

Eğilme ve Eksenel Basınç Etkisindeki Çelik Elemanların Yanal Burulmalı Burkulma
Momenti Katsayılarının Araştırılması

Meltem Eryılmaz

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2016

Investigation of Lateral-Torsional Buckling Moment Factors of Steel Members Under
Bending and Axial Compression

Meltem Eryılmaz

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

June 2016

Eğilme ve Eksenel Basınç Etkisindeki Çelik Elemanların Yanal Burulmalı Burkulma
Momenti Katsayılarının Araştırılması

Meltem Eryılmaz

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Eşref Ünlüoğlu

Haziran 2016

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Meltem Eryılmaz'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Eğilme ve Eksenel Basınç Etkisindeki Çelik Elemanların Yanal Burulmalı Burkulma Momenti Katsayılarının Araştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek "[oybirliği veya oyçokluğu yazmak için tıklayın]" ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Eşref ÜNLÜOĞLU

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Eşref ÜNLÜOĞLU

Üye : Prof. Dr. Hasan GÖNEN

Üye : Doç. Dr. Mizan DOĞAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ayten GÜNAYDIN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Haluk SARAÇOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Eşref ÜNLÜOĞLU danışmanlığında hazırlamış olduğum “Eğilme ve Eksenel Basınç Etkisindeki Çelik Elemanların Yanal Burulmalı Burkulma Momenti Katsayılarının Araştırılması” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.
15/06/2016

Meltem ERYILMAZ

İmza

ÖZET

Eğilme momenti ve aksenal basınç kuvveti etkisindeki elemanlar, simetri düzleminde eğilmeye maruz kaldıklarında, kesitteki en kritik lifin gerilmesi malzemenin izin verdiği gerilmeyi geçtiğinde eleman göçme durumuna ulaşabileceği gibi, düzlem dışı yanal yer değiştirme ve dönme yaparak oluşan burkulmadan dolayı da göçmeye ulaşabilirler. Bir stabilite problemi olan bu davranış, yanal burulmalı burkulma olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada iki eksene göre simetrik kesitli çelik elemanların eğilme momenti ve aksenal basınç kuvveti altındaki yanal burulmalı burkulma yükünün hesabında kullanılan moment katsayıları incelenmiştir. LTBeamN ve ABAQUS sonlu elemanlar programları kullanılarak IPE100, IPE 120, IPE 160, IPE 180, IPE 220, IPE 270, IPE 330 ve IPE 400 kesitli çelik profillerin 11 değişik açıklık boyu ve 8 genel yükleme durumu için kritik elastik yanal burulmalı burkulma yükleri hesaplanmıştır. Eğilme momenti ve aksenal kuvvet altındaki elemanların yanal burulmalı burkulma yükünün hesabı için literatürde verilen parametrik denklemler kullanılarak çelik yapı elemanlarında karşılaşılabilecek 6 genel yükleme durumu için moment dağılım katsayıları önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yanal burkulma, burulma, stabilite, kiriş-kolon, I kesit.

SUMMARY

Structural members under bending and axial compression may fail when the stress of the most critical fiber in the cross-section reaches allowable stress of the material or may fail due to buckling by deflecting laterally and twisting non-uniformly. This behavior is called lateral torsional buckling. In this paper, the moment gradient factors for lateral torsional buckling of beam-columns with doubly-symmetric cross sections are investigated. Eight common cross sections as, IPE 100, IPE 120, IPE 160, IPE 180, IPE 220, IPE 270, IPE330 and IPE 400, are studied for 11 span lengths under 8 loading cases. Elastic critical lateral torsional buckling loads of these specimens are calculated by LTBeamN and ABAQUS, finite element analysis (FEA) programs. The parametric equation for lateral torsional buckling load of beam-columns given in the literature is used for investigating moment gradient factors. As a result of the analysis, moment gradient factors for lateral torsional buckling loads of structural members under bending and axial compression are presented for 6 different loading cases.

Keywords: Lateral buckling, torsion, stability, beam-column, I section.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenim hayatım boyunca değerli bilgilerini ve desteğini esirgemeyerek, bana her konuda ışık tutan, bu çalışmanın gerçekleşmesi için elinden gelen her şeyi yapan saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Eşref ÜNLÜOĞLU'na, en içten sevgi, saygı ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımda bana yardımcı olan hocalarım, Prof. Dr. Nevzat KIRAÇ, Doç Dr. Mizam DOĞAN, Yrd. Doç. Dr. Hande GÖKDEMİR, Araş. Gör. Tolga YILMAZ, Araş. Gör. Ömer KARAGÖZ, Araş. Gör. Buket Gül YILMAZ ve tüm ESOGÜ İnşaat Mühendisliği bölümündeki mesai arkadaşlarıma ve bölüm sekreterimiz Türkan YÖNLÜER başta olmak üzere idari personelimize teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bana zaman ayırarak her türlü bilgi ve manevi desteğini esirgemeyen kıymetli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Hakan ÖZBAŞARAN ve Yrd. Doç. Dr. Ayten GÜNAYDIN'a emekleri ve değerli zamanları için ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Yoğun çalışmalarım sırasında beni anlayışla karşılayıp manevi desteklerini esirgemeyen sevgili annem Gülbin ERYILMAZ, babam Ahmet ERYILMAZ ve kardeşlerim Ali Akın ERYILMAZ ve Oğuz ERYILMAZ ile değerli arkadaşım Dr. Yunus Emre ÇAKIR'a gösterdikleri sabır ve destekleri için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. EĞİLME VE EKSENEL KUVVET ETKİSİNDEKİ ELEMANLAR	
(KİRİŞ-KOLONLAR)	9
3.1. Kiriş-Kolonların Stabilitesi	9
3.2. Kiriş-Kolonlarda Eğilme Burkulması	11
3.2.1. Yanal tekil yük etkisindeki kiriş-kolonların eğilme burkulması	16
3.2.2. Birden fazla yanar tekil yük etkisindeki kiriş-kolonların eğilme burkulması	20
3.2.3. Düzgün yayılı yük etkisindeki kiriş-kolonların eğilme burkulması	22
3.2.4. Uç momentleri etkisindeki kiriş-kolonların eğilme burkulması.....	25
3.3. Kiriş-Kolonlarda Yanal Burulmalı Burkulma	27
3.3.1. Üniform eğilme etkisindeki kiriş-kolonlarda yanar burulmalı burkulma.....	29
3.3.2. Farklı uç momentleri etkisindeki kiriş-kolonlarda yanar burulmalı burkulma	33
3.3.3. Yanar yükler etkisindeki kiriş-kolonlarda yanar burulmalı burkulma.....	34
4. MATERYAL VE YÖNTEM	36
4.1. Materyal	36
4.2. Yöntem	36
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	39
5.1. Kiriş-Kolonların Trahair Formülleri ile Hesaplanması	39
5.2. Kiriş-Kolonların Yanar Burulmalı Burkulma Yükünün LTBeamN ile Hesaplanması	43
5.3. Kiriş-Kolonların Yanar Burulmalı Burkulma Yükünün ABAQUS ile Hesaplanması	50
5.4. Kiriş-Kolonlar için Moment Dağılım Katsayıları	53
6. YÖNETMELİKLERDEKİ DÜZENLEMELER	60
6.1. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Kuralları Yönetmeliğine Göre Eğilme Momenti ve Eksenel Basınç Etkisindeki Çift ve Tek Simetri Eksenli Elemanlar	60

İÇİNDEKİLER (Devam)

Sayfa

6.1.1. Çelik yapıların tasarımında temel ilkeler	61
<u>6.1.1.1. Yük ve dayanım katsayıları ile tasarım (YDKT)</u>	61
<u>6.1.1.2. Güvenlik katsayıları ile tasarım (GKT)</u>	62
6.1.2. Eleman enkesit özellikleri	63
6.2. “Eurocode 3: Design of Steel Structures-Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings (EN1993-1-1)” Yönetmeliğine Göre Eğilme ve Eksenel Basınç Etkisindeki Elemanlar....	67
6.3. “ANSI/AISC 360-10: Spesification for Structural Steel Buildings” Yönetmeliğine Göre Eğilme ve Eksenel Basınç Etkisindeki Elemanlar.....	68
6.4. Sunulan Moment Dağılım Katsayıları ile Yapılan Tasarım Örneği ve Mevcut Yönetmelikler ile Karşılaştırılması	69
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	84
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	86
EK AÇIKLAMALAR.....	89
Ek Açıklama-A: LTBeamN Programı Kullanımı	89

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Kararlı, kararsız ve doğal denge durumları (Chen ve Lui, 1987).....	10
3.2 Sonlu Rahatsızlık Etkisi (Chen ve Lui, 1987).....	11
3.3 Basit mesnetli kiriş ve kiriş-kolon elemanı (Timoshenko, 1961).....	12
3.4 Kiriş boyunca değişen yayılı yük etkisindeki kiriş-kolon (Timoshenko 1961).....	13
3.5 Tekil yük etkisindeki kiriş-kolon (Timoshenko, 1961).....	16
3.6 Birden fazla tekil yük etkisindeki kiriş-kolon (Timoshenko, 1961).....	20
3.7 Yayılı yük etkisindeki kiriş-kolon (Timoshenko, 1961)	22
3.8 Farklı yüklerde kiriş-kolon: (a) Kiriş açıklığı boyunca bir kısımda düzgün yayılı yük (b) bir fonksiyon ile kiriş boyunca değişen yayılı yük (Timoshenko 1961).....	24
3.9 Bir uç momenti etkisindeki kiriş-kolon (Timoshenko, 1961)	25
3.10 Her iki ucunda uç momentleri etkisi altında bulunan kiriş-kolon (Timoshenko, 1961).....	26
3.11 Eleman burkulma türleri: a) Yanal burulmalı burkulma, b) Eğilme Burkulması, c) Burulma Burkulması (Trahair, 1993).....	28
3.12 Üniform eğilme etkisindeki iki eksene göre simetrik kiriş-kolonların burkulması (Trahair, 1993).....	30
3.13 Farklı uç momentlerine maruz kiriş-kolonların burkulması (Trahair, 1993)	33
3.14 Kiriş-kolon: (a) Orta noktasından tekil yük, (b) Kiriş boyunca düzgün yayılı yük (Trahair, 1993).....	34
5.1 IPE 100 profilinin kesit boyutları.....	39
5.2 Orta noktasında tekil yük etkisindeki kiriş-kolon	40
5.3 Kiriş açıklığı boyunca düzgün yayılı yük etkisindeki kiriş-kolon.....	41
5.4 LTBeamN programı giriş ekranı	44
5.5 LTBeamN Yanal mesnetlerin tanımı	45
5.6 LTBeamN mesnetlerin tanımı	46
5.7 LTBeamN tekil yüklerin girildiği pencere	47
5.8 LTBeamN yayılı yüklerin girildiği ekran.....	47
5.9 LTBeamN eksenel kuvvet ve düzgün yayılı yük altındaki kiriş	48
5.10 LTBeamN analiz ekranı	48
5.11 LTBeamN analiz sonuçları.....	49
5.12 S8R5 elemanı	50
5.13 S8R5 elemanı için serbestlikler (Özbaşaran, 2013 a).....	51
5.14 İki ucu basit mesnetli kiriş modeli	51
5.15 Elemanlara eksenel basınç ve tekil yükün yüklenmesi	52

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.16 Elemanlara aksenal basınç ve eleman boyunca düzgün yayılı yükün yüklenmesi.....	52
5.17 I kesitli kiriş-kolonun yanal burulmalı burkulma hali.....	53
5.18 Birinci yükleme durumu için C_{bc} katsayıları.....	55
5.19 İkinci yükleme durumu için C_{bc} katsayıları.....	55
5.20 Üçüncü yükleme durumu için C_{bc} katsayıları.....	56
5.21 Dördüncü yükleme durumu için C_{bc} katsayıları	57
5.22 Beşinci yükleme durumu için C_{bc} katsayıları	58
5.23 Altıncı yükleme durumu için C_{bc} katsayıları	58
5.24 Yedinci yükleme durumu için C_{bc} katsayıları	59
5.25 Sekizinci yükleme durumu için C_{bc} katsayıları	59
6.1 Tasarım örneğinde kullanılan kiriş-kolon için yükleme durumu	69
A.1 LTBeamN programı giriş ekranı	89
A.2 LTBeamN File menüsü	90
A.3 LTBeamN Edit menüsü.....	90
A.4 LTBeamN View menüsü.....	91
A.5 LTBeamN Project menüsü	91
A.6 LTBeamN Options menüsü.....	92
A.7 LTBeamN Kiriş boyutları ve malzeme özellikleri penceresi	92
A.8 LTBeamN Kesit özellikleri penceresi, hazır profil tabloları	93
A.9 LTBeamN Kesit özellikleri penceresi, kullanıcı tanımlı kesit	93
A.10 LTBeam yanal mesnetler.....	94
A.11 LTBeamN Yanal mesnetlerin tanımı.....	95
A.12 LTBeamN Statik mesnetler	95
A.13 LTBeamN Statik mesnetlerin tanımı.....	96
A.14 LTBeamN tekil yüklerin girildiği pencere	96
A.15 LTBeamN yayılı yüklerin girildiği ekran.....	97
A.16 LTBeamN aksenal kuvvet ve düzgün yayılı yük altındaki kiriş	97
A.17 LTBeamN analiz ekranı	98
A.18 LTBeamN analiz sonuçları.....	98

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Yükleme durumları ve yaklaşık eğilme momentleri	38
5.1 IPE 100 kesitinin statik özellikleri	39
5.2 Çelik malzeme özellikleri.....	39
5.3 Yanal mesnet koşulları	46
5.4 Mesnet koşulları	46
5.5 Yükleme durumlarına bağlı kiriş-kolon moment dağılım katsayıları	57
6.1 Eksenel basınç kuvveti etkisindeki enkesit parçaları için genişlik/kalınlık oranları	65
6.2 Eğilme momentinin basınç bileşeni etkisindeki kesit parçaları için genişlik/kalınlık oranları ..	66
6.3 $N_{Rk} = f_y A_i$, $M_{i,Rk} = f_y W_i$ ve $\Delta M_{i,Ed}$ değerleri	68
6.4 Çelik malzeme özellikleri.....	69
6.5 IPE 100 kesitinin statik özellikleri	69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Acıklama</u>
A	Kesit alanı
A_g	Kayıpsız enkesit alanı
b	Kesit genişliği
b_f	Kesit başlığı genişliği
c	Tekil yükün kiriş-kolonun sağ mesnete olan mesafesi
C_b	Eğilme momenti etkisindeki elemanlar için kritik yanal burulma burkulması katsayısı
C_{bc}	Eğilme momenti ve eksenel basınç kuvveti etkisindeki elemanlarda yanal burulmalı burkulma yükü için moment dağılım katsayısı
d	Kesit yüksekliği, kiriş-kolonlarda eğilme burkulmasında elemanın yaptığı yer değiştirme
E	Elastisite modülü
e	Eksantrisite
F	Yük, deprem yükü
F_{cr}	Kritik burkulma gerilmesi
F_e	Elastik burkulma gerilmesi
F_y	Karakteristik akma gerilmesi
G	Kayma modülü, yapıda toplam sabit yük
h	Rijitleştirilmemiş enkesit elemanında başlıklar arasındaki yuvarlatma yarıçapları dışındaki temiz açıklık
h_0	Profil başlıklarının ağırlık eksenleri arasındaki uzaklık
I	Atalet momenti
I_t	Burulma atalet momenti
I_x	Kuvvetli asal eksene göre atalet momenti
I_y	Zayıf asal eksene göre atalet momenti
I_w	Çarpılma atalet momenti
i	Atalet yarıçapı
i_{ts}	Etkin atalet yarıçapı
i_x	x-eksenine göre atalet yarıçapı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
i_y	y-eksenine göre atalet yarıçapı
K	Burkulma boyu katsayısı
K_z	Burulmalı burkulma durumunda burkulma boyu
l	Açıklık, boy
L_b	Kesitte burulmaya karşı kuşaklanmış noktaları arasındaki serbest açıklığı
L_c	Burkulma boyu
L_{cz}	z-ekseni (boyuna eksen) etrafında burkulma boyu
L_p	Tam plastik kesit davranışının elde edildiği sınır L_b değeri
L_r	İnelastik kesit davranışının elde edildiği sınır L_b değeri
M	Moment
M_A	Tanımlanan bölgenin $\frac{1}{4}$ kesitindeki mutlak değerce alınan eğilme momenti
M_B	Tanımlanan bölgenin $\frac{1}{2}$ kesitindeki mutlak değerce alınan eğilme momenti
M_C	Tanımlanan bölgenin $\frac{3}{4}$ kesitindeki mutlak değerce alınan eğilme momenti
M_c	Mevcut eğilme momenti dayanımı
M_{cr}	Kritik yanal burulma burkulması momenti
M_{maks}	Tanımlanan bölgedeki en büyük eğilme momenti
M_{max}	Kirişte meydana gelen en büyük eğilme momenti
M_m	Kiriş-kolonda tanımlanan yaklaşık eğilme momenti
M_n	Karakteristik eğilme momenti dayanımı
M_p	Plastik eğilme momenti
M_r	Eğilme momenti taşıma gücü
M_{rx}	x-eksenine göre eğilme momenti taşıma gücü
M_{ry}	y-eksenine göre eğilme momenti taşıma gücü
M_x	Kiriş-kolonda x-eksenindeki eğilme momenti
M_{yzc}	Kiriş burkulma dayanımı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Acıklama</u>
M_{yz}	Kiriş-kolon elemanın üniform eğilme burkulması dayanımı
N	Eksenel kuvvet
N_{cr}	Kritik burkulma yükü
P	Tekil kuvvet
P_c	Mevcut eksenel basınç kuvveti dayanımı
P_n	Karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı
P_r	Gerekli eksenel kuvvet dayanımı
P_y	Kiriş-kolon elemanın eğilme burkulması dayanımı
P_z	Kiriş-kolon elemanın burulma burkulması dayanımı
Q	Yapıda toplam hareketli yük, kiriş-kolonlarda eğilme burkulmasında elemana etkiyen tekil yük
q	Üniform yayılı yük
t	Kalınlık
t_f	Kesit başlık kalınlığı
t_w	Kesit gövde kalınlığı
V	Kesme kuvveti
W	Deprem yükleri
W_{ex}	x-eksenine göre elastik mukavemet momenti
W_{ey}	y-eksenine göre elastik mukavemet momenti
W_{px}	x-eksenine göre plastik mukavemet momenti
W_{py}	y-eksenine göre plastik mukavemet momenti
x	Güçlü asal eksen
y	Zayıf asal eksen
y_0	Kesme merkezinin ağırlık merkezine göre koordinatı
z	Elemanın boyuna ekseni
δ	Yer değiştirme
ϕ	Burulma dönmesi
λ	Narinlik
θ	Radyan cinsinden dönüş açısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)**Kısaltmalar**

ANSI/AISC

CFSM

G.D.

GKT

Y.D.

YDKT

Açıklama

American Institute of Steel Construction

Fransız Çelik Yapı Birliği

Güvenli moment dağılım katsayısı

Güvenlik Katsayıları ile Tasarım

Yakınsayan moment dağılım katsayısı

Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım

1. GİRİŞ

Çelik yapı elemanlarında göçme, genellikle elemanın akma gerilmesine ulaşması ile olur. Çelik eleman üzerindeki eksenel yük yeterince büyük olduğunda ise o eleman akma gerilmesine ulaşmadan zayıf eksenel doğrultusunda yatayda yer değiştirme ve eleman eksenel etrafında dönme yaparak burkulabilir. Bu durum yanal burulmalı burkulma olarak adlandırılır. Bir stabilite problemi olan yanal burulmalı burkulma davranışı çelik yapı elemanlarında tasarımda göz önünde bulundurulmadığında büyük hasarlara yol açabilir. Bu nedenle eksenel basınç ve eğilme etkisi altındaki elemanların tasarımında eğilme momentinin hesabının yanı sıra kritik burkulma yükünün hesabı da önem kazanmaktadır.

Bileşik etkiler altındaki elemanların teorisi ve tasarımı kapsamlı olarak incelenmiştir. Timoshenko (1961) ve Trahair (1993) farklı yükleme etkileri altındaki elemanların yanal burulmalı burkulma dayanımı hesabı için parametrik denklemler önermişlerdir. Günümüzde bu çalışmalar devam etmekte olup, Mohri vd. (2008, 2013) ve Magnucka (2009) yaptıkları çalışmalarda bileşik yüklemeler altındaki elemanların yanal burulmalı burkulma davranışını incelemişlerdir.

Eğilme momenti ve eksenel basınç kuvveti etkisindeki elemanlar literatürde ‘kiriş-kolon’ elemanı olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada eğilme momenti ve eksenel basınç kuvveti etkilerini üzerinde taşıyan elemanlara söyleyiş kolaylığı açısından zaman zaman ‘kiriş-kolon’ denilecektir.

Yapılan tez çalışmasında iki eksene göre simetrik kesitli çelik elemanların eğilme momenti ve eksenel basınç kuvveti altındaki yanal burulmalı burkulma yükünün hesabında kullanılan moment katsayıları incelenmiştir.

IPE100, IPE 120, IPE 160, IPE 180, IPE 220, IPE 270, IPE 330 ve IPE 400 kesitli çelik profillerin 11 açıklık boyu (1-6 m, 0,5 m aralıklarla) ve 8 genel yükleme durumu için kritik elastik yanal burulmalı burkulma yükleri LTBeamN ve ABAQUS sonlu elemanlar yazılımları ile hesaplanmıştır. Trahair’in (1993) kiriş-kolonların yanal burulmalı burkulma yükü hesabı için verdiği parametrik denklemde moment dağılım katsayıları, $C_{bc}=1,0$

alınarak, kesitleri ve boyları verilen elemanların aynı 8 yükleme durumu için kritik yanal burulmalı burkulma yükleri hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar yazılımı ile bulunan kritik burkulma yükleri, parametrik denklemde $C_{bc}=1,0$ alınarak hesaplanan kritik burkulma yüklerine oranlanarak, farklı narinlikteki elemanlar için 8 genel yükleme durumunda kullanılacak moment dağılım katsayıları grafikler ile gösterilmiştir.

Verilen moment dağılım katsayısı grafiklerinde, kesit ve boy özellikleri farklı olan elemanların her bir yükleme durumunda yakınsadığı moment dağılım katsayıları ve güvenli tarafta kalınan moment dağılım katsayıları işaretlenmiştir. Böylece çelik yapı elemanlarında karşılaşılabilecek tekil yükler, eleman boyunca düzgün yayılı ve/veya doğrusal olarak değişen yayılı yüklerin kombinasyonlarından oluşan 6 genel yükleme durumu için moment dağılım katsayıları sunulmuştur.

Çalışmanın sonunda sunulan moment dağılım katsayıları ile bir tasarım örneği verilmiş ve mevcut çelik yapılar yönetmelikleri ile karşılaştırılarak sonuçlar sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Eğilme ve aksenal basınç etkisi altında bulunan elemanlar uluslararası literatürde “Kiriş-kolon” olarak adlandırılmaktadır. Kiriş-kolonlar kiriş olarak eğilme problemini, kolon olarak da stabilite problemini içermektedir. Eğilmeye çalışan kirişlerde kesitin asal atalet momentlerinden biri diğerine göre çok küçük olursa, kirişi eğmeye çalışan yük belirli bir kritik değere ulaştığında çubuk kendi eksenini etrafında burularak yanal yer değiştirme yapabilir. Bir stabilite problemi olan bu durum yanal burulmalı burkulma olarak adlandırılır. Aşağıda açıklandığı üzere kiriş-kolonların teorisi ve tasarımı üzerine yapılmış birçok çalışma mevcuttur.

Adams vd. (1966) yaptıkları çalışmada haddelenmiş geniş başlıklı çelik kiriş kolonların inelastik yanal burulmalı burkulma davranışını incelemişlerdir. Kiriş-kolonlar üzerinde aksenal kuvvet ve her iki ucu yahut herhangi bir ucunda eğilme momenti etkimesi durumları göz önüne almışlardır. Dayanımdaki azalma elemanın optimum performans düzeyi ile karşılaştırılmış ve kesit boyutlarının akma gerilmesi ve artık gerilmelerin yanal burulmalı burkulma dayanımına etkisini incelemişlerdir. Tasarım için ampirik bir azaltma formülü sunmuşlardır.

İnelastik aralıkta çalışmalar yapan Miranda (1964,1965), kolonun burkulma öncesi yer değiştirmelerini göz önünde bulundurmuş fakat artık gerilmeleri ve pekleşmeyi ihmal etmiştir. Fukumoto (1966, 1972) bu problemi, artık gerilmeleri göz önüne alıp burkulma öncesi yer değiştirmeleri ve pekleşmeyi ihmal ederek incelemiştir (Abdel-Sayed ve Aglan, 1973). Abdel-Sayed ve Aglan (1973) yaptıkları çalışmada geniş başlıklı kiriş-kolonların elastik ve inelastik yanal burulmalı burkulma problemini artık gerilmeler ve burkulma öncesi yer değiştirmeler ve pekleşme ile birlikte dikkate alarak incelemişlerdir.

Heyman, elastically restrained model kiriş-kolon üzerinde deneyler yapmış, modellerin inelastik yanal burkulma ile göçmeye ulaştığını raporlamıştır. Lim ve Lu ise 1/2 ölçekli 3 açıklıklı sürekli kiriş-kolon örnekleri üzerinde deneyler yapmıştır (Bradford ve Trahair, 1986). Cuk, Bradford ve Trahair (1986), 9 sürekli kiriş-kolon üzerinde 14 deney

yapmış ve farklı değerlerde uç momentlere maruz kalan kiriş-kolonların inelastik yanal burkulma yükünün hesabı için bir tasarım metodu sunmuşlardır.

Cuk, Rogers ve Trahair (1986), çok katlı çelik çerçevelerde tipik olarak bulunan mesnetli kiriş-kolonların inelastik eğilmeli-burulmalı burkulma davranışı üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Moment gradyanları ve süreklilik ve mesnetlerin etkileri inelastik burkulma dayanımı üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Bradford ve Trahair (1986) yük atma ve kiriş-kolonun bir parçası olan çerçevenin plastisitesini de göz önünde bulundurarak sürekli kiriş-kolonların inelastik yanal burkulma yükünün tayini için bir sonlu elemanlar yöntemi tarif etmişlerdir.

Mohri vd. (2008) bileşik yükleme etkisi altındaki elemanların yanal burkulması üzerine yaptığı çalışmada tek eksene göre simetrik I kesitli basit mesnetli kirişleri incelemişlerdir. Tasarımda gerekli olan bazı temsili yük durumları için kullanılacak, kompakt kapalı formda bir denklem sunmuşlardır. Bu denklemde eğilmeden dolayı meydana gelen birinci mertebeye etkilerini, yük yüksekliği seviyesi, burkulma öncesi meydana gelen sapmaların etkilerini ve eksenel yükün varlığını göz önünde bulundurmışlardır. Elde edilen sonuçları kabuk eleman kullanılarak çözüm yapılan bir sonlu elemanlar yazılımı ile kontrol etmişler ve özellikle geniş başlıklı I kesitli elemanların yanal burkulma davranışında klasik lineer stabilite çözümlerinin elemanın yanal burkulma dayanımını gerçektekenden daha az hesapladığını göstermişlerdir.

Tek eksene göre simetrik kesitlerin yanal burulmalı burkulması üzerine tez çalışması yapan Vensko (2008), tek eksene göre simetrik kesitli kiriş-kolonların yanal burulmalı burkulma yükü tahmini için toplam potansiyel enerji denklemi türetmiştir. Nguyen, Chan ve Mottram (2014), değişik yükleme koşulları ve yer değiştirme sınır şartları altında elastik burulmalı burkulma ile geçen çekmeli sıkılmış FRP kirişler üzerinde yapılmış 114 deney sonuçları verilmiştir. Kirişler kuvvetli asal eksenine göre eğilebilmesi için her iki ucundan da basit mesnetlenmiştir. Burkulma dayanımı Plot Metodu veya pik yük kullanılarak belirlenmiştir. Ölçülen yanal burulmalı burkulma yükleri, kapalı formda elde edilen denklemlerin elastisite modülü doğrudan çekmeli sıkılmış tasarım klavuzundan alındığında tasarım için güvenli dayanım sağlayacağını göstermek için bu denklemler kullanılarak elde edilen tahminler ile karşılaştırmışlardır.

Basit mesnetli ince cidarlı kirişlerin bileşik yükler etkisi altındaki davranışlarını inceleyen Magnucka (2009) kiriş üzerinde küçük eksenel basınç kuvveti, üniform yayılı yük ve kiriş uçlarında iki farklı uç momenti bulunması hali için kirişin yanal burkulma kritik durumunu tanımlayan genel bir cebirsel denklem sunmuştur.

Eksenel kuvvetin tek eksene göre simetrik kesitli kiriş-kolonların yanal burkulma dayanımlarına etkileri inceleyen Mohri vd. (2013) eksenel kuvvetin elemanın yanal burulmalı burkulma momenti ile etkileşimini veren kapalı formda kompakt bir denklem önermişlerdir. Bu yeni denklem lineer olmayan bir stabilite modelinden türetilmiştir. Bu denklem eğilmeden dolayı oluşan birinci mertebeye etkilerini, yük yüksekliği seviyesini ve tek eksene göre simetri terimlerini, Wagner katsayısı ve kayma noktası pozisyonu, içermektedir. Kirişlerin yanal burkulma stabilitesinde yaygın olarak kullanılan üç faktör olarak adlandırılan (C1-C3) formülüne eksenel kuvvetlerin etkimesi durumu için C4 eklemiştirler. Burkulma öncesi oluşan sapma etkileri bu çalışmada göz önüne alınmışlar ve iki eksene göre simetrik kesit durumları kolayca iyileştirilmişlerdir. Sunulan çözümleri çarpılma durumunu içeren 3D kiriş elemanlar ile sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak karşılaştırılmışlardır.

Küçükler, Gardner ve Macorini (2015) eksenel kuvvet ve kuvvetli asal eksenini doğrultusunda eğilme altında olan kiriş-kolonların eğilmeli burulmalı burkulma davranışını rijitlik azaltma yöntemi ile incelemiştirler. Bu metotta, elastisite modülü (E) ve kayma modülü (G) rijitlik azaltma fonksiyonları ile azaltılır ve lineer burkulma analizleri yapılır. Burkulmadan önce meydana gelen ikinci dereceden kuvvetleri göz önüne almak için elemanın eğilme düzlemindeki ve zayıf eksen düzlemindeki analizleri birbirinden ayırarak ve rijitlik azaltma yöntemi ile eğilme düzlemindeki analiz sonuçlarından alınan eleman kuvvetleri temel alınarak zayıf eksen düzleminde instabilite değerlendirilmesi yapılmıştır.

Aydın ve Doğan (2007) tek korniyer kesitli kirişlerin yanal burulmalı burkulma davranışını incelemiştirler. Yaptıkları çalışmada zayıf asal eksen yönündeki eğilme momentinin kuvvetli asal eksenindeki eğilme momentinden küçük veya eşit olduğunu varsayarak ilk akma momenti kapasitelerini, ilk akma ve tam plastik moment kapasiteleri arasındaki etkileşim diyagramlarını ve kritik yanal burulmalı burkulma momentlerini hesaplamışlardır. Bu değerler boyutsuz katsayılar aracılığı ile gösterilmiş ve tek korniyer

kesitli kirişlerin iki eksenli eğilme davranışı için YDKT kullanılarak bir tasarım metodu verilmişlerdir (Aydın ve Doğan, 2007).

İki eksenli eğilme ve sürekli eksenel basınca maruz eşit kollu korniyer kesitli kirişlerin analizi üzerinde çalışmalar yapan Aydın (2009), kiriş eksenine dik olarak yüklenmiş eşit kollu korniyer kesitli kirişlerin nominal yük analizi için bir hesaplama yöntemi sunmuştur. Eksenel kuvvet sabit bir basınç kuvveti olarak alınmış ve bu sabit eksenel kuvvet, sadece üniform basınç gerilmesi ve kesitte meydana gelen ikinci mertebe etkileri için göz önünde bulundurulmuştur. Böylece kesit sadece iki eksenli eğilme momentlerine maruz kalır. İki eksenli eğilme için ilk akma, tam plastik ve kritik yanal burulmalı burkulma momentleri kirişin narinliği ve eksenel kuvvete bağlı olarak hesaplanır. Kesitin nominal tasarım kuvveti Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım kurallarına göre hesaplanmıştır. Sabit basınç kuvveti için verilen analiz, iterasyon yöntemi kullanılarak diğer eksenel kuvvetlerin analizi için de kullanılabilir.

Aydın vd. (2011) eşit kollu tek korniyerlerin kiriş-kolon davranışı üzerine yaptığı çalışmada, iki eksenli eğilme ve basınç kuvvetine maruz eşit kollu tek korniyer profillerin davranışını deneysel ve analitik olarak sunmuştur. Analitik çözüm için lineer olmayan sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Deneyler 100x100x10 boyutlarında eşit kollu tek korniyerler üzerinde yapılmıştır. Korniyerlerin kolları aşağıda olacak şekilde yerleştirilmiş ve basit kiriş gibi mesnetlenmiştir. Bu basit kirişler kirişin orta noktasında etkiyen dikey kuvvet ve kiriş eksenine paralel olan eksenel kuvvet ile göçme meydana gelene kadar yüklemiştir. Sonlu elemanlar modeli ABAQUS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Test ve ABAQUS yazılımı sonuçları mevcut yönetmelikler ve bir tasarım prosedürü ile yorumlanmıştır.

