

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EĞİLME YÜKLERİNE MARUZ KALAN KİRİŞLERİN HAFİFLETME DELİĞİ
ETRAFINDAKİ TAKVİYENİN VİRENDEEL MEKANİZMASINA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Barış Mehmet ZEYTİNCİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. MEHMET ALİ GÜLER

TEMMUZ 2019

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

.....
Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 171511024 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Barış Mehmet Zeytinci**'nin ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**EĞİLME YÜKLERİNE MARUZ KALAN KİRİŞLERİN HAFİFLETME DELİĞİ ETRAFINDAKİ TAKVİYENİN VIERENDEEL MEKANİZMASINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı tezi **19.07.2019** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mehmet Ali GÜLER**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Eş Danışman : **Dr. Mehmet ŞAHİN**
Türkiye Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Erdem ACAR (Başkan)**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. Ercan GÜRSES
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Barış Mehmet Zeytinci

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EĞİLME YÜKLERİNE MARUZ KALAN KİRİŞLERİN HAFİFLETME DELİĞİ ETRAFINDAKİ TAKVİYENİN VIERENDEEL MEKANİZMASINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Barış Mehmet ZEYTİNCİ

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Ali Güler

Tarih: Temmuz 2019

I-kesitli kirişler, Havacılık, Gemi İnşaatı ve İnşaat sektöründe kullanılan yapısal elemanlardır. Yapısal analiz mühendisleri, günden güne, I-kesitli kirişlerin, değişik yükler altında, mukavemetlerini geliştirmek için çalışmalarını sürdürmektedirler. I-kesitli kirişlere, yukarıda değinilen endüstrilerin ihtiyaçlarına göre, delikler açılır. Açılan delik sebebiyle I-kesitli kirişlerin yük taşıma kapasitesi azalmaktadır. Bu yüksek lisans tez çalışmasında, eğilme yüklerine maruz kalan kirişlerin hafifletme deliği etrafındaki takviyenin Vierendeel mekanizmasına etkisi incelenmiştir. Vierendeel mekanizması kirişlerin, büyük ve genellikle izole edilmiş ağ açıklıklarının yakınında meydana gelen dört plastik mafsal ile hasara sebep olur. Delik etrafındaki takviyenin Vierendeel mekanizmasına etkisi araştırılmadan önce, birincil çalışma olarak, basit mesnet ile desteklenmiş I-kesitli kirişlerin eğilme mekanizması altındaki davranışı araştırılmıştır. I-kesitli kirişin düzgün yayılı yük altındaki plastik moment kapasitesi analitik yöntemlerle hesaplanmış ve sonlu elemanlar analizleri ile doğrulanmıştır. Bundan sonra, bu kirişlere, delik açılmış ve etrafına halka tipi takviye uygulayarak kirişin mukavemetinin artırılması hedeflenmiştir. Takviye kalınlığının (t_s) ve takviye genişliğinin (h_s) etkileri, farklı t_s/d_0 (takviye kalınlığı/delik çapı) ve h_s/t_w (takviye genişliği/gövde kalınlığı) oranlarına göre, yapılan literatür taramaları baz alınarak, araştırılmıştır. Kiriş malzemesi olarak, UB 457x152x52 ve S275 malzeme özelliklerine sahip çelik ele alınmıştır. Hem geometrik hem de malzeme açısından doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri, kirişlerin göçme yükünün (w) hesaplanabilmesi için

gerçekleştirilmiştir. Kayma/moment etkileşim eğrileri hazırlanarak mühendislerin kullanımına sunulmuştur. Farklı delik açıklıklarına sahip takviyeli kirişlerin Vierendeel mekanizmasına etkisini analiz edebilmek için bu etkileşim eğrileri çizdirilmiştir. Takviyeli kirişlerin, ağırlık optimizasyon analizleri göçme yükü açısından incelenmiştir. Farklı delik açıklıklarına sahip takviyeli kirişlerin akma eğilimleri de tez içerisinde sunulmuştur. Son olarak, tasarım formülasyonu çıkarılmıştır. Çalışma sonucunda, takviye kalınlığının ve takviye genişliğinin, ağı açıklığı tipine ve delik çapına bağlı olarak delikli kirişlerin performansı üzerinde farklı kayma/moment etkileri bıraktığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Doğrusal olmayan SEA, Parametrik SEA, Kayma/moment eğrisi, Delikli kirişler, Takviye, Vierendeel mekanizması.



ABSTRACT

Master of Science

INVESTIGATION of the EFFECT of the RING TYPE STIFFENERS on the
VIERENDEEL MECHANISM of PERFORATED BEAMS UNDER BENDING

Barış Mehmet Zeytinci

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Ali Güler

Date: July 2019

I-beams are the structural elements that are widely used in Aerospace, Ship Building and Construction industries. Day by day, engineers try to improve the strength of I-beams under different loading conditions. I-beams are perforated due to needs of mentioned industries. Due to perforation, I-beams load carrying capacity decreases. In this thesis, the effect of ring type stiffeners on the Vierendeel mechanism of perforated beams with various opening shapes is investigated. Vierendeel mechanism causes beams to fail with four plastic hinges that occur in the vicinity of large and usually isolated web openings. First of all, to investigate the effect of ring type stiffeners in perforated beams, a primary investigation is carried out for flexural mechanism of a simply supported I-beam. Plastic moment capacity of an I-beam under a distributed load is calculated with using analytical methods and verified with the finite element analysis. Practical ring type stiffeners are then used to increase the mechanical strength. The effects of stiffener thickness (t_s) and stiffener height (h_s) are analysed for different t_s/d_0 (stiffener thickness to web opening diameter) and h_s/t_w (stiffener height to web thickness) ratios according to the literature. A beam profile of UB457x152x52 and of steel grade S275 is employed. Finite element analysis is conducted with both geometric and material non-linearities to obtain the failure loads (w). Shear/moment interaction diagrams are obtained so that they can be directly used by practising engineers. Such interaction curves are plotted for various opening shapes with stiffeners to demonstrate the effect of stiffeners on the Vierendeel mechanism. Weight optimization analysis was carried out in terms of failure load for stiffened perforated beams. Yield patterns of various beams with different web opening shapes and ring type stiffeners are also presented. Moreover, a

design formulation is derived for direct use by engineers. This study has ultimately shown that, the stiffener's thickness and height has different shear and moment effects on the performance of perforated beams depending on the opening type and web opening diameter.

Keywords: Nonlinear FEA, Parametric FEA, Shear/moment curve, Perforated beams, Stiffener, Reinforcement, Vierendeel mechanism.



TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Mehmet Ali Güler'e, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, tez eş danışmanım Dr. Mehmet Şahin'e, sonlu elemanlar analizi kısmında bana yardımcı olan liderim Mehmet Raif Taşdemir'e, bütün tez çalışması boyunca bana yol gösteren ve tezin makaleye dönüşmesinde yardımlarıyla her zaman destek olan Dr. Daniel Tsavdaridis'e, destekleriyle her zaman yanımda olan nişanlım Öykü Yılmaz'a ve kıymetli aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
KISALTMALAR	xvii
SEMBOL LİSTESİ	xviii
RESİM LİSTESİ	xx
1. GİRİŞ	1
1.1 Delikli I-kesitli Kirişlerde Oluşan Göçmeler	2
1.1.1 Eğilme mekanizması	3
1.1.2 Yanal burkulma.....	3
1.1.3 Kaynaklı birleştirme yerlerinin kopması.....	3
1.1.4 Kayma esnasında gövde burkulması.....	4
1.1.5 Basma burkulması.....	4
1.1.6 Vierendeel Mekanizması.....	5
1.2 Tezin Amacı	6
1.2.1 Hedefler.....	7
1.3 Literatür Araştırması	8
1.3.1 Kirişlerin farklı delik tiplerine göre sonlu elemanlar analizleri.....	8
1.3.2 Delikli kiriş yapısını güçlendirme.....	14
1.3.3 Kiriş yapısının göçmelerine göre yapılmış deneysel çalışmalar	17
2. EĞİLME YÜKLEMESİ ALTINDA KİRİŞLERİN PLASTİK MOMENT KAPASİTESİNİN HESAPLANMASI	21
2.1 Gövde Bölgesi İçin Plastik Moment Hesaplaması.....	22
2.2 Başlık Bölgesi İçin Plastik Moment Hesaplaması	25
2.3 Hesaplamaların Sonlu elemanlar Metotlarıyla Doğrulanması	29
3. EĞİLME YÜKLERİNE MARUZ KALAN KİRİŞLERİN HAFİFLETME DELİĞİ ETRAFINDAKİ TAKVİYENİN VIERENDEEL MEKANİZMASINA ETKİSİ	33
3.1 Sonlu Elemanlar Modelinin Deneysel Çalışmalar ile Doğrulanması.....	33
3.2 Kayma/Moment Etkileşim Eprisinin Başka Bir Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Çalışmasıyla Doğrulanması	36
3.2.1 Kesit geometrisi	38
3.2.2 Sonlu elemanlar modeli	40
3.2.3 Kayma/moment etkileşim eğrilerinin karşılaştırılması	41
3.3 Takviye Parametrelerinin Belirlenmesi.....	43
3.4 Takviyeli Kirişlerin Kayma/Moment Etkileşim Diyagramları	45
3.4.1 Analiz sonuçları	46
3.4.2 Takviye kalınlığına göre analiz sonuçları	47

3.4.3 Takviye genişliğine göre analiz sonuçları.....	55
3.5 Takviyeli Kirişlerde Ağırlık ve Göçme Yüğü (w) Etkileşiminin İncelenmesi.	58
3.6 Takviyeli Kirişlerin Akma Gerilmeleri	62
3.7 Tasarım Önerileri.....	65
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR.....	77
EKLER.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	97



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: Vierendeel mekanizması ile plastik mafsall oluşumu.	5
Şekil 1.2: Wang ve diğ. (2014) tarafından Vierendeel mekanizmasının von-Mises ile gösterimi.	6
Şekil 1.3: İki farklı delik çapı için ($d_0=0.5h$ ve $0.75h$) kayma/moment etkileşim sonuçları Chung ve diğ. (2001) (y eksenli kayma oranını, x eksenli ise moment oranını göstermektedir).	9
Şekil 1.4: Tsavdaridis ve D'Mello (2012) tarafından kullanılan delik çeşitleri, (a) delik açıklıkları, (b) eliptik delikler.	10
Şekil 1.5: Tsavdaridis ve D'Mello (2012) tarafından elde edilen kayma/moment etkileşim diyagramları-1 (Delikler Şekil 1.4'te görülebilir).	11
Şekil 1.6: Tsavdaridis ve D'Mello (2012) tarafından elde edilen kayma/moment etkileşim diyagramları-2 (Delikler Şekil 1.4'da görülebilir).	12
Şekil 1.7: Chung ve diğ. (2003) çalışmasında kullanılan delik geometrileri.	13
Şekil 1.8: Chung ve diğ. (2003) tarafından yeni sunulan kesme alanı.	13
Şekil 1.9: Gövde burkulması tipi göçme Panedpojaman ve Rongram (2014).	14
Şekil 1.10: Analiz edilen I-kesitli kirişler Al-Thabhwawee ve Al-Kannoon (2018) (a) PISB, (b) CHOB, (c) COOB, (d) COOBR.	15
Şekil 1.11: Yükleme-sehim grafiği Al-Thabhwawee ve Al-Kannoon (2018).	16
Şekil 1.12: Takviyeli I-kesitli kiriş ve ağı örgüsü Tsavdaridis ve Galiatsatos (2015).	17
Şekil 1.13: Deney sonuçları (Morkhade ve diğ. (2015)).	18
Şekil 1.14: Uygulanan yük ve orta nokta sehim eğrisinin karşılaştırılması (Morkhade ve diğ. (2015)).	19
Şekil 2.1: I-kesitli kiriş geometrisi.	21
Şekil 2.2: Gövde bölgesinin elastik olduğu durum için kuvvet-moment gösterimi.	22
Şekil 2.3: Gövde bölgesinin kısmi plastik olduğu durum için kuvvet-moment gösterimi.	23

Şekil 2.4: Başlık bölgesinin elastik olduğu durum için kuvvet-moment gösterimi.	25
Şekil 2.5: Başlık bölgesinin kısmi plastik olduğu durum için kuvvet-moment gösterimi.	26
Şekil 2.6: Başlık ve gövde plastik olduğu durum için kuvvet-moment gösterimi.	28
Şekil 2.7: Kullanılan sınır koşulları.	30
Şekil 2.8: Gerilme ve deplasmanın karşılaştırılma grafiği (a) elastik bölge, (b) elastikten plastik bölgeye geçiş, (c) kısmi plastik ve (d) tamamen plastik.	31
Şekil 2.9: $\frac{E_t}{E_y}$ 'nin değişimine göre moment oranı ile yükseklik oranı kıyaslaması.	31
Şekil 3.1: Kiriş 2A ve 3A'nın geometrik özellikleri (Redwood ve McCutcheon (1968)).	33
Şekil 3.2: Bi-lineer elastik-plastik malzeme gerilme gerinim grafiği.	34
Şekil 3.3: 2A kirişi sonlu elemanlar ağı.	35
Şekil 3.4: 2A ve 3A kirişlerinin sonlu elemanlar analizi sonuçları.	35
Şekil 3.5: (a) Basit mesnetleştirme ile sabitleştirilmiş ve dağınık yük (w) uygulanan kiriş (b) Vierendeel mekanizmasının etkisiyle kayma/moment eğrisinin düşüşü.	36
Şekil 3.6: Yeni sunulan kesme alanı hesabı Chung ve diğ. (2001).	38
Şekil 3.7: UB457x152x52 kirişi geometrik boyutları (a) önden görünüm, (b) yandan görünüm.	39
Şekil 3.8: Seçilen delik açıklıkları (a) dairesel (açıklık A), (b) eliptik (açıklık C), (c) kare (açıklık H).	39
Şekil 3.9: Açıklık A için sınır koşulları.	41
Şekil 3.10: Delik mesafesi (x).	41
Şekil 3.11: Kayma/moment etkileşim eğrisi grafiği karşılaştırması (a) açıklık A (Tsavdaridis ve D'Mello (2012)), (b) açıklık A (Güncel Çalışma), (c) açıklık C (Tsavdaridis ve D'Mello (2012)), (d) açıklık C (Güncel Çalışma), (e) açıklık H (Tsavdaridis ve D'Mello (2012)), (F) açıklık H (Güncel Çalışma).	43
Şekil 3.12: Takviyeli kiriş geometrisi (a) önden görünüm, (b) kesit görünümü.	44
Şekil 3.13: Açıklık A için $h_s/t_w=2$ (sabit) iken kayma/moment etkileşim eğrileri (a) $t_s/d_0 = 0$, (b) $t_s/d_0 = 0.03$, (c) $t_s/d_0 = 0.05$, (d) $t_s/d_0 = 0.07$, (e) $t_s/d_0 = 0.09$	48

