



T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**DÜZLEM İÇİ EĞİLME MOMENTİNE MARUZ KALMIŞ ELİPS
ENKESİTLİ T-BİRLEŞİMLERİN DAYANIMLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat YILMAZ

**ARALIK 2018
GÜMÜŞHANE**

**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DÜZLEM İÇİ EĞİLME MOMENTİNE MARUZ KALMIŞ ELİPS
ENKESİTLİ T-BİRLEŞİMLERİN DAYANIMLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat YILMAZ

**Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
“İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı”
Yüksek Lisans Programında Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18/12/2018

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 28/12/2018

ARALIK 2018



KABUL ve ONAY



Dr. Öğr. Üyesi Emre ÖZYURT danışmanlığında **Murat YILMAZ** tarafından hazırlanan “**DÜZLEM İÇİ EĞİLME MOMENTİNE MARUZ KALMIŞ ELİPS ENKESİTLİ T-BİRLEŞİMLERİN DAYANIMLARI**” isimli bu çalışma jürimiz tarafından Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı’ nda Yüksek Lisans Tezi olarak Oy Birliği ile kabul edilmiştir.

Başkan

:Dr. Öğr. Üyesi Murat GÜNAYDIN

Üye (Danışman)

: Dr. Öğr. Üyesi Emre ÖZYURT

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Onur ARAZ

ONAY

Bu tez **06/02/19** tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ferkan SİPAHİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANNAMESİ

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlamış olduğum "**Düzlem İçi Eğilme Momentine Maruz Kalmış Elips Enkesitli T-Birleşimlerin Dayanımları**" isimli tez çalışmasında; bütün bilgi ve belgeleri genel akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel ve yazılı bütün bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak hazırlayıp sunduğumu, başka kaynaklardan yararlandığım bilgileri metin ve kaynaklarda eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresince bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksi durumda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.
18/12/2018.



Murat YILMAZ

ÖZET
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜZLEM İÇİ EĞİLME MOMENTİNE MARUZ KALMIŞ ELİPS
ENKESİTLİ T-BİRLEŞİMLERİN DAYANIMLARI

Murat YILMAZ

Gümüşhane Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Emre ÖZYURT

2018, 60 sayfa

Son yıllarda “Elliptical Hollow Section” (EHS) olarak bilinen ve türkçeye elips enkesitli içi boş profil olarak tercüme ettiğimiz profillerin üretimi, mühendislik avantajları ve estetik görünümleri nedeniyle popüler hale gelmiştir. Ancak elips enkesitli içi boş profiller (EHS) kullanılarak oluşturulmuş birleşimlerin dayanımlarını hesaplamak için yönetmeliklerde herhangi bir analitik yöntem mevcut değildir. Bu profiller iki farklı çapa sahip oldukları için, birleşim dört farklı oryantasyon tipiyle oluşabilmektedir. Genellikle bu profillerin dayanımlarının hesabı, “Rectangular Hollow Section” (RHS) olarak bilinen ve türkçeye dikdörtgen enkesitli içi boş profil olarak tercüme ettiğimiz profillere benzetilerek yapılır. Bu benzetme işlemine eşdeğer dikdörtgen enkesitli profil yöntemi denilmektedir. Bu yöntem; EHS’nin büyük ve küçük çapının sırasıyla, RHS’nin büyük ve küçük çapına

eşit olduğu varsayılp, yönetmeliklerde RHS'lerin dayanımlarını hesaplamak için mevcut olan hesap yöntemlerinin kullanılıp, EHS'lerin dayanımlarının hesaplanması esasına dayanır. Ancak yapılan literatür araştırmaları, eşdeğer dikdörtgen enkesitli profil yönteminin her zaman güvenilir ve ekonomik sonuçlar vermediğini göstermiştir.

Bu çalışmanın amacı, mevcut yönetmeliklerdeki eşdeğer dikdörtgen enkesitli profil yöntemi kullanılarak düzlem içi eğilme momentine maruz kalmış EHS T-birleşimlerinin dayanımlarını ve göçme modlarını incelemektir. Bu çalışmada, doğrusal olmayan sonlu elemanlar yazılımı olan ABAQUS v.6-14.1 programı kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler yapılmadan önce mevcut bir test sonucu ile sonlu elemanlar modelinin doğrulaması yapılmıştır. Elde edilen doğrulama sonucuna göre; sonlu eleman tipi, malzeme özelliği, sonlu eleman ağ aralığı ve doğrusal olmayan sayısal analizlerde ele alınan zaman adımı gibi parametreler, parametrik çalışmalarda kullanılmıştır.

Bir dizi parametrik çalışma, EHS T-birleşimlerinin oryantasyon tipleri ve ana elemanlarının geometrik özellikleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonuçları, eşdeğer dikdörtgen enkesitli içi boş profil yönteminden elde edilen analitik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sayısal analiz sonuçlarına göre, eşdeğer dikdörtgen enkesitli profil yönteminin ekonomik olmayan öngörülerde bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca EHS T-birleşimlerinin tip 1 ile tip 2 ve tip 3 ile tip 4 oryantasyonlarının benzer dayanımlara ve davranışlara sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bu tezde, ekonomik ve güvenli bir analitik hesap yöntemi geliştirilmiş ve sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılarak bu yöntem doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dayanım, Dikdörtgen Enkesitli İçi Boş Kesit (RHS), Düzlem İçi Eğilme Momenti, Elips Enkesitli İçi Boş Kesit (EHS), Eşdeğer Dikdörtgen Enkesitli Profil Yöntemi, Oryantasyon Tipi, Sonlu Eleman Metodu, T- birleşimler.

ABSTRACT

MS THESIS

**RESISTANCE OF ELLIPTICAL HOLLOW SECTIONS T-JOINTS
SUBJECTED TO IN-PLANE BENDING MOMENT**

Murat YILMAZ

Gümüşhane University

The Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Assoc. Dr. Emre ÖZYURT

2018, 60 pages

The production of profiles known as “Elliptical Hollow Section” (EHS) in recent years and translated to Turkish as “Elips Enkesitli İçi Boş Profil” has become popular because of their aesthetic appearance and advantages in the structural engineering. However, there is no any analytical methods in regulations to calculate the resistance of the joints made of Elliptical Hollow Section (EHS). As these profiles have two different diameters, the joints can form in four different orientation types. The resistance of these profiles are generally calculated by simulating to the profiles which are known as “Rectangular Hollow Section” (RHS) and translated to the Turkish as “Dikdörtgen Enkesitli İçi Boş Profil”. This approach is called equivalent rectangular section profile method. In this method, it is assumed that the width and depth of RHS members are equal

to the small and large diameters of EHS member and resistance of EHS joints may be calculated based on the equivalent RHS method in regulations. However, the literature researches have shown that equivalent RHS method may not give safe and economic results for each orientation.

The purpose of this study is to investigate the failure modes and the resistance of EHS T-joints subjected to in-plane bending moment by using equivalent RHS method in available design guides. In this study, numerical analyses have been carried out by using non-linear finite element software, ABAQUS v6-14.1. Before numerical analyses have been done, finite element model has been validated with an available test result. According to this validation study, finite element type, material type, mesh size and parameters such as time step which are handled in non-linear numerical analyses used for parametric studies.

A series parametric study was carried out by considering the orientation types of EHS T-joints and geometrical parameters of main members. Numerical results have been compared to analytic results based on equivalent RHS method. According to these results, it has been found that this method is conservative. Moreover, it has been noted that type 1 and type 2 have similar resistance and behaviour with type 3 and type 4 orientations. In this thesis, a safe and economic calculation method has been introduced and this method has been verified by comparing with numerical results.

Keywords: Strength, Rectangular Hollow Section (RHS), In-plane Bending Moment, Elliptical Hollow Section (EHS), Equivalent Rectangular Section Profile Method, Orientation Type, Finite Element Method, T-joints.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

“Düzlem içi eğilme momentine maruz kalmış elips enkesitli T-birleşimlerin dayanımları” isimli tez çalışmasını bana öneren, çalışmalarım süresince bana değerli zamanını ayıran, tezin her aşamasında beni destekleyen, iyi niyetini, güler yüzünü ve hoşgörüsünü daima hissettiren kıymetli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Emre ÖZYURT'a teşekkürlerimi borç bilirim. Tez savunmasında bana çok önemli katkılar sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Onur ARAZ ve Dr. Öğr. Üyesi Murat GÜNAYDIN'a şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım süresince ve normal hayatta maddi- manevi tüm desteğiyle bugünlere gelmemde büyük katkısı bulunan, başaracağıma dair inanç ve güvenlerini hiçbir zaman eksik etmeyen babam İsmail YILMAZ'a, annem Mülkiye YILMAZ'a, ablalarım Emine KÜÇÜK ve Esra YILMAZ'a sonsuz sevgilerimi sunar, bu tez çalışmasının ülkemize ve akademik camiaya faydalı olmasını temenni ederim.

Murat YILMAZ
Gümüşhane, 2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	IV
ABSTRACT	VI
TEŞEKKÜR	VIII
İÇİNDEKİLER.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Elips Enkesitli Kaynaklı Birleşimler.....	2
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği.....	2
1.4. EHS'nin Tanımı	3
1.5. Çeliğin Mekanik Özellikleri.....	5
1.6. Boru ve Kutu Enkesitli Elemanlar.....	8
1.6.1. Boru ve Kutu Enkesitli Elemanların Uygulama Alanları.....	8
1.6.2. Boru veya Kutu Enkesitli Elemanların Sınıflandırılması.....	13
1.7. Literatür Araştırması	14
1.7.1. İçi Boş En Kesitli Kaynaklı Birleşimler Üzerine Yapılan Çalışmalar	14
1.7.2. Elips En Kesitli Profiller Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	16
1.8. Eşdeğer Dikdörtgen Enkesitli Profil Yaklaşımı	18
1.8.1. Dikdörtgen Enkesitli Birleşimlerin Hesaplama Yöntemleri	20
1.9. Yura'nın Eğilme Elemanlarında Dönme Sınırlaması.....	22
1.10. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Abaqus/CAE 6.14-1	23
1.10.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Kısa Tarihi	24
1.10.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Mühendislikte Uygulama Alanları	24
1.10.3. Sonlu Elemanlar Yönteminin Problemlere Uygulanması	25
1.10.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi Eleman Tipleri	25
1.10.5. Abaqus/CAE v6.14-1 Sonlu Elemanlar Paket Programı.....	26
1.11. Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi.....	26
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR ve BULGULAR.....	28

2.1.	Sayısal Analizlerin Doğrulanması.....	28
2.1.1.	Sonlu Eleman Modeli ve Özellikleri.....	28
2.1.1.1.	Yöntem.....	28
2.1.1.2.	Eleman Türü.....	29
2.1.1.3.	Malzeme Özellikleri.....	30
2.1.1.4.	Mesnet Koşulları.....	31
2.1.2.	Doğrulama Çalışması.....	31
2.1.2.1.	Doğrulama Modeli.....	34
2.1.2.2.	Doğrulama Sonuçları.....	35
2.1.3.	Sonuçlar.....	37
2.2.	Sayısal Analizler.....	38
2.2.1.	Kullanılan Parametreler.....	38
2.2.2.	Malzeme özellikleri ve Mesnet Koşulları.....	40
2.2.3.	Analiz Sonuçları.....	41
2.2.4.	Mevcut Yönetmeliklere Göre Elde Edilen Sonuçlar.....	45
2.2.4.1.	ÇYTYE'ye Göre Hesap.....	47
2.2.4.2.	Eurocode ve CIDECT Yönetmeliklerine Göre Hesap.....	48
2.2.5.	Önerilen Tasarım Metodu.....	50
2.2.5.1.	Tip 1 ve Tip 2 Oryantasyonları İçin Önerilen Yöntem.....	50
2.2.5.2.	Tip 3 ve Tip 4 Oryantasyonları İçin Önerilen Yöntem.....	51
2.2.5.3.	Önerilen Tasarım Metodunun Sayısal Analizlerle Karşılaştırılması.....	52
3.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	54
4.	KAYNAKLAR.....	56
	ÖZGEÇMİŞ.....	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Madrid havaalanı terminal binası, İspanya (Yazıcıoğlu, 2018).....	1
Şekil 1.2. EHS'nin temel boyutları (Haque, 2011).....	4
Şekil 1.3. Çeliğin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	7
Şekil 1.4. Almanya'nın Karlsruhe şehrinde bulunan Çevre Enstitüsü Binası (Wardenier vd., 2002).....	9
Şekil 1.5. Almanya'da bulunan Stuttgart Havalimanının kalkış bekleme salonu (Wardenier vd., 2002).....	9
Şekil 1.6. Hollanda'nın Rotterdam kentinde bulunan demiryolu köprüsü (Wardenier vd., 2002).....	10
Şekil 1.7. Hollanda'nın Hook kasabası yakınlarında bulunan fırtına kabarması bariyeri (Wardenier vd., 2002).....	10
Şekil 1.8. Meksika Körfezinde bulunan Bullwinkle petrol arama platformu (Wardenier vd.,2002).....	11
Şekil 1.9. Elektrik güç iletim kulesi (Wardenier vd., 2002).....	11
Şekil 1.10. Boru ve kutu enkesitli elemanlar kullanılarak inşa edilmiş bazı özel uygulama örnekleri (Wardenier vd., 2002).....	12
Şekil 1.11 EHS T- birleşiminin farklı oryantasyon tipleri (Wardenier vd.,2014)...	17
Şekil 1.12. EHS X-birleşiminin farklı oryantasyon tipleri.....	17
Şekil 1.13. Bir EHS için eşdeğer RHS yöntemi (Haque, 2011).....	19
Şekil 1.14. RHS T- birleşiminin eğilme momenti etkisi altında genel yerleşim planı ve geometrik özellikleri (ÇYTYE, 2016).....	20
Şekil 1.15. Yura'nın eğilme elemanlarında dönme sınırlaması için moment-dönme eğrileri.....	23
Şekil 2.1. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan eleman türleri (ABAQUS/Standart, 2014).....	29
Şekil 2.2. Doğrulaması yapılan birleşimin mesnet koşulları.....	31
Şekil 2.3. Doğrulama çalışması için kullanılan CHS T- birleşiminin genel yerleşim planı (Fung vd., 2016).....	33
Şekil 2.4. CHS T-birleşiminin sonlu eleman programı kullanılarak modellenmiş hali.....	34

Şekil 2.5.	CHS T- birleşiminin sonlu eleman ağ aralıklarına bölünmüş hali.....	35
Şekil 2.6.	CHS T-birleşiminin düzlem içi eğilme momenti etkisi altında göçmüş hali.....	36
Şekil 2.7.	Fung vd. (2016) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen test sonuçları ile sonlu elemanlar programı kullanılarak oluşturulan doğrulama modelinden elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	37
Şekil 2.8.	Tipik bir EHS T-birleşiminin genel yerleşim planı ve geometrik boyutları (Özyurt, 2018b).....	39
Şekil 2.9.	Sayısal analizlerde kullanılan EHS çelik T- birleşimlerinin mesnet koşulları.....	41
Şekil 2.10.	ET 1-6 birleşiminde göçmeden sonra meydana gelen şekil değişimi.....	42
Şekil 2.11.	ET 2-6 birleşiminde göçmeden sonra meydana gelen şekil değişimi.....	42
Şekil 2.12.	ET 3-6 birleşiminde göçmeden sonra meydana gelen şekil değişimi.....	43
Şekil 2.13.	ET 4-6 birleşiminde göçmeden sonra meydana gelen şekil değişimi.....	43
Şekil 2.14.	ET 1-6, ET 2-6, ET 3-6, ET 4-6 birleşimlerinin moment- dönme grafiği.....	44
Şekil 2.15.	Dikdörtgen ve elips enkesitli T-birleşimlerinin birbirlerine karşılık gelen geometrik boyutları.....	46
Şekil 2.16.	Önerilen tasarım yönteminin yapılan tüm sayısal analizlerle karşılaştırılması.....	53

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1.	Elips enkesitli birleşimlerin kesit özellikleri (Tata Steel, 2011).....	5
Tablo 1.2.	Çelik malzemenin sınıf ve dayanımları (Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Esasları, 2016; Eurocode 1993-1-8 (CEN-2005), Cıdict No.3 (2009)).....	8
Tablo 1.3.	Boru ve kutu enkesitli birleşimlerin sınıflandırılması.....	13
Tablo 1.4.	Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Esasları (ÇYTYE, 2016), Eurocode EN 1993-1-8 (CEN, 2005) ve CIDECT (2009)'e göre düzlem içi eğilme momenti altında RHS-T birleşiminin dayanım formülleri.....	21
Tablo 1.5.	Bir, iki ve üç boyutlu sonlu eleman örnekleri (Okur, 2017).....	26
Tablo 2.1.	Doğrulama çalışmasında kullanılan CHS-T birleşiminin boyutları (Fung vd., 2016).....	33
Tablo 2.2.	Sayısal analizlerde ve analitik hesaplamalarda kullanılan birleşimlerin geometrik özellikleri.....	40
Tablo 2.3.	EHS T-birleşimlerinin sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilen sayısal analiz sonuçları.....	45
Tablo 2.4.	ÇYTYE, Eurocode ve CIDECT yönetmeliklerindeki formüller kullanılarak elde edilen analitik sonuçların sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilen sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılması.....	49
Tablo 2.5.	Sayısal analiz sonuçlarının yönetmelik sonuçlarına oranları ve regresyon analizinde kullanılan değişken parametreler (Tip 1 ve Tip 2 için).....	51
Tablo 2.6.	Sayısal analiz sonuçlarının yönetmelik sonuçlarına oranları ve regresyon analizinde kullanılan değişken parametreler (Tip 3 ve Tip 4 için).....	52

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	: Çeliğin ısı genleşme katsayısı
B	: Kutu veya elips enkesitli başlık elemanının birleşim düzlemine dik genişliği
B_b	: Kutu enkesitli örgü elemanının birleşim düzlemine dik genişliği
b	: Elips enkesitli örgü elemanının birleşim düzlemine dik çapı
β	: Kutu ve dairesel enkesitli örgü elemanı genişliğinin, başlık elemanı genişliğine oranı
CHS	: Dairesel enkesitli içi boş kesit
CHS T	: Dairesel enkesitli içi boş T birleşim
C3D15	: 15 düğüm noktalı dörtgen kabuk eleman
C3D20	: 20 düğüm noktalı üç boyutlu eleman
ÇYTYE	: Çelik yapıların tasarım ve yapım esasları
D	: Dairesel enkesitli başlık elemanının çapı veya elips enkesitli başlık elemanının birleşim düzlemine paralel çapı
D.N	: Düğüm noktası
d	: Dairesel enkesitli örgü elemanının çapı veya elips enkesitli örgü elemanının birleşim düzlemine paralel çapı
E	: Elastisite Modülü
EHS	: Elips enkesitli içi boş kesit
EHS T	: Elips enkesitli içi boş T kesit
ET 1.1	: Elips enkesitli 1 numaralı T birleşiminin 1. oryantasyonu
ET 2.1	: Elips enkesitli 1 numaralı T birleşiminin 2. oryantasyonu
ET 3.1	: Elips enkesitli 1 numaralı T birleşiminin 3. oryantasyonu
ET 1.2	: Elips enkesitli 2 numaralı T birleşiminin 1. oryantasyonu
ET 2.2	: Elips enkesitli 2 numaralı T birleşiminin 2. oryantasyonu
ET 3.2	: Elips enkesitli 2 numaralı T birleşiminin 3. oryantasyonu
ET 1.3	: Elips enkesitli 3 numaralı T birleşiminin 1. oryantasyonu
ET 2.3	: Elips enkesitli 3 numaralı T birleşiminin 2. oryantasyonu
ET 3.3	: Elips enkesitli 3 numaralı T birleşiminin 3. oryantasyonu
ET 1.4	: Elips enkesitli 4 numaralı T birleşiminin 1. oryantasyonu
ET 2.4	: Elips enkesitli 4 numaralı T birleşiminin 2. oryantasyonu
ET 3.4	: Elips enkesitli 4 numaralı T birleşiminin 3. oryantasyonu
ET 1.5	: Elips enkesitli 5 numaralı T birleşiminin 1. oryantasyonu
ET 2.5	: Elips enkesitli 5 numaralı T birleşiminin 2. oryantasyonu
ET 3.5	: Elips enkesitli 5 numaralı T birleşiminin 3. oryantasyonu
ET 1.6	: Elips enkesitli 6 numaralı T birleşiminin 1. oryantasyonu
ET 2.6	: Elips enkesitli 6 numaralı T birleşiminin 2. oryantasyonu
ET 3.6	: Elips enkesitli 6 numaralı T birleşiminin 3. oryantasyonu
ET 4.6	: Elips enkesitli 6 numaralı T birleşiminin 4. oryantasyonu
\mathcal{E}	: Birim uzama oranı
\mathcal{E}_T	: Dönüştürülmüş birim uzama oranı
\mathcal{E}_{pl}	: Çeliğin plastik uzaması
F_0	: Çelik çekme deneyinde kullanılan deney çubuğunun kesiti
f_y	: Çeliğin karakteristik akma gerilmesi
f_u	: Çeliğin karakteristik çekme dayanımı
G	: Kayma modülü

σ	: Gerilme
σ_B	: Kopma sınır gerilmesi
σ_E	: Elastik sınır gerilmesi
σ_P	: Orantılı sınır gerilmesi
σ_T	: Dönüştürülmüş gerilme
H	: Kutu enkesitli başlık elemanının birleşim düzlemine paralel yüksekliği
Hb	: Kutu enkesitli örgü elemanının birleşim düzlemine paralel yüksekliği
L	: Başlık elemanı uzunluğu
l	: Örgü elemanı uzunluğu
l_0	: Çelik çekme deneyinde kullanılan deney çubuğunun uzunluğu
M_n	: Karakteristik eğilme momenti dayanımı
Q_f	: Başlık elemanı gerilme etkileşim parametresi
RHS	: Dikdörtgen enkesitli içi boş kesit
S	: Çelik çekme deneyinde kullanılan deney çubuğuna uygulanan kuvvet
SHS	: Kare enkesitli içi boş kesit
SEM	: Sonlu eleman modeli
SE	: Sonlu eleman
S4R	: 4 düğüm noktalı kabuk eleman
S8R	: 8 düğüm noktalı kabuk eleman
T	: Dairesel veya elips enkesitli başlık elemanı et kalınlığı
t	: Dairesel veya elips enkesitli örgü elemanı et kalınlığı, kutu enkesitli başlık elemanı et kalınlığı
t_b	: Kutu enkesitli örgü elemanının et (cidar) kalınlığı
ρ	: Yoğunluk
ν	: Poisson oranı
η	: Sadece kutu enkesitler için uygulanan yük etkime uzunluğu parametresi
θ	: Başlık elemanı ile örgü elemanı arasındaki açı
Φ_{yura}	: Yura'nın eğilmeye maruz kalan elemanlar için belirlediği dönme sınırı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yüksek dayanım, şık görünüm, estetik olması gibi olumlu özellikler elips enkesitli içi boş profillerin son yıllarda çelik yapıların tasarımında tercih edilmeye başlanmasını sağlamıştır. Literatürde, EHS (Elliptical Hollow Section) olarak bilinen bu profillerden, bu tez çalışmasında da EHS olarak bahsedilmiştir. Mimari açıdan sağladığı narinlik ve hafiflik, mühendislik açısından ise tercih edilen eksenini doğrultusunda sağlamış oldukları yüksek direnç bu profillerin tercih edilmesinin başlıca sebeplerini oluşturur. Ayrıca, bu profillerden inşa edilen sistemler, yüzey alanları benzer sistemlere oranla daha küçüktür. Köşelerinin keskin olmaması, bu yapı elemanlarına korozyona karşı daha iyi bir koruma sağlamasında önemli bir özellik katar (Özyurt, 2018a). Ayrıca bu profiller geometrik şekillerinden dolayı önemli bir oranda üzerine gelen rüzgâr yüklerini azalttığı için rüzgâra maruz kalan yapılarda kullanılmak için avantaj sağlar. Bu profiller hem kesilerek (lazer, alev ve plazma) hem de bükülerek kolayca işlenebilirler. Bu gibi özellikler mimarlar ve mühendisler için birçok avantajı beraberinde getirir. Mimarlar bu profilleri kullanarak daha aydınlık ve daha saydam alanlar tasarlayabilirken mühendisler de bu profilleri kullanarak statik anlamda daha dayanıklı yapıların inşa edebilmektedirler. Bu gibi önemli özellikler bu profillerin; havaalanı terminal binaları, köprüler, sergi salonları, statlar, müzeler, alışveriş merkezleri gibi birçok yapının inşasında kullanımına imkan vermektedir (Bortolotti vd., 2003) (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Madrid havaalanı terminal binası, İspanya (Yazıcıoğlu, 2018)

1.2. Elips Enkesitli Kaynaklı Birleşimler

Günümüzde elips enkesitli profillerin imalatı, bu profillerin inşaat uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmasına imkan vermiştir. Mevcut yönetmeliklerde elips enkesitli profillerden oluşmuş birleşimlerin dayanımlarını hesaplamak için herhangi bir hesap yöntemi bulunmamaktadır. Bu profiller iki farklı çapa sahip olması nedeniyle dikdörtgen enkesitli profillere benzetilir. Dolayısıyla mevcut yönetmeliklerde dikdörtgen enkesitli içi boş profillerin dayanımlarını hesaplayabilmek için var olan hesap yöntemleri kullanılarak bu profillerin dayanımları hesaplanır. Yapılan literatür araştırmalardan elde edilen bilgilere göre elips enkesitli içi boş profillerden oluşmuş kaynaklı birleşimlerin dayanımlarının hesaplanmasında, bahsedilen dikdörtgen enkesitli profiller için kullanılan hesap yönteminin kullanılmasının her zaman güvenilir sonuçlar vermediği görülmüştür.

