

**ÇELİK DEPO RAF SİSTEMLERİNDE
KULLANILAN DİKME VE AYAKLARIN
BURKULMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU**

Safa ŞENAYSOY



T.C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK DEPO RAF SİSTEMLERİNDE KULLANILAN DİKME VE AYAKLARIN
BURKULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Safa ŞENAYSOY

Prof. Dr. Yaşar PALA

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

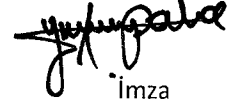
BURSA – 2017

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Safa ŞENAYSOY tarafından hazırlanan "ÇELİK DEPO RAF SİSTEMLERİNDE KULLANILAN DİKME VE AYAKLARIN BURKULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU " adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/~~oy çokluğu~~ ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Yaşar PALA



İmza

Başkan : Prof. Dr. Yaşar PALA

Uludağ Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Yrd. Doç. Dr. Kenan TÜFEKÇİ

Uludağ Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Üye : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ

Bursa Teknik Üniversitesi

Doğa Bilimleri, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.



Prof. Dr. Ali BAYRAM

Enstitü Müdürü

03/01/2017

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

03/01/2017

Safa ŞENAYSOY



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇELİK DEPO RAF SİSTEMLERİNDE KULLANILAN DİKME VE AYAKLARIN BURKULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Safa ŞENAYSOY

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yaşar PALA

Çelik yapı endüstrisinde soğuk şekillendirilmiş elemanların kullanımı yüksek yapısal verimlilik, yüksek dayanım/ağırlık oranı, çok çeşitli kesit şekilleri ve düşük üretim maliyeti gibi özelliklerinden dolayı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlar depo raf sistemlerinde dikme, yatay taşıyıcı ve tava raf gibi depo elemanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında depo raf sistemlerinde kullanılan açık kesitli soğuk şekillendirilmiş dikmelerin burkulma davranışının incelenmesi ve iyileştirilmesi ele alınmaktadır. Öncelikle depo raf sistemlerinde kullanılan dikmenin burkulma davranışı deneysel, sonlu elemanlar yöntemiyle ve doğrudan dayanım yöntemiyle incelenmiştir. Bundan sonra, dikme kesitinin burkulma yükünü arttırmak için çalışma dört gruba ayrılmıştır. Bu gruplardan ilki, kesitin flanşında bulunan güçlendiricinin 90° katlı olması durumudur. Bu durum için, güçlendiricinin sırttan 4 farklı mesafede olduğu durum düşünülmüştür. İkinci grupta, köşeli deliklere sahip dikmelerin yerine radyüs delikli kolonlar kullanılmıştır. Üçüncü grupta, kesitin sırt bölgesinde bulunan güçlendiricinin farklı derinliklerde olması durumu göz önüne alınmıştır. Son grupta ise, dikme flanşının ucunda bulunan açılı güçlendiricinin 90° katlı olduğu durum göz önünde bulundurulmuştur. Sonuç olarak, deneysel çalışmalar, sonlu elemanlar ve doğrudan dayanım yöntemi sonuçları birleştirilerek, maksimum kritik burkulma yükünü veren kesit seçilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çelik, Dikme, Burkulma, Sonlu Eleman Analizi, Optimizasyon, Doğrudan Dayanım Yöntemi

2017, xii + 109 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF BUCKLING BEHAVIOR OF UPRIGHTS AND FRAMES USED IN STEEL STORAGE RACK SYSTEMS

Safa ŞENAYSOY

Uludag University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Yaşar PALA

The use of cold-formed steel members in the steel structure industry have been increasing day by day since they have high ratio of strength / weight, low production costs, various cross – section shapes. Due to these properties, cold formed steel members are commonly used as upright, pallet beam and platform rack in storage rack systems. In this thesis, buckling behavior of the cold formed steel uprights with open cross – section used in storage rack system are studied. In addition, the load-carrying capacity of the cold formed steel uprights is investigated. First, buckling behavior of the column used in a storage rack system is investigated using experimental method, finite element method and direct strength method. Then, the study is divided into four groups in order to improve buckling load of column's cross - section. The first of these groups is the group in which the stiffener on the flange is folded at 90°. For this condition, four different distances of the stiffener from the web are considered. In the second group, the column structure with radius perforations is used instead of the column which has cornered perforations. In the third group, the condition in which different depths of stiffener located on the web is considered. In the last group, the column which has the stiffener on the tip of the flange folded at 90° is analyzed. As a result, the cross - section which gives the ultimate critical buckling load is selected by combining the experimental, finite element results and direct strength method.

Keywords: Steel, Upright, Buckling, Finite Element Analysis, Optimization, Direct Strength Method

2017, xii + 109 pages

TEŞEKKÜR

“ÇELİK DEPO RAF SİSTEMLERİNDE KULLANILAN DİKME VE AYAKLARIN BURKULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU” isimli tez çalışmamın başından itibaren her aşamasında bilgisi ve tecrübesi ile yol gösteren ve her türlü desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Yaşar PALA’ ya içten teşekkürlerimi sunarım.

İmalat ve test çalışmalarının yürütüldüğü ÜÇGE DRS firmasının tüm personellerine desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım süresince bana en büyük desteği veren aileme müteşekkir olduğumu belirtmek isterim.

Bu çalışmanın, yeni çalışmalara ışık tutmasını ve ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.



Safa ŞENAYSOY
03/01/2017

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Literatür Çalışması	3
2.2. Soğuk Şekillendirilmiş Çelikler.....	7
2.2.1. Soğuk Şekillendirilmiş Çeliklerin Üretimi.....	8
2.2.2. Soğuk Şekil Verilmiş Çelik Elemanların Yapısal Uygulamaları	9
2.2.3. Soğuk Şekillendirilmiş Çeliklerin Avantajları ve Dezavantajları	13
2.3. Genel Bilgiler	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM	16
3.1. Kolonların Burkulması.....	16
3.1.1. Elastik Dengenin Sınırları	18
3.2. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Dikmelerin Burkulma Çeşitleri	19
3.2.1. Akma.....	20
3.2.2. Global Dikme Burkulması	20
3.2.3. Yerel (Local) Burkulma.....	26
3.2.4. Distorsiyonel Burkulma.....	28
3.3. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Dikmelerin Kapasite Hesabı Üzerine Geliştirilmiş Standartlar.....	29
3.4. Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü Standardı (AISI S100 – 2007)	30
3.4.1. Ağırlık Merkezinden Yüklenmiş Dikmeler	30
3.4.2. Doğrudan Dayanım Yöntemi (DSM) Kullanılarak Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Yapısal Elemanlarının Tasarımı	35

3.5 Sonlu Çubuk Yöntemi.....	39
3.5.1. Azaltılmış Kalınlık Yöntemi.....	40
3.5.2. Doğrudan Dayanım Yöntemini (DSM) Kullanarak Çelik Depo Raf Sistemlerinde Kullanılan Dikmenin Kritik Burkulma Yüklerinin Belirlenmesi.....	42
3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi	48
3.6.1. Lineer Burkulma Analizi.....	48
3.6.2. Nonlinear Burkulma Analizi ile Çelik Depo Raf Sistemlerinde Kullanılan Dikmelerin Kritik Burkulma Yükünün Belirlenmesi	49
3.7. Çelik Depo Raf Sistemlerinde Kullanılan Dikmelerin Deneysel Olarak Kritik Burkulma Yüklerinin Tespit Edilmesi.....	55
3.8. Çelik Depo Raf Sistemlerinde Kullanılan Dikmelerin Üretildiği Çelik Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	56
4. TARTIŞMALAR VE BULGULAR.....	57
4.1. Orijinal Kesitin Flanşında Bulunan Güçlendiricinin Tam Katlı Olması Durumu ...	57
4.2. Dikmenin Sırt Bölgesinde Bulunan Deliklerin Radyüslü Olması Durumu	65
4.3. Flanş Üzerinde Bulunan Tam Katlı Kısımın Sırttan Farklı Uzaklıklarda Olması Durumu	74
4.4. Dikme Kesitinin Sırt Bölgesinde Bulunan Güçlendiricinin Derinliğinin Arttırılması Durumu	81
4.5. Flanş Ucunda Bulunan Uzantının (Dudak) Tam Katlı Olması Durumu	92
4.6. Nihai Dikme Kesitin Belirlenmesi	99
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	101
KAYNAKLAR.....	106
ÖZGEÇMİŞ.....	109

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklamalar
M	Moment
P	Eksenel yük
E	Elastisite modülü
μ	Poisson oranı
I	Atalet momenti
P_{kr}	Kritik burkulma yükü
L	Kolon boyu
$L_{eş}$	Eşdeğer kolon boyu
A	Kesit alanı
r	Jirasyon yarıçapı
σ_{kr}	Kritik burkulma gerilmesi
λ	Narinlik oranı
σ_y	Akma gerilmesi
P_T	Tanjant modülü yükü
σ_T	Tanjant modülü gerilmesi
E_t	Tanjant modülü
P_T	Azaltılmış kritik burkulma yükü
σ_R	Azaltılmış kritik burkulma gerilmesi
E_r	Azaltılmış modül
I_x	x eksenine göre atalet momenti
I_y	y eksenine göre atalet momenti
u	x eksenini doğrultusundaki yer değiştirme
v	y eksenini doğrultusundaki yer değiştirme
ϕ	Dönme açısı
x_0	Kayma merkezinin x eksenindeki koordinatı

y_0	Kayma merkezinin y eksenindeki koordinatı
G	Kayma modülü
J	St. Venant burulma sabiti
C_w	Burulmanın çarpılma sabiti
r_x	x eksenine göre jirasyon yarıçapı
r_y	x eksenine göre jirasyon yarıçapı
r_0	Kayma merkezine göre kesitin jirasyon polar yarıçapı
P_x	x eksenine göre euler eğilmeli burkulma yükü
P_y	y eksenine göre euler eğilmeli burkulma yükü
P_z	z eksenine göre euler eğilmeli burkulma yükü
σ_{TFO}	Eğilmeli - burulmalı burkulma gerilmesi
A_e	Efektif alan
A_g	Kesitin brüt alanı
P_{crd}	Distorsiyonel burkulma yükü
σ_d	Distorsiyonel burkulma gerilmesi
P_{nl}	Yerel (lokal) burkulma yükü
P_{nd}	Distorsiyonel burkulma yükü
P_{ne}	Elastik global burkulma yükü
t	Sac kalınlığı
t_{rl}	Yerel (lokal) burkulma için azaltılmış sac kalınlığı
t_{rd}	Distorsiyonel burkulma için azaltılmış sac kalınlığı
t_{rg}	Global burkulma için azaltılmış sac kalınlığı
L_p	Delik yüksekliği
B_p	Delik genişliği

Kısaltmalar

DSM

Açıklamalar

Doğrudan dayanım yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Soğuk şekillendirilmiş çelik kesitleri	7
Şekil 2. 2 Sürekli şekil verme makinesi	8
Şekil 2. 3 Soğuk şekil verme işlem adımları	9
Şekil 2. 4 Yapısal çerçevede kullanılan soğuk şekillendirilmiş kesitler	10
Şekil 2. 5 Soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlardan oluşturulmuş bina	10
Şekil 2. 6 Paletli depo raf sistemi	11
Şekil 2. 7 Paletli depo raf sistemlerinin elemanları	12
Şekil 2. 8 Panel ve döşeme kesitleri	13
Şekil 2. 9 Soğuk şekillendirilmiş dikme elemanları	15
Şekil 3. 1 İki ucu basit mesnetlenmiş kolon	16
Şekil 3. 2 Farklı sınır şartlarındaki kolonların efektif uzunlukları	18
Şekil 3. 3 Euler hiperbolü	19
Şekil 3. 4 Burulmalı – Eğilmeli burkulma esnasındaki yer değiştirmeler	23
Şekil 3. 5 Çift simetri eksenine sahip kesitler	24
Şekil 3. 6 Tek simetri eksenine sahip olan kesitler	25
Şekil 3. 7 Dikmenin yerel burkulması	27
Şekil 3. 8 Kesit geometrisi	27
Şekil 3. 9 Çeşitli açık kesitlerde meydana gelen distorsiyonel burkulma örnekleri	29
Şekil 3. 10 Dikme kesitinin sırt ve flanş ölçüleri	33
Şekil 3. 11 Dikme kesitinin flanşında bulunan uzantının ölçüleri	33
Şekil 3. 12 Doğrudan dayanım için dikme kesit ölçüleri	36
Şekil 3. 13 C kesit için sonlu elemanlar ve sonlu çubuk yaklaşımı	39
Şekil 3. 14 Delikli dikme	40
Şekil 3. 15 Delikli dikme ölçüleri	41
Şekil 3. 16 Dikme kesitinin ve deliklerinin ölçüleri	42
Şekil 3. 17 Global burkulma modu için CUFSM programında modellenmiş dikme kesiti	43
Şekil 3. 18 Dikme kesitine uygulanan kuvvet	44
Şekil 3. 19 Dikme kesitinin sınır şartları	44
Şekil 3. 20 2400 mm uzunluğa sahip dikmenin burkulma şekli ve yük faktörü sonucu	45
Şekil 3. 21 CUFSM programında modellenmiş dikme kesiti	46
Şekil 3. 22 Dikme kesitine uygulanan kuvvet	46
Şekil 3. 23 1300 mm uzunluğa sahip dikmenin burkulma şekli ve yük faktörü sonucu	47
Şekil 3. 24 Lineer statik analizde dikmenin sınır şartları	50
Şekil 3. 25 Lineer burkulma analizi sonucu elde edilen burkulma şekli	50
Şekil 3. 26 Nonlineer statik analizde dikmenin sınır şartları	51
Şekil 3. 27 2400 mm boya sahip olan dikmenin nonlineer analiz sonucu burkulma şekli	52
Şekil 3. 28 2400 mm boya sahip olan dikmenin yer değiştirmeye – kuvvet grafiği	52

Şekil 3. 29 1300 mm boya sahip olan dikmenin nonlinear analiz sonucu burkulma şekli	53
Şekil 3. 30 1300 mm boya sahip olan dikmenin yer değiştirme – kuvvet grafiği	53
Şekil 3. 31 300 mm boya sahip olan dikmenin nonlinear analiz sonucu burkulma şekli	54
Şekil 3. 32 300 mm boya sahip olan dikmenin yer değiştirme – kuvvet grafiği	54
Şekil 3. 33 Hidrolik basma test cihazı	55
Şekil 3. 34 Çekme testi numunelerinin ölçüleri	56
Şekil 3. 35 Gerilme – Uzama eğrisi	56
Şekil 4. 1 Dikme kesit ölçüleri	57
Şekil 4. 2 Dikme kesitlerinin kayma merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki mesafe	58
Şekil 4. 3 Nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=2400$ mm)	58
Şekil 4. 4 Doğrudan dayanım yöntemiyle elde edilen burkulma sonuçları ($L=2400$ mm)	59
Şekil 4. 5 Nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=1300$ mm)	59
Şekil 4. 6 Doğrudan dayanım yöntemiyle elde edilen burkulma sonuçları ($L=1300$ mm)	60
Şekil 4. 7 Nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=300$ mm)	61
Şekil 4. 8 $L=2400$ mm için burkulma mod şekilleri	61
Şekil 4. 9 $L=1300$ mm için burkulma mod şekilleri	62
Şekil 4. 10 $L=300$ mm için burkulma mod şekilleri	62
Şekil 4. 11 $L = 2400$ mm için burkulma test sonuçları	63
Şekil 4. 12 $L = 2400$ mm için burkulma şekli sonuçları	63
Şekil 4. 13 $L = 1300$ mm için burkulma test sonuçları	64
Şekil 4. 14 $L = 1300$ mm için burkulma şekli sonuçları	64
Şekil 4. 15 Dikmelerin delik şekilleri	65
Şekil 4. 16 Nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=2400$ mm)	66
Şekil 4. 17 Nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=1300$ mm)	66
Şekil 4. 18 Nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=300$ mm)	66
Şekil 4. 19 Orijinal kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları	67
Şekil 4. 20 Orijinal kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları	67
Şekil 4. 21 Orijinal kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları	67
Şekil 4. 22 Alttan katlı kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları	68
Şekil 4. 23 Alttan katlı kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları	68
Şekil 4. 24 Alttan katlı kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları	68
Şekil 4. 25 Üstten katlı kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları	69
Şekil 4. 26 Üstten katlı kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları	69
Şekil 4. 27 Üstten katlı kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları	69
Şekil 4. 28 $L=2400$ mm için burkulma mod şekilleri	70
Şekil 4. 29 $L=1300$ mm için burkulma mod şekilleri	71
Şekil 4. 30 $L=300$ mm için burkulma mod şekilleri	71
Şekil 4. 31 $L = 2400$ mm için radyüs delikli dikmelerin burkulma test sonuçları	72
Şekil 4. 32 $L = 2400$ mm için radyüs delikli dikmelerin burkulma şekli sonuçları	72

Şekil 4. 33 $L = 1300$ mm için radyüs delikli dikmelerin burkulma şekli sonuçları	73
Şekil 4. 34 $L = 1300$ mm için radyüs delikli dikmelerin burkulma mod şekli.....	73
Şekil 4. 35 Tam katlı kısmın farklı mesafelerden katlanma hali.....	74
Şekil 4. 36 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafe	75
Şekil 4. 37 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=2400$ mm)	76
Şekil 4. 38 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin doğrudan dayanım yönteminden elde edilen burkulma yükü sonuçları ($L=2400$ mm)	76
Şekil 4. 39 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin burkulma mod şekilleri ($L=2400$ mm).....	77
Şekil 4. 40 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=1300$ mm)	78
Şekil 4. 41 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin doğrudan dayanım yönteminden elde edilen burkulma yükü sonuçları ($L=1300$ mm)	78
Şekil 4. 42 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin burkulma mod şekilleri ($L=1300$ mm).....	79
Şekil 4. 43 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=300$ mm)	80
Şekil 4. 44 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin burkulma mod şekilleri ($L=300$ mm).....	80
Şekil 4. 45 Farklı Sırt Derinliklerine Sahip Kesitler	81
Şekil 4. 46 Farklı sırt derinliğine sahip dikme kesitlerinin ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafeleri	82
Şekil 4. 47 Farklı sırt derinliğine sahip dikme kesitlerinin nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=2400$ mm)	82
Şekil 4. 48 Farklı sırt derinliğine sahip dikme kesitlerinin doğrudan dayanım yöntemi sonuçları ($L=2400$ mm)	83
Şekil 4. 49 $L=2400$ mm için 2 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri..	84
Şekil 4. 50 $L=2400$ mm için 4 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri..	85
Şekil 4. 51 $L=2400$ mm için 6 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri..	85
Şekil 4. 52 $L=2400$ mm için 8 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri..	85
Şekil 4. 53 $L=2400$ mm için 10 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri..	86
Şekil 4. 54 Farklı sırt derinliğine sahip dikme kesitlerinin nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=1300$ mm)	86
Şekil 4. 55 Farklı sırt derinliğine sahip dikme kesitlerinin nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=1300$ mm)	87
Şekil 4. 56 $L=1300$ mm için 2 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri..	87
Şekil 4. 57 $L=1300$ mm için 4 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri..	88
Şekil 4. 58 $L=1300$ mm için 6 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri..	88
Şekil 4. 59 $L=1300$ mm için 8 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri..	88
Şekil 4. 60 $L=1300$ mm için 10 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri..	89
Şekil 4. 61 Farklı sırt derinliğine sahip dikme kesitlerinin nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=300$ mm)	89
Şekil 4. 62 $L=300$ mm için 2 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri....	90
Şekil 4. 63 $L=300$ mm için 4 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri....	90
Şekil 4. 64 $L=300$ mm için 6 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri....	91
Şekil 4. 65 $L=300$ mm için 8 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri....	91

Şekil 4. 66 $L=300$ mm için 10 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri..	91
Şekil 4. 67 Dikme kesitlerinin yatay lip hali.....	92
Şekil 4. 68 Yatay uzantılı kesitlerin ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafe.....	93
Şekil 4. 69 Yatay uzantılı kesitlerin nonlineer burkulma analizi sonuçları ($L=2400$ mm)	93
Şekil 4. 70 Yatay uzantılı kesitlerin doğrudan dayanım yönteminden elde edilen burkulma yükü sonuçları ($L = 2400$ mm).....	94
Şekil 4. 71 Yatay uzantılı dikme kesitlerinin nonlineer analiz sonuçlarına göre burkulma mod şekilleri ($L = 2400$ mm).....	95
Şekil 4. 72 Yatay uzantılı dikmelerin nonlineer burkulma analizi sonuçları ($L = 1300$ mm)	95
Şekil 4. 73 Yatay uzantılı dikme kesitlerinin nonlineer analiz sonuçlarına göre burkulma mod şekilleri ($L = 1300$ mm).....	96
Şekil 4. 74 Yatay uzantılı kesitlerin doğrudan dayanım yönteminden elde edilen burkulma yükü sonuçları ($L = 1300$ mm).....	97
Şekil 4. 75 Yatay uzantılı dikme kesitlerinin nonlineer analiz sonuçlarına göre burkulma mod şekilleri ($L = 300$ mm).....	98
Şekil 4. 76 Yatay uzantılı dikme kesitlerinin nonlineer analiz sonuçlarına göre burkulma mod şekilleri ($L = 300$ mm).....	98
Şekil 4. 77 Nihai dikme kesitinin ölçüleri.....	99
Şekil 4. 78 Nihai dikme kesitinin analiz sonuçlarıyla orijinal kolon kesitinin analiz sonuçlarının kıyaslanması.....	99
Şekil 4. 79 Nihai dikme kesitinin burkulma mod şekli.....	100

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4. 1 Dikme kesit özellikleri.....	58
Çizelge 4. 2 Kesit özellikleri.....	65
Çizelge 4. 3 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin özellikleri.....	74
Çizelge 4. 4 Farklı sırt derinliğine sahip kesitlerin özellikleri.....	81
Çizelge 4. 5 Yatay uzantılı kesitlerin özellikleri.....	92



1. GİRİŞ

Son zamanlarda hızla gelişen lojistik sektörü, hem kendi içinde taşıdığı büyüme potansiyeli, hem de Türkiye'nin birçok ekonomik hedefe ulaşmasında oynayacağı temel rol itibarıyla büyük öneme sahiptir. Taşımacılık, depolama, paketleme, gümrükleme ve nihai tüketiciye erişimi de içine alan lojistik hizmetlerinin dünya genelindeki hacmi giderek artmaktadır. Ayrıca lojistik altyapısı gelişmiş ülkelerin ticaret faaliyetlerinin daha etkili ve verimli olduğu görülmektedir. Bu önemli sektörde önemli bir paya sahip olan depolama işlemi, depo raf sistemleri aracılığıyla gerçekleştirilir.

Depo raf sistemleri, ince cidarlı çelik elemanlardan oluşmaktadır. Bu ince cidarlı çelik elemanlar roll form (sürekli şekil verme) makineleri aracılığıyla seri bir şekilde üretilmektedir. Üretimi gerçekleştirilen bu çelik elemanların sac kalınlığı 0,378 mm' den başlayarak 6,35 mm' ye kadar değişmektedir ve çok çeşitli kesit şekilleri üretilmektedir. Ayrıca kullanılan sacın malzemesi değiştirilerek istenilen mekanik özellikleri ve taşıma kapasitelerini sağlayacak üretim gerçekleştirilebilmektedir. Ucuz, hızlı ve esnek kesit şekli elde edebilme gibi avantajlarından dolayı depo raf sistemlerinde yaygın olarak soğuk şekillendirilmiş ince cidarlı çelik elemanlar kullanılmaktadır. Fakat bu avantajlarının yanında soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanları düşük sac kalınlığına sahip olmaları ve boylarının uzun olmalarından dolayı burkulma problemiyle karşı karşıya kalmaktadır. Bundan dolayı bu tez çalışmasında çelik depo raf sistemlerinde kullanılan dikmelerin burkulma özelliklerinin; sac malzemesi ve kalınlığı değiştirilmeden, kesit yapısı ve geometrisinin değişimine bağlı olarak iyileştirilmesi ve bu sayede yük taşıma kapasitesinin artırılması amaçlanmıştır.

Tez çalışmasının kaynak araştırması bölümünde geçmişte yapılan konu ile benzer çalışmalardan, soğuk şekillendirilmiş çeliklerden ve basit yapıli dikmelerin burkulma davranışlarından bahsedilmiştir.

Materyal ve yöntem bölümünde soğuk şekillendirilmiş çelik dikmelerin kapasite hesabı üzerine geliştirilmiş olan çeşitli standartlar kısaca tanıtılmıştır ve bu standartlarla ilgili hesaplamalardan bahsedilmiştir. Bu bölümün 4. ve 5. kısmında ince cidarlı dikmelerin doğrudan dayanım yöntemiyle (DSM) (direct strength method) kapasite hesabı, sonlu şerit yöntemi (finite strip method) ve CUFSM yazılımı aracılığıyla dikmelerin kapasite

hesabı üzerinde durulmuştur. 6. kısımda ise ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak raf sisteminde kullanılan dikmelerin kritik burkulma yüklerinin tespit edilmesi anlatılmıştır. 7. kısımda burkulma deney düzeneğinden ve şartlarından bahsedilmiştir.

Bulgular ve tartışma bölümünde kolonların sonlu elemanlar analizi, doğrudan dayanım yöntemi (DSM) ve deney sonuçları verilmiştir. Bu kısımda 115 x 100 mm boyutlarına sahip olan orijinal dikme kesitinden yola çıkarak flanş kısmındaki açılı olan güçlendiricinin tam katlı olmasının, daha sonra bu tam katlı kısmın kesitin sırt bölgesinden uzaklığının, sırt bölgesinde bulunan güçlendirici girintinin derinliğinin ve flanşlarda bulunan uzantı kısmının katlama açısının ve dikmenin sırt bölgesinde bulunan deliklerin köşeli veya radyüslü olması durumunda burkulma yükü üzerine etkileri sonlu elemanlar yöntemiyle ve doğrudan dayanım yöntemiyle (DSM) incelenmiştir. Ayrıca orijinal dikme kesitinin burkulma yükü kapasitesi deneysel olarak da incelenmiştir. Tüm elde edilen sonuçlar birbiriyle kıyaslanmıştır.

Sonuçlar bölümünde ise sonlu elemanlar yönteminden, doğrudan dayanım yönteminden (DSM) ve deneylerden elde edilen sonuçlar birbiriyle kıyaslanarak en yüksek burkulma yükü kapasitesini veren kesit tipi tespit edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Literatür Çalışması

Sivakumaran ve Abdel – Rahman (1998), çalışmalarında eksenel bası yüklemesi altında olan soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların yerel (local) burkulma, yerel (local) burkulma sonrası davranışları ve C şekilli kesitlerin maksimum dayanımı için sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Geliştirmiş oldukları sonlu elemanlar modelini doğrulamak için testler yapmışlardır. Yapmış oldukları testlerle sonlu eleman modelinin sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir.

Bakker ve Peköz (2003), çalışmalarında ince cidarlı yapıların sonlu elemanlar analizi uygulamaları üzerinde durmuşlardır. Lineer ve nonlinear sonlu elemanlar analizlerinde yapılan hataların nasıl önleneceği ve kontrol edilebileceğinden bahsetmişlerdir.

Sarawit ve ark. (2003), çalışmalarında ince cidarlı elemanların tasarımında kullanmak üzere sonlu elemanlar yöntemini araştırmışlardır. Geleneksel olarak yeni tasarım prosedürlerini doğrulamak ve geliştirmek için birçok fiziksel test yapılmasına ihtiyaç duymuşlardır. Fakat gelişen bilgisayar ve yazılım teknolojisiyle birlikte bu tarz araştırmalar için sonlu elemanlar yöntemi temel bir araç olmuştur. Yapılan bu çalışmada sonlu elemanlar analizinin sonuçlarının analitik yaklaşımlarla ve test sonuçlarıyla uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

Freitas ve ark. (2005), çalışmalarında deneysel ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak eksenel yükleme altında çelik depo raf dikmelerinin burkulma modları ve maksimum dayanımı üzerine kusurların, deliklerin ve malzeme özelliklerinin etkisini araştırmışlardır. Test ve analiz sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir.

Talikoti ve Bajoria (2005), yapmış oldukları çalışmada depo raf sistemlerinde kullanılan soğuk şekillendirilmiş çelik dikmelerin burulmalı ve distorsiyonel burkulma dayanımının arttırılmasını araştırmışlardır. Orta boylu dikmeler için iki farklı kesitin elastik burkulma analizini yaparak dikmelerin burkulma dayanımlarını ve mod şekillerini tespit etmişlerdir. Daha sonra açık kesitli dikmelerin flanşlarını birbirine basit bir parçayla birbirine bağlayarak dikme kesitlerinin distorsiyonel burkulma dayanımını

incelemişlerdir. Yapmış oldukları sonlu elemanlar analizi sonuçlarını testlerle doğrulamışlardır.

Ashraf ve ark. (2006), çalışmalarında farklı kesit geometrilerine sahip olan yapısal paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş kesitlerin sonlu elemanlar modeli üzerinde durmuşlardır. Sıradan yapısal çeliklere göre paslanmaz çelikler pekleşmeye daha yatkın oldukları için mekanik özellikleri sonlu elemanlar modeline doğru bir şekilde tanımlanması gerektiği üzerinde durmuşlardır. Ayrıca soğuk şekillendirilmiş kesitlerde köşe noktaları çok önemli olduğundan dolayı geometrik kusurların dikkatli bir şekilde tanımlanması gerektiğinden de bahsetmişlerdir. Bu çalışmada tüm bu önemli özellikler dikkate alınarak parametrik tasarım çalışması yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde ettikleri sonuçları test sonuçlarıyla kıyasladıkları zaman birbirleriyle uyumlu olduklarını görmüşlerdir.

Pastor ve ark. (2009), çalışmalarında global burkulma modunda en yüksek burkulma yükünü verecek tasarım üzerinde araştırma yapmışlardır. Dikme kesitlerinin tasarım çalışmalarını EN 15512:2008 Avrupa standardına göre yapmışlardır. Buradan elde ettikleri kesitlerin nonlinear sonlu elemanlar analizini yapmışlardır. Bu yöntemle birlikte nonlinear analiz sayısını azaltarak en iyi dikme kesiti tasarımını elde etmişlerdir.

Moen ve Schafer (2009), yaptıkları çalışmada delikli soğuk şekillendirilmiş çelik dikmelerin ve kirişlerin global, distorsiyonel ve lokal kritik burkulma yüklerini belirlemek için basitleştirilmiş bir yöntem araştırmışlardır. Bu basitleştirilmiş yöntemi sonlu elemanlar yöntemine ve laboratuvar testlerine bir alternatif olarak geliştirmişlerdir. Deliklerin etkisini içeren soğuk şekillendirilmiş dikme ve kirişlerin global burkulmasını enerji esaslı stabilite çözümlerinden elde edilen ağırlıklı ortalama yaklaşımıyla hesaplamışlardır. Delikli soğuk şekillendirilmiş çelik dikme ve kirişlerin lokal ve distorsiyonel burkulmasını yarı analitik sonlu çubuk yöntemiyle belirlemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmayı sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulamışlardır.

Roure ve ark. (2011), çalışmalarında çelik depo raf sistemlerinde kullanılan dikmelerin tasarımı için iki alternatif yöntem olan sonlu elemanlar yöntemini ve Eurocode 3 standardını kullanmışlardır. Sonlu elemanlar analizlerini malzeme ve geometrik nonlinear davranış özelliklerini dikkate alarak yapmışlardır. Ayrıca bu iki yöntemi

doğrulamak için testlerde yapmışlardır. Bu iki yöntemin dikme tasarımı ve optimizasyonunda iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir.

Casafont ve ark. (2011), çalışmalarında bası yüklemesi altında çelik depo raf dikmelerinin davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Farklı boylara sahip olan dikmelerin testlerini yapmışlar fakat özellikle distorsiyonel burkulmanın meydana geldiği dikme boylarının davranışı üzerine odaklanmışlardır. Yaptıkları testlerin sonuçlarını doğrudan dayanım yöntemiyle (DSM) kıyasladıklarında birbiriyle uyumlu olduğunu bulmuşlardır.

Casafont ve ark. (2012), çalışmalarında delikli soğuk şekillendirilmiş depo raf dikmelerinin elastik burkulma yüklerinin hesaplamak için sonlu çubuk yönteminin kullanılmasını araştırmışlardır. Sonlu çubuk yönteminin uygulaması, sonlu elemanlar yöntemine göre daha kolay olduğu için soğuk şekillendirilmiş çelik eleman tasarımında daha çok tercih edilmektedir. Fakat bu yöntemi delikli dikmelere uygulamak kolay değildir. Çalışmalarında delikleri modellemek için azaltılmış kalınlık kavramını kullanmışlardır. Azaltılmış kalınlık kavramını kullanmak için sonlu elemanlar yönteminden elde edilen elastik burkulma yüküne göre ayarlanmış bir formül üzerine çalışmışlardır.

Pastor ve ark. (2013), çalışmalarında sonlu elemanlar analizini kullanarak çelik depo raf sistemlerinde kullanılan dikmelerin soğuk şekillendirme esnasında meydana gelen artık gerilme ve gerinimlerin belirlenmesini araştırmışlardır. Elde edilen bu artık gerilme ve gerinim değerleri kullanılan model ile birleştirilerek nonlineer sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçların test sonuçlarıyla uyumlu olduklarını belirlemişlerdir.

Schafer ve ark. (2013), çalışmalarında soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlar için hem elastik burkulma hem de nonlineer çökme analizleri için hesaplamalı bir model tanıtmışlardır. Hesaplamalı modelde, yarı analitik sonlu şerit yönteminin ve sonlu elemanları kullanan çökme modelinin kullanımı üzerine odaklanmıştır. Elastik burkulma için kullanılan teorik modelin sınırlarının bilinmesinin önemli olduğu üzerinde durmuşlardır. Ayrıca çökme modellerinin çözümünün doğru sonuç vermesi

için başlangıç kusurlarının, malzeme modelinin, sınır koşullarının, başlangıçta var olan artık gerilme ve gerinim değerlerinin etkili olduğunu belirtmişlerdir.

He ve Zhou (2014), çalışmalarında distorsiyonel burkulma modunda yük taşıma kapasitesi tahmini için Hancock tarafından geliştirilen iki dayanım tasarım eğrisinin performansını araştırmışlardır.

Pastor ve ark. (2014), çalışmalarında ince cidarlı çelik elemanların nonlinear analizinde kullanılan başlangıç kusurlarının maksimum yük kapasitesi ve çökme modu üzerine etkilerini araştırmışlardır. Yapmış oldukları testlerin sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarını kıyasladıkları zaman maksimum dayanım yükü üzerinde başlangıç kusurlarının önemli derecede etkisi olduklarını tespit etmişlerdir. Ayrıca distorsiyonel burkulma modunda başlangıç kusuru büyüklüğünün maksimum dayanım yükünü bulmada daha fazla etkin olduğunu bulmuşlardır.

Garifullin ve Nackenhorst (2015), çalışmalarında başlangıç kusuru yük taşıma kapasitesini önemli derecede etkilediği için başlangıç kusurlu C kesitli soğuk şekillendirilmiş dikmelerin sonlu elemanlar analiziyle elastik burkulma analizlerini yapmışlardır. Çıkan sonuçlara göre başlangıç kusuru olan dikmeler ile başlangıç kusuru olmayan dikmeler arasındaki taşıma kapasitesi arasında % 5-7 seviyesinde fark olduğunu tespit etmişlerdir.

Dong ve ark. (2015), çalışmalarında farklı geometrik parametrelere sahip olan ve flanşlarında güçlendirici bulunan soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların elastik distorsiyonel burkulma yükünü hesaplamak için kullanılan sonlu çubuk programı CUFSM' yi anlatmışlardır. Ayrıca çalışmalarında farklı kesitlere sahip olan elemanların distorsiyonel burkulma gerilmesini hesaplamak için sadeleştirilmiş bir formül üzerinde de durmuşlardır. CUFSM programı ile yapmış oldukları analizleri bu formül ile kıyasladıkları zaman, formülün uygulanabilir ve doğru sonuçlar verdiğini görmüşlerdir.

Ma ve ark. (2015), çalışmalarında soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlar için optimum kesit geometrisini belirlemek karmaşık olduğundan dolayı optimum kesit geometrisi elde etmek için bir yöntem üzerinde durmuşlardır. Optimizasyon çalışmasına basit güçlendiriciye sahip olan C kesitten başlamışlardır, fakat optimizasyon işlemi sırt bölgesinde üçgensel güçlendiricilere, açılı güçlendiricilere ve çift katlı güçlendiricilere

olarak tanınmaktadır. Kesitlerin optimizasyonu için genetik algoritmaları kullanılarak Eurocode (EN1993-1-3) standardına göre belirlenen yapısal kapasitelere göre optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Anbarasu ve Murugapandian (2015), çalışmalarında sırt elemanında güçlendirici bulunan uzantılı (lip) kesite sahip soğuk şekillendirilmiş dikmelerin bası yüklemeleri altında distorsiyonel ve global burkulma modlarının davranışlarını incelenmişlerdir. Deneysel sonuçları doğrudan dayanım yöntemiyle (DSM) kıyaslayarak azami taşıma yükünün bulunmasında distorsiyonel-global burkulma modlarının etkileşimi ile DSM' nin uygulanabilirliği araştırmışlardır.

2.2. Soğuk Şekillendirilmiş Çelikler

Çelik yapısal elemanların iki ana grubu vardır. Bunların ilk grubu, sıcak hadde elemanları ve levhalardan oluşan elemanlardır. İkinci grup ise, daha az bilinen fakat zamanla önemi artan, sürekli şekil verme, pres bükme veya eğilmeli bükme yöntemiyle soğuk şekil verilmiş çelik sac, şerit, levha veya yassı çubuklardır. Bunlar soğuk şekillendirilmiş yapısal çelik elemanlardır. Şekil 2.1' de soğuk şekillendirilmiş çelik kesitleri verilmiştir. Kullanılan çelik sac ve şeritlerin kalınlıkları genellikle 0.378 mm' den 6.35 mm' ye kadar değişmektedir. Çelik çubuk ve plakalar 25.4 mm civarındaki kalınlığa kadar soğuk şekil verilerek çelik yapılarda kullanılırlar (Yu 1973).



Şekil 2. 1 Soğuk şekillendirilmiş çelik kesitleri (Yu 1973)

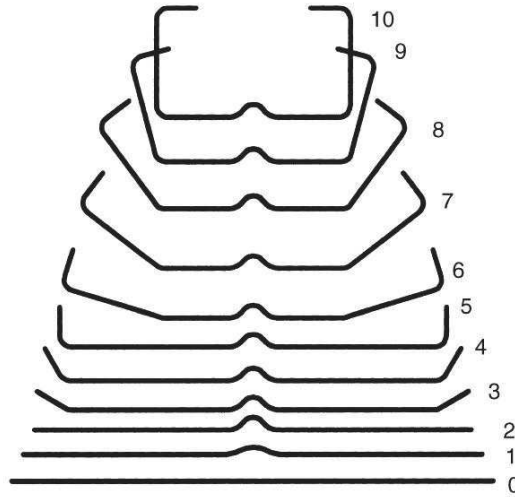
2.2.1. Soğuk Şekillendirilmiş Çeliklerin Üretimi

Sürekli şekil verme yönteminde sac eleman üretimi gerçekleştirilecek olan profil kesitine göre konumları, sayıları ve şekilleri ayarlanmış merdanelerin arasından geçirilerek şekillenir. Sac şeridi çeşitli kademelerde bu merdanelerin arasından geçerek adım adım şekillenir ve son şeklini alır. Bu adımların her birine “pas” veya “istasyon” adı verilir. Bir kesit şeklinin oluşması için gerekli pas veya istasyon sayısı, kesit şeklinin karmaşıklığına göre değişir. Örnek vermek gerekirse iki milimetreden daha kalın bir Z profili kesitinin oluşturulabilmesi için beş veya daha fazla istasyona ihtiyaç duyulur. Soğuk şekil verme adımları Şekil 2.3' de verilmiştir. Sürekli şekil verme yönteminin üç belirgin özelliği vardır. Bunlardan ikisi üretim hızının yüksek oluşu, önceden galvanizlenmiş veya boyanmış sac elemanın boya veya galvaniz tabakasına zarar vermeden şekillendirme yapabilmesidir. Bunların dışında sürekli şekil verme yönteminin en belirgin özelliği üretilen yapı elemanının uzunluğunun, pahalı olan üretim bandına değil de işlenmemiş sac malzemeye bağlı olmasıdır (Akar 2010).



Şekil 2. 2 Sürekli şekil verme makinesi

(<http://acmeholdingpeb.com/wp-content/uploads/2014/11/12.jpg>)



Şekil 2. 3 Soğuk şekil verme işlem adımları (Holmos 2006)

2.2.2. Soğuk Şekil Verilmiş Çelik Elemanların Yapısal Uygulamaları

Soğuk şekillendirilmiş çelik yapısal elemanları

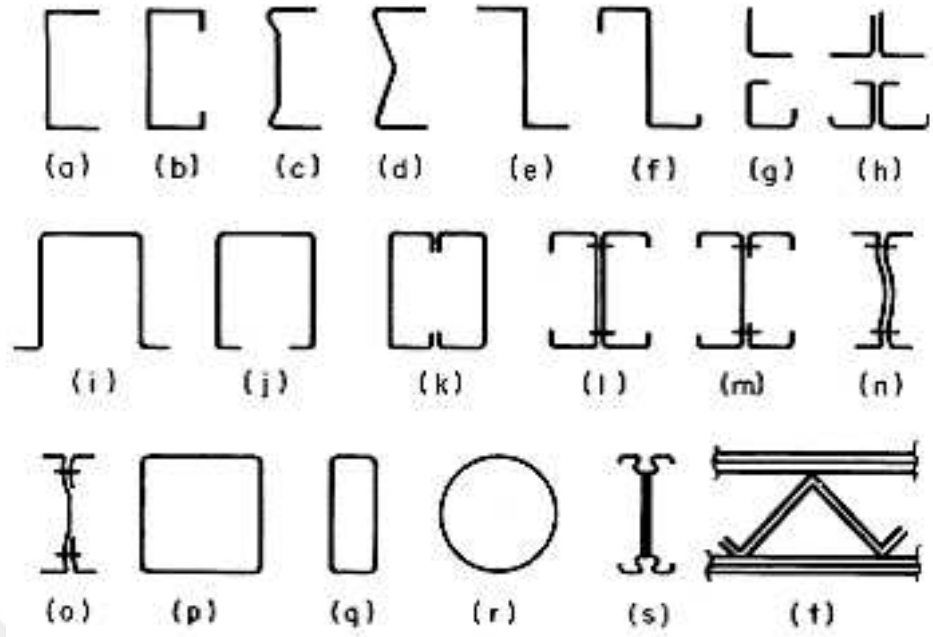
1. Çerçeve elemanları
2. Paneller ve döşemeler

olarak 2 ana grupta sınıflandırılabilir.

