

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çelik I Profillerde Farklı Geometrik Önkusur Düzenlerinin Yanal Burulmalı
Burkulmaya Etkisi

Elif AYDIN

EKİM 2018

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Elif AYDIN tarafından hazırlanan **ÇELİK I PROFİLLERDE FARKLI GEOMETRİK ÖNKUSUR DÜZENLERİNİN YANAL BURULMALI BURKULMAYA ETKİSİ** adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. İlker KALKAN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Doç. Dr. İlker KALKAN
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Mehmet Baran _____
Üye (Danışman) : Doç. Dr. İlker Kalkan _____
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Selçuk Baş _____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



Kıymetli Aileme...

ÖZET

ÇELİK I PROFİLLERDE FARKLI GEOMETRİK ÖNKUSUR DÜZENLERİNİN YANAL BURULMALI BURKULMAYA ETKİSİ

AYDIN, Elif

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Doç. Dr. İlker KALKAN

Ekim 2018, 82 sayfa

Çelik yapı elemanları, üretiminden şantiyede montajları gerçekleşinceye kadar hesaba katılmayan birtakım yüklere maruz kalırlar. Bu durum çelik elemanın teorik olarak kusursuz geometride olduğu düşünülerek yapılan tasarımlarda öngörüldüğü gibi davranmamasına neden olur. Çelik yapı tasarımında dikkate alınması gereken esas kriter burkulma halidir. Yanal burulmalı burkulma, çelik yapıların tasarım şartnamelerinde kirişlerin dayanımına ve doğrudan yapının güvenliğine etki eden durumlardan birisi olarak kabul görmektedir. Özellikle eğilme elemanları olan çelik kirişlerde yanal burulmalı burkulma davranışı ve bu davranışı etkileyen parametreler önem arz etmektedir. Bu parametrelerden biri de geometrik önkusur halidir. Geçmiş çalışmalarda önkusurun yanal stabiliteye etkisi araştırılmış; geometrik önkusurlu kirişlerin burkulma yüklerinin ve burkulma momentlerinin, önkusursuz kirişlere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Fakat yapılan araştırmalarda geometrik önkusur deseninin (şeklinin) burkulma yüküne, burkulma deformasyonuna ve yük deformasyon eğrisine olan etkisinin incelenmediği tespit edilmiştir. Bu çalışmada; farklı önkusur şekline sahip çift simetri eksenli kompakt I- enkesitli çelik profillerin yanal burulmalı burkulma davranışı ABAQUS sonlu elemanlar analiz programı ile araştırılmıştır. Bu kapsamda, başlangıç burulma açısı bulunduran veya bulundurmeyen ve başlangıç yanal deformasyonu kiriş uzunluğu boyunca yarım sinüs dalgası, tam sinüs dalgası ve tam parabol şeklinde dağıtılmış olan standart IPN 300 kesitli kirişlerin elastik yanal burulmalı burkulma davranışları nümerik ve analitik olarak inlenmiştir.

Analitik hesaplarda Amerikan ve Avrupa yapısal çelik yönetmeliklerinin yanal burulmalı burkulma formülleri ile literatürde bulunan ve sıklıkla kullanılan bir teorik formül kullanılmıştır. Her önkusur deseni için ve önkusursuz referans analizlerde elastik burkulma sınırları içinde kalan farklı serbest kiriş açıklığı değerleri kullanılmıştır. Yapılan analitik ve nümerik analizler, kiriş ekseninin yarım sinüs dalgası şekline yaklaşmasıyla kritik burkulma momenti değerlerinin azaldığını ve üst başlığa doğru artan başlangıç burulma açısının varlığının bu azalmayı arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, Avrupa yapısal çelik yönetmeliğinde yer alan önkusur katsayısının da etkisiyle, geometrik önkusurlu kirişlerde bu formülün tercih edilmesinin daha güvenli olacağı da ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: Yanal Burulmalı Burkulma, Geometrik Önkusur, Geometrik Önkusur Deseni, ABAQUS, Sonlu Elemanlar, Elastik Burkulma

ABSTRACT

THE EFFECTS OF DIFFERNT GEOMETRIC IMPERFECTION PATTERNS ON THE LATERAL STABILITY OF STEEL I BEAMS

AYDIN, Elif

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İlker KALKAN

October 2018, 82 pages

The steel structural members are subjected to unexpected loads until their mantling i the construction site. This situation causes the steel members to behave different from the theoretical expectations, which assume that the members are geometrically perfect. Stability is the fundamental crition in the design of steel structures. Lateral torsional buckling is one of the limit states in the structural steel design codes, which influences the strength of steel beams and the structural safety. Particularly, the lateral torsional buckling affects the behavior of bending members and there are certain parameters affecting this behavior. The initial geometric imperfection is one of these parameters. In the previous studies, the effects of initial geometric imperfection on the lateral stability behavior was investigated and the buckling moments and loads of the imperfect beams were observed to be lower than the respective values of their perfect counterparts. However, the previous studies were observed not to investigate the effects of the initial imperfection shape of a beam on the buckling load, deformations and load-deflection curve. In this study, the lateral torsional buckling behavior of doubly-symmetric steel I-beams with different shapes of initial imperfection was investigated numerically with the help of the ABAQUS finite element program. Within this scope, the elastic lateral torsional buckling behavior of beams with standart IPN 300 section, with or without initial twist angle and half sinusoidal, full sinusoidal and full parabolic distribution of sweep along the beam length was examined both

analytically and numerically. In the analytical calculations, the American and European structural steel code lateral torsional buckling formulations and a theoretical formula in the literature, which is commonly used, were adopted. Different unbraced span length values within the elastic lateral torsional buckling limits were considered for each of the imperfection patterns and for the reference perfect beams. The conducted analytical and numerical analyses indicated that the closeness of the lateral bow of a beam to the half-sinusoidal distribution of sweep along the span decreases the buckling moment and the presence of the initial twisting angle, which results in greater deformations at the top, exacerbates this decrease. Moreover, the lateral torsional buckling formulation of the European structural steel code was found to be safer to use in geometrically imperfect steel beams due to the presence of the geometric imperfection factor.

Key Words: Lateral Torsional Buckling, Geometric Imperfection, Geometric Imperfection Patterns, ABAQUS, Finite Element Method, Elastic Buckling

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımını esirgemeyen ve çalışmanın gerçekleőtirilmesinde, kıymetli zamanını ayırıp sabırla, tecrübe ve imkanlarını, değerli bilgilerini benimle paylaşan tez yöneticisi hocam, Sayın Doç. Dr. İlker KALKAN'a, tez çalıőmalarım esnasında, bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Selçuk BAŞ'a; tüm çalışma boyunca manevi desteğini esirgemeyen kıymetli dostum ve meslektaőım Ebru KAHRAMAN'a teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteğini eksik etmeyen ve her zaman tecrübeleriyle beni hayata hazırlayan değerli babam őaban YUCA ve kıymetli annem Hülya YUCA'ya, bu süreçte her türlü şartlar altında beni yalnız bırakmayan saygıdeğer eőim İnşaat Mühendisi Muhammed AYDIN'A teőekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Konu	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi.....	2
1.3. Çalışmanın Kapsamı.....	3
1.4. Çalışma Yöntemi ve Planı	4
1.5. Literatür Özetleri	5
2.GENEL KİRİŞ DAVRANIŞI	14
2.1. Burkulma Modları	14
2.2.Yanal Burulmalı Burkulma	15
2.3. Elastik Yanal Burulmalı Burkulma	17
2.4. Kesitlerin Sınıflandırılması	20
2.5. Önkusur Tanımları.....	21
3-ANALİTİK ÇALIŞMA	25
3.1. Yönetmeliklerde Belirlenmiş Yanal Burulmalı Burkulma İfadeleri	25
4-NÜMERİK ÇALIŞMA	46
4.1 Sonlu Eleman Analiz Programı	47

4.2 Eleman Seçimi.....	47
4.3 Malzeme Özelliği	48
4.4 Kesit Özellikleri.....	48
4.5 Geometrik Önkusur	49
4.6 Eleman Ağının Oluşturulması (Meshing)	53
4.7 Mesnet Koşullarının Belirlenmesi.....	54
4.8 Yükleme Durumu	56
4.9 Analiz	58
4.10 Analiz Sonucu Burkulma Modları.....	60
5.ANALİTİK VE NÜMERİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	66
5.1. Nümerik ve Analitik Sonuçların Karşılaştırılması	66
5.2. Yanal Deplasman Önkusur Etkisi	68
5.3. Yanal Deplasman ve Burulma Açısı Önkusur Etkisi	70
6.SONUÇLAR	74
KAYNAKLAR.....	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1. 1. Eğilmeden Dolayı Başlıklardaki Gerilme Durumu.....	2
1. 2. Yanal burulmalı burkulma	2
2. 1. Burkulma Modları.....	15
2. 2. I- Enkesitli Elemanın Basınç Bölgesi	16
2. 3. Burkulma Dayanımının Setrbest Açıklık İle Değişimi	16
2. 4. Elastik Yanal Burulmalı Burkulma	18
2. 5. Yanal Burulmalı Burkulma Durumu.....	19
2. 6. Artan Yük Etkisi Altında İdeal Ve Önkusurlu Gerçek Kiriş Davranışı.....	20
2. 7. Narinlik Değerlerine Karşılık Gelen Eğilme Momenti Dayanımı	21
2. 8. Kritik Elastik Burkulma Yüğü Ve Plastik Kapasite Arasındaki İlişki.....	23
2. 9. Farklı Önkusur Şekilleri ve Yapılan Kabuller	24
3. 1. Kiriş Kesiti.....	25
3. 2. Kiriş Uzunluğu Boyunca Moment Dağılımı	29
3.3. Basınç Başlığının Yanal Olarak Desteklenmeyen Uzunluğuna Bağlı Olarak Karakteristik Eğilme Momenti Dayanımı.....	29
3. 4. Basit Mesnetli Kiriş.....	35
3. 5. I Profilin Gövde Kesitleri.....	36
3. 6. I Profilin Başlık Kesitleri	37
3. 7. Yükleme Durumu ve Moment Dağılımı	44
4. 1. C3D10 Eleman Yapısı.....	47
4. 2. IPN300 Enkesit Detayları	48
4. 3. Önkusur Şekli.....	50
4. 4. Önkusursuz Kiriş.....	51
4. 5. Yarım Sinüs Dalgası Önkusur Şekline Sahip Kiriş Elemanın Önkusur Durumu	52
4. 6. Tam Sinüs Dalgası Önkusur Şekline Sahip Kiriş Elemanın Önkusur Durumu	52
4. 7. Elemanlara Ayrılan Kiriş	54
4. 8. Modellemede Kullanılan Sabit Mesnetli Kiriş Eleman	55
4. 9. ABAQUS’de Koordinat Sistemi	55
4. 10. Modeldeki Mesnetlenme Durumu.....	56

4. 11. Farklı Yükleme Durumları.....	57
4. 12. Yükleme Şekli.....	58
4. 13. Yükleme Şekli ve Mesnet Koşulları	58
4. 14. IPN300-6 m Önkusursuz Kiriş Burkulma Şekli.....	60
4. 15. IPN300-7 m Önkusursuz Kiriş Burkulma Şekli.....	61
4. 16. IPN300-8 m Önkusursuz Kiriş Burkulma Şekli.....	61
4. 17. IPN300-9 m Önkusursuz Kiriş Burkulma Şekli.....	62
4. 18. IPN300-10 m Önkusursuz Kiriş Burkulma Şekli.....	62
4. 19. IPN300-7 m Yarım Sinüs Dalgası Kiriş Burkulma Şekli	63
4. 20. IPN300-9.5 m Yarım Sinüs Dalgası Kiriş Burkulma Şekli	63
4. 21. IPN300-10 m Yarım Sinüs Dalgası Kiriş Burkulma Şekli	64
4. 22. IPN300-10 m Tam Sinüs Dalgası Kiriş Burkulma Şekli	64
4. 23. IPN300-9 m Tam Parabol Kiriş Burkulma Şekli	65
4. 24. IPN300-6 m Yarım Sinüs Dalgası + Burulma Açılı Kiriş Burkulma Şekli	65
5. 1. IPN300 Önkusursuz Kirişler İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	66
5. 2. Referans Kiriş ile Önkusurlu Kirişlerin Analiz Değerlerinin Karşılaştırılması .	69
5. 3. Burulma Açısı Önkusuru İle Nümerik Sonuçların Değişimi	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2. 1. Yanal Burulmalı Burkulmayı Etkileyen Faktörler	17
3. 1. IPN300 Kesit Özellikleri.....	26
3.2.Eğilme Momentinin Basınç Bileşeni Etkisindeki Enkesit Parçalarının Genişlik/Kalınlık Oranları.....	27
3. 3. Burkulma Momentinin Kiriş Açıklığına Göre Değerleri	33
3. 4. AISC-LRFD Standardına Göre Elde Edilen Değerler	34
3. 5. AISC-LRFD Standardına Göre Pcr Değerleri	36
3. 6. I Profil Sınıfının Belirlenmesi.....	37
3. 7. Çeşitli Moment Dağılım Şekilleri ve kc Değerleri.....	40
3. 8. EUROCODE3 Standardına Göre Elde Edilen Değerler	41
3. 9. EUROCODE 3 Standardına Göre Pcr Değerleri	42
3. 10. GALAMBOS Çözümüne Göre Elde Edilen Değerler	45
3. 11. GALAMBOS Çözümüne Göre Pcr Değerleri	45
5. 1. Analitik ve Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması	67
5. 2. Analitik ve Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması.....	70
5.3. Analitik ve Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması.....	72

SİMGELER DİZİNİ

C_b	Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda moment düzeltme katsayısı
C_w	Çarpılma sabiti
E	Çelik elastisite modülü
F_{cr}	Kritik gerilme
F_y	Karakteristik akma gerilmesi
G	Çelik elemanın kayma(rijitlik) modülü
I_y	Zayıf eksen atalet mome
J	Burulma sabiti
L_r	Elastik olmayan yanal burulmalı burkulma durumu için sınır uzunluk
L_b	Yükün uygulanma noktasındaki başlıklardan her biri için yanal olarak desteklenmeyen uzunluğun büyüğü
L_p	Akma sınır durumu için yanal olarak desteklenmeyen sınır uzunluk
$M_{b,Rd}$	Dizayn burkulma momenti
M_n	Karakteristik eğilme momenti dayanımı.
M_p	Plastik eğilme momenti
M_{cr}	Elastik kritik burkulma momenti
M_{ocr}	Elastik burkulma momenti
P_{cr}	Kritik yanal burulmalı burkulma yükü
W_{ex}	x-ekseni etrafında elastik mukavemet momenti.
W_{px}	x-eksenine göre plastik mukavemet momenti
W_y	Kesit modülü
W_{pl}	Plastik kesit modülü
b_f	Başlık genişliği
c	Kesit şekline göre belirlenen katsayı
f	χ_{LT} düzeltme faktörü

h	Hadde ürünleri için köşe bölgelerdeki yarıçap veya eğrisel bölgeler çıkarılarak elde edilen başlıklar arasındaki net gövde yüksekliği, yapma enkesitli elemanlar için bulon eksenleri veya kaynaklar arasındaki net yükseklik
h_o	I-enkesitte başlık ağırlık merkezleri arası mesafe
i_{ts}	Etkin atalet yarıçapı
i_y	y-eksenine göre atalet yarıçapı
k_c	Moment dağılımı için düzeltme katsayısı
t_f	Başlık kalınlığı
t_w	Gövde kalınlığı
ε	Şekil değiştirme
β	Hadde profillerin yanıl burulmalı burkulma eğrileri için düzeltme faktörü
γ_{M1}	Stabilite sınır durumları malzeme katsayısı
λ	Yerel burkulma narinlik değeri
λ_p	Kompakt elemanlar için sınır narinlik
λ_r	Kompakt olmayan eleman için sınır narinlik
λ_w	Gövde enkesiti için sınır narinlik değeri
λ_f	Başlık enkesiti için sınır narinlik değeri
$\bar{\lambda}_{LT}$	Yanal burulmalı burkulma için narinlik değeri
χ_{LT}	Eğilme etkisindeki sabit enkesitli elemanlar için azaltma faktörü
$\chi_{LT,mod}$	Yanal burulmalı burkulma için değiştirilmiş azaltma faktörü
Φ_{LT}	Azaltma faktörü χ_{LT} belirlemek için kullanılan değer

KISALTMALAR DİZİNİ

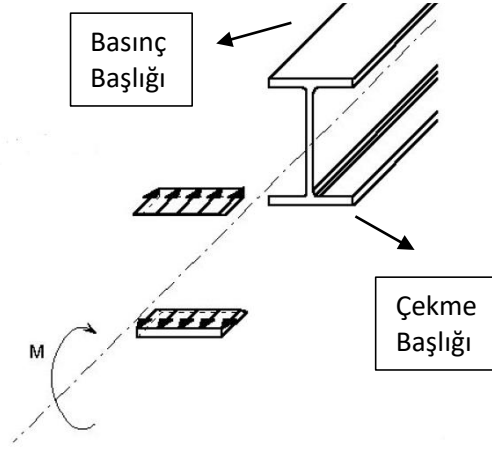
AISC-LRFD	American Institute of Steel Construction (Specification for Structural Steel Buildings)
EUROCODE 3	Avrupa Şartnamesi (Design of Steel Structures)
CSA	Canadian Standards Association



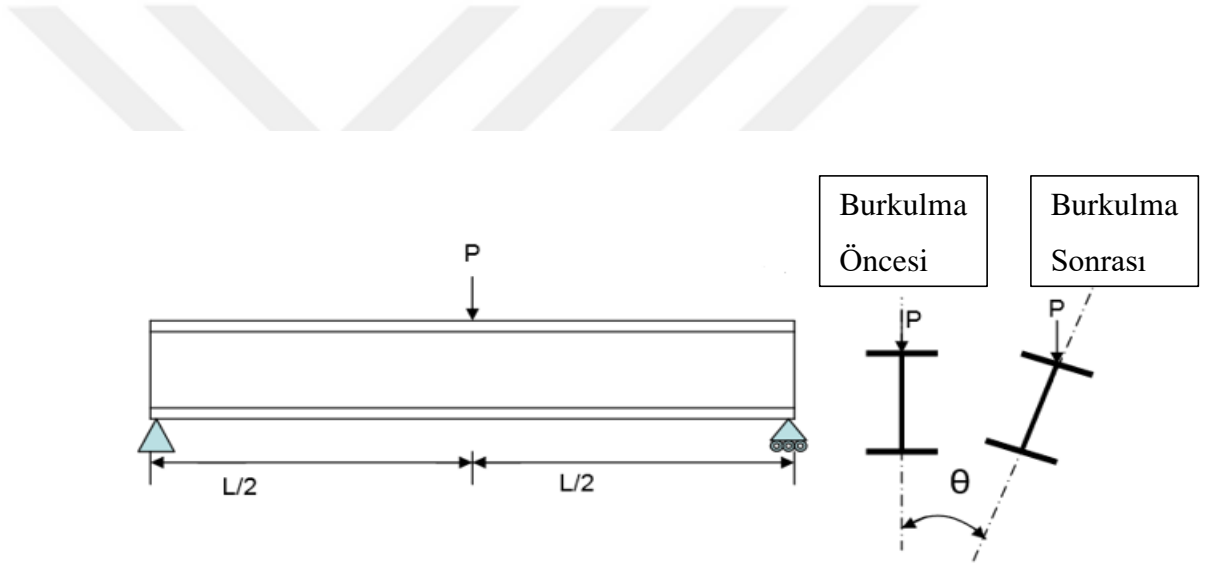
1. GİRİŞ

1.1. Konu

Yanal burulmalı burkulma durumu, çelik yapıların tasarım şartnamelerinde kirişlerin dayanımına, stabilite kaybına ve dolayısıyla doğrudan yapının güvenliğine etki eden durumlardan birisi olarak kabul görmektedir. Yüklemeler altında eğilme etkisine maruz kalan kirişlerde, tasarımda maliyet kaybını en aza indirmek amacıyla kuvvetli eksen rijitliği, zayıf eksen rijitliğine göre önemli derecede yüksek olacak şekilde enkesit seçilir. Bu sebeple, yüklemeye dik yöndeki asal eksen özellikleri yüke paralel yöndeki eksen özelliklerine göre düşük olan bir enkesit ortaya çıkar ve yük kuvvetli eksene göre eğilme etkisi oluşturacak şekilde (zayıf eksene paralel doğrultuda) uygulanır. Bu yüklemeler sonucunda; kirişin üst başlık kısmı basınç, alt başlık kısmı ise çekme bölgesi olarak çalışır (Şekil 1.1). Boyuna eksen boyunca yeterli yanal desteklerin olmadığı kirişlerde, artan yüklerle birlikte basınç bölgesi bir kolon gibi davranır, boyuna eksene dik yönde aniden stabilitesini kaybederek yanal deplasmana maruz kalır ve burkulur. Basınç bölgesi yanal yönde deforme olurken, çekme bölgesi olan alt başlık burkulmayı önleme eğilimindedir ve stabil kalmaya çalışır. Basınç ve çekme bölgelerinin farklı burkulma eğilimleri kirişin kendi ekseni etrafında dönmesine yani burulmaya sebep olur. Yanal yönde eğilmeyi ve burulmayı içeren bu burkulma moduna yanal burulmalı burkulma denilir (Şekil 1.2). Kiriş tasarımını belirleyen limit durumdur.



Şekil 1. 1. Eğilmeden Dolayı Başlıklardaki Gerilme Durumu [1]



Şekil 1. 2. Yanal burulmalı burkulma [2]

1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Çelik yapı elemanlarının tasarımında öncelikli sınır durumları, stabilite sınır durumlarıdır. Bu sınır durumları ile ilgili formüller yönetmeliklerde ve standartlarda yer almakta ve stabilite sınır durumları çelik yapıların tasarımlarda çok önemli bir yer tutmaktadır. Yapılan bu tasarımlar, çelik profilleri kusursuz kabul ederek türetilmiştir. Gerçekte ise, üretimi yapılan elemanlar hesaplamalarda kullanılan yüklerin dışında da

birtakım etkilere (sıcaklık, vs.) maruz kalırlar. Farklı üretim aşamalarında bu etkiler neticesinde çelik profillerde birtakım kusurlar meydana gelir ve önkusurlar oluşmuş olur. Dolayısıyla ideal (teorik) kiriş davranışı ile gerçek kiriş davranışı arasında stabilite olarak da farklılıklar oluşur. Her ne kadar hesap yöntemlerinde güvenlik katsayıları kullanılarak bu oluşumlar hesaba katılıp risk bertaraf edilmeye çalışılsa da, gerçek bir çelik profilin önkusurlar altında stabilite davranışının bilinmesi ve belirlenebilmesi daha faydalı olacaktır. Kirişler etkisi altında olduğu yüke, bulunduğu koşullara göre farklı önkusur şekillerine sahip olabilirler. Geçmiş çalışmalarda önkusur olması durumu varsayılarak incelemeler yapıldıysa da, farklı şekle sahip önkusur düzenleri araştırılmamıştır. Mevcut çalışmanın asıl amacı, farklı önkusur şekillerine (desenlerine) sahip eğilme elemanlarının ABAQUS [3] sonlu elemanlar analiz programı ile modellenerek, kritik burkulma yüklerini belirlemek ve yanal burulmalı burkulma davranışlarını karşılaştırmaktır.