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Bu tez kapsamında, kaynakla birleştirilmiş EHS T-birleşimlerinin düzlem içi eğilme momenti etkisinde dayanımlarının incelemesi amaçlanmıştır. Mevcut yönetmeliklerde, boru ve kutu kesitlerinden oluşmuş kaynaklı birleşimlerin farklı yükler altında (eksenel kuvvet, eğilme momenti) dayanımlarını belirleyebilmek için hesap yöntemleri mevcuttur. Ancak, EHS'ler için herhangi bir hesap yöntemi mevcut değildir.

Yönetmeliklerdeki bu eksikliği gidermek amacıyla hazırlanan bu yüksek lisans tezi kapsamında; geometrik değişkenlerin (enkesit boyutları ve profil et kalınlıkları), farklı oryantasyon tiplerinin, örgü elemanına uygulanan eğilme momenti miktarının, EHS T-birleşimlerinin dayanımları üzerine etkileri, doğrusal olmayan sayısal analiz yöntemleriyle araştırılacaktır. Bu amaçla EHS T- birleşimlerinin farklı oryantasyon tiplerinin tasarım ve analizinde ABAQUS v6.14-1 sonlu elemanlar paket programı kullanılacaktır. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar; Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Esasları (ÇYTYE, 2016), Eurocode EN 1993-1-8 (CEN, 2005) ve CIDECT (2009) yönetmeliklerinden hesaplanan analitik sonuçlar ile karşılaştırılarak yeni bir “analitik hesap yöntemi” geliştirilecektir. Bu doğrultuda yapılan çalışmanın literatürde önemli bir boşluğu dolduracağı düşünülmektedir. Bu kapsamda hazırlanan tez başlıca dört bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, elips enkesitli içi boş profiller üzerinde durulmakta ve bu profillerin çelik yapı tasarımında sağladığı avantajlardan bahsedilerek tezin amacı ve içeriği sunulmaktadır. Ayrıca bu bölümde; EHS'nin tanımından, çeliğin mekanik özelliklerinden, boru, kutu ve elips enkesitli profillerden oluşturulmuş kaynaklı birleşimler üzerine geçmiş çalışmalarda yapılan bir literatür incelemesinden bahsedilmektedir. Son olarak bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi hakkında bilgiler verilmekte ve ABAQUS sonlu elemanlar programının bu tez çalışmasında neden tercih edildiğinden bahsedilmektedir.

İkinci bölümde, bu tezde yapılan sayısal analizlerde ABAQUS kullanımı ile ilgili bir modellemenin doğrulama sonuçları yer almaktadır. Ayrıca bu bölümde; sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar ile mevcut yönetmeliklerdeki hesap yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılarak elips enkesitli içi boş profillerin dayanımlarını hesaplayabilmek için önerilen yöntem yer verilmiştir.

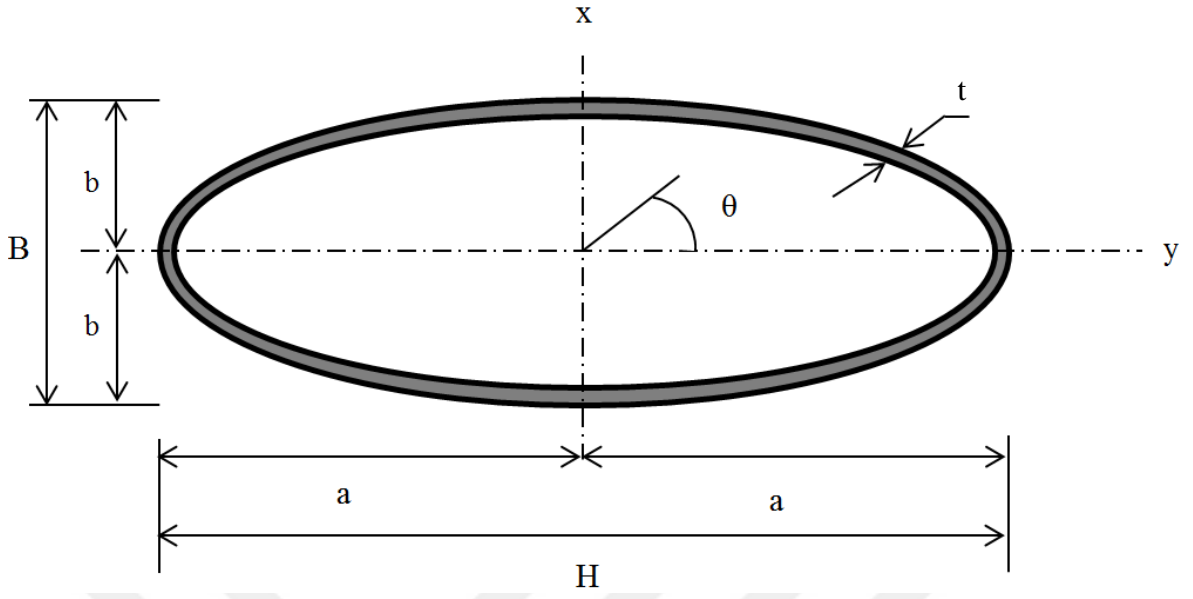
Üçüncü bölümde, tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulurken gelecekte yapılması düşünülen çalışmalardan bahsedilmektedir. Son bölümde ise bu tez çalışması oluşturulurken yararlanılan kaynaklar verilmektedir.

1.4. EHS'nin Tanımı

EHS, çelik yapı dünyası için yeni bir şekil olan içi boş yapısal kesit tipidir. Ayrıca EHS, iki farklı simetri eksenine sahip bir oval şekil olmasının yanında, bir büyük boyuta bir de küçük boyuta sahip olarak tanımlanır. Büyük boyutun ($H=2a$), küçük boyuta ($B=2b$) oranı en/boy oranı olarak adlandırılır. Şu anda üretilen tüm EHS'lerin en/boy oranı 2'dir (Packer, 2008). Bir elips için yazılan genel eşitlik aşağıda verilmiştir (Ruiz Teran ve Gardner, 2008) :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (1.1)$$

bu eşitlikte x ve y kartezyen koordinatları, a ve b sırasıyla EHS'nin büyük ve küçük dış boyutlarının yarısını, t ise kalınlığı ifade etmektedir. EHS'nin temel boyutları Şekil 1.2'de verilmektedir.



Şekil 1.2. EHS'nin temel boyutları (Haque, 2011)

EHS'nin davranışı, "Circular Hollow Section" (CHS) olarak adlandırılan ve türkçeye dairesel içi boş kesit olarak tercüme ettiğimiz kesitler ile dikdörtgen içi boş kesitlerin (RHS) davranışının bir karışımıdır. EHS birçok genel özellik ve davranış açısından CHS gibidir; fakat, EHS'nin değişen bir eğrilik yarıçapına sahip olması ve CHS'de böyle bir durumun olmaması bakımından farklıdır. EHS bir büyük bir de küçük simetri eksenine sahip olması bakımından RHS ile benzerdir, fakat RHS'nin düz yüzleri ve köşeleri olduğu için birbirinden farklıdır (Haque, 2011).

EHS profilin minimum boyutu $150 \times 75 \times 4$ mm ($H \times B \times t$), maksimum boyutu ise $500 \times 250 \times 16$ mm ($H \times B \times t$)'dir (Tablo 1.1).

Shao vd. (2011) yaptıkları çalışmada, başlık elemanı uzunluğunun başlık elemanının büyük çapının 10 katına eşit olması durumunda, birleşimin dayanımının mesnet koşullarından bağımsız olacağını bildirmişlerdir. Ayrıca örgü elemanının uzunluğunun ise örgü elemanının büyük çapının 6 katına eşit olması gerektiğini vurgulamışlardır. Dolayısıyla, bu tez çalışmasında sayısal analizlerde kullanılan birleşimlerin ve oryantasyon türlerinin başlık ve örgü elemanı uzunlukları belirlenirken bu değerler dikkate alınmıştır.

Tablo 1.1. Elips enkesitli birleşimlerin kesit özellikleri (Tata Steel, 2011)

Boyut ($H \times b$) mm	Kalınlık (t) mm
150×75	4.0
	5.0
	6.3
200×100	5.0
	6.3
	8.0
	10.0
	12.5
250×125	6.3
	8.0
	10.0
	12.5
300×150	8.0
	10.0
	12.5
	14.2
	16.0
400×200	8.0
	10.0
	12.5
	14.2
	16.0
500×250	10.0
	12.5
	14.2
	16.0
H: Elips enkesitin büyük çapı	
b: Elips enkesitin küçük çapı	

1.5. Çeliğin Mekanik Özellikleri

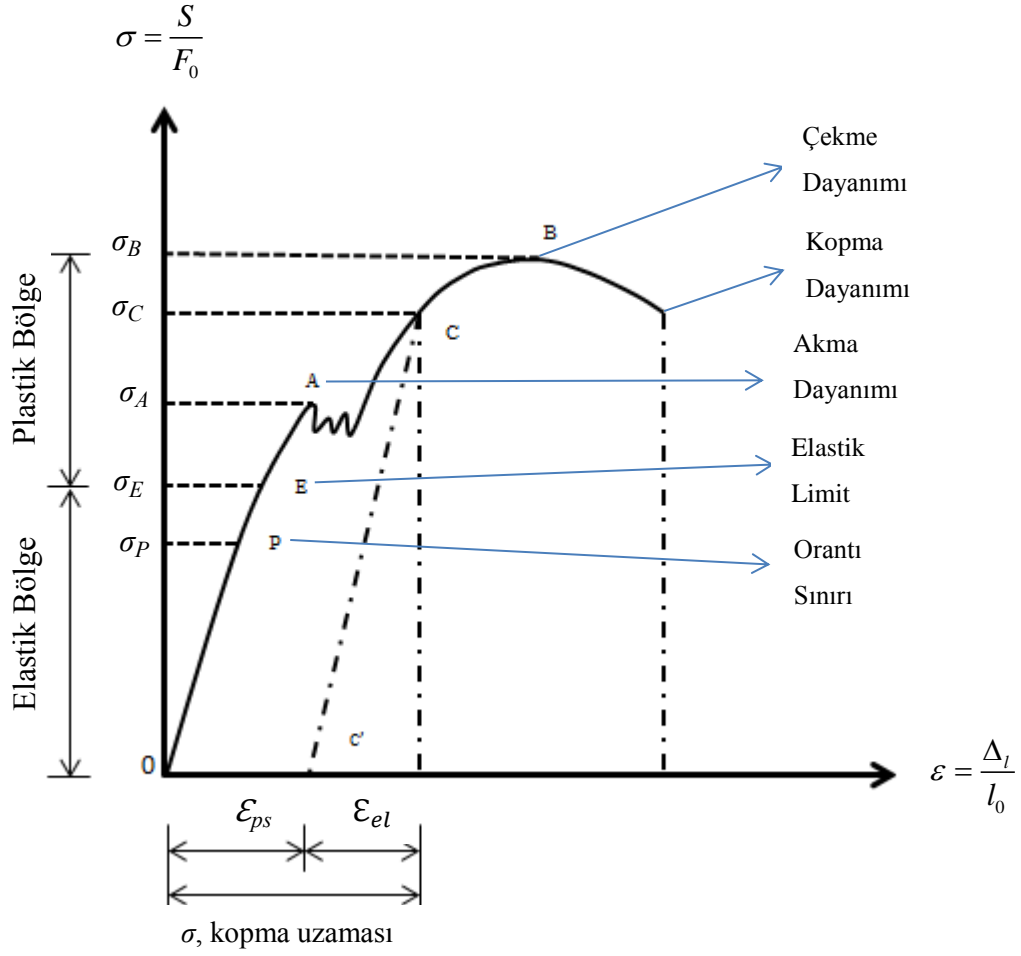
Çelik, dövülerek, preslenerek ve haddeden geçirilerek mekanik olarak işlenebilen demir alaşımıdır. Diğer bir ifadeyle, temel alaşım malzemesi olan karbon ile demirin alaşımıdır. Çelik demire kıyasla daha hafif ve çok daha sert olup işlenebilme özelliğine sahiptir (Odabaşı, 2000).

Çeliğin bünyesinde karbon ve demir dışında: azot, manganez, silisyum, kükürt, bakır, fosfor, alüminyum gibi elementler de bulunmaktadır. Çeliğin bünyesinde bulunan karbon miktarı yaklaşık olarak %0.16-%0.20 arasındadır. Çelikteki karbon miktarının artmasıyla, çeliğin mukavemet ve sertliğinin artması paralellik gösterir. Karbon miktarının artmasıyla

artan mukavemet ve sertlik özellikleri çeliğin işlenebilirliğini de düşürmektedir. Bu yüzden çeliğin malzeme içeriğinin standartlarca belirlenmiş aralıklarda olması gerekmektedir. Buna ilaveten çelik bünyesine: nikel, krom, vanadyum, molibden gibi malzemeler katılarak yüksek kaliteli çelikler üretmek de mümkündür (Balkan, 2007; Ünal, 2015).

Kristal bir yapıya sahip olan çelik malzeme, izotrop ve homojen özellik gösterir. Akma sınırı, çekme mukavemeti ve sertlik gibi özelliklerden yararlanılarak yapı çeliğinin mekanik özellikleri tanımlanır. Çelik çekme deneyi ile çeliğin akma sınırı ve çekme mukavemetini belirlemek mümkündür. Çekme deneyi uygulanan bir çelik numunede Şekil 1.3'de görülen gerilme-deformasyon grafiği ortaya çıkar (Balkan, 2007; Ünal, 2015).

Çekme deneyinde l_0 uzunluğunda, F_0 kesitindeki prizmatik deney çubuğuna sıfırdan başlayarak yavaş yavaş arttırılan S kuvveti uygulanır ve bu sırada çelikte meydana gelen boy değişimi ölçülür. Grafikte orantılı sınır gerilmesi olan σ_p 'ye karşılık gelen malzeme lineer elastiktir ve bu durumda Hook Kanunu geçerlidir. Gerilme ($\sigma = \mathcal{E} \times E$), orantılı sınır gerilmesi olan σ_p ile elastik sınır gerilmesi olan σ_E arasında kaldığı süre zarfında malzeme Hook Kanunu'na uymaz fakat yine de elastiktir. Elastik sınır gerilmesi olan σ_E 'nin aşılmasına başladığı andan itibaren malzemede plastik deformasyonlar oluşmaya başlar. σ_A , akma sınır gerilmesine gelindiği durumda ise malzeme çözülür ve büyük deformasyonlar meydana gelir. Fakat hemen ardından malzeme kendini toparlar ve kopma sınır gerilmesi olan σ_B 'ye ulaştığında çelik malzeme kopar. Plastik bölgede, kuvvet diyagramının herhangi bir C noktasında sıfırlanırsa çubuk ilk boyu l_0 'a dönmez. Bu durumda \mathcal{E}_{ps} kadar bir plastik uzama kalır. Yalnızca \mathcal{E}_{el} 'lik bir uzama kaybolur. Kısaca diyagramda 0 noktası yerine C' noktasına gelinir. CC', OP'ye paraleldir (Balkan, 2007).



Şekil 1.3. Çeliğin gerilme-şekil değiştirme grafiği

Yapı çeliğinin mekanik özellikleri için bilgiler aşağıda verilmiştir (Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, 2016) ;

- ✓ Elastisite Modülü $E=210000 \text{ N/mm}^2$
- ✓ Kayma Modülü $G= 81000 \text{ N/mm}^2$
- ✓ Poisson Oranı $\nu=0.3$
- ✓ Isıl Genleşme Katsayısı $\alpha=12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- ✓ Yoğunluk $\rho= 75,50 \text{ Kn/m}^3$

Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (2016), Eurocode 1993-1-8 (CEN-2005) ve CIDECT No.3 (2009) yönetmeliklerinde uygulamalarda kullanılacak yapı çeliklerine ait akma (f_y) ve kopma (f_u) sınır değerleri Tablo 1.2’de gösterilmiştir.

Tablo 1.2. Çelik malzemenin sınıf ve dayanımları (Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Esasları, 2016; Eurocode 1993-1-8 (CEN-2005), Cıdet No.3 (2009))

Çelik Sınıfı	Kalınlık t (mm)			
	$t \geq 40$ mm		$40 \text{ mm} \leq t \leq 100$ mm	
	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)
S235	235	360	215	340
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	490

f_y =Karakteristik Akma Gerilmesi
 f_u =Karakteristik Çekme Dayanımı

1.6. Boru ve Kutu Enkesitli Elemanlar

Elips enkesitli profillerin kullanılmasından önce, boru ve kutu enkesitli elemanlardan oluşmuş içi boş profillerin uygulamaları neredeyse tüm alanları kapsamaktaydı.

Basınç, çekme, eğilme ve burkulma kuvvetlerine karşı dirençleri bakımından ortaya koydukları mükemmel özellikleri boru ve kutu enkesitli elemanların yapısal tasarımda tercih edilmesini sağlamıştır. Dahası bu elemanlar düşük rüzgar sürüklenme katsayılarına sahiptir. Bu durum mühendisler açısından dayanıklı, geniş açıklığa sahip ve büyük kat yüksekliği bulunan yapıların inşa edilmesine imkan vermiştir. Ayrıca bu profillerin hafif olması ve şık bir dış görünüme sahip olmaları mimari alanda estetik görünüme sahip yapıların ortaya çıkmasında etkili olmuştur. Bu nedenle bu elemanlar: konutlar, uzay kafes çatı sistemleri, havaalanları, köprüler, bariyerler, kuleler, kıyı ötesi yapıları, elektrik direkleri, petrol istasyonları, lunapark hız trenleri, trafik bilgi ve işaret sinyalizasyon direkleri, vinçler, radyo teleskopları gibi birçok yapının inşasında kullanılırlar. Ayrıca boru ve kutu enkesitli elemanlar, beton dolgulu kompozit kolonların imalatında da sıklıkla kullanılırlar (Mudenda, 2008; Wardenier vd., 2002).

1.6.1 Boru ve Kutu Enkesitli Elemanların Uygulama Alanları

Boru ve kutu enkesitli elemanlardan oluşmuş içi boş profiller konutlar ve havaalanı terminal binalarında başlıca; kolonların yapımında, çatılarda ise kafes kirişlerinde veya uzay kafes sistemlerinin imalatında kullanılır (Wardenier vd., 2002).

Şekil 1.4'de Almanya'nın Karlsruhe kentinde bulunan dikdörtgen enkesitli içi boş kolonlardan inşa edilmiş 10 katlı çevre enstitüsü binasının ön cephesi görülmektedir.

Binayı yangına ve güneşten gelen farklı sıcaklıklardan dolayı oluşacak deformasyonlara karşı korumak için binayı oluşturan kolonlar su deposuna bağlanmıştır. Böylelikle kolonlar arasında su döngüsü sağlanmıştır (Wardenier vd., 2002).



Şekil 1.4. Almanya'nın Karlsruhe şehrinde bulunan Çevre Enstitüsü Binası (Wardenier vd., 2002)

Şekil 1.5'de ise Almanya'nın Stuttgart kentine bulunan havalimanının kalkış bekleme salonunun ağaç tipi desteğini gösteren güzel bir uygulama örneği verilmiştir. Birleşimler için aerodinamik çelik dökümler kullanılmıştır (Wardenier vd., 2002).



Şekil 1.5. Almanya'da bulunan Stuttgart Havalimanının kalkış bekleme salonu (Wardenier vd., 2002)

Şekil 1.6’da dairesel içi boş profile sahip kemerleri ile Hollanda’nın Rotterdam şehrinde bulunan bir demiryolu köprüsü görülmektedir.



Şekil 1.6. Hollanda’nın Rotterdam kentinde bulunan demiryolu köprüsü (Wardenier vd., 2002)

Dairesel içi boş kesitlerden (CHS) oluşan profiller yuvarlatılmış köşelere ve küçük yüzey alanlarına sahip olmasından ötürü düşük dalga sürüklenme katsayılarına sahiptir. Bu yüzden büyük deniz dalgalarına maruz kalan yapılarda bu profiller sıkça tercih edilir.

Şekil 1.7’de Hollanda’nın Hook kasabası yakınlarında bulunan fırtına kabarmasını önleme bariyeri görülmektedir. Bu bariyer dairesel içi boş kesitten oluşan üçgensel kollara sahiptir. Ayrıca bu kollar 250 m genişliğe sahip olmasıyla Fransa’nın Paris şehrinde bulunan Eyfel kulesinin yüksekliğine eşittir.



Şekil 1.7. Hollanda’nın Hook kasabası yakınlarında bulunan fırtına kabarması bariyeri (Wardenier vd., 2002)

Şekil 1.8’de Meksika Körfezi’nde bulunan ve içi boş profillerden inşa edilen Bullwinkle petrol arama platformu görülmektedir. Bu platform dünyanın en uzun açık deniz platformu ve aynı zamanda dünyanın en yüksek petrol arama platformudur.



Şekil 1.8. Meksika Körfezinde bulunan Bullwinkle petrol arama platformu (Wardenier vd.,2002)

Boru ve kutu enkesitli elemanlar birçok alanda kullanıldığı gibi kuleler ve elektrik direkleri gibi yüksek oranda rüzgar yüküne maruz kalan yapıların inşasında sıkça kullanılmaktadır. Şekil 1.9’da boru enkesitli elemanlardan inşa edilmiş elektrik güç iletim kulesi görülmektedir.