Çift korniyer ve T kesitli konsolların yanal burulmalı burkulması için yapılan parametrik çalışmada (Aydın vd., 2013 a) çift korniyer ve T kesitli konsolların elastik burulmalı burkulma kritik yükünün belirlenmesi için enerji metoduna dayanan parametrik denklemler sunulmuştur. Çift korniyer ve T kesitli konsolların kendi eksenine etrafındaki dönme açısını veren fonksiyonlar sunulmuş ve söz konusu elemanların değişik yükleme koşulları altında kritik elastik yanal burulmalı burkulma yükleri enerji metodu ile

hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar ABAQUS yazılımı ile kontrol edilmiş ve sonuçların eşleştiği görülmüştür.

Özbaşaran (2013 a) yaptığı tez çalışmasında IPE kesitli konsol kirişlerin yanal burulmalı burkulma yükünü deneysel ve analitik olarak hesaplamıştır. 1, 2 ve 3 metre boylarında her boydan üçer adet olmak üzere toplam 9 adet numune üzerinde yanal burulmalı burkulma deneyi yapılmış alınan sonuçlar ABAQUS yazılımı kullanılarak bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonlu farklar metodu kullanılarak Enerji Yöntemi ile bir tasarım denklemi sunulmuş, bu denklem ile hesaplanan elastik yanal burulmalı burkulma momenti ABAQUS ile kontrol edilmiştir.

Özbaşaran (2013 b) konsol I kesitlerin elastik yanal burulmalı burkulma momentinin hesabında sonlu farklar metodu ile ABAQUS yazılımı kullanarak bulduğu sonuçları karşılaştırmış ve sonlu farklar yönteminin etkili olduğunu göstermiştir.

Prizmatik Çelik kirişlerin kritik yanal burkulma yüklerinin değerlendirilmesine ilişkin çalışma (Aydın vd, 2013 b) basit mesnetli ince cidarlı açık kesitli çelik kirişlerin büyük burulma etkileri altındaki davranışı için tasarım prosedürü ve teorik modeller sunulmuştur. Kesit türü için I profil seçilmiştir. Öncelikle, sadece eğilme momenti etkisi altında bulunan kirişlerin yanal burkulması hesabında yaygın olarak kullanılan diferansiyel denklemler, kiriş açıklığı boyunca etkiyen değişik moment dağılımları için kabul edilmiştir. Bu çözüm hem tek eksene göre hem de çift eksene göre simetrik kesitler için elde edilmiştir. Daha sonra enerji metodu kullanılarak burkulma yükleri elde edilmiştir. Burkulma yükleri 6 değişik yük tipi için elde edilmiştir. Değişik yük ve kesit tipleri için elde edilen sonuçlar ABAQUS yazılımı ile kontrol edilmiş ve birçok standart kuralları ile karşılaştırılmıştır.

IPN ve IPE kesitli konsolların yanal burulmalı burkulma davranışı üstünde yapılan parametrik çalışmalar sonucu I kesitli konsolların yanal burulmalı burkulma yükünün tayini için kullanılabilecek basit bir denklem önerilmiştir (Özbaşaran, 2014).

Özbaşaran, Aydın ve Doğan, (2015) IPE100 kesitli konsol kirişlerin yanal burulmalı burkulma davranışını çeşitli yük durumları altında incelemiştir. Kritik yüklerin ve tasarım momentlerinin hesabının kolaylaştırılması için tasarım metodu önermişler ve Eurocode 3-

2005 ve AISC 360-10 standartlarında bulunan tasarım yöntemleri ile karşılaştırmışlardır. Önerdikleri tasarım metodu ile bulunan tasarım momentinin karşılaştırılan standartlardaki tasarım yöntemleri ile iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Eğilme ve aksenal basınç etkisindeki elemanların teorisi ve tasarımı üzerine yapılan çalışmaların devamı olarak yapılan bu çalışma çelik yapı elemanlarında karşılaşılabilecek genel yükleme durumları için moment dağılım katsayıları sunarak ikinci mertebe etkilerinin de dahil olmasıyla karmaşık hale gelen bir stabilite problemi olan yanal burulmalı burkulma yükünün hesabını kolaylaştırmayı hedeflemektedir.

3. EĞİLME VE EKSENEL KUVVET ETKİSİNDEKİ ELEMANLAR (KİRİŞ-KOLONLAR)

Kiriş-kolonlar eğilme ve aksenal kuvvet etkilerini aynı anda taşıyan yapı elemanlarıdır. Bir çerçevenin bütün elemanları gerçekte birer giriş-kolon elemandır, fakat eğer eleman üzerindeki aksenal kuvvet etkisi eğilme etkisine göre ihmal edilebilecek kadar küçükse bu elemanı giriş olarak analiz etmek daha uygundur. Diğer taraftan, eğer eğilme etkisi eleman üzerindeki aksenal kuvvet etkisine kıyasla ikinci planda kalıyorsa, bu elemanı kolon olarak tasarlamak ve analiz etmek daha uygun olacaktır. Bu nedenle girişler ve kolonlar giriş-kolonların özel durumları olarak adlandırılabilir. Çünkü bir giriş-kolon elemanda hem eğilme momenti hem de aksenal kuvvet etkisi belirgindir. Bu tip bir elemanın analizi giriş olarak eğilme problemini ve kolon olarak da stabilite problemini içermektedir (Chajes,1974).

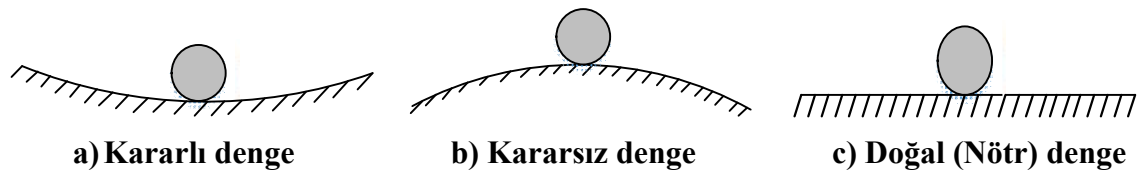
Kiriş-kolonlar çelik çerçevelerde ve kafes girişlerde yaygın olarak görülen elemanlardır. Rüzgâr veya deprem gibi yatay yükler altında olan bir kolonun basınca ek olarak moment taşıması bu tür elemanlara örnek olarak gösterilebilir (Keyder ve Wasti, 2010).

3.1. Giriş-Kolonların Stabilitesi

Dış yükler altındaki bir yapının emniyetini tehlikeye sokan iki durum söz konusudur. Bunlar, gerilme problemi ve stabilite problemidir.

Gerilme problemi cisimde meydana gelen iç kuvvetler ve gerilme dağılışı ile ilgilidir. Sistemdeki zorlanmaların güvenli sınıra ne kadar yakın olduğuna bakılır. Örneğin dış yükler altındaki cisimde meydana gelen gerilme, emniyet gerilmesini aşıyorsa bu cisim göçme durumundadır ve emniyetsiz konuma gelmiştir. Stabilite problemi ise sistemin incelenen denge durumunda kararlı olup olmadığı ile ilgilidir. Eğer kararlı değilse sistem bu konumdan çok küçük etkilerle saptırılacak olursa sistem eski denge haline dönmeyeceği gibi tamamen göçecektir (İnan, 1981).

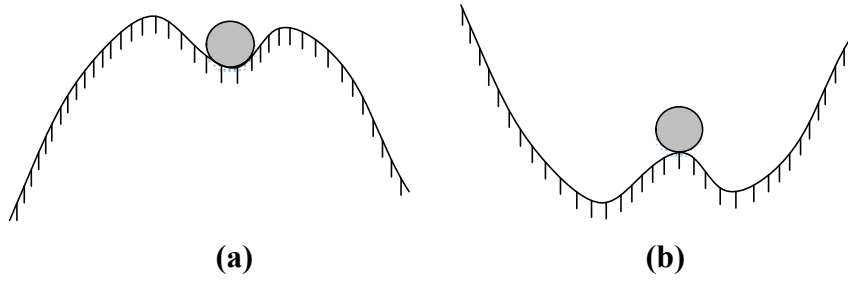
Stabilite kavramı herkesçe bilinen kavisli bir yüzey üzerindeki top örneği ile en iyi şekilde anlatılmaktadır (Şekil 3.1). Başlangıçta dengede olan bir top için, içbükey bir yüzeyde bulunan topa (Şekil 3.1a) hafif rahatsız edici bir kuvvet uygulandığında top küçük bir miktar yer değiştirecek fakat kuvvet kaldırıldığında başlangıç denge konumuna geri dönecektir. Bu durumda topun kararlı dengede olduğu söylenir. Eğer rahatsız edici kuvvet bir dışbükey yüzeyde bulunan topa (Şekil 3.1b) uygulanıp kaldırılırsa, top sürekli olarak yer değiştirir ve rahatsızlık sonsuz olsa bile top ilk denge konumuna dönmez. Bu durumda topun kararsız bir denge içinde olduğu söylenir. Eğer rahatsız edici kuvvet düz bir zemin üzerinde bulunan topa (Şekil 3.1c) uygulanırsa top kuvvetin onu götürdüğü noktada yeni bir denge konumuna ulaşır ve kuvvet kalktığında orada durmaya devam eder. Bu durumda top doğal (nötr) dengededir denir.



Şekil 3.1 Kararlı, kararsız ve doğal denge durumları (Chen ve Lui, 1987)

Yukarıdaki paragrafta anlatılan kararlı ve kararsız denge tanımları rahatsız edici kuvvetin çok küçük olduğu durumlar için geçerlidir. Ancak, bir topun belirli koşullar altında (Şekil 3.2) bir denge konumundan başka bir denge konumuna girebileceği unutulmamalıdır. Örneğin, küçük bir rahatsız edici kuvvet altında kararlı konumda bulunan bir top büyük bir rahatsız edici kuvvet altında kararsız duruma geçebilir (Şekil 3.2a), ya da tam tersi de mümkündür (Şekil 3.2b).

Stabilite kavramı ayrıca sistemin rijitliği göz önünde bulundurularak da açıklanabilir. Bir n dereceli serbestliği olan sistem için, sistemin kuvvetleri ve yer değiştirmeleri bir rijitlik matrisi veya fonksiyonu ile ilişkilidir. Eğer bu rijitlik matrisi veya fonksiyonu pozitif ise, sistem kararlıdır denir. Sistemin kararlı denge durumundan nötr denge durumuna geçişi veya kararlı denge durumundan kararsız denge durumuna geçişi kararlılık limit noktası olarak işaretlenir. Sistemin teğet rijitliği sadece bu noktada kaybolur.



Şekil 3.2 Sonlu Rahatsızlık Etkisi (Chen ve Lui, 1987)

Elastik bir sistemin stabilitesi minimum potansiyel enerji kavramı ile de yorumlanabilir. Doğada, elastik bir sistem her zaman toplam potansiyel enerjisinin minimum olduğu bir dengede olma eğilimindedir. Kararlı denge halinde bulunan bir sistemde ilk denge durumundan herhangi bir sapma oluşması sistemin potansiyel enerjisini artırır. Kararsız denge halinde bulunan sistemde ise ilk denge halinden herhangi bir sapma sistemin potansiyel enerjisinde azalmaya neden olur. Sonuç olarak, doğal denge durumunda bulunan bir sistem için ilk denge durumundan sapma toplam potansiyel enerjisinde artış veya azalış göstermesine neden olacaktır. Bu yüzden, elastik bir sistemin burkulma yükünün tayininde enerji yöntemi kullanılabilir.

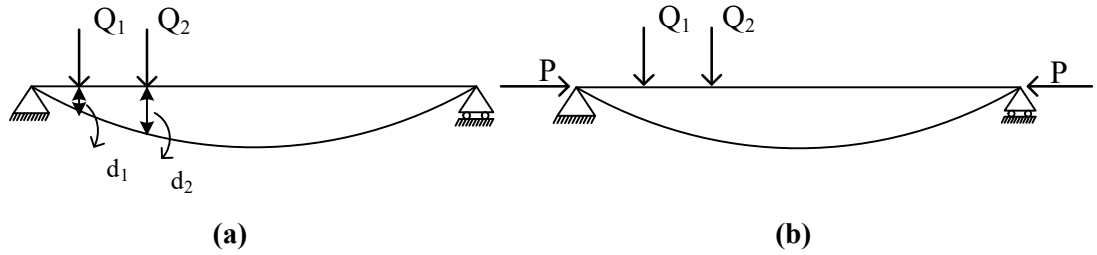
Kiriş-kolon elemanlarında moment ve basınç gerilmeleri etkileşim içindedir. Özellikle narin çubuklarda momentin oluşturduğu yer değiştirme aksel kuvvetin varlığı ile ek moment yaratır (Keyder ve Wasti, 2010). Simetri düzleminde eğilmeye maruz kalan kiriş-kolonların göçmesi eğilme düzlemindeki aşırı eğilmeden veya yükleme düzleminde dışarı doğru yatayda yer değiştirme ve dönme yapması sonucu meydana gelen burkulmadan dolayı olabilir. Bir stabilite problemi olan bu davranış ‘yanal burulmalı burkulma davranışı’ olarak adlandırılır (Trahair, 1993).

3.2. Kiriş-Kolonlarda Eğilme Burkulması

Basit eğilme altında bulunan kirişlerde gerilmeler ve yer değiştirmeler doğrudan o kirişe etkiyen yüke bağlıdır. Yük altında kirişte meydana gelen şekil değişiklikleri yükün oluşturacağı etkileri değiştirmez. Örneğin Şekil 3.3a’daki kiriş Q_1 ve Q_2 gibi sadece düşey yükler altında iken d_1 ve d_2 gibi oluşan küçük yer değiştirmeler ve yükün etkidiği kesitteki küçük şekil değiştirmeler, oluşacak momentleri ve kesme kuvvetlerini ihmal edilebilecek düzeyde etkiler. Bu sayede yer değiştirmeler, gerilmeler, momentler vb. hesabı kirişin ilk

hali temel alınarak yapılabilir. Bu koşullar altında malzeme için Hooke kanunu geçerli iken meydana gelen yer değiştirmeler kirişe etkiyen yükler ile doğru orantılıdır ve süperpozisyon kuralı geçerlidir.

Hem aksenal kuvvet hem de eğilme etkisinde bulunan kirişler (kiriş-kolonlar) (Şekil 3.3b) için ise durum tamamen farklıdır. Eğilme momentleri, kesme kuvvetleri, gerilmeler ve yer değiştirmeler aksenal kuvvet ile doğru orantılı olmayacaktır. Ayrıca bu değerler oluşan yer değiştirmelere bağlı olarak değişeceği gibi aksenal kuvvetin etkidiği eksendeki küçük eksantrisiteye karşı da duyarlı olacaktır (Timoshenko, 1961).



Şekil 3.3 Basit mesnetli kiriş ve kiriş-kolon elemanı (Timoshenko, 1961)

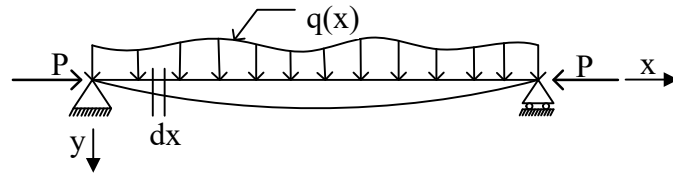
Yanal şekil değiştirmelere karşı tutulu l boyunda bir kiriş-kolon elemanının burkulma davranışını göz önüne alalım. Şekil 3.4a ile verilen aksenal basınç kuvveti P ve kiriş boyunca değişen $q(x)$ yayılı yüküne maruz kirişten, x eksenine dik olarak alınan dx elemanı üzerinde oluşacak kuvvetler gösterilmiştir (Şekil 3.4b). Burada pozitif y yönünde etkiyen $q(x)$ yükü pozitifdir ve dx elemanı üzerinde gösterilen M moment ve V kesme kuvvetlerinin yönü pozitifdir.

Yük, kesme kuvveti ve moment arasındaki ilişkiler denge denklemleri yardımıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

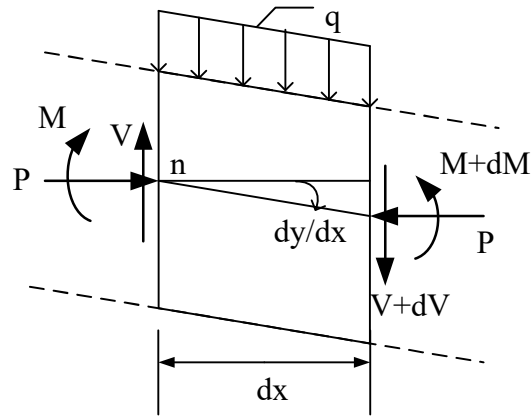
Düşey yönde denge denklemi yazılırsa yük denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$-V + qdx + (V + dV) = 0$$

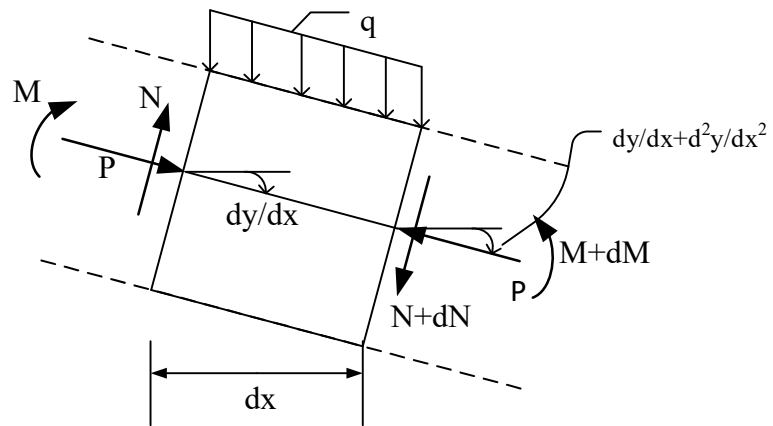
$$q = -\frac{dV}{dx} \quad 3.1$$



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.4 Kiriş boyunca değişen yayılı yük etkisindeki kiriş-kolon (Timoshenko 1961)

Kirişin yatayla yaptığı açının çok küçük olduğu varsayılarak n noktasına göre moment alınırsa

$$M + qdx \frac{dx}{2} + (V + dV)dx - (M + dM) + P \frac{dy}{dx} dx = 0 \quad 3.2$$

Denklem 3.2 elde edilir. İkinci dereceden terimler ihmal edilirse bu denklem aşağıdaki gibi yazılır.

$$Vdx = dM - Pdy$$

$$V = \frac{dM}{dx} - P \frac{dy}{dx} \quad 3.3$$

Kesme kuvvetinden dolayı meydana gelen deformasyonlar ve kiriş eksenindeki kısaltmalar ihmal edilerek elastik eğri denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -M \quad 3.4$$

Burada EI kirişin eğilme düzlemindeki (xy düzlemi, bu aynı zamanda simetri düzlemidir) eğilme rijitliğini gösterir. Denklem 3.4 ifadesi Denklem 3.1 ve 3.3'de yerine yazılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$EI \frac{d^3y}{dx^3} + P \frac{dy}{dx} = -V \quad 3.5$$

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + P \frac{d^2y}{dx^2} = q \quad 3.6$$

Denklem 3.1 ve 3.6 eksenel basınç kuvveti ve eğilme etkisindeki elemanlar (kiriş-kolonlar) için temel diferansiyel denklemlerdir. Eğer eksenel kuvvet sıfır olursa bu denklemler yanal yükler etkisi altındaki kirişlerin bilinen eğilme denklemlerine dönüşür.

Kenarları x eksenine dik olan bir dx elemanı almak yerine, kirişin şekil değiştirmiş eksenine dik olacak şekilde bir eleman alınırsa (Şekil 3.4c), şekil değiştirmiş kiriş ile ilk hali

arasındaki açı çok küçük olduğundan, aksenal kuvvet kirişe etki eden basınç kuvveti P 'ye eşit olacaktır. Bu durumda oluşacak kesme kuvveti N ise Şekil 3.4b deki V 'ye aşağıdaki denklem ile bağlı olacaktır.

$$N = V + P \frac{dy}{dx} \quad 3.7$$

Bu durumda Denklem 3.1 ve 3.3 yerine aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$q = -\frac{dN}{dx} + P \frac{d^2y}{dx^2} \quad 3.8$$

$$N = \frac{dM}{dx} \quad 3.9$$

Denklem 3.9 ile denklem 3.4 birleştirilirse

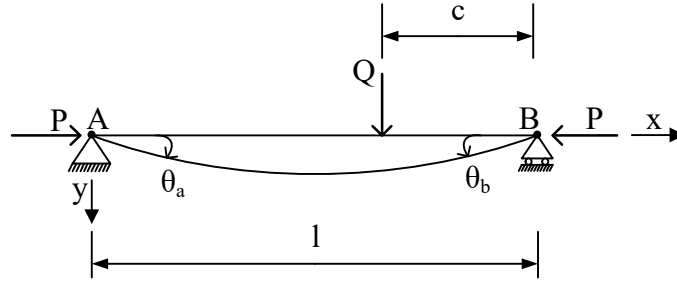
$$EI \frac{d^3y}{dx^3} = -N \quad 3.10$$

elde edilir.

Denklem 3.6 Şekil 3.4c için de sağlanmaktadır. Sonuç olarak aksenal basınç ve eğilme etkisindeki elemanlar için, kesme kuvvetinin kirişin şekil değiştirmemiş ve değiştirmiş haldeki eksenlerine dik olması durumları için iki set halinde diferansiyel denklemleri verilmiştir (Timoshenko, 1961).

3.2.1. Yanal tekil yük etkisindeki kiriş-kolonların eğilme burkulması

Üzerinde aksenal basınç kuvveti, P ve B mesnetinden c kadar mesafede yanal tekil yük, Q, bulunan basit mesnetli l boyundaki kirişi göz önüne alalım (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Tekil yük etkisindeki kiriş-kolon (Timoshenko, 1961)

Yanal yük Q tek başına etkiliyor olsaydı oluşacak eğilme momenti statik yardımıyla kolaylıkla hesaplanabilirdi fakat aksenal basınç kuvveti P de kiriş üzerinde eğilme momenti meydana getirmektedir. P'den dolayı meydana gelen eğilme momentinin hesaplanabilmesi için yer değiştirmelerin hesaplanması gereklidir. Bu nedenle öncelikle elastik eğriyi veren diferansiyel denklemlerin çözülmesi gerekmektedir.

Yükün sol ve sağ tarafındaki eğilme momentleri sırasıyla

$$M = \frac{Qc}{l}x + Py \quad 3.11$$

$$M = \frac{Q(l-c)}{l}(l-x) + Py \quad 3.12$$

O halde Denklem 3.4 kullanılarak aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{Qc}{l}x - Py \quad 3.13$$

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{Q(l-c)(l-x)}{l} - Py \quad 3.14$$

Denklemlerin sadeleştirilmesi için $k^2 = \frac{P}{EI}$ notasyonu kullanılırsa Denklem 3.13 aşağıdaki hali alır.

$$\frac{d^2y}{dx^2} + k^2y = -\frac{Qc}{EI}x \quad 3.15$$

Bu denklemin genel çözümü aşağıdaki denklem ile sağlanır.

$$y = A \cos kx + B \sin kx - \frac{Qc}{Pl}x \quad 3.16$$

Aynı şekilde Denklem 3.14 için genel çözüm denklemini aşağıdaki gibidir.

$$y = C \cos kx + D \sin kx - \frac{Q(l-c)(l-x)}{Pl} \quad 3.17$$

A,B,C,D integral sabitleri sınır şartları yardımıyla hesaplanabilir. Mesnetlerde yer değiştirmeler sıfırdır ($y=0$), o halde

$$A = 0$$

$$C = -D \tan kl \quad 3.18$$

olacaktır. Denklem 3.16 ve 3.17 ile verilen, Q yükünün etkidiği noktanın sol ve sağ kısımları için yazılmış olan elastik eğri denklemlerinin Q yükünün etkidiği noktadaki yer değiştirmeleri ve eğimleri birbirine eşit olacaktır. Bu durumda

$$B = \frac{Q \sin kc}{Pk \sin kl}$$

$$D = -\frac{Q \sin k(l-c)}{Pk \tan kl}$$

3.19

olarak elde edilir.

Bulunan integral sabitleri Denklem 3.16 ve 3.17'de yerine yazılırsa elastik eğri denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$y = \frac{Q \sin kc}{Pk \sin kl} \sin kx - \frac{Qc}{Pl} x \quad 0 \leq x \leq l - c \quad 3.20$$

$$y = \frac{Q \sin k(l-c)}{Pk \sin kl} \sin k(l-x) - \frac{Q(l-c)(l-x)}{Pl} \quad l - c \leq x \leq l \quad 3.21$$

Özel bir durum olarak Q yükünün kirişin tam orta noktasından etkimesi halinde elastik eğri simetrik olacağından yükün etkidiği noktanın sadece sol tarafını göz önüne almak yeterli olacaktır. Bu durumda kirişte meydana gelecek olan maksimum yer değiştirme aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\delta = (y)_{x=\frac{l}{2}} = \frac{Q}{2Pk} \left(\tan \frac{kl}{2} - \frac{kl}{2} \right) \quad 3.22$$

Bu denklemi sadeleştirmek için aşağıdaki notasyon kullanılırsa

$$u = \frac{kl}{2} = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}} \quad 3.23$$

kirişin orta noktasındaki yer değiştirme

$$\delta = \frac{Ql^3}{48EI} \frac{3(\tan u - u)}{u^3} = \frac{Ql^3}{48EI} \chi(u) \quad 3.24$$

halini alacaktır. Bu denklemdeki ilk terim yanal Q yükünün kirişe tek başına etkidiğinde orta noktada meydana gelecek olan yer değiştirmeyi veren ifadedir. İkinci terim, $\chi(u)$, ise eksenel kuvvet P'nin δ yer değiştirmesine olan etkisini ifade etmektedir. Eksenel kuvvet P azaldıkça $\chi(u)$ değeri de azalır ve P=0 iken $\chi(u)=1$ olur. Bu durum aşağıdaki serinin ilk iki terimi kullanılarak gösterilebilir.

$$\tan u = u + \frac{u^3}{3} + \frac{2u^5}{5} + \dots \quad 3.25$$

$u=\pi/2$ olduğunda $\chi(u)$ ifadesinin sonsuza gittiği görülmektedir. Denklem 3.23 de $u=\pi/2$ yerine yazılırsa,

$$P = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad 3.26$$

olarak elde edilir. Buradan, aksenal kuvvet P'nin Denklem 3.26 ile verilen limit değere ulaştığı ve en küçük yanal kuvvetin bile çok büyük yanal yer değiştirmeler meydana getirebileceği sonucuna ulaşılmaktadır. Aksenal basınç değerinin bu limit değeri kritik yük olarak adlandırılmaktadır ve P_{cr} ile gösterilir. Denklem 3.26 kullanılarak, u değeri aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$u = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_{cr}}} \quad 3.27$$

Bu denklemde u'nun sadece P/P_{cr} oranına bağlı olduğu görülmektedir. Elastik eğri denkleminin eğimini kirişin uçlarında hesaplamak için Denklem 3.20'nin türevinde $c=1/2$ ve $x=0$ yazılırsa aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\left(\frac{d_y}{d_x}\right)_{x=0} = \frac{Q}{2P} \left(\frac{1}{\cos \frac{kl}{2}} - 1\right) \quad 3.28$$

$$\left(\frac{d_y}{d_x}\right)_{x=0} = \frac{Ql^2}{16EI} \frac{2(1 - \cos u)}{u^2 \cos u} = \frac{Ql^2}{16EI} \lambda(u)$$

Denklem 3.28'den de görüldüğü gibi ilk terim bize Q yükünün kiriş üzerinde tek başına etkidiği durum için elastik eğri denkleminin $x=0$ daki eğimine eşittir. İkinci terim, $\lambda(u)$, ise aksenal kuvvet P'nin etkisini göstermektedir.

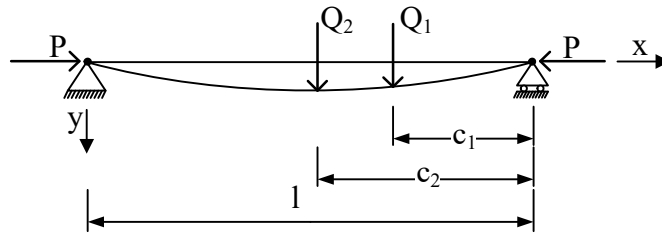
Denklem 3.20 kullanılarak maksimum eğilme momenti, aşağıdaki gibi elde edilir.

$$M_{max} = -EI \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)_{x=\frac{l}{2}} = \frac{QkEI}{2P} \tan \frac{kl}{2} = \frac{Ql}{4} \frac{\tan u}{u} \quad 3.29$$

Yanal yük Q'nun tek başına etkidiği hal için hesaplanan moment 'Ql/4' değeri 'tan(u)/u' katsayısı ile çarpılarak aksenal kuvvetin eğilme momentine etkisi gösterilmiştir. Bu katsayı, tan u/u, diğer trigonometrik katsayılar olan $\lambda(u)$ ve $\chi(u)$ gibi, aksenal kuvvet küçüldükçe azalarak aksenal kuvvet sıfır olduğunda bire eşit olur; aksenal kuvvet arttıkça bu katsayı büyür ve $u=\pi/2$ olduğunda yani aksenal kuvvet kritik yüke ulaştığında ise sonsuza gitmektedir (Timoshenko, 1961).

3.2.2. Birden fazla yanal tekil yük etkisindeki kiriş-kolonların eğilme burkulması

Eksenal basınç etkisindeki bir kirişte eğilme momentinin birden fazla yanal tekil kuvvet tarafından meydana geldiği durum düşünülecek olursa, Denklem 3.20 ve 3.21'den de görüldüğü gibi aksenal kuvvet etkisi altındaki kirişte meydana gelen yer değiştirme kirişe etkiyen yanal yük Q ile doğru orantılıdır. Buna karşın aksenal kuvvet ve yer değiştirmeler arasındaki ilişki 'k' lı terim bulduran trigonometrik fonksiyonlar içerdiği için daha karmaşıktır. Yer değiştirmelerin yanal Q yükü ile doğru orantılı olması, yanal yükler kiriş üzerinde tek başına etkidiğinde sıkça kullanılan 'Süperpozisyon Prensiplerinin' aksenal kuvvet ve yanal yükleri aynı anda üzerinde bulduran elemanlar için de kullanılabilceğini göstermektedir (Timoshenko, 1961).



Şekil 3.6 Birden fazla tekil yük etkisindeki kiriş-kolon (Timoshenko, 1961)

Denklem 3.20 ve 3.21'den de görüldüğü gibi, yanal Q yükü Q_1 ile artırılırsa, sonuç yer değiştirme, aksenal kuvvet etkileri her iki durum için de aynı olması kaydıyla Q ve Q_1

yükünden dolayı ayrı ayrı meydana gelen yer değiştirmelerin süperpoze edilmesi ile elde edilebilir. Şekil 3.6'daki aksenal yüklü kirişi göz önüne alalım. Kirişe etkiyen Q_1 ve Q_2 kuvvetleri kirişin sağ mesnetinden sırasıyla c_1 ve c_2 mesafesindedir. Bu kirişin sol tarafı için elastik eğri denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{Q_1 c_1}{l} x - \frac{Q_2 c_2}{l} x - Py \quad 3.30$$

Q_1 ve Q_2 kuvvetlerinin kiriş üzerinde tek başlarına etkidiği düşünülerek, Q_1 kuvvetinden dolayı kirişte meydana gelecek olan elastik eğri y_1 , Q_2 kuvvetinden dolayı meydana gelecek olan elastik eğri ise y_2 olarak adlandırılmıştır. Bu iki durum için kirişin sol kısmında elastik eğri denklemi yazılırsa,

$$EI \frac{d^2y_1}{dx^2} = -\frac{Q_1 c_1}{l} x - Py_1 \quad 3.31$$

$$EI \frac{d^2y_2}{dx^2} = -\frac{Q_2 c_2}{l} x - Py_2 \quad 3.32$$

olarak elde edilir. Bu iki denklem süperpoze edilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

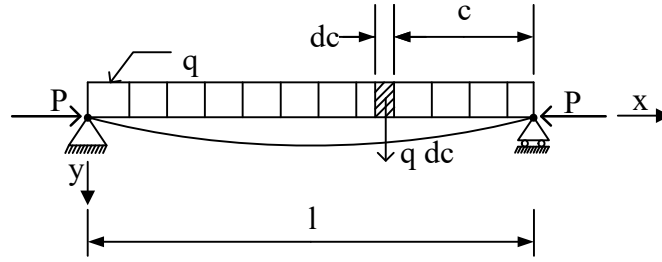
$$EI \frac{d^2(y_1 + y_2)}{dx^2} = -\frac{Q_1 c_1}{l} x - \frac{Q_2 c_2}{l} x - P(y_1 + y_2) \quad 3.33$$

Denklem 3.33'ün Q_1 ve Q_2 yüklerinin aynı anda etkidiği durum için yazılmış olan Denklem 3.30 ile aynı olduğu görülmektedir. O halde n adet yanal yük düşünülürse Q_1, Q_2, \dots, Q_n ve bu yüklerin kirişin sağ mesnetinden uzaklıkları $c_1, c_2, \dots, c_n, c_1 < c_2 < \dots < c_n$ ise Q_m ve Q_{m+1} yükleri arasındaki elastik eğri denklemi aşağıdaki gibi olur (Timoshenko, 1961).

$$y = \frac{\sin kx}{Pk \sin kl} \sum_{i=1}^{i=m} Q_i \sin kc_i - \frac{x}{Pl} \sum_{i=1}^{i=m} Q_i c_i + \frac{\sin k(l-x)}{Pk \sin kl} \sum_{i=m+1}^{i=n} Q_i \sin k(l-c_i) - \frac{l-x}{Pl} \sum_{i=m+1}^{i=n} Q_i (l-c_i) \quad 3.34$$

3.2.3. Düzgün yayılı yük etkisindeki kiriş-kolonların eğilme burkulması

Eksenel basınç ve birden fazla yanal tekil yük etkisinde bulunan elemanlar için uygulanan süperpozisyon metodu eksenel kuvvet ve düzgün yayılı yük etkisinde bulunan elemanın elastik eğri denkleminin hesabında da kullanılabilir. Bir önceki başlık altında verilen Denklem 3.34'deki toplam ifadeleri integraller ile değiştirilerek bu probleme uygun hale getirilebilir. Eksenel basınç P ve düzgün yayılı q yüklü, l boyunda basit mesnetli bir kirişi göz önüne alalım (Şekil 3.7). Şekilde kirişin sağ mesnetinden c kadar mesafede düzgün yayılı yük üzerinde dc boyunda küçük bir eleman alınmıştır. Bu eleman q dc şiddetinde sonsuz küçük tekil yük olarak düşünülebilir, o halde kiriş üzerindeki yayılı yükün de sonsuz küçük tekil yüklerden meydana geldiği kabul edilebilir (Timoshenko, 1961).



