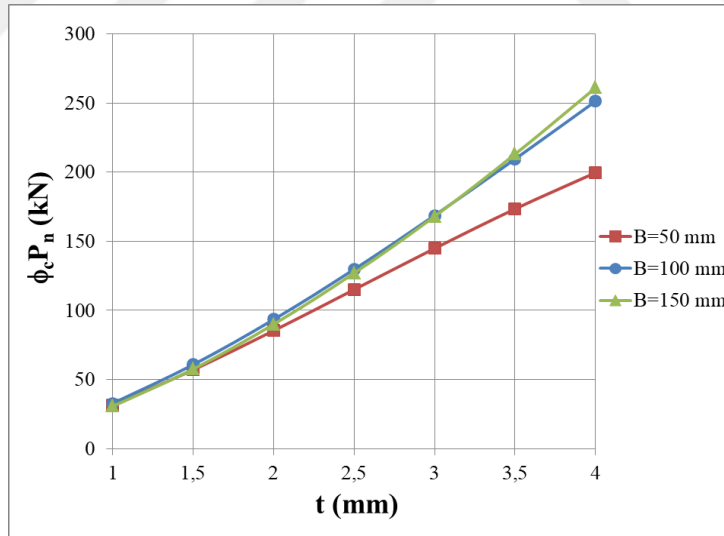
ÜF1'deki C150×65×17×1,5, C150×65×19×2,0, C150×65×20×2,5 ve C150×65×22×3,0 profillerinin kalınlıkları sırasıyla 1,5, 2,0, 2,5 ve 3,0 mm, tasarım dayanımları ise 65,3, 102, 139 ve 176 kN'dur. Kalınlığı 1,5 mm olan profilin dayanımıyla, kalınlığı 3,0 mm olan profilin dayanımı karşılaştırıldığında %170'lik bir dayanım artışı olmuştur.



Şekil 7.19. ÜF1, ÜF2 ve ÜF3'e ait C profillerin çarpılmalı burkulma gerilmesindeki mukavemetlerinin gövde yükseklikleri (H) ve başlık genişliklerine (B) bağlı değişimi

Tez kapsamında incelen profillerin dışında varsayımsal olarak oluşturulan profiller ile H, B, C, t ve R boyutlarının tasarım dayanımına etkisi incelenmiştir. Bu oluşturulan profillerin dayanımları hesaplanırken içbüküm yarıçaplar R=6,0 mm, karakteristik akma gerilmesi S235 ($F_y=235$ MPa) alınmıştır.

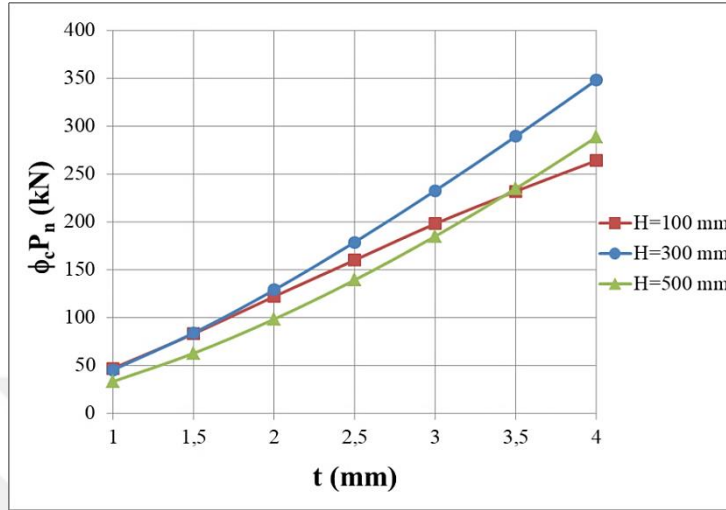
İlk olarak, oluşturulan profillerin çarpımalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımının kalınlıkla değişimi araştırılmıştır. Şekil 7.20, Şekil 7.21 ve Şekil 7.22’de C profillerin çarpımalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının kalınlıkla değişimini gösteren grafikler sunulmuştur. H=150 mm, C=15 mm olan profilin Şekil 7.20’de B=50 mm, B=100 mm ve B=150 mm olduğu durumlardaki tasarım dayanımlarının kalınlıkla değişim grafiği yer almaktadır. Profillerin tümünde kalınlık arttıkça dayanımın arttığı görülmektedir. B=50 mm olan profilin 4 mm kalınlıktaki tasarım dayanımı, 1 mm kalınlıktaki tasarım dayanımından 6,32 kat büyüktür. B=100 mm olan profilde 1 ve 4 mm kalınlıklarındaki dayanımlar karşılaştırıldığında, 4 mm kalınlıktaki dayanımın 7,65 kat, B=150 mm olan profilde 8,50 kat büyük olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.20. H=150 mm, C=15 mm olan C profillerin B=50 mm, B=100 mm ve B=150 mm için çarpımalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına kalınlığın etkisi

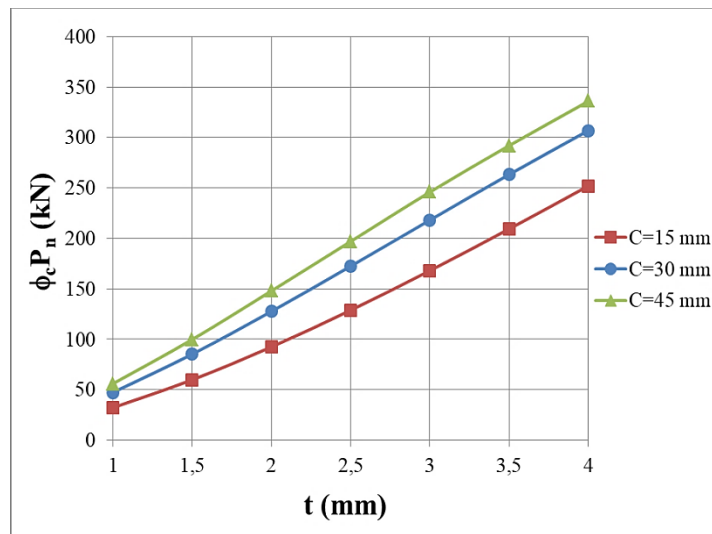
Şekil 7.21’de B=100 mm, C=30 mm boyutlarındaki profilin H=100 mm, H=300 mm ve H=500 mm olduğu durumlardaki tasarım dayanımları hesaplanarak grafikte gösterilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak dayanımdaki artış en fazla H=300 mm olan profilde olmuştur. H=100 mm olan profilde H=500 mm olan profilin 3,5 mm kalınlıktaki

tasarım dayanımları birbirine çok yakındır. Gövde yüksekliği en yüksek (H=500 mm) olan profilde kalınlık 3,5 mm'ye kadar artırıldığında dayanımdaki artış, H=100 mm ve H=300 mm olan profillere göre daha az olmuştur.