Şekil 1.9. Elektrik güç iletim kulesi (Wardenier vd., 2002)

Boru ve kutu enkesitli elemanların özel uygulama alanları da oldukça geniştir. Şekil 1.10'da boru ve kutu enkesitli elemanlar kullanılarak inşa edilmiş bazı özel uygulama örnekleri verilmiştir. Bu profiller günümüzde trafik bilgi ve işaret sinyalizasyon direkleri (Şekil 1.10(a)), petrol istasyonları (Şekil 1.10(b)), ses kirliliğini önleme bariyerleri (Şekil 1.10(c)), otoyol yaya korkulukları, radyo teleskopları (Şekil 1.10(d)), vinçler ve lunapark hız trenleri gibi birçok yapının inşasında oldukça fazla kullanım alanı bulmaktadır (Wardenier vd., 2002).



a) Trafik bilgi ve işaret sinyalizasyon direği



b) Petrol İstasyonu



c) Ses kirliliğini önleme bariyeri



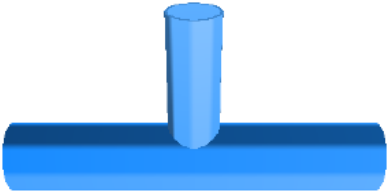
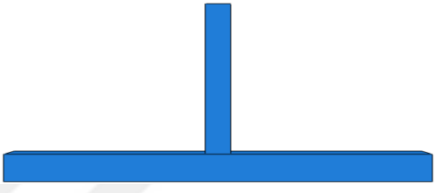

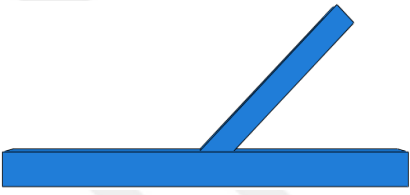

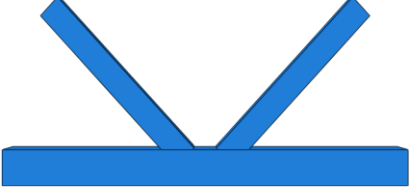

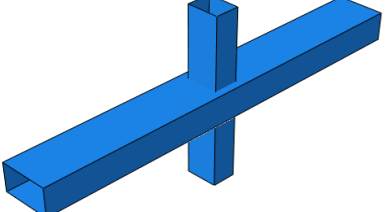

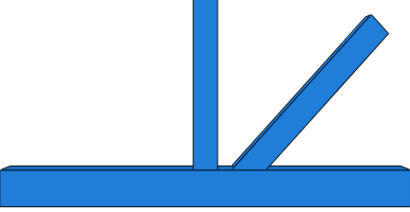
d) Radyo teleskobu

Şekil 1.10. Boru ve kutu enkesitli elemanlar kullanılarak inşa edilmiş bazı özel uygulama örnekleri (Wardenier vd., 2002)

1.6.2 Boru veya Kutu Enkesitli Elemanların Sınıflandırılması

Boru ve kutu enkesitli elemanlar birleşim tipine göre T, Y, K, X ve N olmak üzere 5 birleşim tipine ayrılır. Tablo 1.3'te bu birleşim türlerinin 3 boyutlu olarak sınıflandırılmış halleri gösterilmektedir.

Tablo 1.3. Boru ve kutu enkesitli birleşimlerin sınıflandırılması

Birleşim Türü	Boru Enkesitli Birleşim	Kutu Enkesitli Birleşim
T-birleşim		
Y-birleşim		
K-birleşim		
X-birleşim		
N-birleşim		

1.7. Literatür Araştırması

Yapılan literatür araştırması ve incelenen yönetmeliklerden (Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (2016), Eurocode 1993-1-8 (CEN, 2005), CIDECT No.3 (2009)) görülmüştür ki EHS T-birleşimlerinin dayanımlarını hesaplayabilmek için herhangi bir hesap yöntemi mevcut değildir. Ayrıca elips enkesitli elemanlardan oluşmuş birleşimlerin hesabını yapabilmek için yönetmeliklerde mevcut halde bulunan kutu enkesitli birleşimlerin hesap formülleri kullanılmaktadır. Fakat, bu yöntemin yapılan literatür araştırmalarında EHS T-birleşimlerinin dayanımlarını hesaplamada her zaman doğru ve güvenilir sonuçlar vermediği görülmüştür. Bunun sebebi farklı oryantasyonlardan oluşan elips enkesitli birleşimlerin farklı göçme modlarına sahip olmasıdır.

1.7.1. İçi Boş En Kesitli Kaynaklı Birleşimler Üzerine Yapılan Çalışmalar

Van der Vegte (1995), çok eksenli birleşimlerin statik davranışı hakkındaki bilgileri artırmak ve ayrıca tek eksenli ve çok eksenli birleşimlerin tasarımı için daha iyi bir temel sağlamak amacıyla deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmiştir. Deneysel araştırma programında düzlem dışı yüklemenin etkisi düzlem içi başlık elemanı üzerindeki farklı yükleme türleri için belirlemiştir. Çok düzlemli ve tek düzlemli birleşimlerin dayanımı için teorik bir temel sağlamak amacıyla analitik modeller geliştirmiştir. Analitik modeller ve sayısal sonuçları birleştirerek çok düzlemde ve tek düzlemdeki birleşimlerin dayanım formüllerini türetmiştir. Tablo 1.3'te tek düzlemdeki boru ve kutu enkesitli birleşimlerin türleri gösterilmektedir.

Choo vd. (2006), yaptıkları çalışmalarda çeşitli sınır kısıtlamaları ve başlık elemanına uygulanan eksenel gerilmelerle kalın cidara sahip dairesel içi boş kesitli (CHS) K-birleşimlerinin statik dayanımına ilişkin sistematik bir araştırma yapmışlardır. İzole edilmiş bir K-birleşimi üzerindeki yer değiştirme kontrollü yüklerin, boru şeklinde bir çerçeve içindeki K-birleşiminin yük dağılımının gerçekçi bir temsilini sağladığını bulmuşlardır. K-birleşimlerinde yeni bir başlık elemanı gerilme fonksiyonu için maksimum başlık elemanı gerilme oranı açısından bir tanımlama, birleşim geometrisindeki değişimler bakımından dağılımı en aza indirmek için bulmuşlardır.

Wardenier vd. (2007), maksimum başlık elemanı gerilmesine dayalı bir başlık elemanı gerilme fonksiyonu oluşturmak için dairesel içi boş kesitlerde (CHS) başlık

elemanı yük etkilerini yeniden analiz etmeye karar vermişlerdir. Dikdörtgen içi boş kesitli (RHS) birleşimler için var olan başlık elemanı gerilme fonksiyonları, CHS birleşimleri için geliştirilen başlık elemanı gerilme fonksiyonlarını oluşturmak için yeniden analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, RHS X- ve T-birleşimleri için başlık elemanı gerilme fonksiyonlarını sunmuşlardır.

Packer vd. (2015), dikdörtgen içi boş profiller (RHS) ile uç plakaları arasındaki dolgu kaynaklı bağlantılar üzerinde bir dizi laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Kritik eleman olacak şekilde kaynakla tasarlanmış toplam 21 RHS birleşimlerine aksel gerilme yükü uygulayarak göçmeye karşı test etmişlerdir. Dolgu kaynaklı RHS birleşimlerini hem doğruluk hem de güvenlik seviyesini tespit etmek için çelik yönetmeliklerindeki basit tasarım metodlarının değerlendirmesini yapmışlardır. Bazı çelik yönetmeliklerinde halen izin verilen dolgu kaynağı (köşe kaynağı) için “yönlü güç artırma faktörü”nün uygulanmasına kısıtlamalar getirilmesi gerektiğini bulmuşlardır.

He vd. (2015), kritik sıcaklık yöntemine dayalı aksel yüklemeye tabi tutulan dairesel içi boş kesitli (CHS) K-birleşimlerinin yangın dayanımını değerlendirmek için bir tasarım yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemde göre, birleşimin sıcaklığı kritik bir sıcaklığın altında olduğu zaman boru şeklindeki bir K-birleşimi güvenli kabul edilir. Ayrıca geometrik parametrelerin boru şekilli K birleşimlerinin kritik sıcaklığı üzerindeki etkisini araştırmak için kapsamlı bir parametrik çalışma yürütmüşlerdir. Başlangıçtaki başlık elemanı gerilmesi olmayan boru şeklindeki K-birleşimi için kritik sıcaklığın sadece kullanım derecesine bağlı olduğu ve geometrik parametrelerin bu kritik sıcaklığa etkisi göz ardı edilebilir olduğu bulunmuştur. Sonuçlar aynı zamanda, dengelenmiş aksel yüklere tabi tutulan bir boru şekilli K-birleşiminin kritik sıcaklığının, Eurocode 3 (bölüm 1-2)’de belirtilen bir çelik üyenin kritik sıcaklığını tahmin etme denklemi temel esas alınarak hesaplanabileceğini göstermektedir. Ayrıca, başlık elemanı gerilmesinin kritik sıcaklığa etkisi 30 sonlu eleman modelinin sayısal sonuçları vasıtasıyla araştırılmıştır. Sonuçlar, kritik sıcaklık ile başlık elemanı gerilmesi arasındaki ilişkinin, tasarlanan amaç için parabolik bir eğri olarak basitleştirilebileceğini göstermiştir.

Lan vd. (2016), soğuk şekillendirilmiş paslanmaz çelikten oluşan ve yüksek sıcaklığa maruz kalan boru enkesitli X ve T-birleşimlerinin dayanımlarını belirleyebilmek için sayısal parametrik bir çalışma yapmışlardır. 22 °C’den 760 °C’ye kadar değişen farklı yüksek sıcaklıklarda aksel basınca maruz bırakılan SHS (kare içi boş enkesitli birleşim), RHS (dikdörtgen içi boş enkesitli birleşim) ve CHS (dairesel içi boş enkesitli

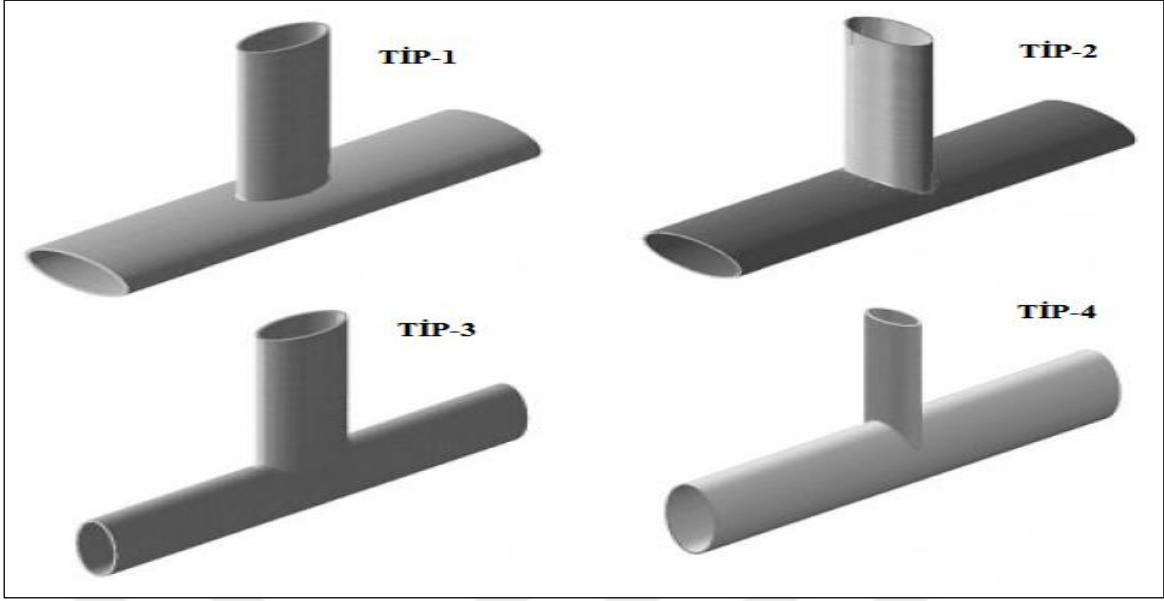
birleşim)'lerden oluşan X- ve T-birleşimleri üzerinde kapsamlı sayısal simülasyonlar yapmışlardır. Yüksek sıcaklıklarda X ve T birleşimlerinin dayanımlarını tahmin edebilmek için bir sıcaklık faktörü getirerek birleşik bir denklem önermişlerdir. İstatistiksel analiz, önerilen dayanım denkleminin güvenilir ve doğru olduğunu göstermiştir.

Becque vd. (2017), C450 tipi soğuk şekillendirilmiş dikdörtgen içi boş kesitlerden (RHS) imal edilen T ve X birleşimlerinden oluşan profiller üzerinde 15 tane deneysel çalışma yapmışlardır. Test sonuçlarını mevcut CIDECT tasarım kurallarıyla karşılaştırmışlardır. Özellikle, hem CIDECT kuralları hem de Eurocode tarafından ileri sürülen C450 bağlantı sınıfının kapasitesi üzerinde 0,9'luk bir azaltma faktörüne ihtiyaç duyulduğu belirtmişlerdir.

Literatür araştırmalarına göre kutu ve boru enkesitli profiller üzerine, Choo vd., 2003c, Dexter vd. (1999a, b), Gibstein vd. (1976), Kurobane vd. (1984, 1986), Liu vd. (2002, 2006), Makino vd. (1996) Marshall vd. (1974), Van der Vegte vd. (2000, 2001, 2002, 2003, 2005, 2006, 2007)'nin çalışmaları mevcuttur. Yapılan çalışmalarda, farklı birleşim türleri, yükleme çeşitleri ve başlık elemanına uygulanan gerilmelerin etkileri üzerine detaylı veriler elde edilmiştir. Bu yüzden, bu tez kapsamında boru veya kutu enkesitli profiller üzerine herhangi bir çalışma yapılması gerek görülmemiştir.

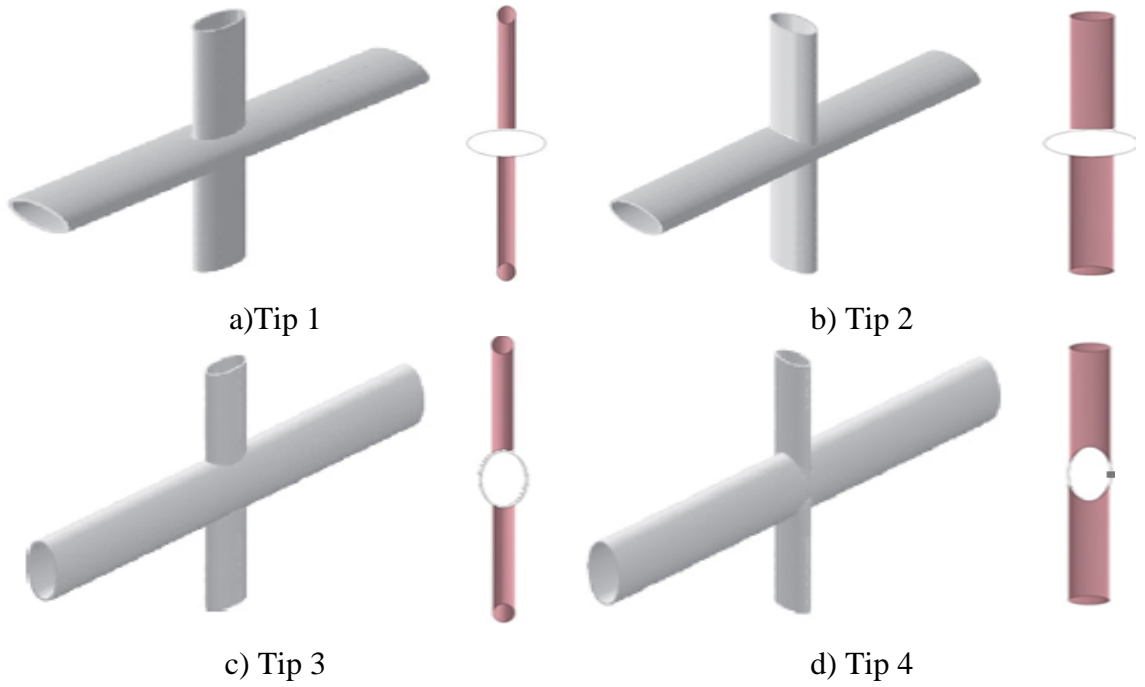
1.7.2. Elips En Kesitli Profiller Üzerine Yapılan Çalışmalar

Bortolotti vd. (2003) ve Pietrapetrosa vd. (2003) EHS X ve N- birleşimlerini eksenel yükleme testlerine tabi tutmuşlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda, kriko kapasitesinden dolayı her iki çalışmada da testlerin göçme öncesi tamamlandığını vurgulamışlardır. Yapılan çalışmaların güvenilirliği bu sebepten dolayı tartışmaya yol açmıştır. Her iki araştırmacının da yaptıkları çalışmalarda EHS T-birleşimlerinin eğilme momenti altındaki davranışı üzerine herhangi bir çalışmaya yer vermemişlerdir. Şekil 1.11'de EHS T-birleşiminin farklı oryantasyon tipleri gösterilmektedir.



Şekil 1.11. EHS T- birleşiminin farklı oryantasyon tipleri (Wardenier vd.,2014)

Choo vd. (2003a), sayısal analiz yöntemleriyle çeşitli oryantasyon tiplerinin davranışlarını araştırmışlardır. EHS X-birleşimlerinin dayanımlarının, tip 4, 3, 2'den 1'e doğru azaldığı sonucuna varmışlardır (Şekil 1.12). Fakat yaptıkları bu çalışmalarda EHS T- birleşimlerinin eğilme momenti altındaki davranışı üzerine herhangi bir çalışmaya yer vermemişlerdir.



Şekil 1.12. EHS X-birleşiminin farklı oryantasyon tipleri

Wardenier (2007), farklı göçme modlarındaki EHS birleşimlerini incelemiştir. Buna ilaveten, CIDECT yönetmeliğinde yer alan boru ve kutu kesitli elemanların hesabı için kullanılan denklemler aracılığıyla, EHS birleşimleri için uygun bir ilişki önermiştir. Ancak yapılan bu çalışmada EHS T-birleşimlerinin eğilme momenti altındaki davranışı üzerine herhangi bir çalışmaya yer verilmemiştir.

Shen vd. (Shen, Choo vd., 2012; Shen, Choo vd., 2013) diyagonalleri basınç ve çekme kuvvetlerine maruz kalan 4 farklı oryantasyon tipinden oluşan EHS X-birleşimlerinin davranışları üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yukarıda belirtilen tip 1 ve 2 (Şekil 1.12. (a) ve (b)) oryantasyonları için EHS X-birleşimlerinin, RHS birleşimleri ile davranış bakımından benzerlikler gösterdikleri sonucuna varmışlardır. Diğer tipteki oryantasyonlarının (Şekil 1.12. (c) ve (d)) ise boru enkesitli elemanlardan oluşmuş birleşimlere benzer sonuçlar verdiğini bulmuşlardır. Bu çalışmada varılan sonuçlardan da anlaşılacağı üzere araştırmacılar EHS T-birleşimlerinin eğilme momenti altındaki davranışı üzerine herhangi bir çalışmaya yer vermemişlerdir.

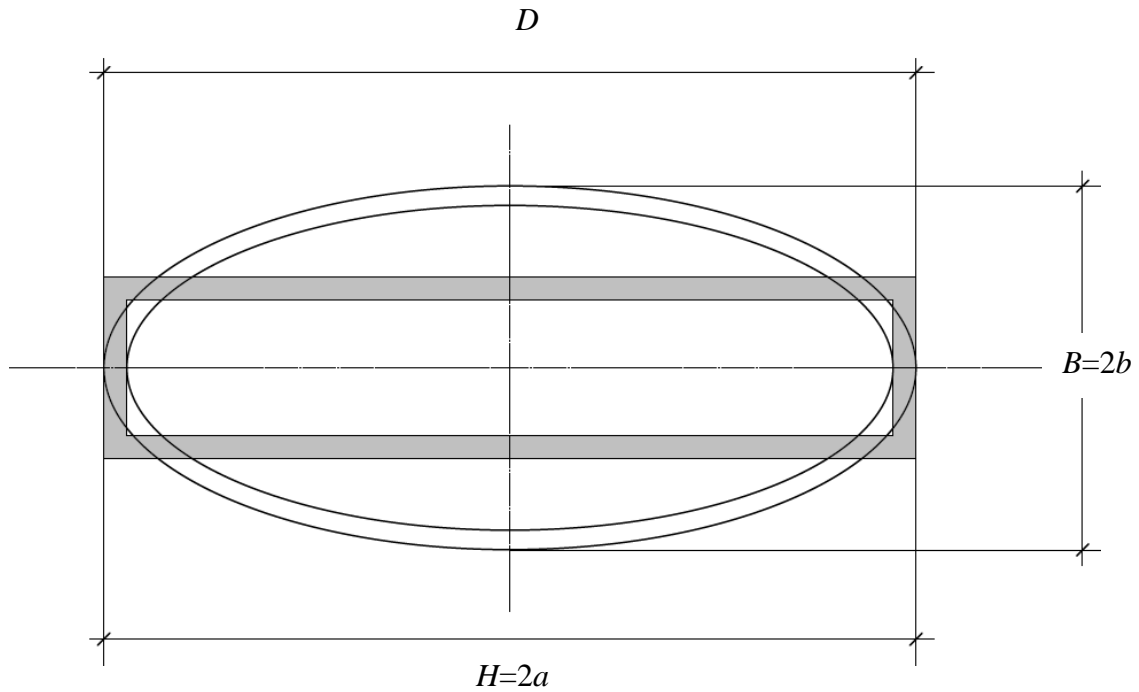
Haque vd. (2012), 12 adet test gerçekleştirerek EHS X- ve T-birleşimlerinin dayanımlarını incelemişlerdir. Oryantasyon tipi, bağlantı açısı ve diyagonallere uygulanan yük türünün etkileri yapılan bu testlerde dikkate alınmıştır. Buna ilaveten birleşimlerin kapasitesini belirlemede; eşdeğer RHS yaklaşımının, eşdeğer boru enkesitli elemanlardan oluşmuş birleşim yaklaşımına göre daha iyi sonuçlar verebileceği kanısına varmışlardır. Ancak EHS T-birleşimlerinin eğilme momenti altındaki davranışı üzerine herhangi bir çalışmaya yer vermemişlerdir.

Packer vd. (2012), hem deneysel hem de sayısal analizler yaparak EHS T- ve X-birleşimlerinin davranışlarını araştırmışlardır. Yapılan çalışmalarda eşdeğer RHS'ye bağlı yaklaşımın tüm EHS birleşimlerinde kullanılmasının güvenilir ve doğru sonuçlar vermeyeceği sonucuna varmışlardır. EHS T ve X-birleşimlerinin dayanımlarını hesaplamak için yaptıkları çalışma sonucunda yeni bir yöntem sunmuşlardır. Önerilen bu yöntem EHS T-birleşimlerinin eğilme momenti altındaki davranışını kapsamamaktadır.

1.8. Eşdeğer Dikdörtgen Enkesitli Profil Yaklaşımı

ÇYTYE, Eurocode, CIDECT yönetmeliklerinde, EHS birleşimlerinin normal sıcaklıklarda maksimum taşıma kapasitesini hesaplamak için mevcut tasarım hesaplamaları eşdeğer dikdörtgen en kesitli içi boş profiller (RHS) yöntemine dayanmaktadır. Bu

yönteme göre; EHS'nin büyük çapı bir eşdeğer RHS olarak, RHS'nin uzun kenarına eşit olduğu ve küçük çapının da RHS'nin kısa kenarına eşit olduğu varsayımına dayanarak yapılmaktadır (Şekil 1.13). Bununla birlikte, EHS birleşimlerinin tasarım ve statik hesaplamalarında yukarıda belirtilen yönetmeliklerde yer alan RHS denklemleri kullanılır. Fakat yapılan literatür araştırmalarından elde edilen sonuçlar bütün birleşim türleri ve oryantasyonları (Şekil 1.11) için bu basit dönüştürme yönteminin her zaman doğru ve güvenilir sonuçlar vermediğini göstermiştir.



