

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPMA ENKESİTLİ ÇİFT İ ELEMANDAN OLUŞAN
ÇOK PARÇALI KİRİŞLERİN YANAL BURULMALI BURKULMASI
ÜZERİNE ANALİTİK BİR ÇALIŞMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Fatih KABAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPMA ENKESİTLİ ÇİFT İ ELEMANDAN OLUŞAN
ÇOK PARÇALI KİRİŞLERİN YANAL BURULMALI BURKULMASI
ÜZERİNE ANALİTİK BİR ÇALIŞMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet Fatih KABAN
(501111084)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER

HAZİRAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111084 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mehmet Fatih KABAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**YAPMA ENKESİTLİ ÇİFT İ ELEMANDAN OLUŞAN ÇOK PARÇALI KİRİŞLERİN YANAL BURULMALI BURKULMASI ÜZERİNE ANALİTİK BİR ÇALIŞMA**" başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Cavidan YORGUN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Bülent AKBAŞ
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Teslim Tarihi: **03 Temmuz 2013**
Savunma Tarihi : **05 Haziran 2013**

Aileme ve tüm sevdiklerime,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, çift I profilden oluşan yapma kirişlerin yanal burulmalı burkulması üzerine analitik bir çalışma yapılmıştır.

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam sırasında engin bilgi ve deneyimleri ile bana yardımcı olan değerli hocam ve danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Cüneyt Vatansever'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bu süreçte tez çalışmam ile ilgili desteğini gördüğüm İnş. Yük. Müh. Bülent Deveci'ye de teşekkürü bir borç bilirim.

Bugüne kadar her türlü maddi ve manevi fedakârlıktan kaçınmayarak bana destek olan sevgili aileme, bana hep doğru yolu gösterdikleri ve beni bugünlere kadar getirdikleri için teşekkür ederim.

Haziran 2013

Mehmet Fatih Kaban

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Konu	1
1.2 Çalışmanın Amacı	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1 Tek ve Çift Çelik Kirişlerin Yapım Aşamasındaki Stabilite Analizleri	3
2.2 Yanal Burulmalı Burkulma Etkisine Maruz Çelik Çerçevelerin Gelişmiş Analizi	4
2.3 Problemin Ortaya Konulması	8
3. KİRİŞLERDE YANAL BURULMALI BURKULMA.....	11
3.1 Tanım.....	11
3.2 Üniform Moment Etkisi Altındaki I Kirişlerin Dayanımı	11
3.3 Yanal Doğrultuda Tutulu Olmayan Uzunluğun Moment Dayanımına Etkisi.....	13
3.4 Kirişlerde Elastik Yanal Burulmalı Burkulma	15
3.5 Yanal Mesnetler Arası Moment Yayılımı.....	29
4. KİRİŞ SİSTEMİ VE ENKESİTİ.....	31
4.1 Tek Bir I Enkesitli Kirişe Ait Özellikler	31
4.2 Çift I Enkesitli Kirişe Ait Özellikler	33
4.3 Yerel Burkulma Durumuna Ait Sınır Koşullar	34
5. ANALİTİK MODELLERİN GELİŞTİRİLMESİ	39
5.1 Sonlu Eleman Analizine Ait Genel Bilgiler	39
5.2 Mesnet Koşullarının Tanımı ve Yükleme Koşulları	40
5.3 Sonlu Eleman Modellerinin Doğrulanması	44
5.4 Doğrulanmış Mesnet ve Yükleme Koşullarının Çift I Enkesitli Çok Parçalı Kirişlere Uygulanması	46
5.5 Çift I Enkesitli Kirişlere Ait Bağlantı Detayı	47
5.6 Açıklığının Üçte Birinden (L/3) Bağlantılı Çok Parçalı Kiriş.....	48
5.7 Açıklığının Dörtte Birinden (L/4) Bağlantılı Çok Parçalı Kiriş.....	50
5.8 Açıklığının Beşte Birinden (L/5) Bağlantılı Çok Parçalı Kiriş	52
5.9 Açıklığının Altıda Birinden (L/6) Bağlantılı Çok Parçalı Kiriş	54
5.10 Açıklığının Yedide Birinden (L/7) Bağlantılı Çok Parçalı Kiriş.....	56
6. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	59

6.1 Sonlu Eleman Analizlerine Ait Sonuçlar.....	59
6.2 Konsol Kirişlere Ait Yanal Burulmalı Burkulma Dayanımı	60
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	69

KISALTMALAR

AISC	: American Institute of Steel Construction
AS4100	: Australian Standart for the Design of Steel Structures
LRFD	: Load and Resistance Factor Design
MPC	: Multiple Point Constraint
PCL	: Patran Command Language
CISC	: Canadian Institute of Steel Construction

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : Doğrultu kosinüsleri.	22
Çizelge 4.1 : Kesit özelliklerinin narinlik sınırları.	38

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Antakya otel üç boyutlu görünümü.	11
Şekil 2.2 : Antakya otel plan ve tipik aks görünüşleri.	12
Şekil 3.1 : Kirişlerde genel davranış.	16
Şekil 3.2 : Yanal burulmalı burkulma dayanımının yanal olarak tutulu olmayan uzunlukla değişimi.	17
Şekil 3.3 : M_0 momenti etkisi altındaki I enkesitli kirişin şekil değiştirmiş durumu (plan).	20
Şekil 3.4 : M_0 momenti etkisi altındaki I enkesitli kirişin şekil değiştirmiş A-A kesiti.	21
Şekil 3.5 : M_0 momenti etkisi altındaki I enkesitli kirişin şekil değiştirmiş durumu (yan görünüş).	21
Şekil 3.6 : Prizmatik bir mildeki burulma.	23
Şekil 3.7 : Dikdörtgen bir kesitte burulma.	25
Şekil 3.8 : I Kesitlerde çarpılmaya sebep olan kesme kuvvetleri.	26
Şekil 3.9 : Moment düzeltme katsayısının (M_1 / M_2) oranına bağlı değişimi.	34
Şekil 4.1 : Tek bir I enkesitli kirişe ait genel kesit özellikleri.	35
Şekil 4.2 : Çift I enkesitli çok parçalı kirişlere ait genel kesit özellikleri.	38
Şekil 4.3 : Modellerde kullanılan tek bir I enkesitli kirişin kesit özellikleri.	40
Şekil 4.4 : Modellerde kullanılan I enkesitli çift kirişlerin kesit özellikleri.	41
Şekil 5.1 : Sonlu elemanlara ayrılmış I enkesitli kirişin ABAQUS modeli.	44
Şekil 5.2 : Tek bir I enkesitli kirişe ait tanımlanan mesnet koşulları.	45
Şekil 5.3 : Tanımlanan mesnet koşullarına sahip I enkesitli kirişte meydana gelen yerel burkulmalar.	46
Şekil 5.4 : Mesnetlere etkitilen momentin düzgün dağılması amacıyla kullanılan çubuk elemanların yerleşimi.	47
Şekil 5.5 : Tanımlanan mesnet koşullarına sahip tek bir I enkesitli kirişin yanal burulmalı burkulması.	48
Şekil 5.6 : Tek bir I enkesitli kirişe ait idealleştirilmiş mesnet koşulları.	49
Şekil 5.7 : 30m açıklığa ve tanımlanan kesit özelliklerine sahip tek bir I enkesitli kirişin yanal burulmalı burkulması.	50
Şekil 5.8 : İdealize edilmiş mesnet ve yükleme koşullarının çift I enkesitli çok parçalı kirişlere uygulanması.	51
Şekil 5.9 : Çift I enkesitli çok parçalı kirişlere ait ara bağlantı detayı.	52
Şekil 5.10 : Çift I enkesitli çok parçalı kiriş için açıklığın üçte birinden ara bağlantı elemanı uygulaması.	53
Şekil 5.11 : Açıklığın üçte birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kiriş	

için yanal burulmalı burkulma.	54
Şekil 5.12 : Çift I enkesitli çok parçalı kiriş için açıklığın dörtte birinden ara bağlantı elemanı uygulaması.	55
Şekil 5.13 : Açıklığın dörtte birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kiriş için yanal burulmalı burkulma.	56
Şekil 5.14 : Çift I enkesitli çok parçalı kiriş için açıklığın beşte birinden ara bağlantı elemanı uygulaması.	57
Şekil 5.15 : Açıklığın beşte birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kiriş için yanal burulmalı burkulma.	58
Şekil 5.16 : Çift I enkesitli çok parçalı kiriş için açıklığın altıda birinden ara bağlantı elemanı uygulaması.	59
Şekil 5.17 : Açıklığın altıda birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kiriş için yanal burulmalı burkulma.	60
Şekil 5.18 : Çift I enkesitli çok parçalı kiriş için açıklığın yedide birinden ara bağlantı elemanı uygulaması.	61
Şekil 5.19 : Açıklığın yedide birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kiriş için yanal burulmalı burkulma.	62
Şekil 5.20 : (L_p / L) ile (M_{cr} / M_p)' nin değişimi.....	63
Şekil 6.1 : 15 m açıklığa sahip iki adet HE500B profilin burkulmuş hali.	67
Şekil 6.2 : 20 m açıklıklı iki adet HE800B profilin burkulmuş hali.	68

SEMBOL LİSTESİ

ϕ : Dönme açısı

γ : Birim kayma şekil değiştirmesi

μ : Poisson oranı

α : Herhangi bir katsayı

α_c : Kiriş narinlik azaltma katsayısı

α_m : Moment düzeltme katsayısı

β : Herhangi bir katsayı

π : Pi sayısı

λ : Elemanın genişlik/kalınlık oranı

λ_p : Kompakt eleman sınıfı için sınır genişlik/kalınlık oranı

λ_r : Kompakt olmayan eleman için sınır genişlik/kalınlık oranı

δ : Deplasman

A : Alan, herhangi bir katsayı

A_1 : Herhangi bir katsayı

A_2 : Herhangi bir katsayı

A_3 : Herhangi bir katsayı

A_4 : Herhangi bir katsayı

b_f : Başlık genişliği

b : Başlık genişliği

c : Çift simetrik kesitlerde 1.0 olarak alınabilen bir katsayı

C_b : Moment büyütme katsayısı

C_w : Çarpılma sabiti

d : Kesitin dıştan dışa yüksekliği

E : Elastisite modülü

F_y : Malzemenin akma dayanımı

G : Kayma modülü

h : Kesitin başlıklarının ağırlık merkezi arasındaki mesafe
 h_0 : Kesitin başlıklarının ağırlık merkezi arasındaki mesafe
 I : Atalet momenti
 I_x : $x-x$ eksenini etrafındaki atalet momenti
 I_y : $y-y$ eksenini etrafındaki atalet momenti
 $I_{x'}$: $x'-x'$ eksenini etrafındaki atalet momenti
 $I_{y'}$: $y'-y'$ eksenini etrafındaki atalet momenti
 I_f : Başlığın $y-y$ eksenini etrafındaki atalet momenti
 J : Burulma sabiti
 L : Kiriş boyu
 L_b : Basınç başlığının tutulu olmayan uzunluğu
 L_p : Plastik ve inelastik bölge arasındaki geçiş için sınır uzunluk
 L_r : Elastik ve inelastik bölge arasındaki geçiş için sınır uzunluk
 l : Kiriş açıklığı
 M_{cr} : Elastik yanal burulmalı burkulma moment dayanımı
 M_o : Üniorm eğilmeye ait elastik burkulma moment dayanımı
 M_p : Plastik moment dayanımı
 M_r : Moment dayanımı
 M_E : Elastik burkulma moment dayanımı
 M_n : Karakteristik moment dayanımı
 $M_{x'}$: M_o momentinin $x'-x'$ eksenini etrafındaki bileşeni
 $M_{y'}$: M_o momentinin $y'-y'$ eksenini etrafındaki bileşeni
 $M_{z'}$: M_o momentinin $z'-z'$ eksenini etrafındaki bileşeni
 M : Eğilme momenti
 M_x : Saint-venant burulması
 M_w : Burulma momentinin yanal eğilmeye sebep olan bir bileşeni
 M_s : Burulma momentinin dönmeye sebep olan bir bileşeni

M_z : Burulma momenti

M_f : Bir başlıktaki yanal eğilme moment dayanımı

M_1 : Kirişin i ucundaki moment dayanımı

M_2 : Kirişin j ucundaki moment dayanımı

m : Herhangi bir katsayı

N : Herhangi bir tamsayı

n : Herhangi bir tamsayı

P : Tekil yük

q : Herhangi bir tamsayı

R_m : Momentin sebep olduğu eğrilik katsayısı

r : Herhangi bir elemanın ağırlık merkezine olan uzaklığı

r_y : Enkesitin $y - y$ zayıf eksenine göre atalet yarıçapı

r_{ts} : Kesitin basınç tarafında kalan parçasının atalet yarıçapı

S_x : Elastik mukavemet momenti

T : Burulma momenti

t : Burulma momenti

t_w : Gövde kalınlığı

t_f : Başlık kalınlığı

u : Merkezin x doğrultusunda yaptığı deplasman

u_f : Başlık merkezinin x doğrultusunda yaptığı deplasman

v : Merkezin y doğrultusunda yaptığı deplasman

V : Kesme kuvveti

V_f : Başlığa gelen kesme kuvveti

w : Gövde kalınlığı

YAPMA ENKESİTLİ ÇİFT I ELEMANDAN OLUŞAN ÇOK PARÇALI KİRİŞLERİN YANAL BURULMALI BURKULMASI ÜZERİNE ANALİTİK BİR ÇALIŞMA

ÖZET

Günümüz dünyasında mimari sebeplerden ötürü mühendisliğin sınırlarını zorlayan bir çok istek gün yüzüne çıkmıştır. İnşaat mühendisliği için, büyük açıklıkların daha narin kesitlerle geçilmek istenmesi de bu isteklerden biridir. Özellikle çelik yapılarda gördüğümüz bu büyük açıklıklar genelde makas sistemleri kullanılarak geçilmektedir. Büyük açıklıkların dolu gövdeli kesitlerle geçilmek istenmesi durumunda ise hesap sonucunda çok yüksek kiriş boyları çıkmaktadır.

Büyük açıklıkların dolu gövdeli kesitlerle geçilmek istenmesi durumunda karşılaşılabilecek tek sorun kiriş yüksekliği değildir. Kirişin yanal burulmalı burkulması da önemli bir stabilite sorunudur. Yanal burulmalı burkulma, kritik bir moment değerinden sonra elemanın hem yatay ve düşey doğrultuda ötelenmesi, hem de enkesitin dönmesi olaylarının birlikte gerçekleşmesi ile meydana gelir. Ani ve habersiz gerçekleşen bir olaydır. Eğilme etkisine maruz tüm çelik elemanlarda görülmesi muhtemel olan bu göçme durumu, yapılan deneyler ve elde edilen teorik ifadeler sonucu sadece I, H vb. gibi açık kesitlerde göz önüne alınır. Örneğin bir kutu kesitin yanal burulmalı burkulma tahkiki ihmal edilir.

Büyük açıklıkların geçilmek zorunda kalınması durumu şu anda proje aşaması devam etmekte olan ASF – Antakya Müze Otel projesinde karşımıza çıkmaktadır. Otelin alt kısmında tarihi eserlerin olması, kalan insanların yürüme yollarından ya da odalarından tarihi eserleri direkt görmesinin istenmesi, bir döşeme sisteminin olmaması, narin kesitlerin kullanılmak istenmesi ve benzeri mimari sebeplerden ötürü büyük açıklıkların dolu gövdeli kesitlerle geçilmesi durumu ortaya çıkmıştır.

Yapılan çalışmanın başlangıç aşaması, tek bir I profil için AISC 360-10 yönetmeliğinde var olan M_{cr} değerini teorik olarak hesap etmek ve bunu ABAQUS bilgisayar programı yardımıyla doğrulamaktır. Model doğrulanırken mesnet şartlarının tanımı büyük bir önem arz etmektedir. Tanımlanan mesnet koşulları hem deplasman hem de yanal burulmalı burkulmaya ait teorik değerlerle doğrulanmıştır. Çalışmanın devamı ise, doğrulanmış modele ait mesnet şartlarını çift I profil için uygulamak ve bu elemana ait yanal burulmalı burkulma davranışını incelemek olmuştur. Yapılan literatür araştırmasında da böyle bir çalışmanın daha önce yapılmadığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla böyle bir araştırma çalışması içine girilmiştir.

Sonlu elemanların kullanıldığı analitik modellerde eleman sıklığı ve düzeni analiz sonuçlarını etkileyen temel faktörlerden biridir. Bu nedenle, kirişlerin analitik modellerinin geliştirilmesinde sonlu eleman ağının sıklığı ve düzeni en uygun sonucu verecek şekilde seçilmiştir.

Değerlendirmeler sonunda, kirişler için 30mm x 30mm boyutlarında sonlu eleman ağı oluşturulması ön görülmüştür

Araştırmaya ait modeller oluşturulurken iki adet I profil, aralarındaki mesafe kesit yüksekliğinin yarısı olacak şekilde yan yana konulup, açıklığın yarısı, üçte biri, dörtte biri, beşte biri, altıda biri ve yedide biri olmak üzere birbirine bağlanmıştır. Bağlantı detayı; alt, üst ve bu iki ek levhayı birbirine bağlayan kılıcına levha kullanılarak oluşturulmuştur. Profiller birbirlerine bağlanırken kullanılan alt ve üst levhaların kalınlığı başlık kalınlığı kadar olup boyları kiriş yüksekliğinin yarısı kadardır. Kılıcına levhanın kalınlığı da başlık kalınlığı kadardır ve boyu kiriş iç yüksekliği kadardır.

Yanal burulmalı burkulma kontrolü yapılırken mesnet koşulları basit kirişte uygulanan koşullarla aynıdır. Yükleme her bir kirişe ait mesnete 0.5 birim olacak şekilde toplamda 1 birim moment uygulanarak yapılır. Burkulma analizi sonucu elde edilecek olan özdeğerlerden en küçüğü M_{cr} değerini verecektir. Bu yükleme ve mesnet koşulları durumu yanal burulmalı burkulmaya ait en olumsuz yükleme ve mesnet koşulu durumudur. Eğer alt ve üst başlıklar kiriş boyunca baştan sonra kadar bağlanırsa, kesit kutu profile döner ve iki kesit yüzde yüz kapasite ile birlikte çalışır. Eğer alt ve üst başlıklar kiriş boyunca hiç bağlanmazsa, iki kirişin birlikte çalışmasından söz edilemez. Dolayısıyla araştırılan şey, optimum aralıklarla alt ve üst başlıkların birbirine bağlanması ile meydana gelen iki I profilin birlikte çalışması durumu ve M_{cr} değerindeki artıştır.

Yapılan analizler sonucu, M_{cr} değerinde önemli bir artış elde edilmiştir. İki profilin birbirine yarılarından bağlanması ve üçte birlerinden bağlanması arasında ciddi bir dayanım artışı söz konusudur. Bu artış, iki profilin birbirine bağlanma sıklığı arttıkça gözlemlenir ve birbirine açıklığın altıda birinden bağlı modelde M_p 'ye % 99.4 yakınsaklık elde edilir.

Çift I profil için teoride yönetmeliklerde yazan bir M_{cr} değeri yoktur. Analitik modellerin yanal burulmalı burkulma modları incelendiğinde, iki uçta yer alan eğilme elemanı parçalarının yanal burulmalı burkulma davranışı konsol kirişlerin sergilediği davranışa benzetilebilir.

Dolayısıyla, çift I enkesitli eğilme elemanlarına ait kuramsal yanal burulmalı burkulma sınır durumunda kritik eğilme momenti ifadesi için, I enkesitli konsol kirişler için verilen ifadeler kullanılabilir. Bu yaklaşımın yakınsaklığının doğrulanması bakımından, farklı açıklıklara (35m, 30m ve 25m) sahip çok parçalı eğilme elemanları için uygulamalar yapılmıştır ve %86 ile %99 arasında değişen yakınsaklıklar elde edilmiştir.

Tüm bu bilgiler ışığında, çalışma kapsamına göre, konsol kirişler için verilen yanal burulmalı burkulma ifadesinin, 35m, 30m ve 25m açıklıklı çok parçalı eğilme elemanlarında, ara bağlantı elemanı aralıklarının plastik eğilme momenti kapasitesine ulaşmasını sağlayacak şekilde tahmin edilmesi için kullanılabileceği söylenebilir. Ancak tasarım sırasında çok parçalı elemanların eğilme momenti kapasitelerini doğrudan kullanabilmek, eğilme elemanlarının plastik moment kapasitesine ulaşmasıyla birlikte yeterli dönme kapasitesine de sahip olmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, sadece doğrusal analiz sonuçlarını kapsayan mevcut çalışmanın bu

esaslar çerçevesinde, doğrusal olmayan analizler ve deneysel yöntemler kullanılarak geliştirilmesi ve genişletilmesi planlanmaktadır.

Sonuç olarak, I profillerin birlikte çalışması ve M_{cr} değerinde hatırı sayılır bir artışın olması durumu profillerin birbirlerine bağlanma sıklıkları, bağlama levhalarının kalınlıkları ve boyutlarının bir fonksiyonudur.

ON THE INVESTIGATION OF LATERAL TORSIONAL BUCKLING ANALYSIS OF BUILT-UP GIRDERS WITH DOUBLE I-SHAPE

SUMMARY

In today's world, lots of architectural requests which push the limits of engineering have arisen. Designing large spans with delicate sections is one of these requests in civil engineering. Engineers face with these large span problems especially in steel structures. In order to solve these kind of problems, engineers use usually truss systems. But when it is wanted to design large spans with only I-shaped beams, huge beam heights are needed.

Additionally, height of the beam is not the only problem when it is wanted to design large spans with I-shaped beams. Lateral torsional buckling is also an important stability problem. Lateral torsional buckling means that cross section of the beam rotates and beam deflects laterally and vertically all together after reaching a critical moment value.

Lateral torsional buckling is a sudden and unannounced situation. Due to experiments and the theoretical expression results, this situation which may be seen in all steel members subjected to bending is only considered in open sections such as I,H and so on. For example, lateral torsional buckling is not considered as a limit state in members which have hollow structural section.

Designing large spans with delicate I-shaped beams is a problem in the ongoing project of ASF-Antakya Museum Hotel. This problem comes up because of historical monuments at the bottom, lack of a floor system and some architectural desires.

Initial phase of this study is, calculating the theoretical value of the existing regulations in AISC 360-10 for a single I-shaped beam and verify it with the help of computer software ABAQUS. Definition of support conditions in ABAQUS has a great importance while validating the model.

In order to define simple support conditions, nodal points of the web finite elements at the ends are restrained in z direction. Moreover, nodal points of the bottom flange finite elements at the ends are restrained in y direction. Lastly, nodal points of the bottom flange finite elements at just one end are restrained in x direction. These x,y and z directions are consistent with right-hand rule. In addition to these, support conditions which are defined in computer program are verified with theoretical values for both deflection and lateral torsional buckling.

The following phase of this study is, applying the confirmed support conditions into double I-shaped beams and investigate the lateral torsional buckling behaviour. The literature search has shown that there is not any study such as in this thesis. Therefore, lateral torsional buckling behaviour of double I-shaped beams is chosen to be investigated in this study.

Element frequency and regularity have a great importance in the models in which finite elements are used. Using many finite elements may conclude time consumption. On the other hand, using inadequate finite elements conclude divergence from the exact result. Therefore, the best finite element regularity and frequency are chosen to set up the analytical models. With respect to some applications, 30mm x 30mm finite elements are found to be optimum for beams.

While creating models for the study, the distance between two I-shaped beams is considered half of the beam height and beams are connected each other from the half, one-third, one-fourth, one-fifth, one-sixth and one-seventh of the beam length.

Connection detail consists of top and bottom additional connecting plates and additional connecting web plate perpendicular to beam direction. Thicknesses of top and bottom additional connecting plates are same as flange thickness of the beam and lengths of these additional plates are half of the beam height. Additionally, thickness of the additional web plate is also same as the flange thickness of the beam and height of the plate is in-to-in height of the beam.

In addition to these connection details, no plates at the ends are constituted. Because some applications show that constituting plates at the ends may cause additional rigidity and the behaviour of the beam becomes like behaviour of beams which have fixed end support conditions.

While investigating the lateral torsional buckling, the support conditions are same as the simple supported beam. Load is applied 0.5 unit moment to each support. This means that the double I-shaped beam is subjected to 1.0 unit uniform moment.