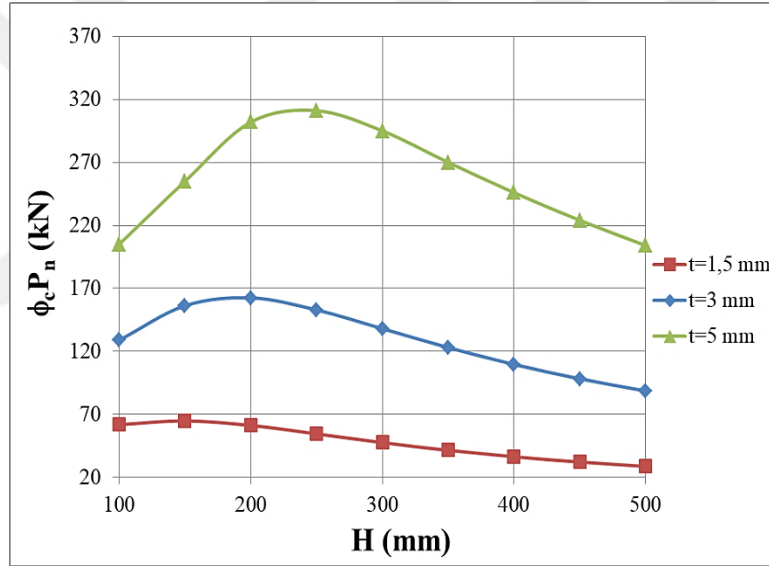
Şekil 7.21. B=100 mm, C=30 mm olan C profillerin H=100 mm, H=300 mm ve H=500 mm için çarpımalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına kalınlığın etkisi

Şekil 7.22'de H=200 mm, B=80 mm boyutlu profilin C=15 mm, C=30 mm ve C=45 mm tırnak boylarındaki tasarım dayanımlarının kalınlıkla değişimi gösterilmiştir. Dayanım artışı en çok C değerinin en büyük olduğu profilde gerçekleşmiştir. Profillerin tümünde kalınlık arttıkça dayanım artmış ve neredeyse doğrusal bir artış olduğu görülebilir.



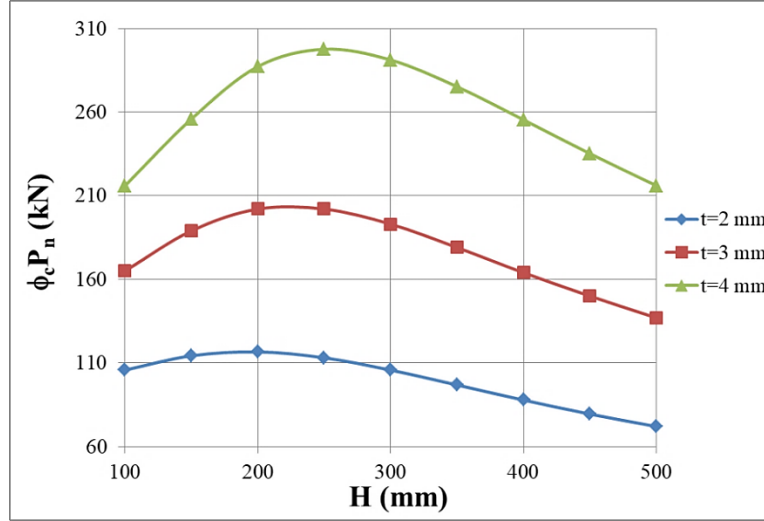
Şekil 7.22. H=200 mm, B=80 mm olan C profillerin C=15 mm, C=30 mm ve C=45 mm için çarpımalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına kalınlığın etkisi

Şekil 7.23, Şekil 7.24 ve Şekil 7.25'te profillerin gövde yüksekliğine bağlı olarak tasarım dayanımlarındaki değişimine ait grafikler yer almaktadır. Şekil 7.23'te B=50 mm, C=20 mm olan 1,5, 3 ve 5 mm kalınlıklarındaki profilin 100-500 mm arasındaki H değerleri için tasarım dayanımları gösterilmiştir. Şekil 7.23'teki grafik incelendiğinde, 1,5 mm kalınlıktaki kesitin H=150 mm'de tasarım dayanımı en yüksek değeri almıştır. 150 mm'den sonra dayanım azalmaktadır. H=500 mm'deki dayanım ile H=100 mm'deki dayanım değeri kıyaslandığında, dayanım %53,6 azalmıştır. 3 mm kalınlıktaki kesitte ise H=200 mm olduğunda dayanım en yüksek değeri almıştır. H=500 mm iken elde edilen dayanım ile H=100 mm iken elde edilen dayanım karşılaştırıldığında, dayanım %31,2 azalmıştır. 5 mm kalınlıktaki profilde ise H=100 mm ve H=500 mm'de tasarım dayanımları aynı olup dayanımda en yüksek değere H=250 mm'de ulaşmıştır.



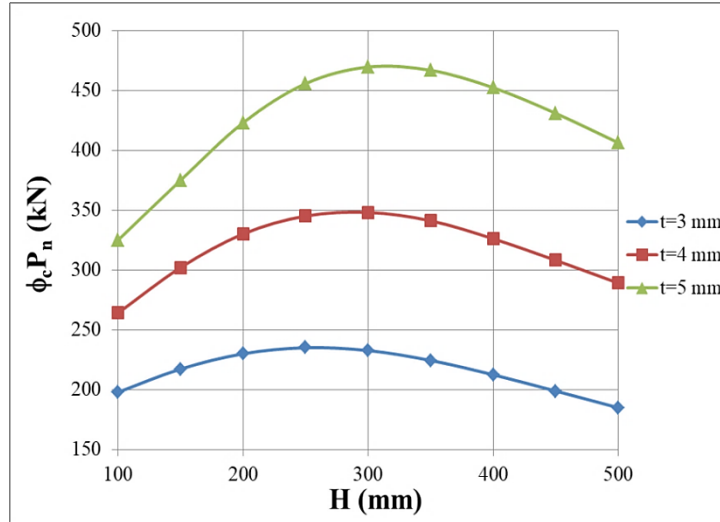
Şekil 7.23. B=50 mm, C=20 mm olan C profillerin t=1,5 mm, t=3 mm ve t=5 mm için çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına gövde yüksekliğinin etkisi

Şekil 7.24'te B=75 mm, C=25 mm olan profilin t=2 mm, t=3 mm ve t=4 mm kalınlıklarındaki tasarım dayanımlarının H'ye bağlı olarak değişimi grafikte gösterilmiştir. 2 mm kalınlıktaki kesitin tasarım dayanımı H değeri 200 mm'ye kadar artmış, 200 mm'den sonra azalmıştır. 500 mm'deki dayanım, 100 mm'deki dayanımla kıyaslandığında dayanımda %31,9 azalma olduğu belirlenmiştir. 4 mm kalınlıktaki kesitin en yüksek dayanım değerini H=200 mm ve H=250 mm aralığında aldığı görülebilir. 4 mm kalınlıktaki kesitte ise H=250 mm iken dayanım en yüksek değeri almıştır.



Şekil 7.24. B=75 mm, C=25 mm olan C profillerin t=2 mm, t=3 mm ve t=4 mm için çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına gövde yüksekliğinin etkisi

Şekil 7.25'teki grafikte, B=100 mm, C=30 mm olan profilin 3, 4 ve 5 mm kalınlıklarındaki tasarım dayanımlarının H'ye bağlı değişimi gösterilmiştir. 3 mm kalınlıktaki kesit H=250 mm iken en yüksek, H=500 mm iken en düşük tasarım dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. 4 ve 5 mm kalınlıktaki kesitlerde en yüksek dayanım H=300 mm iken elde edilmiştir. 300 mm'den sonra dayanımları azalmaya başlamıştır.