Şekil 1.13. Bir EHS için eşdeğer RHS yöntemi (Haque, 2011)

Şekil 1.13'de;

D ; Eşdeğer dikdörtgen enkesitli içi boş kesitin büyük çapını

H ; Elips enkesitin büyük çapını

B ; Elips enkesitin küçük çapını

a ; Elips enkesitin büyük çapının yarısını

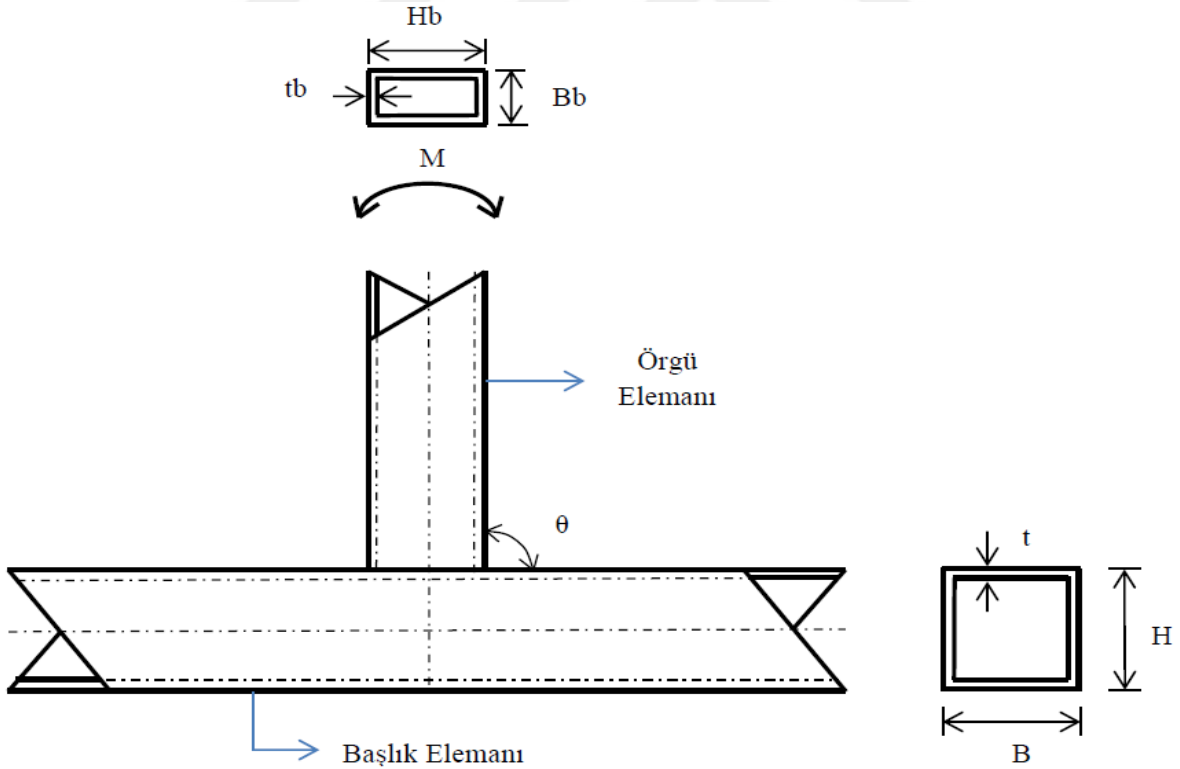
b ; Elips enkesitin küçük çapının yarısını

göstermektedir.

1.8.1. Dikdörtgen Enkesitli Birleşimlerin Hesaplama Yöntemleri

Bu tez kapsamında, ÇYTYE, Eurocode ve CIDECT yönetmelikleri dikkate alınmıştır. Mevcut yönetmeliklerin her biri boru ve kutu enkesitli birleşimlerin farklı yüklemeler ve göçme modları için hesaplama yöntemlerini içermektedir. En kritik göçme modu başlık elemanı kenar enkesit parçasında plastikleşme olduğu için diğer göçme modlarını (kutu profil cidarında yerel akma, örgü elemanında yerel akma) incelemeye gerek yoktur. Ayrıca yönetmeliklerde diğer göçme modlarının önlenmesi için kesitlerin geometrik özelliklerine sınırlamalar getirilmiştir. Bu tez kapsamında da diğer göçme modlarından ötürü (kutu profil cidarında yerel akma, örgü elemanında yerel akma) profillerde göçme olmaması için profillerin geometrik boyutları seçilirken bu sınırlamalar dikkat edilmiştir.

Şekil 1.14’de düzlem içi eğilme momenti etkisi altındaki dikdörtgen enkesitli T-birleşiminin genel yerleşim planı ve geometrik özellikleri verilmiştir.



Şekil 1.14. RHS T- birleşiminin eğilme momenti etkisi altında genel yerleşim planı ve geometrik özellikleri (ÇYTYE, 2016)

Başlık elemanı kenar en kesit parçasında plastikleşme göçme modu için hesaplama yöntemi bahsedilen yönetmeliklerin her biri için Tablo 1.4’te verilmiştir. Eurocode ve CIDECT yönetmeliklerinde en kritik göçme modu olan başlık elemanı kenar en kesit parçasında plastikleşme için kullanılan formüller aynıdır.

Tablo 1.4. Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Esasları (ÇYTYE, 2016), Eurocode EN 1993-1-8 (CEN, 2005) ve CIDECT (2009)’e göre düzlem içi eğilme momenti altında RHS-T birleşiminin dayanım formülleri

Mevcut Yönetmeliklerde Yer Alan Göçme Sınır Durumu ve Birleşimin Karakteristik Eğilme Momenti Dayanımı	
<u>Başlık Elemanı Kenar En Kesit Parçasında Plastikleşme ($\beta \leq 0,85$ için)</u>	
Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Esasları (ÇYTYE, 2016)	$M_n = F_y t^2 H_b \left[\frac{1}{2\eta} + \frac{1}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{\eta}{(1-\beta)} \right] Q_f$ <p>Çekme: $Q_f=1$ Basınç: $Q_f = 1,3 - 0,4 \frac{U}{\beta} \leq 1,0$</p> $\eta = \frac{l_b}{B}, \quad l_b = \frac{H_b}{\sin\theta}, \quad \beta = \frac{B_b}{B}$
Eurocode EN 1993-1-8 (CEN, 2005) ve CIDECT (2009)	$M_n = F_y t^2 H_b \left[\frac{1}{2\eta} + \frac{2}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{\eta}{(1-\beta)} \right] Q_f$ <p>Çekme: $Q_f=1$ Basınç: $Q_f = 1,3 - 0,4 \frac{U}{\beta} \leq 1,0$</p> $\eta = \frac{l_b}{B}, \quad l_b = \frac{H_b}{\sin\theta}, \quad \beta = \frac{B_b}{B}$

Tablo 1.4’te ve Şekil 1.14’te yer alan;

- M_n ; Karakteristik eğilme momenti dayanımını
- F_y ; Karakteristik akma gerilmesini
- t ; Kutu enkesitli başlık elemanın et(cidar) kalınlığını
- t_b ; Kutu enkesitli örgü elemanının et(cidar) kalınlığını
- H ; Kutu enkesitli başlık elemanının birleşim düzlemine paralel yüksekliğini

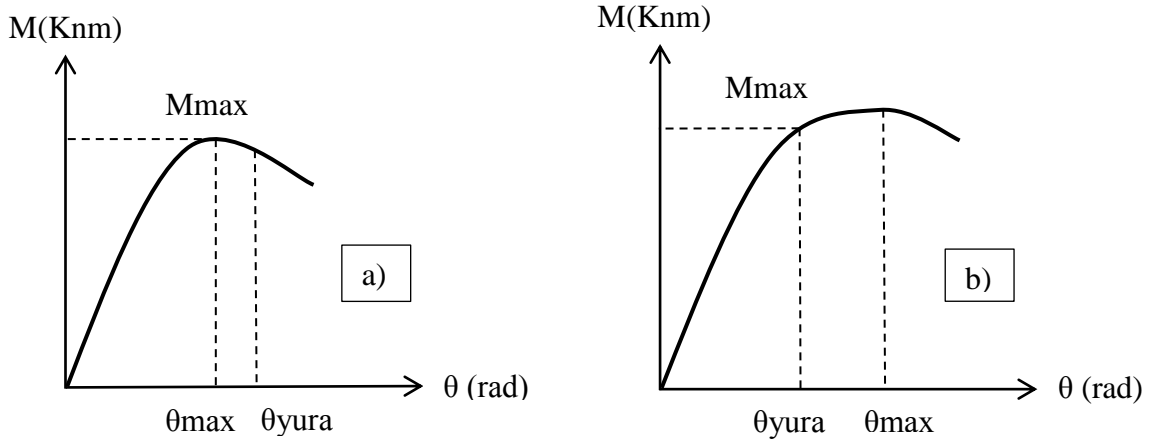
- H_b ; Kutu enkesitli örgü elemanının birleşim düzlemine paralel yüksekliğini
 B ; Kutu enkesitli başlık elemanının birleşim düzlemine dik genişliğini
 B_b ; Kutu enkesitli örgü elemanının birleşim düzlemine dik genişliğini
 β ; Kutu enkesitli örgü elemanı genişliğinin başlık elemanı genişliğine oranı
 η ; Sadece kutu enkesitler için uygulanan yük etkime uzunluğu parametresi
 θ ; Başlık ve örgü elemanı arasındaki açığı
 Q_f ; Başlık elemanı gerilme- etkileşim parametresini
 l_B ; Birleşim düzleminde örgü elemanının başlık elemanı ile birleştiği uzunluğu göstermektedir.

1.9. Yura'nın Eğilme Elemanlarında Dönme Sınırlaması

Bir birleşimin dayanımını belirlemek için kullanılan yer değiştirme sınırı birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Yura vd. (1980) bu araştırmacılardan bazılarıdır (Zhao, 2000).

Yura vd. (1980), artan deformasyon ile daha fazla yüklenmeyi sürdüren birleşimler için bir deformasyon limiti önermişlerdir.

Yura vd. tarafından önerilen deformasyon limiti eğilme momentine maruz kalmış örgü elemanında, bir birleşimin dönme kapasitesi olarak belirlenmiştir. Birleşimin dayanımı, birleşim bölgesinde iki farklı deformasyon miktarına bağlı olarak hesaplanır. Eğer maksimum dönme miktarı denklem 1.2'den hesaplanan değerden küçük ise eğilme-dönme diyagramındaki maksimum nokta birleşimin eğilme kapasitesini verir (Şekil 1.15(a)). Diğer durumda; eğer maksimum dönme miktarı denklem 1.2'den hesaplanan değerden büyük ise denklem 1.2'ye yani Yura'nın deformasyon limitine karşılık gelen moment değeri birleşimin maksimum eğilme kapasitesini verir (Şekil 1.15(b)).



Şekil 1.15. Yura'nın eğilme elemanlarında dönme sınırlaması için moment-dönme eğrileri

Sonuç olarak Yura tarafından eğilme momenti etkisindeki birleşimler için dönme sınırlaması aşağıdaki eşitlikte verilmiştir (Choo, 2003b).

$$\varphi_{yura} = 80 \frac{F_y}{E} \quad (1.2)$$

Bu eşitlikte;

f_y ; Çeliğin karakteristik akma gerilmesini,

E ; Çelik elastisite modülünü göstermektedir.

Bu yer değiştirme sınırı tanımı ampiriktir ve direkt olarak birleşimin taşıma kapasitesi ile ilişkili değildir. Bu doğrulama çalışmasında ve yapılan parametrik çalışmalarda Yura vd. tarafından belirlenen dönme sınırı dikkate alınmıştır.

1.10. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Abaqus/CAE 6.14-1

Sonlu elemanlar yöntemindeki temel amaç, çözülmesi uzun zaman alacak karmaşık problemlerin basite indirgenerek kontrol edilebilir parçalarla daha kolay ve kısa zamanda çözülmesi esasına dayanır. Çoğunlukla, bu basitleştirme işlemi doğru sonuç yerine yaklaşık bir sonuç vermektedir. Bilgisayar teknolojisinin son yıllarda hızla gelişmesiyle birlikte gelişen sayısal hesap yöntemleri içerisinde sonlu elemanlar yöntemi, neredeyse

çoğu mühendislik problemin istenilen ölçütler dahilinde çözülmesini sağlamaktadır (Bedir, 2007).

1.10.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Kısa Tarihi

Yıllar öncesinde “Sonlu Elemanlar Yöntemi” olarak bilinen çözüm yönteminin temel fikirleri ortaya atılmıştır. Örneğin, yıllar öncesinde araştırmacılar bir çemberin etrafına poligonlar çizerek çemberin çevre uzunluğu bulmaktaydılar. Bu sayede poligonun köşe sayısını arttırmış olup sonuca daha fazla yaklaşıyorlardı (Bedir, 2007).

Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak 1950 yılında uzay mühendisliğinde kullanılmaya başlanmıştır. Boeing, Bell Aerospace ve Roll Royce firmaları bu yöntemin ilk kullanıcılarıdır. 1956 yılında Turner ve arkadaşları tarafından bu yöntemin temelini oluşturan ilk çalışma yayınlanmıştır. Yaptıkları çalışmada sonlu elemanlar yönteminin bir uçağın analizinde kullanımını ele almışlardır (Fish, 2007).

Bu yöntemin gelişmesine en büyük katkıyı veren hiç şüphesiz gelişen bilgisayar teknolojisi. Çözülme süresi neredeyse ayları bulabilen bazı karmaşık problemler, günümüzün ileri teknoloji bilgisayarları sayesinde çok kısa bir zaman dilimi içerisinde çözülmekte olup gerçeğe en yakın sonuçları verebilmektedir (Demirsöz, 2005).

1.10.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Mühendislikte Uygulama Alanları

Sonlu elemanlar yöntemi sağladığı avantajlardan ötürü günümüzde pek çok alanda kullanılmaktadır. Yapısal mekanik problemlerinin yanı sıra, akışkanlar mekaniği, ısı iletimi, manyetik ve elektrik alanlar ile ilgili mühendislik problemlerinin çözümünde de sıklıkla tercih edilmektedir. Farklı mühendislik problemleri arasındaki benzerlikler sonlu elemanlar yönteminin bu kadar çok uygulama alanı bulmasını sağlamıştır. Bu uygulama alanlarından bazıları şunlardır (URL-1, 2014) :

- ✓ İnşaat / Makine / Uçak/ Otomotiv vb. mühendislik uygulamaları
- ✓ Yapısal Analizler (Statik/ Dinamik/ Lineer-Nonlineer)
- ✓ Termal akış hesapları
- ✓ Elektromanyetik hesaplamalar
- ✓ Biyomekanik hesaplamalar
- ✓ Medikal uygulamalar vb.

1.10.3. Sonlu Elemanlar Yönteminin Problemlere Uygulanması

Sonlu elemanlar yöntemi elastik ve sürekli ortamlara uygulanırken sırasıyla:

- ✓ Yapı parçalara ayrılır.
- ✓ Uygun bir interpolasyon seçilir.
- ✓ Rijitlik matrislerinin, yük vektörlerinin ve eleman denklemlerinin birleştirilmesiyle toplam denge denklemleri elde edilir.
- ✓ Bilinmeyen düğümsel (nodal) yer değişimleri için çözüm yöntemleri kullanılır.
- ✓ Sonuçlar bulunur (Bedir, 2007).


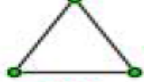

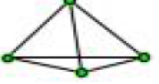
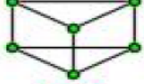
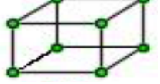


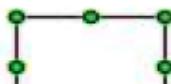

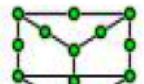
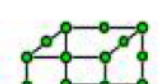
1.10.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi Eleman Tipleri

Bir nesnenin ölçeklendirilmiş kopyası veya temsiline model denilmektedir. Sembolik bir araç olarak kullanılan model ile yapının davranışı simüle edilir. Analizi yapılacak modelin sonuçlarının bulunmasında kayda değer bir fark oluşmaması için bazı matematiksel kabuller yapılır. Fakat kısmi diferansiyel denklemler kullanılarak büyük modellerin çözülmesi çok zordur. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak daha kolay bir şekilde büyük modellerin analizlerini yapmak mümkündür (Okur, 2017).

Bir modelin sonsuz tane noktaya sahip olması, bu noktaları analiz etmek için oluşacak denklemlerin çözümünü zorlaştırarak zaman kaybına yol açar. Sonsuz sayıda noktaya sahip bir model sonlu elemanlar yöntemiyle sonlu sayıda parçalara bölünerek analizler gerçekleştirilebilir. Bu yüzden yapının veya bir cismin gerçek davranışını temsil etmek için oluşturulan model yeterli sayıda sonlu parçaya bölünmelidir. Çünkü modelin çok fazla parçaya bölünmesi işlem hacmini artırır ve ayrıca belirli bir aralıktan sonra sonuçlarda önemli bir farklılaşma da oluşmaz. Bu gibi sebeplerden dolayı optimum seviyede ve yapıyı en biçimde temsil edecek şekilde sonlu eleman sayısına sahip bir model oluşturulmalıdır (Zienkiewicz, 2000).

Sonlu elemanlara bölme işleminde dikkat edilecek hususlar: sürekli ortamın boyutu ve parçanın geometrisine en uygun eleman şeklinin seçimidir. Bir, iki veya üç boyutlu sonlu elemanlar seçilebilir (Tablo 1.5). Genellikle bu eleman tiplerinde; bir boyutlu elemanlar kafes sistemler için, iki boyutlu elemanlar perde ve plaklar için, üç boyutlu elemanlar ise köprü, baraj ve tarihi yapılar için tercih edilir. (Demirsöz, 2005; Okur,2017).

Tablo 1.5. Bir, iki ve üç boyutlu sonlu eleman örnekleri (Okur, 2017)

Bir Boyutlu	İki Boyutlu		Üç Boyutlu		
	Çubuk	Üçgen	Dörtgen	Dörtüzlü	Beşyüzlü
					
2 D.N	3 D.N	4 D.N	4 D.N	6 D.N	8 D.N
					
3 D.N	6 D.N	8 D.N	10 D.N	15 D.N	20 D.N
D.N= Düğüm Noktası					

1.10.5. Abaqus/CAE v6.14-1 Sonlu Elemanlar Paket Programı

Çözülmesi uzun zaman alan karmaşık problemlerin bilgisayar yardımıyla çözülmesi zamandan tasarruf sağlar ve ayrıca yapılan işlemde daha doğru sonuçlar elde edilmesini kolaylaştırır. Buna ilaveten bazı deneysel parametrik testlerin yapılması pahalı ve oldukça zor olsa bile, sonlu eleman modeli doğru bir şekilde kalibre edildiğinde bilgisayar ortamında büyük ölçekli parametrik testler gerçekleştirilebilir. Üzerinde çalışılacak model bilgisayar ortamında çeşitli paket programlar kullanılarak modellenir, ardından bu modeller daha küçük sonlu elemanlara bölünerek analizler yapılır (Bedir, 2007; Mudenda, 2008).

Günümüz teknolojisinde, Sonlu Elemanlar Modeli (SEM) uygulamaları için piyasada birçok yazılım mevcuttur. Bunlardan bazıları: ABAQUS, Sap 2000, ANSYS, NASTRAN, COSMOS, PATRAN, ALGOR vb. programlardır.

ABAQUS programının, ABAQUS/CAE ara yüzünün çözülecek problem için tasarım kısmının yeterli olması ve ayrıca SEM analizi prosesinde kullanıcı dostu olması bu tezdeki modellemelerde en uygun program olarak tercih edilmesini sağlamıştır. Buna ilaveten, bu programın analiz sonuçlarında düşük hata payının olması bu yüksek lisans tez çalışmasında tercih edilmesinin başka bir sebebidir.

1.11. Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi

Bu tez çalışmasında, parametrik çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar doğrultusunda EHS T-birleşimlerinin güvenli ve ekonomik olarak tasarımlarının

yapılabilmesi için yeni bir tasarım metodu geliştirilmiştir. Bu yöntemi elde ederken, çoklu doğrusal regresyon analizi kullanılmıştır. Bu alt başlıkta, regresyon analizi hakkında kısaca bilgi verilmektedir.

İki ya da daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi ölçerek bu ilişki doğrultusunda o konu hakkında tahminler ya da kestirimler yapabilmek amacıyla kullanılan analiz yöntemine regresyon analizi denir.

Bir tane bağımlı değişken (Y) ile bir tane bağımsız (X) değişken arasındaki bağıntıyı inceleyen yöntem basit doğrusal regresyon denir. Bir tane bağımlı değişken (Y) ile iki yada daha fazla bağımsız değişken ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$) arasındaki bağıntıları modeller aracılığıyla inceleyen yöntem de çoklu doğrusal regresyon adı verilir (Özdamar, 1999). Çoklu doğrusal regresyon analizi temelde iki amaca dayanır. Bu amaçlardan birincisi, bağımlı değişkeni etkilediği tespit edilen bağımsız değişkenler vasıtasıyla bağımlı değişkenin değerini tahmin etmektir. Bir diğer amaç ise bağımlı değişkeni etkilediği düşünülen bağımsız değişkenlerden hangisinin veya hangilerinin bağımlı değişkeni daha çok etkilediğini tespit etmek ve aralarındaki ilişkiyi tanımlamaktır (Alpar, 2003). Çoklu regresyon modelinde; bir tane bağımlı değişkeni etkileyen birden çok bağımsız değişken yer almaktadır. Örneğin, bir bağımlı değişkeni etkileyen üç bağımsız değişken söz konusu olduğu durumda kullanılacak regresyon denklemi, denklem (1.3)'teki gibi ifade edilmektedir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \mathcal{E} \quad (1.3)$$

Örnekleme regresyon denklemi ise;

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + e \quad (1.4)$$

denklem 1.4 şeklinde yazılır. Bu eşitlikte,

Y : bağımlı değişkeni

X : bağımsız değişkeni

b_0 : regresyon eğrisinin Y eksenini kesim noktası

β : regresyon katsayısını

e : hata terimini ifade etmektedir

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR ve BULGULAR

2.1. Sayısal Analizlerin Doğrulanması

Doğrulama işlemi, sayısal analizler için oldukça önemlidir. Yapılan literatür araştırmasında, EHS çelik T-birleşimlerinin düzlem içi eğilme momenti etkisi altında davranışları ve dayanımları üzerine herhangi bir çalışma olmadığından, literatürde Fung vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen CHS T- birleşimleri üzerine yapılan çalışmadan elde edilen test sonuçları kullanılarak sonlu eleman modelinin doğrulanması yapılmıştır. Doğrulanmış modelin; eleman türü, malzeme özelliği, sonlu eleman ağ aralığı, doğrusal olmayan analizlerde ele alınan zaman adımı gibi parametreler EHS çelik T-birleşimleri için yapılacak sayısal analizlerde kullanılmıştır.