Şekil 3.7 Yayılı yük etkisindeki kiriş-kolon (Timoshenko, 1961)

Denklem 3.34'de verilen $i=1$ den $i=m$ e kadar olan toplam ifadelerini 0 dan $l-x$ e kadar integraller ve $i=m+1$ den $i=n$ e kadar olan toplamları da $l-x$ den l ye kadar integrallerle değiştirirsek,

$$y = \frac{\sin kx}{Pk \sin kl} \int_0^{l-x} q \sin kc \, dc - \frac{x}{Pl} \int_0^{l-x} qc \, dc + \frac{\sin k(l-x)}{Pk \sin kl} \int_{l-x}^l q \sin k(l-c) \, dc - \frac{l-x}{Pl} \int_{l-x}^l q(l-c) \, dc \quad 3.35$$

İntegraller çözülür ve Denklem 3.23 ile verilen kısaltmalar kullanılırsa, elastik eğri denklemini aşağıdaki gibi olur.

$$y = \frac{ql^4}{16EIu^4} \left[\frac{\cos\left(u - \frac{2ux}{l}\right)}{\cos u} - 1 \right] - \frac{ql^2}{8EIu^2} x(l-x) \quad 3.36$$

Kirişin orta noktasındaki yer değiştirme Denklem 3.36'da $x=l/2$ yazılarak aşağıdaki denklem ile elde edilir.

$$\delta = (y)_{x=\frac{l}{2}} = \frac{5ql^4}{384EI} \frac{12(2 \sec u - 2 - u^2)}{5u^4}$$

$$\delta = (y)_{x=\frac{l}{2}} = \frac{5ql^4}{384EI} \eta(u) \quad 3.37$$

Denklem 3.37'deki ilk terim, $5ql^4/384EI$, kiriş üzerinde q şiddetindeki yayılı yük tek başına etkilediği durum için kirişin orta noktasında hesaplanan yer değiştirme değeridir. İkinci terim, $\eta(u)$, ise aksenal basınç kuvveti P 'nin etkisini göstermektedir. $\sec(u)$ terimini seri olarak açacak olursak $u=0$ iken $\eta(u)=1$ olurken $u=\pi/2$ için (P 'nin kritik yüke ulaştığı durum, Denklem 3.26) $\eta(u)$ sonsuza gitmektedir. Kiriş üzerindeki aksenal kuvvetin, kirişin yapacağı yer değiştirmeye etkisi u 'nun değerine dolayısı ile P/P_{cr} oranına bağlıdır. Eğer bu oran çok küçükse aksenal kuvvetin etkisi de küçüktür ama bu oran bire yaklaştıkça aksenal kuvvetin etkisi sonsuz büyür.

Denklem 3.36'nın türevi alınıp denklemde $x=0$ yazılarak elastik eğri denkleminin $x=0$ noktasındaki eğimine eşit olan kirişin sol ucundaki küçük radyan dönmesi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\theta = \left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=0} = \frac{ql^3}{24EI} \frac{3(\tan u - u)}{u^3} = \frac{ql^3}{24EI} \chi(u) \quad 3.38$$

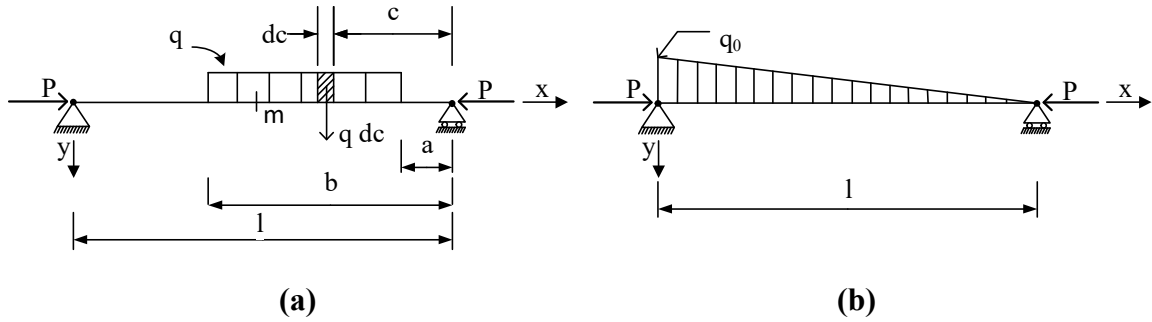
Denklem 3.36'nın iki defa türevi alınarak denklemde $x=l/2$ yazılırsa kirişte meydana gelecek olan maksimum moment aşağıdaki gibi elde edilir.

$$M_{max} = -EI \left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)_{x=\frac{l}{2}} = \frac{ql^2}{8} \frac{2(l - \cos u)}{u^2 \cos u} = \frac{ql^2}{8} \lambda(u) \quad 3.39$$

Denklem 3.38 ve 3.39'daki ilk terimler sırasıyla, kiriş üzerindeki düzgün yayılı yük tek başına etki ettiği durumdaki sol uçtaki dönüş açısını ve orta noktadaki maksimum momenti temsil etmektedir. Denklemlerdeki ikinci terimler olan $\chi(u)$ ve $\lambda(u)$ ise aksenal

kuvvetin etkisini temsil etmektedir. Elastik eğri denkleminde olduğu gibi burada da P/P_{cr} oranı azaldıkça aksenal kuvvetin etkisi de azalmakta ve bu oran bire yaklaştıkça aksenal kuvvetin etkisi de sonsuz büyümektedir.

Süperpozisyon metodu kullanılarak kiriş açıklığı boyunca sadece bir parçasında yayılı yük bulunan kirişin de (Şekil 3.8a) elastik eğri denklemi yazılabilir.



Şekil 3.8 Farklı yüklerde kiriş-kolon: (a) Kiriş açıklığı boyunca bir kısımda düzgün yayılı yük (b) bir fonksiyon ile kiriş boyunca değişen yayılı yük (Timoshenko 1961)

Yükün sol tarafındaki elastik eğri denklemini yazmak için Denklem 3.20'de Q kuvveti yerine q dc yazılır ve toplam yükün meydana getireceği yer değiştirmenin hesabı için $c=a$ ve $c=b$ arasında integrasyon yapılırsa, kirişin sol tarafı için bulunan elastik eğri denklemi aşağıdaki gibidir.

$$y = \int_a^b \frac{q \, dc \, \sin kc}{Pk \, \sin kl} \sin kx - x \int_a^b \frac{qc \, dc}{Pl} \quad 3.40$$

Kirişin herhangi bir m noktasındaki yer değiştirmeyi bulmak için Denklem 3.20 ve Denklem 3.21 kullanılarak oluşturulan elastik eğri denklemi ise aşağıdaki gibidir.

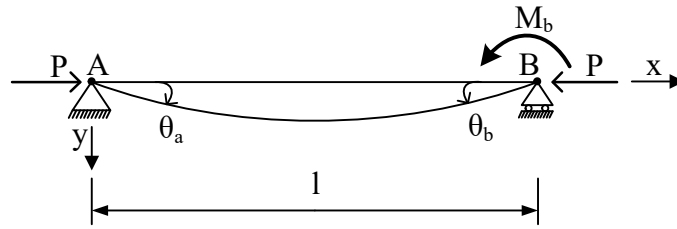
$$y = \int_a^{l-x} \frac{q \, dc \, \sin kc}{Pk \, \sin kl} \sin kx - x \int_a^{l-x} \frac{qc \, dc}{Pl} + \int_{l-x}^b \frac{q \, dc \, \sin k(l-c)}{Pk \, \sin kl} \sin k(l-x) - \int_{l-x}^b \frac{q \, dc \, (l-c)(l-x)}{Pl} \quad 3.41$$

Eğer kiriş üzerindeki q yükü düzgün yayılı halde değil de c 'nin bir fonksiyonu olarak etki ediyor olsaydı, kirişin elastik eğri denklemi, Denklem 3.40 ve 3.41 de q 'nun verilen fonksiyonu için yazılarak bulunur. Şekil (3.8b) de yükleme durumu verilen kirişin elastik eğrisi, $q=q_0c/l$ değeri Denklem 3.41 de $a=0$ ve $b=1$ ile birlikte yazılarak hesaplanabilir (Timoshenko, 1961).

3.2.4. Uç momentleri etkisindeki kiriş-kolonların eğilme burkulması

Şekil 3.9'da yükleme durumu verilen kirişin elastik eğri denklemi Denklem 3.20'de $\sin(kc)=kc$ ve $Qc=M_b$ yazılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$y = \frac{M_b}{P} \left(\frac{\sin kx}{\sin kl} - \frac{x}{l} \right) \quad 3.42$$



Şekil 3.9 Bir uç momentli etkisindeki kiriş-kolon (Timoshenko, 1961)

Kirişin A ve B uçlarındaki dönme,

$$\theta_a = \left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=0} = \frac{M_b}{P} \left(\frac{k}{\sin kl} - \frac{1}{l} \right) = \frac{M_b l}{6EI} \frac{3}{u} \left(\frac{1}{\sin 2u} - \frac{1}{2u} \right) \quad 3.43$$

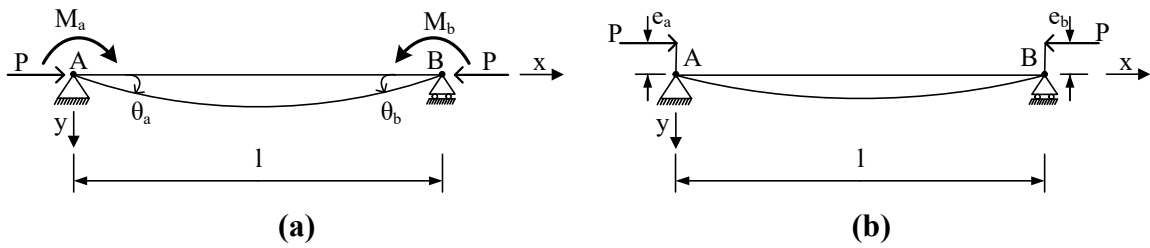
$$\theta_b = - \left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=l} = - \frac{M_b}{P} \left(\frac{k \cos kl}{\sin kl} - \frac{1}{l} \right) = \frac{M_b l}{3EI} \frac{3}{2u} \left(\frac{1}{2u} - \frac{1}{\tan 2u} \right) \quad 3.44$$

Burada $\frac{M_b l}{6EI}$ ve $\frac{M_b l}{3EI}$ değerleri, M_b uç momentinin kiriş üzerinde tek başına etkidiği durumda A ve B noktalarında meydana gelen radyan cinsinden dönme değerleridir. Yanlarındaki katsayılar ise eksenel kuvvet P 'nin etkisini göstermektedir. Bu katsayılar $u=0$ iken bire eşit olurken $u=\pi/2$ de sonsuza gitmektedir.

Denklem 3.43 ve 3.44'ü daha sade yazabilmek için aşağıdaki notasyonlar kullanılmıştır.

$$\phi(u) = \frac{3}{u} \left(\frac{1}{\sin 2u} - \frac{1}{2u} \right) \quad 3.45$$

$$\psi(u) = \frac{3}{2u} \left(\frac{1}{2u} - \frac{1}{\tan 2u} \right) \quad 3.46$$



Şekil 3.10 Her iki ucunda uç momentleri etkisi altında bulunan kiriş-kolon (Timoshenko, 1961)

Eğer kiriş üzerinde Şekil 3.10a'da verildiği gibi M_a ve M_b olmak üzere iki uç momenti etki ediyorsa, kirişin elastik eğri denklemi Denklem 3.42 de M_a yerine M_b ve x yerile $l-x$ yazılıp bu iki denklemin süperpoze edilmesi ile bulunabilir.

$$y = \frac{M_b}{P} \left(\frac{\sin kx}{\sin kl} - \frac{x}{l} \right) + \frac{M_a}{P} \left(\frac{\sin k(l-x)}{\sin kl} - \frac{l-x}{l} \right) \quad 3.47$$

Bu tip bir yükleme şekli aksenal kuvvetin eksantrik olarak etkimesi ile de oluşabilir (Şekil 3.10b). Bu durumda $M_a = Pe_a$ ve $M_b = Pe_b$ olacaktır. Elastik eğri denklemi de aşağıdaki gibi yazılır.

$$y = e_b \left(\frac{\sin kx}{\sin kl} - \frac{x}{l} \right) + e_a \left(\frac{\sin k(l-x)}{\sin kl} - \frac{l-x}{l} \right) \quad 3.48$$

Kiriş uçlarındaki dönme değerleri ise radyan cinsinden aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\theta_a = \frac{M_a l}{3EI} \psi(u) + \frac{M_b l}{6EI} \phi(u) \quad 3.49$$

$$\theta_b = \frac{M_b l}{3EI} \psi(u) + \frac{M_a l}{6EI} \phi(u) \quad 3.50$$

Kirişe etkiyen uç momentlerinin eşit olması durumunda, $M_a=M_b=M_0$, Denklem 3.47 kullanılarak elastik eğri denklemini aşağıdaki gibi elde edilir.

$$y = \frac{M_0}{P \cos\left(\frac{kl}{2}\right)} \left[\cos\left(\frac{kl}{2} - kx\right) - \cos\frac{kl}{2} \right]$$

$$y = \frac{M_0 l^2}{8EI} \frac{2}{u^2 \cos u} \left[\cos\left(u - \frac{2ux}{l}\right) - \cos u \right] \quad 3.51$$

Kirişin orta noktasındaki yer değiştirme,

$$\delta = (y)_{x=\frac{l}{2}} = \frac{M_0 l^2}{8EI} \frac{2(1 - \cos u)}{u^2 \cos u} = \frac{M_0 l^2}{8EI} \lambda(u) \quad 3.52$$

kiriş uçlarındaki dönme açıları radyan cinsinden,

$$\theta_a = \theta_b = \left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=0} = \frac{M_0 l \tan u}{2EI} \quad 3.53$$

ve kiriş orta noktasında meydana gelen maksimum moment,

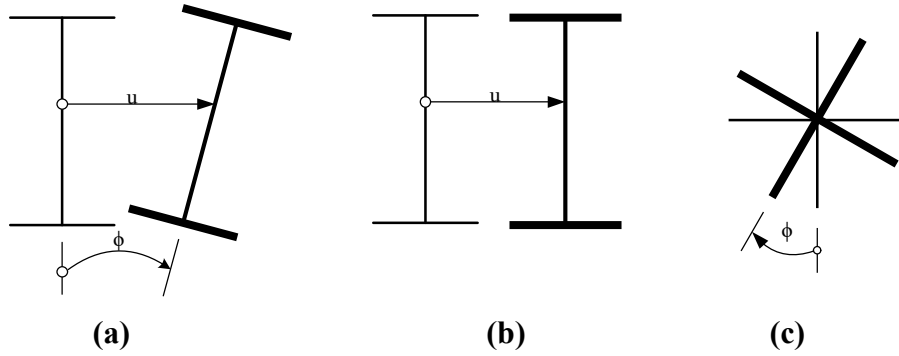
$$M_{max} = -EI \left(\frac{d^2 y}{dx^2}\right)_{x=\frac{l}{2}} = M_0 \sec u \quad 3.54$$

olarak elde edilir (Timoshenko, 1961).

3.3. Kiriş-Kolonlarda Yanal Burulmalı Burkulma

Burkulma, bir yapının veya yapı elemanının, elemanın yükleme düzleminden farklı olan bir düzlemde aniden deforme olmasıdır. Eleman burkulması tek bir elemanı içerir ve eğilme, burulma veya yanal burulmalı burkulma modlarında meydana gelebilmektedir.

Eğilme burkulması, elemanın EI_y veya EI_x eğilme rijitliği tarafından karşı koyulan elemanın kesitinde yanal u veya v yer değiştirme yapması sonucu meydana gelen burkulma türüdür. Eğilme burkulması, aksenal basınç kuvveti P 'nin u veya v yer değiştirmesi ile yaptığı ikinci mertebe momentinin her yerde iç eğilme direnci $EI_y d^2u/dz^2$ veya $-EI_x d^2v/dz^2$ ye eşit olduğu durumda meydana gelir (Trahair, 1993).



Şekil 3.11 Eleman burkulma türleri: a) Yanal burulmalı burkulma, b) Eğilme Burkulması, c) Burulma Burkulması (Trahair, 1993)

Burulma burkulması, Şekil 3.11'de görüldüğü gibi, eleman kesitinin kendi eksenini etrafında dönmesi sonucu oluşan ϕ dönüşü içerir ve elemanın burulma rijitliği GJ ve çarpılma rijitliği EI_w ile karşılanır. Burulma burkulması, aksenal basınç kuvveti P ve $d\phi/dz$ dönüşünden meydana gelen ikinci mertebe burulma momenti $Pr_0^2 d\phi/dz$ nin her yerde toplam iç burulma direnci $GJd\phi/dz^2$ ve $-EI_w d^3\phi/dz^3$ eşit olduğunda meydana gelir.

Yanal burulmalı burkulma, hem u ve v yer değiştirmelerini hem de burulma dönüşü ϕ yi içeren burkulmadır. Bu nedenle hem eğilme rijitliği $EI_y d^2u/dz^2$ ve $-EI_x d^2v/dz^2$ hem de burulma rijitliği $GJd\phi/dz^2$ ve $-EI_w d^3\phi/dz^3$ ile karşılanır (Trahair, 1993).

Kiriş-kolonlar aksenal basınç kuvveti ve eğilme momenti etkisindeki elemanlardır. Simetri kesitinde eğilmeye maruz kalan kiriş-kolonlar simetri eksenindeki aşırı eğilmeden göçebileceği gibi, düzlem dışında yanal yer değiştirme ve kendi eksenini etrafında dönme yapması sonucu meydana gelen burkulması ile de göçmeye ulaşabilir. Bu davranış yanal burulmalı burkulma davranışıdır.

3.3.1. Üniform eğilme etkisindeki kiriş-kolonlarda yanal burulmalı burkulma

Kesiti Şekil 3.12 de verilen iki eksene göre simetrik bir kiriş-kolon iki ucundan basit mesnetlenmiştir ve kiriş-kolona her iki ucundan P basınç kuvveti ile yz düzleminde üniform eğilme momenti meydana getiren eşit ve ters yönlü M momenti etkimektedir. Düzlemde dengenin sağlanması için düzlemde meydana gelen yer değiştirme v 'nin diferansiyel denge denklemini sağlaması gereklidir (Trahair, 1993).

$$(EI_x v'')'' + (Pv')' = 0 \quad 3.55$$

Sınır şartları ise

$$0 = v_{0,L} = v''_{0,L} \quad 3.56$$

Bu denklemi sağlayan şekil değiştirmiş hal aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$v = \left(\frac{M}{P}\right) \left\{ \cos(\mu z) + \sin(\mu z) \tan\left(\frac{\mu L}{2}\right) - 1 \right\} \quad 3.57$$

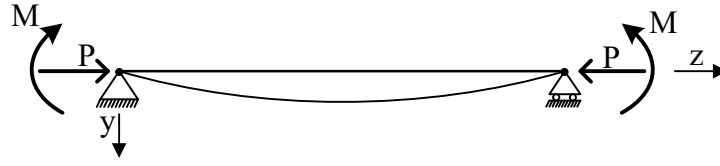
Burada

$$\mu^2 = P/EI_x \quad 3.58$$

ve eğilme momenti $M_x = -EI_x v''$

$$\frac{M_x}{M} = \cos(\mu z) + \sin(\mu z) \tan\left(\frac{\mu L}{2}\right) \quad 3.59$$

ile verilmiştir.



Şekil 3.12 Ünlform eğilme etkisindeki iki eksene göre simetrik kiriş-kolonların burkulması (Trahair, 1993)

Birçok durumda kiriş-kolonlar kolon düzlem burkulma yükünden büyük oranda daha az olan basınç yüküne (P) maruz kalırlar

$$P_x = \pi^2 EI_x / L^2 \quad 3.60$$

bu durumda eğilme momentinin değeri aşağıdaki sabit değer kullanılarak oldukça iyi bir şekilde tahmin edilebilir.

$$M_x \cong \frac{M}{1 - P/P_x} \quad 3.61$$

Kiriş-kolona gelen basınç kuvveti P ve moment M yeterince büyük olduğunda, kiriş-kolon yatayda u kadar sapma ve ϕ kadar dönme yaparak burkulabilir. Kiriş-kolonun burkulmuş halinin denge halinde olması için aşağıdaki diferansiyel denklemlerini

$$(EI_y u'')'' + (Pu')' + (M_x \phi)'' = 0 \quad 3.62$$

ve

$$(EI_w \phi'')'' - (GJ \phi')' + \left\{ P \left(\frac{I_p}{A} \right) \phi' \right\}' + M_x u'' = 0 \quad 3.63$$

ve sınır koşullarını

$$0 = u_{0,L} = u''_{0,L} = \phi_{0,L} = \phi''_{0,L} \quad 3.64$$

sağlaması gereklidir.

Denklem 3.62 ve 3.63, M_x in Denklem 3.61 ile verilen sabit yaklaşık değeri yerine konularak doğrulanabilir, o halde bu ifadeleri aşağıda Denklem 3.65 ve 3.66 ile verilen burkulmuş şekiller sağlayacaktır.

$$\frac{u}{\delta} = \frac{\phi}{\theta} = \sin\pi z/L \quad 3.65$$

$$\frac{\delta}{\theta} = M_x/(P_y - P) \quad 3.66$$

Burada δ ve θ , u ve ϕ 'nin kiriş kesitinin orta noktasındaki değerleridir, verilen P yükü ve M_x momenti Denklem 3.67'yi sağlamalıdır (Trahair, 1993).

$$\left(\frac{M_x}{M_{yz}}\right)^2 = \left(1 - \frac{P}{P_y}\right)\left(1 - \frac{P}{P_z}\right) \quad 3.67$$

Bu denklemde P_y ve P_z sırasıyla, elemanın eğilme ve burulma burkulması dayanımlarıdır. Aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabilirler

$$P_y = \pi^2 EI_y/L^2 \quad 3.68$$

ve

$$P_z = (GJ + \frac{\pi^2 EI_w}{L^2})/r_1^2 \quad 3.69$$

burada r_1 aşağıdaki formülden elde edilir

$$r_1^2 = \frac{I_x + I_y}{A} + y_0^2 \quad 3.70$$

ve y_0 ise kesitin ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafedir. y_0 değeri iki eksene göre simetrik kesitlerde sıfıra eşittir.

M_{yz} ise elemanın üniform eğilme burkulması dayanımıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$M_{yz} = r_1 \sqrt{P_y P_z} \quad 3.71$$

Bu sonuç aynı zamanda Denklem 3.65 ve 3.66 ile verilen burkulmuş şekiller aşağıdaki enerji denkleminde yerine koyularak da elde edilebilir.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int_0^L \{EI_y u''^2 + EI_w \phi''^2 + GJ \phi'^2\} dz - \frac{1}{2} \int_0^L P \left\{ u'^2 + \left(\frac{I_p}{A} \right) \phi'^2 \right\} dz \\ + \frac{1}{2} \int_0^L M_x \{2\phi u''\} dz = 0 \end{aligned} \quad 3.72$$

Bu enerji denklemi burkulma sırasında eğilme, çarpılma ve üniform burulmadan meydana gelen gerilme enerjisindeki artışlarının ve basınç kuvveti P ve M_x momentinin yaptığı işin toplamının sıfır olduğunu ifade etmektedir.

Burkulma davranışına en yakın sonuçları aşağıdaki denklem vermektedir.

$$\left(\frac{M}{M_{yzc}} \right)^2 = \left(1 - \frac{P}{P_x} \right) \left(1 - \frac{P}{P_y} \right) \left(1 - \frac{P}{P_z} \right) \quad 3.73$$

Burada M_{yzc} kiriş burkulma dayanımıdır ve burkulma öncesi yer değiştirmeleri de içeren aşağıdaki denklem kiriş burkulma dayanımı için daha doğru sonuçlar verir.

$$M_{yzc} = \frac{M_{yz}}{\sqrt{\left\{ \left(1 - \frac{EI_y}{EI_x} \right) \left[1 - \frac{GJ + \frac{\pi^2 EI_w}{L^2}}{2EI_x} \right] \right\}}} \quad 3.74$$

Denklem 3.73’u daha sade bir hale getirmek için, M_{yzc} yerine M_{yz} yazılırsa ve P_x , P_y ve P_z kuvvetleri arasında genellikle $P_x > P_z > P_y$ ilişkisi olduğu göz önüne alınırsa $(1 - \frac{P}{P_z})$ yerine $(1 - \frac{P}{P_x})(1 - \frac{P}{P_y})$ yazılabilir. Bu durumda denklem aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{P}{P_y} + \frac{1}{(1 - P/P_x)} \frac{M}{M_{yz}} = 1 \quad 3.75$$

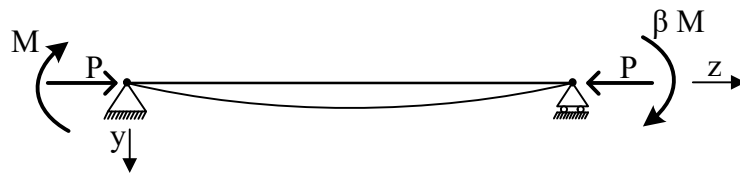
Bu denklem kiriş kolon birleşimi hesaplarında da kullanılabilir, fakat P nin negatif (çekme) olması durumlarında gerçeğe yakın sonuçlardan uzaklaşır. P nin negatif olduğu durumlar için aşağıdaki denklem daha gerçekçi sonuçlar vermektedir (Trahair, 1993).

$$\frac{P}{P_y} + \frac{M}{M_{yz}} = 1 \quad 3.76$$

3.3.2. Farklı uç momentleri etkisindeki kiriş-kolonlarda yanal burulmalı burkulma

Şekil 3.13’te verilen basit mesnetli iki eksene göre simetrik kiriş-kolon’a birbirine eşit olmayan (M ve βM) uç momentleri etkimektedir. Eksenel kuvvetin P_v bileşeninden meydana gelen deformasyonlar (v) ihmal edildiğinde kiriş-kolonda meydana gelecek olan eğilme momenti M_x yaklaşık olarak doğrusaldır ve aşağıda verilen denklem ile tahmin edilebilir.

$$M_x = M - M(1 + \beta)z/L \quad 3.77$$



Şekil 3.13 Farklı uç momentlerine maruz kiriş-kolonların burkulması (Trahair, 1993)

Bu durumda eğilme ve burulma için verilen diferansiyel denklemlerdeki (Denklem 3.62 ve 3.63) bazı terimler değişken katsayıdır ve önceki durumlarda olduğu gibi sonuçları elde etmekten daha zordur. Yaklaşık sonuçları elde etmek için enerji metodu veya bilgisayar destekli sonlu elemanlar programları kullanılabilir.

Moment dağılımı etkisindeki kiriş-kolonların burkulma davranışı ile ilgili nümerik sonuçlar aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilebilir (Trahair, 1993).

$$\left(\frac{M}{C_{bc}M_{yz}}\right)^2 = \left(1 - \frac{P}{P_y}\right)\left(1 - \frac{P}{P_z}\right) \quad 3.78$$

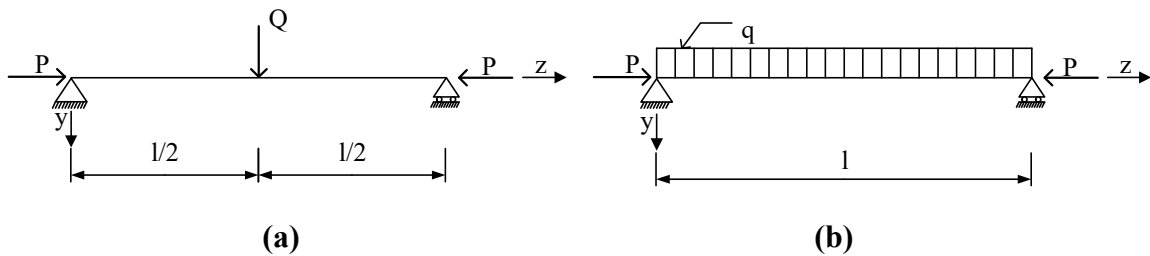
Burada C_{bc} katsayısı kiriş-kolon moment katsayısıdır ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\frac{1}{C_{bc}^2} = \left(\frac{1 - \beta}{2}\right)^2 + \frac{\left(1 - \frac{0,92P}{P_y}\right)}{\left(1 - \frac{0,23P}{P_y}\right)} \left\{0,38\left(\frac{1 + \beta}{2}\right)\right\}^2 \quad 3.79$$

3.3.3. Yanal yükler etkisindeki kiriş-kolonlarda yanal burulmalı burkulma

Üzerinde kiriş açıklığının tam ortasından etkiyen Q kuvveti veya kiriş boyunca düzgün yayılı q yükü bulunan, basit mesnetli, iki eksene göre simetrik kesitli kiriş-kolonların elastik burulmalı burkulma davranışı, yanal yükler kesme merkezinden etkideğinde, aşağıdaki denklem kullanılarak makul bir hassasiyet ile tahmin edilebilir (Trahair, 1993).

$$\left(\frac{M_m}{C_{bc}M_{yz}}\right)^2 = \left(1 - \frac{P}{P_y}\right)\left(1 - \frac{P}{P_z}\right) \quad 3.80$$



Şekil 3.14 Kiriş-kolon: (a) Orta noktasından tekil yük, (b) Kiriş boyunca düzgün yayılı yük (Trahair, 1993)

Kiriş-kolonun tam ortasından etkiyen Q yükü için yaklaşık eğilme momenti (Şekil 3.14a), ve moment katsayısı C_{bc} (P/P_y oranı ile değişmektedir) yaklaşık olarak aşağıdaki gibidir.

$$M_m \approx \frac{QL}{4} \quad 3.81$$

$$C_{bc} \approx 1,35 \quad 3.82$$

Düzgün yayılı q yükü (Şekil 3.14b) için ise

$$M_m \approx \frac{qL^2}{8} \quad 3.83$$

$$C_{bc} \approx 1,13 \quad 3.84$$

olarak alınır.

Yanal yüklerin kayma merkezine y_0 kadar uzak bir mesafeden etkidiği durumlarda elastik burkulma çözümü için aşağıdaki denklem kullanılabilir.

$$\frac{M_m}{C_{bc}M_{yz}} \left\{ \frac{M_m}{C_{bc}M_{yz}} - \frac{0,8C_{bc}y_0}{\left(\frac{M_{yz}}{P_y}\right)} \left(1 - \frac{P}{P_y}\right) \right\} = \left(1 - \frac{P}{P_y}\right) \left(1 - \frac{P}{P_z}\right) \quad 3.85$$

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

Eğilme ve aksenal basınç kuvveti etkisinde kalan elemanlar genellikle kolon elemanlardır. Bu nedenle bu çalışmada iki eksene göre simetrik kesitli çelik IPE profiller kullanılmıştır. Seçilen IPE 100, IPE 120, IPE 160, IPE 180, IPE 220, IPE 270, IPE 330 ve IPE 400 kesitli profiller basit mesnetli olarak mesnetlenmiştir. Kiriş açıklıkları 1m den başlanarak 0,5 m aralıklarla en fazla 6 m olacak şekilde belirlenmiştir.

Kiriş-kolonlar üzerine etkiyecek olan yükleme durumları çelik yapı elemanlarında sıkça karşılaşılabilecek genel yükleme durumlarına göre belirlenmiştir. Bu yükleme durumlarından, tekil yükün kiriş açıklığının orta noktasından etkimesi ve kiriş boyunca düzgün yayılı yük etkimesi durumları en yaygın yükleme durumlarıdır. Bu yükleme durumlarına ek olarak tekil yük, düzgün yayılı yük ve doğrusal değişen yayılı yüklerin kiriş açıklığı boyunca kombinasyonları kullanılarak 6 genel yükleme durumu belirlenmiştir (Çizelge 4.1). Yükleme durumlarında sadece sabit yükler göz önüne alınmıştır.

4.2. Yöntem

Eğilme momenti ve aksenal basınç kuvveti etkisindeki elemanların elastik kritik yanal burulmalı burkulma yükünün hesabı için literatürde verilen parametrik denklemler kullanılmıştır.

Trahair'in, farklı uç momentleri etkisindeki kiriş-kolonların (Bkz. Şekil 3.13) elastik yanal burulmalı burkulma yükünün tahmini için verdiği bir parametrik denklem olan Denklem 3.78 bu çalışmada temel alınmıştır. Denklem 3.78 de bulunan C_{bc} katsayısı kiriş-kolonlar için moment katsayısıdır ve Denklem 3.79 ile ifade edilmiştir.

Trahair, kiriş-kolon üzerinde yanal yükler etkidiği durumlarda elastik kritik yanal burulmalı burkulma yükünün hesabı için Denklem 3.80'i önermiştir. Kiriş-kolonun tam ortasından etkiyen Q yükü için eğilme momenti ve C_{bc} katsayısı Denklem 3.81 ve Denklem

3.82 ile düzgün yayılı yük durumu için eğilme momenti ve C_{bc} katsayısı Denklem 3.83 ve Denklem 3.84 ile verilmiştir.

