

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YANAL DESTEKLERE SAHİP İNCE CİDARLI I KİRİŞLERDE YANAL
BURULMALI BURKULMA DURUMUNUN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tolga KARACA

**TEMMUZ 2013
GÜMÜŞHANE**

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YANAL DESTEKLERE SAHİP İNCE CİDARLI I KİRİŞLERDE YANAL
BURULMALI BURKULMA DURUMUNUN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tolga KARACA

**Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
“İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı”**

Yüksek Lisans Programında Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14/07/2013

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 18/07/2013

TEMMUZ 2013



KABUL ve ONAY



Yrd. Doç. Dr. Selahattin ALBAYRAK danışmanlığında Tolga KARACA tarafından hazırlanan “YANAL DESTEKLERE SAHİP İNCE CİDARLI İ KİRİŞLERDE YANAL BURULMALI BURKULMA DURUMUNUN İNCELENMESİ” isimli bu çalışma jürimiz tarafından Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak Oy Birliği ile kabul edilmiştir.

Başkan

.....
Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÖKDOĞAN

Üye (Danışman)

.....
Yrd. Doç. Dr. Selahattin ALBAYRAK

Üye

.....
Yrd. Doç. Dr. Mustafa DURMAZ

Üye

.....
Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÖKDOĞAN

ONAY

Bu tez/...../..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Temel BAYRAK
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YANAL DESTEKLERE SAHİP İNCE CİDARLI I KİRİŞLERDE YANAL
BURULMALI BURKULMA DURUMUNUN İNCELENMESİ**

Tolga KARACA

Gümüşhane Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Selahattin ALBAYRAK

2013, 48 sayfa

Bu çalışmada, yanal destekler eklenmiş ince cidarlı I kesitli kirişlerin yanal burulmalı burkulması incelenmiştir.

İnce cidarlı I kesitli kirişler eğilme rijitlikleri büyük, burulma rijitlikleri ise küçük yapı elemanlarıdır. Bu özelliğinden dolayı, ince cidarlı I kesitli kirişlerde, çökme durumunu kontrol eden en önemli faktörlerden birisi, yanal burulmalı burkulma durumudur. Eğilme rijitliği büyük, ince, dikdörtgen kesitli bir levha kendisine etkiyen düzlem içi kuvvetler altında yanal yerdeğiştirme yaparak kararsız hale geldiğinde belli bir yük değerinden sonra burkulur. Burulma ile birlikte meydana gelen bu burkulma durumunda, kirişin eğilme rijitliğinin, yanal rijitliğine nazaran çok büyük olması ve yanal mesnetlerin olmaması durumunda yanal burulmalı burkulma meydana gelebilir. Bu durum

uygulamada büyük öneme sahip olabilir. Yanal burulmalı burkulma durumunun yapıların statik hesapların da hesaba katılması gerekebilir (Michell, 1899).

Yanal Burulmalı Burkulma durumunu konu edinmiş olan bu çalışma, üç ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde yanal burulmalı burkulma davranışıyla ilgili tanıtıcı bilgiler verilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde yapılan çalışmalar, bulgular ve irdemeler sunulmuş, yanal desteklenmiş ince cidarlı I kesitli kirişlerin yanal burkulma davranışı, II. Mertebe Yanal Burulmalı Burkulma Teorisini kullanan Sonlu Eleman Teorisine göre çözüm yapan FRILO programı yardımı ile analiz edilmiştir. Çalışmanın son bölümünde elde edilen sonuçlar ve öneriler özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: FRILO, İnce cidarlı I kiriş, Yanal burulmalı burkulma, Yanal destek, II. Mertebe Teorisi.

ABSTRACT

MS THESIS

**INVESTIGATION OF THE LATERAL TORSIONAL BUCKLING OF LATERAL
BRACING WITH THIN-WALLED I BEAMS**

Tolga KARACA

Gümüşhane University

The Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Selahattin ALBAYRAK

2013, 48 pages

In this study, lateral torsion buckling of thin-walled I beams supported with lateral bracings.

Thin-walled I beams are structural members which has small torsional rigidity and big flexural rigidity. Due to those characteristics, one of the most important factors which influence the collapse status of thin-walled I beams is lateral torsional buckling. When a rectangular thin plate which has high flexural rigidity laterally deflects and become unstable under the effect of in planer forces. This deflections finally reach a specific load value and buckling observed. Lateral torsional buckling is observed when buckling rigidity of a beam is relatively larger than the lateral rigidity of a beam and without the lateral bracings. This buckling is observed simultaneously with the torsion. This is considered as a

significantly vital in practice hence, in the condition of lateral torsional buckling, this issue should also considered in the structural design (Michell, 1899).

This study which is considers the lateral torsional buckling consist of three main chapters. In the first chapter, primarily information about the lateral torsional buckling was presented. In the second part of the study, the studies carried out, findings, and observations were presented. The lateral buckling behaviour of lateral bracing thin-walled I beams analyzed in the scope of BTII theory with the aid of finite element methods. The analyzes were carried out in FRILO program. In the last part of the study, findings and suggestions related with the study were summarized.

Key Words: FRILO, Thin-walled I beam, Lateral torsional buckling, Lateral brancing, Second-order Theory

TEŞEKKÜR

Yana desteklere sahip ince cıdarlı kirişlerin yanal burulmalı burkulması durumunun incelenmesini konu alan bu çalışma, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu araştırmamda bana yol gösteren, en meşgul olduğu dönemlerde bile tez çalışmama zaman ayıran, değerli hocam ve danışmanım Sayın Yrd. Doç Dr. Selahattin ALBAYRAK'a teşekkür ederim. Bu vesileyle Sayın hocamın çok değerli ve kıymetli ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Tezimi kendileri önünde sunduğum ve tezimi değerlendirme zahmetine katlanmış olan sayın jüri üyeleri Yrd. Doç Dr. Ahmet GÖKDOĞAN'a ve Yrd. Doç Dr. Mustafa DURMAZ'a teşekkürlerimi arz ederim.

Bülent Ecevit Üniversitesi Zonguldak Meslek Yüksekokulu Müdürü Doç. Dr. Ahmet ALTIN'a ve Zonguldak Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölüm Başkanı Prof. Dr. Ali İhsan EROL'a teşekkürlerimi sunarım.

Eşim Mine KARACA'ya, annem ve babam Emine ve Ahmet KARACA'ya, kardeşim Mihriban'a ve kardeşim Kadriye'ye teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

| | |
|---|------|
| ÖZET..... | III |
| ABSTRACT | V |
| TEŞEKKÜR | VII |
| İÇİNDEKİLER..... | VIII |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | X |
| TABLolar DİZİNİ | XII |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... | XIII |
| 1. GENEL BİLGİLER..... | 1 |
| 1.1. Giriş..... | 1 |
| 1.2. Çalışmanın Amacı | 2 |
| 1.3. Kaynak Araştırması | 3 |
| 1.4. Burulma ve Yanal Burkulma..... | 7 |
| 1.4.1. Tekil Yük Etkisindeki Konsol Kirişte Yanal Burkulmanın Hesabı | 9 |
| 1.4.2. Ortasından Tekil Yük Etkiyen Basit Mesnetli Kirişin Yanal Burkulması | 11 |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR | 14 |
| 2.1. Giriş..... | 14 |
| 2.2. II. Mertebe Teorisi..... | 15 |
| 2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi | 16 |
| 2.4. FRİLO Programı..... | 17 |
| 2.4.1. Programın Genel Özellikleri..... | 17 |
| 2.4.1.1. Programın Kullandığı Hesap Kaynakları ve Hesabın Temeli | 17 |
| 2.4.1.2. Programın Kullanılabileceği Kesitler | 19 |
| 2.4.1.3. Ayrık Mesnetlerde Programın Kullanılabilmesi | 20 |
| 2.4.2. Programda Atanabilecek Yükler ve Yük Özellikleri..... | 21 |
| 2.4.2.1. Yükler..... | 21 |
| 2.4.2.2. İlkel Kusurlar..... | 21 |
| 2.4.2.3. Hareketli Yükler | 21 |
| 2.4.2.4. Kirişlerde Bölgesel Yüklemeler | 21 |
| 2.4.2.5. Mesnet, Yay ve Yük Koordinatları | 22 |
| 2.5. Programın II. Mertebe Burulmalı Burkulma Analizi Yaparken Kullandığı Modülün Tanıtımı..... | 22 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.5.1. | Malzeme Seçimi | 22 |
| 2.5.2. | Boyutlar | 23 |
| 2.5.3. | Destekler - Mesnetler | 24 |
| 2.6. | FRILO Programı Sonuçlarının Değerlendirilmesi | 25 |
| 3. | BULGULAR VE İRDELEME..... | 27 |
| 3.1. | İnce Cidarlı Elemanlarda Desteklerin Yanal Burkulma Yüküne Etkisi..... | 27 |
| 3.1.1. | I Kesitli Kirişler İçin Yanal Desteğin Yanal Burkulma Yüküne Etkisi | 27 |
| 3.1.2. | Ortasından Tekil Yük Etkisindeki Basit Kirişte Yanal Desteğin Yanal Burkulma Yüküne Etkisi | 29 |
| 3.1.2.1. | Basit Kirişte Yanal Desteğin Yanal Burkulma Yüküne Etkisi..... | 29 |
| 3.1.2.2. | Konsol Kirişte Yanal Desteğin Yanal Burkulma Yüküne Etkisi | 37 |
| 4. | SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 44 |
| 5. | KAYNAKLAR..... | 47 |
| | ÖZGEÇMİŞ | |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 1.1. | Yanal burkulmuş kiriş ve kullanılan eksen takımları | 8 |
| Şekil 1.2. | Konsol kiriş için yanal burkulma hali..... | 9 |
| Şekil 1.3. | Ortasından tekil yük etkisindeki basit mesnetli kirişin yanal burkulma durumu..... | 12 |
| Şekil 2.1. | Yüklerin ve yanal desteğin yeri | 14 |
| Şekil 2.2. | I. ve II. Mertebe Teorisinin karşılaştırılması | 15 |
| Şekil 2.3. | II. mertebe teorisine göre boyutlandırma..... | 16 |
| Şekil 2.4. | Mesnetlerde ve kesitlerdeki yüklemelere göre deformasyonlar | 18 |
| Şekil 2.5. | Elemanın yükleme yönleri ve serbestlikleri | 18 |
| Şekil 2.6. | Düğüm noktalarındaki serbestlik derecelerine göre mesnet şartları..... | 20 |
| Şekil 2.7. | Ötelenme serbestlik derecelerinin yay katsayısı olarak tanımlanması durumunda kesitte referans noktasına uzaklıklar | 20 |
| Şekil 2.8. | Yanal desteklerin yerleri..... | 22 |
| Şekil 2.9. | Çelik standartlarına ait tablo değerleri..... | 23 |
| Şekil 2.10. | Kesitin uzunluğunun girilmesi..... | 23 |
| Şekil 2.11. | Kesitin tipinin belirlenmesi..... | 24 |
| Şekil 2.12. | Kesit Tipine ait bir görsel | 24 |
| Şekil 2.13. | Mesnetlerin konulacağı yerler | 25 |
| Şekil 2.14. | Mesnet ve desteklerin özellikleri | 25 |
| Şekil 3.1. | I kesitli kirişler için yanal destek | 27 |
| Şekil 3.2. | 6 m uzunluğundaki basit kiriş için yanal desteğin uygulama yeri..... | 28 |
| Şekil 3.3. | Kirişte yükün uygulandığı nokta | 28 |
| Şekil 3.4. | 6 m uzunluğundaki basit kirişte yanal burkulma yükleri (kN)..... | 30 |
| Şekil 3.5. | 8 m uzunluğundaki basit kirişte yanal burkulma yükleri (kN)..... | 31 |
| Şekil 3.6. | 10 m uzunluğundaki basit kirişte yanal burkulma yükleri (kN)..... | 33 |
| Şekil 3.7. | Basit kiriş (önden görünüş)..... | 34 |
| Şekil 3.8. | Basit kiriş (perspektif görünüş) | 34 |
| Şekil 3.9. | 6 m uzunluğundaki basit kirişin yanal burkulmuş hali (üstten ve önden) | 34 |
| Şekil 3.10. | 6 m uzunluğundaki basit kirişte yanal desteğin gövde ortasında olduğu durumda $\beta_y = 1000$ kN/m için yanal burkulmuş hali (üstten ve önden) | 35 |

| | |
|--|----|
| Şekil 3.11. 6 m uzunluğundaki basit kirişte yanal desteğin gövde ortasında olduğu durumda $\beta_y = 5000 \text{ kN/m}$ için yanal burkulmuş hali (üstten ve önden) | 35 |
| Şekil 3.12. 6 m uzunluğundaki basit kirişte yanal desteğin gövde ortasında olduğu durumda $\beta_y = 25000 \text{ kN/m}$ için yanal burkulmuş hali (üstten ve önden) | 35 |
| Şekil 3.13. 6 m uzunluğundaki konsol kirişte yanal desteğin yay sabitlerine göre yanal burkulma yükleri (kN) | 38 |
| Şekil 3.14. 8 m uzunluğundaki konsol kirişte yanal desteğin yay sabitlerine göre yanal burkulma yükleri (kN) | 39 |
| Şekil 3.15. 10 m uzunluğundaki konsol kirişte yanal desteğin yay sabitlerine göre yanal burkulma yükleri (kN) | 41 |
| Şekil 3.16. 6 m uzunluğundaki konsol kirişin desteksiz hali | 42 |
| Şekil 3.17. 6 m uzunluğundaki konsol kirişin serbest ucuna yanal destek eklenmiş hali | 42 |
| Şekil 3.18. 6 m uzunluğundaki konsol kirişin yanal burkulmuş hali | 42 |
| Şekil 3.19. 6 m uzunluğundaki konsol kirişin $\beta_y = 50 \text{ kN/m}$ için yanal burkulmuş hali | 43 |
| Şekil 3.20. 6 m uzunluğundaki konsol kirişin $\beta_y = 250 \text{ kN/m}$ için yanal burkulmuş hali | 43 |
| Şekil 3.21. 6 m uzunluğundaki konsol kirişin $\beta_y = 500 \text{ kN/m}$ için yanal burkulmuş hali | 43 |
| Şekil 3.22. 6 m uzunluğundaki konsol kirişin $\beta_y = 1000 \text{ kN/m}$ için yanal burkulmuş hali | 43 |

TABLolar DİZİNİ

SAYFA NO

| | |
|---|----|
| Tablo 1.1. ξ , η ve ζ eksenleri ile x , y ve z eksenleri arasındaki ilişki..... | 8 |
| Tablo 1.2. Tekil yüklü konsol kiriş için m değerleri..... | 11 |
| Tablo 1.3. Tekil kuvvet için m değerleri..... | 13 |
| Tablo 2.1. Değişik kiriş uzunlukları için IPE 400 profilinden imal basit kiriş için yanıl burkulma yükleri | 26 |
| Tablo 2.2. Değişik kiriş uzunlukları için IPE 400 profilinden imal konsol kiriş için yanıl burkulma yükleri | 26 |
| Tablo 3.1. 6 m uzunluğundaki basit kirişte yanıl burkulma yükleri (kN)..... | 29 |
| Tablo 3.2. 8 m uzunluğundaki basit kirişte yanıl burkulma yükleri (kN)..... | 31 |
| Tablo 3.3. 10 m uzunluğundaki basit kirişte yanıl burkulma yükleri (kN)..... | 32 |
| Tablo 3.4. 6 m uzunluğundaki konsol kirişte yanıl burkulma yükleri (kN)..... | 37 |
| Tablo 3.5. 8 m uzunluğundaki konsol kirişte yanıl burkulma yükleri (kN)..... | 39 |
| Tablo 3.6. 10 m uzunluğundaki konsol kirişte yanıl burkulma yükleri (kN)..... | 40 |

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|--------------------------|---|
| A | : Kesit alanı (cm ²) |
| C, D | : Diferansiyel denklem çözüm sabitleri |
| c | : Elastik desteğin yay sabiti |
| $\frac{d^n}{dz^n}, u^n$ | : n. dereceden türev |
| E | : Elastisite modülü (MPa) |
| F | : Yanal desteğin uyguladığı kuvvet |
| G | : Kayma modülü (MPa) |
| I_y | : y eksenine atalet momenti (cm ⁴) |
| L | : Kiriş boyu (m) |
| M | : Moment (kNm) |
| M_f | : Başlıktaki eğilme momenti (kNm) |
| M_{kr}, M_{cr} | : Yanal burulmalı burkulma momenti (kNm) |
| M_0 | : Kirişe etkiyen tekil moment (kNm) |
| M_x, M_y, M_z | : x, y, z eksenlerindeki momentler (kNm) |
| M_η, M_ξ, M_ζ | : η, ξ, ζ eksenlerindeki momentler (kNm) |
| $M_{y,Ed}$ | : y-y ekseninde ki tasarım momenti değerini (kNm) |
| $M_{y,Rd}$ | : y-y ekseninde ki moment değeri (kNm) |
| $M_{z,Ed}$ | : z-z ekseninde ki moment değeri (kNm) |
| $M_{z,Rd}$ | : z-z ekseninde ki tasarım momenti değeri (kNm) |
| M_{Ed} | : Moment değerini (kNm) |
| M_{Rd} | : Tasarım momenti değeri (kNm) |
| N_{Ed} | : Normal kuvvet değeri (kN) |
| N_{Rd} | : Tasarım normal kuvvet değeri (kN) |
| O | : Kesit merkezi |
| P | : Kirişe etkiyen yük (kN) |
| P_{kr} | : Yanal burulmalı burkulma yükü (kN) |
| h | : Kesit yüksekliği (cm) |
| I_y | : y eksenine göre atalet momenti (cm ⁴) |
| t_g, t_b | : Kesit gövdesi ve başlığın kalınlığı (cm) |

| | |
|--------------------|--|
| u, v | : Yer değiştirme miktarları |
| f_y | : Çeliğin akma mukavemeti değeri (MPa) |
| x, y, z | : Kartezyen eksen takımları |
| x | : Yanal yer değiştirme (yanal destek için) |
| β_y | : Yanal desteğin yay sabiti (kN/m) |
| Γ | : Çarpılma katsayısı (mm ⁶) |
| I_η, I_ξ | : η, ξ eksenleri atalet momentleri |
| ξ, η, ζ | : Yanal burkulma eksenleri |
| λ_{LT} | : Narinlik |

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yapı mühendisliğinde kullanılan çelik kesitler, genellikle ince cidarlı elemanlardır. Bu elemanlar bir boyutu, diğer iki boyutuna göre çok büyük elemanlardır. İnce cidarlı çelik elemanların mühendislik uygulamalarında kullanılması, ekonomikliğe yaptığı katkı sebebiyle, göz ardı edilemeyecek ölçüde avantajlara sahiptir. Fakat çelik taşıyıcı eleman, içi dolu bir kesit olarak, ahşap ve betonarme gibi diğer taşıyıcı elemanlara göre ağırdır. Aynı zamanda çelik, hammaddesinin değerli olması sebebiyle pahalıdır. Çelik taşıyıcı elemanlar, gövde ve baş kısımları farklı boyutlarda ayrı birer plak olarak imal edilir. Sonra haddelenerek, mukavemeti yüksek, içi boş, farklı şekillere sahip (I, IPE, H, T, L vb.) ince cidarlı profil kesitler elde edilir. Elde edilen bu elemanlar, içi boş olması nedeniyle hem hafif hem de ekonomik olmaktadır. Ayrıca, çeliğin çekme ve basınç mukavemeti, neredeyse birbirine eşit olduğundan, ahşaba ve betonarmeye göre, kullanım alanı daha fazladır. Anlatılan avantajlarının yanında, çelikten imal edilmiş, ince cidarlı elemanların kullanılmasıyla, yanal burulmalı burkulma problemi gibi problemlerle karşılaşmaktadır.