Yapısal Çelik Çerçeve Elemanları

Şekil 2.4’ de genellikle yapısal çerçevede kullanılan soğuk şekillendirilmiş kesitler görülmektedir. Genellikle en yaygın olarak kullanılan kesitler C kesit, Z kesit, Şapka kesit, I kesit, T kesit ve Tüp elemanlardır. Geçmişte yapılmış olan çalışmalar sigma kesitin standart kesitlerle kıyaslandığı zaman yüksek yük taşıma kapasitesi, daha küçük boşluk boyutu, daha az ağırlık ve daha büyük burulma rijitliği gibi birçok avantaja sahip olduğunu göstermektedir (Yu 1973).

Genelde, soğuk şekillendirilmiş çerçeve elemanlarının derinliği 50,8 mm’ den 304,8 mm’ ye kadar ve sac kalınlığı ise 1,22 mm’ den 6,35 mm’ ye kadar değişmektedir. Bazı durumlarda, elemanların derinliği 457,2 mm olabilmektedir ve araç ve bina yapımında kalınlıkları 12,7 mm veya daha fazla olabilir (Yu 1973).



Şekil 2. 4 Yapısal çerçevede kullanılan soğuk şekillendirilmiş kesitler (Yu 1973)

Bu taşıyıcı elemanların tasarımında önemli olan faktörler taşınan yük, yapı dayanımı ve rijitliktir. Böyle bir kesit 3 yada 4 kat yüksekliğine sahip binalarda ana taşıyıcı çerçeve olarak kullanılabilir. Şekil 2.5’ de soğuk şekillendirilmiş kesitlerden yapılmış bir bina görülmektedir. Daha uzun çok katlı binalarda ana taşıyıcı olarak genellikle sıcak şekillendirilmiş elemanlar ve panel gibi ikincil eleman olarak soğuk şekillendirilmiş elemanlar kullanılmaktadır. Böyle bir durumda sıcak şekillendirilmiş elemanlar ve soğuk şekillendirilmiş elemanlar birbirini tamamlamaktadır (Yu 1973).

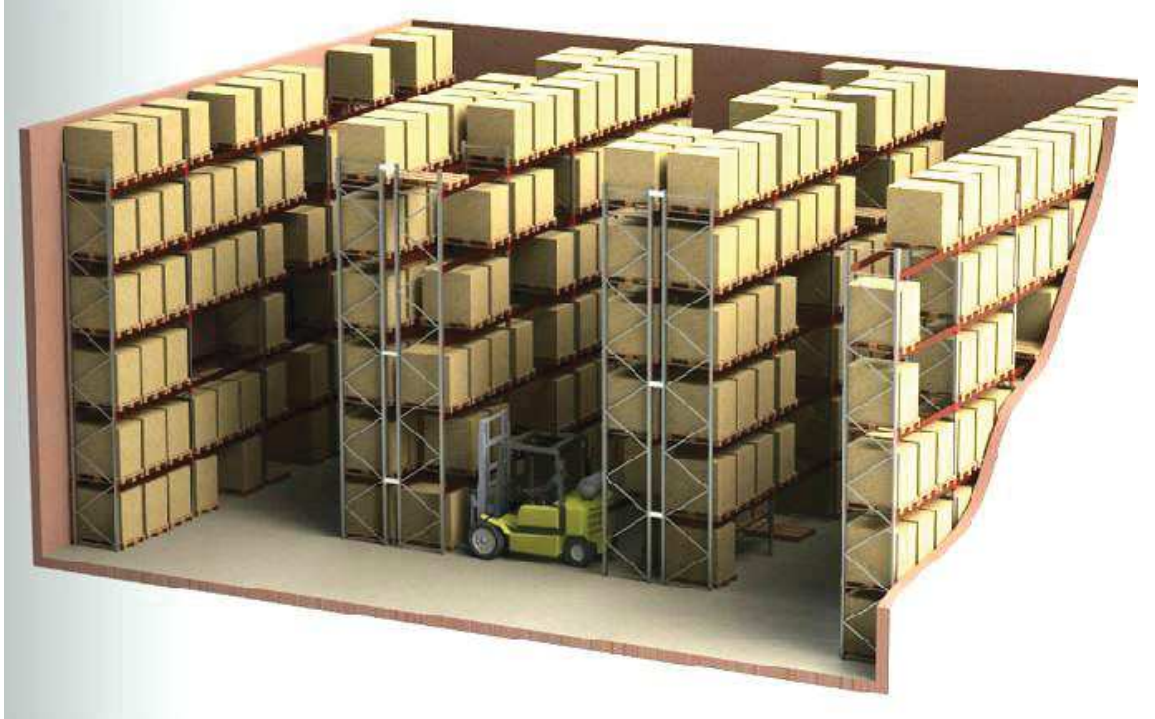


Şekil 2. 5 Soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlardan oluşturulmuş bina

(http://zhongliantrading.com/upfiles/201608/09/1470711522_17.jpg)

Soğuk şekillendirilmiş çelik depo raf sistemleri soğuk şekillendirilmiş çelik yapıların bir diğer önemli uygulamasıdır. Raf sistemleri malzeme depolamak için dünya çapında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu sistemler az bir alanda büyük miktarlarda ürün depolamaya olanak sağladıkları için yüksek depolama yoğunluğuna sahiptirler. Ayrıca depo raf sistemleri depolanan ürünlere erişilebilirlikte büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu sistemler büyük miktarlarda ürün depolayan birçok şirket tarafından kullanılmaktadır. Raf sistemlerinin depolanan her bir ürüne erişme durumuna uyan çeşitli modelleri vardır. Raf sistemi modelleri basit raflardan 30 m' den daha fazla yüksekliğe sahip olan otomatik depolama sistemlerine kadar değişmektedir. Palet raf sistemleri ve içine girilebilir sistemler yaygın olarak kullanılan raf çeşitleridir (Mangır 2014).

Palet raf sistemleri, her ölçüdeki paletli ve paketlenmiş ürünleri depolamada kullanılabilen ve her ürüne doğrudan erişimi mümkün kılan universal, kolay uygulanabilir ve ekonomik depo raf sistemleridir. Basit bir depo raf sisteminin temel elemanları Şekil 2.7' de görüldüğü gibidir.



Şekil 2. 6 Paletli depo raf sistemi (ÜÇGE DRS Çelik Depo Raf Sistemleri A.Ş.)



Şekil 2. 7 Paletli depo raf sistemlerinin elemanları (ÜÇGE DRS Çelik Depo Raf Sistemleri A.Ş.)

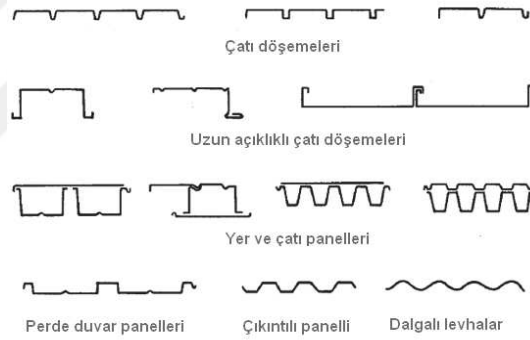
Şekil 2.7’ de görülen elemanlar aşağıdaki gibidir.

- 1- Dikey taşıyıcı kolon
- 2- Yatay taşıyıcı kiriş
- 3- Stoper kirişi
- 4- Sırt sırta ara bağlantı parçası
- 5- Koridor üst bağlantı parçası
- 6- Duvar bağlantı parçası
- 7- Kolon koruyucusu
- 8- Arka çapraz takımı
- 9- Ara kiriş
- 10- Dairesel ürün taşıyıcısı
- 11- Metal kasa ara taşıyıcısı

- 12- Tava raf
- 13- Izgara raf
- 14- Sunta raf
- 15- Güvenlik kafesi
- 16- Dübel
- 17- Ayar plakası

Paneller ve Döşemeler

Paneller ve döşemelerde soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların diğer bir uygulama alanıdır. Şekil 2,8’ de kullanılan panel ve döşeme elemanlarının kesitleri görülmektedir. Bu kesitler genellikle çatı döşemeleri, zemin döşemeleri, duvar panelleri, kaplama panelleri ve köprüler için kullanılır. Panellerin derinlikleri genellikle 38,1 mm ile 190,5 mm arasında ve malzemelerin kalınlıkları da 0,46 mm ile 1,9 mm arasında değişmektedir (Yu 1973).



Şekil 2. 8 Panel ve döşeme kesitleri (Yu 1973)

2.2.3. Soğuk Şekillendirilmiş Çeliklerin Avantajları ve Dezavantajları

Soğuk şekil verilmiş yapısal elemanlar yapı inşasında aşağıdaki avantajları sağlarlar (Yu 1973):

- Sıcak haddeden üretilmiş elemanlarla kıyaslandığı zaman soğuk şekillendirilmiş elemanlar nispeten hafif yüklerde ve küçük açıklıklarda daha ekonomiktir.
- Çok çeşitli kesit konfigürasyonları soğuk şekil verme işlemi ile daha ekonomik olarak üretilebilir ve sonuç olarak daha iyi dayanım / ağırlık oranı elde edilebilir.
- Yük taşıyan paneller ve döşemeler, zemin, çatı ve duvar konstrüksiyonu için daha kullanışlı yüzeyler sağlayabilir ve bir diğer durumda ayrıca elektrik bağlantıları için kapalı hücreler oluşturur.

- Eğer elemanlar birbirleriyle ve mesnet elemanlarıyla yeterli bir şekilde bağlantısı gerçekleştirilmişse yük taşıyan paneller ve döşemeler sadece yüzeylerine gelen dik yükleri taşımazlar aynı zamanda kesme kuvvetlerini de taşırlar.

Soğuk şekillendirilmiş elik elemanlar ahşap, beton gibi diğer malzemelerle kıyaslandığı zaman aşağıdaki özellikleri sergilerler (Yu 1973):

- 1- Hafiflik
- 2- Yüksek mukavemet ve rijitlik
- 3- Seri retim
- 4- Hızlı ve kolay montaj
- 5- Hava koşullarından dolayı ertelemelerin ortadan kaldırılması
- 6- Daha doğru detaylandırma
- 7- evre sıcaklığından dolayı büzülme ve şekil değiştirme olmaması
- 8- şekillendirme işçiliğine ihtiyaç duyulmama
- 9- Aynı kalite

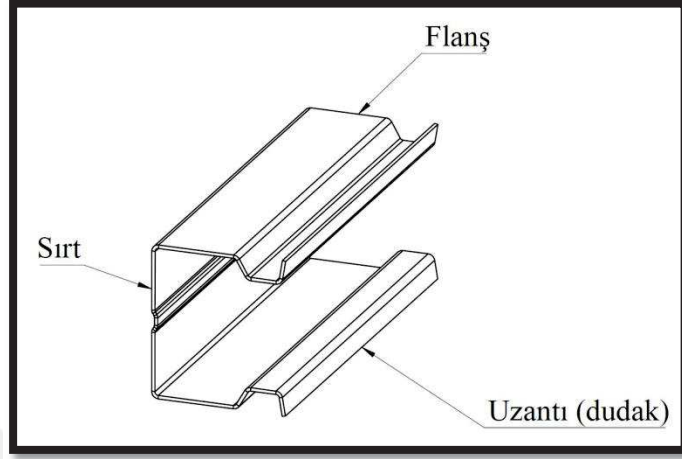
Soğuk şekillendirilmiş elik elemanların yukarıda bahsedilen avantajlardan dolayı inşa esnasında maliyet tasarrufları sağlamaktadır.

Soğuk şekillendirilmiş elemanların dezavantajları da şu şekilde sıralanabilir:

- 1- Yüksek birim maliyeti
- 2- Düşük yangın direnci
- 3- Montaj esnasında bağlantı zorlukları

2.3. Genel Bilgiler

Çelik depo raf sistemlerinde kullanılan soğuk şekillendirilmiş kolon kesiti Şekil 2.9’ da gösterilmektedir.



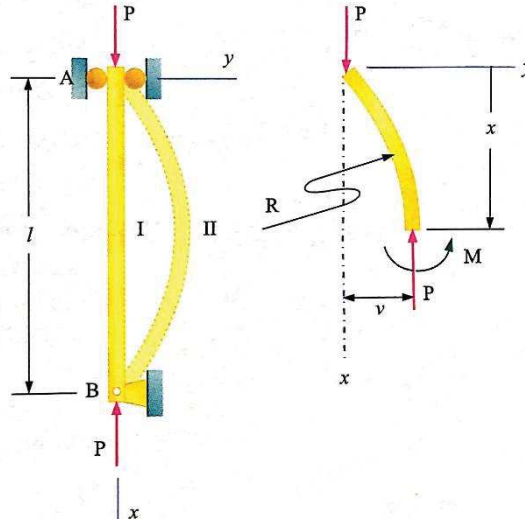
Şekil 2. 9 Soğuk şekillendirilmiş dikme elemanları

Soğuk şekillendirilmiş ince cidarlı çelik yapılarda karşılaşılan en büyük sorunlardan biri burkulma problemidir. Eksenel olarak uygulanan yükler altında elemanlar daha akma dayanımına gelmeden burkulma olayı meydana gelmektedir. Burkulma olayını etkileyen birçok sebep vardır. Bunların başında narinlik oranı gelmektedir. Narinlik oranına ilaveten sınır şartları, yükün eksenden kaçıklığı ve malzemede mevcut olan kusurlarda burkulmayı etkileyen faktörlerdir (Kahya 2016).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kolonların Burkulması

Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında üç temel karakteristik ele alınmaktadır. Bunlar mukavemet (akma veya kırılma), rijitlik buna bağlı olarak deformasyon ve dengedir. Dengede kritik parametreler diğerlerinden daha farklı olmaktadır. Akma ve kırılmada eğer sistemdeki gerilme değerleri belirli bir değeri aşmışsa sistem emniyetli değildir. Bu tarz problemler gerilme problemleridir. Burkulma olayında ise bir denge problemi söz konusudur. Eğer denge konumu kararlı değilse sistemde oluşabilecek en ufak bir farklılık çok büyük şekil değiştirmelere sebep olur ve sistem ilk haline tekrar gelemez. Bu tarz problemlere denge (stabilite) problemleri adı verilir. Kolonların burkulması olayının iyi anlaşılabilmesi için Şekil 3.1’ de görülen çift taraftan basit mesnetlenmiş kolonun kritik burkulma yük formülü problemin diferansiyel denklemleri oluşturularak bu denklemler problemin sınır şartları altında çözülecektir (Sayman ve ark. 2012).



Şekil 3. 1 İki ucu basit mesnetlenmiş kolon (Sayman ve ark. 2012)

Şekil 3.1’ de görüldüğü gibi uzunluğu l olan eğilme rijitliği EI olan elastik kolon, P eksenel yük altında kolonun dengede kalabileceği I. konumundan başka öyle bir II. konumu var mıdır? Bu soruyu cevaplamak için Şekil 3.1’ de A noktasında eksen takımı seçilir ve II. konumda kolon x mesafeden kesilirse statik dengeden eğilme momenti

$$M + Pv = 0 \quad (3.1)$$

şeklinde yazılır. Buradan

$$M = -Pv \quad (3.2)$$

olarak bulunur.

$$EI \frac{d^2 v}{dx^2} = M \quad (3.3)$$

olduğundan

$$EI v'' + P v = 0 \quad (3.4)$$

diferansiyel denklemi elde edilir. Bu denklem EI eğilme rijitliği ile bölünürse ve $\frac{P}{EI} = k^2$ denirse 3.4 denklemi

$$v'' + k^2 v = 0 \quad (3.5)$$

haline gelir. Bu diferansiyel denklemin çözümü

$$v = A \sin kx + B \cos kx \quad (3.6)$$

olarak elde edilir. Bu çözüm, bu problem için genel çözümdür. Özel çözümü bulmak için A ve B katsayıları belirlenmelidir. Bu katsayılar da sınır şartlarının uygulanmasıyla bulunabilir. Sınır şartları mesnet noktalarında çökmelerin sıfır olmasından dolayı $x = 0$ ' da $v = 0$ ve $x = l$ ' de $v = 0$ ' dır. İlk sınır şartından B katsayısı sıfır gelmektedir. $x = l$ ' de $v = 0$ ' dan

$$A \sin kl = 0 \quad (3.7)$$

olacağından dolayı burada $A = 0$ olursa bu boş bir çözüm olacaktır ve kolon hiç şekil değiştirmemiş konumuna karşılık gelir. Buna göre $A \sin kl = 0$ ifadesinde A sıfırdan farklı olmalı ve $\sin kl = 0$ olmalıdır. Buradan

$$kl = n\pi \quad (3.8)$$

olarak bulunur ve k değeri yerine koyulursa $n = 1$ için kritik kuvvet

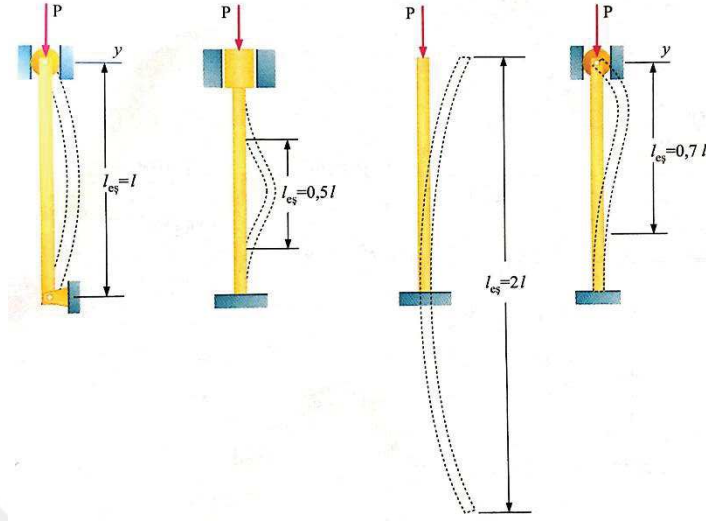
$$P_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (3.9)$$

olarak bulunur. Kolona uygulanan P yükü P_{kr} yükünden küçük ise burkulma meydana gelmez eğer büyük ise burkulma meydana gelecektir (Sayman ve ark. 2012).

Farklı sınır şartlarında yüklenmiş kolonların kritik burkulma yükü hesabında eş değer uzunluk yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemle göre kritik yük formülü denklem 3.10' daki gibi olur.

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{(l_{es})^2} \quad (3.10)$$

Farklı sınır şartları için efektif uzunluk değerleri Şekil 3.2’ de verilmiştir.



Şekil 3. 2 Farklı sınır şartlarındaki kolonların efektif uzunlukları (Sayman ve ark. 2012)

3.1.1. Elastik Dengenin Sınırları

Bir önceki bölümde incelenen kolonların yeterince uzun olduğu kabul edilmiştir. Fakat bu formüllerin geçerli olduğu uzunluk miktarının ne kadar olacağı bilinmemektedir. Bu kısımda önceki bölümde çıkarılmış olan euler kritik yük formülünün hangi uzunluklarda geçerli olduğundan bahsedilecektir. Euler halleri için genel kritik yük formülü aşağıdaki gibidir.

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{(l_{es})^2} \quad (3.11)$$

Bu yük kolonun kesit alanı ile bölünürse kolondaki gerilme değeri

$$\sigma_{kr} = \frac{P_{kr}}{A} = \frac{\pi^2 E(I/A)}{l_{es}^2} \quad (3.12)$$

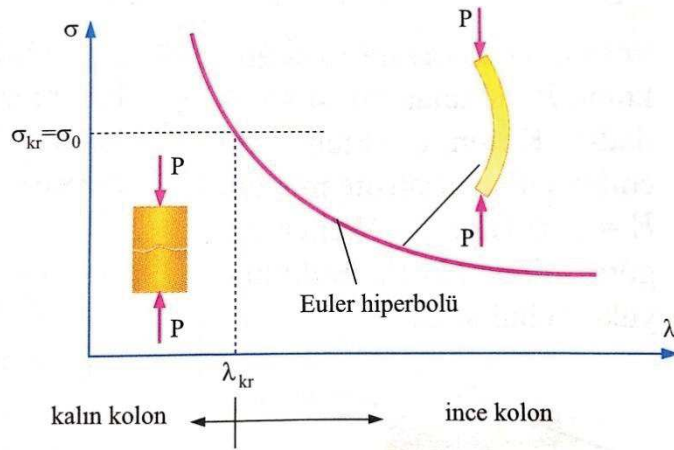
olarak bulunur. $(r^2 = \frac{I}{A})$ denirse bu ifade;

$$\sigma_{kr} = \frac{\pi^2 E}{(l_{es}/r)^2} \quad (3.13)$$

haline gelir. Burada $l_{eş}/r$ ifadesine narinlik oranı ve r değerine ise jirasyon yarıçapı denir. Bu oran büyüdükçe kolon uzun ve dar kesitli olur. Yukarıda elde edilen denklemde narinlik oranına λ denirse kolondaki kritik gerilme;

$$\sigma_{kr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (3.14)$$

olur (Sayman ve ark. 2012). Elde edilen bu kritik gerilme değerinin narinlik oranı ile değişiminin grafiği Şekil 3.3' deki gibidir.



Şekil 3. 3 Euler hiperbolü (Sayman ve ark. 2012)

3.2. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Dikmelerin Burkulma Çeşitleri

Açık kesitli soğuk şekillendirilmiş dikmeler ince cidarlı elemanlardan üretilmektedir ve birçok durumda bu kesitlerin kayma merkezi ile ağırlık merkezi çakışmamaktadır. Bundan dolayı bası yüklemesi altındaki elemanların tasarımı yapılırken aşağıda verilen hasar tipleri dikkate alınmalıdır (Yu 1973).

- Akma
- Global dikme burkulması
 - Eğilmeli dikme burkulması (tarafsız eksen etrafında eğilme)
 - Burulmalı dikme burkulması (kayma merkezi etrafında dönme)
 - Burulmalı – Eğilmeli dikme burkulması (eğilme ve burulmanın eş zamanlı olarak gerçekleşmesi)
- Dikme elemanlarının yerel (local) burkulması
- Distorsiyonel burkulma

3.2.1. Akma

Bası yüklemesi altındaki kısa dikmeler akma dayanımında hasara uğramaktadırlar. Bu durumda kritik yük

$$P_{kr} = A\sigma_y \quad (3.15)$$

denklemini ile hesaplanır. Burada A dikmenin kesit alanıdır ve σ_y ise dikme malzemesinin akma dayanımıdır.

3.2.2. Global Dikme Burkulması

Dikmelerin global burkulması eğilmeli burkulma, burulmalı burkulma ve eğilmeli – burulmalı burkulma olmak üzere üç başlık altında incelenmektedir.

Eğilmeli Dikme Burkulması

Elastik Dikme Burkulması

Eksenel olarak yük altında bulunan çift simetri eksenine (I kesit), kapalı kesite (kare ya da dikdörtgen kesitler) veya silindirik kesite sahip olan narin dikmeler genellikle eğilmeli burkulmaya maruz kalarak hasara uğramaktadırlar.

Yeterince uzun boya sahip olan dikmeler için kritik elastik burkulma yükü aşağıdaki formülle belirlenmektedir.

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{(l_{eş})^2} \quad (3.16)$$

Burada P_{kr} kritik burkulma yükü, E elastisite modülü, I kolon kesitinin atalet momenti ve $l_{eş}$ dikmenin efektif uzunluk değeridir.

Burada bulunan kritik burkulma yükü dikme kesitinin alanı ile bölünürse dikmede meydana gelen kritik gerilme değeri

$$\sigma_{kr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (3.17)$$

olarak elde edilir. Burada σ_{kr} kritik burkulma gerilmesi ve λ narinlik oranıdır.

Elastik Olmayan Dikme Burkulması

Elastik olmayan oranda eğilmeli dikme burkulmasının incelenmesinde iki farklı yöntem vardır. Bunlar tanjant modülü yöntemi ve azaltılmış modül yöntemidir. Tanjant modülü

yöntemi 1889 yılında Engesser tarafında ileri sürülmüştür (Yu 1973). Bu yöntem ile tanjant modülü yükü

$$P_T = \frac{\pi^2 E_t I}{l_{e\varnothing}^2} \quad (3.18)$$

ile bulunur. Kritik burkulma gerilmesi ise

$$\sigma_T = \frac{\pi^2 E_t}{(l_{e\varnothing}/r)^2} \quad (3.19)$$

ile elde edilir. Burada E_t tanjant modülüdür.

1895’ de, Jasinky tanjant modülü kavramının elastik yük boşaltma etkisini kapsamadığını açıklamıştır. Bundan dolayı azaltılmış modül veya çift modül yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem ile kritik burkulma yükü ve gerilme değerleri aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır.

$$P_R = \frac{\pi^2 E_r I}{l_{e\varnothing}^2} \quad (3.20)$$

$$\sigma_R = \frac{\pi^2 E_r}{(l_{e\varnothing}/r)^2} \quad (3.21)$$

Burada,

$$E_r = E(I_1/I) + E_t(I_2/I) \quad (3.22)$$

azaltılmış modüldür. Burada I_1 burkulmadan sonra yüklemenin kaldırıldığı taraftaki alanın tarafsız eksene göre atalet momentidir. I_2 ise burkulmadan sonra yüklemenin olduğu taraftaki alanın tarafsız eksene göre atalet momentidir.

Mühendisler dikme dayanımını belirlemek için bu iki kavramla ilgili uzun yıllar araştırma yapmışlardır. Deneysel ve analitik araştırmalardan sonra, Shanley

- 1) Tanjant modülü yönteminin dikmenin doğrusal kaldığı maksimum yükü verdiği
- 2) Gerçek maksimum yük değerinin tanjant modülü yükünü aştığını fakat azaltılmış modül yük değerine ulaşamadığı sonucuna varmıştır.

Diğer birçok araştırmacı da Shanley' in bulduğu sonuçları doğrulamıştır. Maksimum yük genellikle tanjant modülünden hesaplanan yük değerinden yaklaşık olarak % 5 daha fazla olmaktadır. Bundan dolayı dikme araştırma konseyi çelik dikmelerin tasarım formüllerinde tanjant modülü kavramının kullanılmasını açıklamıştır. Bu sebepten dolayı hesaplanan euler gerilmesi akma gerilmesi değerinden yüksekse tanjant modülü yöntemi kullanılmalıdır. Soğuk şekil verilmiş çeliklerde eğer artık gerilmelerin etkisi hesaba katılırsa ve etkin olan orantı sınırı akma noktasının yarısına eşit olduğu kabul edilirse aşağıdaki formül ile yaklaşık bir çözüm elde edilebilir (Yu 1973).

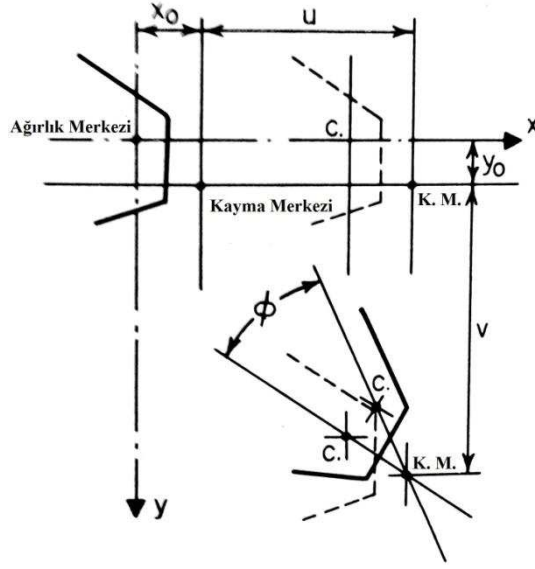
$$\sigma_T = \sigma_y \left(1 - \frac{\sigma_y}{4\sigma_e} \right) = \sigma_y - \left(\frac{\sigma_y^2}{4\pi^2 E} \right) \left(\frac{l_{es}}{r} \right)^2 \quad (3.23)$$

Burada σ_y minimum akma noktasıdır.

Burulmalı Burkulma ve Burulmalı – Eğilmeli Burkulma

Kapalı kesite sahip dikmeler büyük burulma rijitliğine sahip olduklarından dolayı burularak burkulmazlar. Açık kesitler için, burkulma analizi yapılırken üç farklı burkulma çeşidinin de (eğilmeli burkulma, burulmalı burkulma ve burulmalı – eğilmeli burkulma) görülmesi mümkündür.

Açık kesitli dikme burulmalı – eğilmeli burkulma modunda burkulduğu zaman, kesitte eğilme ve burulma eş zamanlı olarak meydana gelmektedir. Şekil 3.4' de görüldüğü gibi kesit x ve y eksenlerinde u ve v kadar ötelenir ve kayma merkezi etrafında ϕ açısı kadar döner.



Şekil 3. 4 Burulmalı – Eğilmeli burkulma esnasındaki yer değiştirmeler (Yu 1973)

Eksenel P yükü altında kolonun denge şartları aşağıdaki diferansiyel denklemlerle ifade edilir (Yu 1973).

$$EI_x v''v + Pv'' - Px_0 \phi'' = 0 \quad (3.24)$$

$$EI_y u''v + Pu'' + Py_0 \phi'' = 0 \quad (3.25)$$

$$EC_w \phi'v - (GJ - Pr_0^2) \phi'' + Py_0 u'' - Px_0 v'' = 0 \quad (3.26)$$

Burada I_x x eksenine göre atalet momenti, I_y y eksenine göre atalet momenti, u x eksenine doğrultusundaki yer değiştirme, v y eksenine doğrultusundaki yer değiştirme, ϕ dönme açısı, x_0 kayma merkezinin x eksenindeki koordinatı, y_0 kayma merkezinin y eksenindeki koordinatı, E elastisite modülü, G kayma modülü, J kesitin St. Venant burulma sabiti, C_w burulmanın çarpılma sabiti, r_x x eksenine göre kesitin jirasyon yarı çapı, r_y y eksenine göre kesitin jirasyon yarı çapı, r_0 kayma merkezine göre kesitin jirasyon polar yarı çapıdır.

Basit mesnetli kolonlar için aşağıdaki sınır şartlarına göre;

$z = 0'$ da

$$u = v = \phi = 0 \quad (3.27)$$

$z = L'$ de

$$u'' = v'' = \phi'' = 0 \quad (3.28)$$

göre çözülürse aşağıdaki karakteristik denklem elde edilir.

$$(r_0)^2(P_{kr} - P_x)(P_{kr} - P_y)(P_{kr} - P_z) - (P_{kr})^2(y_0)^2(P_{kr} - P_x) - (P_{kr})^2(x_0)^2(P_{kr} - P_y) = 0 \quad (3.29)$$

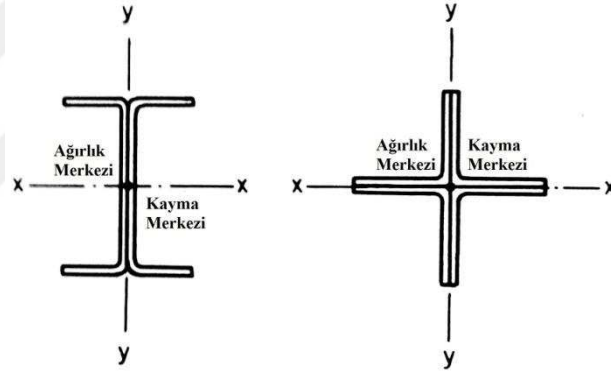
Burada

$$P_x = \frac{\pi^2 EI_x}{l_{e\vartheta}^2} = x \text{ eksenine göre euler eğilmeli burkulma yükü} \quad (3.30)$$

$$P_y = \frac{\pi^2 EI_y}{l_{e\vartheta}^2} = y \text{ eksenine göre euler eğilmeli burkulma yükü} \quad (3.31)$$

$$P_z = \left[\frac{\pi^2 EC_w}{l_{e\vartheta}^2} + GJ \right] \left(\frac{1}{r_0^2} \right) = z \text{ eksenine göre burulmalı burkulma yükü} \quad (3.32)$$

dir. Dikmenin burkulma modu denklem 3.29 ile belirlenebilir. Kritik burkulma yükü P_{kr} yükünün en küçük değeridir (Yu 1973).



Şekil 3. 5 Çift simetri eksenine sahip kesitler (Yu 1973)

I kesit gibi çift simetri eksenine sahip olan kesitlerde ağırlık merkezi ile kayma merkezi birbiriyle çakıştığı için

$$x_0 = y_0 = 0 \quad (3.33)$$

dır. Bu durumda denklem 3.29

$$(P_{kr} - P_x)(P_{kr} - P_y)(P_{kr} - P_z) = 0 \quad (3.34)$$

haline gelir. Kritik burkulma yükü aşağıdaki üç çözümün en düşük değerine sahip olanıdır.

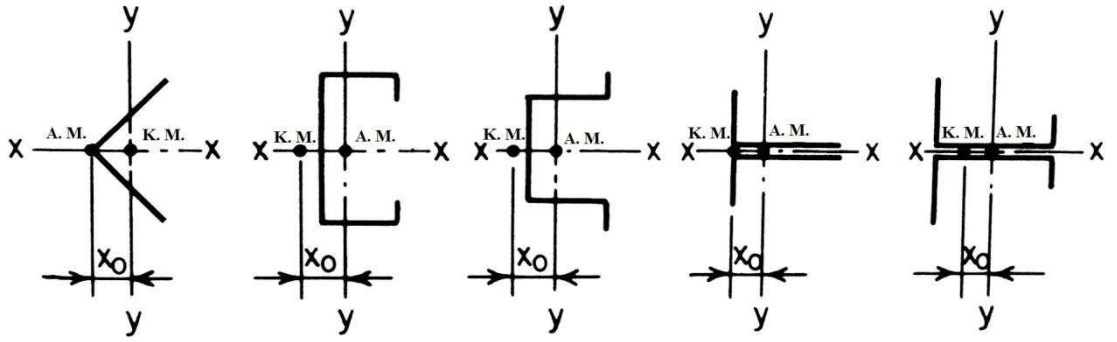
$$(P_{kr})_1 = P_x \quad (3.35)$$

$$(P_{kr})_2 = P_y \quad (3.36)$$

$$(P_{kr})_3 = P_z \quad (3.37)$$

Yukarıda görülen burkulma yüklerine bakıldığında zaman, dikme boyu ve kesit şekline göre çift simetri eksenine sahip olan kesitler ya basit eğilmeyle ya da basit burulmayla hasara uğrayacaklardır. Genellikle bası gerilmesine maruz kalan çift simetri eksenine sahip olan kesitler kolay kolay burulmaya maruz kalmayacaklardır. Bu kesitler için burulmalı burkulma gerilmesi yerel (local) burkulma gerilmesine benzerdir. Çift simetri eksenine sahip olan kesitler için burulmalı burkulma gerilmesinin değerlendirilmesinde aşağıdaki denklem kullanılabilir (Yu 1973).

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{l_{e\varphi}^2} \right] \quad (3.38)$$



Şekil 3. 6 Tek simetri eksenine sahip olan kesitler (Yu 1973)

Şekil 3.6' da görüldüğü gibi köşebentler, C kesitler, şapka kesitler, T kesitler ve flanş boyları birbirine eşit olamayan I kesitler tek simetri eksenine sahiptir. Eğer x eksenini bu kesitler için simetri ekseniyse, y eksenini doğrultusunda kayma merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki y_0 mesafesi sıfırdır. Bu durumda denklem 3.29

$$(P_{kr} - P_y)[(r_0)^2(P_{kr} - P_x)(P_{kr} - P_z) - (P_{kr} x_0)^2] = 0 \quad (3.39)$$

haline gelir. Bu durumda çözümlerden biri

$$(P_{kr})_1 = P_y = \frac{\pi^2 E I_y}{l_{e\varphi}^2} \quad (3.40)$$

dır. Bu kritik eğilmeli burkulma yüküdür. Diğer iki çözümde aşağıdaki quadratik denklem çözülerek elde edilebilir.

$$r_0^2(P_{kr} - P_x)(P_{kr} - P_z) - (P_{kr}x_0)^2 = 0 \quad (3.41)$$

$\beta = 1 - (x_0/r_0)^2$ olarak kabul edelim o halde,

$$(P_{kr})_2 = \frac{1}{2\beta} \left[(P_x + P_z) + \sqrt{(P_x + P_z)^2 - 4\beta P_x P_z} \right] \quad (3.42)$$

$$(P_{kr})_3 = \frac{1}{2\beta} \left[(P_x + P_z) - \sqrt{(P_x + P_z)^2 - 4\beta P_x P_z} \right] \quad (3.43)$$

olarak elde edilir. $(P_{kr})_3$ değeri $(P_{kr})_2$ değerinden daha küçük olduğu için, denklem 3.43 P_x ve P_z değerlerinden her zaman daha küçük olan kritik burulmalı – eğilmeli burkulma yükü olarak kullanılabilir. Denklem 3.43 toplam kesit alanına bölünürse elastik burulmalı – eğilmeli burkulma gerilmesi aşağıdaki gibi elde edilir (Yu 1973).

$$\sigma_{TFO} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta \sigma_{ex} \sigma_t} \right] \quad (3.44)$$

Burada,

$$\sigma_{ex} = \frac{P_x}{A} \quad (3.45)$$

$$\sigma_t = \frac{P_z}{A} \quad (3.46)$$

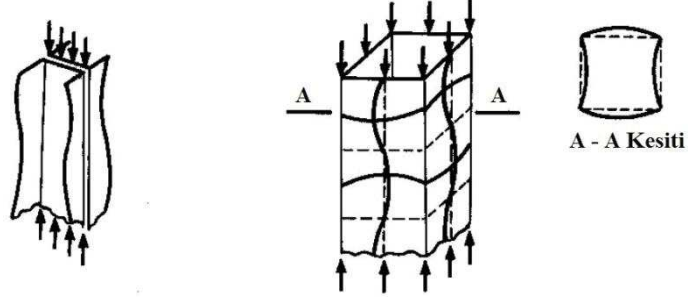
dır.

3.2.3. Yerel (Local) Burkulma

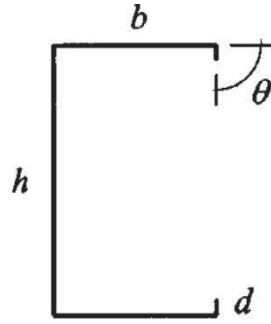
Yerel burkulma, uygulanan yük değerinin dikmenin toplam çökme yüküne ulaşmadan önce dikme kesitinin elemanlarında meydana gelir. Yerel ve global dikme burkulmasının birbiriyle etkileşimi dikmenin toplam dayanımını azaltmaktadır. Genelde, dikme dayanımında yerel burkulmanın etkisi aşağıdaki faktörlere bağlıdır (Yu 1973).

- 1) Kesit şekline
- 2) Dikmenin narinlik oranına
- 3) Meydana gelen global burkulma türüne (eğilmeli burkulma, burulmalı ya da eğilmeli – burulmalı burkulma)

- 4) Kullanılan çelik tipine ve mekanik özelliklerine
- 5) Soğuk şekillendirmeye
- 6) Kusurların etkisine
- 7) Kaynağın etkisine



Şekil 3. 7 Dikmenin yerel burkulması (Yu 1973)



Şekil 3. 8 Kesit geometrisi (Schafer 2002)

Yerel burkulmanın hesabında kullanılan iki yöntem vardır. Bunlar eleman yaklaşımı yöntemi ve yarı ampirik etkileşim yöntemidir. Eleman yaklaşım yöntemi ayrılmış olan elemanların klasik burkulma çözümüdür. Şekil 3.8’ de görülen sırt uzunluğu h , flanş genişliği b ve flanşlarda bulunan uzantıların uzunluğu d olan C kesit için her bir elemanın kritik yerel burkulma gerilmesi (σ_{krl}),

$$(\sigma_{krl})_{sirt} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{h} \right)^2; \quad k = 4 \quad (3.47)$$

$$(\sigma_{krl})_{flanş} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} (b)^2; \quad k = 4 \quad (3.48)$$

$$(\sigma_{krl})_{uzant\ 1} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{d}\right)^2; \quad k = 0.43 \quad (3.49)$$

denklemleri ile bulunur. Eleman yaklaşımı yönteminde C kesitin yerel burkulma gerilmesi denklem 3.47, denklem 3.48 ve denklem 3.49' dan en düşük olanına eşittir veya bu üç denklemin sonuçlarının ortalamasına eşittir (Schafer 2002).

Diğer bir yöntem olan yarı ampirik etkileşim yöntemi elemanların birbiriyle etkileşimini ele almaktadır. Bu yöntemde burkulma katsayısı k sonlu çubuk analizi sonuçlarıyla ampirik olarak hem flanş / uzantı hem de flanş / sırt için belirlenmiştir.

$$k_{flan\ \dot{s}/uzant\ 1} = -11,07 \left(\frac{d}{b}\right)^2 + 3,95 \left(\frac{d}{b}\right) + 4 \quad \frac{d}{b} < 0,6 \quad (3.50)$$

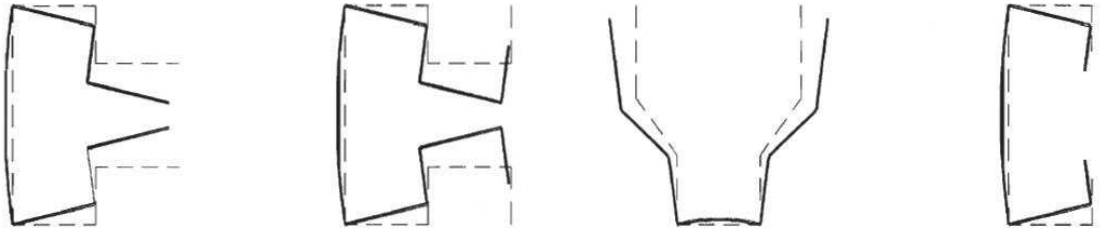
$$k_{flan\ \dot{s}/sirt} = 4 \left(\frac{b}{h}\right)^2 \left[2 - \left(\frac{b}{h}\right)^{0,4}\right]; \quad \frac{h}{b} \geq 1 \quad (3.51)$$

$$k_{flan\ \dot{s}/sirt} = 4 \left[2 - \left(\frac{h}{b}\right)^{0,2}\right]; \quad \frac{h}{b} < 1 \quad (3.52)$$

Tüm dikmenin yerel burkulma gerilmesi (σ_{krl}) denklem 3.50, denklem 3.51 ve denklem 3.52' nin minimum değerleri denklem 3.48' de yerine yazılmasıyla elde edilebilir (Schafer 2002).