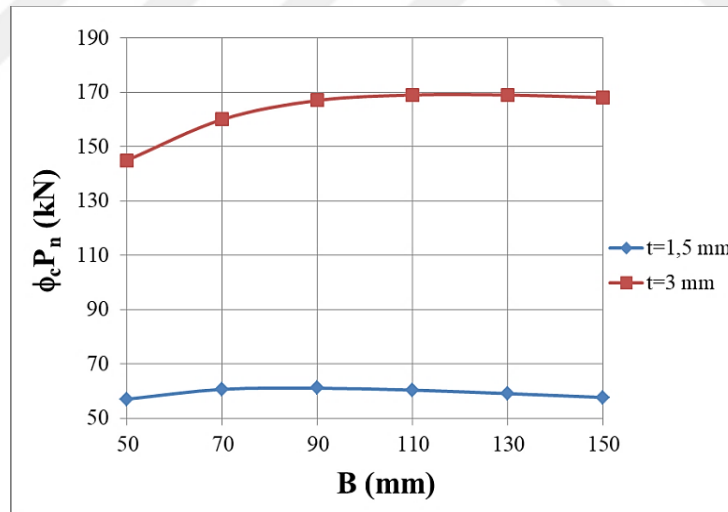
Şekil 7.25. B=100 mm, C=30 mm olan C profillerin t=3 mm, t=4 mm ve t=5 mm için çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına gövde yüksekliğinin etkisi

Profillerin gövde yüksekliğine bağlı olarak dayanımlarındaki değişimi incelendiğinde, her profilde en yüksek dayanım değerine ulaştığı bir H değeri vardır. Kalınlığı 4 ve 5

mm olan profillerde genellikle $H=300$ mm iken, kalınlığı 2 ve 3 mm olan profillerde bu değer 200 ve 250 mm arasındayken çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımları en yüksek değeri almaktadır. Bu değerlerden sonra dayanımda azalış olduğu Şekil 7.23, Şekil 7.24 ve Şekil 7.25'teki grafiklerde görülebilir.

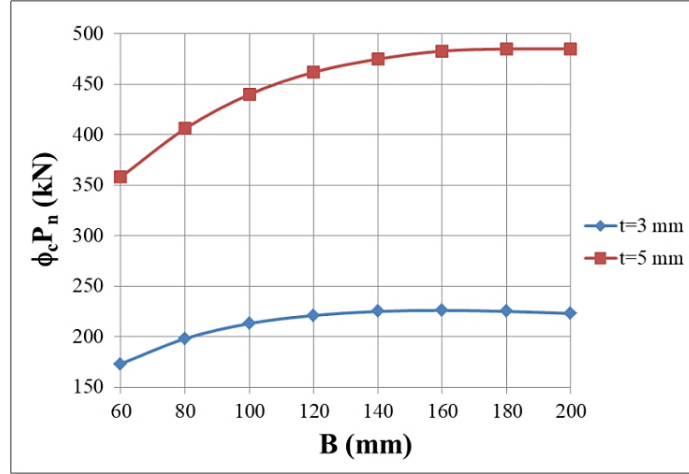
Şekil 7.26, Şekil 7.27 ve Şekil 7.28'de profillerin tasarım dayanımlarının başlık genişliğiyle değişimini gösteren grafikler sunulmuştur. Profillerin B değerleri arttıkça profillerin çoğunda tasarım dayanımlarının arttığı görülmektedir. Kalınlığı fazla olan profillerde B'nin dayanıma etkisi daha fazladır.

$H=150$ mm, $C=15$ mm boyutlarındaki profilin 1,5 ve 3 mm kalınlıklarında tasarım dayanımları 50-150 mm arasındaki başlık genişlikleri için hesaplanarak Şekil 7.26'daki grafikte verilmiştir. 1,5 mm kalınlıktaki profilde $B=50$ mm ve $B=150$ mm'de dayanım değerleri hemen hemen aynı olup bu profilde B'nin etkisi oldukça azdır. 3 mm kalınlıktaki profilde başlık genişliği 50 mm'den 150 mm'ye çıkarıldığında dayanım %15,9 artmıştır.



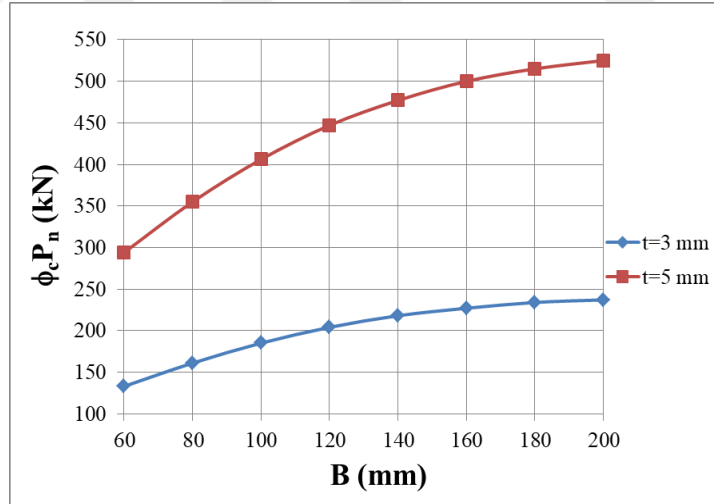
Şekil 7.26. $H=150$ mm, $C=15$ mm olan C profillerin $t=1,5$ mm ve $t=3$ mm için çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına başlık genişliğinin etkisi

Şekil 7.27'de dayanım grafiği verilen $H=300$ mm, $C=25$ mm boyutlu profilin 3 ve 5 mm kalınlıktaki tasarım dayanımları 60-200 mm arasındaki başlık genişliği değerleri için hesaplanmıştır. Başlık genişliği 200 mm'ye çıkarıldığında, 3 mm kalınlıktaki kesitte dayanım %28,9, 5 mm kalınlıktaki kesitte dayanım %35,5 artmıştır. 5 mm kalınlıktaki kesitte başlık genişliğinin dayanıma etkisinin daha fazla olduğu görülebilir.



Şekil 7.27. H=300 mm, C=25 mm olan C profillerin t=3 mm ve t=5 mm için çarpımalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına başlık genişliğinin etkisi

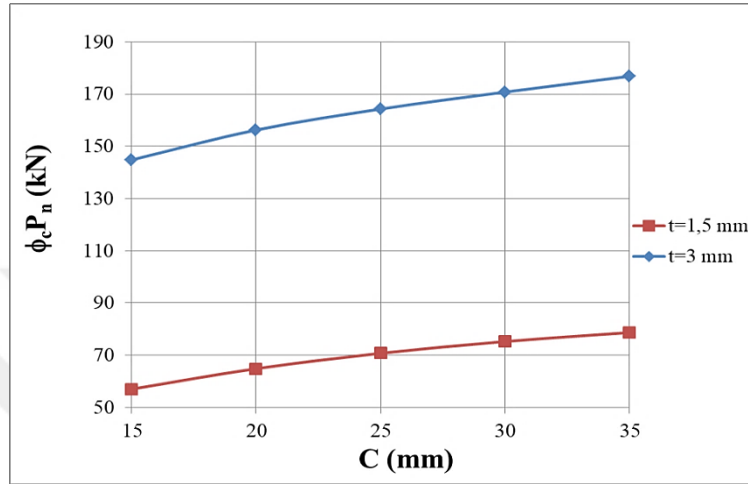
Şekil 7.28’de H=500 mm, C=30 mm olan 3 ve 5 mm kalınlıklarındaki profilin 60-200 mm aralığındaki başlık genişlikleri için hesaplanan tasarım dayanımı grafiği verilmiştir. Başlık genişliği 200 mm’ye kadar yükseltildiğinde, 3 mm kalınlıktaki kesitin dayanımı %78,2, 5 mm kalınlıktaki kesitin dayanımı %78,6 arttığı tespit edilmiştir. Kalınlığı yüksek olan profillerde B değerinin etkisi daha fazla olduğu görülebilir.