Farklı mühendislik alanlarında ince cidarlı çelik elemanların kullanım yeri birkaç örnekle aşağıda sunulmuştur:

- Makine mühendisliğinde: Kompozit basınç tüplerin imalatında, araçların şasi, gövde ve kaporta kısımlarında, makine imalatında vb...
- Yapı mühendisliğinde: Kubbeler, levhalar, çelik profiller, içme suyu boruları vb...
- Uçak mühendisliği: Uçak gövdesi ve kanatlarının kaplanması, iç gövdede bulunan kaplama alanlar...
- Gemi mühendisliği: Gemi gövdesi ve iç kısımları...

İnce cidarlı çelik vb. yüksek mukavemete sahip metallerin ve alaşımların, günümüz mühendislik uygulamalarında kullanılması, elastik kararsızlığı önemli hale getirmiştir. Bu sebeple günümüzde yapı elemanlarının stabilite kaybını engellemek için çalışmalar yapılmaktadır (Timoshenko, 1963).

Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında üç temel karakteristik bulunmaktadır. Bunlar, mukavemet, rijitlik (buna bağlı olarak deformasyon) ve stablitedir. Stablitede kritik parametreler diğerlerinden farklıdır. Akmada ve kopmada sistemdeki gerilmeler

belirli bir değeri aşmışsa, “sistemde emniyet kalmamıştır” denir. Bu tip problemlere gerilme problemi denir. Burkulmada ise bir denge problemi söz konusudur. Söz konusu olan bu denge problemi, daha önce bahsi geçen elastik kararsızlık durumu olarak ifade edilebilir. Bu denge durumunda, sistem kararlı olmadığından, oluşabilecek en küçük bir farklılık sistemde büyük şekil değiştirmelere sebep olabilir. Bu da sistemin tekrar ilk konumuna gelmesini imkânsızlaştırır. Sistem, çeliğin dayanımını aşan gerilmeler sebebiyle değil, bu şekil değiştirmelerle beraber, narin ve ince cidarlı yapı elemanlarının yetersiz elastik stabilitesinden dolayı göçer (Timoshenko, 1963).

Sistemin göçme sınır durumlarının en önemlilerinden biri, daha önce bahsedilmiş olan sistemin stabilitesini kaybetmesidir. Üzerinde durulacak olan bu stabilite kaybı problemi; eğilme etkisi, kuvvetli eksen etrafında olan elemanın, zayıf eksen etrafında eğilmesiyle, kesitin burulmasının aynı anda ortaya çıktığı, bir çeşit stabilite problemidir. Burulmanın ve burkulmanın aynı anda ortaya çıktığı bu stabilite problemi, yanal burulmalı burkulma olarak adlandırılır.

1.2. Çalışmanın Amacı

İnce cidarlı elemanlar günümüzde sıkça kullanılan yapı elemanlarıdır. Bu elemanlar standartlara göre, kenarları ve köşeleri boyunca birleştirilmiş, bir boyutu diğer iki boyutuyla karşılaştırıldığında oldukça ince, plaklardan imal edilmiş elemanlardır.

Yanal burulmalı burkulma davranışı, genellikle ince cidarlı elemanlarda meydana gelir. İnce cidarlı bir kirişe, kesme doğrultusunda bir yük veya bir moment uygulandığında, değerler kritik değerinin altında kaldığı sürece, elemanda düşey yer değiştirmeler oluşacaktır. Ancak, kritik yük değerine ulaşıldığında veya bu değer aşıldığında, sistemin stabilitesi bozulacak ve sistemde dönme ile beraber yatayda ve düşeyde yer değiştirmeler meydana gelecektir. Bu durumda elemanda “Yanal Burulmalı Burkulma” davranışı meydana gelecektir.

Yanal burkulma davranışının teorik esasları geçen yüzyılın başında ortaya çıkmıştır. Günümüzde, gelişmiş bilgisayar teknolojisi ile yanal burulmalı burkulma davranışı ve nedenleri daha sağlıklı biçimde incelenebilmiştir (Güneş, 2004). Kirişlerin sınır şartları, uygulanan yükler, yüklerin çeşitleri ve hangi noktalara uygulandığı yanal burulmalı burkulma davranışını belirlemektedir (Civalek ve Çatal, 2004).

Bu çalışmada amaç, ince cidarlı elemana eklenmiş olan yanal destek yay sabitlerinin ve konumlarının yanal burulmalı burkulma davranışına etkisinin araştırılmasıdır.

1.3. Kaynak Araştırması

Timoshenko (1963), “Elastik Stabilite Teorisi” kitabında kritik burulma yükünün nasıl hesaplanacağını izah etmiştir. Çalışmada ince dikdörtgen kesite sahip bir levhanın uçlarına tatbik edilen M momentleriyle, levha kendi düzleminde eğildiğinde, levhanın kararlılık durumu incelenmiş, levhanın kararsız olabileceği tespit edilmiş ve M'nin belli bir kritik değeri için, levhanın yana doğru burkulacağı belirtilmiştir. Burulma ile meydana gelecek burkulma durumunun, kirişin eğilme rijitliğinin, yanal rijitliğine göre çok büyük olması ve yanal mesnetler bulunmaması durumunda pratikte bir yapı için sorun olabileceği söylenmiştir. Moment değerinin hesabında farklı yöntemler kullanılabilceği belirtilmiştir. Düşey düzlemde tesir eden M momentlerinin tesiri dolayısıyla hafif bir yanal sehimin meydana geldiği farz edilirse; denge denklemleriyle hafifçe eğilmiş levhayı aynı şekilde tutabilmek için gerekli en küçük M değeri tayin edilmiş ve eğilme momentinin bu en küçük değeri M_{kr} (kritik moment) olarak tayin edilmiştir. Timoshenko'nun çalışmasında, I kesitli, basit kirişin ortasından bir P yükü ile yüklenmesi sonucunda basit kirişin yanal burkulması için gereken P_{kr} (kritik yük) diferansiyel ifadeler kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda yapılan nümerik çalışmalarda hesaplamalar yapılırken enerji metodu kullanılmıştır. Sonuç olarak P yükünün uygulandığı yer değiştikçe, kritik yükün değişeceği sonucuna varılmıştır.

Chajes (1974), çalışmasında kirişlerin sadece eğilmeye çalışan elemanlar olarak düşünülebileceğinden bahsetmiştir. Çalışmada, kirişlerde malzemenin (Çelik) Hooke Kanunu'na uyduğu düşünülürse, kritik yük değerinin sistemin dengede kaldığı en küçük yükün değerine eşit olacağı belirtilmiştir.

Keyder (1977), çalışmasında çelik kirişlerde, yanal burkulma davranışını incelemiştir. Çalışmada, TS 648 de (Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları) perçin veya cıvata irtibatlı, çelik yapıların hesap ve yapım kurallarında, eğilmeye çalışan dolu gövdeli kirişler için ‘Gövde levhalarının buruşması ve yanal burkulma gerçeklemeleri yapılması gereken hallerde, hesaplarda ilgili kurallara uyulur’ denilmekte olduğu, bu maddeye üç yönden açıklık getirilmesi gerektiğinden bahsedilmiştir. Bunlar, yanal

burkulma yalnızca dolu gövdeli kirişler için mi gerçeklemelidir? İkinci olarak: Gerçeklemenin yapılması gereken haller nelerdir? Halen kullanılan gerçekleştirme yöntemi; yanal burkulma teorisi ve kirişlerin davranışı ile ne ölçüde bağdaşmaktadır? Çalışma bu soruları yanıtlamıştır.

Attard (1985), sonlu elamanlar vasıtasıyla kirişlerin burulmalı burkulmasını hesaplamaya çalışmıştır. Çalışmasında, sabit statik yüklerle yüklenmiş açık kesitli ince cidarlı elastik kirişlerin, yanal burulmalı burkulmasını hesaplamak için iki adet yeni formülasyon elde edilmiştir. Her iki formülasyonda klasik çözümlerle ve deneylerle test edilmiş ve sonuçlar doğrulanmıştır.

Mateescu ve Ungureanu (1994), çelik kirişlerin yanal burulmalı burkulmasını incelemiştir. Çalışmada, narin elemanlar enlemesine yayılı yüklerle ve kiriş sonlarına momentlerle yüklenirlerse, plastik moment direncini (M_{pl}) tamamen kazanamadan çarpılmaya uğrayabilecekleri söylenmiştir. Teorik sonuçların değerlendirilmesinde Eurocode 3 ün altyapısı kullanılmıştır.

Lee vd. (2002), kompozit malzemedan teşkil edilmiş I kesitli kirişlerin, yanal burkulmasını incelemiştir. Çalışmada, farklı yüklere maruz, düzgün yüzeyli kompozit malzemedan teşkil edilmiş, I kesitli kirişlerin yanal burkulması konu edilmiş ve kirişin plaklar teorisine dayanan genel bir analitik modeli çıkarılmıştır.

Rendek ve Balaz (2004), ince cidarlı kirişlerin çarpılmasını incelemiştir. Çalışmada adi diferansiyel denklemlerin kullanıldığı sistemler vasıtasıyla, prizmatik ince cidarlı elemanların davranışı I. Mertebe Kiriş Teorisine göre açıklanmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır. En büyük toplam gerilmenin bulunduğu kesitte çarpılma momenti çok küçük olduğundan, çarpılmanın verilen konsol kiriş kapasitesine etkisi ihmal edilmiştir. Kiriş teorisinin, sonlu eleman modeli gibi sayısal yöntemlere alternatif olduğu sonucuna varılmıştır.

Chu vd. (2005), soğuk şekillendirilmiş çelik kirişlerin, yanal burulmalı burkulma davranışına yanal desteklerin etkisini incelemiştir. Analiz, enerji yöntemini kullanarak yapılmıştır. Aralıklı olarak eğilmeyi önleyici destek çubukları varken ve de yokken yanal kısıtlamaların etkisi farklı sınır şartları ve yükleme şekillerine sahip kirişler için araştırılmıştır. Genelde yanal destek Z-aşık kirişinin yanal burulmalı burkulma kritik yükünü arttırdığı, bununla beraber artışın, eğilmeyi önleyici elemanlar olsun veya olmasın yükün yeri ve sınır şartları tarafından engellenebileceği söylenmiştir. Basit mesnetli kirişlerde bu artış yavaş olmakla beraber, ankastre mesnetli kirişlerde bu artış çok belirgin

bir şekilde görülebilir. Çalışmada yanal kısıtlayıcıların kritik yük üzerindeki etkisinin eğilmeyi önleyici kirişler yardımıyla azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.

Emrem (2005), sürekli kirişlerde yanal stabilite ile ilgili çalışmıştır. Bu çalışmada çatal mesnetli, çift simetrik-I kesitli sürekli kirişlerde çatı örtü malzemesinin yanal burkulma tehlikesine karşı tutucu tesiri araştırılmıştır. Konuyu belli bir kapsamda tutabilmek amacıyla, uygulamada üç eşit açıklıklı ve simetrik düzgün yayılı yükü bulunan bir kiriş göz önüne alınmıştır. Kiriş üst başlığının açıklıkları boyunca yanal harekete karşı sürekli ve elastik olarak tutulduğu (çatı örtü malzemesinin tesiri) varsayılmıştır. Sonuçta çift simetrik-I kesitli sürekli kirişlerde, çatı örtü malzemesinin, yanal burkulma tehlikesine karşı olumlu bir tutucu tesiri olduğu ortaya koyulmuştur.

Lorensiz ve Togela (2005), izotropik ve enine izotropik ince cidarlı elemanlara uygulanan gerilmelerin, gerçek dağılımının, burkulma üzerine etkisini incelemiştir. Profil çekme yöntemi ile lif katkılı polimerden imal edilmiş olan ince cidarlı elemanlar yapı endüstrisi alanında birincil ve ikincil yük taşıma elemanları olarak kullanılmaktadır. Bu profillerde, tasarımlarındaki incelikleri nedeniyle sıklıkla bölgesel ve genel burkulmaya rastlanmaktadır. Çalışma sonucunda kirişlerin uçlarında ki bölgesel gerilmelerin artması ile burkulma yükü / momentin azalmasına neden olduğu gösterilmiştir. Bu etki kısa eleman için daha önemlidir.

Yu vd. (2005), kompozit kirişler için geliştirilmiş Vlasov teorisini incelemiştir. Çalışmada geliştirilmiş Vlasov Teorisi Varyasyonel Asimptotik Kiriş Kesit Analizine (VABS) bağlı olarak geliştirilmiştir.

Chrosocielewski vd. (2006), ince cidarlı I kiriş kolonunun burulmalı burkulmasının bazı yönlerini incelemiştir. Çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci bölümde, ince cidarlı I kiriş kolonunun burulmalı burkulmasında başlangıç yön değiştirmesi (yer değiştirmesini, dönmesini) incelenmiştir. Başlangıç olarak, mekaniğin gerilme ve şekil değiştirme tanımlarından, potansiyel enerjinin sabit kalması ilkesi yardımı ile burulmalı burkulmanın, diferansiyel denklemleri elde edilmiştir. Sayısal uygulama olarak basit mesnetli I kirişleri çalışılmıştır. Sonuçlar, (Tek yönlü kolon modelinin sonuçları) 6 parametrelili nonlinear kabuk teorisinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada, sonuçların birbirleri ile oldukça uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. İlkel kusurların artması ile kritik yükün azaldığı görülmüştür.

Erkmen ve Mohareb (2006), kayma şekil değiştirmesine sahip ince cidarlı kirişlerin burulmasını incelemiştir. Çalışmada kayma etkilerine maruz ince cidarlı kirişlerin

çarpılmalı eğilme durumunda burulma analizi için gerekli bazı sınır şartları araştırılmıştır ve sonuçta bazı denklemler geliştirilmiştir.

Aydın ve Doğan (2006), eğilme zorlaması altında bulunan çelik korniyerlerin elastik, tam plastik ve yanal burulmalı burkulma dayanımları ile ilgili çalışmışlardır. Çalışmada çelik korniyerlerin eğilme dayanımları tam plastik moment kapasitesi, korniyer kesitlerinin yerel burkulma dayanımları ve yanal burulma burkulmasına ait taşıma kapasiteleri göz önüne alınarak saptanacağı, korniyerlerin genellikle kollarına paralel olan geometrik eksenler doğrultusunda uygulanan dış yüklerin etkisi altında buldukları, bu dış yüklerin tek eksenli olabileceği gibi, yanal yer değiştirmenin önlenmesi halinde iki eksenli de olabileceği söylenmiştir. Her iki durumda da asal eksenlere göre iki eksenli eğilme durumu meydana geleceğinden bahisle, iki eksenli eğilmede, en büyük momentin hangi kritik kesit noktasında meydana geleceğinin kolayca saptanamayacağı belirtilmiştir. Bütün özel noktaların kontrolü gerekeceği ve ayrıca yönetmeliklerin, korniyer kesitlerinin tam plastik moment kapasiteleri göz önüne alınarak tasarımını öngörmekte olduğu söylenmiş ve bu durum tam plastik moment kapasitesinin, ilk akma momentinin hangi oranda artırılarak elde edilebileceği sorunu ortaya çıkartmıştır. Korniyerler narin kesitteki yapısal elemanlar oldukları için, sadece elastik ve plastik moment değerlerine göre tasarımları yapılamayacağından, yanal burulmalı burkulmaları ve yerel burkulma durumlarının da göz önüne alınması ile tasarımda kullanılacak nominal momentlerin bulunması gerektiği söylenmiştir. Sonuç olarak çalışmada, elastik momentlerin asal eksenlerdeki bileşenlerinin oranlarının -1.00 ile +1.00 arasındaki değişimleri için ilk akma momenti, tam plastik momentler arasındaki karşılıklı etkileşim diyagramları ve aynı oranlara ait plastik momentler, minör eksene dik burkulma hali için kritik burkulma momentleri boyutsuz katsayılar yardımı ile elde ederek, korniyerlerin iki eksenli eğilme haline ait yeni bir tasarım önerisinde bulunulmuştur.

Younes vd. (2009), çalışmalarında I kesitli çeliğin yanal burulmalı burkulma direncine gövde ile başlık arasına yapılmış kaynakların etkisini incelemişlerdir. Çalışmanın deneysel kısmı, elastik olmayan I kesitli inşaat çeliğinden imal kirişle yapılmıştır. Bütün kirişlerin başlangıçtaki eğrilik seviyeleri kontrol edilerek çok dikkatli bir biçimde üretilmiştir. On dokuz kiriş; her bir kiriş en üst kenarında iki yük uygulama noktasına sahip ve aynı yüklemeler altında beş gruba ayrılarak deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, bağlantı levhalarının her iki yanında köşe kaynağına sahip eşdeğer kirişlere göre, bağlantı levhalarının bir yanında köşe kaynağına sahip kirişlerin bazen daha güçlü

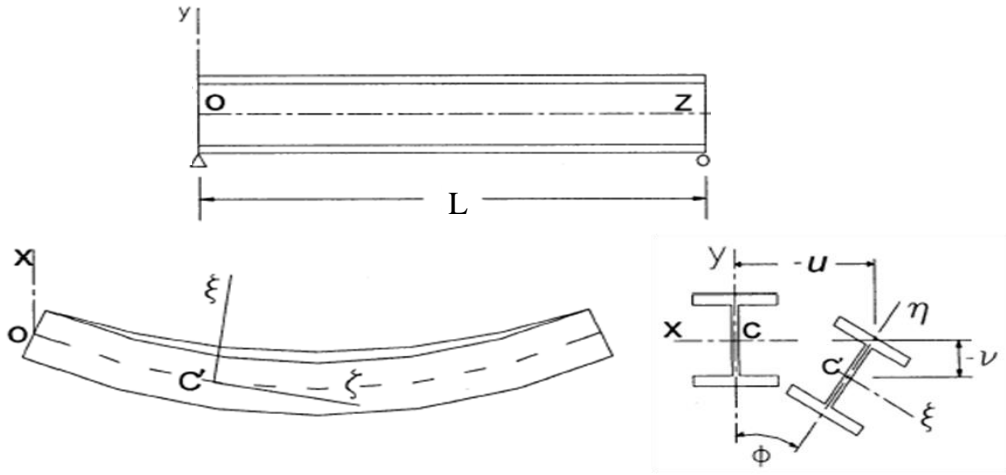
olduğu gösterilmiştir. Avusturya yönetmeliğinin öngördüğu dizayn yükleriyle, test kirişlerinin göçme yükleri için en iyi alt sınırları tahmin etme olanağına sahip olunduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Pınarbaşı (2011), alışmasında Varyasyonel İterasyon Metodu'nu, dikdörtgen kesitli kirişlerin yanal burulma burkulmasının hesabında kullanımını araştırmıştır. Çalışmada, yanal olarak desteklenmemiş çok uzun kirişler veya bir eksenindeki rijitliği diğer eksenindeki rijitliğine göre çok büyük olan kirişlerin dizaynının kontrolünde yanal burulmalı burkulma durumu ve kirişlerin burkulma hesaplarında kullanılan eşitlikler, kolonların burkulma hesabında kullanılan eşitliklerden daha kompleks olduğundan, uzunluğu boyunca üstel olarak farklı artımlı, dar dikdörtgen konsol kirişin, yanal burulmalı burkulması gibi kompleks kiriş burkulma davranışı incelenmiştir. Farklı iterasyon yöntemleri kullanılarak başarılı bir şekilde kiriş davranışı modellenmiştir.