3.2.4. Distorsiyonel Burkulma

Distorsiyonel burkulma dikme elemanlarındaki flanşla sırt bölgesinin birleştiği noktada flanşların dönmesiyle meydana gelir bundan dolayı bu burkulma tipi flanşlar tarafından karakterize edilmektedir. Bundan dolayıda distorsiyonel burkulma, flanş distorsiyonel burkulması olarak da isimlendirilmektedir. Şekil 3.9' da çeşitli açık kesitlerde meydana gelen distorsiyonel burkulma örnekleri görülmektedir.



Şekil 3. 9 Çeşitli açık kesitlerde meydana gelen distorsiyonel burkulma örnekleri
(Eurocode 3 1993)

Distorsiyonel burkulma olayı özellikle narinlik oranı düşük olan açık kesitlerde meydana gelen önemli bir hasar tipidir. Bundan dolayı distorsiyonel burkulma hakkındaki çalışmalar son zamanlarda önemli derecede artmış durumdadır. Açık kesitli çelik depo raf sistemlerinde kullanılan dikmelerin distorsiyonel burkulması 1985’ de Hancock tarafından araştırılmıştır. Hancock bu çalışmasında burkulma gerilmesini hesaplamak için basit tasarım tabloları oluşturmuştur. Daha sonra birçok araştırmacı bu konu üzerinde araştırma yapmıştır (Galambos 1998).

3.3. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Dikmelerin Kapasite Hesabı Üzerine Geliştirilmiş Standartlar

Depo raf sistemlerinde kullanılan ince cidarlı açık kesitli soğuk şekillendirilmiş dikmelerin taşıma kapasitelerini belirlemek için ve tasarımlarını yapmak için birçok standart mevcuttur. Bu standartlardan bazıları şu şekildedir.

- Raf Üreticileri Kuruluşu standardı (RMI 2008) endüstriyel çelik depo raf sistemlerinin tasarımı, test prosedürleri ve kullanımı için oluşturulmuş bir standarttır.
- Amerikan Demir Çelik Kuruluşu standardı (AISI S100-07) çelik depo raf sistemlerinde kullanılan elemanların tasarımı ve dayanımlarını hesaplamak için geliştirilmiştir. Ayrıca bu standart Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Elemanların Tasarımı için Kuzey Amerika standardı olarakta isimlendirilmektedir.
- Avustralya / Yeni Zelanda standardı (AS / NZS 4084-2012) çelik depo raf sistemlerinde kullanılan sıcak haddelenmiş ve soğuk şekillendirilmiş elemanların tasarımı için geliştirilmiştir.

- İngiliz standardı (BS EN 15512:2009) çelik depo raf sistemlerinde kullanılan elemanların tasarımı ve testleri için geliştirilmiştir.

3.4. Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü Standardı (AISI S100 – 2007)

Amerikan Demir Çelik Kuruluşu standardı (AISI S100-07), Amerika Demir Çelik Enstitüsü, Kanada Standartları Komitesi ve Meksika Demir Çelik Odası tarafından hazırlanmıştır ve aynı zamanda Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Elemanların Tasarımı için Kuzey Amerika Standardı olarakta isimlendirilmektedir. Bu standart çelik depo raf sistemlerinde kullanılan elemanların tasarımı ve dayanımlarını hesaplamak için geliştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında bu standardın C.4 bölümündeki ağırlık merkezinden yüklenmiş dikmelerin dayanım hesapları ve Ek 1’ de verilmiş olan doğrudan dayanım yöntemi kullanılarak soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların dayanımı üzerinde durulmuştur.

3.4.1. Ağırlık Merkezinden Yüklenmiş Dikmeler

Akma, Eğilmeli, Burulmalı, Eğilmeli – Bumalı Burkulma için Dikmenin Nominal Dayanımı

AISI S100 - 2007 standardının C4.1. kısmına göre nominal eksenel dayanım denklem 3.53’ e göre hesaplanmaktadır.

$$P_n = A_e \sigma_n \quad (3.53)$$

Burada A_e , σ_n gerilmesi altında hesaplanan efektif alandır.

σ_n narinlik oranına göre aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$\lambda_k \leq 1,5$ için;

$$\sigma_n = (0,658^{\lambda_k^2}) \sigma_y \quad (3.54)$$

$\lambda_k > 1,5$ için;

$$\sigma_n = \left[\frac{0,877}{\lambda_k^2} \right] \sigma_y \quad (3.55)$$

Burada

$$\lambda_k = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_e}} \quad (3.56)$$

dır. σ_y akma gerilmesidir ve σ_e ise AISI S100 - 2007 standardının C4.1.1 ile C4.1.5 bölümleri arasında anlatılan eğilmeli, burulmalı ve eğilmeli – burulmalı burkulma gerilmelerinin en küçük olanıdır (AISI S100 - 2007).

Eğilmeli Burkulmaya Maruz Kalan Kesitler

AISI S100 – 2007 standardının C4.1.1 kısmına göre, çift simetri eksenine sahip kesitler, kapalı kesitler ve burulmalı ya da eğilmeli – burulmalı burkulmaya maruz kalmayan diğer kesitler için elastik eğilmeli burkulma gerilmesi σ_e aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (AISI S100 – 2007).

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (3.57)$$

Burada E çeliğin elastisite modülü, K efektif uzunluk faktörü, L dikme boyu ve r jirasyon yarıçapıdır.

Burulmalı veya Eğilmeli – Burulmalı Burkulmaya Maruz Kalan Tek veya Çift Simetri Eksenine Sahip Kesitler

AISI S100 – 2007 standardının C4.1.2 kısmına göre, tek veya çift simetri eksenine sahip olan kesitler için σ_e elastik burkulma gerilmesi denklem 3.58 ile hesaplanmaktadır.

$$F_e = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] \quad (3.58)$$

$$\beta = 1 - (x_0/r_0)^2 \quad (3.59)$$

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2} \quad (3.60)$$

Burada x_0 kayma merkezinin x eksenindeki koordinatı, r_x x eksenine göre kesitin jirasyon yarıçapı, r_y y eksenine göre kesitin jirasyon yarıçapı, r_0 kayma merkezine göre kesitin jirasyon polar yarıçapıdır. Bu hesaplamalarda tek simetri eksenine sahip kesitlerde simetri eksenini x eksenini olarak seçilmiştir (AISI S100 – 2007).

σ_{ex} ve σ_t , AISI S100 – 2007 standardının C3.1.2.1 kısmına göre aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2} \quad (3.61)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad (3.62)$$

Burada E elastisite modülü, x eksenini etrafında eğilme için efektif boy faktörü, L_x x eksenini etrafında eğilen uzunluk, G kayma modülü, J kesitin Saint – Venant burulma sabiti, C_w kesitin burulma çarpılma sabiti, K_t burulma için efektif boy faktörü, L_t burulan elemanın boyudur (AISI S100 – 2007).

Alternatif bir yol olarak σ_e aşağıdaki gibide hesaplanabilmektedir.

$$\sigma_e = \frac{\sigma_t \sigma_{ex}}{\sigma_t + \sigma_{ex}} \quad (3.63)$$

Distorsiyonel Burkulma Dayanımı

AISI S100 – 2007 standardının C4.2 kısmına göre, açık kesitler için distorsiyonel burkulma dayanımı narinlik oranına göre aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (AISI S100 – 2007).

$\lambda_d \leq 0,561$ için;

$$P_n = P_y \quad (3.64)$$

$\lambda_d > 0,561$ için;

$$P_n = \left(1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right) \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} P_y \quad (3.65)$$

Burada σ_n nominal eksenel dayanımdır.

$$\lambda_d = \sqrt{P_y / P_{crd}} \quad (3.66)$$

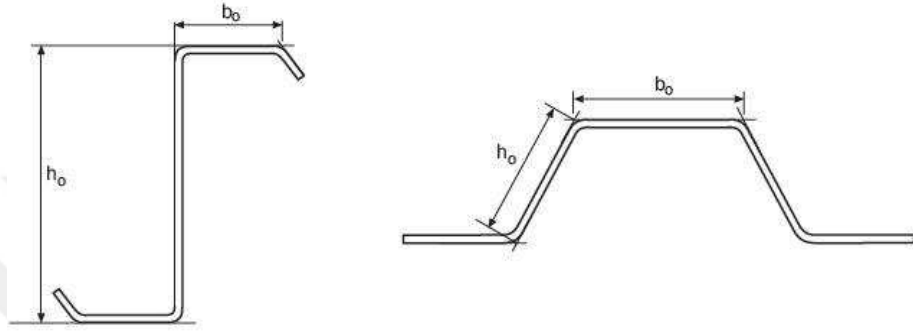
$$P_y = A_g \sigma_y \quad (3.67)$$

Burada A_g kesitin brüt alanıdır ve σ_y akma dayanımıdır.

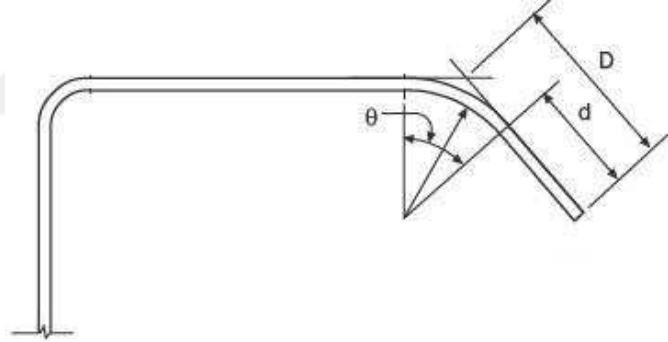
$$P_{crd} = A_g \sigma_d \quad (3.68)$$

Burada σ_d , AISI S100 – 2007 standardının C4.2 (a), (b) veya (c) kısmına göre hesaplanmış olan elastik distorsiyonel burkulma gerilmesidir.

Flaşlarının dönmesinde herhangi bir sınırlama olmayan aşağıda verilen boyutsal sınırları sağlayan C ve Z kesitler için, σ_d distorsiyonel burkulma gerilmesi şu şekilde hesaplanmaktadır (AISI S100 – 2007).



Şekil 3. 10 Dikme kesitinin sırt ve flaş ölçüleri (AISI S100 – 2007)



Şekil 3. 11 Dikme kesitinin flaşında bulunan uzantının ölçüleri (AISI S100 – 2007)

C ve Z kesitler için sağlanması gereken ölçüler aşağıdaki gibidir.

- $50 \leq h_0/t \leq 200$
- $25 \leq b_0/t \leq 100$
- $6,25 \leq D/t \leq 50$
- $45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$
- $2 \leq h_0/b_0 \leq 8$
- $0,04 \leq D \sin \theta / b_0 \leq 0,5$

Burada,

h_0 : Şekil 3.10' da tanımlandığı gibi sırt derinliğinin dıştan dışa ölçüsüdür.

b_0 : Şekil 3.10' da tanımlandığı gibi flanş genişliğinin dıştan dışa ölçüsüdür.

D : Şekil 3.11' de tanımlandığı gibi uzantının dıştan dışa ölçüsüdür.

t : Kesitin sac kalınlığıdır.

θ : Şekil 3.11' de tanımlandığı gibi uzantının açısıdır.

σ_d distorsiyonel burkulma gerilmesi denklem 3.69' a göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma_d = \alpha k_d \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b_0} \right)^2 \quad (3.69)$$

Burada,

α : Efektif boyu oluşturan bir değerdir. Genelde L_m , L_{cr} boyundan daha kısadır fakat α burada 1 olarak alınabilir.

$L_m \geq L_{cr}$ için,

$$\alpha = 0 \quad (3.70)$$

$L_m < L_{cr}$ için,

$$\alpha = (L_m / L_{cr})^{\ln(L_m / L_{cr})} \quad (3.71)$$

L_m : Sınırlandırılmamış efektif uzunluk

$$L_{cr} = 1,2h_0 \left(\frac{b_0 D \sin \theta}{h_0 t} \right)^{0,6} \leq 10h_0 \quad (3.72)$$

$$k_d = 0,05 \leq 0,1 \left(\frac{b_0 D \sin \theta}{h_0 t} \right)^{1,4} \leq 8 \quad (3.73)$$

E : Elastisite modülü

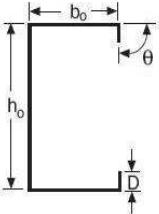
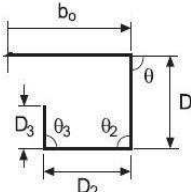
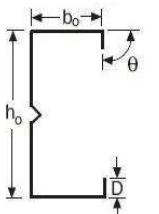
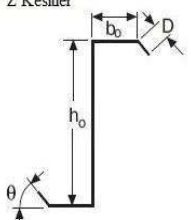
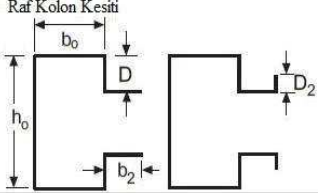
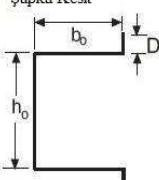
μ : Poisson oranı

Alternatif olarak AISI S100 – 2007 standardının C4.2 (b) ve (c) kısımlarında verilen σ_d distorsiyonel burkulma gerilmesi hesaplanabilir.

3.4.2. Doğrudan Dayanım Yöntemi (DSM) Kullanılarak Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Yapısal Elemanlarının Tasarımı

Doğrudan dayanım yöntemi AISI S100 – 2007 standardının Ek 1 bölümünde anlatılmıştır. Doğrudan dayanım yöntemi elemanların elastik burkulma davranışının belirlenmesinde ve elastik burkulma davranışına göre elemanın dayanımını tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu yöntem efektif genişlik hesabı veya iterasyon kullanmak yerine kesitin elastik burkulma davranışını ve brüt kesit özelliklerini kullanmaktadır. Bu yöntemi kullanmak için dikme kesitlerinin ölçüleri Şekil 3.12’ de verilen şartları sağlamak zorundadır (AISI S100 – 2007).



Uzantılı C Kesitler Basit Uzantılı:  Karmaşık Uzantılı: 	Tüm C kesitler için $h_0/t < 472$ $b_0/t < 159$ $4 < D/t < 33$ $0,7 < h_0/b_0 < 5$ $0,05 < D/b_0 < 0,41$ $\theta = 90^\circ$ $E/F_y > 340 [F_y < 593 \text{ MPa}]$ Karmaşık uzantılı C kesitler için $D_2/t < 34$ $D_2/D < 2$ $D_3/t < 34$ $D_3/D_2 < 1$ Not: D₂ uzantısı içeriye veya dışarıya doğru katlanabilir. D₃ uzantısı aşağı veya yukarıya doğru katlanabilir.
Sırt Güçlendiricili Uzantılı C Kesitler 	$h_0/t < 489$ $b_0/t < 160$ $6 < D/t < 33$ $0,7 < h_0/b_0 < 5$ $1,3 < D/b_0 < 2,7$ $E/F_y > 340 [F_y < 593 \text{ MPa}]$
Z Kesitler 	$h_0/t < 137$ $b_0/t < 56$ $0 < D/t < 36$ $1,5 < h_0/b_0 < 2,7$ $0 < D/b_0 < 0,73$ $\theta = 50^\circ$ $E/F_y > 590 [F_y < 345 \text{ MPa}]$
Raf Kolon Kesiti 	Karmaşık uzantılı C kesitlere bakınız.
Şapka Kesit 	$h_0/t < 50$ $b_0/t < 20$ $4 < D/t < 6$ $1 < h_0/b_0 < 1,2$ $D/b_0 = 0,13$ $E/F_y > 428 [F_y < 476 \text{ MPa}]$

Not: $r/t < 10$, burada r bükme yarıçapı, b_0 toplam genişlik, D_0 toplam uzantı derinliği, t sac kalınlığı, h_0 toplam derinlik

Şekil 3. 12 Doğrudan dayanım için dikme kesit ölçüleri (AISI S100 – 2007)

Elastik Burkulma Yüklerinin Bulunması

Doğrudan dayanım yöntemiyle (DSM) dikme kesitlerinin dayanımını belirlemek için yerel (local), distorsiyonel ve global elastik burkulma yüklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu elastik burkulma yükleri sonlu çubuk yöntemi kullanan CUFSM gibi programlarla veya ANSYS, ABAQUS gibi sonlu elemanlar yazılımıyla elde edilmektedir (Mangır 2014).

Doğrudan Dayanım Yöntemiyle Global (Eğilmeli, Burulmalı, Eğilmeli – Burulmalı) Burkulma Dayanımını Hesaplama

AISI S100 – 2007 standardına göre global (eğilmeli, burulmalı, eğilmeli – burulmalı) burkulma dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$\lambda_c \leq 1,5$ için;

$$P_{ne} = (0,658^{\lambda_c^2}) P_y \quad (3.74)$$

$\lambda_c > 1,5$ için;

$$P_{ne} = \left[\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right] P_y \quad (3.75)$$

Burada

$$\lambda_c = \sqrt{P_y / P_{cre}} \quad (3.76)$$

$$P_y = A_g \sigma_y \quad (3.77)$$

A_g kolon kesitinin brüt alanı, σ_y akma dayanımı ve P_{cre} elastik burkulma yüklerinin bulunması bölümünde anlatılan yöntemlerden elde edilmiş olan kritik elastik burkulma yüküdür.

Doğrudan Dayanım Yöntemiyle Yerel (Local) Burkulma Dayanımını Hesaplama

AISI S100 – 2007 standardına göre yerel (local) burkulma dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$\lambda_l \leq 0,776$ için;

$$P_{nl} = P_{ne} \quad (3.78)$$

$\lambda_l > 0,776$ için;

$$P_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} P_{ne} \quad (3.79)$$

Burada

$$\lambda_l = \sqrt{P_{ne}/P_{crl}} \quad (3.80)$$

P_{ne} , bir önceki bölümde hesaplanan dayanım değeridir. P_{crl} ise elastik burkulma yüklerinin bulunması bölümünde anlatılan yöntemlerden elde edilmiş olan kritik elastik burkulma yüküdür.

Doğrudan Dayanım Yöntemiyle Distorsiyonel Burkulma Dayanımını Hesaplama

AISI S100 – 2007 standardına göre distorsiyonel burkulma dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$\lambda_d \leq 0,561$ için;

$$P_{nd} = P_y \quad (3.81)$$

$\lambda_d > 0,561$ için;

$$P_{nd} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} P_y \quad (3.82)$$

Burada

$$\lambda_d = \sqrt{P_y/P_{crd}} \quad (3.83)$$

P_y denklem 3.77 ile hesaplanmaktadır. P_{crd} elastik burkulma yüklerinin bulunması bölümünde anlatılan yöntemlerden elde edilmiş olan kritik elastik burkulma yüküdür.

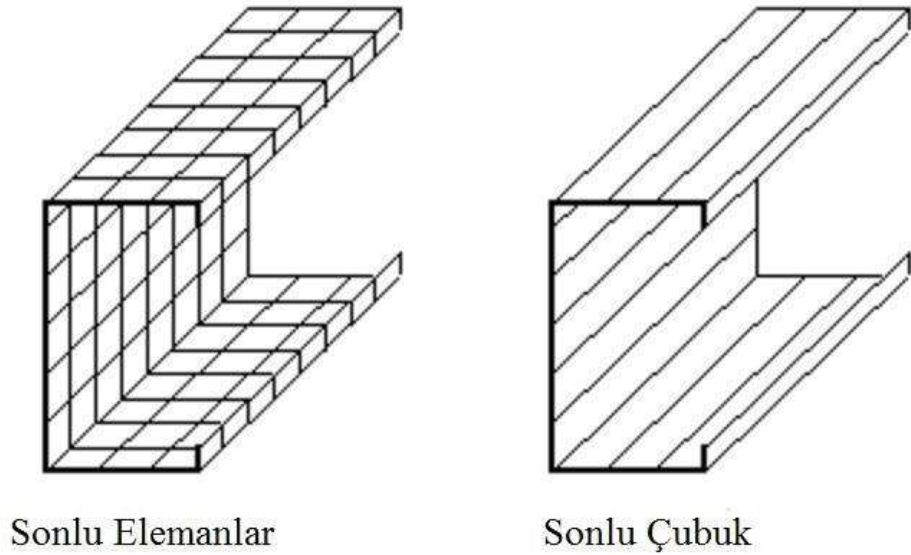
Casafont ve ark. 2011 yılında yaptıkları çalışmada doğrudan dayanım yöntemiyle (DSM) hesapladıkları distorsiyonel burkulma dayanımının yaptıkları test sonuçlarından daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Doğrudan dayanım yönteminden elde edilen sonuçları azaltmak için global – distorsiyonel burkulma etkileşiminin etkilerini dahil etmeye karar vermişlerdir. Distorsiyonel burkulma dayanımını bulmak için alternatif olarak aşağıdaki formülü kullanmışlardır (Casafont ve ark. 2011).

$$P_{nd} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_{ne}} \right)^{0,6} P_{ne} \quad (3.84)$$

Burada P_{ne} elastik global burkulma dayanımıdır.

3.5 Sonlu Çubuk Yöntemi

Elastik burkulma gerilmesi ve modlar çeşitli yöntemlerle hesaplanabilmektedir. En yaygın olarak kullanılan iki yöntem sonlu elemanlar yöntemi ve sonlu çubuk yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi her türlü geometrinin ve çeşitli sınır şartlarının elastik burkulma sonucunu vermektedir. Fakat sonlu çubuk yöntemi kesit geometrileri karmaşık olabilen fakat boyu tek doğrultuda değişen problemlere uygulanabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEM) mühendislik problemleri analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu çubuk yöntemi ise burkulma modlarının sınıflandırılmasında ve belirlenmesinde sahip olduğu avantajlarla soğuk şekillendirilmiş çelik yapılarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 3.13' de C kesit için sonlu elemanlar ve sonlu çubuk yaklaşımı verilmiştir. Eksenel yüklemeler altında soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlardaki tüm olası burkulma modları sonlu çubuk yöntemi tarafından belirlenebilir. Benjamin W. SCHAFER tarafından geliştirilen açık kaynaklı CUFSM yazılımı sonlu çubuk yöntemini kullanarak soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların burkulma gerilmesini ve modlarını hesaplamaktadır (Zi 2009).



Şekil 3. 13 C kesit için sonlu elemanlar ve sonlu çubuk yaklaşımı

(http://ceeserver.cce.cornell.edu/tp26/twresearchgroup/analysis/cufsm/cufsm_manual.htm)

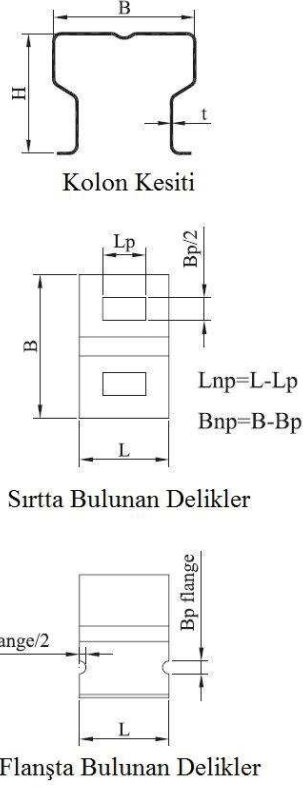
3.5.1. Azaltılmış Kalınlık Yöntemi

Endüstriyel depo raf sistemlerinde kullanılan soğuk şekillendirilmiş çelik dikmeler Şekil 3. 14’ de görüldüğü gibi uzunlukları boyunca birçok deliğe sahiptirler. Böyle dikmelerin dayanım kapasitelerini belirlemek için sonlu elemanlar yöntemi iyi bir alternatiftir. Fakat bu yöntemden sonuç almak sonlu çubuk yöntemine göre çok daha uzun sürmektedir. Casafont ve ark. 2013 yılında yapmış oldukları çalışmada soğuk şekillendirilmiş delikli dikmelerin sonlu çubuk yöntemi analizini kullanarak dayanım kapasitelerini belirlemek için azaltılmış kalınlık kavramını kullanmışlardır. Azaltılmış kalınlık yöntemini kullanarak yaptıkları sonlu çubuk analizi sonuçlarının sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla uyumlu olduğunu belirterek formüller geliştirmişlerdir (Casafont ve ark. 2013).



Şekil 3. 14 Delikli kolon

Soğuk şekillendirilmiş delikli dikmelerin azaltılmış kalınlık hesabı aşağıdaki gibi yapılmaktadır. Şekil 3.15' de dikme kesitinin ölçüleri verilmiştir.



Şekil 3. 15 Delikli dikme ölçüleri

Yerel (local) burkulma için azaltılmış kalınlık formülü denklem 3.85' deki gibidir (Casafont ve ark 2013).

$$t_{rl} = 0,61t \frac{L_{np} B_{np}}{LH} + 0,18t \frac{B_p}{L_p} + 0,11 \quad (3.85)$$

Distorsiyonel burkulma için azaltılmış kalınlık formülü denklem 3.86' daki gibidir (Casafont ve ark 2013).

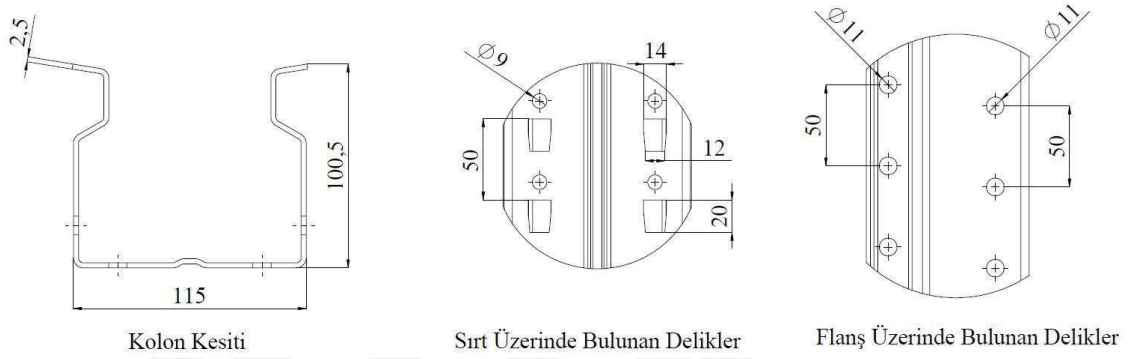
$$t_{rd} = 0,9t \left(\frac{L_{np}}{L} \right)^{1/3} \quad (3.86)$$

Global burkulma için azaltılmış kalınlık formülü denklem 3.87' deki gibidir (Casafont ve ark 2013).

$$t_{rg} = 0,7t \left(\frac{L_{np}}{L} \right) \quad (3.87)$$

3.5.2. Doğrudan Dayanım Yöntemini (DSM) Kullanarak Çelik Depo Raf Sistemlerinde Kullanılan Dikmenin Kritik Burkulma Yüklerinin Belirlenmesi

ÖRNEK ÇALIŞMA: Bu bölümde Şekil 3.16’ da geometrik özellikleri verilmiş olan dikmenin kritik burkulma dayanımı, doğrudan dayanım yöntemi ve CUFSM yazılımı kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 3. 16 Dikme kesitinin ve deliklerinin ölçüleri

Kritik burkulma dayanımı hesabı 2400 mm ve 1300 mm boya sahip olan dikme için yapılmıştır. Burkulma şekline göre azaltılmış kalınlık hesabı aşağıdaki gibidir.

Global (eğilmeli – burulmalı) burkulma için azaltılmış kalınlık denklem 3.87 ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Sırtta bulunan delikler için azaltılmış kalınlık

$$L_{np} = L - L_p = 50 - 20 = 30 \text{ mm}$$

$$t_{rg} = 0,7t \left(\frac{L_{np}}{L} \right) = 0,7 \times 2,5 \times \left(\frac{30}{50} \right) = 1,05 \text{ mm} \quad (3.87)$$

olarak hesaplanmıştır.

Flanşta bulunan delikler için azaltılmış kalınlık

$$L_{np} = L - L_p = 50 - 11 = 39 \text{ mm}$$

$$t_{rg} = 0,7t \left(\frac{L_{np}}{L} \right) = 0,7 \times 2,5 \times \left(\frac{39}{50} \right) = 1,365 \text{ mm} \quad (3.87)$$

olarak hesaplanmıştır.

Distorsiyonel burkulma için azaltılmış kalınlık denklem 3.86 ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Sırtta bulunan delikler için azaltılmış kalınlık

$$L_{np} = L - L_p = 50 - 20 = 30 \text{ mm}$$

$$t_{rd} = 0,9t \left(\frac{L_{np}}{L} \right)^{1/3} = 0,9 \times 2,5 \times \left(\frac{30}{50} \right)^{1/3} = 1,8977 \text{ mm} \quad (3.86)$$

olarak hesaplanmıştır.

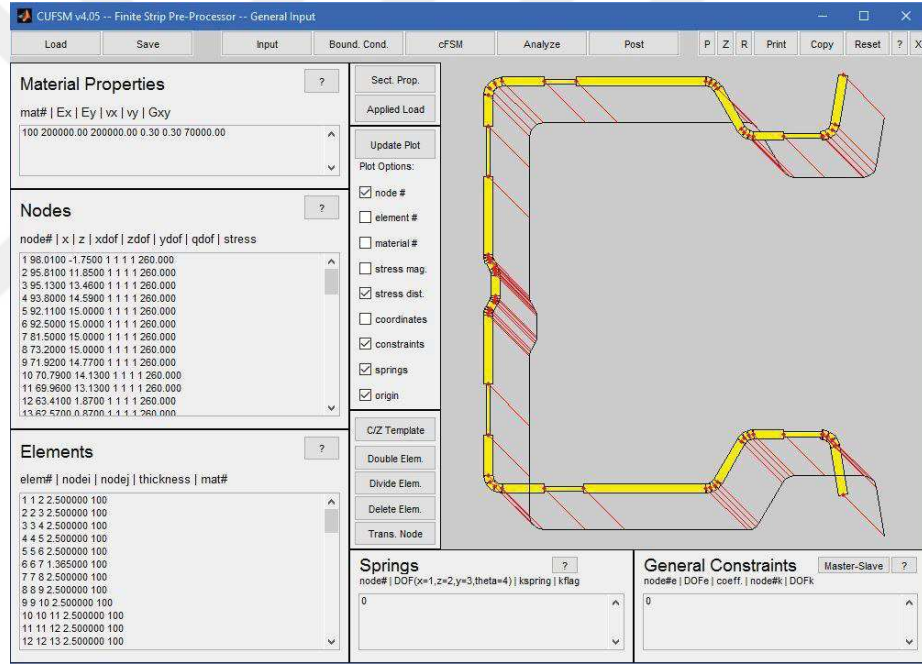
Flanşa bulunan delikler için azaltılmış kalınlık

$$L_{np} = L - L_p = 50 - 11 = 39 \text{ mm}$$

$$t_{rd} = 0,9t \left(\frac{L_{np}}{L} \right)^{1/3} = 0,9 \times 2,5 \times \left(\frac{39}{50} \right)^{1/3} = 2,0712 \text{ mm} \quad (3.86)$$

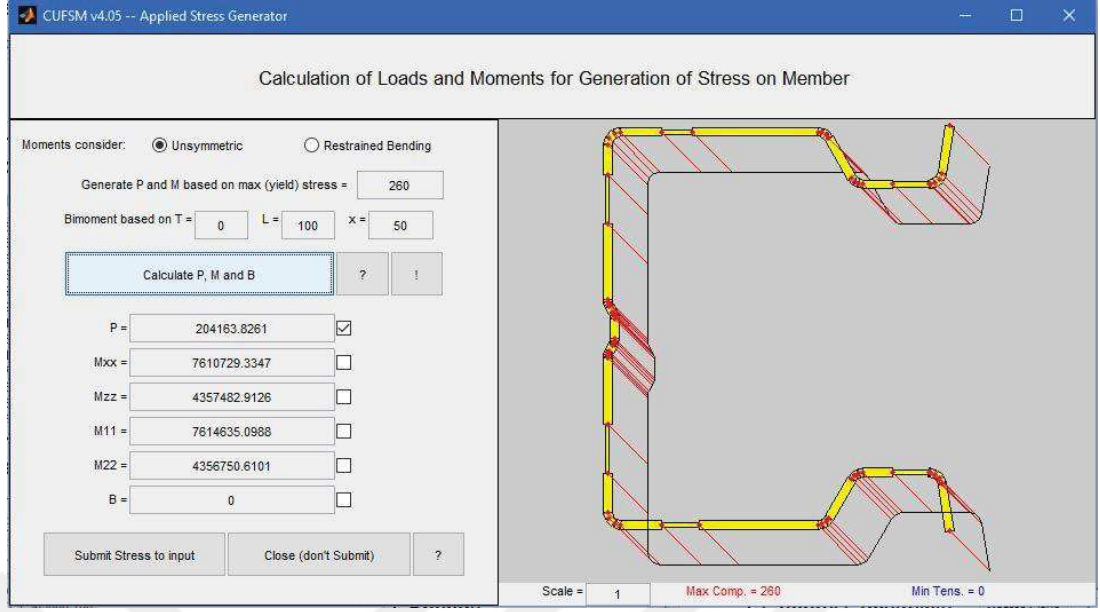
olarak hesaplanmıştır.

2400 mm boya sahip olan dikme global burkulma modu gösterdiğinden dolayı denklem 3.87 ile hesaplanmış olan azaltılmış kalınlık değerleri kullanılarak Şekil 3.17' de görüldüğü gibi CUFSM programında modellenmiştir.



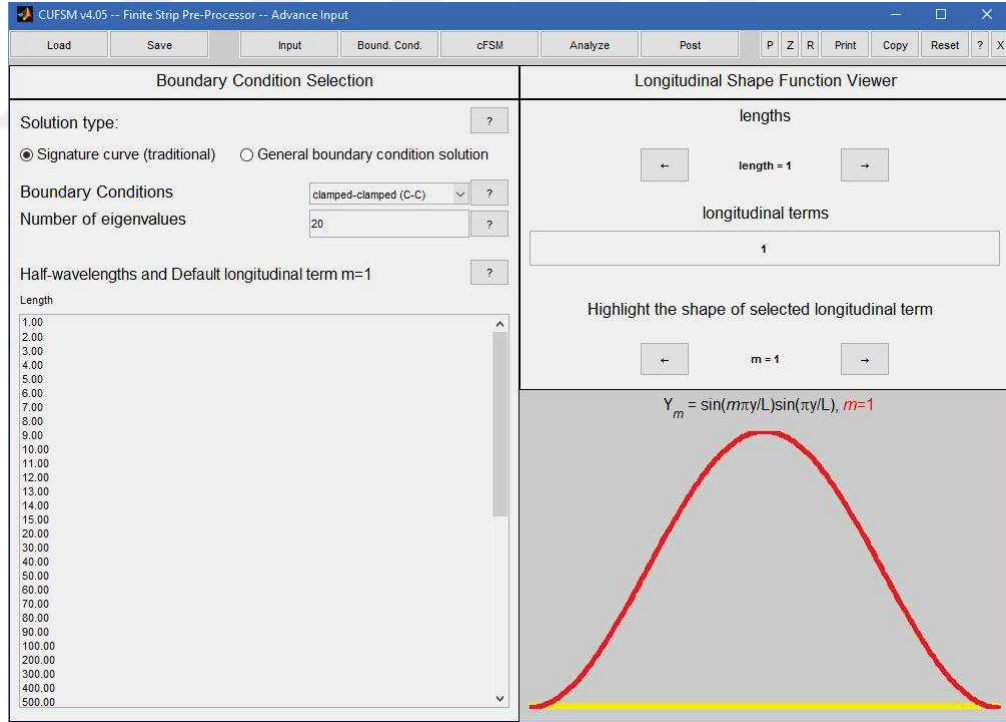
Şekil 3. 17 Global burkulma modu için CUFSM programında modellenmiş dikme kesiti

Dikmenin üretildiği çeliğin akma dayanımı 260 MPa, elastisite modülü 200 GPa ve poisson oranı 0,3 olarak alınmıştır. Dikme kesitine akma gerilmesine karşılık gelecek kuvvet Şekil 3.18' deki gibi uygulanmıştır.



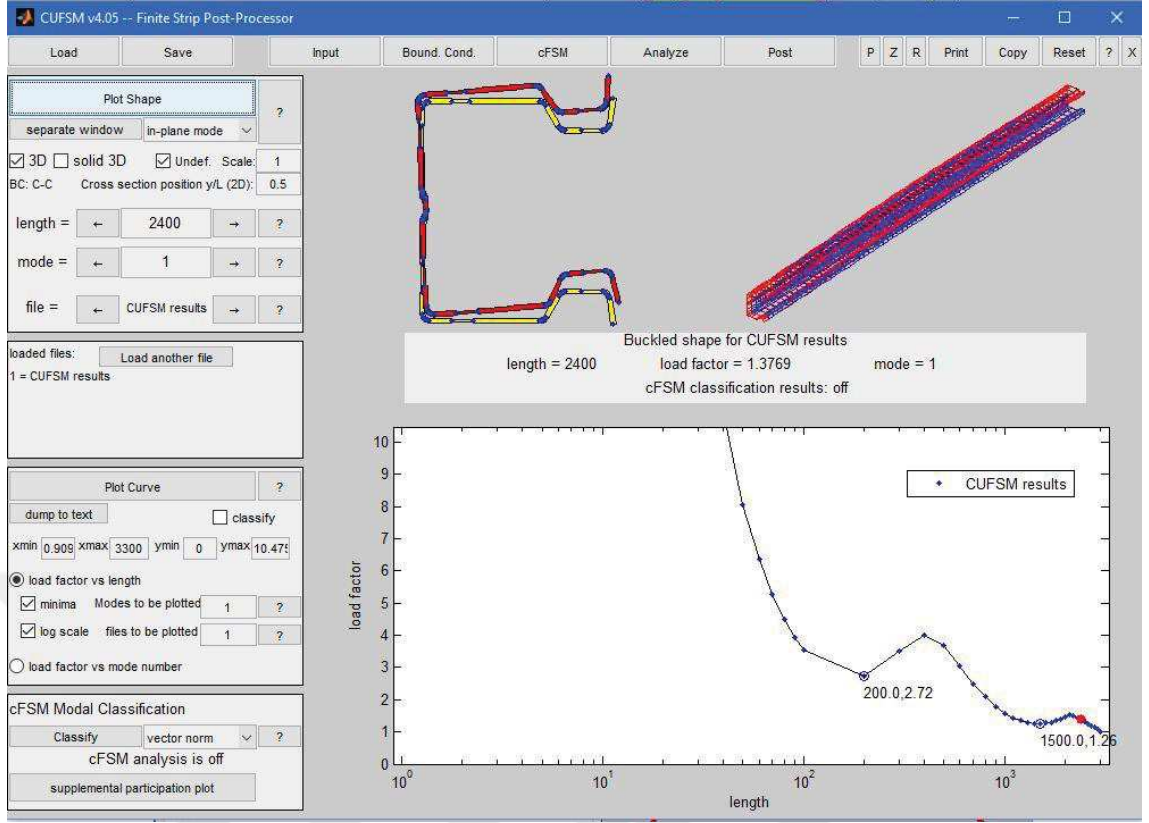
Şekil 3. 18 Kolon kesatine uygulanan kuvvet

Dikmenin sınır şartları Şekil 3.19’ da görüldüğü gibi alt ve üst mesnetleri ankastre olarak seçilmiştir.



Şekil 3. 19 Kolon kesitinin sınır şartları

Belirtilen kuvvet ve sınır şartları altında 2400 mm boya sahip olan dikme Şekil 3.20’ de görüldüğü gibi global (eğilmeli – burulmalı) burkulma modu göstermektedir. Buradan elastik global (eğilmeli – burulmalı) burkulma yük katsayısı elde edilmiştir.



Şekil 3. 20 2400 mm uzunluğa sahip dikmenin burkulma şekli ve yük faktörü sonucu

Buradan elde edilen elastik burkulma yük faktörü ile

$$P_{cre} = \text{Yük Faktörü} \times P_y \quad (3.88)$$

$$P_{cre} = 1,3769 \times 204163,8261 = 281113,1722 \text{ N}$$

olarak elde edilir.