Şekil 7.28. H=500 mm, C=30 mm olan C profillerin t=3 mm ve t=5 mm için çarpımalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına başlık genişliğinin etkisi

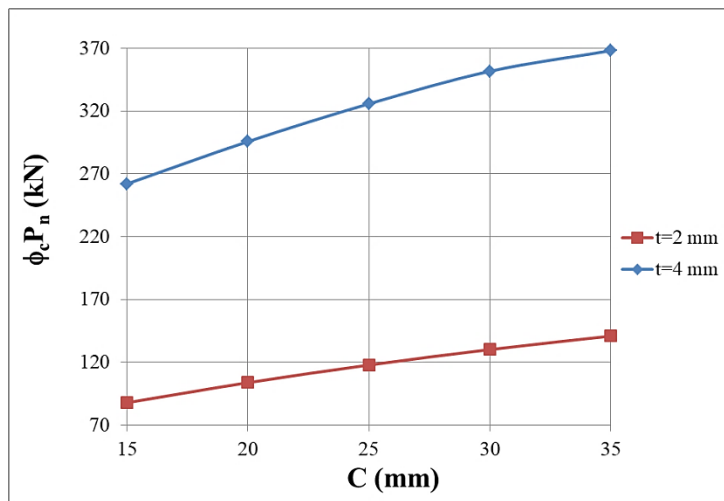
Şekil 7.29, Şekil 7.30 ve Şekil 7.31’de tırnak boyunun tasarım dayanımına etkisini incelemek amacıyla, profillerin 15-35 mm aralığındaki tırnak boyları için tasarım dayanımları hesaplanarak grafiklerle gösterilmiştir. Grafiklerden de fark edileceği gibi, tırnak boyu arttıkça profillerin dayanımları artmaktadır. Dayanım hesabı yapılırken,

profillerin iki farklı kalınlıktaki değerleri için hesap yapılmıştır. Profillerdeki dayanım artışı incelendiğinde, düşük kalınlıklardaki profillerde tırnak boyuna bağlı olarak dayanımdaki artış daha fazla olmaktadır. Şekil 7.29’da dayanım grafiği verilen H=150 mm, B=50 mm olan profilin t=1,5 mm’de C değeri 35 mm’ye çıkarıldığında dayanımı %38,0, t=3 mm’de %22,1 artış göstermiştir.



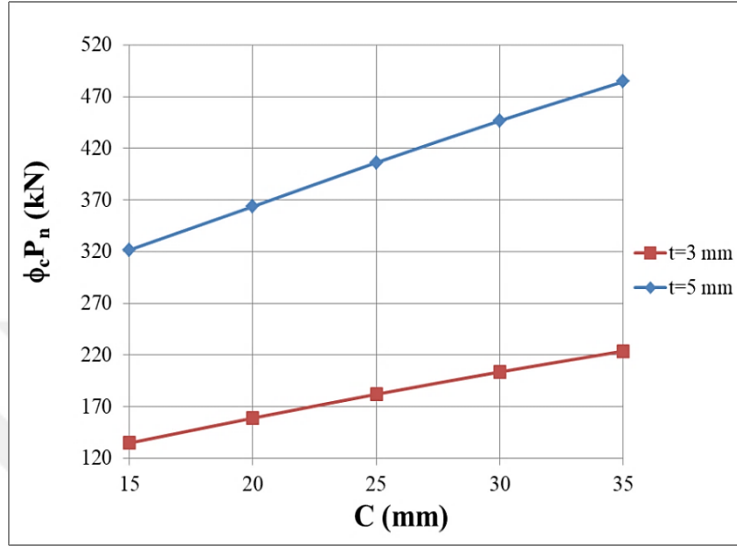
Şekil 7.29. H=150 mm, B=50 mm olan C profillerin t=1,5 mm ve t=3 mm için çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına tırnak boyunun etkisi

Şekil 7.30’da H=300 mm, B=100 mm boyutlarındaki profilin t=3 mm ve t=5 mm olduğu durumlarda tasarım dayanımlarının tırnak boyuyla değişimine ait grafik yer almaktadır. 3 mm kalınlıktaki kesitte dayanım %60,4, 5 mm kalınlıktaki kesitte %41,3 artmıştır.



Şekil 7.30. H=300 mm, B=100 mm olan C profillerin t=2 mm ve t=4 mm için çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına tırnak boyunun etkisi

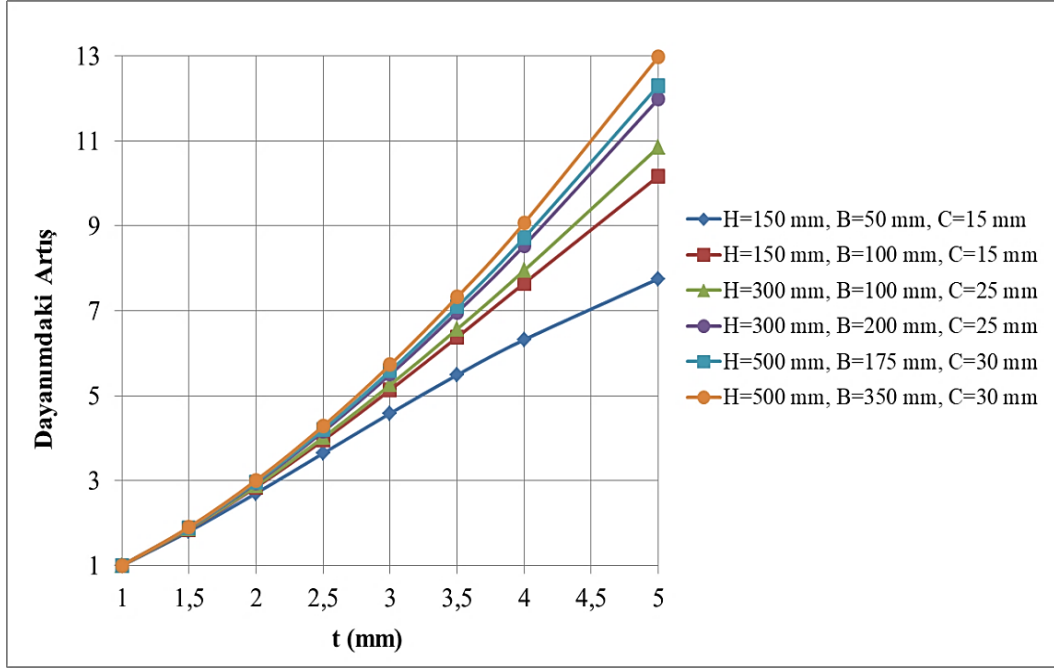
Şekil 7.31’de grafiği verilen, H=500 mm, B=120 mm boyutlu profilin 3 ve 5 mm kalınlıklarında hesaplanan tasarım dayanımları, diğer profillerle benzer şekilde tırnak boyu arttıkça artmıştır. 3 mm kalınlıktaki kesit için dayanım %65,9, 5 mm kalınlıktaki kesit için dayanım %50,6 artış göstermiştir.