1.4. Burulma ve Yanal Burkulma

Mukavemette, burkulma için hesaba katılan yükler, genelde basınç kuvvetleridir ve eleman eksenindeki düzlemde, eğilmeden meydana gelen deformasyon sonucu burulmanın olduğu ifade edilir. Ayrıca, burulma rijitliği düşük elemanlarda burulmayla veya burulma ve eğilmenin beraber etkimesi nedeniyle burkulmada oluşabilir. Bu duruma, yanal burkulma ya da yanal burulmalı burkulma denir. Bu durumun etkilediği elemanlarda, ağırlık merkezi ile kayma merkezi çakışmaz, eleman kararsız hale gelebilir.

İnce cidarlı I kesitli kirişler, kesit gövdesine dik yönde, gereken aralıklarla desteklenmelidir. Yeterli desteklenme yapılmamışsa, gövde doğrultusundaki belli bir yükte (kritik yanal burulmalı burkulma yükü), kirişin kararsız duruma geçişi ancak kesitin burulmasıyla gerçekleşebilir. Kiriş dönerek gövde düzleminden sapar. Elemanın bu davranışına, yanal burulmalı burkulma davranışı denir. Burulma sırasında ince cidarlı kesitlerde, dik kesitin düzlemselliğini koruyamamasından kaynaklanan kesit çarpılması oluşur.



Şekil 1.1. Yanal burkulmuş kiriş ve kullanılan eksen takımları (Chajes, 1974)

Şekil 1.1’de yanall burkulmanın incelenmesinde kullanılan eksen takımı gösterilmiştir. x , y ve z eksen takımları burkulmadan önceki konumu belirtir. Yanal burkulma sırasında kesit, Φ açısı kadar döner. Bu yeni konumda asal eksenler ξ ve η ile çubuğun elastik eğrisinin teğet doğrultusu ζ ile gösterilir. Kesit merkezinin x ve y yönlerindeki yer değiştirme bileşenleri u ve v ’dir. Kesitin z eksenini etrafında dönme açısı Φ ’dir. u , v ve Φ küçük değerlere sahip olduklarından yüksek mertebeden terimler ihmal edilerek ξ , η ve ζ ile x , y ve z koordinatları için dönüşüm değerleri Tablo 1.1 de gösterilmiştir (Timoshenko, 1963; Albayrak, 2011).

Tablo 1.1. ξ , η ve ζ eksenleri ile x , y ve z eksenleri arasındaki ilişki

| Eksenler | x | y | z |
|----------|---------|---------|----------|
| ξ | 1 | Φ | $-du/dz$ |
| η | $-\Phi$ | 1 | $-dv/dz$ |
| ζ | du/dz | dv/dz | 1 |

Şekil 1.1 dikkate alındığında xz ve yz düzlemlerindeki eğrilikler; d^2u/dz^2 ve d^2v/dz^2 olarak ifade edilirler. Çok küçük dönmeler için bu eğrilikler $\xi\zeta$ ve $\eta\zeta$ düzlemleri için de geçerlidir. Tüm bunlar dikkate alınarak kirişte oluşan yer değiştirme ve dönmeler için diferansiyel denklemler, (1.1) denkleminde verilmektedir.

$$EI_{\eta} \frac{d^2 u}{dz^2} = M_{\eta} \quad (1.1)$$

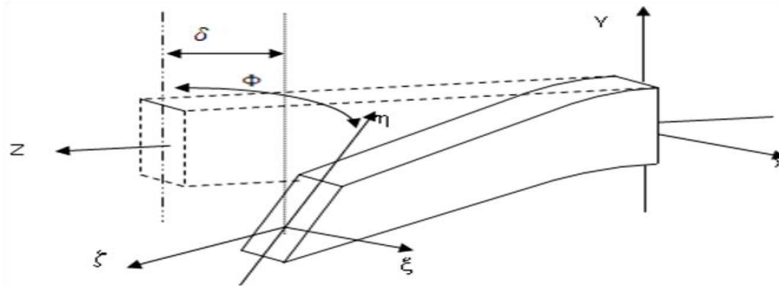
$$EI_{\xi} \frac{d^2 v}{dz^2} = M_{\xi} \quad (1.2)$$

$$GJ \frac{d\Phi}{dz} - E\Gamma \frac{d^3 \Phi}{dz^3} = M_{\zeta} \quad (1.3)$$

Bu eşitliklerde; E ve G sırasıyla, kullanılan malzemenin elastisite ve kayma modülleri; M_{η} ve M_{ξ} sırasıyla η ve ξ eksenleri etrafındaki eğilme momentleri; M_{ζ} , ζ eksenini etrafındaki burulma momenti; I_{η} ve I_{ξ} sırasıyla η ve ξ eksenlerine göre atalet momentleri; J kutupsal (burulma) atalet momenti ve Γ ise kesitin çarpılması ile ilgili bir büyüklüktür. (1.1)-(1.3) denklemleri bir kirişin yanal burkulma davranışını temsil eden temel denklemlerdir (Timoshenko ve Gere, 1961; Albayrak, 2011).

1.4.1. Tekil Yük Etkisindeki Konsol Kirişte Yanal Burkulmanın Hesabı

Şekil 1.2'deki gibi bir konsol kirişin, boş ucunun ağırlık merkezinden bir P kuvveti uygulansın. Uygulanan P kuvveti, kritik bir değere ulaştığında kirişte yanal burkulma meydana gelecektir. Kirişte, bu yanal burkulmayı meydana getiren kritik yanal burkulma durumu için (1.1)-(1.3) denklemleri kullanılır. Kirişin C noktasının sağ tarafındaki denge düşünüldüğünde, P kuvvetinin x, y ve z eksenlerinde meydana getireceği momentler (1.4)-(1.6) denklemlerinde verilmektedir (Timoshenko ve Gere, 1961; Güneş, 2004).



Şekil 1.2. Konsol kiriş için yanal burkulma hali (Albayrak, 2011).

$$M_x = -P(l - z) \quad (1.4)$$

$$M_y = 0 \quad (1.5)$$

$$M_z = P(-\delta + u) \quad (1.6)$$

Burada δ kirişin uç noktasının yatay yer değiştirmesidir. Yukarıdaki moment ifadeleri, Tablo 1.1 kullanılarak ξ , η ve ζ eksenlerine göre (1.7)-(1.9) denklemleri elde edilir.

$$M_\xi = -P(l - z) \quad (1.7)$$

$$M_\eta = -P\Phi(l - z) \quad (1.8)$$

$$M_\zeta = P(l - z)\frac{du}{dz} - P(\delta - u) \quad (1.9)$$

(1.7)-(1.9) denklemleri (1.1)-(1.3) denklemlerinde yerlerine konulursa aşağıdaki diferansiyel denklemler elde edilir (Timoshenko, 1961).

$$EI_\xi \frac{d^2v}{dz^2} + P(l - z) = 0 \quad (1.10)$$

$$EI_\eta \frac{d^2u}{dz^2} + P\Phi(l - z) = 0 \quad (1.11)$$

$$E\Gamma \frac{d^3\Phi}{dz^3} - GJ \frac{d\Phi}{dz} + P(l - z)\frac{du}{dz} - P(\delta - u) = 0 \quad (1.12)$$

(1.12) denkleminin z 'ye göre türevi alınıp (1.11) denkleminde d^2u / dz^2 ifadesi çekilirse, burulma açısı Φ (1.13) denklemiyle elde edilir.

$$E\Gamma \frac{d^4\Phi}{dz^4} - GJ \frac{d^2\Phi}{dz^2} - \frac{P^2}{EI_\eta} (l - z)^2 \Phi = 0 \quad (1.13)$$

(1.13) eşitliğine kiriş uç noktalarındaki sınır şartları kullanılarak kritik burkulma yükü şöyle hesaplanabilir (Timoshenko, 1961).

$$P_{kr} = \frac{m}{l^2} \sqrt{EI_\eta GJ} \quad (1.14)$$

Burada m kesitin çarpılma rijitliği, burulma rijitliği ve kirişin uzunluğuna bağlı bir katsayıdır. Değişik kesit ve kiriş boyları için m değerleri Tablo 1.2’de verilmektedir (Timoshenko, 1961).

Tablo 1.2. Tekil yüklü konsol kiriş için m değerleri

| | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| $\frac{l^2 GJ}{EI}$ | 0.1 | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 40 |
| m | 44.30 | 15.70 | 12.20 | 9.76 | 8.03 | 6.73 | 5.87 | 5.64 |

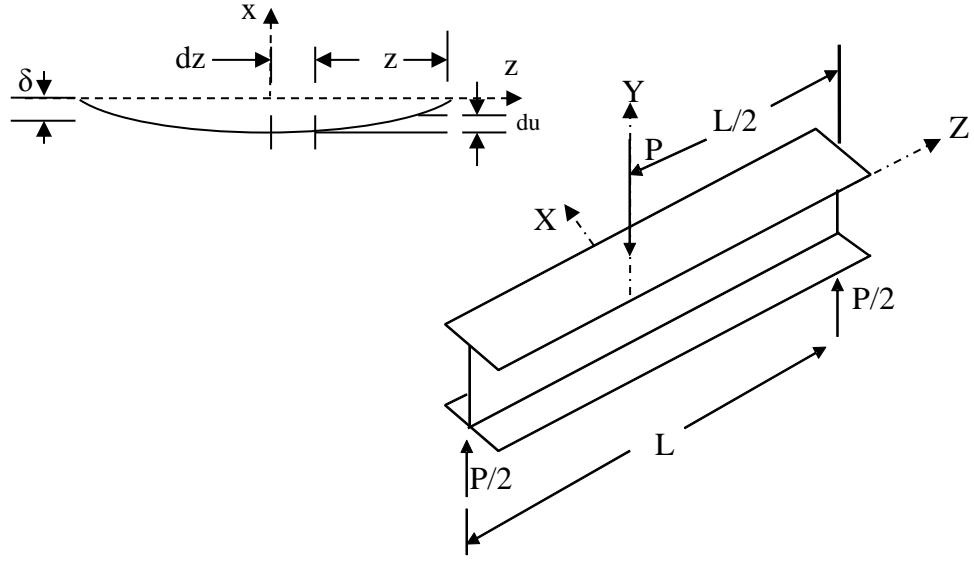
Hesaplanan değerlerde, P yükü konsol kirişin uç noktasının kesitinin merkezinden uygulandı. P yükü kesit merkezinden a kadar mesafeden uygulanırsa, kritik yanal burkulma yükü (1.15) denkleminde hesaplanır.

$$P_{kr} = \frac{m}{l^2} \sqrt{EI_{\eta} GJ} \left(1 - \frac{a}{l} \sqrt{\frac{EI_{\eta}}{GJ}} \right) \quad (1.15)$$

Denklemden a'nın işareti kesit merkezinden yukarıda pozitif, aşağıda negatiftir. Görüleceği gibi P yükü kesit merkezinin yukarısından uygulandığı zaman, kritik yanal burkulma yükü azalır, kesit merkezinden aşağıda uygulandığı zaman ise artar.

1.4.2. Ortasından Tekil Yük Etkiyen Basit Mesnetli Kirişin Yanal Burkulması

Şekil 1.3’teki gibi, kiriş orta noktasında, yz düzleminde bir P kuvveti, kesite gövdenin merkezinde uygulandığında yz düzleminde eğilme oluşur. P kuvveti kritik bir değere ulaştığında kirişte yanal burkulma yapacaktır. Yanal burkulmaya neden olan P yükü hesaplanırken, kirişin çok az bir yanal burkulma yaparak denge sağlandığı hesaba katılır ve diferansiyel denklemlerle P kritik yükü hesaplanır.



Şekil 1.3. Ortasından tekil yük etkisindeki basit mesnetli kirişin yanal burkulma durumu (Albayrak, 2011).

Kirişin sağ tarafındaki herhangi bir noktadaki x , y ve z eksenlerinde P kuvvetinden dolayı oluşacak moment değerleri (1.16)-(1.18) denklemlerinde verilmektedir.

$$M_x = \frac{P}{2} \left(\frac{l}{2} - z \right) \quad (1.16)$$

$$M_y = 0 \quad (1.17)$$

$$M_z = -\frac{P}{2} (\delta + u) \quad (1.18)$$

Burada; δ kirişin orta noktasının yaptığı yanal yer değiştirme, u ise herhangi bir noktanın yaptığı yanal yer değiştirmedir. (1.16)-(1.18) denklemlerindeki moment ifadeleri ξ , η ve ζ eksen takımlarında tekrar yazılırsa (1.19)-(1.21) denklemleri elde edilir.

$$M_\xi = -\frac{P}{2} \left(\frac{l}{2} - z \right) \quad (1.19)$$

$$M_\eta = \frac{P}{2} \left(\frac{l}{2} - z \right) \Phi \quad (1.20)$$

$$M_\zeta = -\frac{P}{2} \left(\frac{l}{2} - z \right) \frac{du}{dz} + \frac{P}{2} (\delta - u) \quad (1.21)$$

(1.19)-(1.21) denklemleri (1.1)-(1.2) denklemlerinde yerlerine konulursa aşağıdaki diferansiyel denklemler elde edilir (Timoshenko ve Gere, 1961).

$$EI_{\xi} \frac{d^2 v}{dz^2} - \frac{P}{2} \left(\frac{l}{2} - z \right) = 0 \quad (1.22)$$

$$EI_{\eta} \frac{d^2 u}{dz^2} - \frac{P}{2} \left(\frac{l}{2} - z \right) \Phi = 0 \quad (1.23)$$

$$GJ \frac{d\Phi}{dz} - E\Gamma \frac{d^3 \Phi}{dz^3} + \frac{P}{2} \left(\frac{l}{2} - z \right) \frac{du}{dz} - \frac{P}{2} (\delta - u) = 0 \quad (1.24)$$

(1.24) denkleminin z' 'ye göre türevi alınıp, u çekilirse (1.25) denklemi elde edilir.

$$E\Gamma \frac{d^4 \Phi}{dz^4} - GJ \frac{d^2 \Phi}{dz^2} - \frac{P^2}{4EI_{\eta}} \left(\frac{l}{2} - z \right)^2 \Phi = 0 \quad (1.25)$$

Kirişin uç noktalarının sınır şartları dikkate alındığında, (1.25) denkleminin çözümünden kritik yanal burkulma yükü için (1.14) denklemi elde edilir (Timoshenko, 1961 ve Güneş 2004). Basit mesnetli durum için (1.14) denklemindeki m değerleri konsol kiriştekinden farklıdır ve Tablo 1.3'te bazı m değerleri verilmektedir.

Tablo 1.3. Tekil kuvvet için m değerleri

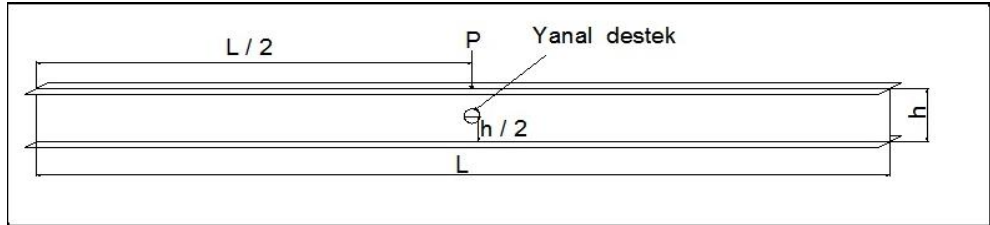
| | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\frac{l^2 GJ}{E\Gamma}$ | 0.4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 96 | 240 | 400 |
| m | 86.40 | 25.60 | 21.80 | 19.60 | 18.30 | 17.90 | 17.40 | 17.20 |

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

İnce cidarlı kirişler, eğilme rijitlikleri büyük olmasından dolayı mühendislikte sıkça kullanılan yapı elemanlarıdır. Uygulanan yükün artmasıyla elemanda yanal bir ötelenme ve kendi eksenini etrafında dönmenin başlamasıyla elemanda dengenin kararlılığı kritik hale gelmektedir. Elemandaki kararlılığı artırmak için kiriş kesitinin bazı noktalarına bu noktanın, kesit düzlemindeki yer değiştirmesi ile orantılı kuvvet uygulayan elastik doğrultu yayları (yanal destek) konulmaktadır (Albayrak, 2011).

Bu çalışmada, yanal destek (yay) eklenmiş, ortasından düşey tekil yük uygulanan basit kiriş ile serbest ucundan tekil yük uygulanan konsol kirişin yanal burkulması değerlendirilmiştir. Bu kirişlere uzama ile orantılı kuvvet uygulayan yaylar (yanal destek) eklenmiştir. Bu yaylar, kiriş uzunluğunun yarısında ($L/2$); kirişin kesit merkezini orijin kabul ederek, kesit merkezine, kesit merkezinden $h/2$ ve $h/4$ kadar mesafe yukarıya, $h/2$ ve $h/4$ kadar mesafe aşağıya, düşeyde kesit merkezine dik olarak konumlandırılmışlardır. Bu durumda kirişe uzama ile orantılı aşağıdaki F kuvveti etkimiştir.



Şekil 2.1. Yüklerin ve yanal desteğin yeri

$$F = \beta_y x \quad (2.1)$$

Burada x yaydaki uzama miktarı, β_y ise yay sabitidir.

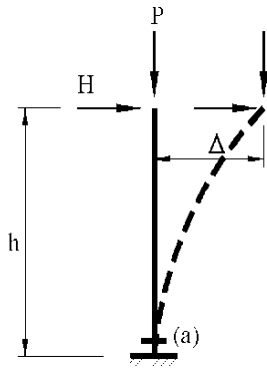
Yanal destek yay sabitleri $0 \text{ kN/m} < \beta_y < 20000 \text{ kN/m}$ arasındadır.

Bu bölümde ince cidarlı I kesitli basit ve konsol kirişin tekil yük etkisinde yanal burulmalı burkulmasına, gövdeye ve başlıklara eklenen yanal desteklerinin etkisi incelenmiştir. Ayrıca, yanal burkulma problemini II. Mertebe Teorisine göre çözen, literatürde çok bilinmeyen FRILO programının hakkında kısa tanıtıcı bilgi verilmektedir.

2.2. II. Mertebe Teorisi

Yapı sistemleri, üzerine uygulanan dış yükler altında şekil değiştirebilirler. Bu şekil değiştirmeler bazen çok küçük miktarda olabilmekle beraber, kesitin özelliklerine bağlı olarak artabilir ve elemana yıkıcı etki yapabilir. Yapı sistemlerinin kısıtlı şekil değiştirmelere sahip olduğu ilk durumda, lineer hesap yöntemleri olarak bilinen hesap yöntemleri kullanılır ve I. Mertebe Etkileri göz önünde bulundurulur. I. Mertebe Etkileri bir varsayımdır. Bu varsayım, “şekil değiştirmelerin çok küçük olması halinde, gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının ve moment- eğrilik bağıntılarının doğrusal olması şartlarının sağlanması durumunda yükler, şekil değiştirmeler ve gerilmeler arasında doğrusal bir bağıntı vardır” (Çakiroğlu ve Özer, 1980), temeline dayanmaktadır. I. Mertebe Teorisi deprem gibi büyük kuvvetler altında geçerliliğini yitirebilir.