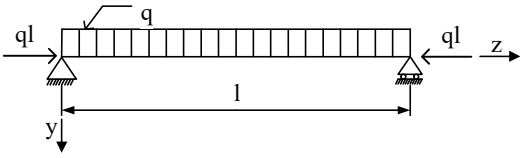
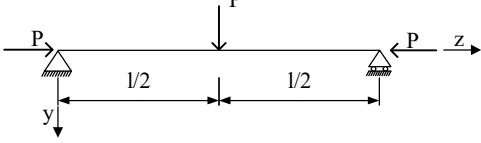
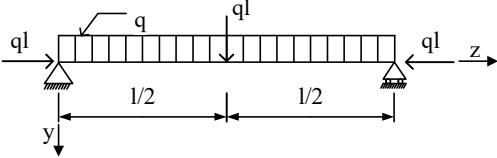
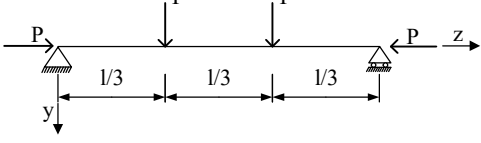
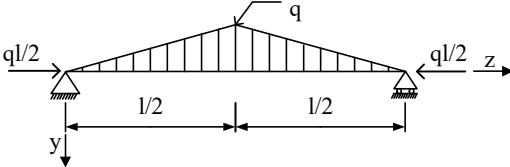
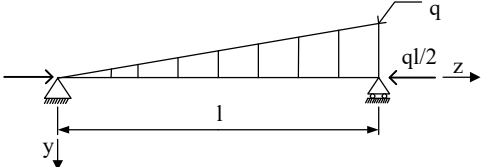
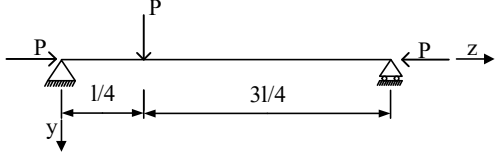
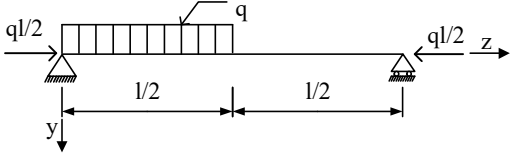
Parametrik denklemde verilen moment dağılım katsayısı $C_{bc}=1,0$ alınarak IPE 100, IPE120, IPE 160, IPE 180, IPE 220, IPE 270, IPE 330 ve IPE 400 profil kesitlerinin 11 açıklık boyunun 8 yükleme durumu (Çizelge 4.1) için ayrı ayrı kritik yanal burulmalı burkulma yükleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar Excel programı kullanılarak yapılmış ve tablolar oluşturulmuştur.

Elemanların yanal burulmalı burkulma yüklerinin hesabı için sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Kullanım ve görsellik avantajlarından yararlanılarak çubuk sonlu elemanlar programı olan LTBeamN programı ile yukarıda belirtilen elemanların kritik yanal burulmalı burkulma yükleri hesaplanmıştır. LTBeamN programının menüleri ve kullanımı Ek Açıklamalar A ile verilmiştir. Üç boyutlu sonlu elemanlar programı olan ABAQUS ile üç farklı narinlikteki kesitin kiriş ortasında tekil yük ve kiriş boyunca düzgün yayılı yük bulunması durumları için yanal burulmalı burkulma yükleri hesaplanarak yapılan analizler desteklenmiştir. Sonlu elemanlar programı ile hesaplanan kritik yanal burulmalı burkulma yükleri için tablolar oluşturulmuştur.

LTBeamN sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılan analizler sonucunda elde edilen kritik yanal burulmalı burkulma yükleri ile literatürde verilen parametrik denklemde moment dağılım katsayısı, $C_{bc}=1,0$ alınarak hesaplanan yanal burulmalı burkulma yükleri birbirine oranlanarak, yükleme durumlarına bağlı olarak moment dağılım katsayıları hesaplanmıştır. Bulunan moment dağılım katsayıları her bir yükleme durumu için grafikler ile Bölüm 5.4'de sunulmuştur. Grafiklerde farklı narinlik ve boylardaki profillerin yakınsadığı moment dağılım katsayısı değerleri (Y.D.) ve güvenli moment dağılım katsayısı değerleri (G.D.) sunulmuştur.

Belirlenen 8 genel yükleme durumu için sunulan moment dağılım katsayıları, yükleme durumlarından seçilen 3. Durum için tasarım örneği yapılmış ve yapılan tasarım mevcut çelik yapılar yönetmelikleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

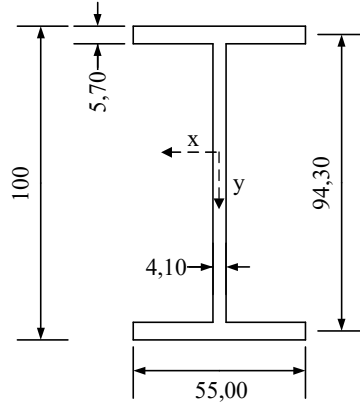
Çizelge 4.1 Yükleme durumları ve yaklaşık eğilme momentleri

	Yükleme Durumu	(M_m)
1. DURUM		$M_m \approx \frac{ql^2}{8}$
2. DURUM		$M_m \approx \frac{Pl}{4}$
3. DURUM		$M_m \approx \frac{3ql^2}{8}$
4. DURUM		$M_m \approx \frac{Pl}{3}$
5. DURUM		$M_m \approx \frac{ql^2}{12}$
6. DURUM		$M_m \approx \frac{ql^2}{15,59}$
7. DURUM		$M_m \approx \frac{3Pl}{16}$
8. DURUM		$M_m \approx \frac{9ql^2}{128}$

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Kiriş-Kolonların Trahair Formülleri ile Hesaplanması

Kesit boyutları Şekil 5.1 ile verilen IPE 100 kesitli kiriş-kolonların, aksenal basınç kuvveti ve kiriş açıklığının orta noktasında tekil yük bulunması (Şekil 5.2) ve kiriş açıklığı boyunca düzgün yayılı yük bulunması (Şekil 5.3) yükleme durumları için Trahair'in (1993) önerdiği moment dağılım katsayıları kullanılarak, elastik kritik yanal burulmalı burkulma yükleri Denklem 3.80 ile hesaplanmıştır.



Şekil 5.1 IPE 100 profilinin kesit boyutları

Şekil 5.1'de gösterilen boyutlar mm cinsindedir. Kesitin statik özellikleri Çizelge 5.1 ile verilmiştir.

Çizelge 5.1 IPE 100 kesitin statik özellikleri

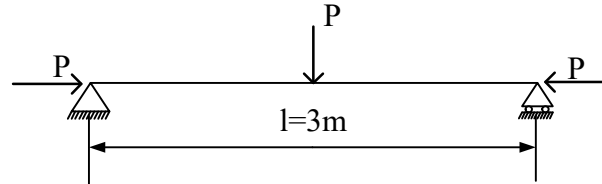
I_x	I_y	I_t	I_w	A
171 cm ⁴	15,9 cm ⁴	1,2 cm ⁴	351 cm ⁶	10,3 cm ²

Kullanılan çelik malzemenin özellikleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Çelik malzeme özellikleri

E (Mpa)	G (Mpa)	ν
200000	76920	0,3

Şekil 5.2’de verilen 3 m açıklıklı kiriş basit mesnetlidir. Kiriş üzerinde aksenal basınç kuvveti P ve kiriş açıklığı orta noktasından etki eden, aksenal kuvvet ile aynı şiddetli, P , tekil yük etkisi altındadır. Kesit ve malzeme özellikleri verilen kiriş-kolonun elastik kritik yanıl burulmalı burkulma yükü Denklem 3.80 kullanılarak hesaplanacaktır.



Şekil 5.2 Orta noktasında tekil yük etkisindeki kiriş-kolon

Kirişte meydana gelecek olan eğilme momenti, M_m , ve moment dağılım katsayısı C_{bc}

$$M_m = \frac{Pl}{4} = \frac{P \times 3000}{4} = 750P$$

$$C_{bc} = 1,35$$

olarak alınacaktır. Denklem 3.80’de P_y ve P_z sırasıyla, elemanın eğilme ve burulma burkulması dayanımlarıdır. Aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabilirler

$$P_y = \frac{\pi^2 EI_y}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 15,9 \times 10^4}{3000^2} = 34872,6 \text{ N}$$

$$r_1^2 = \frac{(I_x + I_y)}{A} + y_0^2$$

$$y_0 = 0$$

ve y_0 ise kesitin ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafedir. y_0 değeri iki eksene göre simetrik kesitlerde sıfıra eşittir.

$$r_1 = \sqrt{\frac{(I_x + I_y)}{A}} = \sqrt{\frac{171 \times 10^4 + 15,9 \times 10^4}{10,3 \times 10^2}} = 42,59$$

$$P_z = \frac{GI_t}{r_1^2} + \frac{\pi^2 EI_w}{L^2 r_1^2} = \frac{76920 \times 1,2 \times 10^4}{42,59^2} + \frac{\pi^2 200000 \times 0,35 \times 10^9}{3000^2 \times 42,59^2} = 551109,5 \text{ N}$$

M_{yz} , elemanın üniform eğilme burkulması dayanımı ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$M_{yz} = r_1 \sqrt{P_y P_z} = 42,59 \sqrt{34872,6 \times 551109,5} = 5905371 \text{ Nmm}$$

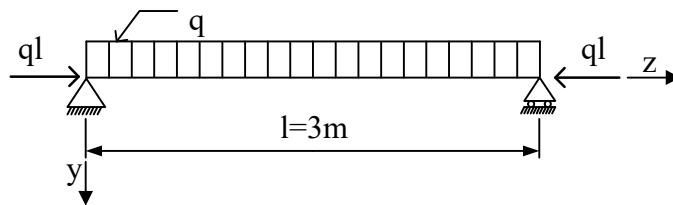
$$\left(\frac{750P}{1,35 \times 5905371}\right)^2 = \left(1 - \frac{P}{34872,6}\right)\left(1 - \frac{P}{551109,5}\right)$$

Denkleminin çözümünden Şekil 5.2 ile verilen kiriş-kolon için elastik kritik yanal burulmalı burkulma yükü aşağıdaki gibi elde edilir. Buradaki birinci kök, mod1 için kritik yanal burulmalı burkulma yüküdür.

$$P_1 = 9068,2 \text{ N} = 9,07 \text{ kN}$$

$$P_2 = -12533,7 \text{ N} = -12,53 \text{ kN}$$

Şekil 5.3 ile verilen 3 m açıklıklı kiriş-kolon üzerinde kiriş boyunca q şiddetinde düzgün yayılı yük ve ql şiddetinde eksenel kuvvet etkimektedir.



Şekil 5.3 Kiriş açıklığı boyunca düzgün yayılı yük etkisindeki kiriş-kolon

Benzer şekilde, Denklem 3.80 kullanılarak verilen kirişin yanal burulmalı burkulma yükü aşağıdaki adımlar takip edilerek hesaplanacaktır.

Kirişte meydana gelecek olan eğilme momenti, M_m , ve moment dağılım katsayısı C_{bc}

$$M_m = \frac{ql^2}{8} = \frac{q3000^2}{8} = 1125000q$$

$$C_{bc} = 1,13$$

Elemanın eğilme burkulması dayanımı P_y ,

$$P_y = \frac{\pi^2 EI_y}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 15,9 \times 10^4}{3000^2} = 34872,6 \text{ N}$$

$$r_1^2 = \frac{(I_x + I_y)}{A} + y_0^2$$

$$y_0 = 0$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{(I_x + I_y)}{A}} = \sqrt{\frac{171 \times 10^4 + 15,9 \times 10^4}{10,3 \times 10^2}} = 42,59$$

Elemanın burulma burkulması dayanımı P_z ,

$$P_z = \frac{GI_t}{r_1^2} + \frac{\pi^2 EI_w}{L^2 r_1^2} = \frac{76920 \times 1,2 \times 10^4}{42,59^2} + \frac{\pi^2 200000 \times 0,35 \times 10^9}{3000^2 \times 42,59^2} = 551109,5 \text{ N}$$

olarak elde edilir. Elemanın üniform eğilme burkulması dayanımı M_{yz} ,

$$M_{yz} = r_1 \sqrt{P_y P_z} = 42,59 \sqrt{34872,6 \times 551109,5} = 5905371 \text{ Nmm}$$

Kirişe etkiyen aksenal basınç kuvvetinin şiddeti ql olduğundan, Denklem 3.80'de $P=ql$ yazılır.

$$P = ql = 3000q$$

$$\left(\frac{1125000q}{1,13 \times 5905371}\right)^2 = \left(1 - \frac{3000q}{34872,6}\right)\left(1 - \frac{3000q}{551109,5}\right)$$

Denkleminin çözümünden Şekil 5.3 ile verilen kiriş-kolonun kritik yanal burulmalı burkulma yükü aşağıdaki gibi elde edilir. Buradaki ilk kök, mod1 için burkulma yüküdür.

$$q_1 = 4,56 \text{ N/mm}$$

$$q_2 = -7,84 \text{ N/mm}$$

Çizelge 4.1 ile verilen yüklenme durumlarının IPE 100, IPE120, IPE160, IPE 180, IPE 220, IPE 270, IPE 330 ve IPE 400 kesitli çelik elemanların 1m açıklık boyundan başlanmak üzere 0,5m'lik artırımlarla 6m ye kadar olan boyları için elastik kritik yanal burulmalı burkulma yükleri Denklem 3.80' de moment dağılım katsayısı, $C_{bc}=1,0$ alınarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar Excel programı kullanılarak yapılmış ve tablolar oluşturulmuştur.

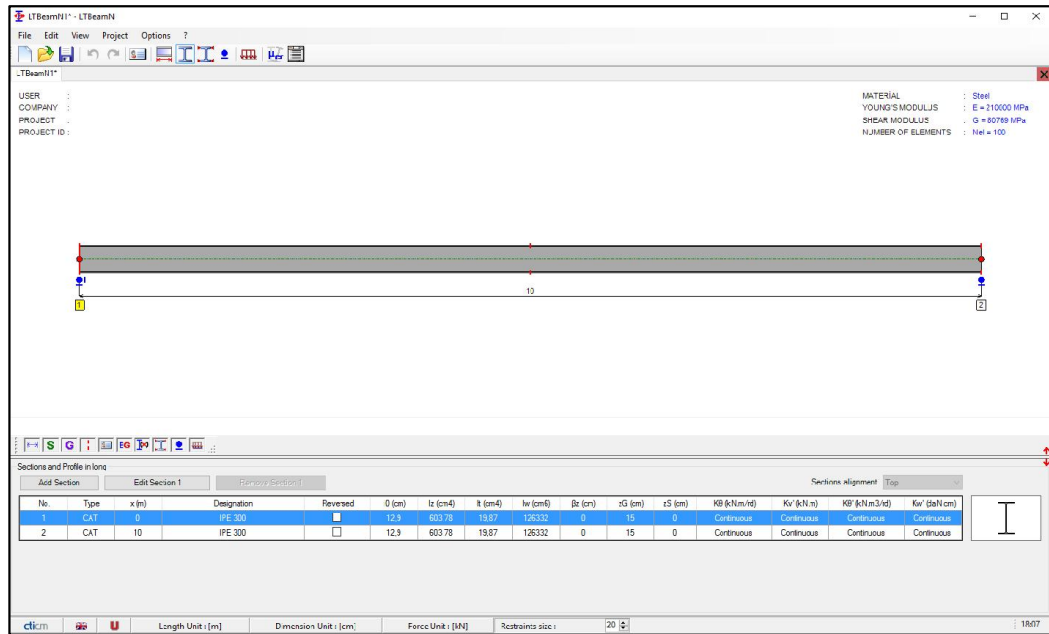
5.2. Kiriş-Kolonların Yanal Burulmalı Burkulma Yükünün LTBeamN ile Hesaplanması

LTBeamN, CTICM isimli Fransız firmasının ürettiği, çubuk sonlu elemanlar yazılımıdır. Fransız Çelik Yapı Birliği'nin (CFMS) isteği üzerine çıkarılan kararname ile kurulmuş olan CTICM firması, 1962'den beri çelik yapı sektöründe teknik referans olmuştur. LTBeamN, adını İngilizce ' **L**ateral **T**orsional **B**uckling of **B**eams' den almıştır. İsminin sonunda bulunan 'N' harfi ise aksenal kuvvet etkisini temsil etmektedir ve LTBeamN yazılımı, aksenal kuvvet etkisini göz önüne almadan analiz yapan 'LTBeam' yazılımından bu yönüyle ayrılmaktadır. VB Net dili ile yazılmış olan LTBeamN programı, gelişmiş bir kullanıcı ara yüzü ile –diğer avantajlarının yanı sıra- değişken yükseklikli kirişlerin kolay ve uygun analizlerine olanak sağlamaktadır. Kullanıcı ara yüzü Fransızca ve İngilizce olarak iki dil seçeneği sunmaktadır.

LTBeamN, aksenal kuvvet ve eğilme momenti etkisindeki elemanların, öz değer faktörünü hesaplayarak elemanın kritik elastik yanal burulmalı burkulma yükünü vermektedir. Bu program, kiriş uzunluğu boyunca üniform olmayan kesite sahip kirişlerin

analizine olanak sağlamaktadır (ancak kesitte süreksizlik olmamalıdır). Analiz yapılmak istenen profil kesitleri hazır profil tablolarından alınabileceği gibi kullanıcı tarafından boyutları ve statik özellikleri girilerek de tanımlanabilir. Program, kirişe etkiyen eksenel kuvvet ve eğilme momentini, eğilme düzleminde veya eğilme düzlemi dışında olmak üzere çeşitli durumlarda verebilme imkanı sunmaktadır.

LTBeamN programı ilk açıldığında eleman eksini x olan 10 m boyunda IPE 300 kesitli bir profil ile ekrana gelir (Şekil 5.4). LTBeamN yazılımı, görselliği ve kolay ulaşılabilir kısa yol araçları ile kullanımı gayet rahat olan bir sonlu elemanlar programıdır.



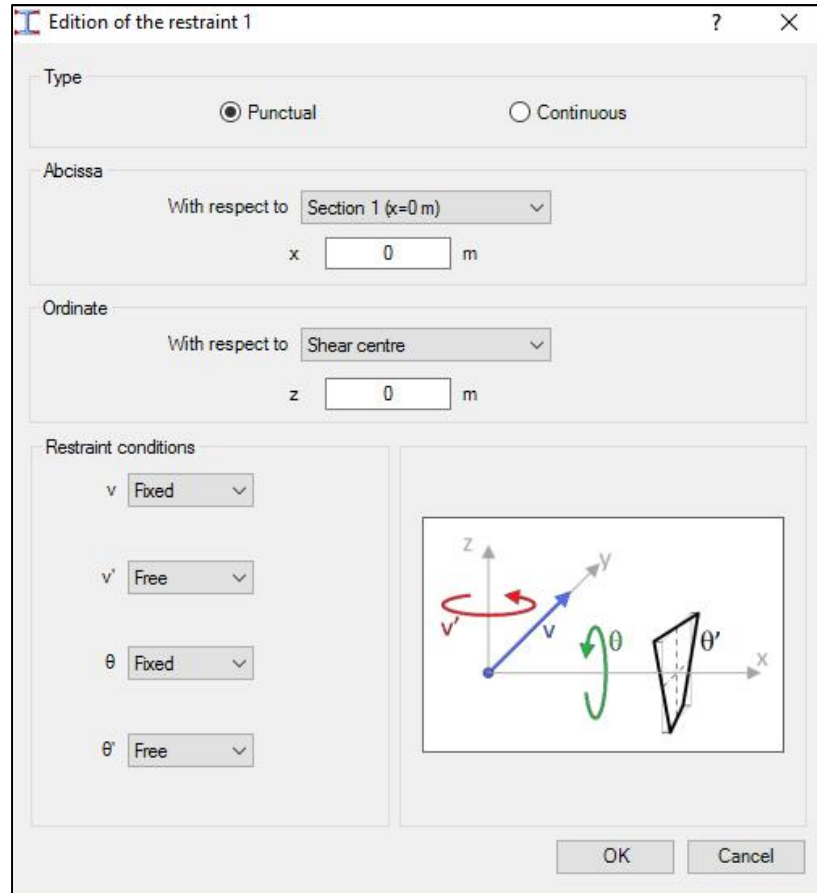
Şekil 5.4 LTBeamN programı giriş ekranı

Programın tasarım ve analiz kısmı 'Project' menüsü altında bulunan menüler ile gerçekleştirilmektedir. Bu menülerin aynı zamanda kolay kullanım için kısa yol ikonları da bulunmaktadır. Options menüsü ise, malzeme özelliklerinin değiştirilebildiği, programda bulunan profil tablolarına erişim sağlanabildiği ve analizde gerekli olan limit değerler ile kullanılacak olan birimlerin belirlenebileceği kısımdır.

LTBeamN ile analize başlarken kullanılacak dil ve birim sistemi seçildikten sonra kiriş boyutları ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi ile devam edilebilir. Bu çalışmada kesit özellikleri programda hazır halde bulunan profil tablolarından istenilen özelliklerdeki

kesit seçilerek belirlenmiştir. İstenilen kesit özellikleri profil tablolarında bulunmuyorsa, LTBeamN programı kullanıcıya boyutlar veya özellikler tanımlayarak kendi oluşturabileceği kesitler üzerinde analiz yapma olanağını da sunmaktadır. Kirişin boyu ve kaç sonlu elemana ayrılmak istendiği ve kullanılmak istenen malzeme özellikleri her bir eleman için elle girilmiştir.

LTBeamN programı kiriş mesnetlenme durumlarını yanal mesnetler (lateral restraints) ve mesnetler (supports) olarak iki kısımda vermiştir. Yanal mesnetler, y eksenindeki yer değiştirme (v), z eksenindeki dönüş (v') ve x eksenindeki dönüş (θ) ile x eksenindeki çarpılma (θ') durumlarının serbestlik derecesini belirlemek için kullanılmaktadır (Şekil 5.5). Yanal mesnetler kiriş uzunluğu boyunca belirli bir noktada verilebileceği gibi kirişin tüm boyunca veya kiriş boyunca belirli uzaklıklar arasında da verilebilir.



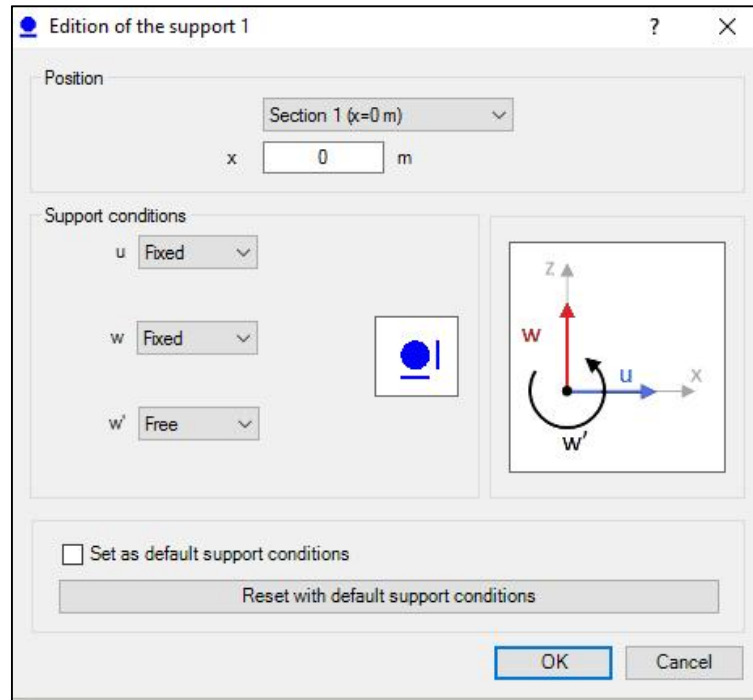
Şekil 5.5 LTBeamN Yanal mesnetlerin tanımı

Bu çalışmada kullanılan yanal mesnetler Çizelge 5.3 ile verilmiştir.

Çizelge 5.3 Yanal mesnet koşulları

Yanal Mesnet				
	$K_v(\text{kN/m})$	$K_\theta(\text{kNm/rd})$	$K_v'(\text{kNm})$	$K_\theta'(\text{kNm}^3/\text{rd})$
Sol uç	Fixed	Fixed	Free	Free
Sağ uç	Fixed	Fixed	Free	Free

LTBeamN de kullanılan mesnetler (supports) ise x eksenini yönünde yer değiştirme (u), z eksenini yönünde yer değiştirme (w) ve z eksenini etrafında dönüş (w') durumlarının seçilen noktadaki serbestlik durumlarını belirlemek için kullanılan mesnetlerdir (Şekil 5.6).



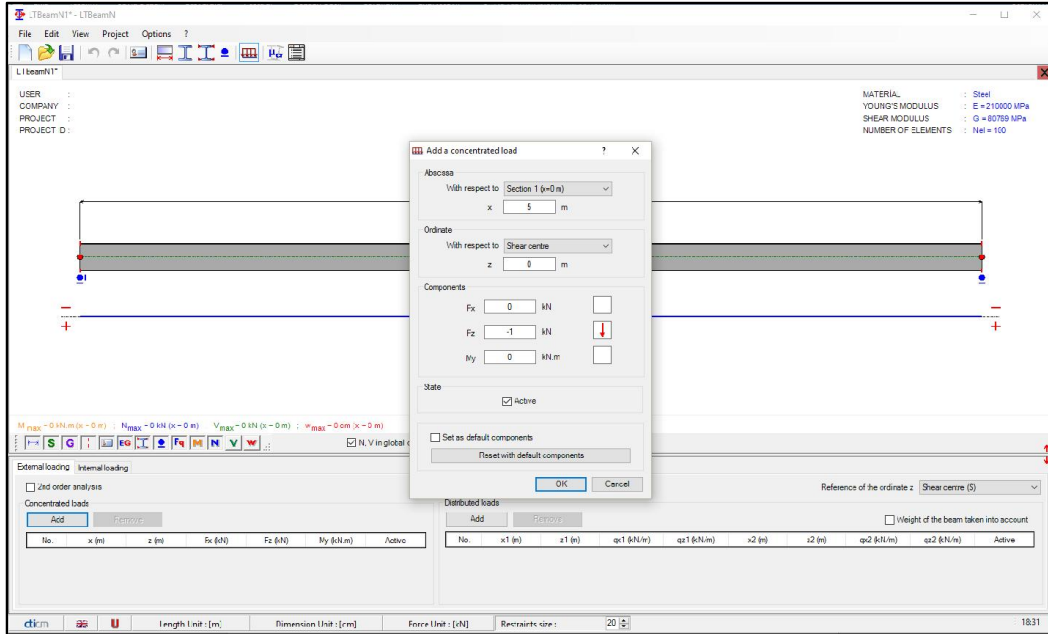
Şekil 5.6 LTBeamN mesnetlerin tanımı

Bu çalışmada kullanılan mesnet koşulları Çizelge 5.4 ile verilmiştir.

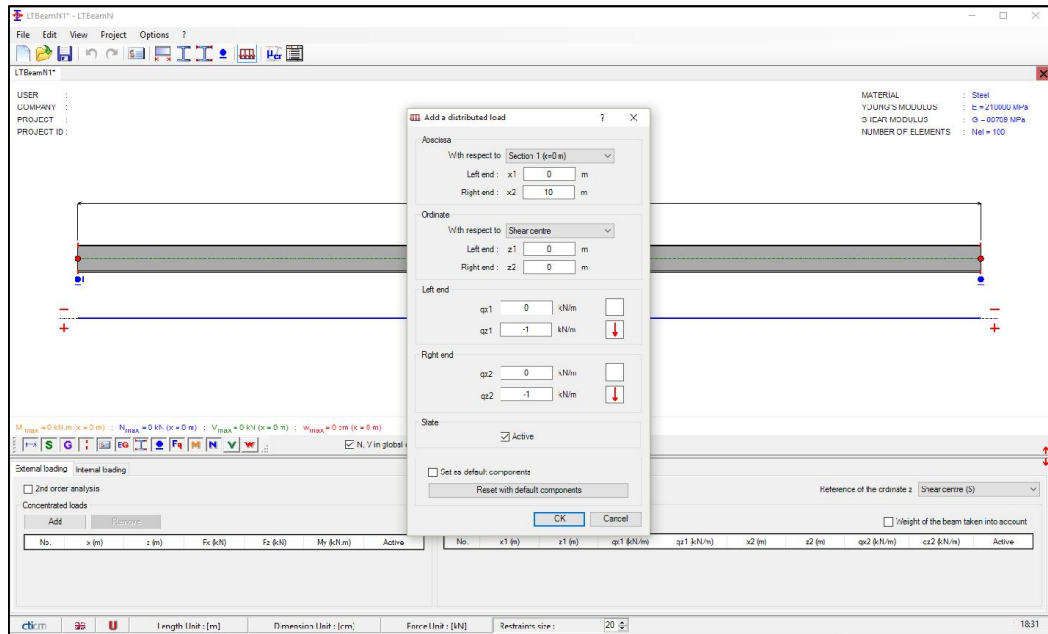
Çizelge 5.4 Mesnet koşulları

Mesnetler			
	$K_u(\text{kN/m})$	$K_w(\text{kN/m})$	$K_w'(\text{kNm/rd})$
Sol uç	Fixed	Fixed	Free
Sağ uç	Free	Fixed	Free

LTBeamN ile eksenel kuvvet ve yanal yükler tekil veya yayılı olarak çeşitli şekillerde girilebilmektedir (Şekil 5.7 ve Şekil 5.8). Kirişlere yükler kesme merkezinden yüklenebileceği gibi üst başlık ve alt başlık yüklemeleri de yapmak mümkündür.

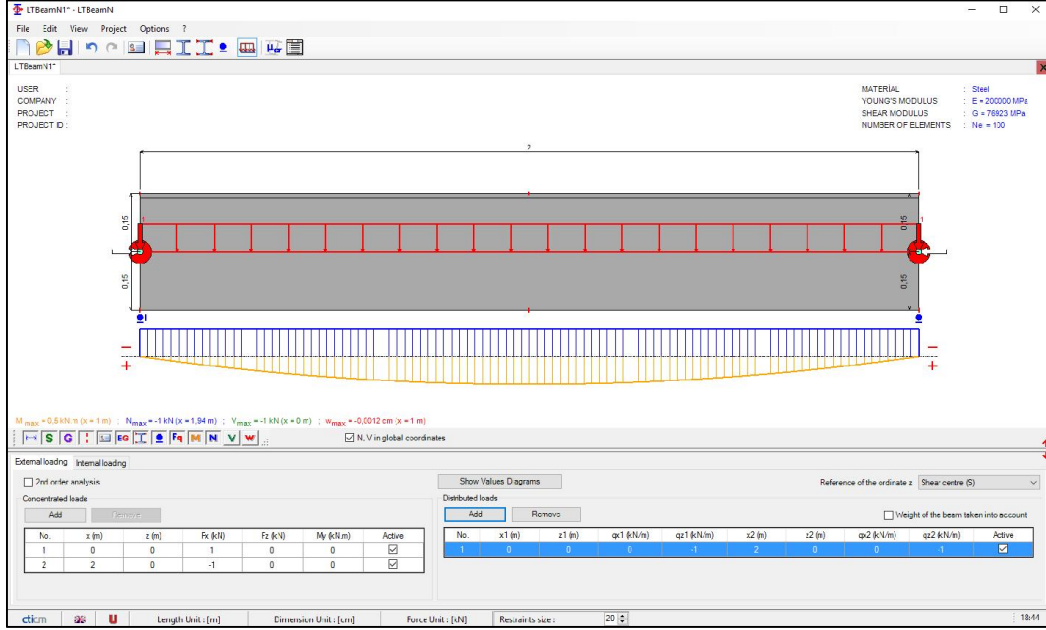


Şekil 5.7 LTBeamN tekil yüklerin girildiği pencere



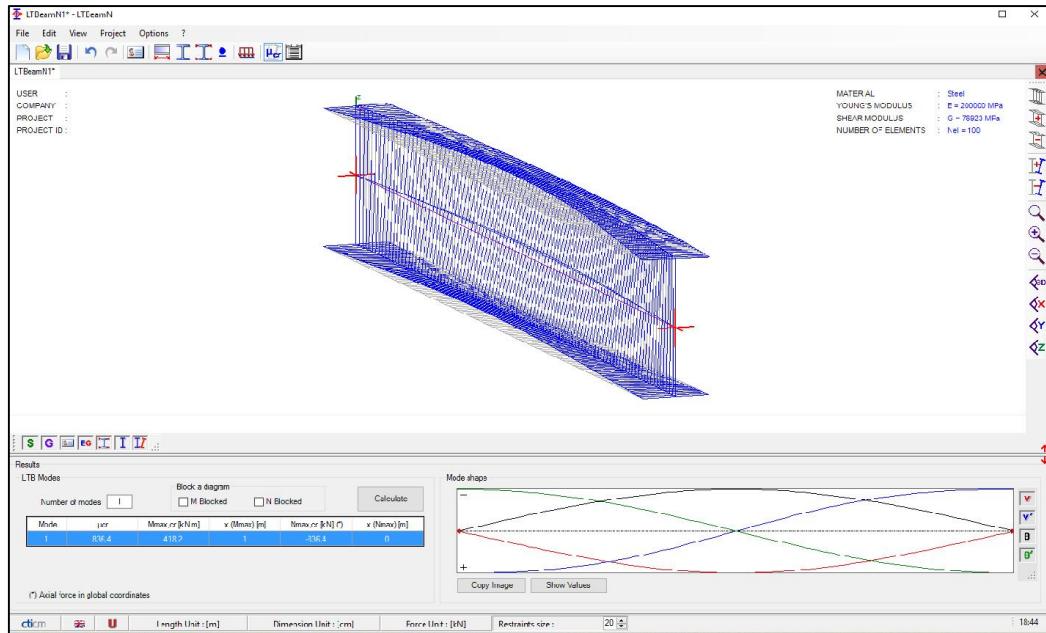
Şekil 5.8 LTBeamN yayılı yüklerin girildiği ekran

Bu çalışmada yapılan analizlerdeki yükleme durumlarından birisi Şekil 5.9 ile örnek olarak gösterilmiştir.