Şekil 3.14: Açıklık A için farklı delik çaplarına göre kayma/moment etkileşim diyagramları ($h_s/t_w=2$) (a) $d_0 = 0.5h$, (b) $d_0 = 0.65h$, (c) $d_0 = 0.75h$ (legendların içindeki oranlar; t_s/d_0).	49
Şekil 3.15: Açıklık C için $h_s/t_w=2$ (sabit) iken kayma/moment etkileşim eğrileri (a) $t_s/d_0 = 0$, (b) $t_s/d_0 = 0.03$, (c) $t_s/d_0 = 0.05$, (d) $t_s/d_0 = 0.07$, (e) $t_s/d_0 = 0.09$	50
Şekil 3.16: Açıklık C için farklı delik çaplarına göre kayma/moment etkileşim diyagramları ($h_s/t_w=2$) (a) $d_0 = 0.5h$, (b) $d_0 = 0.65h$, (c) $d_0 = 0.75h$ (legendların içindeki oranlar; t_s/d_0).	51
Şekil 3.17: Açıklık A ve C için delik kesitinde oluşan kayma gerilmesi örneği.	52
Şekil 3.18: Açıklık H için $h_s/t_w=2$ (sabit) iken kayma/moment etkileşim eğrileri (a) $t_s/d_0 = 0$, (b) $t_s/d_0 = 0.03$, (c) $t_s/d_0 = 0.05$, (d) $t_s/d_0 = 0.07$, (e) $t_s/d_0 = 0.09$	53
Şekil 3.19: Açıklık H için farklı delik çaplarına göre kayma/moment etkileşim diyagramları ($h_s/t_w=2$) (a) $d_0 = 0.5h$, (b) $d_0 = 0.65h$, (c) $d_0 = 0.75h$ (legendların içindeki oranlar; t_s/d_0).	54
Şekil 3.20: Açıklık A için sabit delik çaplarına göre kayma/moment etkileşim eğrileri ($t_s/d_0 = 0.05$) (a) $d_0 = 0.5h$, (b) $d_0 = 0.65h$, (c) $d_0 = 0.75h$ (legendların içindeki sayılar h_s/t_w oranına aittir).	55
Şekil 3.21: Açıklık C için sabit delik çaplarına göre kayma/moment etkileşim eğrileri ($t_s/d_0 = 0.05$) (a) $d_0 = 0.5h$, (b) $d_0 = 0.65h$, (c) $d_0 = 0.75h$ (legendların içindeki sayılar h_s/t_w oranına aittir).	56
Şekil 3.22: Açıklık H için sabit delik çaplarına göre kayma/moment etkileşim eğrileri ($t_s/d_0 = 0.05$) (a) $d_0 = 0.5h$, (b) $d_0 = 0.65h$, (c) $d_0 = 0.75h$ (legendların içindeki sayılar h_s/t_w oranına aittir).	57
Şekil 3.23: Farklı delikler için normalize kütle ($m_{takviye}/m_{delik}$) oranının normalize göçme yüküne ($w_{takviye}/w_{delik}$) etkisi grafikleri (Vi-erendeel göçmesi, $x=284$ mm) (a) Açıklık A (dairesel), (b) Açıklık C (eliptik), (c) Açıklık H (kare) ($h_s/t_w=2$, $t_s/d_0=0-0.09$).	59
Şekil 3.24: Farklı delikler için normalize kütle ($m_{takviye}/m_{delik}$) oranının normalize göçme yüküne ($w_{takviye}/w_{delik}$) etkisi grafikleri (Eğilme göçmesi, $x=1866$ mm) (a) Açıklık A (dairesel), (b) Açıklık C (eliptik), (c) Açıklık H (kare) ($h_s/t_w=2$, $t_s/d_0=0-0.09$).	61
Şekil 3.25: von-Mises akma gerilmelerinin karşılaştırılması (a) açıklık A (Liu ve Chung (2003)), (b) açıklık A (güncel çalışma), (c) açıklık H ((Liu ve Chung (2003)), (d) açıklık H (güncel çalışma).	63

- Şekil 3.26: von-Mises akma gerilmelerinin karşılaştırılması (a) açıklık C (Tsavdaridis ve D’Mello (2012)), (b) açıklık C (güncel çalışma). 63
- Şekil 3.27: Doğru ölçeklendirme (true scale) ile elde edilmiş von-Mises akma değerleri (delik mesafesi, $x = 284 \text{ mm}$ ($d_0 = 0.75h$)). 64



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1: Kullanılan malzeme özellikleri.	30
Çizelge 2.2: Analiz ile analitik metodun doğrulanması.	30
Çizelge 3.1: 2A ve 3A kirisinin malzeme özellikleri (Redwood ve McCuth- ceon (1968)).	34
Çizelge 3.2: Delik mesafeleri (x) (Şekil 3.10'a bakınız).	41
Çizelge 3.3: Maksimum bağlaşık kayma oranı (\bar{v}).	67
Çizelge 3.4: Açıklık A için, (3.25) ve (3.26) numaralı eşitliklerde yer alan sabitler.	68
Çizelge 3.5: Açıklık C için, (3.25) ve (3.26) numaralı eşitliklerde yer alan sabitler.	69
Çizelge 3.6: Açıklık H için, (3.25) ve (3.26) numaralı eşitliklerde yer alan sabitler.	70
Çizelge 4.1: Açıklık A, $t_s/d_0=0$	84
Çizelge 4.2: Açıklık C, $t_s/d_0=0$	84
Çizelge 4.3: Açıklık H, $t_s/d_0=0$	85
Çizelge 4.4: Açıklık A, $t_s/d_0=0.03$	86
Çizelge 4.5: Açıklık A, $t_s/d_0=0.05$	86
Çizelge 4.6: Açıklık A, $t_s/d_0=0.07$	87
Çizelge 4.7: Açıklık A, $t_s/d_0=0.09$	87
Çizelge 4.8: Açıklık C, $t_s/d_0=0.03$	88
Çizelge 4.9: Açıklık C, $t_s/d_0=0.05$	88
Çizelge 4.10: Açıklık C, $t_s/d_0=0.07$	89
Çizelge 4.11: Açıklık C, $t_s/d_0=0.09$	89
Çizelge 4.12: Açıklık H, $t_s/d_0=0.03$	90
Çizelge 4.13: Açıklık H, $t_s/d_0=0.05$	90
Çizelge 4.14: Açıklık H, $t_s/d_0=0.07$	91
Çizelge 4.15: Açıklık H, $t_s/d_0=0.09$	91
Çizelge 4.16: Açıklık A, $h_s/t_w=2$	92
Çizelge 4.17: Açıklık A, $h_s/t_w=3$	92

Çizelge 4.18: Açıklık A, $h_s/t_w=4$	93
Çizelge 4.19: Açıklık C, $h_s/t_w=2$	93
Çizelge 4.20: Açıklık C, $h_s/t_w=3$	94
Çizelge 4.21: Açıklık C, $h_s/t_w=4$	94
Çizelge 4.22: Açıklık H, $h_s/t_w=2$	95
Çizelge 4.23: Açıklık H, $h_s/t_w=3$	95
Çizelge 4.24: Açıklık H, $h_s/t_w=4$	96



KISALTMALAR

SE	: Sonlu Elemanlar
SEM	: Sonlu Elemanlar Modeli
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
FE	: Finite Element (Sonlu Elemanlar)
K/M	: Kayma/Moment
PISB	: I-kesitli Kiriş
COOB	: Bölmeli Sekizgen Kiriş
CHOB	: Bölmeli Altıgen Kiriş
COOBR	: Bölmeli Sekizgen ve Halka Tipi Takviye ile Güçlendirilmiş Kiriş
LMS	: Düşük Moment Tarafı
HMS	: Yüksek Moment Tarafı
V/M	: Kayma/Moment

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A_{vz}	Deliksiz kesitin kayma alanı
A_{vo}	Deliksiz kesitin kayma alanı(azaltılmış)
b	Başlık kısmının genişliği
c	Kritik delik açıklığı
d	Gövde uzunluğu
d_0	Delik çapı
E	Elastisite modülü
E_t	Tanjant modülü
E_{tf}	Başlık kısmının tanjant modülü
E_{tw}	Gövde kısmının tanjant modülü
E_y	Elastisite modülü
F	Kuvvet
f_y	Akma gerilmesi
f_v	Gerilme
h	Kirişin yüksekliği
h_s	Takviyenin genişliği
L	Kirişin uzunluğu
M	Moment
M_{max}	Maksimum moment
$M_{o,Rd}$	Teorik moment kapasitesi
$M_{o,Rd,s}$	Takviyeli teorik moment kapasitesi
M_{sd}	Global moment
$M_{sd}(FEA)$	Global moment(sonlu elemanlar analizi)
m	Moment oranı
\bar{m}	Bağlaşık moment oranı
m_{delik}	Deliğin kütlesi

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

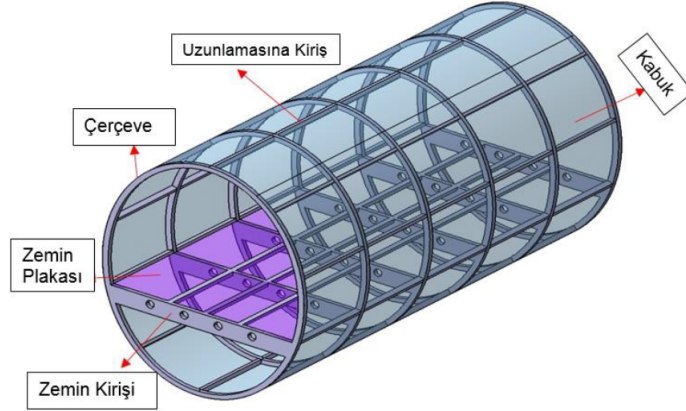
Simgeler	Açıklama
$m_{takviye}$	Takviyenin kütlesi
t_f	Başlık kısmının kalınlığı
t_s	Takviyenin kalınlığı
t_w	Gövde kısmının kalınlığı
V_{max}	Maksimum kayma
$V_{o,Rd}$	Teorik kayma kapasitesi
$V_{o,Rd,s}$	Takviyeli teorik kayma kapasitesi
$V_{o,Rd}$	Teorik kayma kapasitesi
V_{sd}	Global kayma kuvveti
$V_{sd(FEA)}$	Global kayma kuvveti(sonlu elemanlar analizi)
W_{pl}	Plastik modül
ν	Kayma oranı
$\bar{\nu}$	Bağlaşık kayma oranı
w	Göçme yükü
w_{delik}	Takviyesiz (sadece delik ile) göçme yükü
w_f	Başlık kısmının genişliği
$w_{takviye}$	Takviyeli göçme yükü
x	Delik mesafesi
y_y	Akma mesafesi
γ_{Mo}	Güvenlik faktörü, 1 kabul edilmiştir.
σ_A	Başlık ve gövde arasındaki bölgede oluşan gerilme
σ_C	Kirişin en üst noktasında oluşan gerilme
σ_{yf}	Başlık kısmının akma gerilmesi
σ_{yw}	Gövde kısmının akma gerilmesi
κ	Eğrilik
ν	Poissons oranı

RESİM LİSTESİ

Resim 1.1: I-kesitli kirişin havacılık sektöründe kullanımı (Orun ve Guler (2017)).	1
Resim 1.2: I-kesitli kirişin inşaat sektöründe kullanımı (Tsavdaridis 2010). .	2
Resim 1.3: Yanal burkulma tipi göçme (Tsavdaridis (2010)).	3
Resim 1.4: Kaynak birleşim yerlerinin kopması tipi göçme (Tsavdaridis (2010)).	4
Resim 1.5: Kayma esnasında gövde burkulması tipi göçme (Tsavdaridis (2010)).	4
Resim 1.6: Basma burkulması tipi göçme (Tsavdaridis (2010)).	5
Resim 1.7: Basit mesnetleştirme ile desteklenmiş ve üstten yayılı yük uygulanmış delikli kiriş deneyi (Morkhade ve diğ. (2015)).	18
Resim 1.8: Takviye ile güçlendirilmiş kiriş deneyi Al Dafafea ve diğ. (2019).	19

1. GİRİŞ

I-kesitli kirişler, günümüzde bina yapıları, helikopter gövdesi, uçak ana gövdesi, gemi inşaatı gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Yapısal analiz mühendisleri, I-kesitli kirişlerin geometrik ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için çeşitli çalışmalarını bu alanda sürdürmektedir. Havacılık sektöründe ağırlık çok önemli bir etkidir. Uçağın hem menzilin artması hem de yakıt tasarrufu yapması için ağırlığının optimize edilmesi gerekmektedir. Bu iyileştirme yapılırken uçağın yapısal parçalarının mekanik özelliklerini koruması beklenmektedir. Günümüzde uçak yapılarında kullanılan ağırlığı optimize edilmiş kiriş örneklerinden birini Resim 1.1’de görebilirsiniz.



Resim 1.1: I-kesitli kirişin havacılık sektöründe kullanımı (Orun ve Guler (2017)).

Resim 1.1’den görülebileceği üzere uçağın yolcu taşıma plakasının hemen altında zemin kirişi yer almaktadır ve bu kirişlerin ağırlığının optimize edilmesi önemli bir husustur.

İnşaat sektöründe kullanılan kirişlerde de maksimum alan kullanımı ve ağırlık azaltılması için kirişlerde delikler açılmaktadır. Modern bina yapılarında yayılma alanları daha uzundur ve bunu başarmak için delikli kirişlerin kullanılması gerekmektedir. Binalarda kablaj hattı, klima bacası, lavabo borusu, pis ve temiz su boruları gibi yardımcı parçalar için alan gerekmektedir. Bu alan, geçecek parçanın büyüklüğüne göre değişmektedir. Açılan delikler sebebiyle kiriş yapısı, gücünü

kaybetmektedir. Bu yüzden son yirmi yılda kirişlerin deliklerinin optimizasyonu için mühendisler çalışmalar yürütmektedir. Bu çalışmalar farklı geometriler, delikler ve yüklemeler altında mühendisler tarafından değerlendirilmeye devam etmektedir. Çeşitli analizler yapılırken imal usulleri de kirişlerin uygun maliyetli olması için araştırmışlardır. İnşaat sektöründe kullanılan delikli kirişlerin örneği Resim 1.2’de verilmiştir.



Resim 1.2: I-kesitli kirişin inşaat sektöründe kullanımı (Tsavdaridis 2010).