Due to some applications, some local buckling modes are obtained. Because unit moment is subjected to the models from a node point at the web. In order to obtain a homogenous moment distribution and get rid of local buckling modes, rigid frame elements are used.

The smallest eigenvalue of buckling analysis gives the critical moment (M_{cr}) value. These loading and support conditions are the most unfavorable conditions in lateral torsional buckling analysis.

Besides, if top and bottom flanges of the beams are connected each other with additional connecting plates along the beam, cross section of the beam becomes box and these two beams work with one hundred percent capacity. If top and bottom flanges of the beams have no connection along the beam, it is not said that the beams work together. Therefore, the situation which is investigated is, connecting two beams with optimal intervals and supply the increment of the critical moment (M_{cr}) which causes lateral torsional buckling.

As a result of the analyses, a significant increase in the value of M_{cr} has been obtained. There is a significant increment in critical moment strength between the models which beams are connected from the half of the beam length and one-third of the beam length. This increment may be seen when the frequency of connection increases. In the model where the beams are connected from one-sixth of the beam length, has convergence to M_p (plastic moment strength) with %99.4.

There is no theoretical value for critical moment for double I-shaped beams in regulations. When the buckling modes of the analytical models are analyzed, lateral torsional buckling behaviour of the end bending elements may be likened to the lateral torsional buckling behaviour of the cantilever beams. For this reason, critical bending moment for I-shaped cantilever beams can be used for obtaining the theoretical critical bending moment for double I-shaped beams.

To verify the convergence of this approximation, many applications are done for built-up beams which have different openings (35m, 30m and 25m) and different section properties. As a result of these applications, a convergence interval between %86 and %99 is obtained.

In the light of this information, in accordance with the scope of the work, the expression of lateral torsional buckling for cantilever beams can be used to estimate the connection frequency of the built-up beams, which have openings 35m, 30m and 25 m, which satisfies reaching plastic moment strength.

On the other hand, to use the plastic moment capacity of the built-up beams in design, it is a necessity for the beams to provide the rotation capacity. Therefore, this study, which has only results of the linear analysis, is planned to be extended with nonlinear analysis and experimental studies.

As a result, the situation which the beams work together and the increment of the critical moment value is a function of the connection frequency, thickness of additional connection plates and dimensions of the additional connection plates.

1. GİRİŞ

1.1 Konu

Günümüzde mimari tasarımlar, yapı mühendisliğinin sınırlarını zorlayarak gerek yüksek binalarda gerekse büyük açıklıklara sahip yapılarda kullanılacak elemanların boyutlarına bazı sınırlar getirebilmektedir. Özellikle büyük açıklıkların daha narin kesitlerle geçilmek istenmesi de bu sınırlamalardan biridir. Büyük açıklıklarda dolu gövdeli kesitlerin kullanılması durumunda karşılaşılabilecek tek sorun kiriş yüksekliği değildir. Kiriş basınç başlığının yanal burulmalı burkulması da önemli bir stabilite sorunudur. Kirişlerin etkin bir biçimde boyutlandırılabilmesi için açıklık arttıkça narin bir enkesit halini alan kiriş basınç başlığının yanal doğrultuda yer değiştirmesinin önlenmesi gerekmektedir. Ancak yanal burulmalı burkulmaya karşı gerekli dayanımın, tek I enkesitli yüksek bir kiriş kullanılması yerine birbirine yeteri kadar yakın ve belirli aralıklarla birbirine bağlı iki adet I enkesitli elemandan oluşan çok parçalı kiriş kullanılmasıyla da sağlanabileceği düşünülmektedir.

Yanal burulmalı burkulma, kritik bir moment değerinden sonra elemanın yatay ve düşey doğrultuda ötelenmesi ile birlikte enkesitin dönmesi şeklinde meydana gelir. Ani ve habersiz gerçekleşen bir olaydır. Eğilme etkisine maruz tüm çelik elemanlarda görülmesi muhtemel olan bu sınır durum, yapılan deneyler ve elde edilen teorik ifadeler sonucu etkin olarak I, H vb. gibi açık kesitlerde göz önüne alınır. Örneğin özel durumlar hariç, bir kutu enkesitli eğilme elemanı için yanal burulmalı burkulma sınır durumu ihmal edilebilir.

1.2 Çalışmanın Amacı

Kirişlerde karakteristik eğilme dayanımı olarak eğilme momenti kapasitesi M_p 'nin kullanılması, ancak yerel burkulma ve yanal burulmalı burkulmanın belirleyici olmadığı durumlarda mümkün olmaktadır. Bu durum eğilme etkisindeki elemanlarda, kompakt basınç başlığı ve gövde enkesit parçalarıyla birlikte basınç başlığının yanal doğrultuda ötelenmesinin önlenmesi ile sağlanabilmektedir.

Burada, çift I enkesitli çok parçalı bir eğilme elemanı kullanılarak yanal doğrultuda ötelenmesi önlenmeksizin en elverişsiz moment yayılımı durumunda, kritik yanal burulmalı burkulma moment değeri M_{cr} 'in kiriş eğilme momenti kapasitesine eşit alınabilmesi için gerekli ara bağlantı elemanı mesafesinin parametre olarak dikkate alındığı analitik bir çalışma yürütülmüştür.

Çalışmanın kapsamında, ara bağlantı teşkili, bağlantı elemanlarının boyutları ve mesnet koşulları her bir durum için aynıdır. Birleşim aracı olarak kullanılan kaynakların dayanımının yeterli olduğu varsayılmıştır.

Çalışma kapsamında yer alan 30m açıklıklı çok parçalı kirişlerin sonlu elemanlardan oluşan analitik modelleri ABAQUS [1] bilgisayar programı kullanılarak geliştirilmiştir.

Yapılan çalışmanın temel aşamaları şunlardır:

- Analitik modellerin geliştirilmesinde basit mesnet koşullarının I enkesitli tek bir kiriş dikkate alınarak doğrulanması,
- Çift I enkesitli çok parçalı kirişlerin yanal burulmalı burkulma sınır durumunda kritik eğilme momenti değerlerinin elde edilmesi amacıyla analitik modellerinin hazırlanması,
- Çok parçalı kirişlerde ara bağlantı elemanlarının farklı aralıklarla yerleştirilmesinin basınç başlığı yanal burulmalı burkulma durumuna katkısının incelenmesi
- Farklı açıklıklarda çok parçalı kirişlerin kullanılması halinde yanal burulmalı burkulma sınır durumunda kritik eğilme momenti değerlerinin araştırılmasıdır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yanal burulmalı burkulma, çelik yapı elemanlarının tasarımında kritik bir yere sahiptir. Mevcut çalışmaların hemen hemen tamamı, gerek deneysel gerekse kuramsal olmak üzere tek enkesitli eğilme elemanlarının farklı mesnet koşulları altında yanal burulmalı burkulma sınır durumlarının araştırılmasını kapsamaktadır.

Çok parçalı eğilme elemanları kullanılması durumunda, bu tür enkesitlere sahip elemanların basınç başlıklarının yanal burulmalı burkulma esnasında birlikte çalışmasının sağlanması gerekmektedir. Çok parçalı eğilme elemanlarında enkesit parçalarının birlikte ortak olarak çalışmasını sağlayan elemanlar ara bağlantı elemanları olacaktır. Bu elemanların uygulama aralıkları da temel parametre olarak dikkate alınabilir. Bununla birlikte ara bağlantı elemanlarının ve bağlantı şeklinin de yanal burulmalı burkulma sınır durumu için etkin bir rol oynayacağı açıktır. Ancak bu durum, bu çalışma kapsamında dikkate alınmamıştır. Bu konu kapsamında aşağıdaki bölümlerde özetlenen mevcut çalışmalara yer verilmiştir.

2.1 Tek ve Çift Çelik Kirişlerin Yapım Aşamasındaki Stabilité Analizleri

Bu çalışma Sean Justin Coffelt [2] tarafından 2010 yılında Tennessee Üniversitesi'nde hazırlanmıştır. Sean Justin Coffelt'in araştırması iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk kısımda değişik yükleme ve mesnet koşulları altında tek veya çift doğrultuda simetrik bir kirişe ait kapasite zarfları gösterilmiştir. Burada, tek veya çift doğrultuda simetrik çift kirişler ise yalnızca kendi ağırlıklarına maruzdur. İkinci kısımda ise bu çift profillere ait sonlu eleman modelleri mevcuttur. Tek bir doğrultuda simetrik olan çift profillere ait kapasite denklemlerini doğrulamak için burkulma analizleri yapılmıştır ve daha sonra bu kesitin rüzgar yükü etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Analizler zayıf eksen etrafındaki eğilmeyi kapsamaktadır. Çift profiller bir bütün olarak düşünülmüştür ve yatay yükler etkin olduğunda çaprazların burkulmasının bir sorun olup olmadığı araştırılmıştır.

Çalışmanın altı adet sonucu olmuştur. İlk olarak, tek doğrultuda simetrik tek bir kirişin en yüksek yanal burulmalı burkulma riskini taşıdığı elde edilmiştir. Ancak basınç başlığı ne kadar küçük olursa yanal burulmalı burkulma riski de o kadar azalır.

Yura'nın [3] tek doğrultuda simetrik çift kesitler için oluşturduğu burkulma denklemi doğrulanmıştır. Sadece konsol sistemler için C_b moment düzeltme katsayısı AISC 360-10'dan [4] 3.0 olarak alınmalıdır.

Tek doğrultuda simetrik çift kirişli konsol sistemlerde, hakim burkulma modunun 1. burkulma modu olabilmesi için yanal doğrultuda minimum sayıda destekleme gerekmektedir.

Basit bağlı tek doğrultuda simetrik çift kirişlerin bir bütün olarak burkulması ve desteklemeler arası burkulma olmaması için desteklenebilecek maksimum bir sayı vardır. Bu durum özellikle kirişler arası büyük açıklığa sahip sistemler için geçerlidir.

Rüzgar yüküne maruz çift kirişler yanal olarak birlikte ötelenirler ve her bir kiriş için gerilme dağılımları açıklık boyunca neredeyse aynıdır. Tüm sistemin zayıf eksen etrafındaki atalet momenti kirişlerin teker teker zayıf eksen etrafındaki atalet momentlerinin toplamıdır. Bu da kirişlerin yanal kuvvetleri paylaşarak ayrı ayrı eğildiği ama birlikte hareket ettiği anlamına gelir.

Son olarak ise, çift kesitleri birbirine bağlayan çapraz elemanların rüzgar yükünden dolayı burkulması olayı gerçekleşmesi çok zor ancak imkansız olmayan bir durumdur. Çaprazların burkulmasından önce çift kesitlerde akma ya da burkulma olaylarının gerçekleşmesi daha muhtemeldir. Çift kesitlerin merkezden merkeze mesafelerinin daha büyük olduğu durumlarda çapraz elemanlarının burkulma ihtimali artar. Bu durum özellikle yüksek gövdeli kirişlerde geçerlidir. Çünkü kiriş gövde yüksekliği arttıkça etkiyen rüzgar yükü artmaktadır.

2.2 Yanal Burulmalı Burkulma Etkisine Maruz Çelik Çerçevelerin Gelişmiş Analizi

Bu araştırma ise Zeng Yuan [5] tarafından 2004 yılında yapılmıştır. Araştırma konusu, yanal burulmalı burkulma etkilerinin de göz önünde bulundurulduğu çelik çerçeve sistemi tasarımı için uygun ve gelişmiş bir analiz metodu geliştirmektir.

Daha detaylı bir şekilde irdelenecek olursa, araştırma konusu aşağıdaki konuları kapsamaktadır:

- Yanal burulmalı burkulma etkisine maruz çelik çerçeve sistemine ait sonlu eleman modeli oluşturmak. Bu modeller geometrik kusurları, artık gerilmeleri, farklı yük dizilimlerini ve bağlantı detaylarını içermektedir.
- Basit bağlı bir kirişe ve çelik çerçeve sistemine ait yanal burulmalı burkulma davranış karakterlerini anlamak için daha önce oluşturulan bir sonlu eleman modelini kullanmak. Her iki sisteme ait taşıma gücü ve yük-deplasman eğrileri karşılaştırma amaçlı kullanılabilir.
- Sonlu eleman modellerinden düzlem içi yük-yer değiştirme eğrileri ve gerilme dağılımlarını elde etmek. Daha sonra bu sonuçları, yanal burulmalı burkulma etkisini de içeren iki doğrultuda iyileştirilmiş plastik mafsallı analiz yöntemleri için de kullanılabilir hale getirmek.
- Yanal burulmalı burkulma etkilerini de içeren iyileştirilmiş plastik mafsallı analizini kullanarak bir bilgisayar programı geliştirmek.
- Sonlu eleman modellerinden elde edilen karşılaştırmalı çözümleri kullanarak yeni metodu düzenlemek ve doğrulamak.

Tüm bu bilgilerin ışığında yapılan çalışma sonucu elde edilen sonuçlar ise aşağıdaki gibidir:

- Yanal burulmalı burkulma ile ilgili analitik bulgular, çarpılmalı burulmaya karşı tutulma durumu ve moment düzeltme problemleri yüzünden hala daha elastik bölgededir. Bu yapısal dengesizlik durumuna ait kapalı yapıdaki çözümlerin elde edilmesi oldukça zordur. Elastik olmayan yanal burulmalı burkulmanın gerçek anlamda çözümü analitik yöntemler ile mümkün değildir ve bu duruma ait taşıma gücü ise çok sayıda basit bağlı kirişin test edilmesi ile tespit edilebilir.
- Bu çalışmada AS4100 [6], AISC LRFD [7] ve Eurocode 3 [8] tasarım şartnameleri incelenmiştir. Her üç şartnamede görülmüştür ki, çarpılmaya karşı tutulu olma durumu etkili uzunluk katsayılarının kullanımında göz önünde bulundurulmuştur. Moment düzeltme katsayılarının etkilerini oluşturmak için moment düzeltme katsayıları kullanılmıştır. Avustralya

Şartnamesi'nde (AS4100) moment düzeltme katsayısı biraz farklıdır. Kiriş narinlik azaltması çarpanlarının (α_c) hesabında, maksimum elastik burkulma momentini kullanmak yerine $M_E = (\alpha_m)(M_0)$, üniform eğilmeye ait elastik burkulma momenti (M_0) kullanılmaktadır. Bu sebepten ötürü moment düzeltme katsayıları eleman narinliğinden ayrı olarak dikkate alınmaktadır.

- Kabuk (Shell) elemanlara dayalı yayılı plastisite analizi, farklı yük ve mesnet koşullarına sahip basit bağlı kirişe ait yanal burulmalı burkulma etkilerini kapsamaktadır. Sayısal analitik sonuçlar hem elastik analitik burkulma momenti hem de AS4100'de bulunan kiriş tasarım eğrisi ile büyük yakınsaklık göstermektedir. Bu eğri deneysel verilere dayanmaktadır.
- İdealleştirilmiş basit bağlı mesnet koşullarını üç boyutlu kabuk sonlu eleman modelinde kullanabilmek için, on tip mesnet koşulu kullanılmıştır. Bunlardan bir tanesi olan birden çok nokta tutma (MPC) yöntemi, idealleştirilmiş basit bağlı mesnet koşullarını aynen analitik çözümlerde kullanılabilir kılmıştır. Sonlu eleman modeli, bunun gibi idealleştirilmiş basit bağlı bir çok kolon ve kiriş modelleri için gelecekteki araştırmalarda oldukça kullanışlı olacaktır.
- Yük-Deplasman eğrileri kabuk sonlu eleman analizlerinden kolayca elde edilebilir. Basit bağlı kirişlere ait bu eğriler gösterir ki, yanal burulmalı burkulma istenen göçme modu olmamaktadır. Kiriş dayanımı, taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra birden bire düşmektedir. Dolayısıyla burkulmanın başlayabilmesi için yeterli dayanım oluşmamaktadır.

Genel olarak, burkulmaya bağlı göçme olmadan önce kirişlerdeki düzlem içi yük akışları yanal olarak tutulu mesnet koşullarına sahip kirişlere ait yük akışları ile neredeyse aynıdır. Kirişlerde burkulma olmadan önceki bölgede gerçekleşen dayanım azalmasını tahmin etmek mümkün değildir. Bu dayanım azalmaları moment düzeltme katsayıları, sınır koşulları ve eleman narinliğine bağlı faktörler ile ilgili olabilir.

- Dokuz tip sistem araştırılmıştır. Bunlardan bazıları, yanal ötelenmesi önlenmiş ve önlenmemiş tek açıklıklı tek katlı sistemler, Γ şeklinde çerçeveler, konsollu çerçeveler, iki açıklıklı tek katlı sistemler, tek açıklıklı iki katlı sistemler ve tek açıklıklı beşik çerçevelerdir. Daha etkili bir sonlu

eleman modeli için bir bilgisayar alt programı geliştirilmiştir. Bunun için MSC/Patran Komut Dili (PCL) [9] kullanılmıştır.

Tüm bu modellerde başlangıç düzensizlikleri, membran artık gerilmeleri, aşamalı kesit akması, plastisite yayılması, II. mertebe etkileri ve yanal burulmalı burkulma etkileri göz önünde bulundurulmuştur.

- Çerçeve sistemlerinin sonlu eleman analizlerinde 4 tip kiriş-kolon birleşimi modellenmiştir. Eğer çerçeveler yanal doğrultuda tamamen tutulu ise, tüm bu birleşimler rijit birleşim gibi davranmaktadır. Bununla birlikte, yanal olarak tutulu olmayan çerçevelerin taşıma kapasitelerinde kiriş-kolon birleşimlerinin azımsanmayacak kadar etkisi vardır. Birleşimdeki berkitmeler kiriş kısmının yanal burulmalı burkulmaya karşı dayanımını büyük bir miktarda artırmaktadır. Birleşim detaylarının etkileri elastik burkulma analizlerine oranla elastik olmayan analizler için daha önemlidir. Bu da, günümüzde kullanılan yöntemlerdeki elastik etkili uzunluğun ve moment düzeltme katsayılarının çok ihtiyatlı olduğu ve rijit çerçevelerin fazlalığının katkı sağladığı elastik olmayan dayanımın hesaplanmasında kullanılamayacağı anlamına gelmektedir.
- Çerçeve sistemlerde, kiriş kısımların mesnet koşulları birleşim elemanlarının rijitliği ve birleşimin rijitliği ile alakalıdır. Bu iki durumun tanımlanması oldukça zordur. Ayrıca kiriş kısmının sınır koşulları ve yük yüksekliğinin yanal burulmalı burkulmaya olan etkisini tespit etmek de zordur.

Görünen odur ki, kiriş kısmın kapasitesi tespit edilirken tasarımcılar için daha uygun olan durum mühendislik hükümlerine dayalı ampirik yöntemlerin kullanılmasıdır.

- Yük-Deplasman eğrileri göstermektedir ki, rijit çerçevelerin yanal burulmalı burkulma davranışı, basit bağlı kirişlerin davranışından oldukça farklıdır.

Genel olarak rijit çerçeveler, düzlem dışı burkulma oluşumu sırasında, taşınabilecek maksimum yükü koruyarak azımsanmayacak derecedeki deplasmanlara dayanabilir.

- Çerçeve sistemlerin sonlu eleman analizleri orantılı yükleme şeması kullanılarak oluşturulduğunda görülmektedir ki, çerçeve sistemindeki bir

eleman yanal burulmalı burkulmadan dolayı göçtüğünde, çerçeve sistemi daha fazla yük taşıyamamaktadır.

Rijit çerçeve sistemlerinde plastik mafsal formasyonunda göçme tipi ile yanal burulmalı burkulma tipi göçme arasında benzerlik vardır. Çerçevelerdeki kiriş kısmın düzlem dışı göçme durumu plastik mafsal durumu ile aynıdır ancak kapasite biraz daha azdır.

- Çerçeve sistemler için, yanal burulmalı burkulmadan önce aşamalı plastik mafsal oluşumu formasyonu hala izin verilen bir durumdur. Bu yüzden, yeni yöntemle göre hesaplanan çerçeve taşıma kapasitesi şu andaki tasarım prosedürüne göre hesaplanandan daha fazladır.
- Rijit çerçevelerde yanal burulmalı burkulma esnasında plastisitenin yeniden dağılması oldukça önemli olabilir. Bu etkiler oldukça karmaşıktır ve hem tasarım şartnamelerinde hem de iyileştirilmiş yeni plastik mafsal yönteminde göz önünde bulundurulmamıştır. Bu yüzden sayısal değerlendirme çözümleri ile karşılaştırıldığında yeni yöntem daha ihtiyatlıdır.

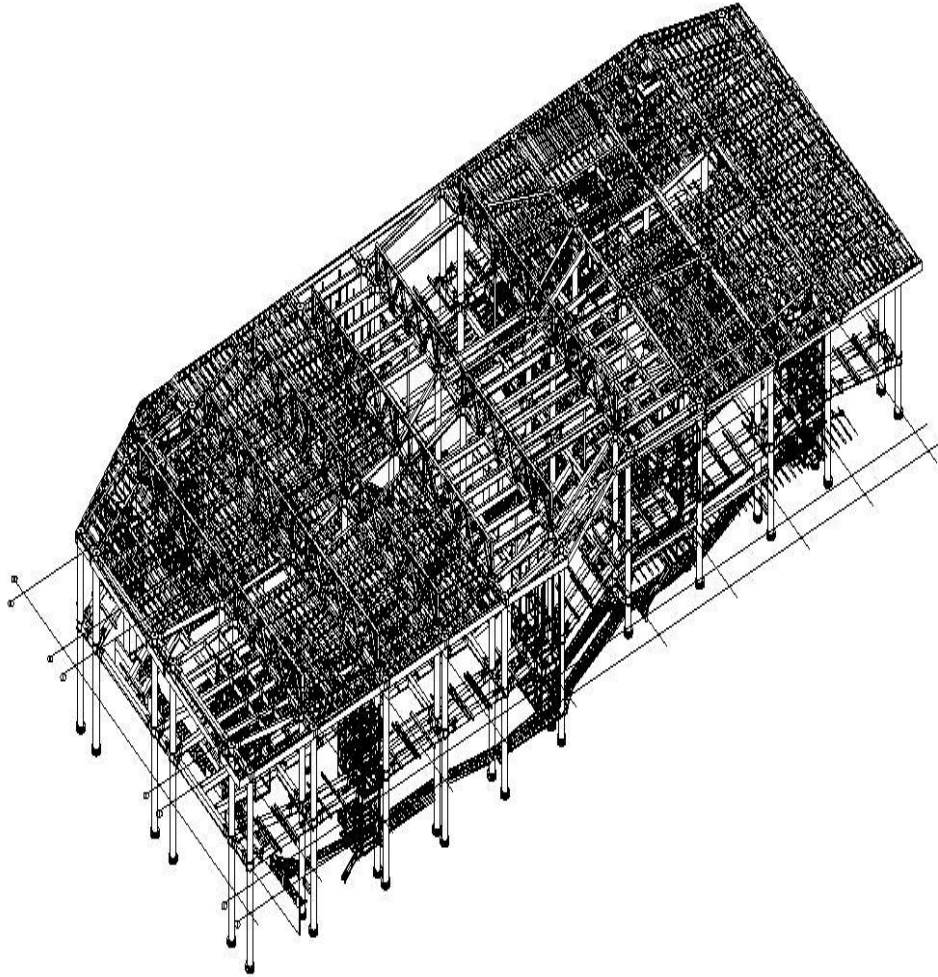
Yeni yöntemle çelik çerçeve sistemlerinin tasarımı oldukça anlaşılır olmuştur. Program ayrıca hem alt hem de üst başlıktaki sınır koşullarını hesaba katabilmektedir.

İyileştirilmiş yeni plastik mafsal yöntemi, analiz boyunca yanal burulmalı burkulma etkilerini göz önünde bulundurmaktadır. Yeni yöntemin kullanımı ile tasarımcılar genel çerçeve sistemlerine ait yük-deplasman eğrilerini elde edebilecek ve yapısal davranışı daha iyi anlayabilecektir. Yanal burulmalı burkulma etkisine maruz kirişler için ampirik formüller kullanılmasına rağmen, yeterli derecede yanal olarak tutulmuş elemanlarda plastik mafsal oluşumuna izin verilmektedir. Yeni yöntem, şu andaki tasarım şartnamesi ile kıyaslandığında, çerçeveli sistemler için önemli faydalar sağlamaktadır.