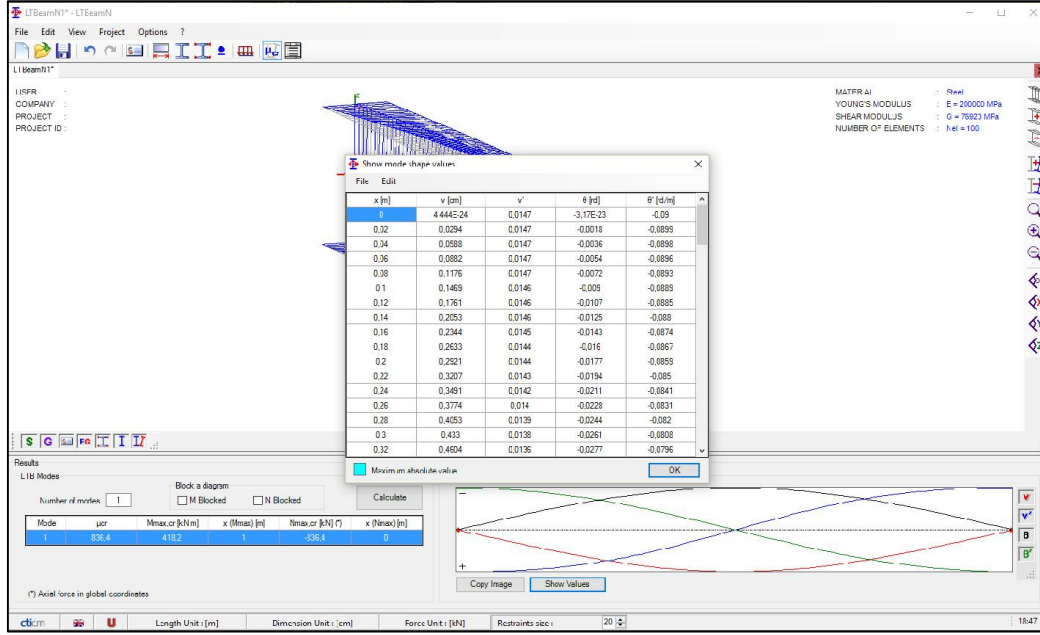
Şekil 5.9 LTBeamN eksenel kuvvet ve düzgün yayılı yük altındaki kiriş

Kiriş boyutları, malzeme ve kesit özellikleri, mesnet koşulları ve yükleme durumu belirlenmiş olan kirişin analizi 'calculate' butonu tıklanarak gerçekleştirilir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 LTBeamN analiz ekranı

Analiz sonucunda program birinci burkulma modu için bir özdeğer verir. Ayrıca maksimum burkulma momentini ve aksel kuvvetini de hesaplar. ‘Show values’ butonu tıklanarak şekil değiştirmiş kirişin yaptığı yer değiştirme ve dönmeler bir tablo halinde alınabilir (Şekil 5.11). Ayrıca ‘Project’ menüsü altında ‘Calculation Sheet’ tıklanarak da yapılan analizin dökümü alınabilmektedir. Yapılan analizler ‘.ltbn’ uzantısı ile kaydedilir.

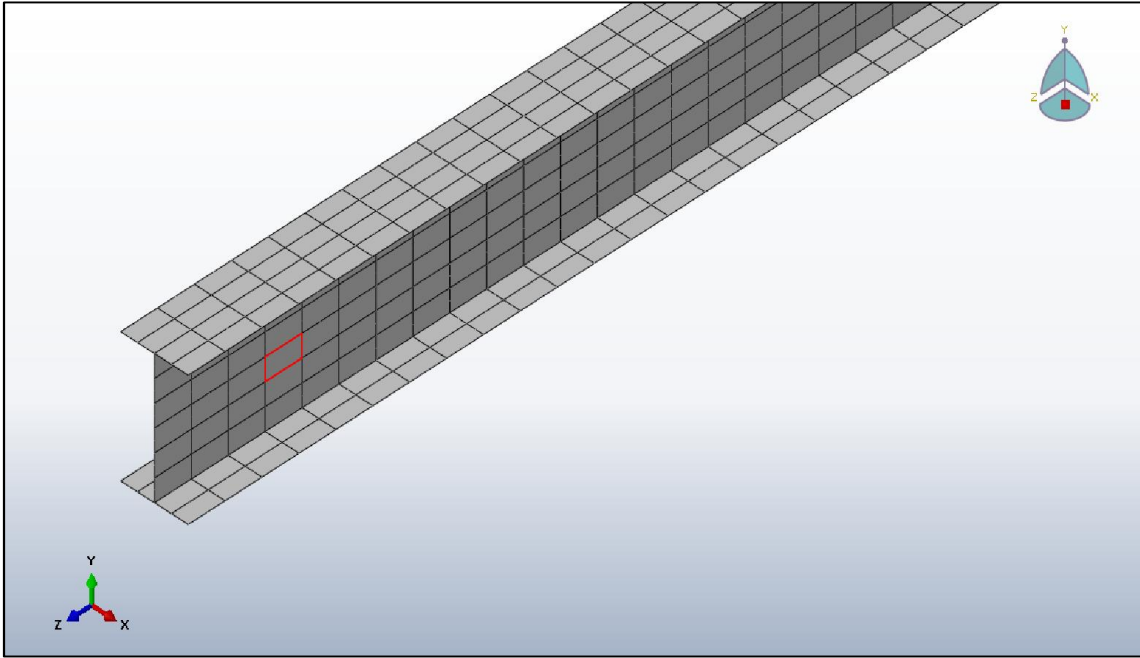


Şekil 5.11 LTBeamN analiz sonuçları

Bu çalışmada sekiz farklı kesitin, IPE 100, IPE 120, IPE160, IPE 180, IPE 220, IPE 270, IPE 330 ve IPE 400; 11 farklı boyu (1-6m 0,5m aralıklarla) üzerinde 8 farklı yükleme durumu (Çizelge 5.5) göz önüne alınarak elastik kritik burkulma boyları LTBeamN ile hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar üç boyutlu sonlu elemanlar analizi yapan ABAQUS yazılımı kullanılarak birkaç farklı kesit, boy ve yükleme durumu için kontrol edilmiştir.

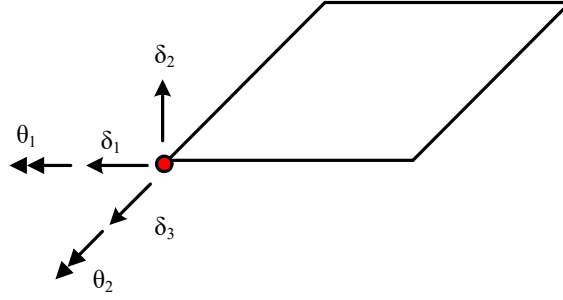
5.3. Kiriş-Kolonların Yanal Burulmalı Burkulma Yükünün ABAQUS ile Hesaplanması

Abaqus, basit lineer analizlerden en karışık non-lineer analizlere kadar birçok problemi sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çözebilen güçlü bir mühendislik yazılımıdır. Abaqus hemen hemen her geometriyi modelleyebilecek geniş bir kütüphane ve mühendislikte en sık kullanılan malzeme davranışlarının simüle edilebilebileceği geniş bir malzeme modeli listesi içerir. Abaqus, unsur tabanlı (parametrik) modelleme özelliğine sahiptir. Yapılan işlemler unsur ağacında görülmekte olup, bu işlemleri daha sonradan değiştirme olanağı sağlamaktadır. Abaqus 'ün diğer bir özelliği ise modelleme, analiz ve çözüm kısımlarının tek bir ara yüzde bulunmasıdır. Abaqus katı cisim, kabuk, kablo gibi eleman seçenekleriyle 2 ve 3 boyutlu tasarımlara olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada çelik malzemenin özellikleri elastisite modülü ve poisson oranı girilerek tanımlanmış ve I kesitli kirişlerin tasarımında kabuk eleman tasarımı kullanılmıştır. Kiriş-kolonlar modellenirken S8R5 tipinde alan elemanları kullanılmıştır (Şekil 5.12).



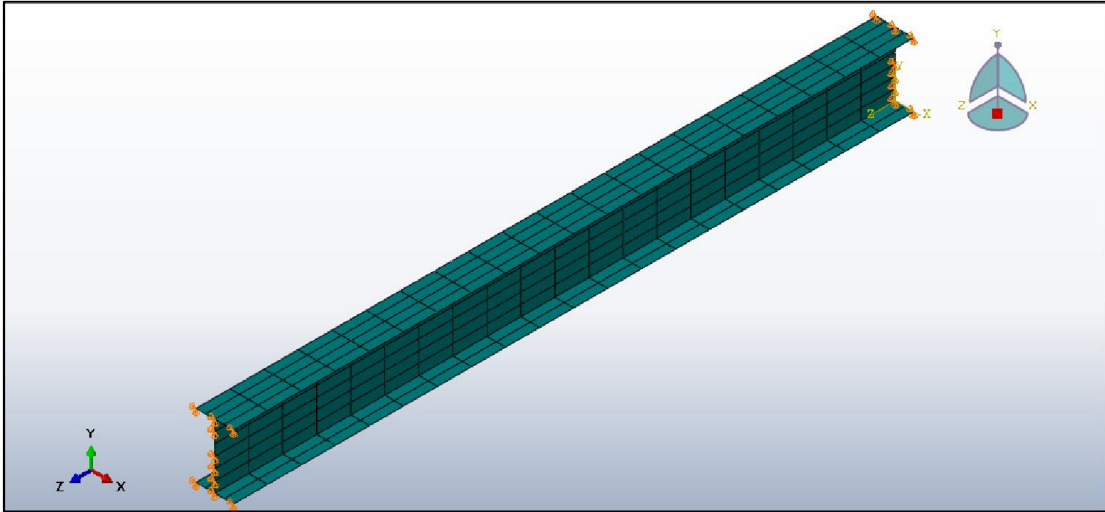
Şekil 5.12 S8R5 elemanı

S8R5 alan elemanı 8 düğüm noktasına sahiptir ve her bir düğüm noktasında 5 serbestlik derecesi vardır. Bu serbestlikler üç eksende yer değiştirme ve eleman normaline etrafındaki yön haricindeki diğer iki yönde dönmelerdir (Şekil 5.13).



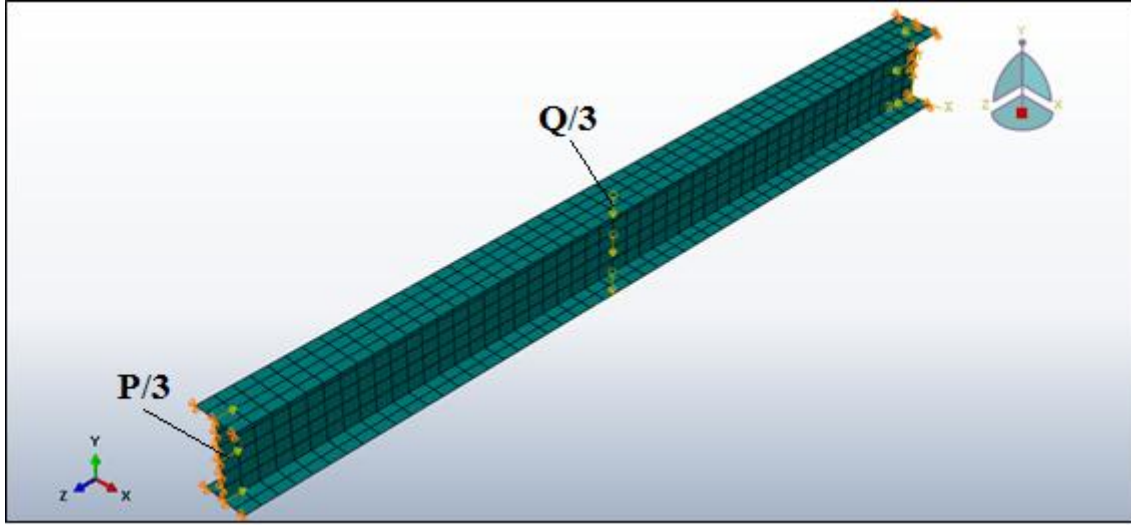
Şekil 5.13 S8R5 elemanı için serbestlikler (Özbaşaran, 2013 a)

Şekil 5.13’de δ , yer değiştirme, θ ise dönme serbestliklerini göstermektedir. Elemanlar her iki ucundan x ve y eksenlerine göre yer değiştirmeleri tutulu olacak şekilde mesnetlenmiştir (eleman eksenini z eksenidir) (Şekil 5.14).



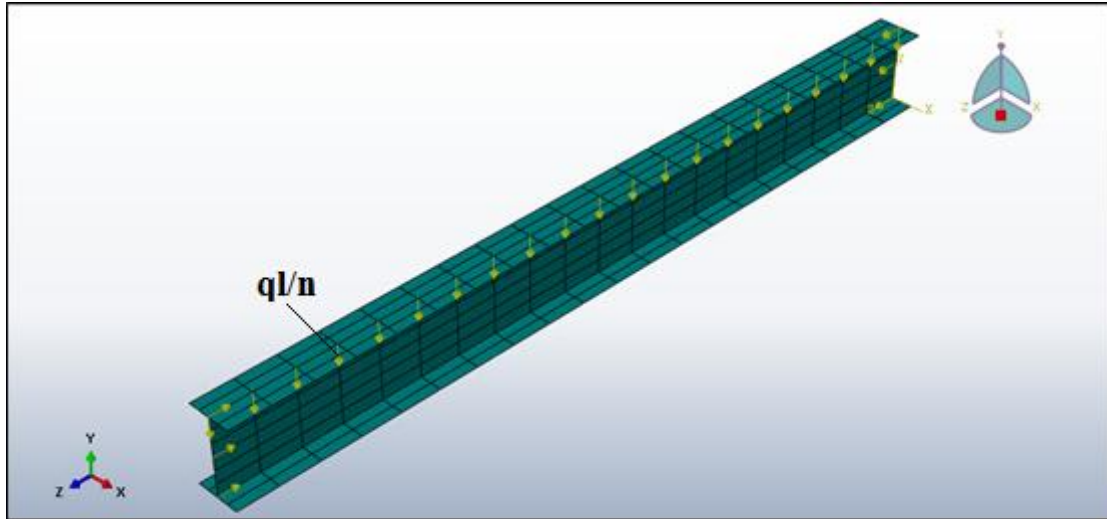
Şekil 5.14 İki ucu basit mesnetli kiriş modeli

Kirişlere aksenal basınç yükü kiriş eksenini olan z ekseninde yük bileşkesi kesme merkezinde olacak şekilde üç eşit parçaya bölünerek her iki uçtan birbirine zıt yönlü ve eşit olarak yüklenmiştir. Yanal tekil yük ise kirişin tam orta noktasından, bileşkesi kesme merkezinde olacak şekilde üst başlık, kesme merkezi ve alt başlık olmak üzere üç noktaya eşit olarak paylaştırılmıştır (Şekil 5.15). Tekil yük bir noktadan etkidiğinde, elemanda bölgesel göçmeler meydana getirir, bu durumu önlemek için yük üç parçaya ayrılarak yükleme yapılmıştır.



Şekil 5.15 Elemanlara aksel basınç ve tekil yükün yüklenmesi

Eleman boyunca düzgün yayılı yük hali için elemana yüklenecek yükün bileşkesi, düzgün yayılı yükün şiddeti ile eleman boyunun çarpılması ile bulunmuştur. Daha sonra bu değer yükleme yapılacak hat üzerindeki düğüm sayısına bölünerek düğümlere tekil yük olarak dağıtılmıştır (Şekil 5.16).



Şekil 5.16 Elemanlara aksel basınç ve eleman boyunca düzgün yayılı yükün yüklenmesi

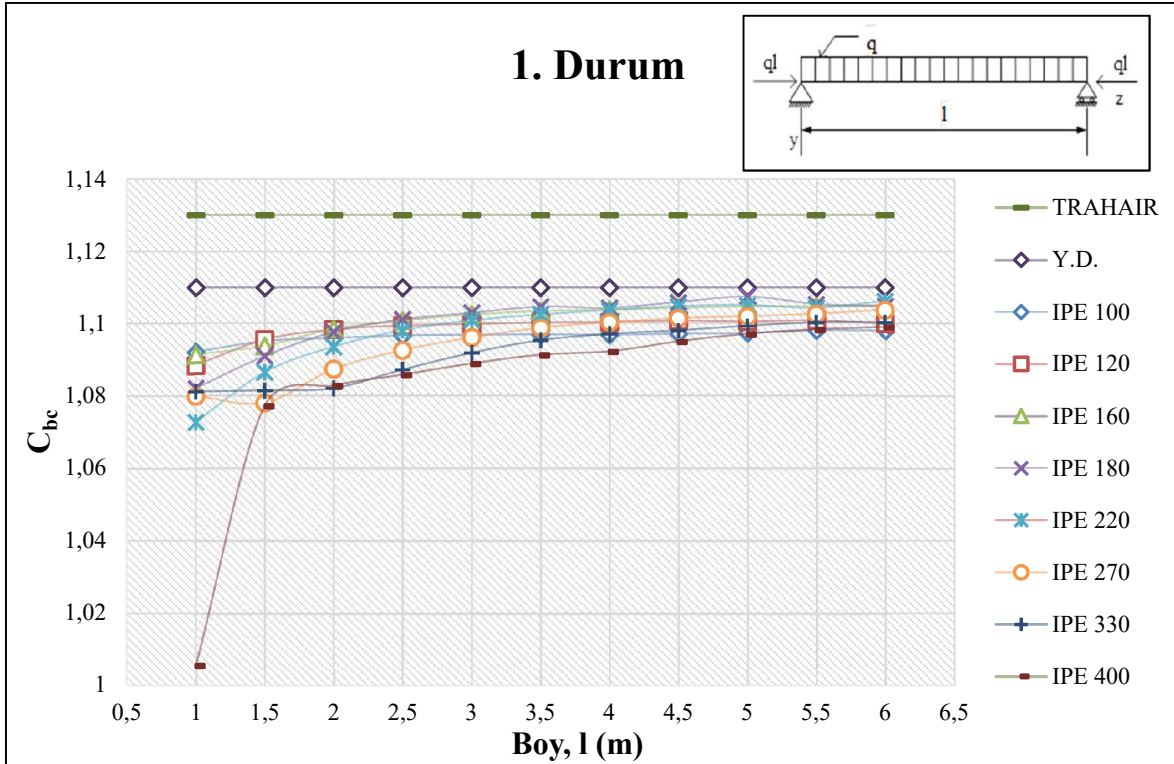
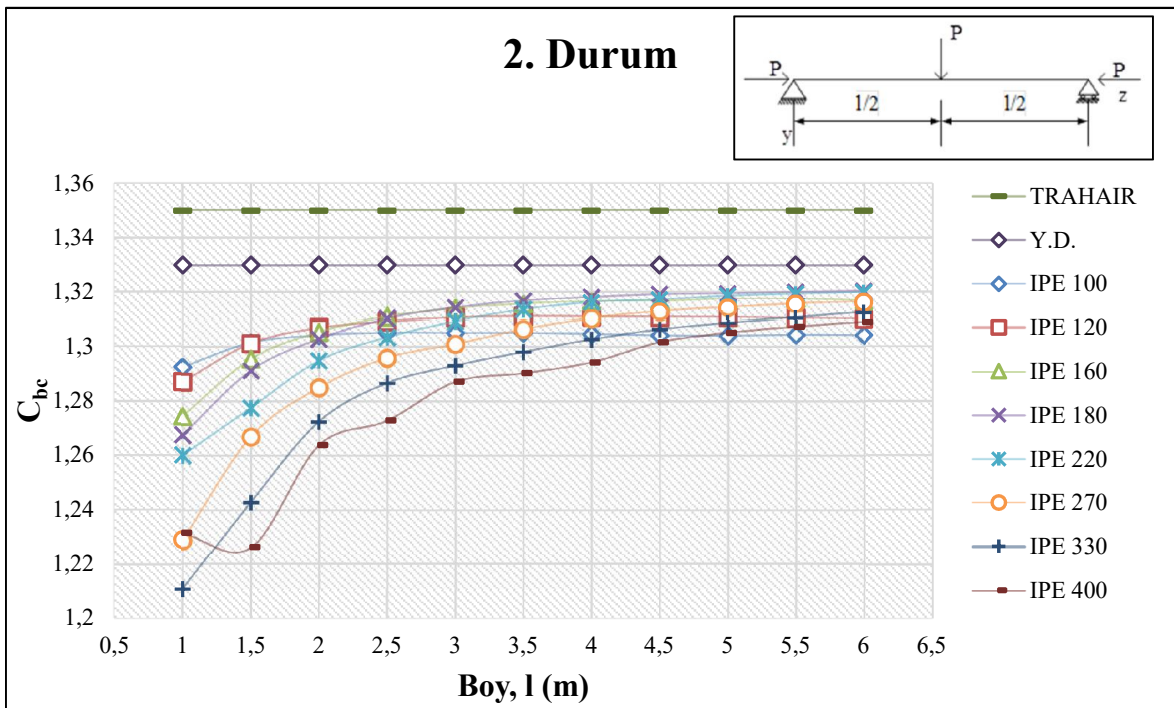
Şekil 5.16' da n , yükleme yapılan düğüm noktası sayısıdır. n değeri ne kadar büyük olursa düzgün yayılı yük o kadar iyi modellenmiş olur. Şekil 5.16' da n sayısı, yükleme yönteminin kolay açıklanabilmesi için az sayıda tutulmuştur fakat analizler yapılırken bu değer yükleme yapılacak hattaki bütün düğümlerin sayısına eşit olarak alınmıştır.

katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan katsayılar yükleme durumlarına göre ayrı ayrı grafiklerde gösterilmiştir.

Grafiklerde yatay eksen kiriş-kolon boylarını metre cinsinden ifade ederken dikey eksen moment dağılım katsayısını göstermektedir. Kesitleri IPE 100, IPE 120, IPE 160, IPE 180, IPE 220, IPE 270, IPE 330 ve IPE 400 olan çelik profillerin 1m'den başlamak üzere 6m'ye kadar 0,5m aralıklarla alınan açıklık boyları için hesaplanan moment katsayıları, grafiklerde her bir yükleme durumu için ayrı ayrı işaretlenmiştir.

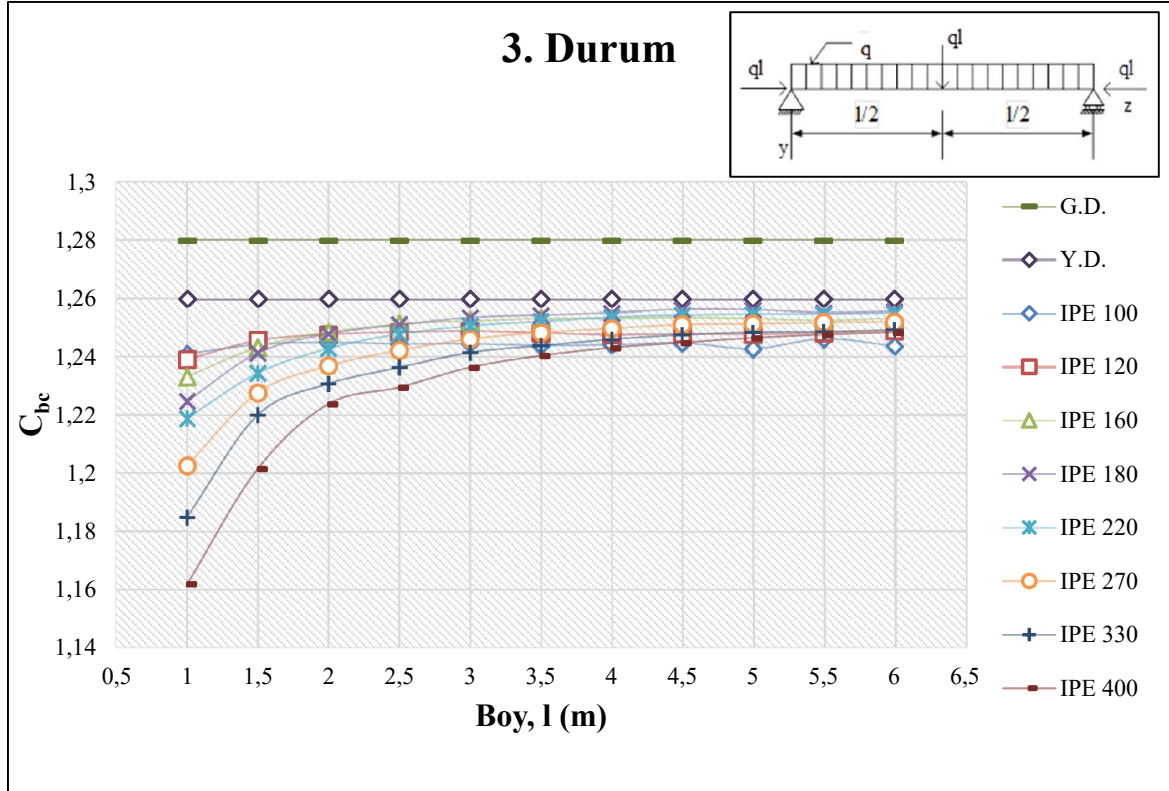
Farklı kesit ve boylardaki profillerin yakınsadığı moment dağılım katsayısı değerleri (Y.D. – Yakınsayan Değer) ve güvenli moment dağılım katsayısı değerleri (G.D. – Güvenli Değer) olarak gösterilmiştir. Birinci ve ikinci yükleme durumları için Trahair'in vermiş olduğu C_{bc} değerleri (Denklem 3.82 ve Denklem 3.84) 'TRAHAIR' isimlendirmesi ile verilmiştir. Burada güvenli moment dağılım katsayısı değerleri (G.D.), birinci ve ikinci yükleme durumlarında "TRAHAIR/(Y.D.)" oranlarının ortalaması kullanılarak hesaplanmıştır.

Bulunan sonuçlar doğrultusunda her bir yükleme durumu için kiriş-kolonların elastik kritik yanal burulmalı burkulma yükü hesabında kullanılacak güvenli moment dağılım katsayıları, C_{bc} , önerilmiştir.

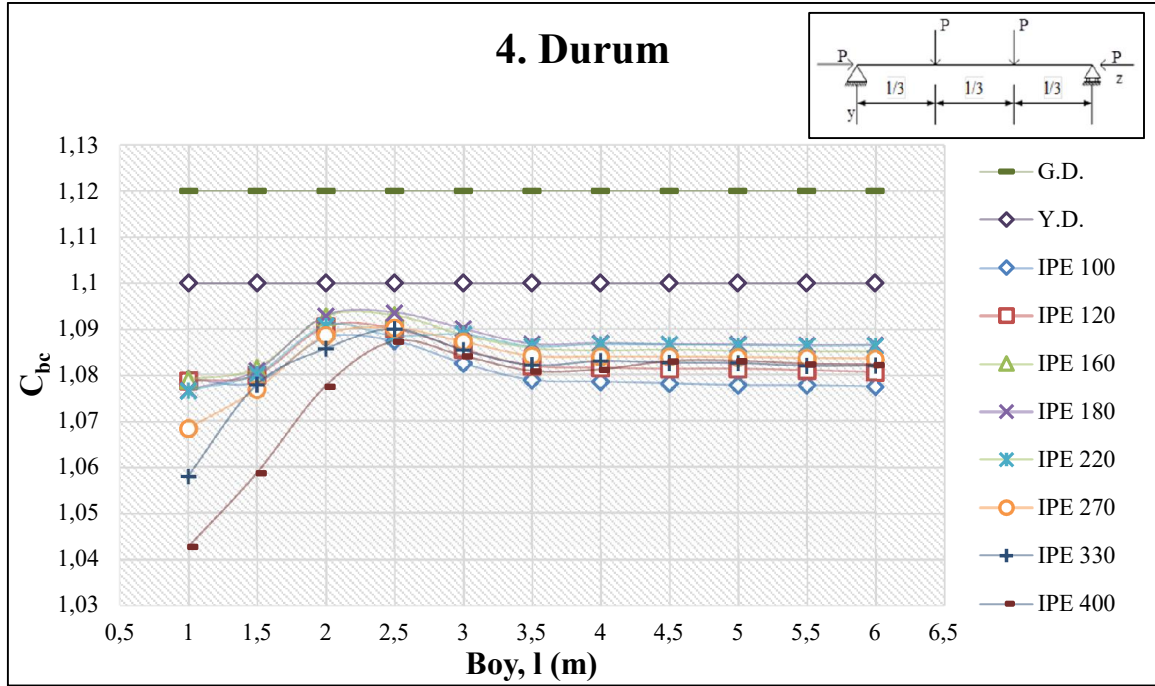
Şekil 5.18 Birinci yükleme durumu için C_{bc} katsayılarıŞekil 5.19 İkinci yükleme durumu için C_{bc} katsayıları

Grafikler incelendiğinde, profillerin aynı açıklık boyları için kesit boyutları küçüldükçe C_{bc} katsayısının arttığı görülmektedir. Profillerin 1m açıklık boyu için, tüm yükleme durumlarında, seçilen kesitlerden en narin kesit olan IPE 100 en büyük moment dağılım katsayısını verirken, IPE 400 ise en düşük değeri vermektedir. Profillerin aynı kesit boyutları için kiriş açıklık boyunun artması da C_{bc} katsayısını artırmakta ve kiriş açıklığı 5m yi geçtikten sonra bu katsayı sabit değerde kalmaktadır. En büyük moment dağılım katsayısı değerini 6m açıklıklı IPE 100 profili vermektedir diğer kesitlerin artan boyları IPE 100 için bulunan moment dağılım katsayısına yaklaşmakta ve analiz edilen bütün kesitlerin artan boyları için moment dağılım katsayısı, sonsuzda teğet olmaktadır.

Elemanların sonsuzda teğet olan moment dağılım katsayısı değerine yakınsayan değer (Y.D.) grafiklerde işaretlenmiştir. Güvenli moment dağılım katsayılarının hesabı 3-8. yükleme durumları için, 1. Durum ve 2. Durum yüklemelerinden hesaplanan 'TRAHAIR/(Y.D.)' ile her bir yükleme durumunda hesaplanan yakınsayan moment dağılım katsayılarının (Y.D.) çarpılması ile hesaplanmıştır.