1.1 Delikli I-kesitli Kirişlerde Oluşan Göçmeler

Delikli I-kesitli kirişlerde çeşitli deneysel ve sonlu elemanlar metotlarıyla yapılan analizler sonucu altı farklı göçme gözlemlenmiştir. Bu göçmeler kirişin; geometrisi, delik tipi, gövde inceliği, yükleme tipi ve sınır koşulları özelliklerine göre farklılıklar göstermektedir. Bu tip özelliklere göre delikli I-kesitli kirişlerde karşımıza çıkan göçmeler;

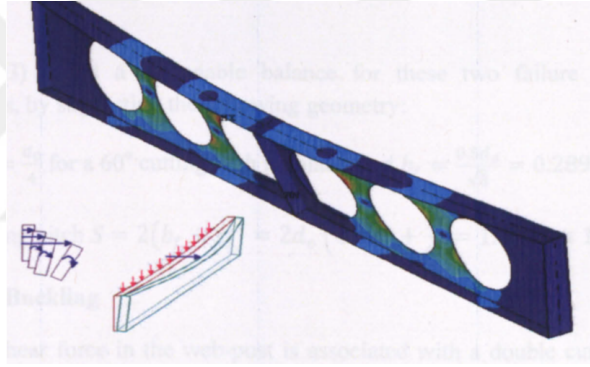
- Eğilme mekanizması
- Yanal burkulma
- Kaynaklı birleşme yerlerinin kopması
- Kayma esnasında gövde burkulması
- Basma burkulması
- Vierendeel ya da kayma mekanizması

1.1.1 Eğilme mekanizması

Bu tip göçme saf eğilme altında kalan parçalar için geçerlidir. I-kesitli kirişin üst ve altta kalan T-kesitleri çekme ve basma altında tamamen plastik olana kadar eğilmeye devam eder. I-kesitli kirişlerde plastik kapasite, ideal olarak elastik kapasitesinin 1.15 katı olana kadar asimptotik olarak yaklaşır. Bunun sonucunda aşırı akmalara meydana gelir ve göçme oluşur.

1.1.2 Yanal burkulma

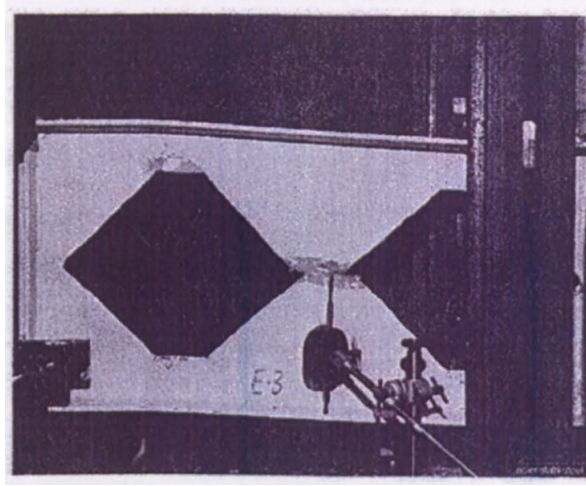
Yanal burkulma tipi burkulmalar deliksiz kirişlerde de olduğu gibi uzun aralıklı delikli kirişlerde de meydana gelmektedir. Bu tip göçmede kirişin gövde bölgesine herhangi bir bozulma olmadan kayması gözlemlenmektedir. Yanal burkulma örneği Resim 1.3'te görülebilir.



Resim 1.3: Yanal burkulma tipi göçme (Tsavdaridis (2010)).

1.1.3 Kaynaklı birleştirme yerlerinin kopması

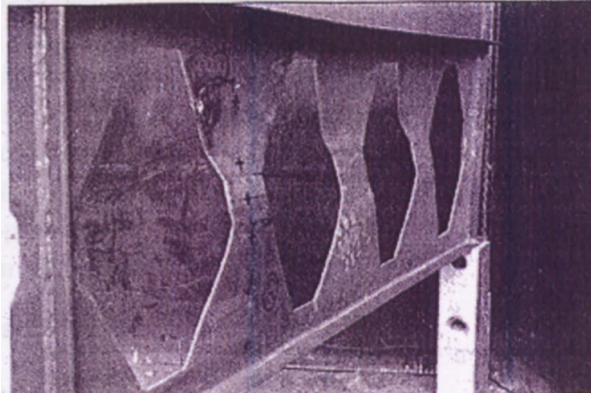
Bu göçme, kirişlerin profil kesilip daha sonra kaynak metodu ile birleştirildiği durumlarda meydana gelmektedir. Bu göçme kaynak yapılan bileşenin uzunluğu ile doğru orantılıdır. Eğer açılan deliğin boyu ikincil momentleri kısa tutmak için küçük yapıldı ise kaynak ağzı boyutu büyüdüğü için otomatik olarak kiriş kaynak noktalarından zayıflayacaktır. Bu tip kaynak metodlarından ötürü de kirişin diğer metodlarla göçmesi kolaylaşacaktır. Bu göçmeye örnek olarak Resim 1.4'teki kirişin kaynak noktasından kopması görülebilir.



Resim 1.4: Kaynak birleşim yerlerinin kopması tipi göçme (Tsavdaridis (2010)).

1.1.4 Kayma esnasında gövde burkulması

Bu göçmede dikey kayma kuvvetleri ile basma kuvvetleri bir araya gelmektedir ve kayma göçmesiyle gövde burkulması gözlemlenir. Deliklerin bir köşesinde eğimli gerilme, diğer tarafındaki köşesinde ise basma olmaktadır. Bu yüzden burkulma mekanizması kirişin gövde kısmı boyunca etkili olmaktadır. Kiriş kayma kuvveti altındayken aynı zamanda burkulur. Bu göçmeye ait Resim 1.5'te görülebilir.

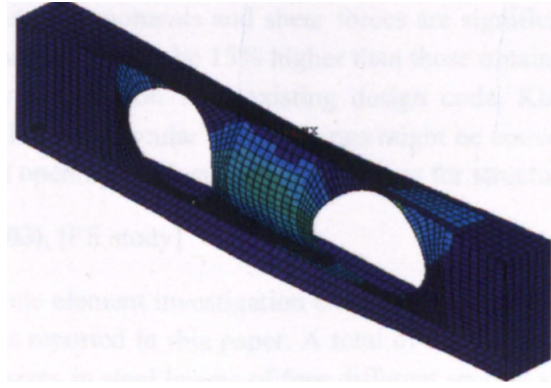


Resim 1.5: Kayma esnasında gövde burkulması tipi göçme (Tsavdaridis (2010)).

1.1.5 Basma burkulması

Bu tip göçme yüksek basma kuvveti altında kirişin gövde kısmının burkulmasıyla gerçekleşir. Bu tip göçmede burkulma, yan taraflardaki deliklerden dolayı mes-

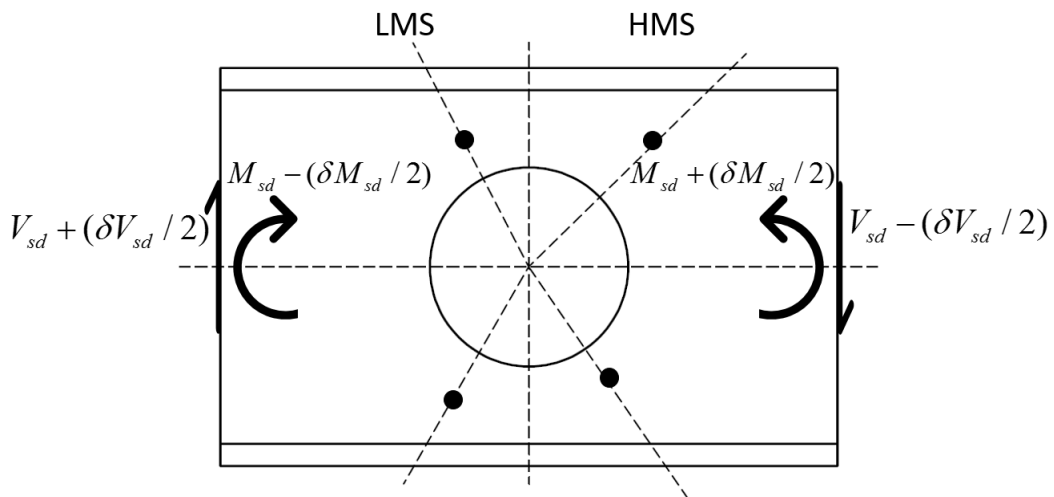
netsiz kalan orta kısmın yükü taşıyamamasıyla oluşur. Resim 1.6’da görülebilir.



Resim 1.6: Basma burkulması tipi göçme (Tsavdaridis (2010)).

1.1.6 Vierendeel mekanizması

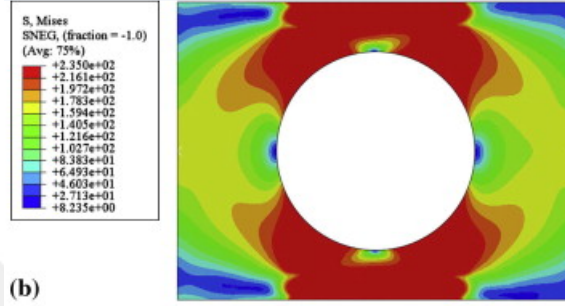
Vierendeel mekanizması tipi göçme ise genellikle kiriş üstüne uygulanan yüksek kayma kuvvetleri sebebiyle oluşmaktadır. Vierendeel göçmesinde, deliğin etrafında 4 adet plastik mafsals oluşur ve üst ve alt kesitlerin deforme olmasına yol açar. Delikli kirişler kayma yüklemesi altındayken, üst ve alt t-kesitler birincil ve ikincil momentleri taşımalıdır. Birincil moment eğilme momenti, ikincil moment ise Vierendeel momenti olarak bilinmektedir. Vierendeel moment, bu tip göçmede kritik delik açıklığına (c , deliğin yatay yöndeki genişliği) bağlıdır. Vierendeel mekanizmasıyla oluşan göçme Şekil 1.1’den görülebilir.



Şekil 1.1: Vierendeel mekanizması ile plastik mafsals oluşumu.

Dört adet plastik mafsal kirişin iki tarafında da LMS (düşük moment tarafı) ve HMS (yüksek moment tarafı) oluşur. Oluşan dört adet plastik mafsal sebebiyle, Vierendeel mekanizması için elastik-plastik malzeme tanımlamasının yapılması ve kirişin göçme yükünün (w) buradan elde edilmesi zorunludur. Bu da doğrusal olmayan (non-linear) sonlu elemanlar analizlerini birlikte getirir.

Vierendeel mekanizması ile oluşan plastik mafsallara örnek olarak Wang ve diğ. (2014) tarafından yapılmış, kirişin von-Mises akma gerilmelerini gösteren çalışma Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2: Wang ve diğ. (2014) tarafından Vierendeel mekanizmasının von-Mises ile gösterimi.

Bu çalışmadan da görülebileceği üzere deliğin etrafında 4 adet plastik mafsal ile plastik deformasyon oluşmaya başlar ve bütün kesite yayılır. Bu yayılma ile birlikte kiriş göçmeye başlar. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, Vierendeel mekanizmasıyla kayma göçmesine sebebiyet veren kirişler üzerinde ağırlıklı olarak durulacaktır.

1.2 Tezin Amacı

İnşaat, havacılık ve gemi inşaatı gibi birçok farklı sektörde, I-kesitli kirişler üzerine sıklıkla başvurulmuş delik açma operasyonları sebebiyle, bu kirişlerin yapısal analizleri gün geçtikçe artmaktadır. Bu tarz kirişler için farklı delik geometrilerine göre sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır (Chung ve diğ. (2001), Lawson ve diğ. (2006), Tsavdaridis ve D’Mello (2012), Panedpojaman ve Rongram (2014), Christensen ve Klarbring (2008)). Bu analizlere ek olarak kirişlerin dayanımının artırılması için kiriş farklı türlerde güçlendirme eklenmiştir (Menkulasi ve diğ. (2015), Al-Thabhawee ve Al-Kannoon (2018), Rodrigues ve diğ. (2014), Tsav-

daridis ve diğ. (2015), Najafi ve Wang (2017)). Son olarak delikli kirişlerde aynı zamanda birçok deneysel çalışma da gerçekleştirilmiştir (Redwood (1969), Redwood ve McCutcheon (1968), Morkhade ve diğ. (2015)). Bu çalışmalara göre I-kesitli kirişlerde kullanılan deliklerin Vierendeel mekanizmasıyla göçmesinin önlenmesi için, delik etrafına halka tipi takviye eklenerek I-kesitli kirişin davranışlarının incelenmesi düşünülmüştür. Bu çalışmalara göre 'Eğilme Yüklerine Maruz Kalan Kirişlerin Hafifletme Deliği Etrafındaki Takviyenin Vierendeel Mekanizmasına Etkisinin Araştırılması' tez konusu olarak belirlenmiştir.

1.2.1 Hedefler

Tez başlığında yer alan ve tezin konusunu oluşturan takviyenin Vierendeel mekanizmasına etkisinin irdelenmesi sürecinde izlenen yol aşağıdaki gibidir.

- Literatür taraması
- Kirişlerde olan göçmelerin araştırılması
- Basit deliksiz kirişlerin eğilme yüklemesiyle birlikte tam plastik eğilmenin araştırılması
- Basit deliksiz kirişlerde analitik metotlar ile plastik moment kapasitesinin hesaplanması
- Teorik olarak yapılan plastik moment kapasitesinin sonlu elemanlar metoduyla doğrulanması
- Delikli kirişlerin Vierendeel mekanizması ile göçmesinin araştırılması
- Sonlu elemanlar metoduyla araştırma yapılabilmesi için, sonlu elemanlar modelinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması
- Vierendeel mekanizması altında göçmüş kirişlerin kayma/eğilme etkileşim eğrisinin çıkartılması ve literatür taramaları ile karşılaştırılması
- Vierendeel mekanizmasına maruz kalmış delikli kirişlere uygun takviye kalınlığı ve genişliğinin belirlenmesi

- Farklı takviye kalınlıkları uygulanmış kirişlerin sonlu elemanlar metoduyla analiz edilmesi
- Elde edilen değerlerle delik etrafı takviyeli kirişlerin kayma/moment etkileşim eğrilerinin çıkarılması
- Takviyeli kirişlerin ağırlık kazanımı açısından incelenmesi
- Takviyeli kirişlerin akma gerilmelerinin Vierendeel mekanizmasına göre yorumlanması
- Takviyeli kirişlerin kayma/moment diyagramlarına göre tasarım formülasyonu çıkarılması

Bu yapılan çalışmalara göre yüksek lisans tezi iki ana başlığı ayrılmıştır. Bunlar;

1. Eğilme Yükleme Altında Kirişlerin Plastik Moment Kapasitesinin Hesaplanması
2. Eğilme Yüklerine Maruz Kalan Kirişlerin Hafifletme Deliği Etrafındaki Takviyenin Vierendeel Mekanizmasına Etkisi

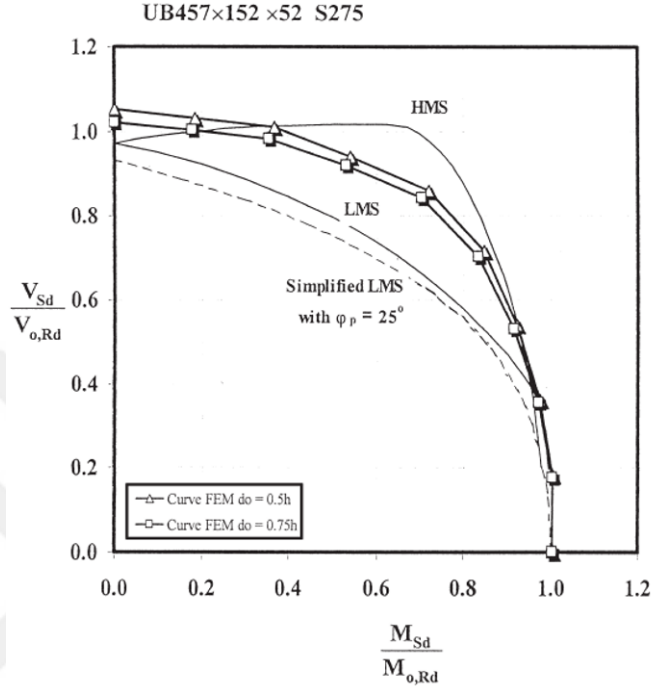
1.3 Literatür Araştırması

Bu bölümde, yüksek lisans tezi boyunca incelenen delikli kirişler ile ilgili makaleler, bildiriler, yüksek lisans ve doktora tezlerine yer verilmiştir. Daha önce yapılmış olan analitik ve nümerik hesaplamalar, sonlu eleman analizleri ve deneysel çalışmalar incelenmiştir. Her araştırmanın temel özelliği açıklanmıştır. Tez içerisinde yapılan literatür taramalarına göre her makale kendi içerisinde ayrıca değerlendirilmiştir.