Şekil 7.31. H=500 mm, B=120 mm olan C profillerin t=3 mm ve t=5 mm için çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına tırnak boyunun etkisi

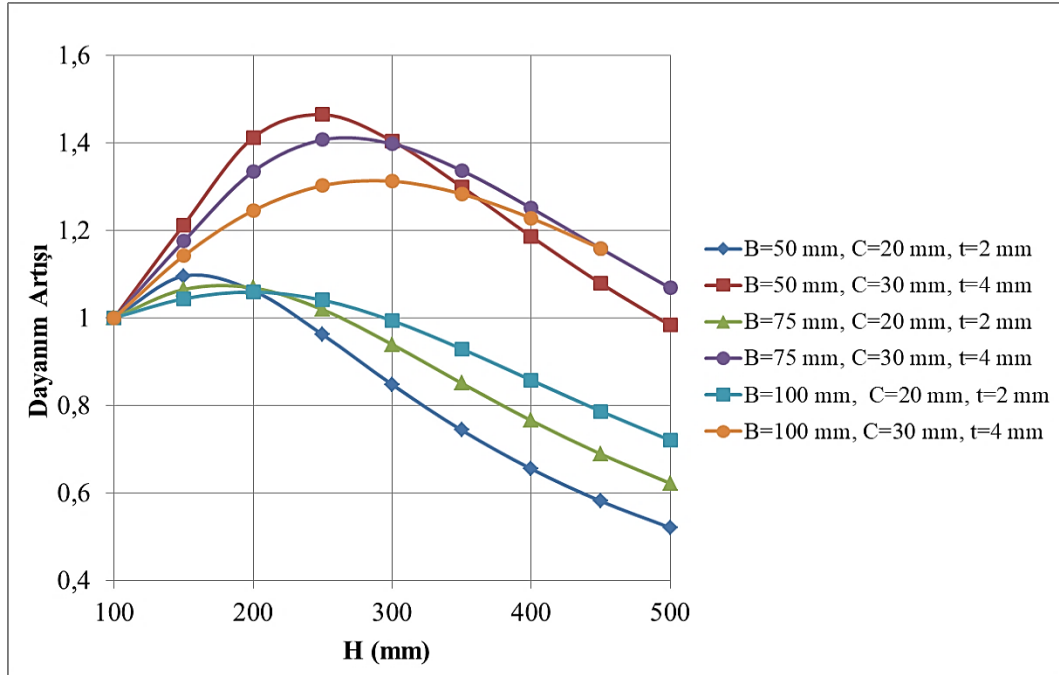
Şekil 7.29, Şekil 7.30 ve Şekil 7.31’deki grafiklerden de görüleceği gibi, tırnak boyu arttıkça profillerin dayanımlarında neredeyse doğrusal bir artış olduğu görülmektedir. Profillerin kalınlıklarının daha küçük olduğu kesitlerde tırnak boyunun dayanıma etkisi daha fazla olmuştur.

Şekil 7.32’de farklı gövde yüksekliği, başlık genişliği ve tırnak boyuna sahip C profillerin çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarındaki artışın kalınlıkla değişimini gösteren grafik sunulmuştur. Dayanım artış oranı, profillerin farklı kalınlıklarda hesaplanan dayanımlarının, 1 mm’deki kalınlıktaki dayanımlarına oranlanmasıyla elde edilmiştir. Profillerin kalınlıkları 1 mm’den 5 mm’ye yükseltildiğinde dayanımdaki artış oranı 7,75 ile 13,0 arasında değişmektedir. Örneğin, H=500 mm, B=350 mm ve C=30 mm boyutlarındaki profilin 1 mm kalınlıktaki tasarım dayanımı 39,8 kN, 5 mm’deki tasarım dayanımı 516 kN’dir. Dayanımdaki artış oranı 13,0 olarak bulunabilir. Grafik incelendiğinde, profillerin tümünde kalınlık arttıkça dayanımlarının arttığı görülebilir. Dayanımdaki artış oranı en yüksek olan H, B ve C değeri en büyük profildedir.



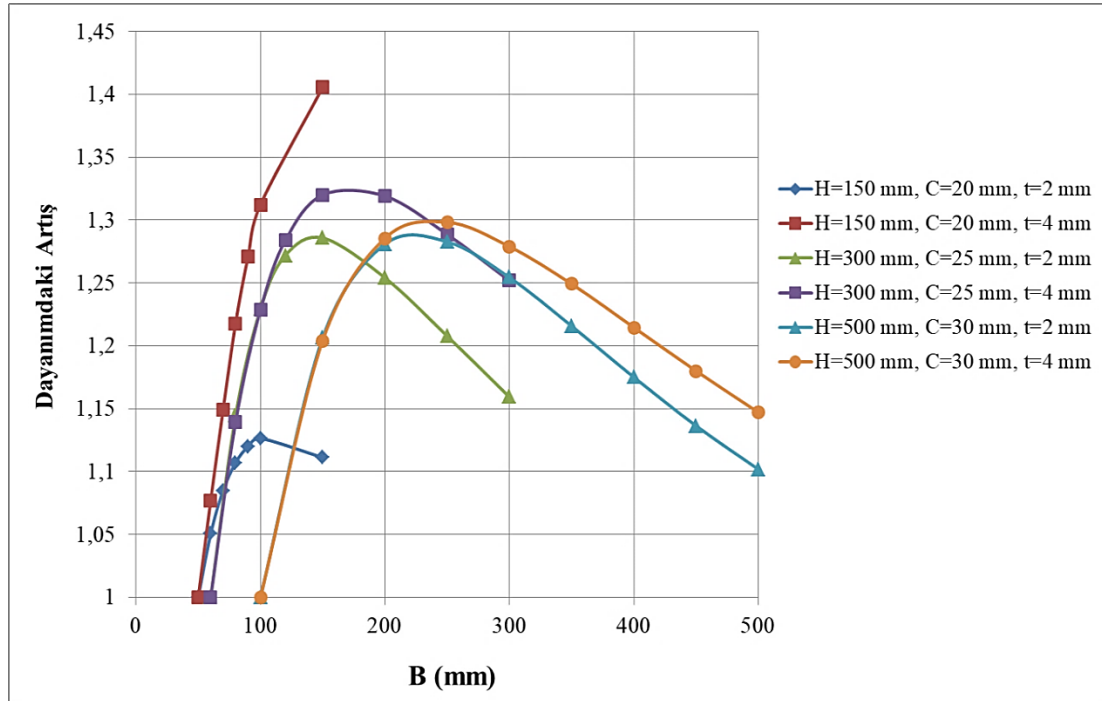
Şekil 7.32. Farklı boyutlara sahip C profillerin çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının kalınlığa (t) bağlı olarak artış oranı

Şekil 7.33'te farklı boyutlardaki altı profilin gövde yüksekliklerine bağlı olarak tasarım dayanımlarındaki artış grafiği sunulmuştur. Profillerin dayanımlarındaki artış oranı H=100 mm'deki tasarım dayanımlarına oranlanarak elde edilmiştir.