Asal eksenlerinin simetri ekseni olup olmamasına ve kesit şekillerine göre eksenel basınç elemanları (kolonlar), üç farklı tip burkulmaya uğrarlar: eğilmeli burkulma (Euler burkulması), burulmalı burkulma ve eğilmeli-burulmalı burkulma. Eğilmeli burkulmaya uğrayan bütün çelik elemanlar, başlangıç önkusurlarının şekline bağlı olmaksızın mesnetler arasında bir yarım sinüs dalgası şeklini alırlar. Yanal burulmalı burkulma ve yanal buruşmalı burkulma gibi kiriş burkulma modları da, kiriş basınç bölgesinin eğilmeli veya eğilmeli-burulmalı burkulmasına dayanır. Kiriş çekme bölgesi de basınç bölgesini takip ederek, basınç bölgesiyle uyumlu fakat basınç bölgesinden daha sınırlı burkulma deformasyonlarına uğrar. Dolayısıyla, burkulma modları da bir yarım sinüs dalgası şeklinin ortaya çıkması beklenir. İşte bu tez çalışmasının temel motivasyonu, kirişin başlangıç önkusurunun yarım sinüs dalgası şekline olan yakınlık derecesinin burkulmayı kolaylaştırıp, burkulma yükünü düşürüp düşürmeyeceğinin belirlenmesidir.

1.3. Çalışmanın Kapsamı

Daha önce yapılan çalışmalarda özellikle geometrik önkusurlu kirişlerin burkulma yüklerinin ve burkulma momentlerinin, önkusursuz kirişlere göre daha düşük olduğu

görülmüştür. Kirişin geometrik önkusur şeklinin (desenin) burkulma yüküne, burkulma deformasyonuna ve yük-deformasyon eğrisine etkisinin daha önce araştırılmadığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada farklı önkusur şekline sahip çift simetri eksenli I-enkesitli çelik profillerin yanal burulmalı burkulma davranışı incelenecektir. Çalışma kapsamında kiriş yüksekliği boyunca üniform yarım sinüs, basınç başlığına doğru artan (burulma açılı) yarım sinüs ile aynı önkusur şekillerinin kiriş eksenli boyunca tam sinüs dalgası ve tam parabolik dağılımına sahip çift simetri eksenli I-enkesitli kirişlerin yanal burulmalı burkulma davranışları araştırılacaktır. Yarım sinüs ve tam sinüs dalgalarının tanımı şu şekildedir:

Yarım sinüs dalgası: İki mesnet arasında bir tam sinüs dalgasının yarısının tamamlandığı önkusur şekli

Tam sinüs dalgası: İki mesnet arasında bir tam sinüs dalgasının tamamlandığı önkusur şekli.

Basit mesnetli I-enkesitli kirişler sonlu elemanlar metoduyla modellenecektir.

Kirişlerin burkulma sonrası aldığı şeklin yarım sinüs dalgası formu olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, geometrik önkusur deseni olarak verilecek sinüs dalgasının burkulmayı kolaylaştıracağı ve kritik burkulma yükünün bu durumda en düşük çıkacağı öngörülmektedir.

1.4. Çalışma Yöntemi ve Planı

Bu tez çalışmasında ABAQUS [3] sonlu elemanlar programı ile analizler yapılacaktır. Kirişlerin burkulduktan sonra moment değerleri ve yük-yanal sehim eğrileri karşılaştırılacaktır. Bu çalışma kapsamında aşağıdaki kiriş tiplerinin analizi gerçekleştirilecektir:

- Geometrik önkusuru olmayan referans
- Kiriş yüksekliği boyunca sabit (burulma açısız) yarım sinüs dalgası önkusurlu

- Basınç başlığına doğru yanal önkusurun arttığı (burulma açılı) yarım sinüs dalgası önkusurlu
- Kiriş yüksekliği boyunca sabit (burulma açısız) tam sinüs dalgası önkusurlu
- Basınç başlığına doğru yanal önkusurun arttığı (burulma açılı) tam sinüs dalgası önkusurlu
- Kiriş yüksekliği boyunca sabit (burulma açısız) tam parabolik dalga önkusurlu
- Basınç başlığına doğru yanal önkusurun arttığı (burulma açılı) tam parabolik dalga önkusurlu

Bu önkusur durumlarının her biri için, farklı serbest uzunluklara sahip ve elastik burkulma davranış bölgesinde yer alan standart IPN 300 kesitli kirişlerin yük-deformasyon eğrileri nümerik olarak ABAQUS [3] programı ile belirlendikten sonra, nümerik burkulma momenti değerleri geçmiş çalışmalarda geliştirilmiş olan ve farklı ülkelerin çelik standartlarında yer alan formüllerden elde edilen analitik yanal moment değerleri ile karşılaştırılacaktır. Bu çalışma sonucunda hangi formüllerin bütün geometrik önkusur şekli için güvenli moment değerlerini verdiği tespit edilecektir.

1.5. Literatür Özetleri

Ahnlen ve Westlund [4] tarafından yapılan çalışmada, yanal burulmalı burkulmaya maruz kirişlerin kritik elastik momentlerinin belirlenmesindeki parametrelerin etkisi dört ayrı yazılım programıyla incelenmiştir. Parametre olarak standartlarda da belirtilmiş olan moment düzeltme katsayıları (C1, C2, C3) kullanılmıştır. IPE500 kesitinde 8m ve 16m açıklığa sahip iki tür kiriş üzerinde analizler yapılmıştır. C3 gradyanı, profil çift simetri eksenli olduğu için ihmal edilmiş ve çalışmalar yalnız C1 ve C2 etkisini incelemek üzere gerçekleştirilmiştir. Geometrik önkusur şekli olarak kiriş elamanda ilk önce doğrusal analiz yapılmış ve analiz sonucundaki burkulma modu esas analize önkusur şekli olarak girilmiştir. Yükleme artırılarak adım adım uygulanmıştır. Sonuç olarak, yapılan dört ayrı analiz programında hesaplamalarda kullanılan C değerleri ile programın modelden direkt olarak hesapladığı değerler arasında farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. C1 ve C2 değerlerini moment dağılım

eğrilerinden alınan değerlerden ziyade, kiriş uzunluğuna, yanal sınır koşullarına ve yükün uygulandığı noktaya göre farklılık oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Van der Aa [5] yapmış olduğu çalışmada yanal burulmalı burkulma etkisi altındaki çelik I kirişlerinin tasarımında göz önünde bulundurulan önkusur etkisini incelemiştir. Bu kapsamda Eurocode 3 EN 1993-1-1, The Dutch National Annex [6] ve TARAS [7] tarafından belirlenmiş olan önkusur formülasyonlarını karşılaştırmıştır. Eurocode 3' deki önkusur etkisinin güvenli ve yeterli olup olmadığını araştırmıştır. Bu amaçla iki çeşit profil (IPE ve HEA) kullanmış ve üç ayrı yükleme (eğilme momenti, tekil yük ve yayılı yük) yapmıştır. Önkusuru hem geometrik önkusur hem de malzeme önkusuru olarak girmiştir. Eurocode 3' e göre önkusur şekli olarak eğilme burkulması modunu kullanmıştır. Burada burulma etkisi yoktur. The Dutch National Annex' e göre ise yanal burulmalı burkulma modu dikkate alınarak önkusur şekli girilmiş ve bu iki standartta da Eurocode 3 EN 1993-1-1' de bulunan yanal burulmalı burkulma eğrisi dikkate alınmıştır. TARAS' ın geliştirdiği yanal burulmalı burkulma eğrisine göre yapılan analizde de yanal ötelenme ve burulma etkisi birlikte girilmiş ve önkusur şekli olarak sinüs dalgası kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda TARAS' ın burkulma eğrisine göre yapılan çözümleme gerçeğe yakın değerler verirken (bazı durumlarda %5 sapma olabilir.); Eurocode 3 ve The Dutch National Annex' in yetersiz kaldığı nümerik olarak belirlenmiştir.

Ayhan [8] , dört adet kompakt, bir adet kompakt olmayan ve 4 adet Arcelor çift simetri eksenli, kuvvetli eksenine göre eğilme etkisine maruz toplam 9 ayrı enkesit özelliğine sahip I kesitli çelik kirişlerin yanal burulmalı burkulma davranışının sonlu eleman analizi ile TS648 [9] ve DIN4114 [10] yönetmeliklerinde geçen yanal burulmalı burkulma dayanımı ifadelerini kıyaslamıştır. Analizlerinde FEMAP sonlu eleman analiz programını kullanarak, malzeme olarak elasto-plastik lineer olmayan ve geometrik önkusur olarak da; kiriş başlıkları açıklığın 1/10000' i eğrilige sahip olacak şekilde kesitler modellemiştir. Farklı narinliklere, enkesitlere ve açıklıklara sahip kirişlerin yayılı yük etkisi altında analizleri yapılmıştır. Nümerik sonuçlar ile TS648 ve DIN4114' de bulunan yanal burulmalı burkulma hesaplamalarından elde edilen değerlerin çoğunlukla örtüşmediği gözlemlenmiş; yönetmeliklerin çarpılma rijitliği

etkisini etkin olarak almadığı ifade edilmiştir. Dolayısıyla kullanılan yönetmeliklerin yetersiz kaldığı saptanmıştır.

Eğilmez, Akbaba ve Vardaroğlu yapmış olduğu çalışmada [11] , yanal burulmalı burkulma kapasitesinin artırılabilmesi için noktasal veya sürekli destek elemanlarının yapım aşamasındaki burkulma davranışını incelemek ve kiriş burkulma boyunu azaltarak burkulma kapasitesini artıran bu yanal destek elemanlarının dayanım ve rijitlik gerekliliklerini araştırmışlardır. Bunun için narin gövdeli çift ve tek simetri eksenli doğrusal malzeme özelliğine sahip çelik I kiriş modellerini kullanmışlardır. Bu kiriş modellerine destek elemanlarının sayısal değerini önemli ölçüde etkilediği düşünülen $L_b/500$ yanal ötelenme, $(L_b/500)/d$ değerinde dönme açısına sahip geometrik önkusur verilmiştir. Kayma diyafram modeli ise daha önceki çalışmalarda kullanılmış olan birbirine bağlı küçük makas sistemlerden oluşmaktadır [12] . ANSYS [13] sonlu elemanlar analiz programı ile analizler gerçekleştirilmiş, kirişin en dış lifinde 210 MPa eğilme momenti oluşturduğu varsayılan tasarım momenti kabulü yapılmıştır. Yanal burulmalı burkulma kapasitelerinin bu seviyeye çıkarılmaları için gerekli olan diyafram rijitliğinin, uzunluğu boyunca desteklenmemiş kirişlerde ideal diyafram sıklığının 4 katı; yanal destek sağlanmış kirişler için ise 2 katı olduğu gözlemlenmiştir.

Kabir ve Bhowmick [14], mevcut standartların yanal burulmalı burkulma davranışı üzerindeki ifadelerinin eksik olduğunu, geometrik önkusur etkisinin gözardı edilerek tanımlamalar yapıldığını, dolayısıyla kiriş yanal burulmalı burkulma ve moment kapasitesi hesaplarının sanıldığından daha farklı sonuçlar verdiğini ileri sürmüşlerdir. Yaptıkları bu çalışmada sabit eğilme momenti etkisi altındaki farklı miktarda düzlem dışı eğrilik ve artık gerilme önkusurlarına sahip çelik I kirişlerin yanal burulmalı burkulma kapasitelerini incelemişler ve CAN-CSA S16-14 [15] standardından elde edilen değerler ile karşılaştırmışlardır. Bu amaçla 15 geniş başlıklı haddelenmiş, 15 geniş başlıklı kaynaklı, farklı açıklıklara sahip toplam 30 I profil kullanmışlardır. Geometrik önkusur olarak verilen düzlem dışı eğrilik $L/1000$, $L/2000$, $L/5000$ olarak üç ayrı değerde verilmiştir. Bunun yanı sıra artık gerilmeler de etki ettirilmiştir. Hem malzeme hem de geometrik olarak nonlinear, elastik burkulma ve nonlinear post buckling analiz yapmışlardır. Analiz sonuçlarına göre elastik olmayan davranışlarda

daha belirgin olmak üzere genel olarak tüm kiriş tiplerindeki burkulma kapasite değerlerinin standardın altında olduğunu gözlemlemişlerdir. Geometrik kusur miktarı azaldıkça moment kapasitesinin standardın belirlediği değere daha da yaklaştığı anlaşılmıştır. Haddelenmiş kiriş davranışının kaynaklı kirişlere göre, standart ile daha uyumlu olduğu, yine de bazı kaynaklı birleşime sahip kirişlerin de uyumlu değerler verdiği gözlemlenmiştir. Buna rağmen elde edilen tüm değerlerin CSA S16-14 [15] çelik yapılar standardındakinden daha düşük olduğu, geometrik önkusur miktarının moment kapasitesini dolayısıyla yanal burulmalı burkulma seviyesini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuşlardır.

Dou ve Pi yapmış olduğu çalışmada, yanal destekli kolonlarda geometrik önkusurun eğilme burkulmasına etkisini incelemişlerdir [16]. Önkusur olarak yaygın kullanılan yarım sinüs dalgası ya da özdeğer burkulma analizi (eigenbuckling analysis) yöntemlerinin kolonların inelastik burkulma şekilleri ve dayanımı hakkında gerçekçi sonuçlar vermeyeceğini, üretim ve sonrasında oluşan kusur şekillerinin gerçek davranış modellerinde sinüs ya da cosinüs eğrisi gibi belirgin bir şekil ihtiva etmeyebileceğini ifade etmişlerdir. Daha belirsiz kusur düzenleri de oluşabileceği belirtilmiştir. Daha doğru sonuçlar elde etmek için kolonun yanal deplasman kusuru olarak farklı noktalarından değerler verilmiştir. Bu doğrultuda kolon uzunluğu boyunca dörtte birine denk gelecek şekilde farklı eğrilik değerleri verilmiş ve yeni bir dalga şekli oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra diğer geleneksel yöntemler olan özdeğer analiz burkulma şekli, yarım sinüs dalgası şekli, yarım dalga özdeğer analiz şekli ile bunların kombinasyonlarından da oluşan farklı önkusur şekilleri girilmiştir. Kullanılan tüm dalga şekillerinin genliği $L/1000$ olarak alınmıştır. Farklı önkusur şekillerinin burkulma kapasitesine etkisini görebilmek için ABAQUS [3] sonlu eleman analiz programı ile nümerik analizler yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre; bağlantı elemanın rijitliği arttıkça önkusur etkisi daha da belirginleşmektedir. Rijitlik arttıkça tek yarım dalga önkusur şekli ve özdeğer (eigenbuckling analysis mode) analizinden elde edilen şekil yetersiz kalmakta ve normalden daha fazla burkulma yük değeri vermektedir. Bu da kritik burkulma yükü hakkında yanıltıcı bir sonuç oluşturmaktadır. Bağlantı rijitliği düşük olduğunda tüm önkusur şekillerinin analizlerde verdiği değerler birbirine oldukça yakın çıkmıştır.

Yine benzer bir çalışmayı Gil ve Yura yapmışlardır [17] . Bu araştırmalarında yükseklik boyunca orta noktasından destekli kompozit kolonlarda geometrik önkusur etkisini incelemişlerdir. Geometrik önkusur şeklinin genliği olarak $L/500$ (L; kolon yüksekliği) değerini kullanmışlardır. Üç tip şekil denemişlerdir. Simetrik tek dalga, asimetrik çift dalga ve nonsimetrik çift dalga şekillerini önkusur deseni olarak test etmişlerdir. Analiz sonuçlarında geometrik önkusur şeklinin kolon burkulma kapasitesiyle yakından ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Özbaşaran , çelik I kesitli konsol kirişlerin yanal burulmalı burkulmasını farklı yük tipleri için incelediği tez çalışmasında, sonlu farklar yöntemini ile enerji yöntemini kullanarak elde ettiği sonuçları ABAQUS [3] yazılımından elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmıştır [18]. Elde ettiği sonuçların bir kısmı örtüşse de, bazı modellerde yük kesme merkezinden uzaklaştıkça azalan eleman boyu ile birlikte eleman levha davranışı göstermiş, çubuk eleman özelliğini yitirmiştir. Bu durum da, ABAQUS [3]' den elde edilen verilerle diğer kıyas değerleri arasında farklara neden olmuştur. Geometrik önkusur ve malzeme kusurlarının yanal burulmalı burkulmaya doğrudan etkisinin olduğunu ve yanal destekler kullanılarak burkulmaya boyu azalmasıyla birlikte burkulma direncinin daha da artacağını belirtmiştir.

Polat , çalışmasında önkusur etkisinin gerçek yapı davranışını modellemede önemli bir faktör olduğunu ifade etmiş, kaynaklı I kolon – I kiriş birleşimi analizlerinde dönme kapasitelerini belirlerken kesite plan düzleminde $L/300$; düşeyde ise $L/250$ değerinde önkusur vermiştir [19].

Vales ve diğ., eğilme momenti etkisindeki narin ve geometrik önkusurlu kirişlerin yük taşıma kapasitesini inceledikleri çalışmalarında analitik yöntemler ve standartlarda belirlenen ifadelerle lineer olmayan sonlu eleman analiz değerlerini kıyas etmişlerdir [20]. ANSYS[13] yazılımı kullanmışlardır. Geleneksel yaklaşım olan ilk özdeğer burkulma şeklinin (eigenbuckling mode) kullanılmasının deneysel ve analitik araştırma sonuçlarıyla tam olarak örtüşmeyebileceğini belirtmişlerdir. Modellerde geometrik önkusur tanımlanmış; yanal ötelenme olarak yarım sinüs dalgası şekli ve dönme açısı verilmiştir. Çarpılma etkisi de göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan analizler sonucu, narinlik değeri $\lambda \geq 0.7$ olan kirişlerde stnandartlardan elde edilen

sonuçlar ile ANSYS [13]' den elde edilen sonuçların uyumlu olduğu grlmştir. $\lambda \leq 0.7$ olduğu durumda ise standartlarda belirtilen dayanım değerinin ANSYS [13]' den elde edilen değerden %2 - %6 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Amprik formüllerden elde edilen dayanım değerinin ise hem standartlardakinden hem de analiz programınıninkinden daha kk çıktığı ve güvenli tarafta kaldığı ifade edilmiştir.

Gendy ve Hanna soğuk haddelenmişt sigma kesit Şekline sahip elik kirişlerde geometrik nkusur Şeklinin moment kapasitesine etkisini araştırmışlardır [21]. Soğuk haddelenmişt narin sigma elik kirişlere 3 ayrı tip nkusur Şekli girilmiştir. Bunlar; elastik burkulma modu, yarım sinüs dalgası Şekli ve bu iki durumun kombinasyonu olan bir nc Şekil girilmiştir. Modellerde dönme ve çarpılma etkisine izin verilmiştir. Elastik burkulma analizinde zdeğer burkulma değerlerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. İlk 5 zdeğer moduna bakılmıştır. Kısa kirişler için; 1. zdeğer modu buruşmalı burkulma (distorsional buckling), diğer tüm modlar başlık yerel burkulması (local buckling) olarak tanımlanmıştır. Orta açıklıklı kirişlerde ise 2. zdeğer burkulma modu yanal burulmalı burkulma (lateral torsional buckling); 1., 3., 4. ve 5. modlar ise yerel veya buruşmalı burkulma olarak belirlenmiştir. Nonlinear analizde ise bu 5 zdeğer burkulma analizinden elde edilen Şekil ilk önkusur olarak girilmiştir. Kısa kirişler uzun kiriş davranışına göre AISI-2012 [22] sonuçlarıyla daha yakın değerler vermiştir. Sonuç olarak, nkusur Şeklinin dayanıma tesiri kısa ve orta uzunluktaki kirişlerde yerel ve buruşmalı burkulma davranışı üzerinde etkili olurken; uzun açıklıklı kirişlerde yanal burulmalı burkulma üzerinde etkili olduğu kanısına varılmıştır.

Vales ve Stan, basit mesnetli IPE200 elik kirişleri Shell (kabuk) eleman ve solid (katı) eleman olarak modelleyerek yanal burulmalı burkulma davranışını ve yük taşıma kapasitelerini sonlu eleman analiz yöntemi ile araştırmışlar ve bu amaçla ABAQUS [3]' de Shell modelleme; ANSYS [13]' de ise solid modelleme yapmışlardır [23] . Bu modellerde malzeme ve geometrik olarak nonlinear analiz gerçekleştirmişlerdir. Geometrik nkusur olarak ilk zdeğer (eigenmode) moduna göre düzlem dışı yerdeğiştirme ile burulma dönmesi verilmiş ve bunlar genlik değeri L/1000 olan sinüs dalgası Şekli olarak düzenlenmiştir. Farklı narinlik değerlerine ($\lambda=0,3$; $\lambda=0,6$; $\lambda=1,2$) sahip artık gerilme etkisi olan modeller ile artık gerilme etkisi olmayanlar

kıyaslanmıştır. Yapılan analizler sonucunda ABAQUS [3] Shell eleman modellemesinden elde edilen sonuçlar ANSYS [13] solid eleman değerlerinden yaklaşık %2 - %6 daha fazla çıkmıştır. Bu farkın Shell eleman modellemesi yapılırken gövde ve başlık birleşim yerinin çakışması sonucu farklı rijitlik gösteriyor gibi algılanmasından kaynaklandığını düşünmüşlerdir. Önkusurun yük taşıma kapasitesine etkisinin görülme ihtimali yüksek olan orta narinlik değerine sahip ($\lambda=0,6$) model sonuçlarında her iki analiz programının uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Yanal burulmalı burkulma ve yük taşıma kapasitesi davranışı araştırmaları yapılırken yaygın olarak Shell eleman kullanılıyor olsa da solid model kullanmanın daha doğru olduğunu ifade etmişlerdir.

Unterweger ve diğ., basınç başlığından desteklenmiş kirişler ile orta noktasından desteklenmiş kolonlarda önkusurların stabiliteye etkisini incelemiştir [24]. Destek elemanın rijitliğinin azalması elastik burkulma yükünü düşürdüğünü ifade etmişlerdir. Geometrik önkusur düzeninin yalnızca kiriş boyunca şekline bağlı olmayıp, bu şeklin genliğinin de önemli ölçüde burkulma yükünü etkilediğini belirtmişlerdir. Yanal desteklenmiş elemanlarda ilk en düşük özdeğer modunun en kritik yük değerini belirlemede yetersiz kaldığını, daha rijit desteklerin bulunduğu burkulma mod şekillerinin daha küçük burkulma yüküne neden olabileceğini ileri sürmüşlerdir. İlk özdeğer burkulma şekline göre yapılan önkusur varsayımlarının temel nonlineer analizlerde kullanılabileceğini fakat daha gerçekçi sonuçlara varmak için geometrik önkusur şeklinin ve genliğinin farklı rijitliklere sahip destek elemanlı modellerden elde edilen burkulma modlarına da bakılarak en kritik burkulma yükünü belirlemede kullanılacak önkusur modeline karar verilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

Boissonnade ve Somja, çelik profillerde geometrik ve malzeme önkusurunun yanal burulmalı burkulma davranışına olan etkisini incelemişler, bu amaçla IPE500 ve HEB300 profiller kullanmışlardır [25]. Malzeme önkusuru olarak üç tip artık gerilme dağılımı uygulamışlardır. Geometrik önkusuru ise global ve yerel (local) olmak üzere iki ayrı şekilde tanımlamışlardır. Global önkusur düzeni olarak; zayıf eksen etrafında yerdeğiştirme ve burulma dönmesi, sinüsoidal olarak kiriş uçlarında 0, açıklık ortasında maksimum olacak şekilde genlik değerleri verilmiştir. Bunun dışında alt ve üst başlık yanal yerdeğiştirmesiyle de kusur düzeni oluşturulmuştur. Yerel önkusur

ise, alt ve üst başlık ile gövdede yarım sinüs dalgası şekli verilerek girilmiştir. Analizler sonlu eleman analiz programı ile yapılmış ve sonuç olarak; yanal burulmalı burkulma davranışı üzerinde yanal yerdeğiştirme önkusur etkisinin, burulma önkusurundan daha etkili olduğu ve bu ikisinin kombinasyonu olarak bir önkusur şekli tanımının yapılmasının daha doğru sonuçlar vereceğini ifade etmişlerdir. Genellikle basınç başlığı olan üst başlık önkusurunun yapı davranışını önemli ölçüde etkilediği düşünülse de, bazı görüşlerin (Villete 2004) [26] çekme tesirinde olan alt başlık önkusurunun da etkili olabileceğini ileri sürmüşlerdir. Bu durum göz önüne alınarak yapılan analizlerde önkusurlu alt başlığın yanal burulmalı burkulma davranışına olan etkisi IPE500 profil sonuçlarında pek bir fark oluşturmazken, HEB300 profillerde yaklaşık %10 farklılık olduğu gözlemlenmiştir. Yerel önkusurların varlığı yapı davranışında çok etkili olmadığı anlaşılmıştır. Özdeğer burkulma analizinden elde edilen burkulma şekli basınç başlığına uygulanmış ve genlik değeri $L/1000$ alınmıştır. Bu özdeğer analizinden elde edilen sonuçlar ile diğer girilen önkusur şekillerinden elde edilen sonuçlar uyumlu görülmüştür. Genel olarak bakıldığında önkusur deseni olarak, genlik $L/1000$ değerinde olan yanal yerdeğiştirme, burulma dönmesi kusuru ve artık gerilmelerin etki ettirilmesi ile birlikte çelik kirişlerde yanal burulmalı burkulma davranışının gerçekçi analizinin yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

Amouzegar ve diğ., yapmış oldukları araştırma kapsamında soğuk haddelenmiş ince cidarlı çelik kolonlarda geometrik önkusurların eleman davranışına etkisini incelemişlerdir [27]. Bu araştırma kapsamında farklı uzunluklardaki çelik elemanlara değişken değerlerde global ve local (yerel) önkusur tanımlamaları yapmışlardır. ABAQUS [3] yazılımı ile yapılan analizler sonucu; uzun elemanlarda global önkusurlar (zayıf ekseninde eğilme kusuru) önemli rol oynarken; kısa elemanlarda burkulma ve burkulma sonrası davranışta kesit önkusurlarının (dönme-buruşma kusuru) yük taşıma kapasitesinde etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Uzun profillerde genlik değeri maksimum $L/960$ değerinde olan yarım sinüs dalgası kusur şekli yaklaşımının daha gerçekçi olacağı kanısına varılmıştır.

