



**ÇELİK KONSTRÜKSİYON RAF SİSTEMLERİNDE
KULLANILAN DİKME (AYAK) BURKULMA
DAVRANIŞININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

Çağlar KAHYA



T.C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK KONSTRÜKSİYON RAF SİSTEMLERİNDE KULLANILAN DİKME
(AYAK) BURKULMA DAVRANIŞININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

Çağlar KAHYA

Prof. Dr. Yaşar PALA

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2016

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Çağlar KAHYA tarafından hazırlanan “ÇELİK KONSTRÜKSİYON RAF SİSTEMLERİNDE KULLANILAN DİKME (AYAK) BURKULMA DAVRANIŞININ İYİLEŞTİRİLMESİ ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Yaşar PALA

Başkan : Prof. Dr. Yaşar PALA

Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Yrd. Doç. Dr. Murat REİS

Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ

Bursa Teknik Üniversitesi
Doğa Bilimleri, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ali Osman DEMİR

Enstitü Müdürü

/ /

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

- 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.

.././....

İmza

Çağlar KAHYA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇELİK KONSTRÜKSİYON RAF SİSTEMLERİNDE KULLANILAN DİKME (AYAK) BURKULMA DAVRANIŞININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Çağlar KAHYA

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yaşar PALA

Bu tez çalışmasında taşıma ve depolama işlemleri için kullanılan çelik konstrüksiyon raf sistemlerinin burkulma davranışları incelenmiştir. Bu çalışmada, düzlemsel levhaların ve raf sistemlerinde kullanılan dikmelerin burkulma davranışları üzerine deliklerin ve güçlendiricilerin nasıl etki ettiği üzerinde durulmuştur. Bu amaçla lineer ve non-lineer burkulma analizleri ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılmış ve sonuçları incelenmiştir.

Delik şekillerinin, deliklerin birbirleri arasındaki mesafelerinin ve deliklerin yan ve üst kenarlardan olan uzaklıklarının burkulma davranışına etkisi incelenmiştir. İlaveten flanş ve veb güçlendiricilerin konumunun ve şeklinin etkisi de açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lokal (yerel) burkulma, burulmalı burkulma, eğilme burkulması, distorsiyonel burkulma, raf sistemleri, Dikme (ayak)

2016, xi + 91 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

IMPROVING THE BUCKLING BEHAVIOUR OF COLUMNS USED IN STEEL RACK SYSTEMS

Çağlar KAHYA

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Yaşar PALA

In this thesis, buckling behaviour of the steel rack system which is used for transporting and storing, are investigated. In this study, how holes and stiffeners effect on buckling behaviour of plates and uprights which are used in rack system are focused on. For this purpose linear and non-linear buckling analyses have been performed using ANSYS finite element program and results are examined.

The effects of hole shapes, space between holes and distance from holes to lateral and top faces on the buckling behaviour are studied. Furthermore, the effects of shape and location of flange and web stiffeners effects are also explained.

Key words: Local buckling, torsional buckling, flexural buckling, distortional buckling, rack system, upright

2016, xi + 91 pages

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam boyunca bana her konuda yardımcı olan, bilgi ve deneyimlerini her zaman paylaőan değerli danışman hocam Prof. Dr. Yaşar PALA'ya teőekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca görüőlerinden faydalandığım değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Murat REİS'e teşekkür ederim.

Analizlerin kurgulanmasında bana yardımcı olan Safa ŐENAYSOY ve Oęuz DOęAN'a, bu süreçte manevi desteklerinden ötürü Ahmet Serhan CANBOLAT, Burak TÜRKAN, Oęuz TUNÇEL ve Sezgin ESER'e teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde bana her zaman destek olan aileme ve bu zamana kadar geçen sürede üzerimde emeği olan tüm hocalarıma teőekkürlerimi sunarım.



aęlar KAHYA

/ /

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGE DİZİNİ.....	xi
1.GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
2.1. Literatür Çalışması	2
2.2 Genel Bilgiler	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM	10
3.1 Kolonların Burkulması.....	10
3.1.1 Elastik Stabilite Sınırları	14
3.1.2 Orta Noktasından Yükleme Maruz Kalan Kolonun Burkulma Yüğü Hesabı	16
3.1.3 Secant Bağıntısı.....	17
3.1.4 Büyük sehime sahip çubuklar (Elastika).....	20
3.1.5 Enerji Yöntemi	22
3.2. Levhalarda Burkulma.....	24
3.2.1 Delikli Levhalarda Burkulma.....	27
3.2.2 Efektif Genişlik Konsepti.....	29
3.3 Açık Kesitli Kolonların Burkulması	31
3.3.1 Lokal Burkulma	31
3.3.2 Distorsiyonel Burkulma	32
3.3.3 Global Burkulma	33
3.4 Delikli Kolonlarda Burkulma Davranışları	36
3.4.1 Lokal Burkulma	36
3.4.2 Distorsiyonel Burkulma	37
3.4.3 Global Burkulma	38
3.5 Maksimum Taşıma Kapasitesi (Ultimate Load)	40
3.5.1 Global Burkulmaya Maruz Dikmelerde Taşıma Kapasitesi	40
3.5.2 Lokal Ve Global Burkulma Modlarının Etkileşimindeki Dikmelerde Taşıma Kapasitesi	41

3.5.3 Global Ve Distorsiyonel Burkulma Modlarının Etkileşimindeki Dikmelerde Taşıma Kapasitesi	41
3.5.4 Distorsiyonel Burkulmaya Maruz Dikmelerde Taşıma Kapasitesi.....	42
3.6 Sonlu Elemanlar Analizi	43
3.6.1.Sonlu Elemanlar Analizinde Burkulma Çözümü.....	44
3.6.2 Sonlu Elemanlar Analizinin Kurgulanması	45
3.6.3 Yapılan Analizlerin Doğrulanması	47
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	49
4.1 Düzlemsel Levha Analizleri.....	49
4.1.1 Delik Şeklinin Burkulma Yüküne Etkisi	49
4.1.2 Deliğin Yan Kenarlardan Olan Uzaklığının Burkulma Yüküne Etkisi.....	51
4.1.3 Deliklerin Yükleme Kenarından Uzaklığının Burkulma Yüküne Etkisi	54
4.2 Dikme Analizleri.....	68
4.2.1 Dikmelerdeki Farklı Uzantı Açılarının Burkulma Yüküne Etkisi	69
4.2.2 Güçlendirici Etkisinin Burkulma Yüküne Etkisi	71
4.2.3 Veb Eleman Üzerinde Bulunan Deliklerin Birbirlerine Yaklaşması İle Burkulma Yükündeki Değişimi	81
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	84
KAYNAKLAR	86
EKLER.....	89
ÖZGEÇMİŞ	91

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklamalar
b_{eff}	Efektif genişlik
C_w	Burulma kesitinin çarpılma sabiti
E	Elastisite modülü
EC_w	Çarpılma rijitliği
G	Kayma modülü
GJ	Burulma rijitliği
I_g ve I_{net}	Sırasıyla deliksiz bölgedeki kesitin ve delikli bölgedeki kesitin atalet momentleridir
J	St. Venant burulma sabiti
K	Efektif uzunluk çarpanı
P_{cre}	Kritik global elastik burkulma yükü
P_e	Elastik Eğilmeli burkulma yükü
P_{krl}	Elastik lokal burkulma yükü
$P_{kr,eb}$	Kritik eğilmeli-burulmalı burkulma yükü
$P_{kr,eb,d}$	Delikli kolonlardaki kritik eğilmeli burulmalı burkulma yükü
$P_{kr,ed}$	Delikli yapının eğilmeli burkulma yükü
P_{nd}	Distorsiyonel burkulmaya maruz yapının taşıyabileceği maksimum yük
P_{nl}	Lokal-global burkulma etkileşimi olan yapının taşıyabileceği maksimum yük
P_{nde}	Distorsiyon-global burkulma etkileşimi olan yapının taşıyabileceği maksimum yük
P_{ne}	Global burkulmaya maruz yapının taşıyabileceği maksimum yük
P_{nld}	Lokal-distorsiyonel burkulma etkileşimi olan yapının taşıyabileceği maksimum yük
P_{ndl}	Distorsiyonel-lokal burkulma etkileşimi olan yapının taşıyabileceği maksimum yük
r	Jirasyon yarıçapı
t	Levhanın et kalınlığı
t_r	İndirgenmiş kalınlık

ν	Poisson oranı
x_0 ve y_0	Kayma merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki mesafe
σ_e	Eğilme burkulması gerilmesi
σ_{krd}	Elastik distorsiyonel burkulma gerilmesi
σ_{akma}	Akma gerilmesi
σ_{kr}	Kritik burkulma gerilmesi
σ_{krl}	Lokal burkulma gerilmesi
$\sigma_{krl-delikli}$	Delikli yapının lokal burkulma gerilmesi
λ	Narinlik oranı

Kısaltmalar

DSM

Açıklamalar

Direct Strength Method

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1 Dikme elemanları.....	6
Şekil 2. 2 Soğuk şekillendirilmiş çeliklerde burkulma türleri	7
Şekil 2. 3 Lokal burkulma örnekleri (Kulatunga ve Macdonald 2013)	7
Şekil 2. 4 Lokal burkulma modu (Gunalan ve ark 2015)	8
Şekil 2. 5 Distorsiyonel burkulma modu (Ranawaka 2006).....	8
Şekil 2. 6 C kesitli dikmede eğilmeli-burulmalı burkulma (Kang ve ark 2013).....	9
Şekil 3. 1 (a) Alt ucu ankastre, üst ucu serbest kolon (b) Alt ve üst ucu basit mesnetlenmiş kolon.....	11
Şekil 3. 2 Euler hiperbolü	14
Şekil 3. 3 Orta Noktasından Yüklemeye Maruz Kalan Kolon	16
Şekil 3. 4 Eksantrik yüklemeye maruz kolon	18
Şekil 3. 5 Kolonun eksenden kaçık yüklenme durumu	19
Şekil 3. 6 Büyük yer değiştirmeye sahip çubuk (Timoshenko ve Gere 1961)	21
Şekil 3. 7 (a) Kararsız hal (b) denge konumu (c) kararlı hal	22
Şekil 3. 8 Mesnetlenmiş kolonun burkuluş şekli	23
Şekil 3. 9 Levha burkulma katsayısı (Yu ve Schafer 2007). ss basit mesnet, fix ankastre ve free serbest ucu temsil etmektedir.	25
Şekil 3. 10 Farklı sınır şartlarına göre değişen k değeri (Ziemann 2010).....	26
Şekil 3. 11 Eğilme ve bası gerilmelerinin olması durumunda levha burkulma katsayısı (Ziemann 2010).....	27
Şekil 3. 12 Şerit metodu (Moen ve Schafer 2009).....	28
Şekil 3. 13 Oluklu levha (Ma ve Wang 2013)	29
Şekil 3. 14 Düzlem levhada efektif genişlik (Davies 2000)	30
Şekil 3. 15 Ektif genişlik konsepti (Ma ve Wang 2013).....	30
Şekil 3. 16 Dikme kesit geometrisi	31
Şekil 3. 17 Flanş modeli (Schafer ve Peköz 1999)	32
Şekil 3. 18 Eğilmeli Burulmalı burkulma esnasındaki yer değiştirmeler (Yoo ve Lee 2011)	34
Şekil 3. 19 Veb elemanındaki delik yerleşimleri (Smith ve Moen 2014).....	36
Şekil 3. 20 Düzlemsel levha analizlerinde ((a)Lineer analiz ve (b) Non- Lineer analiz) uygulanan sınır şartları.....	46
Şekil 3. 21 Dikme analizlerinde uygulanan sınır şartları ((a)Lineer analiz ve (b) Non- Lineer analiz) uygulanan sınır şartları.....	47
Şekil 4. 1 Levha genişliği 100 mm olan levhada delik şeklinin burkulma yüküne etkisi	50
Şekil 4. 2 Levha genişliği 200 mm olan levhada delik şeklinin burkulma yüküne etkisi	50
Şekil 4. 3 Delik şekillerinin burkulma şekillerine etkisi (Üst sıra lineer analiz, alt sıra non-lineer analiz sonucunda elde edilen şekil değişimlerini göstermektedir).....	51
Şekil 4. 4 Deliklerin levha üzerindeki konumları	52
Şekil 4. 5 Farklı delik sayılarına sahip levhalarda delik konumunun, kenardan levha merkezine doğru kayması ile burkulma yükündeki değişimi (Lineer Analiz Sonuçları)53	
Şekil 4. 6 Farklı delik sayılarına sahip levhalarda delik konumunun, kenardan levha merkezine doğru kayması ile burkulma yükündeki değişimi (Non-linear Analiz Sonuçları).....	53
Şekil 4. 7 Delik Konumları	54

Şekil 4. 8 Tek delikli levhada deliklerin yükleme kenarından olan uzaklığının ve delik boyutunun burkulma yüküne etkisi.....	55
Şekil 4. 9 (Lineer Analiz Sonucu)Tek delikli ve d/h oranı 0,1 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375 (f) 0,5.....	56
Şekil 4. 10 (Non-Linear Analiz Sonucu) Tek delikli ve d/h oranı 0,1 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375 (f) 0,5.....	57
Şekil 4. 11 (Lineer Analiz Sonucu)Tek delikli ve d/h oranı 0,3 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375 (f) 0,5.....	58
Şekil 4. 12 (Non-Linear Analiz Sonucu) Tek delikli ve d/h oranı 0,3 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375 (f) 0,5.....	59
Şekil 4. 13 2 delikli levhada deliklerin yükleme kenarından olan uzaklığının ve delik boyutunun burkulma yüküne etkisi.....	60
Şekil 4. 14 (Lineer Analiz Sonucu) 2 delikli ve d/h oranı 0,3 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375.....	61
Şekil 4. 15 3 delikli levhada deliklerin yükleme kenarından olan uzaklığının ve delik boyutunun burkulma yüküne etkisi.....	62
Şekil 4. 16 5 delikli levhada deliklerin yükleme kenarından olan uzaklığının ve delik boyutunun burkulma yüküne etkisi.....	62
Şekil 4. 17 9 delikli levhada deliklerin yükleme kenarından olan uzaklığının ve delik boyutunun burkulma yüküne etkisi.....	63
Şekil 4. 18 (Lineer Analiz Sonucu) 3 delikli ve d/h oranı 0,2 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375.....	64
Şekil 4. 19 (Lineer Analiz Sonucu) 3 delikli ve d/h oranı 0,3 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375.....	65
Şekil 4. 20 (Lineer Analiz Sonucu) 5 delikli ve d/h oranı 0,2 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375.....	66
Şekil 4. 21 (Lineer Analiz Sonucu) 9 delikli ve d/h oranı 0,3 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3.....	67
Şekil 4. 22 Dikmelerin kesit geometrisi.....	68
Şekil 4. 23 Açılı uzantıya sahip dikmenin kesit geometrisi.....	69
Şekil 4. 24 Uzantının Yatayda Yaptığı Açının Burkulma Yüküne Etkisi	70
Şekil 4. 25 1. dikmede uzantının açılı olması ile burkulma şekillerindeki değişim. (a) 0° (b) 30° (c)45° (d)60° (e)75°	70
Şekil 4. 26 3. dikmede uzantının açılı olması ile burkulma modundaki değişim (a) 45° (b) 60°	71
Şekil 4. 27 Flanş bölgesinde üçgen güçlendirici bulunan dikmenin kesit görüntüsü	72
Şekil 4. 28 L=400 mm uzunluğundaki 1. dikmenin flanş bölgesindeki güçlendirici ile burkulma yükündeki değişimi.....	73

Şekil 4. 29 L=800 mm uzunluğundaki 2. dikmenin flanş bölgesindeki güçlendirici ile burkulma yükündeki değişimi.....	73
Şekil 4. 30 L=1000 mm uzunluğundaki 3. dikmenin flanş bölgesindeki güçlendirici ile burkulma yükündeki değişimi.....	74
Şekil 4. 31 Flanş bölgesinde dikdörtgen güçlendirici bulunan dikmenin kesit görüntüsü.....	74
Şekil 4. 32 L=400 mm uzunluğundaki 1. dikmenin flanş bölgesindeki dikdörtgen güçlendirici ile burkulma yükündeki değişimi.....	75
Şekil 4. 33 L=800 mm uzunluğundaki 2. dikmenin flanş bölgesindeki dikdörtgen güçlendirici ile burkulma yükündeki değişimi.....	76
Şekil 4. 34 L=1000 mm uzunluğundaki 3. dikmenin flanş bölgesindeki dikdörtgen güçlendirici ile burkulma yükündeki değişimi.....	76
Şekil 4. 35 Veb bölgesinde güçlendirici bulunan dikmenin kesit görüntüsü.....	77
Şekil 4. 36 Veb bölgesinde güçlendirici bulunan dikmelerin taşıma kapasitelerindeki değişimi.....	78
Şekil 4. 37 Veb bölgesindeki güçlendiricinin burkulma şekline etkisi (a) Güçlendirici bulunmadığı durum, (b) güçlendirici bulunan durum.....	79
Şekil 4. 38 Veb elemandaki güçlendiricinin burkulma şekline etkisi. (a) güçlendirici bulunmadığı durum, (b) güçlendirici bulunduğu durum.....	80
Şekil 4. 39 α açısı değişiminin burkulma yüküne etkisi.....	80
Şekil 4. 40 Güçlendirici bulunması durumunda burkulma yükündeki değişim.....	81
Şekil 4. 41 Veb eleman üzerindeki deliklerin konumlarının gösterimi.....	82
Şekil 4. 42 Veb eleman üzerinde bulunan deliklerin yan kenarlardan veb eleman ortasında doğru bulunması ile dikmenin taşıma kapasitesindeki değişim.....	83

ÇİZELGE DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1 Farklı sınır şartları için efektif uzunluk faktörü (Yu 1973)	13
Çizelge 3. 2 Tetmajer bağıntıları	15
Çizelge 3. 3 K değerleri (Timoshenko ve Gere 1961)	17
Çizelge 3. 4 Burkulan çubuklar için yükleme ve sehim çizelgesi (Timoshenko ve Gere 1961)	22
Çizelge 3. 5 Deneysel veriler ile analiz sonuçlarının kıyaslanması	48
Çizelge 4. 1 Delik şekillerinin numaralandırılması	49
Çizelge 4. 2 Dikmelerin Geometrik Özellikleri	68
Çizelge 4. 3 Dikmelerin kesit özellikleri	72
Çizelge 4. 4 Dikmelerin kesit özellikleri	75
Çizelge 4. 5 Dikme ve delik geometrisi	82



1.GİRİŞ

Yük taşıma ve depolama amacı için kullanılan çelik konstrüksiyon raf sistemlerinde, hem taşınan veya depolanan malzemelerin güvenliği hem de aynı alanda daha fazla yük taşınması istenen bir durumdur. Bunu sağlamak için raf sistemlerinde kullanılan dikmelerin burkulma davranışı ve buna bağlı olarak da taşıma kapasitelerinde bir iyileştirme yapılması bu çalışmada amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda delik ve güçlendiricilerin burkulma davranışına etkisi incelenmiştir.

Araştırmanın kaynak araştırması bölümünde daha önceki yıllarda yapılan benzer çalışmalardan ve kuramsal kavramlardan bahsedilmiştir.

Materyal ve yöntem bölümünde önce levhalar ve sonra dikmelerin delik bulunan ve bulunmayan durumları için burkulma yüklerini ve taşıma kapasitelerini hesaplamada kullanılan formüller verilmiştir. Ayrıca ANSYS sonlu elemanlar programı ve lineer burkulma modülünün çözüm mantığından bahsedilmiştir.

Bulgular ve tartışma bölümünde levhalar ve dikmeler için yapılan analiz sonuçları verilmiştir. Levha analizlerinde delik şeklinin, deliğin yan kenarlardan ve yükleme kenarından olan uzaklığının burkulma yüküne etkisi incelenir iken, dikme analizlerinde ise dikmenin veb ve flanş elemanlarında bulunan güçlendiricilerin konum ve şekillerinin burkulma davranışına etkisine bakılmıştır. İlaveten uzantının farklı açılarda bulunması durumunun ve veb eleman üzerinde bulunan çift sıra deliklerin konumunun yan kenarlardan veb elemanın ortasına doğru uzaklaşmasının burkulma yüküne etkisi de incelenmiştir.

Sonuçlar bölümünde ise analiz sonuçlarından elde edilen bilgiler özetlenerek sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Literatür Çalışması

Davies ve ark. (1997), makalelerinde basıya maruz kolonlar için genelleştirilmiş kiriş teorisi ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırılmış ve genelleştirilmiş kiriş teorisinin sonlu elemanlar yöntemine göre daha kısa sürede daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Ayrıca tüm kolon uzunlukları göz önüne alındığında da daha güvenilir sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. İlâveten yapılacak geniş çaplı deneylerin gereksiz olduğu belirtilmiştir.

El-Sawy ve Nazmy (2001), makalelerinde kenarları yuvarlaklaştırılmış dikdörtgen delik kullanımı, deliğin kısa kenarı levhanın uzun kenarı boyunca yerleşen konumlarda, yuvarlak delik kullanımına göre, levha kararlılığı bakımından daha iyi sonuçlar verdiğiinden bahsetmişlerdir. Dikdörtgen delikli levhalarda yükleme kenarı ile delik arası mesafe x_{edge} ve levhanın genişliği b olmak üzere, delik merkezinin $x_{edge}/b=0,25-0,5$ arasındaki kritik bölgede bulunmaması tavsiye edilmekte ve bu bölgede bulunması durumunda ise deliğin limit çapı (delik genişliği/levha genişliği) 0,4'ten küçük veya eşit olması burkulma katsayısının en az 3 olması gerektiğinden bahsedilmiştir. Yuvarlak delikli levhalarda ise deliğin kenarı ile yüklenmemiş en yakın kenar arasındaki mesafenin $0,1b$ 'den az olmaması tavsiye edilmektedir.

Bambach ve Rasmussen (2004), makalelerinde güçlendirici bulunmayan elemanlar için efektif genişlik üzerine çalışma yapmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada dayanım eğrisi (strength curve) ve efektif genişlik denklemleri çıkartılmıştır, bununla birlikte kaynaklı ve kaynaklı olmayan levhalar incelenmiş, elastik ve plastik efektif genişlikler bulunmuştur.

El-Sawy ve Martini (2007) levha üzerine yapılan çalışmalarında delik çapının arttıkça levha kararlılığının ve burkulma gerilmesinin düşeceği belirtilmiştir. Levha boy oranı (levha uzunluğu/genişliği) 0,6 ile 1,2 arası değerlerden kaçınılması, burkulma gerilmesinde büyük düşüslere sebep olduğundan, istenmektedir. Burkulma gerilmesini arttırmak ve kararlılığı geliştirmek için delik yeri yüklenen kenardan mümkün oldukça uzak olmalıdır (yüklenen kenar ile delik arası mesafe e_x ve levha genişliği b olmak üzere $e_x/b > 1$).

Moen ve Schafer (2008) yaptıkları çalışmalarında soğuk şekillendirilmiş delikli çelik kolonlardaki elastik burkulma ve yapılan testler ile arasındaki bağ incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizi kullanılmış olup, delik varlığının lokal ve distorsiyonel burkulmasına etkidiğinden bahsedilmiştir.

Moen ve Schafer (2009)'da ince levhalarda kritik burkulma gerilmesine delik varlığının nasıl etkidiği incelenmiş ve delik varlığının levhanın kritik burkulma gerilmesini, delik şekli ve boyutu ile bağlantılı olmak üzere, arttırıcı veya azaltıcı etki gösterdiğinden bahsedilmiştir.

Kwon ve ark. (2009) çalışmalarında, akma gerilmesi 560 MPa olan ve kalınlıkları 0,6 mm ile 0,8 mm olan soğuk şekillendirilmiş uzantılı kesitli ve veb ile flanşların ortasında güçlendirici bulunan çelik yapılar üzerine bası testi uygulanmıştır. Farklı burkulma modları arasındaki ilişki incelenmiş ve DSM ile kıyaslanmıştır.

Chen ve ark. (2010), yaptıkları bu çalışmada bir dizi karmaşık kesitli kolonların test sonuçları sunulmuştur. Lokal burkulmaya, elemanın ortasında bulunan güçlendiricilerin iyileştirici yönde etkidiği gözlemlenmiştir. Elastik burkulma yükünü tahmin ederken sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen burkulma gerilmesi göz önüne alınarak hesaplanan DSM ile bulunan dayanım sonuçları, test sonuçları ile uyduğu görülmüştür.

Zhou ve ark. (2011), çalışmalarında çelik piramit tabanlı kapalı kesitli soket bağlantısının düzgün bası yüklemesi altında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ve deneysel olarak incelenerek limit yüklemenin bulunulmasına çalışılmıştır. 3 tip olmak üzere lineer burkulma, non-lineer burkulma ve Modifiye Riks metotları kullanılmıştır. Non-lineer analizde malzeme non-lineerite özellikleri ile büyük yer değiştirmeler de analize katılmıştır. Analiz sonuçları, deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve non-lineer burkulma ve modifiye riks metodu analizlerinin, lineer burkulma analizine göre daha doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir, bunun sebebi de non-lineer özellikler ve büyük yer değişimlerinin de hesaba katılmasıdır. İlaveten bası kuvveti altındaki çelik bağlantılarda modifiye riks metodunun çökme analizlerinde daha da etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Del Coz Diaz ve ark. (2011) makalelerinde sonlu elemanlar metodunu kullanarak, çelik raf sistemlerine forklift gibi araçların hareketi esnasında çarpması ile raf sisteminin

bütünlüğünü tehdit edecek olan hasarın engellenmesine yönelik çalışma yapılmış ve en iyi koruma aparatının belirlenmesine çalışılmıştır.

Kulatunga ve Macdonald (2013), makalelerinde bası kuvvetine maruz kalan soğuk şekillendirilmiş çeliklerde sonlu elemanlar analizi kullanılarak delik pozisyonlarının kolonun taşıma kapasitesine etkisi incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizinin delikli ve deliksiz her iki türde de yaklaşık tahminlerde bulunmaktadır. Lokal burkulma etkisindeki ince kesitli yapılarda, deliklerin sonlarda bulunmasının zayıflatıcı etki gösterdiği belirtilmiştir.

Ma ve Wang (2013), makalelerinde delikli levhalarda burkulma yüklerinin ve efektif genişliğin bulunması için çalışılmıştır. Sonlu elemanlar analizi kullanılarak kritik burkulma yükünün bulunmasında bir düzeltme katsayısı bulunmuştur. Daha önceki çalışmalarda önerilen efektif genişlik faktörleri ile nümerik çalışmalar kıyaslanmıştır.

Gilbert ve ark. (2014), çalışmalarında ince cidarlı ağaç yapıları ile soğuk şekillendirilmiş çelik ve alüminyum yapıların mukayesesi yapılmıştır. Özellikle çok uzun olmayan kompozit C kesitli (500mm uzunlukta) ince cidarlı ağaç yapıların kullanımının mümkün olduğu bahsedilmektedir. İki tip C kesit dikkate alınmıştır, birincisi veb kısmının ortasında bir destekleyici olması diğeri ise olmaması halidir. Yapılan inceleme sonucunda önerilen ürünün soğuk şekillendirilmiş çelik yapılar ile rekabet edebileceği belirtilmektedir.

Guo ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada C kesitli yapılarda delik ve flanş destekleyici etkisi incelenmiştir. Nastran programı kullanılarak farklı türde destek tipleri incelenmiş ve sonlu elemanlar analizi ile burkulma yükü lineer ve non-lineer olarak bulunmuştur. Non-lineer analizin lineer analize göre daha doğru sonuç verdiği belirtilerek delik varlığının kritik burkulma yükünde azalmaya sebebiyet verdiğinden L şekilli desteklerin flanş bölgesindeki takviyesi kritik çökme yükünü %20,9 iyileştirdiğinden bahsedilmiştir.

He ve Zhou (2014), makalelerinde test sonuçları ve Hancock' un dizayn eğrisinden yola çıkarak önerilen dizayn eğrisi DSM ve efektif genişlik metodu ile kıyaslanmıştır. Bazı durumlarda test sonuçları ile DSM ve efektif genişlik metodu farklılıklar gösterdiğinden yeni bir formül önerilmiştir.

Pastor ve ark. (2014) çalışmalarında non-linear analizde kullanılacak olan başlangıçtaki geometrik kusurların etkisini incelemiştirlerdir. Bası yükü altındaki dikmeler üç farklı uzunlukta lokal, çarpılma ve global burkulma modlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Azami taşıma yükününün kapasitesini en doğru veren analizde başlangıç kusurlarının, lokal burkulma için $w/200$, distorsiyonel burkulması için $f/50$ ve global burkulma için $L/1000$ olduğu belirtilmiştir. Burada w veb genişliğini, f flanş derinliğini ve L ise dikmenin boyunu temsil etmektedir.

Smith ve Moen (2014) yaptıkları bu çalışmada delikli ince cidarlı kolonlarda oluşan lokal, distorsiyonel, eğilmeli ve eğilmeli burulmalı burkulma modları için yaklaşık çözüm formülleri önerilmiş ve sonlu elemanlar yöntemi kullanarak önerilen bu formüllerin doğrulukları test edilmiştir. Lokal burkulma için Rayleigh – Ritz enerji çözümü ile deliğin varlığı sonucu yanal ve boyuna levhadaki eğilme katılığındaki düşüş indirgenmiş kalınlık ile bulunmuştur. Distorsiyonel burkulmada da keza indirgenmiş kalınlık ile deliğin eğilme katılığındaki düşüş göz önüne alınmıştır. Global burkulmada ise delik varlığı ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılarak bulunan atalet momentleri ve burulma sabitleri ile formülize edilmiştir.

He ve ark. (2014) çalışmalarında ankastre mesnetli güçlendiricili veb elemana sahip uzantılı kesitli 1,5 mm kalınlığında düşük karbonlu soğuk şekillendirilmiş kolonlarda taşıma kapasitelerinin bulunması için deneysel veriler doğrultusunda bası testleri sunulmuştur. Yapılan deneylerde distorsiyonel ve lokal burkulma modlarının etkileşimde oldukları post-buckling davranışları gözlemlenmiştir. Burkulma modlarının etkileşimi taşıma kapasitelerinde düşüğe sebep olduğu ve lokal-distorsiyonel ile distorsiyonel-lokal burkulma etkileşimlerinin farklı mekanik davranışa sahip olduklarından bahsedilmiştir.

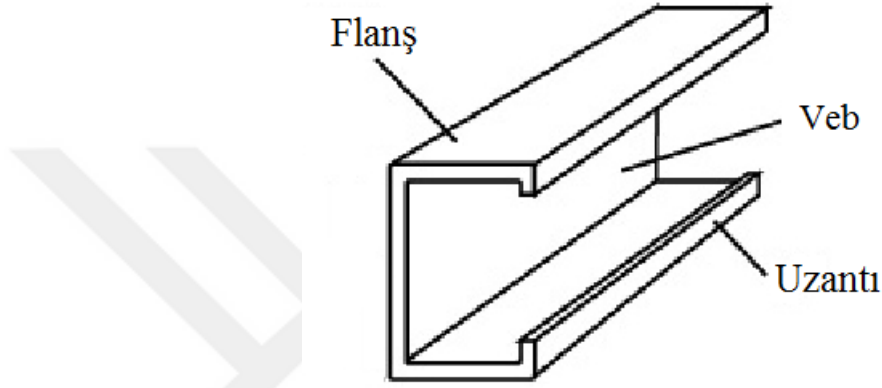
Zhou ve ark. (2015), makalelerinde düzgün basıya maruz C kesitli kolonların, distorsiyonel burkulma gerilmelerinin Lau ve Hancock modeli temel alınarak oluşturulan modelde, veb eğilmesi ile birlikte veb kısmının dönme sınırlamasındaki düşüş için bir faktör tanımlanarak, formülasyonu yapılmıştır. Formülün sonuçları ile bilgisayar programları ve literatürdeki veriler kıyaslanmıştır.

Anbarasu ve Murugapandian (2015) çalışmalarında veb elemanında güçlendirici bulunan uzantılı kesitli soğuk şekillendirilmiş çeliklerde, bası yükleri altında distorsiyonel ve global burkulma modlarının davranışları incelenmiştir. Deneysel sonuçlar DSM ile

kıyaslanarak azami taşıma yükünün bulunmasında distorsiyonel-global burkulma modlarının etkileşimi ile DSM' nin uygulanabilirliği araştırılmıştır.