1.3.1 Kirişlerin farklı delik tiplerine göre sonlu elemanlar analizleri

Chung ve diğ. (2001), standart dairesel delik açılmış kirişlerin Vierendeel mekanizmasıyla geçmesini araştırmışlardır. Bu süreçte farklı universal kirişler ve farklı delik çapları kullanılmıştır. Delik çapları kirişin gövde kısmının 0.5 katı ve 0.75 katı olacak şekilde seçilmiştir. Vierendeel mekanizmasının etkisi, delik çapı daha

büyük olan $d_0 = 0.75h$ deliklerinde daha etkin olarak görülmüştür. Bu iki farklı delik için de daha pratik tasarım yapılabilmesi için kayma-moment etkileşim eğrisi elde edilmiştir. Çeşitli sonlu elemanlar analizleriyle elde edilmiş sonuçlar Şekil 1.3'ten görülebilir. Şekil 1.3'te belirtilen LMS ve HMS sırasıyla, delik etrafında oluşan, düşük moment tarafı ve yüksek moment tarafı anlamına gelmektedir.

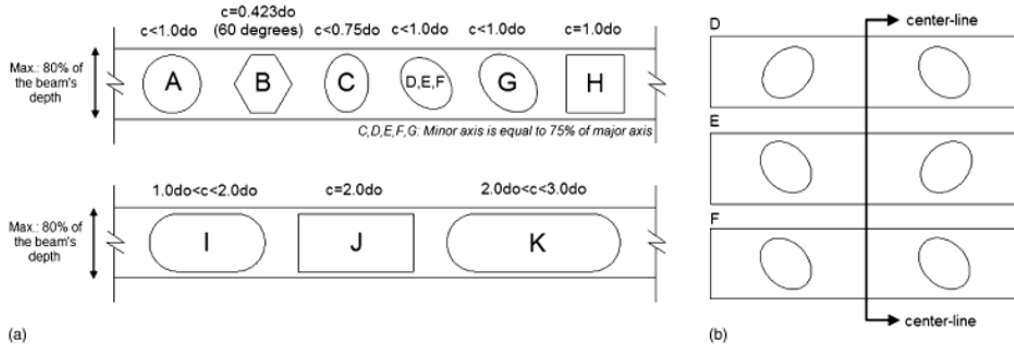


Şekil 1.3: İki farklı delik çapı için ($d_0=0.5h$ ve $0.75h$) kayma/moment etkileşim sonuçları Chung ve diğ. (2001) (y eksenı kayma oranını, x eksenı ise moment oranını göstermektedir).

Bunlara ek olarak kirişlerin yük taşıma kapasiteleri de araştırılmıştır. Bu araştırmalar farklı kiriş boylarına göre yapılmıştır; 5, 6, 7.5 ve 10m. Kirişlerin sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirirken, kirişin üst kısmına eşit dağılmış yük uygulanmıştır. Yük taşıma kapasitesindeki azalmanın, büyük ölçüde kirişlerin ortalarına yakın delikli bölümlerde moment kapasitesini düşürürken, Vierendeel mekanizmasını kritik bir şekilde etkilememiştir.

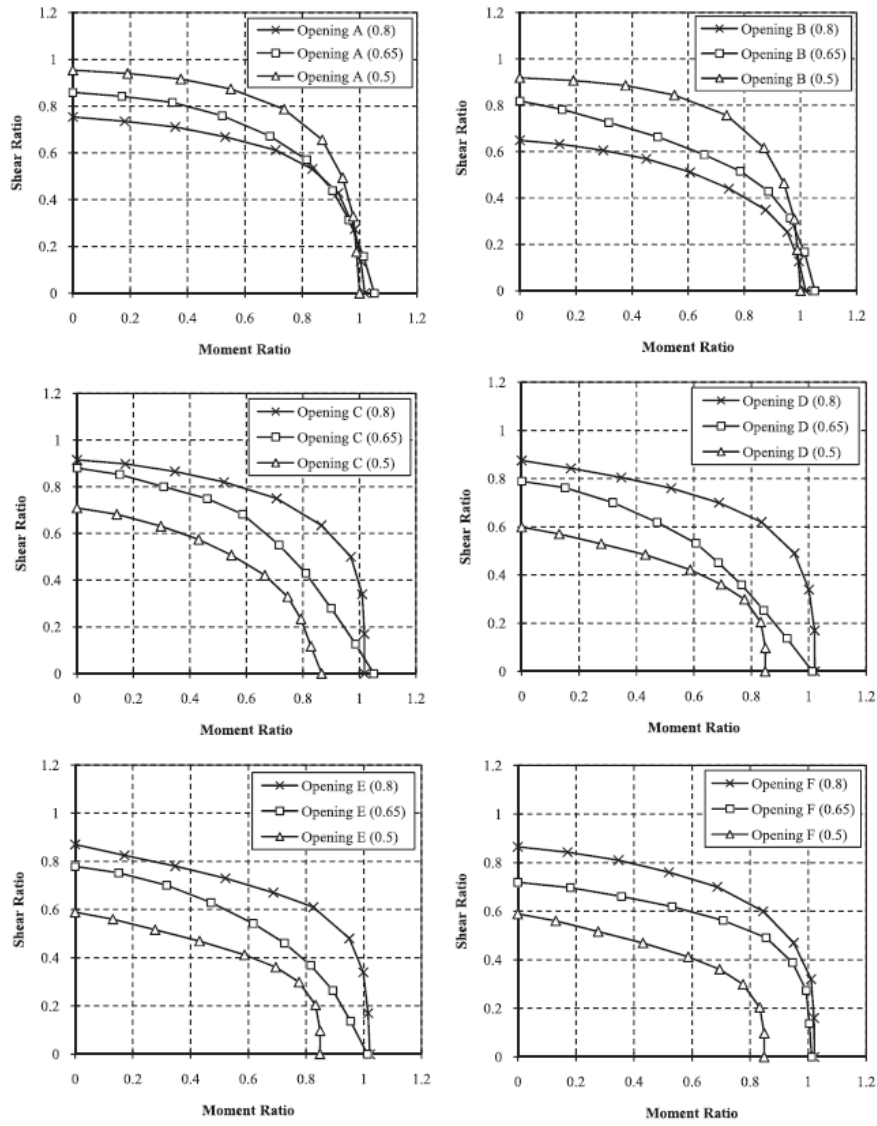
Lawson ve diğ. (2006), düzenli aralıklı dairesel ve dikdörtgen delikli çelikleri sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir. Sonlu elemanlar analiz programı olarak ANSYS'i kullanmışlardır. Kirişin doğrusal olmayan malzeme geometri özellikleri analiz kısmında tanımlanmıştır. Sonuç olarak, destek tipi tasarım modeli burkulma eğrilerine göre elde edilmiştir.

Tsavdaridis ve D'Mello (2012), farklı delik tiplerindeki açıklıkların Vierendeel mekanizması altında davranışlarını incelemişlerdir. Bunu yaparken 11 farklı delik geometrisi ve oryantasyonu kullanmışlardır. Bu deliklerin kayma/moment etkileşim diyagramlarını elde etmişler ve mühendislere kullanabilmeleri için sunmuşlardır. Elde edilen kayma/moment etkileşim diyagramları üç farklı delik çapı için uygulanmıştır. Bunlar kirişin gövde kısmının 0.5, 0.65 ve 0.8 katı olarak kayıtlara geçmiştir. Gövde kısmının 0.8 katı literatür taramalarında en yüksek delik boşluğu olmaktadır. Kullanılan delik geometrileri Şekil 1.4'te görülebilir.

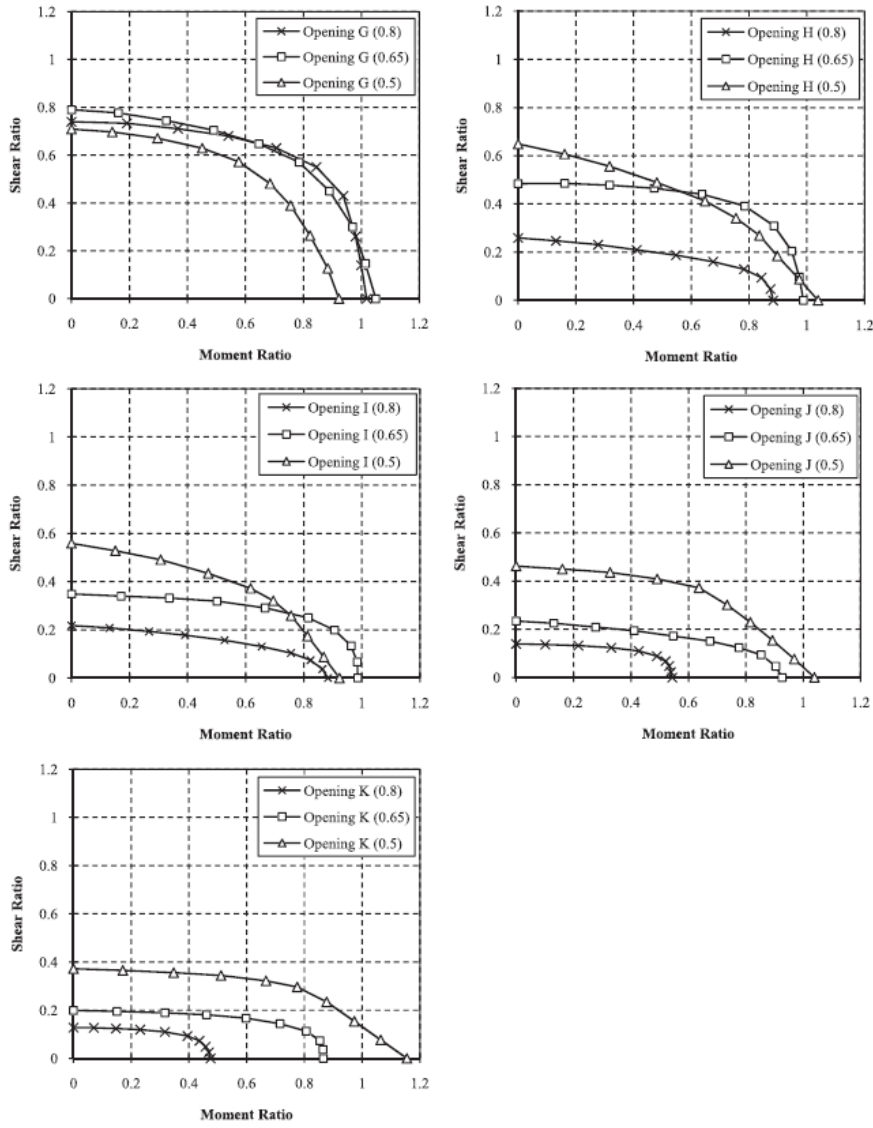


Şekil 1.4: Tsavdaridis ve D'Mello (2012) tarafından kullanılan delik çeşitleri, (a) delik açıklıkları, (b) eliptik delikler.

Kayma/moment diyagramının çıkarımından sonra bunların 3 ana eğilim altında toplandığı görülmüştür. Şekiller A ve B 1.tip, C, D, E, F ve G 2.tip, H, I, J ve K şekilleri iste 3. tip olarak adlandırılmıştır. 1.tip delik açıklıkları için kayma/moment etkileşim eğrisi beklendiği gibi $d_0 = 0.8h$ en altta, $d_0 = 0.65h$ ortada ve $d_0 = 0.5h$ en üstte yer almaktadır. 2.tip delikler için bu sıralama tam tersidir. Buna göre; $d_0 = 0.5h$ en altta, $d_0 = 0.65h$ ortada ve $d_0 = 0.8h$ en üstte yer almaktadır. 3.tip delikler için durum daha farklıdır, $d_0 = 0.65h$ delik çapı kirişin merkezine yaklaştıkça $d_0 = 0.5h$ delik çapının moment açısından önüne geçmektedir. Her delik geometrisi için elde edilen sonuçlar Şekil 1.5 ve 1.6 'da görülebilir.

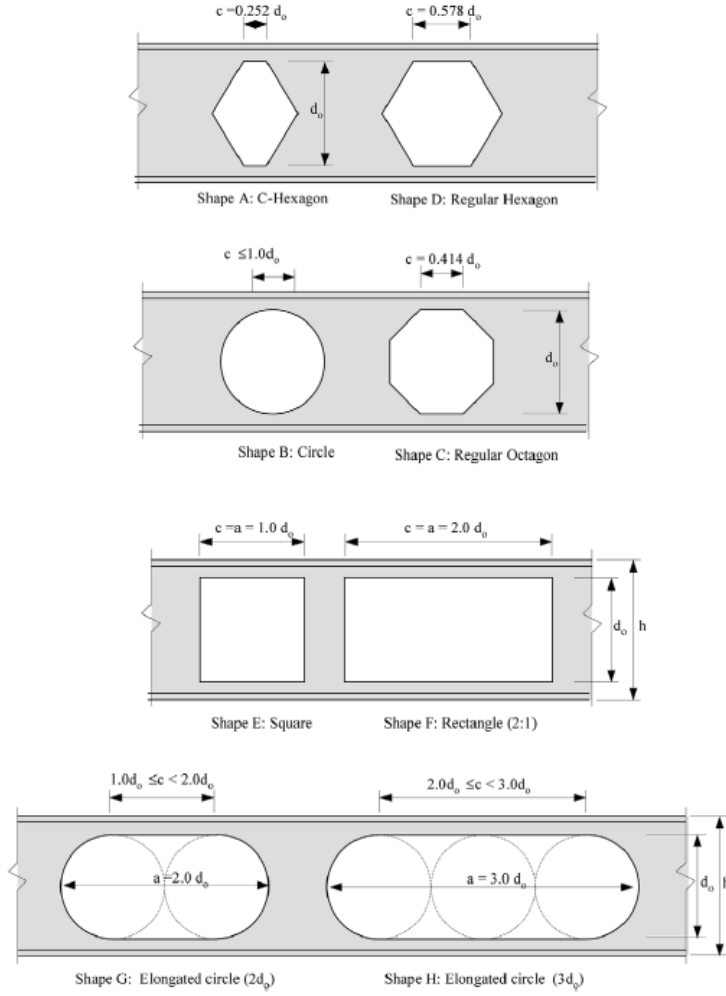


Şekil 1.5: Tsavdaridis ve D'Mello (2012) tarafından elde edilen kayma/moment etkileşim diyagramları-1 (Delikler Şekil 1.4'te görülebilir).