Schillinger [28], yapmış olduğu çalışmada Hasham ve Rasmussen (1997)' nin [29] deneysel olarak daha önceden test ettikleri 6 adet I enkesitli kirişlerin yerel ve global önkusurlarının birleşimi olan kusurlu kirişler elde etmiştir. Bu önkusurlar; geometrik

önküsür, kalınlık önküsuru (thickness imperfection), artık gerilme, malzeme önküsuru içermektedir. Bu kırışlerin bu önküsurlar altında stabilite analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak yapılan tüm yükleme durumlarında Hasham ve Rasmussen' in deneysel sonuçlarıyla yakın değerlere ulaşmış ve eksenel basınç yüklerine maruz elemanların önküsurdan özellikle de global önküsurdan çok fazla etkilenmediği anlaşılmıştır.

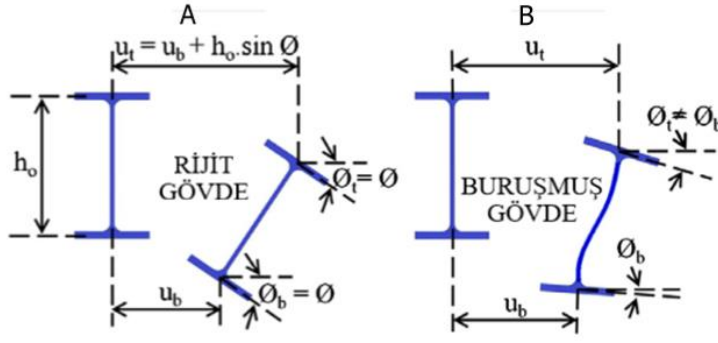
Yapılan literatür çalışmalarında yanal burulmalı burkulma durumları için önküsür etkisinin dikkate alındığı ve bu önküsür durumunun önemli bir etken olduğu görölmektedir. Fakat önküsür deseni olarak yarım sinüs dalgası ve değişken genlik değerlerine sahip yanal eğilme deformasyonu denenmiştir. Bu da; farklı önküsür desenlerine sahip olabilecek kırışlerin yanal burulmalı burkulma etkisi altında nasıl bir davranış sergileyeceğini tahmin etmede eksik kalmaktadır. Her ne kadar kırış elemanlar burkulma sonrası genel olarak sinüs dalgası desenine yakın bir form alsalar da, maruz kalacakları farklı tesirlerden dolayı bu önküsür şeklinin de farklılık gösterebileceği unutulmamalıdır. Bu çalışmada farklı önküsür düzenleri verilerek analizler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2.GENEL KİRİŞ DAVRANIŞI

2.1. Burkulma Modları

Çelik elemanlarda kesitlerin narinlik derecesine göre yerel (local) ve yanal burkulmalar görülebilir. Bu çalışmada kullanılan çift simetri eksenli IPN profiller kompakt olduğu için yerel burulma ve buruşma (distorsional buckling) oluşmayacaktır. Hem başlıkları hem de gövdeleri kompakt olan, yani yerel burkulma riskine sahip olmayan, kesitlere kompakt kesit adı verilmektedir. Kiriş enkesitinin eğilme düzlemine dik yanal ötelenmesi (yanal eğilme) ve aynı anda kayma merkezi etrafında dönmesi (burulma) ile yanal burulmalı burkulma durumu ortaya çıkar. Burulma, gövdede herhangi bir buruşma olmadan, kesitin rijit bir şekilde dönmesiyle gerçekleşir. Kirişe etki eden yüklerin, asal eksenlerden birinin doğrultusunda yüklenmesi ve yükün kayma merkezinden geçtiği durumda oluşan eğilme durumuna basit eğilme denir (bending). Eğilme etkisindeki kiriş elemanda yükler kayma merkezinden geçmiyorsa eğilmenin yanı sıra burulma (torsion) da oluşur.

Kirişlerin aynı anda yanal ötelenme ve dönmeye maruz kaldığı burkulma şeklinde yanal burulmalı burkulma (lateral torsional buckling) adı verilir. Yanal burulmalı burkulma esnasında gövdenin de eğilmeye uğradığı burkulma şekline de yanal buruşmalı burkulma (lateral distortional buckling) adı verilir. Şekil 2.1’de bu burkulma modları gösterilmiştir.



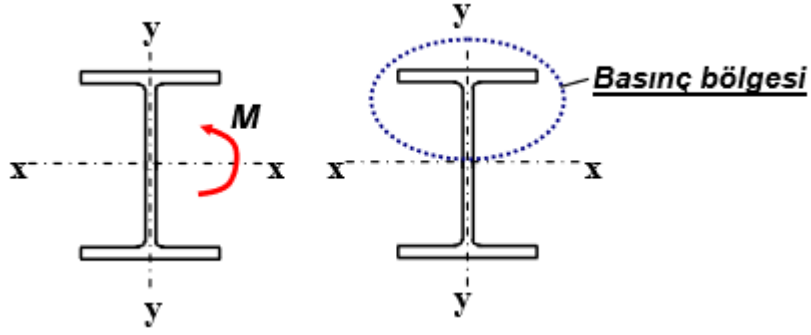
Şekil 2. 1. Burkulma Modları [30]

2.2.Yanal Burulmalı Burkulma

Her çelik elemanın belirli bir yük taşıma kapasitesi vardır. Geometrik önkusurlu elemanların, bu kritik yük taşıma kapasitesine kadar yaptığı deformasyonlar kabul edilebilir sınırdadır. Stabilite problemi oluşturmaz ve yapı kararlı davranır. Simetri ekseninden yüklenmiş olan önkusurlu elemanlar, kritik yük taşıma kapasitelerine ulaşıncaya kadar düzlemi dışı deplasman ve dönmeye uğrayabilirler. Bu davranış biçimi, kuvvetli eksen yani x eksenini etrafında eğilme momentine neden olabilecek yüklemelerin sonucunda meydana gelen bir davranış biçimidir [31]. Yapılan yükleme etkisiyle kuvvetli eksen, diğer bir ifade ile mukavemet momenti ve atalet momentinin diğer eksene göre daha büyük olduğu eksen, etrafında eğilme etkisi meydana gelir. Zayıf eksen etrafında dolayısıyla zayıf yönde burkulma oluşur. Elemanın kayma merkezi etrafında dönmesi ile de burkulma davranışı ortaya çıkar. Kiriş basınç başlığı olan üst başlık, aksenal yüklü kolon gibi davranır. Burkulma eğilimindedir. Çekme başlığı ise buna belirli bir oranda karşı koyabilir. Bu burkulma süreci, kiriş eksenini etrafında dönmenin de eşlik ettiği zayıf eksen etrafında ikinci mertebe momentlerinin oluşmasına neden olur. Dolayısıyla kiriş elemanında yanal burulmalı burkulma davranışı hakim olur.

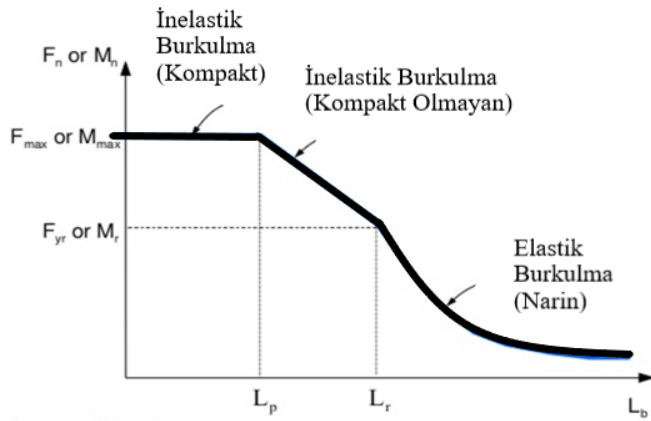
Yanal burulmalı burkulma, yanal yönde yeterli olarak desteklenmemiş basınç başlığının etkisiyle meydana gelir. Basınç başlığı mesnet noktaları arasında düzlem dışı burkulma eğilimindedir. Çekme başlığı düzlem içi deforme olma eğiliminde

olduğu için kiriş yanal dönme hareketi yapar. Yanal burulmalı burkulma oluştuğu zaman plastik moment kapasitesine ulaşamaz [32]. Burkulma sınır durumu hesaplarında bu yüzden basınç bölgesindeki etkin olan kesitin atalet yarıçapı esas alınır [33].



Şekil 2. 2. I- Enkesitli Elemanın Basınç Bölgesi [33]

Açıklığı fazla ince cidarlı kiriş elemanların, açıklığı daha az olanlara göre daha düşük yük değerlerinde burkulması beklenir. Yanal desteklerle burkulma boyunun azaltılmadığı kirişlerde burkulma yükü kiriş uzunluğu ile değişkenlik gösterir (Şekil 2.3).



Şekil 2. 3. Burkulma Dayanımının Setrbest Açıklık İle Değişimi [34]

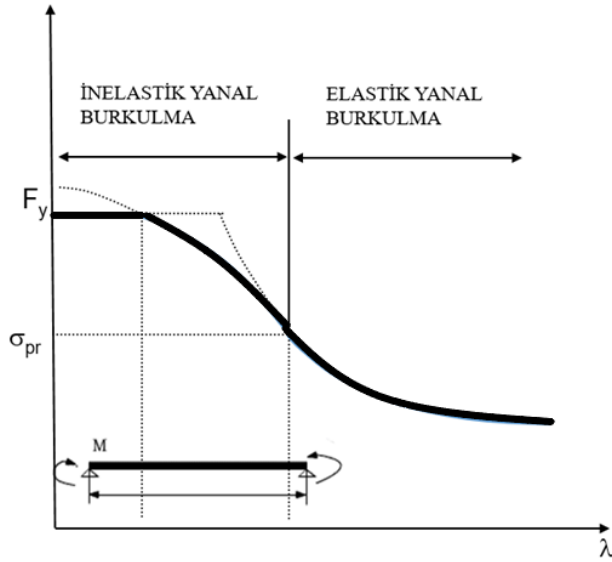
Fakat yanal burulmalı burkulma davranışında yalnızca kiriş uzunluğu ve kesit özelliği değil, bunlar dışında da bir takım faktörler etkilidir. Bunlar, Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2. 1. Yanal Burulmalı Burkulmayı Etkileyen Faktörler [35]

Malzeme Özellikleri	-Kayma Modülü (Shear Modulus, G) -Elastisite Modülü (Youngs’s Modulus, E)
Kesit Özellikleri	-Burulma Sabiti (Torsional Constant, I_t) -Çarpılma Sabiti (Warping Constant, I_w)
Geometrik Özellikler	-Kiriş Uzunluğu (Length of the Beam, L) -Geometrik Önkusur (Geometric Imperfection)
Sınır Koşulları	-Güçlü Eksende Eğilme -Zayıf Eksende Eğilme
Yük	-Tekil Yük -Yayıllı Yük
Yük Uygulama Yeri	-Alt Başlık -Üst Başlık -Kayma Merkezi

2.3. Elastik Yanal Burulmalı Burkulma

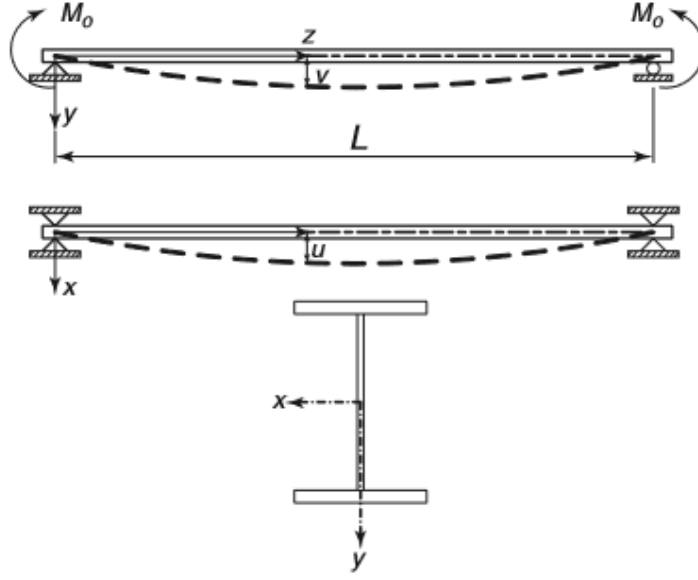
Timoshenko, yanal desteği bulunmayan kirişler için yanal burkulmanın en önemli tasarım kriteri olduğunu ifade eder. Böyle kirişlerde belli bir yük değerine kadar kiriş, stabildir. Eleman şartları (yanal destek, mesnet koşulları) burkulmayı engelleyeme yeterli değilse, yük belli bir değere ulaştığında eleman stabilitesini kaybeder ve yanal deplasmanlar ile dönmeler meydana gelir. Bir diğer ifadeyle, yük kritik bir değere ulaştığında stabilite kaybı başlar [36]. Burkulma olayının başladığı anda kirişin bütünü elastik sınırlar içinde kalıyorsa, bu burkulma moduna elastik burkulma adı verilir.



Şekil 2. 4. Elastik Yanal Burulmalı Burkulma [37]

Bu çalışmada, elastik yanallı burulmalı burkulma davranışı için yapılan kabuller aşağıdaki gibidir ve Şekil 2.5' de bu kabuller şekil üzerinde belirtilmiştir [31] ;

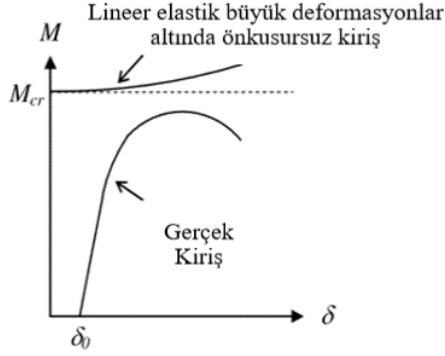
- 1-Kiriş elastik davranış altındadır.
- 2-Basit mesnet koşulları geçerlidir.
- 3-Kuvvetli eksen etrafında uniform eğilme momentine maruz kalmıştır.
- 4-Kesit çift simetri eksenlidir.
- 5-Eğilme kuvvetli eksen etrafında oluşur.
- 6-Malzeme elastik, homojen ve izotropiktir.
- 7-Kesit kompakt olduğu için gövdede ve başlıklarda yerel burkulma meydana gelmemiştir.
- 8-Kesitte burkulma boyunca buruşma oluşmamıştır.
- 9-Şekil değiştirmelerin (deplasman ve burulma açısı) küçük olduğu kabul edilir.



Şekil 2. 5. Yanal Burulmalı Burkulma Durumu [31]

Teorik olarak yanall burulmalı burkulma ideal elastik şartlar altında geçerlidir. Yani geometrik önkusurun olmadığı, kirişin mükemmel geometride olduğu varsayılır. Fakat üretilen hiçbir kesit gerçekte kusursuz değildir. İdeal (önkusursuz) kiriş kritik moment değerine ulaşıncaya kadar deforme olmaz, kritik değere ulaşıldıktan sonra ani bir stabilite kaybına uğrar ve yanall deformasyonlar meydana gelir. Bu andan itibaren yükün en ufak bir artışı bile büyük deplasmana yol açar. Önkusursuz kiriş, kritik moment değerine ulaşmadan düzlem dışı yer değiştirmelere ve dönme etkisine maruz kalmaz. Burkulmanın gerçekleştiği moment değeri, kirişin stabilitesini kaybettiği, sabit yükte deformasyonların gerçekleştiği momente karşılık gelir. Bu burkulma türüne de dallanma (bifurcation) burkulması adı verilmektedir. Önkusurlu kirişlerde ise durum daha farklıdır. Burkulma, dallanma burkulması olarak meydana gelmez. Burkulma oluşmadan kirişler önkusura sahip olduğu için daha farklı bir davranış sergilerler. Kiriş eleman yükleme gerçekleştikten sonra daha büyük yer değiştirme ve dönme deformasyonlarının olduğu nihai bir limit moment değerine ulaşır. Deformasyonlar arttıkça moment değerinde azalmalar görülür. Bu burkulma da limit yük burkulması olarak ifade edilir [38]. Artan moment değerine karşılık şekil değiştirme eğrisi Şekil 2.6'da verilmiştir. Görüldüğü üzere, ideal kiriş kritik moment

değerine ulaşıncaya kadar herhangi deformasyona maruz kalmamaktadır. Geometrik önkusurlu gerçek kiriş davranışı incelendiğinde ise; yük arttıkça deformasyon değerleri değişmektedir. Özellikle kritik yük değerine yaklaştıkça deformasyonlar artmaktadır. Fakat yine de teorik moment olan M_{cr} değerini aşmamaktadır.



Şekil 2. 6. Artan Yük Etkisi Altında İdeal Ve Önkusurlu Gerçek Kiriş Davranışı [35]

2.4. Kesitlerin Sınıflandırılması

Eğilme momenti etkisindeki enkesitler yerel burkulma sınır durumu dikkate alındığında;

-Kompakt

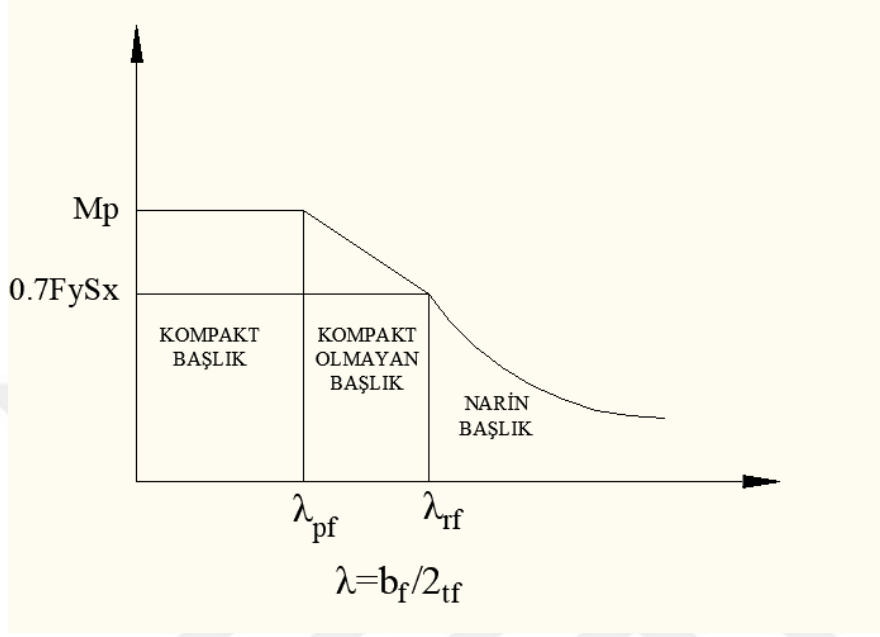
-Kompakt olmayan

-Narin

olmak üzere üçe ayrılırlar.

λ_p (plastik narinlik oranı) sınır değerini aşmayan (kompakt enkesit parçalı) enkesitler kompakt olarak sınıflandırılırlar. Basınç bileşeninin etkisindeki en az bir enkesit parçasının genişlik (çap) / kalınlık oranı λ_p sınırını aşan; fakat tüm enkesit parçaları için λ_r (elastik narinlik oranı) 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 [39]. Şekil 2.7’de bu 3 durum gösterilmiştir.



Şekil 2. 7. Narinlik Değerlerine Karşılık Gelen Eğilme Momenti Dayanımı [40]

Kompakt kesitler; yerel burkulmaya uğramadan moment ve dönme kapasitesine ulaşabilen ve burkulmaların kesit kapasitesine ulaşıldıktan sonra meydana geldiği kesitlerdir. Kompakt kesitlerde yerel burkulma görülmediği için, yerel burkulma sınır durumu hesabı yapmaya gerek yoktur. Bu çalışmada kompakt IPN profiller kullanılmıştır.

2.5. Önkusur Tanımları

Çelik yapı elemanları, endüstriyel üretim sürecinden, nakliye oluncaya kadar bekletilmek üzere istiflenmesine; nakliyeden şantiyede montaj sırasına kadar birçok farklı yükleme ve sınır durumuna maruz kalırlar. Çelik elemanların yerinde yapımı mümkün olmadığı için daha önceden fabrikasyonu gerçekleştirilip, ilgili yerlere

getirilirler. Bu durum, defalarca kaldırılıp indirilme gibi sebeplerle taşıma ve nakliye sırasında öngörülemeyen kuvvetlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bunların yanı sıra işçilik hatalarından da kaynaklı sorunlar oluşmaktadır. Dolayısıyla çelik yapı elemanları asla hesaplarda varsaydığımız şekilde kusursuz ve mükemmel geometride olamazlar. Tasarım hesaplarında elde ettiğimiz sayısal değerler, gerçek değerlerin üstünde kalmaktadır. Diğer bir deyişle, tasarım esnasında varsayılan eleman davranışı gerçek eleman davranışından farklıdır ve varsayılan bu gerçek dışı davranış tasarımcıların burkulma ve yük-deplasman ilişkisi konularında güvenli olmayan varsayımlar yapmasına neden olacaktır.

Çelik eğilme elemanlarının (kirişlerin) etki eden yükler altındaki davranışını en gerçekçi bir şekilde ortaya koymak için geometrik önkusurlar dikkate alınmalıdır. Önkusurlu bir kirişin deneysel burkulma yük değeri, kusursuz elemanın teorik olarak belirlenen nihai taşıma gücüne göre önemli derecede düşük olabilmektedir. Önkusurları genel olarak 5 başlık altında toplamak mümkündür:

1-Geometrik Önkusur (Geometric Imperfection): Çelik elemanın şeklinde, mükemmel ve kusursuz şekline göre olan sapmalardır. Bu önkusur, kendi arasında yerel (lokal) ve genel (global) geometrik önkusur olmak üzere ikiye ayrılır. Yerel önkusurda kesitin belli kısımlarında bölgesel kusurlar bulunurken, global önkusurda kesitin tamamı asıl şeklinden farklı bir şekile sahiptir.