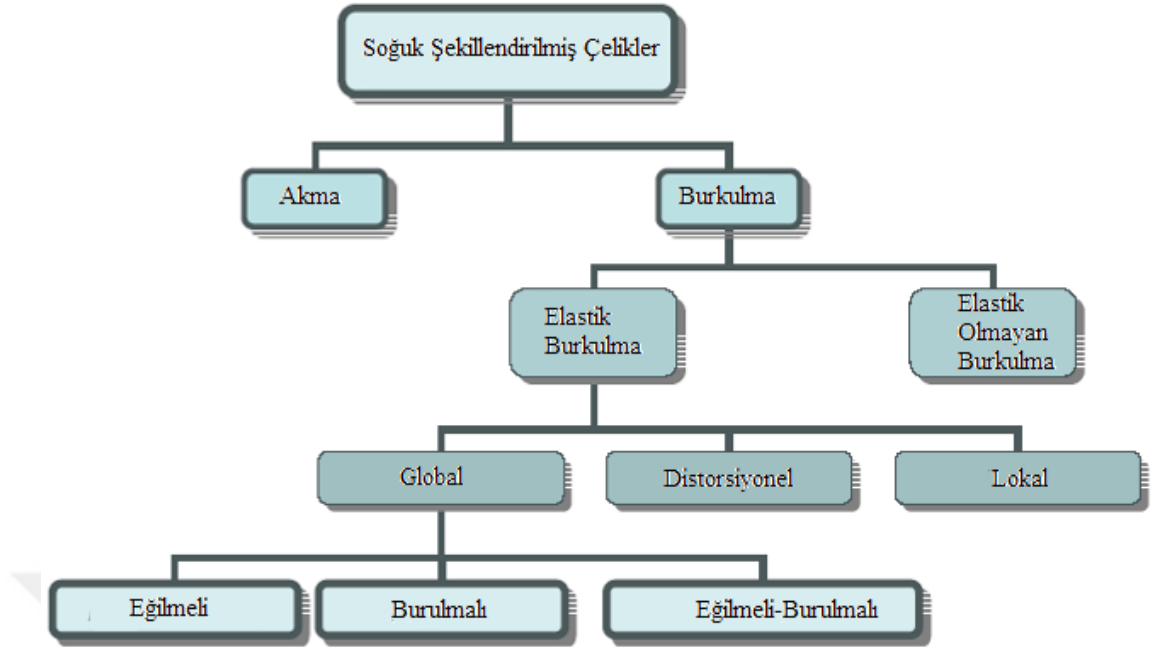
2.2 Genel Bilgiler

Raf sistemlerinde kullanılan soğuk şekillendirilmiş çelik yapılardaki dikmelerde kullanılan uzantılı (dudaklı) C kesitli dikmelerin elemanları Şekil 2. 1' de gösterilmektedir.



Şekil 2. 1 Dikme elemanları

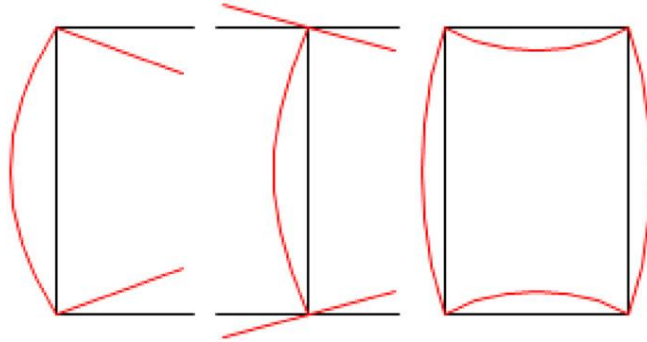
Soğuk şekillendirilmiş çelik yapılarda en büyük sorunların başında burkulma problemi gelmektedir. Uygulanan yükler altında akma sınırına daha yaklaşımadan elemanlar burkulmaya başlamaktadır. Burkulmayı etkileyen birçok etken vardır. Narinlik oranı bu etkenlerin en başında gelmektedir. Sadece narinlik oranı değil, buna ilave olarak sınır şartları, yükün eksenden kaçıklığı ve malzemedeki kusurlar da burkulmayı etkileyen etkenlerden sayılabilir. Soğuk şekillendirilmiş çeliklerde burkulma sınıflandırılması Şekil 2. 2' de görüldüğü üzere yapılabilmektedir (Kang ve ark 2013).



Şekil 2. 2 Soğuk şekillendirilmiş çeliklerde burkulma türleri

Lokal Burkulma

Basıya maruz kalan yapıda diğer elemanlar ile bağlantılı olan kenarlarında herhangi bir değişim olmadan oluşan burkulma modudur ve lokal burkulmada her bir eleman bireysel olarak burkulmaktadır. Şekil 2. 3 ve Şekil 2. 4’ te bazı lokal burkulma örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 2. 3 Lokal burkulma örnekleri (Kulatunga ve Macdonald 2013)



(a) Lokal Veb Burkulması

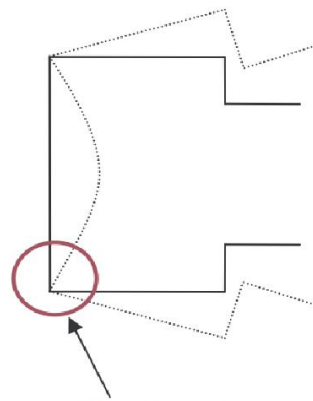


(b) Lokal Flanş Burkulması

Şekil 2. 4 Lokal burkulma modu (Gunalan ve ark 2015)

Distorsiyonel Burkulma

Güçlendirici burkulması (stiffener buckling) veya lokal-burulmalı burkulma olarak da bilinmekte olan distorsiyonel burkulmada, flanşların veb ve flanş elemanlarının birleşme yerlerinden dönmesiyle oluşan burkulma modudur ve distorsiyonel burkulmanın varlığı yapının daha çabuk çökmesine sebep olmaktadır (Ranawaka 2006).



Flanşların bağlantı noktalarından dönmesi

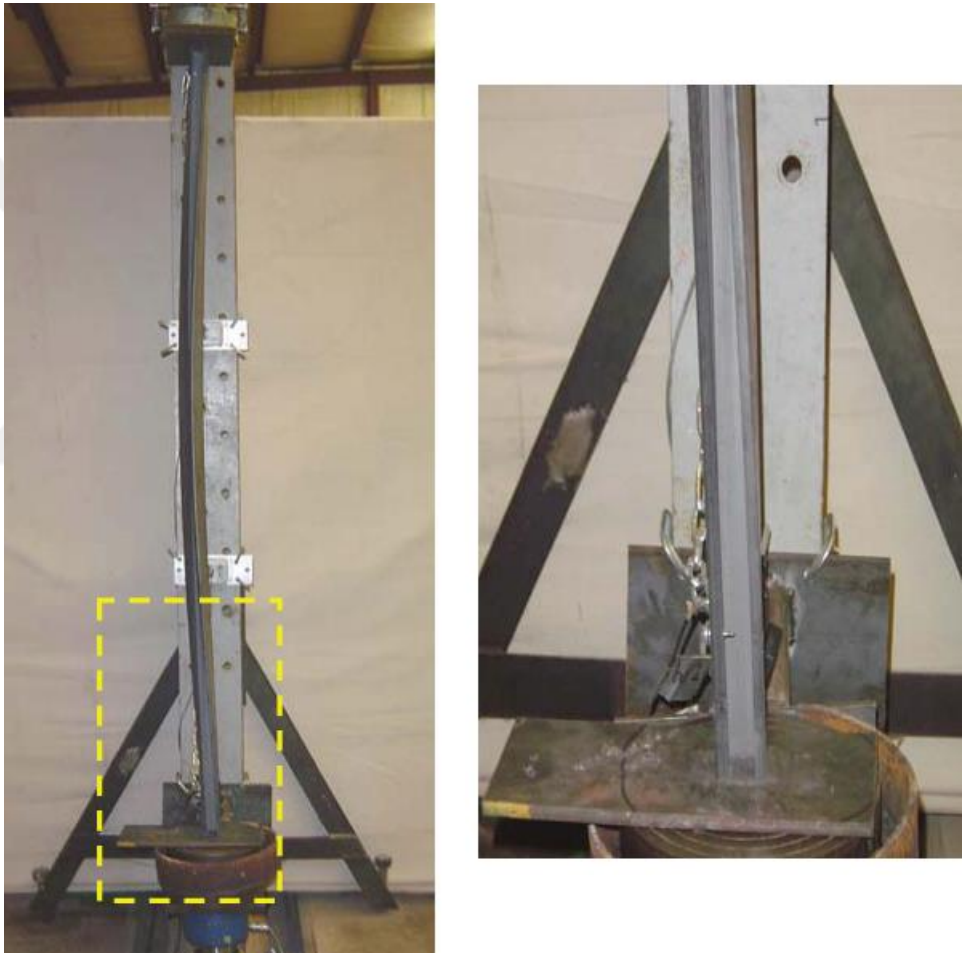
Şekil 2. 5 Distorsiyonel burkulma modu (Ranawaka 2006)

Global Burkulma

Eğilmeli burkulma: Zayıf asal eksen dışına doğru burkularak yapı dönmeye uğramadan burkulur.

Burulmalı burkulma: Eğilme olmaksızın yapı kayma merkezi etrafında sadece dönmesi ile çökmeye uğramaktadır.

Eğilmeli-Burulmalı burkulma: Bu modda kayma merkezi ile ağırlık merkezi birbirinden uzaklaştıkça yapıda hem eğilme hem de burulma aynı anda gözlemlenir.



Şekil 2. 6 C kesitli dikmede eğilmeli-burulmalı burkulma (Kang ve ark 2013)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Kolonların Burkulması

Kolonların taşıyabileceği kritik yükün bulunmasında ideal kolon kabulü yapılmaktadır. Bu tanımdan kasıt başlangıçta hiçbir geometrik kusuru olmayan ve merkezlenmiş yüke maruz kolondur. Şekil 3. 1 (a)'daki gibi ince ve alt kısmında ankastre kirişe sahip bir ideal kolon P bası kuvvetine maruz kalmaktadır.

Uygulanan P kuvveti kritik değerden az ise kolon düzgün kalacak ve eksenel yönde basıya maruz kalacaktır. Kolonun bu şekilde düzgün kalabilmesi durumuna kararlı hal denilmektedir ve kararlı haldeki bir kolon, uygulanan yanal kuvvet sonucunda, yanal doğrultuda ufak yer değişimi oluşmakta ve uygulanan yanal yük kaldırıldığında tekrar eski haline dönmektedir. Kararsız durumda ise, P kuvveti kritik değere ulaştığında, uygulanacak yanal kuvvet sonucunda oluşacak olan yer değişimi, yanal yükün kaldırılması ile ortadan kalkmamaktadır. Kritik yük aynı zamanda Euler yükü olarak da bilinmektedir. Eğilme denklemi

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -M \quad (3.1)$$

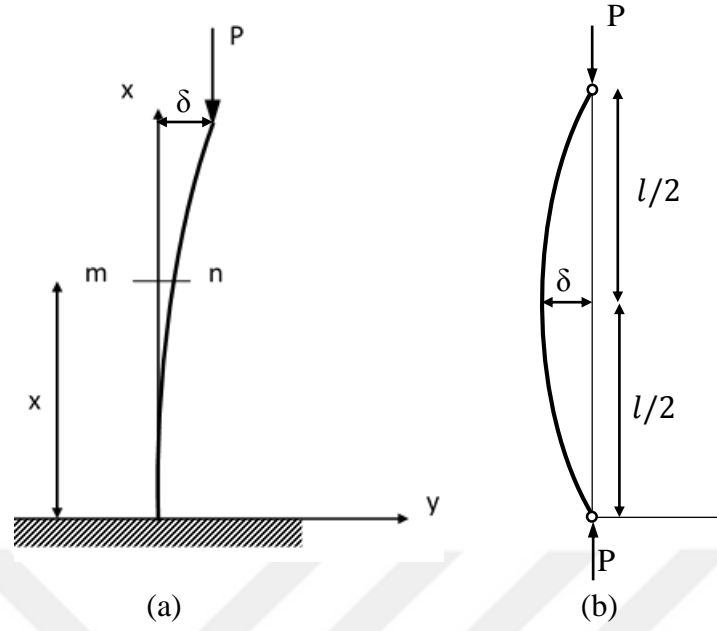
olup,

$$M = -P(\delta - y) \quad (3.2)$$

olduğuna dikkat edilerek

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = P(\delta - y) \quad (3.3)$$

bulunur. Burada M ; x mesafesindeki kesitteki eğilme momentidir.



Şekil 3. 1 (a) Alt ucu ankastre, üst ucu serbest kolon (b) Alt ve üst ucu basit mesnetlenmiş kolon

Burkulma en düşük eğilme rijitliğine (EI) sahip yüzeyde oluşacaktır. Yukarıdaki denklemde ufak bir düzenleme yapılarak elde edilen diferansiyel denklemin sınır şartlarına bağlı olarak çözülmesi ile kritik yük aşağıdaki denklemlerdeki gibi bulunabilmektedir:

$$k^2 = \frac{P}{EI} \quad (3.4)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} + k^2y = k^2\delta \quad (3.5)$$

3.5 denkleminin homojen kısmının çözümü ile özel kısmının toplamından ibaret genel çözümü yapılarak

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

şeklinde verilir. Burada A ve B katsayıları Şekil 3. 1 (a)'daki sınır şartlarına göre bulunmaktadır (Bir ucu ankastre, diğer ucu serbest çubuk):

$$x = 0 \text{ da } y = \frac{dy}{dx} = 0 \quad (3.7)$$

$$x = l \text{ de } y = \delta$$

Bu sınır şartları altında çözüm yapıldığında A ve B katsayıları bulunur:

$$\begin{aligned} A &= -\delta & (x=0 \text{ da}) \\ B &= 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\delta k^2 \cos kl = 0 \quad (x=l \text{ de } M=0) \quad (3.9)$$

Yukarıdaki bulunan sonuçta ya $\delta=0$ olmalı ya da $\cos kl=0$ olmalı ki denklem sağlansın. $\delta=0$ olduğu farz edilir ise kolonun yanal doğrultuda hiç yer değiştirmedeği anlamına gelir ki burkulma olmadığını gösterir. O halde $\cos kl=0$ olmalıdır. Bu şartın sağlanması için n pozitif tam sayılar olmak üzere

$$kl = (2n - 1) \frac{\pi}{2} \quad (3.10)$$

şartını sağlaması gerekmektedir. Kritik değer kl değerinin en ufak olduğu değerdir ve kritik burkulma yükü P_{kr} alt ucu ankastre üst ucu serbest kolon için denklem 3.12' de gösterildiği şekilde hesap edilir.

$$\sqrt{\frac{P}{EI}} l = \frac{\pi}{2} \quad (3.11)$$

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{4l^2} \quad (3.12)$$

Diğer sınır şartları altındaki kolonlar için de benzer uygulamalar yapılarak sonuçlar elde edilebilir. Şekil 3. 1 (b) ' de görüldüğü üzere alt ve üst kenarlarından basit mesnetlenmiş kolonun simetriden dolayı her bir parçasının Şekil 3. 1 (a) ' da gösterilen alt tarafı ankastre üst ucu serbest bırakılmış kolonun davranışının benzeri şekilde burkulduğu

görülmektedir. Bu sebepten denklem 3.12 de kolon uzunluğu için $l/2$ yazılarak alt ve üst ucundan basit mesnetlenmiş kolonun kritik yükü denklem 3.13'teki gibi ifade edilir.


$$P_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (3.13)$$

Benzer şekilde diğer sınır şartları altında kolonların davranışları için kritik yük hesabında efektif uzunluk metodu genelde kullanılmaktadır. Efektif uzunluk bir kolonun bir birini takip eden eğilme noktaları ya da sıfır moment noktaları arasında kalan uzunluktur. Bu kavrama göre Euler kritik yük denklem 3.14 'deki gibi olur.

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (3.14)$$

Burada K efektif uzunluk çarpanıdır. Farklı sınır şartları için efektif uzunluk çarpanı değerleri Çizelge 3. 1' de belirtilmiştir.

Çizelge 3. 1 Farklı sınır şartları için efektif uzunluk faktörü (Yu 1973)

Burkulmuş Şekiller	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Teorik K değerleri	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
İdeal şartlarda önerilen değerler	0.65	0.80	1.0	1.2	2.0	2.0
Sınır Şartları		Dönmeye sınırlı Ötelemeye sınırlı Dönmeye serbest Ötelemeye sınırlı Dönmeye sınırlı Ötelemeye serbest Dönmeye serbest Ötelemeye serbest				

3.1.1 Elastik Stabilite Sınırları

Bulunan Euler denklemini elastik bölgede kalındığı kabulü ile yeterince uzun kolonlar için elde edilmiştir. Euler denkleminin kullanılabilirdiği aralığı bulmak için kritik burkulma gerilmesi

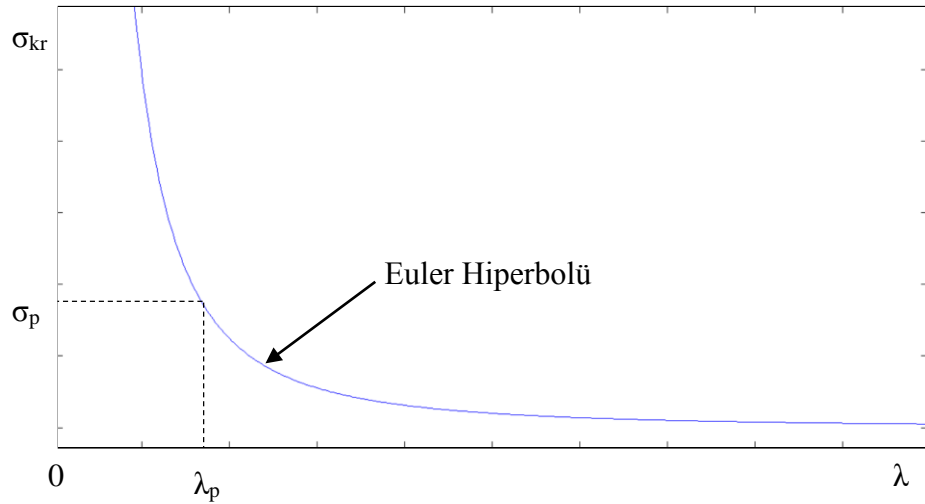
$$\sigma_{kr} = \frac{P_{kr}}{A} = \frac{\pi^2 E (I/A)}{(KL)^2} \quad (3.15)$$

şeklinde bulunur. Burada A kesit alanı, I alan atalet momentidir. Şimdi $r^2 = I/A$ dönüşümü yapılırsa kritik gerilme değeri

$$\sigma_{kr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (3.16)$$

olarak gösterilir. r jirasyon yarıçapıdır ve KL/r ifadesi narinlik oranı olarak adlandırılır. λ ile gösterilen bu oran büyüdükçe kolon uzun ve dar kesitli olur (Sayman ve ark. 2012).

Narinlik oranı, burkulmanın elastik veya elastik olmayan bir burkulma olacağı hakkında fikir vermektedir.



Şekil 3. 2 Euler hiperbolü

3.1.1.1 Elastik Burkulma

Şekil 3. 2 'de görülen λ_p elastik bölge sınırını temsil etmektedir. Eğer $\lambda > \lambda_p$ ise kolon elastik olarak burkulacaktır ve denklem 3.16 bu bölge için kullanılabilir. σ_p burada elastik sınırı temsil etmektedir ve akma sınırı ($\sigma_p = \sigma_{akma}$) olarak alınabilmektedir (Sayman ve ark. 2012).

3.1.1.2 Elastik Olmayan Burkulmalar

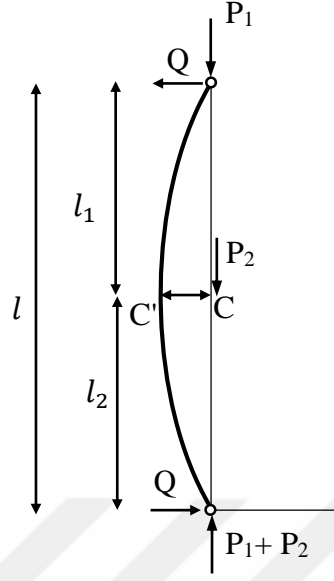
Elastik olmayan burkulmalar için Euler burkulma formülünün yerine Tetmajer bağıntıları kullanılabilir. Farklı malzemeler için farklı ampirik ifadeler vardır.

Çizelge 3.2'de bazı Tetmajer bağıntıları için örnekler verilmiş olup σ_{kr} birim olarak [N/cm²] dir (Omurtag 2012).

Çizelge 3.2 Tetmajer bağıntıları

Yapı Çeliği	$\sigma_{kr} = 31000 - 114\lambda$	$\lambda < \lambda_p = 105$
	$\sigma_{kr} = 28950 - 82,5\lambda$	$60 \leq \lambda \leq \lambda_p = 100$
	$\sigma_{kr} = 24000 - \frac{\lambda^2}{1,5}$	$0 \leq \lambda \leq \lambda_p = 120$
Ahşap	$\sigma_{kr} = 2930 - 19,4\lambda$	$\lambda \leq \lambda_p = 100$
Dökme Demir	$\sigma_{kr} = 77600 - 1200\lambda + 5,3\lambda^2$	$\lambda \leq \lambda_p = 80$

3.1.2 Orta Noktasından Yüklemeye Maruz Kalan Kolonun Burkulma Yüğü Hesabı



Şekil 3. 3 Orta Noktasından Yüklemeye Maruz Kalan Kolon

Şekil 3. 3 ' de görüldüğü üzere kolonun ortasından ek bir yüke maruz kalan kolonların kritik yük hesabı Timoshenko ve Gere (1961) 'de incelenmiştir. Genel bir çözüm elde edilmesi amacı ile orta yüklemenin altında ve üstünde kalan kısımlarının farklı atalet momentlerine (I_1 , I_2) sahip oldukları varsayılarak diferansiyel denklemlerin çözümü sonucunda, kritik yük aşağıdaki denklem gibi ifade edilebilmektedir.

$$(P_1 + P_2)_{kr} = \frac{\pi^2 E I_2}{(KL)^2} \quad (3.17)$$

KL efektif uzunluktur ve uygulanan yükün kolonun tam ortasından uygulandığı durumlar için K değerleri Çizelge 3. 3' de belirtildiği gibidir.

Çizelge 3. 3 K değerleri (Timoshenko ve Gere 1961)

$n \backslash m$	1	1,25	1,5	1,75	2	3
1	1	0,95	0,91	0,89	0,87	0,82
1,25	1,06	1,005	0,97	0,94	0,915	
1,5	1,12	1,06	1,02	0,99	0,96	
1,75	1,18	1,11	1,07	1,04	1,005	
2	1,24	1,16	1,12	1,08	1,05	

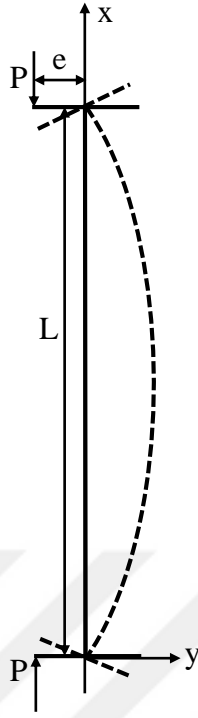
Burada $m = (P_1 + P_2)/P_1$ ve $n = I_2/I_1$ ' dir.

Farklı bir çözüm yöntemi olarak enerji metodu ile çözüm yapıldığında kritik yük aşağıdaki şekilde bulunmaktadır (Timoshenko ve Gere 1961) :

$$(P_1 + P_2)_{kr} = \frac{(\pi^2 EI_2 / l^2)(m + 1)}{m + \frac{m}{6} \left(\frac{m-1}{m}\right)^2 - \frac{8}{\pi^2}(m-1) + n \left[\frac{1}{m} + \frac{m}{6} \left(\frac{m-1}{2}\right)^2 + \frac{8}{\pi^2} \frac{m-1}{m} \right]} \quad (3.18)$$

3.1.3 Secant Bağıntısı

Uygulanan yük kolon ağırlık merkezine tatbik edildiği durumlar için Euler formülü kullanılabilir. Yük kolon ağırlık merkezinden e mesafesi kadar uzaklıktan uygulandığı durumlarda ise sadece bası kuvveti değil aynı zamanda yükleme kaçıklığından dolayı oluşacak moment kolonu eş zamanlı olarak eğmeye çalışacaktır.



Şekil 3. 4 Eksantrik yüklemeye maruz kolon

Bu momenti de göz önünde bulundurarak yapılacak olan diferansiyel denklem çözümü sonucunda ufak yer değiştirmeler için kolonun elastik eğrisi Omurtag (2012)'de şu şekilde gösterilir.

$$y(x) = e \left[\tan\left(\frac{1}{2} kL\right) \sin(kx) + \cos(kx) - 1 \right] \quad (3.19)$$

Burada $k = \sqrt{P/EI}$ olup $y(x)$ herhangi bir nokta için kolonun sapmasıdır.

Kolonun maksimum yer değiştirmesi tam orta noktada gözükcektir. O halde denklem 3.19' da x yerine $L/2$ yazılarak maksimum yer değiştirme bulunabilir.

$$y_{maksimum} = e \left[\sec\left(\frac{kL}{2}\right) - 1 \right] \quad (3.20)$$

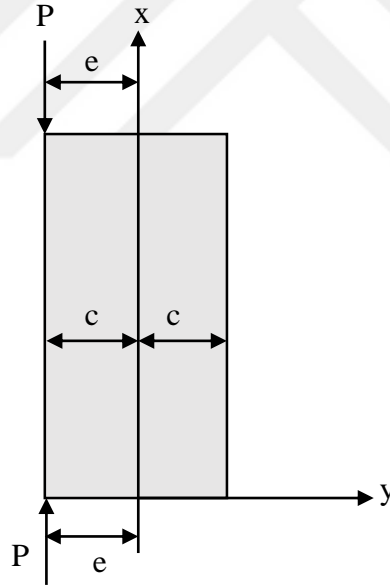
e sıfıra yaklaşırken sonucun da sıfır olmaması için $\sec\left(\frac{kL}{2}\right)$ sonsuza gitmesi gerekmektedir. Böylece kritik yük denklem 3.23 ile bulunur.

$$\sec\left(\frac{kL}{2}\right) = \sec\left(\frac{\sqrt{\frac{P}{EI}}L}{2}\right) \rightarrow \infty \quad (3.21)$$

$$\frac{\sqrt{\frac{P}{EI}}L}{2} = \frac{\pi}{2} \quad (3.22)$$

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.23)$$

Görüldüğü üzere uygulanan yükün burkulma yüküne bir etkisi olmamaktadır.



Şekil 3. 5 Kolonun eksenden kaçık yüklenme durumu

Kolon üzerinde oluşacak olan maksimum moment kolonun tam ortasında oluşmaktadır ve $M_{max} = Pe \sec(kL/2)$ ile ifade edilir. Kolon üzerinde oluşacak olan bileşik gerilme ise denklem 3.24' deki gibidir.

$$\sigma_y = \frac{P}{A} + \frac{M}{I}y \quad (3.24)$$

Maksimum gerilme $y=\pm c$ 'de oluşur.

$$\sigma_{mak} = \frac{P}{A} + \frac{Pec}{I} \sec\left(\frac{kL}{2}\right) \quad (3.25)$$

Omurtag (2012) 'de elastik bölgedeki ve elastik olmayan bölgedeki kolonlar için maksimum gerilmeyi ifade eden secant bağıntıları şu şekildedir.

Elastik bölge için;

$$\sigma_{mak} = \frac{P}{A} \left[1 + \frac{ec}{r^2} \sec\left(\frac{L}{2r} \sqrt{\frac{P}{EA}}\right) \right] \quad (3.26)$$

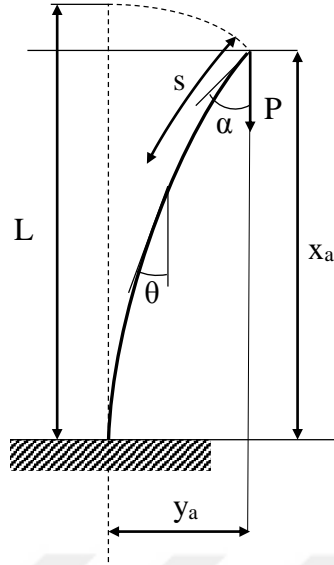
Elastik olmayan bölgedeki kolonlar için;

$$\frac{P_A}{A} = \frac{\sigma_{akma}}{1 + \frac{ec}{r^2} \sec\left(\frac{L}{2r} \sqrt{\frac{P_A}{EA}}\right)} \quad (3.27)$$

Burada $r = \sqrt{I/A}$, $k = \sqrt{P/EI}$, σ_{akma} akma gerilmesi, r jirasyon yarıçapı, A kesit alanı ve $2c$ kesit genişliğidir.

3.1.4 Büyük sehime sahip çubuklar (Elastika)

Kritik burkulma yükünden daha fazla bir yüke maruz kalan kolonda büyük sehimler oluşacaktır. Şekil 3. 6' da görüldüğü şekilde büyük sehime uğrayan bir çubukta hesaplamalar yapılır iken, önceki bölümlerdeki gibi eğrilik d^2y/dx^2 ifadesindense çubuğun gerçek eğriliğini ifade eden $d\theta/ds$ kullanılır. Gerçek diferansiyel denklemlerin çözümü ile elde edilen eğriliğin şekline elastika denilir.



Şekil 3. 6 Büyük yer değiştirmeye sahip çubuk (Timoshenko ve Gere 1961)

$p = \sin(\alpha/2)$ ve $k^2 = P/EI$ olmak üzere diferansiyel denklemlerin çözülmesi sonucunda denklem 3.28 bulunur (Timoshenko ve Gere 1961).

$$L = \frac{1}{k} \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - p^2(\sin \phi)^2}} = \frac{1}{k} K(p) \quad (3.28)$$

Eğer sehim ufak olduğu varsayılır ise $p^2 \sin(\phi)^2$ ifadesi ihmal edilebilir. Denklem 3.28 çözümü sonucunda daha önceden bulunan kritik burkulma yükü ile eşdeğer olduğu görülmektedir.

$$L = \frac{1}{k} \int_0^{\pi/2} d\phi = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI}{P}} \quad (3.29)$$

$$P = P_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (3.30)$$

$$y_a = \frac{2p}{k} \quad (3.31)$$

$$x_a = \frac{2}{k} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - p^2(\sin \phi)^2} d\phi - L$$

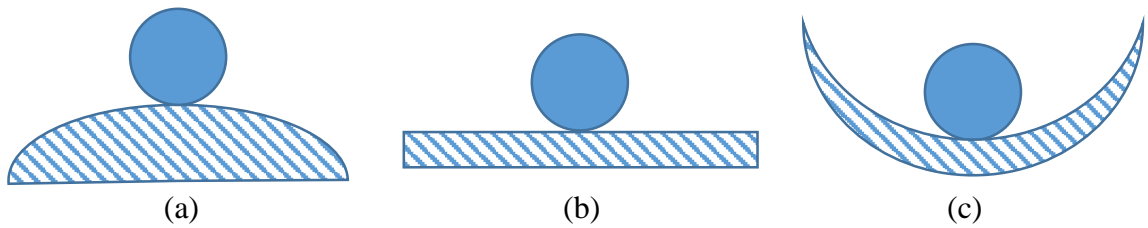
α açısı değişimi ile P/P_{kr} oranının değişimi Çizelge 3. 4'te verilmektedir. Yine bu çizelgede çubuk boyunun, sehim ve x_a uzaklıklarına oranının açı ile değişimi de verilmiştir.

Çizelge 3. 4 Burkulan çubuklar için yükleme ve sehim çizelgesi (Timoshenko ve Gere 1961)

α	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	176°
P/P_{kr}	1	1,015	1,063	1,152	1,293	1,518	1,884	2,541	4,029	9,116
x_a/L	1	0,97	0,881	0,741	0,560	0,349	0,123	-0,107	-0,34	-0,577
y_a/L	0	0,220	0,422	0,593	0,719	0,792	0,803	0,75	0,625	0,421

3.1.5 Enerji Yöntemi

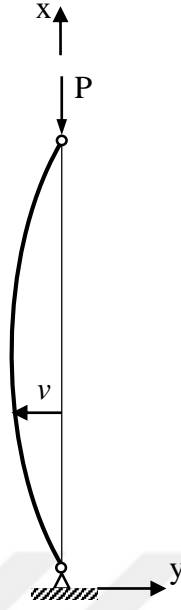
3 farklı yüzey üzerindeki topların hareketleri incelendiği zaman, Şekil 3. 7 (a) 'da topun hareketi ile ağırlık merkezi aşağıya doğru inecek ve topun hareketi ile potansiyel enerjisi azalacaktır. Şekil 3. 7 (c)'de ise topun hareketi ile ağırlık merkezinin yükselmesi sebebiyle potansiyel enerjisi artacaktır. Şekil 3. 7 (b)'de ise topun hareketi potansiyel enerjisinde bir değişime sebebiyet vermez.



Şekil 3. 7 (a) Kararsız hal (b) denge konumu (c) kararlı hal

Buradan yola çıkarak sistemin enerjisi minimumsa kararlılık durumunda, sistemin enerjisi maksimum olduğu durumda ise kararsız durumdadır.

Enerji yöntemi ile çözümde dış yüklemekten kaynaklı iş ve sistemin şekil değiştirme enerjisini birbirine eşitleyerek kritik yük hesaplanabilir.



Şekil 3. 8 Mesnetlenmiş kolonun burkuluş şekli

Toplam potansiyel enerji ifadesini aşağıdaki denklem ile göstermek mümkündür.

$$\Pi = \int_0^L \left[\frac{1}{2} EI (v'')^2 - \frac{1}{2} P (v')^2 \right] dx \quad (3.32)$$

Eğer sınır şartlarını sağlayan $v(x)$ biliniyor ise kritik yük hesabı şu şekilde yapılabilir.

$$P_{kr} = \frac{\int_0^L EI (v'')^2 dx}{\int_0^L (v')^2 dx} \quad (3.33)$$

Hesaplama yaparken genelde $v(x)$ tam olarak bilinmediği için yaklaşık bir ifade kullanılarak hesaplama yapılır ve bu hesap sonucunda bulunan kritik yük gerçek $v(x)$ kullanılarak bulunan kritik yükten daha büyüktür (Omurtag 2012).