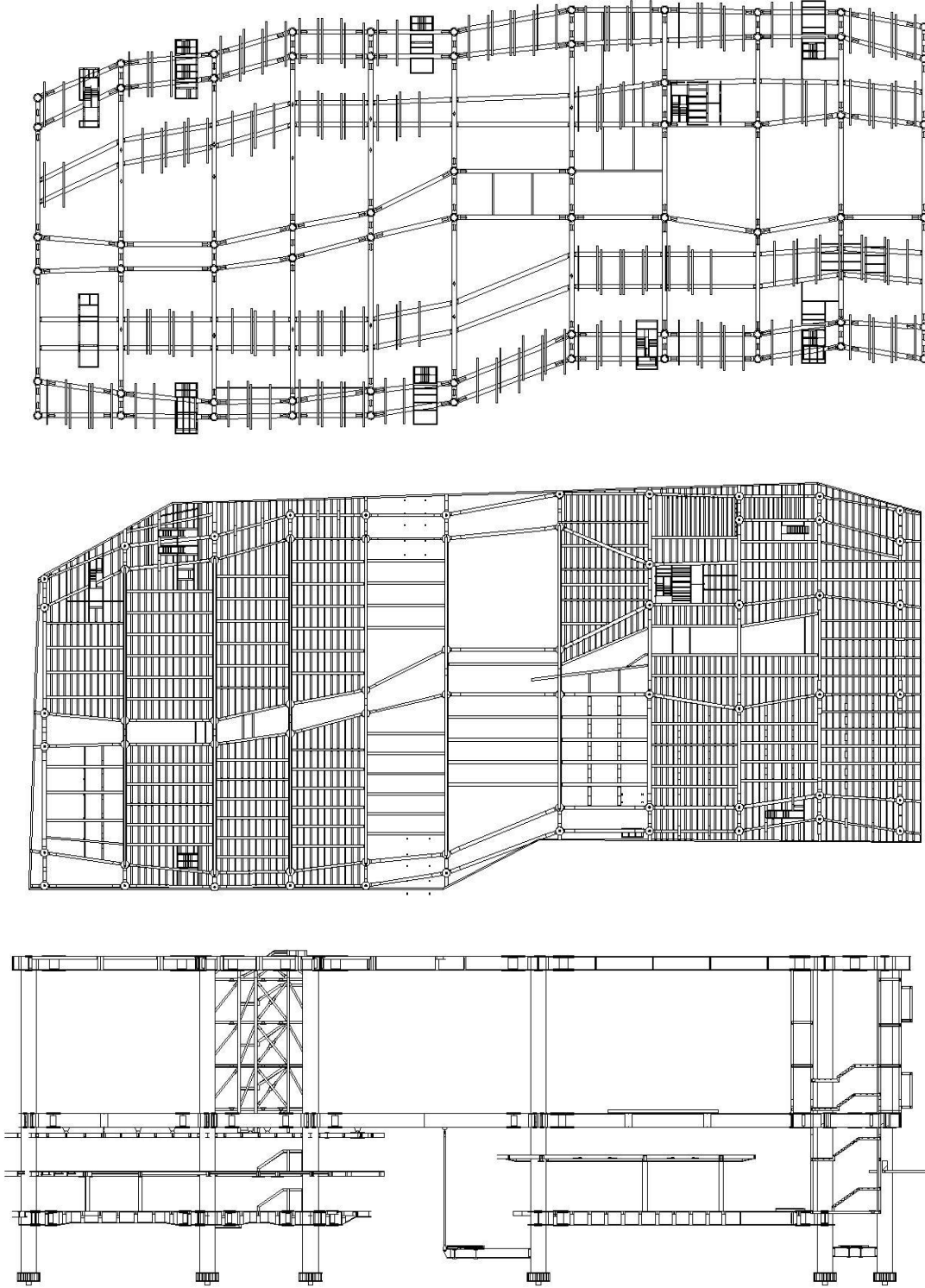
2.3 Problemin Ortaya Konulması

Mevcut çalışmalar incelendiğinde, çift I enkesitli çok parçalı eğilme elemanlarının yanal burulmalı burkulması ile doğrudan ilgili araştırma oldukça sınırlıdır. Büyük açıklıkların (yaklaşık 30 m) geçilmek zorunda kalınması durumu şu anda proje aşaması devam etmekte olan ASF – Antakya Müze Otel projesinde karşımıza

çıkılmaktadır. Otelin alt kısmında tarihi eserlerin olması, otelde kalan insanların yürüme yollarından ya da odalarından tarihi eserleri görmesinin istenmesi, bir döşeme sisteminin olmaması, narin kesitlerin kullanılmak istenmesi ve benzeri mimari sebeplerden ötürü büyük açıklıkların dolu gövdeli narin kesitlerle geçilmesi durumunu ortaya çıkarmıştır. Büyük açıklıkların dolu gövdeli kesitlerle geçilmek istenmesi durumunda karşılaşılabilecek tek sorun kiriş yüksekliği değildir. Özellikle bir döşeme sistemi bulunmayan yapılarda kirişlerin yanal burulmalı burkulması da önemli bir stabilite sorunudur. Bahsedilen otele ait üç boyutlu görünüm **Şekil 2.1**'de, plan ve tipik aks görünüşleri **Şekil 2.2**'de görülmektedir.



Şekil 2.1 : Antakya otel üç boyutlu görünümü.



Şekil 2.2 : Antakya otel plan ve tipik aks görünüşleri.

Dolayısıyla bu çalışmada, birbirine ara bağlantı elemanlarıyla belirli aralıklarda bağlanan iki adet I enkesitli yapma elemanın kullanıldığı çok parçalı kirişlerin yanal burulmalı burkulma davranışı analitik olarak araştırılacaktır.

3. KİRİŞLERDE YANAL BURULMALI BURKULMA

3.1 Tanım

Kirişlerin yanal burulmalı burkulma için tasarım bağıntılarının elde edilmesi, genel olarak; yanal burulmalı burkulma için en olumsuz durumu oluşturan kirişin üniform moment etkisinde olduğu en kritik yükleme durumuna dayanır.

Kirişin yanal burkulmasına sebep olan en küçük moment değeri ise kirişin yanal burkulma yükü ya da kritik moment olarak tanımlanır.

3.2 Üniform Moment Etkisi Altındaki I Kirişlerin Dayanımı

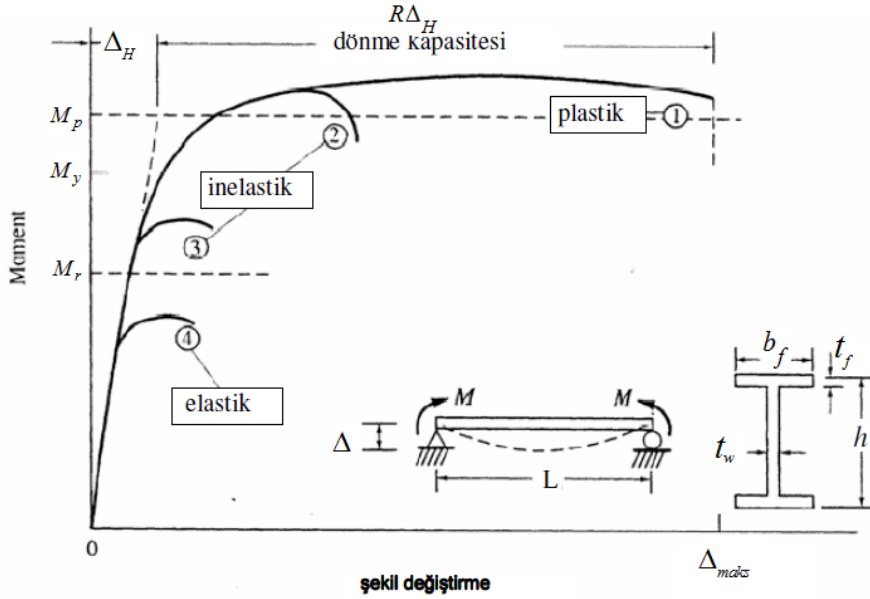
Kirişlerin etkin bir biçimde boyutlandırılabilmesi için açıklık arttıkça narin bir enkesit halini alan kiriş basınç başlığının yanal doğrultuda yer değiştirmesinin önlenmesi gerekmektedir. Kritik eğilme momenti değerleri, eğilme etkisi bakımından en elverişsiz durum olan, kirişlerin uzunluğu boyunca sabit bir eğilme momenti etkisinde olması durumu dikkate alınarak belirlenmektedir.

Üniform moment etkisi altındaki I enkesitli kirişlerin dayanımı ile ilgili teorik ifadeler Charles G. Salmon ve John E. Johnson [10] tarafından ifade edilmiştir. Salmon & Johnson'a göre yanal burulmalı burkulma, kiriş dayanımını kontrol eden bir sınır durum olabilir. Basınç etkisi altındaki enkesit parçalarının yerel burkulması kesitin dayanımını sınırlayabilir. Herhangi bir kirişe ait en büyük dayanım, kirişin plastik moment dayanımı (M_p) olmaktadır.

Eğilme etkisindeki elemanlarda, göçme durumu aşağıda sıralanan sebeplerden biri olabilir:

- Basınç etkisindeki başlığın yerel burkulması.
- Eğilme nedeniyle basınç etkisindeki gövdenin yerel burkulması.
- Yanal burulmalı burkulma.

Yura'ya [11] göre I enkesitli kirişlerde genel davranış **Şekil 3.1**'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.1 : Kirişlerde genel davranış.

Şekil 3.1'de görülen 1, 2, 3 ve 4 durumunda;

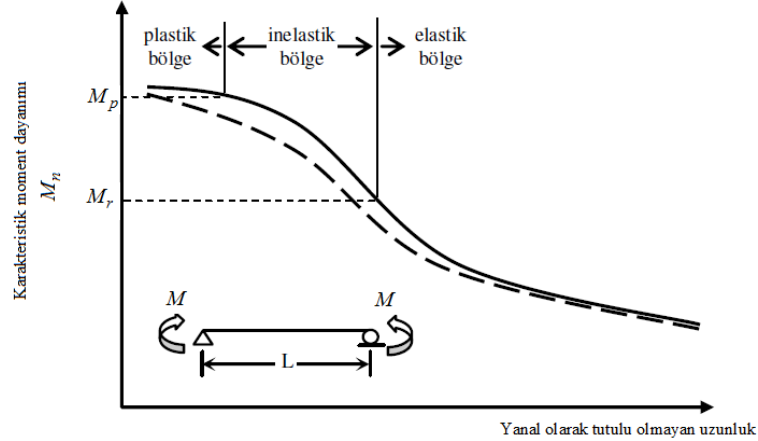
- 1 No'lu eğride kiriş, plastik moment dayanımına (M_p) büyük şekil değiştirme yaparak ulaşır. Dönme kapasitesi olarak adlandırılan şekil değiştirme kapasitesi esasen, basınç başlığının stabilitesini kaybetmeden kirişin büyük şekil değiştirme yapabilme özelliğidir.
- 2 No'lu eğride M_p 'ye ulaşılmasına rağmen yeterli dönme miktarının sağlanamadığı elastik olmayan davranış görülmektedir. Ancak kesit 1 No'lu eğriye sahip kirişe nazaran daha az dönme kapasitesine sahiptir. Bu durumun sebebi, başlık levhasının elastik davranış göstermediği durumda, başlık ya da gövde levhasının yerel burkulmaya karşı koyabilecek yeterli rijitliğe sahip olmaması ya da kirişin yanal burulmalı burkulma için yeterli derecede tutulu olmamasıdır.
- 3 No'lu eğride moment dayanımına (M_r) ulaşıldığında ya da aşıldığında, artık gerilmelerin elastik olmayan davranışın başlamasına sebep olduğu görülmektedir. Gövdenin ya da başlığın yerel olarak burkulması veya yanal burulmalı burkulma M_p 'ye ulaşılmasını engeller.

- 4 No'lu eğride ise moment dayanımına (M_r) ulaşılan kadar kirişin davranışı elastiktir. Bu durumda M_r , elastik burkulma tarafından kontrol edilir. Bunlar da yerel ya da tüm basınç başlığının burkulması, gövdenin yerel burkulması ya da yanal burulmalı burkulma durumlarıdır.

3.3 Yanal Doğrultuda Tutulu Olmayan Uzunluğun Moment Dayanımına Etkisi

I enkesitli kirişlerde, basınç başlığının yanal olarak tutulu ve enkesitin kompakt olması koşullarının her ikisinin sağlanmasıyla, plastik moment dayanımına ulaşıncaya kadar yüklemeye düzleminde sadece eğilme deformasyonu gözlenir.

Yanal olarak tutulu olmayan kirişlerde ise kritik kesitte plastik moment dayanımına ulaşılmadan önce; basınç başlığında yüklemeye düzlemi dışına burkulma ve/veya kesitte çarpılma deformasyonları da ortaya çıkar. Yanal burulmalı burkulma dayanımının yanal olarak tutulu olmayan uzunlukla değişimi Şekil 3.2'de gösterilmiştir [12].



Şekil 3.2 : Yanal burulmalı burkulma dayanımının yanal olarak tutulu olmayan uzunlukla değişimi.

Kuvvetli ekseninde eğilme etkisindeki kompakt I enkesitli kirişlerin tasarımı basınç başlığının yanal olarak tutulu veya tutulu olmamasına dayanır. Kirişin yanal olarak tutulu olmayan basınç başlığı uzunluğu olarak tanımlanan L_b değeri, hesaplanan L_p sınır uzunluğundan küçük ise kiriş basınç başlığı yanal doğrultuda tutulu olarak göz önüne alınır. Bu durumda kompakt kesitlerde, kiriş kararsız hale gelmeden çelik

malzemenin pekleşme özelliğinin etkisiyle, **Şekil 3.1**'de görülen 1 eğrisine karşı gelen, M_p plastik moment dayanımından daha büyük moment kapasitesine ulaşılır. Fakat, tasarımda moment kapasitesindeki bu artış göz önüne alınmaz ve basınç başlığı yanal olarak tutulu ise karakteristik moment dayanımını akma sınır durumu belirler. Buna göre;

$$L_b \leq L_p \text{ ise } M_n = M_p$$

olmaktadır. Kirişin yanal olarak tutulu olmayan uzunluğuna ve yerel burkulma rijitliğine bağlı olarak kiriş enkesitinin dönme kapasitesi azalacağından davranış **Şekil 3.1**'de görülen 1 veya 2 eğrilerindeki gibi olur. Eğer; $L_b > L_p$ ise basınç başlığı yanal doğrultuda tutulmamış olarak göz önüne alınır. Bu durumda M_p plastik dayanımına ulaşılmadan, kirişin karakteristik moment dayanımını yanal burulmalı burkulma sınır durumu belirler. Buna göre;

$$L_b > L_p \text{ ise } M_n < M_p$$

olmaktadır. Basınç başlığının yanal doğrultuda tutulmamış olduğu bu durumda, basınç elemanlarında olduğu gibi, elastik veya elastik olmayan yanal burkulma sınır durumlarından birine ulaşılmasıyla ortaya çıkan stabilite kaybı, karakteristik moment dayanımını belirler. Sonuç olarak özetlenirse; elastik ve elastik olmayan bölge arasındaki geçiş için sınır uzunluk L_r olarak tanımlandığında;

$$L_b \leq L_r \text{ ise inelastik yanal burulmalı burkulma}$$

$$L_b > L_r \text{ ise elastik yanal burulmalı burkulma}$$

sınır durumu ile karakteristik moment dayanımı belirlenir.

Yanal burkulma olmaksızın kiriş kesitinin $M_n = M_p$ plastik moment dayanımına ulaşabilmesi için yanal doğrultuda tutulu olmayan basınç başlığı uzunluğunun narinliği (3.1) ile sınırlanır.

$$\frac{L_b}{r_y} \leq 1.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3.1)$$

Burada;

L_b = Basınç başlığının tutulu olmayan uzunluğu

r_y = Enkesitin y-y zayıf eksenine göre atalet yarıçapı

F_y = Malzemenin akma dayanımı

Elastik ve inelastik burkulma arasındaki sınır uzunluk, L_r ise;

$$L_r = 1.95r_{ts} \frac{E}{0.7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_0}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \left(\frac{0.7F_y S_x h_0}{E Jc} \right)^2}} \quad (3.2)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Burada;

r_{ts} = Kesitin basınç tarafında kalan parçasının atalet yarıçapı

S_x = Elastik mukavemet momenti

h_0 = Kesitin başlıklarının ağırlık merkezi arasındaki mesafe

c = Çift simetrik kesitlerde 1.0 olarak alınabilen bir katsayı

Çift simetrik I kesitlerde güvenle tarafta kalınarak r_{ts} değeri için,

$$r_{ts} = \frac{b_f}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} \frac{ht_w}{b_f t_f} \right)}} \quad (3.3)$$

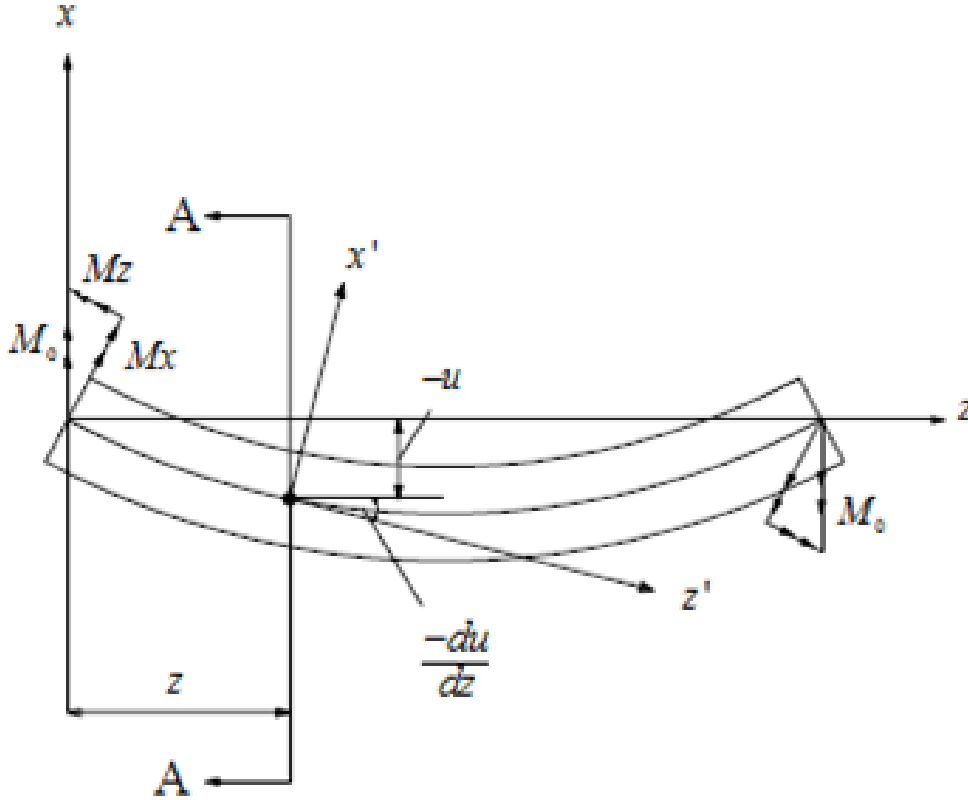
olarak hesaplanabilir.

3.4 Kirişlerde Elastik Yanal Burulmalı Burkulma

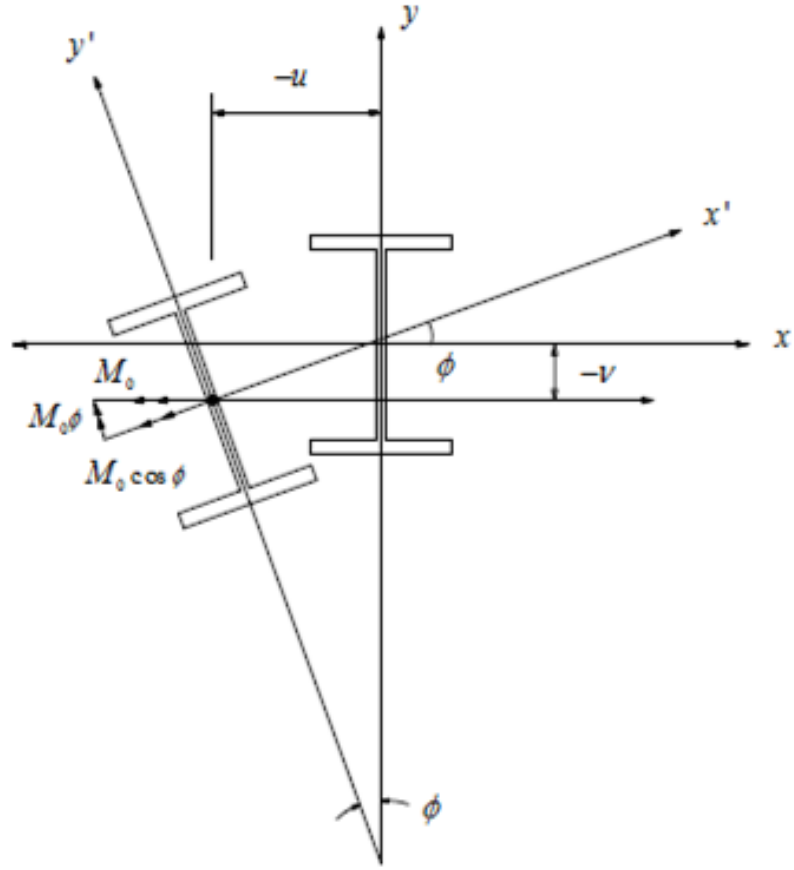
Yanal olarak tutulu olmayan uzunluğun fazla olduğu kirişlerde, kesitte akma başlamadan stabilite kaybı ortaya çıkacağından, **Şekil 3.1**'de görülen 4 eğrisinde gösterildiği gibi davranış elastik olur ve karakteristik moment kapasitesi elastik yanal burulmalı burkulma sınır durumuna ulaşılması ile belirlenir.

Yapılan araştırmada hem tek I profillerin hem de yapma çift I profillerin elastik yanal burulmalı burkulma yaptığı varsayılmıştır. Elastik yanal burulmalı burkulma olayına

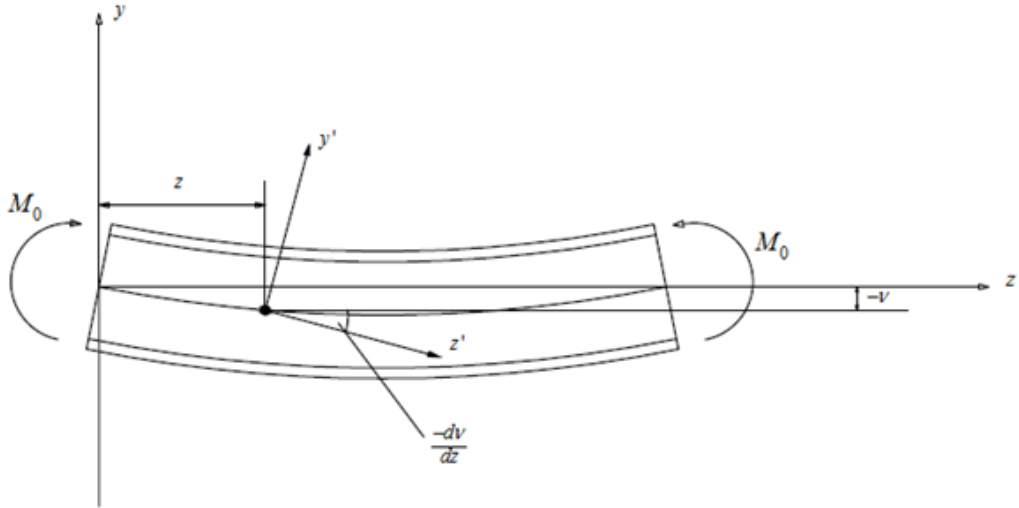
ait temel ifadeler diferansiyel denklemler kullanılarak elastik malzeme varsayımı altında elde edilmiştir. Artık gerilmeler ihmal edilmiş ve enkesit homojen olarak varsayılmıştır. M_0 momenti etkisi altındaki I enkesitli tek bir kirişin şekil değiştirmiş haline ait görünüş ve kesitler sırasıyla, Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmektedir.



Şekil 3.3 : M_0 momenti etkisi altındaki I enkesitli kirişin şekil değiştirmiş durumu (plan).



Şekil 3.4 : M_0 momenti etkisi altındaki I enkesitli kirişin şekil değiştirmiş A-A kesiti.