Fung vd. (2016), üç farklı sıcaklık (20 °C, 550 °C ve 700°C) durumunda dairesel içi boş kesitlerden olan (CHS) T-birleşimlerinin statik davranışı hakkında bilgi edinmek için CHS T-birleşimlerini düzlem içi eğilmeye maruz bırakarak deneysel ve sayısal çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu tez kapsamında yüksek sıcaklığın birleşimler üzerindeki etkisi araştırılmadığından, Fung vd. (2016)'nin 20 °C'de yani normal şartlar altında düzlem içi eğilmeye maruz kalan CHS T- birleşiminden elde ettiği test sonuçları kullanılmıştır.

2.1.1. Sonlu Eleman Modeli ve Özellikleri

2.1.1.1. Yöntem

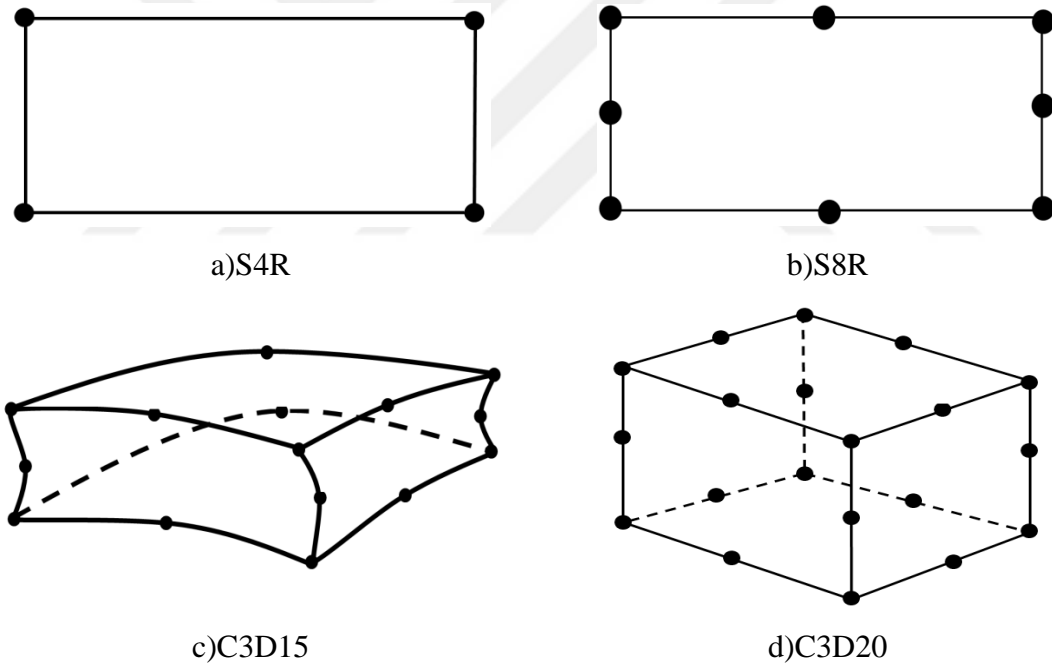
Deneysel metotlar kullanılarak yapı elemanlarının davranışlarını incelemek en doğru yaklaşım yöntemidir. Fakat, artan deney parametreleri, yapılması gereken deney sayısını da arttıracığı için bu durum hem ekonomik hem de zaman açısından bazı sorunlara sebebiyet vermektedir. Doğrusal olmayan sonlu analiz yapabilen programlar kullanılarak bu sorun giderilebilir. İnce cidara sahip başlık ve örgü elemanlarından oluşmuş çelik birleşimlerin, düzlem içi eğilme momenti etkisinde gerçek davranışının elde edilebilmesi için doğrusal olmayan malzeme ve geometrik analiz yapılır. Doğrusal olmayan sonlu eleman analizi yöntemi daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için kullanılır.

Bu kapsamda, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak doğrusal olmayan sayısal analizlerle, Fung vd. (2016)'nin yapmış olduğu düzlem içi eğilmeye maruz kalmış CHS T- birleşim test çıktıları doğrulama çalışmasını gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Doğrulama

çalışmasını yapabilmek için ABAQUS v.6-14.1 (2014) sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

2.1.1.2. Eleman Türü

Örgü ve başlık elemanları için ABAQUS’de mevcut olan eleman türleri; C3D20R (20 düğüm noktalı üç boyutlu eleman, Şekil 2.1(d)), S8R (8 düğüm noktalı kabuk eleman, Şekil 2.1(b)) veya S4R (4 düğüm noktalı kabuk eleman, Şekil 2.1(a)) kullanılabilir. Boru ve kutu enkesitli birleşimlerin kaynaklı olarak modellenmesi için; üç boyutlu kaynak elemanı, üç boyutlu eleman (C3D15, Şekil 2.1(c)), yirmi düğüm noktalı üç boyutlu eleman (C3D20R, Şekil 2.1(d)), 8 düğüm noktalı kabuk eleman (S8R) veya 4 düğüm noktalı kabuk eleman (S4R) kullanılabilir (Özyurt, 2015).



Şekil 2.1. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan eleman türleri (ABAQUS/Standart, 2014)

Yapılan literatür araştırmalarından elde edilen bilgiler ışığında; birleşimde meydana gelen büyük miktarlardaki şekil değiştirme durumlarının incelenmesine imkan vermesinden dolayı bu doğrulama çalışmasında örgü ve başlık elemanları için S8R eleman türü, kaynak modeli için ise C3D20 eleman türü kullanılmıştır.

2.1.1.3. Malzeme Özellikleri

Fung vd. (2015) yaptıkları çalışmada tüm test numuneleri için S355 çelik sınıfını kullanmışlardır. Yaptıkları çelik çekme deneyinde S355 çeliğinin; karakteristik akma gerilmesini (f_y) 380.3 N/mm², karakteristik çekme dayanımını (f_u) 519.1 N/mm² ve elastisite modülünü (E) 201200 Mpa olarak bulmuşlardır. Ayrıca çelik malzemenin Poisson oranı $\nu=0.3$ 'tür.

Çeliğin gerilme-şekil değiştirme diyagramı, çelik numunenin başlangıçtaki kesit alanı (A_0) ve uzunluğuna (l_0) göre hesaplandığından dolayı malzemenin deformasyon özellikleri hakkında tam ve doğru bilgileri vermez. Çünkü çelik çekme deneyinde uygulanan yüke bağlı olarak çelik numunenin ölçü uzunluğu (l_0) sürekli olarak artarken, kesit alanı (A_0) da sürekli olarak azalmaktadır. Bundan dolayı, çekme deneyinin herhangi bir safhasında, numuneye etki eden gerçek gerilme değerinin hesaplanabilmesi için, numuneye etki eden yükün, numunenin o anki kesit alanına bölünmesi ve gerçek gerilme değerinin hesaplanması gerekir. Çekme deneyi devam ettiği sırada, numunenin o anki kesit alanını ölçmek zor olduğundan dolayı mühendislik gerilme kavramı türetilmiştir ve gerilme hesabında numunenin o anki kesit alanı yerine orijinal kesit alanı (A_0) kullanılmaktadır. Bu şekilde hesaplanan gerilmeye mühendislik gerilmesi adı verilir. Benzer şekilde, çekme deneyinin herhangi bir safhasında gerçek birim şekil değişiminin hesaplanabilmesi için numunedeki uzama miktarının o anki ölçü uzunluğuna bölünmesi gerekirken, pratik zorluklardan ötürü, birim şekil değişimi hesaplarında orijinal ölçü uzunluğu (l_0) dikkate alınır. Mühendislik gerilme-birim şekil değişimi eğrisi ve değerleri tüm kalite kontrol ve standartları ile ilgili çalışmalarda dikkate alınır ve kullanılır. Fakat, malzemenin farklı gerilme koşulları altındaki davranışlarını tahmin etmede ise gerçek gerilme ve gerçek şekil değişimi değerleri kullanılır (Mindivan, 2017) .

Aşağıda verilen (2.1) ve (2.2) numaralı denklemler yardımıyla bulunan değerler ile dönüştürme işlemi yapılarak, ABAQUS'de tanımlanacak olan gerilme-birim uzama eğrisi girilmelidir (Boresi ve Schmidt, 2003). Çünkü, ABAQUS kullanılarak doğrusal olmayan analizlerin yapılması ve yüksek deformasyonların elde edilebilmesi bu dönüştürme işlemi yapılmadan mümkün olmamaktadır. Bir başka deyişle, analizin yüksek deformasyonlarda duraksama yapmadan iterasyonların tekrarlanarak yakınsama yapması sağlanır. Ayrıca, bu dönüştürme işlemi yapılarak doğrusal olmayan malzeme özellikleri sonlu eleman modeline dahil edilmiştir.

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.1)$$

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.2)$$

Bu denklemlerde;

\mathcal{E} : mühendislik birim uzama oranını

\mathcal{E}_T : gerçek birim uzama oranını

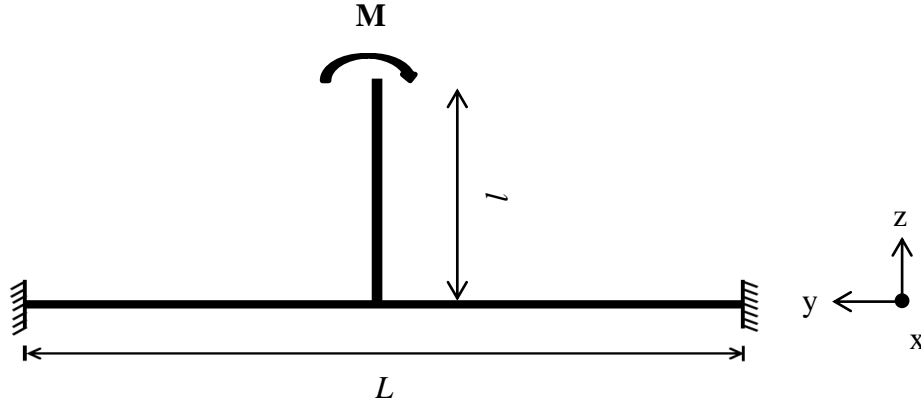
σ : mühendislik gerilmeyi

σ_T : gerçek gerilmeyi

göstermektedir.

2.1.1.4. Mesnet Koşulları

Doğrulanması yapılan CHS T-birleşiminin örgü elemanı iki ucu ankastre mesnetten, başlık elemanının ucunda ise düzlemde çalışabilmek için gerekli yer değiştirme ve dönmeler kısıtlanmıştır (Şekil 2.2).



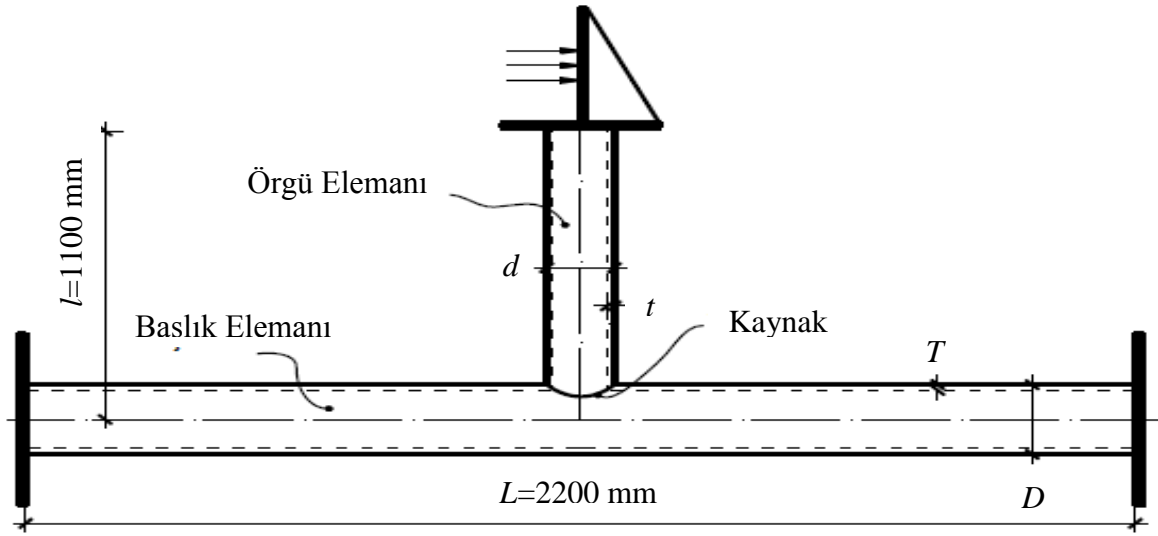
Şekil 2.2. Doğrulanması yapılan birleşimin mesnet koşulları

2.1.2. Doğrulama Çalışması

Doğrulanması yapılan CHS T-birleşiminin geometrik özellikleri (Şekil 2.3) ve boyutları (Tablo 2.1) aşağıda verilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda CHS T-birleşimi sonlu eleman programında modellenmiştir.

Sonlu eleman programında sayısal modelleme yapılırken, Fung vd. (2016)'nin deneysel çalışmasını tümüyle temsil edebilmek için en uygun metot ve yöntemler seçilmiştir. Bu doğrultuda; CHS T-birleşimini oluşturan başlık ve örgü elemanlarının geometrik kesitlerinin uygun olmasından ötürü “shell” eleman ile modellenirken, kaynak sahip olduğu geometri sebebiyle “solid” eleman olarak modellenmiştir. Mekanik yükleri uygulamak için “Static” ve “Riks” olmak üzere iki yöntem vardır. Örgü elemanına uygulanan eğilme momentinden ötürü birleşim bölgesinde büyük miktarda dönme olacağından, birleşim bölgesindeki bu büyük deformasyonları dikkate almak için “Riks” yöntemi seçilmiştir. Kaynakla bağlantısı sağlanmış birleşimlerde, hem örgü hem de başlık elemanları “tie” fonksiyonu kullanılarak kaynak elemanları ile bağlanmıştır. “Discretisation” metodu ise kaynak parçasının örgü ve başlık elemanlarını birleştirmesi için yüzeyden yüzeye temas olarak tanımlanmıştır. Bağlantı bölgesindeki başlık ve örgü elemanları “master surface” olarak seçilirken, kaynak elemanı “slave surface” olarak seçilir. Bu sayede birleşim bölgesinin rijit davranması sağlanmıştır. Kaynak geometrisini modellemek için “sweep” fonksiyonu kullanılmıştır. Ayrıca doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerinde kullanılan zaman adımının maksimum ve minimum değerleri sırasıyla 0,1 ve 1E-015'dir.

CHS T-birleşimini oluşturan elemanlar, modelleme safhasında mümkün olan en uygun sayıda sonlu eleman ağ aralıklarına (mesh) bölünmelidirler. Çünkü, sonlu eleman analizlerinde verimli sonuçlar elde edilebilmesi için bu işlem çok önemlidir. Eğer, gerekli sayıda sonlu eleman ağ aralıkları mevcut değilse, yük aktarımı süresiz olur ve kesin sonuçtan uzaklaşılır. Sonlu eleman aralıklarına bölme işleminin çok sık yapılması durumunda ise sonuç değişimi olmayacağı gibi eleman ve düğüm sayısı artacağından çözüm süresi de uzayacaktır. Bundan dolayı optimum aralıkta sonlu eleman aralıklarına bölme işlemi yapılması gerekmektedir. CHS T-birleşimini oluşturan elemanları en uygun sayıda sonlu elemanlara bölmek için bir dizi çalışma yapılmıştır. Bu doğrultuda; kaynak 5 mm aralıklı sonlu eleman ağ aralığına bölünmüştür. Birleşim bölgelerinde; başlık ve örgü elemanı için sonlu eleman ağ aralığı, başlık ve örgü elemanının et kalınlığı ile eşit alınmıştır, diğer bölgelerde ise eleman et kalınlığının iki katı alınarak sonlu eleman ağ aralığı seyrekleştirilmiştir (Şekil 2.5). Bu sonlu eleman ağ aralıkları kullanılarak yapılan modellemeden elde edilen dayanım sonucu, deneysel test yapılarak elde edilen dayanım sonucuna en yakın değeri vermiştir.



Şekil 2.3. Doğrulama çalışması için kullanılan CHS T- birleşiminin genel yerleşim planı (Fung vd., 2016)

Bu şekilde;

- D : Başlık elemanı çapını
- d : Örgü elemanı çapını
- T : Başlık elemanı et kalınlığını
- t : Örgü elemanı et kalınlığını
- L : Başlık elemanı uzunluğunu
- l : Örgü elemanı uzunluğunu

göstermektedir.

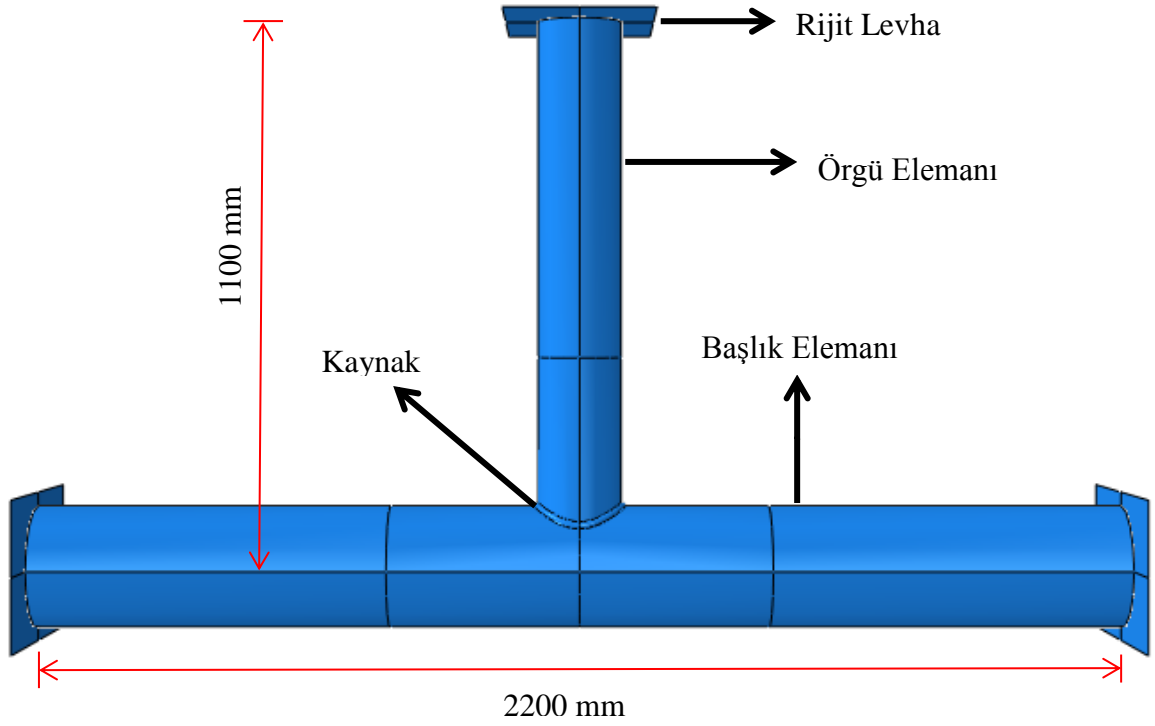
Boyutsuz parametre β , örgü elemanı çapının başlık elemanı çapına oranıdır (d/D). θ ise başlık elemanı ile örgü elemanı arasında kalan açıdır. Tablo 2.1’de doğrulama çalışmasında kullanılmış olan Fung vd. (2016)’nin CHS-T birleşimine ait test numunesinin geometrik özelliklerini göstermektedir.

Tablo 2.1. Doğrulama çalışmasında kullanılan CHS-T birleşiminin boyutları (Fung vd., 2016)

Birleşim Adı	$D(\text{mm})$	$d(\text{mm})$	$T(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	$\beta(d/D)$	$L(\text{mm})$	$l(\text{mm})$	θ
CHS-T	244.5	168.3	6.3	6.3	0.69	2200	1100	90

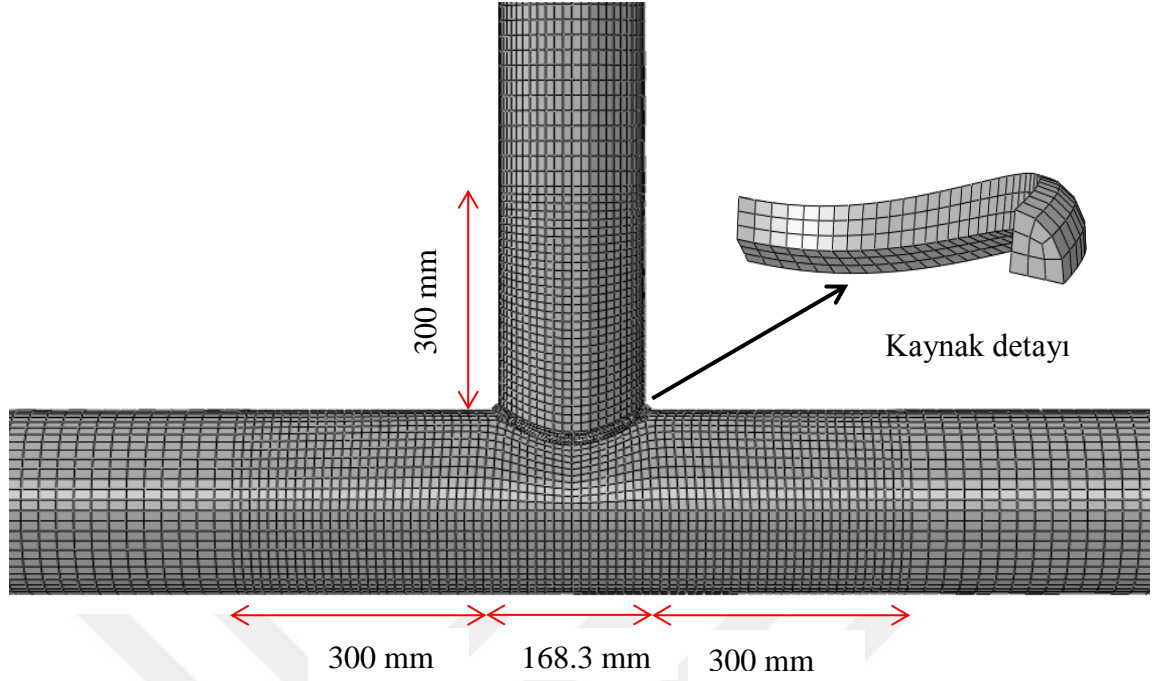
2.1.2.1. Doğrulama Modeli

Şekil 2.4'te sonlu elemanlar programı kullanılarak oluşturulan doğrulama modeli gösterilmektedir. Doğrulama modelinde ve 4. bölümde yapılan sayısal analizlerde başlık elemanı ile örgü elemana rijit levhalar eklenmiştir. Rijit levhaların eklenme amacı; birleşimin sınır koşullarını tanımlayabilmek, örgü elemanına düzlem içi eğilme momentini etki ettirebilmek, başlık ve örgü elemanının uç kısımlarının rijit bir şekilde çalışmasını sağlayabilmek içindir.



Şekil 2.4. CHS T-birleşiminin sonlu eleman programı kullanılarak modellenmiş hali

Şekil 2.5'te doğrulama modelinin sonlu eleman ağ aralıklarına bölünmüş hali gösterilmektedir.