3.2. Levhalarda Burkulma

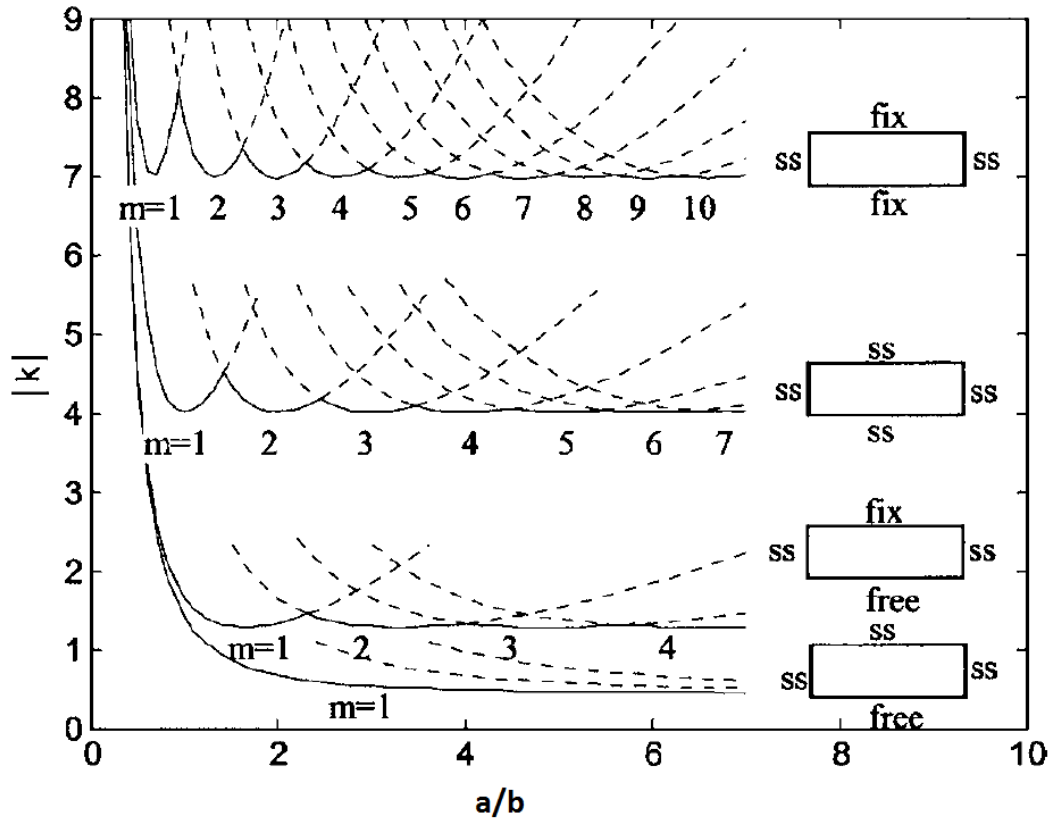
Dört tarafından basit mesnetlenmiş ve P bası kuvvetine maruz kalan düzlemsel levhalarda kritik burkulma yükü aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$\sigma_{kr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (3.34)$$

Burada, σ_{kr} levhanın kritik burkulma gerilmesi, E elastisite modülü, b levha genişliğini, ν poisson oranını ve t levhanın et kalınlığını belirtmektedir. k levha burkulma katsayısı olup levha geometrisi ve sınır şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Dört tarafından mesnetlenmiş levhalar için

$$k = \left(\frac{mb}{a} + \frac{n^2 a}{mb}\right)^2 \quad (3.35)$$

denklemleri ile ifade edilebilir (Venkatraman ve Patel 1970). a levha uzunluğu, m levhanın boyuna n ise levhanın enine oluşacak olan yarım dalga boylarının sayısını ifade etmektedir. n , burkulma katsayısının en düşük değeri göz önünde bulundurulduğundan ötürü 1 alınabilir ve m 'nin tam sayı değerleri için levhanın burkulma katsayısı hesaplanabilir.



Şekil 3. 9 Levha burkulma katsayısı (Yu ve Schafer 2007). ss basit mesnet, fix ankastre ve free serbest ucu temsil etmektedir.

Burkulma katsayısının sınır şartlarına ve oluşacak olan yarım dalgaların sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 3. 9 ' da görülmektedir.

Levha burkulma katsayısına bakıldığında mb/a ' nın bir fonksiyonu olduğu görülmektedir. Burkulma yükünün de burkulma katsayısı ile doğru orantılı olmasından ötürü k değerinin minimum olması burkulma yükünü de minimum yapacağından levha boyunca oluşacak yarım dalgaların sayısı şu şekilde ifade edilebilir (Venkatraman ve Patel 1970).

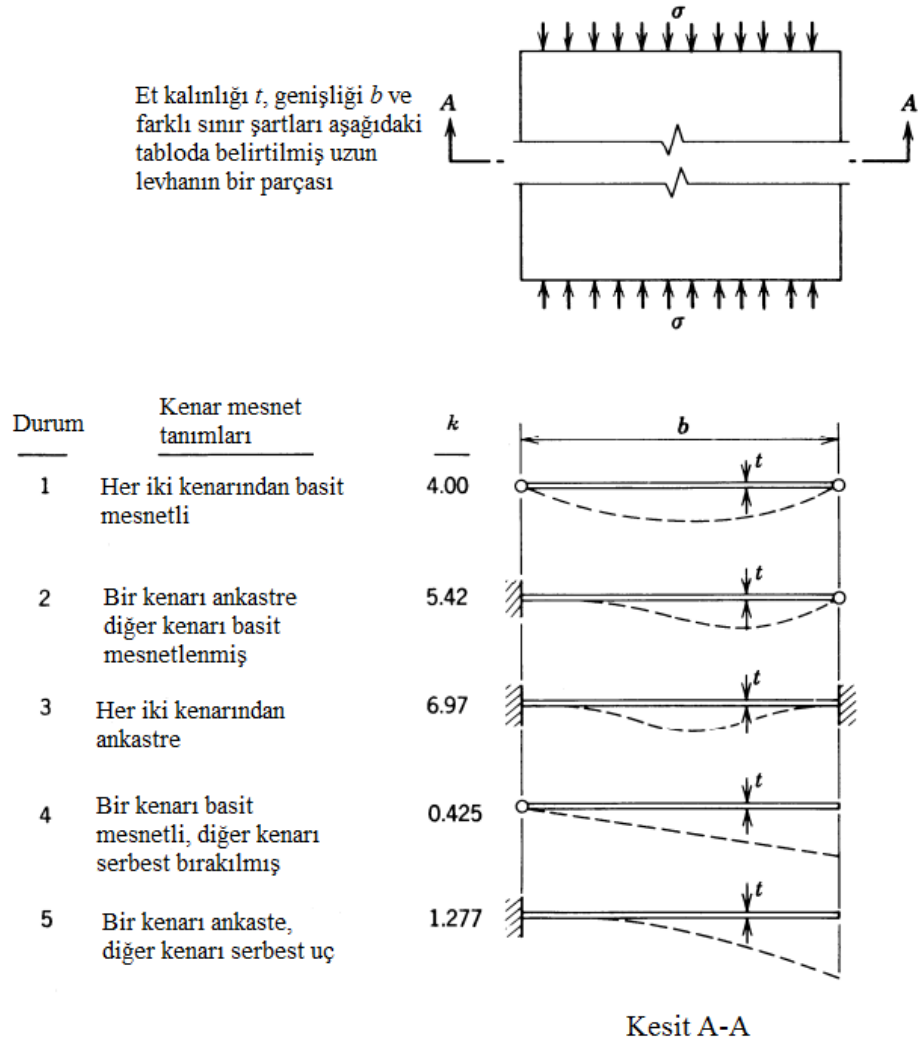
$$\frac{dk}{d(mb/a)} = 2 \left[\left(\frac{mb}{a} + \frac{1}{(mb/a)} \right) \right] \left[1 - \frac{1}{(mb/a)^2} \right] = 0 \quad (3.36)$$

Bu denklem mb/a ' nın 1 değeri için sağlanacağından ötürü levha boyunca oluşacak yarım dalgaların sayısı

$$m = \frac{a}{b} \quad (3.37)$$

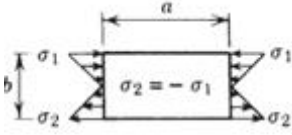
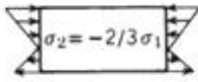
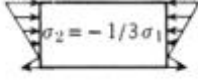
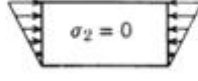
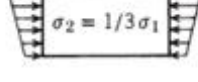
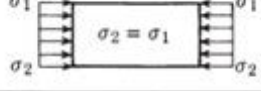
ile ifade edilebilir.

Genelde levha burkulma katsayısı dört tarafından basit mesnetlenmiş ise $k=4$, bir uzun kenarı serbest diğer üç kenarı basit mesnetlenmiş levhalar için ise $k=0,425$ alınabilmektedir. Farklı sınır şartları ile mesnetlenmiş levhalar için burkulma katsayısı değerleri Şekil 3. 10'da görülebilmektedir.



Şekil 3. 10 Farklı sınır şartlarına göre değişen k değeri (Ziemann 2010).

Buna ilave olarak levha sadece basıya maruz kalmayıp aynı zamanda eğilmeye de maruz kalabilmektedir. Levhanın bası ve eğilme gerilmelerine maruz kalması durumunda ise burkulma katsayısı değerleri Şekil 3. 11'den bulunabilmektedir.

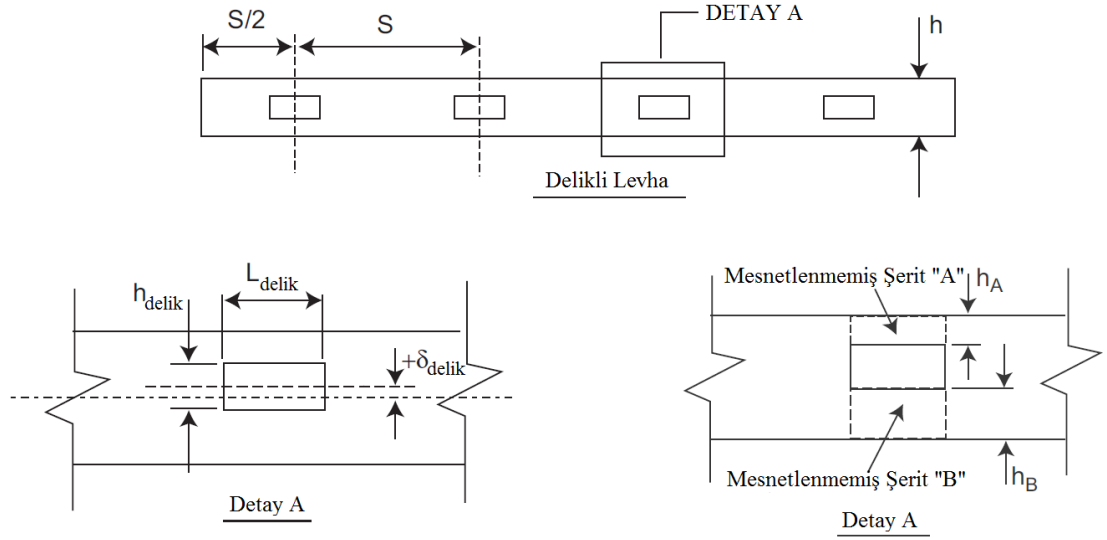
Eğilme gerilmesinin bası gerilmesine oranı	Minimum burkulma katsayısı				$*k_c$		
	Yüklenmeyen kenarlar basit mesnet	Yüklenmeyen kenarlar ankastre	Üst kenar serbest		Alt kenar serbest		
			Alt kenar basit mesnet	Alt kenar ankastre	Üst kenar basit mesnet	Üst kenar ankastre	
 $\sigma_2 = -\sigma_1$ (sadece eğilme)	∞	23.9	39.6	0.85	2.15		
 $\sigma_2 = -2/3 \sigma_1$	5.00	15.7					
 $\sigma_2 = -1/3 \sigma_1$	2.00	11.0					
 $\sigma_2 = 0$	1.00	7.8	13.6	0.57	1.61	1.70	5.93
 $\sigma_2 = 1/3 \sigma_1$	0.50	5.8					
 $\sigma_2 = \sigma_1$ (sadece bası)	0.0	4.0	6.97	0.42	1.33	0.42	1.33

* Verilen değerler yükleme kenarlarından basit mesnet olduğu durum için verilmiştir ve yükleme kenarları ankastre mesnet olması durumunda da yakın sonuçlar vermektedir.

Şekil 3. 11 Eğilme ve bası gerilmelerinin olması durumunda levha burkulma katsayısı (Ziemann 2010)

3.2.1 Delikli Levhalarda Burkulma

Levha üzerinde delik bulunması, levha üzerindeki gerilmeler değişir iken deformasyon şekilleri de değişebileceğinden levha kararlılığında değişikliklere sebep vermektedir. Bununla birlikte levha burkulması da delik etkisinden etkilenerek deliksiz levhalara göre farklılıklar göstermektedir.



Şekil 3. 12 Şerit metodu (Moen ve Schafer 2009)

Levhada delik bulunması durumu göz önüne alındığında levha burkulma katsayısı şerit yaklaşımı ile bulunabilir. $i=A$ veya B olmak üzere (Moen ve Schafer 2009) :

$$\sigma_{kr,i} = k_i \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{h_i}\right)^2 \quad (3.38)$$

$$\sigma_{crh,net} = \min[\sigma_{cr,A}, \sigma_{cr,B}] \quad (3.39)$$

$$L_{delik}/h_i \geq 1 \Rightarrow k_i = 0,425 + \frac{0,2}{(L_{delik}/h_i)^{0,95} - 0,6} \quad (3.40)$$

$$L_{delik}/h_i < 1 \Rightarrow k_i = 0,925 \quad (3.41)$$

$$\sigma_{kr,delikli} = \sigma_{crh,net}(1 - h_{delik}/h) \quad (3.42)$$

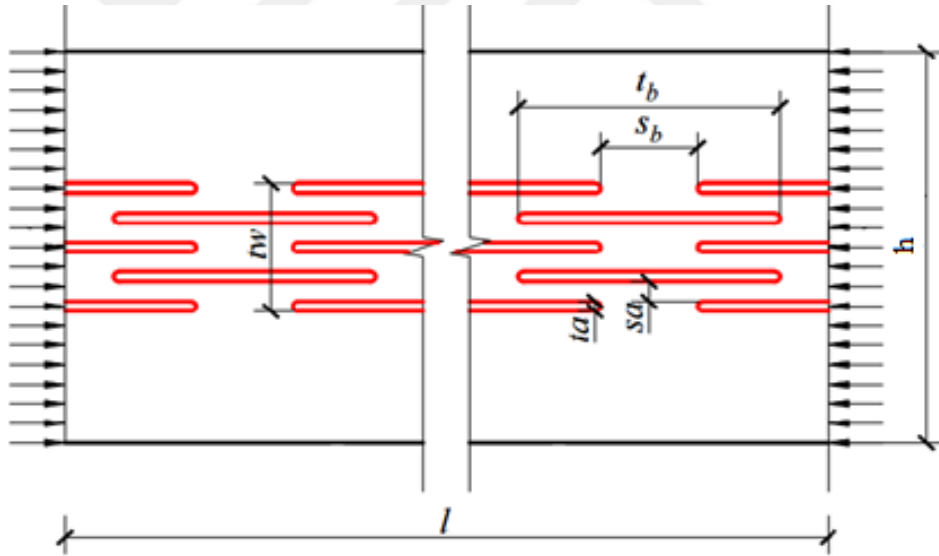
Burada L_{delik} ve h_{delik} sırasıyla deliğin boyunu ve genişliğini, h ise levha genişliğini temsil etmektedir.

Bir diğerk çalışmada ise Ma ve Wang (2013) sonlu elemanlar analizi kullanılarak elde edilen kritik burkulma yükleri sonucunda oluklu levhalar için bir düzeltme katsayısı önermiştir.

$$\sigma_{kr,delikli} = k_{delik} \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left(\frac{h}{t}\right)^2} \quad (3.43)$$

Burada t_w olukların bulunduğu bölgenin genişliği, k levha burkulma katsayısı olup denklem 3.35' den elde edilebilir.

$$k_{delik} = -0,091 + 0,362 \frac{h}{t_w} - 0,074 \left(\frac{h}{t_w}\right)^2 + 0,005 \left(\frac{h}{t_w}\right)^3 \quad (3.44)$$



Şekil 3. 13 Oluklu levha (Ma ve Wang 2013)

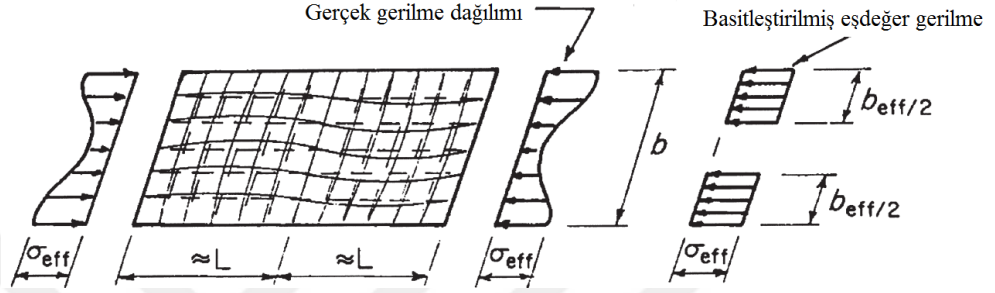
3.2.2 Efektif Genişlik Konsepti

1930'larda von Karman tarafından ilk kez sunulmuş ve daha sonra 1940'larda Winter tarafından soğuk şekillendirilmiş çelik yapılarda kullanılacak şekilde genişletmiştir (Ma ve Wang 2013).

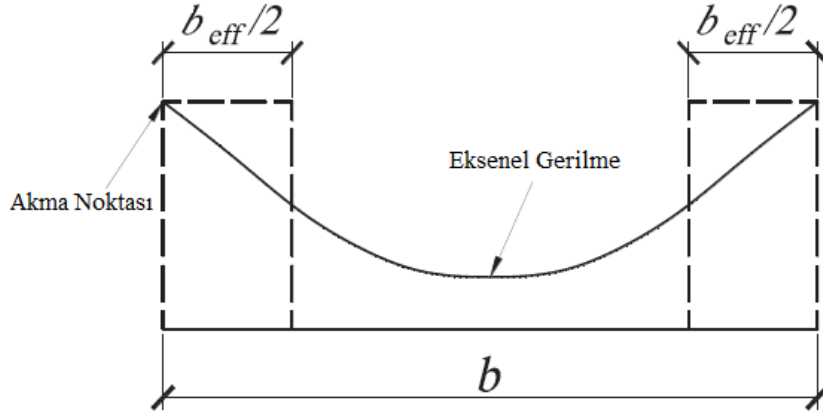
Efektif genişlik metodu ince levhanın taşıyabileceği maksimum yükün belirlenmesi için kullanılan yöntemlerden biridir. Dört tarafından basit mesnetlenmiş ve düzgün basıya

maruz kalan düzlemsel levhalarda burkulma başladıktan sonra, levha üzerindeki gerilme dağılımlarında tekrardan bir dağılım oluşmakta ve taşınması öngörülen kritik burkulma yükünden daha fazla yük taşıyabilmektedir.

Kenarlarından mesnetlenmiş olan levhada Şekil 3. 14 ve Şekil 3. 15 den de görüleceği üzere asıl yükü genel bir dağılımdan ziyade kenar bölgelerin taşıdığı varsayılır ve bu taşıyabileceği yükler bazı durumlarda akma noktasına kadar gelmektedir.



Şekil 3. 14 Düzlem levhada efektif genişlik (Davies 2000)



Şekil 3. 15 Efektif genişlik konsepti (Ma ve Wang 2013)

Efektif genişlik metodu yaklaşımı, ampirik ifadeler ile 3.45 denkleminde belirtildiği üzere ifade edilebilir (Davies 2000).

$$\rho = \frac{b_{eff}}{b} = \begin{cases} 1, & \sqrt{\frac{\sigma_{eff}}{\sigma_{cr}}} \leq 0,673 \\ \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{eff}}}\right) \left(\sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{eff}}}\right), & \sqrt{\frac{\sigma_{eff}}{\sigma_{cr}}} > 0,673 \end{cases} \quad (3.45)$$

Burada b_{eff} efektif genişlik, b levha genişliği, σ_{eff} levhadaki maksimum bası gerilmesi, σ_{cr} kritik burkulma gerilmesidir.

Oluklu levhalar için Ma ve Wang (2013) önerilen efektif genişlik metodunu düzenleyerek aşağıdaki denklemi sunmuşlardır.

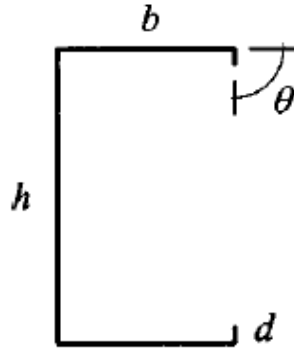
$$\rho_{mod} = 0,95\rho^{0,697} \left(\frac{b - t_w}{b} \right)^{0,303} \quad (3.46)$$

ρ_{mod} oluklu levha için modifiye efektif genişlik oranıdır.

3.3 Açık Kesitli Kolonların Burkulması

3.3.1 Lokal Burkulma

Lokal burkulma hesabında kullanılabilen iki yöntem mevcuttur. İlki, eleman yaklaşımıdır ve bu yöntemde burkulma için klasik çözüm, yapının levha elemanlarının bireysel çözümüdür. Elemanların her birinin bireysel burkuldukları ve birbirleri ile etkileşimde bulunmadıkları varsayılır.



Şekil 3. 16 Dikme kesit geometrisi

Web genişliği h , flanş genişliği b ve uzantı uzunluğu d olan uzantılı C kesitli bir dikmenin kritik lokal burkulması, eleman yönteminde yaklaşık olarak 3.47, 3.48 ve 3.49 denklemlerinden minimum olanına eşittir varsayımında bulunulur (Schafer 2002).

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

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

$$\sigma_{krl,tip} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{d}\right)^2 ; k = 0,43 \quad (3.49)$$

Diğer yöntem ise elemanların birbirleri ile etkileşimlerinin de göz önünde bulundurulduğu yarı ampirik etkileşim yöntemidir. Burkulma katsayısı olan k , hem flanş-uzantı lokal burkulması hem de flanş-veb lokal burkulması olarak sonlu şerit metodu ile ampirik olarak ifade edilmiştir (Schafer 2002).

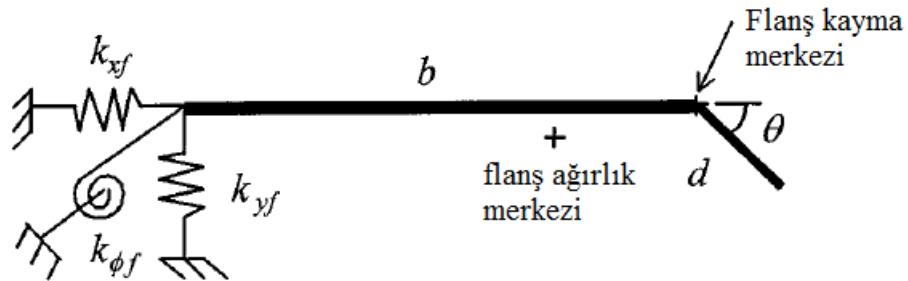
$$k_{flanş-tip} = -11,07 \left(\frac{d}{b}\right)^2 + 3,95 \left(\frac{d}{b}\right) + 4 \quad \left(\frac{d}{b} < 0,6\right) \quad (3.50)$$

$$k_{flanş-veb} = \begin{cases} 4 \left(\frac{b}{h}\right)^2 \left[2 - \left(\frac{b}{h}\right)^{0,4}\right], & \frac{h}{b} \geq 1 \\ 4 \left[2 - \left(\frac{h}{b}\right)^{0,2}\right], & \frac{h}{b} < 1 \end{cases} \quad (3.51)$$

Tüm dikmenin lokal burkulması 3.50 ve 3.51 denklemlerinden minimum olanının 3.48 denkleminde yazılması ile bulunur.

3.3.2 Distorsiyonel Burkulma

Kritik distorsiyonel burkulma gerilmesi aşağıdaki denklemler yardımı ile bulunabilir (Schafer 2002).



Şekil 3. 17 Flanş modeli (Schafer ve Peköz 1999)

$$\sigma_{krd} = \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we}}{\tilde{k}_{\phi fg} + \tilde{k}_{\phi wg}} \quad (3.52)$$

$$k_{\phi fe} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \left[EI_{xf}(x_0 - h_x)^2 + EC_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_0 - h_x)^2 \right] + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 GJ_f \quad (3.53)$$

$$\tilde{k}_{\phi fg} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \left\{ A_f \left[(x_0 - h_x)^2 \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}}\right)^2 - 2y_0(x_0 - h_x) \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}}\right) + h_x^2 + y_0^2 \right] + I_{xf} + I_{yf} \right\} \quad (3.54)$$

$$k_{\phi we} = \frac{Et^3}{6h(1 - \nu^2)} \quad (3.55)$$

$$\tilde{k}_{\phi wg} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \frac{th^3}{60} \quad (3.56)$$

$$L_{kr} = \left\{ \frac{6\pi^4 h(1 - \nu^2)}{t^3} \left[I_{xf}(x_0 - h_x)^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_0 - h_x)^2 \right] \right\}^{0.25} \quad (3.57)$$

Denklemlerdeki “f” indisi sadece flanşın kesit özellikleri kullanılarak elde edildiğini göstermek için kullanılmıştır.

Burada x_0 ve y_0 kayma merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki mesafeyi, h_x ve h_y ağırlık merkezi ile flanş-veb bağlantı (yayların bağlandığı) noktası arası mesafeyi tanımlamaktadır.

Kritik distorsiyonel burkulma gerilmesini hesaplamak için, denklem 3.57 kullanılarak distorsiyonel burkulmanın kritik uzunluğu hesaplanır, 3.53-3.56 arasındaki denklemlerde L yerine L_{kr} yazılır ve 3.52 denklemini kullanılarak burkulma gerilmesi hesaplanır (Schafer 2002).

3.3.3 Global Burkulma

Basıya maruz uzun kolonlarda global burkulma sebebiyle farklı türde çökme gözlemlenebilir. Eksenel yüklenen kolonda kayma merkezi ve ağırlık merkezi arasındaki

mesafeye göre eğilmeli, burulmalı veya eğilmeli-burulmalı burkulma gözlemlenebilmektedir.

3.3.3.1 Eğilmeli Burkulma

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (3.58)$$

Burada P_e elastik eğilmeli burkulma değeri, K ise efektif uzunluk çarpanıdır.

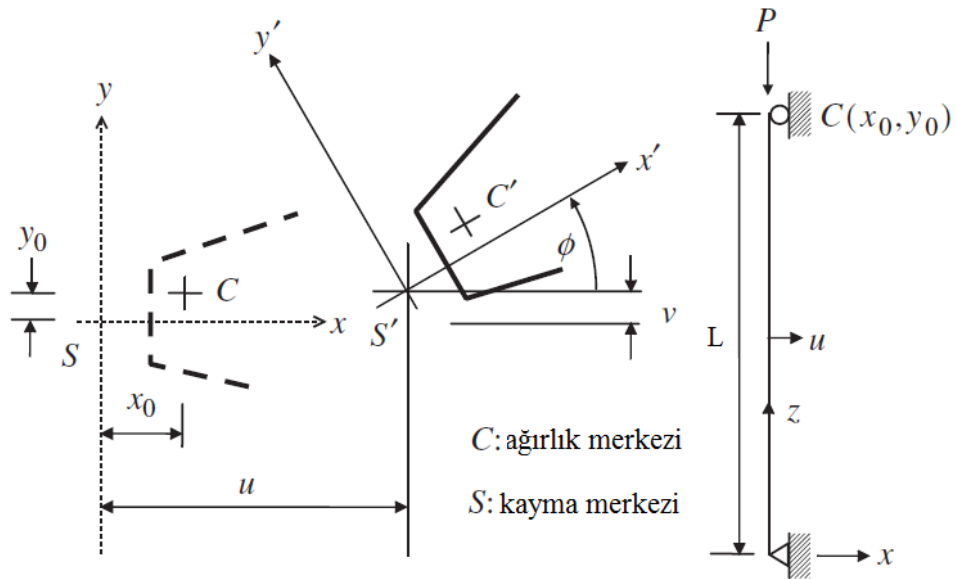
Denklem 3.58' de $I=Ar^2$ dönüşümü yapılır ise elastik kolon burkulması için eğilmeli burkulma (Euler) gerilmesi şu şekilde tanımlanır.

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (3.59)$$

KL/r narinlik oranı, r jirasyon yarıçapını ifade etmektedir.

3.3.3.2 Eğilmeli Burulmalı Burkulma

Açık kesitli kolonlar eğilmeli burulmalı burkulma modunda hem eğilir iken hem de burulmaya maruz kalmaktadır.



Şekil 3. 18 Eğilmeli Burulmalı burkulma esnasındaki yer değiştirmeler (Yoo ve Lee 2011)

Kayma merkezi etrafında ϕ dönme açısı ile x ve y eksenlerindeki yer değiştirmeleri sırasıyla u ve v ise P yüküne maruz kalan bir kolonun denge şartı aşağıdaki diferansiyel denklemler ile ifade edilir (Yoo ve Lee 2011) :

$$EI_x v^{iv} + P v^{ii} + P x_0 \phi^{ii} = 0 \quad (3.60)$$

$$EI_y u^{iv} + P u^{ii} - P y_0 \phi^{ii} = 0 \quad (3.61)$$

$$EC_w \phi^{iv} - (GJ - P r_0^2) \phi^{ii} - P y_0 u^{ii} + P x_0 v^{ii} = 0 \quad (3.62)$$

C_w burulma kesitinin çarpılma sabiti, J St. Venant burulma sabiti, G kayma modülü, x_0 ve y_0 kayma merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki mesafelerini, GJ burulma rijitliğini ve EC_w 'de çarpılma rijitliğini ifade etmektedir. $r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2}$ kayma merkezi etrafındaki jirasyon yarıçapı, r_x ile r_y de sırasıyla x ve y eksenlerindeki jirasyon yarıçaplarıdır.

Sınır şartları:

$$\begin{aligned} u = v = \phi = 0 & \quad (z=0 \text{ 'da}) \\ u'' = v'' = \phi'' = 0 & \quad (z=L \text{ 'de}) \end{aligned} \quad (3.63)$$

şeklinde tanımlanacak olur ise aşağıdaki karakteristik denklem elde edilir.

$$\begin{aligned} (r_0)^2 (P_{kr,eb} - P_x)(P_{kr,eb} - P_y)(P_{kr,eb} - P_z) - (P_{kr,eb})^2 (y_0)^2 (P_{kr,eb} - P_x) \\ - (P_{kr,eb})^2 (x_0)^2 (P_{kr,eb} - P_y) = 0 \end{aligned} \quad (3.64)$$

$$P_x = \frac{\pi^2 EI_x}{(KL)^2}$$

$$P_y = \frac{\pi^2 EI_y}{(KL)^2} \quad (3.65)$$

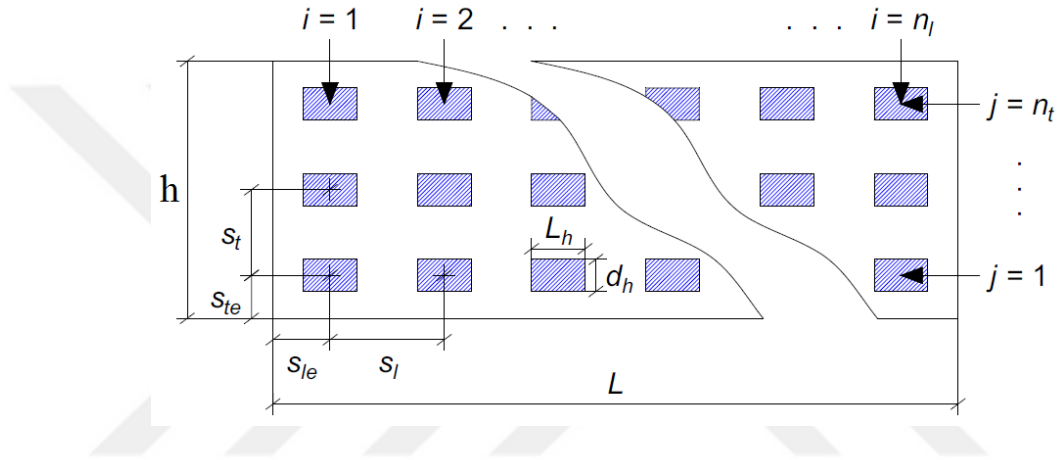
$$P_z = \left(\frac{\pi^2 EC_w}{(KL)^2} + GJ \right) \left(\frac{1}{r_0^2} \right)$$

KL efektif uzunluktur ve Çizelge 3. 1' den okunabilir. 3.64 denkleminin köklerinden bulunacak olan $P_{kr,eb}$ yüklerinden en ufak olanı kritik eğilmeli-burulmalı burkulma

yükünü temsil etmektedir. Sadece burulmalı burkulma gözlemleniyor ise kritik burkulma yükü P_z ile hesaplanabilmektedir.

3.4 Delikli Kolonlarda Burkulma Davranışları

Dikmelerin veb kısmında bulunan deliklerin burkulma yüklerine etkisinin araştırılması amacıyla yapılan literatürdeki çalışmalarda farklı burkulma modları için formüller elde edilmiştir. Şekil 3. 19 'da dikmenin veb kısmındaki deliklerin sayısı ve yerleşimi gösterilmektedir. Deliğin varlığı genel olarak burkulma dayanımını azaltıcı yönde etki etmektedir.