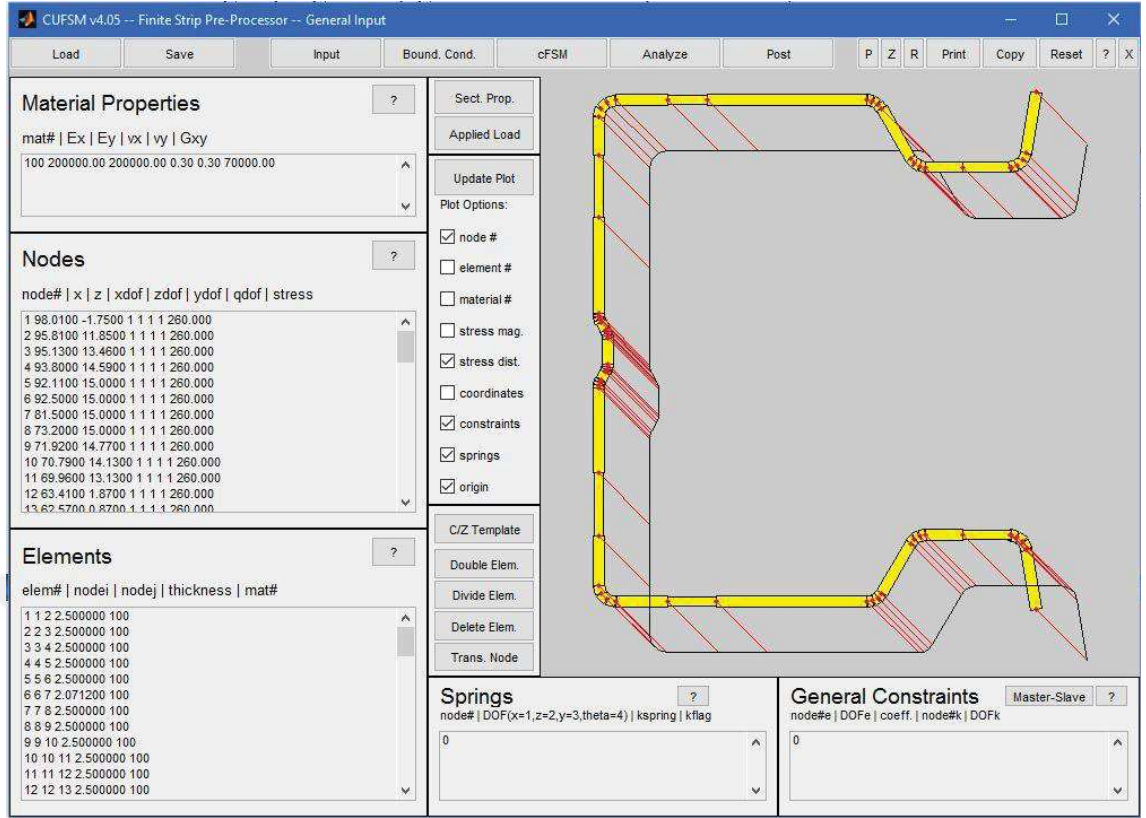
$$\lambda_c = \sqrt{204163,8261/281113,1722} = 0,8522 \quad (3.76)$$

olduğu için global (eğilmeli – burulmalı) burkulma yükü

$$P_{ne} = (0,658^{0,8522^2}) \times 204163,8261 = 150649,0125 \text{ N} \quad (3.74)$$

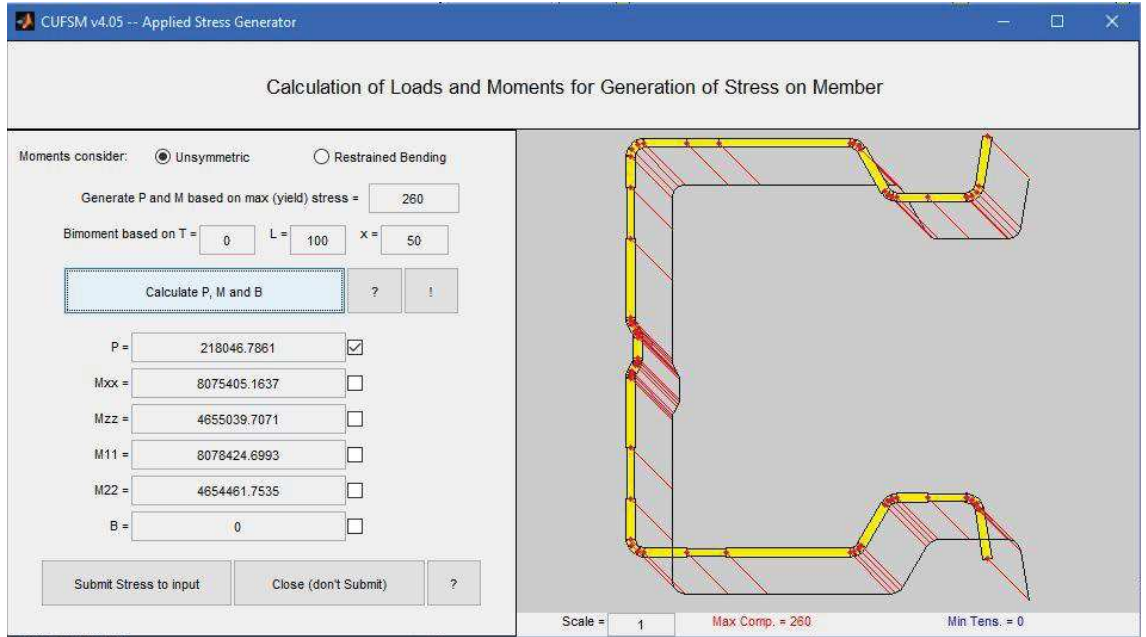
olarak bulunur.

1300 mm boya sahip olan kolon distorsiyonel burkulma modu gösterdiğinden dolayı denklem 3.86 ile hesaplanmış olan azaltılmış kalınlık değerleri kullanılarak Şekil 3.21’ de görüldüğü gibi CUFSM programında modellenmiştir.



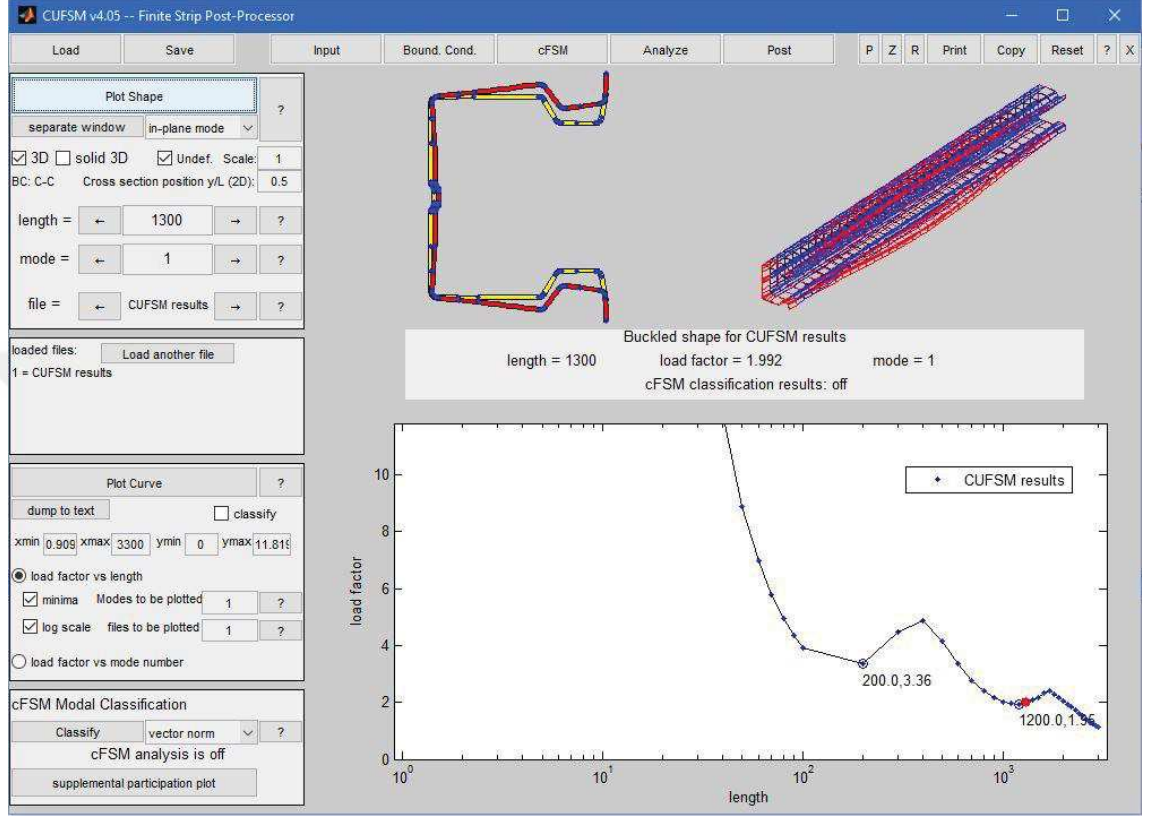
Şekil 3. 21 CUFSM programında modellenmiş dikme kesiti

Dikme kesitine akma gerilmesini karşılık gelecek kuvvet Şekil 3.22’ deki gibi uygulanmıştır.



Şekil 3. 22 Dikme kesitine uygulanan kuvvet

Dikmenin sınır şartları alt ve üst mesnetleri ankastre olarak seçilmiştir. Belirtilen kuvvet ve sınır şartları altında 1300 mm boya sahip olan dikme Şekil 3.23’ de görüldüğü gibi distorsiyonel burkulma modu göstermektedir. Buradan elastik distorsiyonel burkulma yük katsayısı elde edilmiştir.



Şekil 3. 23 1300 mm uzunluğa sahip dikmenin burkulma şekli ve yük faktörü sonucu

Buradan elde edilen elastik burkulma yük faktörü ile

$$P_{crd} = \text{Yük Faktörü} \times P_y \quad (3.89)$$

$$P_{crd} = 1,992 \times 218046,7861 = 434349,1979 \text{ N}$$

olarak elde edilir.

$$\lambda_d = \sqrt{218046,7861/434349,1979} = 0,7085 \quad (3.76)$$

olduğu için distorsiyonel burkulma yükü denklem 3.84 ile hesaplanabilir. Burada P_y kuvveti yerine dikme kesitin global (eğilmeli – burulmalı) burkulma yükü değeri kullanılacaktır. Bu yük değeri yine bu kesit için CUFSM programından hesaplanarak 168282,077 N olduğu bulunmuştur. O halde distorsiyonel burkulma yükü

$$P_{nd} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{434349,1979}{218046,7861} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{434349,1979}{218046,7861} \right)^{0,6} (168282,077)$$

$$= 158266,3528 \text{ N} \quad (3.84)$$

olarak bulunur.

3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, gerilme analizi, ısı transferi, elektromanyetik ve akışkanların akışını kapsayan geniş bir alandaki mühendislik problemlerini çözmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Modern sonlu elemanlar yönteminin kullanımı, bazı araştırmacıların elastik sürekli bir ortamı ayrık eşdeğer elastik çubuklar ile yaklaşık olarak modellediği 1900' lü yılların başlarına kadar uzanmaktadır. Ancak, Courant sonlu elemanlar yöntemini ilk geliştiren kişi olarak kabul edilmektedir. Courant, 1940' ların başlarında yayınlanan bir çalışmada burulma problemlerini araştırmak için üçgen şeklindeki alt bölümlerde parçalı polinom interpolasyonunu kullanmıştır. 1950' li yıllarda Boeing' in uçak kanatlarını modellemede üçgen gerilme elemanlarını kullanmıştır. Sonlu elemanlar terimi Clough tarafından 1960 yılında popüler hale getirilmiştir. 1960' lı yıllar boyunca araştırmacılar sonlu elemanlar yöntemini ısı transferi ve sızıntı akışları gibi mühendisliğin diğer alanlarına uygulamaya başlamışlardır (Ayhan 2015).

Sonlu eleman analizi çözümünde kullanılan temel denklem aşağıdaki gibidir.

$$[K][D] = [R] \quad (3.90)$$

Burada K rijitlik matrisi, D yer değiştirme matrisi ve R ise yük matrisidir.

3.6.1. Lineer Burkulma Analizi

Genel burkulma probleminin çözümü için öncelikle statik lineer analiz yapılması gereklidir ve denge denklemleri denklem 3.90' daki gibidir. Yer değiştirme bilindiği zaman gerilme değeri $[K_{\sigma}]_{ref}$ gerilme rijitlik matrisini oluşturmak için kullanılan $[R]_{ref}$ için hesaplanabilmektedir. $[K_{\sigma}]_{ref}$ gerilme rijitlik matrisi yük vektörü olan $[R]_{ref}$ ile orantılı olduğu için, keyfi gerilme rijitlik matrisi ve yük matrisi denklem 3.91' deki gibi λ sabiti ile tanımlanabilir (Wallin 2014).

$$[K_{\sigma}] = \lambda[K_{\sigma}]_{ref} \text{ ve } [R] = \lambda[R]_{ref} \quad (3.91)$$

Rijitlik matrisi $[K]$ uygulanan yük ile değişmez çünkü problem lineerdir. Bundan dolayı rijitlik matrisi, yer değiştirme ve kritik yük arasındaki ilişki yapının burkulacağı zamanı tahmin etmek için kullanılan denklem 3.92' deki gibi ifade edilebilir (Wallin 2014).

$$([K] + \lambda_{kr} [K_{\sigma}]_{ref}) [D]_{ref} = \lambda_{kr} [R]_{ref} \quad (3.92)$$

Burkulma aynı yükte yer değiştirmedeki değişim olarak tanımlandığı için denklem 3.93 geçerlidir (Wallin 2014).

$$([K] + \lambda_{kr} [K_{\sigma}]_{ref}) ([D]_{ref} + [\delta D]) = \lambda_{kr} [R]_{ref} \quad (3.93)$$

Denklem 3.93' deki $[\delta D]$ burkulma yer değiştirme artımıdır. Burkulmada, yer değiştirme uygulanan yükte değişim olmadan meydana geldiği nokta burkulma noktası olarak adlandırılır. Denklem 3.93 ile denklem 3.92' nin farkı denklem 3.94' ün öz değer problemini verir. Burada en küçük kök λ_{kr} , burkulmanın meydana geldiği en küçük yük değerini verir (Wallin 2014).

$$([K] + \lambda_{kr} [K_{\sigma}]_{ref}) [\delta D] = [0] \quad (3.94)$$

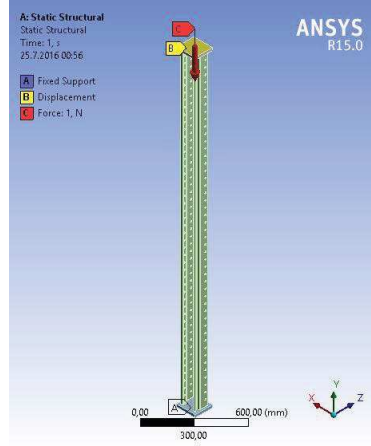
$$\det([K] + \lambda_{kr} [K_{\sigma}]_{ref}) = 0 \quad (3.95)$$

Aynı zamanda sonlu elemanlar yöntemi ile nonlinear burkulma analizleride yapılabilmektedir. Nonlinear burkulma analizinde malzemenin nonlinear özellikleri, başlangıç kusurları ve büyük yer değiştirmeler dikkate alındığı için lineer burkulma analizine göre daha gerçekçi sonuçlar vermektedir.

3.6.2. Nonlinear Burkulma Analizi ile Çelik Depo Raf Sistemlerinde Kullanılan Dikmelerin Kritik Burkulma Yükünün Belirlenmesi

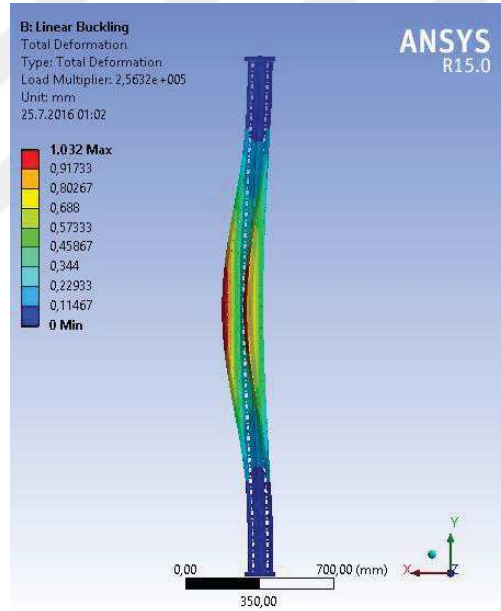
Bu tez çalışmasında nonlinear burkulma analizleri ANSYS Workbench 15.0 yazılımında gerçekleştirilmiştir. Nonlinear analizler aşağıdaki işlem adımlarına göre gerçekleştirilmiştir.

Örnek olarak Şekil 3.16' da verilen dikme kesitinin 2400 mm, 1300 mm ve 300 mm boyları için nonlinear burkulma analizi ile kritik burkulma yükleri belirlenmiştir. Öncelikle dikmeye lineer statik analiz yapılmıştır. Bu analizde sınır şartları Şekil 3.24' de de görüldüğü dikmenin alt mesneti ankastre ve üst mesnetiyse sadece dikme boyu doğrultusunda serbest olacak şekilde seçilmiştir ve uygulanan yük bir plaka vasıtasıyla dikmenin ağırlık merkezine gelecek şekilde uygulanmıştır.



Şekil 3. 24 Lineer statik analizde dikmenin sınır şartları

Lineer statik analiz yapıldıktan sonra lineer burkulma analizi yapılmıştır. Buradan Şekil 3.25’ de görülen dikmenin burkulma şekilleri belirlenmiştir.



Şekil 3. 25 Lineer burkulma analizi sonucu elde edilen burkulma şekli

Elde edilen burkulma şekli bir başlangıç kusur katsayısıyla çarpılmıştır. Bu işlemi gerçekleştirmek için aşağıdaki kod kullanılmıştır.

/Prep7

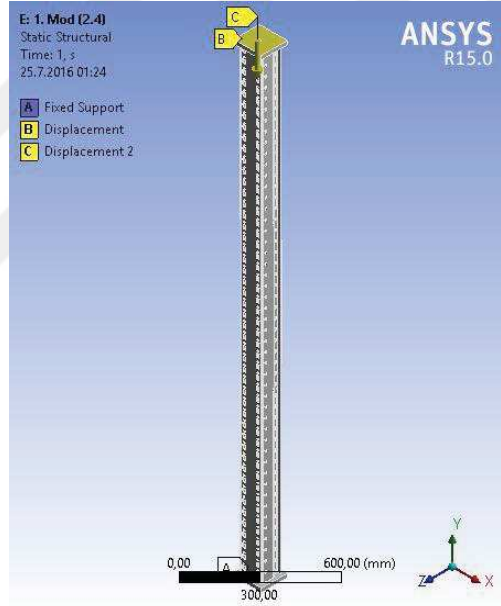
UPGEOM, x , 1,1,file,rst

cdwrite,db,file,cdb

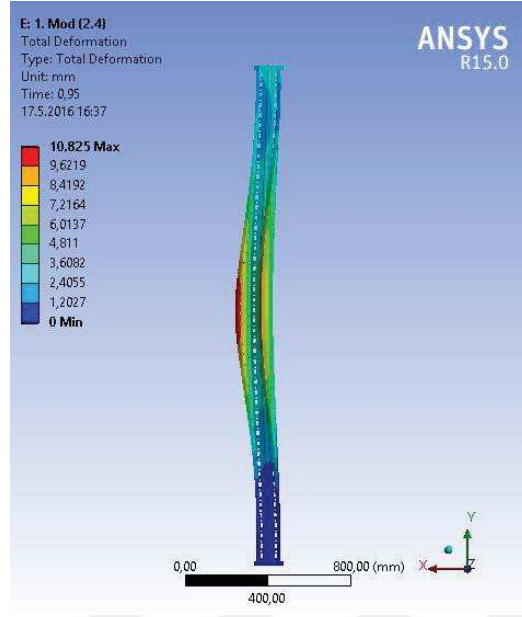
Bu kod satırında gösterilen x değeri başlangıç kusur katsayısıdır. Bu başlangıç kusur katsayısı burkulma şekline (global, distorsiyonel veya yerel burkulma) göre

belirlenmektedir. Başlangıç kusur katsayısı global burkulma için L (dikme boyu) / 1000, distorsiyonel burkulma için f (flanş uzunluğu) / 50 ve yerel (local) burkulma için w (sırt genişliği) / 200 olarak belirlenmektedir (Pastor ve ark. 2014).

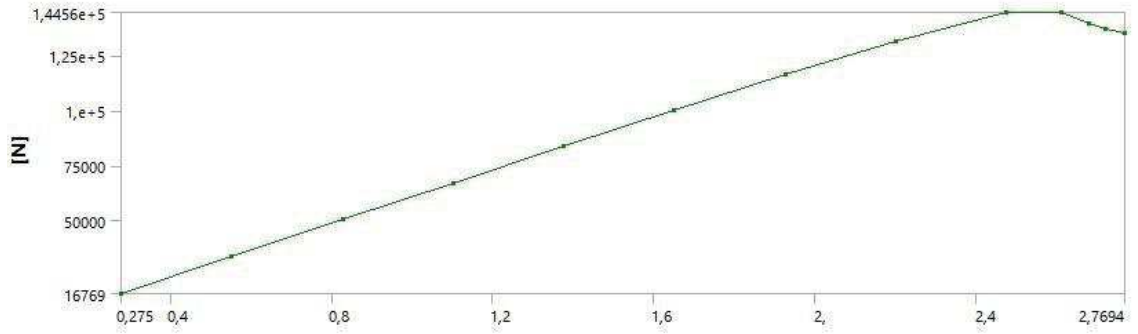
Burkulma şekline göre başlangıç kusur katsayısı ile çarpılmış geometriye aynı sınır şartları altında nonlinear statik analiz yapılmıştır. Ayrıca bu kısımda malzemenin nonlinear özellikleride kullanılmıştır. Bu analizlerde malzeme bilineer malzeme (tanjant modülü = 0) olarak kabul edilmiştir. Nonlinear statik analizde Şekil 3.26’ da görüldüğü gibi dikmenin üst kısmından yer değiştirme verilerek yapılmıştır. Şekil 3.28’ de verilen grafikte dikmede yer değiştirme artarken taşıdığı yük değerinin azaldığı an dikmenin kritik burkulma yüküdür.



Şekil 3. 26 Nonlinear statik analizde dikmenin sınır şartları

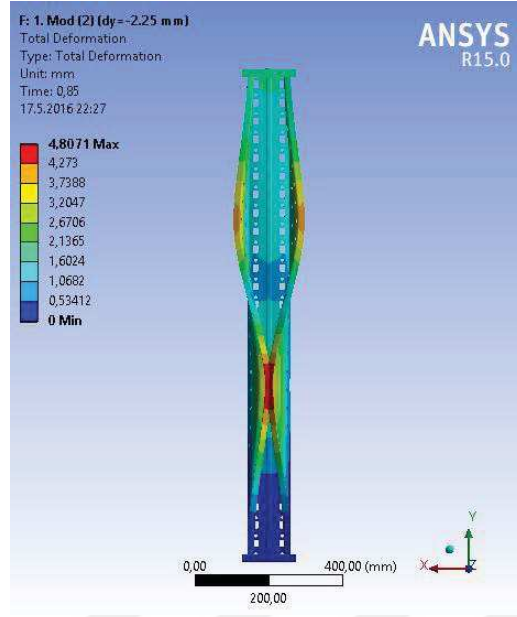


Şekil 3. 27 2400 mm boya sahip olan dikmenin nonlinear analiz sonucu burkulma şekli

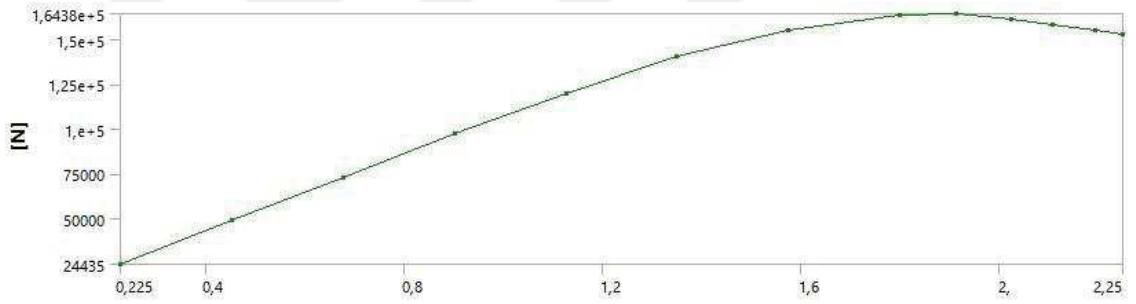


Şekil 3. 28 2400 mm boya sahip olan dikmenin yer değiştirme – kuvvet grafiği

Şekil 3.27’ de görüldüğü gibi 2400 mm boya sahip olan dikme global (eğilmeli – burulmalı) burkulma modunda burkulmaktadır. Bu boy için dikmenin kritik burkulma yük değeri, Şekil 3.28’ de verilen yer değiştirme – kuvvet grafiğine bakıldığında zaman kuvvetin azalmaya başladığı değer olan 144560 N’ dur.

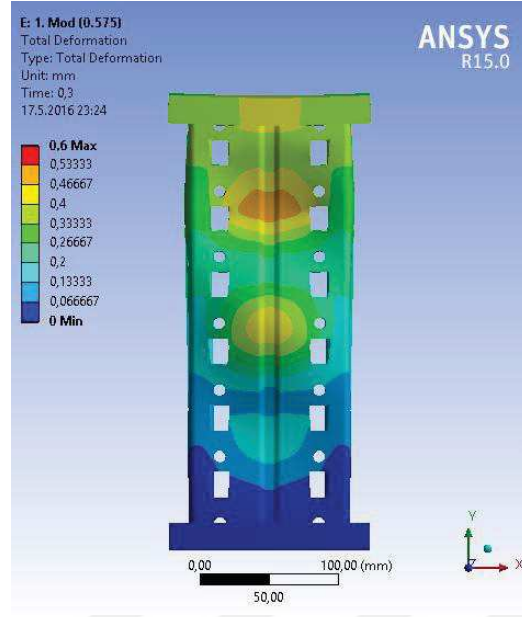


Şekil 3. 29 1300 mm boya sahip olan dikmenin nonlinear analiz sonucu burkulma şekli

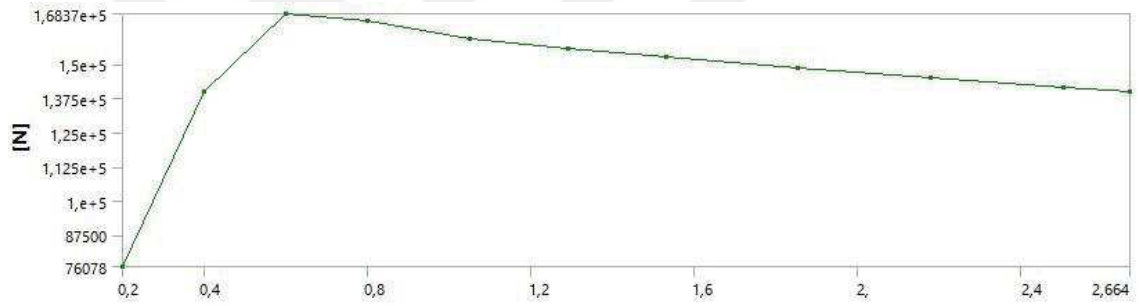


Şekil 3. 30 1300 mm boya sahip olan kolonun yer değiştirme – kuvvet grafiği

Şekil 3.29’ da görüldüğü gibi 1300 mm boya sahip olan dikme distorsiyonel burkulma modunda burkulmaktadır. Bu boy için dikmenin kritik burkulma yük değeri, Şekil 3.30’ da verilen yer değiştirme – kuvvet grafiğine bakıldığında zaman kuvvetin azalmaya başladığı değer olan 164380 N’ dur.



Şekil 3. 31 300 mm boya sahip olan dikmenin nonlineer analiz sonucu burkulma şekli



Şekil 3. 32 300 mm boya sahip olan dikmenin yer değiştirme – kuvvet grafiği

Şekil 3.31’ de görüldüğü gibi 300 mm boya sahip olan dikme yerel (local) burkulma modunda burkulmaktadır. Bu boy için dikmenin kritik burkulma yük değeri, Şekil 3.32’ de verilen yer değiştirme – kuvvet grafiğine bakıldığında zaman kuvvetin azalmaya başladığı değer olan 168370 N’ dur.

3.7. Çelik Depo Raf Sistemlerinde Kullanılan Dikmelerin Deneysel Olarak Kritik Burkulma Yüklerinin Tespit Edilmesi

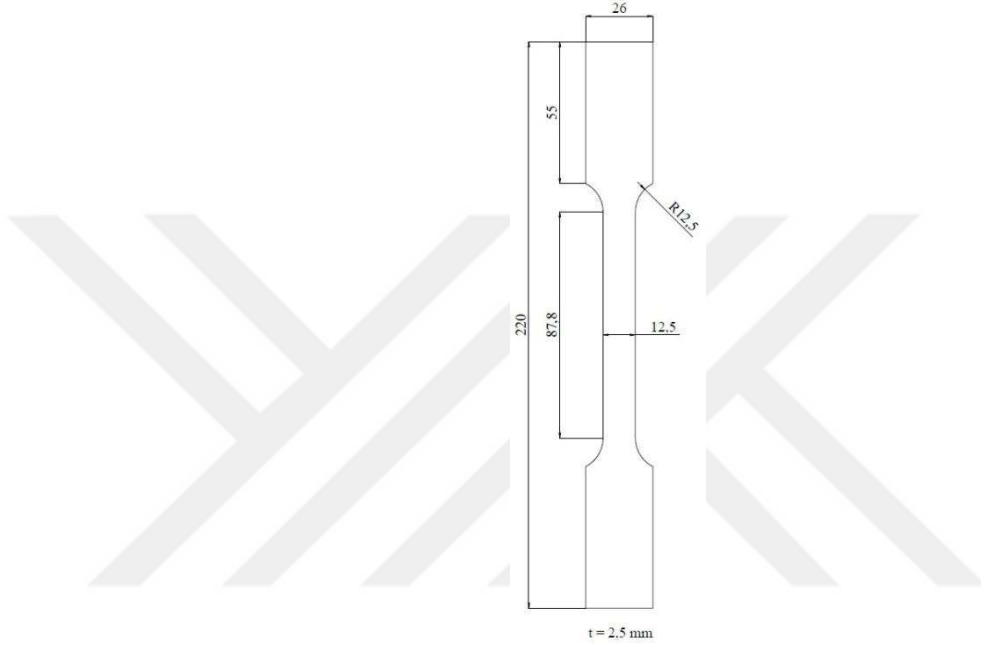
Dikmelerin burkulma testi yapıldığı hidrolik basma test cihazı Şekil 3.33’ de görülmektedir. Hidrolik basma test cihazının kapasitesi 1000 kN’ dur. Test cihazına dikmeler alt taraftan ankastre üst taraftan ise sadece dikme boyu doğrultusunda yer değiştirecek şekilde bağlanmıştır. Burkulma testleri dikme maksimum taşıma kapasitesine ulaşana kadar uygulanan kuvvet artırılarak yapılmıştır. Burkulma testlerinde test hızı olarak 500 N/s seçilmiştir.



Şekil 3. 33 Hidrolik basma test cihazı

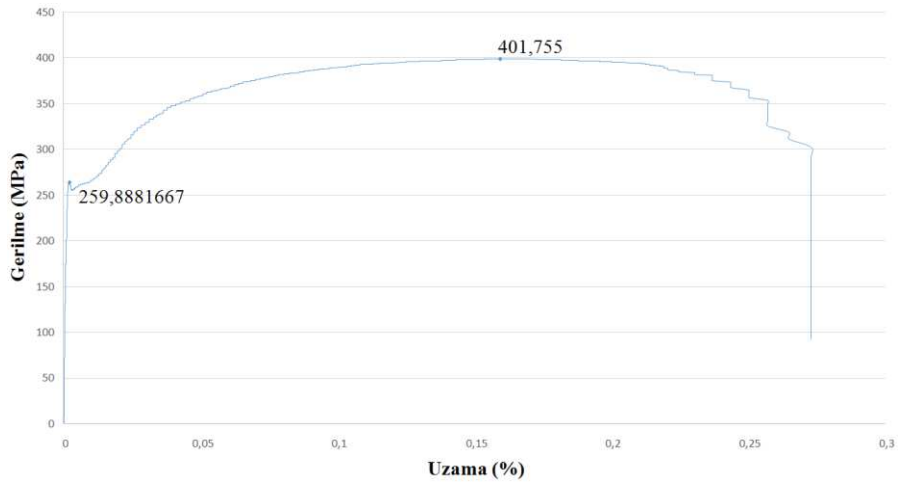
3.8. Çelik Depo Raf Sistemlerinde Kullanılan Dikmelerin Üretildiği Çelik Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Çelik depo raf sistemlerinde kullanılan dikmelerin üretiminde kullanılan çelik malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi yapılmıştır. Çekme testi numuneleri ASTM E8 – 04 standardına göre üretilmiştir. Şekil 3.34’ de çekme testi numunelerinin ölçüleri verilmiştir.



Şekil 3. 34 Çekme testi numunelerinin ölçüleri

Çekme testi 25 mm/dk çekme hızında 250 kN kapasiteli çekme testi makinesinde yapılmıştır. Çekme testinden elde edilen sonuçlar Şekil 3.35’ deki gibidir.



Şekil 3. 35 Gerilme – Uzama eğrisi

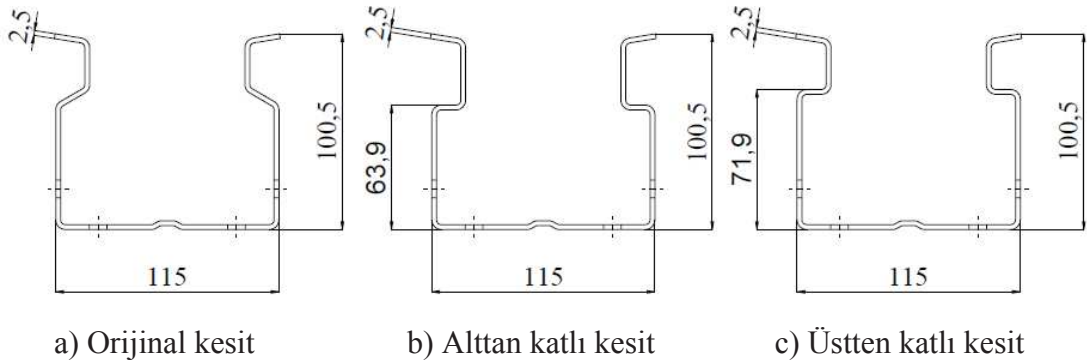
4. TARTIŞMALAR VE BULGULAR

Bu bölümde mevcut durumda kullanılan 115x100 mm kesit ölçülerine sahip orijinal dikme kesitlerinin 2400 mm, 1300 mm ve 300 mm olmak üzere 3 farklı boy için kritik burkulma yükleri nonlineer burkulma analizi ve doğrudan dayanım yöntemi kullanarak ve deneysel olarak belirlenmiştir. Orijinal kesitten yola çıkarak kesit üzerinde aşağıda belirtilen değişiklikler yapılarak kritik burkulma yükünün nasıl değiştiği araştırılmıştır ve 115x100 mm kesit ölçüsüne sahip olan en uygun kesit geometrisi belirlenmiştir.

- Orijinal kesitin flanşında açılı bulunan güçlendiricinin tam katlı olması
- Dikmenin sırt bölgesinde bulunan deliklerin radyüslü olması
- Dikme kesitinin sırt bölgesinde bulunan güçlendiricinin derinliğinin artırılması
- Flanş üzerinde bulunan tam katlı kısmın sırttan farklı uzaklıklarda olması
- Flanş ucunda bulunan uzantının (dudak) tam katlı olması

4.1. Orijinal Kesitin Flanşında Bulunan Güçlendiricinin Tam Katlı Olması Durumu

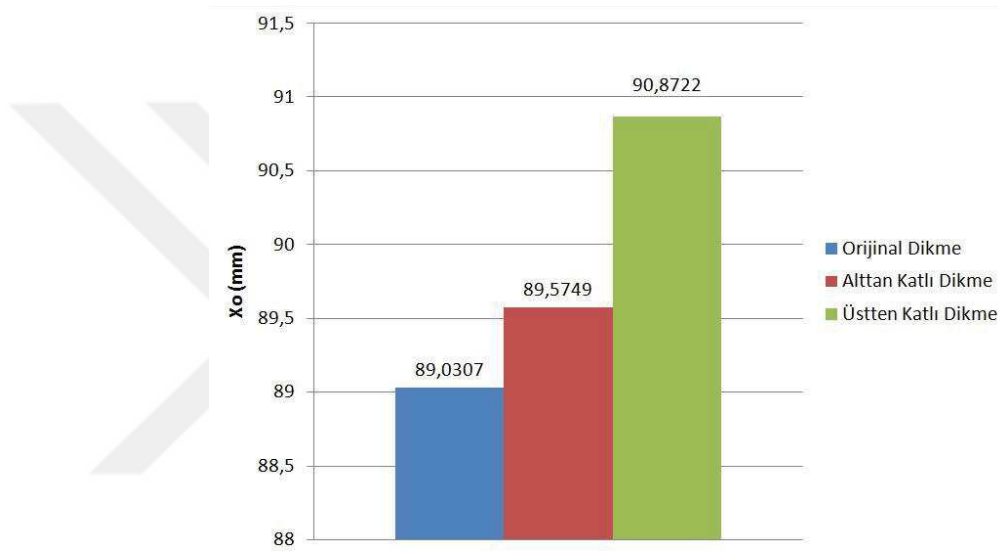
Bu kısımda orijinal kesitin flanşında açılı bulunan güçlendiricinin tam katlı olmasının burkulma yükü üzerine etkisi araştırılmıştır. Burada orijinal kesitin yanında alttan katlı ve üstten katlı olmak üzere iki farklı kesitin daha burkulma davranışı incelenerek kıyaslama yapılmıştır. Şekil 4.1’ de incelenen dikme kesitlerinin ölçüleri görülmektedir.



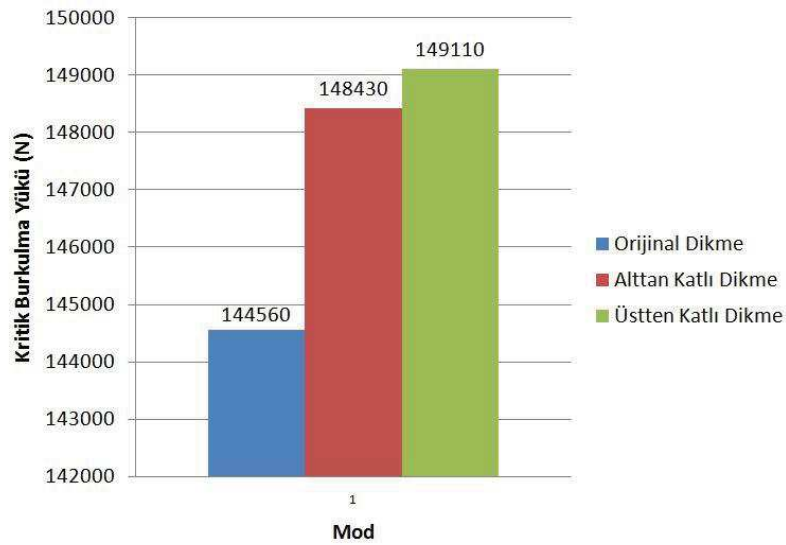
Şekil 4. 1 Dikme kesit ölçüleri

Çizelge 4. 1 Dikme kesit özellikleri

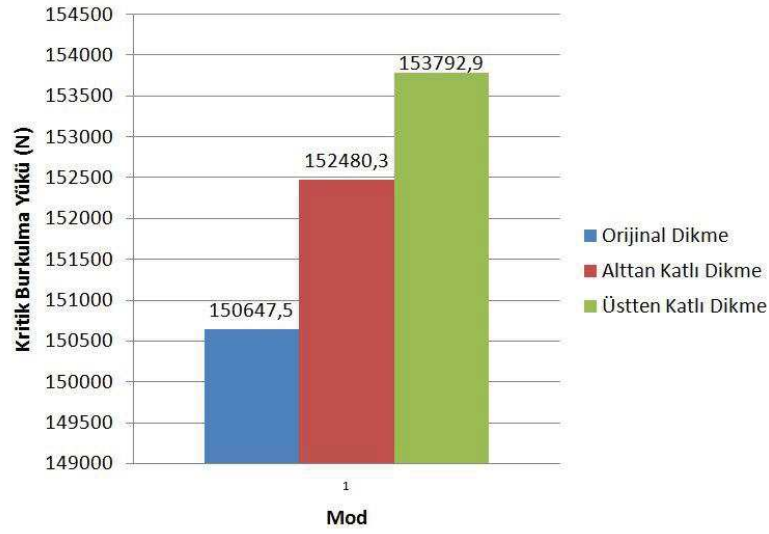
Kesit	Alan (mm ²)	Efektif Alan (mm ²)	I _{xx} (mm ⁴)	I _{yy} (mm ⁴)	J (mm ⁴)
Orijinal Kesit	870.44	647.5769	1104609.13	1863408.80	2968017.92
Altan Katlı Kesit	890.18	679.5769	1104434.43	1873320.30	2977754.73
Üstten Katlı Kesit	890.18	669.5769	1129774.33	1931820.30	3061594.63



Şekil 4. 2 Dikme kesitlerinin kayma merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki mesafe

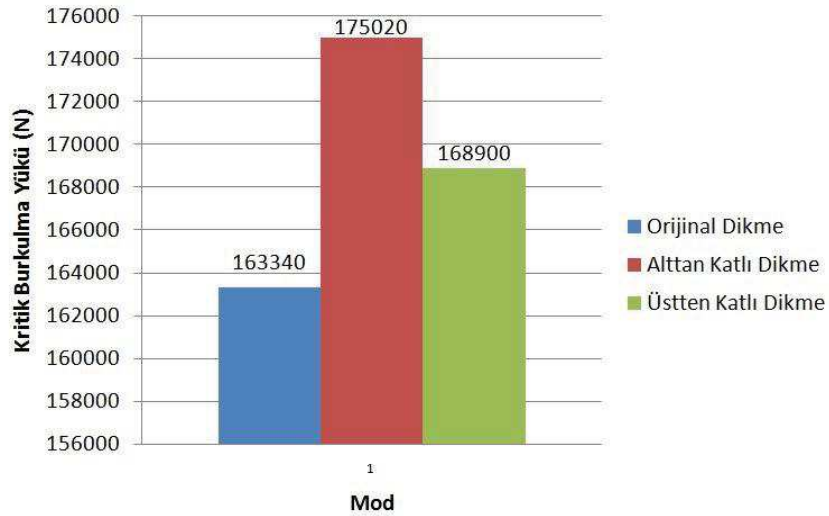


Şekil 4. 3 Nonlineer burkulma analizi sonuçları (L=2400 mm)

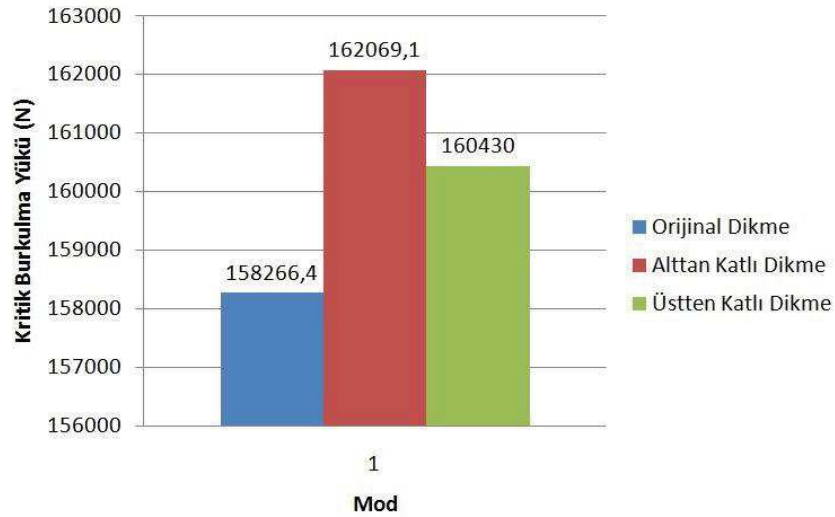


Şekil 4. 4 Doğrudan dayanım yöntemiyle elde edilen burkulma sonuçları ($L=2400$ mm)

Şekil 4.3’ de $L=2400$ mm’ lik boya sahip dikmenin nonlinear burkulma analizi sonuçları ve Şekil 4.4’ de doğrudan dayanım yöntemiyle elde edilen burkulma sonuçları görülmektedir. Bu halde flanşlar aynı yönlü distorte olmakta ve buna müteakiben polar atalet momenti J küçüldüğünden burulma meydana gelmektedir. Buradan da görüldüğü gibi üstten katlı halde en büyük burkulma yükü değeri elde edilmektedir. Gerek alttan katlı kesitte gerekse üstten katlı kesitte I_{xx} , I_{yy} , J ve A değerlerinin arttığı görülmektedir. Üstten ve alttan katlı kesitlerde alanlar aynı olmasına rağmen üstten katlı kesit halinde Çizelge 4.1’ de de görüldüğü gibi atalet momenti değerleri en büyüktür. Bu sebepten dolayı da I_{xx} değeri üstten katlı kesit halinde en büyük kaldığı için en büyük kritik yük değeri bu halde elde edilmektedir.