Bilgisayarların gelişmesi ile yapı hesaplarında, II. mertebe etkileri daha fazla göz önünde bulundurulmaya başlanmıştır. Burkulma problemlerinde, eleman belirli şekil değiştirmelere maruz kaldığı için, yer değiştirmeler çok artmakta ve başlangıçta yapılan kabullerin hata yüzdesi ihmal edilemez düzeylere çıkmaktadır. Şekil değiştirmelerin büyük olması nedeni ile denge denklemlerini, şekil değiştirmiş sistem üzerinde yazarak hesap yapmak gerekir. Bu işlemin yapıldığı teoriye, II. Mertebe teorisi adı verilmektedir (Livesley, 1956). II. mertebe teorisi için ikinci bir tanım şöyle yapılabilir: Yer değiştirmelerin yeter derecede küçük olmadığı yapı sistemlerinde denge denklemlerinin şekil değiştirmiş eksen üzerinde yazılması gerekir. Geometri değişimlerinin (yer değiştirmelerin) denge denklemlerine etkisinin göz önüne alındığı bu teoriye, II. mertebe teorisi denir (Şekil 2.1).



$$\text{I. mertebe teorisi : } M^I_a = H \times h$$

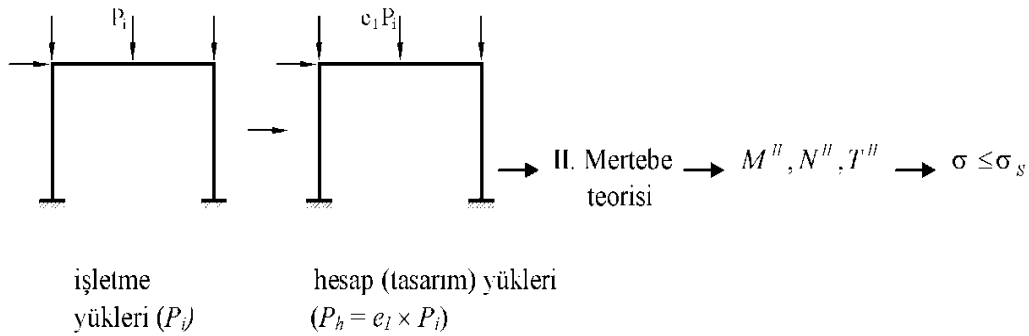
$$\text{II. mertebe teorisi : } M^{II}_a = H \times h + \underbrace{P \times \Delta}_{\text{II. mertebe terimi}}$$

($P\Delta$ etkisi)

Şekil 2.2. I. ve II. Mertebe Teorisinin karşılaştırılması (Çakiroğlu ve Özer, 1980).

II. mertebe teorisinde, yer değiştirmelerin geometrik süreklilik denklemlerine etkisi terkedilmektedir. Bu etkinin de göz önüne alındığı teoriye sonlu deplasman teorisi adı verilir. İnşaat mühendisliği kapsamındaki yapı sistemlerinde yer değiştirmelerin belirli sınır değerleri aşmasına izin verilmediğinden, yer değiştirmelerin geometrik süreklilik denklemlerine etkisi çoğu zaman terkedilebilecek düzeyde kalmaktadır.

II. mertebe teorisi doğrusal olmadığından, güvenlik gerilmeleri esasına göre hesap yapılamaz. Bunun yerine, işletme (servis) yüklerinin güvenlik katsayıları ile çarpımından oluşan hesap yükleri (tasarım yükleri) altında, sistem II. mertebe teorisine göre hesaplanarak kesit zorları bulunur (Çakiroğlu ve Özer, 1980). Bu kesit zorlarından oluşan gerilmeler, sınır gerilmeyi aşmayacak şekilde, sistem boyutlandırılır (şekil 2.2).



şekil 2.3. II. mertebe teorisine göre boyutlandırma (Çakiroğlu ve Özer, 1980)

Çalışmada kullanılacak olan FRILO programı çözümde temel olarak Sonlu Elemanlar Metodu ile beraber geometrik olarak doğrusal olmayan II. Mertebe Teorisini kullanmaktadır.

2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Genellikle, klasik yöntemleri kullanarak kesin burkulma analizi yapmak oldukça karmaşıktır. Bilgisayarlardaki gelişmelerle beraber burkulma analizlerinde yaklaşık sonuçlar üreten sonlu eleman modelini kullanmak oldukça yaygın hale gelmiştir. Sonlu eleman yönteminde, sistemin oldukça küçük seçilen ve eleman adı verilen çok sayıda parçacıktan meydana geldiği düşünülür. Her eleman için yazılan denklemler birleştirilerek bütün sistem için elde edilen denklem çözümlenerek elemanlara ait bilinmeyenler hesaplanır.

2.4. FRILO Programı

Program tarafından, yanal burulmalı burkulma probleminin çözümünde II. Mertebe Yanal Burulmalı Burkulma Teorisi kullanılmaktadır. II. Mertebe Yanal Burulmalı Burkulma Teorisi, doğrusal bir çelik çubuk sisteminde, taşıma güvenliği analizlerinin, gerçekleştirilmesine yardımcı olur. Analiz, hem II. mertebe yanal burulma burkulması teorisi, hem de ideal çatallanma yüklerine dayanan, eşdeğer çubuk yöntemine göre yapılabilmektedir. İdeal çatallanma yükleri, tüm sistem için yanal burkulma ve yanal burulmaya bağlı burkulma altında ve göçme durumunda, ayrı ayrı nümerik olarak elde edilir.

2.4.1. Programın Genel Özellikleri

2.4.1.1. Programın Kullandığı Hesap Kaynakları ve Hesabın Temeli

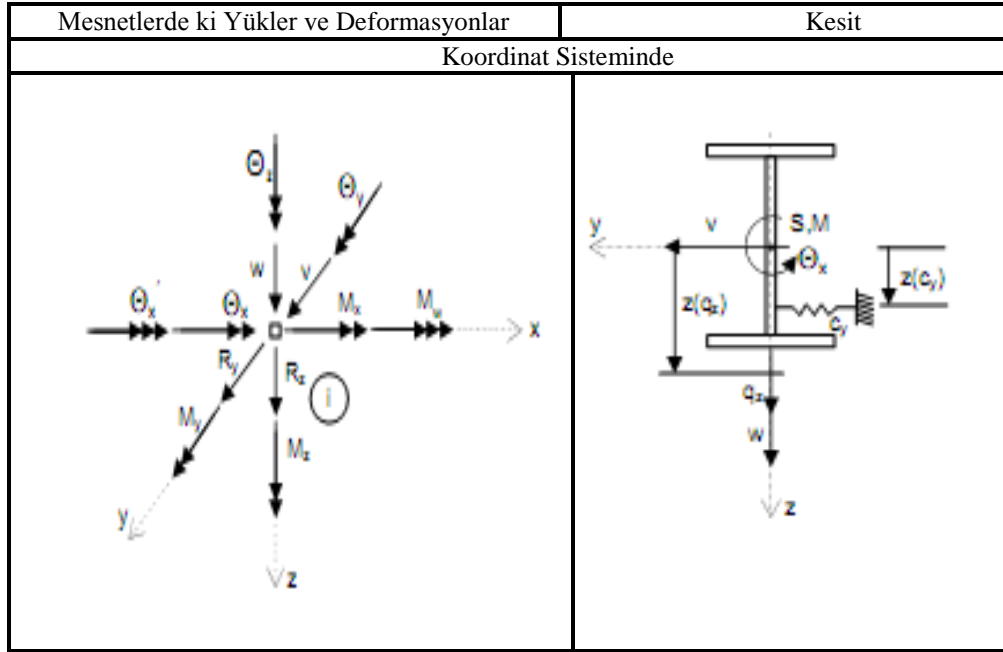
Tasarım isteğe göre aşağıdaki standartlara göre yapılabilir:

- DIN 18800-1/2 (Structural Steelwork Design And Construction)
- EN 1993-1-1 (Design Of Steel Structures)

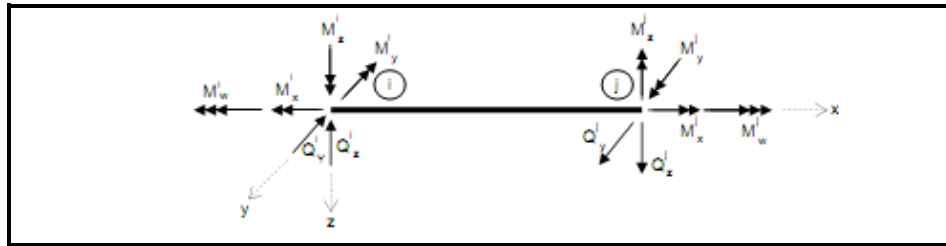
EN 1993-1'in seçilmesi durumunda hesap ulusal eklere uygun yönetmelikler gözönüne alınarak yapılır.

Kapalı sistemlerde, genel burulmalı burkulma davranışının, tüm deformasyonlarının tanımlanması imkânsızdır. Bu, uygulamadaki durumun, büyüklüğüyle ilişkilidir. Sonuçta kiriş, farklı uzunluklara sahip, sayısız kesite bölünerek, sonlu elemanlar metoduna uygun olarak doğrulanır (Friedrich + Lochner GmbH, 2011).

Elemandaki deformasyon durumu, burulmamış ve yatay çubuklara dik geçen elemanlar için kübik polinomlar yardımıyla tanımlanır. Onların arasında ki bağlantı noktaları ise elemanlarla birleştirilir (Şekil 2.3). Elemanlar sağ ve sol düğüm noktalarında 6 adet serbestliğe sahiptir (Şekil 2.4) (Friedrich + Lochner GmbH, 2011).



Şekil 2.4. Mesnetlerde ve kesitlerdeki yüklemelere göre deformasyonlar (Friedrich + Lochner GmbH, 2011).



Şekil 2.5. Elemanın yükleme yönleri ve serbestlikleri (Friedrich + Lochner GmbH, 2011).

Kullanıcı tarafından seçilen kesit EN 1993 “6.2. Kesitin Dayanımı” bölümüne göre II. Mertebe Yanal Burulmalı Burkulma Teorisi’ne göre çözüm yapan FRILO analiz programı tarafından kontrol edilir. I kesitli çelik kirişlerin hesaplarında sağlanması gereken koşul (2.2) eşitliğinde verilmiştir:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (2.2)$$

Bu eşitlikte; N_{Ed} ; normal kuvvet değerini (kN), N_{Rd} ; tasarım normal kuvvet değerini (kN), $M_{y,Rd}$; y-y eksenindeki moment değerini (kNm), $M_{y,Ed}$; y-y eksenindeki tasarım momenti

değerini (kNm), $M_{z,Ed}$; z-z eksenindeki moment değerini (kNm), $M_{z,Rd}$; z-z eksenindeki tasarım momenti değerini (kNm) temsil eder (BS EN1993-1-1, 2005).

(2.2) eşitliği doğrulanmışsa, program tarafından çözüme devam edilir. Program tarafından EN 1993-1-1 “6.3. Elemanların Burkulma Dayanımı” başlığının altında “6.3.2. Eğilme etkisinde Elemanlar” başlığının altında bulunan bir alt başlıktaki “6.3.2.1. Burkulma Dayanımı” bölümündeki; $\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1$ şartı sağlatılarak işleme devam edilir. Eşitlikte; M_{Ed} ; moment değerini (kNm), M_{Rd} ; tasarım momenti değerini (kNm) verir.

Program tarafından, çözümün devamında içsel kuvvetlere dayalı dizayn değerleri hesaplanır, ardından M_{cr} kritik burulmalı burkulma moment değeri elde edilir. Bu değer (2.3) denkleminle hesap edilir:

$$M_{cr} = W_y * \frac{f_y}{\lambda_{LT}} \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte; W_y ; mukavemet momentini, f_y ; akma mukavemetini ve λ_{LT} ; narinliği temsil eder. (BS EN1993-1-1, 2005)

2.4.1.2. Programın Kullanılabileceği Kesitler

Program kemer takviyeli ve kesitsel sıçramaların olduğu kirişlerin tanımlanmasına olanak tanır. Mevcut kesitler aşağıdaki gibidir:

- Üst flanş dirsekli/siz çift ve tek taraflı simetrik I profiller
- U-Profiller, dikdörtgen kesitler
- Yuvarlak ve dikdörtgen kesitli borular
- Ayrıca herhangi bir asimetrik açık ince cidarlı çokgen kesit

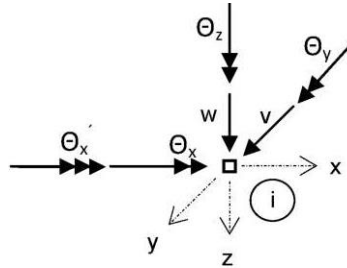
Bu arada, simetrik olmayan kesitlerin kullanılması halinde, ağırlık merkezinin rölatif noktası ile kayma merkezinin rölatif noktasının çakışmayacağına dikkat etmek gerekmektedir. Normal kuvvet etkisi altındaki sistemlerde, kullanıcıdan farklı ağırlık merkezleri sebebiyle, ilave eğilme momentleri tanımlanması da istenebilir (Friedrich + Lochner GmbH, 2011).

2.4.1.3. Ayrık Mesnetlerde Programın Kullanılabilirliği

Ayrık mesnetler kiriş üzerinde x-koordinatlarının belirlenmesi ile sıralanırlar.

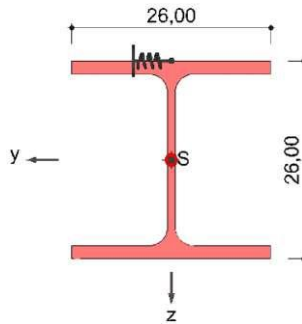
Düğüm noktalarındaki serbestlik derecelerine göre mesnet şartları aşağıdaki şekillerde tanımlanır:

- ✓ İki Öteleme
- ✓ Üç dönme
- ✓ Burulma (Şekil 2.5)



Şekil 2.6. Düğüm noktalarındaki serbestlik derecelerine göre mesnet şartları (Friedrich + Lochner GmbH, 2011).

Ötelenme serbestlik derecelerinin yay katsayısı olarak tanımlanması durumunda kesitte referans noktasına uzaklık atanması mümkündür (Şekil 2.6) (Friedrich + Lochner GmbH, 2011).



Şekil 2.7. Ötelenme serbestlik derecelerinin yay katsayısı olarak tanımlanması durumunda kesitte referans noktasına uzaklıklar (Friedrich + Lochner GmbH, 2011).

2.4.2. Programda Atanabilecek Yükler ve Yük Özellikleri

2.4.2.1. Yükler

Dış yük olarak:

- ✓ Yayılı düşey yükler
- ✓ y/z-Doğrultusunda tekil yükler
- ✓ y/z-Ekseni etrafında tekil momentler
- ✓ Burulma momentleri
- ✓ Çizgisel burulma momentleri

tanımlanabilmektedir (Friedrich + Lochner GmbH, 2011).

2.4.2.2. İlkel Kusurlar

Eğer elemanda başlangıçta bir şekil bozukluğu(ilkel kusur) varsa, bu kusurların ya kesitte iki asal eksen doğrultusundaki başlangıçtaki eğrilikler olarak, ya da boyuna eksen etrafında başlangıçtaki dalgalanmalar olarak, gözönüne alınması için, sıfır noktalarının ve sinüsoidal ya da parabolik yarı dalgaların genliklerinin, belirtilmesi gerekmektedir (Friedrich + Lochner GmbH, 2011).

2.4.2.3. Hareketli Yükler

Tekil yükler bir yük katarı olarak sınıflandırılabilir. Bu durumda limit yük pozisyonları tanımlanabilmektedir. Belirleyici yük pozisyonu için kriterler kesit kuvvetlerinin maksimum/minimum değerleri veya eksenel ya da eşdeğer gerilmelerdir. Belirleyici yük pozisyonu için program, yapısal güvenlik analizini, seçilen format için otomatik olarak gerçekleştirmektedir (Friedrich + Lochner GmbH, 2011).

2.4.2.4. Kirişlerde Bölgesel Yüklemeler

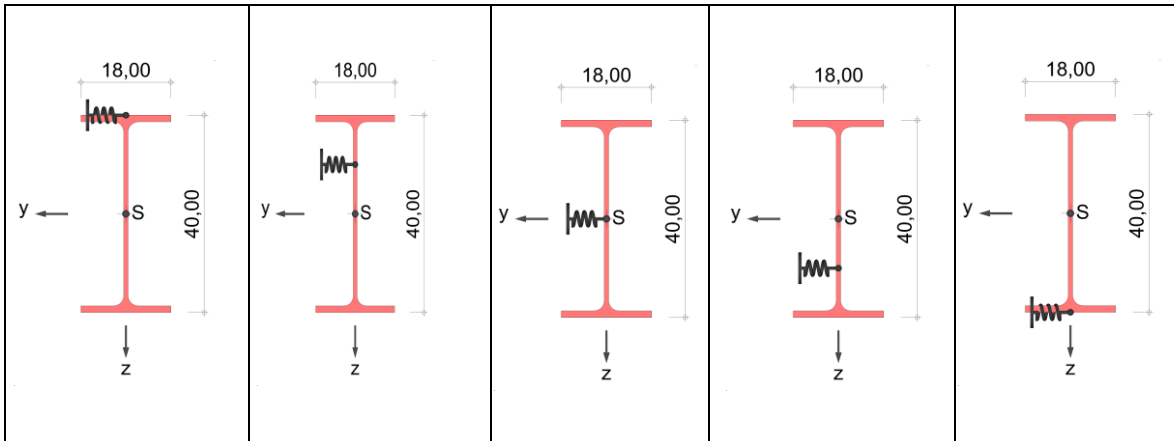
Alt flanş krenleri ve alt flanş tekerlekli krenlerinde, kren tekerlek yükleri ya da makaralı araba yükleri, eksantrik olarak giriş ağına etkirlir.

Yük etkiye noktasının etrafında, iki doğrultuda, bu yüklerin sonucu olarak, ikincil flanş eğilme gerilmeleri, meydana gelir. Program tarafından, bölgesel yük etkimesinden kaynaklanan gerilmeler hesaplanır ve bunlar genel kiriş gerilmeleri ile süperpoze edilir. Bu yerel yüklemeler, üst flanş dirsekli/siz çift-T kirişler için dikkate alınmaktadır (Friedrich + Lochner GmbH, 2011).

2.4.2.5. Mesnet, Yay ve Yük Koordinatları

Kesit sınırları, ayrık rijit ve elastik mesnetler, temel bölge sınırları, tekil yük etkiye noktaları, çizgisel yük sınırları ve kusur yarı dalgası sıfır noktaları x koordinatlarının belirtilmesi ile tanımlanır (Friedrich + Lochner GmbH, 2011)

Bu çalışmada, kirişlere eklenen yanal desteklerin konumları Şekil 2.7'de verilmiştir.

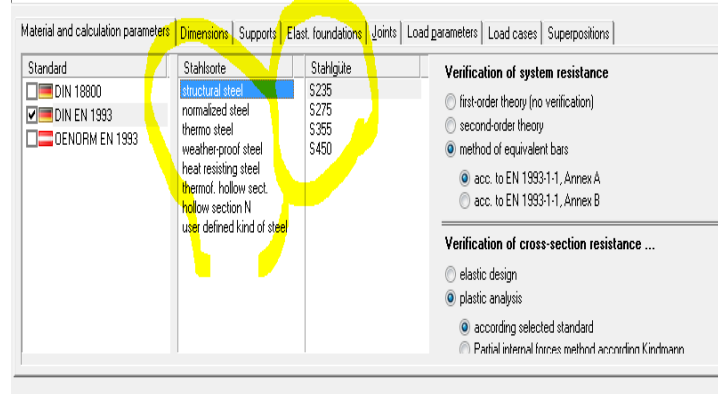


Şekil 2.8. Yanal desteklerin yerleri

2.5. Programın II. Mertebe Burulmalı Burkulma Analizi Yaparken Kullandığı Modülün Tanıtımı

2.5.1. Malzeme Seçimi

Program farklı çelik standartlarını ihtiva etmekte ayrıca bu kesitlerin değerlerinin elle girilerek kullanılmasına izin vermektedir. Bu değişmiş olan değerleri bir sayfa halinde yazdırmakta mümkündür (Şekil 2.9).