Şekil 3. 19 Veb elemanındaki delik yerleşimleri (Smith ve Moen 2014)

3.4.1 Lokal Burkulma

Kritik yükün hesaplanmasında deliğin etkisi indirgenmiş kalınlık hipotezi ile hesaplanabilir. Basit mesnetlenmiş levha için kritik lokal burkulma gerilmesi 3.66 denklemi ile hesaplanabilir (Smith ve Moen 2014).

$$\sigma_{krl,delikli} = \frac{\pi^2 E t^2}{12(1-\nu^2)h^2} k = \frac{\pi^2 E t_r^2}{12(1-\nu^2)h^2} k_{delik} \quad (3.66)$$

$$t_r = t \left(\frac{k_{delik}}{k} \right)^{\frac{1}{2}}$$

k deliksiz, k_{delik} ise delikli levha için burkulma katsayıları, t_r indirgenmiş kalınlıktır. Rayleigh-Ritz yöntemi kullanılarak delikli levhanın burkulma katsayısı bulunabilir (Smith ve Moen 2014).

$$\begin{aligned}
k_{delik} = & \left(\frac{m^2 b^2}{L^2} + \frac{n^4 L^2}{m^2 b^2} \right) \left[1 - \sum_{j=1}^{n_t} \sum_{i=1}^{n_l} \left[\frac{(L_h - \alpha X_i)(d_h - \beta Y_j)}{Lb} \right] \right] \\
& + 2n^2 \left[1 \right. \\
& \left. - \sum_{j=1}^{n_t} \sum_{i=1}^{n_l} \left[\frac{(L_h + \alpha X_i)(d_h + \beta Y_j) - 2v(L_h \alpha Y_j + d_h \beta X_i)}{Lb} \right] \right]
\end{aligned} \tag{3.67}$$

Burada α ve β delik konumları, X_i ve Y_j ' de sırasıyla uzunlamasına ve enlemesine her bir deliğin konumlarının burkulma ile etkisini ifade etmektedir.

$$X_i = \cos \left(\frac{2\pi m}{L} [s_l(i-1) + s_{le}] \right) \tag{3.68}$$

$$Y_j = \cos \left(\frac{2\pi n}{h} [s_t(j-1) + s_{te}] \right)$$

$$\alpha = \frac{L}{\pi m} \sin \left(\frac{\pi L_h m}{L} \right) \tag{3.69}$$

$$\beta = \frac{h}{\pi n} \sin \left(\frac{\pi d_h n}{h} \right)$$

m ve n boyuna ve enine oluşacak olan yarım dalgaların sayısıdır.

3.4.2 Distorsiyonel Burkulma

Delik varlığı, özellikle delik bölgesinde levha üzerindeki eğilme katılığını azaltmaktadır. Yanal eğilme katılığındaki düşüş, delikli yapının dönme rijitliği ile deliksiz haldeki dönme rijitliğine oranı şeklinde tanımlanabilir ve bu dönme katılığı levha katılığı ile doğru orantılıdır (Smith ve Moen 2014).

$$\frac{K_{\theta,d}}{K_{\theta}} \propto \frac{D_d}{D} = \frac{\frac{Et_r^3}{12(1-v^2)}}{\frac{Et^3}{12(1-v^2)}} = \frac{t_r^3}{t^3} \tag{3.70}$$

$K_{\theta,d}$ delikli levhanın ve K_{θ} deliksiz levhanın dönme katılığını, t_r indirgenmiş veb kalınlığı ve t ise levha kalınlığını göstermektedir. Yukarıdaki denklemin tekrar düzenlenmesi ile indirgenmiş veb kalınlığı şu şekildedir.

$$t_r = t \left(\frac{K_{\theta,d}}{K_{\theta}} \right)^{1/3} \quad (3.71)$$

Delik varlığının dönme katılığına etkisi, veb net alanının, delik olmadığındaki alanına oranı ile orantılı olduğu hipotezi ile ifade edilmektedir. Delikli levhanın net alanı $A_{veb,net}=Lh-n_l n_t L_h d_h$ ve deliksiz levhanın alanı $A_{veb}=Lh$ ise indirgenmiş kalınlık nihai şeklini alır (Smith ve Moen 2014). Bulunan indirgenmiş kalınlık ile tekrardan çözüm yapılarak delikli levhalarda distorsiyonel burkulma bulunabilmektedir.

$$t_r = t \left(\frac{A_{veb,net}}{A_{veb}} \right)^{1/3} \quad (3.72)$$

Moen ve Schafer 2009’da ise indirgenmiş kalınlık

$$t_r = t \left(1 - \frac{L_h}{L_{kr}} \right)^{1/3} \quad (3.73)$$

ile gösterilmiştir. Delikli yapının distorsiyonel burkulma gerilmesini bulmak için önce deliksiz bölgenin kesit alanı özelliklerinden bulunacak olan L_{kr} ile indirgenmiş veb kalınlığı bulunur. Yeniden belirlenen veb kalınlığı ile distorsiyonel gerilme bölüm 3.3.2’deki formüller ile hesaplanır.

3.4.3 Global Burkulma

3.4.3.1 Eğilmeli Burkulma

Delik bulunan dikmelerde eğilmeli burkulma söz konusu ise ağırlıklı ortalama (weighted average) metodu kullanılabilir. Bu yöntem dâhilinde deliksiz yapının Euler burkulmasına

deliğin etkisi aşağıdaki denklemlerde görüldüğü üzere etki etmektedir (Smith ve Moen 2014).

$$P_{kr,ed} = P_e \frac{I_{ort}}{I_g} \quad (3.74)$$

$$I_{ort} = \frac{I_g L_g + I_{net} L_{net}}{L} \quad (3.75)$$

Burada P_e deliksiz dikme için kritik Euler burkulması olup denklem 3.58’de I yerine I_g yazılarak hesap edilebilir. I_g ve I_{net} sırasıyla deliksiz bölgedeki kesitin ve delikli bölgedeki kesitin atalet momentleridir.

$$\begin{aligned} L_{net} &= n_l L_h \\ L_g &= L - L_{net} \end{aligned} \quad (3.76)$$

P_e ‘yi hesaplarken klasik formüllerden sonlu şerit analizinin kullanılması, klasik formülün gerçek değer üzerinde sonuçlar verdiği için dolayı daha doğru sonuç vermektedir. İlâveten tahmini hesaplar ile sonlu elemanlar analizi arasında da farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir (Smith ve Moen 2014).

3.4.3.2 Eğilmeli Burulmalı Burkulma

Denklem 3.64 ve 3.65 kullanılarak deliksiz kolonlarda eğilmeli-burulmalı kritik burkulma yükü hesaplanabilir. Burada deliksiz dikmelerden farklı olarak atalet momentleri I_x ve I_y , St.Venant burulma sabiti J ile çarpılma burulma sabiti C_w delik etkisinden dolayı değişmektedir. I_x ve I_y denklem 3.75’de olduğu gibi ağırlıklı ortalama yöntemi ile bulunabilir. Bunlara ilave olarak St.Venant burulma sabitini de ağırlıklı ortalama yöntemi ile bulmak mümkündür (Moen ve Schafer 2009).

$$J_{ort} = \frac{J_g L_g + J_{net} L_{net}}{L} \quad (3.77)$$

Çarpılma sabitindeki değişim ise Moen ve Schafer (2009)'da delik etrafındaki bozulmayı da hesaba katarak, delik ve bozulmuş bölgeyi beraber d_h^* ile göstererek şu şekilde tanımlanmıştır.

$$d_h^* = d_h + \frac{1}{2}(h - d_h) \left(\frac{d_h}{h}\right)^{0,2} \quad (3.78)$$

Burada tanımlanan d_h^* ile tekrar hesaplanan C_w bulunarak denklem 3.65' de kullanılabilir.

Benzer şekilde deliğin etkisinin C_w üzerindeki etkisi, Smith ve Moen (2014)'te yanal delik sayısının 1 ve 1'den fazla olması durumuna göre ayrılmıştır. Eğer yanal delik sayısı 1'den fazla ise ağırlıklı ortalama yönteminin kullanılmasının, yanal delik sayısı 1 ise delikli kesitin çarpılma burulma sabitinin kullanılmasının ($C_{w,net}$) daha doğru sonuç verdiği belirtilmiştir. Kübik formdaki denklemden başka olarak delikli kolonlardaki eğilmeli burulmalı kritik burkulmayı denklem 3.79 ile de ifade edilebilmektedir.

$$P_{kr,eb,d} = P_{kr,eb} \frac{J_{ort} C_w}{J_g C_{wg}} \quad (3.79)$$

$$C_w = \begin{cases} C_{w,net}, & n_t = 1 \\ C_{w,ort}, & n_t \neq 1 \end{cases}$$

$P_{kr,eb}$ deliksiz kolon için kritik eğilmeli burulmalı burkulma yükü, n_t yanal delik sayısı J_g ve C_{wg} sırasıyla delik olmayan bölgedeki kesitin St.Venant burulma sabiti ve delik olmayan bölgedeki kesitin çarpılma sabitidir.

3.5 Maksimum Taşıma Kapasitesi (Ultimate Load)

Uzun yıllardır kullanılan efektif genişlik metoduna alternatif olarak ortaya konulan direct strength metodu (DSM), ince cidarlı soğuk şekillendirilmiş çelik kolonlarda oluşan lokal, distorsiyonel ve global burkulmaların birbirleri ile olan etkileşimlerini de göz önünde bulundurarak kolonun taşıyabileceği maksimum yükü belirlemede kullanılmaktadır.

3.5.1 Global Burkulmaya Maruz Dikmelerde Taşıma Kapasitesi

Global kritik elastik burkulma yükü P_{cre} ile temsil edilir ise, global burkulmaya maruz dikmenin taşıma kapasitesi P_{ne} aşağıdaki denklem ile ifade edilir (He ve ark. 2014).

$$P_{ne} = \begin{cases} \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2}\right) P_y, & \lambda_c > 1,5 \\ \left(0,658\lambda_c^2\right) P_y, & \lambda_c \leq 1,5 \end{cases} \quad (3.80)$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{P_y}{P_{cre}}}$$

$$P_y = A\sigma_{akma}$$

3.5.2 Lokal Ve Global Burkulma Modlarının Etkileşimindeki Dikmelerde Taşıma Kapasitesi

Lokal ve global burkulmaların etkileşimde olduğu varsayımı için dayanım yükü, denklem 3.81’de gösterildiği üzere bulunabilir (He ve ark. 2014).

$$P_{nl} = \begin{cases} P_{ne}, & \lambda_l \leq 0,776 \\ P_{ne} \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{krl}}{P_{ne}}\right)^{0,4}\right] \left(\frac{P_{krl}}{P_{ne}}\right)^{0,4}, & \lambda_l > 0,776 \end{cases} \quad (3.81)$$

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{P_{ne}}{P_{krl}}} \quad (3.82)$$

Burada P_{krl} elastik lokal burkulma yükü, P_{ne} ise global burkulmaya maruz dikmenin taşıma kapasitesini temsil etmektedir.

3.5.3 Global Ve Distorsiyonel Burkulma Modlarının Etkileşimindeki Dikmelerde Taşıma Kapasitesi

Kritik elastik distorsiyonel ve elastik global burkulma yükleri birbirine yakın olan kolonlarda bu iki burkulma yükü birbirleri ile etkileşimde bulunabilirler. Bu etkileşimi göz önünde bulundurarak önerilen formül Anbarasu ve Murugapandian (2015)’ de şu şekilde belirtilmiştir:

$$P_{nde} = \begin{cases} P_{ne}, & \lambda_{de} \leq 0,561 \\ P_{ne} \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{krd}}{P_{ne}}\right)^{0,6}\right] \left(\frac{P_{krd}}{P_{ne}}\right)^{0,6}, & \lambda_{de} > 0,561 \end{cases} \quad (3.83)$$

$$\lambda_{de} = \sqrt{\frac{P_{ne}}{P_{krd}}} \quad (3.84)$$

P_{krd} kritik distorsiyonel burkulma yükünü göstermektedir.

3.5.4 Distorsiyonel Burkulmaya Maruz Dikmelerde Taşıma Kapasitesi

Distorsiyonel burkulmaya maruz kalan kolonların maksimum taşıma kapasiteleri denklem 3.85 ile ifade edilmektedir (Kwon ve ark. 2009).

$$P_{nd} = \begin{cases} A\sigma_{akma}, & \lambda_d \leq 0,561 \\ A\sigma_{akma} \left[1 - 0,25 \left(\frac{\sigma_{krd}}{\sigma_{akma}} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{\sigma_{krd}}{\sigma_{akma}} \right)^{0,6}, & \lambda_d > 0,561 \end{cases} \quad (3.85)$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{\sigma_{akma}}{\sigma_{krd}}} \quad (3.86)$$

σ_{krd} elastik distorsiyonel burkulma gerilmesini, σ_{akma} akma gerilmesini, A ise kesit alanını temsil etmektedir.

3.5.4.1 Lokal-Distorsiyonel Burkulma Modlarının Etkileşimindeki Dikmelerde Taşıma Kapasitesi

3.87 denklemi, uzantı bulunan orta uzunluktaki dikmelerdeki lokal ve distorsiyonel burkulma arasındaki ilişkiyi göz önünde bulundurarak taşıma kapasitesini DSM (direct strength method) ile bulunmasını sağlamaktadır (He ve ark. 2014).

$$P_{nld} = \begin{cases} P_{nd}, & \lambda_{ld} \leq 0,776 \\ P_{nd} \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{krl}}{P_{nd}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{krl}}{P_{nd}} \right)^{0,4}, & \lambda_{ld} > 0,776 \end{cases} \quad (3.87)$$

$$\lambda_{ld} = \sqrt{\frac{P_{nd}}{P_{krl}}} \quad (3.88)$$

P_{nld} lokal – distorsiyonel burkulma etkileşimi olduğu durumdaki dayanım yükü, P_{nd} denklem 3.85 ile hesaplanan distorsiyonel burkulma dayanımını göstermektedir.

Yüksek dayanıma sahip (akma gerilmesi 550 MPa) soğuk şekillendirilmiş çelik yapılar ve orta sertlikteki (akma gerilmesi 300 MPa) çelik yapıların denklem 3.87 ile mukayesesi yapılmıştır. Yüksek dayanıma sahip çelik yapıların maksimum dayanımının test sonuçları ile denklem 3.87'den elde edilen sonuçlar arasında farklılıklar mevcuttur ve bu farkın sebebi ise yüksek dayanımlı soğuk şekillendirilmiş çelik yapıların, orta dayanımlı yapılara göre daha fazla post-buckling özelliğine sahip olmasıdır (Kwon ve ark 2009). Aynı çalışmada belirtilen orta uzunluktaki kolonlarda makul sonuçlar veren düzeltilmiş dayanım formülü şu şekildedir:

$$P_{nld} = \begin{cases} P_{nd} , & \lambda_{ld} \leq 0,667 \\ P_{nd} \left[1 - 0,2 \left(\frac{P_{krl}}{P_{nd}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{krl}}{P_{nd}} \right)^{0,4} , & \lambda_{ld} > 0,667 \end{cases} \quad (3.89)$$

3.5.4.2 Distorsiyonel-Lokal Burkulma Modlarının Etkileşimindeki Dikmelerde Taşıma Kapasitesi

Yapının burkulması esnasında önce distorsiyonel burkulma başlayıp devamında lokal burkulmanın da etkili olduğu durumlar için, He ve ark. (2014)' de aşağıdaki formül ile azami taşınabilecek yükün hesaplanabileceği belirtilmiştir.

$$P_{ndl} = \begin{cases} P_{nl} , & \lambda_{dl} \leq 0,561 \\ P_{nl} \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_{nl}} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_{nl}} \right)^{0,6} , & \lambda_{dl} \geq 0,561 \end{cases} \quad (3.90)$$

$$\lambda_{dl} = \sqrt{\frac{P_{nl}}{P_{crd}}}$$

3.6 Sonlu Elemanlar Analizi

Gerçek durumdaki problemlerin analitik olarak çözümleri geometrik, çevresel şartlar gibi sebeplerden ötürü çok karışıktır. Bunlara ilaveten nonlinear özellikler ve dinamik etkiler de göz önünde bulundurulur ise analitik çözüm neredeyse imkansızdır. Sonlu elemanlar analizinde, bu sebepten eleman adı verilen geometrik olarak daha basit birçok parçaya ayrılan cismin, bu elemanları için denge denklemlerinin eş zamanlı çözümü yapılır. Bu elemanlar kenarlarından ve köşelerinden düğüm noktaları ile birbirlerine

bağlıdır. Bu düğüm noktaları için yer değiştirmeler vektördür ve 3 bileşeni vardır (Lee 2012).

Sonlu elemanlar analizinin ilk kullanımı 1900'lerin başında, bazı araştırmacıların elastik barları modellemesi ile başlamaktadır, buna rağmen Courant 1943 yılında sonlu elemanlar analizini kullanan ilk kişi olarak bilinmektedir. 1940'ların başlarında Courant yayımlanan bir makalede burulma probleminin araştırılmasında kullanmıştır. Daha sonra 1950'lerde Boeing uçak kanatlarını incelerken kullanmıştır. 1960'larda araştırmacılar sonlu elemanlar analizini mühendisliğin farklı alanlarında da kullanmaya başlamışlardır. 1967 yılında Cheung sadece sonlu elemanları anlatan ilk kitabı yazmıştır ve 1971 yılında ise ANSYS ilk defa piyasaya sürülmüştür (Moaveni 2003).

Sonlu elemanlar analizi çözümünde, $\{D\}$ yer değiştirme vektörü, $\{F\}$ düğüm noktalarına etkiyen dış kuvvetler vektörü ve $[K]$ ise katılık matrisi olmak üzere aralarındaki ilişki şu şekilde gösterilmektedir.

$$[K]\{D\} = \{F\} \quad (3.91)$$

Yapı, bir yay gibi düşünülecek olursa $\{F\}$ dış kuvvet, $\{D\}$ yayın deplasmanıdır. $[K]$ bu yaklaşımda yay katılığını ifade etmektedir. Lineer yapıda $[K]$ sabit bir matristir, buna ters olarak non-lineer durumlarda $[K]$, $\{D\}$ 'nin bir fonksiyonu olmaktadır.

3.6.1. Sonlu Elemanlar Analizinde Burkulma Çözümü

Sonlu elemanlar analizi çözümlerinde kullanılan 2 tip burkulma analizi mevcuttur. Bunlardan birincisi lineer (özdeğer) diğeri ise non-lineer burkulma analizleridir.

Non-lineer burkulma analizinde yapının non-lineer malzeme özellikleri, başlangıçtaki kusurları ve büyük yer değişimleri göz önünde bulundurulmaktadır.

Lineer burkulmada ise lineer elastik kusursuz bir yapının ne kadar yük taşıyabileceği belirlenebilmektedir. Bu analiz ile bulunan değerler teorik olarak bulunan sonuçlar ile benzeşmektedir. Örneğin bir kolonun burkulma yükü analiz sonucu ve Euler formülü kullanılarak bulunan sonuç birbirleri ile örtüşmektedir. Fakat gerçekte non-lineer malzeme özellikleri ve kusurlar göz ardı edilmediği için lineer analiz çok güvenilir sonuçlar vermemektedir (Tajdari ve ark. 2011).

Ansysis lineer burkulma analizinde iki tane terim kullanılarak katılık matrisi oluşturulur. İlk terim K_0 , geleneksel katılık matrisini, ikinci terim K_σ ise başlangıç gerilme katılık matrisidir ve başlangıçta var olan gerilmelerin etkisini göz önünde bulundurur.

$$\{F\} = ([K_0] + [K_\sigma(\lambda\sigma_0)])\{D\} \quad (3.92)$$

λ skaler bir büyüklük olup $\{F\}$ ve $\{D\}$ ' ler sırasıyla dış yükleri ve ilgili düğüm noktaların yer değiştirme vektörleridir. Başlangıçta σ_0 bilinmemektedir ve birim yük uygulayarak başlangıç gerilmesi $\lambda\sigma_0$ seviyesine ulaştırılır. Burkulma esnasında dış yükte bir artış olmamasına rağmen yer değişimi artmaktadır. Bu da şu şekilde ifade edilir.

$$([K_0] + \lambda[K_\sigma(\sigma_0)])\{dD\} = 0 \quad (3.93)$$

Burada $\{dD\}$ düğüm noktalarının artan yer değiştirme vektörüdür ve sıfır olamaz. Bu sebepten aşağıdaki denklem sağlanmalıdır.

$$\det([K_0] + \lambda[K_\sigma(\sigma_0)]) \quad (3.94)$$

Determinant çözümü ile bulunan öz değerlerin λ_i en düşük olanı kritik yüke karşılık gelmektedir. İlgili öz vektörler karakteristik mod şekillerini temsil etmektedir (Komur ve Sonmez 2008).

3.6.2 Sonlu Elemanlar Analizinin Kurgulanması

Non-linear analizlerin gerçekleştirilmesi için lineer analiz sonucunda elde edilen şekil değişimleri belli bir geometrik kusur çarpanı (imperfection factor) kullanılarak, non-linear burkulma analizlerinin başlangıç şekli olarak alınmıştır. Bu işlemin gerçekleştirilmesinde upgeom komutu aşağıdaki gösterildiği şekilde kullanılmıştır.

```
/prep7
upgeom,X,1,1,file,rst
cdwrite,db,file,cdb
```

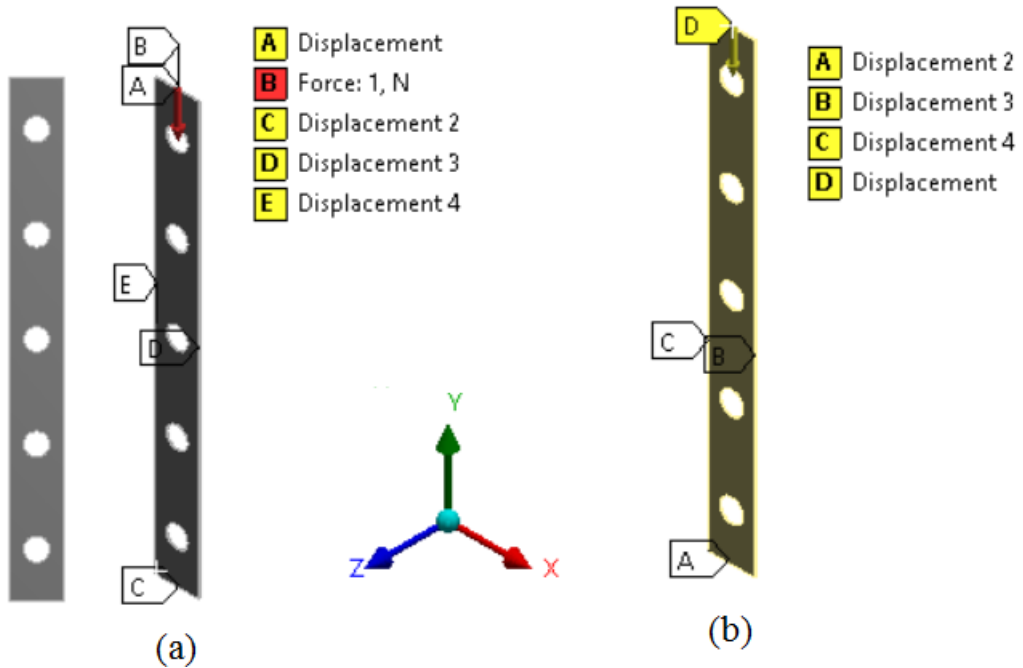
X burada kusur çarpanıdır ve burkulma modu (lokal, distorsiyonel, global) ile şekil geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Kusur çarpanı değerinin bulunmasında lokal burkulma için $w/200$, distorsiyonel burkulma için $f/50$ ve global burkulma için $L/1000$ ifadeleri geçerlidir (Pastor M.M. ve ark. 2014). Burada w web genişliğini, f flans derinliğini ve L ise dikmenin uzunluk değerleridir.

Eleman tipi olarak 3 serbestlik derecesine sahip (x,y ve z eksenlerinde yer değişimine izin veren) SOLID186 kullanılmıştır.

Düzlemsel levha ve dikmeler için yapılan sonlu elemanlar analizlerindeki sınır şartları şu şekildedir:

Düzlemsel Levha Analizlerinde Uygulanan Sınır Şartları

Düzlemsel levha analizleri yapılırken uygulanan sınır şartları, lineer analizlerde; levhanın alt kenarı her üç ekseninde de (x, y ve z eksenleri) sınırlandırılır iken, üst kenarda x ve z eksenlerinde kısıtlanıp y ekseninde hareket serbest bırakılmıştır. Yan kenarlarda ise z ekseninde hareket sınırlandırılmıştır. Bu sınırlandırmalar displacement komutu ile sağlanmış olup üst kenardan force komutu kullanılarak 1 N büyüklüğünde bir kuvvet $-y$ doğrultusunda uygulanmıştır.



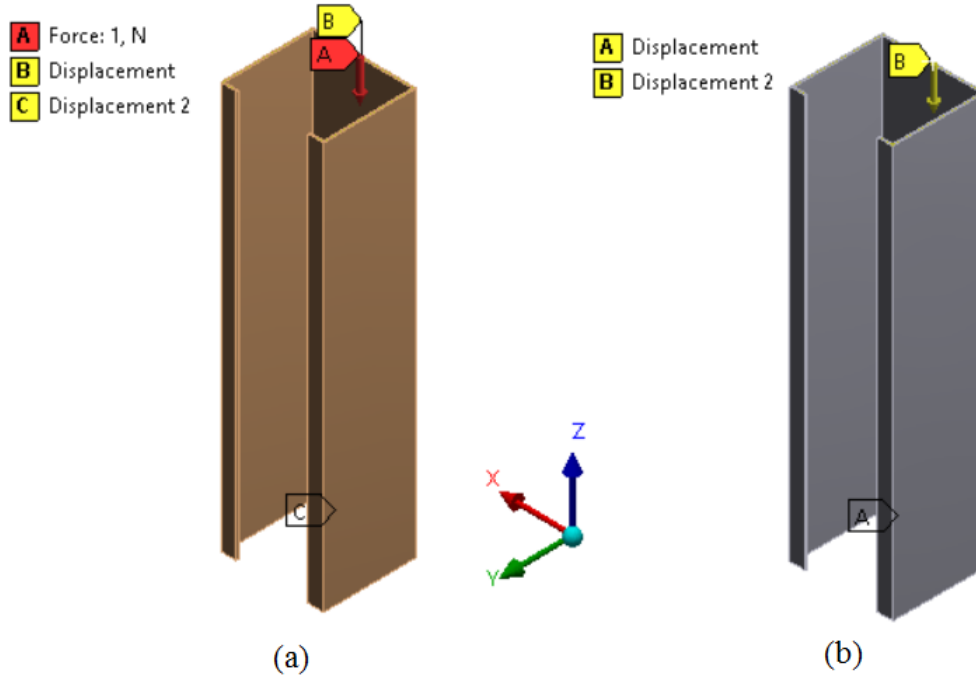
Şekil 3. 20 Düzlemsel levha analizlerinde ((a)Lineer analiz ve (b) Non- Linear analiz) uygulanan sınır şartları

Non-linear analizlerde ise benzer sınır şartları uygulanmıştır, tek farkı üst kenardan kuvvet etki etmemekte, onun yerine üst kenardan $-y$ doğrultusunda belli bir deplasman uygulanmasıdır.

Dikme Analizlerinde Uygulanan Sınır Şartları

Dikme analizleri esnasında uygulanan sınır şartları, lineer analizde; displacement komutu vasıtasıyla, alt ucu her üç ekseninde de sınırlandırılır iken, üst ucu x ve y eksenlerinde sınırlı, z ekseninde harekete müsaade edecek şekildedir. Üst uca force komutu ile z ekseninde $-z$ yönünde 1 N'luk bir yük tatbik edilmektedir.

Non-linear analizlerde ise benzer sınır şartları uygulanmıştır, tek fark dikmenin üst ucundan kuvvet etki etmemekte, onun yerine üst kenardan z ekseninde $-z$ yönünde belli bir deplasman uygulanmasıdır.



Şekil 3. 21 Dikme analizlerinde uygulanan sınır şartları ((a)Lineer analiz ve (b) Non-Linear analiz) uygulanan sınır şartları

3.6.3 Yapılan Analizlerin Doğrulanması

Literatürdeki daha önceden yapılan çalışmalarda (Moen ve Schafer 2008, Gunalan ve ark. 2015) verilen deneysel sonuçlar ile makalelerde verilen dikme geometrileri üzerinden yapılan analiz sonuçları, analizlerin kurgulanmasının doğrulanması amacı için mukayese

edilmiştir. P_{deney} makalelerde verilen maksimum taşıma kapasitesini, P_{ansys} sonlu elemanlar analizinden elde edilen dikmelerin maksimum taşıma kapasitesini temsil etmektedir.

Çizelge 3. 5 Deneysel veriler ile analiz sonuçlarının kıyaslanması

	$P' (P_{deney} / P_{ansys})$
G550-0.95-20-Aa	0,9211
G250-0.95-20-Aa	1,0094
G450-1.90-20-Aa	0,9181
G250-1.95-20-Aa	0,9990
362-2-24-NH	1,0376
600-2-24-H	1,0318

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde önce düzlemsel levhalar daha sonra da dikmeler için yapılan analiz sonuçları verilerek, sonuçların yorumlanmasına çalışılmıştır.

4.1 Düzlemsel Levha Analizleri

4.1.1 Delik Şeklinin Burkulma Yüküne Etkisi

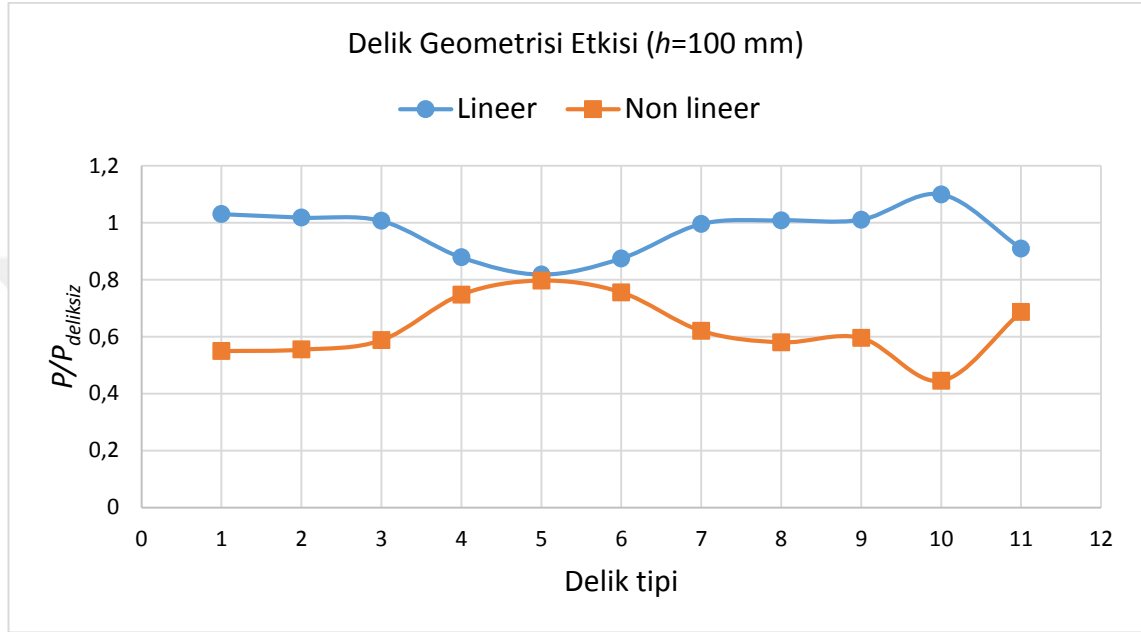
Delik şeklinin burkulma yüküne etkisinin gözlemlenebilmesi açısından yapılan analizlerde sınır şartları kısım 3.6.2’ de belirtildiği üzeredir. Düzlemsel levha üzerinde 5 adet delik bulunan levhalar için burkulma yükleri, yapılan analizler sonucunda elde edilmiş ve delik şekline göre değişimleri belirtilmiştir. P delikli levhadaki, $P_{deliksiz}$ ise delik bulunmayan levhadaki kritik yükü temsil etmektedir. Delik şekilleri Çizelge 4. 1’ de numaralandırılmıştır.

Çizelge 4. 1 Delik şekillerinin numaralandırılması

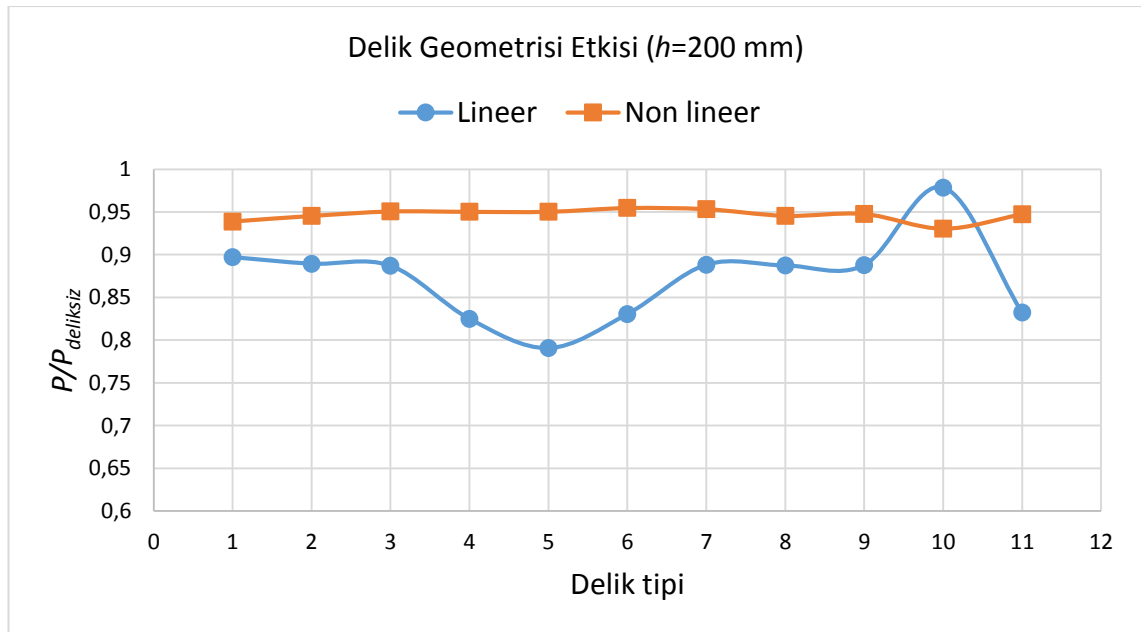
	DELİK TİPİ
1	Altıgen ucu yuvarlaklaştırılmış delik
2	Altıgen delik
3	Dairesel delik
4	Dikey dikdörtgen delik
5	Dikey dikdörtgen kenarları yuvarlaklaştırılmış delik
6	Dikey dikdörtgen üst kenarı yuvarlaklaştırılmış delik
7	Kare delik
8	Ongen delik
9	Sekizgen delik
10	Yatay dikdörtgen delik
11	Dikey dikdörtgen açılı delik (Dik kenarlar 80 derece yatayla açılı)

Delik şeklinin etkisinin incelendiği tüm levha analizlerinde net alan yaklaşık olarak aynıdır.