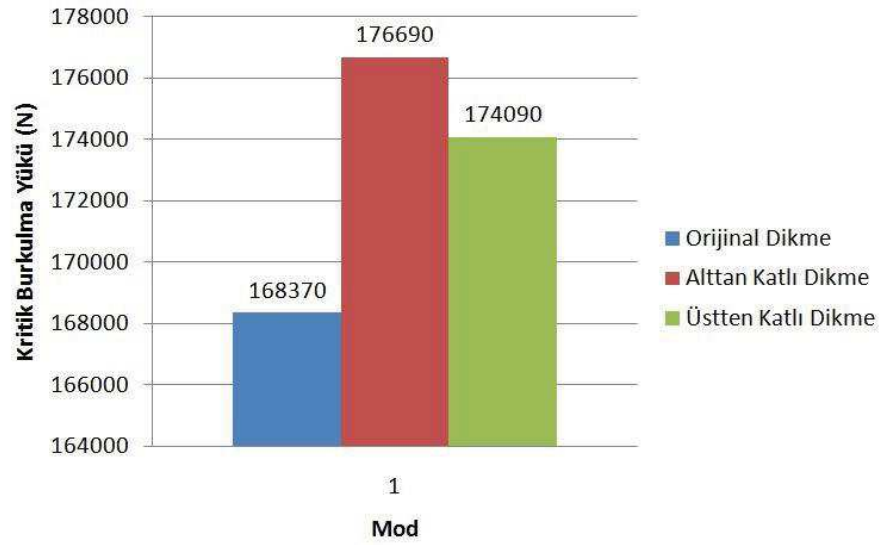


Şekil 4. 5 Nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=1300$ mm)



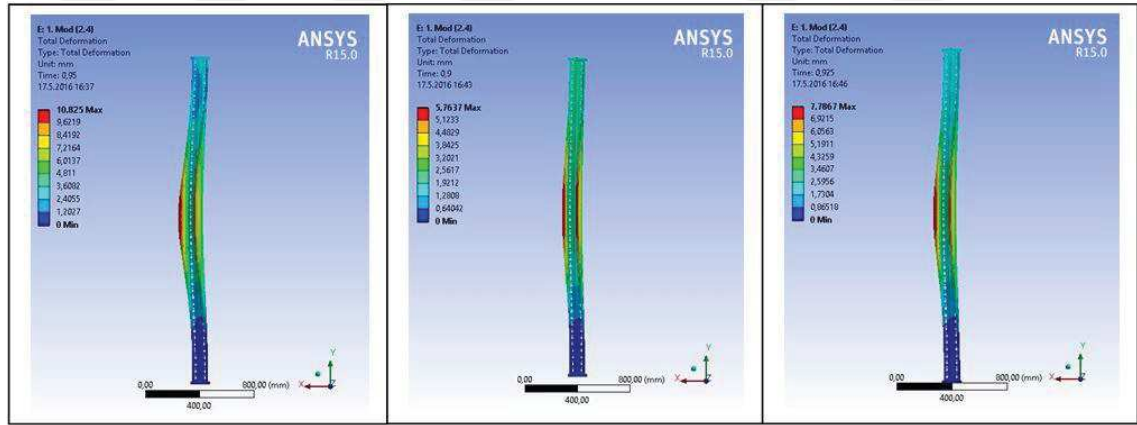
Şekil 4. 6 Doğrudan dayanım yöntemiyle elde edilen burkulma sonuçları ($L=1300$ mm)

Dikme boyunun yüksek olmasından dolayı akmaya tekabül eden yükün altında burkulma yükü elde edilmektedir. Çelik depo raf sistemlerinde boşta kalan etkin uzunluk genellikle 1300 mm civarındadır. Dolayısıyla böyle bir depo raf sistemlerindeki dikmelerin gerçek çalışma şartlarındaki burkulma yüklerini tayin etmek için bu uzunlukta burkulma davranışlarını incelemek daha anlamlıdır. Bu nedenle alt ucu sabit ve üst ucu da dönmelere ve yer değiştirmelere karşı sınırlandırılmıştır (y eksenini hariç). 1300 mm boyundaki dikme için nonlineer burkulma analizleri ve doğrudan dayanım yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6' daki sonuçlara göre bu halde zıt yönlü distorsiyon modu ortaya çıkmaktadır. Zıt yönlü distorsiyon dolayısıyla kesitte burulma yok gibidir. En yüksek kritik yük alttan katlı kesit halinde elde edilmiştir. Boy kısaldıkça burkulma modunun değişmesi ve yükün artması beklenen bir sonuçtur. Bu halde yapı neredeyse akma sınırına kadar zorlanmakta ve burkulma yükü değeri de buna bağlı olarak yüksek çıkmaktadır. Bu halde burkulma yükü üzerinde efektif alan daha etkili olmaya başlamakta ve maksimum yükün değerini belirlemektedir. Nitekim alttan katlı kesitin efektif alanı en büyüktür. Ayrıca boy kısaldıkça orijinal kesit ile alttan ve üstten katlı kesitler arasındaki farkta artmaktadır.



Şekil 4. 7 Nonlineer burkulma analizi sonuçları ($L=300$ mm)

Kesitlerin efektif alanlarını bulmak için 300 mm boyundaki bodur dikmelere nonlineer burkulma analizi yapılmıştır. Buradan elde edilen kritik burkulma yükleri akma noktasına kadar taşıdığı yüküdür. Elde ettiğimiz bu burkulma yüklerini akma dayanımına bölerek efektif alanlar tespit edilmiştir.

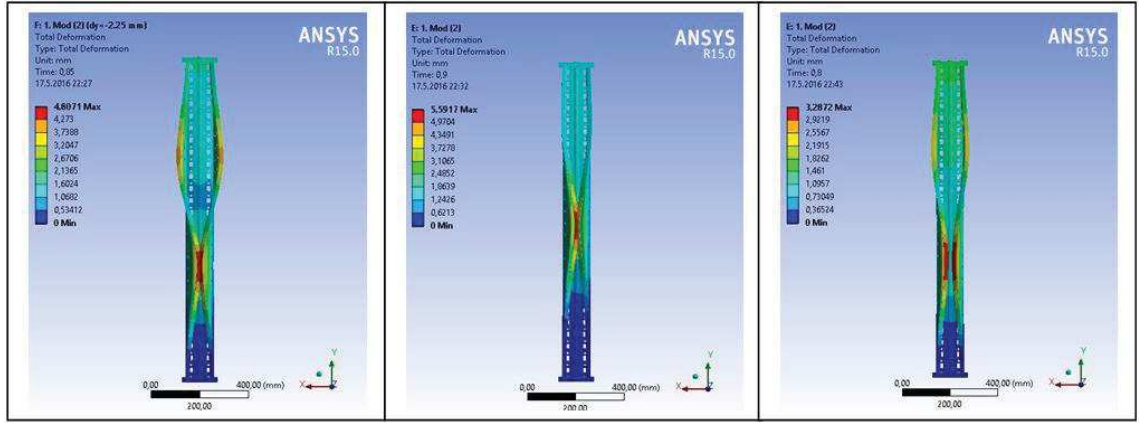


a) Orijinal kesit

b) Altıtan katlı kesit

c) Üstten katlı kesit

Şekil 4. 8 $L=2400$ mm için burkulma mod şekilleri

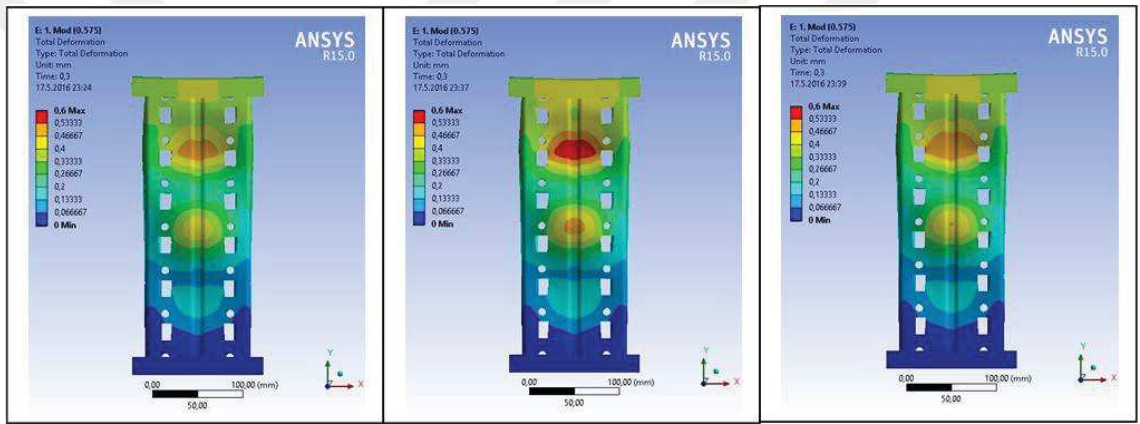


a) Orijinal kesit

b) Alttan katlı kesit

c) Üstten katlı kesit

Şekil 4. 9 $L=1300$ mm için burkulma mod şekilleri



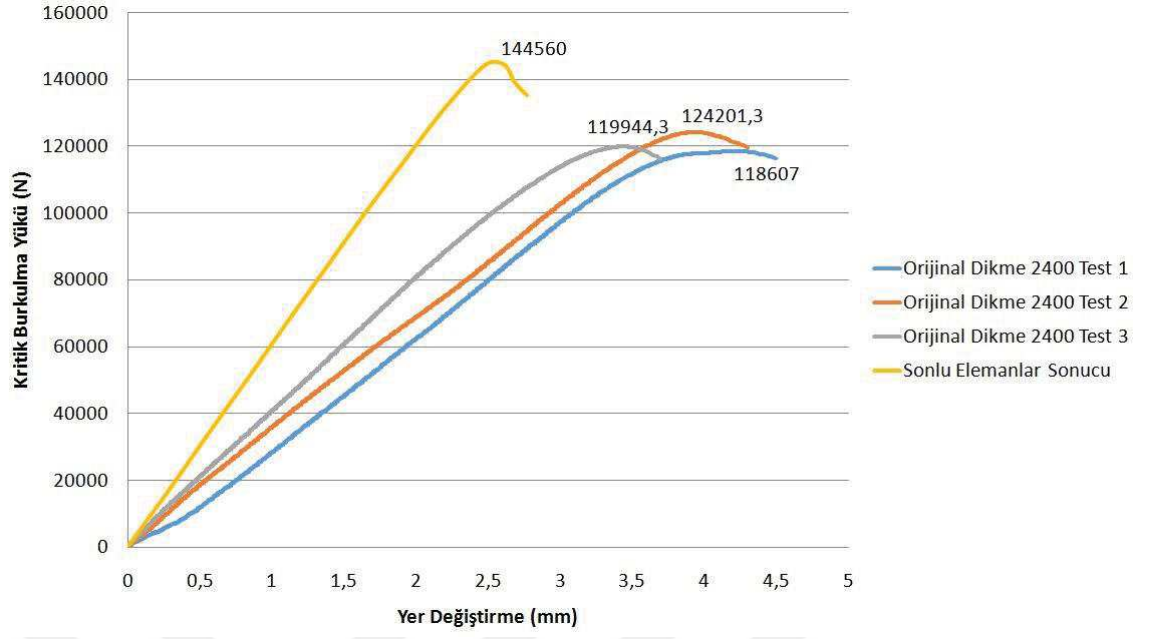
a) Orijinal kesit

b) Alttan katlı kesit

c) Üstten katlı kesit

Şekil 4. 10 $L=300$ mm için burkulma mod şekilleri

2400 mm ve 1300 mm uzunluğuna sahip olan orijinal kolon kesiti için burkulma deneyleri de yapılmıştır. 2400 mm boya sahip orijinal kolonun test sonuçları Şekil 4.11 verilmiştir. Deney sonuçlarına bakılacak olursa 2400 mm boy için yapılan testlerle Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’ verilen sonuçlar arasında yaklaşık olarak 2 tonluk bir yük farkı vardır. Bu halde deney sonucunun analize göre düşük çıkmasının sebebi boy arttıkça üretim kusurlarının da (ağırlıklı olarak flanş kısımlarında ilkel eğriliğin boy uzadıkça artması) artmasıdır. Şekil 4.8’ de verilen burkulma şekilleri ile deneyde meydana gelen burkulma şekilleri kıyaslandığı zaman 2400 mm boy için global burkulma modu gözlenmektedir.

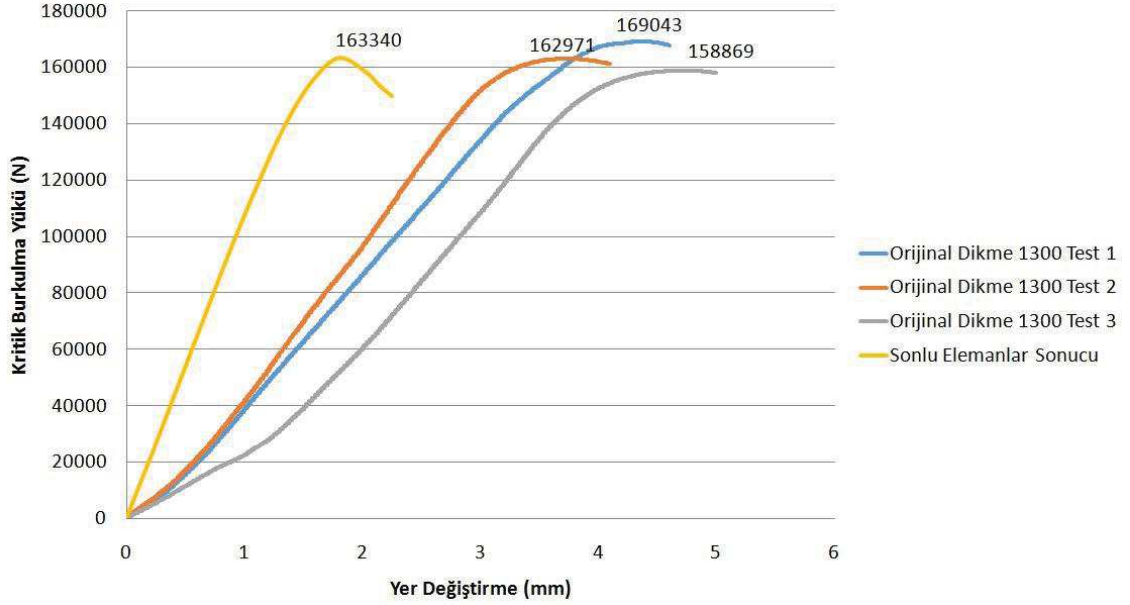


Şekil 4. 11 $L = 2400$ mm için burkulma test sonuçları



Şekil 4. 12 $L = 2400$ mm için burkulma şekli sonuçları

1300 mm boya sahip dikmelerin test sonuçları Şekil 4.13’ de verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi 1300 mm boy için yapılan test sonuçları burkulma analizi sonuçlarıyla ve doğrudan dayanım yöntemi sonuçlarıyla birbirine çok yakın çıkmıştır.



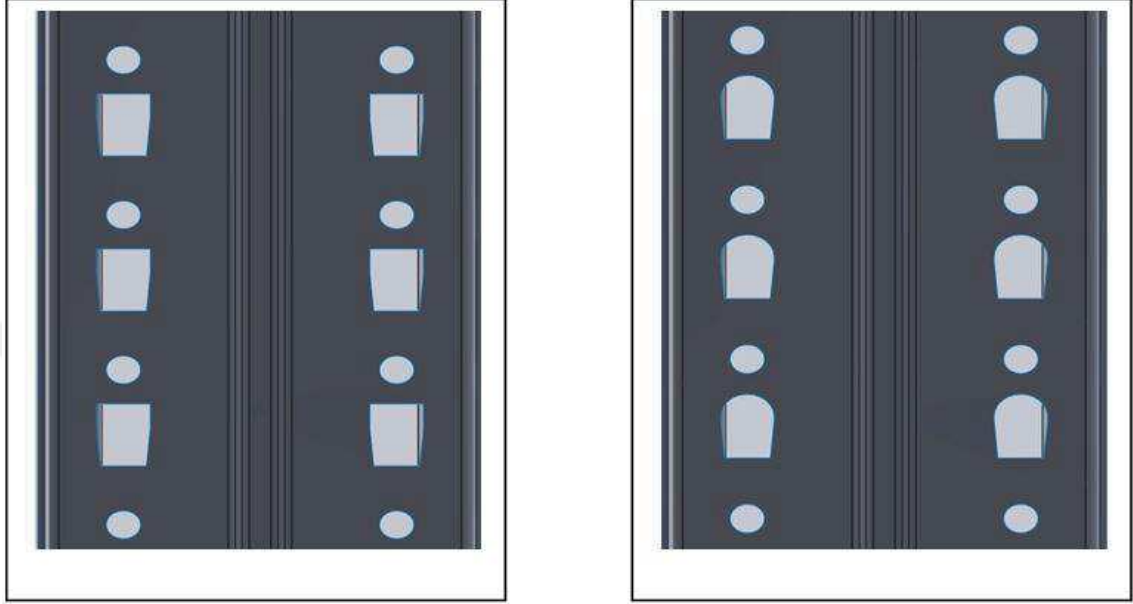
Şekil 4. 13 $L = 1300$ mm için burkulma test sonuçları



Şekil 4. 14 $L = 1300$ mm için burkulma şekli sonuçları

4.2. Dikmenin Sırt Bölgesinde Bulunan Deliklerin Radyüslü Olması Durumu

Bu kısımda dikmenin sırt bölgesinde bulunan delik şekillerinin burkulma yükü üzerine etkisi incelenmiştir. Burada Şekil 4.1’ de verilen dikme kesitlerinin Şekil 4.15’ de görüldüğü gibi deliklerin köşeli ve radyüslü olması halleri incelenmiştir.



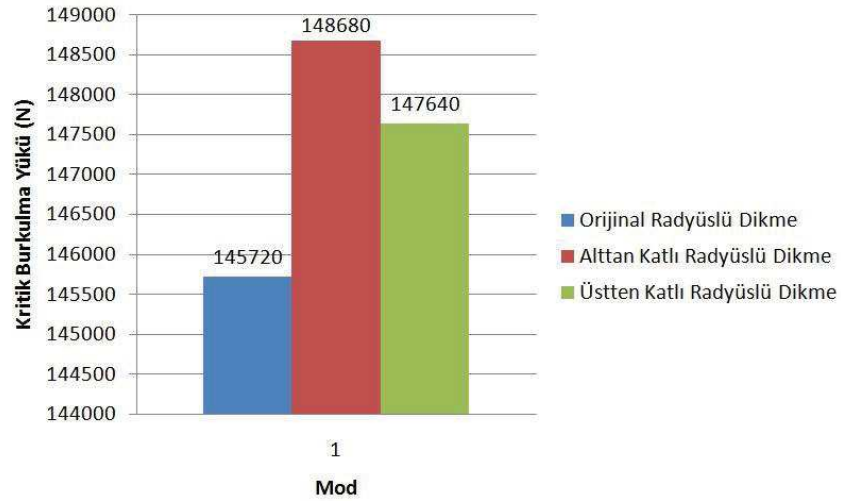
a) Köşeli delikli dikme

b) Radyüs delikli dikme

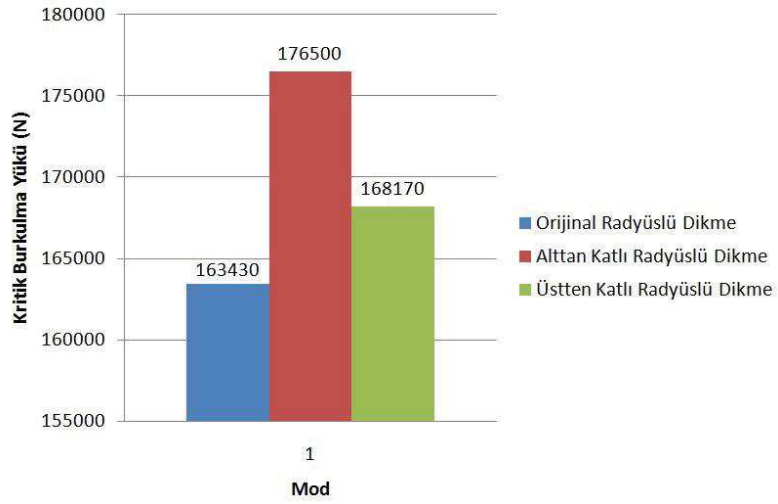
Şekil 4. 15 Dikmelerin delik şekilleri

Çizelge 4. 2 Kesit özellikleri

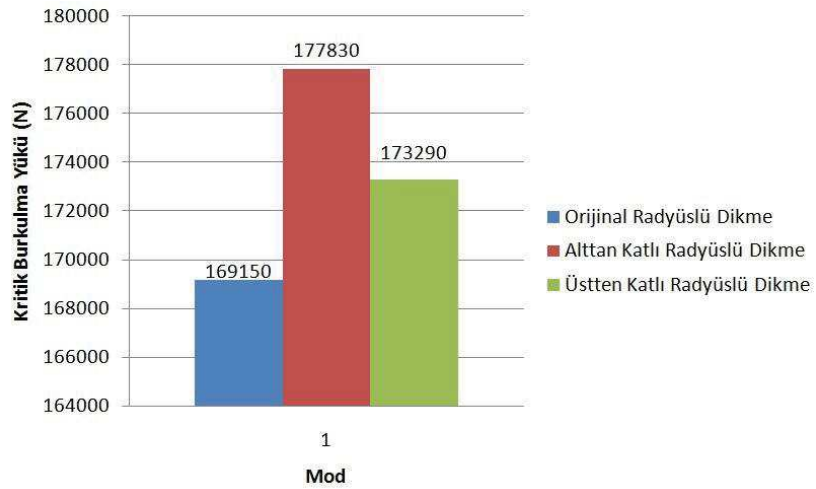
Kesit	Alan (mm ²)	Efektif Alan (mm ²)	I _{xx} (mm ⁴)	I _{yy} (mm ⁴)	J (mm ⁴)
Orijinal Kesit	870.44	647.5769	1104609.13	1863408.80	2968017.92
Orijinal Radyüslü Kesit	870.44	650.5769	1104609.13	1863408.80	2968017.92
Alttan Katlı Kesit	890.18	679.5769	1104434.43	1873320.30	2977754.73
Alttan Katlı Radyüslü Kesit	890.18	683.9615	1104434.43	1873320.30	2977754.73
Üstten Katlı Kesit	890.18	669.5769	1129774.33	1931820.30	3061594.63
Üstten Katlı Radyüslü Kesit	890.18	666.5000	1129774.33	1931820.30	3061594.63



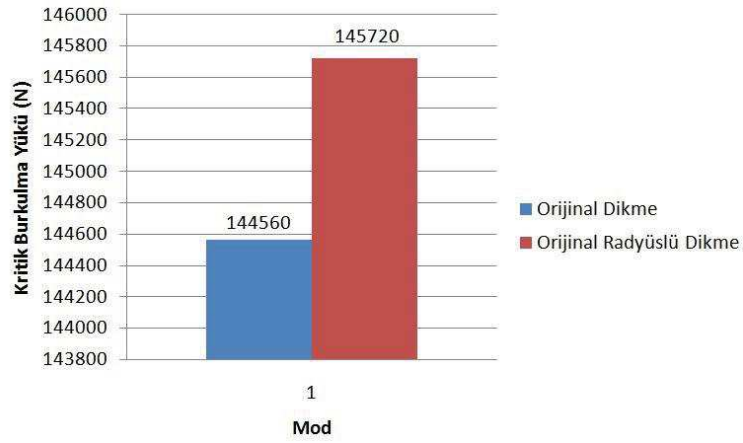
Şekil 4. 16 Nonlineer burkulma analizi sonuçları ($L=2400$ mm)



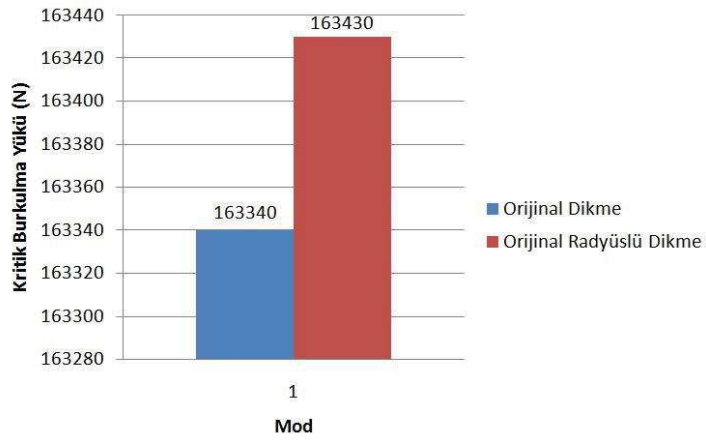
Şekil 4. 17 Nonlineer burkulma analizi sonuçları ($L=1300$ mm)



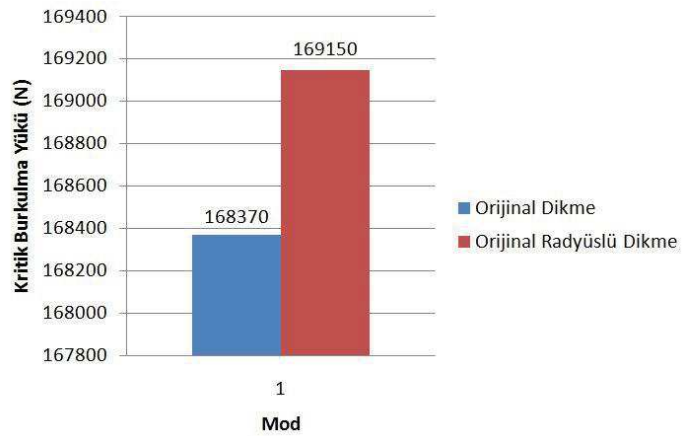
Şekil 4. 18 Nonlineer burkulma analizi sonuçları ($L=300$ mm)



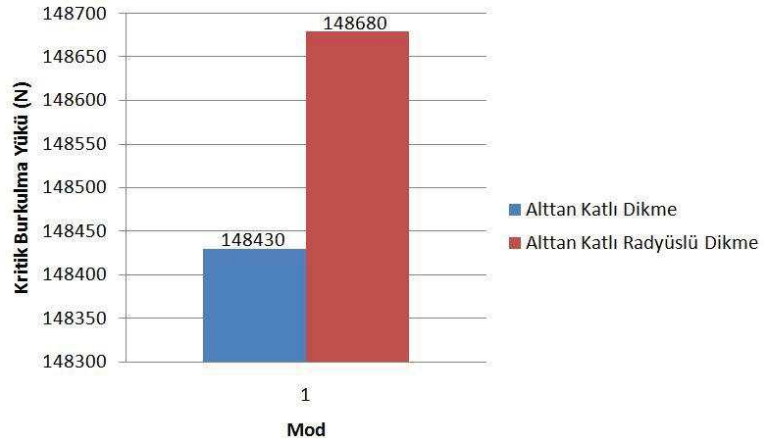
Şekil 4. 19 Orijinal kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları
($L=2400$ mm)



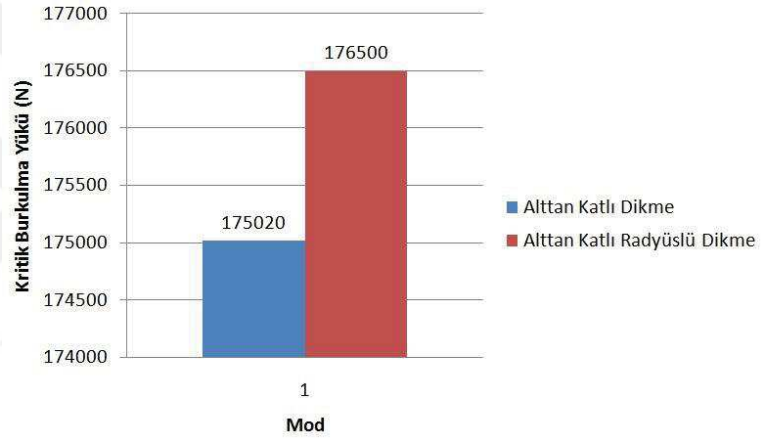
Şekil 4. 20 Orijinal kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları
($L=1300$ mm)



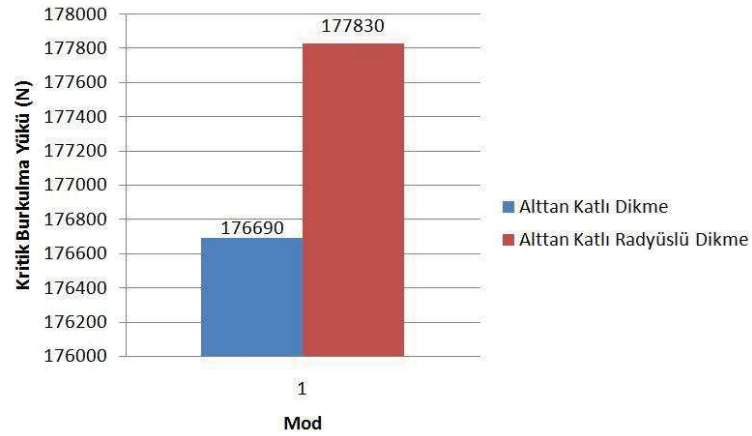
Şekil 4. 21 Orijinal kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları
($L=300$ mm)



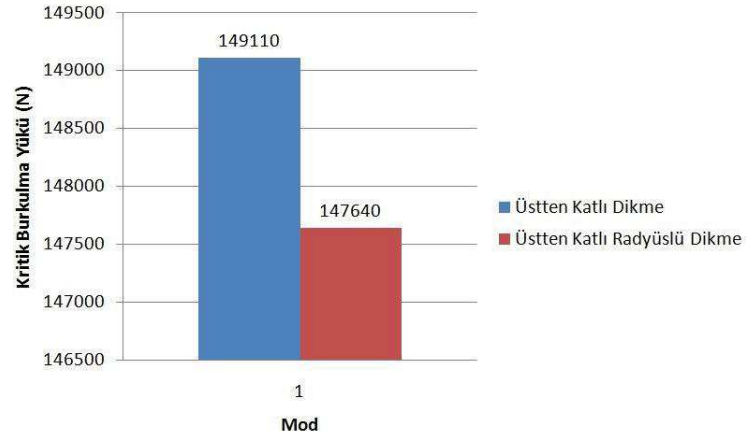
Şekil 4. 22 Altıtan katlı kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları
($L=2400$ mm)



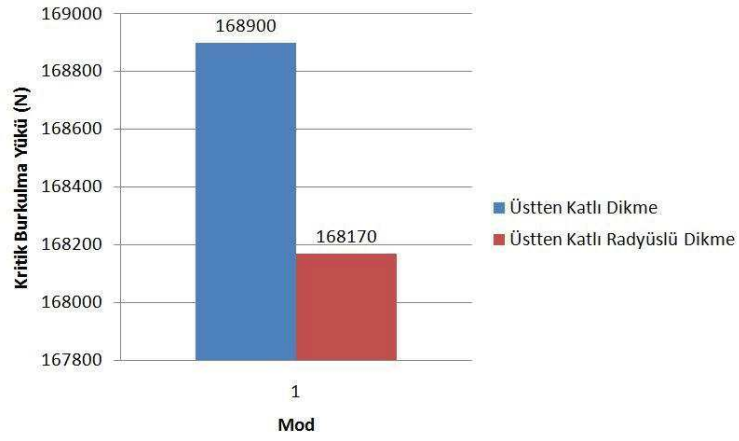
Şekil 4. 23 Altıtan katlı kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları
($L=1300$ mm)



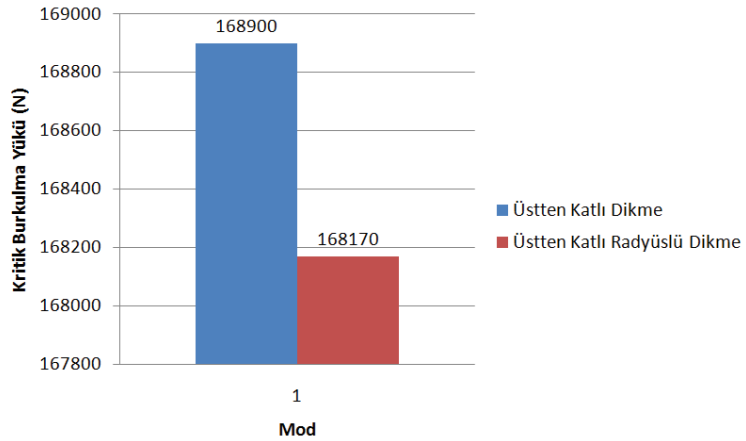
Şekil 4. 24 Altıtan katlı kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları
($L=300$ mm)



Şekil 4. 25 Üstten katlı kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları
($L=2400$ mm)

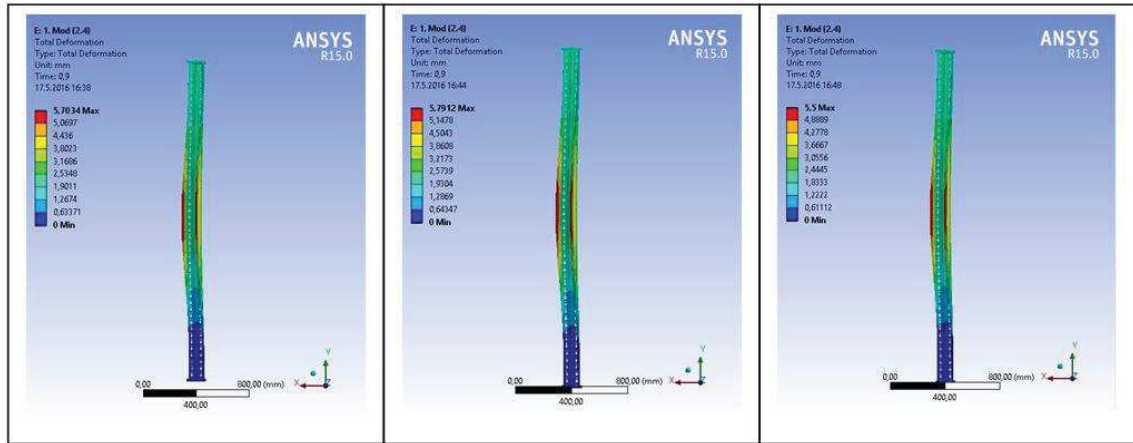


Şekil 4. 26 Üstten katlı kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları
($L=1300$ mm)



Şekil 4. 27 Üstten katlı kesitin radyüslü-radyüssüz nonlinear burkulma analizi sonuçları
($L=300$ mm)

Deliklerin radyüslü hale getirildiği durumda orijinal ve alttan katlı kesitlerde Şekil 4.19 – Şekil 4.24 arası görüldüğü gibi ufakta olsa kritik burkulma yüklerinde bir artış meydana gelmektedir. Fakat üstten katlı kesitte de kritik burkulma yükünde bir düşüş gözlenmektedir. Bunun muhtemel sebebi delik şekillerinin değişmesiyle birlikte kesitlerin efektif alanlarının değişmesidir. Delikler radyüslü hale geldiği zaman Çizelge 4.2’ deki efektif alanlar birbiriyle kıyaslandığı zaman orijinal ve alttan katlı kesitlerin efektif alanlarında ufakta olsa bir artış gözlemlenirken, üstten katlı kesitteyse ufak bir düşüşün meydana geldiği görülmektedir. Buradan da görüldüğü gibi efektif alan ile kritik burkulma yükü arasında doğrudan bir ilişki olduğu kabul edilmelidir. Ayrıca delik şekillerinin kesitlerin burkulma modları üzerine bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Şekil 4.28’ de görüldüğü gibi 2400 mm boyuna sahip olan dikmeler flanşların aynı yöne distorte olmasından dolayı global burkulmaya (burulmalı-eğilmeli burkulma) maruz kalmaktadır. Boy kısaldıkça kolonların narinlik oranı da giderek azalmaktadır ve bundan dolayı da burkulma modu değişmektedir. Şekil 4.29’ da görüldüğü gibi 1300 mm boya sahip olan dikmelerde flanşlar zıt yönlü distorsiyona maruz kaldıkları için distorsiyonel (eğilmeli) burkulmaya maruz kalmaktadırlar. Dikme boyları 300 mm olduğu zaman artık kesitler akma noktasına kadar yük taşıyabildikleri için kesitin sırt bölgelerinde yerel burkulma (local burkulma) meydana gelmektedir.

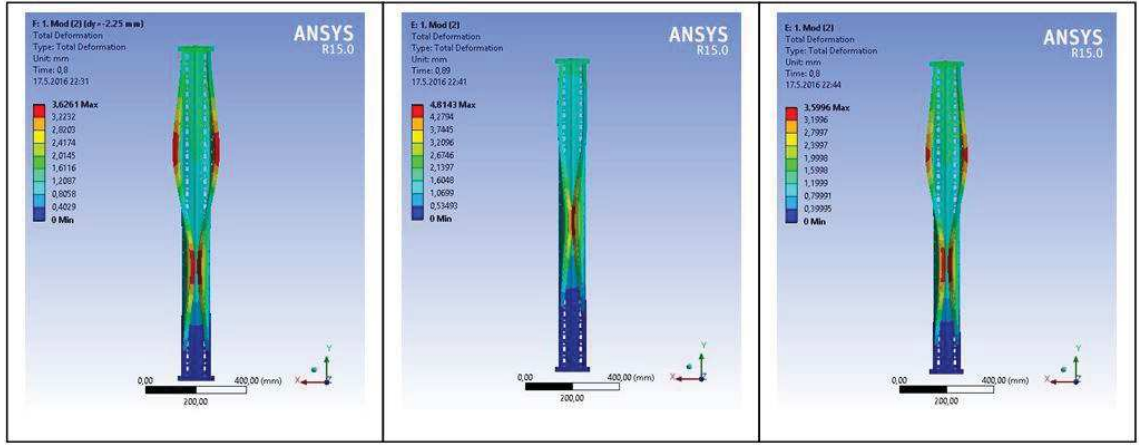


a) Orijinal kesit

b) Alttan katlı kesit

c) Üstten katlı kesit

Şekil 4. 28 $L=2400$ mm için burkulma mod şekilleri

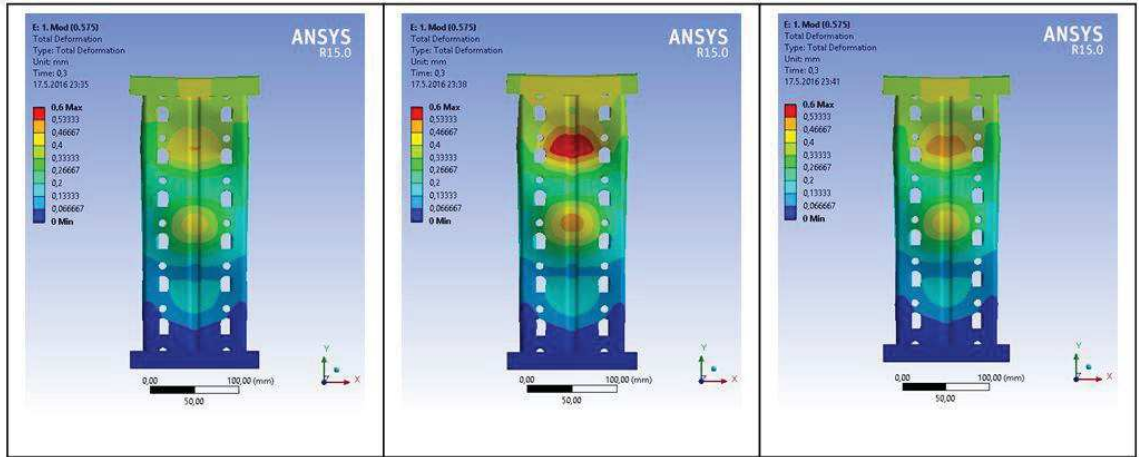


a) Orijinal kesit

b) Alttan katlı kesit

c) Üstten katlı kesit

Şekil 4. 29 $L=1300$ mm için burkulma mod şekilleri



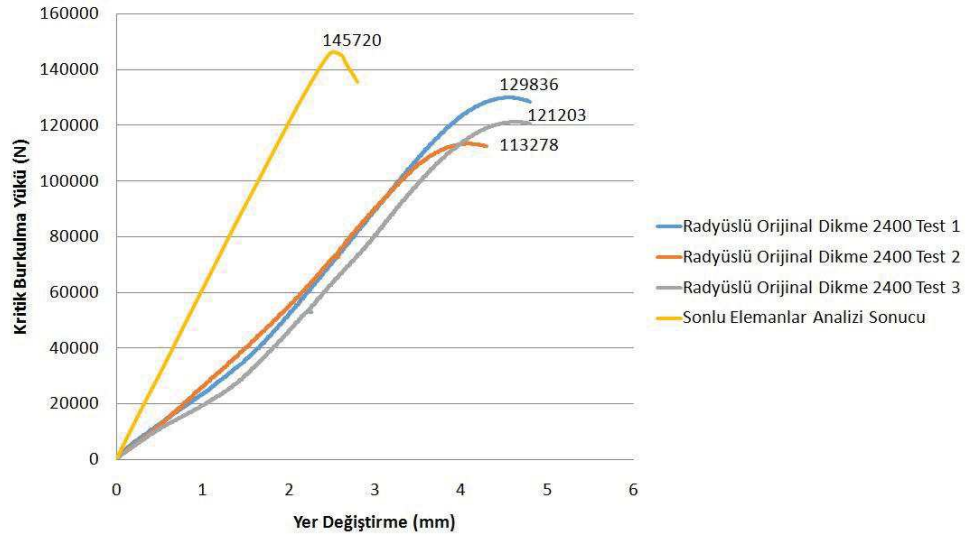
a) Orijinal kesit

b) Alttan katlı kesit

c) Üstten katlı kesit

Şekil 4. 30 $L=300$ mm için burkulma mod şekilleri

2400 mm ve 1300 mm uzunluğuna sahip olan radyüslü orijinal dikme kesiti için burkulma deneyleri de yapılmıştır. 2400 mm boya sahip radyüs delikli orijinal dikmenin test sonuçları Şekil 4.31' de verilmiştir.