Şekil 3.5 : M_0 momenti etkisi altındaki I enkesitli kirişin şekil değiştirmiş durumu (yan görünüş).

Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de yer alan ifadelere ait doğrultu kosinüsleri Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 : Doğrultu kosinüsleri.

	x	y	z
x'	1	ϕ	$-\frac{du}{dz}$
y'	$-\phi$	1	$-\frac{dv}{dz}$
z'	$\frac{du}{dz}$	$\frac{dv}{dz}$	1

Gövde düzleminde etkiyen üniform moment etkisi altındaki I kirişe ait elastik yanal burulmalı burkulma dayanımı (M_{cr}) için geliştirilmiş ifadeler bu konunun devamında gösterildiği gibi olacaktır.

Şekil 3.3, Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Çizelge 3.1’de görüldüğü üzere $y-z$ düzleminde uygulanan M_o momenti, x' , y' ve z' eksenleri etrafında $M_{x'}$, $M_{y'}$ ve $M_{z'}$ bileşenleri oluşturacaktır. Bu da $x'-z'$ ve $y'-z'$ düzlemlerinde eğilme eğrileri ve z' eksen çevresinde de burulma eğrisi oluşturacaktır. Küçük şekil değiştirmeler göz önünde bulundurularak $y'-z'$ düzlemi içindeki eğilme (y ve y' , z ve z' arasındaki kosinüs değerleri 1 olarak kabul edilmiştir) ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

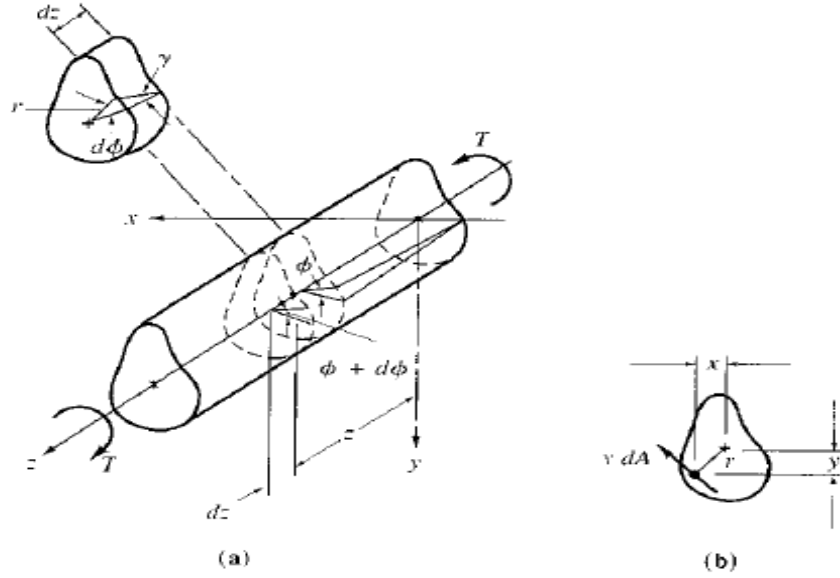
$$EI_x \frac{d^2v}{dz^2} = M_{x'} = M_o \quad (3.4)$$

Şekil 3.4’de görüldüğü üzere v , merkezin y doğrultusunda yaptığı deplasmanı göstermektedir. Ayrıca $x'-z'$ düzlemindeki eğri için ifade;

$$EI_y \frac{d^2u}{dz^2} = M_{y'} = M_o \phi \quad (3.5)$$

Burada u , merkezin x doğrultusunda yaptığı deplasmanı göstermektedir.

Prizmatik bir mildeki burulma etkisi Şekil 3.6'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.6 : Prizmatik bir mildeki burulma.

$$\text{Burulma oranı} = \frac{d\phi}{dz} \quad (3.6)$$

$$\gamma dz = r d\phi \quad (3.7)$$

$$\gamma = r \frac{d\phi}{dz} \quad (3.8)$$

Kayma modülü G için Hooke Kanunu yazılacak olursa, birim kayma gerilmesi,

$$\nu = \gamma G \quad (3.9)$$

olur.

Şekil 3.6'da gösterildiği üzere, basit tork ifadesi,

$$dT = \nu dA = r \gamma G dA \quad (3.10)$$

$$dT = r^2 \frac{d\phi}{dz} G dA \quad (3.11)$$

olmaktadır.

Denge durumuna ait toplam moment;

$$T = \int_A r^2 \frac{d\phi}{dz} G dA \quad (3.12)$$

Burada G ve $\frac{d\phi}{dz}$ her kesitte aynı olarak kabul edilmiştir.

$$T = \frac{d\phi}{dz} G \int_A r^2 dA = GJ \frac{d\phi}{dz} \quad (3.13)$$

Burada;

$$J = \int_A r^2 dA \quad (3.14)$$

(3.14)'deki ifade eğilme momenti M 'ye ait ifadeye benzer olarak düşünülebilir.

Burada eğilme momenti, eğilme rijitliğiyle eğilme eğrisinin çarpımından oluşmaktadır $\left(M = EI \frac{d^2 y}{dz^2} \right)$.

Dolayısıyla burada burulma momenti T , burulma rijitliği ile burulma eğrisinin çarpımından meydana gelmektedir.

Kayma gerilmesi;

$$\nu = \gamma G = r \frac{d\phi}{dz} G \quad (3.15)$$

$$T = GJ \frac{d\phi}{dz} \quad (3.16)$$

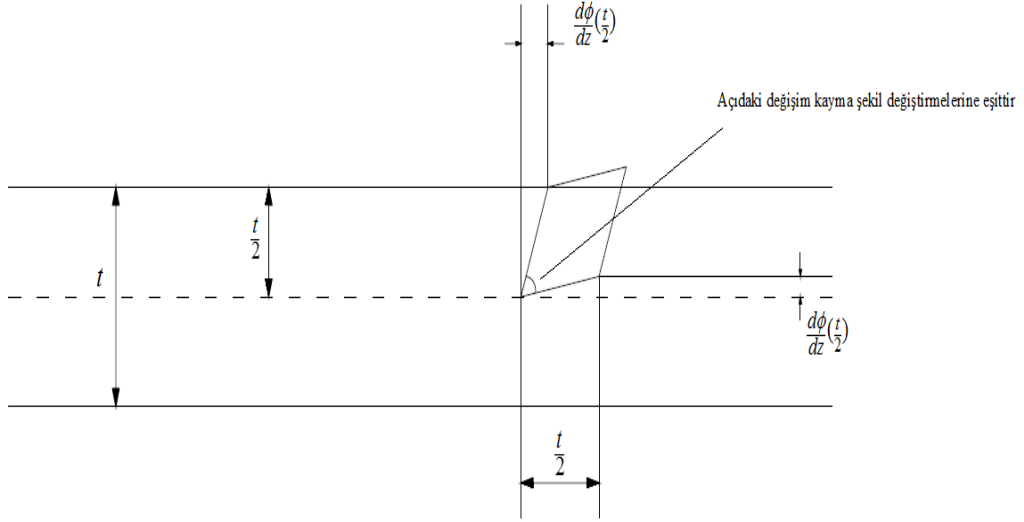
$$\frac{d\phi}{dz} = \frac{T}{GJ} \quad (3.17)$$

Bu ifadelerden;

$$\nu = \frac{Tr}{J} \quad (3.18)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadede burulma kayma gerilmesi, burulma merkezinden olan radyal uzaklıkla orantılıdır.

Dikdörtgen bir kesitteki burulma etkisi Salmon & Johnson'a göre **Şekil 3.7**'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.7 : Dikdörtgen bir kesitte burulma.

Tüm bu bilgilerin ışığında I kirişlere ait burulma için ifade edilen diferansiyel denklem,

$$\gamma = 2 \frac{d\phi}{dz} \left(\frac{t}{2} \right) = \frac{d\phi}{dz} t \quad (3.19)$$

Benzerlik amacıyla, **Şekil 3.7**'de görülen kaymaya maruz eleman kullanılacak olursa,

$$\gamma = t \frac{d\phi}{dz} \quad (3.20)$$

İnce dikdörtgenler için, sınır etkileri göz ardı edecek olursak, kayma gerilmesi ifadesi **(3.21)**'deki gibi ifade edilebilir.

$$\nu = \gamma G = tG \frac{d\phi}{dz} \quad (3.21)$$

ya da (3.18)'deki;

$$v = \frac{Tt}{J} \quad (3.22)$$

kullanılabilir. Daha önce (3.14)'de ifade edilmiş olan burulma momenti T , sadece burulma etkisi altındaki M_x 'e karşı gelecek olursa,

$$M_x = GJ \frac{d\phi}{dz} \quad (3.23)$$

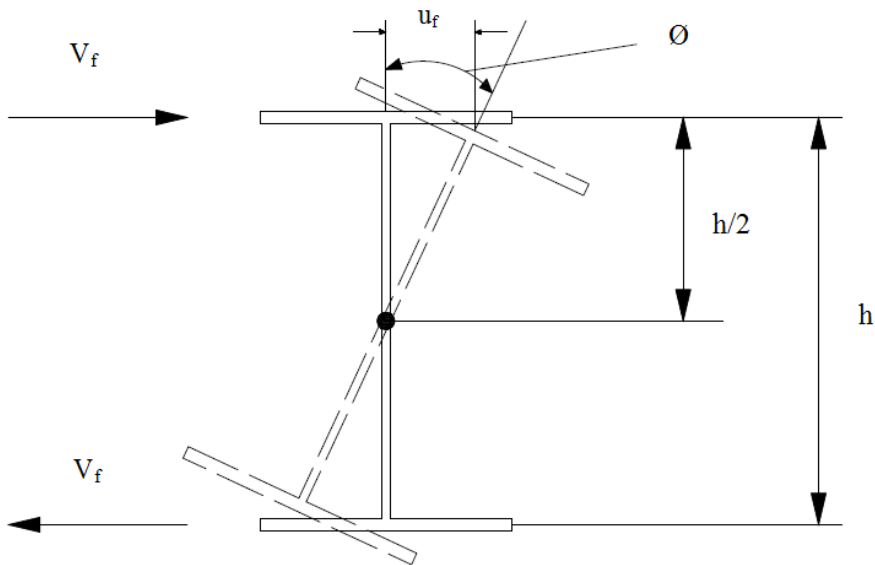
olarak ifade edilebilir. Burada;

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (3.24)$$

olarak kabul edilmektedir.

(3.18)'e göre M_x 'den kaynaklanan gerilme, burulma merkezine olan uzaklıkla orantılı olarak değişir.

I kesitlerde çarpılmaya sebep olan kesme kuvvetleri Salmon & Johnson'a göre Şekil 3.8'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.8 : I Kesitlerde çarpılmaya sebep olan kesme kuvvetleri.

Geometriden anlaşılacağı üzere,

$$u_f = \phi \frac{h}{2} \quad (\phi \text{ 'nin küçük değerleri için}) \quad (3.25)$$

olmaktadır.

I kesitlerdeki burulmayı anlayabilmek için (3.25) en önemli bağıntıdır. Burulma açısı, yanal doğrultuda ötelenme ile direkt olarak orantılıdır. Burulma sınır koşulları yanal eğilme sınır koşulları ile benzerdir.

(3.25) ifadesi z 'ye bağlı olarak 3 defa türetilirse,

$$\frac{d^3 u_f}{dz^3} = \frac{h}{2} \left(\frac{d^3 \phi}{dz^3} \right) \quad (3.26)$$

olmaktadır.

Bir başlık için eğri ifadesi,

$$\frac{d^2 u_f}{dz^2} = \frac{-M_f}{EI_f} \quad (3.27)$$

olmaktadır. Burada M_f 'nin önündeki eksi ifadesi kabul edilen pozitif yn

kabulünden ileri gelmektedir. $V = \frac{dM}{dz}$ olduğundan;

$$\frac{d^3 u_f}{dz^3} = \frac{-V_f}{EI_f} \quad (3.28)$$

olarak ifade edilebilir ve bu denklemden;

$$V_f = -EI_f \left(\frac{h}{2} \right) \frac{d^3 \phi}{dz^3} \quad (3.29)$$

olarak elde edilir.

Burulma momentinin bir bileşeni olan M_w , başlıkların yanal eğilmesine sebep olur. Bu M_w değeri, moment kolu h ile başlık kayma kuvvetinin çarpımına eşittir. Bu da gövde tarafından çarpılmaya karşı hiç bir kayma gerilmesinin karşılanmadığı anlamına gelir.

$$M_w = V_f h = -EI_f \left(\frac{h^2}{2}\right) \frac{d^3 \phi}{dz^3} = -EC_w \frac{d^3 \phi}{dz^3} \quad (3.30)$$

Burada çarpılma sabiti olarak ifade edilen C_w 'nin değeri;

$$C_w = I_y \frac{h^2}{4} \quad (3.31)$$

olmaktadır.

Tüm bu bilgilerin ışığında burulma momentinin, dönme kısmını oluşturan M_s ve yanal eğilmeyi oluşturan M_w 'nin toplamından oluştuğu görülmektedir.

$$M_z = M_s + M_w = GJ \frac{d\phi}{dz} - EC_w \frac{d^3 \phi}{dz^3} \quad (3.32)$$

Çizelge 3.1'den anlaşılacağı üzere, kiriş bir miktar burkulduğunda, burulma momentinin bir bileşeni olan M_o , kirişin $x-z$ düzlemindeki eğimiyle orantılıdır.

$$M_z = -\frac{du}{dz} M_o \quad (3.33)$$

Bu da bize burulma için gerekli diferansiyel ifadeyi vermektedir.

$$-\frac{du}{dz} M_o = GJ \frac{d\phi}{dz} - EC_w \frac{d^3 \phi}{dz^3} \quad (3.34)$$

(3.4) ve (3.5) de bazı kabuller vardır. Bunlar her iki denklemde de küçük şekil değiştirmeler olduğu, I_x ve I_y değerlerinin de I_x ve I_y değerlerine eşit olması durumlarıdır. I_x , I_y 'ye oranla daha büyüktür. Bu sebepten ötürü (3.4), (3.5) ve

(3.34) ile bağlantılı değildir. Ayrıca eğilme düzlemindeki deplasman v , burulma fonksiyonu ϕ 'yi etkilememektedir.

(3.34) z 'ye göre türetilirse;

$$-\frac{d^2u}{dz^2}M_o = GJ \frac{d^2\phi}{dz^2} - EC_w \frac{d^4\phi}{dz^4} \quad (3.35)$$

(3.5)'den, $\frac{d^2u}{dz^2} = \frac{M_o\phi}{EI_y}$ denklemi, (3.35) denkleminin içine yerleştirilirse;

$$EC_w \frac{d^4\phi}{dz^4} - GJ \frac{d^2\phi}{dz^2} - \frac{M_o^2}{EI_y} \phi = 0 \quad (3.36)$$

elde edilir. (3.36) denklemi burulma açısı için elde edilmiş diferansiyel ifadedir.

(3.36) için bir çözüm elde etmek için, denklem EC_w 'ye bölünür ve $2\alpha = \frac{GJ}{EC_w}$ ve

$\beta = \frac{M_o^2}{E^2C_wI_y}$ olarak varsayılırsa (3.36);

$$\frac{d^4\phi}{dz^4} - 2\alpha \frac{d^2\phi}{dz^2} - \beta\phi = 0 \quad (3.37)$$

ifadesine dönüşür.

$$\left. \begin{aligned} \phi &= Ae^{mz} \\ \frac{d^2\phi}{dz^2} &= Am^2 e^{mz} \\ \frac{d^4\phi}{dz^4} &= Am^4 e^{mz} \end{aligned} \right\} \quad (3.38)$$

olarak varsayılp (3.37) içine yerleştirilirse ifade,

$$Ae^{mz} (m^4 - 2\alpha m^2 - \beta) = 0 \quad (3.39)$$

olur.

e^{mz} sıfır değerini alamayacağına ve sadece burkulma olmadığında A sıfır olabileceğine göre yalnızca parantez içinin sıfır olma ihtimali ortaya çıkmaktadır.

Bu da;

$$m^2 = \alpha \pm \sqrt{\beta + \alpha^2}$$

$$m = \pm \sqrt{\alpha + \sqrt{\beta + \alpha^2}} \quad (3.40)$$

durumu ortaya çıkar.

(3.40)'de görülmektedir ki m katsayısı iki adet gerçek iki adet karmaşık kökten oluşur ($\sqrt{\beta + \alpha^2} > \alpha$).

$$n^2 = \alpha + \sqrt{\beta + \alpha^2} \quad (3.41)$$

$$q^2 = -\alpha + \sqrt{\beta + \alpha^2} \quad (3.42)$$

olarak varsayılırsa; m için ifade edilen dört değer kullanıldığında, (3.38)'dan elde edilen ϕ ifadesi,

$$\phi = A_1 e^{nz} + A_2 e^{-nz} + A_3 e^{iqz} + A_4 e^{-iqz} \quad (3.43)$$

olmaktadır.

Karmaşık fonksiyonlar dairesel fonksiyonlar cinsinden ifade edilirse,

$$\left. \begin{aligned} e^{iqz} &= \cos qz + i \sin qz \\ e^{-iqz} &= \cos qz - i \sin qz \end{aligned} \right\} \quad (3.44)$$

olmaktadır. (3.44) ve $A_3 = A_3 + A_4$, $A_4 = A_3 i - A_4 i$ ifadeleri kullanıldığında,

$$\phi = A_1 e^{nz} + A_2 e^{-nz} + A_3 \cos qz + A_4 \sin qz \quad (3.45)$$

olarak karşımıza çıkar.

A_1 ve A_4 katsayıları sınır koşulları yardımıyla elde edilir. Bu koşullara göre, burulma için basit mesnet koşulu kirişin baş ve sonundaki noktalar dönemez ancak çarpılmaya karşı serbest olduğu anlamına gelir. Bu koşullar;

$$z = 0 \text{ ve } z = L \text{ 'de } \phi = 0 \text{ ve } \frac{d^2\phi}{dz^2} = 0$$

$z = 0$ 'da $\phi = 0$ ifadesi için (3.45);

$$A_1 + A_2 + A_3 = 0 \quad (3.46)$$

ifadesini verir.

$z = 0$ 'da $\frac{d^2\phi}{dz^2} = 0$ ifadesi için ise (3.45);

$$A_1 n^2 + A_2 n^2 - A_3 q^2 = 0 \quad (3.47)$$

ifadesini verir.

(3.46) n^2 ifadesi ile çarpılıp (3.47)'de yerine konulursa,

$$A_3(q^2 + n^2) = 0 \Rightarrow A_3 = 0 \quad (3.48)$$

$$A_1 = -A_2 \quad (3.49)$$

ifadeleri elde edilir. Bu bilgiler ışığında (3.45), $\phi = A_1(e^{nz} - e^{-nz}) + A_4 \sin qz$ halini alır. Bu ifade de bir diğer deyişle;

$$\phi = 2A_1 \sinh nz + A_4 \sin qz \quad (3.50)$$

olur.

$z = L$ 'de $\phi = 0$ ifadesinden,

$$0 = 2A_1 \sinh nL + A_4 \sin qL \quad (3.51)$$

$z = L$ 'de $\frac{d^2\phi}{dz^2} = 0$ ifadesinden,

$$0 = 2A_1 n^2 \sinh nL - A_4 q^2 \sin qL \quad (3.52)$$

elde edilir.

(3.51) q^2 ile çarpılıp (3.52)'de yerine konursa,

$$2A_1(n^2 + q^2) \sinh nL = 0 \quad (3.53)$$

ifadesi elde edilir.

$\sinh nL$ ve $n^2 + q^2$ sıfır değerini alamayacağından A_1 değeri sıfır olmalıdır.

$$A_1 = -A_2 = 0 \quad (3.54)$$

Sonuç olarak, (3.50)'den;

$$\phi = A_4 \sin qL = 0 \quad (3.55)$$

ifadesi elde edilir. Eğer yanal burulmalı burkulma meydana gelirse, A_4 değeri sıfır olamaz. Dolayısıyla, $\sin qL = 0$ olmalıdır. $qL = N\pi$ ifadesinde N herhangi bir tamsayıdır. $N = 1$ temel burkulma modu için elastik burkulma koşulu,

$$q = \frac{N\pi}{L} \quad (3.56)$$

olarak ifade edilir.

$q = \frac{N\pi}{L}$ koşulunu sağlayan M_o değeri kritik moment olarak adlandırılır.

$$q = \sqrt{-\alpha + \sqrt{\beta + \alpha^2}} = \frac{\pi}{L} \quad (3.57)$$

ifadesinde her iki tarafın karesi alınıp α ve β ifadelerine ait açılımlar yerine konursa,

$$-\frac{GJ}{2EC_w} + \sqrt{\frac{M_o^2}{E^2C_wI_y} + \left(\frac{GJ}{2EC_w}\right)^2} = \frac{\pi^2}{L^2} \quad (3.58)$$

ifadesi elde edilir.

Bu ifade $M_o = M_{cr}$ için çözülecek olunursa,

$$M_{cr}^2 = E^2C_wI_y \left[\left(\frac{\pi^2}{L^2} + \frac{GJ}{2EC_w}\right)^2 - \left(\frac{GJ}{2EC_w}\right)^2 \right] \quad (3.59)$$

ifadenin karekökü alınır,

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{\pi^4 E^2 C_w I_y}{L^4} + \frac{\pi^2 E I_y G J}{L^2}} \quad (3.60)$$

olarak elde edilir.

Moment düzeltme katsayısı göz önünde bulundurulmak istenirse denklem nihai halini alır.

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L} \sqrt{\left(\frac{\pi E}{L}\right)^2 C_w I_y + E I_y G J} \quad (3.61)$$

3.5 Yanal Mesnetler Arası Moment Yayılışı

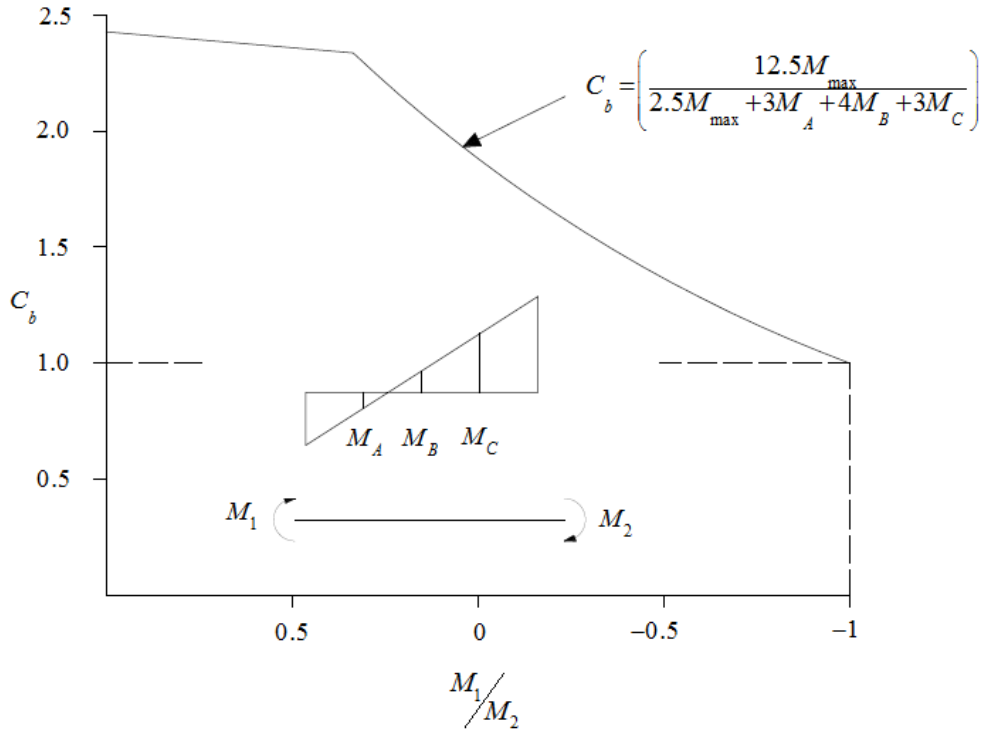
(3.61)'de ifade edilen moment düzeltme katsayısı olan C_b , kirişin maruz kaldığı yükün kiriş serbest açıklığı boyunca üniform bir moment değeri oluşturmadığı durumlar içindir. C_b sayesinde düzgün sabit bir moment etkisi altında olmayan kirişin yanal burulmalı burkulma dayanımı daha doğru bir şekilde ifade edilmiş olur.

C_b 'ye ait ifade;

$$C_b = \left(\frac{12.5M_{\max}}{2.5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \right) R_m \leq 3.0 \quad (3.62)$$

şeklindedir.