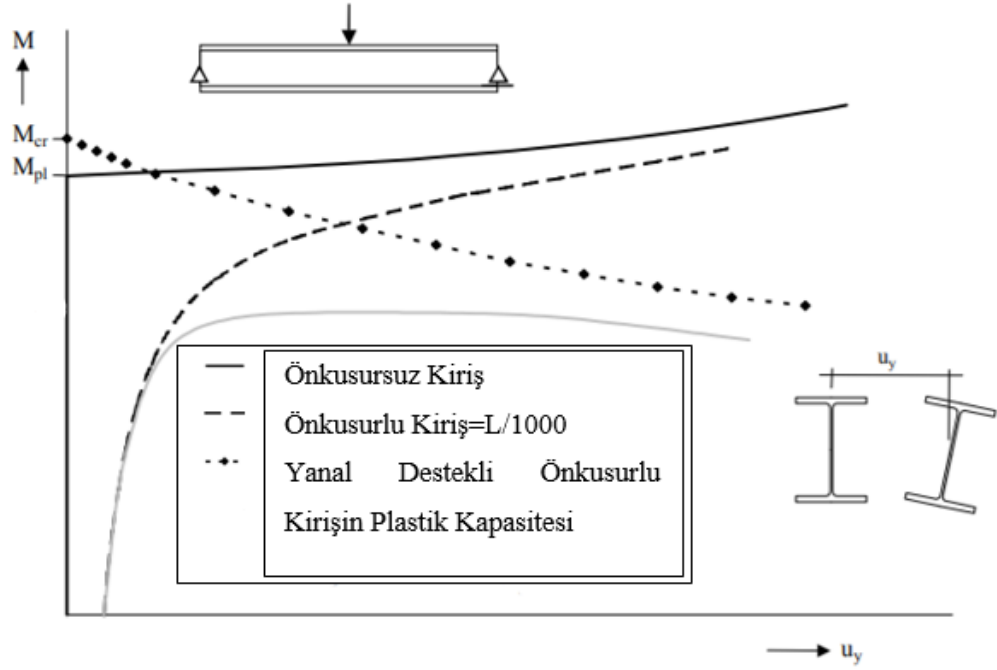
2-Malzeme Önkusurları (Material Imperfection): Elemanın malzeme özelliklerinden (Elastisite modülü, akma gerilmesi, poisson oranı vb.) kaynaklı değişiklikleri ifade eder.

3-Artık Gerilmeler (Residual Stress)

4-Kalınlık Önkusuru (Thickness Imperfection)

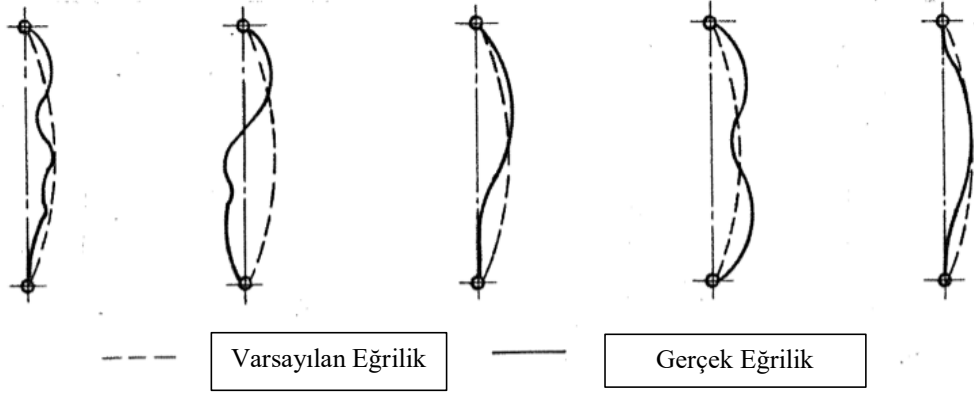
5-Mesnetlenme ve Yüklemeden Kaynaklı Önkusurlar (Boundary Imperfections-Loading Conditions)

Yukarıda sayılan tüm önkusurlar burkulma davranışında etkilidir. Basınç ve eğilme altındaki elemanın yük taşıma kapasitesini düşürürler. Genel bir burkulma yükü hesabı yapılırken tüm bu ihtimallerin göz önünde bulundurulması doğru sonuca daha da yaklaştıracaktır [39]. Geometrik önkusurlu kirişlerde, bu kusurlar arttıkça burkulma momentinde düşüş olur. Kritik elastik burkulma yükü ve plastik kapasite arasındaki ilişki Şekil 2.8’ de gösterilmiştir [41].



Şekil 2. 8. Kritik Elastik Burkulma Yükü Ve Plastik Kapasite Arasındaki İlişki [41]

Geometrik önkusur genliği sınırlandırılmaya çalışılsa da kusurun dağılım şeklinin belirlenmesi zordur. Basınç etkisindeki elemanın yük taşıma kapasitesinde herhangi bir önemli hataya sebep vermeyecek şekilde, geometrik önkusurun genel olarak sinüs eğrisi şeklinde alınabileceği genel bir görüştür. Farklı eğrilik biçimleri Şekil 2.9’da gösterilmiştir [42].



Şekil 2. 9. Farklı Önkusur Şekilleri ve Yapılan Kabuller [42]



3-ANALİTİK ÇALIŞMA

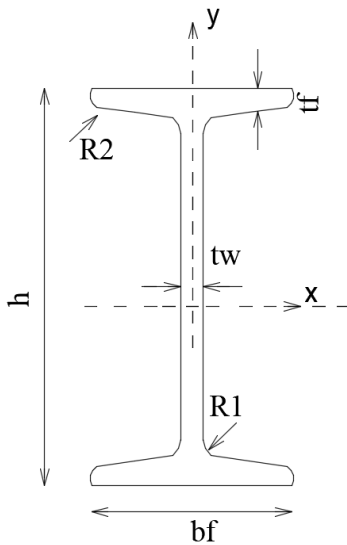
Analitik çalışmada; yanal burulmalı burkulma yüklerini belirlemek ve nümerik analizler sonucu elde edilen P_{cr} değerlerini kıyaslayabilmek için AISC-LRFD (2016) (American Institute of Steel Construction-Amerikan Çelik Şartnamesi) [39], EUROCODE-3 (Avrupa Çelik Şartnamesi) (2005) [43] yönetmeliklerinde bulunan formülasyonlar ile Galambos (1998) [44]' nin geliştirmiş olduğu formüller kullanılmıştır. Bu sonuçlar arasındaki farklılıklar yorumlanmıştır.

3.1. Yönetmeliklerde Belirlenmiş Yanal Burulmalı Burkulma İfadeleri

3.1.1 AISC-LRFD [39] ÇÖZÜMÜ

Kesit özelliğinin belirlenmesi

Bu çalışmada, standart IPN300 kesit kullanılmıştır. IPN 300 profilin kesit detayları, Şekil 3.1 ve Çizelge 3.1'de verilmektedir.



Şekil 3. 1. Kiriş Kesiti

Çizelge 3. 1. IPN300 Kesit Özellikleri

IPN300 Kesit Özellikleri		
A	Kesit Alanı	6900 mm ²
h	Kesit Yüksekliği	300 mm
b _f	Kesit Genişliği	125 mm
t _f	Başlık Kalınlığı	16.2 mm
t _w	Gövde Kalınlığı	10.8 mm
I _x	x-eksenine göre atalet momenti	9800 x 10 ⁴ mm ⁴
I _y	y-eksenine göre atalet momenti	451 x 10 ⁴ mm ⁴
i _x	x-eksenine göre atalet yarıçapı.	119 mm
i _y	y-eksenine göre atalet yarıçapı.	25.6 mm
W _{ex} = S _x	x-eksenine göre elastik mukavemet momenti	653 x 10 ³ mm ³
W _{ey}	y-eksenine göre elastik mukavemet momenti	72.2 x 10 ³ mm ³
W _{px} = W _y	x-eksenine göre plastik mukavemet momenti	762 x 10 ³ mm ³
W _{py}	y-eksenine göre plastik mukavemet momenti	121 x 10 ³ mm ³
J	Burulma Sabiti	56.8 x 10 ⁴ mm ⁴
C _w	Çarpılma Sabiti	91.8 x 10 ⁹ mm ⁶

Şartnameye göre bir elemanın burkulma hesabını yapmadan önce, elemanın enkesit özellikleri belirlenmelidir. Bunu belirlerken elemanın genişlik/kalınlık oranları dikkate alınır. Enkesitleri özellikleri bakımından üçe ayırmaktadır. Bunlar;

-Kompakt Kesitler

-Kompakt Olmayan Kesitler

-Narin Kesitler

Bu tez çalışmasında çift simetri eksenli kuvvetli eksen etrafında eğilme etkisindeki I enkesitler kullanıldığı için yönetmeliğin ilgili çizelgesinden alınan sınır değerleri (Çizelge 3.2) ile hesaplar yapılarak seçilen kesitin özelliği belirlenmiştir.

Çizelge 3. 2.Eğilme Momentinin Basınç Bileşeni Etkisindeki Enkesit Parçalarının Genişlik/Kalınlık Oranları

Tanım	λ Genişlik/ Kalınlık Oranı	λ_p (Kompakt/ Kompakt Olmayan)	λ_r (Kompakt Olmayan/ Narin)
Başlık	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Gövde	h/t_w	$3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

Yukarıdaki çizelgeye göre yapılan hesaplamalar sonucu kullanılacak kesitin başlık ve gövdesinin kompakt olduğu belirlenmiştir. Çalışma boyunca kullanılacak kesit tanımının kompakt çift simetri eksenli, kuvvetli eksenine göre eğilmeye maruz kalan I kesitli profil olduğu ortaya konmuştur. Başlık ve gövde kompakt olduğu için kiriş elemanlarda herhangi bir yerel burkulma görülmeyecektir. Dolayısıyla yerel burkulma hesabı yapmaya gerek olmadığından direkt olarak yanal burulmalı burkulma hesabı yapılmıştır.

Akma sınır durumu

Akma sınır durumu için karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n ;

$$M_n = M_p = F_y W_{px} \quad (3.1)$$

Burada, M_p plastik eğilme momenti; F_y karakteristik akma gerilmesi; W_{px} x-ekseni etrafında plastik mukavemet momentidir.

Moment Düzeltme Katsayısı

Yanal burulmalı burkulma hesap adımlarına geçmeden önce tüm denklemlerde kullanılacak olan C_b moment düzeltme katsayısını belirlemek gerekir. Kirişler her zaman uniform yükleme ve bunun sonucu meydana gelen sabit moment dağılımına sahip olmayabilirler. Maruz kaldıkları yükleme ve mesnet koşulları sonucu kiriş eleman boyunca uniform olmayan moment etkisi oluşabilmektedir. Kiriş boyunca sabit bir moment dağılımı yok ise, yanal burulmalı burkulma momenti eğilme momentinden daha büyük değerde olacaktır. Dolayısıyla eleman için gerçekte oluşan sınır moment değerlerini belirlemek gerekmektedir [45]. C_b katsayısı kiriş boyunca momentin işaret değişimini hesaba katan bir katsayıdır. C_b değeri arttıkça yanal burkulma tehlikesi azalır [46].

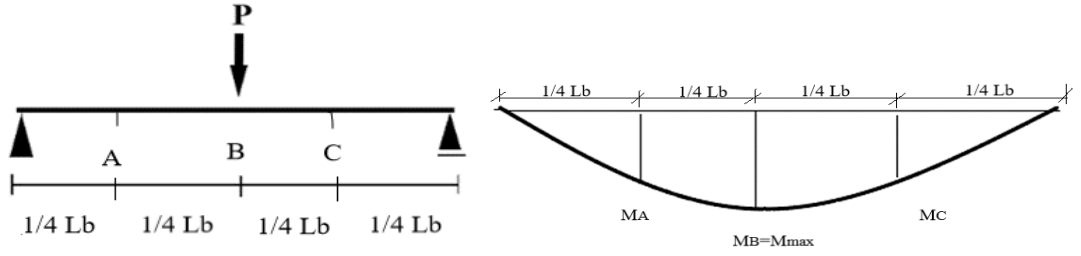
Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda, yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki uzunluk boyunca, eğilme momenti yayılımının olumlu katkısı ile tanımlanan moment düzeltme katsayısı, C_b , ile hesaba katılabilir. Denklem 3.2' de belirtilmiştir. Bu denklem çift simetri eksenine sahip, tüm elemanlar ve tek simetri eksenine sahip tek eğrilikli eğilme etkisinde olan elemanlar için kullanılabilir.

$$C_b = \frac{12.5 \cdot M_{\max}}{2.5 \cdot M_{\max} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C} \cdot R_m \leq 3 \quad (3.2)$$

Denklem 3.2'de geçen moment ifadeleri aşağıda açıklanmış ve Şekil 3.2'de moment dağılımı üzerinde karşılık geldikleri noktalar gösterilmiştir.

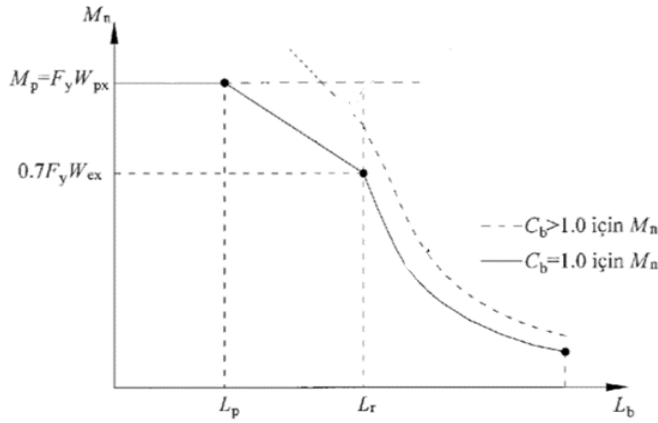
Burada, M_{maks} yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğu boyunca en büyük eğilme momentinin mutlak değeri; M_A yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğunun $\frac{1}{4}$ noktasındaki eğilme momentinin mutlak değeri; M_B yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğunun $\frac{1}{2}$ noktasındaki eğilme momentinin mutlak değeri; M_C yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğunun $\frac{3}{4}$ noktasındaki eğilme momentinin mutlak değerini ifade etmektedir. R_m tek simetri eksenli kesitler için geliştirilmiş bir parametredir ve bu değer çift simetri

eksenli kesitlerde 1 alınır. Bu çalışmada C_b (açıklık ortasından yüklenmiş, sabit mesnetli kirişlerde) 1.32 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. 2. Kiriş uzunluğu boyunca moment dağılımı

Karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n 'nin basınç başlığının yanal olarak desteklenmeyen uzunluğu, L_b ye bağlı olarak değişimi ve moment düzeltme katsayısı, C_b 'nin ilişkisi Şekil 3.3 de gösterilmiştir.



Şekil 3. 3. Basınç başlığının yanal olarak desteklenmeyen uzunluğuna bağlı olarak karakteristik eğilme momenti dayanımı [47]

Yanal Burulmalı Burkulma Durumu

Yanal burulmalı burkulma, basınç başlığının yanal olarak desteklenmeyen uzunluğu, L_b 'ye bağlı olarak üç durumda incelenir.

$L_b \leq L_r$ ise bu sınır durumunu dikkate almaya gerek yoktur. Yanal burulmalı burkulma oluşmaz.

$L_p < L_b \leq L_r$ ise elastik olmayan (inelastik) burkulma gerçekleşir ve karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n Denklem 3.3 ile belirlenir.

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y W_{ex}) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (3.3)$$

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

$L_b > L_r$ olması halinde ise elastik burkulma meydana gelir. Karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n Denklem 3.4 ile hesaplanacaktır.

$$M_n = F_{cr} W_{ex} \leq M_p \quad (3.4)$$

Formüldeki kritik gerilme, F_{cr} aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{i_{ts}} \right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{Jc}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{i_{ts}} \right)^2} \quad (3.5)$$

Her iki asal eksenine göre de simetrik veya sadece düşey asal eksenine göre simetrik olan I-enkesitli çelik kirişlerde, AISC-LRFD [39] formüllerine göre elastik burkulma momentleri elde edilirken, basınç başlığı ve gövdenin basınç bölgesinin belirli bir bölümünü kapsayan etkin alanın düşey asal eksene göre atalet yarıçapı hesaba katılır. Bu etkin alanın oluşturduğu basınç çubuğunun, eğilmeli burulmalı burkulma moduna

göre burkulma yükü hesaplanarak, kirişin analitik burkulma momenti değerine ulaşılır. Denklem 3.5’de karekök içindeki ifade, basit eğilme (Euler Burkulması) burkulmasını eğilmeli-burulmalı burkulmadan ayırt etmek amacıyla kullanılmaktadır. AISC-LRFD [39], bu kareköklü ifadenin 1 alınarak işlem yapılabileceğini fakat bu durumda elde edilen sonuçların çok da gerçekçi olmayan bir yaklaşıma sahip olacağını belirtmiştir. Sonuç olarak karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n denklem 3.6’da belirtildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$M_n = \left(\frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{i_{ts}} \right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{Jc}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{i_{ts}} \right)^2} \right) S_x \quad (3.6)$$

Denklemlerde geçen L_p ve L_r uzunlukları ise Denklem 3.7 ve Denklem 3.8 yardımı ile bulunur.

L_p , akma sınır durumu için yanal olarak desteklenmeyen sınır uzunluk değeri;

$$L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3.7)$$

Elastik olmayan yanal burulmalı burkulma durumu için sınır uzunluk limiti olan L_r ise;

$$L_r = 1.95 i_{ts} \frac{E}{F_y} \sqrt{\frac{Jc}{W_{ex} h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{W_{ex} h_o} \right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7 F_y}{E} \right)^2}} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’de kullanılan c katsayısı I ve U kesitler için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Çift simetri eksenli I-enkesitlerde:

$$c=1.0 \quad (3.8.a)$$

ve U-enkesitlerde:

$$c = \frac{h_o}{2} \sqrt{\frac{I_y}{C_w}} \quad (3.8.b)$$

Denklemlerde, h_o enkesit başlıklarının ağırlık merkezleri arasındaki uzaklık ($h_o = d - t_f$); C_w çarpılma sabiti; I_y y-eksenine göre atalet yarıçapı; J Burulma sabitidir. Bu tez çalışmasında çift simetri eksenli I-enkesitler kullanıldığı için $c=1.0$ olarak alınmıştır. Etkin atalet yarıçapı, i_{ts} ise Denklem 3.8.c ile hesaplanacaktır:

$$i_{ts} = \frac{b_f}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} \frac{ht_w}{b_f t_f} \right)}} \quad (3.8.c)$$

Denklem 3.8.c'de geçen ifadeler; b_f başlık genişliği; t_f başlık kalınlığı; t_w gövde kalınlığı; h hadde ürünleri için köşe bölgelerdeki yarıçap veya eğrisel bölgeler çıkarılarak elde edilen başlıklar arasındaki net gövde yüksekliğini ifade eder.

AISC-LRFD standardına göre eğilme elemanlarında, karakteristik eğilme momenti dayanımı, $\phi_b = 0.90$ (LRFD) eğilme etkisi dayanım katsayısı ile çarpılarak, tasarım eğilme momenti dayanımı, $M_n \phi_b$, değerleri elde edilir. Bu çalışma kapsamında analiz edilen IPN 300 kesitin farklı serbest uzunluk değerleri için yukarıda verilen formüllere göre hesaplanan karakteristik eğilme momenti dayanımı değerleri Çizelge 3.3'te verilmektedir. Ayrıca, hesaplar esnasında belirlenen önemli değerler, Çizelge 3.4'te sunulmaktadır.

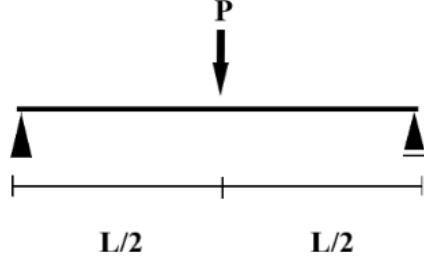
Çizelge 3. 3. Burkulma Momentinin Kiriş Açıklığına Göre Değerleri

L_b (m)	M_n (kNm)
6m	151.746
6.5m	138.930
7m	128.160
7.5m	118.967
8m	111.032
8.5m	104.110
9m	98.015
9.5m	92.610
10m	87.770

Çizelge 3. 4. AISC-LRFD Standardına Göre Elde Edilen Değerler

TANIM	SONUÇ	
λ_f (Başlık Narinliği)	3.858	$\lambda_f < \lambda_{pf}$
λ_w (Gövde Narinliği)	22.370	(Başlık Narinliği) (Başlık Plastik Narinliği)
λ_{pf} (Başlık Plastik Narinliği)	10.248	$\lambda_w < \lambda_{pw}$
λ_{rf} (Başlık Elastik Narinliği)	26.968	(Gövde Narinliği) (Gövde Plastik Narinliği)
λ_{pw} (Gövde Plastik Narinliği)	101.400	} Gövde ve Başlık kompakttır.
λ_{rw} (Gövde Elastik Narinliği)	153.718	
M_p (Plastik Moment Kapasitesi)	209.55 kNm	
L_p	1.215×10^3 mm	
i_{ts}	32.740mm	
L_r	5.558×10^3 mm	
C_b	1.316	

Kirişler, düzlem içinde basit mesnet şartlarına sahip olacak şekilde analiz edilmiş ve açıklık ortasında tekil yüke maruz bırakılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3. 4. Basit Mesnetli Kiriş

Basit mesnetli, açıklığının orta noktasından yüklenmiş kirişlerde eğilme momenti aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$M = \frac{PL}{4} \quad (3.9)$$

Denklem 3.9'dan kirişin taşıyabileceği yük, P Denklem 3.10 ile elde edilir.

$$P = \frac{4M}{L} \quad (3.10)$$

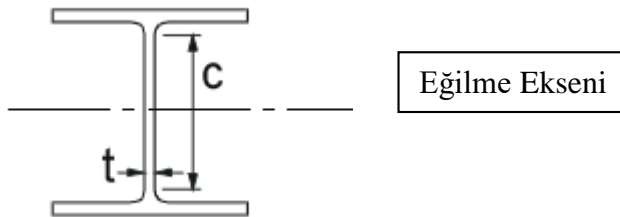
L_r değerinden büyük kiriş uzunlukları seçilerek elastik burkulma davranışı incelenmiştir. Bir kirişin narinlik oranının L_r sınır değerinden büyük olması durumunda kirişin tümü elastik sınırlar içindeyken burkulma meydana gelir. Henüz hiçbir bölgesinde akma olmadan burkulmanın gerçekleşeceği elastik burkulma altındaki kiriş elemanda burkulmadan sonra yükler kaldırıldığında ilk haline döner. Yapılan hesaplar sonucu bulunan değerler Denklem 3.10' da yerine yazılarak 6m ile 10m aralığında, 0.5m artımla toplam 9 ayrı açıklığa sahip çelik IPN300 profil için hesaplar yapılmıştır. Bu hesap sonuçları Çizelge 3.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. AISC-LRFD Standardına Göre P_{cr} Değerleri

L_b (m)	P_{cr} (AISC-LRFD) (t)
6m	9,28
6.5m	7,84
7m	6,71
7.5m	5,82
8m	5,09
8.5m	4,49
9m	4,00
9.5m	3,58
10m	3,22

3.1.2 EUROCODE 3 [43] ÇÖZÜMÜ

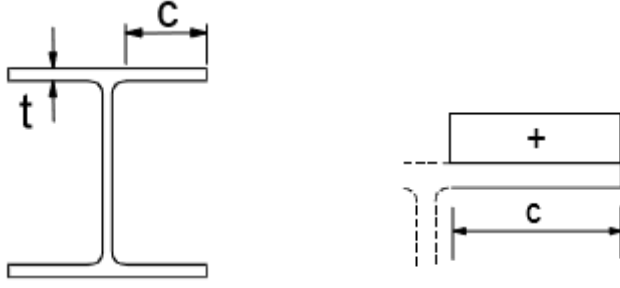
Öncelikle Eurocode 3 [43]'ün belirlemiş olduğu kısıtlamalara göre çelik elemanın sınıfını belirlemek gerekmektedir. Gövde ve başlık narınlığı belirlenirken, Şekil 3.5 ve 3.6'da gösterilen boyutlar kullanılır:



Şekil 3. 5. I Profilin Gövde Kesitleri

Elemanın gövde enkesiti için sınır genişlik/kalınlık oranı;

$$\lambda_w = \frac{c}{t} \leq 72\varepsilon \quad (3.11)$$



Şekil 3. 6 . I Profilin Başlık Kesitleri

Elemanın başlık enkesiti için sınır genişlik/kalınlık oranı;

$$\lambda_f = \frac{c}{t} \leq 9\varepsilon \quad (3.12)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3.13)$$

IPN 300 profil, Çizelge 3.6'da gösterildiği üzere başlık ve gövde narinliği için gerekli sınırların altında kaldığı için, Sınıf 1 profil grubunda yer almaktadır.