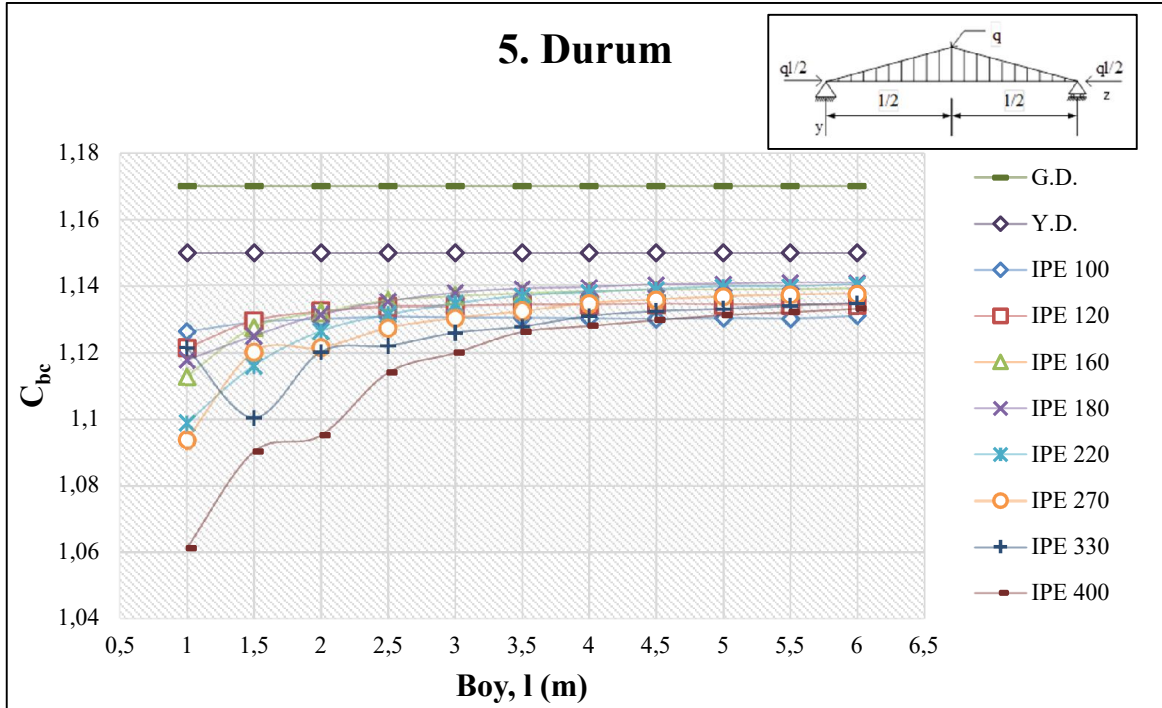
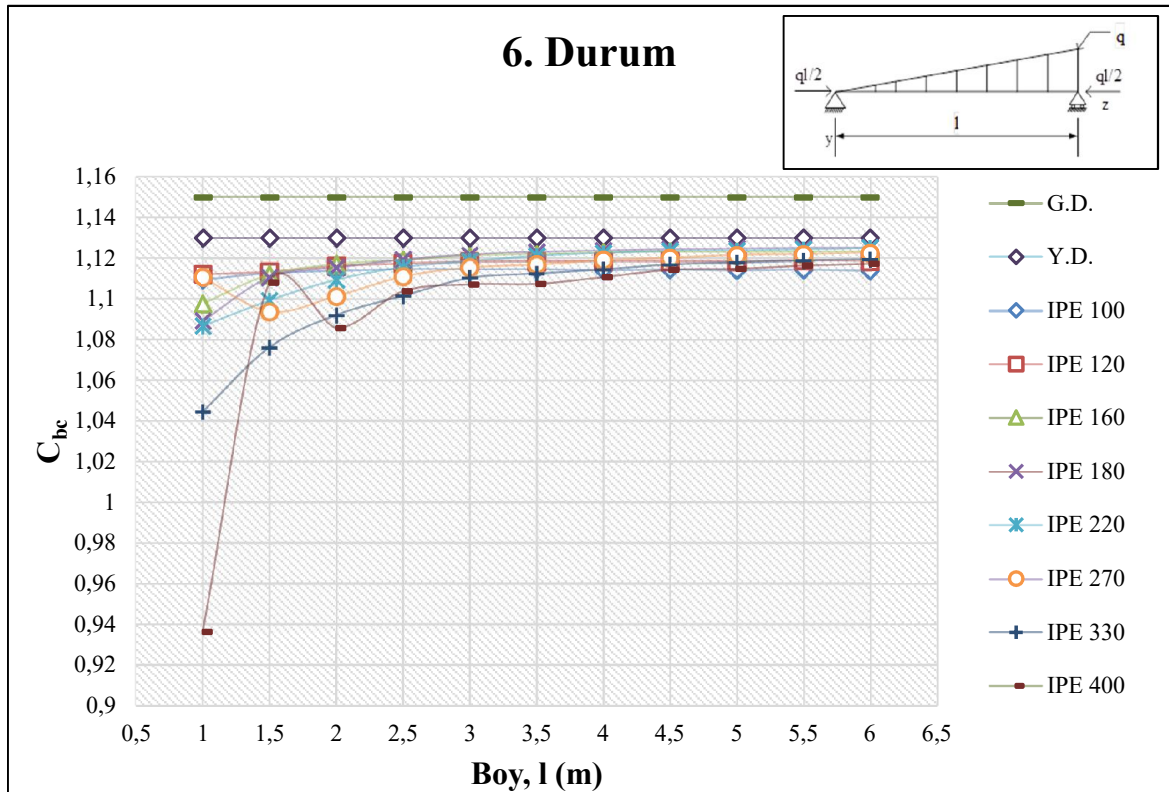
Şekil 5.20 Üçüncü yükleme durumu için C_{bc} katsayıları

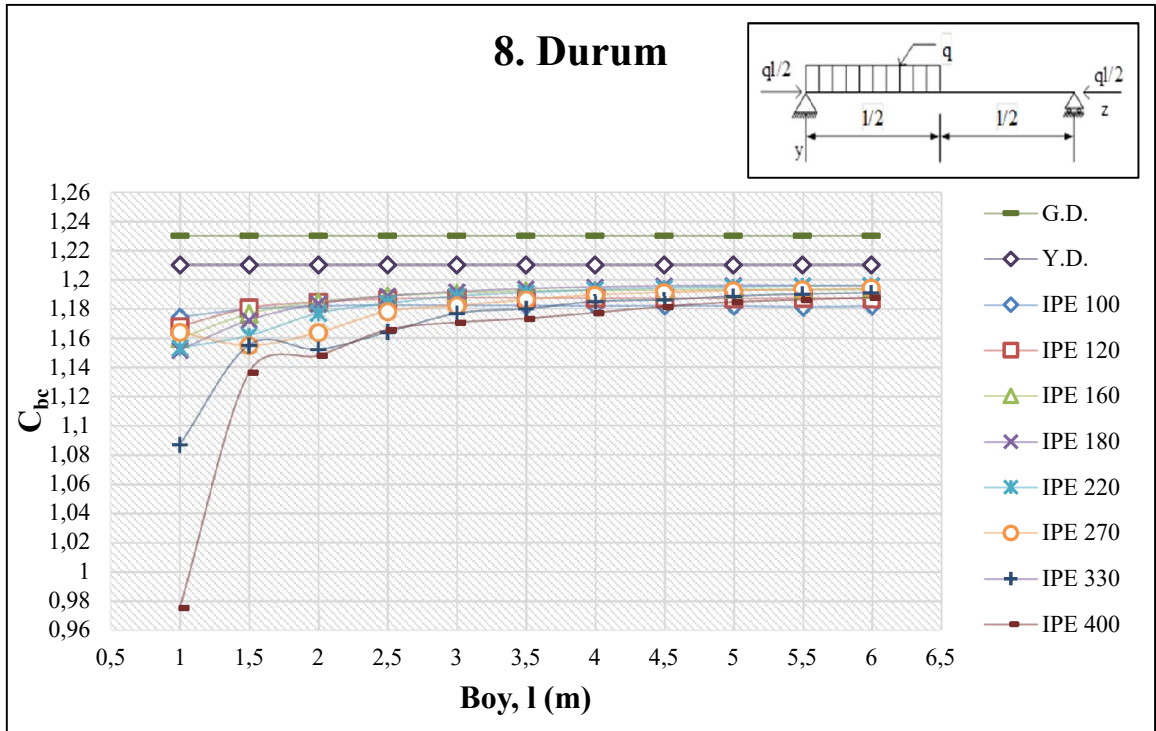
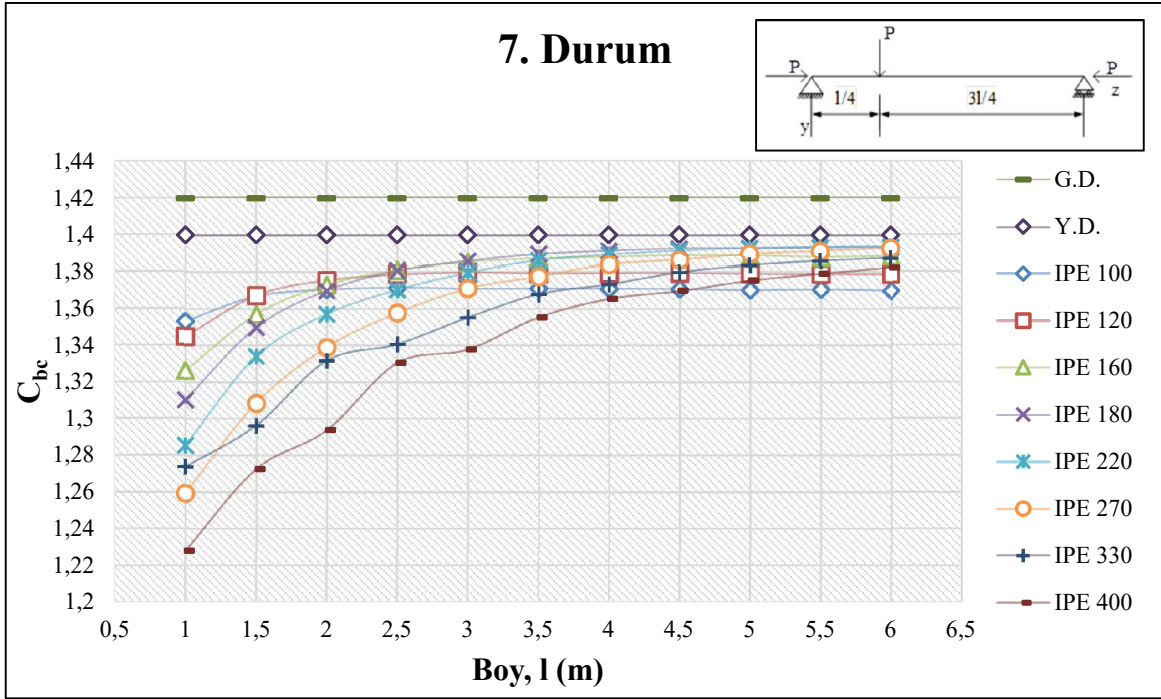


Grafiklerden de görüldüğü gibi elemanın narinleşmesi kullanılacak C_{bc} katsayısının büyümesine dolayısı ile elemanın kritik yanal burulmalı burkulma yükünün küçülmesine yol açmaktadır. IPE 330 ve IPE 400 kesitli profillerin kısa boylarında, 1-2 m, C_{bc} katsayısında dalgalanma görülmektedir. Bu durumun nedeni, çubuk sonlu elemanlar yazılımı olan LTBeamN programının kesit/boy oranının çubuk eleman teorisi sınırları dışında kaldığı için tam anlamıyla yanal burulmalı burkulma yükü için bir özdeğer verememesidir. Bu dalgalanma simetrik yükleme durumlarında daha az belirgin olurken, yüklemenin simetrik olmadığı durumlarda daha belirgindir ve kesit boyutları büyük olan profillerin kısa boylarında anlamsız değerler vermektedir. Kiriş-kolonlar için yükleme durumlarına bağlı olarak elde edilen moment dağılım katsayıları Çizelge 5.5 ile verilmiştir.

Çizelge 5.5 Yükleme durumlarına bağlı kiriş-kolon moment dağılım katsayıları

Yükleme Durumları	(Y.D.)	(G.D.)
1. Durum	1,11	1,13 (TRAHAIR)
2. Durum	1,33	1,35 (TRAHAIR)
3. Durum	1,26	1,28
4. Durum	1,10	1,12
5. Durum	1,15	1,17
6. Durum	1,13	1,15
7. Durum	1,40	1,42
8. Durum	1,21	1,23

Şekil 5.22 Beşinci yükleme durumu için C_{bc} katsayılarıŞekil 5.23 Altıncı yükleme durumu için C_{bc} katsayıları



6. YÖNETMELİKLERDEKİ DÜZENLEMELER

6.1. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Kuralları Yönetmeliğine Göre Eğilme Momenti ve Eksenel Basınç Etkisindeki Çift ve Tek Simetri Eksenli Elemanlar

Geometrik eksenleri (x ve/veya y) etrafında eğilme etkisindeki çift ve tek simetri eksenli elemanlarda eğilme momenti ve eksenel basınç kuvveti etkileşimi Denklem 6.1 ve Denklem 6.2 ile sınırlandırılmıştır.

(a) $\frac{P_r}{P_c} \geq 0,2$ için

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad 6.1$$

(b) $\frac{P_r}{P_c} < 0,2$ için

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad 6.2$$

Burada

P_r : (YDKT) veya (GKT) yük birleşimleri için gerekli eksenel kuvvet dayanımı.

P_c : Mevcut eksenel basınç kuvveti dayanımı (= $\phi_c P_n$ veya P_n/Ω_c).

M_r : (YDKT) veya (GKT) yük birleşimleri için gerekli eğilme momenti dayanımı.

M_c : Mevcut eğilme momenti dayanımı (= $\phi_b M_n$ veya M_n/Ω_b).

x: Kuvvetli eksenini gösteren alt indis.

y: Zayıf eksenini gösteren alt indis.

YDKT için

ϕ_c : Basınç kuvveti etkisi için dayanım katsayısı, (= 0,90).

ϕ_b : Eğilme momenti etkisi için dayanım katsayısı, (= 0,90).

GKT için

Ω_c : Basınç kuvveti etkisi için güvenlik katsayısı, (= 1,67).

Ω_b : Eğilme momenti etkisi için güvenlik katsayısı, (= 1,67).

6.1.1. Çelik yapıların tasarımında temel ilkeler

Çelik yapıların tasarımı için iki ana yöntem mevcuttur. Bunlar taşıma gücü yöntemi (yük ve dayanım katsayıları ile tasarım – YDKT) ve emniyet gerilmeleri (güvenlik katsayıları tasarımı – GKT) yöntemidir. Gerekli dayanımın belirlenebilmesi için tasarım yüklerine uygulanacak yük birleşimleri iki tasarım yöntemine göre farklılıklar göstermektedir. Bu yük birleşiminde yer alan yükler aşağıda tanımlanmıştır.

G: Sabit yük.

Q: Hareketli yük.

Q_r : Çatı hareketli yükü.

S: Kar yükü.

R: Yağmur yükü.

W: Rüzgar yükü.

E: Deprem etkisi.

F: Akışkan madde basınç yükü.

T: Sıcaklık değişmesi, mesnet çökmesi etkileri.

H: Yatay zemin basıncı, zemin suyu basıncı veya yığılı madde basıncı.

6.1.1.1. Yük ve dayanım katsayıları ile tasarım (YDKT)

Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT), tüm yapısal elemanlar için, tasarım dayanımı, ϕR_n nin bu tasarım yöntemi için öngörülen ve YDKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanım, R_u , değerine eşit veya daha büyük olması prensibine dayanmaktadır.

Buna göre tasarım aşağıdaki denkleme uygun olarak gerçekleştirilir.

$$R_u \leq \phi R_n$$

R_u : YDKT yük birleşimi ile belirlenen gerekli dayanım

R_n : Karakteristik dayanım.

ϕ : Dayanım katsayısı.

ϕR_n : Tasarım dayanımı.

Bu tasarım yönteminde gerekli dayanım, R_u , aşağıdaki yük birleşimleri ile belirlenecektir.

- (1) $1,4G$
- (2) $1,2G+1,6Q+0,5(Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R)$
- (3) $1,2G+1,6(Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R)+(Q \text{ veya } 0,8W)$
- (4) $1,2G+1,6W+1,0Q+0,5(Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R)$
- (5) $1,2G+1,0E+1,0Q+0,2S$
- (6) $0,9G+1,6W$
- (7) $0,9G+1,0E$

6.1.1.2. Güvenlik katsayıları ile tasarım (GKT)

Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT), tüm yapısal elemanlar için, güvenli dayanım, R_n/Ω nın tasarım yöntemi için öngörülen ve GKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanım, R_a , değerine eşit veya daha büyük olması prensibine dayanmaktadır.

Buna göre tasarım aşağıdaki denkleme uygun olarak gerçekleştirilir.

$$R_a \leq \frac{R_n}{\Omega} \quad 6.4$$

R_a : GKT yük birleşimi ile belirlenen gerekli dayanım.

R_n : Karakteristik dayanım.

Ω : Güvenlik katsayısı.

R_n/Ω : Güvenli dayanım.

Bu tasarım yönteminde gerekli dayanım, R_a , aşağıdaki yük birleşimleri ile belirlenecektir.

- (1) G
- (2) G+Q
- (3) G+(Q_r veya S veya R)
- (4) G+0,75Q+0,75(Q_r veya S veya R)
- (5a) G+1,0W
- (5b) G+0,7E
- (6a) G+0,75Q+0,75(W)+0,75(Q_r veya S veya R)
- (6b) G+0,75Q+0,75(0,7E)+0,75(Q_r veya S veya R)
- (7) 0,6G+W
- (8) 0,6G+0,7E

6.1.2. Eleman enkesit özellikleri

Eksenel basınç kuvveti etkisindeki enkesitler, yerel burkulma sınır durumu dikkate alındığında narin ve narin olmayan enkesitler olarak ikiye ayrılırlar. Hiçbir enkesit parçasının genişlik (çap)/ kalınlık oranını, λ nın Çizelge 6.1 ile verilen λ_r sınır değerini aşmadığı (narin enkesit parçası bulunmayan) enkesitler narin olmayan enkesit ve en az bir enkesit parçasının genişlik (çap)/ kalınlık oranının λ_r sınır değerini aştığı enkesitler ise narin enkesit olarak sınıflandırılır.

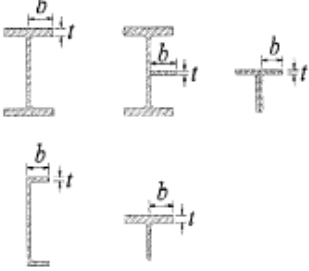
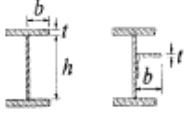
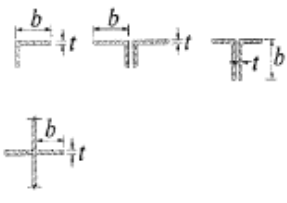

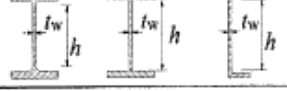




Eğilme momenti etkisindeki enkesitler, yerel burkulma sınır durumu dikkate alındığında, kompakt, kompakt olmayan ve narin enkesitler olarak üçe ayrılırlar. Eğilme momentinin basınç bileşeni etkisindeki hiçbir enkesit parçasının genişlik (çap)/ kalınlık oranı, Çizelge 6.2 ile verilen λ_p sınır değerini aşmayan enkesitler kompakt olarak sınıflandırılırlar. Basınç bileşeninin etkisindeki en az bir enkesit parçasının genişlik (çap)/ kalınlık oranı λ_p sınır değerini aşan; fakat tüm enkesit parçaları için λ_r değeri aşılmayan enkesitler kompakt olmayan enkesitlerdir. Basınç bileşeninin etkisindeki en az bir enkesit parçasının genişlik (çap)/ kalınlık oranı λ_r değerini aşan enkesitler ise narin enkesit olarak tanımlanır.

Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2 de verilen rijitleştirilmemiş ve rijitleştirilmiş enkesit parçaları aşağıda açıklanmıştır.


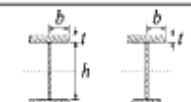
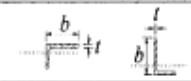



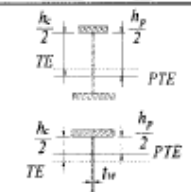
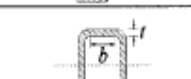


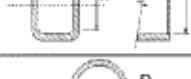
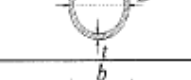
Rijitleştirilmemiş enkesit parçaları: Basınç kuvveti doğrultusuna paralel bir kenarı boyunca enkesitin diğer parçası ile bağlanan, basınç etkisindeki enkesit parçaları rijitleştirilmemiş enkesit parçalarıdır.

Rijitleştirilmiş enkesit parçaları: Basınç kuvveti doğrultusuna paralel iki kenarı boyunca enkesitin diğer parçaları ile bağlanan, basınç etkisindeki enkesit parçaları rijitleştirilmiş enkesit parçalarıdır.

Çizelge 6.1 Eksenel basınç kuvveti etkisindeki enkesit parçaları için genişlik/kalınlık oranları

	Durum	Tanım	Genişlik / Kalınlık Oranı, λ	Genişlik / Kalınlık Oranı Sınır Değeri, λ_r	Enkesit
Rijitleştirilmemiş Enkesit Parçası	1	Hadde I-profillerinin başlıkları, bu profillere bağlanan levhalar, boşluksuz olarak sürekli birleştirilen çift korniyerlerin dış kolları, U- ve T-profillerin başlıkları	b/t	$0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	2	Yapma I-profillerin başlıkları, bu profillere bağlanan levhalar ve korniyerlerin dış kolları	b/t	$0.64 \sqrt{\frac{k_s E}{F_y}}$ ^(a)	
	3	Tek korniyerlerin kolları, birbirlerine boşluklu olarak bağlanan çift korniyerlerin kolları ve tüm rijitleştirilmemiş elemanlar	b/t	$0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	4	T-profillerin gövdeleri	d/t	$0.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Rijitleştirilmiş Enkesit Parçası	5	U-profillerin ve çift simetri eksenli I-profillerin gövdeleri	h/t_w	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	6	Üniform kalınlıklı dikdörtgen ve kare kutu enkesitlerin gövde ve başlıkları	b/t	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	7	Birleşim araçları arasında kalan takviye levhaları ve diyafram levhaları	b/t	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	8	Tüm diğer rijitleştirilmiş enkesit parçaları	b/t	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	9	Boru enkesitli elemanlar	D/t	$0.11 \frac{E}{F_y}$	

Çizelge 6.2 Eğilme momentinin basınç bileşeni etkisindeki kesit parçaları için genişlik/kalınlık oranları

	Durum	Tanım	Genişlik/ Kalınlık Oranı, λ	Genişlik / Kalınlık Oranı Sınır Değerleri		Enkesit
				λ_p (kompakt / kompakt olmayan)	λ_r (kompakt olmayan / narin)	
Rijitleştirilmemiş Enkesit Parçası	10	Hadde I-profiller, U-profiller ve T-enkesitli elemanların başlıkları	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	11	Tek ve çift simetri eksenli yapma I-enkesitli elemanların başlıkları	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.95 \sqrt{\frac{k_c E}{F_c}}$	
	12	Tek korniyerlerin kolları	b/t	$0.54 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.91 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	13	Zayıf eksen etrafında eğilme etkisindeki tüm I-enkesitli elemanlar ve U-profiller	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	14	T-enkesitli elemanların gövdeleri	d/t	$0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.03 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Rijitleştirilmemiş Enkesit Parçası	15	U-profillerin ve çift simetri eksenli I-profillerin gövdeleri	h/t_w	$3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	16	Tek simetri eksenli I-enkesitli elemanların gövdeleri	h_c/t_w	$\frac{k_c \sqrt{E}}{k_c \sqrt{F_y}} \leq \lambda$ $\left(0.54 \frac{M_x}{M_y} - 0.09\right)^{-1} \leq \lambda$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	17	Üniform cidar kalınlıklı kutu enkesitli elemanların başlıkları	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	18	Takviye levhaları ve birleşim araçları arasında kalan diyafram levhaları	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	19	Kutu enkesitli elemanların gövdeleri	h/t	$2.42 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	20	Boru enkesitli elemanlar	D/t	$0.07 \frac{E}{F_y}$	$0.31 \frac{E}{F_y}$	
	21	Yapma kutu enkesitlerin başlıkları	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

6.2. “Eurocode 3: Design of Steel Structures-Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings (EN1993-1-1)” Yönetmeliğine Göre Eğilme ve Eksenel Basınç Etkisindeki Elemanlar

Yapıdaki kusurlar göz önüne alınarak ikinci mertbe analizler yapılmadığı takdirde, iki eksene göre simetrik kesitli, çarpılma deformasyonlarına karşı hassas olmayan üniform elemanların stabilitesi burada verilen kurallara göre kontrol edilmelidir. Yönetmelikte aşağıda verilen elemanlar ayrı olarak incelenmiştir.

- Burulma deformasyonlarına karşı hassas olmayan kesitler, örneğin dairesel boşluklu kesitler veya burulmaya karşı tutulu kesitler.
- Burulma deformasyonlarına karşı hassas olan elemanlar, örneğin açık kesitli elemanlar ve burulmaya karşı tutulu olmayan elemanlar.

Taşıyıcı sistem elemanlarının dayanım kontrolü, sistemden kesilip çıkarılan tek açıklıklı elemanlar üzerinde yapılabilir. Yanal ötelenmesi tutulu olmayan sistemlerin ikinci mertbe etkileri elemanın uç momentleri ile veya uygun burkulma boyları ile hesaba katılmalıdır.

Eğilme ve eksenel basınç kuvvetine maruz elemanlar aşağıdaki denklemleri sağlamalıdır:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad 6.5$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad 6.6$$

Denklem 6.5 ve Denklem 6.6 da kullanılan terimler aşağıda açıklanmıştır.

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ ve $M_{z,Ed}$ sırasıyla, basınç kuvveti ve elemanın y-y ve z-z eksenlerine göre maksimum moment tasarım değerleridir.

$\Delta M_{y,Ed}$, $\Delta M_{z,Ed}$, Sınıf 4 kesitleri için eksenel yer değiştirmeden dolayı meydana gelen momentlerdir (Çizelge 6.3).

χ_y ve χ_z , eğilme burkulmasına bağlı azaltma katsayısıdır.

χ_{LT} , yanal burulma burkulmasından dolayı azaltma katsayısıdır.

k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} etkileşim faktörleridir.

Çizelge 6.3 $N_{Rk} = f_y A_i$, $M_{i,Rk} = f_y W_i$ ve $\Delta M_{i,Ed}$ değerleri

Sınıf	1	2	3	4
A_i	A	A	A	A_{eff}
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
W_z	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{Ny} N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{Nz} N_{Ed}$

Burulma deformasyonlarına karşı hassas olmayan kesitler için $\chi_{LT} = 1,0$ olarak alınmalıdır.

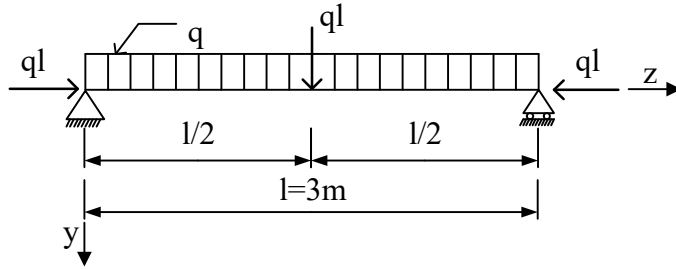
k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} etkileşim faktörleri seçilen metoda göre değişmektedir. Bu faktörlerin hesabı için EC3 yönetmeliği Ek A (alternatif metod 1) ve Ek B (alternatif metod 2)' de iki alternatif yaklaşım sunulmuştur. Kolaylık olması açısından tahkikler sadece elastik aralıktta yapılabilir.

6.3. "ANSI/AISC 360-10: Specification for Structural Steel Buildings" Yönetmeliğine Göre Eğilme ve Eksenel Basınç Etkisindeki Elemanlar

AISC yönetmeliği ile Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım kuralları arasında büyük benzerlik olması nedeni ile AISC 360-10 yönetmeliği ayrıca ağıklanmamıştır.

6.4. Sunulan Moment Dağılım Katsayıları ile Yapılan Tasarım Örneği ve Mevcut Yönetmelikler ile Karşılaştırılması

Yapılan analizler sonucunda bulunan moment dağılım katsayıları kullanılarak Şekil 6.1’de verilen 3 m açıklıklı kiriş-kolon için bir tasarım yapılacaktır. Kiriş-kolon için Çizelge 4.1 ile verilen yükleme durumlarından 3. yükleme durumu seçilmiştir.



Şekil 6.1 Tasarım örneğinde kullanılan kiriş-kolon için yükleme durumu

IPE 100 kesitli olan kiriş-kolonun malzeme özellikleri Çizelge 6.4 ve kesit özellikleri Çizelge 6.5 ile verilmiştir.

Çizelge 6.4 Çelik malzeme özellikleri

E (MPa)	G (MPa)	v	F _y (MPa)
200000	76920	0,3	235

Çizelge 6.5 IPE 100 kesitinin statik özellikleri

I _x (cm ⁴)	i _x (cm)	I _y (cm ⁴)	i _y (cm)	I _t (cm ⁴)	I _w (cm ⁶)	W _{ex} (cm ³)	W _{px} (cm ³)	A (cm ²)
171,0	4,01	15,90	1,22	1,20	351,0	34,20	39,41	10,3

Denklem 3.80 kullanılarak verilen kiriş-kolonun elastik kritik yanal burulmalı burkulma yükü hesaplanacaktır. Denklemdeki C_{bc} moment dağılım katsayısı 3. Yükleme durumu için Şekil 5.20 ile verilen 1,28 olarak alınır.

Kirişte meydana gelecek eğilme momenti,

$$M_m \approx \frac{3qL^2}{8} = \frac{3q(3000)^2}{8} = 3375000q$$

Kiriş etkiyen aksenal basınç kuvvetinin şiddeti ql olduğundan, Denklem 3.80'de $P=ql$ yazılır.

$$P = ql = 3000q$$

P_y ve P_z sırasıyla, elemanın eğilme ve burulma burkulması dayanımlarıdır. Aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabilirler

$$P_y = \frac{\pi^2 EI_y}{l^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 15,9 \times 10^4}{3000^2} = 34872,60 \text{ N}$$

$$r_1^2 = \frac{I_x + I_y}{A} + y_0^2$$

$$y_0 = 0$$

ve y_0 ise kesitin ağırlık merkezi ile kayma merkezi arasındaki mesafedir. y_0 değeri iki eksene göre simetrik kesitlerde sıfıra eşittir.

$$r_1 = \sqrt{\frac{(I_x + I_y)}{A}} = \sqrt{\frac{171 \times 10^4 + 15,9 \times 10^4}{10,3 \times 10^2}} = 42,59$$

$$P_z = \frac{GI_t}{r_1^2} + \frac{\pi^2 EI_w}{l^2 r_1^2} = \frac{76920 \times 1,2 \times 10^4}{42,59^2} + \frac{\pi^2 200000 \times 0,35 \times 10^9}{3000^2 \times 42,59^2}$$

$$= 551187,57 \text{ N}$$

M_{yz} , elemanın üniform eğilme burkulması dayanımı ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$M_{yz} = r_1 \sqrt{P_y P_z} = 42,59 \sqrt{34872,60 \times 551187,57} = 5904722,77 \text{ Nmm}$$

$$\left(\frac{3375000q}{1,28 \times 5904722,77} \right)^2 = \left(1 - \frac{3000q}{34872,60} \right) \left(1 - \frac{3000q}{551187,57} \right)$$

Denklem çözümünden, Şekil 6.1 ile verilen kiriş-kolon için elastik kritik yanal burulmalı burkulma yükü aşağıdaki gibi elde edilir. Buradaki ilk kök, mod1 için burkulma yüküdür.

$$q_1=2,024 \text{ N/mm}$$

$$q_2=-2,484 \text{ N/mm}$$

Verilen elemanın üzerindeki yüklerden dolayı meydana gelecek kesitteki en büyük gerilmeyi karşılayan lifin çelik malzeme akma dayanımını aşıp aşmadığının kontrolü için aşağıdaki adımlar izlenecektir. Kesitteki en büyük gerilmenin basınç başlığında olması beklenir. Bu durumda aşağıda verilen denklemi sağlayan yük değeri kirişi göçmeye ulaştıran kritik yüküdür.

$$\frac{N}{A} + \frac{M}{I_x/y} \leq F_y \quad 6.7$$

$$\frac{ql}{A} + \frac{3ql^2/8}{I_x/(\frac{h}{2})} \leq 235$$

$$\frac{3000q}{1030} + \frac{3375000q}{171 \times 10^4 / (\frac{100}{2})} \leq 235$$

Denklem çözümünden $q=2,31 \text{ N/mm}$ bulunur. O halde tasarım için kullanılacak kritik yük bulunan yüklerden en küçüğü yani $q=2,024 \text{ N/mm}$ olarak seçilir.

Yapılan tasarımın, mevcut Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Kuralları yönetmeliğine göre kontrol edilmesi için Denklem 6.1 ve Denklem 6.2 kullanılacaktır.

$$(a) \frac{P_r}{P_c} \geq 0,2 \text{ için}$$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0$$

(b) $\frac{P_r}{P_c} < 0,2$ için

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0$$

Bu denklemde verilen P_r değeri, yük ve dayanım katsayıları ile tasarım (YDKT) veya güvenlik katsayıları tasarımı (GKT) yük birleşimleri için gerekli olan aksenal kuvvet dayanımıdır ve bu çalışmada (YDKT) için aşağıdaki gibi hesaplanacaktır.

$$P_r = 1,4 \times ql = 1,4 \times 3000q = 4200q \text{ (YDKT)}$$

6.8

$$P_r = ql = 3000q \text{ (GKT)}$$

P_c , mevcut aksenal basınç kuvveti dayanımı ($= \phi_c P_n$ veya P_n/Ω_c).

P_n , karakteristik aksenal basınç kuvveti dayanımıdır. Aksenal basınç etkisindeki elemanın enkesit asal eksenlerinden herhangi biri etrafında eğilmeli burulma, burulmalı burkulma ve/veya eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumlarına göre hesaplanacak dayanımların en küçüğü olarak alınacaktır.

Kesit narinlikleri başlık ve gövde elemanlar için ayrı ayrı aşağıdaki gibi belirlenir. Başlıkta (Rijitleştirilmemiş enkesit elemanları) Çizelge 6.1 kullanılarak,

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{55/2}{5,7} = 4,83$$

$$\lambda_r = 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,56 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 16,34$$

$$\lambda = 4,83 < \lambda_r = 16,34$$

Alt ve üst başlıklar narin değildir.

Gövdede (Rijitleştirilmiş enkesit parçaları) Çizelge 6.1 kullanılarak,

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{100 - 2 \times (5,7 + 5)}{4,1} = 19,17$$

$$\lambda_r = 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,49 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 43,47$$

$$\lambda = 19,17 < \lambda_r = 43,47$$

Gövde narin değildir. Eleman enkesiti narin olan eleman içermediği için kesit narin olmayan enkesit sınıfına dahildir. Eksenel basınç kuvveti altındaki narin olmayan enkesitli elemanların karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı P_n , aşağıdaki denklem ile hesaplanacaktır.

$$P_n = F_{cr} A_g \quad 6.9$$

Bu denklemde

F_{cr} : Kritik burkulma gerilmesidir.

A_g : Kayıpsız enkesit alanıdır.

Kritik burkulma gerilmesi, F_{cr} , aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

$$\frac{L_c}{i} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

veya

$$\frac{F_y}{F_e} \leq 2,25$$

için,

$$F_{cr} = [0,658 \frac{F_y}{F_e}] F_y \quad 6.10$$

$$\frac{L_c}{i} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

veya

$$\frac{F_y}{F_e} > 2,25$$

için,

$$F_{cr} = 0,877F_e \quad 6.11$$

Buradaki terimler:

F_e : Elastik burkulma gerilmesi.

F_y : Karakteristik akma gerilmesi.

F_{cr} : Kritik burkulma gerilmesi.

F_e , elastik burkulma gerilmesinin hesabı eğilmeli burkulma sınır durumu ve burulmalı ve eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumları için ayrı ayrı hesaplanacak ve bunlardan küçük olanı hesaplarda kullanılacaktır.