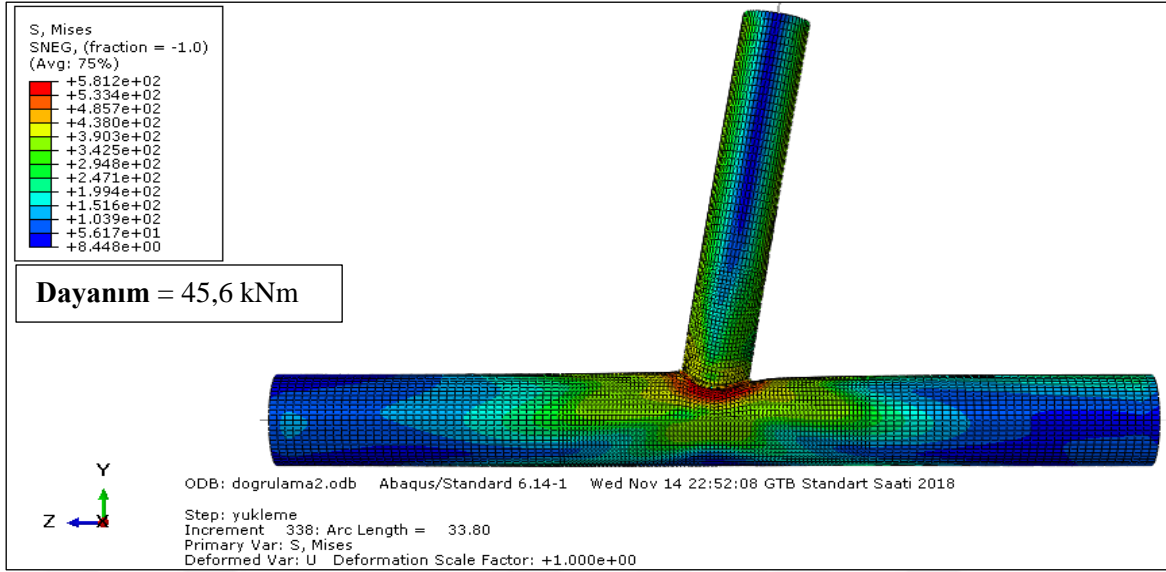


Şekil 2.5. CHS T- birleşiminin sonlu eleman ağ aralıklarına bölünmüş hali

2.1.2.2. Doğrulama Sonuçları

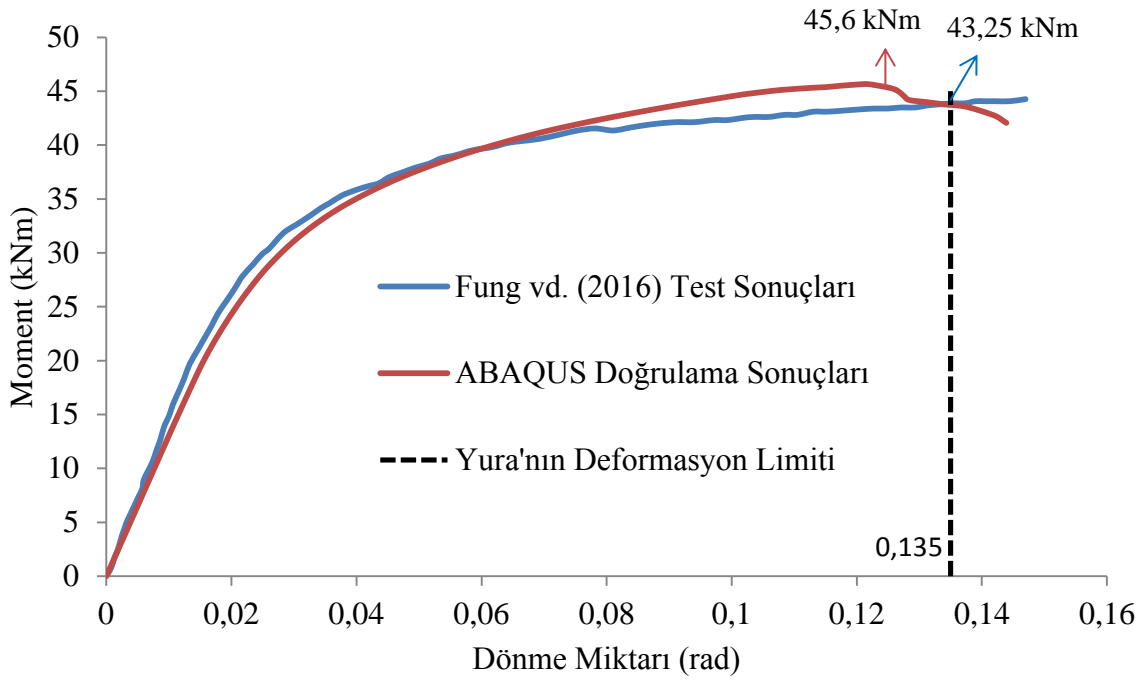
Fung vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen düzlem içi eğilme momentine maruz kalmış CHS T- birleşimleri üzerine yapılmış çalışmadan elde edilen test sonuçları ile doğrusal olmayan sonlu elemanlar paket programı kullanılarak oluşturulmuş CHS T- birleşiminden elde edilen moment- dönme eğrileri, Şekil 2.7’de karşılaştırılmıştır. Ayrıca Yura vd. (1980) tarafından belirlenen eğilme elemanları için dönme sınırlaması da Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

Şekil 2.6’da CHS T-birleşiminin düzlem içi eğilme momenti etkisiyle başlık elemanında plastikleşmeden ötürü oluşan göçme mekanizması görülmektedir. Sayısal sonuçlardan elde edilen göçme tipi, Fung vd. (2016) tarafından elde edilen göçme tipi ile aynıdır.



Şekil 2.6. CHS T-birleşiminin düzlem içi eğilme momenti etkisi altında göçmüş hali

Şekil 2.7’de görüleceği üzere Fung vd. (2016) yaptığı test sonuçları ile sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiş sayısal modelin doğrulama sonuçları birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Dahası Fung vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen test sonucuna göre CHS T- birleşimi düzlem içi eğilme etkisiyle yüklenmeye devam etmiştir ve bu durumda Yura’nın deformasyon limitine karşılık gelen moment değeri olan 43.25 kNm birleşimin dayanım değeri olarak kabul edilmiştir. Sonlu elemanlar programı kullanılarak oluşturulmuş sayısal modelde ise birleşim Yura’nın deformasyon limit değerine ulaşmadan akmaya başlamış olup bu durumda akmaya karşılık gelen moment değeri 45.6 kNm birleşimin dayanım değeri olarak kabul edilmiştir. Buda yapılan doğrulama çalışmasının hata oranının, öngörülebilir hata payı olan %5’den küçük olduğunu (%0,95) göstermiştir. Hata payının öngörülebilir sınırlar içerisinde olup aynı zamanda bu kadar küçük olması bu yüksek lisans tez kapsamında, sayısal analizlerden doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 2.7. Fung vd. (2016) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen test sonuçları ile sonlu elemanlar programı kullanılarak oluşturulan doğrulama modelinden elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması

2.1.3. Sonuçlar

Yapılan bu doğrulama çalışmasından elde edilen sonuçlar, EHS çelik T- birleşimlerin davranışlarını belirlemede kullanılacak eleman türü, malzeme özelliği, sonlu eleman ağ aralığı, doğrusal olmayan analizlerde ele alınan zaman aralığı gibi parametrelere uygunluğunu ortaya koymuştur. Bu kapsamda yapılacak sayısal analizlerde kullanılacak EHS çelik T- birleşimlerinin;

- Örgü ve başlık elemanları için 8 düğüm noktalı üç boyutlu kabuk eleman (S8R) tercih edilmiştir.
- Kaynak modeli için 20 düğüm noktalı üç boyutlu eleman (C3D20) tercih edilmiştir.
- Kaynak modeli için sonlu eleman ağ aralığı 5 mm olarak alınmıştır.
- Birleşim bölgelerinde; başlık ve örgü elemanı için sonlu eleman ağ aralığı, başlık ve örgü elemanının et kalınlığı ile eşit, diğer bölgelerde ise sonlu eleman ağ aralığı başlık ve örgü elemanlarının et kalınlığının iki katı olarak alınmıştır.

2.2. Sayısal Analizler

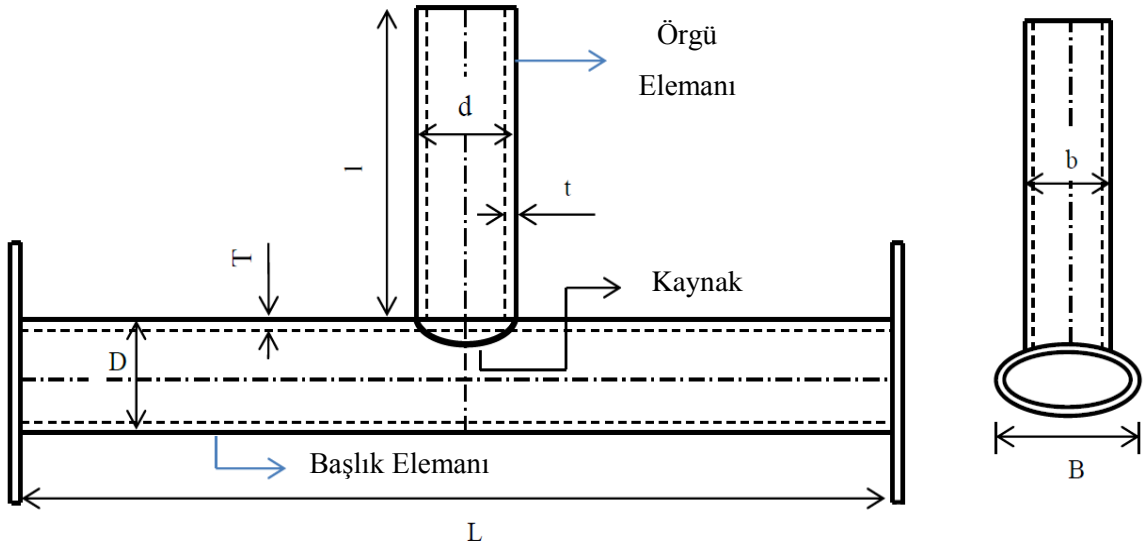
Yapılan doğrulama çalışmasından elde edilen sonuçlar ışığında doğrulanmış modelde kullanılan; sonlu eleman tipi, malzeme özelliği, sonlu eleman ağ aralığı, doğrusal olmayan analizlerde ele alınan zaman adımı gibi parametreler EHS çelik T- birleşimleri için yapılacak sayısal analizlerde de kullanılmıştır.

Bu bölümde sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak sayısal analizler yapılmış ve EHS çelik T- birleşimlerinin davranış şekillerine etki edebilecek parametreler incelenmiştir. Bu doğrultuda; geometrik değişkenleri (enkesit boyutları ve profil et kalınlığı), farklı oryantasyon tipleri, örgü elemanına uygulanan eğilme momenti miktarının EHS T- birleşimlerinin dayanımlarına ve göçme modlarına etkileri araştırılmıştır.

ÇYTYE, Eurocode ve CIDECT yönetmeliklerden alınan formüller yardımıyla EHS çelik T- birleşimlerin düzlem içi eğilme etkisi altında dayanımları, eşdeğer RHS metoduyla analitik olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlarla yönetmeliklerden elde edilen analitik sonuçlar karşılaştırılarak eşdeğer RHS yönteminin, düzlem içi eğilmeye maruz kalan elips enkesitli birleşimlerin dayanımlarını belirlemek için uygun olup olmadığı araştırılmıştır. Yapılan sayısal ve analitik analizlerden elde edilen bulgular yardımıyla düzlem içi eğilmeye maruz kalan EHS çelik T- birleşimlerin dayanımlarını hesaplamak için analitik bir hesap yöntemi önerilmiştir.

2.2.1. Kullanılan Parametreler

Profil enkesit boyutları, profil et kalınlığı, başlık elemanı uzunluğu, örgü elemanı uzunluğu, farklı oryantasyon tipleri, örgü elemanına uygulanan eğilme momenti miktarı sayısal analizlerde dikkate alınacak parametreler olarak sıralanır. Şekil 2.8'de tipik bir EHS T- birleşiminin geometrik özellikleri ve boyutları gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Tipik bir EHS T-birleşiminin genel yerleşim planı ve geometrik boyutları (Özyurt, 2018b)

Şekil 2.8'de gösterilen;

- D ; Başlık elemanının birleşim düzlemine paralel çapını
- B ; Başlık elemanının birleşim düzlemine dik çapını
- L ; Başlık elemanı uzunluğunu
- T ; Başlık elemanı et kalınlığını
- d ; Örgü elemanının birleşim düzlemine paralel çapını
- b ; Örgü elemanının birleşim düzlemine dik çapını
- l ; Örgü elemanı uzunluğunu
- t ; Örgü elemanı et kalınlığını

göstermektedir.

Elips enkesitli profiller, geometrik özellikleri bakımından küçük ve büyük çapa sahip oldukları için bu profillerden oluşan birleşimlerin 4 farklı oryantasyon tipi vardır. Bu kapsamda farklı geometrik boyutlardan oluşan 6 farklı birleşimden elde edilen toplam 19 oryantasyon türü sayısal analizlerle sonlu elemanlar programında modellenerek analiz edilmiştir. Aşağıda verilen Tablo 2.2'de sayısal analizlerde kullanılan birleşimlerin geometrik özellikleri verilmiştir. 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı birleşimlerin 4 numaralı oryantasyon tipleri geometrik olarak oluşmamıştır. Çünkü bu birleşimlerin Tablo 2.2'de görüldüğü gibi başlık elemanlarının birleşim düzlemine dik çapları (B), örgü elemanlarının birleşim düzlemine dik çaplarına (b) eşit veya bu çaplardan küçük olduğu için bu birleşimlerin 4 numaralı oryantasyon tipleri oluşmamıştır. Bu yüzden belirtilen bu profiller

her iki hesaba da dahil edilmemiştir. Tüm birleşim ve oryantasyonlarının kaynak kalınlıkları yönetmeliğe göre belirlenmiştir. Bu kapsamda, S355 çeliği için kaynak kalınlığı; farklı et kalınlıklarına sahip başlık ve örgü elemanlarında et (cidar) kalınlığı küçük olanın 1,1 katı alınırken, aynı et kalınlığına sahip başlık ve örgü elemanları için kaynak kalınlığı et (cidar) kalınlığının 1,1 katı alınmıştır.

Tablo 2.2. Sayısal analizlerde ve analitik hesaplamalarda kullanılan birleşimlerin geometrik özellikleri

Birleşim Adı	Başlık Elemanı Boyutları				Örgü Elemanı Boyutları			
	B (mm)	D (mm)	T (mm)	L (mm)	b (mm)	d (mm)	t (mm)	l (mm)
ET 1.1	300	150	8	3000	125	250	8	1500
ET 2.1	300	150	8	3000	250	125	8	1500
ET 3.1	150	300	8	3000	125	250	8	1500
ET 1.2	300	150	8	3000	100	200	8	1200
ET 2.2	300	150	8	3000	200	100	8	1200
ET 3.2	150	300	8	3000	100	200	8	1200
ET 1.3	300	150	8	3000	75	150	8	900
ET 2.3	300	150	8	3000	150	75	8	900
ET 3.3	150	300	8	3000	75	150	8	900
ET 1.4	300	150	8	3000	125	250	6,3	1500
ET 2.4	300	150	8	3000	250	125	6,3	1500
ET 3.4	150	300	8	3000	125	250	6,3	1500
ET 1.5	300	150	8	3000	125	250	12,5	1500
ET 2.5	300	150	8	3000	250	125	12,5	1500
ET 3.5	150	300	8	3000	125	250	12,5	1500
ET 1.6	400	200	8	4000	75	150	8	900
ET 2.6	400	200	8	4000	150	75	8	900
ET 3.6	200	400	8	4000	75	150	8	900
ET 4.6	200	400	8	4000	150	75	8	900

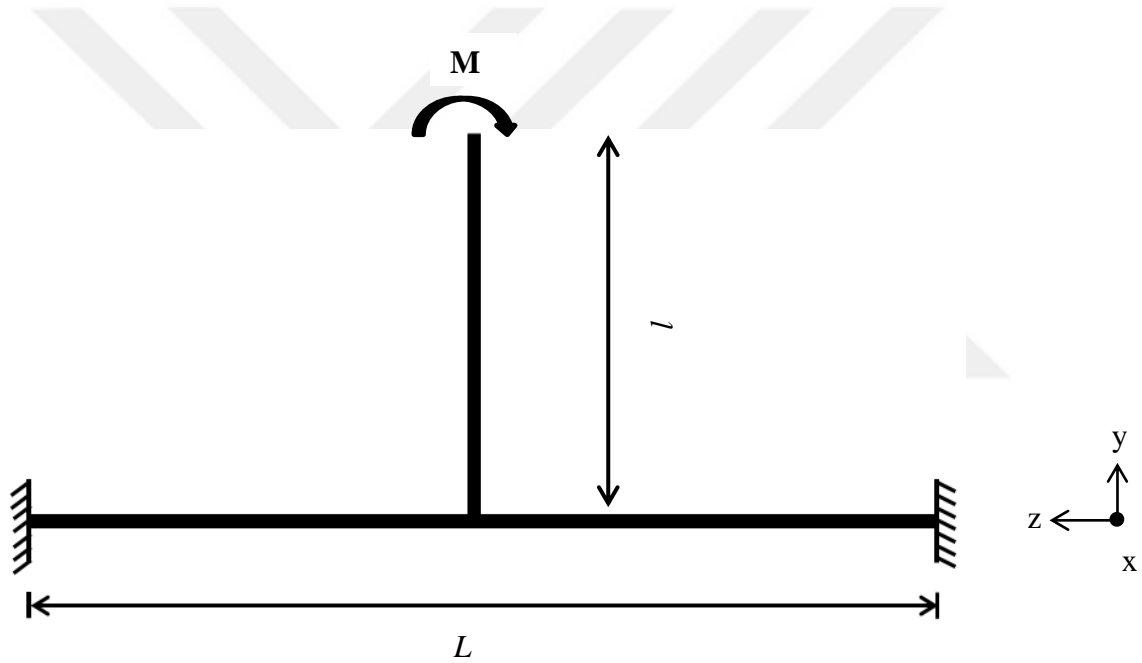
Tabloda verilen birleşim adlarında; örnek olarak, ET 1.1 sembolünde, E harfi elips en kesiti, T harfi birleşim tipini, ilk rakam oryantasyon türünü, son rakam ise birleşim numarasını temsil etmektedir. Bu sıralamaya göre diğer birleşim adları da aynı şekilde temsil edilmektedir.

2.2.2. Malzeme özellikleri ve Mesnet Koşulları

Bu bölümde yapılan tüm sayısal analizlerde S355 çelik sınıfı kullanılmıştır. S355 çeliğinin; karakteristik akma gerilmesi (f_y) 355 N/mm², karakteristik çekme dayanımı

(f_u) 510 N/mm² varsayılmıştır. Çeliğin elastisite modülü (E) 210000 N/mm² ve poisson oranı (ν) 0.3 olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca doğrulma çalışmasında olduğu gibi sayısal analizlerde de (2.1) ve (2.2) numaralı denklemler yardımıyla bulunan değerler ile dönüştürme işlemi yapılarak, ABAQUS’de tanımlanacak olan malzeme özelliklerine dönüştürülmüş gerilme-birim uzama eğrisi girilmiştir. Çünkü ABAQUS kullanılarak doğrusal olmayan analizlerin yapılması, bu dönüştürme işlemi yapılmadan mümkün olmamaktadır.

Sayısal analizler kapsamında kullanılan EHS çelik T-birleşimlerinin başlık elemanı iki ucu ankastre mesnetten, örgü elemanı ise bir ucu düzlem içi çalışmaya uygun olabilecek şekilde gerekli serbestlikler sınırlandırılmış olup aşağıda Şekil 2.9’da gösterilmektedir.



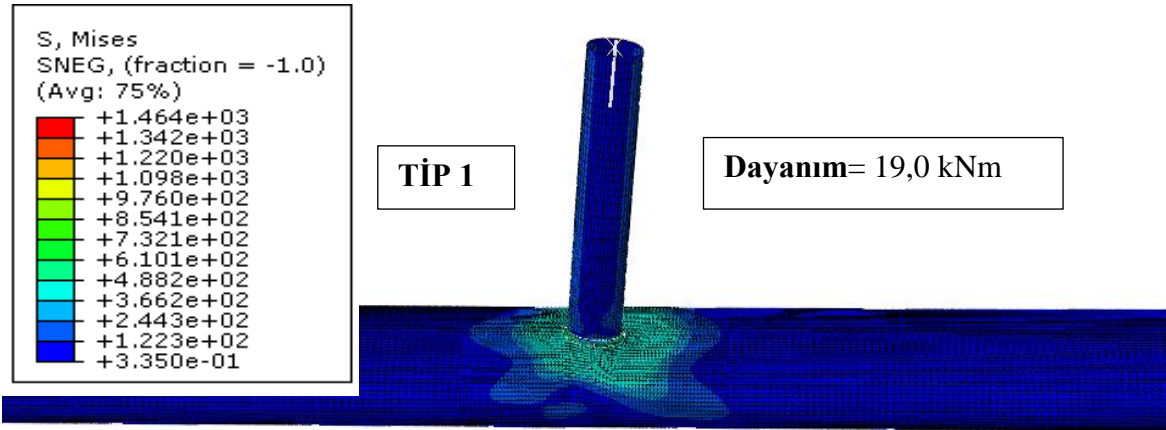
Şekil 2.9. Sayısal analizlerde kullanılan EHS çelik T- birleşimlerinin mesnet koşulları

2.2.3. Analiz Sonuçları

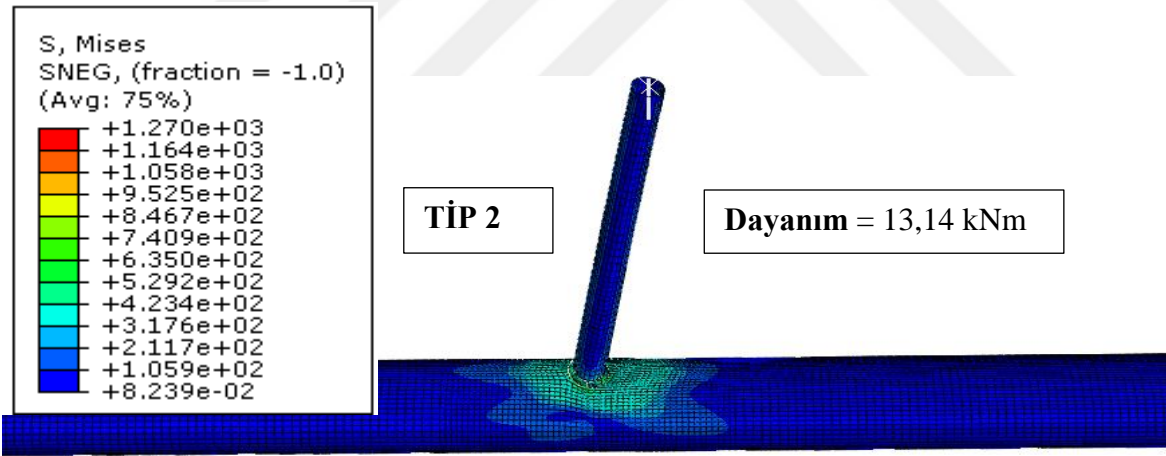
Tablo 2.2’de geometrik boyutları verilen EHS T- birleşimleri, sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve düzlem içi eğilme momenti etkisi altında dayanımları ve göçme modları belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında Yura’nın maksimum dönme sınırı ($\varphi_{yura} = 80f_y/E = 0,135$ rad) dikkate alınmıştır.