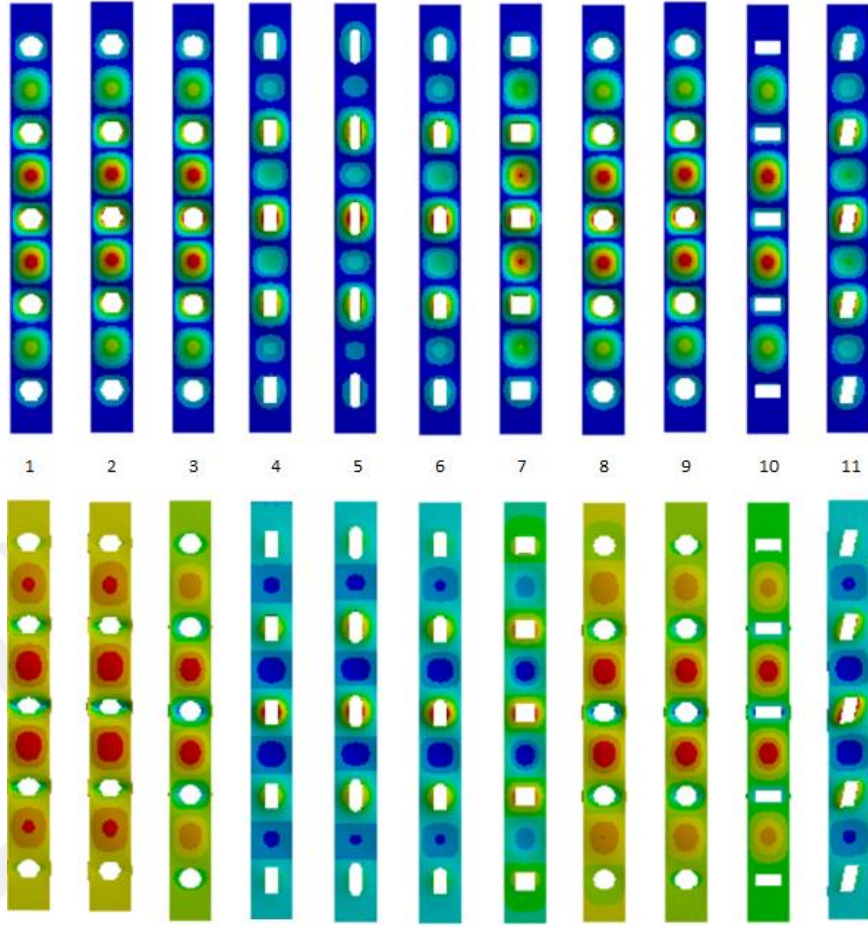
Lineer analiz sonucunda delikler arasındaki alanda oluşan burkulma yarım dalgalarının boyunun uzunluğu en fazla tip 10'dadır. Buna bağlı olarak da burkulma yükü diğer tiplere göre daha fazladır. Non-linear analizde ise levha yatay eksenindeki net alanın daralması ile taşıma kapasitesi azalmaktadır.



Şekil 4. 1 Levha genişliği 100 mm olan levhada delik şeklinin burkulma yüküne etkisi



Şekil 4. 2 Levha genişliği 200 mm olan levhada delik şeklinin burkulma yüküne etkisi



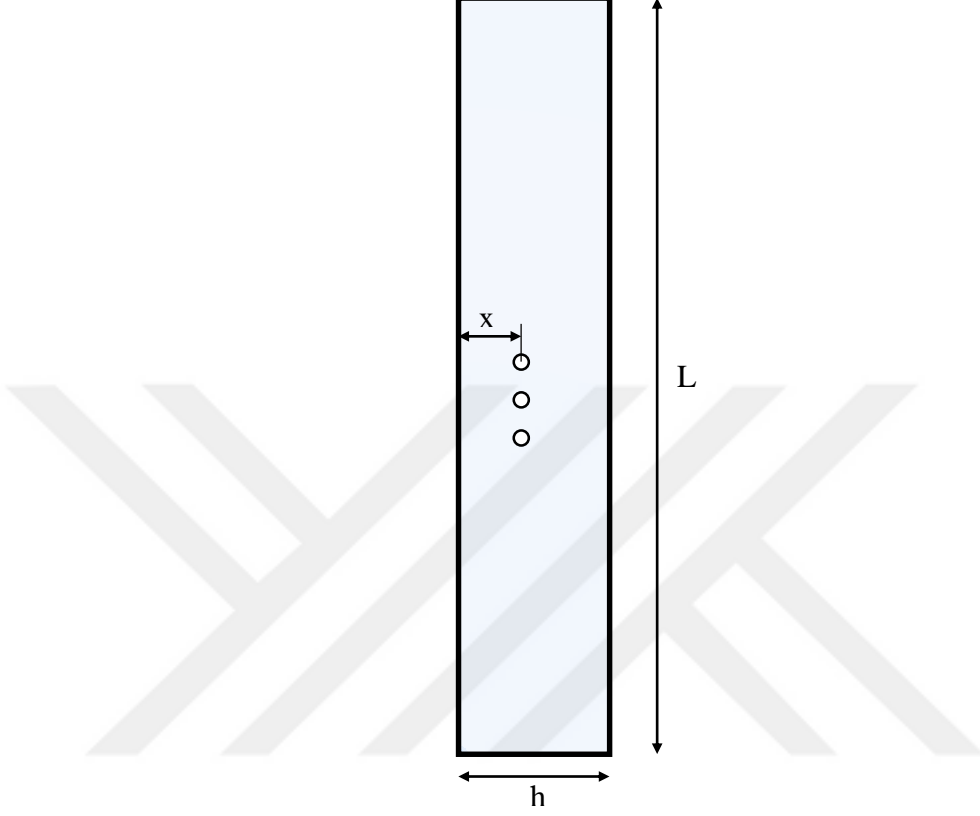
Şekil 4. 3 Delik şekillerinin burkulma şekillerine etkisi (Üst sıra lineer analiz, alt sıra non-linear analiz sonucunda elde edilen şekil değişimlerini göstermektedir)

Levha genişliği 100 mm ve 200 mm olan levhalarda yapılan analiz sonuçlarından elde edilen grafikler sunulmuştur. Her iki levha genişliğinde de lineer burkulma analizleri sonucunda delik şeklinin etkisi benzer eğilimde olmakla birlikte, non-linear analiz sonuçları farklılık göstermektedir. Bunun sebebi ise levha genişliği 100 mm olan levhada, delik ve levha kenarı arasında kalan alanın, 200 mm'ye göre daha az olması ve buna bağlı olarak da taşıma kapasitesinde azalma veya artım daha fazla gözlemlenmektedir. Daha geniş levha için ise bu bölgelerdeki net alanın daha fazla olmasından dolayı taşıma kapasitesinde dar levhaya göre daha az değişim gözükmemektedir.

4.1.2 Deliğin Yan Kenarlardan Olan Uzaklığının Burkulma Yüküne Etkisi

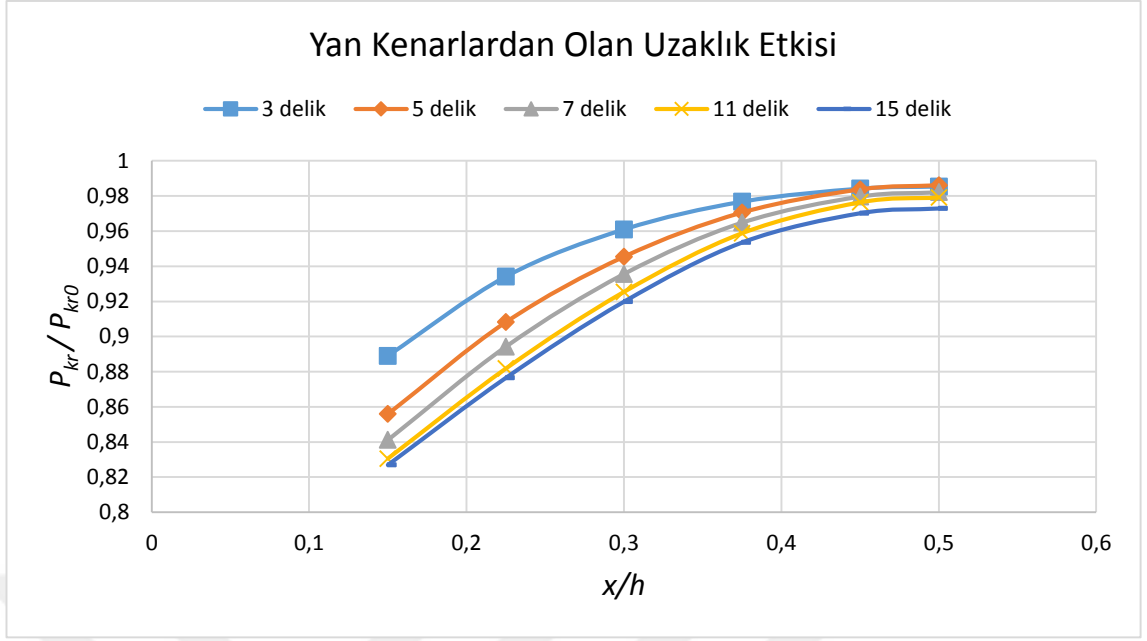
Farklı delik sayılarına sahip düzlemsel levhalarda deliklerin konumlarının, yan yüzeyden levha ortasına doğru ilerleyişi ile birlikte burkulma yüklerindeki değişimi, P delikli, P_{kr0} ise deliksiz levhanın burkulma yükleri olmak üzere aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur.

Burada x yan kenardan delik merkezinin uzaklığı, L levhanın boyu ve h ise levha genişliğini göstermektedir. Delik çapı 20 mm olarak analizler yapılmıştır.



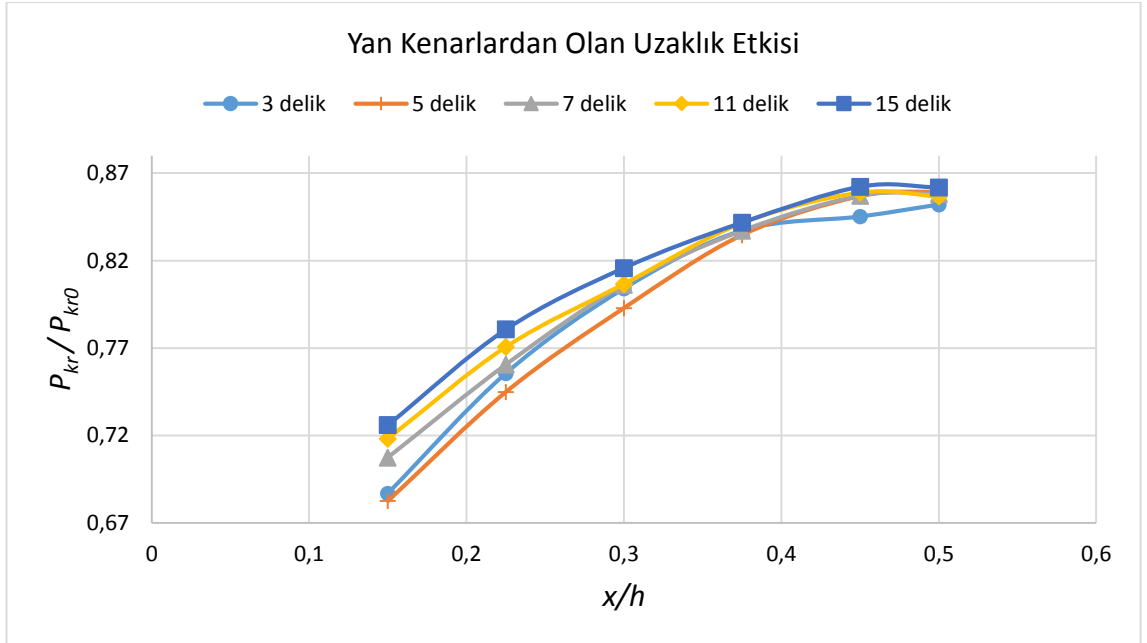
Şekil 4. 4 Deliklerin levha üzerindeki konumları

Levhanın yan kenarları ile delikler arasında kalan mesafe de göz önünde bulundurularak analizler sırasında mesh boyutu 4 mm olacak şekilde işlemler gerçekleştirilmiştir. Sınır şartları keza bölüm 3.6.2' de belirtildiği üzeredir.



Şekil 4. 5 Farklı delik sayılarına sahip levhalarda delik konumunun, kenardan levha merkezine doğru kayması ile burkulma yükündeki değişimi (Linear Analiz Sonuçları)

Yapılan lineer analiz sonucunda, farklı delik sayılarına sahip levhalar için elde edilen sonuçlar Şekil 4. 5’de belirtilmiştir. Delik konumlandırılmasının levhanın ortasına doğru yapılması levhanın burkulma yükünün artmasını sağlamaktadır.

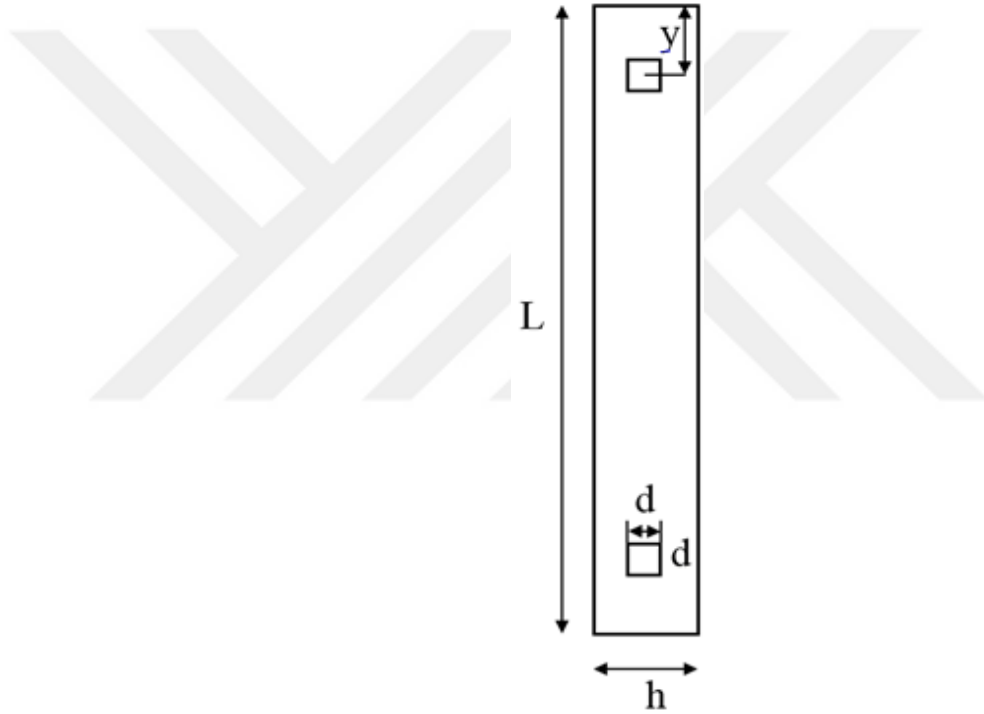


Şekil 4. 6 Farklı delik sayılarına sahip levhalarda delik konumunun, kenardan levha merkezine doğru kayması ile burkulma yükündeki değişimi (Non-linear Analiz Sonuçları)

Yukarıdaki grafiklerden de görüleceği üzere deliğin yan kenarlardan uzaklaşması ile birlikte taşıma kapasitelerindeki düşüş azalmaktadır. Bunun sebebi olarak mesnetlenmiş yan kenarlar levhanın orta kısmından daha fazla yük taşımakta ve deliğin bu bölgede bulunması levha rijitliğini düşürmektedir.

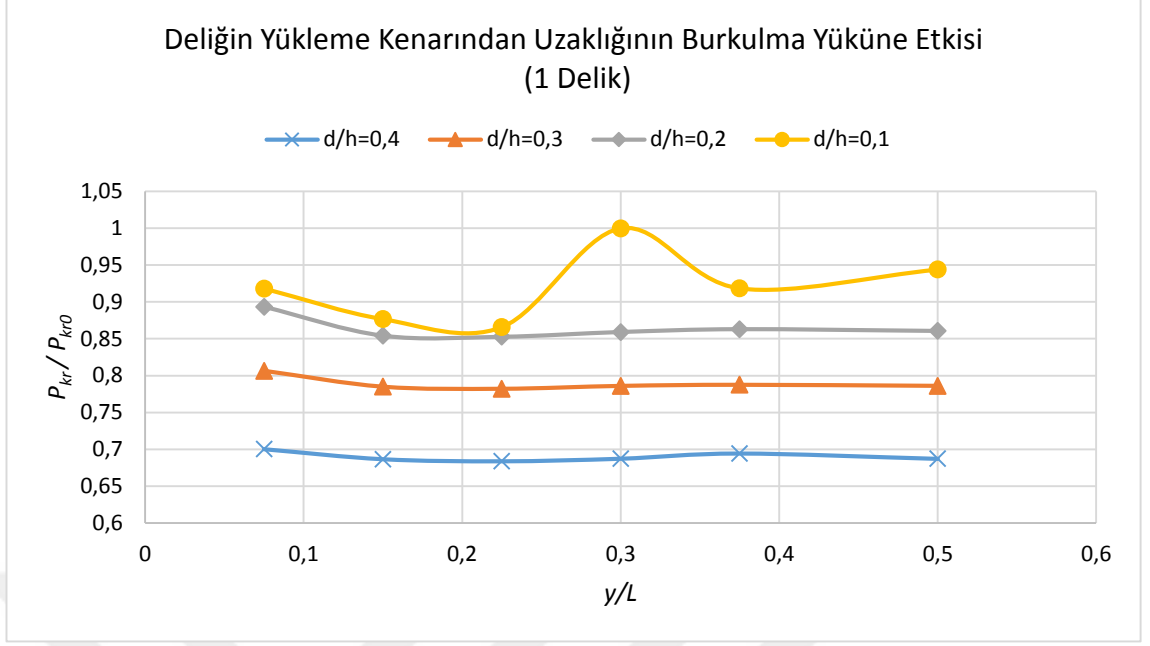
4.1.3 Deliklerin Yükleme Kenarından Uzaklığının Burkulma Yüküne Etkisi

Deliklerin yükleme kenarından olan uzaklığının etkisini belirlemek amacıyla düzlemsel levhalar için burkulma analizleri yapılarak, levhanın taşıyabileceği maksimum yükün deliklerin yükleme kenarından uzaklaşması ile nasıl değiştiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 4. 7 Delik Konumları

P_{kr0} deliksiz levha için kritik burkulma yükünü, P_{kr} delikli levhaların analizi sonunda elde edilen kritik burkulma yükü, y deliğin yükleme kenarından olan uzaklığı ve L' de levha boyunu ifade etmektedir. d kare deliğin bir kenar uzunluğu ve h ise levha genişliğidir.



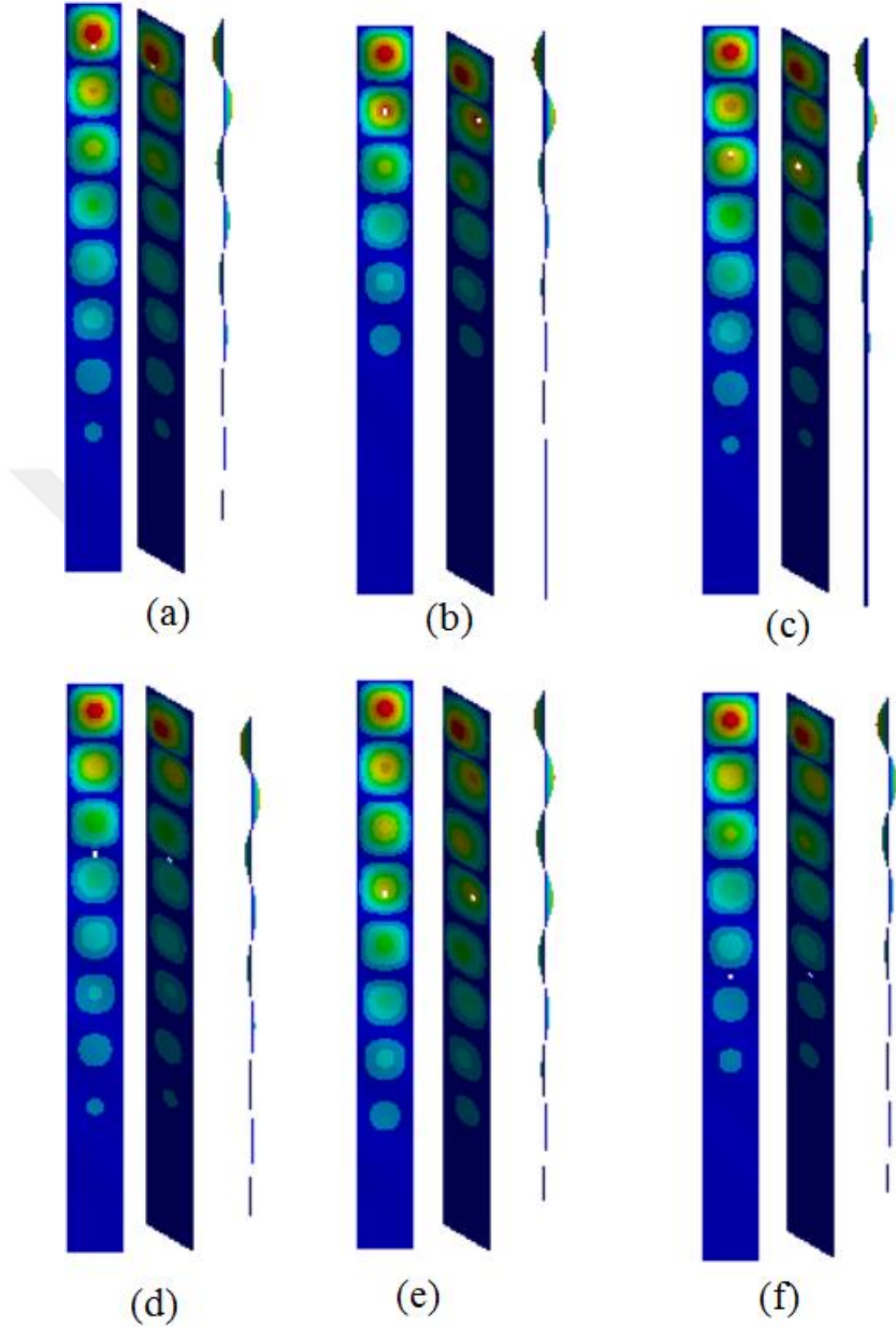
Şekil 4. 8 Tek delikli levhada deliklerin yükleme kenarından olan uzaklığının ve delik boyutunun burkulma yüküne etkisi

Tek delikli levhanın burkulma şekilleri, Şekil 4. 9' da lineer analizler, Şekil 4. 10' da da non-lineer analizlerin sonuçları doğrultusunda gösterilmiştir.

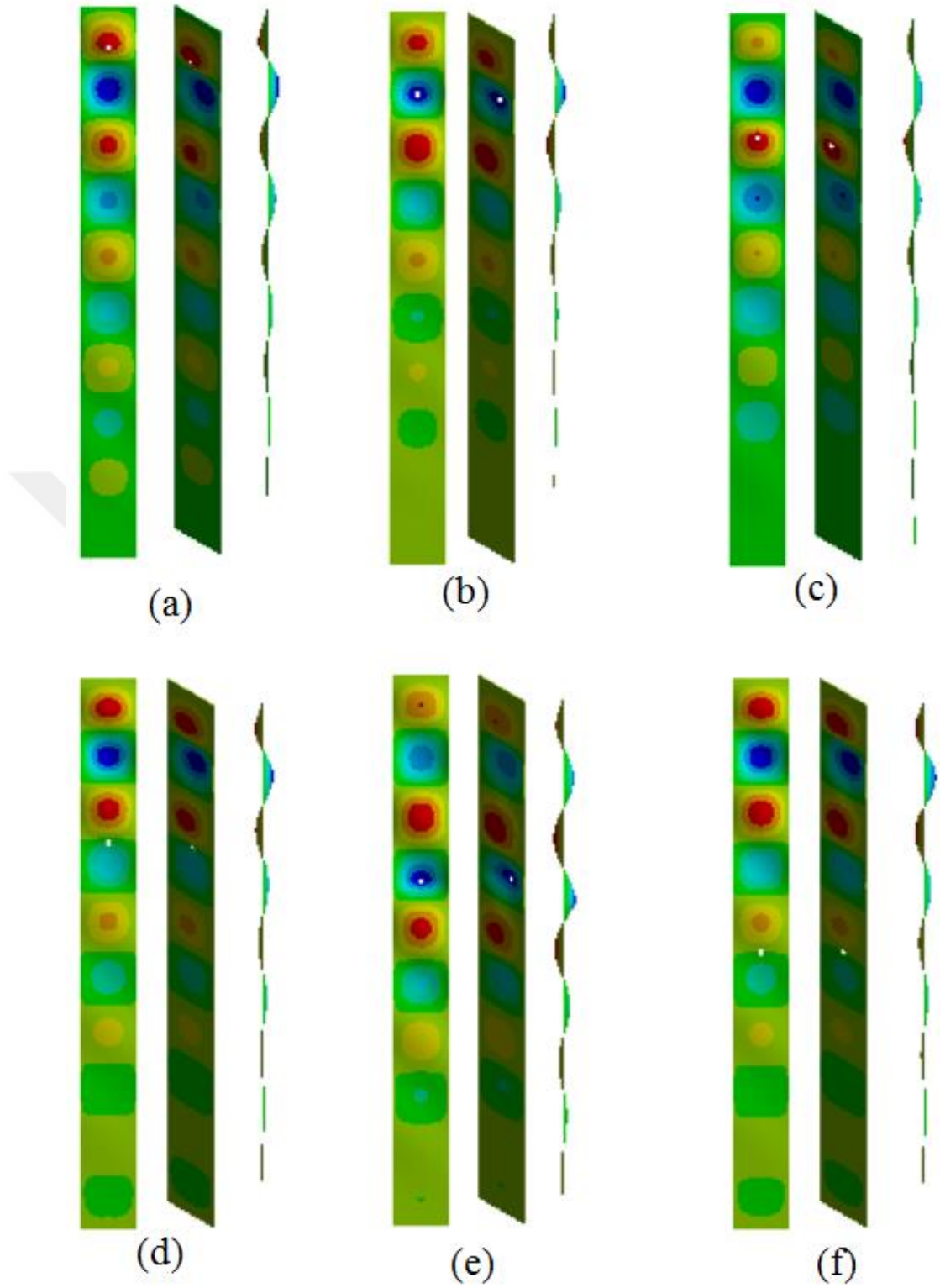
d/h oranı 0,1 olan levha analizlerinde $y/L=0,3$ ve $y/L=0,5$ noktalarında bazı sapsmalar gözlemlenmektedir. Bunun sebebi olarak, Şekil 4. 9'dan da görüleceği üzere deliğin burkulma sırasında oluşan yarım dalgaların üzerine denk gelmemesi belirtilebilir.

Şekil 4. 11 ve Şekil 4. 12' e bakıldığında burkulma yarım dalgalarının delik bölgesinde yoğunlaştığı gözükmektedir.

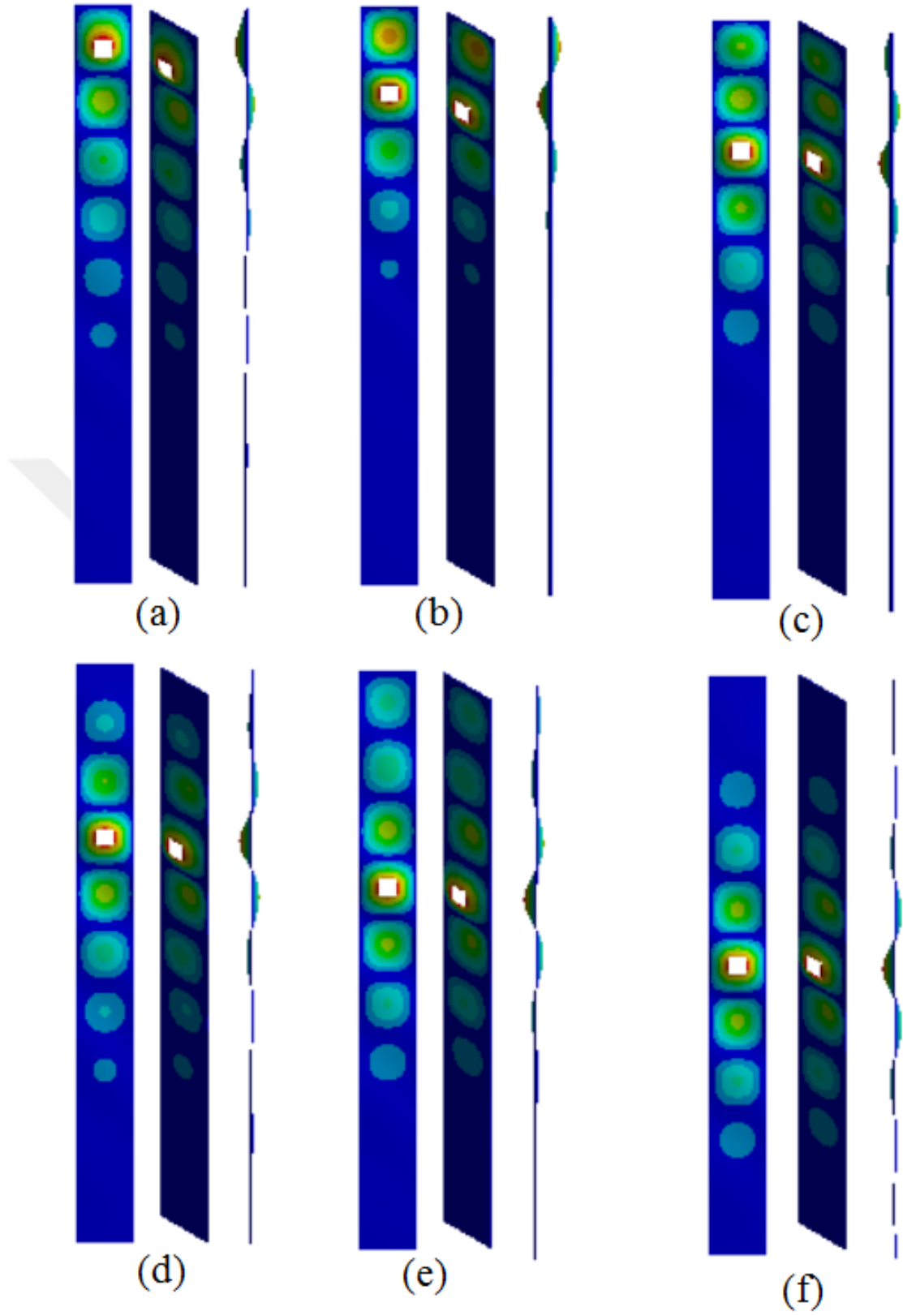
Deliklerin konumları, burkulma yarım dalgalarının boyunu ve sayısını değiştirmektedir. İlaveten deliğin konumu keza yarım dalgaların sönümlenmesine de sebep olabilmektedir. Burkulma yarım dalgalarındaki bu tarz değişimler de dikmenin taşıma kapasitesini az da olsa etkilemektedir.