Çizelge 3. 6. I Profil Sınıfının Belirlenmesi

<i>Tanım</i>	<i>Sonuç</i>	Sınıf 1
$\lambda_w = \frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$	22.37 < 66.55	
$\lambda_f = \frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$	3.858 < 8.320	

Eğilme etkisindeki sabit enkesitli elemanlar için azaltma faktörü Denklem 3.14 ve 3.15’de verilen ifadeler yardımı ile bulunur.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1.0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$\Phi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (3.15)$$

Denklem 3.14 ve 3.15’de geçen hadde profiller için bazı sınır değerleri aşağıdaki gibidir.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0.4 \text{ (maksimum değer)} \quad (3.16)$$

$$\beta = 0.75 \text{ (minimum değer)} \quad (3.17)$$

Φ_{LT} , χ_{LT} ifadesini tanımlamak için kullanılan bir ara değerdir, α_{LT} , önkusur faktörü olup $\frac{h}{b} > 2$ olduğu için yönetmelikteki ilgili çizelgeden burkulma eğrisi c olarak belirlenmiştir. Burkulma eğrisi c tipine karşılık gelen önkusur faktörü $\alpha_{LT}=0.49$ değeri alınmıştır. Bu fomüllerden de anlaşılacağı üzere, Eurocode 3 kirişlerde bulunabilecek önkusuruların burkulma momenti üzerindeki etkilerini hesaba katmaktadır.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18’de kullanılan ifadeler aşağıda verilmiştir.

$$W_y = W_{pl,y} \text{ (Sınıf 1 enkesitler için kesit modülü)} \quad (3.19)$$

M_{cr} elastik kritik burkulma momentidir ve Denklem 3.32’de belirtilmiştir.


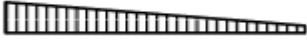






Azaltma faktörü olan χ_{LT} moment dağılımının etkisini de dikkate alarak Denklem 3.20’deki gibi yeniden yazılabilir.

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f}, \chi_{LT,mod} \leq 1.0 \quad (3.20)$$

$$f = 1 - 0.5(1 - k_c) \left[1 - 2.0(\bar{\lambda}_{LT} - 0.8)^2 \right], f \leq 1.0 \quad (3.21)$$

f, χ_{LT} için düzeltme faktörü, k_c ilgili çizelgelerden moment dağılımı şekline göre belirlenen düzeltme katsayısıdır. Tekil yükleme altındaki kirişin moment dağılımı Çizelge 3.7’ye göre $k_c = 0.86$ olarak alınır.

Çizelge 3. 7. Çeşitli Moment Dağılım Şekilleri ve k_c Değerleri [43]

Moment Dağılımı	k_c
 $\psi = 1$	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
  	0,94 0,90 0,91
  	0,86 0,77 0,82

Stabilite sınır durumları malzeme katsayısı, γ_{M1} Eurocode 3 [43]'de $\gamma_{M1} = 1.0$ olarak verilmiştir. Burkulma momenti Denklem 3.22 yardımıyla bulunur.

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT,mod} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3.22)$$

Kritik burkulma yükü;

$$P_{cr} = \frac{4M_{b,Rd}}{L} \quad (3.23)$$

Eurocode 3 [43] formüllerine göre hesaplanan kritik burkulma yükü değerleri Çizelge 3.8'de ve P_{cr} 'in elde edilmesi aşamalarında yapılan hesaplamalar Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3. 8. Eurocode 3 [43] Standardına Göre Elde Edilen Değerler

L (m)	$\bar{\lambda}_{LT}$	Φ_{LT}	χ_{LT}	f	$\chi_{LT,mod}$	$M_{b,Rd}$ (kNm)	M_{cr} (kNm)
6m	1.302	1.356	0.474	0.965	0.490	102.836	123.538
6.5m	1.353	1.419	0.450	0.973	0.463	97.040	114.484
7m	1.401	1.481	0.429	0.980	0.437	91.678	106.739
7.5m	1.447	1.541	0.410	0.988	0.414	86.960	100.026
8m	1.492	1.602	0.392	0.997	0.393	82.387	94.145
8.5m	1.535	1.661	0.376	>1	0.376	78.854	88.946
9m	1.577	1.720	0.361	>1	0.361	75.771	84.311
9.5m	1.617	1.778	0.348	>1	0.348	72.923	80.152
10m	1.656	1.836	0.335	>1	0.335	70.263	76.397

Çizelge 3.9. Eurocode 3 [43] Standardına Göre Hesaplanan P_{cr} Değerleri

L_b (m)	P_{cr} (t)
6m	6.988
6.5m	6.087
7m	5.30
7.5m	4.727
8m	4.199
8.5m	3.783
9m	3.433
9.5m	3.129
10m	2.864

3.1.3 GALAMBOS [44] ÇÖZÜMÜ

Çift simetri eksenli sabit mesnetli kirişler için elastik yanal burulmalı burkulma momenti için Galambos [44] Denklem 3.24'teki denklemi ifadeyi geliştirmiştir. Bu ifadeye göre kiriş uçlarında yanal ötelenme ($u = 0$) ve dönme (ϕ) önlenmiş fakat yanal dönme ($u'' = 0$) ve kesit uçlarında çarpılma ($\phi'' = 0$) serbest bırakılmıştır. Referans kritik burkulma momenti;

$$M_{ocr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y GJ} \sqrt{1 + W^2} \quad (3.24)$$

Bu ifadeye;

$$W = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{EC_w}{GJ}} \quad (3.25)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.26)$$

Denklem 3.24; 3.25 ve 3.26'da geçen terimler L kiriş açıklığı; C_w çarpılma sabiti; J burulma sabiti; I_y zayıf eksen atalet momenti; G çelik elemanın kayma (rijitlik) modülü; ν poisson oranını ($\nu = 0.3$) göstermektedir.

Açıklık boyunca yanıl desteklerin olmadığı kirişlerde yükün uygulandığı nokta önem arz etmektedir. Bu durum dikkate alınarak Nethercot ve Rockey [48] tarafından aşağıdaki ifade geliştirilmiştir.

$$C_b = AB^{2y/h} \quad (3.27)$$

A ve B mesnet ve yükleme koşulları ile ilgili bir katsayı olup ilgili çizelgelerden belirlenir. Şekil 3.7'de verilen yükleme durumu, mesnet şartları ve moment dağılım şekline göre;

$$A = 1.35 \quad (3.28)$$

$$B = 1 - 0.180W^2 + 0.649W \quad (3.29)$$

$$C_b = AB^{2y/h} \quad (3.30)$$

Denklem 3.30'da ;

y : Kesit orta noktasından yükün uygulandığı noktaya olan mesafe ($y = \frac{h}{2}$)

h : Kesit yüksekliği

olmakla birlikte, y değeri yük üst başlığa uygulandığı zaman negatif; alt başlığa uygulandığında pozitif alınır. Bu tez çalışmasında yük üst başlığa uygulanmıştır, dolayısıyla değer negatif alınır.

Böylelikle;

$$C = AB^{-1} \text{ şeklinde yazılabilir.} \quad (3.31)$$



Şekil 3. 7. Yükleme Durumu ve Moment Dağılımı

Elastik burkulma momenti, aşağıdaki eşitlikten elde edilir:

$$M_{cr} = C_b M_{ocr} \quad (3.32)$$

Elastik yanal burulmalı burkulma yükü ise, daha önce de ifade edildiği gibi aşağıdaki formüle göre hesaplanır:

$$P_{cr} = \frac{4M_{cr}}{L} \quad (3.33)$$

Galambos [44] çözümüne göre yapılan hesaplamalarda edilen hesap değerleri ve kritik burkulma yükleri sırasıyla Çizelge 3.10 ve 3.11'de verilmektedir.

Çizelge 3. 10. Galambos [44] Çözümüne Göre Elde Edilen Değerler

L_b (m)	W	A	B	C	M_{ocr} (kNm)	M_{cr} (kNm)
6m	0.339	1.35	1.200	1.125	109.769	123.538
6.5m	0.313	1.35	1.186	1.139	100.548	114.484
7m	0.291	1.35	1.174	1.150	92.790	106.739
7.5m	0.272	1.35	1.163	1.161	86.167	100.026
8m	0.255	1.35	1.154	1.170	80.445	94.145
8.5m	0.240	1.35	1.145	1.179	75.450	88.946
9m	0.226	1.35	1.138	1.187	71.049	84.311
9.5m	0.214	1.35	1.131	1.194	67.141	80.152
10m	0.204	1.35	1.125	1.200	63.647	76.397

Çizelge 3. 11. Galambos [44] Çözümüne Göre P_{cr} Değerleri

L_b (m)	P_{cr} (t)
6m	8.395
6.5m	7.182
7m	6.218
7.5m	5.438
8m	4.798
8.5m	4.267
9m	3.820
9.5m	3.440
10m	3.115

4-NÜMERİK ÇALIŞMA

Sonlu elemanlar metodu mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan nümerik bir metoddur. Karmaşık geometri, farklı yükleme koşulları ve değişken malzeme özelliklerini içeren problemleri analitik yollarla çözmek ve gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek her zaman mümkün olmayabilir. Sonlu elemanlar metodu sayesinde karmaşık olan tüm yapıyı ele almak yerine, tüm eleman yapısını temsil eden daha küçük parçalara ayrıştırarak her bir parçanın kendi içinde çözümlenmesiyle tüm yapı hakkında gerçekçi bir fikir elde etmek mümkün olmaktadır [49]. Geometrik olarak kompleks olan çözüm gerektiren elemanın ilgili kısmı geometrik olarak daha basit yapıda alt bölgelere ayrılarak analiz edilmesi kolaylaşmaktadır. Bu alt bölgelere ayrılan elemanların çözümlenmeleri birleştirilerek tüm yapı hakkında istenilen sonuçlara ulaşılabilir. Bu bölümlere ayrılan eleman sayısı arttıkça doğru sonuçta daha da yaklaşık değerlerin elde edildiği görülmüştür. Bu ayrıştırma sonucu her bir eleman bir diğerine düğüm noktası adı verilen noktalardan bağlandığı kabul edilir. Düğüm noktalarının yapının global koordinat sisteminden bağımsız olarak kendine ait lokal bir koordinat sistemi bulunmaktadır. Yapılan analizler sonucu bu düğüm noktalarından okunan yer değiştirmeler, gerilmeler vb. genel yapı probleminin çözümünü ifade etmektedir. Hesaplanmak istenen büyüklük bu düğüm noktalarındaki değerlerin interpolasyonu ile bulunabilmektedir.

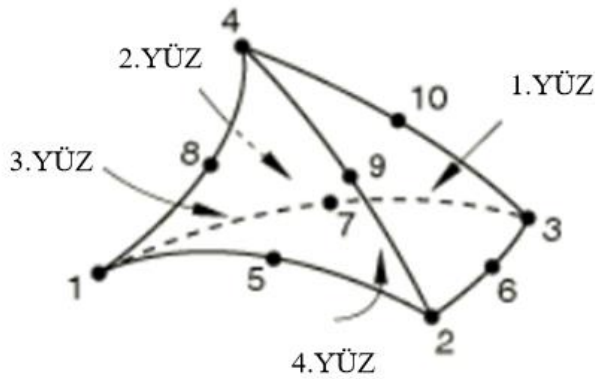
Sonlu elemanlar metodu ile çözümlenme yapan birçok yazılım bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında ABAQUS CAE [3] sonlu elemanlar programı kullanılarak burkulma analizleri yapılmıştır.

4.1 Sonlu Eleman Analiz Programı

Bu çalışmada ABAQUS CAE [3] sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. ABAQUS [3], neredeyse tüm mühendislik alanlarında kullanılan fonksiyonel bir yazılım programıdır. Yapı analizleri, elektromanyetik analizler, termal analizler, statik analizler, dinamik analizler, burkulma analizleri, özdeğer analizleri gibi birçok farklı analiz türünde çözümlenmeye imkan sağlamaktadır. Yapı analizlerinde gerilme-şekil değiştirme, kuvvet, yer değiştirme büyüklüklerinin kolaylıkla belirlenebilmesine olanak vermektedir. Bu doğrultuda çalışma boyunca burkulma analizlerini gerçekleştirebilmek için uygun bir yazılım olmuştur.

4.2 Eleman Seçimi

ABAQUS [3] yazılımında IPN300 çelik profillerin analizinde eğrisel formda geometrik elemanları da çözümlenebilen üç boyutlu on düğüm noktalı kuadratik C3D10 solid eleman modeli kullanılmıştır.



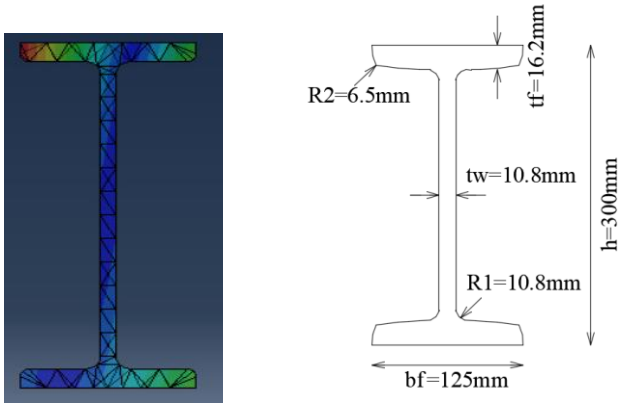
Şekil 4. 1. C3D10 Eleman Yapısı [50]

4.3 Malzeme Özelliği

Çalışmada kullanılan kirişler çelik IPN 300 profiller olarak oluşturulmuştur. Doğrusal malzeme özellikleri kullanılmış ve elastisite modülü (E) 200000 MPa; poisson oranı (ν) 0.3 olarak alınmıştır. S275 çelik kullanılmış ve akma dayanımı 275 MPa alınmıştır. Doğrusal elastik burkulma analizleri (eigenvalue buckling analysis) yapıldığı için çeliğin gerilme-birim deformasyon eğrisinin bütünü modelde tanımlanması gerekli olmamıştır

4.4 Kesit Özellikleri

Kesit olarak kompakt gövde ve başlıklı 9 ayrı uzunlukta IPN300 çelik profiller kullanılmıştır. Şekil 4.2’de kesit boyutları gösterilmiştir. Gövde-başlık birleşim bölgeleri ve başlık uçları gerçeğe uygun olacak şekilde eğrilik yarıçapı verilerek profiller oluşturulmuştur.



Şekil 4. 2. IPN300 Enkesit Detayları

4.5 Geometrik Önkusur

Yapılan çalışmalarda özellikle geometrik önkusurlu kirişlerin burkulma yüklerinin ve burkulma momentlerinin, önkusursuz kirişlere göre daha düşük olacağı öngörülmektedir. Kirişin geometrik önkusur şeklinin (desenin) burkulma yüküne, burkulma deformasyonuna ve yük-deformasyon eğrisi üzerine etkisini araştırmak için yapılan bu çalışmada farklı önkusur desenleri denenmiştir. Bu kapsamda 3 ayrı önkusur başlığı altında analizler gerçekleştirilmiştir. Bunlar;

1-Önkusursuz kirişler (yanal deplasman ve dönmenin olmadığı ideal kirişler)

2-Yanal deplasman önkusur desenine sahip kirişler

2.a.Yarım sinüs dalgası

2.b.Tam sinüs dalgası

2.c.Tam parabolik form

3-Yukarıdaki (2.madde) önkusurlara ek olarak burulma açısının (sinüs fonksiyonuna bağlı olarak) verildiği önkusur şekilleridir. Bu önkusur şeklinde basınç başlığındaki yanal önkusurun çekme başlığındaki yanal önkusura göre daha büyük olacağı şekilde bir burulma açısı tanımlanmıştır. Bu durumda, burulma açısının burkulma üzerinde olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir.

Bu önkusur şekilleri kiriş elemanın düğüm noktalarındaki koordinat değerlerinde değişiklik yapılmak suretiyle Denklem 4.1 ve 4.2'deki gibi sinüs fonksiyonuna bağlı olarak oluşturulmuştur.

$$u = u_o \cdot \sin\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \quad (4.1)$$

$$u = u_o \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{L_b}\right) \quad (4.2)$$

Tam parabol deseni oluşturacak önkusur şekli denklem 4.3’de verilmiştir.

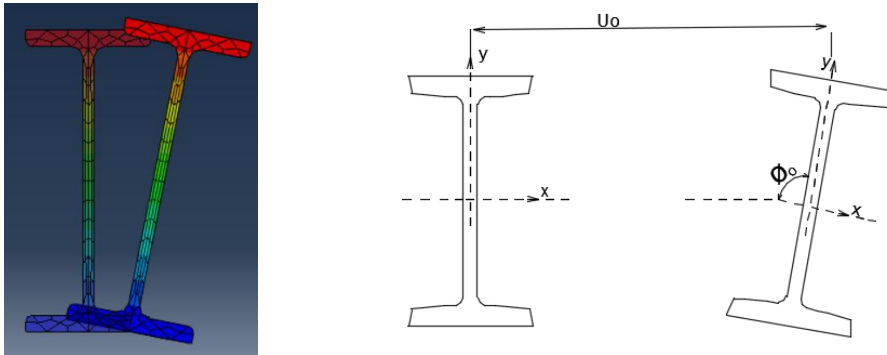
$$u = \frac{1}{250} \left(x - \frac{x^2}{L_b} \right) \quad (4.3)$$

Yukarıdaki denklemlerde geçen u_o önkusur yanal deplasman değerinin maksimum değeri yani genliği olup $L_b/1000$ olarak seçilmiştir. L_b mesnetler arası kiriş uzunluğudur.

Denklem 4.4’de kesitin burulma açısı verilmiş önkusur deseni yine sinüs fonksiyonu dağılıma sahiptir. Burada kesitin burulma açısı önkusur genliği olarak $\phi_o = L_b/2000h$ değeri alınmıştır.

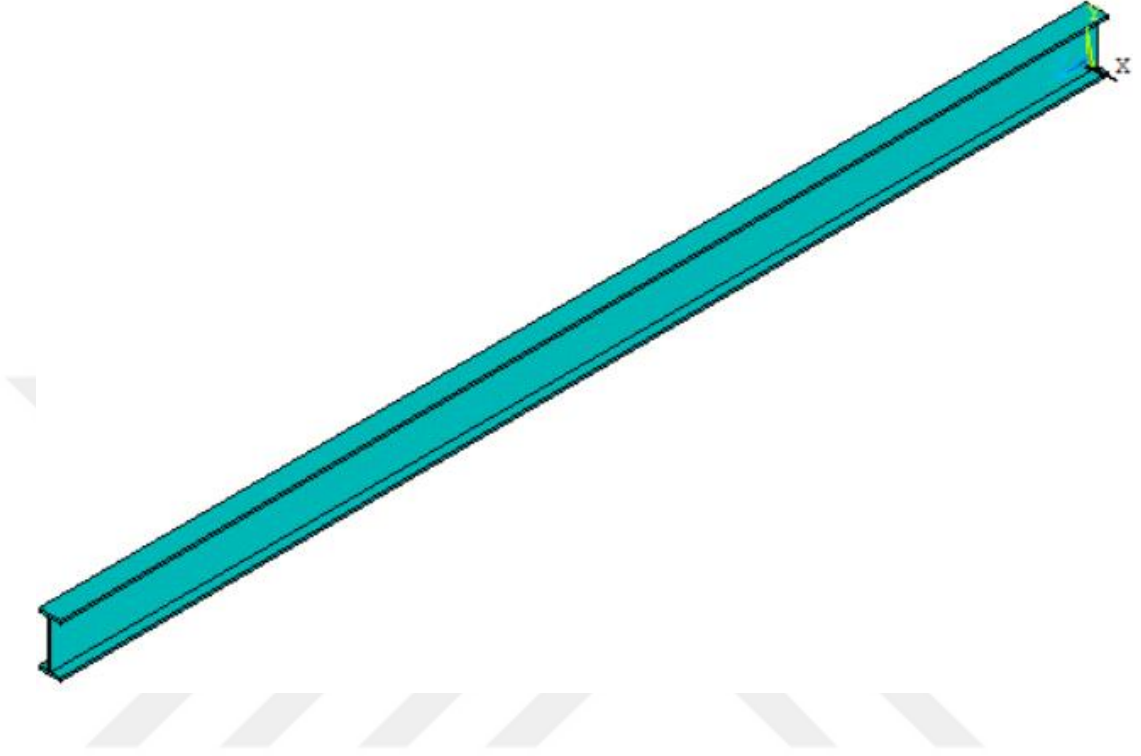
$$\phi = \phi_o \cdot \sin \left(\frac{\pi x}{L_b} \right) \quad (4.4)$$

Kirişlerin burulma açısı, üst başlığa, alt başlıkta olduğundan daha fazla yanal ötelenme verilmesi yolu ile elde edilmiştir Bu önkusur etkisinin de eklenmesiyle burkulma yükünde yanal önkusurdan kaynaklı azalmaya ek bir azalma daha olması beklenmektedir.