Sayısal analizlerden elde edilen sonuçlara göre, tüm birleşim türü ve oryantasyonları için, başlık elemanının birleşim bölgesinde plastik mafsallaşmalardan ötürü göçme olduğu

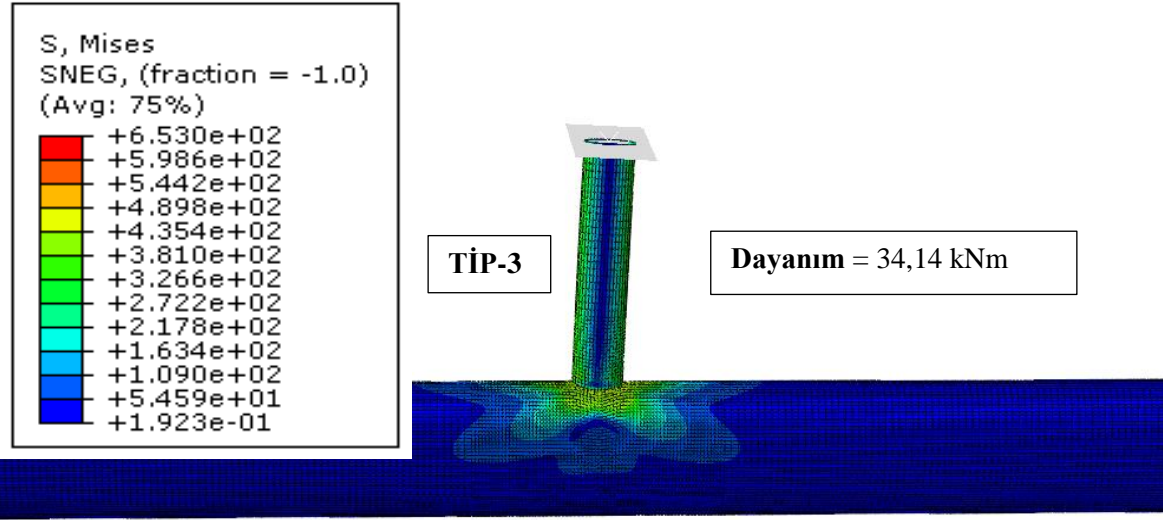
gözlemlenmiştir. Aşağıda, ET 1-6, ET 2-6, ET 3-6, ET 4-6 birleşimlerinin göçmeden sonraki şekil değiştirmeleri örnek olarak sunulmuştur. Bütün şekillerden de görüleceği gibi, göçme modu, oryantasyon tipinden bağımsız olarak, birleşim bölgesinde meydana gelen yüksek deformasyonlar sonucu oluşan plastikleşme olarak gözlemlenmektedir.



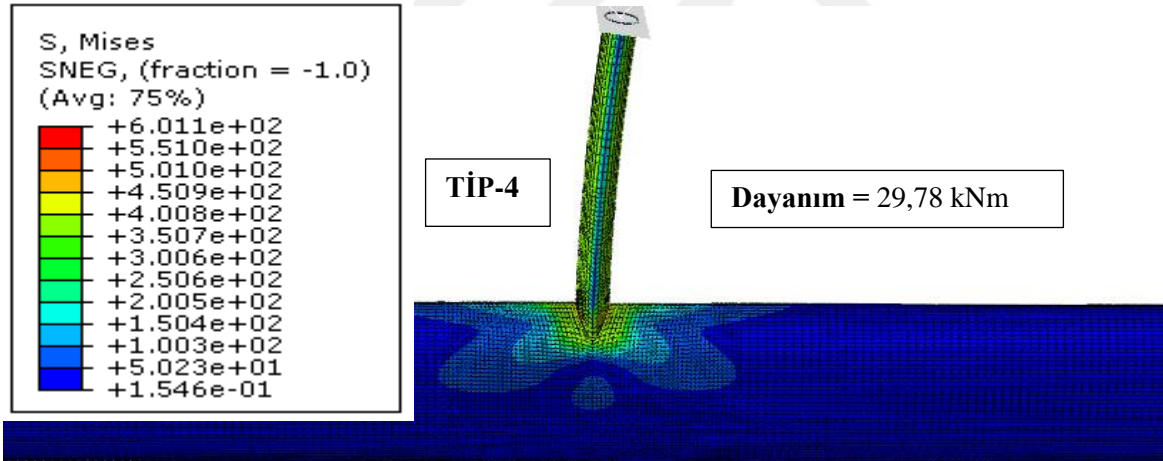
Şekil 2.10. ET 1-6 birleşiminde göçmeden sonra meydana gelen şekil değişimi



Şekil 2.11. ET 2-6 birleşiminde göçmeden sonra meydana gelen şekil değişimi

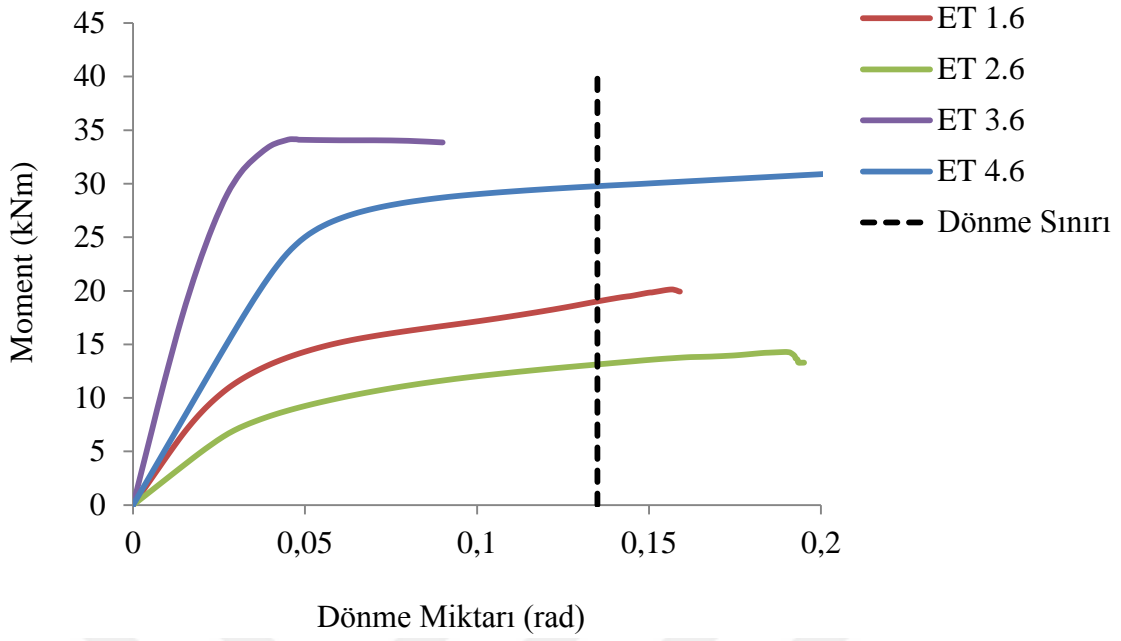


Şekil 2.12. ET 3-6 birleşiminde göçmeden sonra meydana gelen şekil değişimi



Şekil 2.13. ET 4-6 birleşiminde göçmeden sonra meydana gelen şekil değişimi

Şekil 2.14'de, örnek olarak 6 nolu birleşimin farklı oryantasyonlarının (ET 1-6, ET 2-6, ET 3-6, ET 4-6) moment-dönme miktarı grafiği verilmiştir. Şekil 2.14'den görüleceği üzere birleşimlerin dayanımları büyükten küçüğe doğru; ET 3-6 (Tip-3), ET 4-6 (Tip-4), ET 1-6 (Tip-1), ET 2-6 (Tip-2) şeklinde sıralanmaktadır. Bu durumun sebebi; düzlem içi eğilme durumuna göre, 3 ve 4 numaralı oryantasyon tiplerinin ataletleri, 1 ve 2 numaralı oryantasyon tiplerinin ataletlerine göre fazla olmasıdır. Çünkü, 3 ve 4 numaralı oryantasyon tiplerinin başlık elemanları güçlü ekseninde çalışırken 1 ve 2 numaralı başlık elemanlarının başlık elemanları zayıf ekseninde çalışır.



Şekil 2.14. ET 1-6, ET 2-6, ET 3-6, ET 4-6 birleşimlerinin moment- dönme grafiği

Literatür araştırmalarından elde edilen bilgilere göre en kritik göçme modu başlık elemanında plastikleşme olarak belirtilmektedir. Ancak bu en kritik göçme modunun elde edilebilmesi için, yönetmeliklerde belirtilen geometrik sınırlamalara (örneğin, örgü elemanı enkesit boyutunun başlık elemanının enkesit boyutuna oranı 0,85 değerinden küçük olması) ve kaynakta herhangi bir kopmanın veya kırılmanın önlenmesi (kaynak kalınlığının yönetmelikte belirtilen değerlerden az olmaması) gerekmektedir.

Parametrik çalışma sonucu olarak elde edilen EHS T- birleşimlerinin maksimum düzlem içi eğilme momenti dayanımları Tablo 2.3'te sunulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen dayanım değerlerine göre, maksimum eğilme momenti değeri Tip 3 ve 4 oryantasyonları için elde edilmiştir. Çünkü bu oryantasyonlarda, başlık elemanı güçlü ekseninde çalışır ve göçme modu başlık elemanında plastikleşmedir. Tip 1 ve 2 için ise başlık elemanı zayıf ekseninde çalıştığı için eğilme momenti dayanımları Tip 3 ve 4'e göre daha azdır.

Tablo 2.3. EHS T-birleşimlerinin sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilen sayısal analiz sonuçları

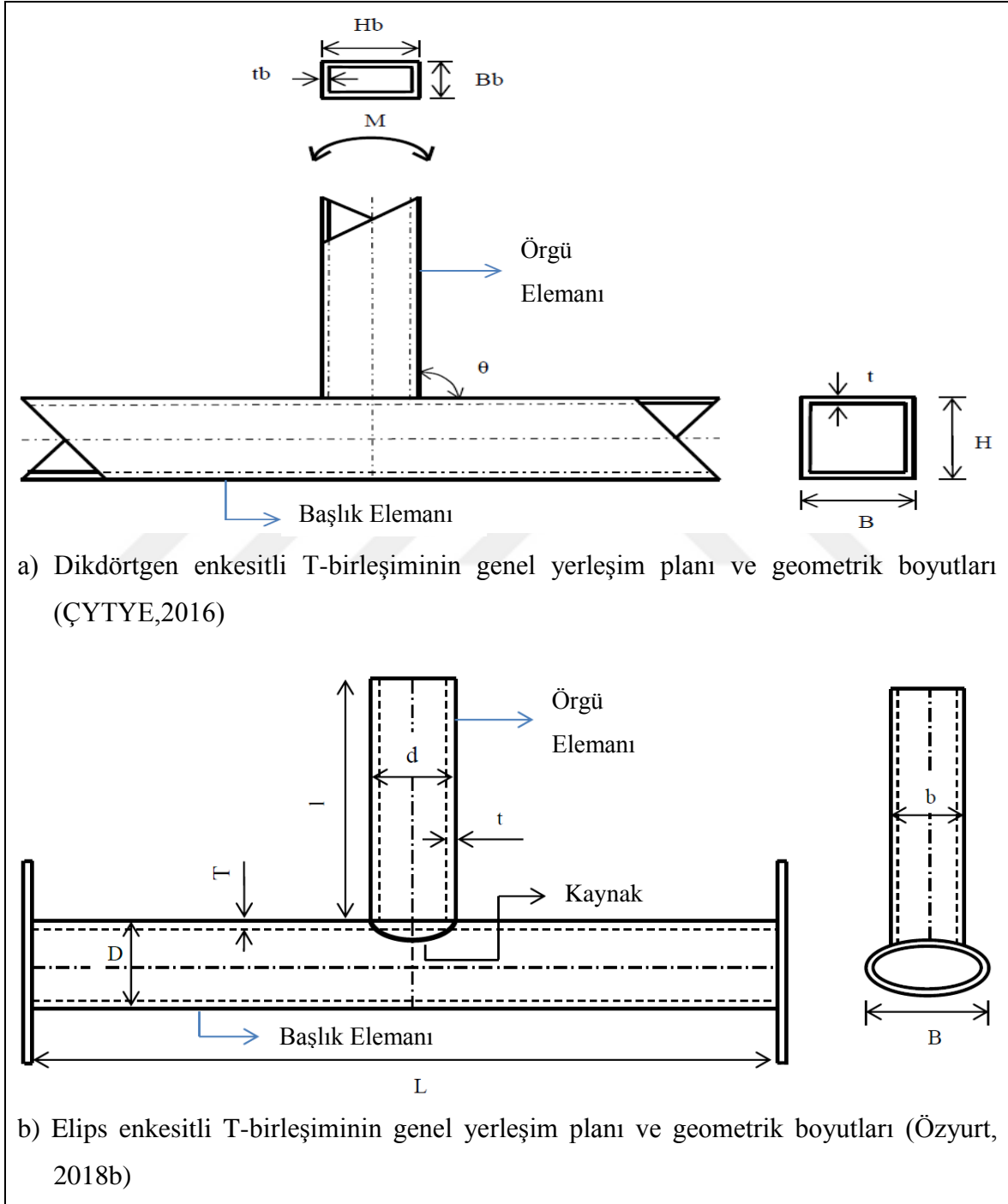
Birleşim Adı	Sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilen sayısal analiz sonuçları (kNm)
ET 1.1	40,5
ET 2.1	47,09
ET 3.1	140,9
ET 1.2	35,6
ET 2.2	28,3
ET 3.2	88,1
ET 1.3	22,2
ET 2.3	17,2
ET 3.3	46,8
ET 1.4	49,8
ET 2.4	47,6
ET 3.4	112,4
ET 1.5	53,7
ET 2.5	55,2
ET 3.5	168,9
ET 1.6	19,0
ET 2.6	13,14
ET 3.6	34,14
ET 4.6	29,78

Ayrıca, modellerde kullanılan geometrik özelliklere dikkat edilerek dayanımların karşılaştırılmasında ise; 1, 2 ve 3 numaralı birleşimlerin tüm oryantasyon türlerinin başlık elemanlarının boyutları sabit tutulup örgü elemanlarının büyük ve küçük çapları küçüldüğünde dayanım değerinin de azaldığı görülmüştür. Örneğin; 1, 2 ve 3 numaralı birleşimlerin 1. oryantasyon türlerinin dayanım sonuçları Tablo 2.3'te incelendiğinde, dayanım değerlerinin büyükten küçüğe doğru sırasıyla ET 1.1, ET 1.2, ET 1.3 şeklinde olduğu görülmektedir. Bu durum, 1, 2 ve 3 numaralı birleşimlerin 2. ve 3. oryantasyon türleri için de benzerdir. Dolayısıyla, aynı geometrik özelliklere sahip başlık elemanı ile birleştirilmiş örgü elemanı boyutlarındaki artış ve azalış düzlem içi eğilme momenti etkisindeki EHS T-birleşimlerinin dayanımlarını etkilediği sonucuna varılmıştır.

2.2.4. Mevcut Yönetmeliklere Göre Elde Edilen Sonuçlar

ÇYTYE, Eurocode ve CIDECT yönetmeliklerde düzlem içi eğilmeye maruz kalmış dikdörtgen enkesitli T- birleşimlerinin dayanımlarını belirlemek için kullanılan formüller,

eşdeğer RHS yöntemiyle elips enkesitli birleşimlerin dayanımlarını analitik olarak belirlemek için kullanılmıştır. Aşağıda verilen Şekil 2.15'te eşdeğer RHS yöntemine göre dikdörtgen enkesitli T- birleşiminin geometrik boyutlarının simgesel olarak, elips enkesitli T- birleşiminin geometrik boyutlarına karşılık gelen ifadeleri verilmiştir.



Şekil 2.15. Dikdörtgen ve elips enkesitli T-birleşimlerinin birbirlerine karşılık gelen geometrik boyutları

Şekil 2.15'e göre dikdörtgen enkesitli T- birleşiminde,

- H_b ; elips enkesitli T- birleşiminde (d)'ye
 B_b ; elips enkesitli T- birleşiminde (b)'ye
 t_b ; elips enkesitli T- birleşiminde (t)'ye
 B ; elips enkesitli T- birleşiminde (B)'ye
 H ; elips enkesitli T- birleşiminde (D)'ye
 t ; elips enkesitli T- birleşiminde (T)'ye
karşılık gelmektedir.

Mevcut yönetmeliklerdeki formüller kullanılarak yapılan analitik hesapların işlem adımlarının nasıl yapıldığını göstermek için örnek olarak 2 numaralı birleşimin 1 nolu oryantasyon tipi (ET 1.2) seçilmiştir. 2 numaralı birleşimin 1 numaralı oryantasyonunun geometrik boyutları yukarıda verilen Tablo 2.2'de mevcuttur.

2.2.4.1. ÇYTYE'ye Göre Hesap

ET 1.2 için;

İlk olarak denklem (2.3)'de verilen β değerinin hangi aralıklarda olduğuna bakılarak yönetmelikte belirtilen sınırlar içerisinde olup olmadığı tespit edilir.

$$\beta = \frac{b}{B} = \frac{100}{300} = 0,333 \leq 0,85 \quad (2.3)$$

En kritik göçme modu olan, başlık elemanı kenar enkesit parçasında plastikleşmeye göre hesap yapılır ve aşağıda verilen denklem (2.4) yardımıyla birleşimin karakteristik eğilme momenti dayanımı belirlenir.

$$M_n = F_y t^2 d \left[\frac{1}{2\eta} + \frac{1}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{\eta}{(1-\beta)} \right] Q_f \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'de verilen Q_f başlık elemanı gerilme etkileşim parametresidir. Bu yüksek lisans tezi kapsamında kullanılan profillerin başlık elemanlarına herhangi bir basınç

veya çekme yükü etkilmediği için Q_f denklem (2.4)'te göz ardı edilerek analitik hesap yapılır.

Denklem (2.4)'te verilen η değeri denklem (2.5)'te verildiği gibi hesaplanır;

$$\eta = \frac{d}{B \times \sin\theta} = \frac{200}{300 \times \sin 90} = 0,667 \quad (2.5)$$

Bilinmeyen değerler denklem (2.3) ve denklem (2.5)'ten elde edildikten sonra denklem (2.4)'te yerine yazılarak elips enkesitli 1 numaralı T-birleşimin 2. oryantasyon türünün (ET 1.2) düzlem içi eğilme momenti altındaki dayanımı hesaplanır.

$$M_n = 355 \times 8^2 \times 200 \times \left[\frac{1}{2 \times 0,667} + \frac{1}{\sqrt{1-0,333}} + \frac{0,667}{(1-0,333)} \right] = 13514146,76 \text{ Nmm} = 13,51 \text{ kNm}$$

Bu formüle göre ET 1.2'nin eğilme momenti dayanımı 13,51 kNm olarak bulunmuştur.

2.2.4.2. Eurocode ve CIDECT Yönetmeliklerine Göre Hesap

ET 1.2 için:

Eurocode EN 1993-1-8 (CEN, 2005) ve CIDECT (2009) yönetmeliklerinde denklem (2.3) ve (2.5)'in hesaplama şekli Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Esasları Yönetmeliği (ÇYTYE, 2016) ile aynıdır. Bu yüzden en kritik göçme modu olan başlık elemanı kenar enkesit parçasında plastikleşmeye göre ET 1.2 birleşiminin düzlem içi eğilme momenti dayanımı değeri aşağıda denklem (2.6)'da verilmiştir.

$$M_n = F_y t^2 d \left[\frac{1}{2\eta} + \frac{2}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{\eta}{(1-\beta)} \right] Q_f \quad (2.6)$$

Denklem 2.6’da bilinmeyen değerler yerine yazılarak elips enkesitli 1 numaralı T-birleşimin 2. oryantasyon türünün (ET 1.2) düzlem içi eğilme momenti altındaki dayanımı hesaplanır.

$$M_n = 355 \times 8^2 \times 200 \times \left[\frac{1}{2 \times 0,667} + \frac{2}{\sqrt{1-0,333}} + \frac{0,667}{(1-0,333)} \right] = 19077996,67 \text{ Nmm} = 19,08 \text{ kNm}$$

Bu formüle göre Eurocode ve CIDECT yönetmeliklerinde ET 1.2’nin eğilme momenti dayanımı 19,08 kNm olarak bulunur.

Bu şekilde bütün birleşim ve oryantasyonları için analitik hesaplamalar; ÇYTYE, Eurocode ve CIDECT yönetmeliklerine göre yapılmış olup Tablo 2.4’te sayısal analizlerden elde edilmiş dayanımlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalardan görüleceği üzere, mevcut yönetmelikler, sayısal analizlerden elde edilen dayanımlara göre önemli derecede daha düşük dayanım tahminlerinde bulunmuşlardır. ÇYTYE’ye göre dayanım tahminleri ise Eurocode ve CIDECT tahminlerine göre gerçek dayanıma daha uzak değerler vermektedir. Bu durum, ekonomik olmayan tasarıma mühendisleri yönlendirecektir.

Bu tez çalışmasının literatürdeki boşluğu doldurulmasındaki en önemli amaçlardan biri olan bu dayanım tahminlerinin incelenmesi olup, eğer değilse yeni ve güvenli bir yöntem önerilerek EHS T-birleşimlerinin düzlem içi eğilme durumunda dayanımlarının hesaplanmasıdır.

Tablo 2.4. ÇYTYE, Eurocode ve CIDECT yönetmeliklerindeki formüller kullanılarak elde edilen analitik sonuçların sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilen sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılması

Birleşim Adı	Sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilen sayısal analiz sonuçları (kNm)	Yönetmeliklerden Elde Edilen Sonuçlar	
		ÇYTYE (kNm)	Eurocode ve CIDECT Yönetmelikleri (kNm)
ET 1.1	40,5	18,96	26,39
ET 2.1	47,09	17,46	24,42
ET 3.1	140,9	72,42	86,33
ET 1.2	35,6	13,51	19,08
ET 2.2	28,3	9,61	13,55
ET 3.2	88,1	27,75	35,62
ET 1.3	22,2	9,61	13,55

Tablo 2.4. (devamı)

ET 2.3	17,2	6,67	9,07
ET 3.3	46,8	13,34	18,15
ET 1.4	49,8	18,96	26,39
ET 2.4	47,6	17,46	24,42
ET 3.4	112,4	72,42	86,33
ET 1.5	53,7	18,96	26,39
ET 2.5	55,2	17,46	24,42
ET 3.5	168,9	72,42	86,33
ET 1.6	19,0	9,89	13,67
ET 2.6	13,14	7,21	9,36
ET 3.6	34,14	10,67	14,98
ET 4.6	29,78	8,23	11,64

2.2.5. Önerilen Tasarım Metodu

ÇYTYE, Eurocode ve CIDECT yönetmeliklerde düzlem içi eğilmeye maruz kalmış dikdörtgen enkesitli T-birleşimlerinin dayanımlarını hesaplamak için sunulan denklemler mevcuttur. Ancak, bahsedilen yönetmeliklerdeki hesap yöntemlerinden elde edilen sonuçlar, sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında büyük oranda tutarsızlıklar mevcuttur. Bu yüzden, parametrik çalışmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda, mevcut yönteme bir katsayı eklenip, düzlem içi eğilmeye maruz kalmış EHS T birleşimlerin dayanımları güvenli olarak hesaplanması mümkün olacaktır.

Daha önce bahsedildiği gibi, EHS T birleşimlerine ait Tip 1 ve 2'nin dayanımları ile Tip 3 ve 4'ün dayanımları başlık elemanın çalıştığı zayıf veya kuvvetli ekseni bağlı olarak benzer davranışlar göstermişlerdir. Bu yüzden, önerilen tasarım yönteminde, bu ikili oryantasyonları için ayrı ayrı tasarım yöntemi geliştirilmiştir.