Burada M_1 ve M_2 en büyük ve en küçük kiriş uç momentleridir. $\frac{M_1}{M_2}$ oranı, moment çift eğrilikli eğilmeye yol açıyorsa pozitif, kiriş açıklığında moment diyagramı tek eğrilikli ise bu oran negatif değerlidir. Bu durumu göz önünde bulunduran katsayı R_m katsayısıdır. Üiform moment, tek eğrilikli olduğundan 1.0 olarak kabul edilebilir. C_b değerinin $\frac{M_1}{M_2}$ oranına göre değişimi Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Bu çalışmada kirişin 1 birimlik düzgün sabit moment etkisi altındaki davranışı inceleneceğinden $C_b = 1$ 'dir.

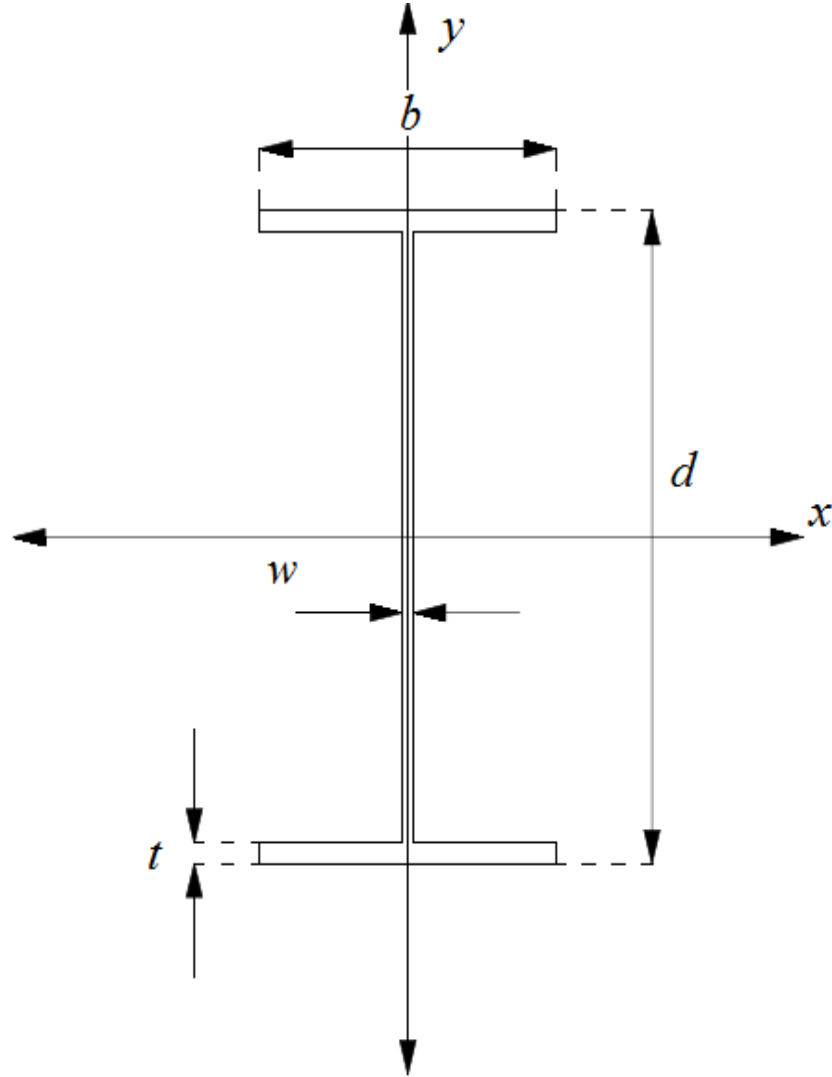


Şekil 3.9 : Moment düzeltme katsayısının (M_1/M_2) oranına bağlı değişimi.

4. KIRIŞ SİSTEMİ VE ENKESİTİ

4.1 Tek I Enkesitli Kirişe Ait Özellikler

CISC'de [13] belirtildiği üzere Şekil 4.1'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.1 : Tek bir I enkesitli kirişe ait genel kesit özellikleri.

Yapma I kirişlerde, kirişi oluşturan elemanların hepsi aynı karakteristik özelliğe sahiptir. Malzemeye ait özellikler S355 kalitesindeki çelik malzeme ile aynıdır.

(3.62)'de bahsi geçen ifadeler, tek bir I kiriş için aşağıdaki gibi kullanılmıştır.;

J değerleri SAP2000 [14] kullanılarak elde edilmiştir.

$$I_f = \frac{tb^3}{12} \quad (4.1)$$

Salmon & Johnson'a göre çarpılma sabiti (4.2)'de verildiği gibidir.

$$C_w = I_y \frac{h^2}{4} \quad (4.2)$$

Yine aynı şekilde Salmon & Johnson'a göre kayma modülü G , kesitin y eksenine göre atalet momenti I_y (4.3) ve (4.4)'te verildiği gibidir.

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (4.3)$$

$$I_y = 2\left(\frac{tb^3}{12}\right) + \frac{(d-2t)w^3}{12} \quad (4.4)$$

S355 kalitesindeki çelik malzemesine ait elastisite modülü (4.5)'te verildiği gibidir.

$$E = 21000000 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} = 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (4.5)$$

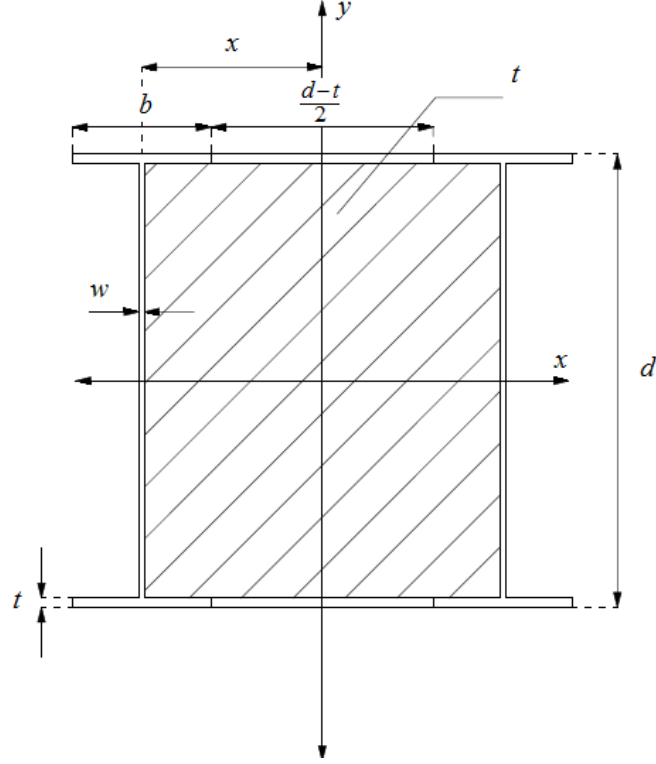
$$d' = d - t \quad (4.6)$$

Poisson oranı, malzemelerin temel fiziksel özelliklerinden bir tanesidir. Katı cisimler bir yönde deformasyona uğratıldıklarında, diğer yönlerde bu deformasyona ters işaretli bir deformasyona maruz kalırlar. Örneğin, dikdörtgenler prizması şeklinde bir metal boyu kısılacak şekilde deforme edilirse, eni ve genişliği zorlanmış bir büyüme eylemi gösterir. Sonuç olarak, zorlanmış şekil değiştirme miktarının, ilk olarak uygulanan şekil değişimine oranına malzemenin o yöndeki Poisson oranı denir. Mükemmel bir katı için (sıkıştırılmaz) bu değer 0.5'dir. Çeliklerin Poisson oranı 0.3 civarındadır. Betonun 0.2, mantarın yaklaşık olarak 0.0'dır.

Tüm bu bilgilerin ışığında, bu çalışmada Poisson oranı 0.3 olarak kabul edilmiştir.

4.2 Çift I Enkesitli Çok Parçalı Kirişlere Ait Özellikler

Çift I enkesitli çok parçalı kirişlere ait genel kesit özellikleri **Şekil 4.2**'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.2 : Çift I enkesitli çok parçalı kirişlere ait genel kesit özellikleri.

Yapma çift I kiriş için J ve I_y değerleri tek bir I kiriş için hesaplanan değerlerin iki katı olarak kabul edilmiştir. C_w ise tek bir I enkesitli kiriş için **Şekil 4.2**'de ifade edilenden farklı olarak;

$$C_w = I_f \frac{h^2}{4}$$

şeklinde hesaplanmıştır.

Burada I_f , ortak eksene göre **(4.8)**'deki gibi hesaplanmıştır.

$$I_f = 2 \left[\frac{tb^3}{12} + tbx^2 \right] \quad (4.8)$$

4.3 Yerel Burkulma Durumuna Ait Sınır Koşullar

Ayrıca kiriş enkesitleri, narinlik oranlarına göre üç kategoriye ayrılırlar:

1. Kompakt Kesitler
2. Kompakt Olmayan Kesitler
3. Narin Kesitler

Çizelge 4.1 : Kesit özelliklerinin narinlik sınırları.

Kesit	Düzlem Eleman	λ	λ_p	λ_r
I	Başlık	$b/2t_f$	$0.38\sqrt{E/F_y}$	$1.00\sqrt{E/F_y}$
	Gövde	h/t_w	$3.76\sqrt{E/F_y}$	$5.70\sqrt{E/F_y}$

I-kesitli profil için kompaktlık sınırlarını belirleyen genişlik/kalınlık oranları, AISC 360-10'da yer alan Tablo B4.1b'de tanımlandığı haliyle **Çizelge 4.1**'de verilmiştir.

Düzlem elemanlara ait λ değerleri λ_p değerlerini aşınca elemanlar kompakt olmayan eleman olarak adlandırılırken, λ_r değeri aşıldığında ise narin olarak adlandırılır.

Herhangi bir lokal burkulma durumu oluşmaması için modellerde aşağıda belirtilen kalınlıklar kullanılmıştır. Bu durum, sonlu eleman analiz programından elde edilen özdeğerlerin direkt kritik burkulma momenti (M_{cr}) olarak değerlendirilebilmesine yardımcı olmaktadır. Tüm bu bilgilerin ışığında modellerde;

Başlık için;

$$\frac{300}{2(t_f)_{sınır}} = 0.38 \sqrt{210000 \frac{N}{mm^2} / 355 \frac{N}{mm^2}} \Rightarrow (t_f)_{sınır} = 16,229mm \quad (4.9)$$

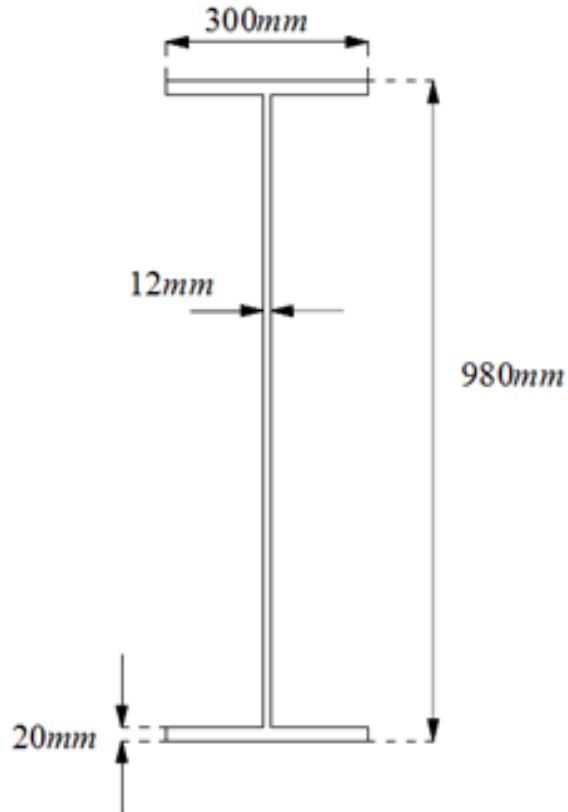
Dolayısıyla $t_f = 20mm$ olarak seçilmiştir.

Gövde için;

$$\frac{940}{(t_w)_{sınır}} = 3.76 \sqrt{210000 \frac{N}{mm^2} / 355 \frac{N}{mm^2}} \Rightarrow (t_w)_{sınır} = 10,27mm \quad (4.10)$$

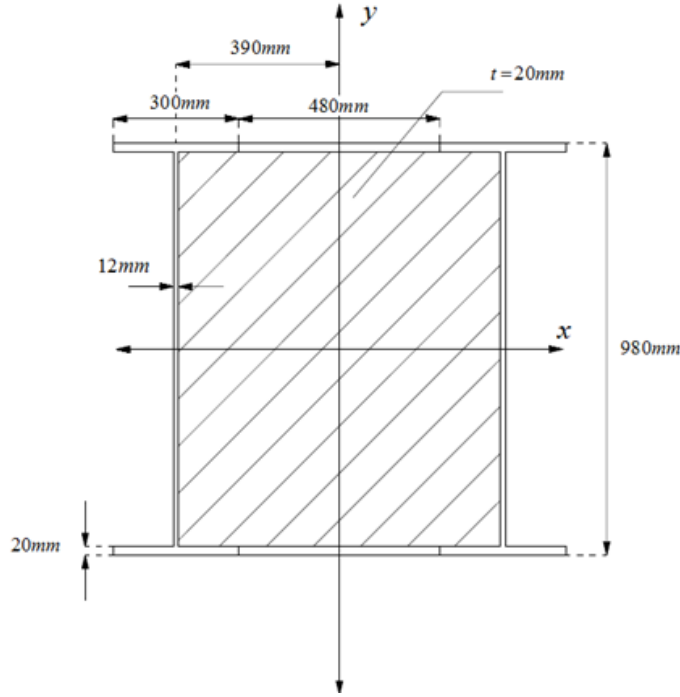
Dolayısıyla $t_w = 12mm$ olarak seçilmiştir.

Tüm bu bilgilerin ışığında, modellerde kullanılan tek bir I enkesitli kirişin kesit özellikleri Şekil 4.3'teki gibidir.



Şekil 4.3 : Modellerde kullanılan tek bir I enkesitli kirişin kesit özellikleri.

Modellerde kullanılan I enkesitli çift kirişlerin kesit özellikleri ise **Şekil 4.4**'teki gibidir.



Şekil 4.4 Modellerde kullanılan I enkesitli çift kirişlerin kesit özellikleri.

Araştırılan kiriş modelleri için tek I kirişlere ait M_{cr} değeri teorik olarak elde edilecek olursa;

$$I_f = \frac{(20)(300^3)}{12} = 450000000 \text{mm}^4 \quad (4.11)$$

$$C_w = \frac{(960^2)(90135360)}{4} = 2.076 \times 10^{13} \text{mm}^6 \quad (4.12)$$

$$I_y = 2\left(\frac{(20)(300^3)}{12}\right) + \left(\frac{(940)(12^3)}{12}\right) = 90135360 \text{mm}^4 \quad (4.13)$$

$$J = 2117873 \text{mm}^4 \quad (4.14)$$

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^4 (210000^2)(2.076 \times 10^{13})(90135360)}{30000^4} + \frac{\pi^2 (210000)(90135360)(80769)(2117873)}{30000^2}}$$

$$M_{cr} = 2.131 \times 10^8 \text{Nmm} \quad (4.15)$$

olarak elde edilir.

Çift I enkesitli çok parçalı kirişler için M_p değeri hesaplanacak olursa;

$$M_p = (F_y)(Z_x) \quad (4.21)$$

$$M_p = \left(355 \frac{N}{mm^2}\right)(16821600mm^3) \quad (4.22)$$

$$M_p = 5971668000Nmm = 5.971 \times 10^9 Nmm \quad (4.23)$$

Burada Z_x ortak x eksenine göre hesaplanmıştır.

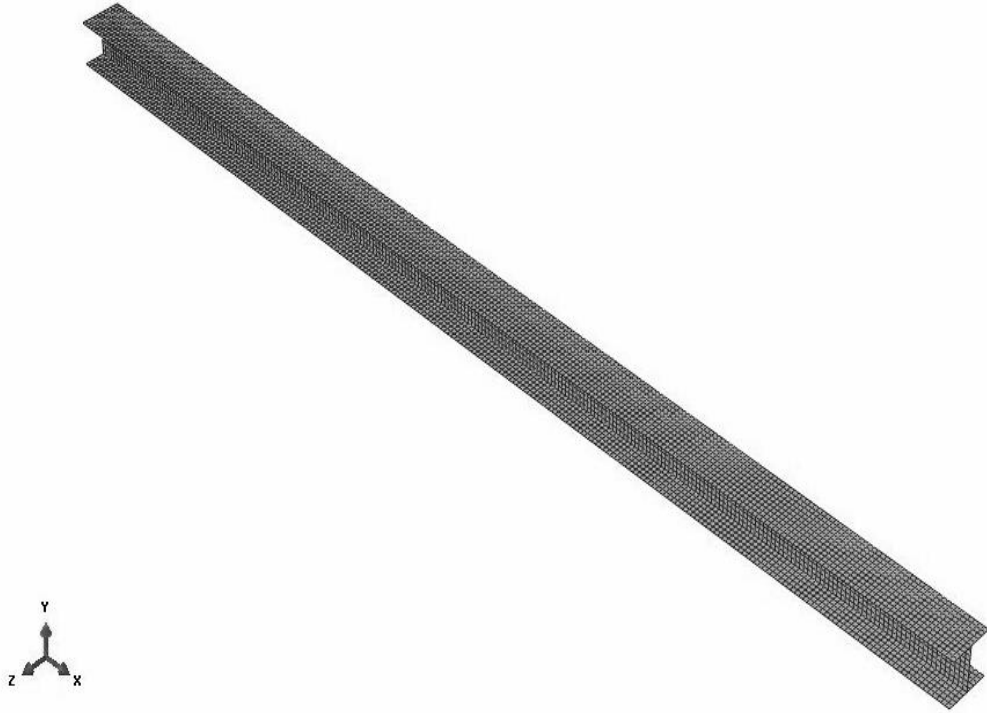
5. ANALİTİK MODELLERİN GELİŞTİRİLMESİ

5.1 Sonlu Eleman Analizine Ait Genel Bilgiler

Hem I kirişlere hem de yapma çift I kirişler için yanal burulmalı burkulma dayanımına ait sonlu eleman analizi için ABAQUS bilgisayar programı kullanılmıştır.

Sonlu elemanların kullanıldığı analitik modellerde eleman sıklığı ve düzeni analiz sonuçlarını etkileyen temel faktörlerden biridir. Bu nedenle, kirişlerin analitik modellerinin geliştirilmesinde sonlu eleman ağının sıklığı ve düzeni en uygun sonucu verecek şekilde seçilmiştir. Değerlendirmeler sonunda, 30m açıklıklı kiriş için 30mm x 30mm boyutlarında sonlu eleman ağı oluşturulması ön görülmüştür

Tüm bu bilgiler ışığında sonlu elemanlara ayrılmış I enkesitli kirişin ABAQUS modeli Şekil 5.1'de görüldüğü gibidir.



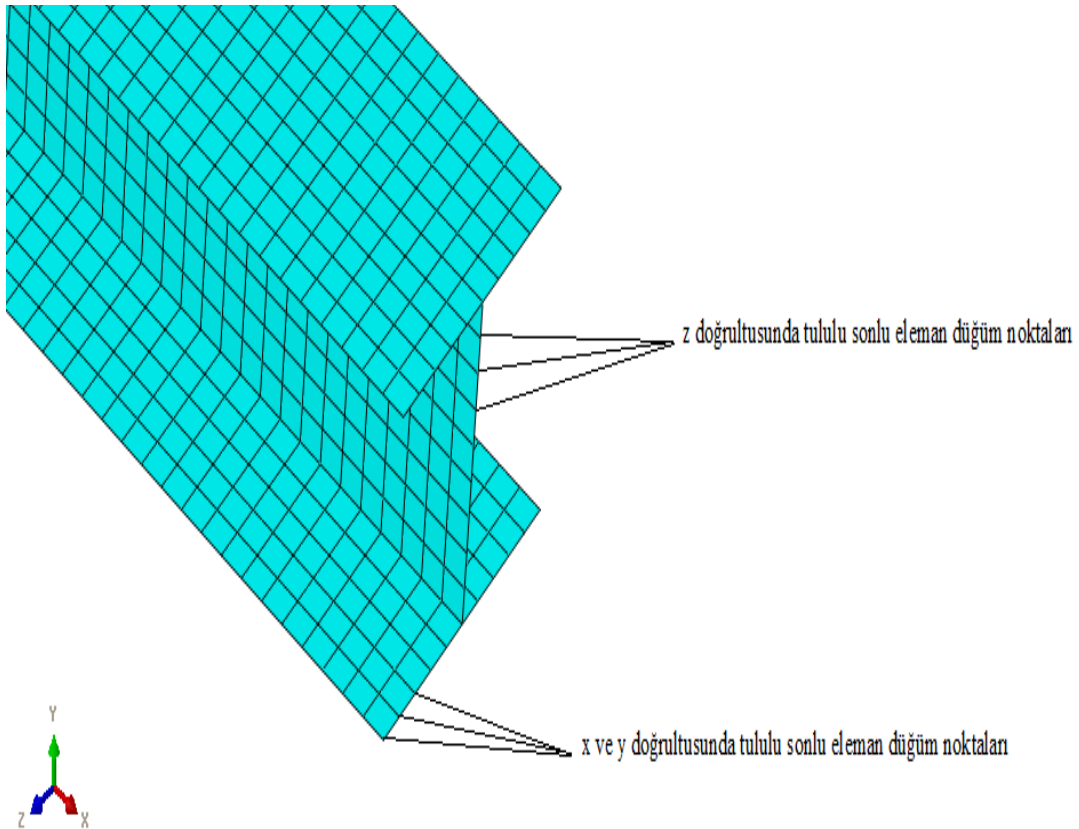
Şekil 5.1 : Sonlu elemanlara ayrılmış I enkesitli kirişin ABAQUS modeli.

5.2 Mesnet Koşullarının Tanımı ve Yükleme Koşulları

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenen kirişlerde analiz sonuçlarının doğruluğu, teoride ve hesaplarda kullanılmış olan basit mesnet koşullarının programda doğru bir şekilde tanımlanmasıyla mümkündür. Tek bir I kirişe ait basit mesnet koşulunu ABAQUS sonlu eleman programında oluşturabilmek için aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

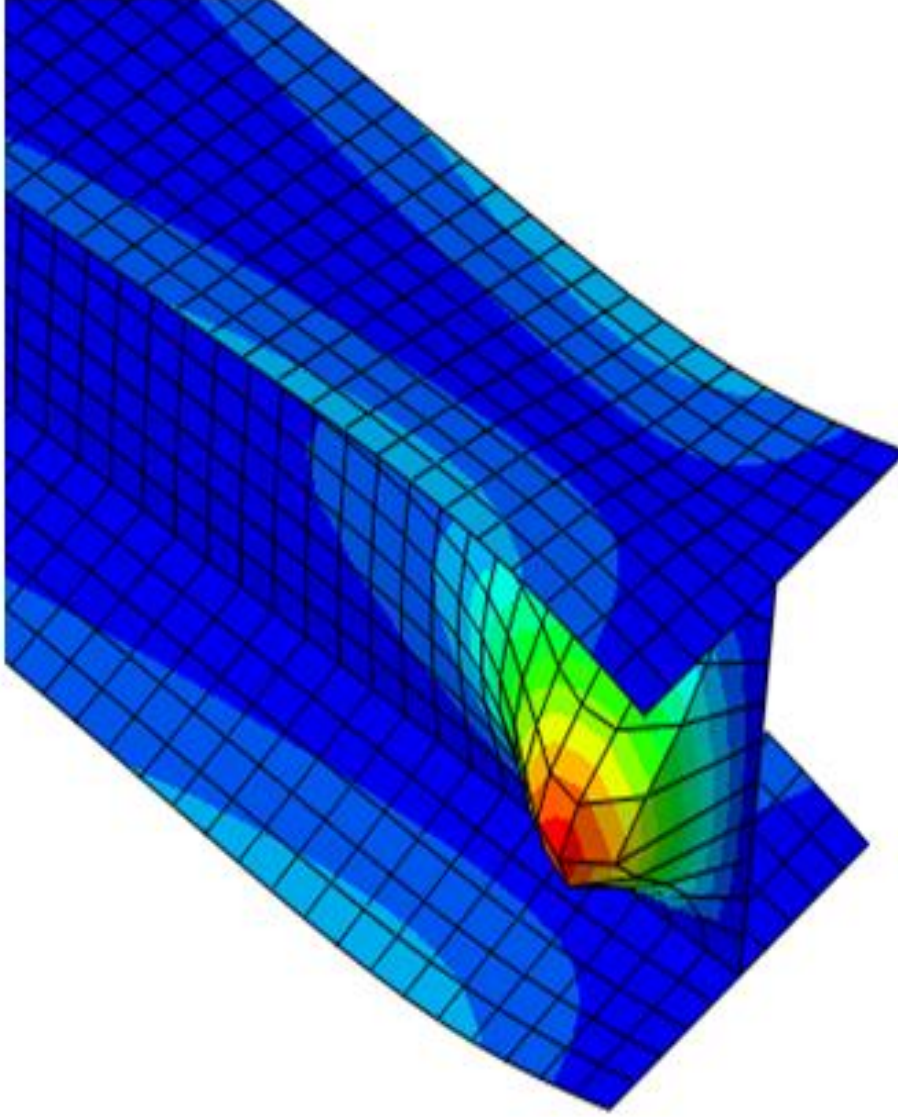
Basit kiriş mesnet koşullarını tanımlamak amacıyla kiriş uçlarında gövdeye ait düğüm noktalarının z doğrultusundaki yer değiştirmeleri sınırlandırılmıştır. Bununla birlikte, kiriş uçlarında alt başlığa ait düğüm noktalarının y doğrultusundaki yer değiştirmeleri de sınırlandırılmaktadır. Ayrıca, kirişin bir ucunda alt başlığa ait düğüm noktalarının x doğrultusundaki ötelenmeleri de önlenmiştir.