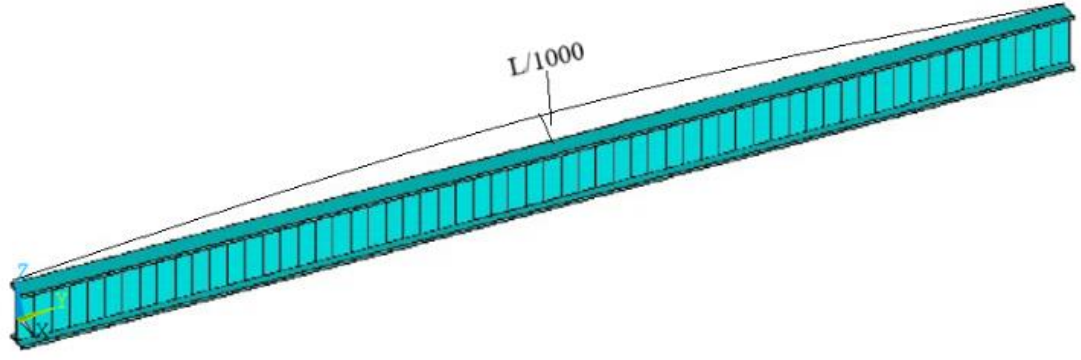


Şekil 4. 3. Önkusur Şekli

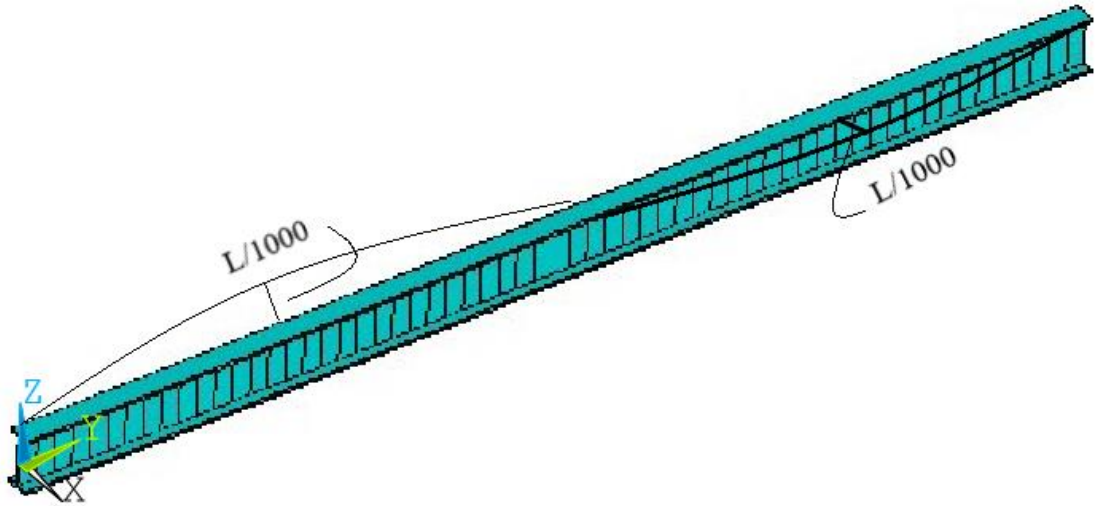
Kusursuz, yarım sinüs ve tam sinüs önkusurlu kirişlerin modelleri Şekil 4.4-4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4. 4. Önkusursuz Kiriş



Şekil 4. 5. Yarım Sinüs Dalgası Önkusur Şekline Sahip Kiriş Elemanın Önkusur Durumu

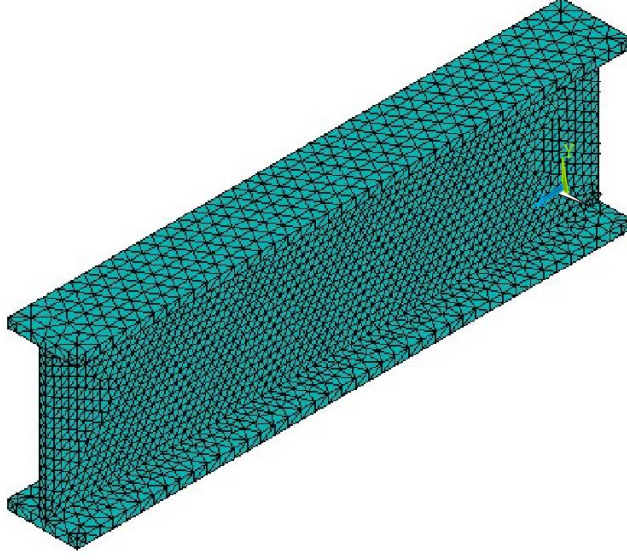


Şekil 4. 6. Tam Sinüs Dalgası Önkusur Şekline Sahip Kiriş Elemanın Önkusur Durumu

4.6 Eleman Ağının Oluşturulması (Meshing)

Mühendislikte, modelleri oluşturmak için sonlu elemanlar analizleri kullanılır. Kullanım, malzemenin bilgisini yazılıma aktarmak kadar simüle edilen modeli fiziksel olarak da temsil eden bir tasarım yapmayı gerektirmektedir. Burada amaç fiziksel olarak kullandığımız elemanların gerçek davranışlarını önceden tahmin ederek doğru hesaplamaları yapmaktır. Bu süreçte uygun elemanlara ayırabilmek (meshing) kritik bir rol oynar.

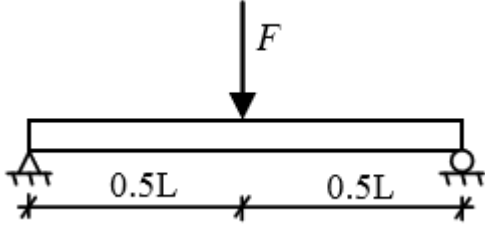
“Mesh” sayısı arttıkça model daha fazla elemana bölüneceği için daha hassas sonuçlar elde edilir. Yeterli “mesh” sayısına da karar verebilmek önemlidir. Çünkü gereğinden fazla eleman daha fazla düğüm noktası demektir ve dolayısıyla çözülmesi gereken denklem sayısında da ciddi artışı beraberinde getirerek analiz süresini uzatabilir. Meshleme (parçalara ayırma) işleminde bazı bölgelerde daha fazla ađ oluşumu gözlemlenebilir. Bu noktalar modelde kritik alanları oluşturmaktadır. Bu işlem sonucu oluşan elemanlar düğüm noktalarından birbirlerine bağlanarak süreklilik oluşturular. Bu düğüm noktaları tüm analizler boyunca kullanılır. Yükleme, sınır koşullarının atanması gibi tüm veriler düğüm noktalarına girilmektedir. Bu çalışmada elemanlar maksimum 10 mm boyutlarında olacak şekilde parçalara ayırma (free meshing) yapılmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4. 7. Elemanlara Ayrılan Kiriş

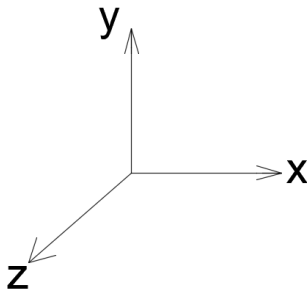
4.7 Mesnet Koşullarının Belirlenmesi

Modelleme aşamasında dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri mesnetlerin düğüm noktalarına yerleştirilirken, kiriş elemanın oluşturacağı reaksiyonları hesaba katarak en doğru sınır durumlarını oluşturabilmektir. Mesnet şartlarındaki değişim, oluşacak kritik moment değerlerini de etkileyeceğinden yapı davranışına uygun gerçekçi sınırlamalar verilmeye özen gösterilmelidir. Bu tez çalışmasında kullanılan tüm kirişler sabit mesnet koşullarına uygun olarak teşkil edilmiştir (Şekil 4.8).



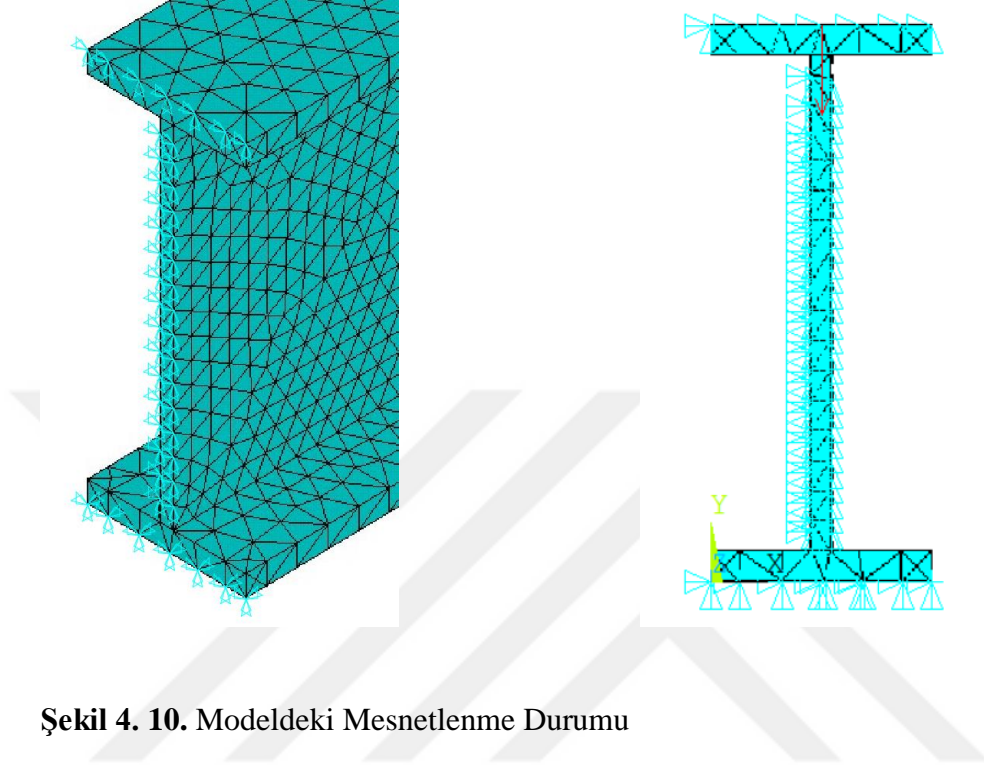
Şekil 4. 8. Modellemede Kullanılan Sabit Mesnetli Kiriş Eleman

Bu doğrultuda Şekil 4.9'daki koordinat sisteminden hareketle; profil alt başlık, gövde ve üst başlığındaki kesit boyunca bulunan düğüm noktalarının x ve y (yanal ve düşey) doğrultularındaki yer değiştirmeleri tutularak bu doğrultudaki ötelenmesi engellenmiştir. Kirişin bir ucu sabit diğer ucu hareketli mesnet olacağından; sabit mesnetli uçtaki alt başlığın z doğrultusundaki (boyuna doğrultudaki) ötelenmesi de tutulmuştur. Dönmeye karşı herhangi bir kısıtlama getirilmemiştir. I-enkesitli kirişler aksenal eğilme momentleri altında çarpılma deformasyonlarına maruz kalırlar. Çarpılma etkisinin önlendiği durumlarda eğilme momentinde ciddi artış olmaktadır. Bu tez çalışmasında bunu önlemek için burkulma analizlerinde kiriş uçları çarpılmaya karşı serbest bırakılarak çarpılma etkisi bertaraf edilmiştir.



Şekil 4. 9. ABAQUS'de Koordinat Sistemi

Şekil 4.10'da ABAQUS [3] programında mesnetlerin kesit boyunca düğüm noktalarındaki konumları gösterilmiştir.

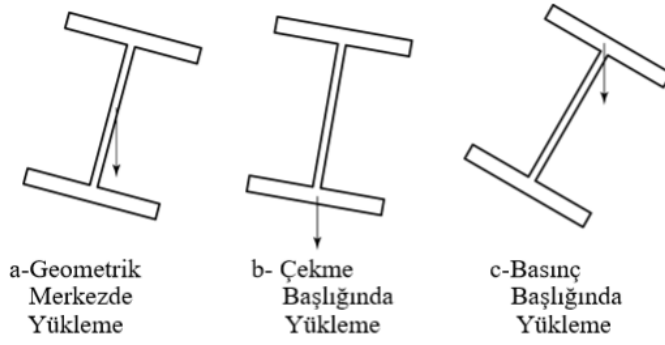


Şekil 4. 10. Modeldeki Mesnetlenme Durumu

4.8 Yükleme Durumu

Basit mesnetli yanal burulmalı burkulma etkisi altındaki çelik kirişlerde yük tesiriyle güçlü eksen etrafında moment oluşmaktadır. Yükün uygulama noktası, tekil veya yayılı yük olması gibi yüklemenin özelliği oldukça önemlidir. Bir kirişte dış yüklerin bulunduğu eksen, kesit asal eksen düzlemlerinden biriyle aynı veya paralel olması durumunda basit eğilme meydana gelir. Yük kesitin kayma merkezinden geçmiyorsa eğilmeye ek olarak burulma da ortaya çıkar.

Bir kiriş elemanda yükün uygulama noktası farklılık arz edebilir. Üst başlığa, alt başlığa veya gövdede geometrik merkeze uygulanabilir. Şekil 4.11'de üç farklı yükleme durumu gösterilmiştir [51].

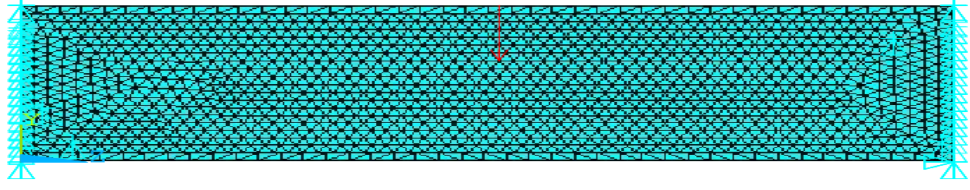


Şekil 4. 11. Farklı Yükleme Durumları

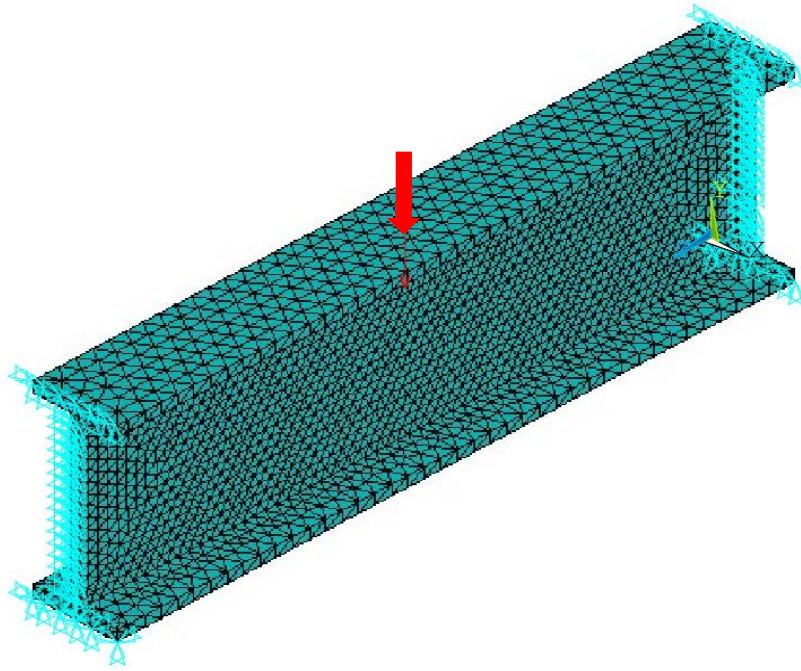
Şekil 4.11.b'de çekme başlığına yapılan yükleme durumunda; yük elemanın stabilitesine yardımcı olarak burkulma yükünü artırır. Yük, basınç başlığı olan üst başlığa uygulandığında ise başlık burkulma eğiliminde olduğu için stabilite kaybı yaşanır ve burkulma yükünde azalma görülür.

Analiz sonrası yer değiştirme, kuvvet, gerilme gibi sonuçları düğüm noktalarından okumalar yaparak elde ettiğimiz için yükler de yine düğüm noktalarına verilmektedir. Tez çalışmasında basınç başlığında kiriş açıklığının orta noktasına denk gelen düğüm noktasına tekil yük girilmiştir. Önkusursuz kirişler için yapılan özdeğer burkulma analizlerinde 1 br'lik yükleme yapılmıştır. Yükleme durumları Şekil 4.12 ve 4.13'de gösterilmiştir.

P



Şekil 4. 12. Yükleme Şekli



Şekil 4. 13. Yükleme Şekli ve Mesnet Koşulları

4.9 Analiz

Model oluşturulup, meshleme işlemi yapıldıktan ve yük ile mesnet koşullarının da tanımlanmasından sonra analiz aşamasına gelinmiştir. Çalışma boyunca IPN300 çelik profillerin boyuna yöndeki uzunluğu (kiriş açıklığı) 6 m'den başlayarak 10 m'ye kadar yarımşar metre (0.5m) artırılarak 9 farklı uzunluk için analizler yapılmıştır.

4.9.1 Analiz Tipi

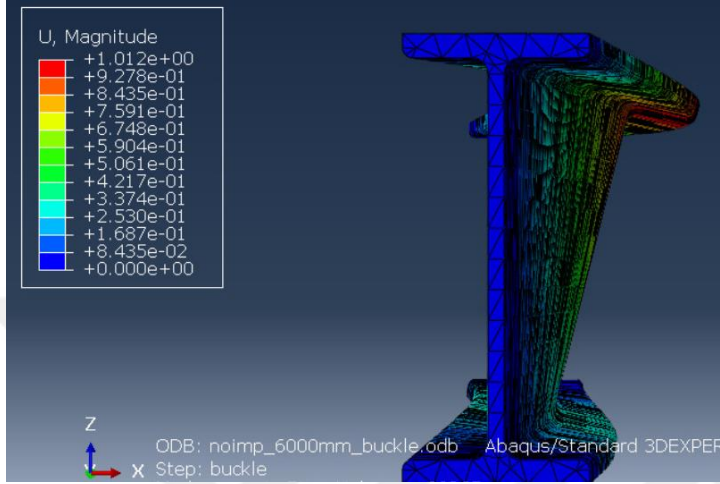
Çalışmada kirişlerin yanal burulmalı burkulma altındaki kritik burkulma yüklerini belirleyebilmek için doğrusal elastik burkulma analizleri yapılmıştır. Kiriş elemanlar önkusurlu olmaları nedeni ile geometrik olarak doğrusal değildir. Dolayısıyla nonlineer (doğrusal olmayan) geometrik özellikleri dikkate alan statik analizler yapılmıştır. Kusursuz kirişlerde ise özdeğer analizleri ile sonuçlar elde edilmiştir.

4.9.1.1 Özdeğer (Eigenbuckling) Burkulma Analizi

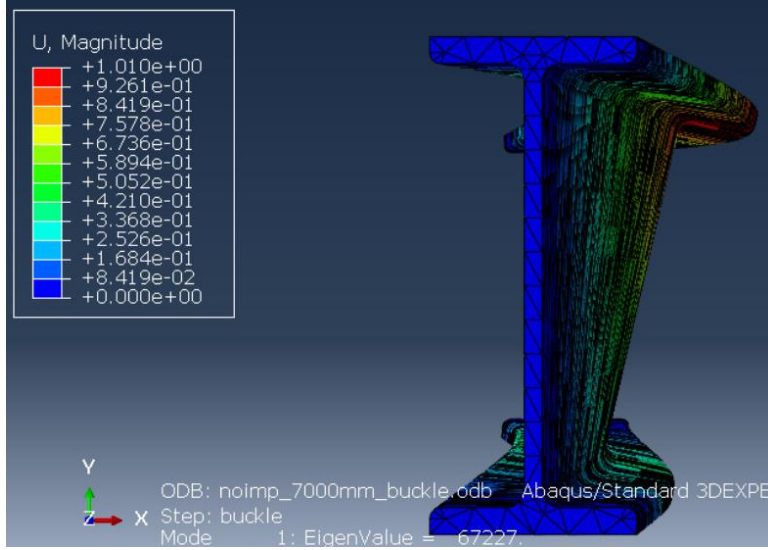
Gerçek bir yapıda burkulma modları doğrusal değildir. Fakat gerçek yapı davranışını modelleyebilmek için bir takım doğrusal kabuller yapılmaktadır. Burkulma hesaplarını yapmak için kullanılan bu analiz türü doğrusallaştırılmış bir hesaplama yöntemidir ve yalnızca elastik yapılar için kullanılabilir. Kiriş modellemesi yapılırken elemanların yanal olarak mesnetlenmemiş uzunlukları elastik sınırlar içinde olacak şekilde belirlenmiştir. Eigenbuckling (özdeğer) analiz sonucu elde edilen özvektörler (eigenvectors) yapının gerçek burkulma şekline en yakın olduğu mod şeklini vermektedir. Dolayısıyla doğrusal burkulma analizi yapılarak yapının kusur modu anlaşılması olmaktadır.

4.10 Analiz Sonucu Burkulma Modları

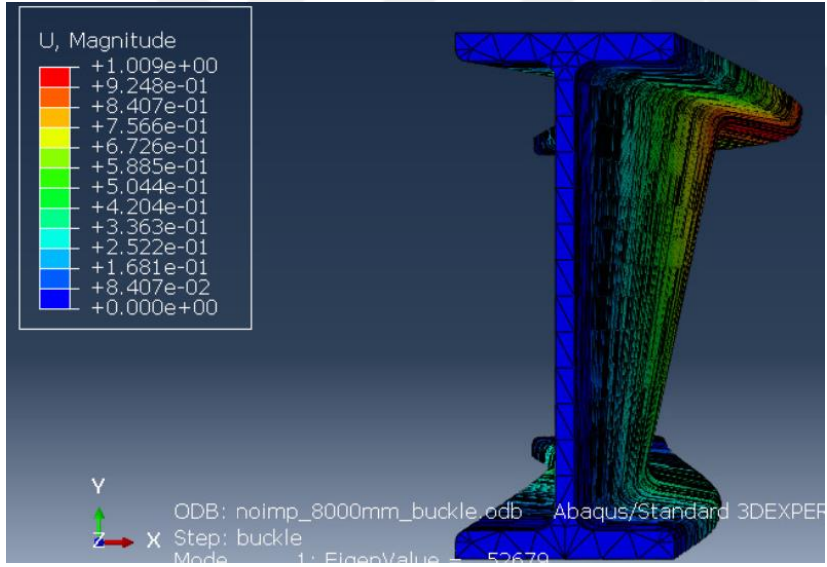
Yapılan analizler sonucunda önkusursuz kirişlerin burkulma şekilleri Şekil 4.14-4.22'de gösterilmiştir.