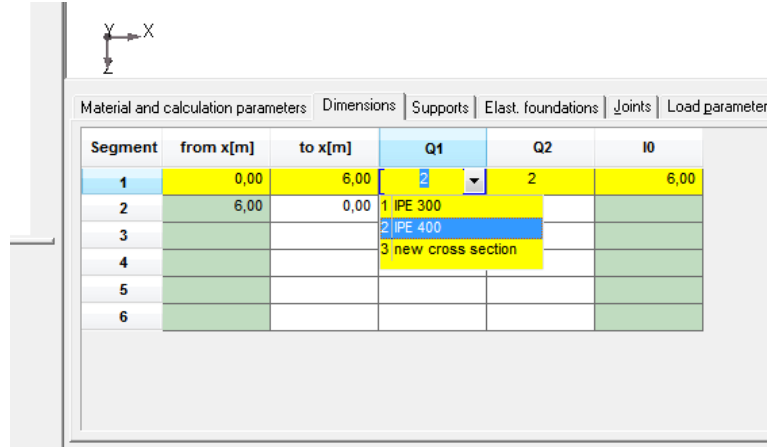
Şekil 2.9. Çelik standartlarına ait tablo değerleri

2.5.2. Boyutlar

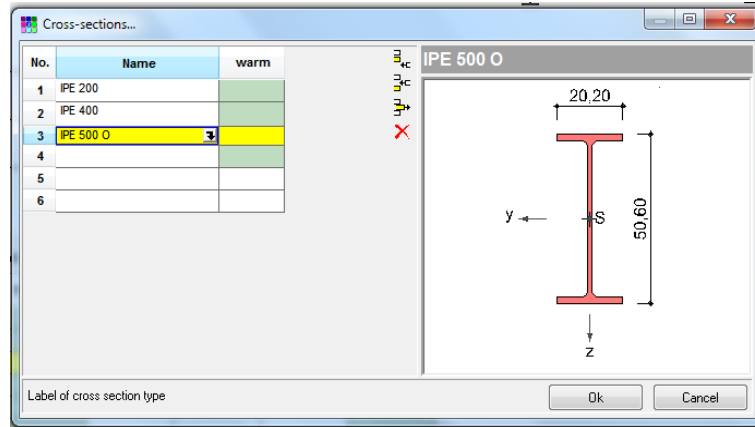
Bu arayüz, elemanın boyutunu belirlemek için kullanır. Kullanılmak istenen kesit tipi buradan seçilir. Kullanılacak kesitle ilgili tüm özellikler, bu arayüz altında bulunan iç içe geçmiş arayüzler vasıtasıyla görülür (Şekil 2.10-2.12).

| Segment | from x[m] | to x[m] | Q1 | Q2 | I0 |
|---------|-----------|---------|----|----|------|
| 1 | 0,00 | 6,00 | 2 | 2 | 6,00 |
| 2 | 6,00 | 0,00 | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |
| 6 | | | | | |

Şekil 2.10. Kesitin uzunluğunun girilmesi



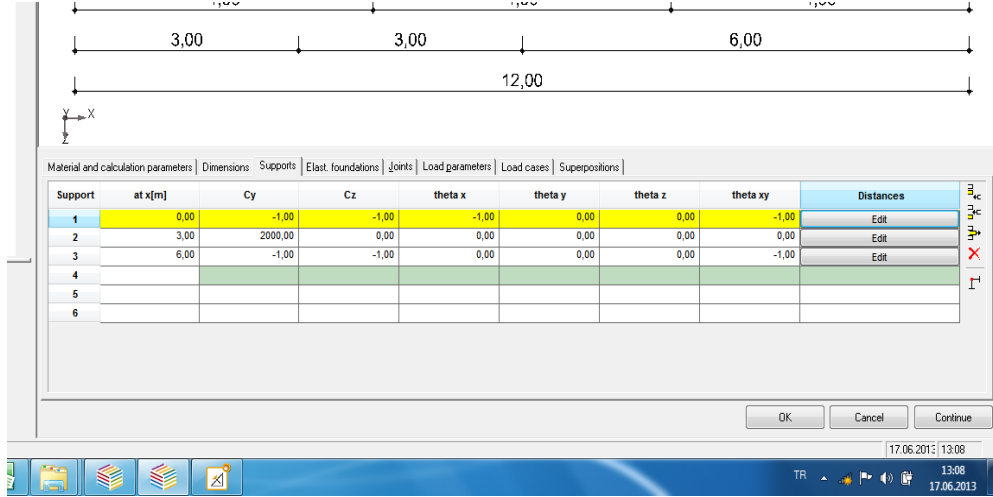
Şekil 2.11. Kesitin tipinin belirlenmesi



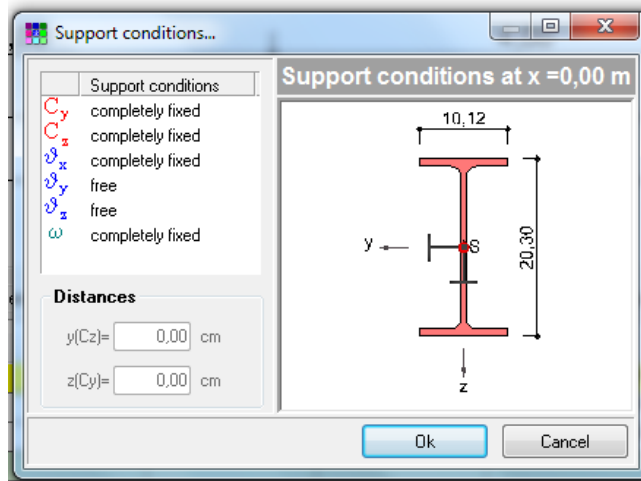
Şekil 2.12. Kesit tipine ait bir görsel

2.5.3. Destekler - Mesnetler

Bu arayüzden, programa mesnetler, destekler ve mesnetlerin serbestlik durumları girilir. Arayüze girilebilecek değerler -1 ile + sonsuz arasında değişir. Arayüze -1 değeri girildiğinde, mesnetin o yöndeki tepkisi, tamamen tutulu olarak işlem görür. 0 değeri girildiğinde mesnetin o yöndeki tepkisi, serbest bırakılır. 1 ve daha büyük değerlerde ise mesnetin o yöndeki tepkisi, elastik bir yay gibi işleme katılır (Şekil 2.13-2.14).



Şekil 2.13. Mesnetlerin konulacağı yerler



Şekil 2.14. Mesnet ve desteklerin özellikleri

2.6. FRILO Programı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde tekil yük etkisindeki 6 m, 8 m ve 10 m uzunluklarında IPE 400 profilinden imal edilmiş, basit mesnetli çelik kirişler ile konsol kirişlerde FRILO ile bulunan sonuçlar, (1.14) denklemin elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.1. Değişik kiriş uzunlukları için IPE 400 profilinden imal basit kiriş için yanal burkulma yükleri

| L(m) | P_{kr} (kN) [(1.14) denklemi] | P_{kr} (kN) FRILO | Mutlak Hata (%) |
|-------------|--|--|----------------------------------|
| 6 | 209.67 | 209.05 | 0.29 |
| 8 | 107.00 | 106.58 | 0.39 |
| 10 | 64.99 | 64.66 | 0.50 |

Tablo 2.2. Değişik kiriş uzunlukları için IPE 400 profilinden imal konsol kiriş için yanal burkulma yükleri

| L(m) | P_{kr} (kN) [(1.14) denklemi] | P_{kr} (kN) FRILO | Mutlak Hata (%) |
|-------------|--|--|----------------------------------|
| 6 | 65.05 | 65.61 | 0.86 |
| 8 | 32.88 | 32.65 | 0.68 |
| 10 | 19.15 | 19.27 | 0.68 |

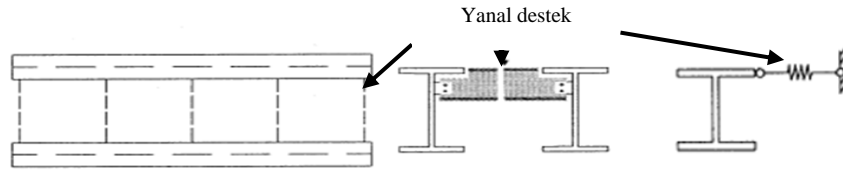
1.14 denklemi ile programdan elde edilen yanal burkulma yük değerleri Tablo 2.1-2.2’de karşılaştırılmıştır. Tablo 2.1-2.2’de yapılan karşılaştırma sonucunda, P_{kr} değerinin hesaplanmasında, program ile 1.14 denklemi arasında hata ortalaması % 0.56 bulunmuştur. Bu sonuçlara göre FRILO programı ile Yanal burulmalı burkulma yüklerini hesaplamanın çok büyük kolaylığı olmuş, göz ardı edilebilecek bir hata ile yanal burulmalı burkulma yükleri elde edilmiştir.

Bu sonuçlar incelendiğinde aynı kesit tipine sahip kirişlerin narinliğinin artmasıyla birlikte, kirişin karşı koyabileceği kritik yanal burulmalı burkulma yükünün azalacağı, kirişin daha küçük bir yüklemeye yanal burulmalı burkulmaya maruz kalacağı görülmüştür.

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. İnce Cidarlı Elemanlarda Desteklerin Yanal Burkulma Yüküne Etkisi

İnce cidarlı elemanlarda, daha önce belirtildiği üzere, yanal burkulma önemli bir problem teşkil eder. Elemanın kesit boyutlarını değiştirmeden, sistemin yanal burkulma yükünü artırmak için sisteme bazı yardımcı elemanlar eklemek gerekebilir. Sistemin yanal burkulma yükünü artıran bu yardımcı elemanlara destek denir. Genel anlamda, destekler, yanal destekler ve burulma destekleri olarak iki kısma ayrılır. Yanal destek, elemana bağlı olduğu noktadaki elemanın, yanal olarak yer değiştirmesini etkileyerek sistemin yanal olarak burkulacağı yük değerini artırır. Burulma destekleri ise kesitin kendi etrafında dönmesini (burulmasını) kısıtlayarak sistemin yanal burkulma yükünü artırır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. I kesitli kirişler için yanal destek

Yanal burkulmuş bir elemanda, her noktanın yer değiştirmesi veya dönmesi eşit değildir. Bu sebeple, yanal burkulma yükünü artırmak için elemana yerleştirilecek desteğin konumu önemli bir etkendir. Yapıda engelleyici bir durum yoksa (destekler istenildiği noktalara rahatlıkla bağlanabiliyorlarsa), elemanın yanal burkulma davranışı iyi analiz edilmeli ve destek öyle bir konumlandırılmalı ki, daha küçük destek yay sabitlerinde sisteme zarar vermeyecek yanal burkulma yükü elde edilebilsin. Desteğin yeri sabitse (yapının durumundan dolayı destek sadece bir noktaya yerleştirilebiliyorsa), desteğin yay sabiti, ekonomik şartlar gereği, en uygun (optimum) şekilde seçilmelidir.

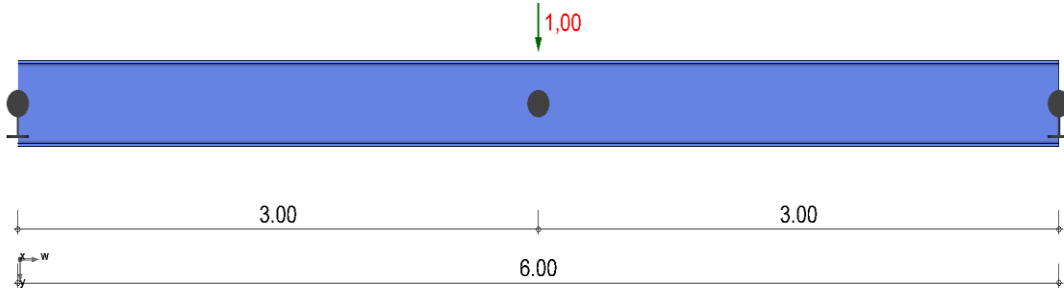
3.1.1. I Kesitli Kirişler İçin Yanal Desteğin Yanal Burkulma Yüküne Etkisi

I kesitli kirişler için yanal desteğin yanal burkulma yüküne etkisini belirlemek için değişik yay sabitlerine sahip yanal desteğin, I kesitli kirişte yükseklik doğrultusunda farklı noktalara yerleştirilmesiyle, yanal burkulma yükünün nasıl değişeceği araştırılmıştır.

Uygulama için 6 m, 8 m ve 10 m uzunluğunda I kesitli IPE 400 profilinden imal iki ucu basit mesnetli, ortasından tekil yük etkisindeki kiriş ile 6 m, 8 m ve 10 m uzunluğunda I kesitli, IPE 400 profilinden imal serbest ucundan tekil yük etkisindeki konsol kiriş olmak üzere iki farklı model seçilmiştir.

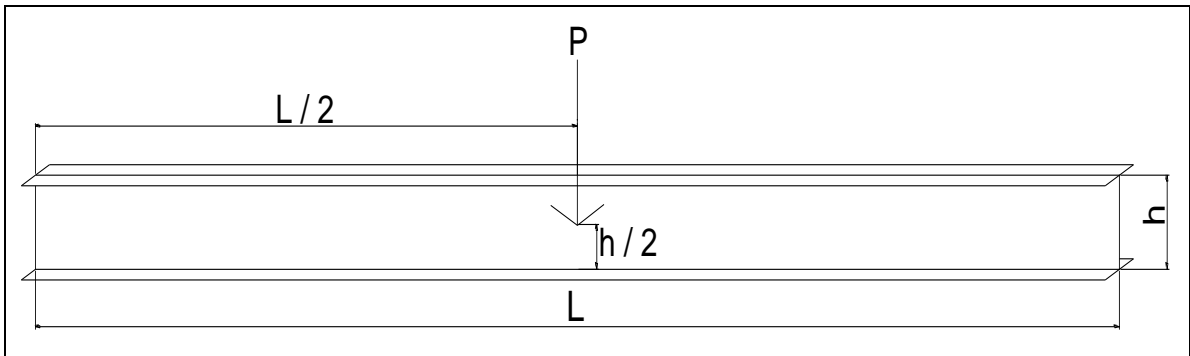
IPE 400 profili kesit özellikleri şöyledir:

$$E = 2100 \text{ kN/cm}^2 \quad J = 51.3 \text{ cm}^4 \quad \Gamma = 490000 \text{ cm}^6 \quad I_y = 1320 \text{ cm}^4$$



Şekil 3.2. 6 m uzunluğundaki basit kiriş için yanal desteğin uygulama yeri

Tekil yüke maruz basit mesnetli kiriş için yanal desteğin yeri ile yükün uygulandığı nokta, Şekil 3.2-3.3 de gösterilmiştir. Burada h başlıklar arası mesafeyi temsil etmektedir. β_y yanal desteğin yay sabitini temsil etmektedir ve yanal desteğin, kiriş kesitinin merkezinde uygulandığı nokta ise referans noktası olarak gözönünde bulundurulmuştur. Kiriş uzunluğu ise L ile temsil edilmiştir. Yukarıda belirtilen iki farklı (basit kiriş, konsol kiriş) örnek için elde edilen sonuçlar grafikler yardımı ile ifade edilmiştir. Uygulama sonunda, değişik konum ve yay sabitlerine sahip destekler için grafikler çizilerek, ifade edilen üç farklı uzunluktaki kirişte desteklerin, yanal burkulma yükünü nasıl etkiledikleri incelenmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Basit kirişte yükün uygulandığı nokta

3.1.2. Ortasından Tekil Yük Etkisindeki Basit Kirişte Yanal Desteğin, Yanal Burkulma Yüküne Etkisi

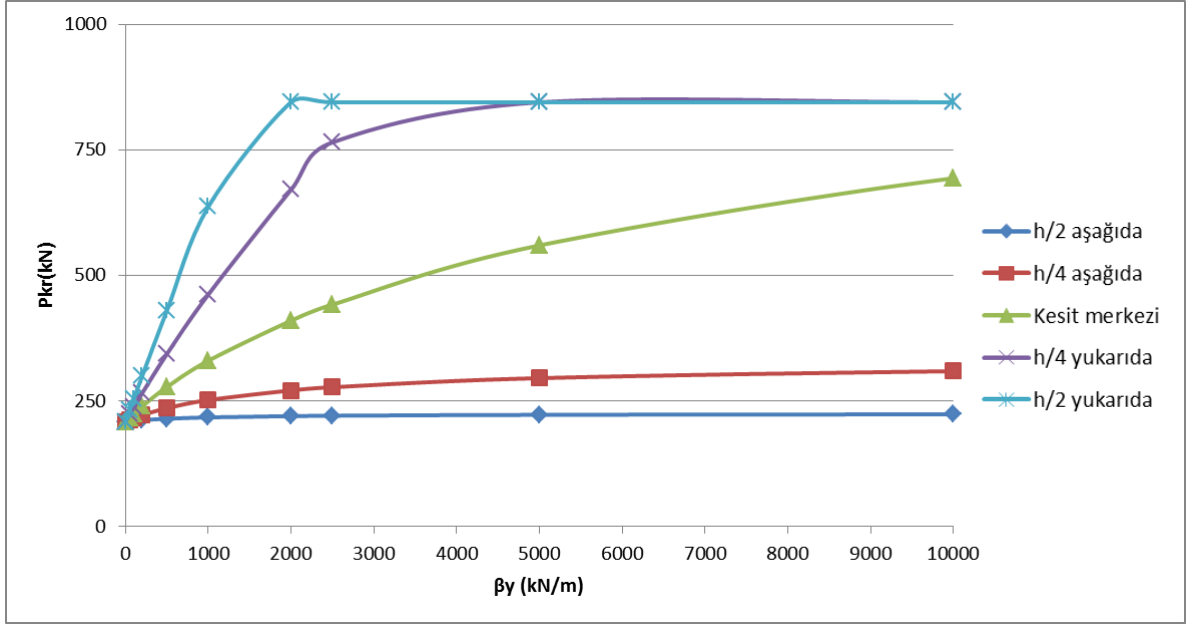
Bu bölümde, yanal destek yay sabitlerinin tekil yük etkisindeki basit mesnetli kiriş ile konsol kirişte, yanal burkulmaya etkisini incelemek için 6 m, 8 m ve 10 m uzunluğunda IPE 400 kesitli çelik kirişler kullanılmıştır. Desteğin yay sabitinin ve uygulama noktasının, yanal burkulma yüküne etkisinin belirlenmesi için, seçilen elemana değişik yay sabitlerine sahip yanal destek elemanları kiriş kesitine ve başlıklara, uygulanan tekil yükün hizasında, farklı noktalara eklenmiştir ancak FRILO da yük kesit merkezine uygulanmasına rağmen, programın görsellerinde kirişin üst başlığına uygulanıyor gibi gözükmektedir (Şekil 3.2-3.3) .