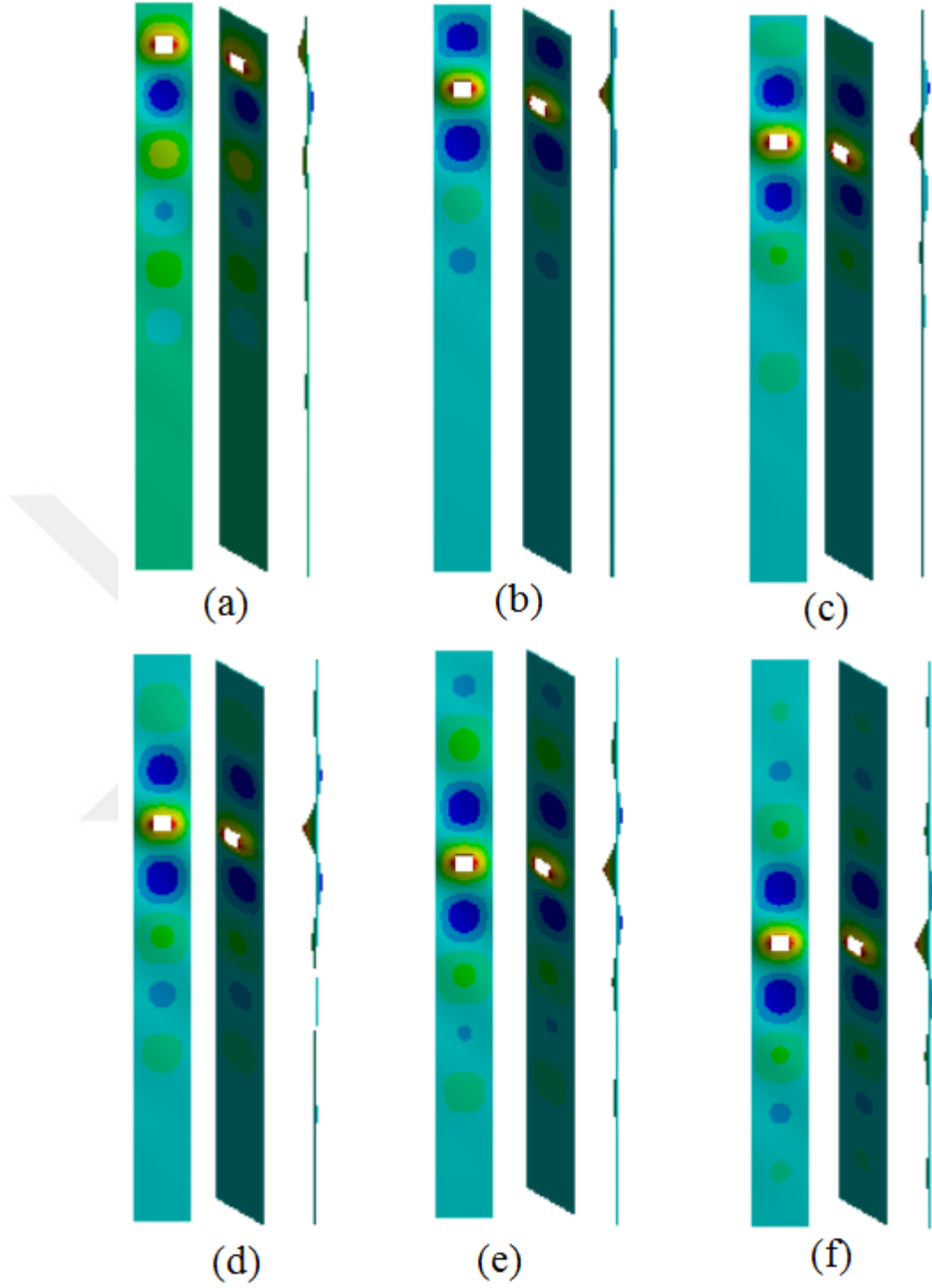
Şekil 4. 9 (Lineer Analiz Sonucu) Tek delikli ve d/h oranı 0,1 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375 (f) 0,5



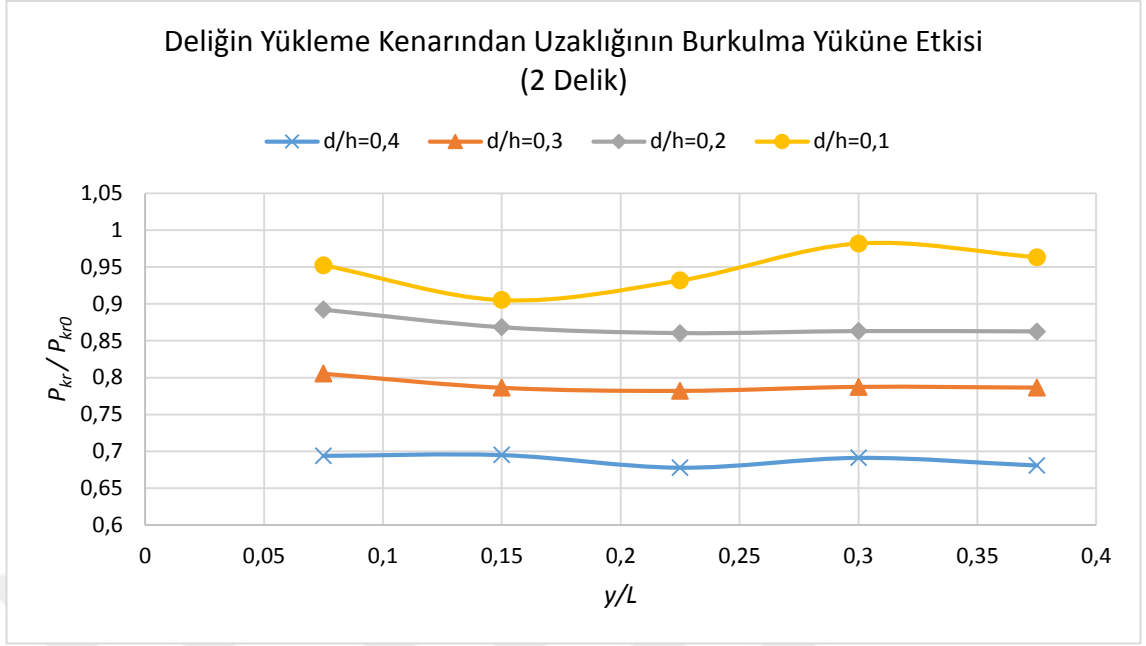
Şekil 4. 10 (Non-Linear Analiz Sonucu) Tek delikli ve d/h oranı 0,1 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375 (f) 0,5



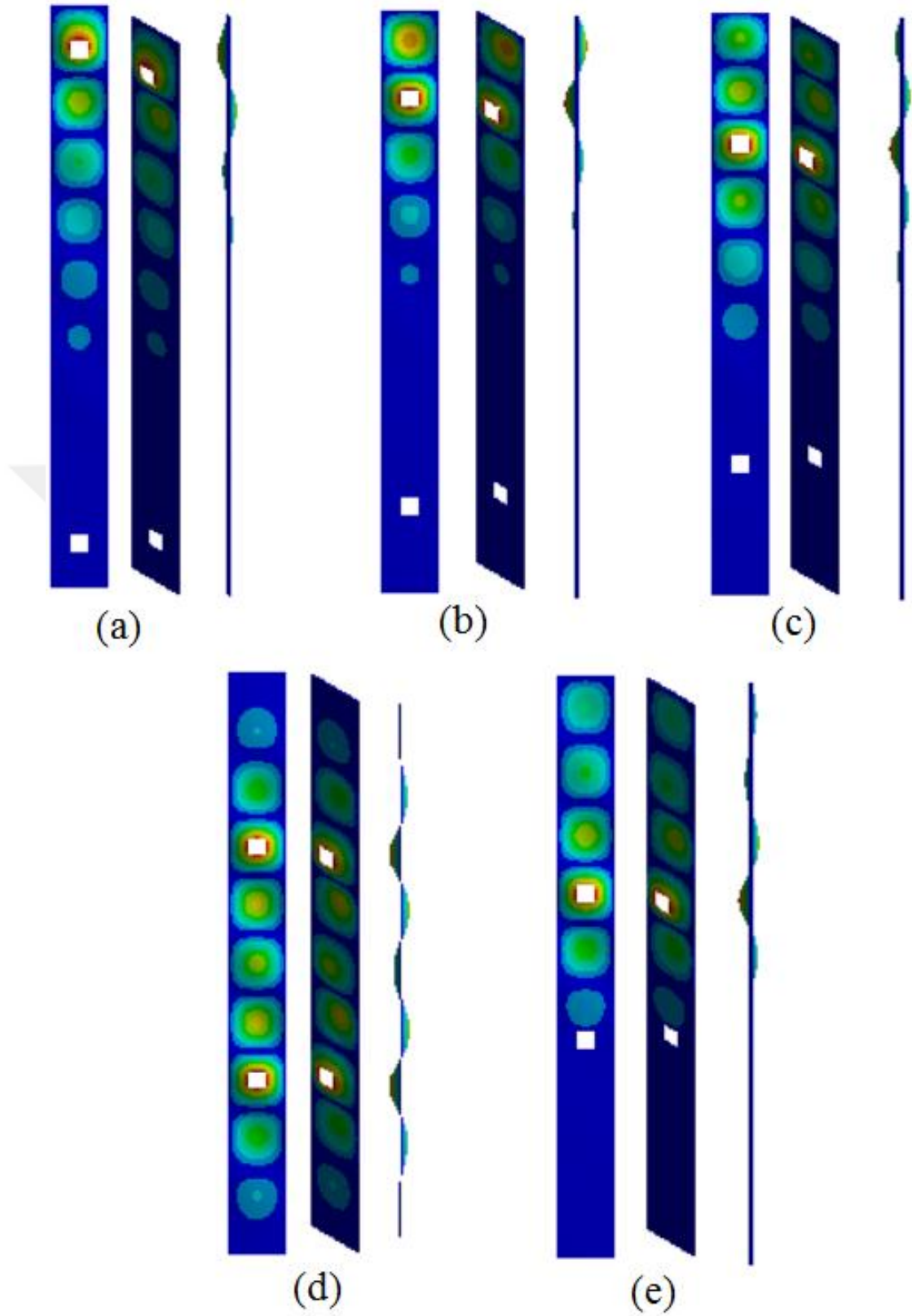
Şekil 4. 11 (Lineer Analiz Sonucu) Tek delikli ve d/h oranı 0,3 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375 (f) 0,5



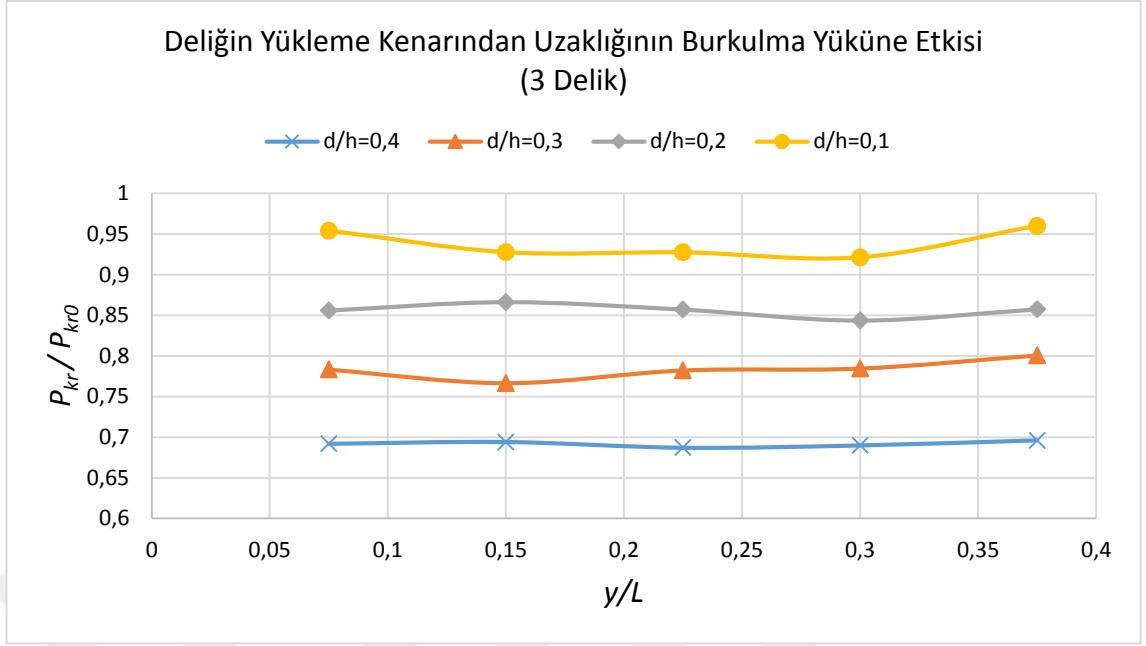
Şekil 4. 12 (Non-Linear Analiz Sonucu) Tek delikli ve d/h oranı 0,3 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375 (f) 0,5



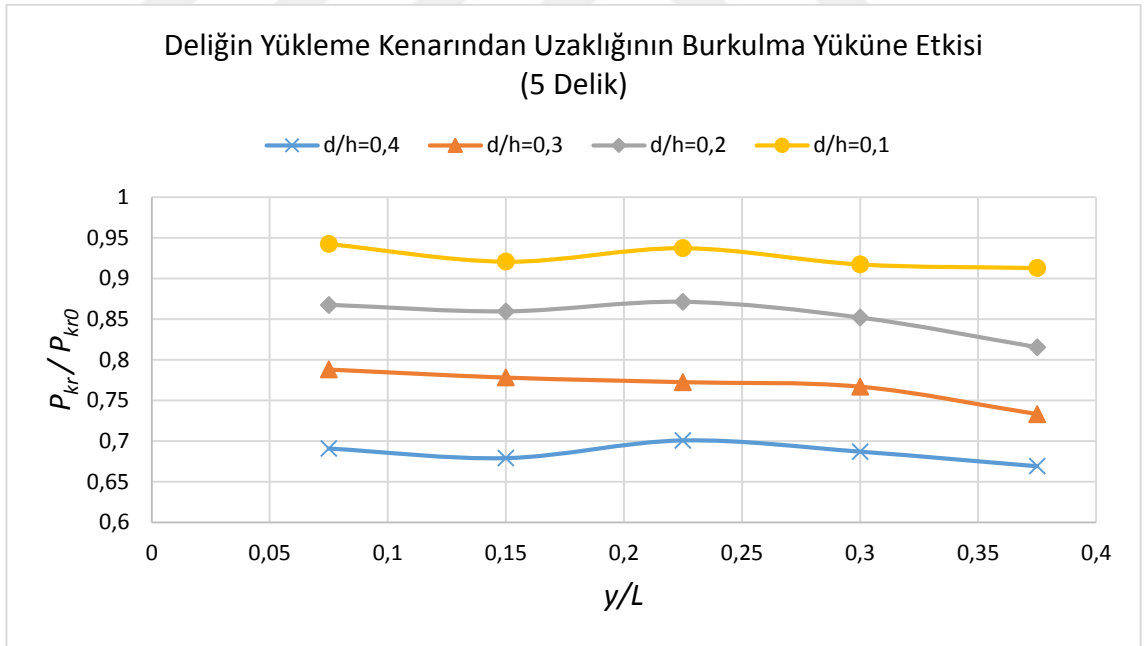
Şekil 4. 13 2 delikli levhada deliklerin y¼kleme kenarından olan uzaklığının ve delik boyutunun burkulma y¼k¼ne etkisi



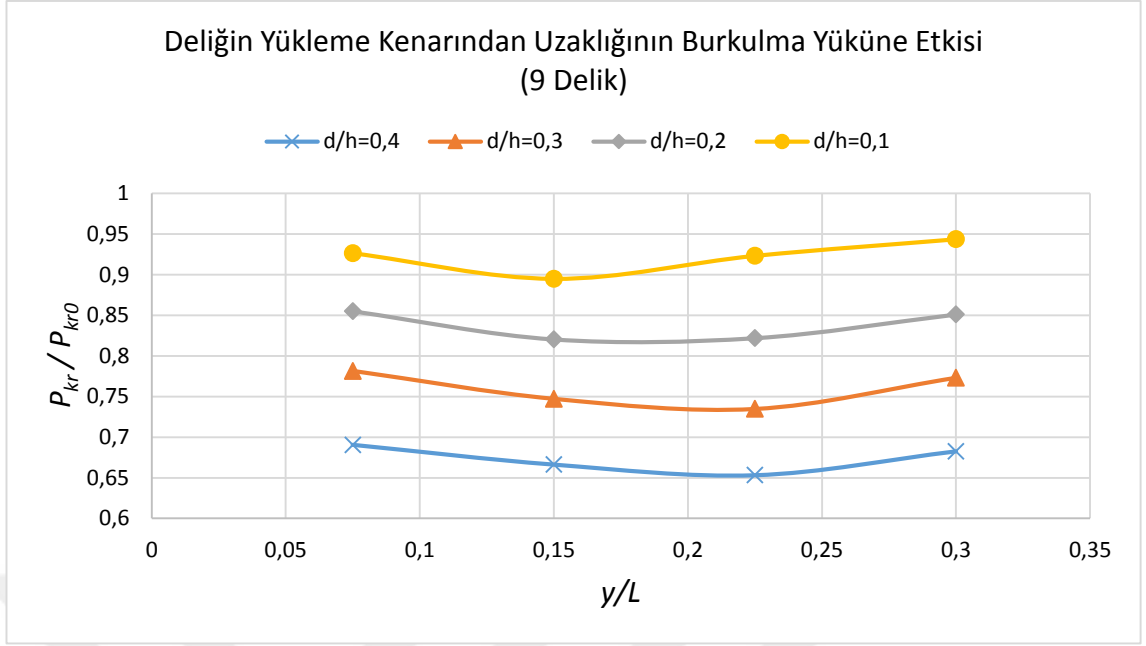
Şekil 4. 14 (Lineer Analiz Sonucu) 2 delikli ve d/h oranı 0,3 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375



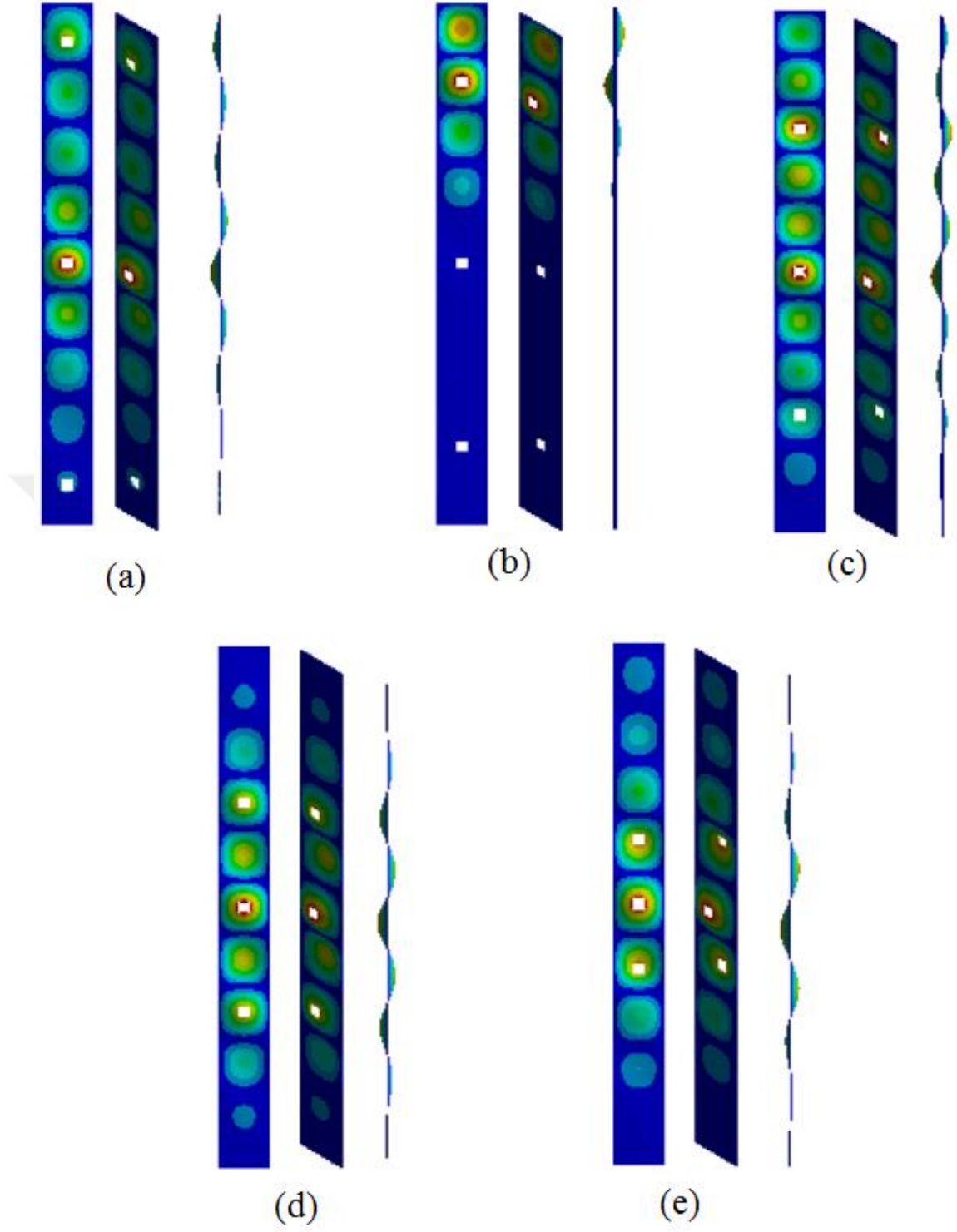
Şekil 4. 15 3 delikli levhada deliklerin y¼kleme kenarından olan uzaklığının ve delik boyutunun burkulma y¼k¼ne etkisi



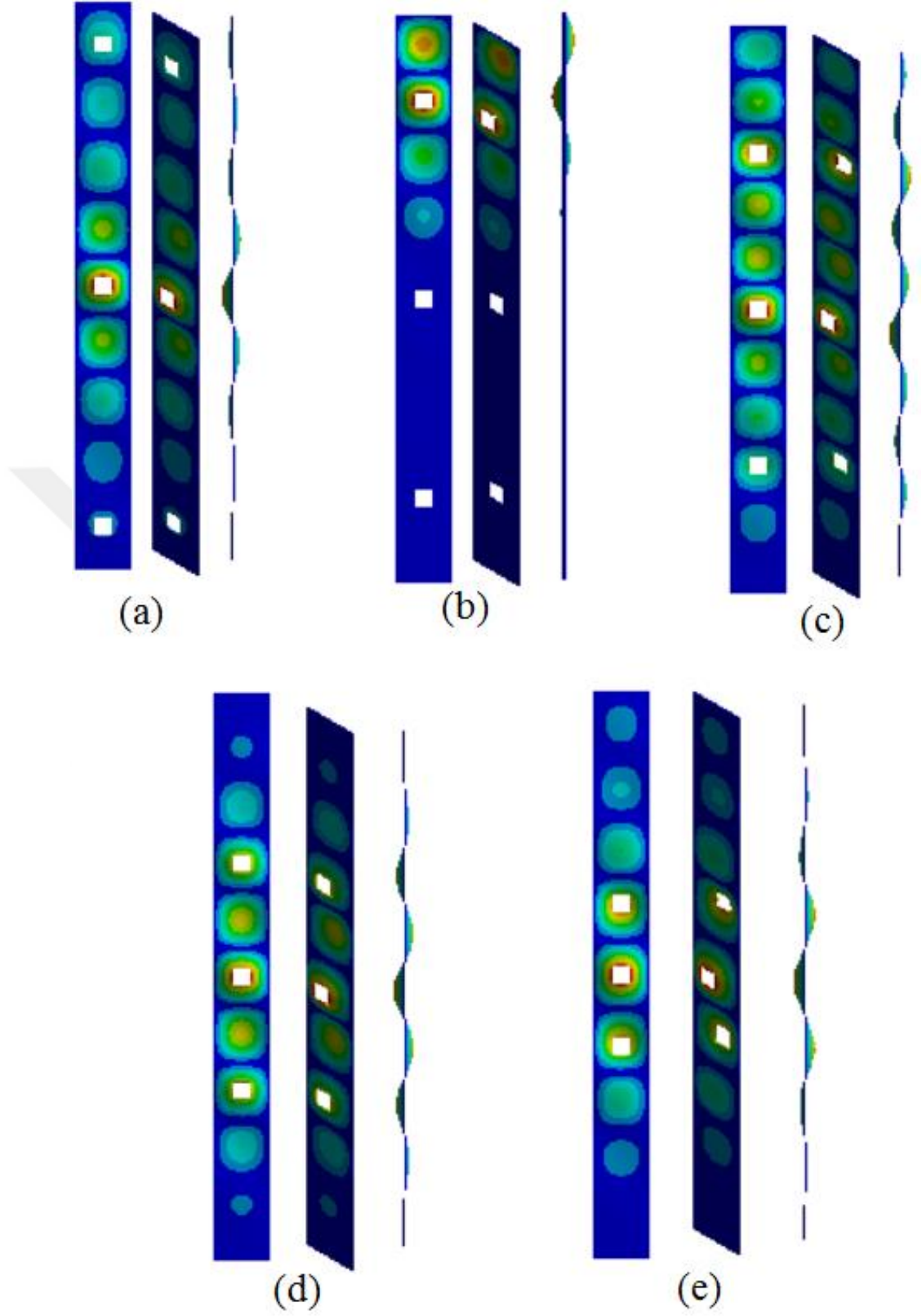
Şekil 4. 16 5 delikli levhada deliklerin y¼kleme kenarından olan uzaklığının ve delik boyutunun burkulma y¼k¼ne etkisi



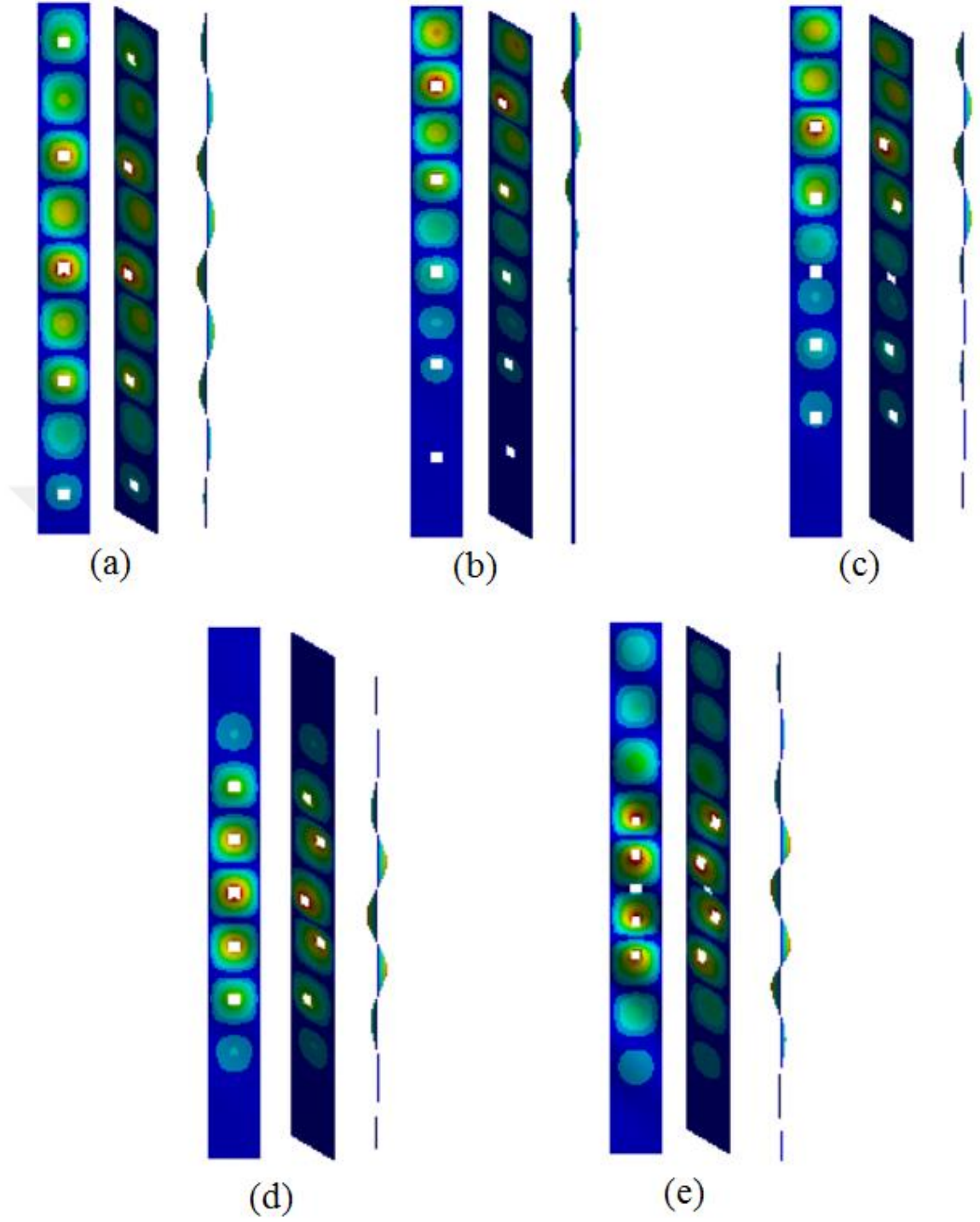
Şekil 4. 17 9 delikli levhada deliklerin y¼kleme kenarından olan uzaklığının ve delik boyutunun burkulma y¼k¼ne etkisi



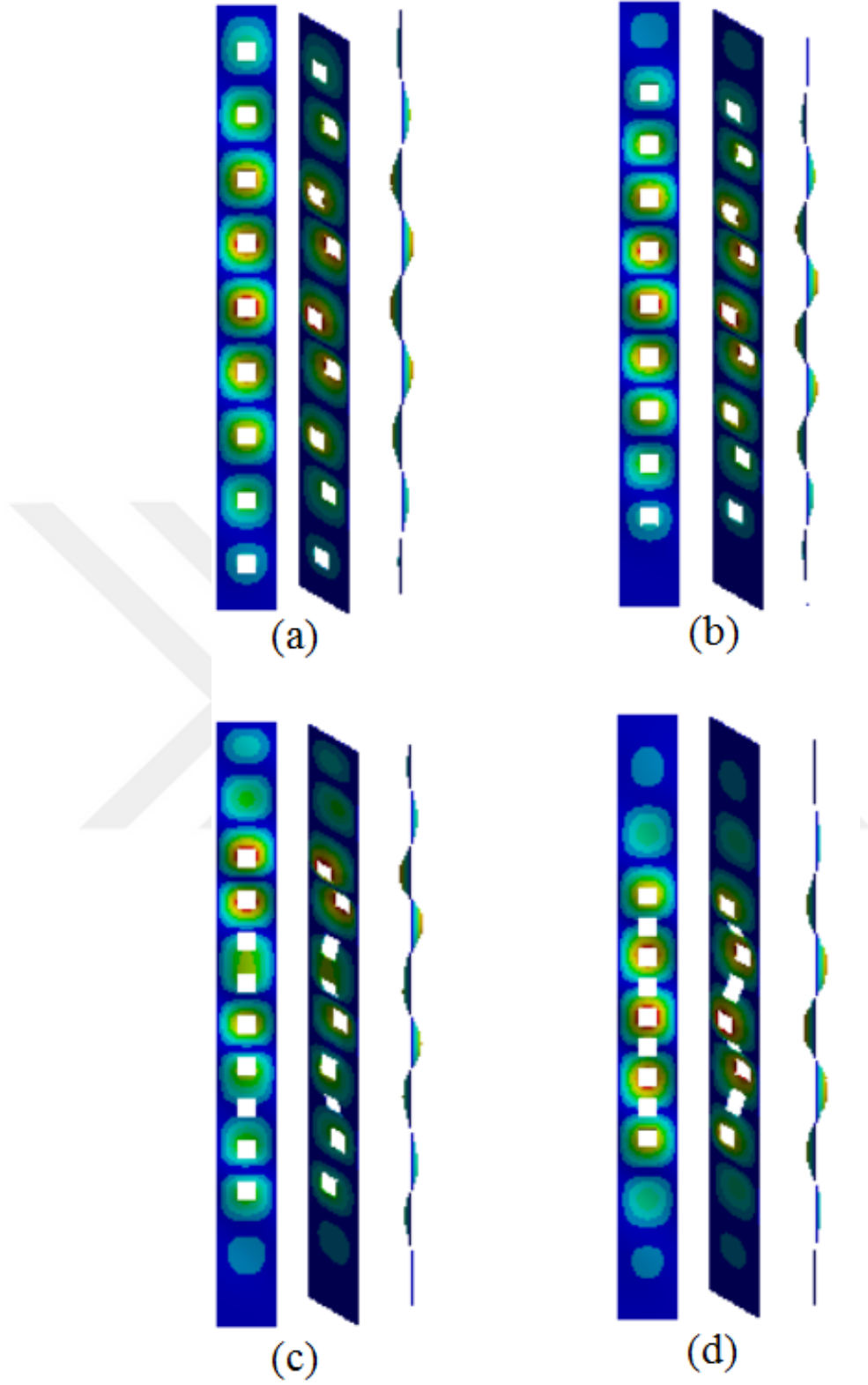
Şekil 4. 18 (Lineer Analiz Sonucu) 3 delikli ve d/h oranı 0,2 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375



Şekil 4. 19 (Lineer Analiz Sonucu) 3 delikli ve d/h oranı 0,3 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375



Şekil 4. 20 (Lineer Analiz Sonucu) 5 delikli ve d/h oranı 0,2 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3 (e) 0,375

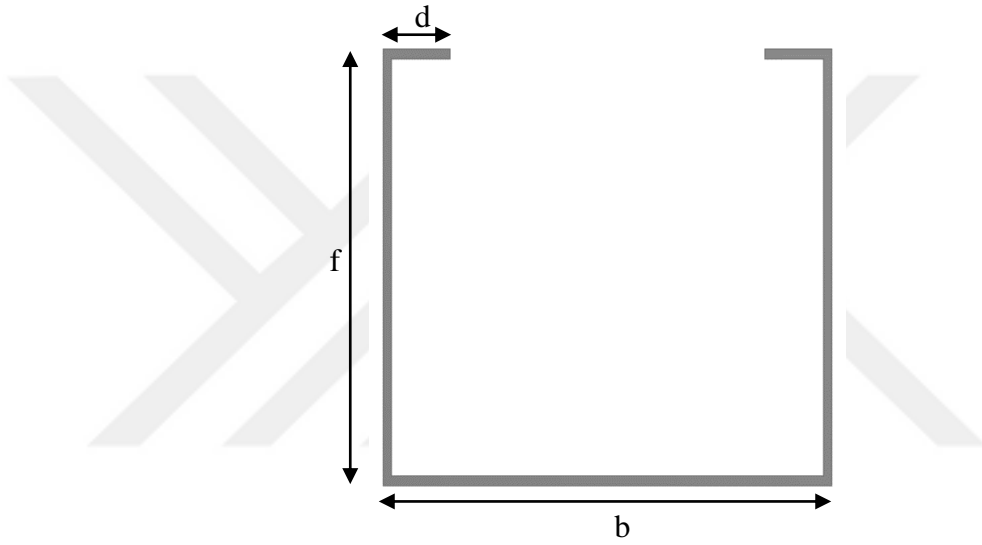


Şekil 4. 21 (Lineer Analiz Sonucu) 9 delikli ve d/h oranı 0,3 olan levhada deliklerin kenarlardan uzaklığının burkulma şekline etkisi, yükleme kenarı ile levha boyu oranı (a) 0,075 (b) 0,15 (c) 0,225 (d) 0,3

4.2 Dikme Analizleri

Bu bölümde dikmelerin flanş ve veb bölgelerindeki güçlendiricilerin etkisi, uzantının flanşa dik olmayıp açılı olması durumunda burkulma yüküne nasıl etkideği ve veb bölgesinde bulunan çift sıra deliklerin bir birlerine yaklaşması ile burkulma yükünün nasıl değişecekleri belirlenmeye çalışılmıştır. Üç farklı geometriye sahip dikmeler için yapılan bu analizlerde her bir dikme farklı burkulma moduna sahiptir.