Şekil 7.33. Farklı boyutlara sahip C profillerin çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının gövde yüksekliğine (H) bağlı olarak artış oranı

Grafik incelendiğinde, $t=2$ mm kalınlıktaki üç profilin gövde yüksekliği 200 mm iken dayanımdaki artış oranları eşittir. Grafik incelendiğinde, $t=2$ mm kalınlıktaki profillerin, gövde yüksekliklerinin 200 mm'den sonraki değerleri için dayanım artış oranı azalmaktadır. Bu profillerin gövde yüksekliklerinin 300, 400 ve 500 mm olduğu durumlarda hesaplanan dayanımları, $H=100$ mm olduğunda hesaplanan dayanımından daha düşüktür. $t=4$ mm kalınlıktaki profillerin dayanım artış oranları ise $H=250$ mm'den sonra azalmaktadır. En yüksek dayanım artış oranı 1,46 olup $B=50$ mm, $C=20$ mm ve $t=4$ mm olan profildedir. 4 mm kalınlığa sahip profillerde dayanım artış oranı en yüksek olan profil, başlık genişliği en küçük olan profildir.

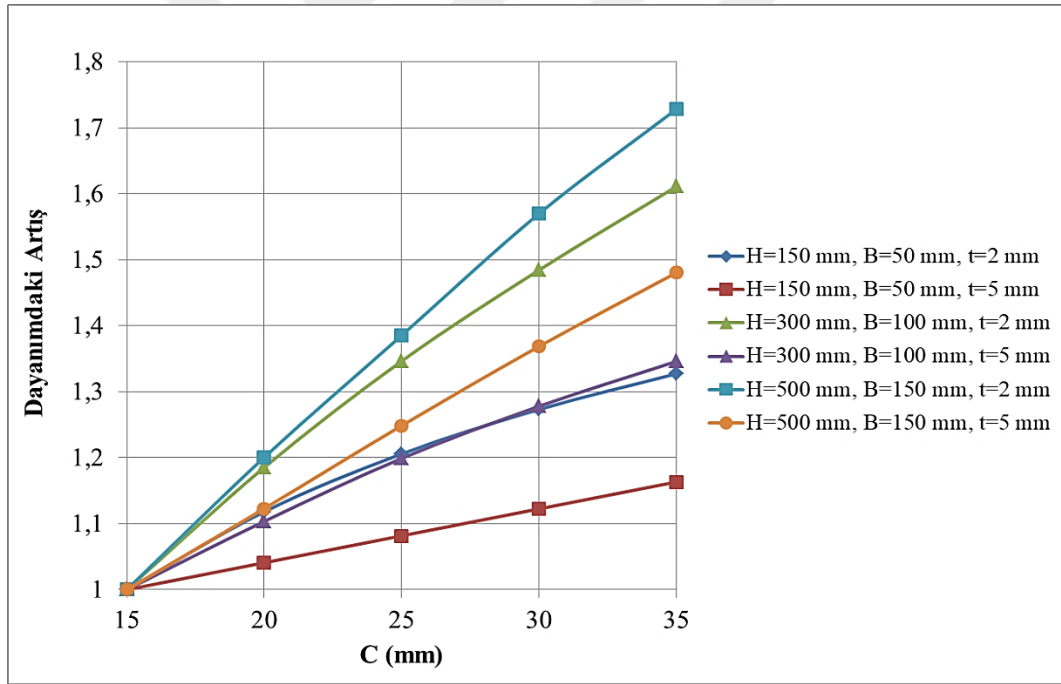


Şekil 7.34. Farklı boyutlara sahip C profillerin çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının başlık genişliğine (B) bağlı olarak artış oranı

Şekil 7.34'te grafikte farklı boyutlardaki C profillerin tasarım dayanımlarındaki artışın başlık genişliğiyle değişimi gösterilmiştir. Grafikte, $H=150$ mm, $C=20$ mm boyutlu profilin $t=2$ mm ve $t=4$ mm kalınlıklarındaki tasarım dayanımları, 50-150 mm arasındaki başlık genişlikleri (B) değerleri için hesaplanmıştır. Elde edilen dayanım değerleri $B=50$ mm'deki dayanım değerine oranlanarak dayanımdaki artış oranı elde edilmiştir. $t=4$ mm kalınlıktaki kesitteki dayanım artışı, $t=2$ mm kalınlıktaki kesitteki dayanım artışından daha fazladır. Ardından, $H=300$ mm, $C=25$ mm boyutlarındaki profilin $t=2$ mm ve $t=4$ mm kalınlıklarındaki tasarım dayanımları, 60-300 mm

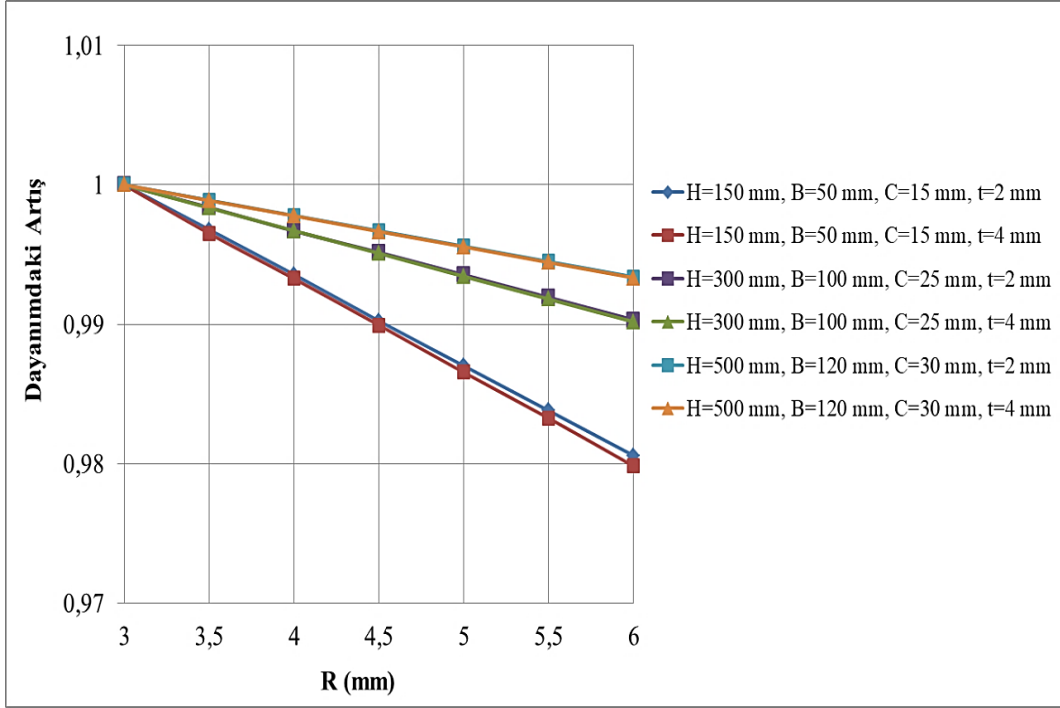
arasındaki B değerleri için hesaplanmıştır. $t=2$ mm kalınlığındaki kesit için dayanımdaki artış oranı $B=150$ mm iken en yüksek değeri almıştır. $t=4$ mm kalınlıktaki kesit için dayanımdaki artış oranı $B=150$ mm ve $B=200$ mm iken birbirine eşit olup 200 mm'den sonra azalmaya başlamıştır. Son olarak $H=500$ mm, $C=30$ mm boyutlarındaki profilin $t=2$ mm ve $t=4$ mm kalınlıklarındaki tasarım dayanımları 100-500 mm arasındaki B değerleri için belirlenmiştir. $t=2$ mm olan kesitte B değerinin 200-250 mm aralığında dayanım artışı en fazla, $t=4$ mm olan kesitte ise $B=250$ mm iken dayanım artış oranı en fazladır.