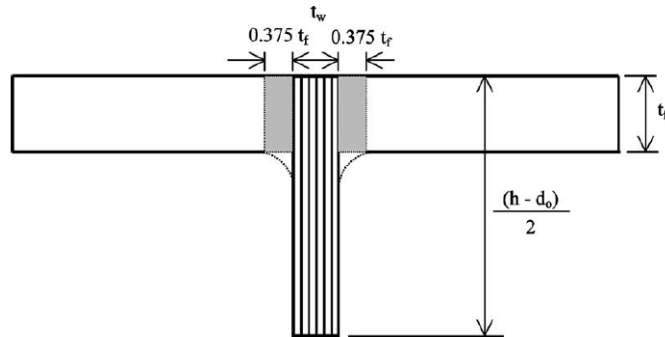
Şekil 1.6: Tsavdaridis ve D'Mello (2012) tarafından elde edilen kayma/moment etkileşim diyagramları-2 (Delikler Şekil 1.4'da görülebilir).

Chung ve diğ. (2003), önceki bölümde yer verilen çalışmalarında da olduğu gibi şekillerin Vierendeel mekanizması altında davranışlarını sonlu elemanlar metoduyla incelemiştir. Chung ve diğ.(2003) tarafından yapılan bir önceki çalışmadan farklı olarak sadece dairesel delikler için değil, sekiz adet farklı delik tipi için çalışmaları yapmışlardır. Bu delikler; altıgen, düzgün altıgen, daire, düzgün sekizgen, kare, dikdörtgen, uzun daire (2x), uzun daire (3x) olarak adlandırılmaktadır. Araştırılan delikler Şekil 1.7'de görülebilir.



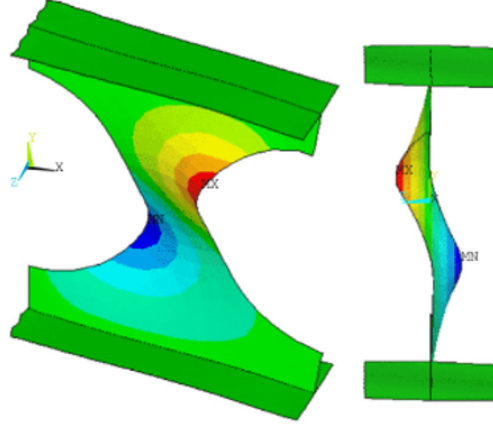
Şekil 1.7: Chung ve diğ. (2003) çalışmasında kullanılan delik geometrileri.

Her bir deliğin farklı universal kiriş tiplerinde gösterdiği davranışları incelenmiştir. Kayma/moment etkileşim eğrilerinin elde edilme yöntemi önceki çalışmalar ile aynıdır. Buna göre kayma/moment diyagramı çıkarılmasında hesaba katılmak üzere kesme alanına göre yeni bir metot sunulmuştur. Şekil 1.8’de görülebilir.



Şekil 1.8: Chung ve diğ. (2003) tarafından yeni sunulan kesme alanı.

Panedpojaman ve Rongram (2014), çalışmalarında kompozit olmayan simetrik veya asimetrik bölmeli kirişlerin gövde burkulması için tasarım denklemleri geliştirmiştir. Gövde burkulması göçmesi Şekil 1.9'da görülebilir.



Şekil 1.9: Gövde burkulması tipi göçme Panedpojaman ve Rongram (2014).

Tasarım yönteminin geliştirilmesi için, burkulma davranışı parametrik bir şekilde sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Sonlu elemanlar metodunun parametrik olarak uygulanabilmesi için ANSYS yazılımı kullanılmıştır. ANSYS yazılımında kirişe geometrik ve malzeme açısından doğrusal olmayan özellikler tanımlanmıştır. Yapılan çalışmanın doğruluğunun tespiti için literatürde yapılan deneylerle karşılaştırılmış ve netice olarak çalışmanın doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Bununla birlikte, yapılan çalışma, mühendislere, kirişlerin ağ burkulmasına karşı tasarım kolaylığı sağlamaktadır.

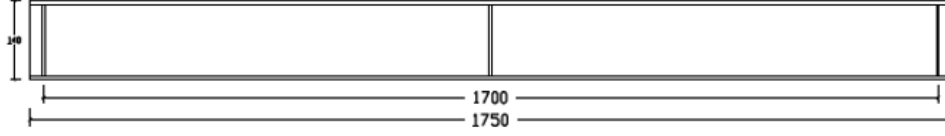
1.3.2 Delikli kiriş yapısını güçlendirme

Menkulasi ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, bölmeli kirişlerin konsantre yüklerle karşı nominal kapasitelerini geliştirilebilmesi amacıyla bir tasarım metodu geliştirilmesi yönünde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada incelenen sınır koşulları, kirişin gövde bölgesinin burkulmasıyla ilgilidir. Beş farklı delikli I-kiriş kesiti ele alınmıştır. Takviyeli ve takviyesiz olarak iki farklı durumun karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan analizlerde doğrusal olmayan geometrik ve materyal özellikleri kullanılmıştır.

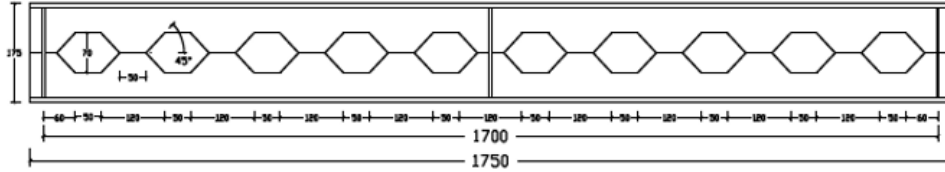
Al-Thabhwawee ve Al-Kannoon (2018), bölmeli kirişlere halka tipi uygulanan takviyenin etkisini incelemişlerdir. Analizler yapılırken doğrusal olmayan malzeme

ve geometri özellikleri tanımlanmıştır. Dört farklı kiriş çeşidi ele alınmıştır. Bunlar; I-kesitli kiriş (PISB), bölmeli altıgen kiriş (CHOB), bölmeli sekizgen kiriş (COOB) ve bölmeli sekizgen ve halka tipi takviye ile güçlendirilmiş kiriş (COOBR). Bu kirişler Şekil 1.10'da görülebilir.

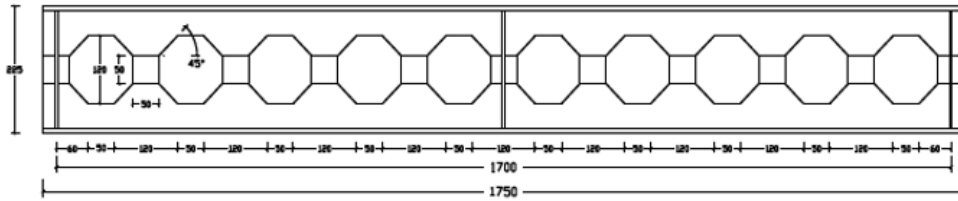
a) *Parent I-Section steel Beam (IPE140) (PISB)*



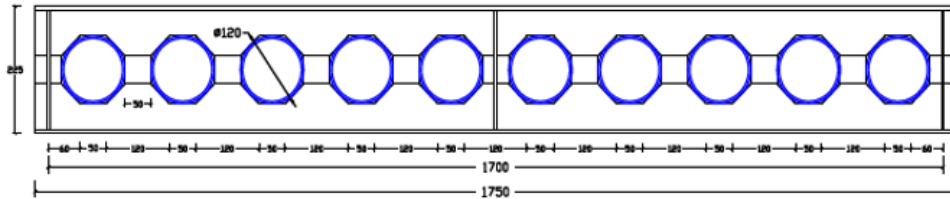
b) *Castellated Hexagonal Openings Beam (CHOB)*



c) *Castellated Octagonal Openings Beam (COOB)*



d) *Castellated Octagonal Openings Beam with Ring steel stiffeners (COOBR)*

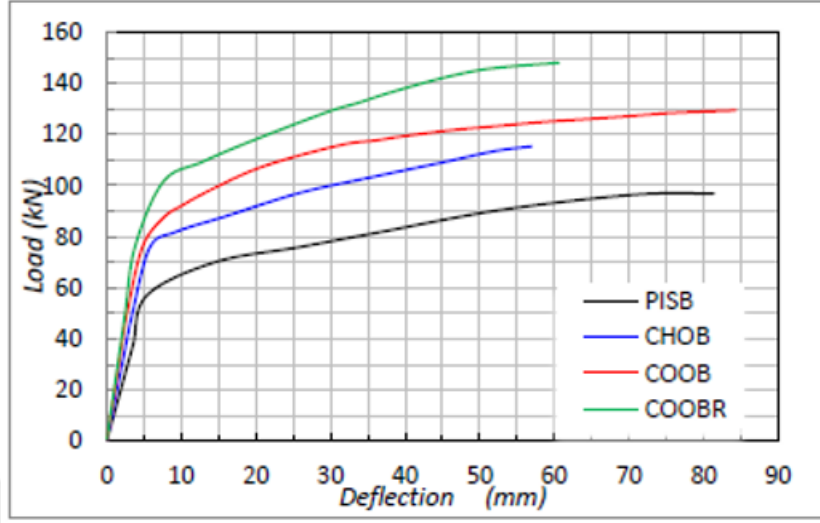


Şekil 1.10: Analiz edilen I-kesitli kirişler Al-Thabhawe ve Al-Kannoon (2018) (a) PISB, (b) CHOB, (c) COOB, (d) COOBR.

Yapılan analizler sonucu; yükleme- sehim grafiği çizdirilmiştir. Söz konusu grafik; Şekil 1.11'de görülebilir.

Yapılan çalışmaya göre bölmeli sekizgen ve halka tipi takviye ile güçlendirilmiş kirişlerde (COOBR) en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte takviye ile kiriş üzerindeki sehimin azaldığı, çekme dayanımının da arttırıldığı görülebilir. Al-Thabhawe ve Al-Kannoon (2018), yaptığı bu çalışmaya ek olarak takviye kalınlığını bölmeli kirişe etkisini araştırmıştır. Buna göre takviye kalınlığı belir-

lerken t_s/d_0 (takviye kalınlığı/delik çapı) oranını baz alınmıştır. t_s/d_0 oranı 0.02, 0.03, 0.05 ve 0.07 olarak belirlenmiştir. En iyi sonuçların 0.03 oranında elde edildiği görülmüştür. Diğer takviye genişliği belirlenirken ise h_s/t_w (takviye genişliği/gövde kalınlığı) oranı ele alınmış ve sabit olan bu oran 4 olarak belirlenmiştir.



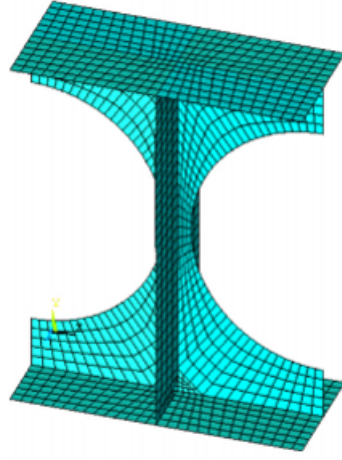
Şekil 1.11: Yükleme-sehim grafiği Al-Thabhawee ve Al-Kannoon (2018).

Orun ve Guler (2017), havacılık sektöründe kullanılan ince halka tipi takviyesi eklenmiş I-kesitli kirişlerin burkulma davranışını birleşik yükler altında incelemiştir. Uygulanan birleşik yükler; kayma, basma ve eğilmedir. Analizler; ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılmış, doğrusal olmayan geometrik ve malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Al-Thabhawee ve Al-Kannoon (2018)'in yapmış olduğu çalışmalarda olduğu gibi t_s/d_0 ve h_s/t_w oranları, Orun ve Guler (2017) tarafından da kullanılmıştır. Buna göre; t_s/d_0 oranı 0.033 ve 0.15 aralığında değişmektedir. h_s/t_w oranı da 1.5 ve 4.5 değerleri arasında kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucu farklı yüklemelere göre burkulma etkileşim eğrileri çıkarılmıştır.

Rodrigues ve diğ. (2014), çalışmalarında delikli çelik kirişlerin, delik etrafında oluşan gerilme dağılımını gözlemlemişlerdir. Çalışma ANSYS sonlu elemanlar programında doğrusal olmayan geometrik ve malzeme özellikleri kullanarak yapılmıştır. Alınan analiz sonuçlarının doğruluğu için nümerik ve test sonuçlarıyla karşılaştırmaları yapılmıştır. Farklı delik geometrileri için yapılan bu analizlerde daha sonra yatay güçlendirme kullanılarak kirişin gerilme dağılımları elde edilmiştir.

Tsavdaridis ve Galiatsatos (2015), delikler arası küçük olan bölmeli kirişlerde

enine güçlendirme kullanarak kirişlerin davranışlarını incelemiştir. Parametrik analizler ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak tamamlanmıştır. Araştırma konusu olan kirişin tipi ve ağ örgüsü Şekil 1.12’de görülebilir.



Şekil 1.12: Takviyeli I-kesitli kiriş ve ağ örgüsü Tsavdaridis ve Galiatsatos (2015).

Takviye kalınlığı belirlerken gövde kalınlığı (t_w)/takviye kalınlığı (t_s) oranına önem verilmiştir. Takviye uygulanan analizlerde, enine takviyelerin t_w/t_s oranı 1.3 değerinden küçük olduğu sürece çok etkili, 1.3 değerinden büyük olduğunda ise neredeyse etkisinin olmadığı görülmüştür.