3.1.2.1 Basit Kirişte Yanal Desteğin, Yanal Burkulma Yüküne Etkisi

Bu bölümde, yanal desteğin, basit mesnetli kirişte yanal burkulma yüküne etkisi incelenmiş ve bulunan değerler Şekil 3.4-3.6 ve Tablo 3.1-3.3 de karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.1. 6 m uzunluğundaki basit kirişte yanal burkulma yükleri (kN)

| Yay Rijitliği | h/2 aşağıda | h/4 aşağıda | Kesit merkezi | h/4 yukarıda | h/2 yukarıda |
|---------------|-------------|-------------|---------------|--------------|--------------|
| 0 | 209.05 | 209.05 | 209.05 | 209.05 | 209.05 |
| 50 | 209.88 | 212.59 | 217.09 | 223.56 | 231.93 |
| 100 | 209.63 | 215.79 | 224.81 | 237.78 | 254.60 |
| 200 | 211.91 | 221.67 | 239.38 | 265.44 | 299.38 |
| 500 | 214.65 | 235.71 | 277.83 | 343.52 | 429.92 |
| 1000 | 217.27 | 251.83 | 330.17 | 462.17 | 637.15 |
| 2000 | 219.83 | 271.07 | 409.86 | 670.84 | 844.74 |
| 2500 | 220.54 | 277.39 | 441.95 | 764.99 | 844.74 |
| 5000 | 222.31 | 295.43 | 559.85 | 844.74 | 844.74 |
| 10000 | 223.41 | 309.19 | 693.59 | 844.74 | 844.74 |
| 15000 | 223.83 | 314.98 | 768.97 | 844.74 | 844.74 |
| 20000 | 224.05 | 318.18 | 817.31 | 844.74 | 844.74 |



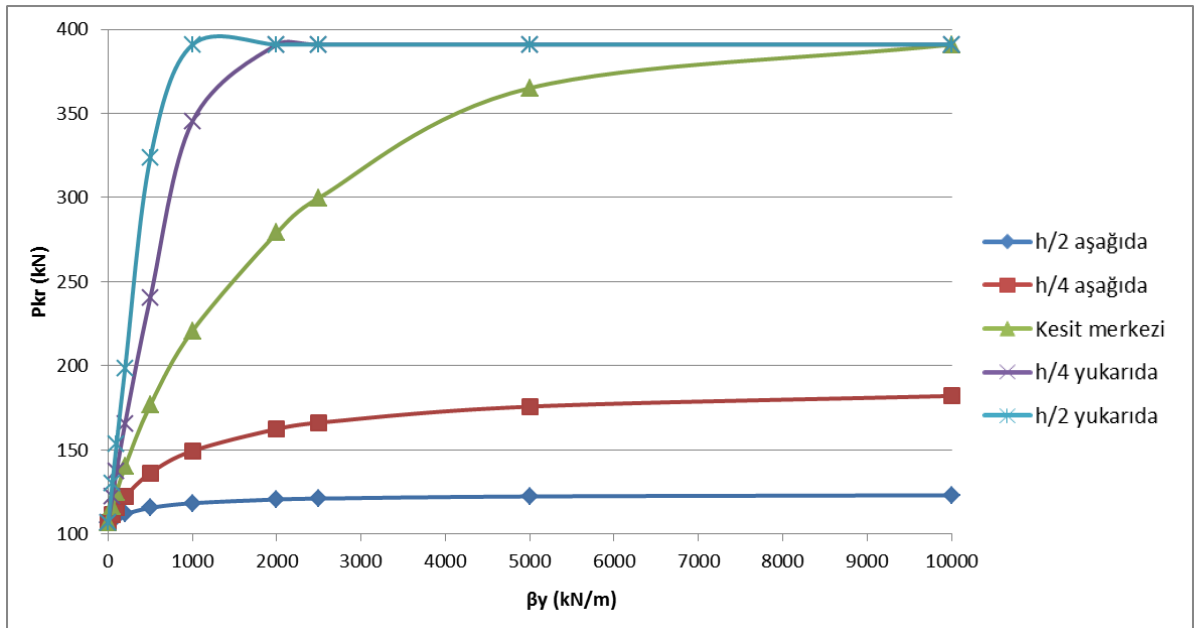
Şekil 3.4. 6 m uzunluğundaki basit kirişte yanal burkulma yükleri (kN)

Çalışmada, 6 m uzunluğundaki basit kirişte desteğin kesit üzerindeki yeri değiştirildikçe, yanal burulmalı burkulmanın meydana gelmesi için gereken kritik yük değeri farklılık göstermiştir. Yanal destekler kiriş uzunluğunun orta noktasına yerleştirilmiştir $L/2$. Kiriş kesitinin üzerinde ise düşey ekseninde kesit merkezinden $h/4$ ve $h/2$ kadar aşağıya, kesit merkezine ve kesit merkezinden $h/4$ ve $h/2$ kadar yukarıya yerleştirilmiştir. Her bir duruma ait yanal burkulma yükleri P_{kr} , sırasıyla $\beta_y=100$ kN/m için 210.63, 215.79, 224.81, 237.78 ve 254.60 kN; $\beta_y=500$ kN/m için 214.65, 235.71, 277.83, 343.52 ve 429.92 kN $\beta_y=1000$ kN/m için 217.27, 251.83, 330.17, 462.17 ve 637,15 kN; $\beta_y=2500$ kN/m için, 220.54, 277.39, 441.95, 764.99 ve 844.74 kN hesaplanmıştır. Değerler incelendiğinde 100, 500, 1000 ve 2500 kN/m yay sabitleri için, yanal desteğin tatbik edilmediği duruma göre desteğin üst başlığa konulduğu durumda, kirişteki yanal burkulma yükleri sırasıyla 1.21, 2.05, 3.04 ve 4.03 kat artmıştır.

Yapılan çalışmada, yanal destek üst başlığa yerleştirildiğinde, desteğin yay sabiti artırıldıkça yanal burkulma yükünün arttığı; destek, alt başlığa yerleştirildiğinde ise yanal burkulma yükünün, destek yay sabitinin artması ile pek artmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 3.2. 8 m uzunluğundaki basit kirişte yanal burkulma yükleri (kN)

| Yay Rijitliği | h/2 aşağıda | h/4 aşağıda | Kesit merkezi | h/4 yukarıda | h/2 yukarıda |
|---------------|-------------|-------------|---------------|--------------|--------------|
| 0 | 106.58 | 106.58 | 106.58 | 106.58 | 106.58 |
| 50 | 108.31 | 111.35 | 116.02 | 122.36 | 130.32 |
| 100 | 109.71 | 115.48 | 124.65 | 137.36 | 153.44 |
| 200 | 111.85 | 122.32 | 140.04 | 165.56 | 198.21 |
| 500 | 115.55 | 136.27 | 176.73 | 240.53 | 323.67 |
| 1000 | 118.34 | 149.45 | 220.80 | 345.34 | 390.97 |
| 2000 | 120.55 | 162.46 | 279.02 | 390.97 | 390.97 |
| 2500 | 121.10 | 166.21 | 299.90 | 390.97 | 390.97 |
| 5000 | 122.34 | 175.79 | 365.15 | 390.97 | 390.97 |
| 10000 | 123.06 | 182.09 | 390.97 | 390.97 | 390.97 |
| 15000 | 123.31 | 184.51 | 390.97 | 390.97 | 390.97 |
| 20000 | 123.44 | 185.79 | 390.97 | 390.97 | 390.97 |



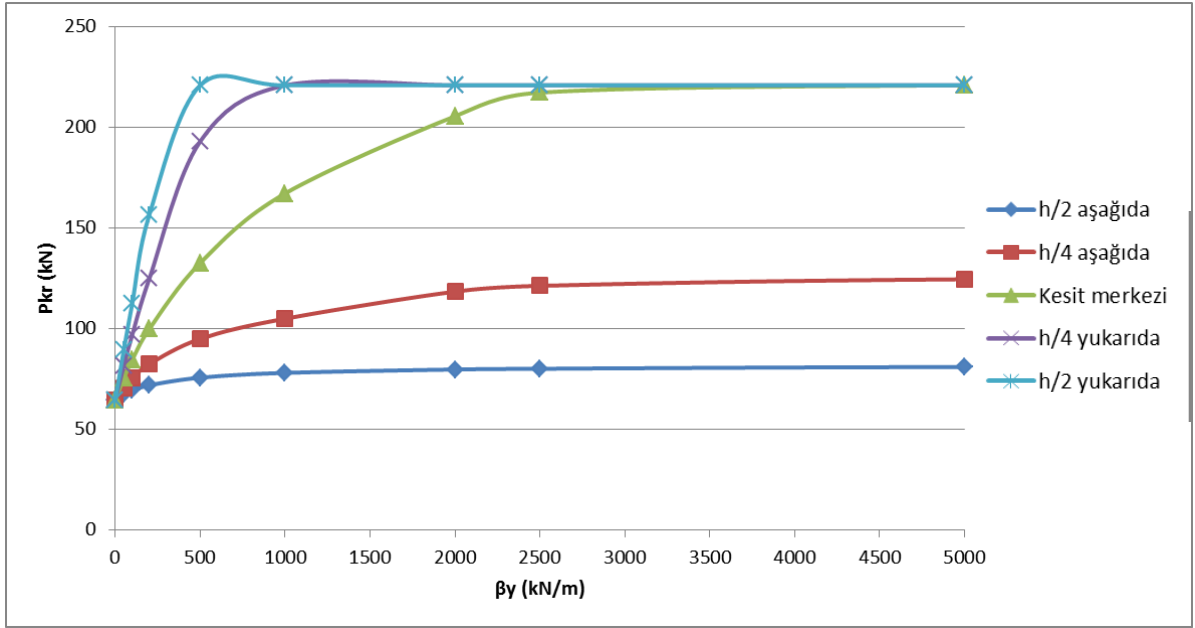
Şekil 3.5. 8 m uzunluğundaki basit kirişte yanal burkulma yükleri (kN)

8 m uzunluğundaki basit kirişte desteğin kesit üzerindeki yeri değiştirildikçe yanal burulmalı burkulmanın meydana gelmesi için gereken kritik yük değeri farklılık göstermiştir. Yanal destekler kiriş uzunluğunun orta noktasına yerleştirilmiştir $L/2$. Kiriş kesitinin üzerinde ise düşey ekseninde kesit merkezinden $h/4$ ve $h/2$ kadar aşağıya, kesit merkezine ve kesit merkezinden $h/4$ ve $h/2$ kadar yukarıya yerleştirilmiştir. Her bir duruma ait yanal burkulma yükleri P_{kr} sırasıyla $\beta_y=100$ kN/m için 109.71, 115.48, 124.65, 137.36 ve 153.44 kN; $\beta_y=200$ kN/m için, 71.90, 82.43, 99.79, 124.72 ve 156.35 kN; $\beta_y = 500$ kN/m için 115.55, 136.27, 176.73, 240.53 ve 323.67 kN; $\beta_y=1000$ kN/m için 118.34, 149.45, 220.80, 345.34 ve 390.97kN hesaplanmıştır. Değerler incelendiğinde 100, 200, 500 ve 1000 kN/m yay sabitleri için, yanal desteğin tatbik edilmediği duruma göre desteğin üst başlığa konulduğu durumda, kirişteki yanal burkulma yükleri sırasıyla 1.44, 1.86, 3.04 ve 3.67 kat artmıştır.

Yanal destek üst başlığa yerleştirildiğinde desteğin yay sabiti artırıldıkça yanal burkulma yükünün arttığı; destek, alt başlığa yerleştirildiğinde ise yanal burkulma yükünün destek yay sabitinin artması ile pekte artmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 3.3. 10 m uzunluğundaki basit kirişte yanal burkulma yükleri (kN)

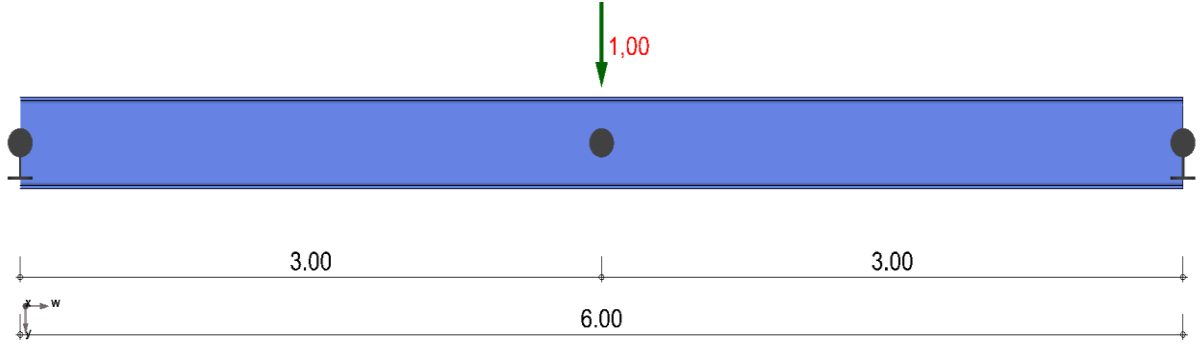
| Yay Rijitliği | $h/2$ aşağıda | $h/4$ aşağıda | Kesit merkezi | $h/4$ yukarıda | $h/2$ yukarıda |
|---------------|---------------|---------------|------------------|----------------|----------------|
| 0 | 64.66 | 64.66 | 64.66 | 64.66 | 64.66 |
| 50 | 67.37 | 70.64 | 75.38 | 81.61 | 89.29 |
| 100 | 69.30 | 75.34 | 84.52 | 97.00 | 112.58 |
| 200 | 71.90 | 82.43 | 99.79 | 124.72 | 156.35 |
| 500 | 75.68 | 94.92 | 132.60 | 192.92 | 220.74 |
| 1000 | 78.08 | 104.97 | 167.10 | 220.74 | 220.74 |
| 2000 | 79.75 | 118.39 | 205.41 | 220.74 | 220.74 |
| 2500 | 80.14 | 121.26 | 217.16 | 220.74 | 220.74 |
| 5000 | 80.99 | 124.51 | 220.74 | 220.74 | 220.74 |
| 10000 | 81.45 | 125.70 | 220.74 | 220.74 | 220.74 |
| 15000 | 81.61 | 126.32 | 220.74 | 220.74 | 220.74 |
| 20000 | 81.70 | 126.70 | 220.74 | 220.74 | 220.74 |



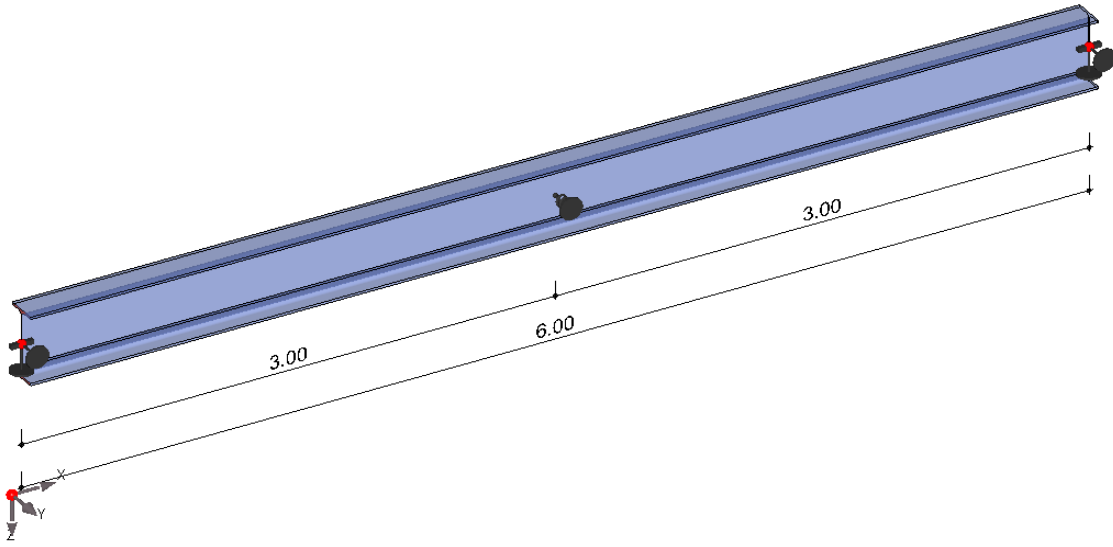
Şekil 3.6. 10 m uzunluğundaki basit kirişte yanal burkulma yükleri (kN)

10 m uzunluğundaki basit kirişte, desteğin kesit üzerindeki yeri değiştirildikçe yanal burulmalı burkulmanın meydana gelmesi için gereken kritik yük değeri farklılık göstermiştir. Yanal destekler kiriş uzunluğunun orta noktasına yerleştirilmiştir $L/2$. Kiriş kesitinin üzerinde ise düşey ekseninde kesit merkezinden $h/4$ ve $h/2$ kadar aşağıya, kesit merkezine ve kesit merkezinden $h/4$ ve $h/2$ kadar yukarıya yerleştirilmiştir. Her bir duruma ait yanal burkulma yükleri P_{kr} sırasıyla $\beta_y=50$ kN/m için, 67.37, 70.64, 75.38, 81.61 ve 89.29kN; $\beta_y=100$ kN/m için 69.30, 75.34, 84.52, 97.00 ve 112.58 kN; $\beta_y=200$ kN/m için 71.90, 82.43, 99.79, 124.72 ve 156.35 kN; $\beta_y=500$ kN/m için 75.68, 94.92, 132.60, 192.92 ve 220.74 kN olarak hesaplanmıştır. Değerler incelendiğinde 50, 100, 200 ve 500 kN/m yay sabitleri için, yanal desteğin tatbik edilmediği duruma göre desteğin üst başlığa konulduğu durumda, kirişteki yanal burkulma yükleri sırasıyla 1.38, 1.74, 2.42 ve 3.41 kat artmıştır.

Yanal destek üst başlığa yerleştirildiğinde desteğin yay sabiti artırıldıkça yanal burkulma yükünün arttığı; destek, alt başlığa yerleştirildiğinde ise yanal burkulma yükünün destek yay sabitinin artması ile pekte artmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 3.7-3.12 da görülür. Şekil 3.7-3.8 boş kiriş, diğer şekiller sırasıyla yanal burulmalı burkulma etkisindeki kiriş örnekleridir.



Şekil 3.7. Basit kiriş (önden görünüş)



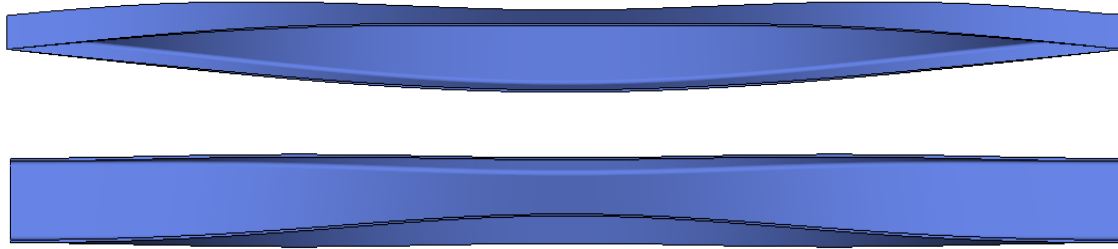
Şekil 3.8. Basit kiriş (perspektif görünüş)



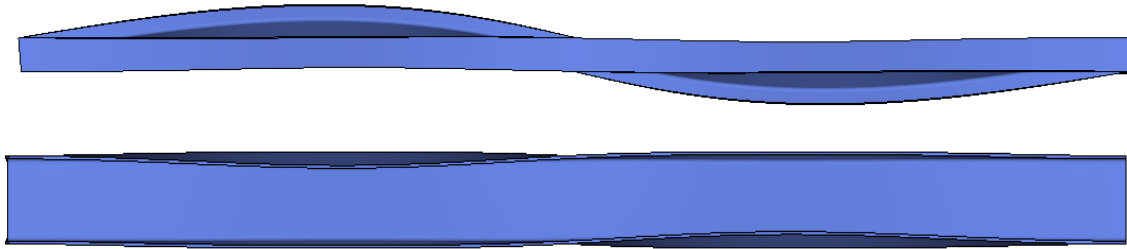
Şekil 3.9. 6 m uzunluğundaki basit kirişin yanal burkulmuş hali (üstten ve önden)



Şekil 3.10. 6 m uzunluğundaki basit kirişte yanal desteğin kesit merkezinde olduğu durumda $\beta_y = 1000$ kN/m için yanal burkulmuş hali (üstten ve önden)



Şekil 3.11. 6 m uzunluğundaki basit kirişte yanal desteğin kesit merkezinde olduğu durumda $\beta_y = 5000$ kN/m için yanal burkulmuş hali (üstten ve önden)



Şekil 3.12. 6 m uzunluğundaki basit kirişte yanal desteğin kesit merkezinde olduğu durumda $\beta_y = 25000$ kN/m için yanal burkulmuş hali (üstten ve önden)

Şekil 3.7’de görüldüğü gibi ortasından tekil yüklü, basit kirişin yanal burkulma durumunda kirişin bütün noktaları, aynı yönde yatay yer değiştirmeye başlamıştır. Ancak, yay rijitliğinin artırılmasıyla kirişin üst başlığında yatay yer değiştirmeler bir miktar engellenmiş ve kritik yanal burkulma yükü artmıştır. Daha büyük yay rijitlikleri için, kirişin alt başlığındaki bazı noktaların yer değiştirmeleri, kirişin üst başlığındaki yer değiştirmelere göre farklı yönlere kaymaya başlamıştır. Yanal desteğin yay sabiti arttıkça, farklı yönde, yatay yer değiştirme yapan nokta sayısı da artmaktadır. Öyle ki, yanal destek yay sabiti biraz daha artırıldığında kirişin uzunluk boyunca orta noktasına göre sol tarafındaki yatay yer değiştirmelerin sağ taraftaki yer değiştirmelerle

farklı yönde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 3.12'ye tekabül eder ve kirişin yanal burkulmada ikinci moduna denk gelir. Şekil 3.12'den de görüleceği üzere ikinci modda yer değiştirmelerde artık en büyük yer değiştirme kirişin orta noktasının üst başlığında değil, kiriş uzunluğunun çeyreğinin üst başlığında meydana gelir. Destek yerleştirmedeki amaç, kirişin yanal yerdeğiştirmesini azaltarak yanal burkulmasını önlemek olduğu için, belli bir yanal destek yay sabitinden sonra yanal burkulma yükünün artmadığı söylenir. Sonuçta kiriş birinci modda burkulacağından kritik burkulma yükü aşılmıştır.