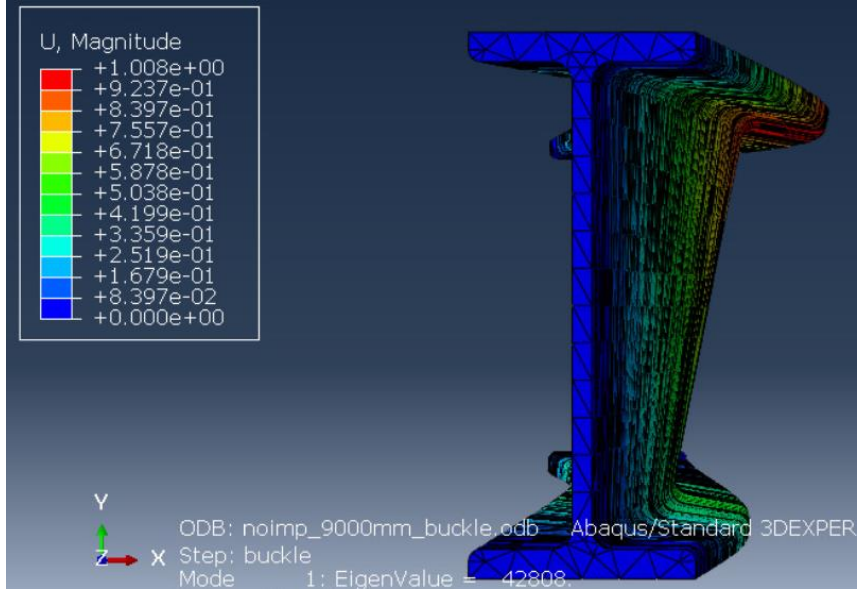
Şekil 4. 14. IPN300-6 m Önkusursuz Kiriş Burkulma Şekli



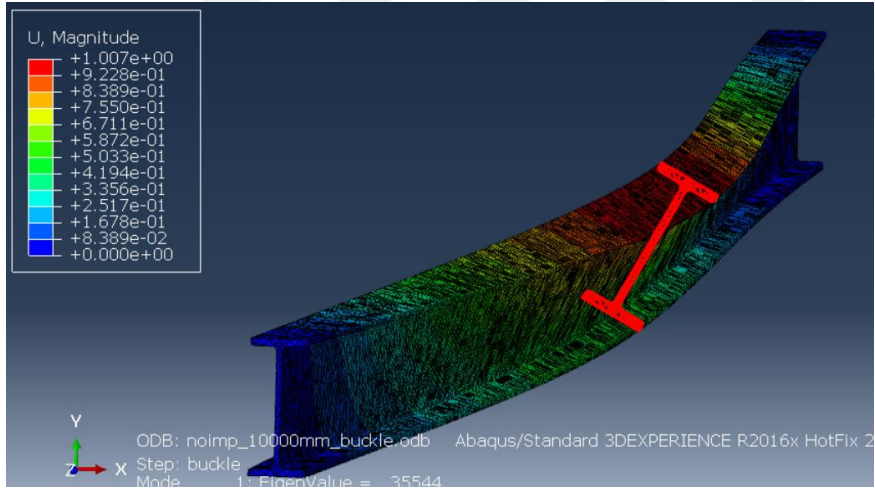
Şekil 4. 15. IPN300-7 m Önkusursuz Kiriş Burkulma Şekli



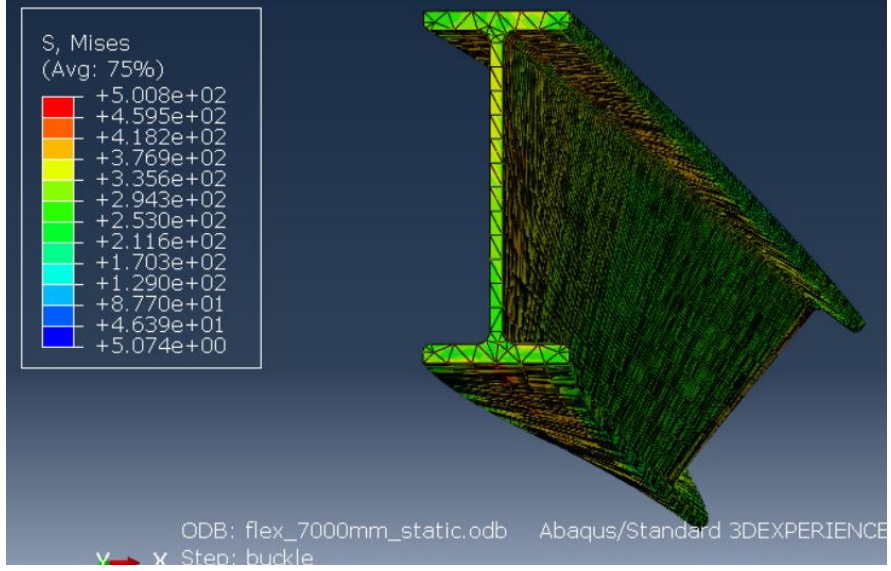
Şekil 4. 16. IPN300-8 m Önkusursuz Kiriş Burkulma Şekli



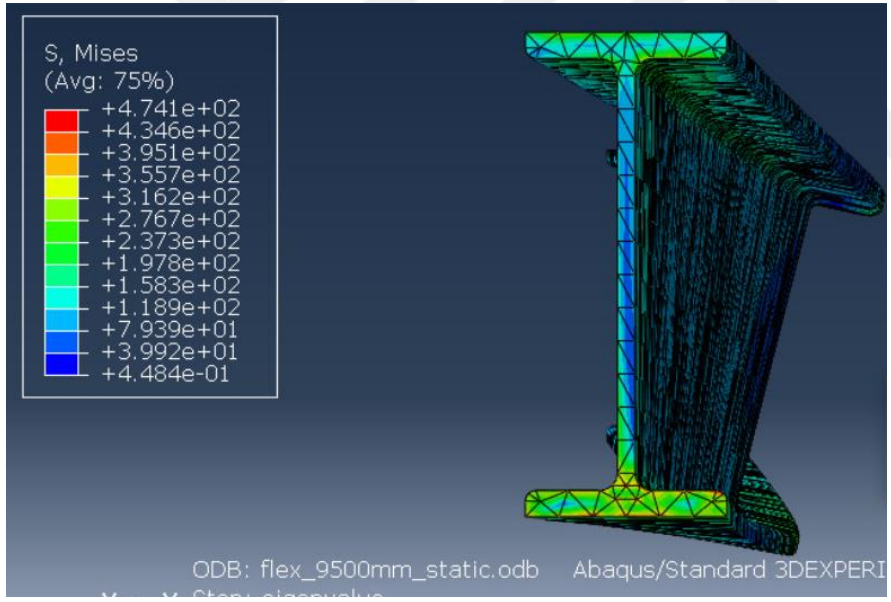
Şekil 4. 17. IPN300-9 m Önkusursuz Kiriş Burkulma Şekli



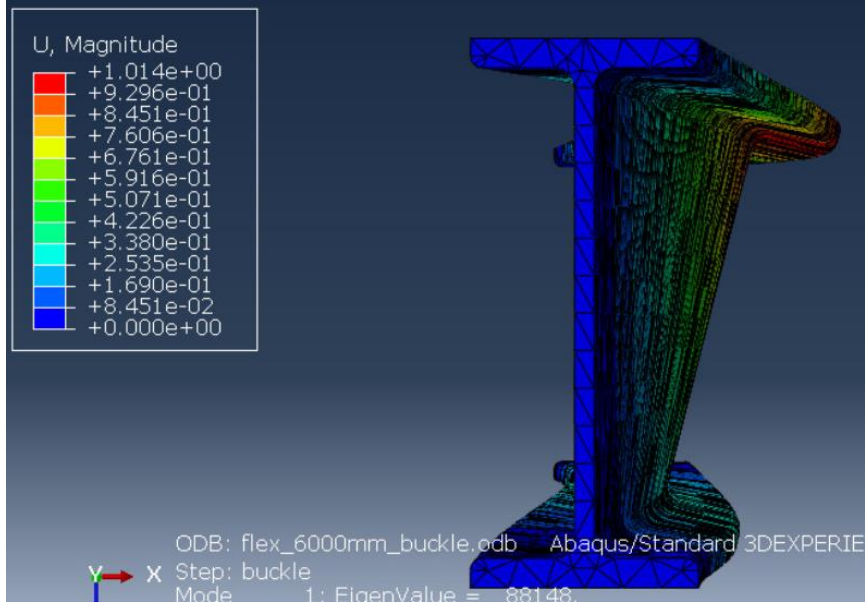
Şekil 4. 18. IPN300-10 m Önkusursuz Kiriş Burkulma Şekli



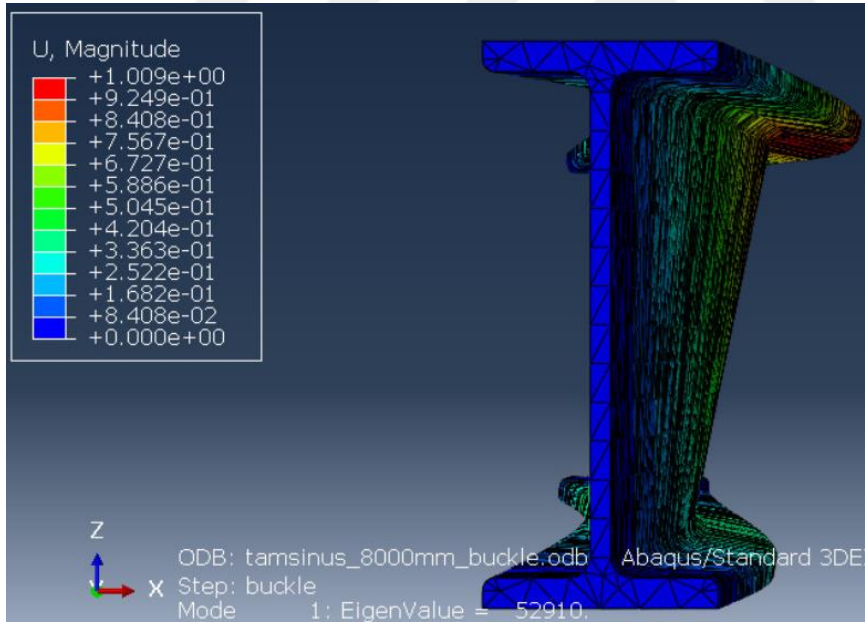
Şekil 4. 19. IPN300-7 m Yarım Sinüs Dalgası Kiriş Burkulma Şekli



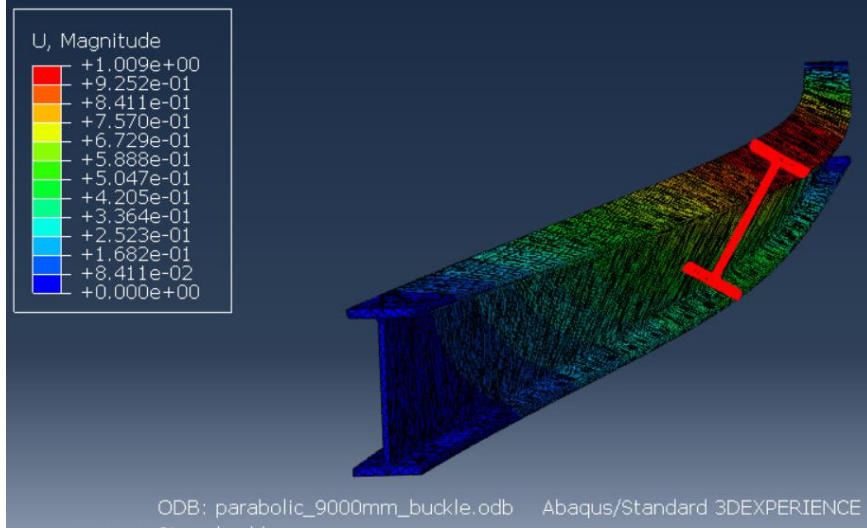
Şekil 4. 20. IPN300-9.5 m Yarım Sinüs Dalgası Kiriş Burkulma Şekli



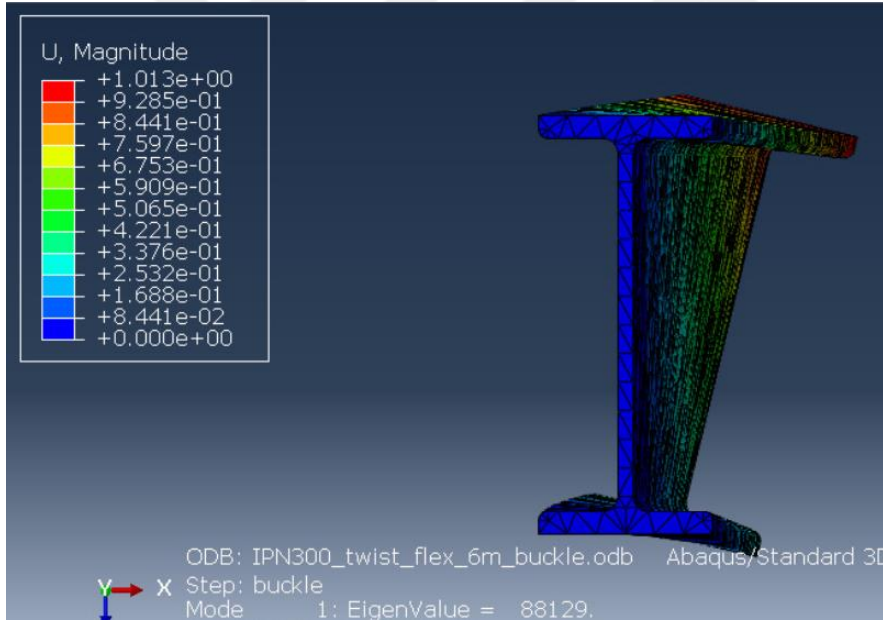
Şekil 4. 21. IPN300-10 m Yarım Sinüs Dalgası Kiriş Burkulma Şekli



Şekil 4. 22. IPN300-10 m Tam Sinüs Dalgası Kiriş Burkulma Şekli



Şekil 4. 23. IPN300-9 m Tam Parabol Kiriş Burkulma Şekli

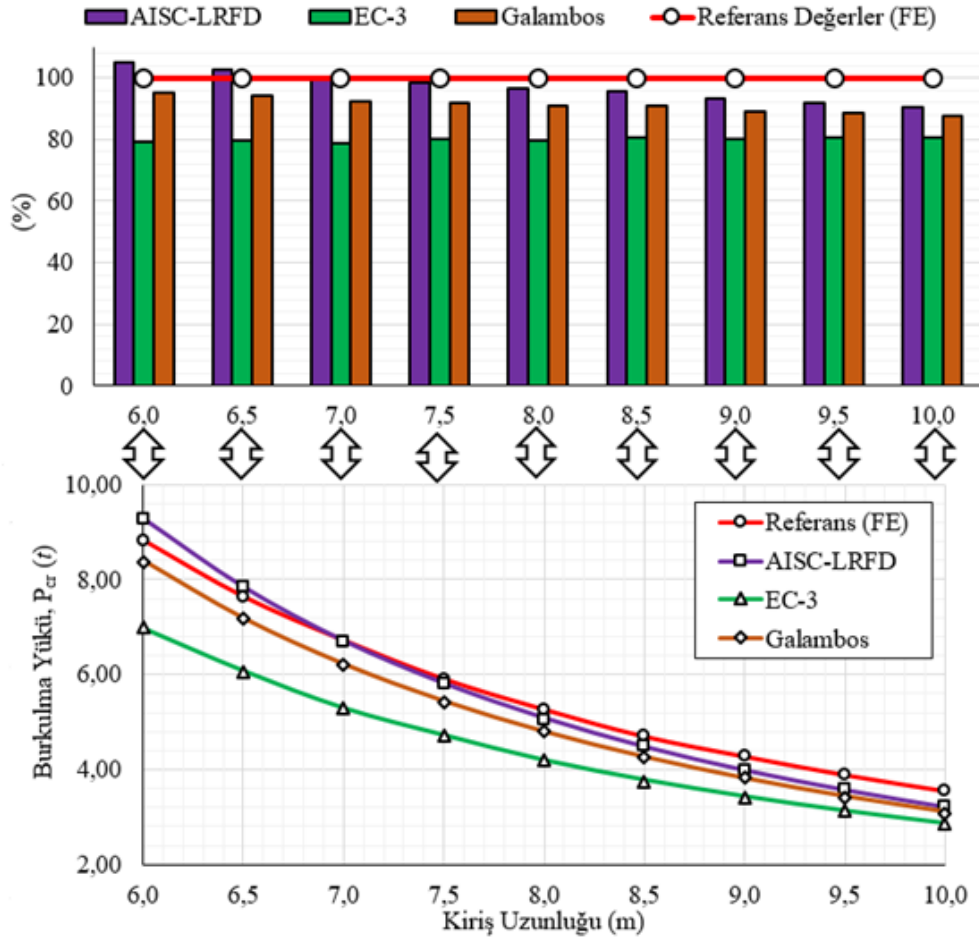


Şekil 4. 24. IPN300-6 m Yarı Sinüs Dalgası + Burulma Açılı Kiriş Burkulma Şekli

5. ANALİTİK VE NÜMERİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

5.1. Nümerik ve Analitik Sonuçların Karşılaştırılması

Bu tez çalışmasında incelenen kirişlerin elastik yanal burulmalı burkulma yükü (P_{cr}) değerlerini analitik olarak hesaplamak için AISC-LRFD [39] ve Eurocode 3 [43] yönetmelikleri ile Galambos [44] çözümü olmak üzere üç ayrı çözüm yöntemi kullanılmıştır. Bu çözümlerden elde edilen değerler ile ABAQUS [3] sonlu elemanlar programında önkusursuz kirişler için elde edilen nümerik sonuçlarla karşılaştırılmış (Şekil 5.1) ve aralarındaki farklılıklar yüzdelik olarak Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5. 1. IPN300 Önkusursuz Kirişler İçin Elde Edilen Sonuçlar

Çizelge 5. 1. Analitik ve Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması

No	Kiriş Uzunluğu (m)	Referans (FE) $P_{cr,FE}$	Burkulma Yüğü (P_{cr}, t_j)					
			AISC-LRFD		EC-3		Galambos	
			$P_{cr,AISC}$	$P_{cr,AISC}/P_{cr,FE}$ (%)	$P_{cr,EC3}$	$P_{cr,EC3}/P_{cr,FE}$ (%)	$P_{cr,G}$	$P_{cr,G}/P_{cr,FE}$ (%)
1	6,0	8,83	9,28	105	6,99	79	8,40	95
2	6,5	7,64	7,84	103	6,09	80	7,18	94
3	7,0	6,72	6,71	100	5,30	79	6,22	92
4	7,5	5,91	5,82	99	4,73	80	5,44	92
5	8,0	5,27	5,09	97	4,20	80	4,80	91
6	8,5	4,70	4,49	96	3,78	80	4,27	91
7	9,0	4,28	4,00	93	3,43	80	3,82	89
8	9,5	3,89	3,58	92	3,13	80	3,44	88
9	10,0	3,56	3,22	91	2,86	81	3,12	88

Görüldüğü üzere, nümerik analizden elde edilen değerler ile en uyumlu sonuçlar, AISC-LRFD [39] standardı ile Galambos [44]'un geliştirmiş olduğu teorik formülden elde edilmiştir. Eurocode 3 [43] yanal burulmalı burkulma formülünden elde edilen analitik değerler ise nümerik sonuçların önemli derecede altında kalmaktadır. Bu farklılık, Eurocode formüllerindeki geometrik önkusur azaltma faktöründen kaynaklanmaktadır. Galambos [44]'un yaklaşımından elde edilen değerler referans yani önkusursuz kirişlerin analizlerinden elde edilen değerlere yakın olmakla birlikte, nümerik değerler ile en yakın ve uyumlu değerler AISC-LRFD [39] formüllerinden elde edilmiştir.

Elde edilen verilerden bir değerlendirme yapılacak olursa, referans kirişlerin nümerik değerleri ile analitik değerler arasındaki yüzdelik farklar, AISC-LRFD [39] çözümü için maksimum % 9, Galambos [43] çözümü için maksimum % 12 ve Eurocode 3 [43] çözümü için maksimum %21 olarak belirlenmiştir.

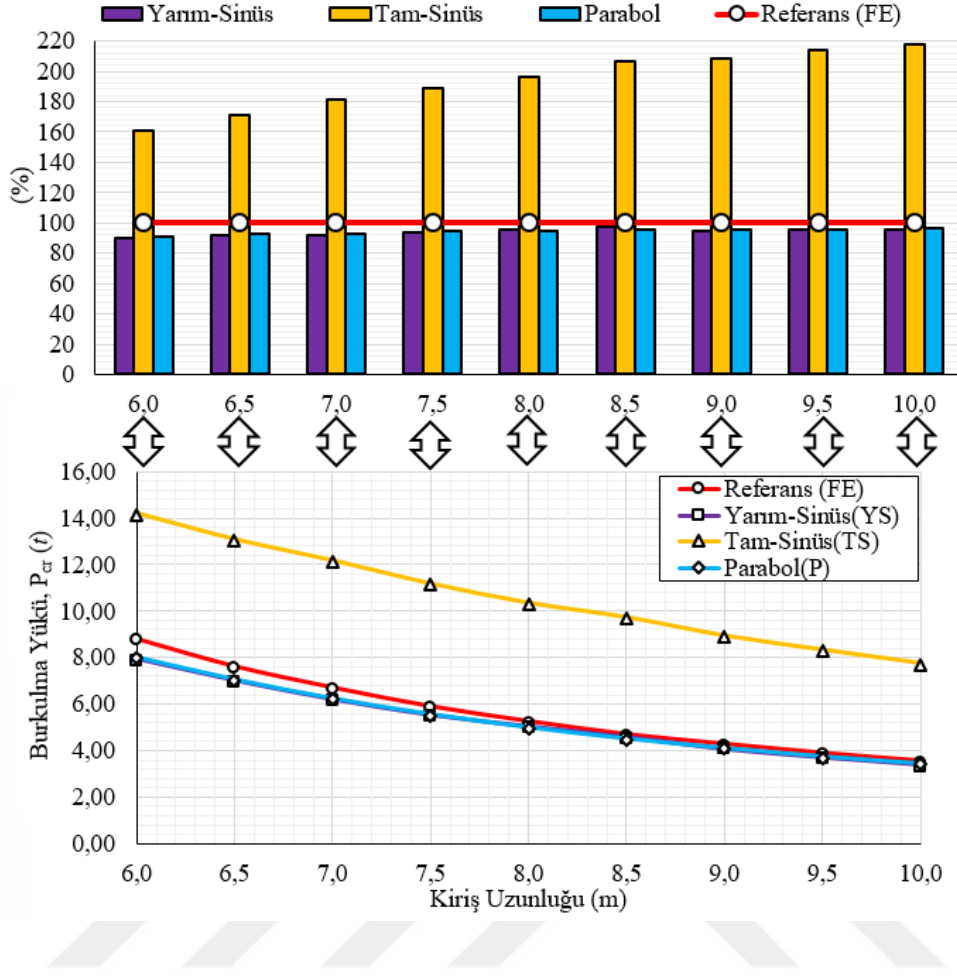
Galambos [44] ve AISC-LRFD [39] formülleri geometrik önkusursuz kirişlerde gerçeğe yakın sonuçlar verse de, bu formüllerde geometrik önkusur deseninin ve önkusur büyüklüğünün yanal burulmalı burkulma yüküne olan etkisini hesaba katan bir çarpan bulunmamaktadır.

5.2. Yanal Deplasman Önkusur Etkisi

Yanal deplasman önkusurunun kritik burkulma yüküne etkisini araştırmak amacı ile sonlu elemanlar modeline yarım sinüs, tam sinüs ve tam parabolik önkusur Şekilleri verilmiştir. Kiriş boyuna eksenine boyunca oluşturulan kusurların kritik burkulma yükünde azaltıcı bir tesir meydana getireceği öngörölmüştür. Elde edilen sonuçlar kusursuz referans kiriş değerleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.2), sonuçlar arasındaki farklar yüzdeler olarak Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2’den anlaşılacağı üzere tam sinüs fonksiyonuna bağlı kusur Şekline sahip kirişlerin kritik burkulma yükü değerleri, beklenen aksine kusursuz kirişlerin ilgili değerlerinden yüksektir. Bunun sebebi, burkulma mod Şeklinin 2. mod burkulma Şekline yakın olmasıdır. 1. mod burkulma Şekli yarım sinüs dalgasıdır. Tam sinüs dalgası ve buna benzer Şekiller, kirişin 1. moda göre burkulmasını güçleştireceği için kirişin burkulma davranışını daha güvenli hale getirmektedir. Bu sebeple, bu önkusur Şekillerinin yanall burulmalı burkulma analizlerinde önkusur Şekli olarak kabul edilmemesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Çizelge 5.2 incelendiğinde azalması beklenen kritik burkulma yük değerinin, tam sinüs dalgası önkusur Şeklinin etkisiyle yaklaşık % 120 arttığı görölmektedir.

Diğer önkusur Şekilleri olan yarım sinüs dalgası ve tam parabol eğriliğindeki kusurlu kirişlerde ise beklenildiği gibi burkulma yükünde azalmalar olmuştur. Bu azalma, yarım sinüs dalgası kusurunda maksimum % 10, tam parabol kusurlu kirişlerde ise maksimum % 9 seviyesindedir.