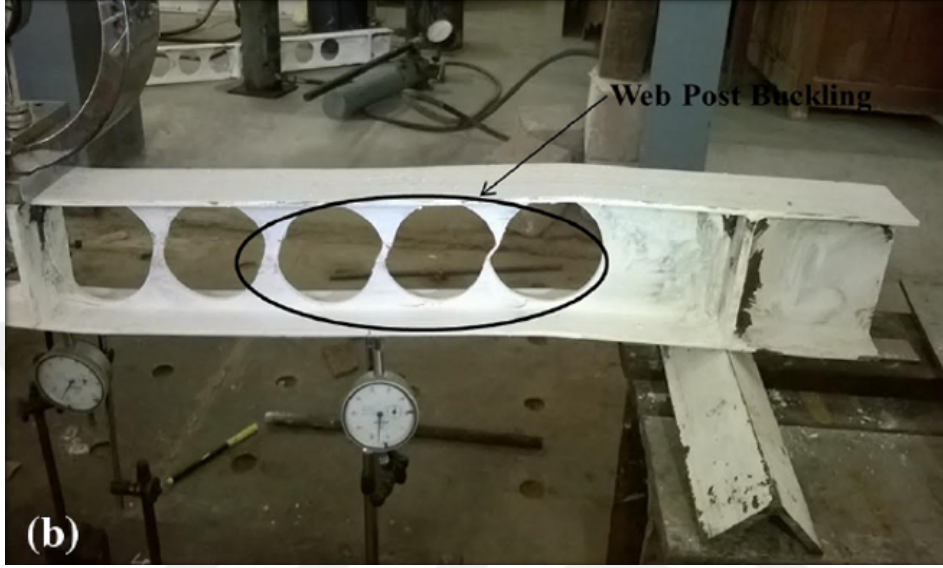
1.3.3 Kiriş yapısının göçmelerine göre yapılmış deneysel çalışmalar

Redwood ve McCutcheon (1968), bu çalışma üzerinde bir veya iki delik olan ve uzun gövdeye sahip I-kesitli kirişlerin farklı yükler altında gösterdiği davranışları ele almıştır. Sınır koşulları olarak, kirişin alt başlık bölgesi alttan iki tane basit mesnetleştirme ile desteklenmiştir. Kirişin üst başlık kısmının ortasından da çizgi-yük uygulanmıştır. Bu çalışmaya göre kirişin Vierendeel mekanizması (delik etrafında dört adet plastik mafsal) altında oluşarak göçtüğü görülmüştür.

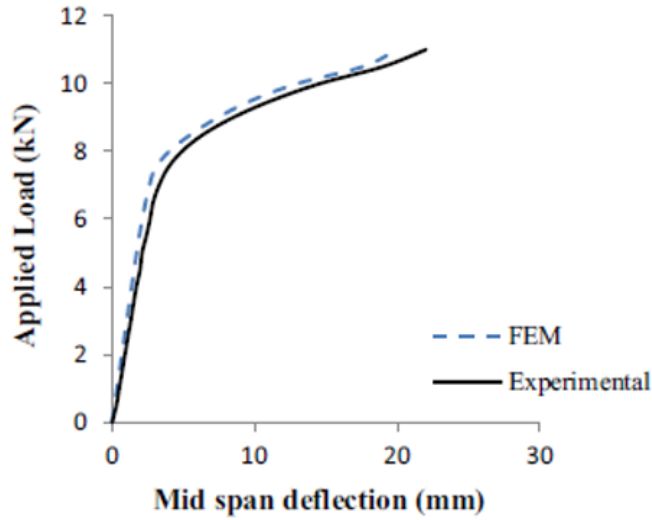
Morkhade ve diğ. (2015), delikli çelik kirişlerin mukavemet hesabının yapılabilmesi için çeşitli deneysel çalışmalar yürütmüş ve aynı zamanda sonlu elemanlar metodlarıyla doğrulamaları yapılmıştır. Bu kirişler, farklı geometrilere, deliklere ve delik çaplarına göre incelenmiştir. Yapılan çalışmada kirişler sıcak hadde yöntemiyle üretilmiştir. Sınır koşulları Redwood ve McCutcheon (1968) olduğu gibi alttan basit mesnet ile desteklenmiş ve üstten konsantre yük uygulanmıştır. Yapı-

lan deneylerden biri Resim 1.7’de görülebilir.

Bu çalışmanın deneysel kısmında sadece kare ve dairesel delik tipli kirişler kullanılmıştır. Aynı zamanda ANSYS sonlu elemanlar programı ile de analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sonlu elemanlar analizlerinin deneysel sonuçlar ile örtüştüğü görülmüştür. Deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar sonuçlarının karşılaştırılmasına örnek olarak Şekil 1.13 incelenebilir.



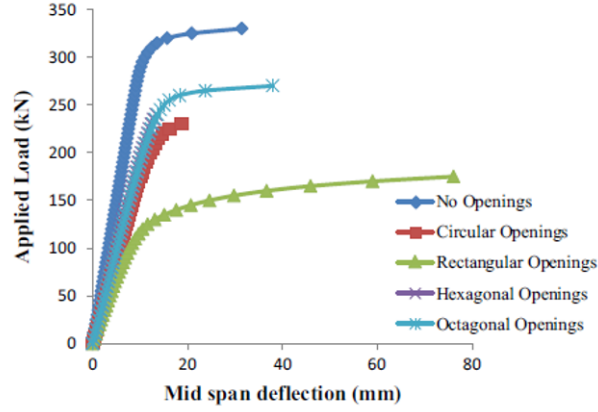
Resim 1.7: Basit mesnetleştirme ile desteklenmiş ve üstten yayılı yük uygulanmış delikli kiriş deneyi (Morkhade ve diğ. (2015)).



Şekil 1.13: Deney sonuçları (Morkhade ve diğ. (2015)).

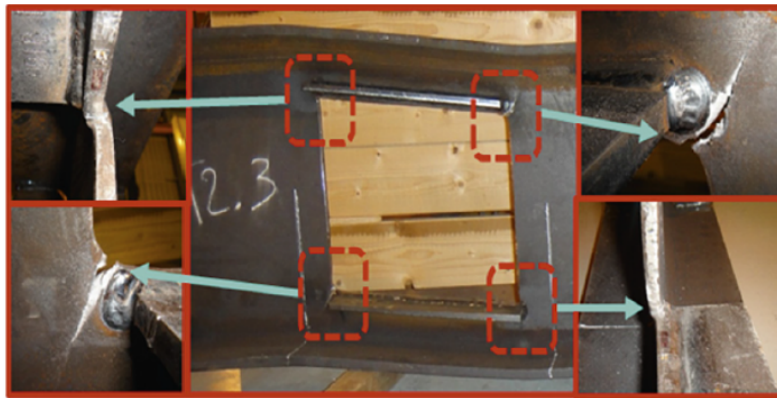
Elde edilen deneysel sonuçlar ile farklı geometriler için yapılan sonlu eleman-

lar analizlerine göre elde edilen sonuçlardan biri Şekil 1.14'de görülebilir. Şekil 1.14'de uygulanan yük ve orta nokta sehim eğrisi çizdirilmiştir.



Şekil 1.14: Uygulanan yük ve orta nokta sehim eğrisinin karşılaştırılması (Morkhade ve diğ. (2015)).

Al-Dafafea ve diğ. (2019), üzerinde kare şeklinde delik olan ve farklı güçlendirmeler uygulanmış 13 farklı I-kesitli kirişin deneysel analizlerini gerçekleştirmiştir. Yaptıkları analizlerde iki temel amaç vardır. Biri, güçlendirmenin uzunluğu diğeri ise, tek taraflı veya çift taraflı takviyenin etkisini araştırmaktır. Kirişlerin birçok yerinden gerinim ve deplasman ölçer ile ölçüm yapılmıştır. Bu sayede kirişlerin maksimum dayanımı ve kesitlerdeki gerinim dağılımı elde edilebilmektedir. Yapılan analizler sonucu uzunluğu küçük olan takviyelerin iyileştirme yapmadığı görülmüştür. Hatta bu tarz takviyelerin kaynak sırasında malzemeye vereceği zarardan ötürü lokal zayıflamaların kirişi negatif etkilediği görülmüştür. Benzer sonuçlar çerçeve güçlendirmeleri için de söylenebilmektedir. Buna göre uzun olan yatay takviyelerin en iyi sonuçları verdiği çalışma ile elde edilmiştir. Yapılan testlere örnek olarak Resim 1.8 verilebilir.

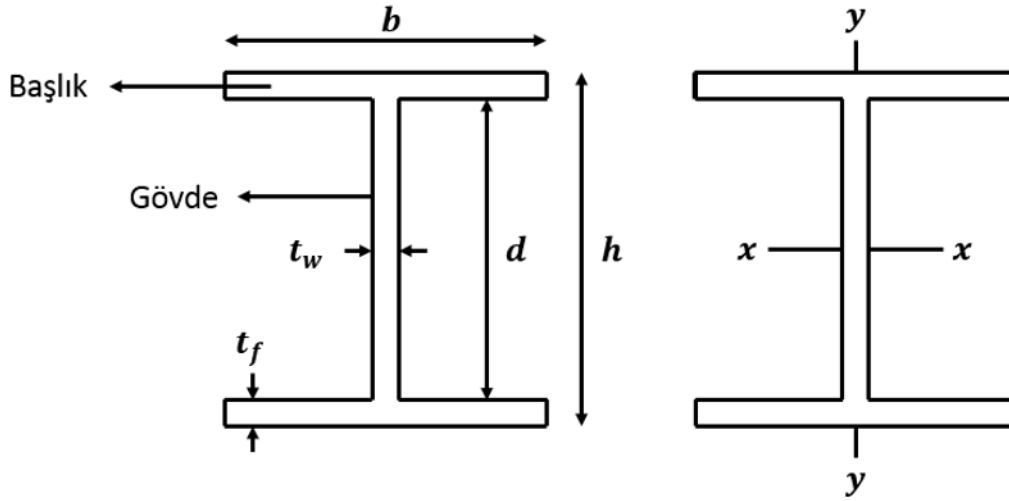


Resim 1.8: Takviye ile güçlendirilmiş kiriş deneyi Al Dafafea ve diğ. (2019).



2. EĞİLME YÜKLEMESİ ALTINDA KIRIŞLARIN PLASTİK MOMENT KAPASİTESİNİN HESAPLANMASI

Çalışmanın bu kısmında, delik takviyeli kirişlerin Vierendeel mekanizmasına etkisi araştırılmadan önce, deliksiz kirişin plastik moment kapasitesinin analitik metotlar ile araştırılması ele alınmıştır. Tezin bu kısmı ile yapılan çalışmada Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı'nda bir adet bildiri yayımlanmıştır. Analitik metotlar ile yapılan hesaplamada I-kesitli kirişin geometrisi Şekil 2.1'de görülebilir.



Şekil 2.1: I-kesitli kiriş geometrisi.

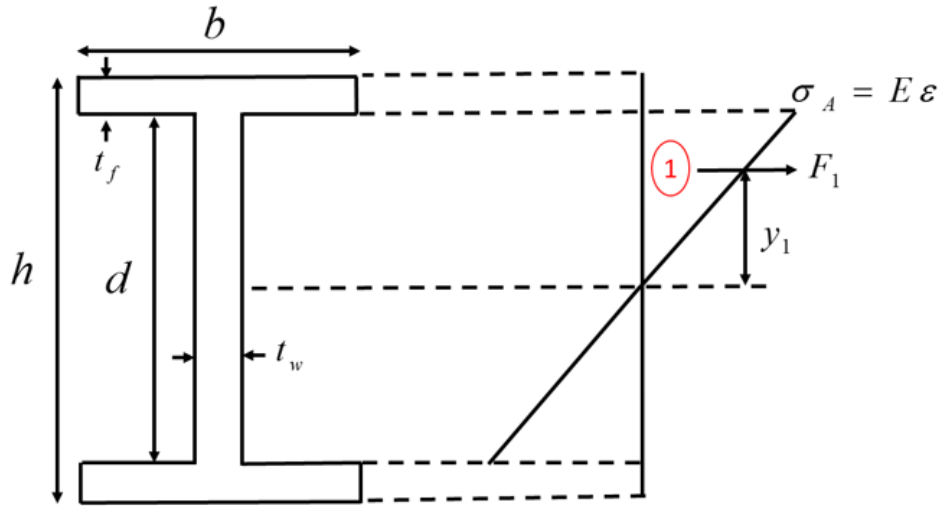
Analitik metotlar ile hesaplama yapılırken kirişin iki farklı bölgesi de (başlık ve gövde) ayrı olarak değerlendirilmiştir. Her bölge için üç farklı durum bu tür geçmede söz konusu olmaktadır. Bu iki bölge içinde bölgenin, elastik, elasto-plastik (kısmi plastik) ve tam plastik olma durumudur. Her ayrı durum için kuvvet ve moment denklemleri yazılarak plastik moment kapasitesi analitik metotlar ile hesaplanmıştır. Kirişin başlık ve gövde kısmı farklı malzemelerdendir. Hesaplamalar yapılırken bu husus göz önünde bulundurulmuştur. Kompozit malzemenin bilineer plastik malzeme özellikleri gösterdiği varsayılmıştır. Bu kısımda kabul edilen diğer varsayımlar şu şekildedir;

1. I-kesitli kiriş; x ve y eksenlerine göre simetrik kabul edilmiştir.
2. Üst ve alt başlıkların kalınlıkları ve uzunlukları aynıdır.
3. I-kesitli kirişin başlık ve gövde kısımları farklı malzeme özelliklerine sahiptir.
4. I-kesitli kirişin hem başlık kısmı hem de gövde kısmı bi-lineer elastik-plastik malzeme özelliklerine sahiptir.

2.1 Gövde Bölgesi İçin Plastik Moment Hesaplaması

Bu kısımda gövde bölgesi öncelikle tamamen elastik, daha sonrasında kısmi plastik olduğu durum olarak iki farklı şekilde incelenmiştir.

Gövde bölgesinin tamamen elastik olduğu durumun kuvvet-moment gösterimi Şekil 2.2'de görülebilir.



Şekil 2.2: Gövde bölgesinin elastik olduğu durum için kuvvet-moment gösterimi.