Çalışmada 6 m uzunluğundaki kesit merkezinden desteklenmiş basit kiriş için tam desteklenme durumunda (ikinci moda burkulma) yanal burkulma yükü $P_{kr}=844.74$ kN olarak belirlenmiştir. Bu yük değerine karşılık gelen yay sabiti değeri ise $\beta_y=27750$ kN/m olarak hesap edilmiştir. Buna karşın aynı kirişte üst başlıktan desteklenme durumunda yanal burkulma yükü $P_{kr}=844.74$ kN iken, bu yük değerine karşılık gelen yay sabiti değeri ise $\beta_y=2000$ kN/m olarak hesap edilmiştir. Aynı şartlarda yanal burkulma yükü $P_{kr}=844.74$ kN iken, kesit merkezi ile üst başlık arasına yerleştirilmiş yanal desteğin yay sabiti değeri $\beta_y=5000$ kN/m olarak elde edilmiştir.

Bu çalışmada 8 m uzunluğundaki kesit merkezinden desteklenmiş basit kiriş için tam desteklenme durumunda (ikinci moda burkulma) yanal burkulma yükü $P_{kr}=390.97$ kN olmaktadır. Bu yük değerine karşılık gelen yay sabiti değeri ise $\beta_y=7250$ kN/m olarak hesap edilmiştir. Buna karşın aynı kirişte üst başlıktan desteklenme durumunda yanal burkulma yükü $P_{kr}=390.97$ kN iken, bu yük değerine karşılık gelen yay sabiti değeri ise $\beta_y=1000$ kN/m olarak hesap edilmiştir. Aynı şartlarda yanal burkulma yükü $P_{kr}=390.97$ kN iken, kesit merkezi ile üst başlık arasına yerleştirilmiş yanal desteğin yay sabiti değeri $\beta_y=2000$ kN/m olarak elde edilmiştir.

10 m uzunluğundaki kesit merkezinden desteklenmiş basit kiriş için tam desteklenme durumunda (ikinci moda burkulma) yanal burkulma yükü $P_{kr}=220.74$ kN olmaktadır. Bu yük değerine karşılık gelen yay sabiti değeri ise $\beta_y=2800$ kN/m olarak hesap edilmiştir. Buna karşın aynı kirişte üst başlıktan desteklenme durumunda yanal burkulma yükü $P_{kr}=220.74$ kN iken, bu yük değerine karşılık gelen yay sabiti değeri ise $\beta_y=500$ kN/m olarak hesap edilmiştir. Aynı şartlarda yanal burkulma yükü $P_{kr}=220.74$ kN iken kesit merkezi ile üst başlık arasına yerleştirilmiş yanal desteğin yay sabiti değeri $\beta_y=1000$ kN/m olarak elde edilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde 6, 8 ve 10 m uzunluğundaki basit kirişler, en büyük yanal burulmalı burkulma yüküne maruz kaldıklarında, kesit merkezine yerleştirilmiş olan yanal

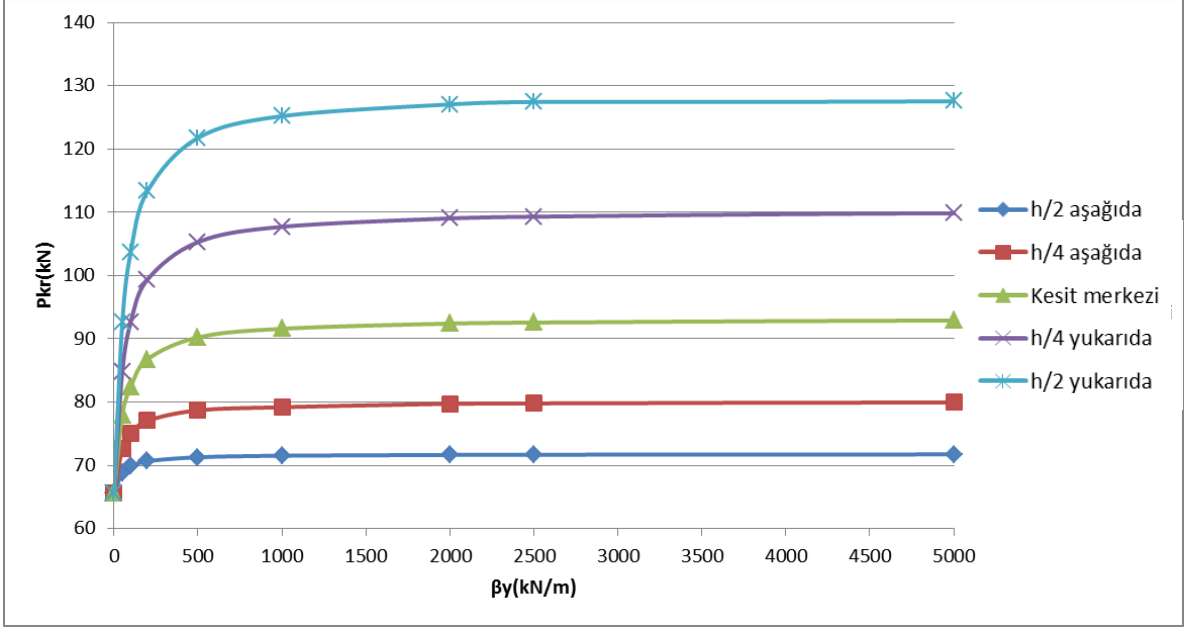
desteğin yay sabiti değerine göre, üst başlığa yerleştirilmiş yanal desteğin yay sabiti değeri β_y , sırasıyla yaklaşık olarak 13.88, 7.25 ve 5.6 kat azalmıştır. Kesit merkezi ile üst başlık arasına yerleştirilmiş yanal desteğin yay sabiti değerleri, kesit merkezine yerleştirilmiş olan yanal desteğin yay sabiti değerlerine göre sırasıyla 5.55, 3.63 ve 3.7 kat azalmıştır. Sonuçta, üst başlığa eklenecek olan daha küçük bir yay sabitine sahip yanal destek, kirişin yanal burulmalı burkulma yükünü, çok yüksek oranda arttırmıştır.

3.1.2.2. Konsol Kirişte, Yanal Desteğin Yanal Burkulma Yüküne Etkisi

Bu bölümde, yanal desteğin konsol kirişte yanal burkulma yüküne etkisi incelenmiş ve bulunan değerler Şekil 3.13-3.15 ve Tablo 3.4-3.6'da karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.4. 6 m uzunluğundaki konsol kirişte yanal burkulma yükleri (kN)

| Yay Rijitliği | h/2 aşağıda | h/4 aşağıda | Kesit merkezi | h/4 yukarıda | h/2 yukarıda |
|---------------|-------------|-------------|---------------|--------------|--------------|
| 0 | 65.61 | 65.61 | 65.61 | 65.61 | 65.61 |
| 50 | 68.89 | 72.62 | 78.00 | 84.85 | 92.68 |
| 100 | 69.89 | 75.06 | 82.41 | 92.62 | 103.72 |
| 200 | 70.67 | 77.06 | 86.78 | 99.39 | 113.38 |
| 500 | 71.29 | 78.71 | 90.24 | 105.29 | 121.77 |
| 1000 | 71.54 | 79.21 | 91.61 | 107.72 | 125.20 |
| 2000 | 71.66 | 79.73 | 92.42 | 109.04 | 127.06 |
| 2500 | 71.69 | 79.81 | 92.58 | 109.31 | 127.44 |
| 5000 | 71.74 | 79.96 | 92.91 | 109.87 | 127.56 |
| 10000 | 71.77 | 80.03 | 93.07 | 110.15 | 128.62 |
| 15000 | 71.78 | 80.06 | 93.13 | 110.24 | 128.76 |
| 20000 | 71.79 | 80.07 | 93.15 | 110.29 | 128.82 |



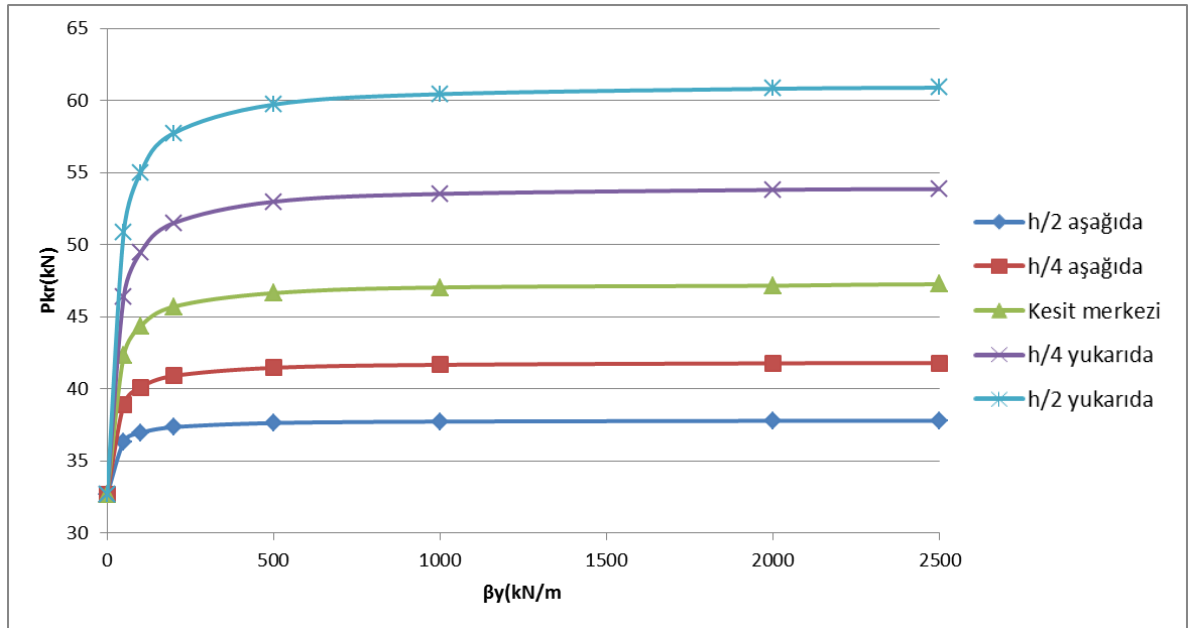
Şekil 3.13. 6 m uzunluğundaki konsol kirişte yanal desteğin yay sabitlerine göre yanal burkulma yükleri (kN)

Çalışmada 6 m uzunluğundaki konsol kirişte desteğin kesit üzerindeki yeri değiştirildikçe yanal burulmalı burkulmanın meydana gelmesi için gereken kritik yük değeri farklılık göstermiştir. Yanal destek konsol kirişin serbest ucuna tatbik edilmiştir (L). Kiriş kesiti üzerinde ise kesit merkezine, düşey ekseninde kesit merkezinden $h/4$ kadar ve $h/2$ kadar yukarıya, kesit merkezinden $h/4$ ve $h/2$ kadar aşağıya yerleştirilmiştir. Her bir duruma ait yanal burkulma yükleri P_{kr} sırasıyla $\beta_y=50$ kN/m için 68.89, 72.62, 78.00, 84.85 ve 92.68 kN; $\beta_y=100$ kN/m için 69.89, 75.06, 82.41, 92.62 ve 103.72 kN; $\beta_y=200$ kN/m için 70.67, 77.06, 86.78, 99.39 ve 113.38 kN; $\beta_y=500$ kN/m için, 71.29, 78.71, 90.24, 105.29 ve 121.77 kN olarak hesaplanmıştır. Değerler incelendiğinde 50, 100, 200 ve 500 kN/m yay sabitleri için, yanal desteğin tatbik edilmediği duruma göre desteğin üst başlığa konulduğu durumda, kirişteki yanal burkulma yükleri sırasıyla 1.41, 1.58, 1.73 ve 1.86 kat artmıştır.

Konsol kirişte yanal destek üst başlığa yerleştirildiğinde desteğin yay sabiti artırıldıkça yanal burkulma yükünün belirgin bir şekilde arttığı; destek, alt başlığa yakın bölgelere yerleştirildiğinde ise yanal burkulma yükünün destek yay sabiti artması ile pek de artmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 3.5. 8 m uzunluğundaki konsol kirişte yanal burkulma yükleri (kN)

| Yay Rijitliği | h/2 aşağıda | h/4 aşağıda | Kesit merkezi | h/4 yukarıda | h/2 yukarıda |
|---------------|-------------|-------------|---------------|--------------|--------------|
| 0 | 32.65 | 32.78 | 32.65 | 32.65 | 32.65 |
| 50 | 36.31 | 38.90 | 42.31 | 46.40 | 50.87 |
| 100 | 36.94 | 40.11 | 44.34 | 49.44 | 54.97 |
| 200 | 37.35 | 40.90 | 45.70 | 51.50 | 57.74 |
| 500 | 37.63 | 41.46 | 46.64 | 52.98 | 59.72 |
| 1000 | 37.73 | 41.67 | 47.03 | 53.52 | 60.44 |
| 2000 | 37.78 | 41.77 | 47.16 | 53.80 | 60.82 |
| 2500 | 37.79 | 41.80 | 47.26 | 53.86 | 60.89 |
| 5000 | 37.81 | 41.84 | 47.33 | 53.97 | 61.04 |
| 10000 | 37.82 | 41.86 | 47.37 | 54.03 | 61.12 |
| 15000 | 37.83 | 41.87 | 47.38 | 54.05 | 61.15 |
| 20000 | 37.83 | 41.87 | 47.39 | 54.06 | 61.16 |



Şekil 3.14. 8 m uzunluğundaki konsol kirişte yanal desteğin yay sabitlerine göre yanal burkulma yükleri (kN)

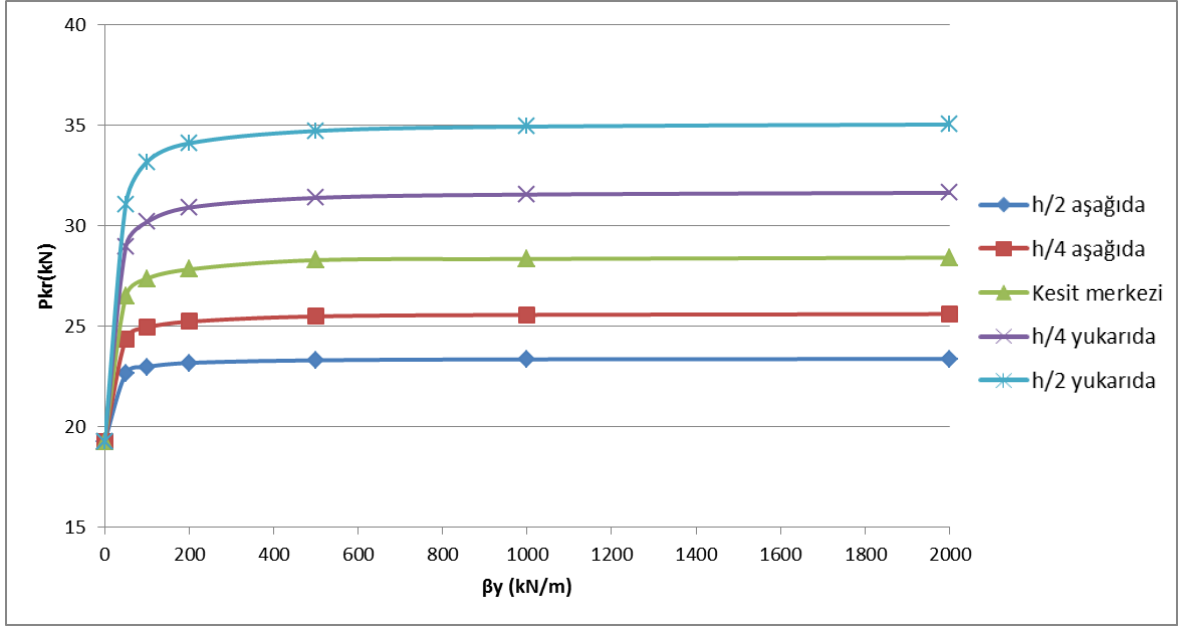
8 m uzunluğundaki konsol kirişte desteğin kesit üzerindeki yeri değiştirildikçe yanal burulmalı burkulmanın meydana gelmesi için gereken kritik yük değeri farklılık göstermiştir. Yanal destek konsol kirişin serbest ucuna tatbik edilmiştir. Kiriş kesiti

üzerinde ise kesit merkezine, düşey ekseninde kesit merkezinden $h/4$ kadar ve $h/2$ kadar yukarıya, kesit merkezinden $h/4$ ve $h/2$ kadar aşağıya yerleştirilmiştir. Her bir duruma ait yanal burkulma yükleri $\beta_y=50$ kN/m için 36.31, 38.90, 42.31, 46.40 ve 50,87 kN; $\beta_y=100$ kN/m için 36.94, 40.11, 44.34, 49.44 ve 54.97 kN; $\beta_y=500$ kN/m için 37.63, 41.46, 46.64, 52.98 ve 59.72 kN; $\beta_y=2000$ kN/m için, 37.78, 41.77, 47.16, 53.80 ve 60.82 kN olarak hesaplanmıştır. Değerler incelendiğinde 50, 100, 500 ve 2000 kN/m yay sabitleri için, yanal desteğin tatbik edilmediği duruma göre desteğin üst başlığa konulduğu durumda, kirişteki yanal burkulma yükleri sırasıyla 1.55, 1.68, 1.83 ve 1.86 kat artmıştır.