Tanımlanan bu 3 maddeye ait görsel **Şekil 5.2**'de verilmiştir.



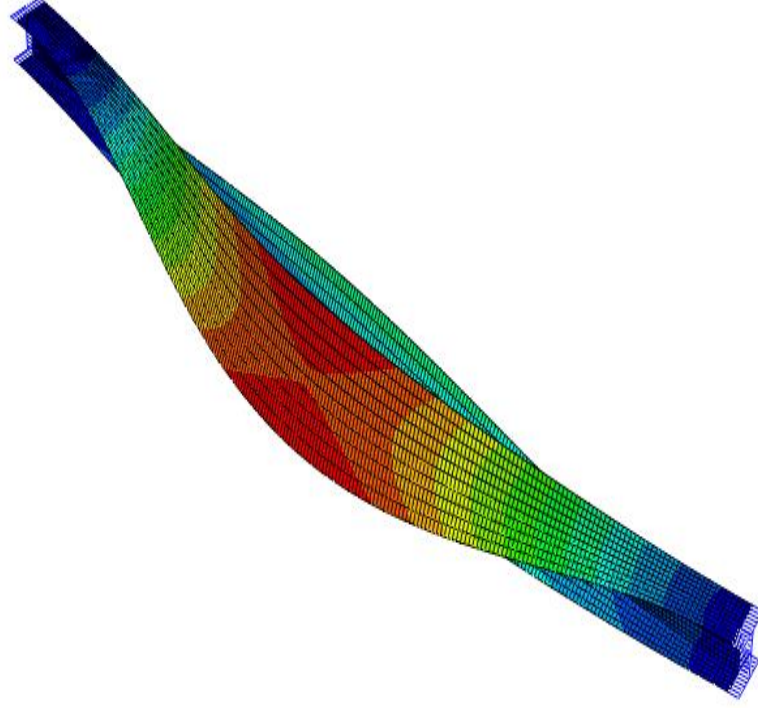
Şekil 5.2 : Tek bir I enkesitli kirişe ait tanımlanan mesnet koşulları.

Tüm bu işlemlerden sonra birim moment, ikiye ayrılarak alt ve üst başlığın ortasına 0.5 birim moment olarak girilmiştir. Ancak bu durum yerel burkulmalara sebep olduğundan uygun bulunmamıştır. Bu duruma ait görsel **Şekil 5.3**'de verilmektedir..



Şekil 5.3 : Tanımlanan mesnet koşullarına sahip I enkesitli kirişte meydana gelen yerel burkulmalar.

Yerel burkulmalara sebep olan temel etken, momentin sadece bir düğüm noktasına yerel olarak etkimesidir. Yerel etkileri ortadan kaldırmak ve etkitilen momentin homojen bir biçimde dağılmasını sağlamak için modellerde çubuk elemanlar kullanılmıştır. Çubuk elemanlar sonlu elemanlara ait düğüm noktalarına yerleştirilmiştir.



Şekil 5.5 : Tanımlanan mesnet koşullarına sahip tek bir I enkesitli kirişin yanal burulmalı burkulması.

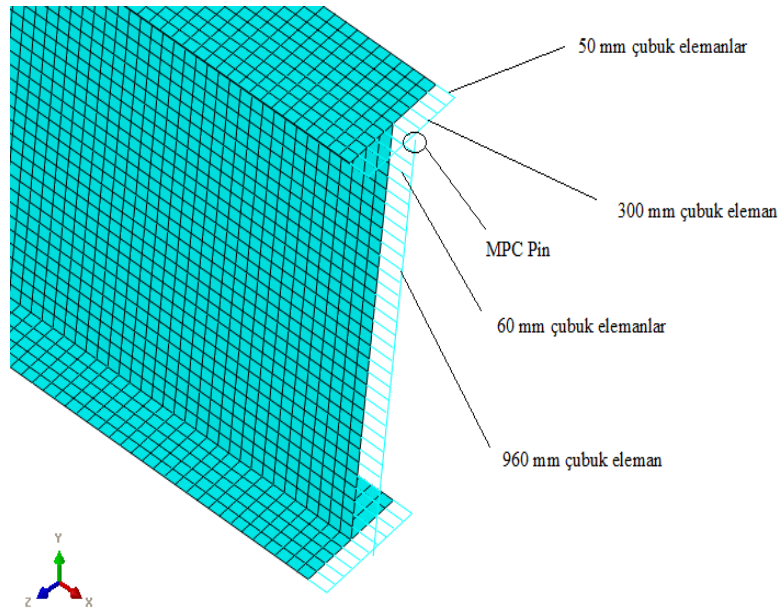
Modelleri çubuk elemanların rijitliğinden bağımsız hale getirmek ve basit mesnet davranışını modellerde gözlemleyebilmek için basınç başlığının dönmesini sağlamak gerekir.

Böylelikle kullanılan çubuk elemanlar, rijitliği ne olursa olsun dayanıma çok az katkı verecek ayrıca etkitilen momentin homojen bir biçimde dağılmasını sağlayacaktır. Basınç başlığının dönmesi, mesnet koşullarında aşağıdaki düzenlemeler yapılarak sağlanabilir

- Alt ve üst başlıktaki sonlu elemanların düğüm noktalarına bağlı kiriş boyu doğrultusunda olan çubuk elemanların boyları 50 mm olarak kalacaktır.
- Gövdedeki sonlu elemanların düğüm noktalarına bağlı kiriş boyu doğrultusunda olan çubuk elemanların boyu 60 mm olacak şekilde uzatılacaktır.
- Başlıktaki çubukları kapatan çubuk eleman 300 mm, gövdedeki çubukları kapatan çubuk eleman ise 960 mm olarak kalacaktır.

- Başlıklardaki kapatma çubuğu ile gövdedeki kapatma çubuğu arasındaki bağlantı, mafsallı bağlantıyı teşkil edecek olan MPC Pin (Birden çok nokta tutma yöntemi) komutu ile sağlanacaktır.

Yukarıda değinilen 4 madde doğrultusunda tek bir I enkesitli kirişe ait idealleştirilmiş mesnet koşulları **Şekil 5.6**'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : Tek bir I enkesitli kirişe ait idealleştirilmiş mesnet koşulları.

5.3 Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması

Modelde oluşturulan mesnet koşulları tek bir I kiriş için hali hazırda bulunan sehim formülleri ile karşılaştırılmıştır. Basit mesnetli kirişte açıklığının ortasından etkiyen tekil yük için sehim değeri teorik olarak;

$\delta = \frac{Pl^3}{48EI_x}$ olarak kabul edilmiştir. 50 mm düşey deplasman için gerekli olan P

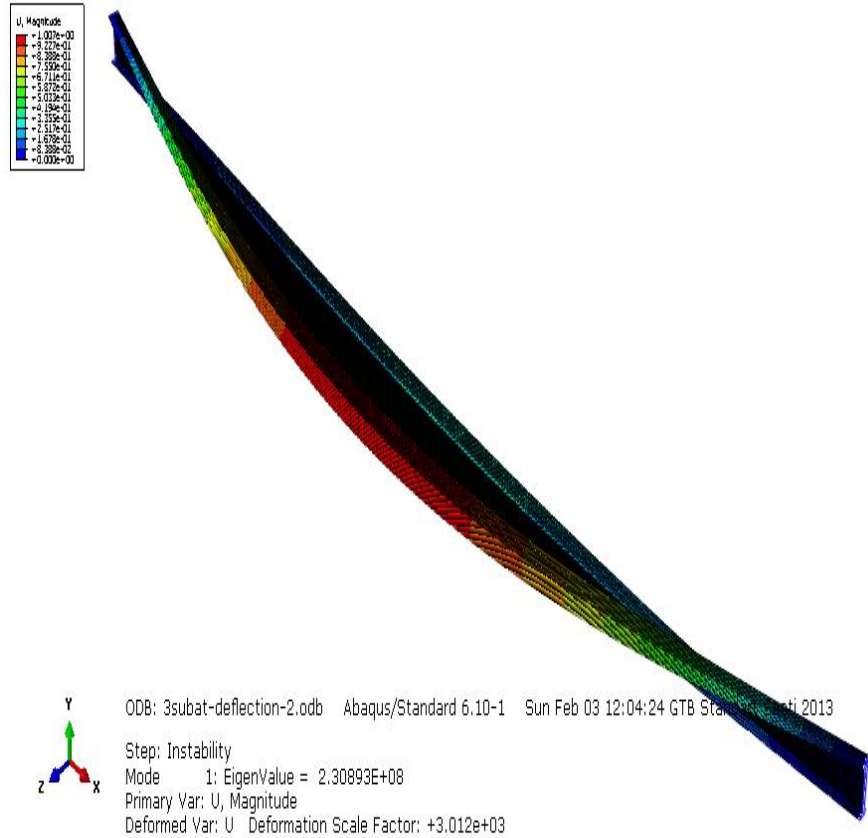
kuvveti;

$$\frac{P30000^3 \text{ mm}^3}{48(210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})(3595784000 \text{ mm}^4)} = 50 \text{ mm} \Rightarrow P = 67121.30 \text{ N} \quad (5.1)$$

olmaktadır.

Mesnet koşullarını doğrulamak amacıyla, yanal burkulma sınır durumu ve yer değiştirme kontrolü göz önüne alınarak tek bir I enkesitli kiriş için kuramsal ve analitik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Basit mesnetli kirişte 50mm sehim için uygulanması gereken tekil kuvvet 67.1kN olmaktadır. Bu kuvvet analitik modele etkilmiş ve analitik modelin analizi sonucunda yer değiştirme değeri, 49.92mm olarak elde edilmiştir. Bu durumda yer değiştirme bakımından basit mesnet koşulları yeteri yaklaşıklıkta temsil edilebilmiştir. Ayrıca, 30m açıklıklı tek bir basit kirişin yanal burulmalı burkulma sınır durumunda kuramsal yaklaşımla kritik eğilme momenti, $M_{cr} = 213/1kNm$ olarak hesaplanmaktadır.

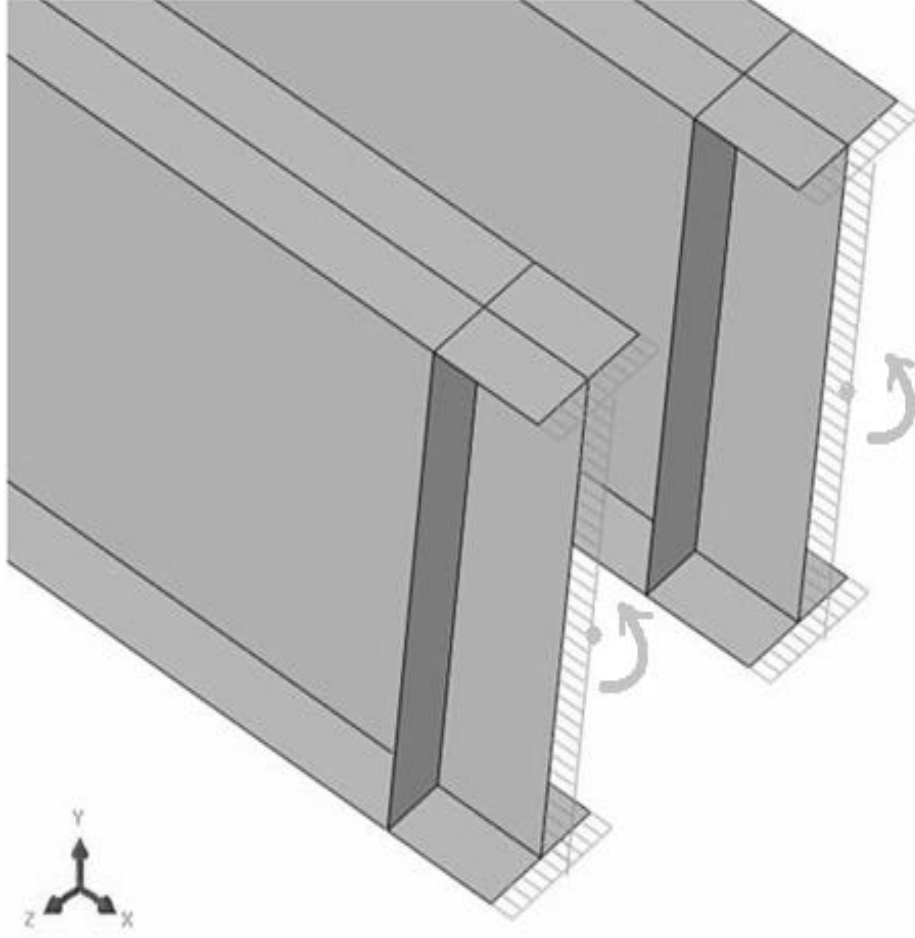
Analitik modelin analizi sonucunda bu değer 230.9kNm olarak elde edilmiştir. Bu durumda basit mesnet koşulları yaklaşık olarak %8 oranında bir hata ile temsil edilebilmiştir. Tek bir I enkesitli kirişin yanal burulmalı burkulması Şekil 5.7’de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.7 : 30m açıklığa ve tanımlanan kesit özelliklerine sahip tek bir I enkesitli kirişin yanal burulmalı burkulması.

5.4 Doğrulanmış Mesnet ve Yükleme Koşullarının Çift I Enkesitli Çok Parçalı Kirişlere Uygulanması

İdealize edilmiş mesnet ve yükleme koşullarının çift I enkesitli çok parçalı kirişlere uygulanması Şekil 5.8’de görüldüğü gibidir.



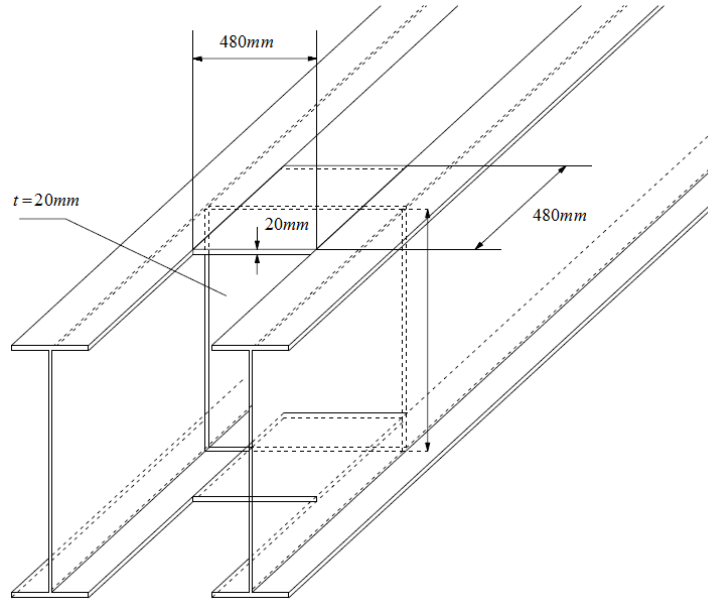
Şekil 5.8 : İdealize edilmiş mesnet ve yükleme koşullarının çift I enkesitli çok parçalı kirişlere uygulanması.

Çift I enkesitli çok parçalı kirişlere ait mesnet koşulları tek bir I kiriş için tanımlananla aynıdır. Ancak birim moment her bir kirişe 0.5 birim olmak üzere etkilmiştir. İki kiriş birbirine alt ve üst başlıklarından levhalar ile bağlanırsa, kesit kutu kesite döner ve %100 birlikte çalışma durumu meydana gelir. Bir diğer deyişle iki kirişin birlikte çalışma durumu bağlantı detayı ve sıklığının bir fonksiyonudur.

Burada, I enkesitli kirişlerin birbirlerine belirli aralıklarda yerleştirilen ara elemanlar (yatay ve düşey levhalar) yardımıyla bağlanması sağlanmıştır.

5.5 Çift I Enkesitli Çok Parçalı Kirişlere Ait Bağlantı Detayı

Çift I enkesitli çok parçalı kirişlere ait ara bağlantı detayı Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



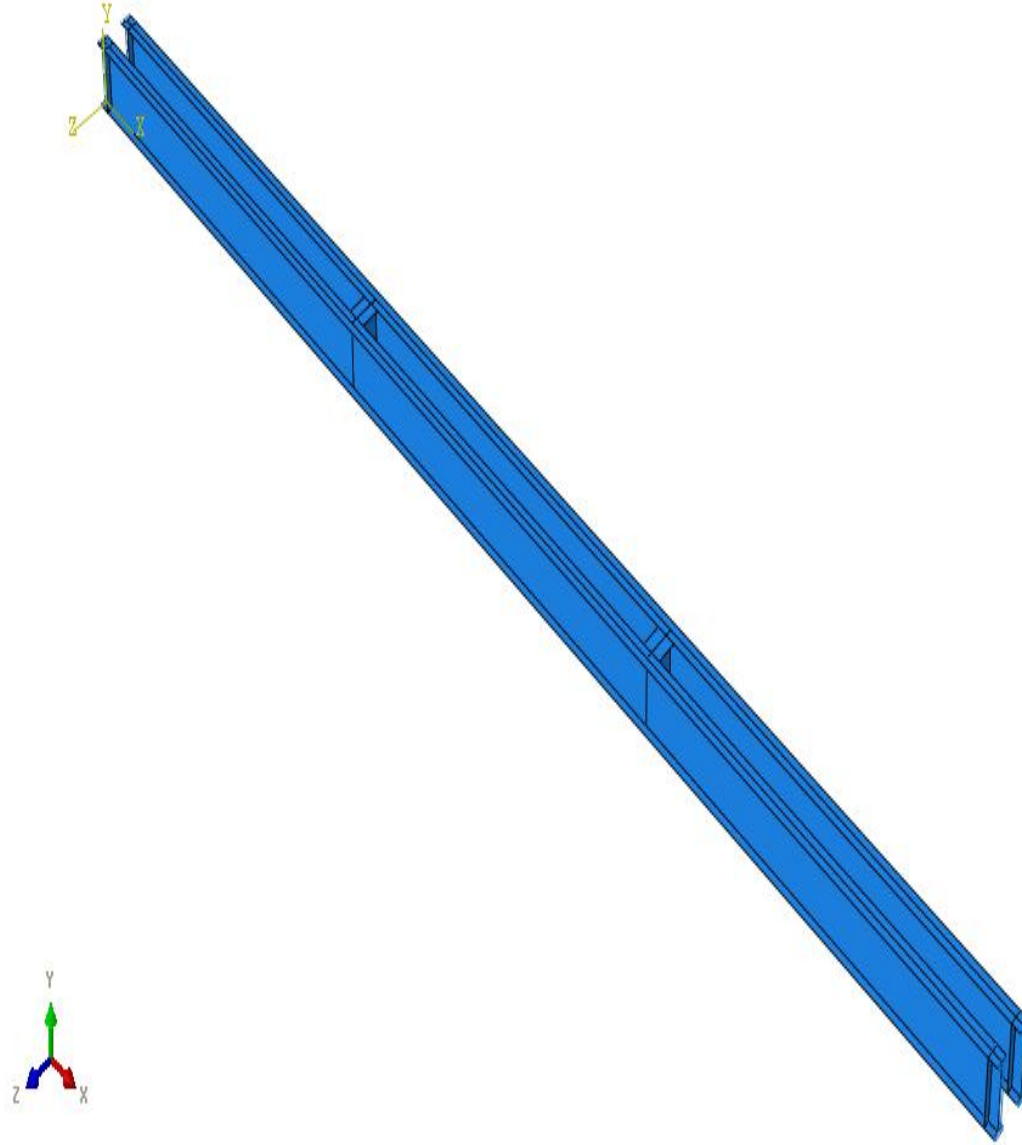
Şekil 5.9 : Çift I enkesitli çok parçalı kirişlere ait ara bağlantı detayı.

Kirişlerin birlikte ortak olarak çalışmalarını sağlamak amacıyla ara bağlantı elemanları olarak iki yatay ve bir de düşey düzlemde olmak üzere toplamda üç adet levha kullanılmaktadır. Kiriş başlıklarını birbirine bağlayan yatay levhalar yardımıyla her bir kirişin bağımsız çarpılma şekil değiştirme durumlarının, düşey levha ile her bir kirişin bağımsız burulma şekil değiştirme durumlarının sınırlandırılması öngörülmektedir.

Modellerde alt ve üst başlıkları birbirine bağlayan levhalar kiriş yüksekliğinin yarısı kadar uzunluğa ve başlık kalınlığı kadar kalınlığa sahip levhalar olarak teşkil edilmiştir. Düşey levhanın kalınlığı başlık kalınlığı ile aynıdır. Alt ve üst başlıkları birbirine bağlayan levhaların kiriş boyu doğrultusundaki boyutları kiriş yüksekliğinin yarısı kadardır (Şekil 3). Çok parçalı kirişlerin uç bölgelerinde yapma I enkesitleri birbirine bağlayan herhangi bir levha ya da bağlantı elemanı kullanılmamıştır. Enkesit Şekil 5.9’da görüldüğü gibidir.

5.6 Açıklığının Üçte Birinden (L/3) Bağlantılı Çok Parçalı Kiriş

Çift I enkesitli çok parçalı kirişin ara bağlantı elemanı uygulaması Şekil 5.10'te gösterildiği gibidir.



Şekil 5.10 : Çift I enkesitli çok parçalı kiriş için açıklığın üçte birinden ara bağlantı elemanı uygulaması.

Bu modelde her bir I enkesitli kiriş birbirlerine açıklığın üçte birlerinden bağlanmıştır. Bağlantı detayı daha önce tanımlanan bağlantı detayı olup, mesnet şartları çift I kirişler için tanımlanan mesnet şartları ile aynıdır.

Açıklığın üçte birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kirişin yanal burulmalı burkulması Şekil 5.11’te gösterilmiştir.