Önerilen tasarım metodunda, çoklu regresyon analizi sonucu elde edilen ψ katsayısı mevcut yönetmeliklerden elde edilen dayanımlara çarpan olarak eklenmiştir. Bu çoklu regresyon analizinde; η , β , D ve t değerleri değişken, sayısal analiz sonuçlarının analitik sonuçlara oranları ise bağımlı olan parametrelerdir.

2.2.5.1. Tip 1 ve Tip 2 Oryantasyonları İçin Önerilen Yöntem

Tip 1 ve 2 oryantasyonları, başlık elemanının zayıf ekseninde çalıştığı durumdur. Tablo 2.5'te EHS T-birleşimlerinin Tip 1 ve Tip 2 oryantasyonlarına ait sayısal analiz

sonuçlarının, yönetmelik sonuçlarına oranları ve regresyon analizinde kullanılan değişken parametreleri görülmektedir.

Tablo 2.5. Sayısal analiz sonuçlarının yönetmelik sonuçlarına oranları ve regresyon analizinde kullanılan değişken parametreler (Tip 1 ve Tip 2 için)

	SE sonuçları / ÇYTYE sonuçları	SE sonuçları / CIDECT-Eurocode sonuçları	$\eta = \frac{d}{B}$	$\beta = \frac{b}{B}$	D	t
ET 1.1	2,14	1,53	0,83	0,42	150	8
ET 2.1	2,70	1,93	0,42	0,83	150	8
ET 1.2	2,64	1,87	0,67	0,33	150	8
ET 2.2	2,94	2,09	0,33	0,67	150	8
ET 1.3	2,31	1,64	0,50	0,25	150	8
ET 2.3	2,58	1,90	0,25	0,50	150	8
ET 1.4	2,63	1,89	0,83	0,42	150	6.3
ET 2.4	2,73	1,95	0,42	0,83	150	6.3
ET 1.5	2,83	2,03	0,83	0,42	150	12.5
ET 2.5	3,16	2,26	0,42	0,83	150	12.5
ET 1.6	1,92	1,39	0,38	0,19	200	8
ET 2.6	1,82	1,40	0,19	0,38	200	8

ÇYTYE yönetmeliği için regresyon analizi sonucunda, regresyon istatistiklerinde R kare 0,97 için önerilen katsayı (ψ) denklem (2.7)'de sunulmuştur.

$$\psi = 3,68 - 0,12 * \eta + 0,65 * \beta - 0,012 * D + 0,063 * t \quad (2.7)$$

Eurocode ve CIDECT yönetmelikleri için yapılan regresyon analizi sonucunda, regresyon istatistiklerinde R kare 0,94 için önerilen katsayı (ψ) ise denklem 2.8'de sunulmuştur.

$$\psi = 2,51 - 0,12 * \eta + 0,46 * \beta - 0,008 * D + 0,046 * t \quad (2.8)$$

2.2.5.2. Tip 3 ve Tip 4 Oryantasyonları İçin Önerilen Yöntem

Tip 3 ve 4 oryantasyonları, başlık elemanının kuvvetli ekseninde çalıştığı halidir. Tablo 2.6'da EHS T-birleşimlerinin Tip 3 ve Tip 4 oryantasyonlarının sayısal analiz sonuçlarının,

yönetmelik sonuçlarına oranları ve regresyon analizinde kullanılan değişken parametreleri göstermektedir.

Tablo 2.6. Sayısal analiz sonuçlarının yönetmelik sonuçlarına oranları ve regresyon analizinde kullanılan değişken parametreler (Tip 3 ve Tip 4 için)

	SE sonuçları / ÇYTYE sonuçları	SE sonuçları / CIDECT-Eurocode sonuçları	$\eta = \frac{d}{B}$	$\beta = \frac{b}{B}$	D	t
ET 3.1	1,95	1,63	1,67	0,83	300	8
ET 3.2	3,17	2,47	1,33	0,67	300	8
ET 3.3	3,51	2,58	1,00	0,50	300	8
ET 3.4	1,55	1,30	1,67	0,83	300	6,3
ET 3.5	2,33	1,96	1,67	0,83	300	12,5
ET 3.6	3,20	2,28	0,75	0,38	400	8
ET 4.6	3,62	2,56	0,38	0,75	400	8

ÇYTYE yönetmeliği için regresyon analizi sonucunda, regresyon istatistiklerinde R kare 0,95 için önerilen katsayı (ψ) denklem (2.9)'da sunulmuştur.

$$\psi = 9,05 - 2,18 * \eta - 1,06 * \beta - 0,012 * D + 0,109 * t \quad (2.9)$$

Eurocode ve CIDECT yönetmelikleri için yapılan regresyon analizi sonucunda, regresyon istatistiklerinde R kare 0,95 için önerilen katsayı (ψ) ise denklem 2.10'da verilmiştir.

$$\psi = 6,37 - 1,39 * \eta - 0,65 * \beta - 0,009 * D + 0,092 * t \quad (2.10)$$

2.2.5.3. Önerilen Tasarım Metodunun Sayısal Analizlerle Karşılaştırılması

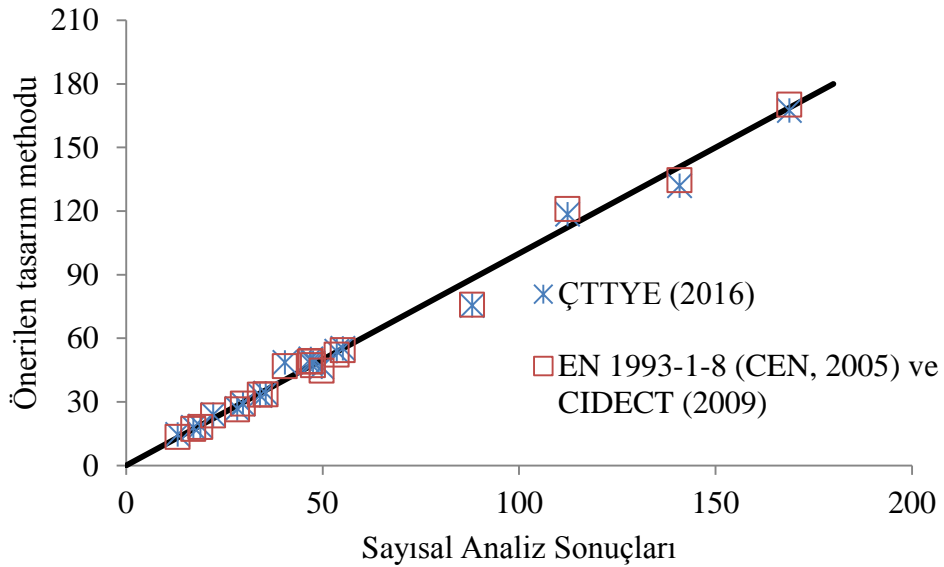
Eşdeğer RHS yöntemine göre ÇYTYE (2016)'da önerilen mevcut yöntem denklem (2.4)'te verilmiştir. Bu tez çalışmasında ÇYTYE için kullanılması gereken düzeltme katsayı çarpanı (ψ) ise denklem (2.9)'da ifade edilmiştir. Sonuç olarak, ÇYTYE (2016)'ye göre kullanılması gereken eşdeğer RHS yönteminin dikkate alınmasıyla EHS T-birleşimlerinin dayanımı denklem (2.11)'den hesaplanabilir.

$$M_n = F_y t^2 d \left[\frac{1}{2\eta} + \frac{1}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{\eta}{(1-\beta)} \right] Q_f \psi \quad (2.11)$$

Bu tez çalışmasında Eurocode ve CIDECT için kullanılması gereken düzeltme katsayı çarpanı (ψ) ise denklem (2.10)'da ifade edilmiştir. ÇYTYE ve diğer bahsedilen iki yönetmeliğin (Eurocode ve CIDECT) hesaplama yöntemleri farklı olduğu için, Eurocode ve CIDECT'e göre kullanılması gereken eşdeğer RHS yönteminin dikkate alınmasıyla EHS T-birleşimlerinin dayanımı denklem (2.12)'da verilmiştir.

$$M_n = F_y t^2 d \left[\frac{1}{2\eta} + \frac{2}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{\eta}{(1-\beta)} \right] Q_f \psi \quad (2.12)$$

Mevcut yönetmelikler için önerilen yöntemler, Şekil 2.16'da yapılan tüm sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüleceği üzere, her üç yönetmeliğe göre ve tüm oryantasyon türleri için önerilen yöntemler sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırıldığında çok iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu yüzden, bu tez çalışmasında, EHS T-birleşimlerinin düzlem içi eğilme dayanımlarının tahmininde denklem (2.11) ve (2.12)'nin kullanılması önerilmektedir.



Şekil 2.16. Önerilen tasarım yönteminin yapılan tüm sayısal analizlerle karşılaştırılması

3. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, kaynakla birleştirilmiş elips enkesitli içi boş çelik profillerden (EHS) oluşan T birleşimlerinin düzlem içi eğilme momenti etkisi altında dayanımları sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Mevcut yönetmeliklerde, boru ve kutu kesitlerden oluşmuş kaynaklı birleşimlerin aksenal yük altında veya eğilme momenti altında dayanımlarını hesaplamak amacıyla her bir göçme için yöntemler mevcuttur. Ancak EHS'li birleşimler için herhangi bir hesaplama yöntemi mevcut değildir.

EHS T- birleşimlerinin farklı oryantasyon tiplerinin tasarım ve analizi için ABAQUS/Standart v.6-14.1 (2016) sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Parametrik çalışmadan önce, Fung vd. (2016)'nin test verileri ve çıktıları doğrulama çalışması olarak yapılmıştır.

Sayısal analizlerden elde edilen bulgular ve bu bulgular doğrultusundaki öneriler aşağıda sunulmuştur;

- 1-) Oryantasyon tiplerinin EHS T- birleşimlerinin dayanımlarına etkileri çok büyüktür. Tip 3 ve 4 oryantasyonları, Tip 1 ve 2 oryantasyon türlerine göre taşıma kapasiteleri daha yüksektir. Ancak estetik açıdan en avantajlı Tip 2 oryantasyonudur.
- 2-) β parametresi, dikkate alınan birleşimlerin dayanımlarına etkisi açısından çok önemlidir.
- 3-) Mevcut yönetmeliklerde, EHS T-birleşimlerinin eğilme momenti dayanımı için yapılan öngörüler, bu birleşimlerin sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen değerlerden çok daha düşüktür.
- 4-) Sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda EHS T-birleşimlerinin düzlem içi eğilme momenti etkisi altında dayanımlarını belirleyebilmek için yeni bir hesap yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, bu tezde kullanılan tüm modeller ile doğruluğu sağlanmıştır.

Bu çalışmada, zamanın kısıtlı olmasından dolayı dikkate alınamayan ve aşağıda bahsedilen hususların gelecekte yapılması önerilmektedir.

- 1-) Geliştirilen yöntemin, test sonuçları ile karşılaştırılması ve doğrulanması yapılabilir.
- 2-) Başlık elemanının, farklı gerilmeler altındaki davranışları incelenebilir.

- 3-) Düzlem dışı eğilme momentinin etkisi, düzlem içi eğilme davranışından farklı olacağı için bu durum dikkate alınabilir.
- 4-) Başlık elemanında güçlendirme için kullanılacak levhanın rijitliğe etkisi araştırılabilir.



4. KAYNAKLAR

- ABAQUS, 2014. 6.14 documentation, Dassault Systems Simula Corporation
- Alpar, R., 2003. Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemlere Giriş I, Nobel Yayın Dağıtım, 408 s, Ankara.
- Balkan, G., 2007, Türk, Amerikan ve Avrupa Çelik Standartlarının İncelenmesi ve Kıyaslanması, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 164 s.
- Becque, J. ve Wilkinson, T., 2017. The Capacity of Grade C450 Cold-Formed Rectangular Hollow Section T and X Connections. Journal of Constructional Steel Research, 133, 345-359.
- Bedir, S., 2007. Çift Yönlü Asansör Fren Bloklarının Modellenmesi ve Sonlu Elemanların Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 177s.
- Boresi, A. P. ve Schmidt, R. J., 2003. Advanced Mechanics of Materials, John Wiley and Sons Press, USA.
- Botolotti, E., Jaspart, J. P., Pietrapertosa, C., Nicaud, G., Petitjean, P. D. ve Grimault, J. P., 2003. Testing and Modelling of Welded Joints Between Elliptical Hollow Sections, Proceedings of the 10th International Symposium on Tubular Structures, Madrid, İspanya, 259-264.
- CEN EN 1993-1-8, 2005. Design of Steel Structures, Design of Joints, British Standart Institute, London.
- Choo, Y. S., Liang, J. X. ve Lim, L. V., 2003a. Static Strength of Elliptical Hollow Section X- Joint Under Brace Compression, Tubular Structures X, Proceedings of the 10th International Symposium, Madrid, İspanya.
- Choo, Y. S., Qian, X. D., Liew, J. Y. R. ve Wardenier, J., 2003b. Static Strength of Thick-Walled CHS X- Joints- Part 1. New Approach in Strength Definition, Journal of Constructional Steel Research, 59, 10, 1201-1228.
- Choo, Y., Qian, X., Liew, J. ve Wardenier, J., 2003c. Static strength of thick-walled CHS X-joints—Part II. Effect of chord stresses. Journal of Constructional Steel Research, 59(10), 1229-1250.
- Choo, Y. S., Qian, X. D. ve Wardenier, J., 2006. Effects of Boundary Conditions and Chord Stresses on Static Strength of Thick- WalledCHS K-Joints, Journal of Constructional Steel Research, 62, 4, 316-328.
- Demirsöz, R., 2004. Asansör Kılavuz Raylarının Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 116s.

- Dexter, E. ve Lee, M., 1999a. Static strength of axially loaded tubular K-joints. I: behavior. Journal of Structural Engineering, 125(2), 194-201.
- Dexter, E. ve Lee, M., 1999b. Static strength of axially loaded tubular K-joints. II: Ultimate capacity. Journal of Structural Engineering, 125(2), 202-210.
- Fish, J. ve Belytschko, T., 2007. A First Course in Finite Elements, John Wiley and Sons, New York, 1-9.
- Fung, T. C., Tan, K. H. ve Nguyen, M. P., 2015. Structural Behaviours of CHS T- Joints Subjected to Static In- Plane Bending in Fire Conditions, Journal of Structural Engineering, 142, 3, 04015155.
- Gibstein, M. B., 1976. The static strength of T-joints subjected to in-plane bending moments. In: Det Norske Veritas Report No. 76-137, Oslo, Norway.
- Haque, T. O., 2011. Elliptical Hollow Section T and X Connections, Yüksek Lisans Tezi, University of Toronto, Canada, 128 s.
- Haque, T., Packer, J. A. ve Zhao, X-L., 2012. Equivalent RHS Approach for The Design of EHS in Axial Compression or Bending, Advances in Structural Engineering, 15,1, 107-120.
- He, S., Shao, Y. ve Zhang, H., 2015. Evaluation on Fire Resistance of Tubular K-Joints Based on Critical Temperature Method, Journal of Constuctional Steel Research, 115, 398-406.
- Kurobane, Y., ASCE, M., Makino, Y. ve Ochi, K., 1984. Ultimate resistance of unstiffened tubular joints. Journal of Structural Engineering, 110, 385-400.
- Kurobane, Y., Ogawa, K., Ochi, K. ve Makino, Y., 1986. Local buckling of braces in tubular K-joints. Thin-Walled Structures, 4(1), pp. 23-40.
- Lan, X. ve Huang, Y., 2016. Structural Design of Cold-Formed Stainless Steel Tubular X- and T-Joints at Elevated Temperatures, Thin-Walled Structures, 108, 270-279.
- Liu, D. ve Wardenier, J., 2006. Effect of chords on the strength of RHS uniplanar gap K-joints. In: &Willibald, P., ed. Tubular Structures XI, Canada. 539-544.
- Liu, D., Wardenier, J. ve Van der Vegte, G. J., 2002. Survey of chord load functions for hollow section joints. CIDECT Report 5BK-4/02.
- Makino, Y., Kurobane, Y. K. O., Van der Vegte, G. J. ve Wilmshurst, S. T., 1996. Introduction to unstiffened CHS tubular joint database. In: Tubular Structure VII, Rotterdam, Netherlands. 157-164.
- Marshall, P. W. ve Toprac, A. A., 1974. Basis for tubular joint design. Welding Journal, 53(5), 192-201.
- Mudenda, K., 2008. Performance of Cold Formed Welded Tubular Steel Joints Under Moment Loading, Yüksek Lisans Tezi, University of Cape Town, 93s.

- Mindivan, H., 2017. Çekme-Basma Deney Föyü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik, 23s.
- Odabaşı, Y., 2000. Ahşap ve Çelik Yapı Elemanları, Beta Basım, Yayın No. 313, İstanbul, 479s.
- Okur, F. Y., 2017. Mühendislik Yapılarında Statik, Sayısal ve Deneysel Yöntemlere Dayalı Hasar Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 193 s.
- Özdamar, K., 1999. Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi. Kaan Kitap Evi, Eskişehir, 137-210.
- Özyurt, E., 2015. Behaviour of Welded Tubular Structures in Fire, Doktora Tezi, University of Manchester, 185 s.
- Özyurt, E., 2018a. Yangında Elips Enkesitli Eksenel Yük Taşıyan Çelik Kolonların Davranışı, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Bursa, 23, 1, 205-206.
- Özyurt, E., Wang, Y. C., 2018b. Resistance of Axially Loaded T-and X-Joints of Elliptical Hollow Sections at Elevated Temperatures—A Finite Element Study. In: Structures. Elsevier, 15-31.
- Packer, J. A., 2008. Going Elliptical, Modern Steel Construction, 48, 3, 65-67.
- Packer, J. A., Wardenier, J., Zhao, X. L., Van der Vegte, G. J. ve Kurobane, Y., 2009. Design Guide for Rectangular Hollow Section (RHS) Joints Under Predominantly Static Loading, 2. Baskı, No.3, CIDECT, Cenevre, İsviçre.
- Packer, J. A., Choo, Y. S., Shen, W., Wardenier, J., Van der Vegte, G. J. ve Mustard, T., 2012. Axially Loaded T and X Joints of Elliptical Hollow Sections, CIDECT Final Report No. 5BW-2.
- Packer, J. A., Sun, M., Outway, P. ve Frater, G. S., 2015. Experimental Evaluation of the Directional Strength Increase for Fillet Welds to Rectangular Hollow Sections, In Tubular Structures XV: Proceedings of the 15th International Symposium on Tubular Structures, Rio de Janeiro, Brazil, 349.
- Pietrapertosa, C. ve Jaspart, J. P., 2003. Study of the Behaviour of Welded Joints Between Elliptical Hollow Sections, Proceedings of the 10th International Symposium on Tubular Structures, 601-608.
- Ruiz- Teran, A. M. ve Gardner, L., 2008. Elastic Buckling of Elliptical Tubes, Thin-Walled Structures, 46, 11, 1304-1318.
- Shao, Y. B., Li, T., Seng, T. L. ve Chiew, S. P., 2011. Hysteretic behaviour of square tubular T-joints with chord reinforcement under axial cyclic loading. Journal of Constructional Steel Research, 67,1, 140-149.

- Shen, W., Choo, Y. S., Wardenier, J. ve Van der Vegte, G. J., 2012. Static Strength of Axially Loaded Elliptical Hollow Section X Joints with Braces Welded to Wide Sides of Chord, I: Numerical Investigations Based on Experimental Tests, Journal of Structural Engineering, 140, 1, 04013035.
- Shen, W., Choo, Y. S., Wardenier, J. ve Van der Vegte, G. J., 2013. Static Strength of Axially Loaded EHS X- Joints with Braces Welded to the Narrow Sides of the Chord, Journal of Constructional Steel Research, 88, 181-190.
- Tata Steel., 2011. Celcius 355 Technical Guide- Structural Hollow Sections, Tata Steel Europe.
- Türk Standartları Enstitüsü, 2016. Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Ankara.
- URL- 1, <https://www.elektrikport.com/universite/sonlu-elemanlar-metodu-nedir-nerelerde-kullanilir/11661#ad-image-0> 14 Mart 2014.
- Ünal, M. Ç., 2015. Çelik Yapıların Farklı Standartlara Göre Karşılaştırmalı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 130s.
- Van der Vegte, G. J., 1995. The Static Strength of Uniplanar and Multiplanar T- and X-Joints, Doktora Tezi, Delft University of Technology, 376s.
- Van der Vegte, G., Liu, D., Makino, Y. & Wardenier, J. 2003. New chord load functions for circular hollow sections joints. Delft University of Technology, Delft, Cidect report 5BK-04/03.
- Van der Vegte, G. ve Makino, Y. 2005. Ultimate strength formulation for axially loaded CHS uniplanar T-joints. In: The Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 305-312.
- Van der Vegte, G. ve Makino, Y. 2006. Ultimate strength formulation for axially loaded CHS uniplanar T-joints. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 16(4), 305-312.
- Van der Vegte, G., Makino, Y., Choo, Y. ve Wardenier, J. 2001. The influence of chord stress on the ultimate strength of axially loaded uniplanar X-joints. In: Ninth International Symposium on Tubular Structures. 165-174.
- Van der Vegte, G., Makino, Y., Liu, D. ve Wardenier, J. 2000. New chord load function for CHS joints. Delft University of Technology, Delft, CIDECT Report 5BK-6/00.
- Van der Vegte, G., Makino, Y. ve Wardenier, J. 2002. The effect of chord pre-load on the static strength of uniplanar tubular K-joints. In: proceedings of Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. 1-10.
- Van Der Vegte, G., Wardenier, J. ve Makino, Y. 2007. Effect of chord load on ultimate strength of CHS X-joints. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 17(4), 301-308.

- Wardenier, J., Packer, J. A., Zhoo, X- L. ve Van der Vegte, G. J., 2002. Hollow Sections in Structural Applications, Bouwen met Staal Rotterdam, The Netherlands.
- Wardenier, J., 2007. Elliptical Hollow Sections, Internal Report Prepared for Corus.
- Wardenier, J., Van der Vegte, G. J. ve Liu, D. K., 2007. Chord Stress Function for Rectangular Hollow Section X and T Joints, The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Yura, J. A., Zettlemoyer, N. ve Edwards, I. E., 1980. Ultimate Capacity of Circular Tubular Joints, Proceedings of Offshore Technology Conference.
- Zhao, X- L., 2000. Deformation Limit and Ultimate Strength of Welded T-Joints in Cold Formed RHS Sections, Journal of Constructional Steel Research, 53, 2, 149-165.
- Yazıcıoğlu, D., 2018. Yenilikçi Teknolojileri Fonksiyonel ve Estetik Bir Şekilde Sunan, Ödül Almış Havaalanı Aydınlatma Projeleri, <http://www.lightworld.com.tr/yenilikci-teknolojileri-fonksiyonel-ve-estetik-bir-sekilde-sunan-odul-almis-havaalani-aydinlatma-projeleri>
- Zienkiewicz, O. C., 2000. The Finite Element Method, Mc Graw Hill Book Company.

ÖZGEÇMİŞ

Murat YILMAZ, 1994 yılında Trabzon ilinin Arsin ilçesinde doğdu. İlköğrenimine 2000 yılında Harmanlı İlköğretim Okulunda başlayıp, 2008 yılında Yomra Merkez İlköğretim Okulunda tamamlamıştır. Lise öğrenimini 2008-2012 yılları arasında Yomra Lisesinde tamamlamıştır. 2012 yılında girdiği üniversite sınavı ile Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde okumaya hak kazandı. 2016 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Aynı yıl Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine başladı ve halen devam etmektedir. 2016-2017 yılları arasında bazı özel firmalarda saha ve kontrol mühendisi gibi görevlerde bulunan YILMAZ'ın yabancı dili İngilizcedir.