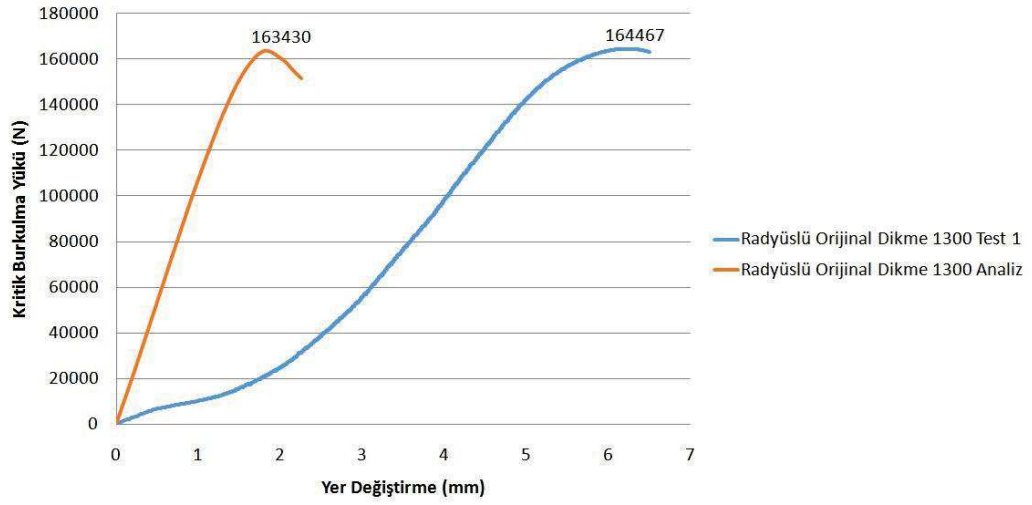
Şekil 4. 31 $L = 2400$ mm için radyüs delikli dikmelerin burkulma test sonuçları



Şekil 4. 32 $L = 2400$ mm için radyüs delikli dikmelerin burkulma şekli sonuçları

$L=2400$ mm için orijinal kesit için radyüslü delikli haldeki deneyden elde edilen ortalama kritik burkulma yükü 121526 N iken, Ansys sonucu 145720 N olarak çıkmaktadır. 4.1. bölümdeki gibi test sonucu analiz sonucundan daha yüksek çıkmasının sebebi yine boy arttıkça dikmenin flanşlarındaki ilkel eğrilik kusurlarının artmasındandır. Şekil 4.28 ve Şekil 4.32' de görüldüğü gibi, sonlu elemanlar analizinden

elde edilen burkulma mod şekliyle deneylerden elde edilen burkulma mod şekli birbirine benzer çıkmıştır.



Şekil 4. 33 $L = 1300$ mm için radyüs delikli dikmelerin burkulma şekli sonuçları

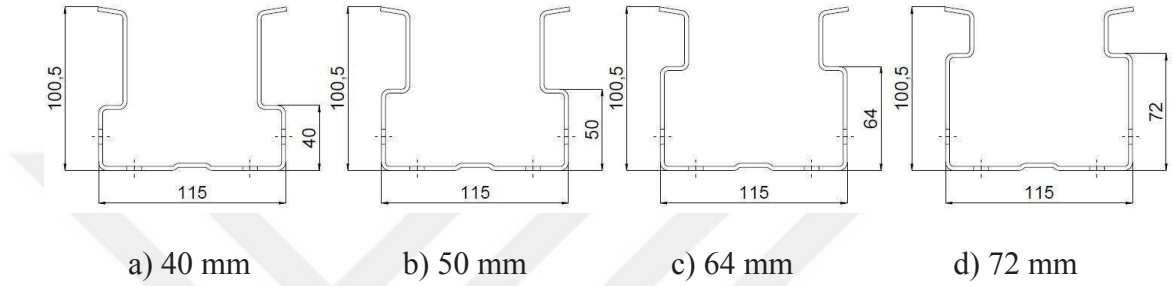


Şekil 4. 34 $L = 1300$ mm için radyüs delikli dikmelerin burkulma mod şekli

1300 mm boya sahip dikmenin test sonucu Şekil 4.34' de verilmiştir. Buradan görüldüğü Şekil 4.29' da verilen sonlu elemanlar analizinden elde edilen burkulma mod şekliyle Şekil 4.34' de verilen testten elde edilen burkulma mod şekli birbiriyle uyumlu çıkmıştır. $L = 1300$ mm için yapılan burkulma testinden elde edilen kritik burkulma

yükü 164467 N' dur. Sonlu elemanlar analizden elde edilen sonuç ise 163430 N' dur. Buradan da görüldüğü gibi boy kısaldıkça analiz ve test sonuçları birbirine yaklaşmaktadır. Sonuç olarak, orijinal ve alttan katlı dikmeler için radyüslü haldeki değerler radyüslü olmayan haldeki değerlere göre daha büyüktür. Şu halde, bu kesitler için radyüslü delik hali daima tercih edilmelidir.

4.3. Flanş Üzerinde Bulunan Tam Katlı Kısımın Sırttan Farklı Uzaklıklarda Olması Durumu



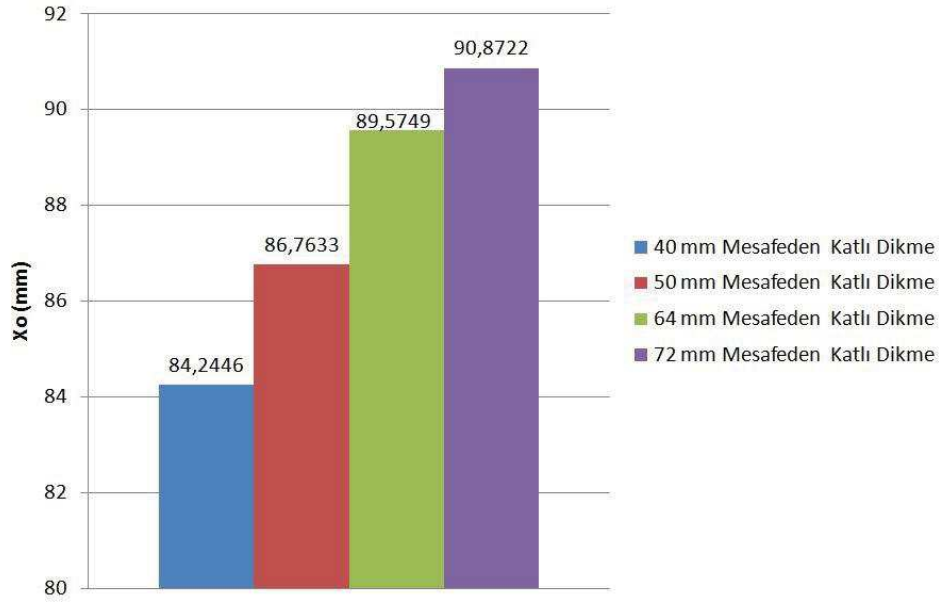
Şekil 4.35 Tam katlı kısmın farklı mesafelerden katlanma hali

Bu kısımda Şekil 4.35' de verilen dikme kesitlerinin flanşlarında bulunan tam katlı güçlendiricilerin sırt bölgesinden farklı uzaklıklarda olması durumunun kritik burkulma yükleri üzerine etkisi incelenmiştir. Katlama noktasının sırttan uzaklığı 40 mm' den başlayarak 72 mm' ye kadar artırılmıştır. 4 halde de sırt derinliği 2 mm olup sabit tutulmuştur. Burada 64 mm mesafeden katlanan kesit 1. bölümdeki alttan katlı kesit ve 72 mm mesafeden katlanan kesit üstten katlı kesittir. Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin özellikleri Çizelge 4.3' de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin özellikleri

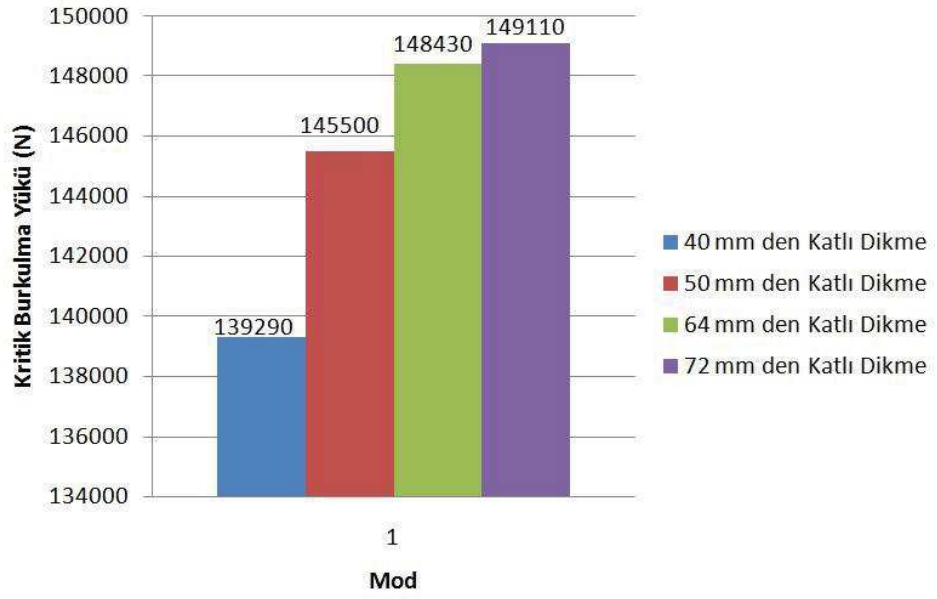
Kesit	Alan (mm ²)	Efektif Alan (mm ²)	I _{xx} (mm ⁴)	I _{yy} (mm ⁴)	J (mm ⁴)
40 mm Mesafeden Katlı Kesit	890.18	677.3076	1070668.08	1698455.17	2769123.25
50 mm Mesafeden Katlı Kesit	890.18	675.6923	1077135.25	1771580.17	2848715.42
64 mm Mesafeden Katlı Kesit	890.18	679.5769	1104434.43	1873320.30	2977754.73
72 mm Mesafeden Katlı Kesit	890.18	669.5769	1129774.33	1931820.30	3061594.63

Çizelge 4.3' den görüldüğü gibi sırt ile katlama arasındaki mesafe arttıkça kesitin atalet momenti özellikleri de iyileşmektedir. Ayrıca efektif alanda 64 mm mesafeye kadar artmaktadır fakat 64 mm mesafeyi aştıktan sonra efektif alan düşmeye başlamaktadır.

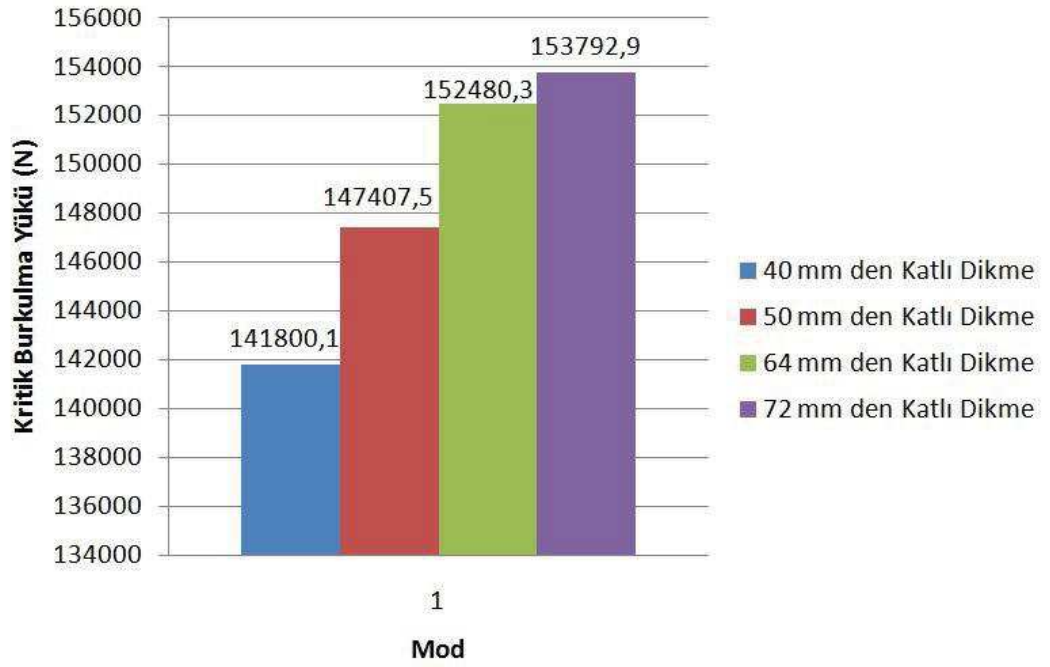


Şekil 4. 36 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafe

Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafelerin değişimi Şekil 4.36' da verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi katlama mesafesi arttıkça kesitlerin ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafede artmaktadır.



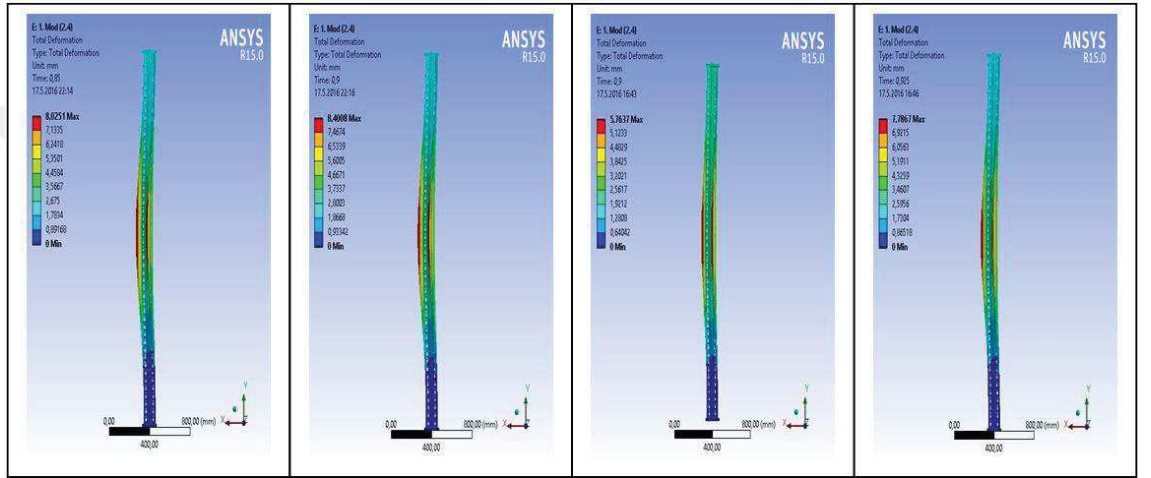
Şekil 4. 37 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin nonlineer burkulma analizi sonuçları ($L=2400$ mm)



Şekil 4. 38 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin doğrudan dayanım yönteminden elde edilen burkulma yüğü sonuçları ($L=2400$ mm)

Şekil 4.37' de 2400 mm boya sahip kesitlerin kritik burkulma yükleri görülmektedir. 2400 mm boy için kesitlerin katlama mesafeleri arttıkça burkulma yüklerinin arttığı

görülmektedir. Bu boyda atalet momenti özelliklerinin kritik burkulma yükü üzerinde daha etkin olduğu görülmektedir. Bundan dolayı da en yüksek atalet momenti değerine sahip olan 72 mm mesafeden katlı kesit en yüksek kritik burkulma yüküne sahiptir. Ayrıca bu boyda tüm dikmelerin narinlik oranları yüksek olduğundan dolayı hepsinde flanşlar aynı yönlü distorte olmaktadır. Bundan dolayı da global burkulma (burulmalı-eğilmeli burkulma) gerçekleşmektedir. Bu boy için burkulma mod şekilleri Şekil 4.39' da verilmiştir. Şekil 4.38' de verilen doğrudan dayanım yönteminden elde edilen sonuçlarda nonlinear burkulma analizinden elde edilen sonuçlara benzer çıkmıştır.



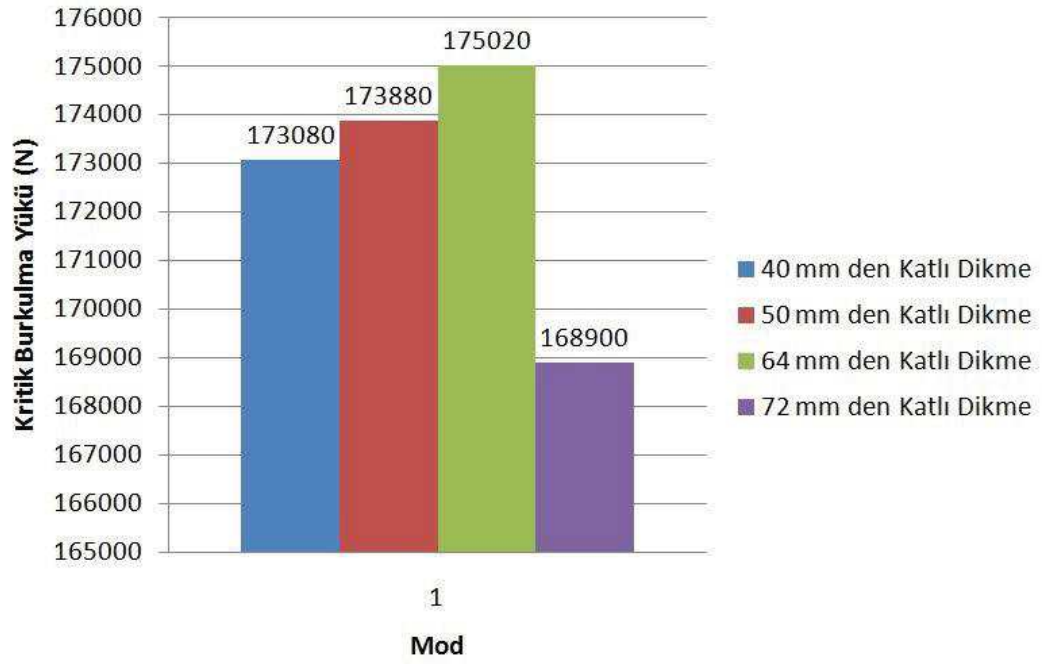
a) 40 mm

b) 50 mm

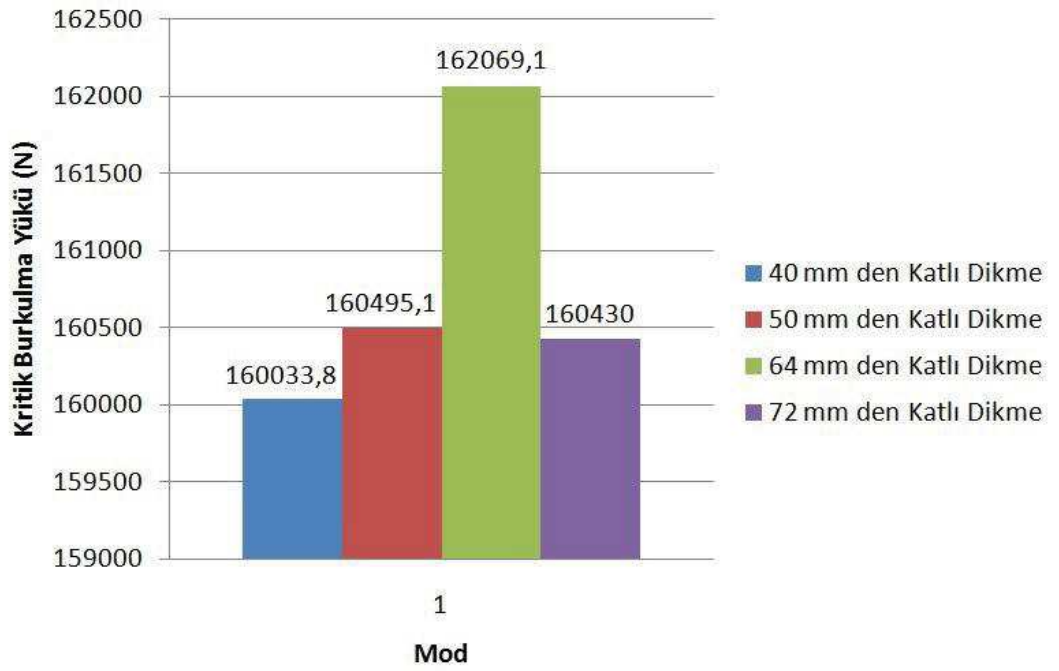
c) 64 mm

d) 72 mm

Şekil 4. 39 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin burkulma mod şekilleri
($L=2400$ mm)

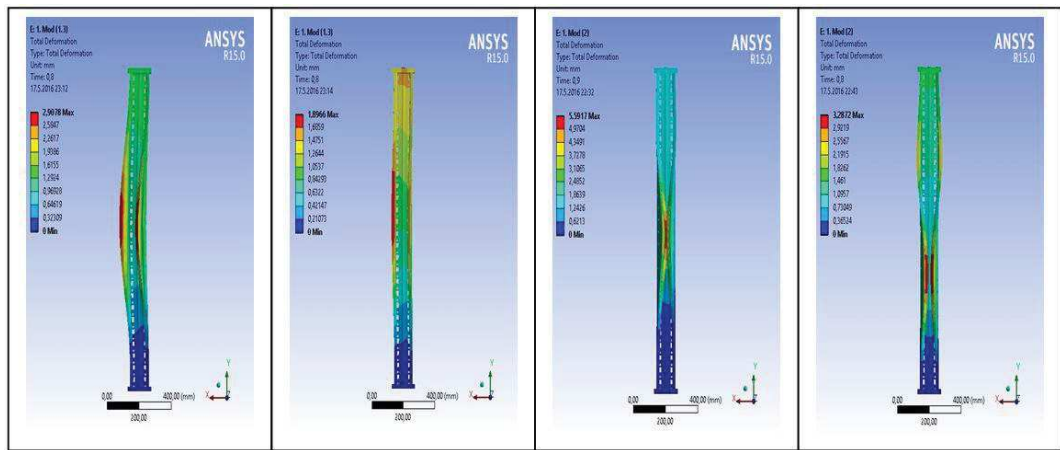


Şekil 4. 40 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin nonlineer burkulma analizi sonuçları ($L=1300$ mm)



Şekil 4. 41 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin doğrudan dayanım yönteminden elde edilen burkulma yüğü sonuçları ($L=1300$ mm)

Şekil 4.40' da 1300 mm boya sahip dikmelerin kritik burkulma yükleri görülmektedir. Burada katlama mesafesi sırttan uzaklaştıkça kritik burkulma yüklerinin arttığı görülmektedir. Fakat 64 mm' yi aştıktan sonra bir düşüş olmaktadır. Bunun nedeni bu mesafeyi geçtikten sonra efektif alanın azalmasıdır. Bu boyda artık efektif alanlar atalet momentleri değerlerinden daha önemli rol oynadıkları için en düşük kritik burkulma yükü en düşük efektif alana sahip olan 72 mm mesafeden katlı kesitte gözlenmektedir. Bu boyda flanşlar zıt yönlü distorte oldukları için distorsiyonel burkulma meydana gelmiştir. Şekil 4.42' de 1300 mm boy için nonlinear burkulma analizlerinden elde edilen burkulma mod şekilleri görülmektedir. Şekil 4.41' de doğrudan dayanım yönteminden elde edilen kritik burkulma yükleri verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi doğrudan dayanım yönteminden elde edilen burkulma yükleriyle sonlu elemanlar yönteminden elde edilen burkulma yükleri birbirine benzer çıkmıştır. Doğrudan dayanım yönteminde de kesitlerin katlama mesafesi 64 mm' ye kadar arttıkça kritik burkulma yüklerinin arttığı görülmektedir. Sonlu elemanlar analizinde en düşük burkulma yükünü veren kesit 72 mm mesafeden katlı kesit iken doğrudan dayanım yöntemine göre en düşük burkulma yükünü veren kesit 40 mm mesafeden katlı kesittir. Bunun sebebi, doğrudan dayanım yönteminde burkulma yükleri hesaplanırken kesitlerin atalet momentlerinin de bir miktar etkisi olmasıdır. 72 mm mesafeden katlı kesit Çizelge 4.3' de de görüldüğü gibi en yüksek atalet momentleri değerlerine sahip olduğundan dolayı en düşük kritik burkulma yükü bu kesitte çıkmamıştır.



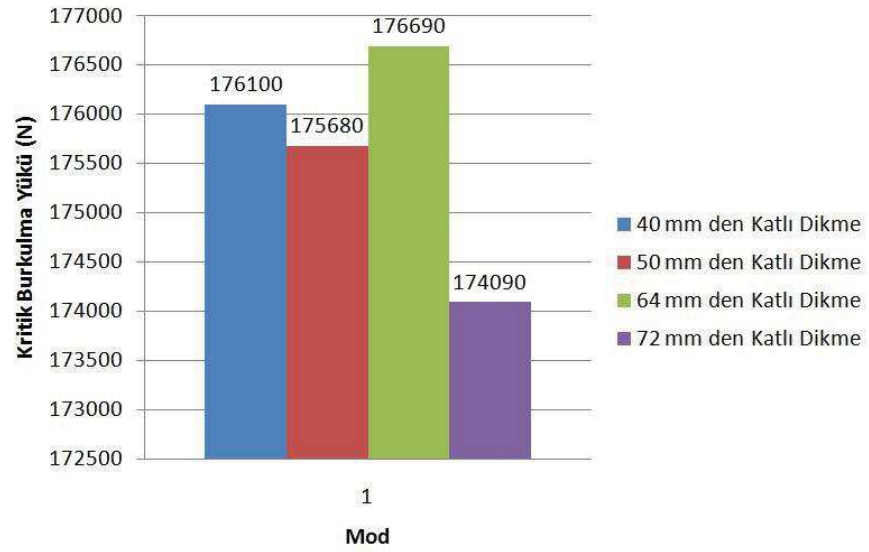
a) 40 mm

b) 50 mm

c) 64 mm

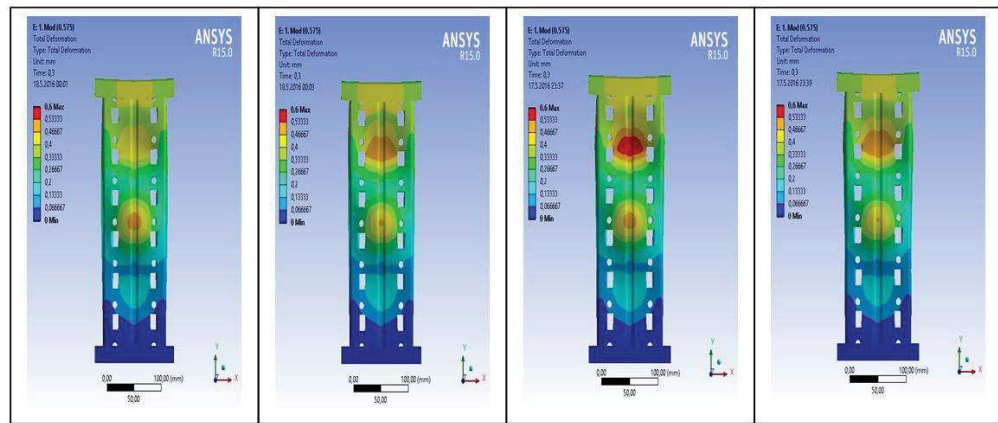
d) 72 mm

Şekil 4. 42 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin burkulma mod şekilleri ($L=1300$ mm)



Şekil 4. 43 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin nonlineer burkulma analizi sonuçları ($L=300$ mm)

Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin efektif alanlarını hesaplamak için 300 mm boyundaki dikmelere nonlineer burkulma analizi yapılmıştır. 300 mm boyundaki dikmelerin nonlineer burkulma analizi sonuçları Şekil 4.43' de verilmiştir. Bu boydaki dikmeler artık akma noktasına kadar yük kaldıracağı için burada çıkan sonuçlar tamamen efektif alanlarla orantılıdır. Bu boyda gözlemlenen burkulma tipi sırt bölgesinde meydana gelen yerel (local) burkulmadır ve burkulma mod şekilleri Şekil 4.44' de verilmiştir.



a) 40 mm

b) 50 mm

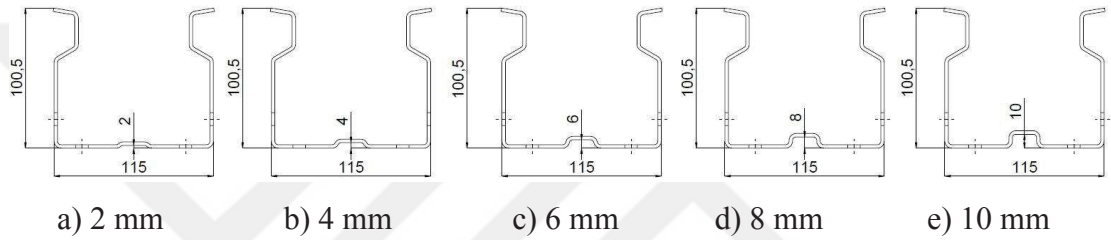
c) 64 mm

d) 72 mm

Şekil 4. 44 Farklı katlama mesafesine sahip kesitlerin burkulma mod şekilleri ($L=300$ mm)

Sonuç olarak bu kısımda yapılan çalışmalar sonucunda 2400 mm boya sahip dikmelerde en büyük burkulma yükünü veren kesitin 72 mm mesafeden katlı kesit olduğu ve 1300 mm boya sahip dikmelerde ise 64 mm mesafeden katlı kesit olduğu tespit edilmiştir. Depo raf sistemlerinde kullanılan ayaklardaki iki çapraz arasındaki maksimum mesafe genellikle 1300 mm' yi geçmediğinden dolayı 1300 mm boy için yapılan analizler dikkate alındığından dikmelerin flanşında bulunan tam katlı kısmın 64 mm' de olması gereklidir.

4.4. Dikme Kesitin Sırt Bölgesinde Bulunan Güçlendiricinin Derinliğinin Arttırılması Durumu

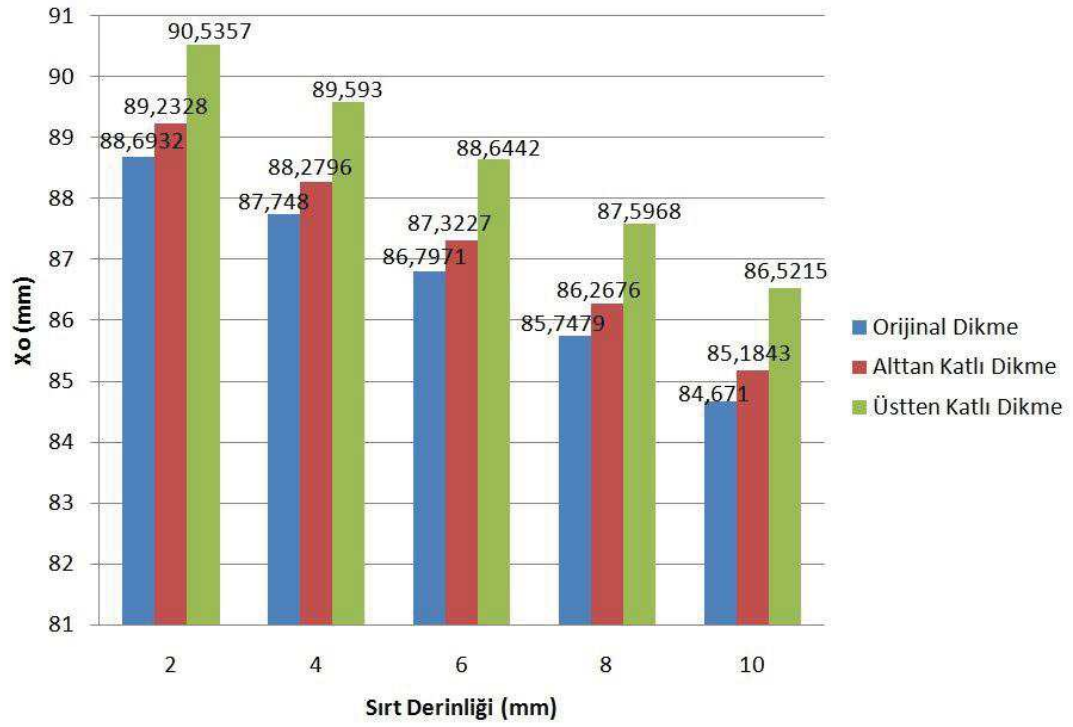


Şekil 4.45 Farklı Sırt Derinliklerine Sahip Kesitler

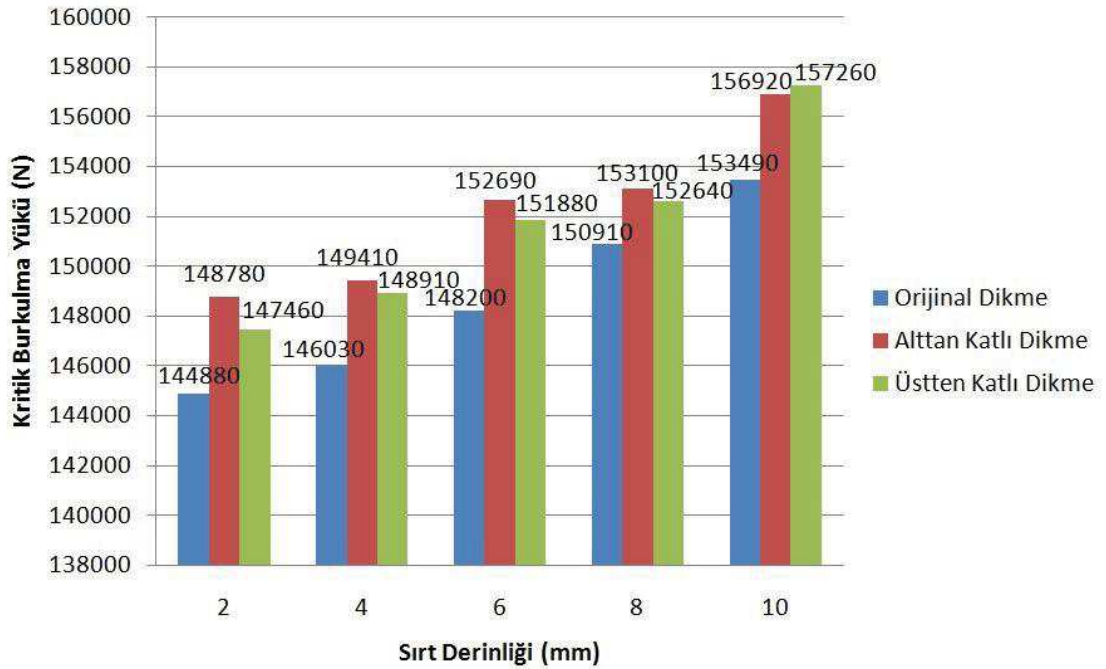
Şekil 4.45' de görüldüğü gibi orijinal kesit, alttan katlı kesit ve üstten katlı kesitler için sırt derinliği 2 mm' den başlayıp 2 mm arttırılarak 10 mm derinliğe kadar inilmiştir.

Çizelge 4.4 Farklı Sırt Derinliğine Sahip Kesitlerin Özellikleri

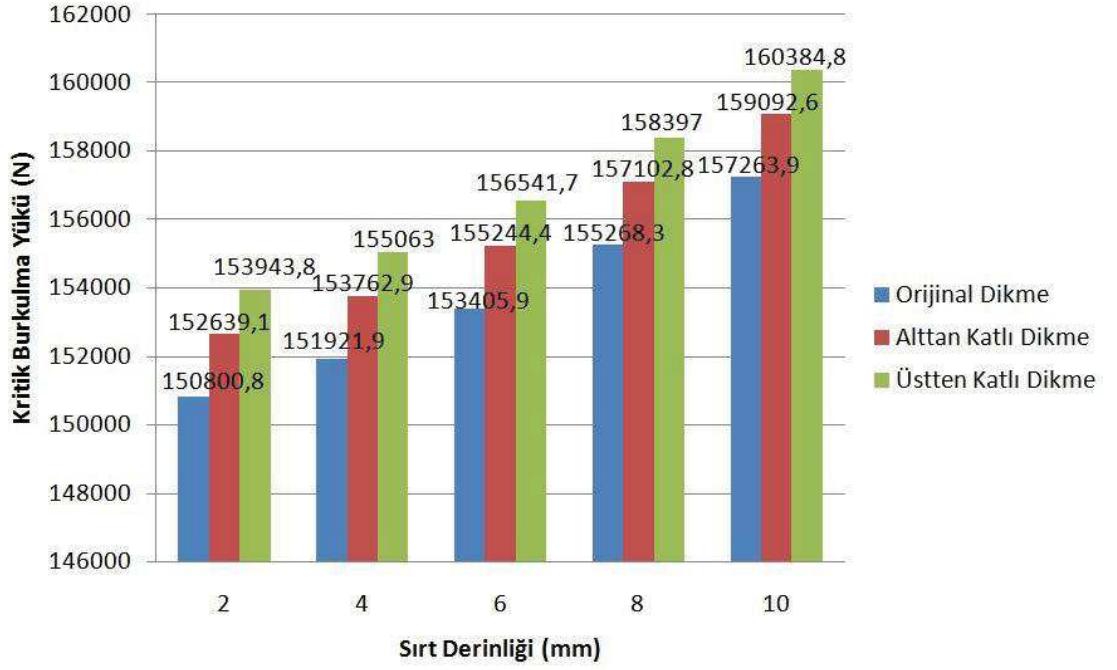
Kesit	Alan (mm ²)	Efektif Alan (mm ²)	I _{xx} (mm ⁴)	I _{yy} (mm ⁴)	J (mm ⁴)
Orijinal 2 mm	870.77	657.2615	1101650.10	1863603.80	2965253.89
Orijinal 4 mm	875.76	685.7307	1100569.56	1864149.18	2964718.75
Orijinal 6 mm	882.84	701.9230	1102344.58	1864835.73	2967180.31
Orijinal 8 mm	892.13	711.6538	1105892.39	1865748.74	2971641.13
Orijinal 10 mm	902.13	728.0769	1109197.52	1866753.95	2975951.47
Alttan 2 mm	890.65	672.0384	1101938.48	1873971.27	2975909.97
Alttan 4 mm	895.64	707.5769	1100901.31	1874516.87	2975418.18
Alttan 6 mm	902.72	719.5769	1102762.28	1875203.42	2977965.70
Alttan 8 mm	912.02	729.8076	1106430.66	1876116.44	2982547.09
Alttan 10 mm	922.02	746.9230	1109857.11	1877121.65	2986978.76
Üstten 2 mm	890.52	670.6153	1126748.73	1931992.04	3058740.77
Üstten 4 mm	895.51	705.1538	1125789.50	1932537.43	3058326.93
Üstten 6 mm	902.59	716.0000	1127802.36	1933223.98	3061026.34
Üstten 8 mm	911.88	727.9615	1131680.52	1934136.99	3065817.51
Üstten 10 mm	921.88	745.7692	1135314.89	1935142.19	3070457.09



Şekil 4. 46 Farklı sırt derinliğine sahip dikme kesitlerinin ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafeleri



Şekil 4. 47 Farklı sırt derinliğine sahip dikme kesitlerinin nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=2400$ mm)



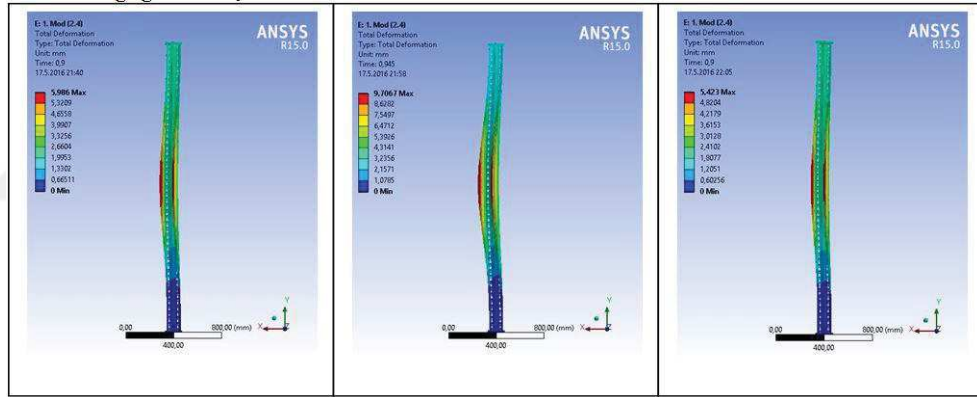
Şekil 4. 48 Farklı sırt derinliğine sahip dikme kesitlerinin doğrudan dayanım yöntemi sonuçları ($L=2400$ mm)

$L=2400$ mm uzunluğundaki dikmeler, orijinal, altıtan katlı ve üstten katlı kesitler halinde farklı sırt derinliğinin etkisi Şekil 4.46' da görülmektedir. Beklendiği üzere sırt derinliği arttıkça tüm kesit tiplerinde bir artış meydana gelmektedir. Bunun muhtemel sebepleri arasında şunlar söylenebilir:

- Sırt derinliği arttıkça her üç kesit tipinde de kesit alanları hafif miktarda artmaktadır.
- Şekil 4.46' da görüldüğü gibi sırt derinliği arttıkça kütle merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafe azalmaktadır. Buda kesitin burulma momentini azalttığından dolayı burulma şekil değiştirmelerini düşürmektedir.
- Sırt derinliği arttıkça dikmenin sırt bölgesinde belirgin köşelerin ortaya çıkması sebebiyle Von Karman etkisi artmaktadır.