Şekil 2.2 üzerinde 1 numaralı bölge olarak kırmızı ile işaretlenen bölge üzerinde oluşan kuvvet ve bu kuvvetin merkeze olan uzaklığı (2.1) ve (2.2) numaralı denklemlerde görülebilir.

$$F_1 = \frac{\sigma_A}{2} \frac{dt_w}{2} \quad (2.1)$$

$$y_1 = \frac{d}{3} \quad (2.2)$$

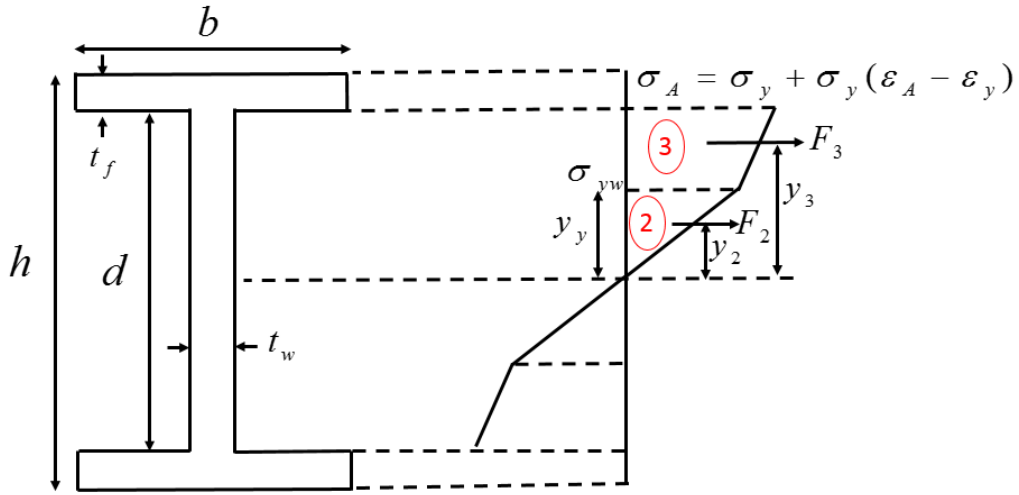
Bu bölgedeki kuvvetten dolayı oluşacak moment;

$$M_1 = 2F_1y_1 \quad (2.3)$$

I-kesitli kirişin geometrisi simetrik olduğu için diğer tarafta da aynı büyüklükte moment oluşmaktadır. Bundan sonra hesaplanan her moment değerinde, moment 2 ile çarpılacaktır. (2.1) ve (2.2) numaralı denklemler (2.3) numaralı denklemde yerine koyulursa aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$M_1 = \sigma_A \frac{d^2 t_w}{6} \quad (2.4)$$

Gövde bölgesinin kısmi plastik olduğu durum: Gövde bölgesinin tamamen kısmi plastik olduğu durumun kuvvet-moment gösterimi Şekil 2.3'te görülebilir.



Şekil 2.3: Gövde bölgesinin kısmi plastik olduğu durum için kuvvet-moment gösterimi.

Şekil 2.3 üzerinde 2 numaralı bölgede verilmiş olan kuvvet ve onun merkeze olan mesafesi 5 ve 6 numaralı denklemlerde verilmiştir.

$$F_2 = \frac{\sigma_{yw}}{2} t_w t_y \quad (2.5)$$

$$y_2 = \frac{2}{3}y_y \quad (2.6)$$

Bu bölgedeki kuvvetten dolayı oluşacak moment;

$$M_2 = 2F_2y_2 \quad (2.7)$$

Bu bölgedeki momentin hesaplanabilmesi için (2.5) ve (2.6) numaralı denklemler (2.7) numaralı denklemde yerine koyulursa;

$$M_2 = \frac{2}{3}\sigma_{yw}t_w t_y y_y \quad (2.8)$$

3 numaralı bölgede gösterilmiş olan kuvvet ve kuvvetin kirişin merkezine olan mesafesi ((2.9)) ve ((2.10)) numaralı denklemlerde verilmiştir.

$$F_3 = \frac{\sigma_{yw} + \sigma_A}{2} t_w (d/2 - y_y) \quad (2.9)$$

$$y_3 = y_y + \frac{(\sigma_{yw} + 2\sigma_A)}{(\sigma_{yw} + \sigma_A)} (d/2 - y_y) \frac{1}{3} \quad (2.10)$$

Bu bölgedeki moment;

$$M_3 = 2F_3y_3 \quad (2.11)$$

şeklinde hesaplanabilir.

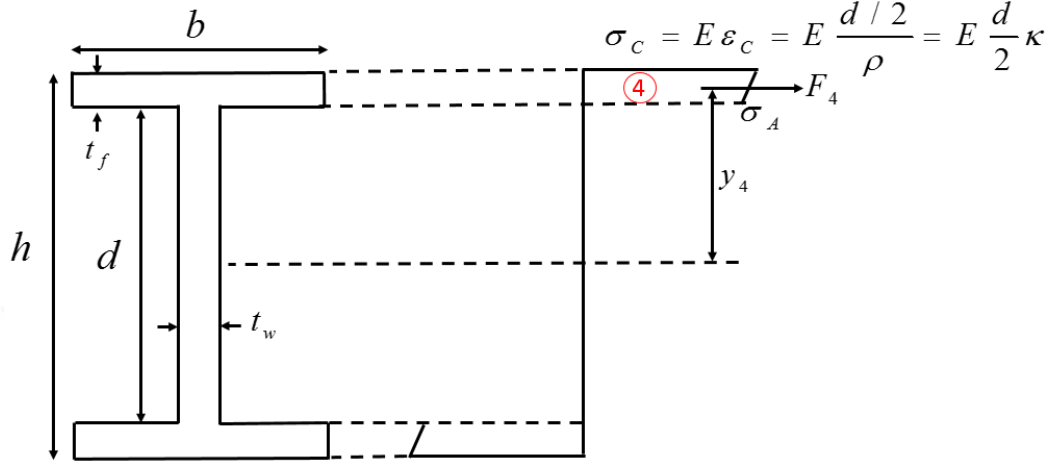
3.bölgedeki moment değerinin hesaplanabilmesi için (2.9) ve (2.10) numaralı denklemler (2.11) denkleminde yerine koyulursa;

$$M_3 = [(\sigma_{yw} + \sigma_A)t_w (d/2 - y_y)] \left[y_y + \frac{(\sigma_{yw} + 2\sigma_A)}{3(\sigma_{yw} + \sigma_A)} (d/2 - y_y) \right] \quad (2.12)$$

2.2 Başlık Bölgesi İçin Plastik Moment Hesaplaması

Bu kısımda başlık bölgesi öncelikle tamamen elastik, daha sonrasında kısmi plastik olduğu durum olarak 2 farklı şekilde incelenmiştir.

Başlık bölgesinin tamamen elastik olduğu durumun kuvvet-moment gösterimi Şekil 2.4'te görülebilir.



Şekil 2.4: Başlık bölgesinin elastik olduğu durum için kuvvet-moment gösterimi.

4 numaralı bölge üstünde oluşan kuvvet ve bu kuvvetin merkeze olan uzaklığı;

$$F_4 = \frac{\sigma_A + \sigma_C}{2} b t_f \quad (2.13)$$

$$y_4 = \frac{d}{2} + \left(\frac{\sigma_A + 2\sigma_C}{\sigma_A + \sigma_C} \right) \frac{t_f}{3} \quad (2.14)$$

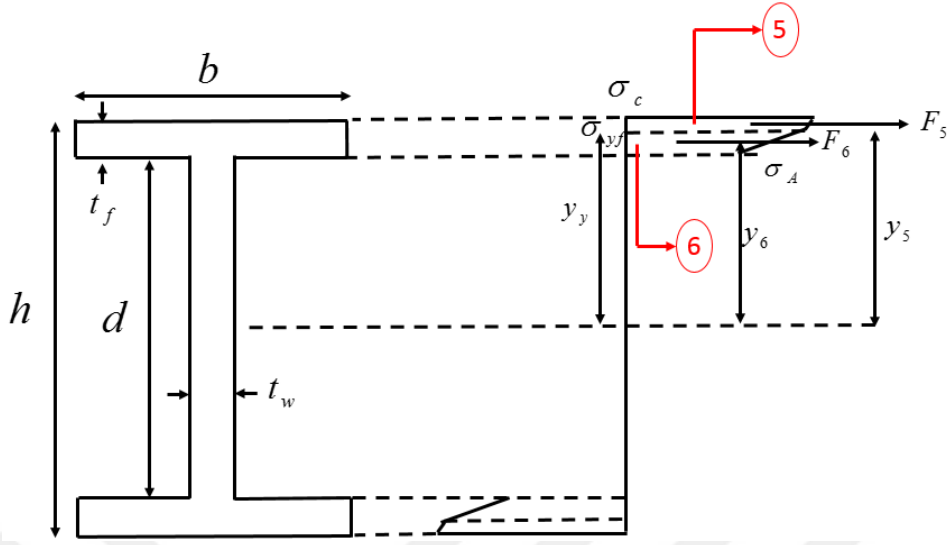
(2.13) ve (2.14) numaralı denklemlerde görüldüğü gibi hesaplanabilir. Bu bölgedeki kuvvetin oluşturacağı moment ise (2.15) numaralı denklemde görülebilir;

$$M_4 = 2F_4 y_4 \quad (2.15)$$

(2.15) numaralı formülü hesaplamak için (2.13) ve (2.14) numaralı denklemler (2.15) numaralı denklemin içine yazdığımız zaman;

$$M_4 = [(\sigma_A + \sigma_C) b t_f] \left[\frac{d}{2} + \left(\frac{\sigma_A + 2\sigma_C}{\sigma_A + \sigma_C} \right) \frac{t_f}{3} \right] \quad (2.16)$$

Başlık bölgesinin kısmi plastik olduğu durum için kuvvet-moment gösterimi Şekil 2.5'te görülebilir.



Şekil 2.5: Başlık bölgesinin kısmi plastik olduğu durum için kuvvet-moment gösterimi.

5. bölgede ve 6. bölgede bulunan kuvvet değerlerini ve mesafe değerlerini hesaplayabilmemiz için σ_A (başlık ve gövde arasındaki bölgede oluşan gerilme), σ_C (kirişin en üst noktasında oluşan gerilme) değerlerini kullanmamız gerekmektedir.

$$\sigma_A = \frac{y_y}{d/2} \sigma_{yf} \quad (2.17)$$

$$\sigma_B = \sigma_{yf} \quad (2.18)$$

$$\sigma_C = \sigma_{yf} \left(1 - c + c \frac{h/2}{y_y} \right) \quad (2.19)$$

Bu değerler kullanılarak F_5 ve y_5 değerleri hesaplanabilir.

$$F_5 = \frac{(\sigma_C + \sigma_{yf})}{2} b(h/2 - y_y) \quad (2.20)$$

$$y_5 = y_y + \left(\frac{\sigma_{yf} + 2\sigma_C}{\sigma_{yf} + \sigma_C} \right) \frac{(h/2 - y_y)}{3} \quad (2.21)$$

5. bölgedeki moment değeri (2.22) numaralı formül kullanılarak elde edilebilir.

$$M_5 = 2F_5y_5 \quad (2.22)$$

(2.20) ve (2.21) numaralı denklemler (2.22) numaralı denklemde yerine koyulursa aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$M_5 = [(\sigma_C + \sigma_{yf})b(h/2 - y_y)] \left[y_y + \left(\frac{\sigma_{yf} + 2\sigma_C}{\sigma_{yf} + \sigma_C} \right) \frac{(h/2 - y_y)}{3} \right] \quad (2.23)$$

6. bölge üzerinde oluşacak kuvvet ve kuvvetin merkeze olan mesafesi (2.24) ve (2.25) numaralı denklemler üzerinde verilmiştir;

$$F_6 = \frac{(\sigma_A + \sigma_{yf})}{2} b(y_y - d/2) \quad (2.24)$$

$$y_6 = \frac{d}{2} + \left(\frac{\sigma_A + 2\sigma_{yf}}{\sigma_A + \sigma_{yf}} \right) \frac{(y_y - d/2)}{3} \quad (2.25)$$

Bu bölge üzerinde oluşacak moment değeri M_6 ;

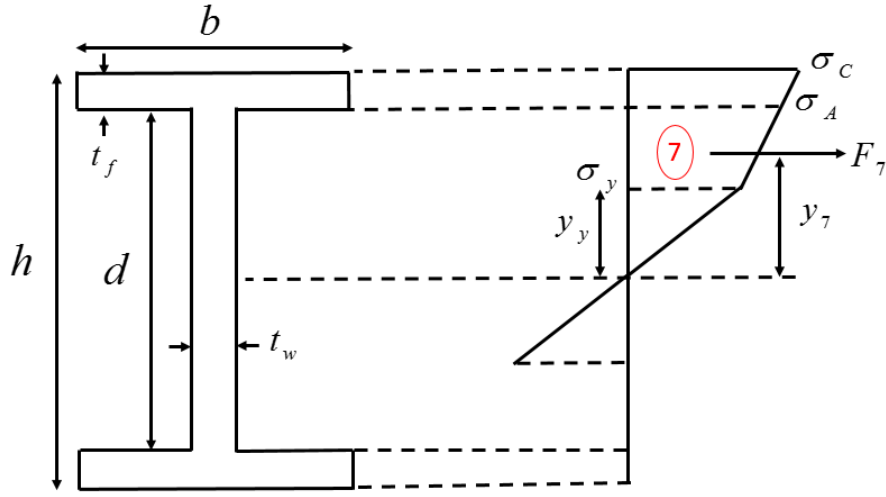
$$M_6 = 2F_6y_6 \quad (2.26)$$

(2.24) ve (2.25) numaralı denklemler (2.26) numaralı denklemde yerine konulursa aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$M_6 = [(\sigma_A + \sigma_{yf})b(y_y - d/2)] \left[\frac{d}{2} + \left(\frac{\sigma_A + 2\sigma_{yf}}{\sigma_A + \sigma_{yf}} \right) \frac{(y_y - d/2)}{3} \right] \quad (2.27)$$

Bu kısımda başlık ve gövde bölgesinin birlikte plastik olduğu durum incelenmiştir. Bu bölgenin kuvvet-moment gösterimi Şekil 2.6'da görülebilir.

7. bölge üzerinde oluşacak kuvveti ve kuvvetin merkeze olan uzaklığını hesaplayabilmemiz için σ_C ve σ_A bilinmelidir. (2.28) ve (2.29) numaralı denklemlerde görülebilir.