Şekil 5. 2. Referans Kiriş ile Önkusurlu Kirişlerin Analiz Değerlerinin Karşılaştırılması

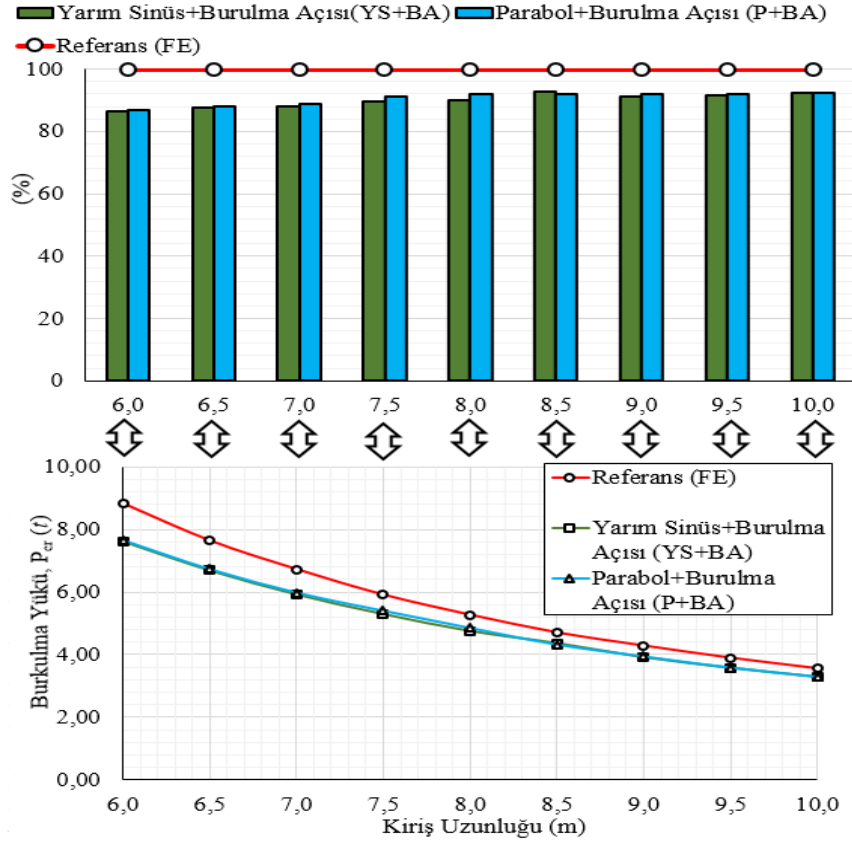
Çizelge 5. 2. Analitik ve Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması

Kiriş Uzunluğu (m)	Referans (FE) $P_{cr,FE}$	Burkulma Yüğü (P_{cr}, t_f)								
		Ön Kusur Şekli								
		Yarım-Sinüs(YS)			Tam-Sinüs(TS)			Parabol(P)		
$P_{cr,YS}$	$P_{cr,YS}/P_{cr,FE}$ (%)	Azalma (%)	$P_{cr,TS}$	$P_{cr,TS}/P_{cr,FE}$ (%)	Artış (%)	$P_{cr,P}$	$P_{cr,P}/P_{cr,FE}$ (%)	Azalma (%)		
6,0	8,83	7,94	90	-10	14,20	161	61	8,04	91	-9
6,5	7,64	7,02	92	-8	13,08	171	71	7,08	93	-7
7,0	6,72	6,20	92	-8	12,17	181	81	6,25	93	-7
7,5	5,91	5,53	94	-6	11,18	189	89	5,57	94	-6
8,0	5,27	5,04	96	-4	10,35	196	96	4,99	95	-5
8,5	4,70	4,58	97	-3	9,73	207	107	4,51	96	-4
9,0	4,28	4,06	95	-5	8,94	209	109	4,09	96	-4
9,5	3,89	3,70	95	-5	8,33	214	114	3,72	96	-4
10,0	3,56	3,39	95	-5	7,76	218	118	3,42	96	-4

Sayısal sonuçlara bakılarak kirişlerde yarım sinüs dalgası kusur şeklinin daha kritik bir etki yarattığını görmek mümkündür. Kirişlerde boyuna eksenin kusur şeklinin yarım sinüs dalgası formuna yaklaştıkça daha düşük yük değerlerinde burkulmaya maruz kalacağını ifade etmek gerekir. Bu durum, gerçek kiriş davranışında burkulma sonrasında kirişin yarım sinüs dalgası formunu alması ile açıklanabilmektedir. Yarım sinüs dalgasından farklı desenlerde önkusur kullanılması çift simetri eksenli çelik I kirişlerde daha büyük burkulma yüklerinin elde edilmesine neden olacaktır.

5.3. Yanal Deplasman ve Burulma Açısı Önkusur Etkisi

Yanal deplasman önkusuru kadar önemli olan diğer bir kusur şekli de burulma açısıdır. Bu kusur şeklinin burkulma yüküne etkisini belirleyebilmek için kirişlere hem yanal deplasman hem de burulma açısı kusuru verilmiştir. Özellikle burulma açısının etkisiyle kirişin üst kısmının geometrik merkeze göre daha büyük yanal deplasmanlara sahip olduğu önkusurlu kirişlerde, yük kirişin üst yüzüne uygulanıyorsa, burkulma yükü değerleri önemli miktarda azalır. Bu azalma, başlangıç burulma açısının stabiliteye olan ilave olumsuz etkilerinden kaynaklanır. Bu bağlamda, bu çalışma kapsamında analiz edilen burulma açılı ve yanal önkusurlu kirişlerin burkulma yükü değerleri, önkusursuz kirişlerin ilgili değerleri ile Şekil 5.3 ve Çizelge 5.3'de kıyaslanmıştır.



Şekil 5. 3. Burulma Açısı Önkusuru İle Nümerik Sonuçların Değişimi

Çizelge 5. 3. Analitik ve Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması

Kiriş Uzunluğu (m)	Referans (FE) $P_{cr,FE}$	Burkulma Yüğü (P_{cr}, t)					
		Yanal Deplasman+Burulma Açısı					
		Yarım Sinüs+Burulma Açısı (YS+BA)			Parabol+Burulma Açısı(P+BA)		
$P_{cr,YS+BA}$	$P_{cr,YS+BA}/P_{cr,FE}$ (%)	Azalma (%)	$P_{cr,P+BA}$	$P_{cr,P+BA}/P_{cr,FE}$ (%)	Azalma (%)		
6,0	8,83	7,62	86	-14	7,66	87	-13
6,5	7,64	6,69	88	-12	6,73	88	-12
7,0	6,72	5,92	88	-12	5,98	89	-11
7,5	5,91	5,29	90	-10	5,40	91	-9
8,0	5,27	4,75	90	-10	4,85	92	-8
8,5	4,70	4,36	93	-7	4,32	92	-8
9,0	4,28	3,91	91	-9	3,94	92	-8
9,5	3,89	3,57	92	-8	3,58	92	-8
10,0	3,56	3,28	92	-8	3,29	93	-7

Yarım sinüs dalgası yanal deplasman ve burulma açısı önkusuruna sahip kirişlerde maksimum % 14 mertebesinde bir azalma görülürken, tam parabol ve burulma açısı önkusurlu kirişlerde ise bu değer yaklaşık % 13'tür. Her iki durumda da kirişin mesnetlenmemiş uzunluğu azaldıkça burkulma yükündeki düşüş daha da artmaktadır. Buna göre, burulma açısının varlığı yarım sinüs ve tam parabol boyuna eksen şekilli kirişlerde yaklaşık % 4-5 ilave burkulma yükü azalmasına neden olmuştur.

Yapılan analizlerden ve analitik çalışmalardan elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, önkusurun varlığı uzun kirişlere kıyasla kısa kirişlerde burkulma yükü değerinde daha da etkili olmuştur.

Yalnızca burulma açısı kusurunun kritik burkulma yüküne olan etkisini sayısal olarak ifade etmek gerekirse Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'ten hareketle; yarım sinüs dalgası yanal deplasmana sahip kirişlerde maksimum % 6, tam parabol yanal deplasmana sahip kirişlerde ise maksimum % 4 azalmaya neden olduğu görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere yarım sinüs eğrilik formu oldukça önemli bir önkusur şeklidir.

Ayrıca, Çizelge 5.1'de verilen değerler, Eurocode 3 [43] çözümüne göre önkusursuz referans kirişler için elde edilen analitik değerlerin nümerik değerlere göre yaklaşık % 20 daha güvenli olduğunu göstermektedir. Yarım sinüs yanal deplasman ve burulma

açısının varlığı durumunda dahi, geometrik önkusurlu kirişin burkulma yükü önkusursuz kirişin burkulma yükünün en fazla % 14 altında kalmaktadır. Bu değerlerden hareketle, Eurocode 3 [43]'te verilen yanal burulmalı burkulma çözümünün geometrik önkusursuz kirişler için oldukça güvenli değerler verdiğini, ancak geometrik önkusurların varlığında diğer iki çözümün aksine (Galambos [44] ve AISC-LRFD [39]) hala güvenli tarafta kalan burkulma yükü tahminleri ortaya çıkardığını göstermiştir. Çift simetri eksenli I profillerde geometrik önkusurların bulunması kaçınılmaz olduğu için, yanal burulmalı burkulma momentinin Eurocode 3 [43] formülüne göre hesaplanması daha güvenli ve uygun olacaktır. Bu durum, Eurocode 3 [43] formüllerinde bulunan önkusur faktöründen (α_{LT}) kaynaklanmaktadır. Ayrıca, üretim, nakliye ve montaj aşamaları sonucu yapıya yerleştirilen çelik kirişlerin geometrik önkusur değerlerinin bu çalışmada varsayılan değerlerin de üstüne çıkabildiği ve bu durumlarda burkulma yükü değerlerinin daha da azalacağı gerçeği, Eurocode 3 [43] formüllerinin kullanımının önemini daha güçlü şekilde vurgulamaktadır.

6.SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında farklı önkusur desenlerine sahip kuvvetli eksenleri etrafında eğilme etkisindeki çift simetri eksenli kompakt I-enkesitli profillerin yanal burulmalı burkulma davranışı incelenmiştir. Bu amaçla, elastik yanal burulmalı burkulma davranışı gösterecek serbest uzunluklara sahip, S275 sınıfı çelik malzemeden yapılmış standart IPN 300 kesitli kirişler, ABAQUS [3] sonlu elemanlar programı yardımıyla analiz edilmiştir. Bu profillere, kesit boyunca üniform veya üst başlığa doğru artan ve açıklık boyunca yarım sinüs, tam sinüs ve tam parabolik önkusur desenleri verilerek, önkusur şeklinin yanal burulmalı burkulma davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Daha önceki çalışmalardan farklı olarak, kiriş açıklığı boyunca yanal eğriliğin genlik değerinden ziyade bu eğriliğin şeklinin (kiriş boyunca dağılımının) burkulma davranışları üzerindeki etkisine odaklanılmıştır. Yapılan sonlu eleman çözümlerinden elde edilen nümerik değerler, AISC-LRFD [39], Galambos [44] ve Eurocode 3 [43] yanal burulmalı burkulma formüllerinden elde edilen analitik değerler ile karşılaştırılmış ve kirişin hangi önkusur deseninde daha düşük burkulma yüklerinde stabilitesini kaybettiği belirlenmiştir. Önkusursuz ve önkusurlu kirişlerin nümerik sonuçlarının Amerikan ve Avrupa yapısal çelik yönetmeliklerindeki [39, 43] yanal burulmalı burkulma formüllerinden elde edilen ve literatürdeki [44] burkulma formüllerine göre hesaplanan analitik değerlerle karşılaştırılması sonucu, çok önemli sonuçlara ulaşılmıştır:

1-) Önkusurlu kirişlerin burkulma yüklerinin elde edilmesi için büyük deplasman analizi (large displacement analysis) gerekmektedir. Özdeğer analizleri (eigenvalue buckling analysis) yalnızca dallanma burkulmasına (bifurcation buckling) izin vermektedir. Çalışmada önkusursuz kirişlerin burkulma analizleri, özdeğer analizi ile yapılmış ve beklenen sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, burkulma öncesinde de büyük yanal deplasmanlar yapmasına izin verilmesi gereken geometrik önkusurlu kirişlerde, özdeğer analizleri gerçek burkulma davranışının ortaya çıkmasına engel olmuştur. Özdeğer analizi, önkusurlu kirişlerin de burkulma anına kadar yanal deformasyon ve burulma dönmesi yapmasına izin vermediğinden, gerçek burkulma davranışı (limit yük burkulması) yerine dallanma burkulması meydana gelmesine neden olmaktadır.

Bu durumdan hareketle, geometrik önkusurlu kirişlerin burkulma analizlerinde doğrusal olmayan geometrik özellikleri dikkate alan statik analizler tercih edilerek gerçek sonuçlara ulaşılmıştır.

2-) Başlangıç kusuru olmayan kirişler için yapılan özdeğer analizleri, Amerikan AISC-LRFD [39] yapısal çelik yönetmeliğinde sunulan yanal burulmalı burkulma formüllerine göre hesaplanan analitik değerlerin, Galambos [44] teorik formülüne ve Avrupa Eurocode 3 [43] yapısal çelik yönetmeliği formülüne göre hesaplanan analitik değerlere göre nümerik değerlerle daha uyumlu olduğunu göstermiştir.

3-) Geometrik önkusur deseni, kirişin burkulma sonunda aldığı yarım sinüs dalgası şekline yaklaştıkça, burkulma yükü azalmaktadır.

4-) Yüklemenin üst tablaya uygulandığı kirişlerde, yanal önkusurların kesit boyunca üst tablaya doğru artmasının yanal burulmalı burkulma momentini önemli derecede (% 4-6) azalttığı görülmüştür.

5) Eurocode 3 [43] yanal burulmalı burkulma formülleri, geometrik önkusuru olmayan çift simetri eksenli I-profillerde aşırı güvenli tarafta kalan sonuçlar (yaklaşık % 20) verse de, geometrik önkusurların bulunduğu durumlarda (özellikle yarım sinüs dalgası şeklinde kiriş boyuna eksenine ve başlangıç burulma açısı) nümerik sonuçlara yakın sonuçlar vermektedir. Bu durum, formüllerde önkusur faktörü olarak nitelenen bir katsayının kullanılıyor olmasından kaynaklanmaktadır. Pratikte, kirişlerde geometrik önkusur bulunmasının kaçınılmaz olmasından dolayı, Eurocode 3 [43] formüllerinin kullanılması daha güvenli olacaktır.

6) Geometrik önkusurun burkulma yüküne etkisini doğru bir şekilde belirleyebilmek için burkulma modu ile uyumlu önkusur şekilleri dikkate alınmalıdır. Tam sinüs dalgası önkusur şekli, kirişlerin 1. burkulma modu ile uyumlu olmadığı için okunan değerlerde azalma olması beklenirken artış olduğu görülmüştür. Çünkü tam sinüs eğrilik deseni, 2. burkulma moduna karşılık gelmektedir. Bu nedenle, analizlerde mod uyumuna dikkat edilmesi gereklidir.

7) Galambos [44] ve AISC-LRFD [39] formüllerinde önkusur şeklini dikkate alan bir kusur faktörü olmadığı görülmüş ve bu hesaplamalarda önkusur azaltma faktörünü dikkate alan bir katsayı eklenmesinin gerekliliği anlaşılmıştır.

8) Yarım sinüs dalgası önkusuruna sahip kirişlerin burkulma yükünde önkusursuz referans kirişlere göre maksimum % 10 azalma görülürken, tam parabol kusur şekline sahip kirişlerde ise bu fark % 9'dur. Burulma açısı eklenmiş kirişlerde ise yarım sinüs dalgalı olanlarda maksimum % 14, tam parabol eğrilikli kirişlerde ise maksimum % 13 fark tespit edilmiştir. Her iki tip önkusur durumu için de (yanal deplasman önkusurlu ve yanal deplasman+burulma açısı önkusurlu durumlar) yarım sinüs dalgası desenli başlangıç kusurunun kritik olduğu belirlenmiştir.

9) Kiriş elastik limit uzunluğuna yaklaştıkça, kritik burkulma yükünde önkusurun etkisinin arttığı görülmüştür.

10) Çift simetri eksenli I kirişlerde, sinüsoidal dağılıma sahip yanal eğrilik ve burulma açısı kombinsayonunu içeren önkusur şekli burkulma yükünde yaklaşık %15 azalmaya neden olduğu için yanal burulmalı burkulma analizlerinde bu dağılımın dikkate alınması gerektiği açık bir şekilde ortaya konmuştur.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçların çalışma kapsamında varsayılan yanal deformasyon ve burulma açısı genlik değerlerine bağlı olduğu unutulmamalıdır. Farklı genlik değerleri bulunan kirişler üzerine de benzer çalışmaların yapılması ve geometrik önkusur deseninin etkilerinin farklı genlik değerleri için de araştırılması faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Adluri, S., Structural Steel Design, Flexural Members, Memorial University, Canada
- [2] Nawaz, R., Equivalent Uniform Moment Factor for Lateral Torsional Buckling of Steel Beams, Master of Engineering Report in Structural Engineering, University of Alberta Department of Civil & Environmental Engineering, , Canada, 2009
- [3] ABAQUS [Computer software]. Dassault Systèmes, Waltham, MA
- [4] M. Ahnlen, J. Westlund, Lateral Torsional Buckling Of I-Beams. Master Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 2013
- [5] R. P. van der Aa, Numerical Assessment Of The Design Imperfections For Steel Beam Lateral Torsional Buckling. Master Thesis, Eindhoven University of Technology, Netherlands, 2015
- [6] NEN-EN 1993-1-1 Including Dutch National Annex, Eurocode 3: Design Of Steel Structures. Part 11: General Rules And Rules For Buildings, 2011
- [7] A.Taras, Contribution to the Development of Consistent Stability Design Rules for Steel Members, PhD thesis, Graz University of Technology, Austria, 2010
- [8] D. Ayhan, Çelik Kirişlerde Yanal Burulmalı Burkulma Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul 2007
- [9] TS-648, 1980. Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- [10] DIN 4114, 1952, Deutsches Institut Für Normung—Stability Cases
- [11] Eğilmez, O. Ö., Akbaba, A., Vardaroğlu, M., Narin Çelik Kirişlere Stabilité Desteği Sađlayan Kayma Diyaframlarının Rijitlik Gereklilikleri. İMO Teknik D. 489, 8105-8128, 2017
- [12] Davies J. M., Bryan E. R., Manual of Stressed Skin Diaphragm Design, Wiley Press, 1982
- [13] ANSYS V.15 [Engineering Simulation Software]. ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA, 2013
- [14] Kabir, İ., Bhowmick, A. K., Effect Of Geometric Imperfection On Lateral Torsional Buckling Capacity Of I-Beams, Resilient Infrastructure, London, 2016
- [15] Canadian Standards Association (CSA), Limit States Design of Steel Structures, CAN/CSA-S16-14: Toronto, Ontario, Canada, 2014
- [16] Dou, C., Pi, Y., Effects of Geometric Imperfections on Flexural Buckling Resistance of Laterally Braced Columns. Journal of Structural Engineering , ASCE, 142(9), 1-10,2016
- [17] Gil, H., Yura, J. A., Bracing requirements of inelastic columns, Journal of Constructional Steel Research, 51(1), 1–19, 1999
- [18] H. Özbaşaran, Çelik I Kesitli Konsol Kirişlerin Yanal Burulmalı Burkulmasının Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2013
- [19] E. Polat, Kaynaklı Çelik I Ve Kutu Kesitli Kolon - I Kiriş Birleşimlerinin Plastik Dönme Kapasitelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009

- [20] Valeš, J., Kala, Z., Martinásek, J., Omishore, A., FE Nonlinear Analysis Of Lateral-Torsional Buckling Resistance , International Journal Of Mechanics, 10, 235-241,2016
- [21] Gendy, B., L., Hanna, M., T., Effect Of Geometric Imperfections On The Ultimate Moment Capacity Of Cold-Formed Sigma-Shape Sections, Housing And Building National Research Center, HBRC Journal, 13 (2), 163-170, 2015
- [22] AISI, Cold—Formed Steel Design Manual, American Iron and Steel Institute, AISI,2012
- [23] Valeša, J., Stan, T., C., FEM Modelling of Lateral-Torsional Buckling Using Shell and Solid Elements, Procedia Engineering , 190, 464 – 471, 2017
- [24] Unterweger, H., Taras, A., Loschan, S., Kettler, M., Influence Of Imperfections On The Stability Of Beams With Intermediate Flexible Supports, Journal of Constructional Steel Research, 136, 140-148, 2017
- [25] Boissonnade, N., Somja, H., Influence of Imperfections in FEM Modeling of Lateral Torsional Buckling, Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council, Texas, 2012
- [26] Villette, M., Assessment on the Behavior and Design of Beam-Columns and Proposal of New Formulations, PhD Thesis, University of Liège, Belgium, 2004
- [27] Amouzegar, H., Amirzadeh, B., Zhao, X., Schafer, B., W., Tootkaboni, M., P., Stat-iscal Analysis Of The Impact Of Imperfection Modes On Collapse Behavior Of Cold-Formed Steel Members, Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council, Tennessee, 2015

- [28] Schillinger, D., Stochastic FEM Based Stability Analysis of I-Sections With Random Imperfections, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of "Diplom-Ingenieur", University of Stuttgart, 2008
- [29] Hasham, A., S., Rasmussen, K., J., R., Member Capacity of Thin-walled I-sections in Combined Compression and Major Axis Bending, , School of Civil Engineering, University of Sydney, Rapor No:R746, 1997
- [30] Kalkan, İ., Büyükkaragöz, A., A Numerical and Analytical Study on Distorsional Buckling of Doubly-Symmetric Steel I-Beams, Journal of Constructional Steel Research, 70, 289-297, 2011
- [31] Galambos, T., V., Surovek, A., E., Structural Stability of Steel: Concepts And Applications For Structural Engineer, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 236-239, 2008
- [32] Raymond A. Hartle, P.E., Kenneth E. Wilson, P.E., S.E., William A. Amrhein, P.E., S.E., Scott D. Zang, P.E., Justin W. Bouscher, E.I.T., Laura E. Volle, E.I.T, LRFD Design Example for Steel Girder Superstructure Bridge, FHWA / National Highway Institute Washington, DC, Rapor No: FHWA NHI - 04-041, 2003
- [33] Türker, K., Çelik Yapılar-I Ders Notları, Bölüm : 3.3, Eğilme ve Kesme Etkisindeki Elemanlar, Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2017
- [34] Anonim, Lectures For MBA, <https://www.slideshare.net/edhole/free-video-lectures-for-mba-42707960> , (Erişim tarihi: 02.04.2018)
- [35] Höglund, T., Att konstruera med stål, Modul 6 – Stabilitet för balkar och stänger, Luleå Tekniska Universitet, Kungliga Tekniska Högskolan & Stålbyggnads Institutet, Sweden, 2006

- [36] Timoshenko, S., Gere, J., M., Theory of Elasticity, 251, McGraw-Hill Book Company, New York, 1963
- [37] Lee, J., Energy-Based Approach for Buckling Problems in Steel Structures, National Research Laboratory, Sejong University, 2000
- [38] Kalkan, İ., Lateral Torsional Buckling Of Rectangular Reinforced Concrete Beams, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, 2009
- [39] AISC, 2016, Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, USA
- [40] Gabr, R., H., M., Behavior And Strength Of Singly Symmetric Continuous I-Beams, Ain Shams University, 2014
- [41] Maljaars, J., Stark, J., W., B., Steenbergen, H., M., G., M., Buckling Of Coped Steel Beams And Steel Beams With Partial Endplates, Eindhoven University of Technology, Netherlands Heron, 49(3), 233-271, 2004
- [42] Ballio, G., Mazzolani, F., M., Theory and Design of Steel Structures, 130-133, 1979
- [43] EN 1993-1-1, 2005, Eurocode 3: Design Of Steel Structures - Part 1-1: General Rules And Rules For Buildings, Brussels, Belgium
- [44] Galambos, T., V., Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, Fifth Edition, 194-196, John Wiley & Sons, Inc., America, 1998
- [45] Mohebkhah, A., The Moment Gradient Factor in Lateral Torsional Buckling on Inelastic Castellated Beams, Malayer University, Journal of Constructional Steel Research, 60, 1481–1494, 2004

- [46] Keyder, E., Wasti, S., T., Çelik Yapı Elemanları, 130-131, ODTÜ, Ankara, 2013
- [47] Çelik Yapıların Tasarım Ve Yapım Kuralları, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2018
- [48] Nethercot, D., A., Rockey, K., C., A Unified Approach to the Elastic Lateral Buckling of Beams, AISC Engineering Journal, 9(3), 96-107, 1972
- [49] Logan, D., L., A First Course in the Finite Element Method, Fourth Edition, University of Wisconsin–Platteville, 1-2, 2007
- [50] Abaqus Analysis User's Guide, ABAQUS 6.13
- [51] Galambos, T., V., Surovek, A., E., Structural Stability of Steel: Concepts And Applications For Structural Engineer, 250-253, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2008