Dikmelerin kesit geometrileri ve uzunlukları Şekil 4. 22 ve Çizelge 4. 2'de gösterildiği şekildedir.



Şekil 4. 22 Dikmelerin kesit geometrisi

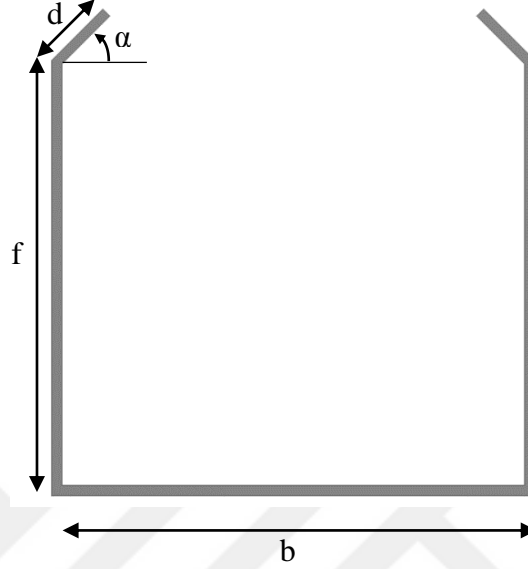
1.dikme lokal burkulma, 2.dikme distorsiyonel ve 3.dikme ise global burkulmaya maruz kalmaktadır.

Çizelge 4. 2 Dikmelerin Geometrik Özellikleri

	1.dikme	2.dikme	3.dikme
d	15 mm	15 mm	18 mm
f	90 mm	70 mm	36 mm
b	100 mm	90 mm	72 mm
L	400 mm	800 mm	1000 mm

4.2.1 Dikmelerdeki Farklı Uzantı Açılarının Burkulma Yüküne Etkisi

Kesit geometrisi Şekil 4. 23' deki gibi olan dikmelerin kenar ölçüleri Çizelge 4. 2'deki belirtildiği şekildedir.



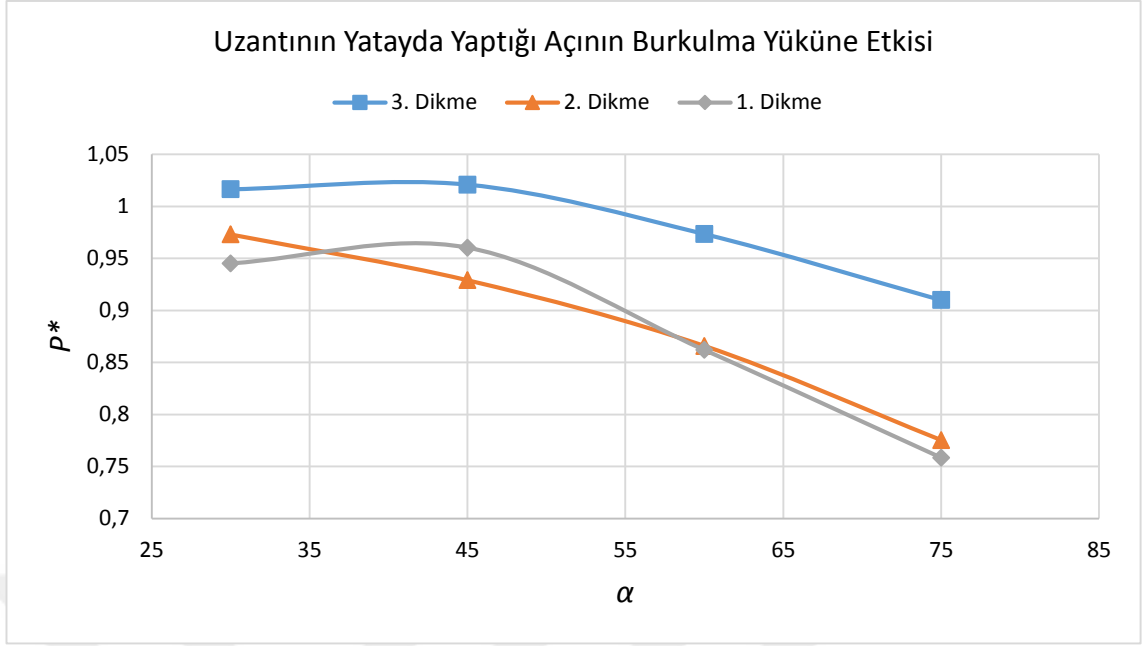
Şekil 4. 23 Açılı uzantıya sahip dikmenin kesit geometrisi

Uzantının yatay ekseninde yaptığı α açısı $30^\circ - 45^\circ - 60^\circ - 75^\circ$ olacak şekilde 4 farklı açı değeri için analizler yapılmış ve α açısının 0° olduğu haldeki burkulma yükleri oranlanarak normalleştirilmiş burkulma yükü P^* - α grafiği sunulmuştur.

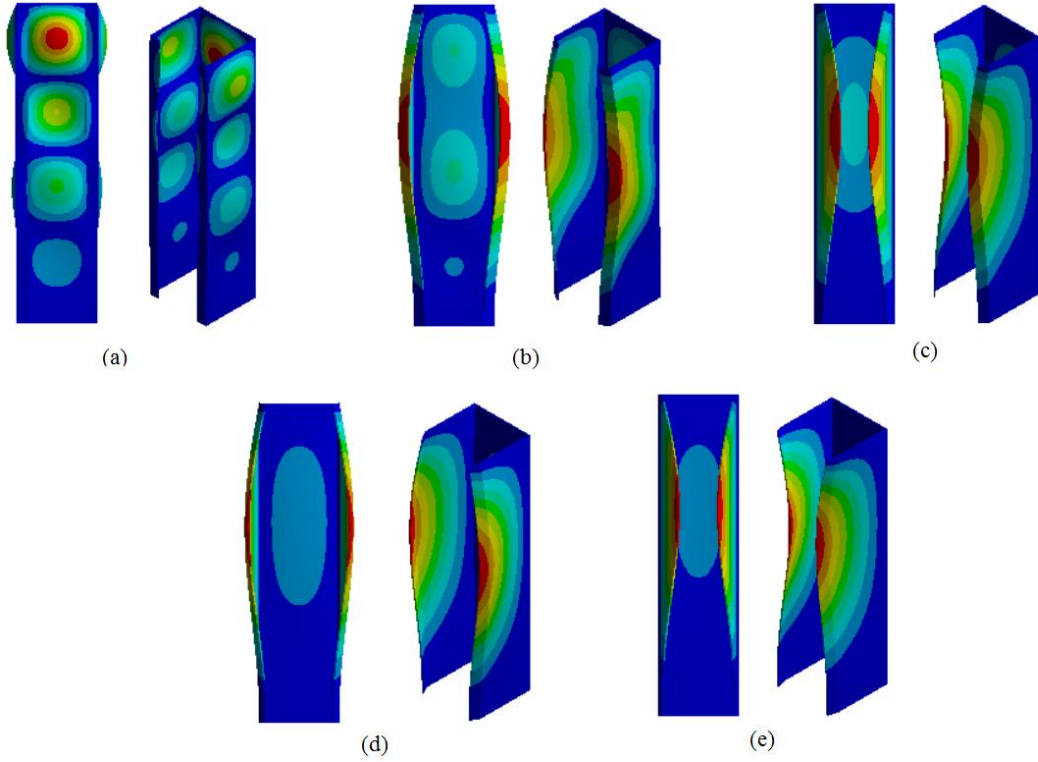
$$P^* = \frac{P_\alpha}{P_{\alpha=0}}$$

Genel olarak α açısının artması ile distorsiyonel burkulma yükünde bir düşüş gözlemlenmektedir. 1. ve 3. dikmelerde bu düşüş 45° sonrasında olmaktadır.

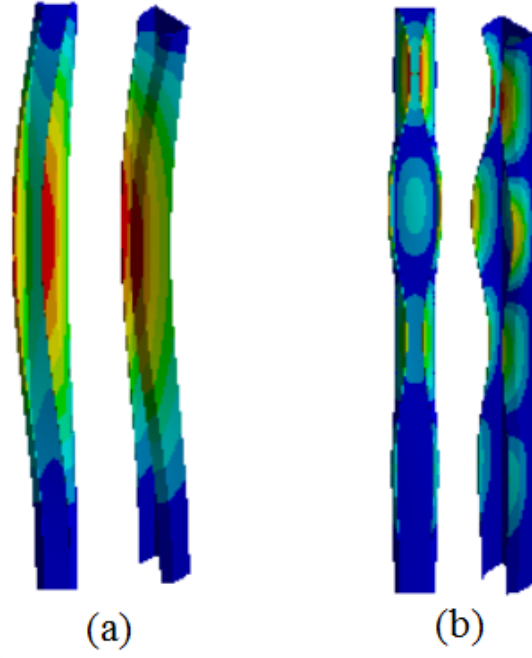
1. dikme lokal burkulmaya girer iken uzantının açılı olması ile birlikte distorsiyonel burkulmaya girmektedir. Benzer olarak Şekil 4. 26' da görüleceği gibi, 3. dikmede global burkulma gözlemlenir iken uzantının 45° den sonraki açılarında burkulma modu değişmektedir.



Şekil 4. 24 Uzantının Yatayda Yaptığı Açının Burkulma Yüküne Etkisi



Şekil 4. 25 1. dikmede uzantının açılı olması ile burkulma şekillerindeki değişim. (a) 0° (b) 30° (c) 45° (d) 60° (e) 75°



Şekil 4. 26 3. dikmede uzantının açılı olması ile burkulma modundaki değişim (a) 45°
(b) 60°

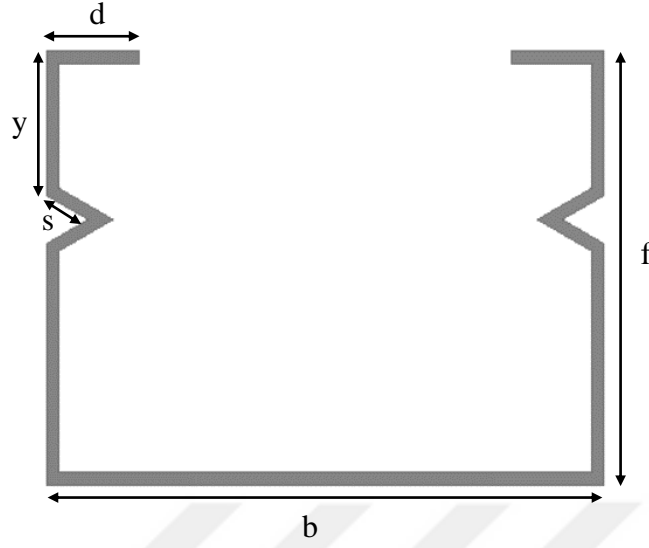
4.2.2 Güçlendirici Etkisinin Burkulma Yüküne Etkisi

Flanş ve veb bölgesinde bulunan güçlendiricilerin burkulma yüküne nasıl etkidiklerinin incelenmesi amacıyla, üçgen ve dikdörtgen güçlendiricilere sahip dikmelerin analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.2.2.1 Flanş Güçlendirmelerinin Burkulma Yüküne Etkisi

P_u dikmenin taşıyabileceği azami yük, $P_{u-stiff}$ güçlendirici bulunmayan dikmenin azami yük kapasitesini, L dikme boyunu, f flanş boyunu ve y ise uzantı ile güçlendirici arasındaki mesafeyi temsil etmektedir.

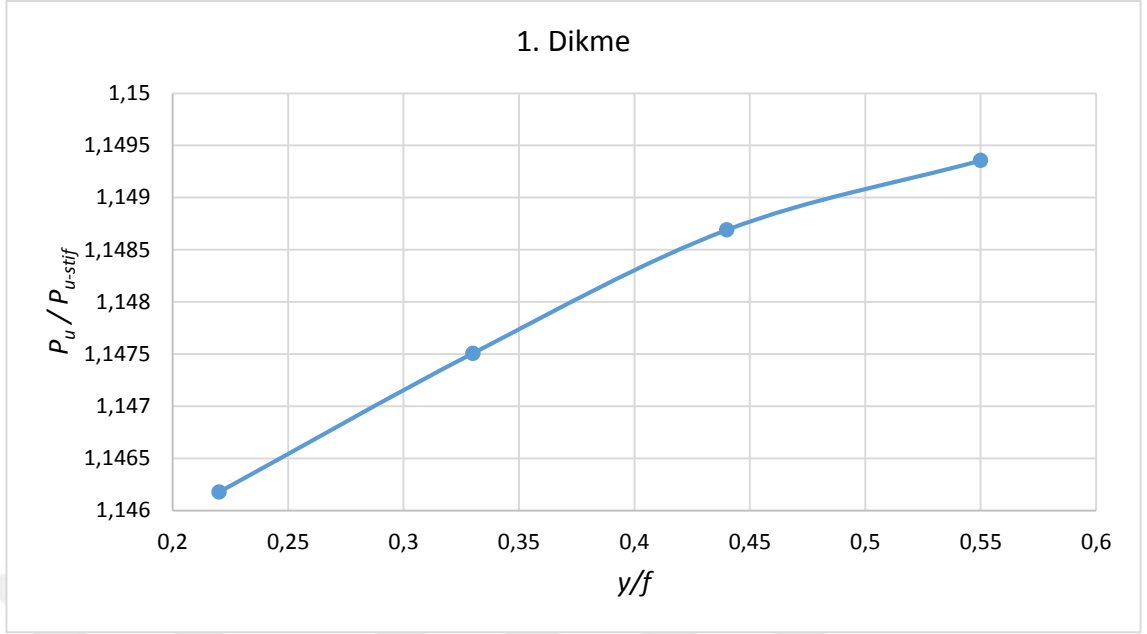
Üçgen güçlendirmenin burkulma yüküne etkisi



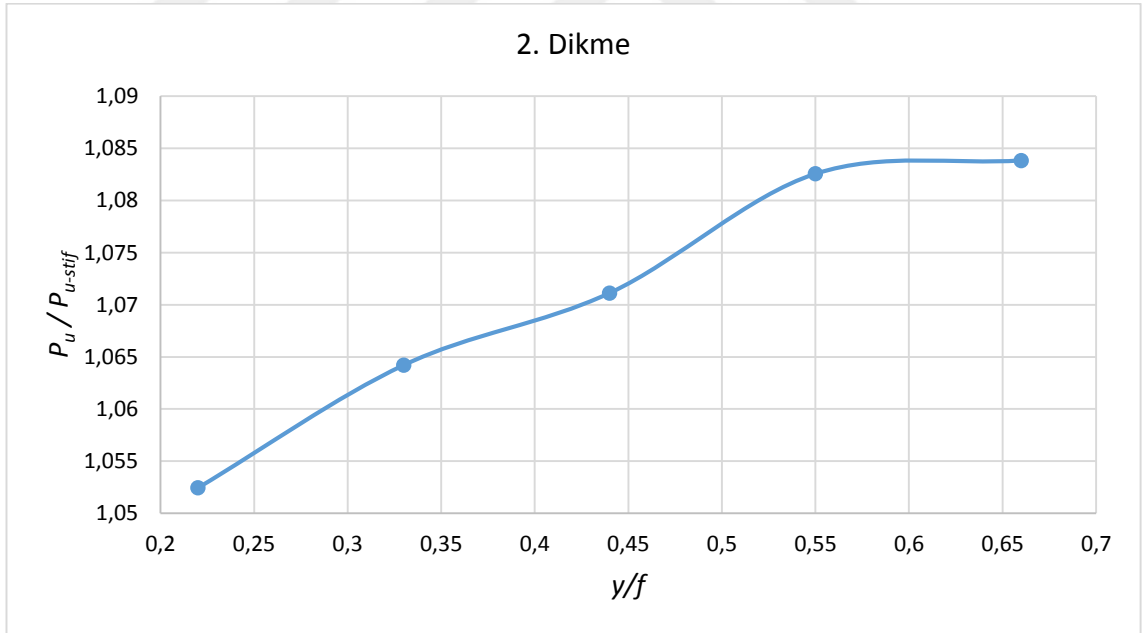
Şekil 4. 27 Flanş bölgesinde üçgen güçlendirici bulunan dikmenin kesit görüntüsü
Güçlendiriciler düşey eksen ile 60° açılı ve bir kenarı s uzunluğundadır. Güçlendiricinin veb elemanına doğru yaklaşması ile taşıma kapasitesindeki değişimi Çizelge 4. 3' deki geometrik uzunluklara sahip 3 farklı dikme için gösterilmiştir. s/f oranı her üç dikmede de sabit olup $1/9$ 'dur.

Çizelge 4. 3 Dikmelerin kesit özellikleri

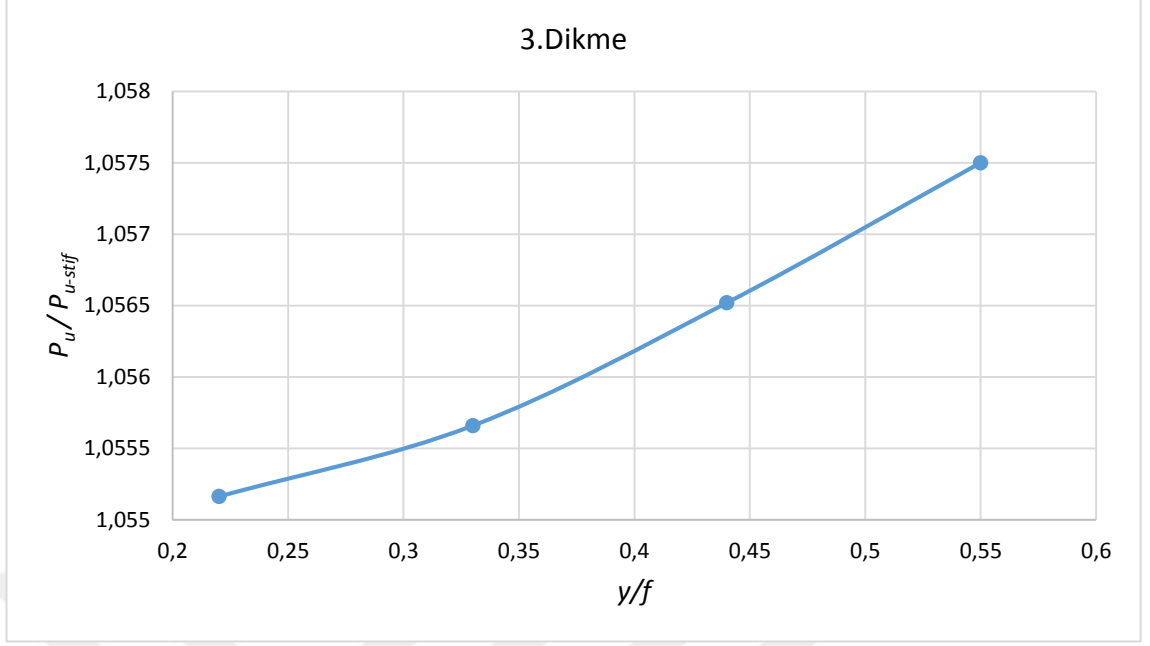
	1. dikme	2. dikme	3. dikme
L[mm]	400	800	1000
f [mm]	90	70	36
s [mm]	10	7,78	4
b [mm]	100	90	72
d [mm]	15	15	18



Şekil 4. 28 $L=400$ mm uzunluğundaki 1. dikmenin flanş bölgesindeki güçlendirici ile burkulma yükündeki değişimi



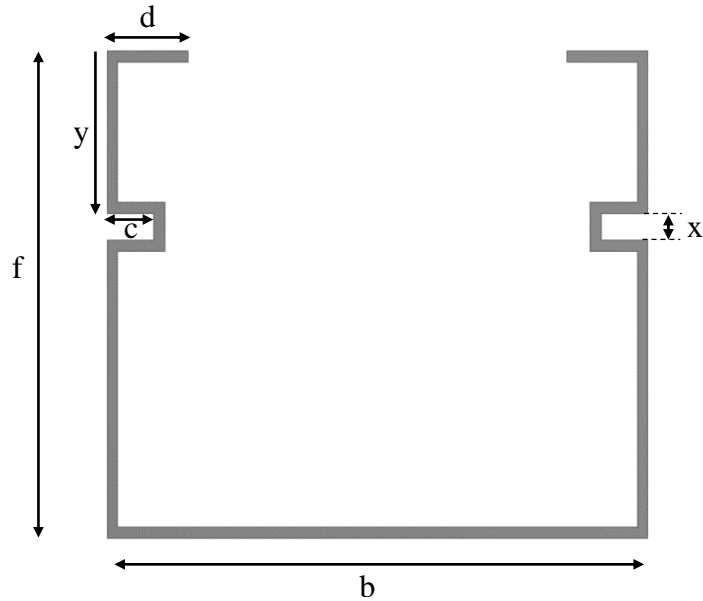
Şekil 4. 29 $L=800$ mm uzunluğundaki 2. dikmenin flanş bölgesindeki güçlendirici ile burkulma yükündeki değişimi



Şekil 4. 30 $L=1000$ mm uzunluğundaki 3. dikmenin flanş bölgesindeki güçlendirici ile burkulma yükündeki değişimi

Flanş bölgesinde bulunan güçlendiricilerin uzantıdan veb elemanına doğru kayması ile taşıma kapasitelerinde bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışın lokal ve global burkulmaya nazaran distorsiyonel burkulmaya maruz dikmede daha fazla olduğu yukarıdaki grafiklerden görülmektedir.

Dikdörtgen güçlendirmenin burkulma yüküne etkisi



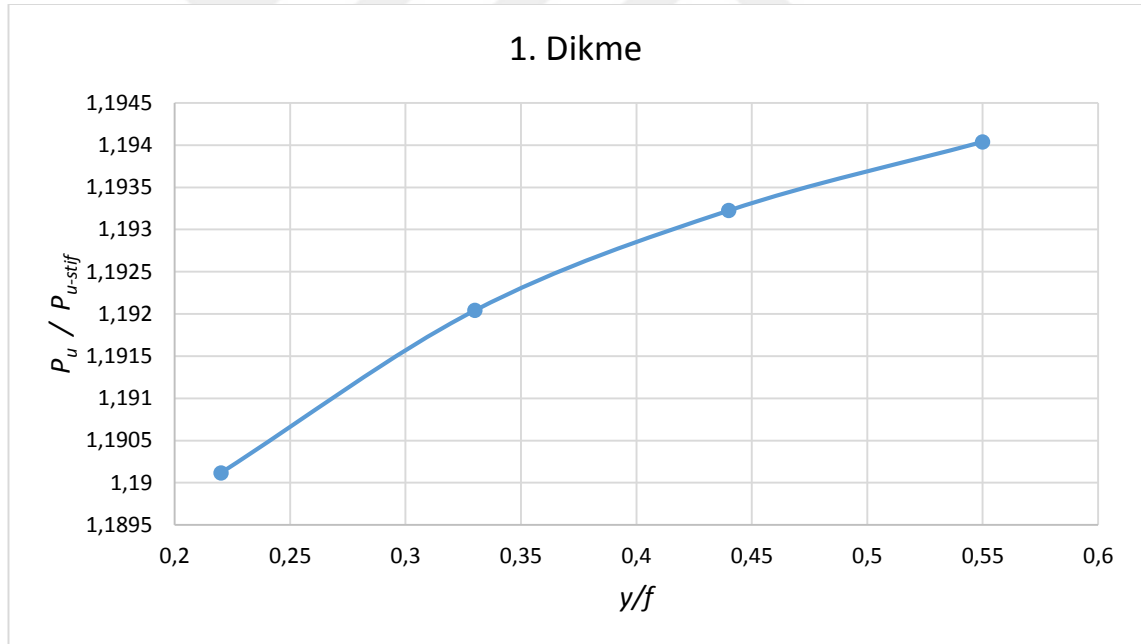
Şekil 4. 31 Flanş bölgesinde dikdörtgen güçlendirici bulunan dikmenin kesit görüntüsü

Güçlendiriciler dikdörtgen şekilli olup geometrik uzunlukları Çizelge 4. 4 'de gösterildiği üzeredir.

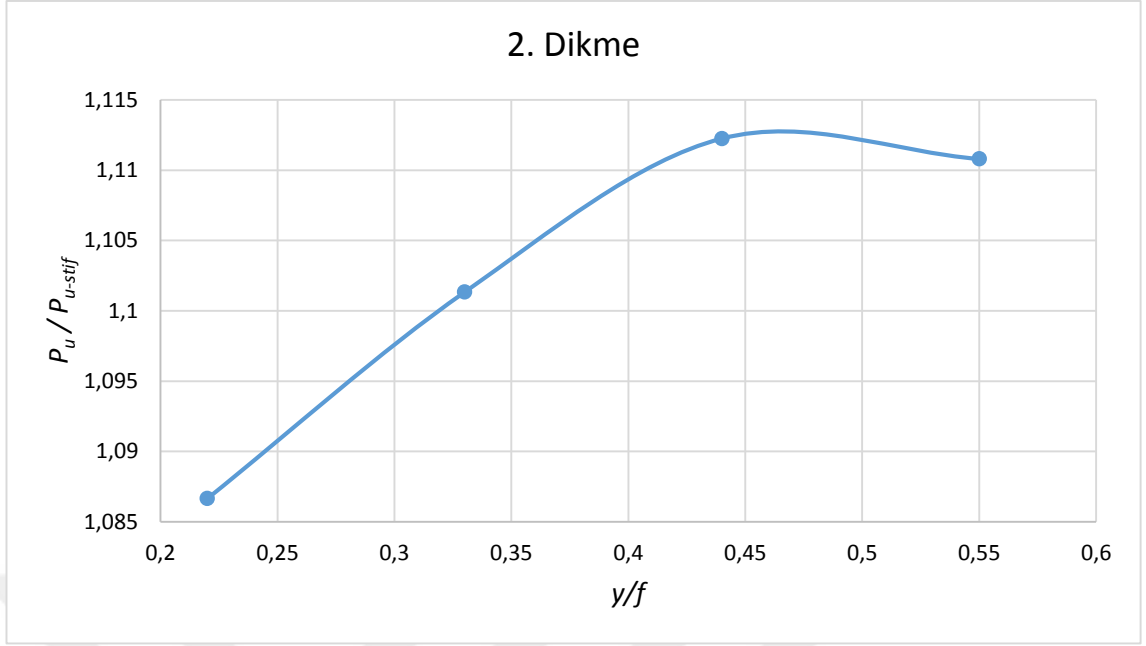
Çizelge 4. 4 Dikmelerin kesit özellikleri

	1. dikme	2. dikme	3. dikme
L[mm]	400	800	1000
f [mm]	90	70	36
x [mm]	5	3,69	2
c [mm]	8,66	6,737	3,464
b [mm]	100	90	72
d [mm]	15	15	18

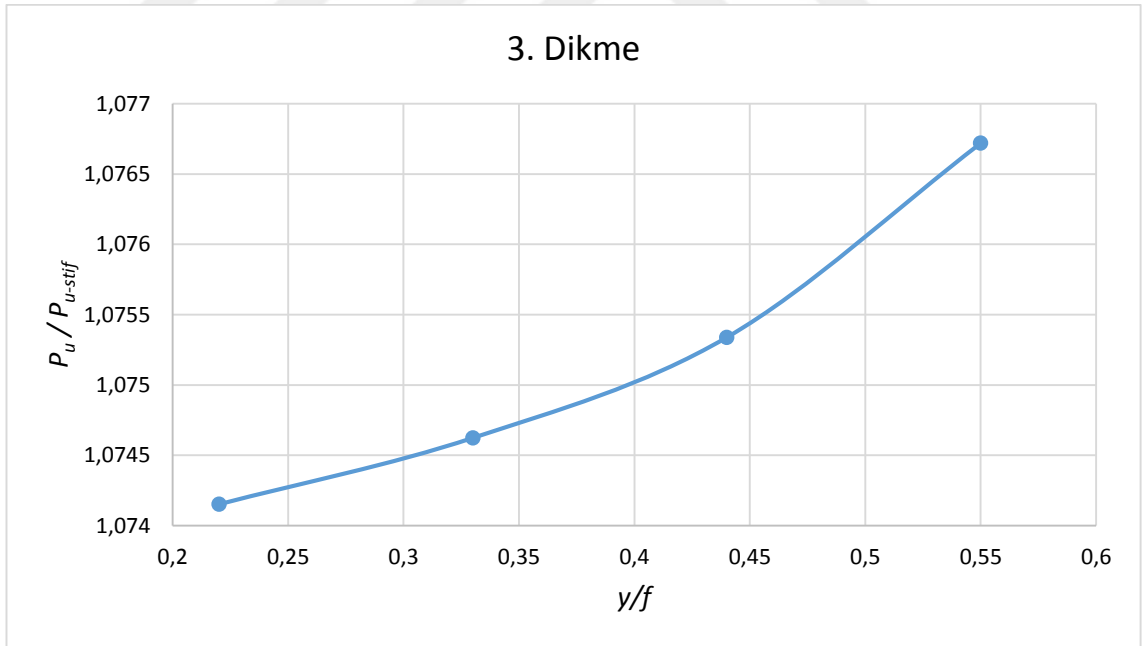
Güçlendiricilerin veb elemana doğru yaklaşması ile burkulma yükündeki değişimleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 4. 32 $L=400$ mm uzunluğundaki 1. dikmenin flanş bölgesindeki dikdörtgen güçlendirici ile burkulma yükündeki değişimi



Şekil 4. 33 $L=800$ mm uzunluğundaki 2. dikmenin flanş bölgesindeki dikdörtgen güçlendirici ile burkulma yükündeki değişimi



Şekil 4. 34 $L=1000$ mm uzunluğundaki 3. dikmenin flanş bölgesindeki dikdörtgen güçlendirici ile burkulma yükündeki değişimi

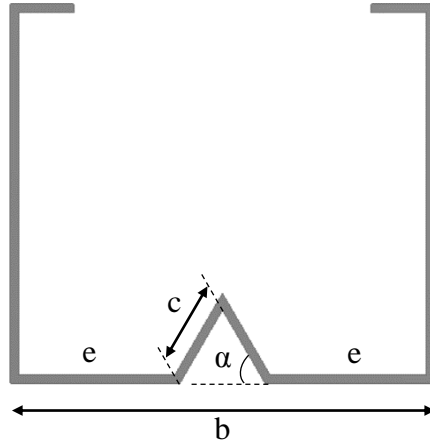
Üçgen güçlendiricilerdeki benzer yorumlar dikdörtgen güçlendiriciler için de yapılabilmektedir.

Her iki tip güçlendirici için de lokal burkulma sırasında veb ile güçlendirici arasında kalan alanın daralması, o bölgede oluşacak olan burkulma yarım dalgalarını azaltmakta ve hatta yok etmektedir. Bu sebepten de lokal burkulmada bir artış gözlemlenmiştir.

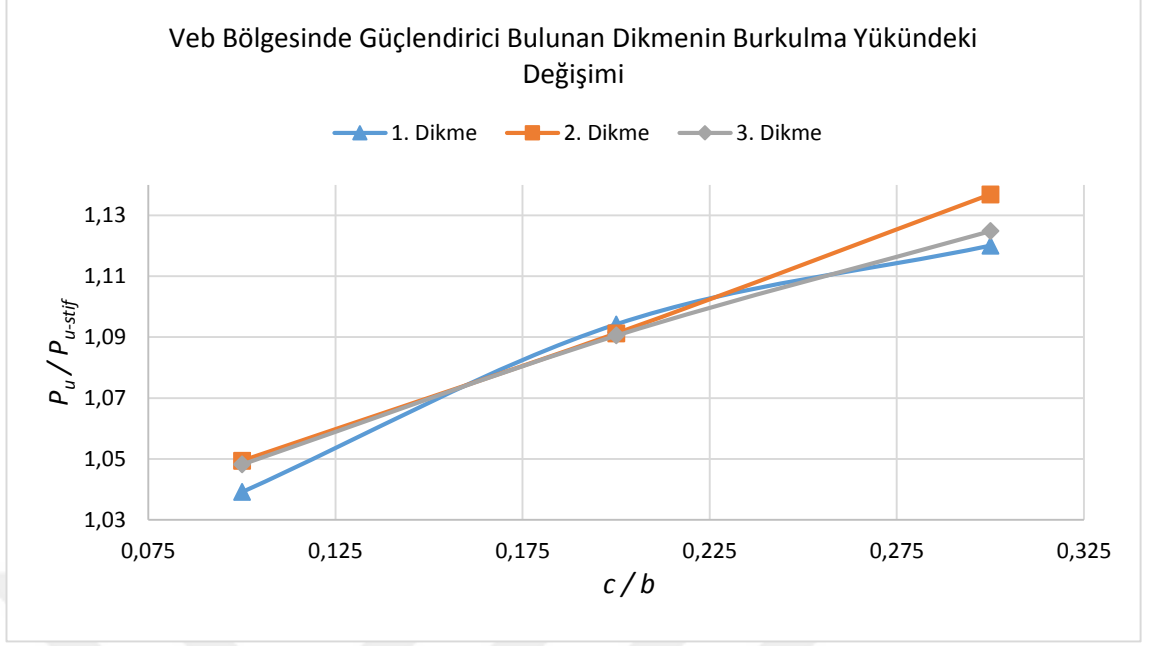
Global burkulmada güçlendiricilerin veb bölgesine doğru kayması atalet momentlerini değiştirmekte, ağırlık merkezine kadar azalırken bu noktadan sonra ağırlık merkezinden uzaklaştıkça ataleti artmaktadır. Buna ilaveten köşeler sebebiyle güçlendirici veb elemana doğru yaklaştıkça efektif genişlik etkilerinden ötürü de bir artış olmaktadır. Bu iki etki göz önüne alındığında taşıma kapasitesinde artış gözlemlenmiştir.