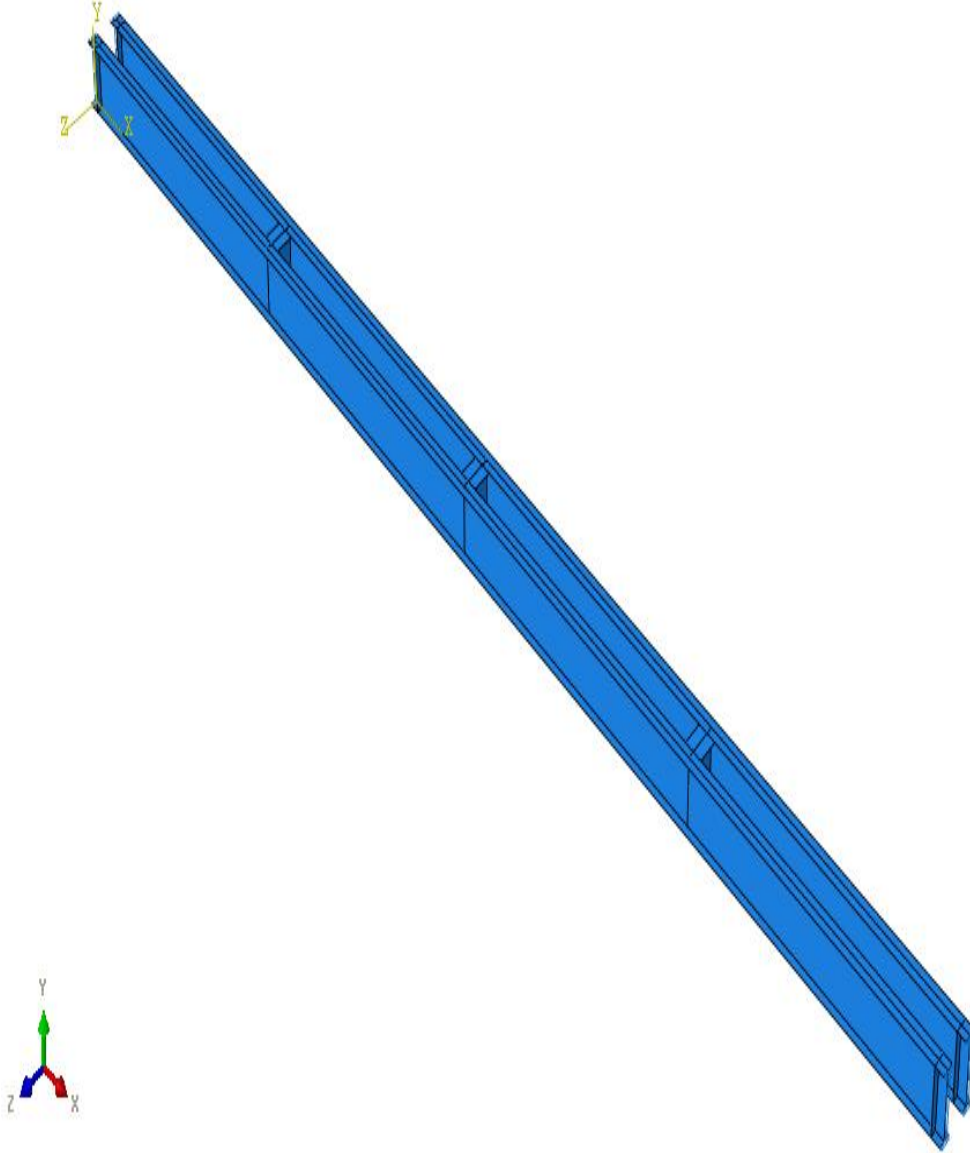


Şekil 5.11 : Açıklığın üçte birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kiriş için yanal burulmalı burkulma.

Buna göre, kirişlerin birbirlerine açıklığın üçte birinden bağlanması sonucu ortaya çıkan $M_{cr} = 1.974 \times 10^9 \text{ Nmm}$ olmaktadır.

5.7 Açıklığın Dörtte Birinden (L/4) Bağlantılı Çok Parçalı Kiriş

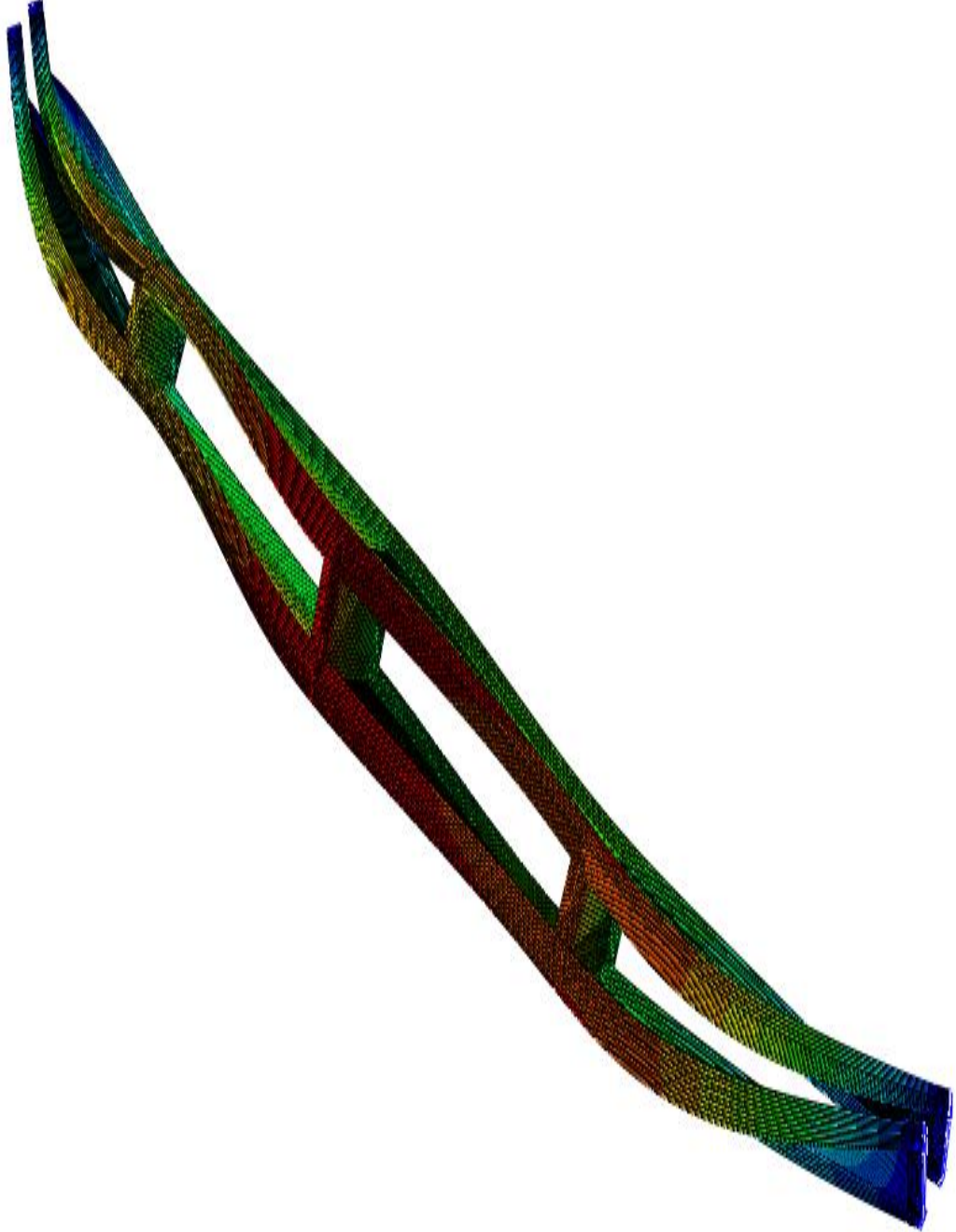
Çift I enkesitli çok parçalı kirişin ara bağlantı elemanı uygulaması Şekil 5.12’te gösterildiği gibidir.



Şekil 5.12 : Çift I enkesitli çok parçalı kiriş için açıklığın dörtte birinden ara bağlantı elemanı uygulaması.

Bu modelde her bir I enkesitli kiriş birbirlerine açıklığın dörtte birlerinden bağlanmıştır. Bağlantı detayı daha önce tanımlanan bağlantı detayı olup, mesnet şartları çift I kirişler için tanımlanan mesnet şartları ile aynıdır.

Açıklığın dörtte birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kirişin yanal burulmalı burkulması Şekil 5.13’da gösterilmiştir.

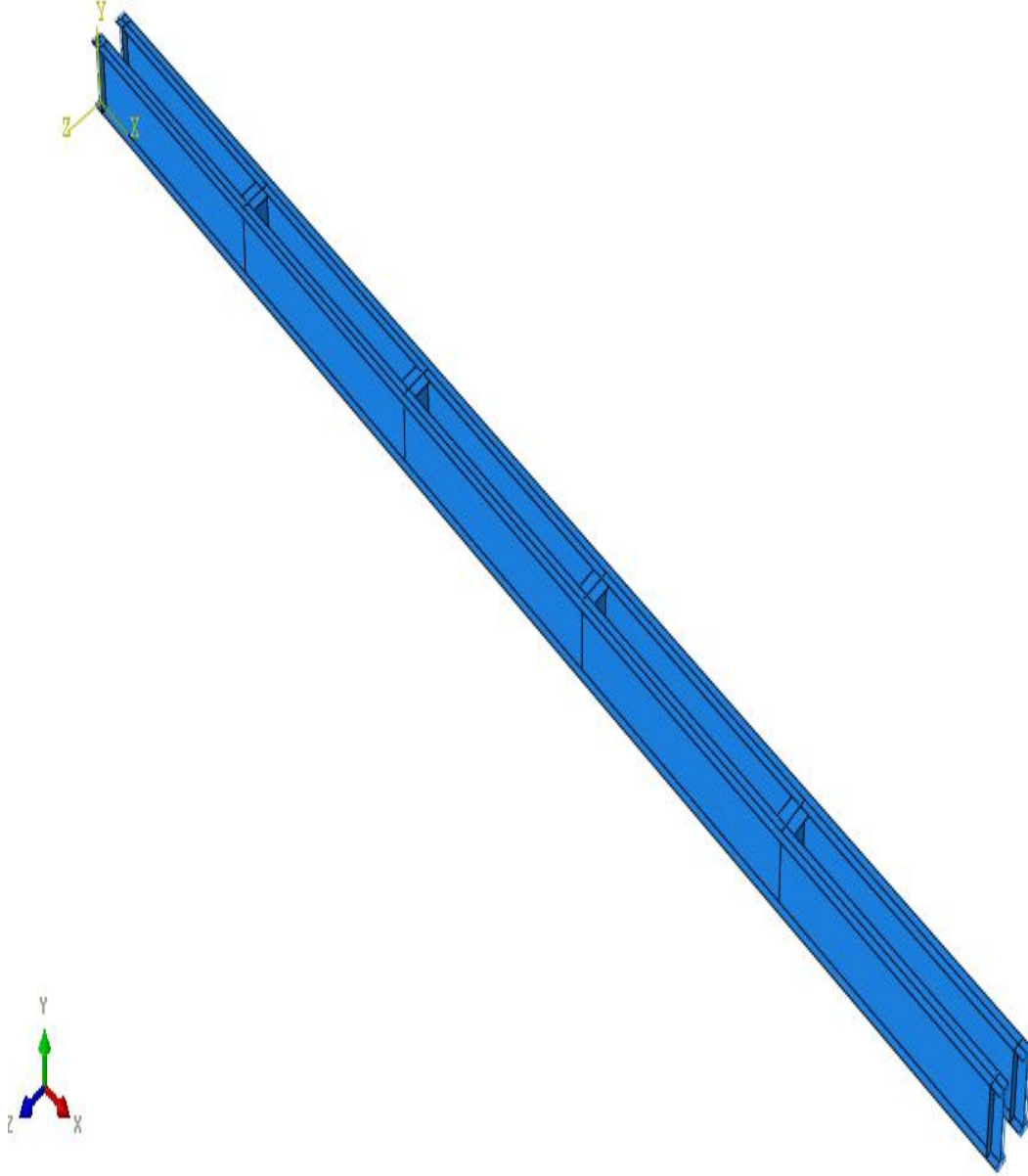


Şekil 5.13 : Açıklığın dörtte birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kiriş için yanal burulmalı burkulma.

Buna göre, kirişlerin birbirlerine açıklığın dörtte birinden bağlanması sonucu ortaya çıkan $M_{cr} = 3.072 \times 10^9 \text{ Nmm}$ olmaktadır.

5.8 Açıklığın Beşte Birinden (L/5) Bağlantılı Çok Parçalı Kiriş

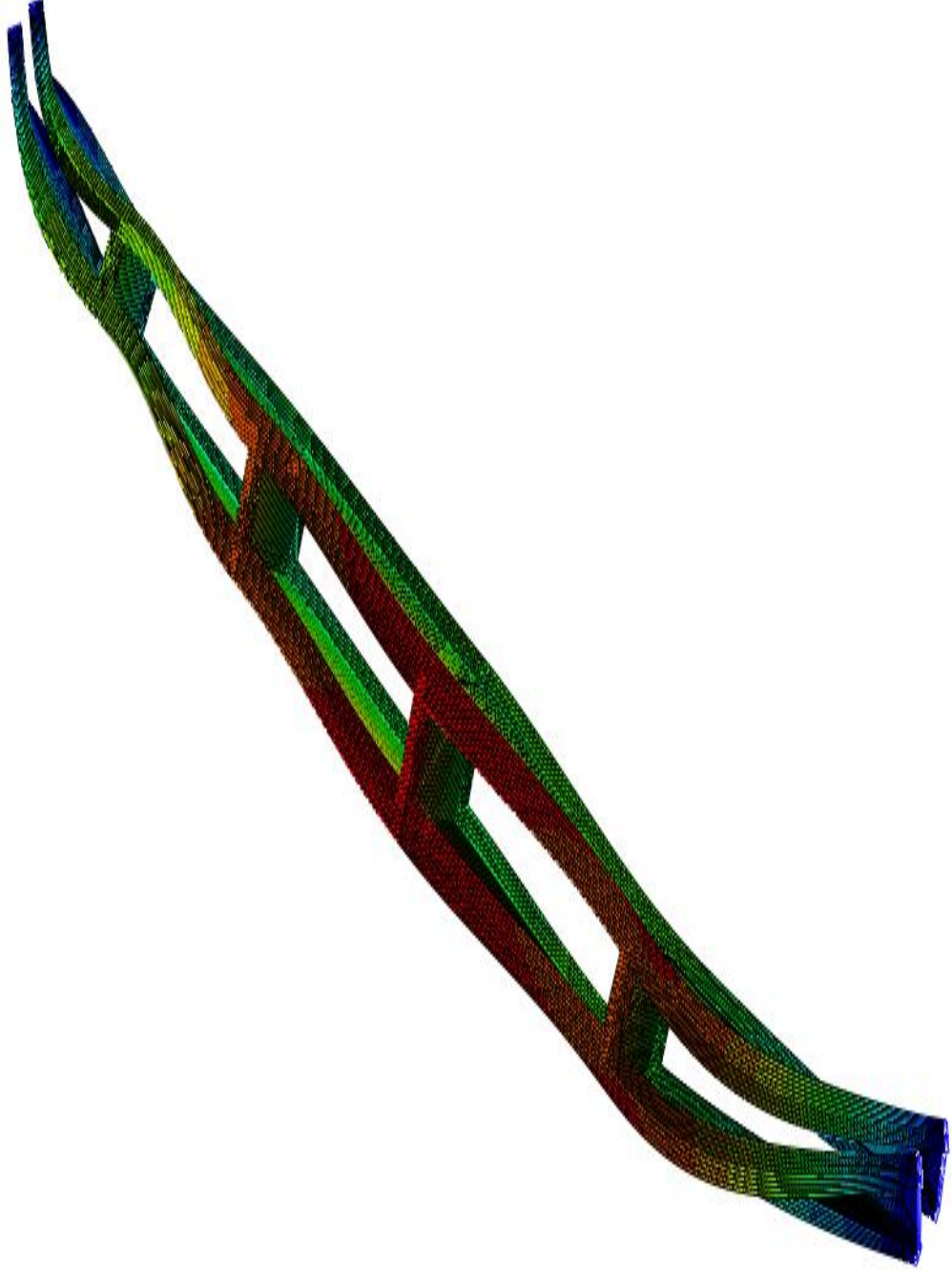
Çift I enkesitli çok parçalı kirişin ara bağlantı elemanı uygulaması Şekil 5.14’de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.14 : Çift I enkesitli çok parçalı kiriş için açıklığın beşte birinden ara bağlantı elemanı uygulaması.

Bu modelde ise her bir I enkesitli kiriş birbirlerine açıklığın beşte birlerinden bağlanmıştır. Bağlantı detayı daha önce tanımlanan bağlantı detayı olup, mesnet şartları çift I kirişler için tanımlanan mesnet şartları ile aynıdır.

Açıklığın beşte birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kirişin yanıl burulmalı burkulması Şekil 5.15’de gösterilmiştir.

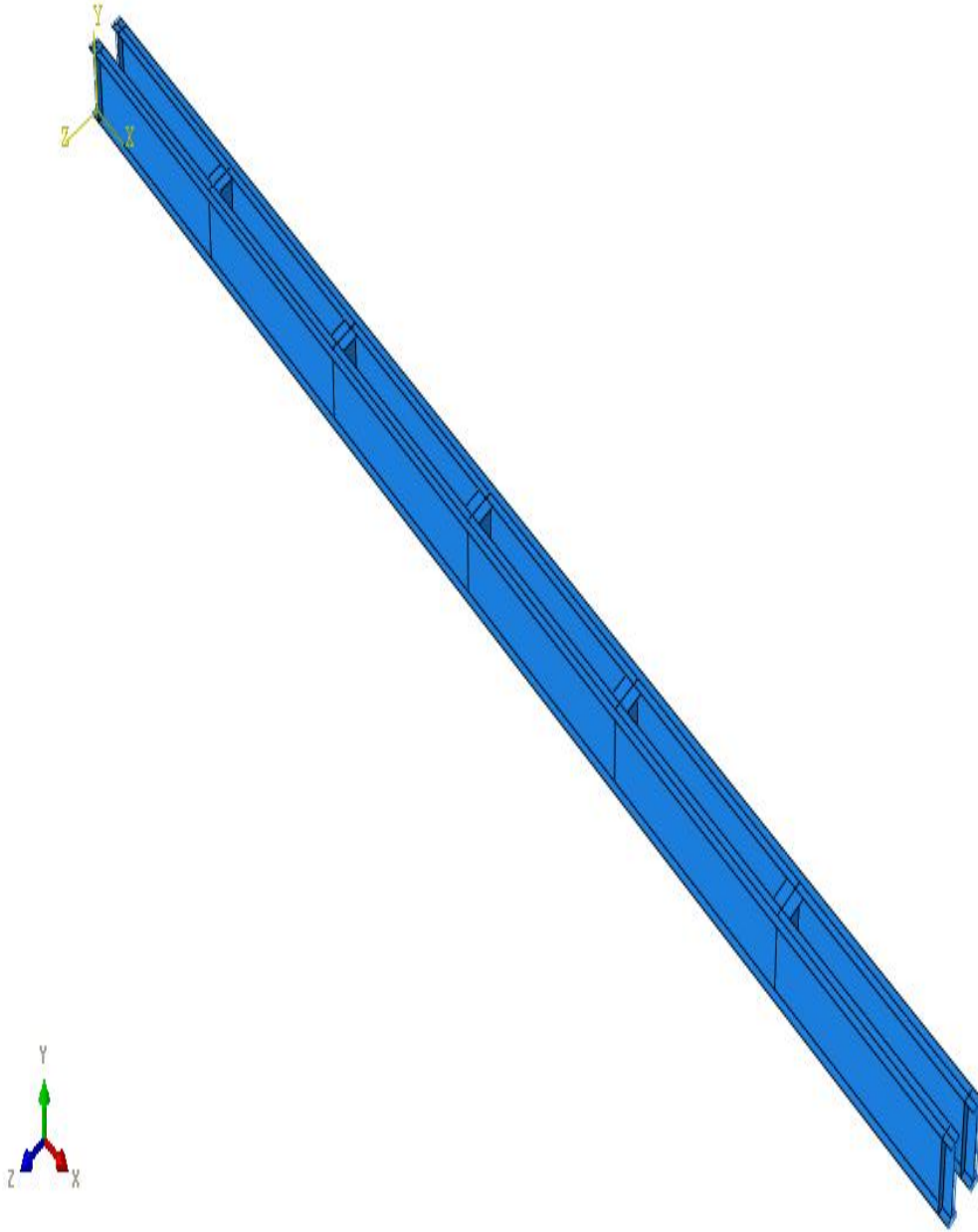


Şekil 5.15 : Açıklığın beşte birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kiriş için yanıl burulmalı burkulma.

Buna göre, kirişlerin birbirlerine açıklığın beşte birinden bağlanması sonucu ortaya çıkan $M_{cr} = 4.462 \times 10^9 \text{ Nmm}$ olmaktadır.

5.9 Açıklığın Altıda Birinden (L/6) Bağlantılı Çok Parçalı Kiriş

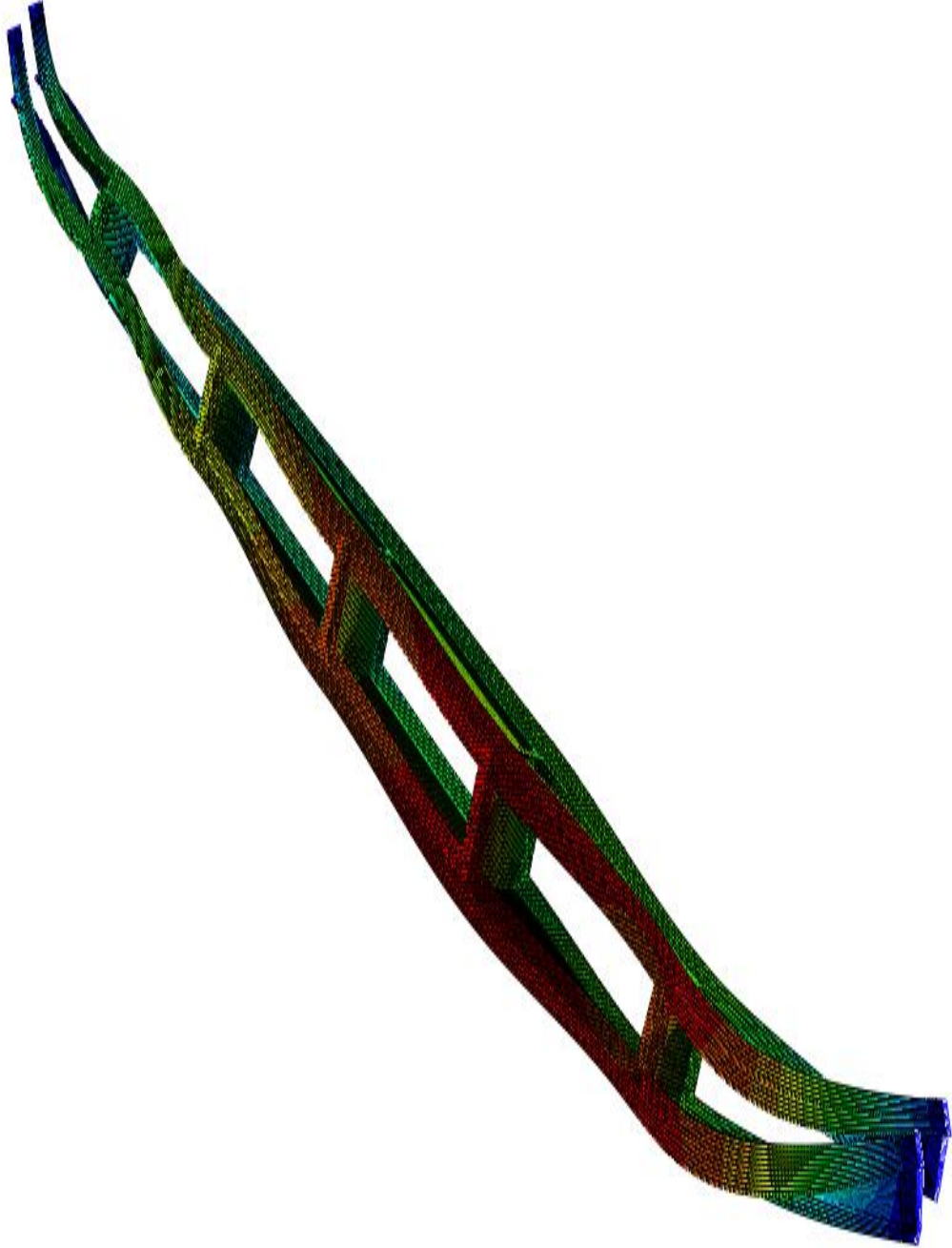
Çift I enkesitli çok parçalı kirişin ara bağlantı elemanı uygulaması Şekil 5.16'da gösterildiği gibidir.



Şekil 5.16 : Çift I enkesitli çok parçalı kiriş için açıklığın altıda birinden ara bağlantı elemanı uygulaması.

Bu modelde de kirişler birbirlerine açıklığın altıda birlerinden bağlanmıştır. Bağlantı detayı daha önce tanımlanan bağlantı detayı olup, mesnet şartları çift I kirişler için tanımlanan mesnet şartları ile aynıdır.

Açıklığın altında birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kirişin yanal burulmalı burkulması Şekil 5.17’de gösterilmiştir.