Şekil 7.35'te profillerin tasarım dayanımlarındaki artışın tırnak boyuyla değişimi gösterilmiştir. Grafiklerden de görüleceği gibi, tırnak boyu arttıkça tasarım dayanımları artmaktadır. Dayanımdaki artış oranı 15 mm tırnak boyundaki dayanıma oranlanarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.35. Farklı boyutlara sahip C profillerin çarpımalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının tırnak boyuna (C) bağlı olarak artış oranı

Profillerin tırnak boyu 35 mm olduğunda dayanımdaki artış oranı 1,16 ile 1,73 arasındadır. Dayanımdaki artış oranı en yüksek profil $H=500$ mm, $B=150$ mm ve $t=2$ mm olan profildir. Aynı H ve B değerlerine sahip profiller karşılaştırıldığında, kalınlığı az olan profillerin tümünde C değerinin artırılmasıyla dayanım artışı daha fazla olmuştur. C değerinin kalınlığı az profillerde dayanıma etkisi daha fazladır.



Şekil 7.36. Farklı boyutlara sahip C profillerin çarpımalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarının içbüküm yarıçapına (R) bağlı olarak artış oranı

Şekil 7.36’da profillerin içbüküm yarıçaplarına bağlı olarak dayanımlarındaki değişimi gösterilmiştir. Dayanım artış oranı, profillerin farklı yarıçaplardaki dayanımlarının 3 mm yarıçapındaki dayanımlarına oranlanarak elde edilmiştir. Grafikte yer alan tüm profillerin içbüküm yarıçapları arttıkça dayanımlarında azalma olduğu tespit edilmiştir. Profillerin dayanımlarındaki azalma en fazla %2,00 olup C profiller için içbüküm yarıçapının dayanıma etkisi, diğer boyutların (H, B, C, t) dayanıma etkisine nazaran daha azdır.

Bu kısımda incelenen farklı boyutlardaki C profillerin çarpımalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına etki eden en önemli boyutun kalınlık (t) olduğu söylenebilir. Kalınlığın dayanıma etkisi diğer geometrik boyutlardan (H, B, C, R) daha fazladır. Kalınlığı fazla olan profillerde H ve B değerlerinin dayanıma etkisi, kalınlığı az olan profillere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. C değerinin etkisi kalınlığı az olan profillerde daha fazladır. R değerinin etkisi ise diğer boyutlara kıyasla oldukça azdır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, soğuk şekillendirilmiş çelik C profillerin eksenel basınç davranışları incelenmiştir. Bu amaçla, Türkiye’de soğuk haddelenmiş çelik profil satışı yapan üç farklı firmanın üretmiş olduğu C profillerin eksenel basınç kuvveti dayanımları AISI S100-16 (AISI, 2016) yönetmeliğindeki tasarım ilkelerine göre elde edilmiştir. Elde edilen dayanım değerleri tablolar halinde sunulmuştur. Çalışmada sunulan tabloların tasarım hesaplamalarında mühendis ve mimarlara kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir.

Dayanım hesaplarına geçilmeden önce, tezde incelenen profillerin dayanım hesabı için gerekli bazı enkesit özellikleri firmaların kataloglarında yer almaması nedeniyle profillerin tüm enkesit özellikleri AISI S100-16 (AISI, 2016) yönetmeliğindeki formüllerle hesaplanmış ve tablolar halinde gösterilmiştir. Bu sayede kataloglarda yer almayan enkesit özellikleri elde edilerek, bu enkesit özellikleri dayanım hesaplarında kullanılmıştır.

Bu çalışmada incelenen profillerin tasarım dayanımları, genel burkulmanın engellendiği ve mevcut olduğu durumlar için ayrı ayrı hesaplanarak tablolar halinde sunulmuştur. Ayrıca C profillerde basınç davranışını belirleyen önemli sınır durumlardan biri olan çarpılmalı burkulma için profillerin çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımları da hesaplanmıştır. Elde edilen dayanım değerleri tablolarda sunulmuştur.

Profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımları ve her enkesit parçası için yerel burkulma oluşmadan taşıyabilecekleri en büyük yükler hesaplanmıştır. İncelenen profillerin çoğunda gövdelerin, başlık ve tırnaklara kıyasla daha narin olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada dayanım hesabının ardından, C profillerin geometrik özelliklerinin akma gerilmesindeki ve çarpılmalı burkulma gerilmesindeki tasarım dayanımlarına etkisi araştırılmıştır. Her iki durum için incelenen profillerin tasarım dayanımları başlık genişliği ve gövde yüksekliklerine göre karşılaştırılmıştır. Aynı gövde yüksekliğine ve aynı başlık genişliğine sahip profillerin dayanımlarının farklı olmasındaki en büyük etkenin kalınlık olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmada sadece incelenen profillerle sınırlı kalınmamış, farklı boyutlardaki profiller varsayımsal olarak geliştirilmiş ve bu profillerin kalınlık (t), gövde yüksekliği (H), başlık genişliği (B), tırnak (rijitleştirici) boyu (C) ve içbükmü yarıçapına (R) bağı olarak tasarım dayanımlarımdaki değışimi hem akma gerilmesi için hem de çarpılmalı burkulma gerilmesi için ayrıntılı şekilde incelenmiştir.

Profillerin akma gerilmesindeki tasarım dayanımlarında genel olarak H, B, C ve t boyutları arttıkça dayanımları da artmıştır ancak dayanım artışına en çok etki eden boyut kalınlık (t) olmuştur. Kalınlığın dört kat artırılmasıyla dayanımın yaklaşık 12,8 katına çıkabildiği gözlenmiştir. Kalınlığı fazla olan profillerde H ve B boyutlarının dayanıma etkisinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. H boyutunun artırılmasıyla 1,52, B boyutunun artırılmasıyla 1,46 kat kadar dayanım artmıştır. C boyutunun dayanıma etkisi kalınlığı az olan profillerde daha fazla olduğu tespit edilmiştir. C boyutu ile dayanım 1,35 katına çıkmıştır. R boyutunun artırılmasının dayanıma etkisi oldukça az olup profillerin dayanımında en fazla %2,00 oranında etkisi olduğu belirlenmiştir.