4.2.2.2 Veb Güçlendirmelerinin Burkulma Yüküne Etkisi

P_u dikmenin taşıyabileceği azami yük, $P_{u-stiff}$ güçlendirici bulunmayan dikmenin azami yük kapasitesini, L dikme boyunu, b veb genişliğini ve c ise güçlendiricinin bir kenar uzunluğunu temsil etmektedir. c 'nin boyutunun artması ile taşıma kapasitesindeki değişim Şekil 4. 36'da görülmektedir. Flanşlar arasındaki mesafe (b) ve α açıları sabit tutularak analizler gerçekleştirilmiştir. Güçlendiricinin boyutlarının artması ile birlikte flanş ve güçlendirici arasında kalan mesafe (e) azalmaktadır.



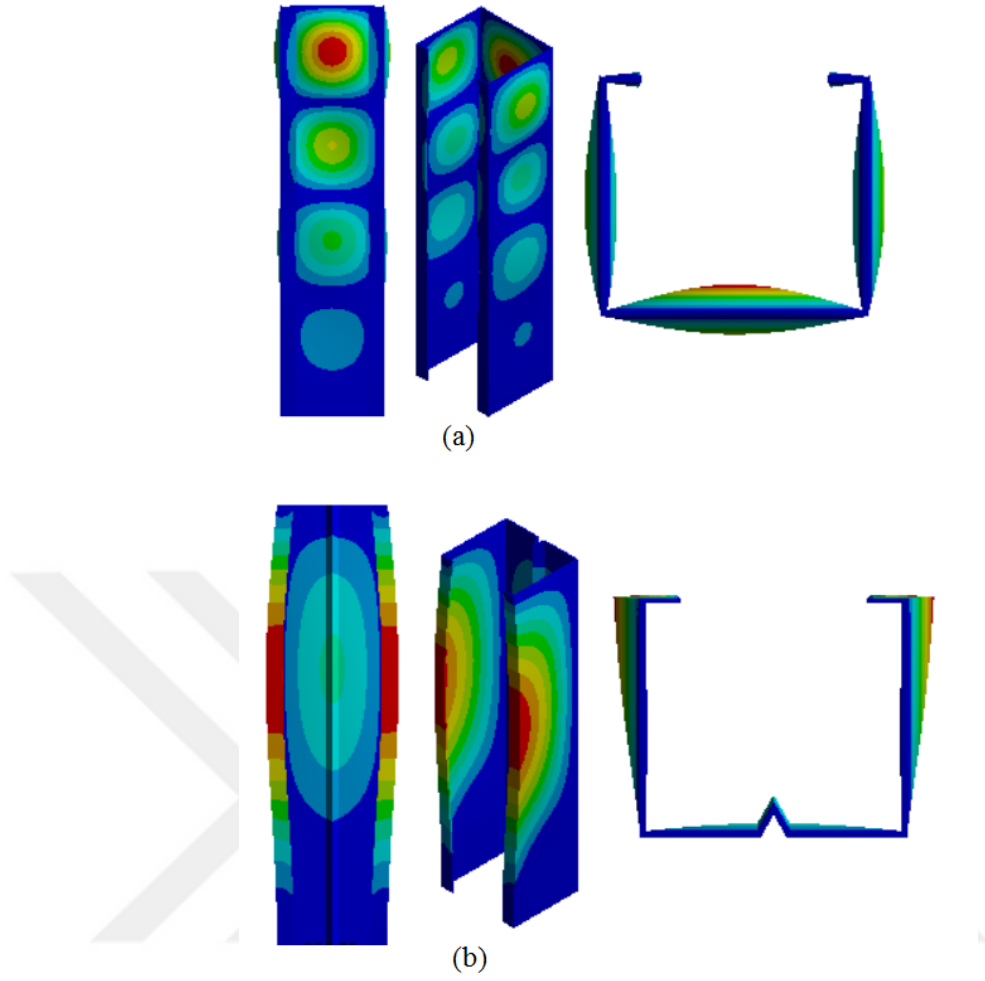
Şekil 4. 35 Veb bölgesinde güçlendirici bulunan dikmenin kesit görüntüsü



Şekil 4. 36 Veb bölgesinde güçlendirici bulunan dikmelerin taşıma kapasitelerindeki değişimi

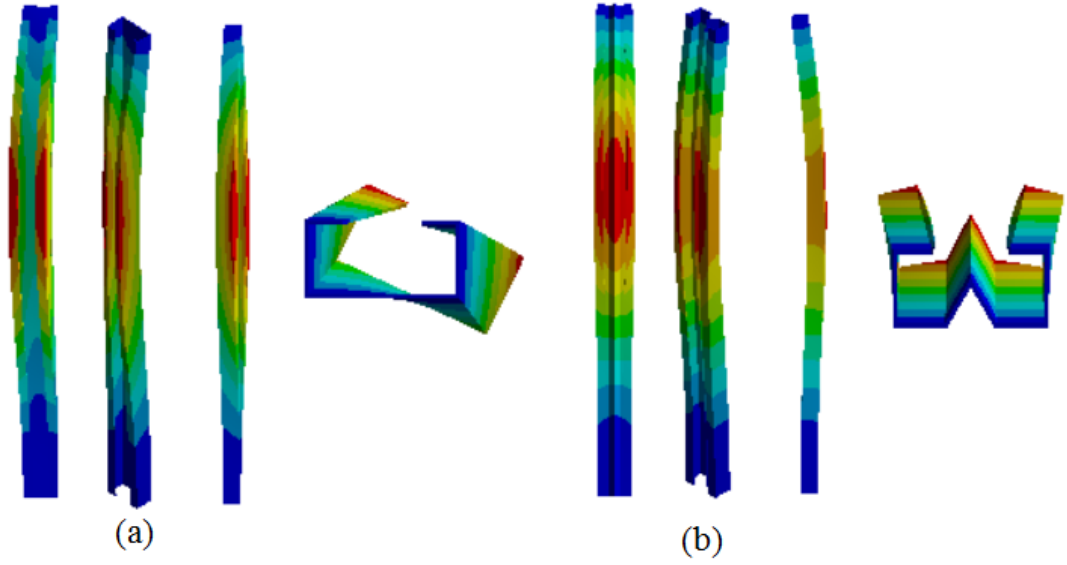
Veb kısmında bulunan güçlendiricinin dikmede taşıma kapasitesini arttırıcı bir etkisi olduğu söylenebilmektedir.

1.dikmede, veb elemanında güçlendirici bulunması durumunda, güçlendirici bulunmuyor iken lokal burkulmaya maruz kalan dikme, güçlendirici ile birlikte o bölgenin lokal burkulmaya girmesini engeller iken dikmenin distorsiyonel burkulmada burkulmasını sağlamaktadır.



Şekil 4. 37 Veb bölgesindeki güçlendiricinin burkulma şekline etkisi (a) Güçlendirici bulunmadığı durum, (b) güçlendirici bulunan durum

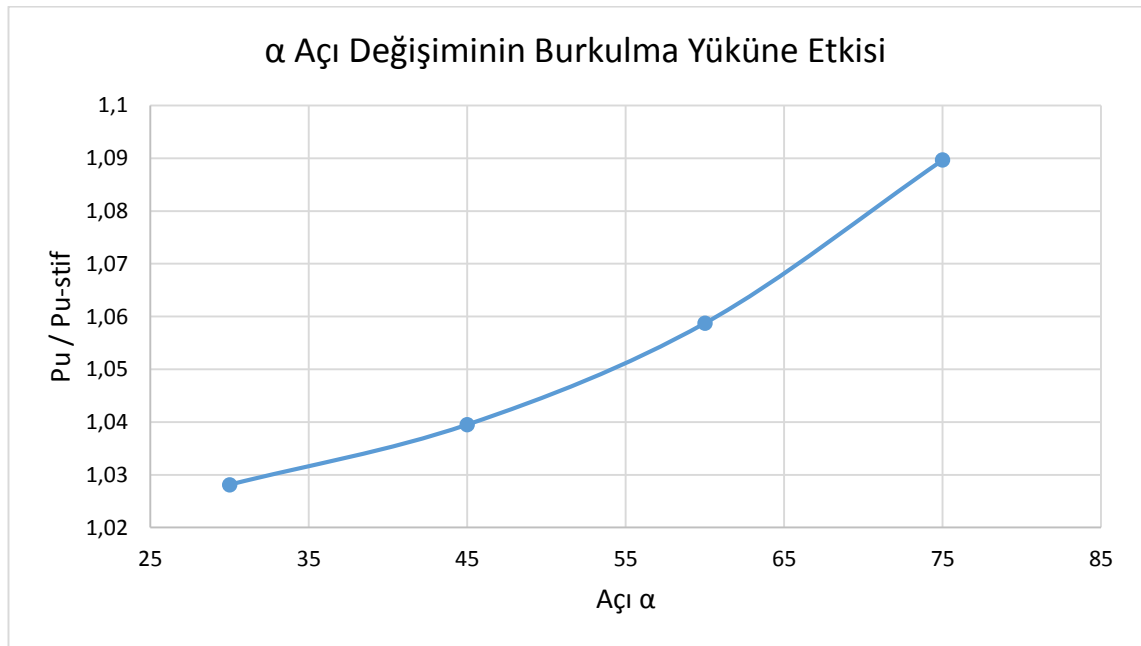
Buna benzer bir durum olarak Şekil 4. 38’de görülen 3.dikmede, c/b oranı 0,3 olan bir güçlendirici bulunması halinde burkulma modunun değiştiği görülmektedir. Bunun sebebi olarak kayma merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki mesafenin güçlendirici varlığı ile azalması şeklinde yorumlanabilmektedir.



Şekil 4. 38 Veb elemandaki güçlendiricinin burkulma şekline etkisi. (a) güçlendirici bulunmadığı durum, (b) güçlendirici bulunduğu durum

Veb elemandaki güçlendiricilerin açı ile değişiminin burkulma yüküne etkisi

Veb elemandaki güçlendiricinin yatayla yaptığı α açısının değişimi ile taşıma kapasitesindeki değişimi görmek amacıyla 1.dikme geometrisi üzerinden $\alpha= 30^\circ - 45^\circ - 60^\circ - 75^\circ$ olacak şekilde analizler gerçekleştirilmiş ve bu bölümde sunulmuştur. Burada iki flanş arasındaki mesafe (b) ve güçlendiricinin kenar uzunluklarının boyutları (c) sabit tutularak analizler gerçekleştirilmiştir.

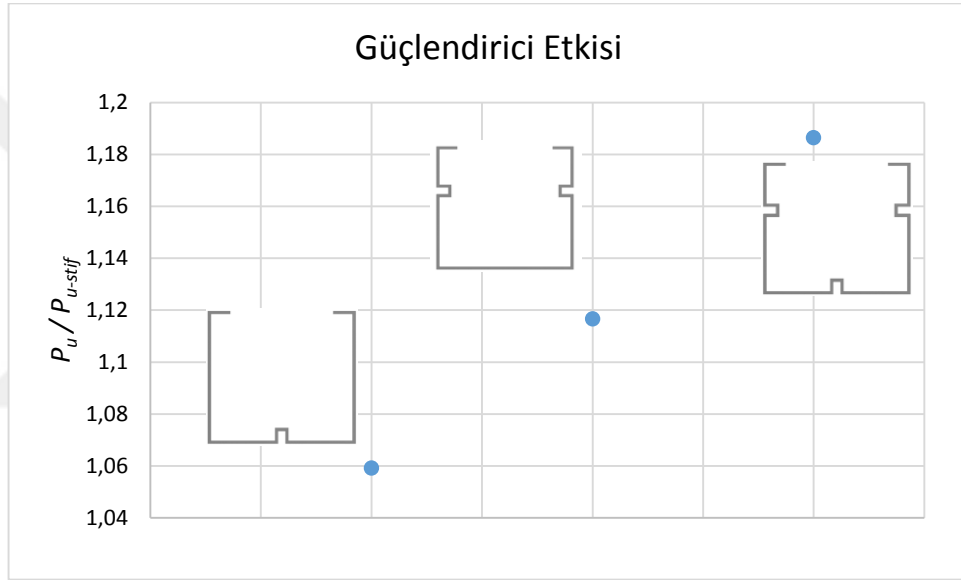


Şekil 4. 39 α açı değişiminin burkulma yüküne etkisi

Güçlendiricinin dikleşmesi ile birlikte taşıyabileceği yük kapasitesi artmaktadır.

4.2.2.3 Hem Veb Hem De Flanş Elemanı Üzerindeki Güçlendiricilerin Burkulma Yüküne Etkisi

Flanş veya veb eleman üzerindeki güçlendiricilerin etkisi önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Her iki eleman üzerinde güçlendirici bulunması durumunda taşıma kapasitesindeki değişim, Şekil 4. 40' da görüleceği üzere, en fazladır. P_u güçlendirme bulunan dikmenin, $P_{u-stiff}$ güçlendirme bulunmayan dikmenin taşıma kapasitelerini temsil etmektedir. Analizlerin kurgulanması aşamasında her üç tip dikmede de upgeom komutunda kullanılan çarpan 1,8 olarak alınmıştır.

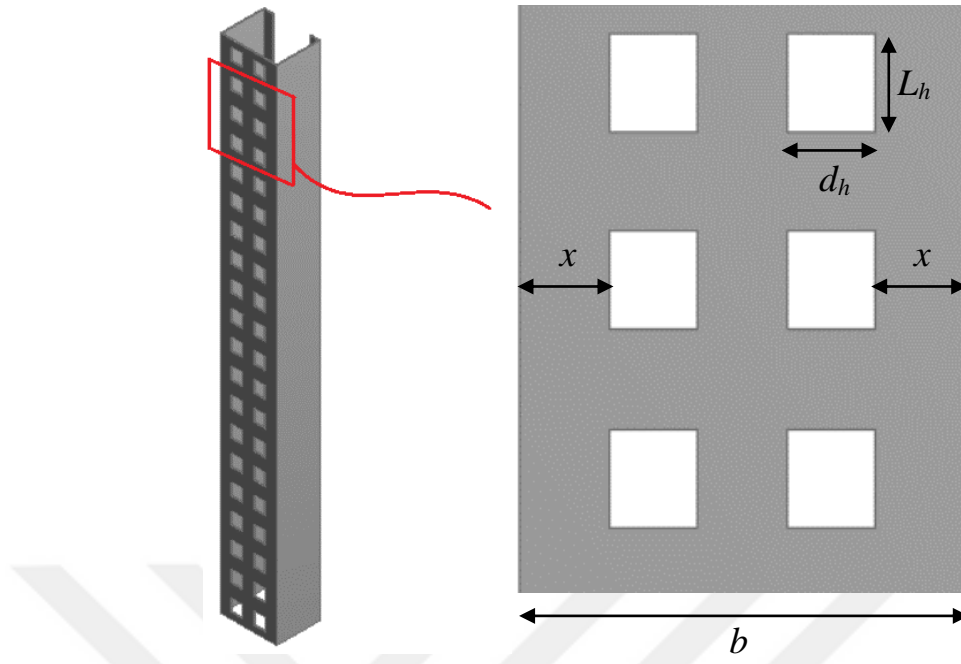


Şekil 4. 40 Güçlendirici bulunması durumunda burkulma yükündeki değişim

Hem veb hem de flanş bölgesindeki güçlendirici bulunması taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Bunun sebebi kesit alanındaki artış ve efektif alanların artması olarak yorumlanabilmektedir.

4.2.3 Veb Eleman Üzerinde Bulunan Deliklerin Birbirlerine Yaklaşması İle Burkulma Yükündeki Değişimi

Dikmenin veb eleman üzerindeki deliklerin, yan kenarlardan veb elemanın ortasına doğru hareketi ile farklı tip burkulma modlarında, burkulma yüküne nasıl etkideğini incelemek amacı ile bu bölümde gerçekleştirilen non-lineer analizlerin sonuçları sunulmuştur.



Şekil 4. 41 Veb eleman üzerindeki deliklerin konumlarının gösterimi

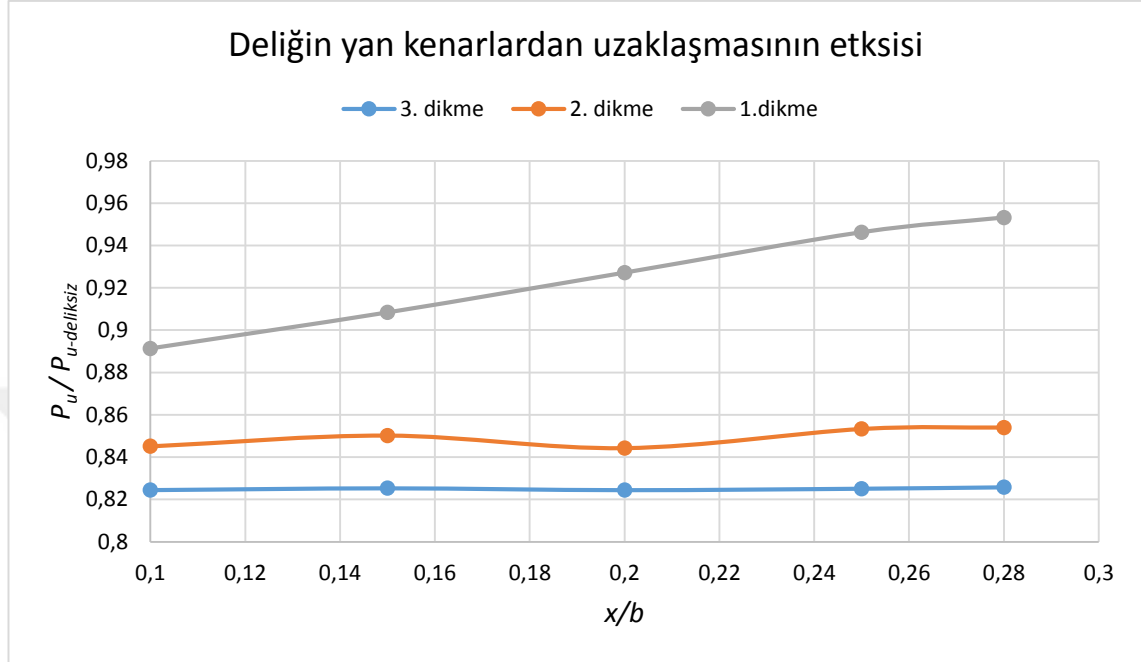
Çizelge 4. 5’ te belirtilen geometrik özelliklere sahip 3 farklı dikme için analizler yapılmıştır. L_h deliğin boyunu temsil etmekte olup 20 mm’dir. d_h delik genişliği olup veb genişliğinin beşte biridir ($d_h=b/5$). x delikler ile yan kenar arasında kalan mesafedir.

Çizelge 4. 5 Dikme ve delik geometrisi

	1.dikme	2.dikme	3.dikme
uzantı	15 mm	15 mm	18 mm
flaş	90 mm	70 mm	36 mm
veb	100 mm	90 mm	72 mm
dikme boyu	400 mm	800 mm	1000 mm
d_h	20 mm	18 mm	14,4 mm
L_h	20 mm	20 mm	20 mm

P_u delikli dikmenin taşıyabileceği azami yük, $P_{u-deliksiz}$ üzerinde delik bulunmayan dikmenin azami yük kapasitesini temsil etmektedir.

Diğer parametrelerin incelendiği analizlerin aksine, burada lineer analizden non-lineer analize geçişte yaşanan problemlerden ötürü mesh boyutu 4,5 mm olan üçgen mesh ağ (tetrahedrons mesh) yapısı oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. 42 Veb eleman üzerinde bulunan deliklerin yan kenarlardan veb eleman ortasında doğru bulunması ile dikmenin taşıma kapasitesindeki eğişim

Distorsiyonel ve global burkulmaya maruz 2. ve 3. dikmelerde bulunan delik konumlarının yan kenarlardan, orta bölgeye doğru ilerlemesi taşıma kapasitesinde lokal burkulmaya maruz 1. dikmeye nazaran daha düşük bir etki gösterdiği Şekil 4. 42'den görülmektedir. Lokal burkulmaya bu şekilde etkisi efektif genişlik ile açıklanabilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Levha üzerinde bulunan deliklerin burkulma yarım dalgalarının üzerinde bulunması burkulma yükünü azaltmaktadır. Ayrıca burkulma yarım dalgaları levha üzerinde bulunan delik bölgesine yakın yerlerde oluşmaktadır ve en yüksek gerilme bu delik bölgesindedir. İlâveten levha üzerindeki delikler oluşacak olan burkulma yarım dalgalarının sayısını da değiştirebilmekte, bazı bölgelerde sönümlenmektedir. Ayrıca delik şekilleri de burkulma yükünü değiştirici yönde etki etmektedir.

Dikmelerde bulunan uzantıların yatayda belli bir açı ile bulunması burkulma yükünü ve hatta bazı durumlarda burkulma modunu değiştirmektedir. Distorsiyonel burkulmada açının artması taşıma kapasitesinde azaltıcı yönde etki etmektedir. Lokal ve global burkulmada çok etki etmiyor iken, burkulma modundaki değişim ile o noktadan sonra bir düşüş gözükmemektedir.

Flanş üzerinde bulunan güçlendiriciler taşıma kapasitesinde her üç tip burkulma modunda da bir artışa sebep olmaktadır. İlâveten güçlendirici geometrisi üçgen ve dikdörtgen olan güçlendiriciler kıyaslandığında, üçgen güçlendiricinin daha az taşıma kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Flanş üzerindeki güçlendiricilerin konumunun, uzantıdan veb elemana doğru kayması ile global ve lokal burkulmaya maruz dikmelerde taşıma kapasitesinde artış gözlemlenmiştir. Distorsiyonel burkulmaya maruz dikmede ise bir noktaya kadar keza artım gözlemlenmiştir.

Veb elemanın üzerinde bulunan güçlendiriciler taşıma kapasitesini arttırmaktadır ve bu güçlendiricilerin veb elemana dik ekseninde flanş doğrultusunda boyunun uzaması da taşıma kapasitesini olumlu yönde etkilemektedir. İlâveten veb eleman üzerinde bulunan güçlendiriciler dikmenin burkulma modunu değiştirebilmektedir.

Hem flanş hem de veb eleman üzerinde güçlendirici bulunması sadece flanş ve sadece veb eleman üzerinde güçlendirici bulunması durumuna göre daha fazla taşıma kapasitesine sahiptir.

Dikmelerin veb eleman üzerinde çift sıra delik bulunması durumunda taşıma kapasitesindeki en fazla düşüş, distorsiyonel ve global burkulmaya maruz dikmelerde

görülmüştür. Ancak deliklerin yan kenardan uzaklaşarak dikmenin ortasına doğru yoğunlaşması ile lokal burkulmaya maruz dikmede değişime sebep olur iken diğer distorsiyonel ve global burkulmaya maruz dikmelerde çok da etkili olmadığı gözlemlenmiştir.



KAYNAKLAR

- 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
- Bambach, M.R., Rasmussen, K.J.R. 2004.** Effective widths of unstiffened elements with stress gradient. *Journal Of Structural Engineering*, 130(10) 1611-1619
- Chen, J., He, Y., Jin, W.L.2010.** Stub column tests of thin-walled complex section with intermediate stiffeners. *Thin-Walled Structures*, 48 (2010) 423-429
- Davies, J.M. , Leach, P. , Taylor, A. 1997.** The design of perforated cold-formed steel sections subject to axial load and bending. *Thin-Walled Structures*, 29 (1997) 141-157
- Davies, J.M. 2000.** Recent research advances in cold-formed steel structures. *Journal of Constructional Research*. 55 (2000) 267-288
- Del Coz Diaz, J.J., Garcia Nieto, P.J., Vilan Vilan, J.A., Suarez Sierra, J.L.2011.** Non-linear analysis and calculation of the performance of a shelving protection system by FEM. *Applied Mathematics and Computation*, 218 (2011) 2365-2376
- El-Sawy, K.M., Nazmy A.S. 2001.** Effect of aspect ratio on the elastic buckling of uniaxially loaded plates with eccentric holes. *Thin-Walled Structures*, 39 (2001) 983–998
- El-Sawy, K.M., Martini, M.I. 2007.** Elastic stability of bi-axially loaded rectangular plates with a single circular hole. *Thin-Walled Structures*, 45 (2007) 122–133
- Gilbert, B.P. , Hancock, S.B., Bailerres, H., Hijaj,M. 2014.** Thin-walled timber structures An investigation. *Construction and Building Materials*, 73 (2014) 311–319
- Gunalan, S., Heva, Y.B., Mahendran, M. 2015.** Local buckling studies of cold-formed steel compression members at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*. 108 (2015) 31–45
- Guo, S., Li, D., Zhang, X., Xiang, J. 2014.** Buckling and post-buckling of a composite C-section with cutout and flange reinforcement. *Composites*, 60 (2014) 119–124
- 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
- He, Z., Zhou, X., Liu, Z., Chen, M. 2014.** Post-buckling behaviour and DSM design of web-stiffened lipped channel columns with distortional and local mode interaction. *Thin-WalledStructures*, 84(2014)189-203
- Kang, T.H.K., Biggs, K.A., Ramseyer C. 2013.** Buckling Modes of Cold-Formed Steel Columns. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 4, August 2013

- Komur, M.A., Sonmez, M. 2008.** Elastic buckling of rectangular plates under linearly varying in-plane normal load with a circular cutout. *Mechanics Research Communications*. 35 (2008) 361–371
- Kulatunga, M.P., Macdonald, M. 2013.** Investigation of cold-formed steel structural members with perforations of different arrangements subjected to compression loading. *Thin-Walled Structures*, 67 (2013) 78-87
- Kwon, Y.B., Kim, B.S., Hancock, G.J.2009.** Compression tests of high strength cold-formed steel channels with buckling interaction. *Journal Of Constructional Steel Research*, 65 (2009) 278-289
- Lee, H. 2012.** Finite element simulations with ANSYS workbench 14. SDC Publications. USA,602pp
- Ma, Q., Wang, P. 2013.** Simplified stability design method for he stiffened plate with slotted holes under uniform compression. *Thin-WalledStructures*, 68(2013)35–41
- Moaveni, S. 2003.** Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS. Pearson Education Inc., USA, 822pp
- Moen, C.D., Schafer, B.W. 2008.** Experiments on cold-formed steel columns with holes. *Thin-Walled Structures*, 46 (2008) 1164-1182
- Moen, C.D. , Schafer, B.W. (2009).** Elastic buckling of thin plates with holes in compression or bending , *Thin-Walled Structures* , 47 (2009) 1597–1607
- Omurtag, M.H. 2012.** Mukavemet Cilt 2. Birsen Yayinevi, İstanbul, 480 s.
- Pastor, M.M., Casafont, M., Bonada, J., Roure, F. 2014.** Imperfection amplitudes for nonlinear analysis of open thin-walled steel cross-section used in rack column uprights. *Thin-Walled Structures*, 76 (2014) 28-41
- Ranawaka, T. 2006.** Distortional buckling behaviour of cold-formed steel compression members at elevated temperatures. *Ph.D. Thesis*, School of Urban Developments Queensland University of Technology
- Sayman, O., Karakuzu, R., Aktaş, A. 2012.** Mukavemet 2. Sürat Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 301 s.
- Schafer, B.W., Peköz, T. 1999.** Laterally braced cold-formed steel flexural members with edge stiffened flanges. *Journal Of Structural Engineering*. 10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:2(118), 118-127
- Schafer, B.W. (2002).** Local, Distortional, and Euler Buckling in Thin-walled Columns. ASCE, *Journal of Structural Engineering*. 128 (3) 289-299.
- Smith, H. S., Moen, C.D. 2014.** Finite strip elastic buckling solutions for thin-walled metal columns with perforation patterns. *Thin-WalledStructures*. 79 (2014) 187–201
- Tajdari, M., Nezamabadi, A.R., Naeemi, M., Pirali, P. 2011.** The Effects of Plate-Support Condition on Buckling Strength of Rectangular Perforated Plates under Linearly Varying In-Plane Normal Load. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*. Vol:5, No:6, 2011

- Timoshenko, S.P., Gere, J.M. 1961.** Theory of elastic stability. McGraw-Hill Inc., New York, 541pp.
- Venkatraman, B., Patel, S.A. 1970.** Structural mechanics with introductions to elasticity and plasticity. McGraw-Hill Inc., USA, 647 pp.
- Yoo, C.H., Lee, S.C. 2011.** Stability of structures: principles and applications. Elsevier Inc., UK, 523pp
- Yu, C., Schafer, B.W. 2007.** Effect of Longitudinal stress gradients on elastic buckling of thin plates. *Journal Of Engineering Mechanics*, 133(4), 452–463
- Yu, W. 1973.** Cold-formed steel structures. McGraw-Hill Inc., New York, 463pp.
- Zhou, Z., Nishida, A., Kuwamura, H. 2011.** Applicability of Finite Element Method to Collapse Analysis of Steel Connection under Compression. *Progress in Nuclear Science And Technology*, Vol. 2, pp.481-485 (2011)
- Zhou, X., Liu, Z., He, Z. 2015.** General distortional buckling formulae for both fixed-ended and pinned-ended C section columns. *Thin-Walled Structures*, 94(2015)603-611
- Ziemian, R.D. 2010.** Guide to stability design criteria for metal structures. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 1078pp

EKLER

EK 1 Eğilmeli Burulmalı Burkulma Denkleminin Çıkarılması

$$EI_x v^{lv} + Pv^u + Px_0 \phi^u = 0 \quad (1)$$

$$EI_y u^{lv} + Pu^u - Py_0 \phi^u = 0 \quad (2)$$

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

Burada sınır şartlarını sağlayacak şekilde bir u, v ve ϕ tanımlamaları yapılırsa ve ilgili denklemlerde yazılırsa

$$\begin{aligned} u &= A \sin\left(\frac{\pi Z}{L}\right) \\ v &= B \sin\left(\frac{\pi Z}{L}\right) \\ \phi &= C \sin\left(\frac{\pi Z}{L}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$EI_x B \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \sin\left(\frac{\pi Z}{L}\right) - PB \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi Z}{L}\right) - Px_0 C \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi Z}{L}\right) = 0$$

$$EI_y A \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \sin\left(\frac{\pi Z}{L}\right) - PA \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi Z}{L}\right) + Py_0 C \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi Z}{L}\right) = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} EC_w C \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \sin\left(\frac{\pi Z}{L}\right) + (GJ - Pr_0^2) C \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi Z}{L}\right) + Py_0 A \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi Z}{L}\right) \\ - Px_0 B \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi Z}{L}\right) = 0 \end{aligned}$$

$k = \pi/L$ dönüşümü yapılarak

$$EI_x B k^2 - PB - Px_0 C = 0 \quad (6)$$

$$EI_y A k^2 - PA + Py_0 C = 0 \quad (7)$$

$$EC_w C k^2 + (GJ - Pr_0^2) C + Py_0 A - Px_0 B = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
(EI_y k^2 - P)A + Py_0 C &= 0 \\
(EI_x k^2 - P)B - Px_0 C &= 0 \\
(EC_w k^2 + GJ - Pr_0^2)C + Py_0 A - Px_0 B &= 0
\end{aligned} \tag{9}$$

Denklem 9 matris formatında yazılır ve çözüm şu şekilde yapılır.

$$\begin{bmatrix} EI_y k^2 - P & 0 & Py_0 \\ 0 & EI_x k^2 - P & -Px_0 \\ Py_0 & -Px_0 & EC_w k^2 + GJ - Pr_0^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = 0 \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
P_y &= EI_y k^2 \\
P_x &= EI_x k^2 \\
P_\phi &= \frac{1}{r_0^2} (EC_w k^2 + GJ)
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{vmatrix} P_y - P & 0 & Py_0 \\ 0 & P_x - P & -Px_0 \\ Py_0 & -Px_0 & r_0^2 (P_\phi - P) \end{vmatrix} = 0 \tag{12}$$

$$(P_y - P)(P_x - P)(P_\phi - P) - (P_y - P) \frac{P^2 x_0^2}{r_0^2} - (P_x - P) \frac{P^2 y_0^2}{r_0^2} = 0 \tag{13}$$

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Çağlar KAHYA

Doğum Yeri ve Tarihi : Yıldırım / 1990

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Milli Piyango Anadolu Lisesi / 2008

Lisans : Uludağ Üniversitesi – Makine Mühendisliği / 2012

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi – Makine Mühendisliği / 2016

Çalıştığı Kurum : Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü –
(2013- Devam)

İletişim : ckahya@uludag.edu.tr

Yayımları : -