Eğilmeli burkulma sınır durumu:

Eğilmeli burkulma sınır durumu, enkesit özelliklerinden bağımsız olarak, tüm basınç elemanlarında dikkate alınacaktır. Buna göre basınç kuvveti etkisindeki elemanların eğilmeli burkulma sınır durumu için elastik burkulma gerilmesi, F_e ,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{i}\right)^2} = \frac{\pi^2 200000}{\left(\frac{3000}{12,2}\right)^2} = 32,644 \text{ MPa} \quad 6.12$$

Burulmalı ve eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumu:

Burulmaya karşı desteklenmeyen uzunluğu, yanal ötelenmeye karşı desteklenmeyen uzunluğunu aşan enkesitli çift simetri eksenli tüm basınç elemanlarının tasarımında kullanılacak elastik burkulma gerilmesi, F_e ,

$$F_e = \left[\frac{\pi^2 E I_w}{(L_{cz})^2} + G I_t \right] \frac{1}{I_x + I_y} \quad 6.13$$

Buradaki terimler:

I_w : Çarpılma atalet momenti, çift simetri eksenli I kesitlerde h_0 , başlıkların ağırlık merkezleri arasındaki uzaklık olmak üzere Denklem 6.14 ile hesaplanabilir.

$$I_w = \frac{I_y h_0^2}{4} \quad 6.14$$

I_x, I_y : İlgili asal eksen etrafındaki atalet momenti.

I_t : Burulma atalet momenti.

L_{cz} : z-ekseni (boyuna eksen) etrafında burkulma durumunda burkulma boyu.

$$L_{cz} = K_z L_z \quad 6.15$$

K_z : Burulmalı burkulma durumunda burkulma boyu katsayısı. Güvenli tarafta kalan bir yaklaşımla $K_z=1,0$ alınabilir. O halde terimler aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$L_{cz} = K_z L_z = 3000 \times 1 = 3000 \text{ mm}$$

$$I_w = \frac{I_y h_0^2}{4} = \frac{15,9 \times 10^4 (100 - 2 \times 2,85)^2}{4} = 3,535 \times 10^8 \text{ mm}^6$$

$$F_e = \left[\frac{\pi^2 200000 \times 3,535 \times 10^8}{(3000)^2} + 76920 \times 1,2 \times 10^4 \right] \frac{1}{171 \times 10^4 + 15,9 \times 10^4}$$

$$= 523,62 \text{ MPa}$$

F_e için eğilme burkulmasından bulunan 32,664 MPa ve burulma ve eğilmeli burulma burkulmasından bulunan 523,62 MPa değerlerinden küçük olanı, yani 32,644 MPa değeri seçilecektir.

Taşıma gücü hesabı,

$$\frac{L_c}{i} = \frac{3000}{12,2} = 245,9 > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4,71 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 137,11$$

veya

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{235}{32,644} = 7,19 > 2,25$$

için,

$$F_{cr} = 0,877F_e = 0,877 \times 32,644 = 28,63 \text{ MPa}$$

Bu durumda karakteristik aksenal kuvvet dayanımı aşağıdaki gibi olacaktır.

$$P_n = F_{cr}A_g = 28,63 \times 10,3 \times 10^2 = 29488,9 \text{ N}$$

Mevcut aksenal basınç kuvveti dayanımı,

$$P_c = \phi_c P_n = 0,9 \times 29488,9 = 26540 \text{ N} = 26,54 \text{ kN (YDKT)}$$

$$P_c = \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{29488,9}{1,67} = 17658 \text{ N} = 17,66 \text{ kN (GKT)}$$

Denklem 6.1 ve Denklem 6.2 de verilen M_r , (YDKT) veya (GKT) yük birleşimleri için gerekli eğilme momenti dayanımıdır.

$$M_r = 1,4 \times \frac{3ql^2}{8} = 1,4 \times \frac{3q3^2}{8} = 4,725q \text{ (YDKT)}$$

6.16

$$M_r = ql = 3q \text{ (GKT)}$$

M_c , mevcut eğilme momenti dayanımı ($= \phi_b M_n$ veya M_n/Ω_b). M_n , karakteristik aksenal basınç kuvveti dayanımıdır ve akma sınır durumu ve yanal burulmalı burkulma sınır durumu için bulunan aksenal basınç kuvveti dayanımlarından küçük olanı seçilecektir.

Kesit narinlikleri başlık ve gövde elemanlar için ayrı ayrı aşağıdaki gibi belirlenir. Başlıkta (rijitleştirilmemiş enkesit elemanları) Çizelge 5.1 kullanılarak,

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{55/2}{5,7} = 4,83$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 11,09$$

$$\lambda_r = 1,0 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,0 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 29,17$$

$$\lambda = 4,83 < \lambda_p = 11,09$$

Başlıklar kompakttır.

Gövdede (Rijitleştirilmiş enkesit parçaları) Çizelge 6.1 kullanılarak,

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{100 - 2 \times (5,7 + 5)}{4,1} = 19,17$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 109,7$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 5,70 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 166,3$$

$$\lambda = 19,17 < \lambda_p = 109,7$$

Gövde elemanı kompakttır. Kesit elemanları kompakt eleman olduğu için kesit kompakt enkesittir.

Kuvvetli eksenleri etrafında eğilme etkisindeki kompakt, çift simetri eksenli I enkesitli elemanlar için taşıma gücü hesabı akma sınır durumu ve yanal burulmalı burkulma sınır durumu için yapılacaktır.

Akma sınır durumu:

Akma hali için karakteristik eğilme momenti M_n ,

$$M_n = M_p = F_y W_{px} \quad 6.17$$

Buradaki terimler:

M_n : Karakteristik eğilme momenti dayanımı

M_p : Plastik eğilme momenti

F_y : Karakteristik akma gerilmesi

W_{px} : x-ekseni etrafında plastik mukavemet momenti

$$M_n = M_p = 235 \times 39,41 \times 10^3 = 9261350 \text{ Nmm} = 9,26 \text{ kNm}$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumu:

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda, yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki uzunluk boyunca, eğilme momenti yayılışının olumlu katkısı, aşağıdaki denklem ile tanımlanan moment düzeltme katsayısı C_b ile hesaba katılabilir.

$$C_b = \frac{12,5M_{maks}}{2,5M_{maks} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad 6.18$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

M_{maks} : Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğu boyunca en büyük eğilme momentinin mutlak değeri.

M_A : Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğunun $\frac{1}{4}$ noktasındaki mutlak değeri.

M_B : Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğunun $\frac{1}{2}$ noktasındaki mutlak değeri.

M_C : Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğunun $\frac{3}{4}$ noktasındaki mutlak değeri.

$$M_{maks} = M_B = \frac{3ql^2}{8} = 3,375q$$

$$M_A = M_C = 1,969q$$

$$C_b = \frac{12,5 \times 3,375}{2,5 \times 3,375 + 3 \times 1,969 + 4 \times 3,375 + 3 \times 1,969} = 1,25$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumu için karakteristik eğilme momenti dayanımı,

(a) $L_b \leq L_p$ ise bu sınır durumunun göz önüne alınmasına gerek yoktur.

(b) $L_p < L_b \leq L_r$ olması durumunda M_n ,

$$M_n = C_b [M_p - (M_p - 0,7 \times F_y W_{ex}) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right)] \leq M_p \quad 6.19$$

(c) $L_b > L_r$ olması durumunda M_n ,

$$M_n = F_{cr} W_{ex} \leq M_p$$

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{l_{ts}} \right)^2} \quad 6.20$$

F_{cr} : Kritik gerilmedir.

L_p ve L_r sınır uzunluklarının hesabı sırasıyla,

$$L_p = 1,76i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,76 \times 12,2 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 626,4 \quad 6.21$$

$$L_r = 1,95i_{ts} \frac{E}{0,7F_y} \sqrt{\frac{I_t c}{W_{ex} h_0} + \sqrt{\left(\frac{I_t c}{W_{ex} h_0}\right)^2 + 6,76\left(\frac{0,7F_y}{E}\right)^2}} \quad 6.22$$

Buradaki c katsayısı çift simetri eksenli I enkesitlerde $c=1,0$ alınacaktır. Etkin atalet yarıçapı i_{ts} , ise

$$(i_{ts})^2 = \frac{\sqrt{I_y I_w}}{W_{ex}} = \frac{\sqrt{15,9 \times 10^4 \times 0,35 \times 10^9}}{34,2 \times 10^3} = 218,13 \quad 6.23$$

$$i_{ts} = 14,77 \text{ mm}$$

$$L_r = 1,95 \times 14,77 \frac{200000}{0,7 \times 235} \sqrt{\frac{1,2 \times 10^4 \times 1,0}{34,2 \times 10^3 \times 94,3} + \sqrt{\left(\frac{1,2 \times 10^4 \times 1,0}{34,2 \times 10^3 \times 94,3}\right)^2 + 6,76\left(\frac{0,7 \times 235}{200000}\right)^2} = 3134,5$$

$$L_b = 3000$$

$L_p < L_b \leq L_r$ olduğundan,

$$M_n = 1,25[9,26 - (9,26 - 0,7 \times 235 \times 34,2 \times 10^{-3}) \left(\frac{3 - 0,626}{3,135 - 0,626}\right)] \leq 9,26$$

$$M_n = 7,28 \text{ kNm} \leq M_p = 9,26 \text{ kNm}$$

Karakteristik eğilme dayanımı, M_n , için akma sınır durumundan hesaplanan 9,26kNm ve yanal burulmalı burkulma sınır durumundan hesaplanan 7,28 kNm değerlerinden küçük olanı, yani 7,28 kNm seçilir.

O halde mevcut eğilme dayanımı,

$$M_c = \phi_b M_n = 0,9 \times 7,28 = 6,55 \text{ kNm}$$

$$M_c = \frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{7,28}{1,67} = 4,36 \text{ kNm}$$

Buradaki terimler:

M_n : Karakteristik eğilme momenti dayanımı

M_p : Plastik eğilme momenti

F_y : Karakteristik akma gerilmesi

W_{ex} : x-ekseni etrafında elastik mukavemet momenti

C_b : Tanımlanan moment düzeltme katsayısı

L_b : Basınç başlığında yanal yer değiştirmenin ve enkesit burulmasının önleendiği noktalar arasındaki eleman uzunluğu.

L_p : Akma sınır durumu için yanal olarak desteklenmeyen sınır uzunluk.

L_r : Elastik olmayan yanal burulmalı burkulmada sınır uzunluk.

Denklem 6.1 ve Denklem 6.2 ye göre, eğilme ve eksenel basınç kuvveti altındaki elemanların kritik burkulma yükü, $\frac{P_r}{P_c} \geq 0,2$ ve $\frac{P_r}{P_c} < 0,2$ için (YDKT) ve (GKT) tasarım kurallarına göre ayrı ayrı hesaplanacaktır. y-ekseni etrafında eğilme momenti olmadığından y-eksenine göre gerekli eksenel kuvvet dayanımı ve mevcut eksenel kuvvet dayanımı değerleri sıfır alınmıştır.

(YDKT) için:

$$\frac{P_r}{P_c} \geq 0,2 \text{ için}$$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0$$

$$\frac{4,2q}{26,54} + \frac{8}{9} \left(\frac{4,725q}{6,55} \right) \leq 1,0$$

$$q = 1,25 \text{ kN/m}$$

$$\frac{P_r}{P_c} < 0,2 \text{ için}$$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0$$

$$\frac{4,2q}{2 \times 26,54} + \left(\frac{4,725q}{6,55} \right) \leq 1,0$$

$$q = 1,19 \text{ kN/m}$$

(YDKT) için hesaplanan tasarım yüklerinden küçük olanı, yani $q=1,19 \text{ kN/m}$ eğilme ve aksenal basınç etkisindeki Şekil 6.1 ile verilen eleman için tasarım yükü olarak seçilir.

(GKT) için:

$$\frac{P_r}{P_c} \geq 0,2 \text{ için}$$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0$$

$$\frac{3q}{17,66} + \frac{8}{9} \left(\frac{3,375q}{4,36} \right) \leq 1,0$$

$$q = 1,17 \text{ kN/m}$$

$$\frac{P_r}{P_c} < 0,2 \text{ için}$$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0$$

$$\frac{3q}{2 \times 17,66} + \left(\frac{3,375q}{4,36}\right) \leq 1,0$$

$$q = 1,16 \text{ kN/m}$$

(GKT) için hesaplanan tasarım yüklerinden küçük olanı, yani $q=1,16 \text{ kN/m}$ eğilme ve aksenal basınç etkisindeki Şekil 6.1 ile verilen eleman için tasarım yükü olarak seçilir.

Bölüm 5.2’de sunulan moment dağılım katsayıları kullanılarak Çizelge 5.5 ile verilen yükleme durumlarından 3. Durum için IPE 100 kesitli 3m boyundaki kiriş-kolonun, Denklem 3.80 parametrik denklemi ile hesaplanarak yapılan tasarım örneği sunulmuştur. Tasarımda kullanılabilen yük $q=2,02 \text{ kN/m}$ olarak hesaplanmıştır. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Kuralları yönetmeliği kullanılarak aynı kiriş-kolon için hesaplanan tasarım yükü $q=1,16 \text{ kN/m}$ (bulunan en küçük değer) olarak bulunmuştur. Sonuçlar karşılaştırıldığında mevcut çelik yapılar yönetmeliğinin eğilme momenti ve aksenal basınç kuvveti etkisindeki elemanların tasarım yükü hesabında oldukça güvenli tarafta kaldığı görülmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Eğilme momenti ve eksenel basınç kuvveti etkisindeki çelik yapı elemanları, çoğu zaman eğilme kapasitelerine ulaşmadan yatayda yer değiştirme ve dönme yaparak burkulurlar. Bir stabilite problemi olan yanal burulmalı burkulma davranışı tasarımda göz önünde bulundurulması gereken önemli durumlardan birisidir. Bu çalışmada, eğilme momenti ve eksenel basınç kuvveti etkisindeki çelik yapı elemanlarının yanal burulmalı burkulma yükünün hesabında kullanılan moment dağılım katsayıları bazı temel yükleme halleri için çeşitlendirilmiştir.

Literatürde kiriş-kolonların eleman boyunca düzgün yayılı yük ve eleman ortasında tekil yük ile beraber eksenel yük durumları için verilen moment dağılım katsayıları incelenmiştir. Bu katsayılar çubuk sonlu elemanlar yazılımı olan LTBeamN ve üç boyutlu sonlu elemanlar programı olan ABAQUS ile karşılaştırılarak verilen katsayıların güvenli tarafta kaldığı doğrulanmıştır. Yapılan analizler ile tekil yük, düzgün yayılı yük ve üçgen yayılı yük kombinasyonları içeren 6 genel yükleme durumu için eğilme momenti ve eksenel basınç kuvveti etkisindeki elemanların yanal burulmalı burkulma yükü moment katsayıları Bölüm 5.4'de grafikler ile verilmiştir. Katsayıların yakınsadığı değer ve güvenli tarafta kalınması için alınması gereken değerler ayrıca sunulmuştur.

Grafiklerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 1) Elemanın sabit kiriş açıklığı için, kesit boyutları küçüldükçe, moment dağılım katsayısı, C_{bc} , artmaktadır.
- 2) Elemanın sabit kesit boyutları için, kiriş açıklığı arttıkça moment dağılım katsayısı, C_{bc} , artmakta ve bu değer 4,5-5 m'den sonra sabit kalmaktadır.
- 3) Moment dağılım katsayısı, en büyük değerine, her yükleme durumu için IPE 100 kesitinin 6 m boyunda ulaşmaktadır.
- 4) Analiz edilen bütün kesitlerin artan boyları için moment dağılım katsayısı, sonsuzda teğet olmaktadır.

- 5) Kesit boyutlarının büyümesi ve kiriş açıklığının kısılması çubuk sonlu elemanlar programı ile yapılan hesaplamaların çubuk kabulü dışında kalması sebebi ile anlamsız sonuçlar vermektedir.
- 6) Simetrik yükleme durumları için elde edilen moment dağılım katsayıları grafikleri, simetrik olmayan yükleme durumlarına göre daha düzgün dağılım göstermiştir.
- 7) Hesaplanan moment dağılım katsayıları 1,12 ile 1,42 arasında değişmektedir. En büyük moment dağılım katsayısı değerinin, kiriş açıklığının $\frac{1}{4}$ mesafesinde tekil yük bulunan 7. Durum için olduğu görülmüştür.
- 8) En küçük moment dağılım katsayısı değeri, 1,12 ise kiriş açıklığının $\frac{1}{3}$ ve $\frac{2}{3}$ mesafelerinde tekil yük olan 4. Durum için hesaplanmıştır.

Çalışmanın sonunda, aksenal basınç kuvveti ile eleman açıklığı boyunca düzgün yayılı yük ve açıklık orta noktasında tekil yük bulunan bir çelik eleman için, Bölüm 5.4'de sunulan güvenlik katsayıları kullanılarak bir tasarım örneği verilmiştir (Bölüm 6.4). Sunulan tasarım örneği Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım kuralları yönetmeliğindeki tasarım esasları ile karşılaştırıldığında, mevcut çelik yapılar yönetmeliğinin eğilme momenti ve aksenal basınç kuvveti etkisindeki elemanların tasarım yükü hesabında oldukça güvenli tarafta kaldığı görülmüştür.

Bir sonraki aşama olarak, sunulan moment katsayıları için yüklerin değişen konumlarına bağlı grafikler sunulması planlanmaktadır. Böylelikle bir adet tekil yükün kirişin farklı noktalarında bulunması hali için moment dağılım katsayısı sunulabilecek, benzer işlemler düzgün yayılı yük gibi diğer yükleme durumlarında da uygulanabilecektir. Ayrıca, yapılan nümerik çalışmalar, laboratuvarında hazırlanan deney düzeneğinde test edilecek olan deney numuneleri ile de karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar sunulacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abdel-Sayet, G., Aglan, A. A., 1973, Inelastic lateral torsional buckling of beam columns, IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen, 33 (1973), p. 17
doi:<http://dx.doi.org/10.5169/seals-25628>
- Adams, P. F., Fukumoto, Y., Galambos, T. V., 1966, Further Studies on the Lateral-Torsional Buckling of Steel Beam-Columns, Fritz Engineering Laboratory, Leigh University, Report No: 205A.36, p. 53.
- American Institute of Steel Construction (A. I. S. C.), 2010, Specification for Structural Steel Buildings, p. 552.
- Aydın, M. R., 2009, Analysis of equal leg single-angle section beams subjected to biaxial bending and constant axial compressive force, Journal of Constructional Steel Research, 65(2), p. 335-341, doi:10.1016/j.jcsr.2008.04.009
- Aydın, R., Dogan, M., Gunaydin, A., Gokdemir, H., Kirac, N., 2011, Experimental and code based study of beam–column behaviour of equal leg single-angles, Journal of Constructional Steel Research, 67(5), p. 780-789, doi:10.1016/j.jcsr.2010.12.016
- Aydın, R., Doğan, M. 2007, Elastic, full plastic and lateral torsional buckling analysis of steel single-angle section beams subjected to biaxial bending, Journal of Constructional Steel Research, 63(1), p. 13-23, doi:10.1016/j.jcsr.2006.03.012
- Aydın, R., Günaydın, A., Kırac, N., Özbaşaran, H., 2013, On the Evaluation of Critical Lateral Buckling Loads of Prismatic Steel Beams, Civil-Comp Press, p. 21.
- Aydın, R., Özbaşaran, H., Kırac, N., Günaydın, A., 2013, Lateral Torsional Buckling of Double Angle and Tee Cantilevers: A Parametric Study, Civil-Comp Press, p. 21.
- Bradford, M. A., Trahair, N. S., 1986, Inelastic Buckling Tests on Beam-Columns, Journal of Structural Engineering-Asce, 112(3), p. 538-549.
- Chajes, A., 1974, Principles of Structural Stability Theory, Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, p. 336.
- Chen, W. F., Lui E. M., 1987, Structural Stability Theory and Implementation, Elsevier Science Publishing Co.,Inc., New York, p. 490.
- Cuk, P. E., Bradford, M. A., Trahair, N. S., 1986, Inelastic Lateral Buckling of Steel Beam Columns. Canadian Journal of Civil Engineering, 13(6), p. 693-699.
- Cuk, P. E., Rogers, D. F., Trahair, N. S., 1986, Inelastic Buckling of Continuous Steel Beam-Columns, Journal of Constructional Steel Research, 6(1), p. 21-52, doi:Doi 10.1016/0143-974x(86)90019-2

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları, 2016, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, s. 244.
- Eurocode 3: Design of Steel Structures- Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, 2003, Brussels, European Committee for Standardisation, p. 90.
- İnan, M., 1981, Cisimlerin Mukavemeti, Birsen Yayınevi, İstanbul, s. 560.
- Keyder, E., Wasti, S. T., 2010, Çelik Yapı Elemanları: Analiz ve Tasarım, 1. Baskı, Ankara, s. 368.
- Kucukler, M., Gardner, L., & Macorini, L., 2015, Flexural–torsional buckling assessment of steel beam–columns through a stiffness reduction method, *Engineering Structures*, 101, p. 662-676, doi:10.1016/j.engstruct.2015.07.041
- Magnucka-Blandzi, E., 2009, Critical state of a thin-walled beam under combined load *Applied Mathematical Modelling*, 33(7), p. 3093-3098, doi:10.1016/j.apm.2008.10.014
- Mohri, F., Bouzerira, C., & Potier-Ferry, M., 2008, Lateral buckling of thin-walled beam-column elements under combined axial and bending loads, *Thin-Walled Structures*, 46(3), p. 290-302, doi:10.1016/j.tws.2007.07.017
- Mohri, F., Damil, N., Potier-Ferry, M., 2013, Buckling and lateral buckling interaction in thin-walled beam-column elements with mono-symmetric cross sections, *Applied Mathematical Modelling*, 37(5), p. 3526-3540, doi:10.1016/j.apm.2012.07.053
- Nguyen, T. T., Chan, T. M., Mottram, J. T., 2014, Lateral-torsional buckling resistance by testing for pultruded FRP beams under different loading and displacement boundary conditions, *Composites Part B: Engineering*, 60, p. 306-318, doi:10.1016/j.compositesb.2013.12.025
- Ozbasaran, H., 2013 a, Çelik I Kesitli Konsol Kirişlerin Yanal Burulmalı Burkulmasının Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, s. 164.
- Ozbasaran, H., 2013 b, Finite Differences Approach For Calculating Elastic Lateral Torsional Buckling Moment of Cantilever I Sections, *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi A-Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, 14(2), s. 143-152.
- Ozbasaran, H., 2014, A Parametric Study on Lateral Torsional Buckling of European IPN and IPE Cantilevers, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 8(7), p. 6.

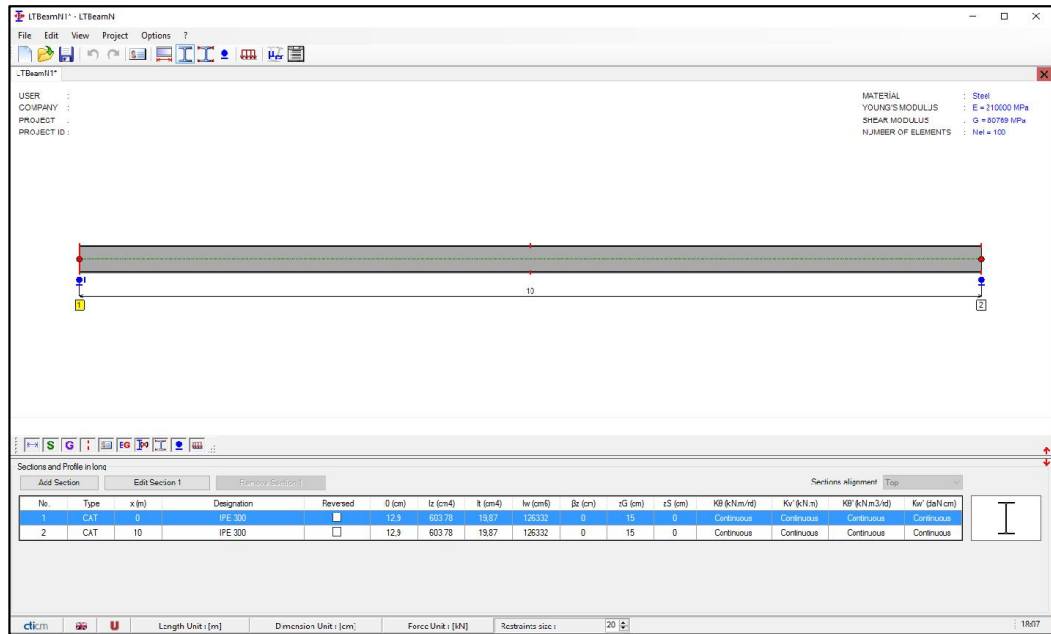
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ozbasaran, H., Aydin, R., Dogan, M., 2015, An alternative design procedure for lateral–torsional buckling of cantilever I-beams, *Thin-Walled Structures*, 90, p. 235-242, doi:10.1016/j.tws.2015.01.021
- Timoshenko, S., 1961, *Theory of elastic stability*, 2d ed., McGraw-Hill, New York, p. 541.
- Trahair, N. S., 1993, *Flexural- Torsional Buckling of Structures*, 1st ed, CRC Press, London, p. 360.
- Vensko, M. J., 2008, *Lateral-Torsional Buckling of Structures With Monosymmetric Cross-Sections*, Master of Science Masters, University of Pittsburgh, p. 175.

EK AÇIKLAMALAR

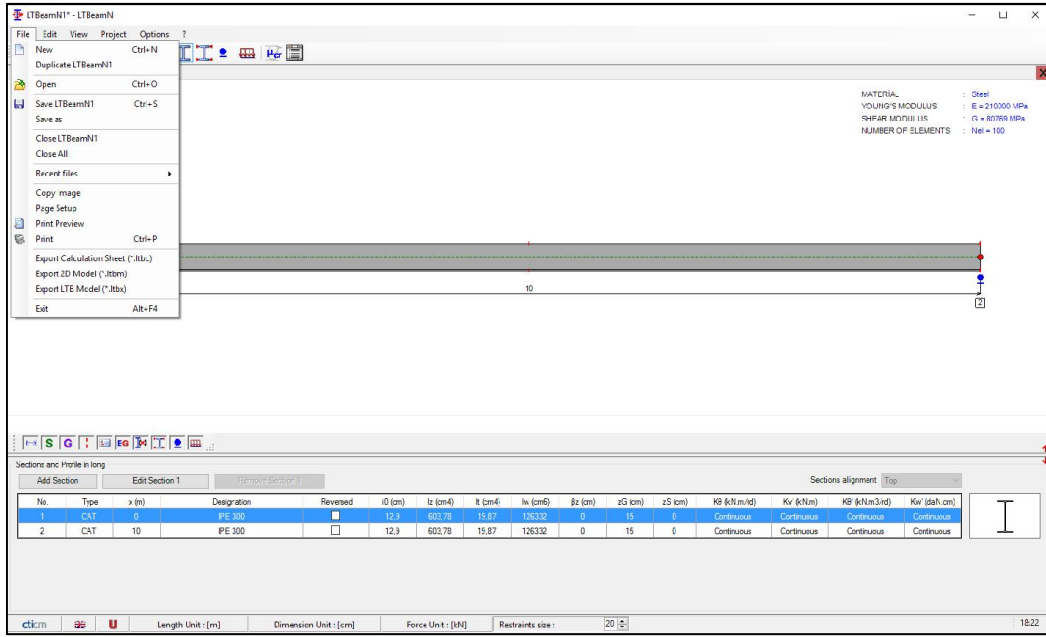
Ek Açıklama-A: LTBeamN Programı Kullanımı

LTBeamN, CTICM isimli Fransız firmasının ürettiği, çubuk sonlu elemanlar yazılımıdır. LTBeamN, aksenal kuvvet ve eğilme momenti etkisindeki elemanların, öz değer faktörünü hesaplayarak elemanın kritik elastik yanal burulmalı burkulma yükünü vermektedir.

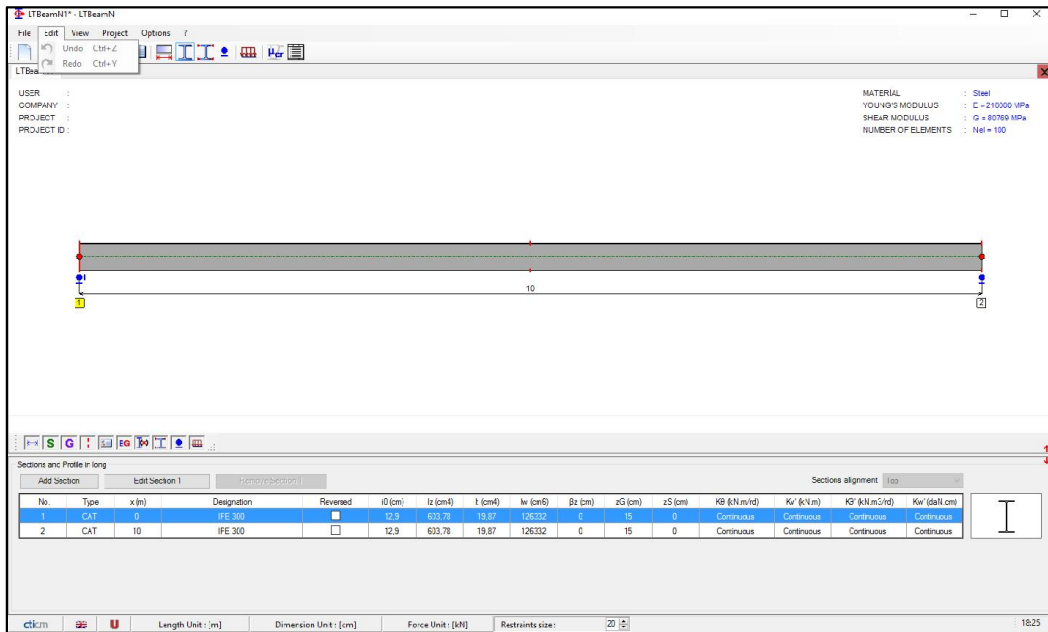


Şekil A.1 LTBeamN programı giriş ekranı

LTBeamN programı ilk açıldığında 10m boyunda IPE 300 kesitli bir profil ile ekrana gelir (Şekil A.1). LTBeamN yazılımı, görselliği ve kolay ulaşılabilir kısa yol araçları ile kullanımı gayet rahat olan bir sonlu elemanlar programıdır. File menüsü, yeni dosya veya sayfa açma, kaydetme, yazdırma gibi işlevlerin yanı sıra dosyanın 2 ve 3 boyutlu olarak dışarı aktarımını yapabileceği alt menüler içermektedir (Şekil A.2).

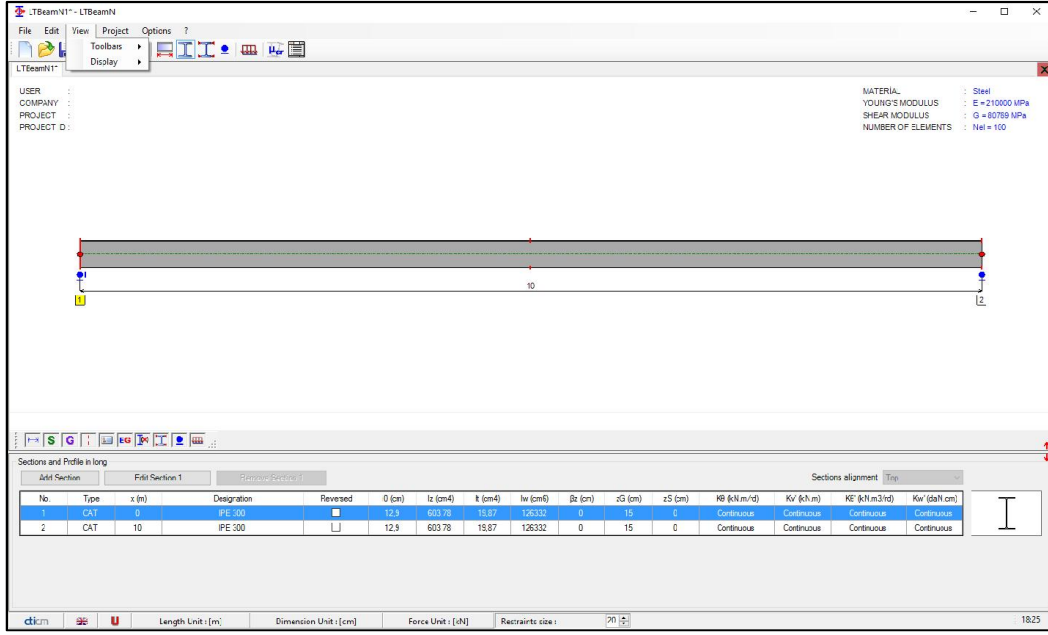


Şekil A.2 LTBeamN File menüsü

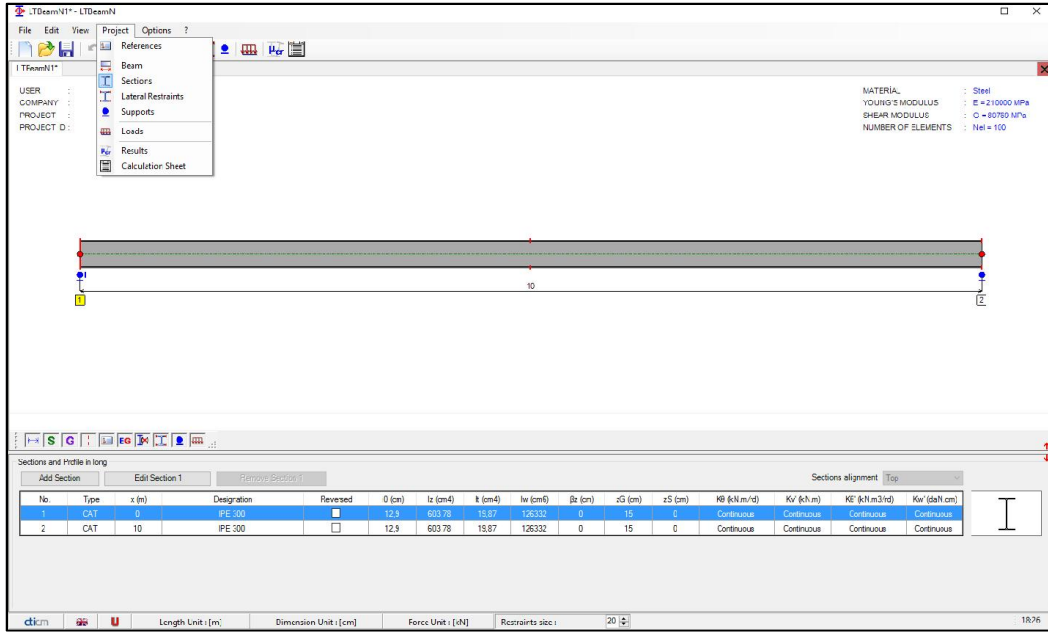


Şekil A.3 LTBeamN Edit menüsü

Edit menüsü (Şekil A.3) yapılan işlemlerin geri alınması veya geri alınan işlemin tekrarlanması işlevlerini içerirken, view menüsü (Şekil A.4) ekranda kullanılan araç çubuklarını ve yükler, mafsallar, eksenler gibi görselliği kolaylaştıran nesnelerin ekranda görünürlüğünü açıp kapatan menüdür.