Profillerin çarpılmalı burkulma dayanımlarına etki eden en önemli boyutun kalınlık olduğu tespit edilmiştir. Kalınlığın dört kat artırılmasıyla çarpılmalı burkulma dayanımının 13,0 kat büyüyebileceği gözlenmiştir. Kalınlığı 2 ve 3 mm olan profillerin çarpılmalı burkulma dayanımları genellikle H değeri 200-250 mm aralığında, kalınlığı 4 ve 5 mm olan profillerde ise 250-300 mm olduğunda en yüksek değeri almıştır. Kalınlığı büyük olan profillerde H ve B boyutlarının çarpılmalı burkulma dayanımına etkisi daha fazla olmuştur. H'nin artırılmasıyla dayanımda 1,46, B'nin artırılmasıyla 1,41 kat büyümenin olduğu belirlenmiştir. C boyutunun artırılması büyük başlık genişliği ve düşük kalınlığa sahip profillerin dayanımını daha çok artırmıştır. C boyutunun 20 mm kadar artırılmasıyla dayanımın 1,73 kat büyüyebileceği gözlenmiştir. R boyutunun dayanıma etkisi diğer boyutlara kıyasla dayanıma etkisi daha azdır.

Bu çalışmada incelenen C profillerin sadece eksenel basınç altındaki davranışları incelenmiş olup farklı yükler altındaki davranışlarının incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca bu çalışmada C profillerin çarpılmalı burkulma dayanımları yalnız AISI S100-16 (AISI, 2016) yönetmeliğinde tanımlanan formüllerle hesaplanmış olup gelecek çalışmalarda bu profillerin çarpılmalı burkulma dayanımları farklı yöntemlerle hesaplanabilir.

KAYNAKLAR

- American Iron and Steel Institute (AISI). (2014). *AISI Manual - Cold Formed Steel Design –1* (2013 Edition). USA.
- American Iron and Steel Institute, (2016). *AISI S100-16: North American Specification (NAS) for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members* (2016 Edition, 1st Printing). USA.
- B.W. Schafer. (2006)., Distortional Buckling of Cold-Formed Steel Columns, *American Iron and Steel Institute*, Research Report RP00-1, 2-5.
- Çelik H. (2020). Soğuk Şekillendirilmiş Çelik U Profillerin Enkesit Özelliklerinin Ve Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 624248.
- Genç, F. (2008). Soğukta Şekil Verilmiş İnce Cidarlı C Kesit Eğilme Elemanlarının Davranış ve Dayanımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 0609021044.
- Goodier, J. N. (1941). The Buckling of Compressed Bars by Torsion and Flexure, Cornell University Experiment Station, USA.
- European Committee for Standardization, (2006). *EN 1993-1-3: Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1-2: General rules for Cold-Formed Members and Sheeting*, Brussels.
- European Committee for Standardization, (2006). *EN 1993-1-3: Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*.
- Macdonald, M., Kulatunga, M. P. (2013). Finite Element Analysis of Cold-Formed Steel Structural Members with Performations Subjected to Compression Loading, University of Glasgow Caledonian, School of Engineering & Built Environment, Scotland.
- Mojaddidy, K., Göğüş, M. T. (2013). Eksenel Yüklü Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Elemanların Dayanımlarının Farklı Şartnamelere Göre İncelenmesi, *XVIII. Ulusal Mekanik Kongresi*, Gaziantep, Türkiye, 26 - 30 Ağustos 2013.
- Pinto, A. E. M. R. (2010). Local and Distortional Buckling of Cold-Formed Steel Members, University of Lisbon, MSc Dissertation in Civil Engineering, Portugal.
- Piyawat, K., Ramseyer, C., Kang, T. H.-K. (2013). Development of an Axial Load Capacity Equation for Doubly Symmetric Built-up Cold-Formed Sections, *Journal of Structural Engineering*, 139 (12): 04013008, 1-13.

- Ranawaka, T. (2006). Distortional Buckling Behaviour of Cold-Formed Steel Compression Members at Elevated Temperatures, School of Urban Developments Queensland University of Technology, Australia.
- Stahl, İ. Z. (2002). Häuser in Stahl-Leichtbauweise, Dusseldorf, 15-27.
- TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018). *T.C. Resmi Gazete* (30364, 18 Mart 2018) T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- Timoshenko, S. P. (1945). Theory of Bending, Torsion and Buckling of Thin-Walled Members of Open Cross Section, Journal of the Franklin Institute, UK.
- TS 11372: Çelik Yapılar-Hafif-Soğukta Şekil Verilmiş Profillerle Oluşturulan Hesap Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1994.
- Türker, İ. Y. (2020). *Çelik Yapılar*. Türk Yapısal Çelik Derneği, https://tuksa.org/tr/celik_yapilar_yazi.aspx?yazi=1016, (Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2021).
- URL-1: http://www.almetsan.com/en/tr/urunler/yapi/tablo/CEE_tablo_p.pdf (Ziyaret tarihi: 1 Ekim 2020).
- URL-2: <http://www.haskarprofil.com/pdf/haskar-cee-profil.pdf> (Ziyaret tarihi: 1 Ekim 2020).
- URL-3: <https://www.hekimprofil.com/c-profil> (Ziyaret tarihi: 1 Ekim 2020).
- URL-4: <https://www.novasteell.com/index.php/sistem-tanimi/> (Ziyaret tarihi: 25 Temmuz 2021).
- URL-5: <https://www.manufacturingguide.com/en/roll-forming> (Ziyaret tarihi: 25 Temmuz 2021).
- URL-6: https://www.ahmetnemutlumetal.com/abkant-bukum_3_h_tr.html (Ziyaret tarihi: 4 Ağustos 2021).
- URL-7: <https://apec.com.tr/sogukta-sekil-verilmis-ince-cidarli-celik-profiller/> (Ziyaret tarihi: 5 Ağustos 2021).
- URL-8: <https://statikrapor.com/hafif-%C3%A7elik-hakk%C4%B1nda> (Ziyaret tarihi: 5 Ağustos 2021).
- URL-9: <https://uslularhadde.com/soguk-sekillendirilmis-celik-yapi-elemanlari> (Ziyaret tarihi: 10 Ağustos 2021).
- URL-10: <https://www.sardemirmetal.com/index.php/c-profil/> (Ziyaret tarihi: 1 Eylül 2021).

URL-11: <https://teknoloji-tasarim.com/celik-yapi-nedir/> (Ziyaret tarihi: 1 Eylül 2021).

URL-12: https://www.yapikatalogu.com/kaba-yapi/betonalti-trapez-sac-doseme/haskar-celik-boru-beton-alti-trapez-sac-levha_13411 (Ziyaret tarihi: 10 Eylül 2021).

Yu, W.-W., LaBoube, R. A., Chen, H. (2020). Cold Formed Steel Design, Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Yağmur H., Okay F., Pınarbaşı Çuhadaroğlu S., Soğuk Şekillendirilmiş Çelik C Profillerin Eksenel Basınç Davranışlarının İncelenmesi, *3. Ulusal Başkent Disiplinler Arası Bilimsel Çalışmalar Kongresi*, Ankara, 14-15 Mart 2021.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Düzce’de tamamladı. 2013 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2018 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2018 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başladığı yüksek lisans eğitimine halen devam etmektedir.