Konsol kirişte yanal destek üst başlığa yerleştirildiğinde desteğin yay sabiti artırıldıkça yanal burkulma yükünün belirgin bir şekilde arttığı; destek, alt başlığa yakın bölgelere yerleştirildiğinde ise yanal burkulma yükünün destek yay sabiti artması ile pek de artmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 3.6. 10 m uzunluğundaki konsol kirişte yanal burkulma yükleri (kN)

| Yay Rijitliği | $h/2$ aşağıda | $h/4$ aşağıda | Kesit merkezi | $h/4$ yukarıda | $h/2$ yukarıda |
|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| 0 | 19.27 | 19.27 | 19.27 | 19.27 | 19.27 |
| 50 | 22.63 | 24.35 | 26.49 | 28.95 | 31.06 |
| 100 | 22.97 | 24.93 | 27.36 | 30.17 | 33.16 |
| 200 | 23.17 | 25.23 | 27.82 | 30.90 | 34.09 |
| 500 | 23.30 | 25.48 | 28.28 | 31.37 | 34.70 |
| 1000 | 23.35 | 25.56 | 28.34 | 31.54 | 34.92 |
| 2000 | 23.37 | 25.60 | 28.40 | 31.63 | 35.02 |
| 2500 | 23.38 | 25.61 | 28.41 | 31.64 | 35.05 |
| 5000 | 23.39 | 25.62 | 28.44 | 31.68 | 35.09 |
| 10000 | 23.39 | 25.63 | 28.45 | 31.70 | 35.11 |
| 15000 | 23.39 | 25.63 | 28.45 | 31.70 | 35.12 |
| 20000 | 23.39 | 25.64 | 28.45 | 31.70 | 35.12 |



Şekil 3.15. 10 m uzunluğundaki konsol kirişte yanal desteğin yay sabitlerine göre yanal burkulma yükleri (kN)

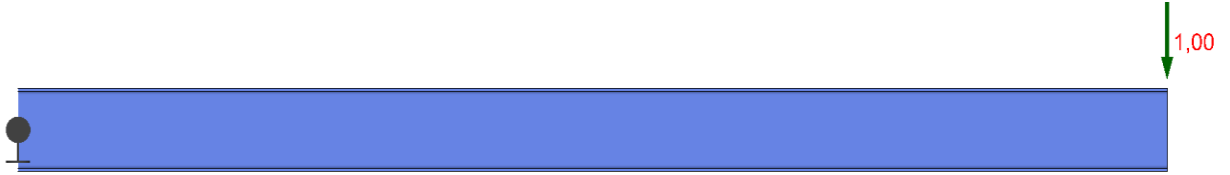
10 m uzunluğundaki konsol kirişte desteğin kesit üzerindeki yeri değiştirildikçe yanal burulmalı burkulmanın meydana gelmesi için gereken kritik yük değeri farklılık göstermiştir. Yanal destek konsol kirişin serbest ucuna tatbik edilmiştir. Kiriş kesiti üzerinde ise kesit merkezine, düşey ekseninde kesit merkezinden $h/4$ kadar ve $h/2$ kadar yukarıya, kesit merkezinden $h/4$ ve $h/2$ kadar aşağıya yerleştirilmiştir. Her bir duruma ait yanal burkulma yükleri $\beta_y=50$ kN/m için 22.63, 24.35, 26.49, 28.95 ve 31.06 kN; $\beta_y=100$ kN/m için 22.97, 24.93, 27.36, 30.17 ve 33.16 kN; $\beta_y=200$ kN/m için 23.17, 25.23, 27.82, 30.90 ve 34.09 kN; $\beta_y=2000$ kN/m için, 23.37, 25.60, 28.40, 31.63 ve 35.02 kN olarak hesaplanmıştır. Bu değerler dikkate alındığında yanal desteğin kesit merkezinden alınarak, üst başlığa konulması durumunda yanal destek yay sabitleri 50, 100, 200 ve 2000 kN/m için, kirişteki yanal burkulma yükleri kendi aralarında kıyaslandığında sırasıyla en fazla 1.61, 1.72, 1.77 ve 1.82 kat artmıştır.

Konsol kirişte yanal destek üst başlığa yerleştirildiğinde desteğin yay sabiti artırıldıkça yanal burkulma yükünün belirgin bir şekilde arttığı; destek, alt başlığa yakın bölgelere yerleştirildiğinde ise yanal burkulma yükünün destek yay sabiti artması ile pek de artmadığı gözlemlenmiştir.

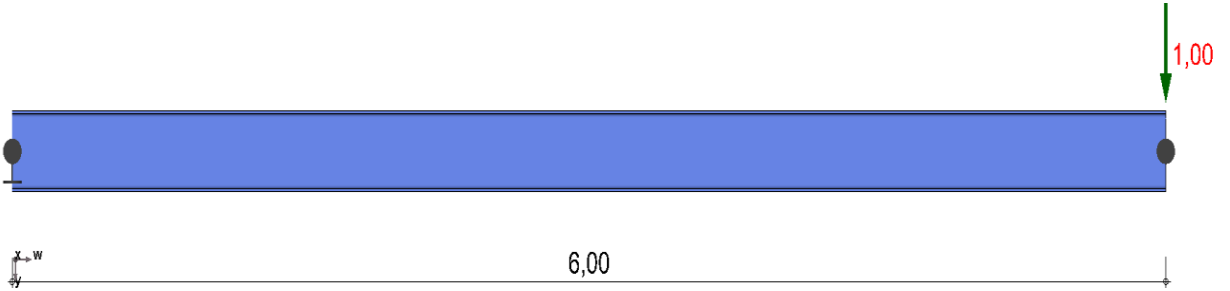
Bu çalışmada Tablo (3.4-3.6) incelendiğinde her bir konsol kiriş kendi içerisinde incelendiğinde, görülmüştür ki yanal destek yay sabitlerinin artması ile her bir kirişte yanal burulmalı burkulma yükleri azalarak artmaya devam etmiştir ve belli bir değerden sonra

yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Bu durum, yanal destek yay sabiti artırıldığında yanal burkulma yükünün yaklaşık olarak sabit kaldığını göstermiştir.

Konsol kirişin boyunun artmasıyla birlikte 6 m uzunluğundaki konsol kirişin desteksiz durumda kritik yanal burulmalı burkulma yükü $P_{kr} = 65.61$ kN, 8 m uzunluğundaki konsol kirişin desteksiz durumda kritik yanal burulmalı burkulma yükü $P_{kr} = 32.65$ kN, 10 m uzunluğundaki konsol kirişin desteksiz durumda kritik yanal burulmalı burkulma yükü $P_{kr} = 19.27$ kN olarak elde edilmiştir. Buradan konsol kirişin narinliğinin artmasıyla beraber kirişin kritik yanal burulmalı burkulmaya maruz kalacağı yük değerinin azalacağı görülmüştür.



Şekil 3.16. 6 m uzunluğundaki konsol kiriş yanal desteksiz hali



Şekil 3.17. 6 m uzunluğundaki konsol kirişin serbest ucuna yanal destek eklenmiş hali



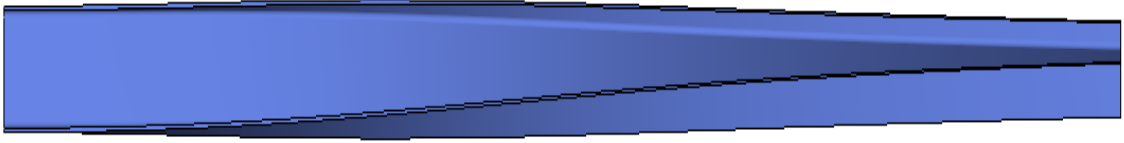
Şekil 3.18. 6 m uzunluğundaki desteksiz konsol kirişin yanal burkulmuş hali



Şekil 3.19. 6 m uzunluğundaki konsol kirişin $\beta_y = 50\text{kN/m}$ yanal burkulmuş hali



Şekil 3.20. 6 m uzunluğundaki konsol kirişin $\beta_y = 250\text{ kN/m}$ için yanal burkulmuş hali



Şekil 3.21. 6 m uzunluğundaki konsol kirişin $\beta_y = 500\text{ kN/m}$ için yanal burkulmuş hali



Şekil 3.22. 6 m uzunluğundaki konsol kirişin $\beta_y = 1000\text{ kN/m}$ için yanal burkulmuş hali

Destek yay sabitinin artırılmasıyla Şekil 3.16-3.22’de alt başlık ve üst başlık arasındaki yerdeğiştirmenin daha fazla artmadığı, bundan da yanal desteğin yay sabitinin artırılmasının yanal burkulma yükünü daha fazla artırmayacağı sonucu çıkmaktadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. I kesitli kirişte, FRILO programı ile elde edilen sonuçlarla (1.14) denkleminde elde edilen sonuçlar birbirine çok yakındır.
2. I kesitli basit kirişin kesit boyutları sabit olmak üzere, kiriş boyu arttıkça FRILO programı ile elde edilen sonuçların hata oranları değişmektedir.
3. Aynı kesite sahip basit kirişlerde narinliğin artması ile kritik yanal burulmalı burkulma yükünün azaldığı bir başka deyişle kesitin daha düşük bir yük etkisinde yanal burulmalı burkulma durumuna maruz kaldığı görülmüştür.
4. FRILO programının otomatik olarak belirlediği sonlu eleman ağ modelinin yeteri seviyede sonuç verdiği görülmüştür.
5. Aynı kesite sahip konsol kirişlerde narinliğin artması ile kritik yanal burulmalı burkulma yükünün azaldığı, bir başka deyişle kesitin daha düşük bir yük etkisinde yanal burulmalı burkulma durumuna maruz kaldığı görülmüştür.
6. Basit kirişte, yanal desteğin alt başlığa yakın bölgelere yerleştirilmesi yanal burkulma yükünü fazla etkilememiştir.
7. Basit kirişlerde yanal destek üst başlığa yakın noktalara yerleştirildiğinde, elemanın yanal burulmalı burkulmaya uğraması için gereken kritik yük değerini önemli ölçüde artırmıştır.
8. Basit mesnetli 6 m uzunluğundaki IPE 400 kirişinde, desteğin kiriş açıklığı ortası ve kesit üst başlığına yerleştirilmesi durumunda yanal burkulma yükü 844.74 kN'a ulaşmış ve sonraki yük değerlerinde ikinci moda burkulmuştur. Üst başlığa konulacak desteğin yay sabiti bu yük değerine karşılık gelen 2000 kN/m olarak şekil yardımı ile elde edilmiştir. Bu yay sabitinden sonraki değerlerde yanal burkulma yükü kirişin burkulmada ikinci moda geçmesine karşılık gelmektedir. Kiriş birinci modda zaten burkulmuş olacağından kirişin yanal burkulma yükü bu yay sabiti değerinden büyük değerler için sabit kalmıştır. Bu nedenle elemana daha rijit bir yay eklemek ekonomik değildir.
9. 6 m uzunluğundaki basit kirişte yanal desteğin kesit merkezine değil de üst başlığa yerleştirilmesi ile yanal desteğin yay sabitinin en fazla 13.85 kat

azaldığı gözlemlenmektedir. Bundan da anlaşılacağı üzere, basit kirişe yanal destek kesit merkezi yerine üst başlığa eklendiğinde, daha düşük bir yanal destek yay sabitiyle kirişin yanal burulmalı burkulması önlenmektedir.

10. Konsol kirişlerde yanal destek, kesit üst başlığı ve üst başlık ile kirişin serbest ucuna yakın noktalara yerleştirildiğinde desteğin yay sabiti artırıldıkça yanal burkulma yükü önemli ölçüde artmaktadır. Destek, kesit alt başlığına yerleştirildiğinde ise destek yay sabiti yanal burkulma yükünü etkilememektedir. Aynı yay sabitine sahip desteklerde, en büyük yanal burkulma yükü desteğin kesit üst başlığına yerleştirilmesi durumunda elde edilmiştir.
11. 6 m uzunluğundaki IPE 400 konsol kirişinde, desteğin kiriş serbest ucu ve kesit üst başlığına yerleştirilmesi durumunda yanal burkulma yükü, 750 kN/m yay sabitine sahip destek için en fazla 1.90 kat artmıştır. Serbest ucu ve kesit üst başlığına yerleştirilen yanal desteklerde destek yay sabiti artırılmaya devam edilirse, kirişte yanal burkulma kesit üst başlığının yanal yer değiştirmesinden dolayı değil de alt başlığın yanal yer değiştirmesinden dolayı oluşmaktadır. Bu durumda yay sabiti daha fazla artırılsa da yanal burkulma yükü daha fazla artmamış ve sabit kalmıştır.
12. Sonuçlar incelendiğinde yanal burkulma yükü her iki örnek için de belli bir değerden sonra sabit kalmaktadır. Kirişe yanal destek eklendiğinde en büyük yanal burkulma yükü, desteğin, kirişin yanal olarak en fazla yer değiştirme yapacağı yere konulması ile elde edilmektedir. Yanal burkulma yükünü artırmak için desteğin yay sabiti ve konumunun iyi belirlenmesi gerekir. Destek konumu sabitse en ideal destek yay sabiti araştırılmalı, destek elemanda istenilen yere konulamıyorsa bile mümkün olduğu kadar kiriş üst başlığına ve üst başlığına yakın yerlere konumlandırılmalıdır.
13. 6, 8 ve 10 m uzunluğundaki IPE 400 basit kirişte, desteğin kiriş serbest ucu ve kesit üst başlığına yerleştirilmesi durumunda yanal burkulma yükü, 2000 kN/m yay sabitine sahip destek için en fazla sırasıyla 4.032, 3.66 ve 3.41 kat artmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, basit kirişlerde, kiriş boyunun artmasıyla birlikte, yanal desteğin, yanal burulmalı burkulma yüküne etkisi azalmıştır.

14. 6, 8 ve 10 m uzunluğundaki IPE 400 konsol kirişte, desteğin kiriş serbest ucu ve kesit üst başlığına yerleştirilmesi durumunda yanal burkulma yükü, 750 kN/m yay sabitine sahip destek için en fazla sırasıyla 1.96, 1.87 ve 1.81 kat artmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, konsol kirişlerde, kiriş boyunun azalması ile birlikte, yanal desteğin, yanal burulmalı burkulma yüküne etkisi az da olsa artmaktadır.

Gelecek çalışmalara ışık tutacak birkaç öneriye değinilecek olunursa:

Bu çalışmada söz konusu kirişlere daima tekil yük uygulanmıştır. Yanal burkulma etkisindeki I kesitli kirişler için moment ve yayılı yük durumları için ideal yay sabitlerinin belirlenmesi gerçekleştirilebilir. Ayrıca uygulanan yükün doğrultuları ve yönleri değiştirilerek yanal burkulma yüküne etkileri araştırılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Albayrak, S., 2011, Yanal Burkulma Etkisindeki I Kesitli Kirişlerde İdeal Desteklerin Belirlenmesi ve YSA Yaklaşımı. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , Trabzon, 165 s.
- Attard, M. M., 1985. Lateral Buckling Analysis of Beams By The FEM, Computer And Structure, 23, 2, 217-231.
- Aydin, M. R. ve Doğan, M., 2006. Eğilme Zorlaması Altında Bulunan Çelik Korniyerlerin Elastik, Tam Plastik Ve Yanal Burulma Burkulmalı Dayanımları, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi, 84-112.
- Chajes, A., 1974. Principles Of Structural Stability Theory, New Jersey: Prentice-Hall Yayınları, s. 196-237
- Chrosocielewski, J., Lubowiecka, I., Szymczak, C. ve Witkowski, W., 2006. On Some Aspects of Torsional Buckling of Thin-Walled I-Beam Columns, Computers and Structures, 84, 1946–1957.
- Chu, X. T., Rickard, Y. ve Li, L. Y. 2005. Influence of Lateral Restraint on Lateral-Torsional Buckling of Cold-Formed Steel Purlins, Thin-Walled Structures, 43, 800–810.
- Civalek, Ö. ve Çatal, H. H., 2004. Geriye Yayılma Yapay Sınır Ağı Kullanılarak Elastik Kirişlerin Statik ve Dinamik Analizi, DEÜ Müh. Fak. Fen ve Mühendislik Dergisi, 6, 1, 1-16.
- Emrem, T., 2005. Sürekli Kirişlerde Yanal Stabilite, Türkiye Mühendislik Haberleri, 2, 436, 24-27.
- Erkmen, R. E. ve Mohareb, M., 2006. Torsion Analysis of Thin-Walled Beams Including Shear Deformation Effects, Thin-Walled Structures, 44, 1096–1108.
- EN1993-1-1:2005. Eurocode-3: Desing of Steel Structures, British Standards Institution, London, 2005.
- Friedrich + Lochner GmbH., (2011). Lateral torsional buckling analysis BTII, www.frilo.com.
- FRILO program lisans numarası 997; Student version , version R-2013-1C, Lisans Bitimi: 24.04.2014, Nemetscheck Frilo GmbH,
- Güneş, B., 2004. Yanal Burkulma Probleminin Uzay Çerçeve Sistemi Analjisi ile Çözümü. Yüksek Mühendislik Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 96s.

- Keyder, E., 1977. Çelik Kirişlerde Yanal Burkulama, Türkiye Mühendislik Haberleri, 42-46.
- Lee, J., Kim, S. ve Hong, K., 2002. Lateral buckling of I-section composite beams, Engineering Structures, 955-964.
- Livesley, R. K., 1956. The Application of An Electronic Computer to Some Problems of Structural Analysis, The Structure Engineering, 34.
- Lorenzis, L. D. ve Tegola, A. L., 2005. Effect of the Actual Distribution of Applied Stresses on Global Buckling of Isotropic and Transversely Isotropic Thin-Walled Members: Theoretical Analysis, Composite Structures, 68, 339-348.
- Michell, A.G., 1899. Elastic stability of long beams under transverse forces, Philosophical Magazine, 298-309.
- Mateescu, D., ve Ungureanu, V., 1994. Considerations On The Value Of Reduction Factor Of Lateral-Torsional Buckling Of Beams In Bending, Thin-Walled Structures, 265-277.
- Pınarbaşı, S., 2011., Lateral torsional buckling of rectangular beams using variational iteration method, Scientific Research and Essays, 6, 6, 1445-1457.
- Rendek, S. ve Balaz, I., 2004. Distortion of thin-walled beams, Thin-Walled Structures, 42, 255-277.
- Younes, R. M., Abu-Farsakh, G. ve Hunatlı, Y. M., 2009. Effect of Welding on Lateral-Torsional Buckling Resistance of I-Shaped Built-up Steel, Jordan Journal of Civil Engineering, 4, 3, 295-313.
- Yu, W., Hodges, D. H., Volovoi, V. V. ve Fuchs, E. D., 2005. A Generalized Vlasov Theory for Composite Beams, Thin-Walled Structures, (43), 1493-1511.
- Çakiroğlu, A. ve Özer, E., 1980. Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 58.
- Timoshenko, S., 1963. Elastik Stabilite Teorisi, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul, 260-310p.
- Timoshenko, S. P. ve Gere, J. M., 1985. Theory of elastic stability, McGraw-Hill, 239-286p.

ÖZGEÇMİŞ

Karaca, 1983 yılında Ankara'da doğdu. İlköğrenimini Atapark İlköğretim Okulu'nda, orta öğrenimini Rauf Denktaş Lisesi'nde tamamladı. 2001 yılında girmiş olduğu üniversite sınavı ile Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nü kazanarak 2 yıl eğitimden sonra, eğitimine ara verdi. 2003 yılında tekrar girdiği üniversite sınavı ile Karadeniz Teknik Üniversitesi Gümüşhane Mühendislik Fakültesini İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde eğitimine devam etti. Buradan 2008 yılında İnşaat Mühendisliği Unvanı ile mezun olan Karaca 2008-2009 yılları arası Ankara Su Ve Kanalizasyon İdaresi'nde sözleşmeli mühendis olarak görev yaptı, sonrasında 2009-2010 yılları arasında Ankara Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Daire Başkanlığı AYKOME Şube Müdürlüğü'nde memur olarak görev yaptı. Karaca 2010 yılında Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim Dalı'na ÖYP Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2012 yılına kadar bu görevde kalan Karaca, daha sonra Bülent Ecevit üniversitesi Zonguldak Meslek Yüksek Okulu İnşaat Bölümüne Öğretim Görevlisi olarak atandı. Halen Bülent Ecevit Üniversitesi Zonguldak Meslek Yüksek Okulu İnşaat Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak görev yapan Karaca, İnşaat Bölüm Başkan Yardımcılığı görevini yürütmektedir. Evli olan Karaca iyi seviyede İngilizce bilmektedir.