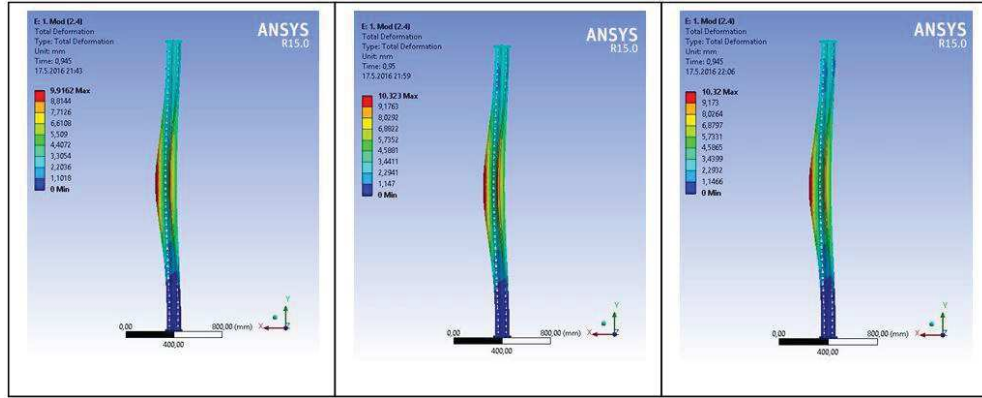
Şu halde sonuç olarak sırt derinliği arttıkça burkulma yükünün de arttığı bir kural olarak söylenebilir. Bu artışın neredeyse doğrusal olduğu dikkat çekmektedir. Altıtan ve üstten katlı kesitlerin orijinal kesite göre daha fazla burkulma yükü değerleri vermesinin sebebi ise bu iki halde hem alanların hem de x ve y eksenine göre atalet moment değerlerinin artması olarak gösterilebilir. Ayrıca, Şekil 4.48' de de görüldüğü gibi

doğrudan dayanım yöntemiyle hesaplanan kritik burkulma yüklerine göre de alttan katlı ve üstten katlı kolon kesitleri orijinal dikme kesitine göre daha fazla burkulma yüküne sahiptirler. Buradaki tek fark sonlu elemanlar analizi sonuçlarında 10 mm sırt derinliğine kadar alttan katlı kesitin burkulma yük değerleri üstten katlı kesitten bir miktar daha büyük olmasıdır fakat doğrudan dayanım yöntemi sonuçlarına göre tüm sırt derinliklerinde üstten katlı dikme kesiti en büyük burkulma yükü değerine sahiptir. Bunun muhtemel sebebi şu şekilde açıklanabilir. 2400 mm boyda tüm dikmelerin narinlik oranı yüksek olduğundan dolayı burkulma yükleri üzerinde dikme kesitlerinin atalet momentlerinin büyük etkisi vardır ve doğrudan dayanım yönteminde atalet momenti etkileri daha fazla ön plana çıktığı için en yüksek atalet momenti değerlerine sahip olan üstten katlı kesit diğer dikme kesitlerine göre daha yüksek burkulma yükü değeri vermektedir. 2400 mm boy için Şekil 4.49 ile Şekil 4.53 arasında farklı sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma mod şekilleri verilmiştir.



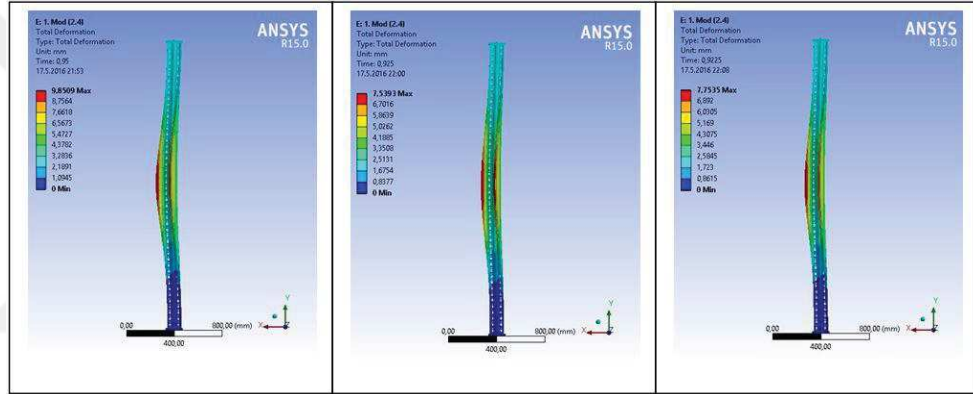
a) Orijinal Kesit b) Alttan Katlanmış Kesit c) Üstten Katlanmış Kesit

Şekil 4. 49 $L=2400$ mm için 2 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri



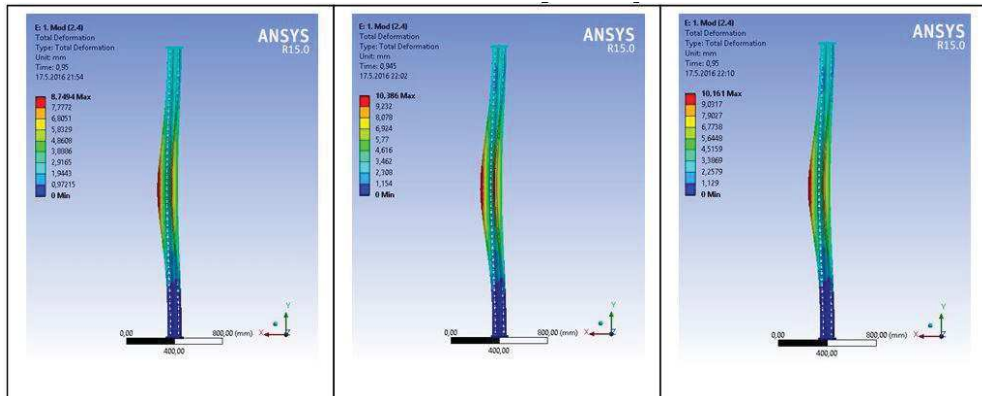
a) Orijinal Kesit b) Alttan Katlanmış Kesit c) Üstten Katlanmış Kesit

Şekil 4. 50 $L=2400$ mm için 4 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri



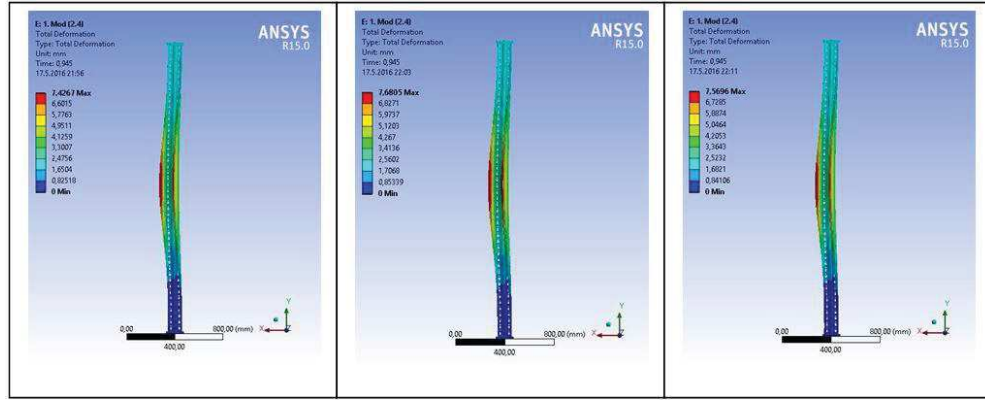
a) Orijinal Kesit b) Alttan Katlanmış Kesit c) Üstten Katlanmış Kesit

Şekil 4. 51 $L=2400$ mm için 6 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri



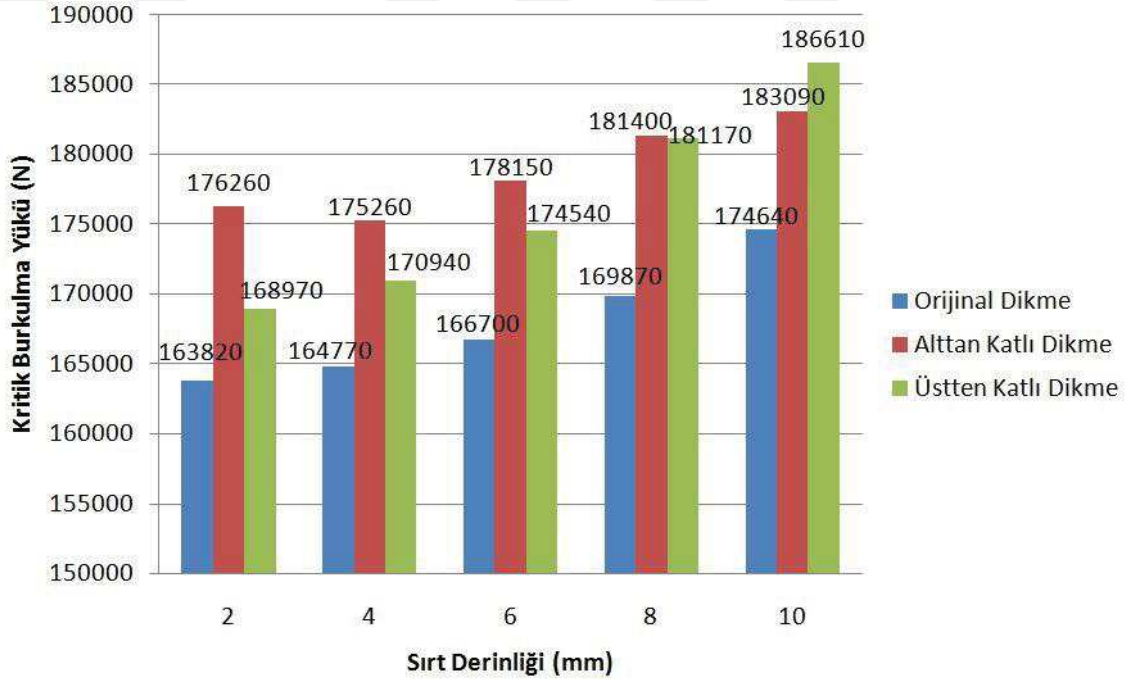
a) Orijinal Kesit b) Alttan Katlanmış Kesit c) Üstten Katlanmış Kesit

Şekil 4. 52 $L=2400$ mm için 8 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri



a) Orijinal Kesit b) Alttan Katlanmış Kesit c) Üstten Katlanmış Kesit

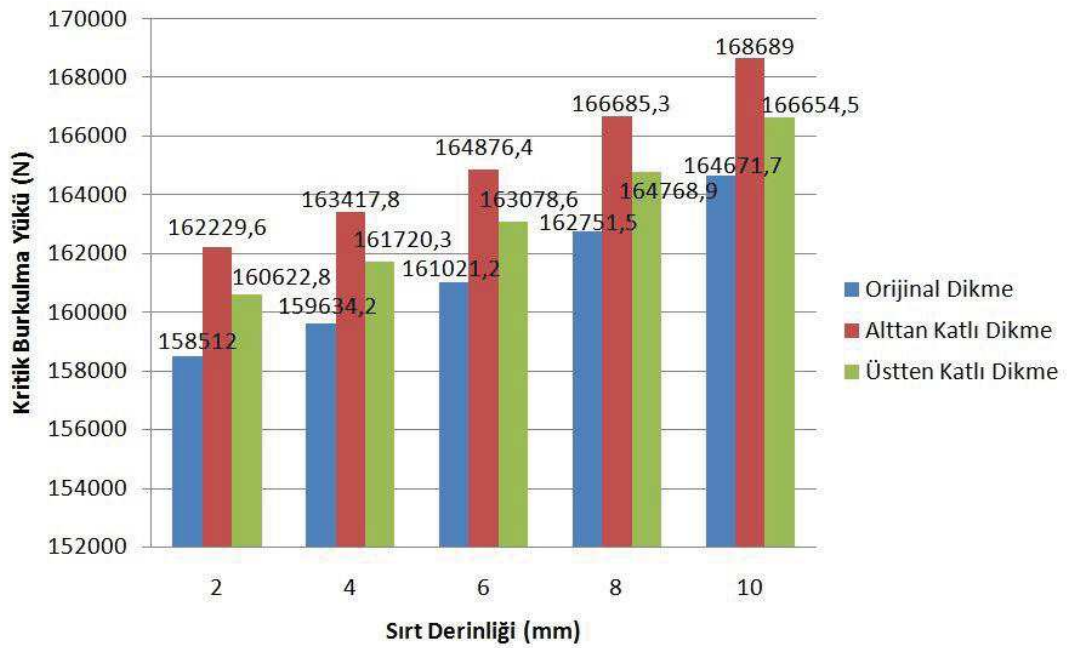
Şekil 4. 53 $L=2400$ mm için 10 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri



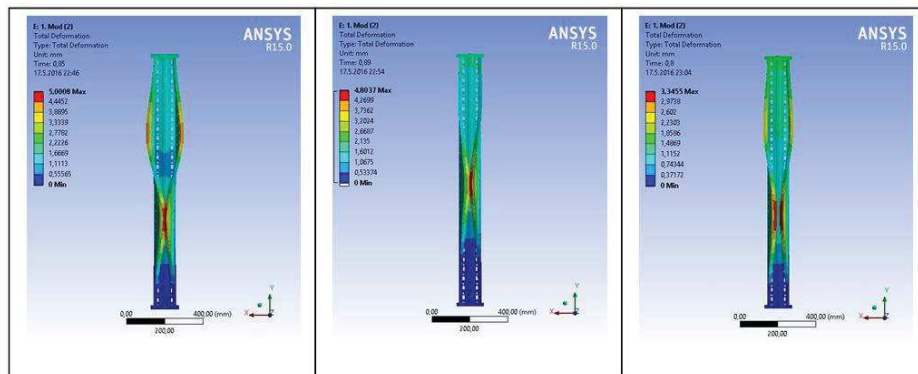
Şekil 4. 54 Farklı sırt derinliğine sahip dikme kesitlerinin nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L=1300$ mm)

$L=1300$ mm uzunluğundaki dikmelere yapılan nonlinear burkulma analizinin sonuçları Şekil 4.54' de görüldüğü gibidir. Burkulma analizi sonuçlarına göre bu boyda tüm kesitler zıt yönlü distorsiyona maruz kalmışlardır. Burkulma mod şekilleri Şekil 4.56 ile Şekil 4.60 arasında verilmiştir. Bundan dolayı da distorsiyonel burkulma modu gözlenmiştir. Şekil 4.54' deki sonuçlara bakıldığında bu boyda da sırt derinliğinin artmasıyla birlikte kritik burkulma yüklerinin arttığı görülmektedir. Dikme boyları

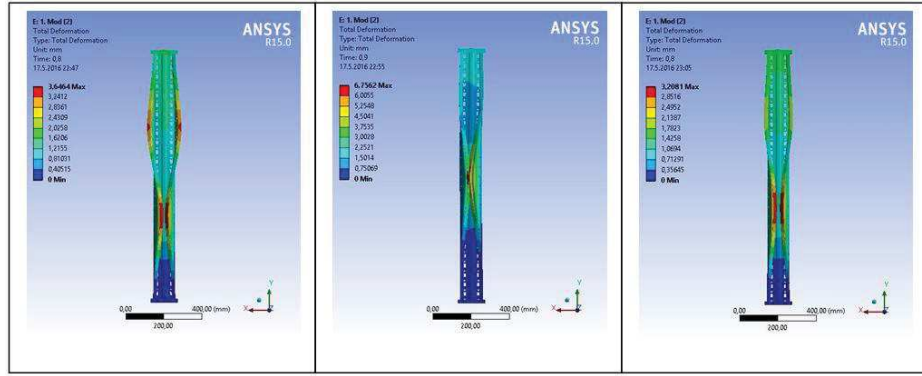
kısaldıkça kesitler neredeyse akma noktasına kadar yük kaldırabilmektedir. Bundan dolayı orta ve kısa boylu dikmelerde kritik burkulma yükünü belirleyen en etkili parametrelerden birisi de efektif alandır. Çizelge 4.4' de görüldüğü gibi kesitlerin tümünde sırt derinliğinin artmasıyla birlikte efektif alanlar ciddi derece artmaktadır. Nonlineer burkulma analizi sonuçlarına benzer eğilim Şekil 4.55' de de görüldüğü gibi doğrudan dayanım yönteminden hesaplanan kritik burkulma yüklerinde de görülmektedir.



Şekil 4. 55 Farklı sırt derinliğine sahip dikme kesitlerinin nonlineer burkulma analizi sonuçları ($L=1300$ mm)

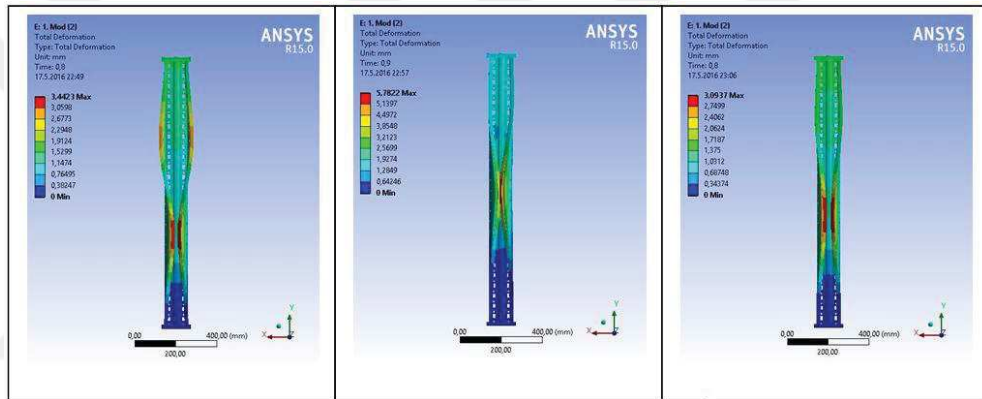


Şekil 4. 56 $L=1300$ mm için 2 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri



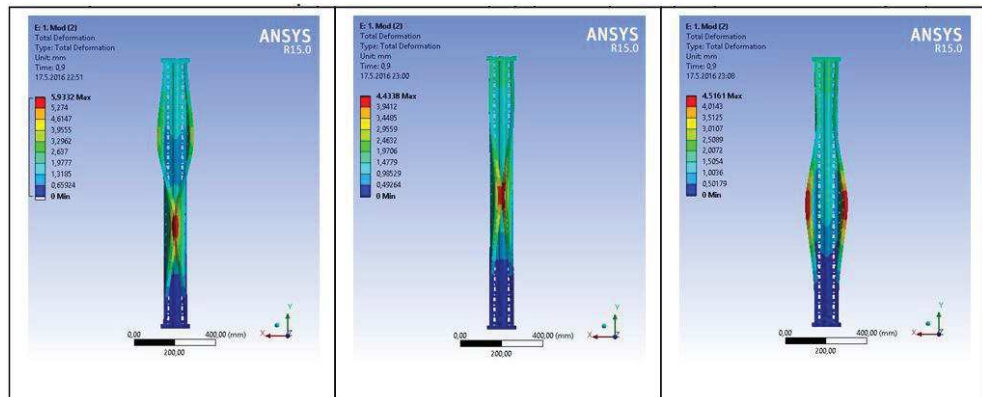
a) Orijinal Kesit b) Alttan Katlanmış Kesit c) Üstten Katlanmış Kesit

Şekil 4. 57 $L=1300$ mm için 4 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri



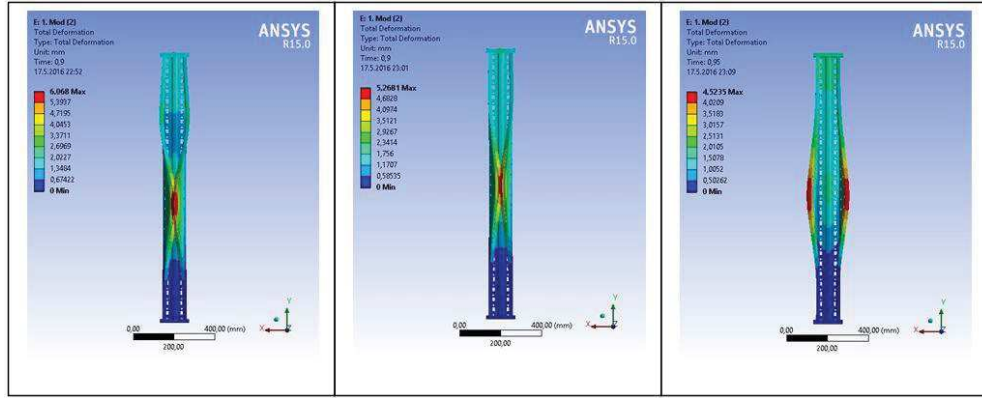
a) Orijinal Kesit b) Alttan Katlanmış Kesit c) Üstten Katlanmış Kesit

Şekil 4. 58 $L=1300$ mm için 6 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri

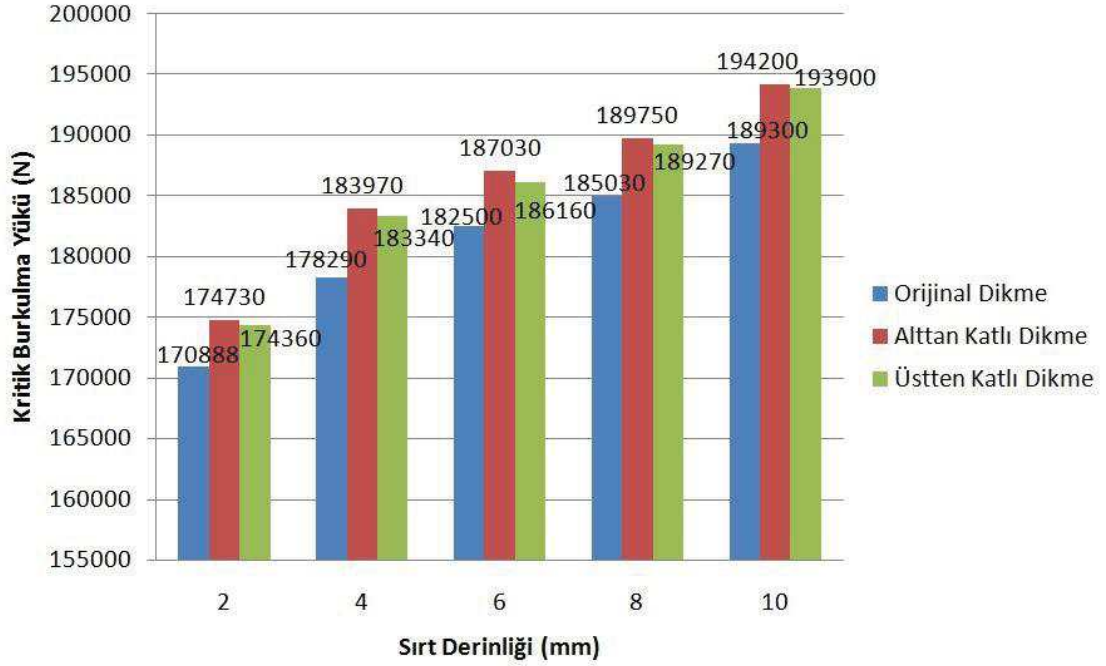


a) Orijinal Kesit b) Alttan Katlanmış Kesit c) Üstten Katlanmış Kesit

Şekil 4. 59 $L=1300$ mm için 8 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri



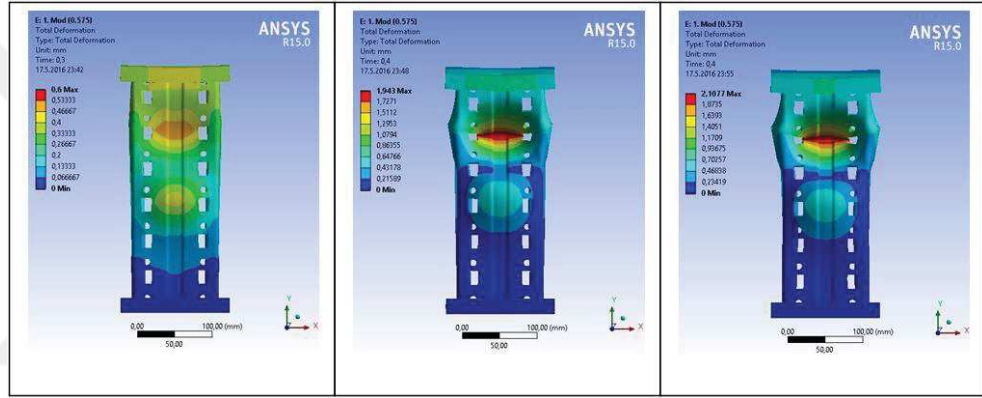
Şekil 4. 60 $L=1300$ mm için 10 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri



Şekil 4. 61 Farklı sırt derinliğine sahip dikme kesitlerinin nonlineer burkulma analizi sonuçları ($L=300$ mm)

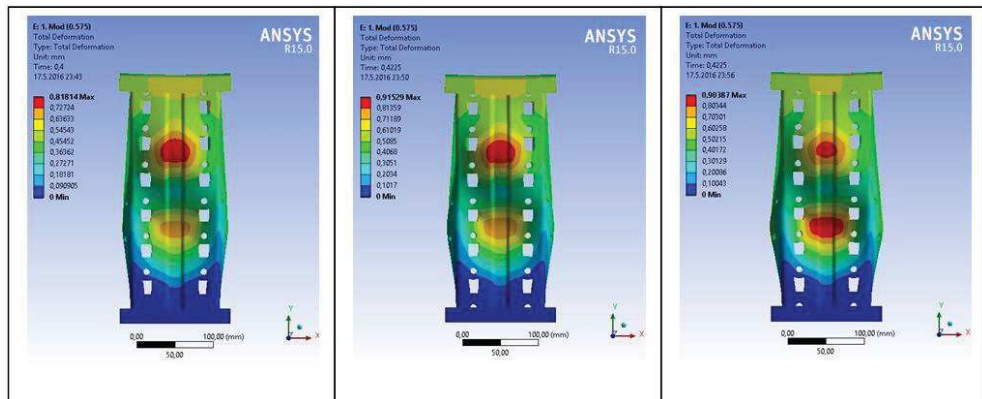
Kesitlerin efektif alanlarını hesaplamak için 300 mm boyundaki dikmelere nonlineer burkulma analizi yapılmıştır. Şekil 4.61’ de görülen kritik burkulma yükleri dikme malzemesinin akma dayanımına bölünerek kesitlerin efektif alanları hesaplanmıştır. Çizelge 4.4’ de de görüldüğü gibi en yüksek efektif alan 10 mm sırt derinliğine sahip alttan katlı kesitte çıkmaktadır. Bu efektif alan sonuçlarına paralel olarak da kritik burkulma yükleri devamlı olarak artış göstermektedir. Sonlu elemanlar analizi

sonuçlarına göre orta ve kısa boylu dikmeler için 2 mm’ den başlayarak 8 mm’ ye kadar devam eden sırt derinliklerinde kritik burkulma yükü üzerine efektif alan direkt olarak etkili olurken 10 mm sırt derinliğine sahip olan kesitlerde efektif alanla birlikte kesitlerin atalet momentlerinin de etkisi görülmektedir. 8 mm’ ye kadar alttan katlı kesitte en büyük kritik burkulma yükleri elde edilmiştir. Fakat 10 mm’ lik sırt derinliğine gelindiğinde en büyük kritik burkulma yükü değeri üstten katlı kesitte elde edilmiştir. Bunun sebebi de Çizelge 4.4’ den de görüldüğü gibi üstten katlı kesitin atalet momenti özelliklerinin alttan katlı kesite göre daha yüksek değerlere sahip olmasıdır. Ayrıca sırt derinliğinin burkulma modları üzerinde etkili olmadığı gözlenmiştir. 300 mm boy için burkulma mod şekilleri Şekil 4.62 ile Şekil 4.66 arasında verilmiştir.



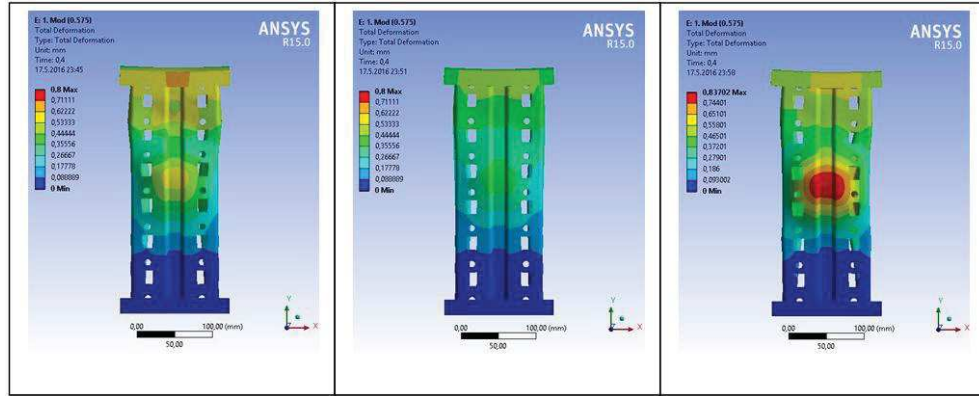
a) Orijinal Kesit b) Alttan Katlanmış Kesit c) Üstten Katlanmış Kesit

Şekil 4. 62 $L=300$ mm için 2 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri



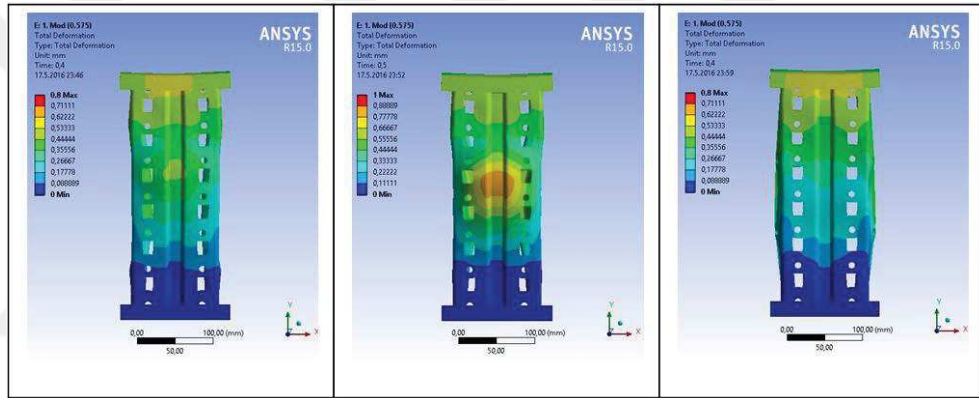
a) Orijinal Kesit b) Alttan Katlanmış Kesit c) Üstten Katlanmış Kesit

Şekil 4. 63 $L=300$ mm için 4 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri



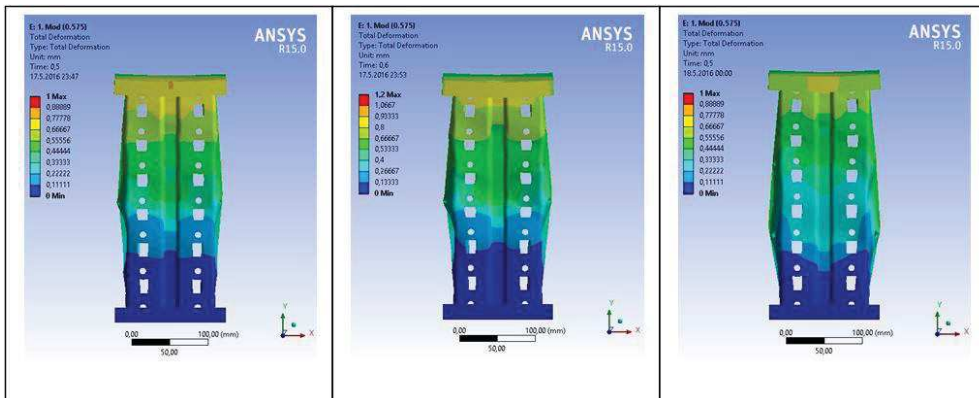
a) Orijinal Kesit b) Alttan Katlanmış Kesit c) Üstten Katlanmış Kesit

Şekil 4. 64 $L=300$ mm için 6 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri



a) Orijinal Kesit b) Alttan Katlanmış Kesit c) Üstten Katlanmış Kesit

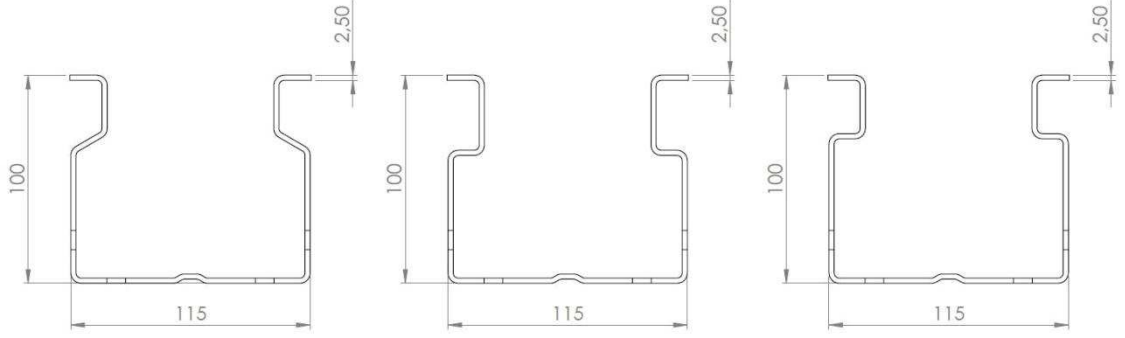
Şekil 4. 65 $L=300$ mm için 8 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri



a) Orijinal Kesit b) Alttan Katlanmış Kesit c) Üstten Katlanmış Kesit

Şekil 4. 66 $L=300$ mm için 10 mm sırt derinliğine sahip kesitlerin burkulma şekilleri

4.5. Flanş Ucunda Bulunan Uzantının (Dudak) Tam Katlı Olması Durumu



a) Yatay uzantılı orijinal kesit

b) Yatay uzantılı alttan katlı kesit

c) Yatay uzantılı üstten katlı kesit

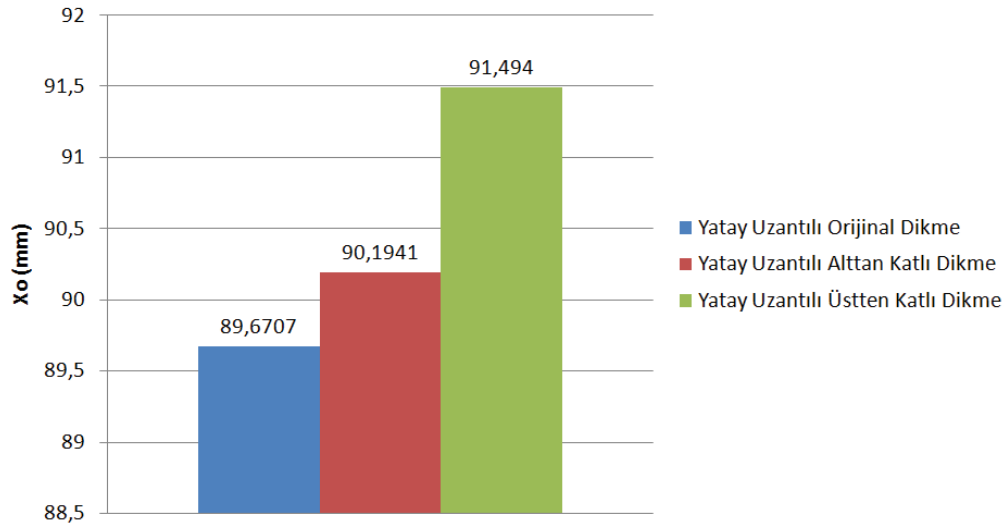
Şekil 4. 67 Dikme kesitlerinin yatay uzantılı hali

Burada ilk kısımda incelenen dikme kesitlerinin bu bölümde flanşlarının ucunda bulunan uzantı kısımlarının yatay olmasının burkulma yükleri üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.67' de dikme kesitlerinin yatay uzantılı halleri verilmiştir.

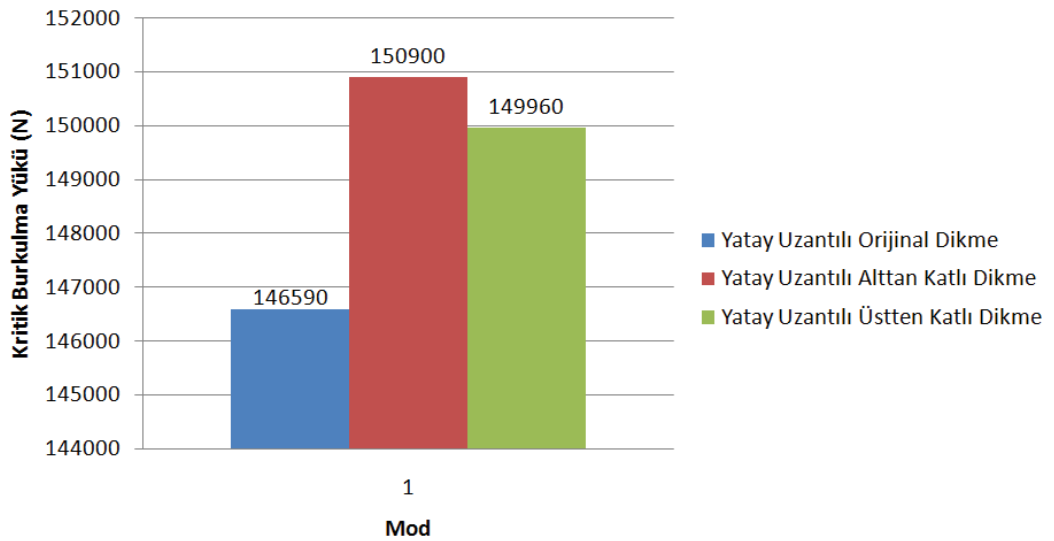
Çizelge 4. 5 Yatay uzantılı kesitlerin özellikleri

Kesit	Alan (mm ²)	Efektif Alan (mm ²)	I _{xx} (mm ⁴)	I _{yy} (mm ⁴)	J (mm ⁴)
Yatay Uzantılı Orijinal Kesit	877.78	670.2307	1135455.25	1875088.14	3010988.58
Yatay Uzantılı Altan Katlı Kesit	897.53	665.2307	1135900.44	1884999.64	3020454.90
Yatay Uzantılı Üstten Katlı Kesit	897.53	663.4615	1160290.73	1943499.64	3103790.37

Çizelge 4.5' de yatay uzantılı kesitlerin özellikleri verilmiştir. Çizelge 4.5 ile Çizelge 4.1 ile kıyaslandığı zaman uzantılar yatay olduğu zaman tüm kesitlerin atalet momenti özelliklerinin arttığı görülmektedir. Fakat efektif alanlarda sadece orijinal kesitte bir artış görülmektedir. Diğer kesitlerde efektif alanlar azalmıştır. Ayrıca Şekil 4.68' e bakıldığı zaman 4.1. kısımdaki kesitlere göre ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafede bir miktar artış meydana gelmiştir.



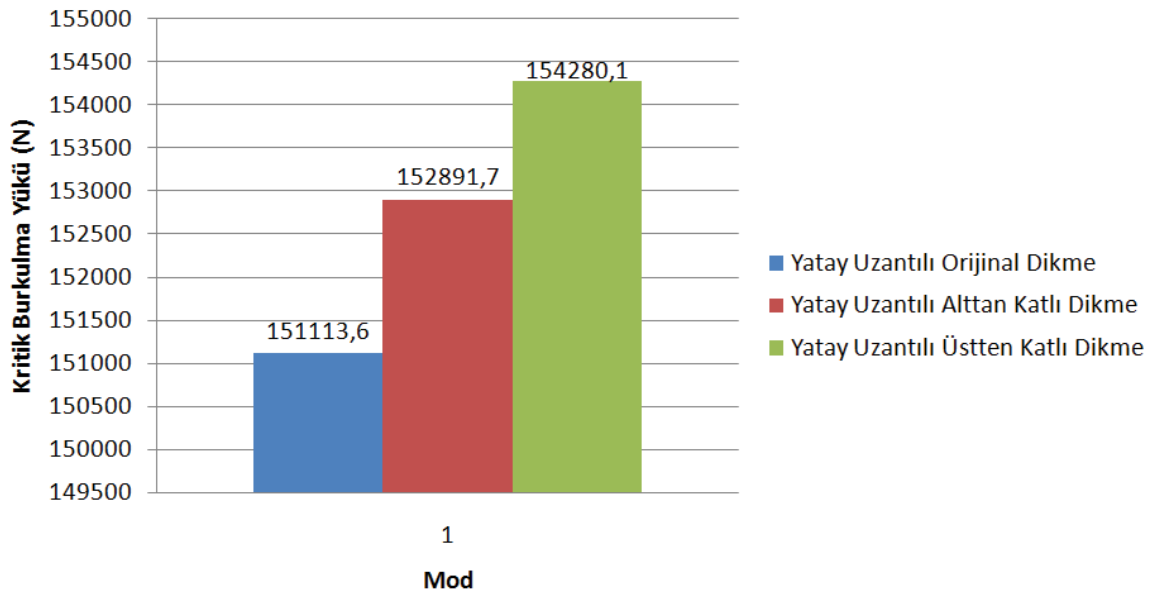
Şekil 4. 68 Yatay uzantılı kesitlerin ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafe



Şekil 4. 69 Yatay uzantılı kesitlerin nonlinear burkulma analizi sonuçları
($L = 2400$ mm)

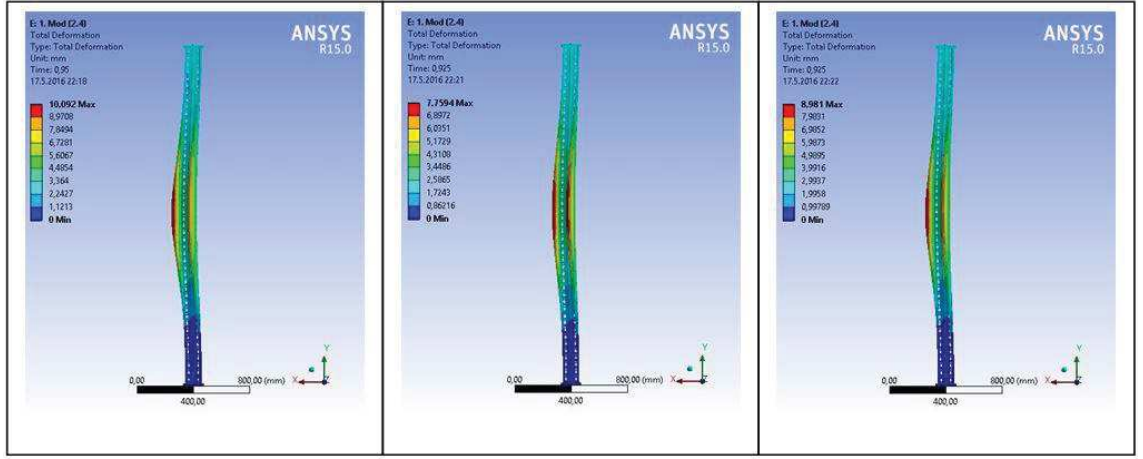
Şekil 4.69' a bakıldığı zaman alttan katlı ve üstten katlı kesitler orijinal kesite göre daha yüksek kritik burkulma yüküne sahiptir. Bunun nedeni ise bu iki kesitin orijinal kesite göre daha yüksek atalet momenti değerlerine sahip olmasıdır. 2400 mm boy için dikmelerin narinlik oranları yüksek olduğundan dolayı bu boy için dikmelerin flanşları aynı yönlü distorsiyona uğradıkları için global burkulma modu meydana gelmiştir. 2400 mm' lik boyda sahip dikmelerin sonlu elemanlar analizinden elde edilmiş burkulma mod

şekilleri Şekil 4.71' de verilmiştir. Bu boy için en yüksek kritik burkulma yükü değerini en yüksek atalet momenti değerine sahip olan üstten katlı kesitin vermesi beklenmekteydi. Fakat Şekil 4.69' de verilen sonuçlara göre en yüksek kritik burkulma yükü değerine alttan katlı kesit sahiptir. Bunun sebebi olarak üstten katlı kesitin ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafenin kritik sınırın üzerinde olduğu söylenebilir. Çünkü bu boyda global burkulma modu meydana geldiği için ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki fark ne kadar az olursa o kadar fazla kritik burkulma yükü değeri elde edilecektir.