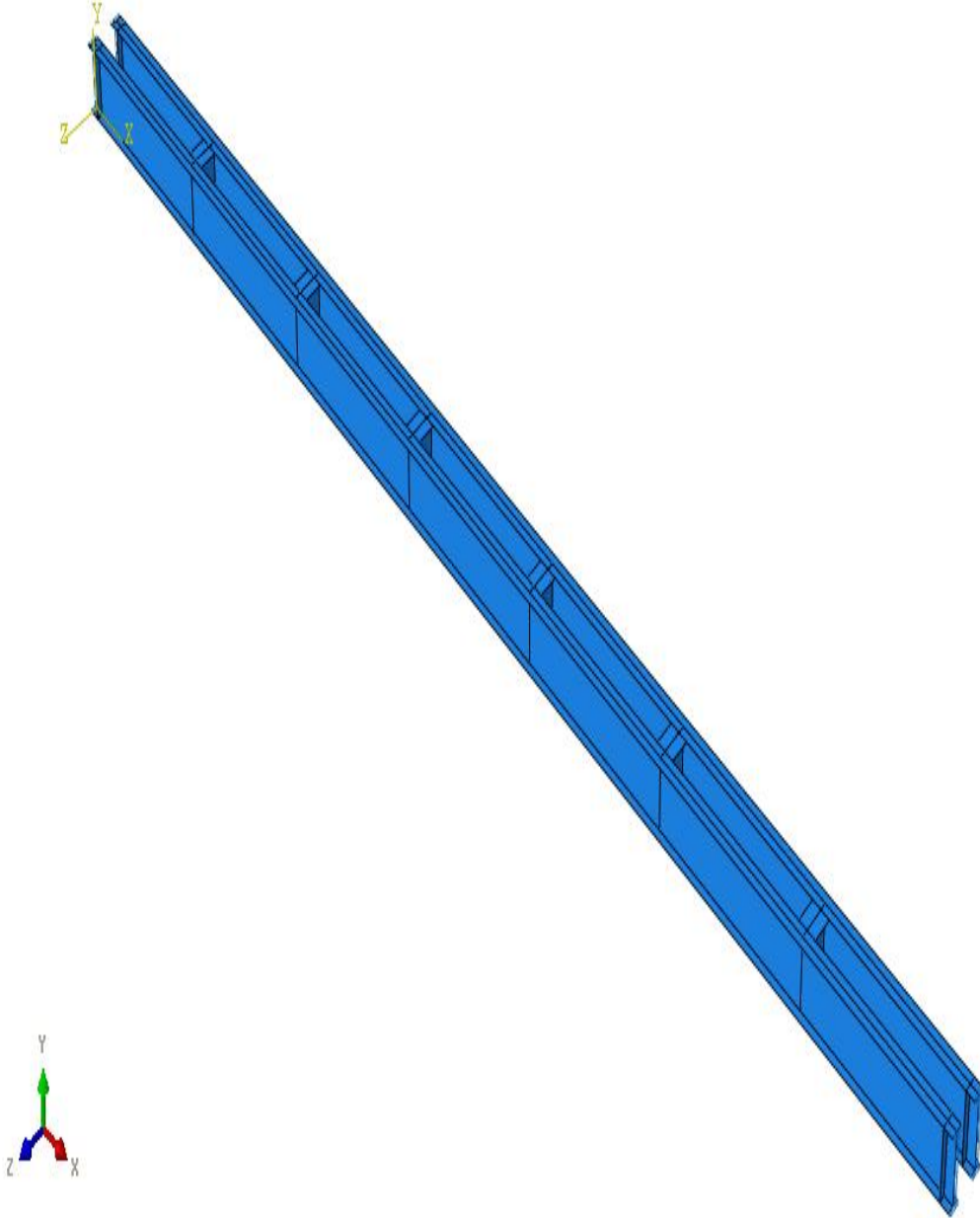


Şekil 5.17 : Açıklığın altında birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kiriş için yanal burulmalı burkulma.

Buna göre, kirişlerin birbirlerine açıklığın altında birinden bağlanması sonucu ortaya çıkan $M_{cr} = 5.940 \times 10^9 \text{ Nmm}$ olmaktadır.

5.10 Açıklığının Yedide Birinden ($L/7$) Bağlantılı Çok Parçalı Kiriş

Çift I enkesitli çok parçalı kirişin ara bağlantı elemanı uygulaması Şekil 5.18'de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.18 : Çift I enkesitli çok parçalı kiriş için açıklığın yedide birinden ara bağlantı elemanı uygulaması.

Son olarak bu modelde ise, her bir I enkesitli kiriş birbirlerine açıklığın yedide birlerinden bağlanmıştır. Bağlantı detayı daha önce tanımlanan bağlantı detayı olup, mesnet şartları çift I kirişler için tanımlanan mesnet şartları ile aynıdır.

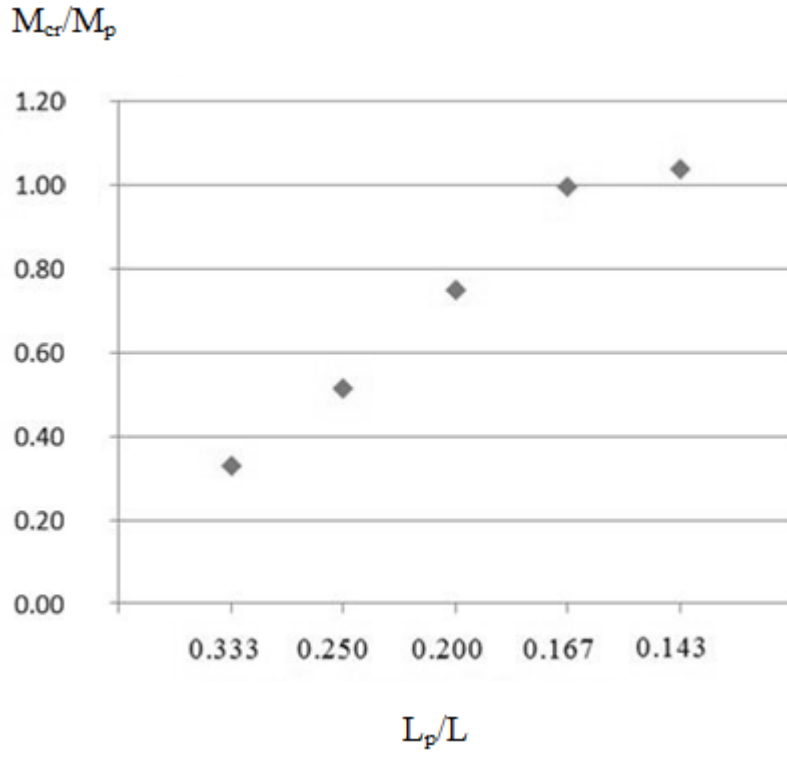
Açıklığın yedide birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kirişin yanal burulmalı burkulması Şekil 5.19’de gösterilmiştir.



Şekil 5.19 : Açıklığın yedide birinden bağlanmış çift I enkesitli çok parçalı kiriş için yanal burulmalı burkulma.

Buna göre, kirişlerin birbirlerine açıklığın yedide birinden bağlanması sonucu ortaya çıkan $M_{cr} = 6.190 \times 10^9 \text{ Nmm}$ olmaktadır.

Tüm bu sonuçlar **Şekil 5.20**'te gösterilecek olursa;



Şekil 5.20 : (L_p / L) ile (M_{cr} / M_p) ' nin değişimi.

şeklinde olmaktadır.

6. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1 Sonlu Eleman Analizlerine Ait Sonuçlar

Analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Açıklığının üçte birinden bağlantılı çok parçalı kirişlerin yanal burulmalı burkulmasına ait kritik moment dayanımı (M_{cr}) $1.974 \times 10^9 \text{ Nmm}$ olmaktadır. Bu değer, toplam kiriş plastikleşme momenti değeri M_p 'nin %33.10'u kadardır.
- Açıklığının dörtte birinden bağlantılı çok parçalı kirişlerin yanal burulmalı burkulmasına ait kritik moment dayanımı (M_{cr}) $3.072 \times 10^9 \text{ Nmm}$ olmaktadır. Bu değer, toplam kiriş plastikleşme momenti değeri M_p 'nin %51.45'i kadardır.
- Açıklığının beşte birinden bağlantılı çok parçalı kirişlerin yanal burulmalı burkulmasına ait kritik moment dayanımı (M_{cr}) $4.462 \times 10^9 \text{ Nmm}$ olmaktadır. Bu değer, toplam kiriş plastikleşme momenti değeri M_p 'nin %74.73'ü kadardır.
- Açıklığın altıda birinden bağlantılı çok parçalı kirişlerin yanal burulmalı burkulmasına ait kritik moment dayanımı (M_{cr}) $5.940 \times 10^9 \text{ Nmm}$ olmaktadır.

Bu değer göstermektedir ki, 30m açıklığa sahip çift I enkesitli yapma kirişler, daha önce tanımlanan bağlantı detayı ile birbirlerine açıklığın altıda birlerinden bağlandığında kritik moment dayanımı M_{cr} , bu kirişlere ait toplam kiriş plastikleşme momenti değeri M_p 'nin %99.48'i kadardır.

Açıklığın yedide birinden bağlantılı çok parçalı kirişlerin yanal burulmalı burkulmasına ait kritik moment dayanımı (M_{cr}) ise $6.190 \times 10^9 \text{ Nmm}$ olmaktadır. Bu değere ait model incelenecek olursa, artan moment değeri ile

birlikte gövdenin yerel burkulma durumunun belirleyici olduğu gözlemlenmektedir.

Bu durum yerel olarak etkiyen momentin belirli bir bölgede yığılı basınç etkileri oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

6.2 Konsol Kirişlere Ait Yanal Burulmalı Burkulma Dayanımı

Konsol kirişlere ait yanal burulmalı burkulma dayanımı Martinelli [15] tarafından (6.1)'de ifade edildiği gibidir.

$$M_{cr} = \frac{\pi}{2L} \sqrt{GJ E I_y + \frac{1}{4} \left(\frac{\pi E}{L} \right)^2 I_y C_w} \quad (6.1)$$

İki kirişin birbirine açıklığın altıda birinden bağlanmış modeli ABAQUS yardımıyla oluşturulduğunda elde edilen M_{cr} değeri çok parçalı kiriş plastikleşme momenti değeri, M_p 'nin %99.50'si kadardır.

Elde edilen bu sonuç 30 m açıklığa sahip kirişlerin L_p değerinin 5 m olarak kabul edilmesine olanak sağlamıştır.

Bu kirişlerin 5 m'lik parçaları için konsol kiriş yaklaşımı yapıp, teorik değer

$L = 5m$ için (6.1) denklemi ile hesaplanacak olursa;

$$I_y = 180270720 \text{ mm}^4$$

$$J = 4235746 \text{ mm}^4$$

$$I_f = 1915200000 \text{ mm}^4$$

$$C_w = I_f \frac{h^2}{4} = (1915200000) \frac{(960)^2}{4} = 4.413 \times 10^{14} \text{ mm}^6$$

$$M_{cr} = \frac{\pi}{2(5000)} \sqrt{(80770)(4235746)(210000)(180270720) + \dots}$$

$$\dots + \frac{1}{4} \left(\frac{\pi(210000)}{5000} \right)^2 (180270720)(4.413 \times 10^{14})$$

$$M_{cr} = 5.95 \times 10^9 \text{ Nmm}$$

sonucu elde edilir.

Yaklaşım, hem ABAQUS yardımıyla bulunan sonucun hem de çok parçalı kirişin plastikleşme momenti, M_p 'nin %99 oranında tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır.

Konsol kiriş yaklaşımı, farklı açıklığa sahip başka tip profiller için de denenmiştir. Bunlardan ilki 20 m açıklığa sahip HE800B kirişler içindir. Kirişe ait kesit özellikleri;

$$I_y = 2.98 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$J = 19180000 \text{ mm}^4$$

$$I_f = 2574000000 \text{ mm}^4$$

$$C_w = 3.78 \times 10^{14} \text{ mm}^6$$

şeklindedir. 20 m açıklığa sahip çift HE800B kirişler için plastik moment dayanımı;

$$M_p = (F_y)(Z_x)$$

$$M_p = (355)(19900715)$$

$$M_p = 7064753825 \text{ Nmm}$$

olmaktadır. Bu M_p değeri, M_{cr} olarak kabul edilip (6.1) yardımıyla L hesaplanırsa;

$$L = 5212 \text{ mm} \text{ olarak bulunur.}$$

Bu değer de 20 m açıklığa sahip kirişlerin, ihtiyatlı olmayan bir yaklaşımla açıklığın dörtte birlerinden birbirine bağlanması durumuna teorik olarak karşılık gelir. 20 m açıklığa sahip kirişler birbirlerine açıklığın dörtte birinden bağlanarak ABAQUS yardımıyla modellenirse elde edilen $M_{cr} = 8.46 \times 10^9 \text{ Nmm}$ olmaktadır. Bu da %84 yakınsaklık demektir. ABAQUS bilgisayar programıyla elde edilen değer (6.1) yardımıyla hesaplanan değerden büyük olmasının sebebi, C_w katsayısının gerçekte olandan daha ihtiyatlı bir şekilde tahmin edilmesinden kaynaklanır. C_w katsayısının

çift I enkesitli kirişler için tam anlamıyla hesaplanabilmesi için durumun mekaniğinin tam anlamıyla irdelenmesi gerekir.



ODB: 17MAYHEB800-L-BOLU-4-10kat.odb Abaqus/Standard 6.10-1 Fri May 17 23:04:19 GTB Yaz Saati 2013

Step: Instability

Mode 1: EigenValue = 8.46453E+09

Primary Var: U, Magnitude

Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.012e+03

Şekil 6.1 : 15 m açıklığa sahip iki adet HE500B profilin burkulmuş hali.

15 m açıklığa sahip HE500B kirişler için de konsol kiriş yaklaşımı yapılmıştır.

Kirişe ait kesit özellikleri;

$$I_y = 2.52 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$J = 10960000mm^4$$

$$I_f = 1396500000mm^4$$

$$C_w = 7.78 \times 10^{13} mm^6$$

şeklindedir.

15 m açıklığa sahip çift HE500B kirişler için plastik moment dayanımı;

$$M_p = (F_y)(Z_x)$$

$$M_p = (355)(9358836)$$

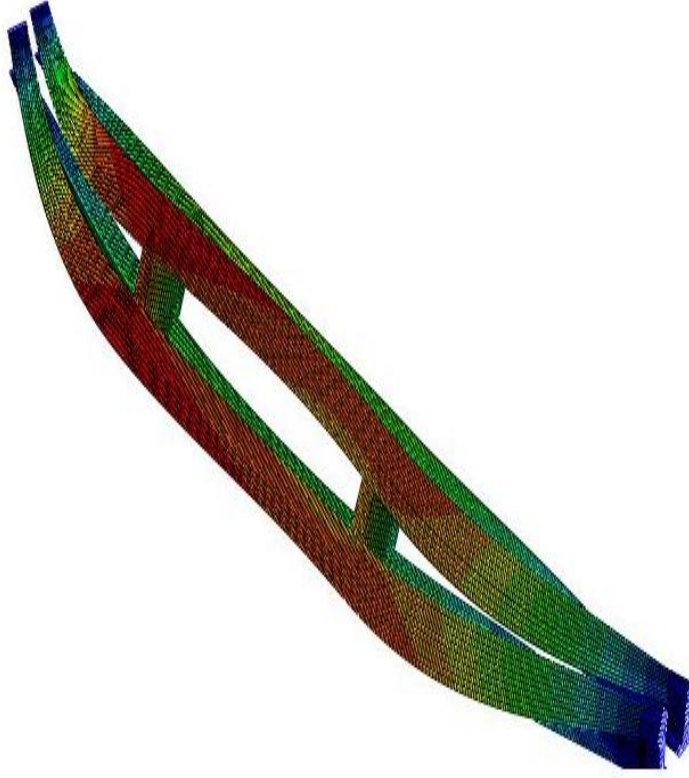
$$M_p = 3322386780 Nmm$$

olmaktadır.

Bu M_p değeri, M_{cr} olarak kabul edilip (6.1) yardımıyla L hesaplanırsa;

$$L = 5262mm \text{ olarak bulunur.}$$

Bu değer de 15 m açıklığa sahip kirişlerin, ihtiyatlı olmayan bir yaklaşımla açıklığın üçte birlerinden birbirine bağlanması durumuna teorik olarak karşılık gelir. 15 m açıklığa sahip kirişler birbirlerine açıklığın dörtte birinden bağlanarak ABAQUS yardımıyla modellenirse elde edilen $M_{cr} = 4.55 \times 10^9 Nmm$ olmaktadır. Bu da %75 yakınsaklık demektir. ABAQUS bilgisayar programıyla elde edilen değer (6.1) yardımıyla hesaplanan değerden büyük olmasının sebebi, C_w katsayısının gerçekte olandan daha ihtiyatlı bir şekilde tahmin edilmesinden kaynaklanır. C_w katsayısının çift I enkesitli kirişler için tam anlamıyla hesaplanabilmesi için durumun mekaniğinin tam anlamıyla irdelenmesi gerekir.



ODB: 17MAYHEB500-L-BOLU-3-10kat.odb Abaqus/Standard 6.10-1 Fri May 17 22:56:13 GTB Yaz Saati 2013

Step: Instability
Mode 1: EigenValue = 4.55499E+09
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.512e+03

Şekil 6.2 : 20 m açıklıklı iki adet HE800B profilin burkulmuş hali.

Çalışma kapsamına göre, konsol kirişler için verilen yanal burulmalı burkulma ifadesinin, 35m, 30m ve 25m açıklıklı çok parçalı eğilme elemanlarında, ara bağlantı elemanı aralıklarının plastik eğilme momenti kapasitesine ulaşmasını sağlayacak şekilde tahmin edilmesi için kullanılabileceği söylenebilir. Ancak tasarım sırasında çok parçalı elemanların eğilme momenti kapasitelerini doğrudan kullanabilmek, eğilme elemanlarının plastik moment kapasitesine ulaşmasıyla birlikte yeterli dönme kapasitesine de sahip olmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, sadece doğrusal analiz sonuçlarını kapsayan mevcut çalışmanın bu esaslar çerçevesinde, doğrusal olmayan analizler ve deneysel yöntemler kullanılarak geliştirilmesi ve genişletilmesi planlanmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 30 m açıklığa sahip ve bu açıklık boyunca yanal olarak tutulu olmayan iki adet I enkesitli yapma kirişin birbirine açıklığın, üçte birinden, dörtte birinden, beşte birinden, altıda birinden ve yedide birinden bağlandığı çok parçalı kirişlerin yanal burulmalı burkulma dayanımı incelenmiştir.

Bu incelemede analitik modellerin sonlu eleman analizleri ABAQUS bilgisayar programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm kirişlerin uç bağlantı sınır koşulları, basit kiriş mesnet koşullarını sağlayacak şekilde tanımlanmaktadır. Çalışmada iki adet I enkesitli elemandan oluşan çok parçalı kirişlerde, eşit aralıklı yerleştirilen farklı sayıda ara bağlantı elemanının, kiriş basınç başlığı yanal burulmalı burkulma durumuna katkısı incelenerek, dikkate alınan çok parçalı yapma kirişlerin toplam plastik moment kapasitesine ulaşmasıyla taşıma güçlerini yitirmesine karşı gelen ara bağlantı elemanı aralığının belirlenmesine çalışılmıştır. Bu incelemede, sonlu eleman analizleri sonucunda her bir çok parçalı kirişin yanal burulmalı burkulma sınır durumu için elde edilen kritik eğilme momenti, kirişlerin toplam plastik eğilme momenti değeri ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın amacı olarak belirlenen, birbirine ara bağlantı elemanları vasıtasıyla belirli aralıklarla bağlı çift I enkesitli kirişlerin yanal burulmalı burkulma dayanımına ait elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Bu çalışmada, basit mesnetli, çok parçalı kirişlerin en elverişsiz durum olan kiriş boyunca sabit moment etkisi dikkate alınarak yanal burulmalı burkulma analizleri gerçekleştirilerek ara elemanların bağlantı sıklığının kritik eğilme momentine katkısı doğrusal sonlu eleman analizleri yardımıyla incelenmiştir.
- Çift I enkesitli çok parçalı kirişlere ait çarpılma sabiti (C_w) ve basınç başlığı toplam atalet momentini temsil eden I_f (başlıkların ortak y eksenine göre atalet momenti) ortak y eksenine dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Analitik modellerin analizleri sonucunda elde edilen sonuçların bu yaklaşımla uyumlu

olduğu görülmektedir. Ancak bu uyumun, doğrusal olmayan analizler yardımıyla ve deneysel olarak da doğrulanması sağlanmalıdır,

- Kirişin eğilme momenti kapasitesine ulaşmasıyla birlikte yeterli dönme kapasitesine de sahip olması gerekir. Yeterli dönme kapasitesi, kirişin M_p değerine ulaştığı andaki dönme değeri, θ_p 'nin üç katı kadar bir değere ulaşmasıyla sağlanabilmektedir. Ancak bu çalışmada bu durum göz önünde bulundurulmamıştır. Bu durumun göz önünde bulundurulabilmesi için doğrusal analiz yöntemini içeren bu doğrusal olmayan analizler kullanılarak ve deneylerle desteklenmesi gerekmektedir.
- Sonuç olarak, çift I en kesitli çok parçalı kirişlerde yanal burulmalı burkulma sınır durumu için kritik eğilme momenti, M_{cr} değerinin toplam plastik eğilme momenti, M_p 'ye yakınsaması durumu, ara elemanların bağlantı sıklığının bir fonksiyonudur. Gelecekteki çalışmalarda ara bağlantı elemanlarının dayanımlarında belirleyici olabilecek sınır durumların da (yerel burkulma, akma, vb.) dikkate alınması özellikle boyutlandırma aşaması için önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **ABAQUS**, (2010), Finite Element Analysis and Computer-Aided Engineering, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- [2] **Coffelt, S.J.**, (2010), “Stability Analysis of Single and Double Steel Girders during Construction”, Master’s Thesis, University of Tennessee, Tennessee, USA.
- [3] **Yura, Joseph A., Helwig, T., Herman R. and Zhou, C.**, (2008), Global Lateral Buckling of I-shaped Girder Systems, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 134, No. 9, pp.1487-1494.
- [4] **American Institute of Steel Construction (AISC)**, (2010), Specification for Structural Steel Buildings (360-10), second ed., Chicago, Illinois, USA.
- [5] **Yuan, Z.**, (2004), “Advanced Analysis of Steel Frame Structures Subjected to Lateral Torsional Buckling Effects”, PhD Thesis, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia.
- [6] **Australian Standard for the Design of Steel Structures (AS4100)**, (1998), Steel Structures, Standard Association of Australia, Sydney, Australia.
- [7] **American Institute of Steel Construction (AISC)**, (1999), Load and Resistance Factor Design (LRFD) Specification for Structural Steel Buildings, second ed., Chicago, Illinois, USA.
- [8] **Eurocode 3**, (1993), Design of Steel Structures: Part 1 – General Rules and Rules for Buildings, Brussels, Belgium.
- [9] **Patran Command Language (PCL)**, (2003), Functional Computer Programming Language, MSC Software Corp., California, USA.
- [10] **Salmon, C.G. and Johnson, J.E.**, (1997), Steel Structures: Design And Behavior, Emphasizing Load and Resistance Factor Design, fourth ed., HarperCollins Publishers, Inc., New York, USA.
- [11] **Yura, J.A., Galambos, T.V., Ravindra, M.K.**, (1978), The Bending Resistance of Steel Beams, *Journal of Structural Division*, ASCE 104, ST9, 1355-1370.
- [12] **Galambos, T.V.**, (1988), Guide to Stability Design Criteria of Metal Structures, J Wiley & Sons.
- [13] **Canadian Institute of Steel Construction (CISC)**, (2002), Torsional Section Properties of Steel Shapes, Willowdale, Ont., Canada.

- [14] **Structural Analysis Program (SAP2000)**, (1995), Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA, USA.
- [15] **Martinelli, E.**, (2012), Stability of Structures, Salerno, Italy.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Mehmet Fatih KABAN

Doğum Yeri ve Tarihi: Üsküdar/İSTANBUL 02.04.1990

Adres: Zümrütevler Mah. Zeren Sok. Seval Apt. No: 13/5 Maltepe/İSTANBUL

E-Posta: fatihkaban2005@yahoo.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim ve Ödüller: Proje Mühendisliği (2 yıl)