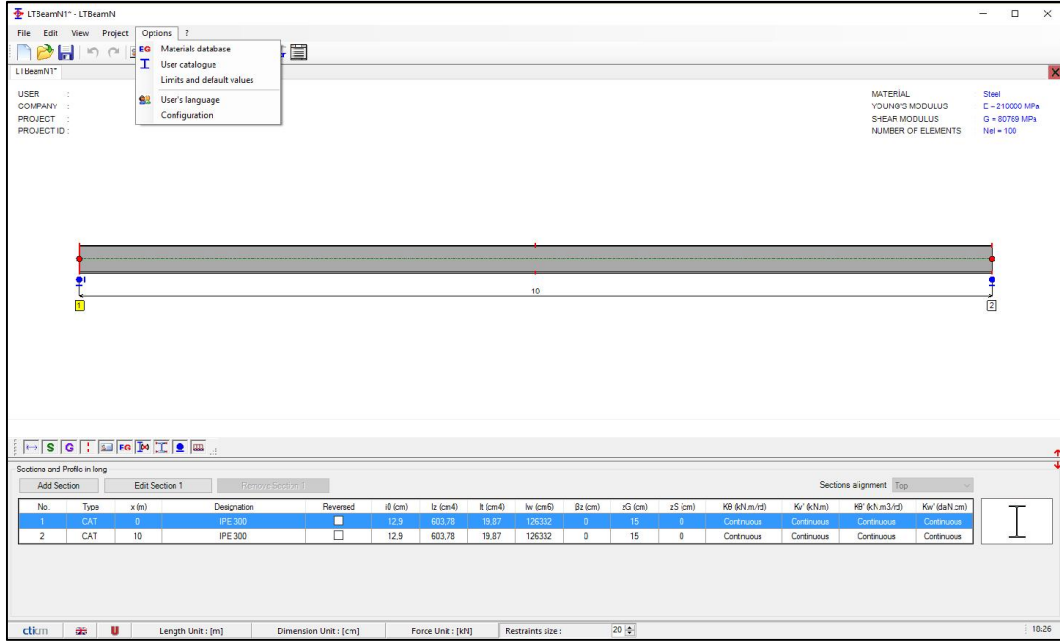


Şekil A.4 LTBeamN View menüsü

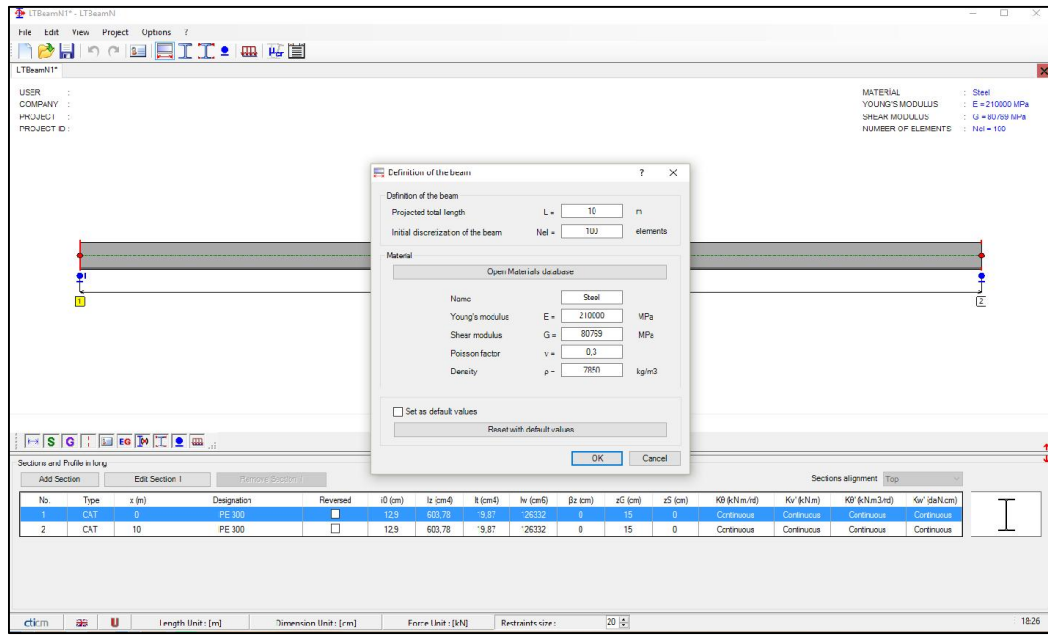


Şekil A.5 LTBeamN Project menüsü

Programın tasarım ve analiz kısmı Project menüsü (Şekil A.5) altında bulunan menüler ile gerçekleştirilmektedir. Bu menülerin aynı zamanda kolay kullanım için kısa yol araçları da bulunmaktadır. Options menüsü ise, malzeme özelliklerinin değiştirilebildiği, programda bulunan profil tablolarına erişim sağlanabildiği ve analizde gerekli olan limit değerler ile kullanılacak olan birimlerin belirlenebileceği kısımdır (Şekil A.6).

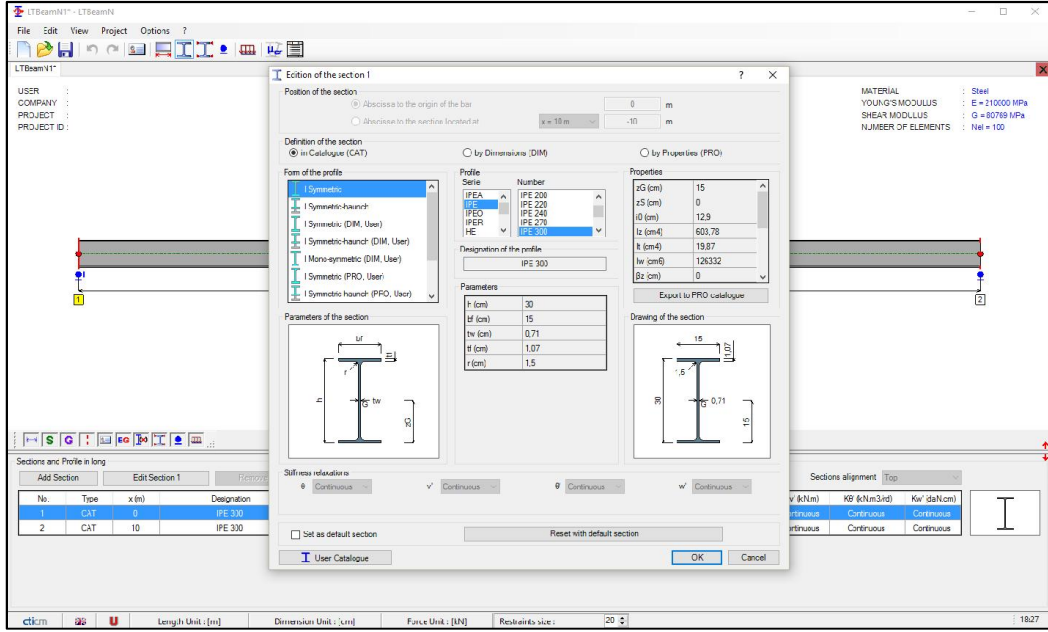


Şekil A.6 LTBeamN Options menüsü



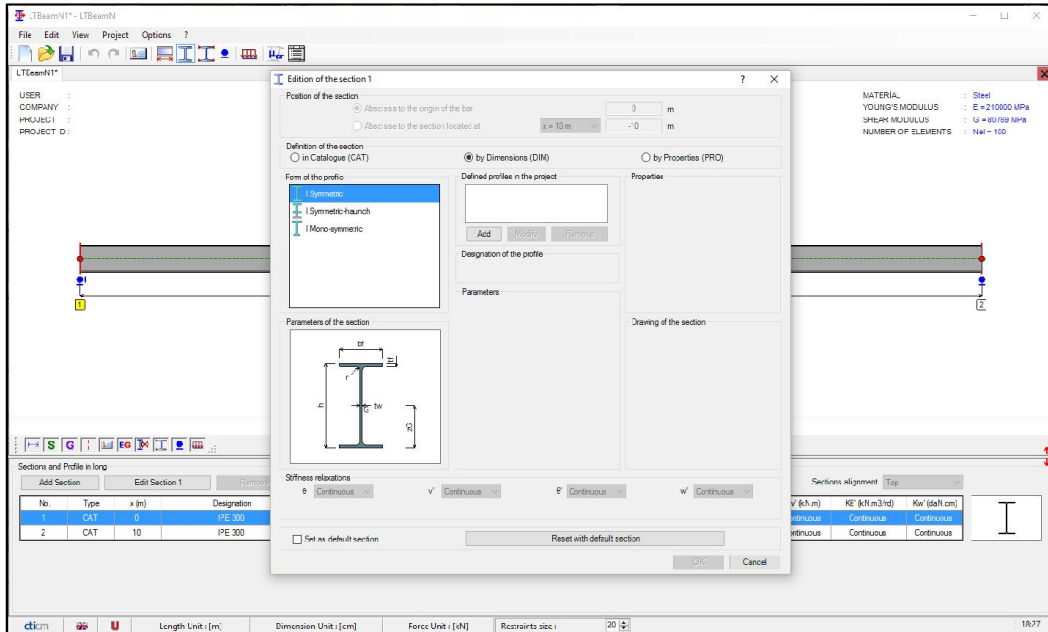
Şekil A.7 LTBeamN Kiriş boyutları ve malzeme özellikleri penceresi

LTBeamN ile analize başlarken kullanılacak dil ve birim sistemi seçildikten sonra kiriş boyutları ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi ile devam edilebilir. Şekil A.7'da görülen pencereye Project menüsü altında bulunan Beam menüsü ile veya araç çubuklarında bulunan Beam ikonu ile ulaşılabilmektedir. Bu pencereden kirişin boyu ve kaç sonlu elemana ayrılacak istendiği ve kullanılacak istenen malzeme özellikleri belirlenmektedir.



Şekil A.8 LTBeamN Kesit özellikleri penceresi, hazır profil tabloları

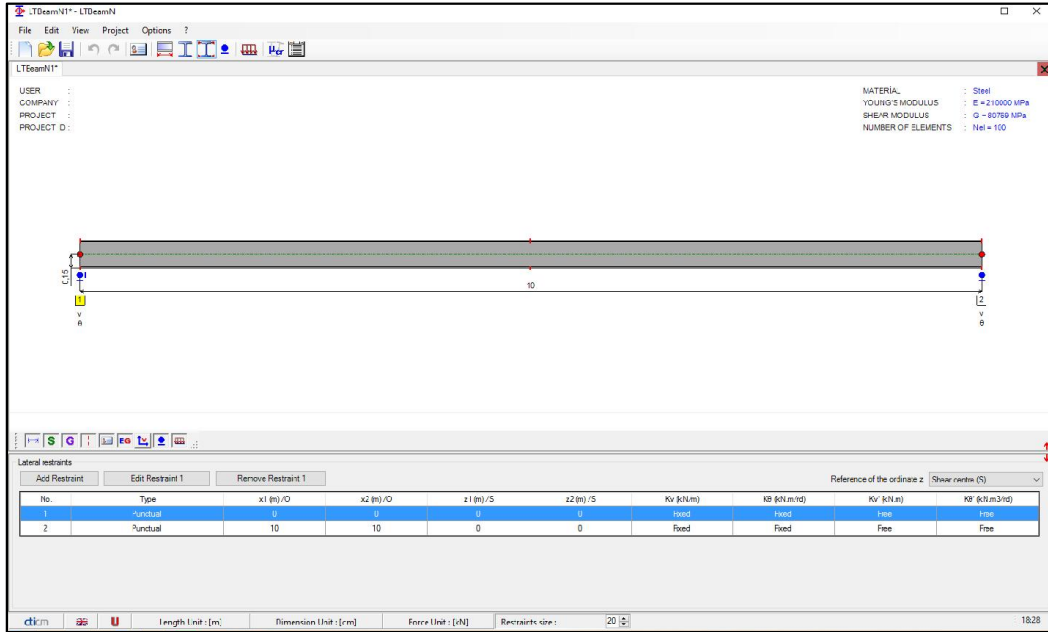
Kesit özellikleri, program açılırken ekrana hazır olarak gelen kesitler üzerinde çift tıklanarak açılan pencereden (Şekil A.8) 'in Catalogue' seçeneği işaretli iken, programda hazır halde bulunan profil tablolarından istenilen özelliklerdeki kesit seçilerek belirlenebilir. Profil tabloları eğilme düzlemine göre simetrik olan I kesitleri içermektedir.



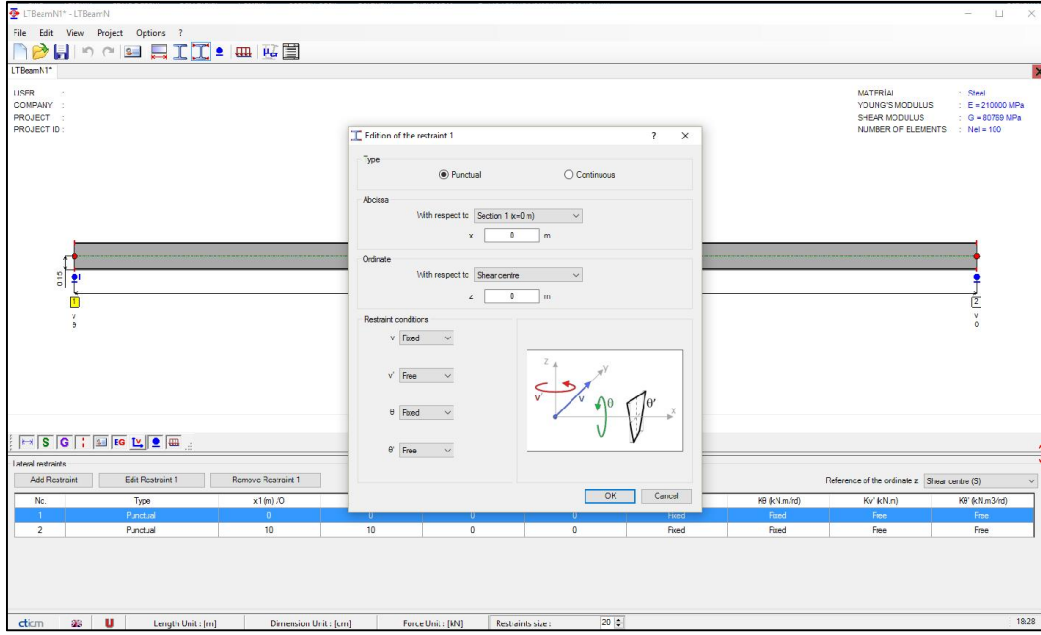
Şekil A.9 LTBeamN Kesit özellikleri penceresi, kullanıcı tanımlı kesit

İstenilen kesit özellikleri profil tablolarında bulunmuyorsa, LTBeamN programı kullanıcıya boyutlar veya özellikler tanımlayarak kendi oluşturabileceği kesitler üzerinde analiz yapma olanağını da sunmaktadır (Şekil A.9).

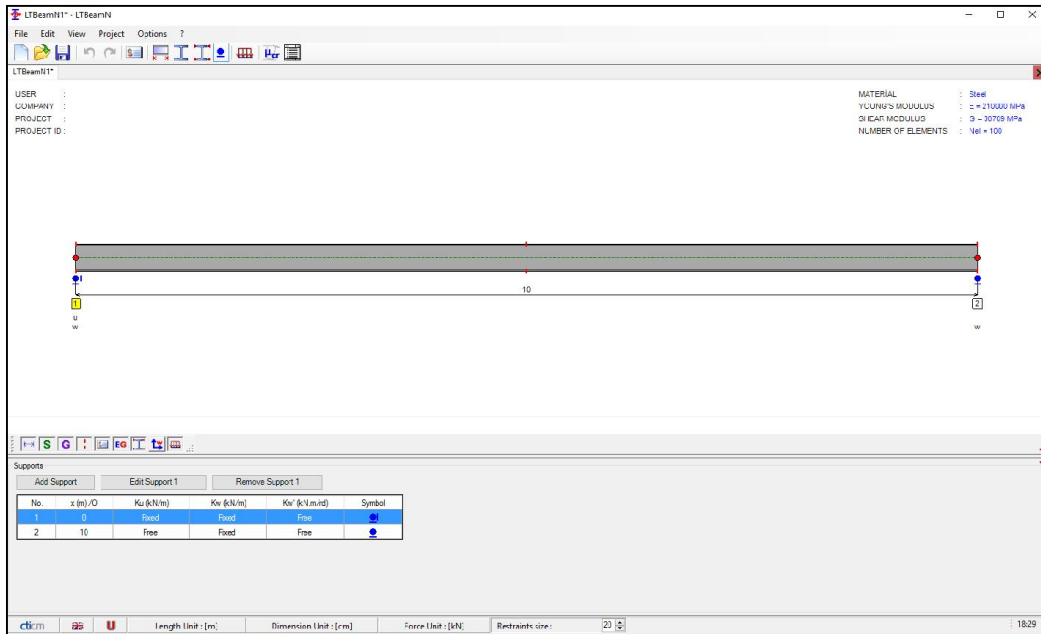
LTBeamN programı kiriş mesnetlenme durumlarını yanal mesnetler (lateral restraints) ve statik mesnetler (supports) olarak iki kısımda vermiştir. Yanal mesnetler, y eksenindeki yer değiştirme (v), z eksenindeki dönüş (v') ve x eksenindeki dönüş (θ) ile x eksenindeki çarpılma (θ') durumlarının serbestlik derecesini belirlemek için kullanılmaktadır (Şekil A.10 ve Şekil A.11). Yanal mesnetler kiriş uzunluğu boyunca belirli bir noktada verilebileceği gibi kirişin tüm boyunca veya kiriş boyunca belirli uzaklıklar arasında da verilebilir.



Şekil A.10 LTBeam yanal mesnetler

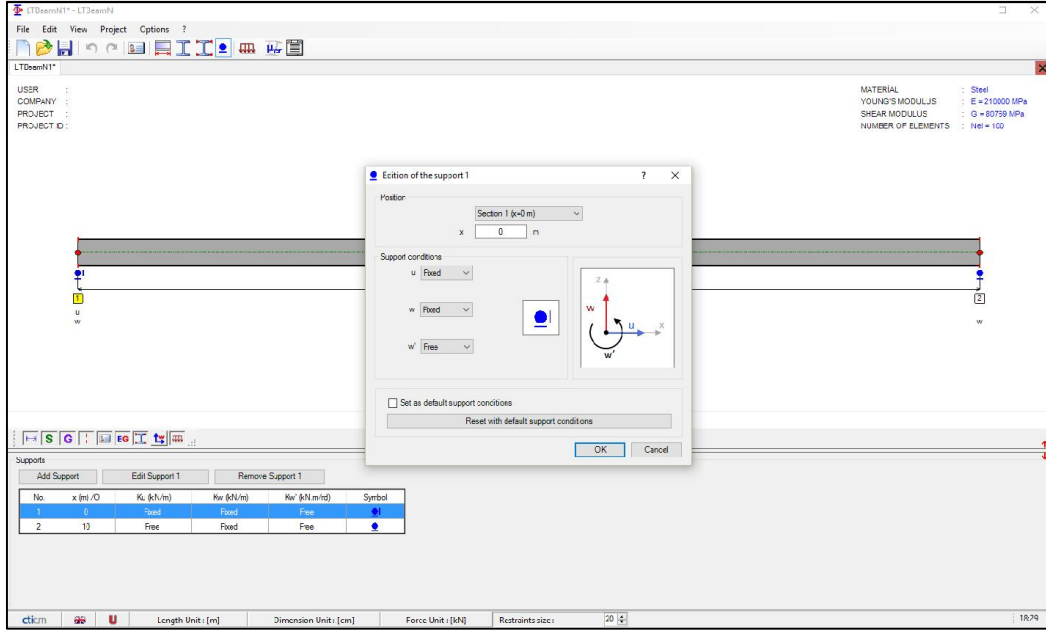


Şekil A.11 LTBeamN Yanal mesnetlerin tanımı

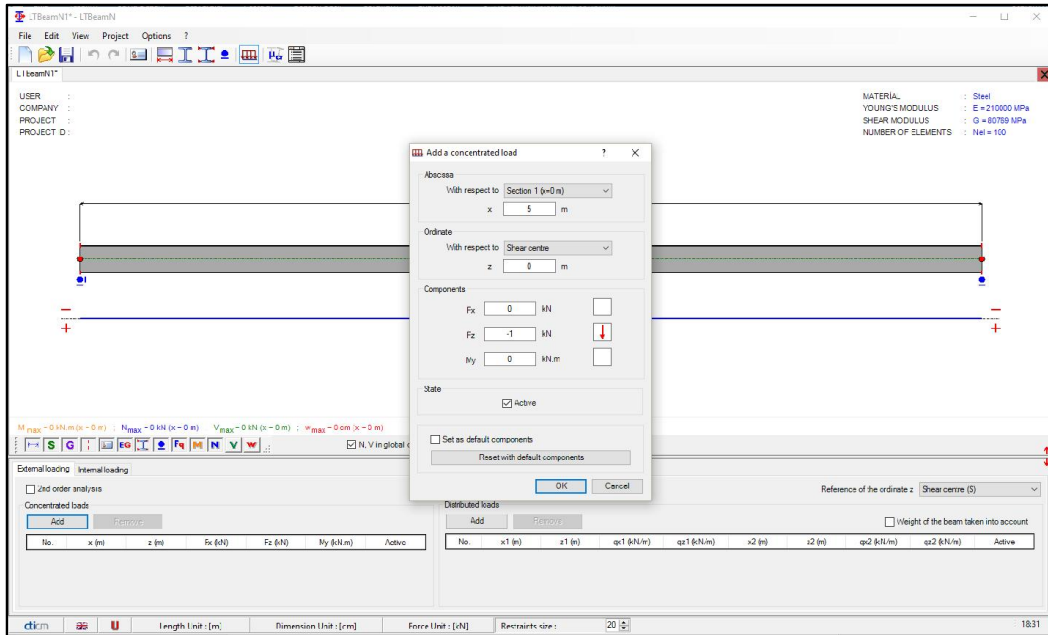


Şekil A.12 LTBeamN Statik mesnetler

LTBeamN de kullanılan statik mesnetler ise x eksenı yönünde yer değıştirme (u), z eksenı yönünde yer değıştirme (w) ve z eksenı etrafında dönüş (w') durumlarının seçilen noktadaki serbestlik durumlarını belirlemek için kullanılan mesnetlerdir (Şekil A.12 ve Şekil A.13).

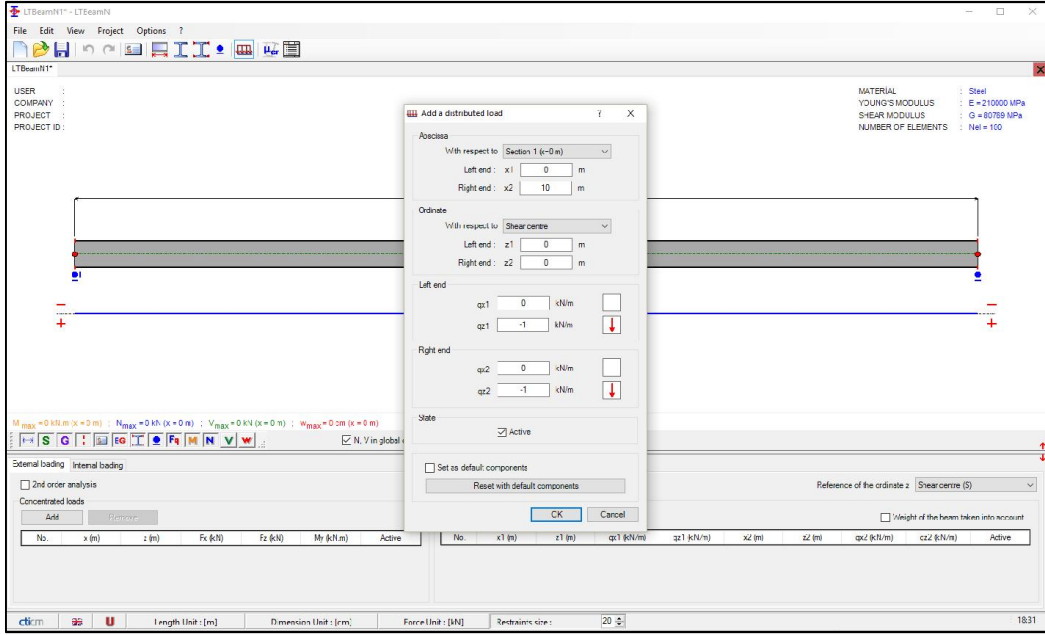


Şekil A.13 LTBeamN Statik mesnetlerin tanımı

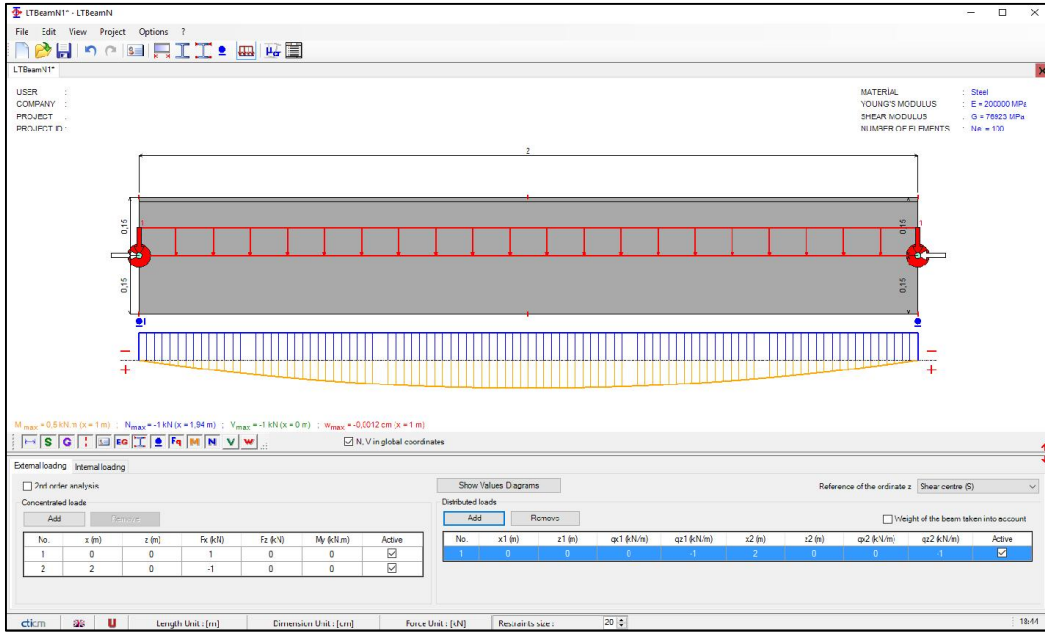


Şekil A.14 LTBeamN tekil yüklerin girildiği pencere

LTBeamN ile aksenal kuvvet ve yanal yükler tekil veya yayılı olarak çeşitli şekillerde girilebilmektedir (Şekil A.14 ve Şekil A.15). Kirişlere yükler kesme merkezinden yüklenebileceği gibi üst başlık ve alt başlık yüklemeleri de yapmak mümkündür. Aksenal kuvvet ve düzgün yayılı yük etkisindeki bir kiriş Şekil A.16 ile örnek olarak gösterilmiştir.

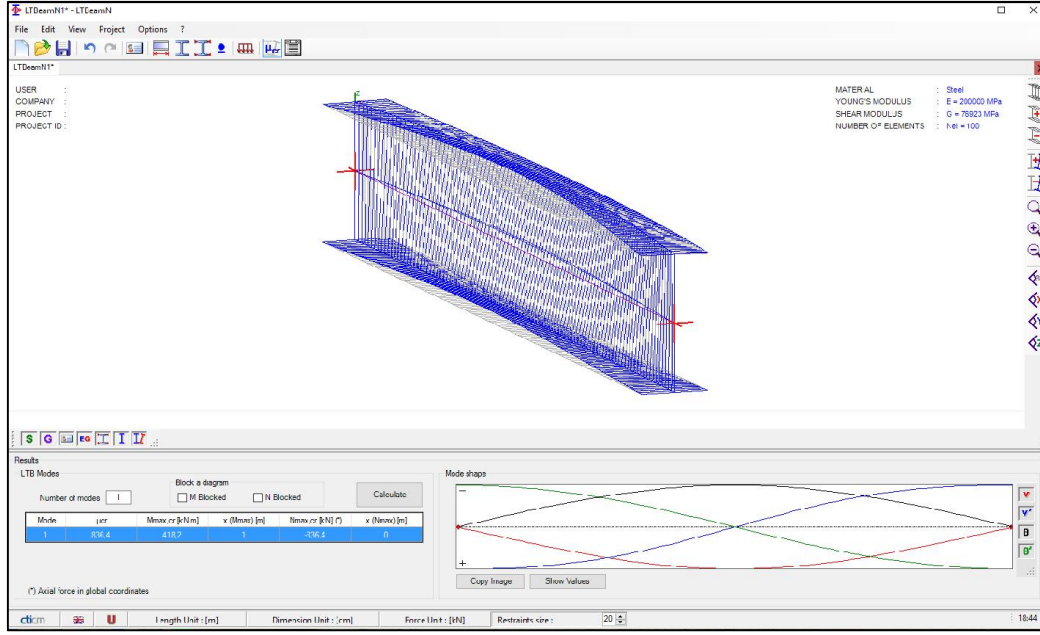


Şekil A.15 LTBeamN yayılı yüklerin girildiği ekran

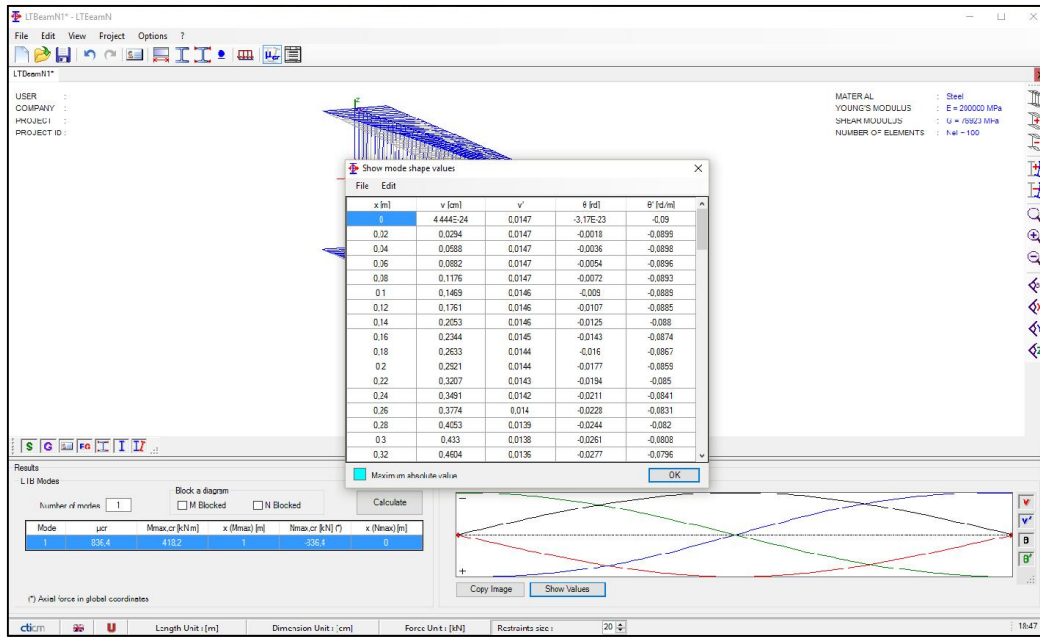


Şekil A.16 LTBeamN aksenal kuvvet ve düzgün yayılı yük altındaki kiriş

LTBeamN programının analiz ekranı da diğer menüleri gibi kullanması rahattır. Kiriş boyutları, malzeme ve kesit özellikleri, mesnet koşulları ve yükleme durumu belirlenmiş olan kirişin analizi 'calculate' butonu tıklanarak gerçekleştirilir. Analiz sonucunda kirişin şekil değiştirmiş hali ekranda görülebilir (Şekil A.17 ve Şekil A.18).



Şekil A.17 LTBeamN analiz ekranı



Şekil A.18 LTBeamN analiz sonuçları