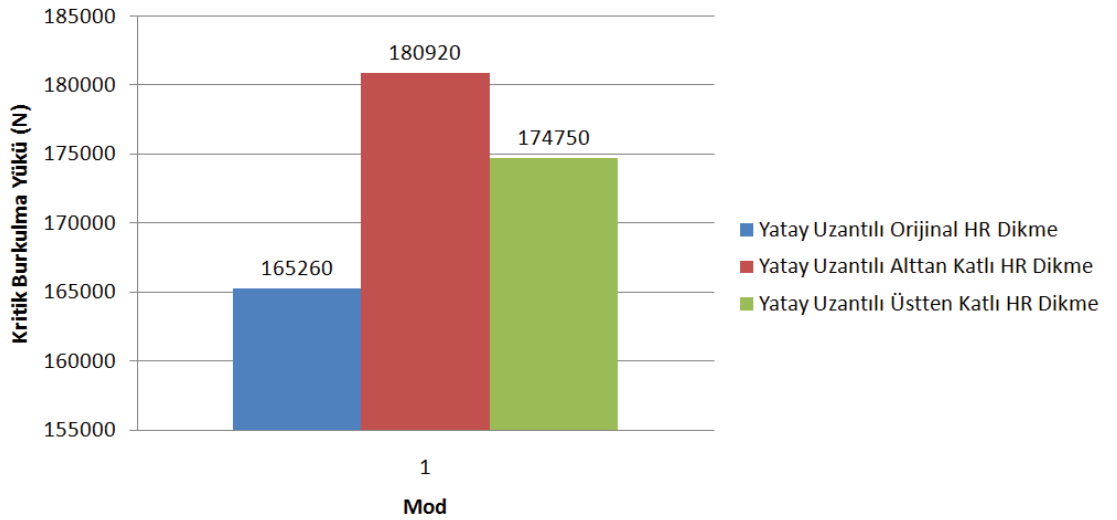
Şekil 4. 70 Yatay uzantılı kesitlerin doğrudan dayanım yönteminden elde edilen burkulma yükü sonuçları ($L = 2400$ mm)

Şekil 4.70' de yatay uzantılı kesitlerin doğrudan dayanım yönteminden elde edilen burkulma yükü değerleri verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi doğrudan dayanım yönteminden elde edilen burkulma yük değerleriyle nonlinear sonlu elemanlar analizinden elde edilen burkulma yükü değerleriyle oldukça yakın çıkmıştır. Fakat doğrudan dayanım yöntemine göre en yüksek kritik burkulma yükü üstten katlı kesitte elde edilmiştir. Doğrudan dayanım yöntemine göre en yüksek kritik burkulma yükü değeri beklenildiği gibi en yüksek atalet momenti değerine sahip olan üstten katlı kesitte çıkmıştır.



a) Yatay uzantılı orijinal kesit b) Yatay uzantılı alttan katlı kesit c) Yatay uzantılı üstten katlı kesit

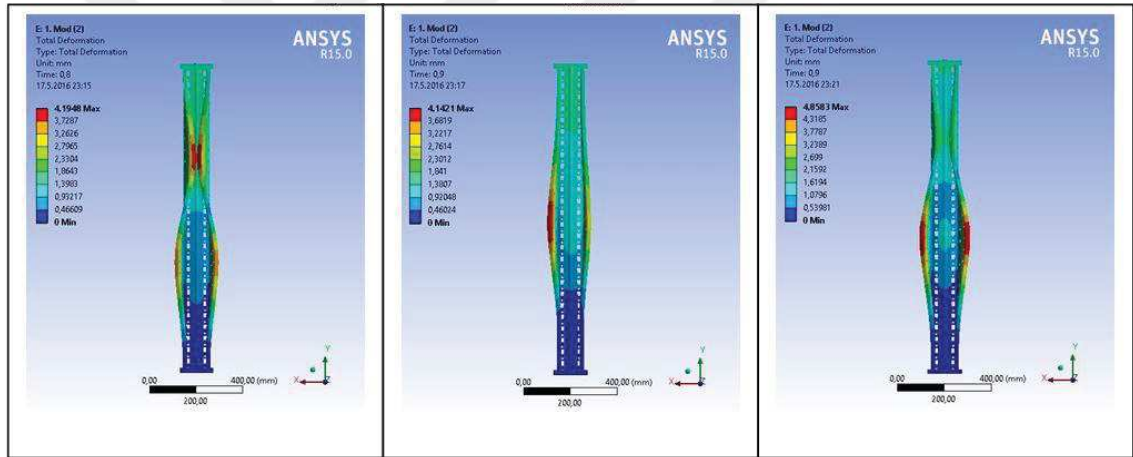
Şekil 4. 71 Yatay uzantılı dikme kesitlerinin nonlinear analiz sonuçlarına göre burkulma mod şekilleri ($L = 2400$ mm)



Şekil 4. 72 Yatay uzantılı kesitlerin nonlinear burkulma analizi sonuçları ($L = 1300$ mm)

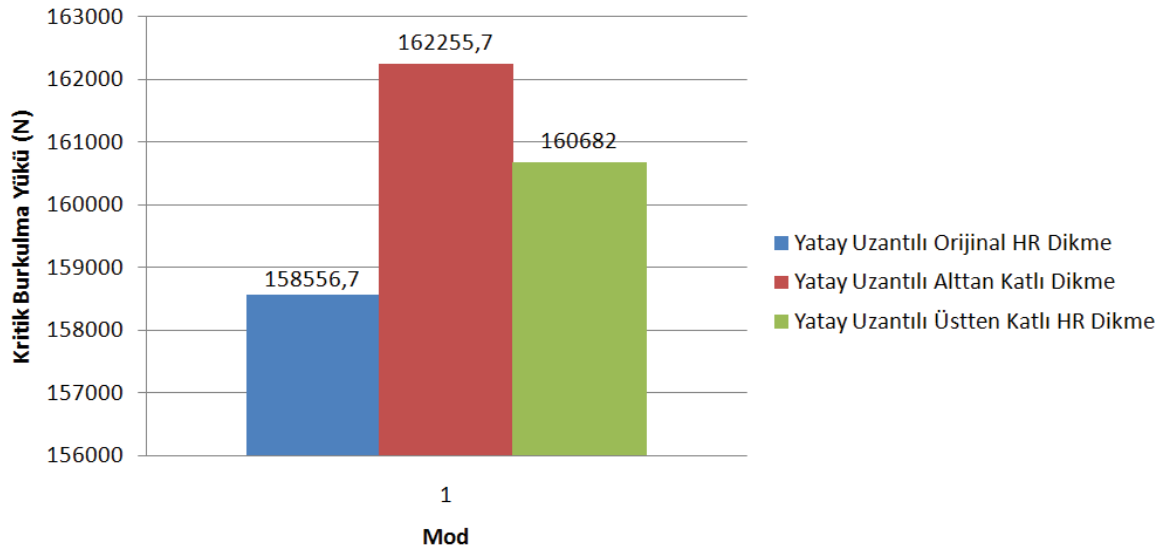
Şekil 4.72' de 1300 mm boya sahip yatay uzantılı dikmelerin nonlinear sonlu elemanlar analizi sonuçları verilmiştir. Boy kısaldıkça efektif alanların kritik burkulma yükü üzerine etkisi daha fazla olmaktadır. Fakat Şekil 4.72' deki sonuçlara bakıldığında en yüksek efektif alana sahip olan orijinal dikme en düşük kritik burkulma yükünü vermektedir. Bunun muhtemel sebebi Şekil 4.73' de verilen burkulma mod şekillerindendir. Buradan da görülebileceği gibi orijinal kesit üst kısma yakın bir bölgede içeri doğru kapanarak distorsiyonel burkulmaya maruz kalıyor. Fakat alttan katlı kesitte bunun tam tersi bir durum ortaya çıkmaktadır. Bu kesitte maksimum yer

değiştirme dışarıya doğru açılan kısımda gerçekleşiyor. Bundan dolayı da eğilme rijitliği (EI) orijinal kesit kadar azalmadığı için daha yüksek bir kritik burkulma yükü vermektedir. Aynı durum üstten katlı kesit içinde geçerlidir. Maksimum yer değiştirme Şekil 4.74' de de görüldüğü gibi dışarı doğru açılan bölgede gerçekleşmiştir. Bundan dolayı da en yüksek kritik burkulma yükünü orijinal kesitin vermesi beklenirken alttan ve üstten katlı kesitler daha yüksek yük değerleri vermiştir. Fakat bu sonuçlara test yapmadan güvenilmemesi gerekir çünkü burkulma esnasında flanşlar dışarı doğru değil de içeriye doğru hareket ederse bu sefer tam tersi bir sonuç çıkacaktır ve en büyük kritik burkulma yükünü en yüksek efektif alana sahip olan orijinal kesitli dikme verecektir. Bundan dolayı yatay uzantı alttan ve üstten katlı kesitte efektif alanı azalttığı ve tüm kesitlerde ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafeyi arttırdığı için nihai kesit seçimi yaparken kullanılmayacaktır.



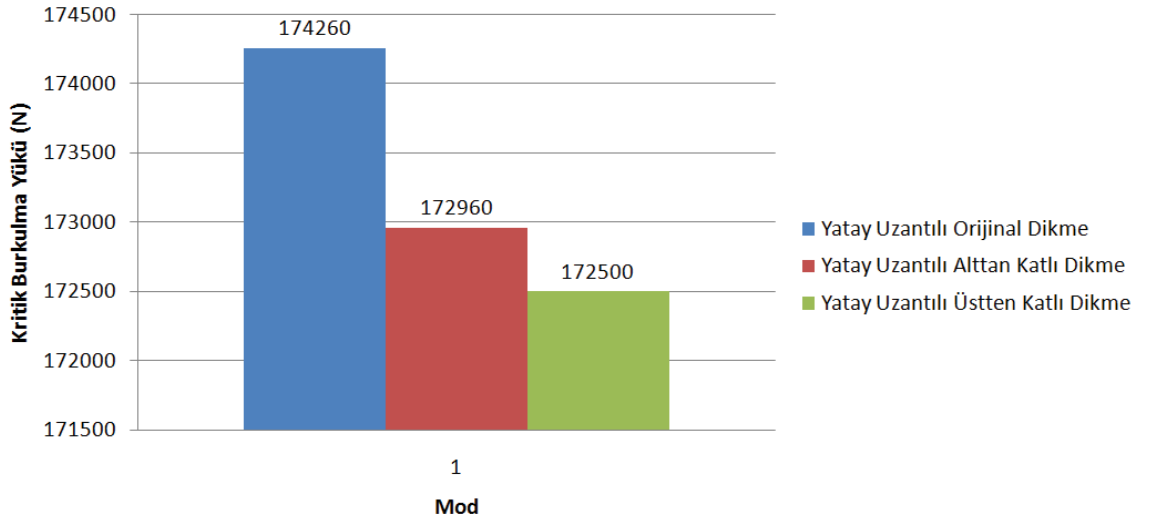
a) Yatay uzantılı orijinal kesit b) Yatay uzantılı alttan katlı kesit c) Yatay uzantılı üstten katlı kesit

Şekil 4. 73 Yatay uzantılı dikme kesitlerinin nonlinear analiz sonuçlarına göre burkulma mod şekilleri ($L = 1300$ mm)



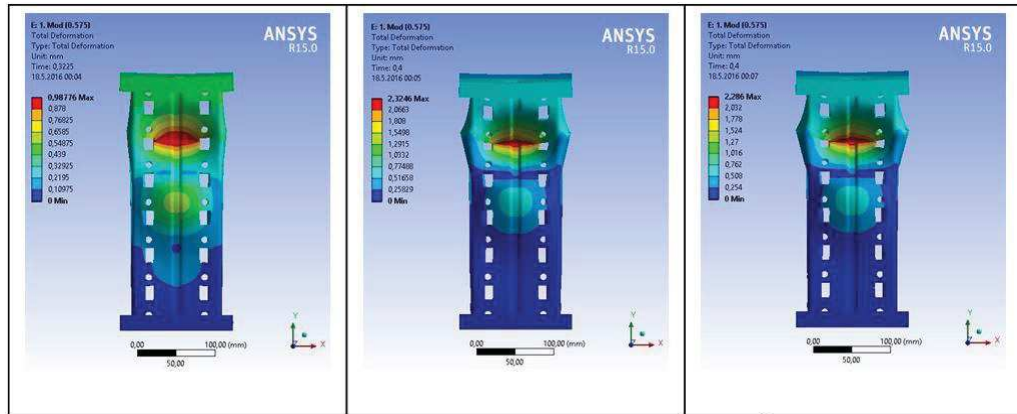
Şekil 4. 74 Yatay uzantılı kesitlerin doğrudan dayanım yönteminden elde edilen burkulma yükü sonuçları ($L = 1300$ mm)

Şekil 4.74' de 1300 mm boya sahip dikmelerin doğrudan dayanım yönteminden elde edilen kritik burkulma yükleri verilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar nonlineer sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlarla benzer çıkmıştır. Fakat özellikle alttan katlı ve üstten katlı kesitler için doğrudan dayanım yöntemiyle bulunan burkulma yükleri ile nonlineer sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar arasında yaklaşık 15000 N' luk fark vardır. Bu farkın bu kadar büyük çıkmasının sebebi sonlu elemanlar analizinde meydana gelen mod şeklidir. Şekil 4.73' de verilen burkulma mod şekillerine bakılırsa alttan katlı ve üstten katlı kesitlerin flanşlarında maksimum yer değiştirme dışarı doğru olduğu için beklenen burkulma yükü değerlerinden daha fazla yük değerleri elde edilmiştir. Eğer flanşlar dışarı doğru değil içeri doğru şekil değiştirseydi, burkulma yükü değerleri daha düşük çıkacaktı ve doğrudan dayanım yönteminden elde edilen değerlere daha da yaklaşmış olacaktı.



Şekil 4. 75 Yatay uzantılı dikme kesitlerinin nonlinear analiz sonuçlarına göre burkulma mod şekilleri ($L = 300$ mm)

Şekil 4.75' de 300 mm boya sahip yatay uzantılı dikmelerin nonlinear burkulma analizi sonuçları verilmiştir. Bu boy için yapılan analizlerden dikme kesitlerinin efektif alanları dikme malzemesinin akma dayanımına bölünerek hesaplanmıştır. Şekil 4.75' de görüldüğü gibi en büyük kritik burkulma yüküne sahip olan kesit orijinal dikme kesitidir. Buna paralel olarak da en büyük efektif alana sahip olan kesitte orijinal kesittir. 300 mm boyundaki dikmelerde lokal burkulma modu meydana gelmiştir ve nonlinear analizlerden elde edilen burkulma mod şekilleri Şekil 4.76' da verilmiştir.

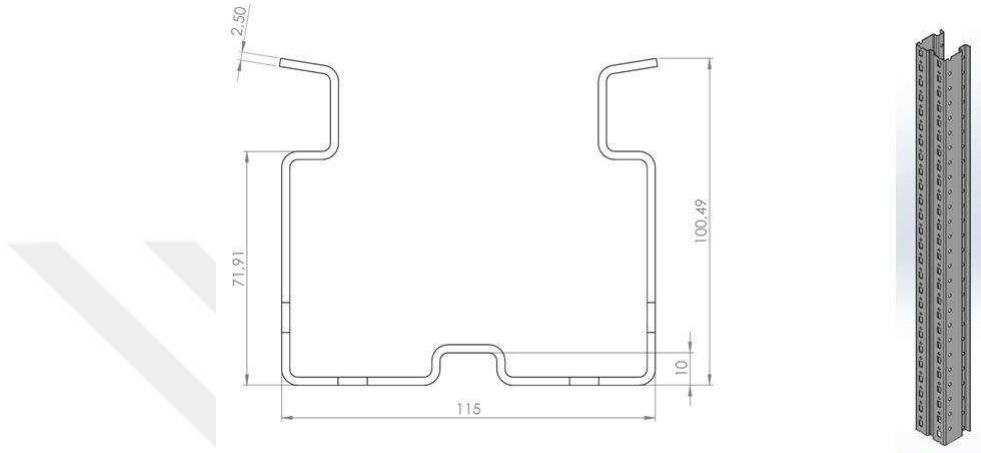


a) Yatay uzantılı orijinal kesit b) Yatay uzantılı alttan katlı kesit c) Yatay uzantılı üstten katlı kesit

Şekil 4. 76 Yatay uzantılı dikme kesitlerinin nonlinear analiz sonuçlarına göre burkulma mod şekilleri ($L = 300$ mm)

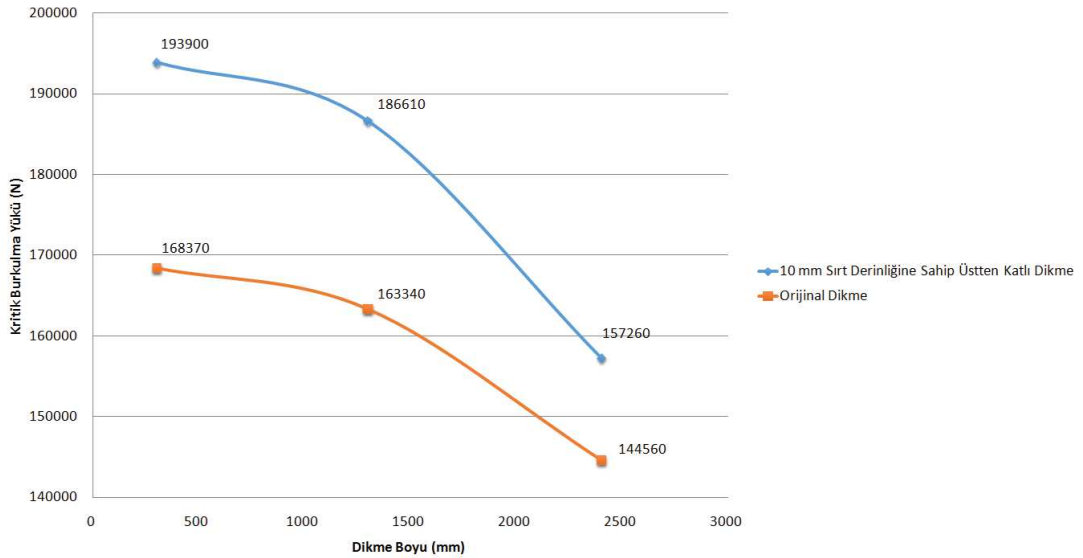
4.6. Nihai Dikme Kesitin Belirlenmesi

Yapılan deneysel çalışmalara, nonlinear sonlu elemanlar analizi sonuçlarına ve doğrudan dayanım yönteminin sonuçlarına göre en yüksek kritik burkulma yükü değerini verecek kesit olarak 10 mm sırt derinliğine ve köşeli deliklere sahip üstten katlı dikme kesiti seçilmiştir. Nihai dikme kesitinin ölçüleri Şekil 4.77' de verilmiştir.

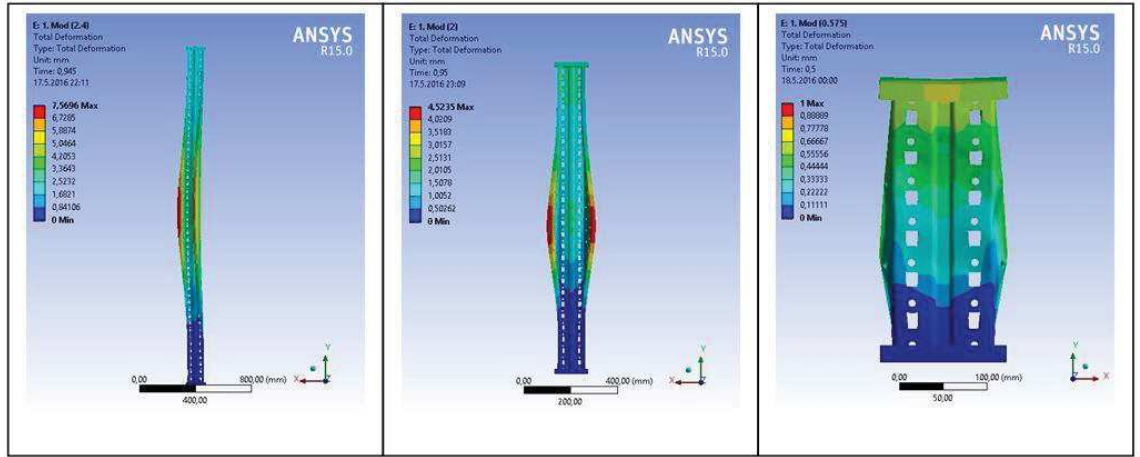


Şekil 4. 77 Nihai dikme kesitinin ölçüleri

Şekil 4.77' de verilmiş olan nihai dikme kesitinin nonlinear sonlu elemanlar analizi 3 farklı boy için yapılmıştır. Buradan elde edilen sonuçların orijinal dikme kesitinin nonlinear sonlu elemanlar analizi sonuçları ile kıyaslanması Şekil 4.78' de verilmiştir.



Şekil 4. 78 Nihai dikme kesitinin analiz sonuçlarıyla orijinal kolon kesitinin analiz sonuçlarının kıyaslanması



a) $L=2400$ mm

b) $L=1300$ mm

c) $L=300$ mm

Şekil 4. 79 Nihai dikme kesitinin burkulma mod şekli

Buradan görüldüğü gibi karar verilen nihai kesit 2400 mm boy için orijinal kesitten yaklaşık %8.8 daha fazla yük kaldırmaktadır. Aynı şekilde 1300 mm boy için nihai kesit yaklaşık olarak %14.2 daha fazla yük kaldırmaktadır. 300 mm boy için seçilen nihai kesit yaklaşık olarak % 15.16 daha fazla yük kaldırmaktadır. Sonuç olarak depo raf sistemlerinde kullanılan ayak sisteminde iki atkı arasındaki maksimum boşluk 1300 mm olduğundan dolayı ayak hesaplamaları 1300 mm boyundaki dikmenin burkulması üzerinden yapılmaktadır. Buradan çıkan sonuca göre kesitin dış ölçüleri (115x100 mm) ve saç kalınlığı ($t=2,5$ mm) değiştirilmeden sadece kesit şeklinin değiştirilmesiyle %14.2 daha fazla yük taşıyabilecektir. Bu artışta sadece tek bir dikme için yaklaşık olarak 2372 kg' dır. Bir ayakta iki dikmeden ve en küçük bir depo sistemi de iki ayaktan oluştuğu için sistemdeki toplam kapasite artışı yaklaşık olarak 9488 kg' dır. Bu kapasite artışı ile aynı dikme kesiti ile fazladan bir kaç kat daha fazla yükleme yapılabilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında öncelikle çelik depo raf sistemlerinde kullanılan 115 x 100 mm' lik kesit ölçülerine sahip olan açık kesitli ve ince cidarlı dikmelerin burkulma davranışı 2400 mm, 1300 mm ve 300 mm olmak üzere 3 farklı boy için deneysel, nonlinear sonlu elemanlar analizi ve doğrudan dayanım yöntemiyle incelenmiştir. 2400 mm boy için yapılan deneysel çalışma ile nonlinear sonlu elemanlar analizi çalışması kıyaslandığında analiz sonucundan elde edilen kritik burkulma yükü deneysel çalışmadan elde edilen kritik burkulma yükünden 23642 N daha büyük çıkmıştır. Bu farkın oluşmasının sebebi kolon boyu arttıkça üretimi gerçekleştirilen dikmenin doğrusallığının azalmasıdır. Buradan da anlaşılabileceği gibi bu tarz ince cidarlı yapılarda üretim sırasında meydana gelebilecek kusurlar taşıma kapasitelerini ciddi miktarda etkilemektedir. 2400 mm boya sahip dikmenin narinlik oranı yüksek olduğundan dolayı deneylerde ve sonlu elemanlar analizi çalışmalarında global burkulma modu gözlenmiştir. Ayrıca doğrudan dayanım yöntemiyle de hesaplanan kritik burkulma yükü değerleri de sonlu elemanlar yönteminden elde edilen değerle uyumlu çıkmıştır. 1300 mm boy için yapılan deneysel çalışma ile nonlinear sonlu elemanlar analizi çalışması kıyaslandığında elde edilen kritik burkulma yükü değerleri birbirine oldukça yakın bulunmuştur. 1300 mm boya sahip olan dikme için yapılan deneysel ve nonlinear sonlu elemanlar analizi çalışmalarında distorsiyonel burkulma modu gözlenmiştir. Doğrudan dayanım yönteminden elde edilen kritik burkulma yükü değeri de deneysel ve nonlinear sonlu elemanlar analizinden elde edilen değerlerle uyumlu çıkmıştır. 300 mm boya sahip olan dikme için sadece nonlinear sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Buradan elde edilen sonuçlardan dikme kesitinin efektif alanları hesaplanmıştır. Bu boyda dikmede lokal burkulma modu meydana gelmiştir. Üretimi gerçekleştirilen bu orijinal dikme kesitinin burkulma davranışı deneysel, sonlu elemanlar analizi ve doğrudan dayanım yöntemiyle incelendikten sonra bu kesitin 115 x 100 mm' lik dış ölçüleri ve sac kalınlığı değiştirilmeden kesit üzerinde bulunan güçlendiricilerin pozisyonları, konumları, derinlikleri ve deliklerin şekilleri değiştirilerek en yüksek kritik burkulma yükü değerini verecek dikme kesiti araştırılmıştır.

Bölüm 4.1' de görüldüğü gibi öncelikle orijinal dikme kesitinin flanşları üzerinde bulunan açılı güçlendirici tam katlı hale getirilerek alttan katlı ve üstten katlı olarak

isimlendirilen 2 adet yeni kesit elde edilmiştir. Elde edilen bu kesitlerin atalet momenti ve efektif alan değerleri orijinal kesitten daha yüksektir. Bu da burkulma yükü için olumlu bir artıştır. Bu kesitlerin burkulma davranışları sonlu elemanlar ve doğrudan dayanım yöntemiyle 3 farklı boy için incelenerek orijinal kesitle kıyaslanmıştır. Sonuç olarak incelenen tüm boylar için bu iki kesit orijinal kesitten daha yüksek burkulma yükü vermektedir. Flanş üzerinde bulunan güçlendiricinin tam katlı olması burkulma yükleri için olumlu katkı sağlamaktadır. 2400 mm boy için en yüksek kritik burkulma yükü değerine üstten katlı kesit sahipken, 1300 mm boy için en yüksek kritik burkulma yükü değerine alttan katlı kesit sahiptir. Genellikle depo raf sistemlerinde kullanılan ayaklarda iki çapraz arası açıklık maksimum 1300 mm olduğundan dolayı 1300 mm boy için elde edilen değerler kullanılmalıdır. Bu bölümde incelenen kesitler arasından alttan katlı kesitin seçilmesi uygun görülmüştür.

Bölüm 4.2' de orijinal, alttan katlı ve üstten katlı kesitlerin sırt kısmında bulunan köşeli deliklerin üst kısımları radyüslü hale getirilmiştir. Bu bölümde yapılan çalışmalara göre orijinal ve alttan katlı kesitte efektif alanların az da olsa bir miktar arttığı gözlenmesine rağmen üstten katlı kesitte bir miktar azaldığı gözlenmiştir. Buna paralel olarak da radyüslü deliklere sahip olan orijinal ve alttan katlı kesitlerin köşeli deliklere sahip olan orijinal ve alttan katlı kesitlere göre az da olsa daha fazla kritik burkulma yükü değerine sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca üstten katlı kesitte köşeli deliklerin radyüslü hale dönüştürülmesi efektif alanı azalttığından dolayı kritik burkulma yükü değerinde azalma görülmüştür. Bu bölümden elde edilen sonuçlara göre radyüslü deliklere sahip olan alttan katlı kesit tüm boylar için en yüksek burkulma yükü değerini verdiği için bu kesitin seçilmesi uygun görülmüştür.

Bölüm 4.3' de dikme kesitinin flanşında bulunan tam katlı güçlendirici sırt kısmından 40 mm, 50 mm, 64 mm ve 72 mm mesafelerde olacak hale getirilmiştir. Burada 64 mm mesafeden katlı olan kesit alttan katlı kesiti ve 72 mm mesafeden katlı olan kesit ise üstten katlı kesiti temsil etmektedir. Bu kısımda yapılan çalışmalarda katlama mesafesi 64 mm' ye kadar arttıkça kesitlerin atalet momenti değerleri ve efektif alanları arttığı fakat 72 mm mesafeye gelindiği zaman atalet momenti değerinin artmasına rağmen efektif alanın azaldığı görülmüştür. 2400 mm boy için yapılan nonlineer sonlu elemanlar analizi sonucuna göre tam katlı kısım sırt bölgesinden uzaklaştıkça dikme

kesitlerinin burkulma yüklerinin arttığı görülmüştür. Bu boyda atalet momentinin burkulma kapasitesi üzerinde önemli derecede etkisi olduğundan dolayı en yüksek atalet momenti değerine sahip olan 72 mm mesafeden katlı olan kesit en yüksek burkulma yükü değerini vermiştir. Sonlu elemanlar analizine benzer sonuçlar doğrudan dayanım yönteminden de elde edilmiştir. 1300 mm boya sahip dikmelerin sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre en yüksek burkulma yükü değerini veren kesitin 64 mm mesafeden katlı kesit olduğu tespit edilmiştir. Orta boylu dikmelerde burkulma yükü üzerine atalet momentinin yanı sıra efektif alanlarında etkisi olduğundan dolayı bu boy için en yüksek efektif alana sahip olan kesit en yüksek burkulma yükü değerini vermiştir. Bu boy içinde sonlu elemanlar analizine benzer sonuçlar doğrudan dayanım yönteminden de elde edilmiştir. 300 mm boya sahip dikmelere yapılan nonlineer analiz sonuçlarına göre en yüksek efektif alana sahip olan 64 mm mesafeden katlı kesitin en yüksek burkulma yükü değerine sahip olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak tam katlı kısım için seçilmesi gereken en uygun mesafenin 64 mm olması gerektiği bulunmuştur.

Bölüm 4.4' de orijinal, alttan katlı ve üstten katlı kesitlerin sırt bölgesinde bulunan güçlendiricinin 2 mm' den başlayarak 10 mm' ye kadar arttırılmıştır. Artan sırt derinliğiyle beraber tüm kesitlerin atalet momenti değerleri ve efektif alanları artış göstermiştir. Ayrıca artan sırt derinliğiyle beraber kayma merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki mesafede azalmaktadır. Bu durum özellikle global burkulma modunda önemli olmaktadır. 2400 mm boy için yapılan nonlineer sonlu elemanlar analizi sonuçlarına bakıldığında sırt derinliği arttıkça tüm kesitlerin burkulma yükü değeri artış göstermiştir. Bu boyda dikmelerde global burkulma modu gözlemlendiği için en büyük atalet momenti değerine sahip olan üstten katlı kesitler en yüksek burkulma yükü değerini vermiştir. Benzer sonuçlar doğrudan dayanım yönteminden de elde edilmiştir. 1300 mm boy için yapılan sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre de sırt derinliğinin artmasıyla beraber tüm kesitlerin burkulma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Orta boylu dikmelerde distorsiyonel burkulma modu gözlemlendiği için bu boyda efektif alanların burkulma yükü üzerine önemli etkisi vardır. Bundan dolayı 8 mm sırt derinliğine kadar en yüksek kritik burkulma yükü değerleri alttan katlı kesitlerde elde edilmiştir. 10 mm sırt derinliğine inildiği zaman ise artık en yüksek kritik burkulma yükü değerini üstten katlı kesitin verdiği tespit edilmiştir. Sonucun bu şekilde çıkmasının sebebi olarak 10 mm sırt derinliğine sahip üstten katlı kesitin atalet momenti değerinin dikkate değer bir

şekilde diğer kesitlerden yüksek olmasıdır. Benzer eğilim doğrudan dayanım yönteminden elde edilen sonuçlarda da görülmektedir. 300 mm boy için yapılan sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre sırt derinliği arttıkça tüm kesitlerin burkulma yükü değerinin arttığı görülmüştür. Bu boy için tüm sırt derinliklerin alttan katlı kesit en yüksek burkulma yükü değerini vermiştir. Bu kısımda yapılan çalışmaların sonucuna göre 10 mm sırt derinliğine sahip üstten katlı kesitin seçilmesine karar verilmiştir.

Bölüm 4.5' de orijinal, alttan katlı ve üstten katlı kesitlerin flanşlarının ucunda bulunan açılı uzantılar tam katlı hale getirilmiştir. Uzantılar tam katlı hale getirildiğinde orijinal kesitin efektif alanı artarken alttan ve üstten katlı kesitlerin efektif alanlarında düşüş meydana gelmiştir. 2400 mm boy için yapılan sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre en yüksek kritik burkulma yükü değerini alttan katlı kesit vermiştir. Burada en yüksek atalet momenti değerine sahip olan kesitin en yüksek burkulma yükü değerini vermesi beklenmekteydi. Sonucun bu şekilde çıkmasının muhtemel sebebi üstten katlı kesitin ağırlık merkeziyle kayma merkezi arasındaki mesafenin kritik değerin üstünde olmasıdır. Doğrudan dayanım yöntemi sonuçlarına bakıldığında beklenildiği gibi en yüksek kritik burkulma yükü değerini üstten katlı kesit vermiştir. 1300 mm boy için yapılan sonlu elemanlar analizi sonucuna bakıldığında en yüksek kritik burkulma yükünü en yüksek efektif alana sahip kesitin vermesi beklenirken alttan katlı kesit en yüksek burkulma yükü değerini vermiştir. Benzer sonuçlar doğrudan dayanım yönteminden elde edilen sonuçlardan da elde edilmiştir. Bunun bu şekilde çıkmasının sebebi lineer sonlu elemanlar analizinden elde edilen mod şeklinden kaynaklanmaktadır. Alttan ve üstten katlı kesitlerin flanşlarındaki en büyük yer değiştirmeler dışarı doğru değil içeri doğru olsaydı en büyük burkulma yükü değerini en büyük efektif alana sahip olan orijinal kesitin verecektir. 300 mm boy için yapılan sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlara göre en yüksek burkulma yükü değerini orijinal kesit vermiştir. Sonuç olarak uzantıların yatay hale getirilmesi alttan ve üstten katlı kesitlerin efektif alanlarını azalttığı için nihai dikme kesiti seçimi yapılırken uzantıların yatay olması hali kullanılmamıştır.

Yapılan çalışmaların sonucunda 115x100 mm kesit ölçülerine sahip olan en yüksek kritik burkulma yükünü verecek kesit olarak 10 mm sırt derinliğine ve köşeli deliklere sahip üstten katlı kesitin seçilmesine karar verilmiştir. Buradan çıkan sonuca göre

kesitin dış ölçüleri (115x100 mm) ve saç kalınlığı ($t=2,5$ mm) değiştirilmeden sadece kesit şeklinin değiştirilmesiyle nihai kesit 2400 mm boy için orijinal kesitten % 8.8, 1300 mm boy için % 14.2 ve 300 mm boy için % 15.16 daha fazla burkulma yükü değeri verdiği bulunmuştur. Sonuç olarak depo raf sistemlerinde kullanılan ayak sisteminde iki atkı arasındaki maksimum boşluk 1300 mm olduğundan dolayı ayak hesaplamaları 1300 mm boyundaki dikmenin burkulması üzerinden yapılmaktadır. Buradan çıkan sonuca göre nihai kesit orijinal kesitten %14.2 daha fazla yük taşıyabilecektir. Burkulma yükündeki bu artışta sadece tek bir dikme için yaklaşık olarak 2372 kg' dır. Bir ayakta iki dikmeden ve en küçük bir depo sistemi de iki ayaktan oluştuğu için sistemdeki toplam kapasite artışı yaklaşık olarak 9488 kg' dır. Bu kapasite artışı ile aynı dikme kesiti ile fazladan bir kaç kat daha yükleme yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Akar M.C. 2010.** Sıcak Hadde Çeliği ile Soğukta Şekillendirilen Çeliklerin Özelliklerinin ve Taşıyıcı Farklılıklarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Anbarasu, M., Murugapandian, G. 2015,** Experimental study on cold formed steel web stiffened lipped channel columns undergoing distortional-global interaction. *Materials and Structures*, 10.1617/s11527-015-0586-6
- Anonim, AISI S100-2007 (2007).** North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, *American Iron and Steel Institute*, USA.
- Anonim, European Standard EN1993-1-3 (2009).** Eurocode 3 - Design of Steel Structures, *European Committee for Standardization*, Brussels.
- Anonim, 2016.** ÜÇGE Depo Raf Sistemleri Ürün Kataloğu, Bursa.
- Anonim 2016.** Sürekli Şekil Verme Makinesi. <http://acmeholdingpeb.com/wp-content/uploads/2014/11/12.jpg> - (Erişim tarihi: 2016).
- Anonim 2016.** Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Elemanlardan Oluşturulmuş Bina. http://zhongliantrading.com/upfiles/201608/09/1470711522_17.jpg - (Erişim tarihi: 2016).
- Ashraf M., Gardner L., Nethercot D.A. 2006,** Finite element modelling of structural stainless steel cross-sections. *Thin - Walled Structures*, 44 (2006): 1048 - 1062
- Ayhan A.O. 2015.** Sonlu Elemanlar Analizi Teori ve ANSYS ile Uygulamalar. Palme Yayıncılık, Ankara, 906s.
- Bakker M.C.M., Peköz T. 2003,** The finite element method for thin-walled members — basic principles. *Thin - Walled Structures*, 41(2003): 179 - 189
- Casafont M., Pastor M.M., Roure F., Peköz T. 2011,** An experimental investigation of distortional buckling of steel storage rack columns. *Thin - Walled Structures*, 49 (2011): 933 - 946
- Casafont M., Pastor M., Bonada J., Roure F., Peköz T. 2012,** Linear buckling analysis of perforated steel storage rack columns with the Finite Strip Method. *Thin - Walled Structures*, 61 (2012): 71 - 85
- Dong S., Li H., Wen Q. 2015,** Study on distortional buckling performance of cold - formed thin - walled steel flexural members with stiffeners in the flange. *Thin - Walled Structures*, 95 (2015): 161 - 169
- Freitas A.M.S., Freitas M.S.R., Souza F.T. 2005,** Analysis of steel storage rack columns. *Journal Of Constructional Steel Research*, 61 (2005): 1135 - 1146
- Galambos T.V. 1998.** Guide to stability design criteria for metal structures. John Wiley & Sons Inc., New York, 923 pp.

Garifullin M., Nackenhorst. 2015, Computational Analysis of Cold-Formed Steel Columns with Initial Imperfections. *Procedia Engineering*, 117 (2015): 1073 - 1079

He Z., Zhou X. 2014, Strength design curves and an effective width formula for cold-formed steel columns with distortional buckling. *Thin - Walled Structures*, 79 (2014): 62 - 70

Holmos G.T. 2006. Roll forming handbook. Taylor and Francis., New York, 583pp.

Kahya, Ç. 2016. Çelik konstrüksiyon raf sistemlerinde kullanılan dikme (ayak) burkulma davranışlarının iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Li, Z. 2009. Buckling Analysis of the Finite Strip Method and Theoretical Extension of the Constrained Finite Strip Method for General Boundary Condition. John Hopkins University

Ma W., Becque J., Hajirasouliha I., Ye J. 2015, Cross-sectional optimization of cold-formed steel channels to Eurocode 3. *Engineering Structures*, 101 (2015): 641 - 651

Mangır A. 2014. Strength and Stability of Thin Walled Steel Columns in Storage Rack Structures. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Moen C.D., Schafer B.W. 2009, Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes. *Engineering Structures*, 31 (2009): 2812 - 2824

Pastor M.M., Casafont M., Chillaron E., Lusa A., Roure F., Somala M.R. 2009, Optimization of cold-formed steel pallet racking cross-sections for flexural_torsional buckling with constraints on the geometry. *Engineering Structures*, 31 (2009): 2711 - 2722

Pastor M.M., Bonada J., Roure F., Casafont M. 2013, Residual stresses and initial imperfections in non-linear analysis. *Engineering Structures*, 46 (2013): 493 - 507

Pastor M.M., Casafont M., Bonada J., Roure F. 2014, Imperfection amplitudes for nonlinear analysis of open thin-walled steel cross-sections used in rack column uprights. *Thin - Walled Structures*, 76 (2014): 28 - 41

Roure F., Pastor M.M., Casafont M., Somalo M.R. 2011, Stub column tests for racking design: Experimental testing, FE analysis and EC3. *Thin - Walled Structures*, 49 (2011): 167 - 184

Sarawit A.T., Kim Y., Bakker M.C.M., Peköz T. 2003, The finite element method for thin-walled members-applications. *Thin - Walled Structures*, 41 (2003): 191 - 206

Sayman, O., Karakuzu, R., Aktaş, A. 2012. Mukavemet 2. Sürat Üniversite Yayınları, İstanbul, 301 s.

Schafer B.W. 2002. Local, Distortional, and Euler Buckling of Thin-Walled Columns. *Journal of Structural Engineering*, (2002): 128 289 299

Schafer B.W., Li Z., Moen C.D. 2010, Computational modeling of cold - formed steel. *Thin - Walled Structures*, 48 (2010): 752 - 762

Sivakumaran K.S., Abdel - Rahman N. 1998, A finite element analysis model for the behaviour of cold-formed steel members. *Thin - Walled Structures*, 31(1998): 305 - 324

Talikoti R.S., Bajoria K.M. 2005, New approach to improving distortional strength of intermediate length thin-walled open section columns. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 5 (2005)

Timoshenko, S.P., Gere, J.M. 1961. Theory of elastic stability. McGraw-Hill Inc., New York, 541pp.

Wallin M. 2014. A Finite Element Tool for Linear Buckling Analysis. Yüksek Lisans Tezi, Linköping Institute of Technology, Division of Solid Mechanics, Linköping.

Yu, W. 1973. Cold-formed steel structures. McGraw-Hill Inc., New York, 463pp.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Safa ŞENAYSOY

Doğum Yeri ve Tarihi : Eskişehir, 26.10.1989

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Süleyman Çakır Lisesi / 2006

Lisans : Uşak Üniversitesi Makine Mühendisliği / 2011

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği / 2017

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (2012 - 2014)

Üçge DRS A.Ş. Bursa (2014 - 2015)

Bursa Teknik Üniversitesi (2015 - Halen)

İletişim (e-posta) : safasenaysoy@gmail.com

Yayınları : -