Şekil 2.6: Başlık ve gövde plastik olduğu durum için kuvvet-moment gösterimi.

$$\sigma_C = \sigma_y \left(1 - c + c \frac{h/2}{y_y} \right) \quad (2.28)$$

$$\sigma_A = \sigma_y \left(1 - c + c \frac{d/2}{y_y} \right) \quad (2.29)$$

Daha sonra F_7 ve y_7 değerleri (2.30) ve (2.31) numaralı denklemlerde olduğu gibi hesaplanabilir.

$$F_7 = \frac{(\sigma_A + \sigma_C)}{2} b t_f \quad (2.30)$$

$$y_7 = \frac{d}{2} + \left(\frac{\sigma_A + 2\sigma_C}{\sigma_A + \sigma_C} \right) \frac{t_f}{3} \quad (2.31)$$

Bu bölgede kuvvet sebebiyle oluşacak moment;

$$M_7 = 2F_7 y_7 \quad (2.32)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Kirişin tamamen plastik olduğu bölgedeki momentin hesaplanabilmesi için (2.32) numaralı denklem içerisinde (2.30) ve (2.31) numaralı denklem yazılarak (2.33) numaralı denklem elde edilebilir.

$$M_7 = [(\sigma_A + \sigma_C)bt_f] \left[\frac{d}{2} + \left(\frac{\sigma_A + 2\sigma_C}{\sigma_A + \sigma_C} \right) \frac{t_f}{3} \right] \quad (2.33)$$

Kompozit kirişin analitik metotlar ile hesaplanmasını yapabilmemiz için (2.4), (2.8), (2.12), (2.16), (2.23), (2.27), (2.33) numaralı denklemlerin moment sonuçlarını bir denklem içerisinde toplamamız gerekmektedir. (2.34) numaralı denklemde; yukarıda bahsi geçen denklemlerden yararlanarak plastik moment kapasitesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$M_{kesit} = \sum M_{govde} + \sum M_{baslik} \quad (2.34)$$

Yapılmış olan analitik metotlar ile çözümlenmelerin doğrulaması için 4 farklı eğer ifadesi (if statement) (2.34) numaralı denklem içerisinde kullanılması gereklidir. Bunlar; hepsinin elastik olduğu durum, başlık kısmının plastik gövde kısmının elastik olduğu durum, başlık kısmının elastik gövde kısmının plastik olduğu durum ve başlık ve gövde kısmının plastik olduğu durum olarak özetlenebilir. Yazılan python programlama kodu tezin Ek-1 kısmında sunulmuştur.

Analitik metodun doğrulanabilmesi için Python programlaması kullanılarak daha önce bahsedilen eğer ifadesi tanımlanmıştır ve buna göre çözümlenmeler yapılmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken başlığın akma gerilmesi (σ_{yf}) < gövdenin akma gerilmesi (σ_{yw}) olduğu kabul edilmiştir.

2.3 Hesaplamaların Sonlu Elemanlar Metotlarıyla Doğrulanması

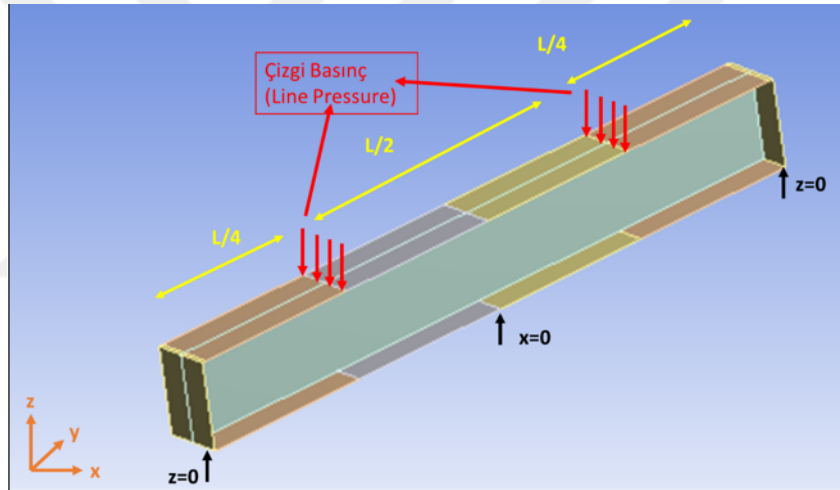
I-kesitli kiriş Solidworks 2015 programı kullanılarak çizilmiştir. Daha sonra sonlu elemanlar ağı tanımlaması yapılabilmesi için ANSA yazılımı kullanılmıştır. ANSA yazılımı içinde kiriş Shell eleman olarak tanımlanmış ve ANSYS 2018 programına entegre edilmiştir.

ANSYS programı bünyesinde plastik analizler sıklıkla kullanılmaktadır. Analizler yapılırken I-kesitli kirişin başlık ve gövde kısmının farklı malzemelerden oluştuğu ve aynı zamanda malzemeler bi-lineer plastik malzeme özelliğine sahip olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Malzeme özellikleri Çizelge 2.1'de detaylı olarak görülebilir.

Çizelge 2.1: Kullanılan malzeme özellikleri.

E_y	200(GPa)
E_{tf}	1(GPa)
E_{tw}	1(GPa)
σ_{yf}	352 (MPa)
σ_{yw}	376 (MPa)
ν	0.3

Analiz yapılırken malzemenin von-Mises akma kriterine göre eğildiği ve ayrıca kinematik sertleşme kuralını izlediği kabul edilmiş ve programda bu şekilde tanımlanmıştır. Buna ek olarak, programın iteratif Newton-Raphson metodu ile çözümlene yapması istenmiştir. Eğilme (Bending) analizi yapabilmek için 4-nokta temaslı eğilme metodu esas alınmıştır. I-kesitli kiriş üzerinde uygulanan sınır koşulları Şekil 2.7’de görülebilir.



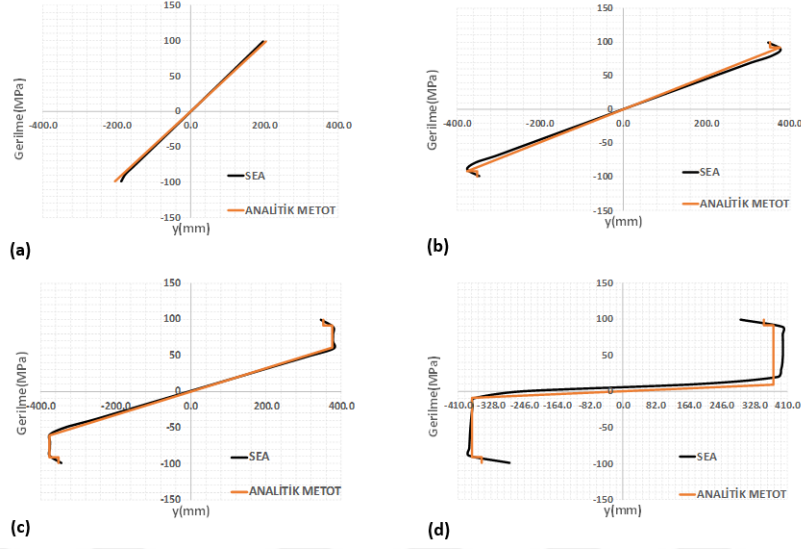
Şekil 2.7: Kullanılan sınır koşulları.

Yapılmış olan analizler ve analitik hesaplamalar sonucu Elastik moment ve Plastik moment değerleri hesaplatılmıştır. Çıkan sonuçlar Çizelge 2.2’de görülebilir.

Çizelge 2.2: Analiz ile analitik metodun doğrulanması.

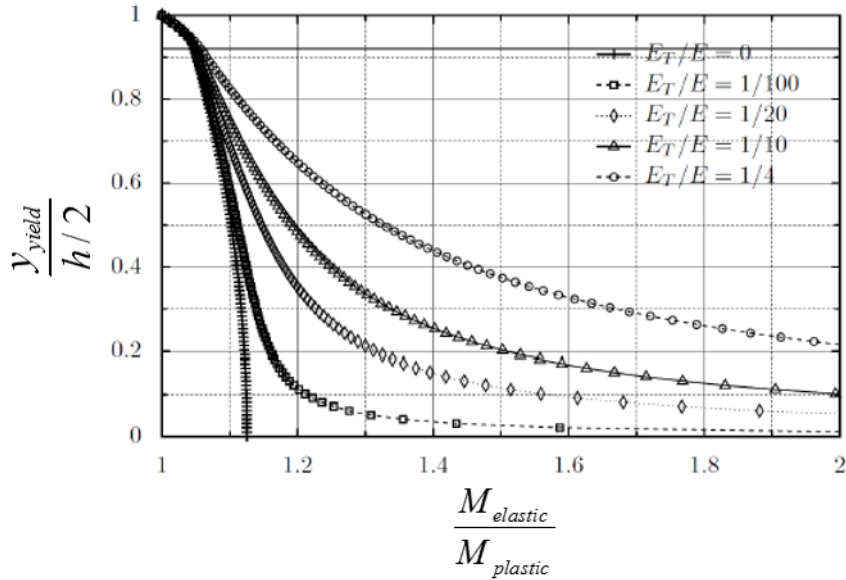
	Analitik metot	Sonlu elemanlar analizi	Hata oranı (yüzde)
M_{ela}	91.7 kN.m	91.5 kN.m	0.2
M_{pla}	103.5 kN.m	100.6 kN.m	2.8

Buna göre analitik metot ile yapılan hesapların doğru olduğu gözükmektedir. Buna ek olarak, kirişin elastik, elastik bölgeden plastik bölgeye geçiş, kısmi plastik ve tamamen plastik olduğu durumlar için çizdirilen grafikler Şekil 2.8’de görülebilir.



Şekil 2.8: Gerilme ve deplasmanın karşılaştırılma grafiği (a) elastik bölge, (b) elastikten plastik bölgeye geçiş, (c) kısmi plastik ve (d) tamamen plastik.

Analitik metot ile sonlu elemanlar metodunun doğrulanmasından sonra, python kodunun yardımı ile mühendislerin kullanabilmesi için $\frac{E_t}{E_y}$ plastik momentin artış grafiği Şekil 2.9’da sunulmuştur.



Şekil 2.9: $\frac{E_t}{E_y}$ nin değişimine göre moment oranı ile yükseklik oranı kıyaslaması.

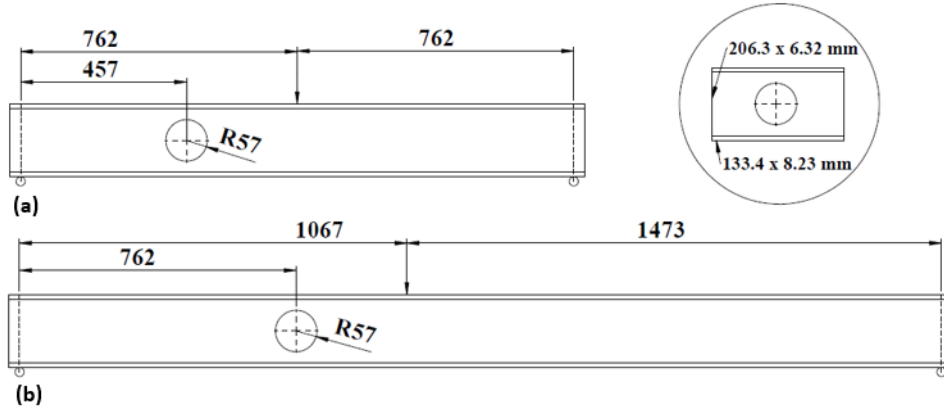


3. EĞİLME YÜKLERİNE MARUZ KALAN KİRİŞLERİN HAFİFLETME DELİĞİ ETRAFINDAKİ TAKVİYENİN VIERENDEEL MEKANİZMASINA ETKİSİ

3.1 Sonlu Elemanlar Modelinin Deneysel Çalışmalar ile Doğrulanması

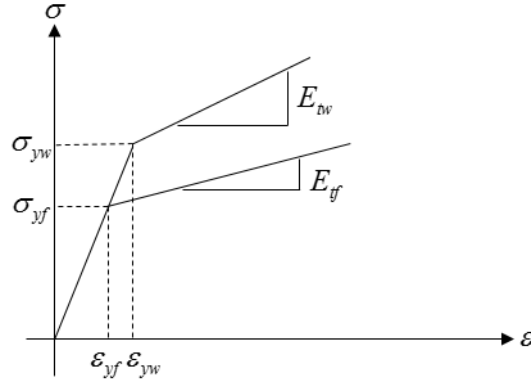
Sonlu elemanlar modeli ile analizlere başlanabilmesi için modelin; daha önce yapılmış deneysel sonuçlar ile doğrulanması gerekmektedir. Benzer karşılaştırmalar Rodrigues ve diğ. (2014), Chung ve diğ. (2001) ve Tsavdaridis ve D’Mello (2012) tarafından da yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri için Redwood ve McCutcheon (1968) yaptığı kupon testleri baz alınmıştır.

Redwood ve McCutcheon (1968) bazı kupon testlerini 2A ve 3A kirişleri üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Buna göre kiriş iki tarafından basit mesnetleştirme ile desteklenmiş ve çizgi basma kuvveti kirişin üst başlık kısmının belirli bir yerinden uygulanmıştır. Bu deneyde kullanılan 2A ve 3A kirişlerinin geometrisi Şekil 3.1’de görülebilir.



Şekil 3.1: Kiriş 2A ve 3A'nın geometrik özellikleri (Redwood ve McCutcheon (1968)).

Bu aşamada; deneysel sonuçların doğrulanabilmesi için ANSYS 2018 programı kullanılmıştır. Bi-lineer plastik model; kirişin malzeme özelliği olarak tanımlanmıştır. Örnek elastik-plastik malzeme gerilme gerinim grafiği Şekil 3.2’de görülebilir.



Şekil 3.2: Bi-linear elastik-plastik malzeme gerilme gerinim grafiği.

Kirişin bi-linear kinematik sertleşme ve von-Mises eğilme kriterini izlediği sonlu elemanlar programında malzeme özellikleri kısmında belirtilmiştir. Kirişin Vierendeel mekanizmasıyla eğilmesi; daha önce de bahsedildiği gibi deliğin etrafında dört adet plastik mafsallı oluşturmaktadır. Kiriş buradan geçer. Buna göre yüksek sehim seçeneği ANSYS programında aktive edilmiştir. Kirişin başlık ve gövde kısımları farklı malzemelere (kompozit) sahiptir. Buna göre kirişin elastik modülü ve tanjant modülünün başlık ve gövde kısımları için aynıdır. Kirişin elastik modülünü 200 GPa ve tanjant modülü 1 GPa olarak tanımlanmıştır.

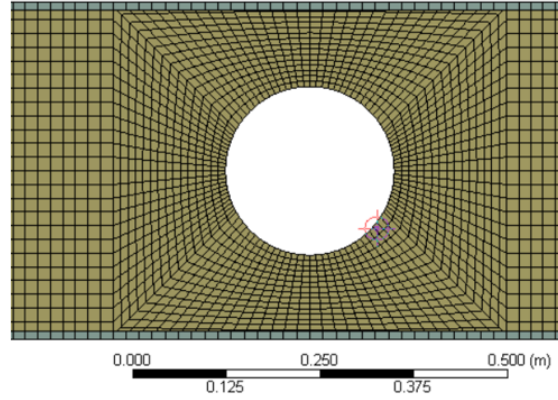
Başlık ve gövde kısımlarının akma gerilmesi ve son çekme mukavemeti farklı olarak tanımlanmıştır. Bu değerler Çizelge 3.1’de görülebilir.

Çizelge 3.1: 2A ve 3A kirişinin malzeme özellikleri (Redwood ve McCutcheon (1968)).

	Malzeme Mukavemet Değerleri	2A Kirişi	3A Kirişi
Başlık	Akma Dayanımı, f_y (MPa)	352	311
	Son Çekme Mukavemeti, f_{ult} (MPa)	503	576
Gövde	Akma Dayanımı, f_y (MPa)	376	361
	Son Çekme Mukavemeti, f_{ult} (MPa)	512	492

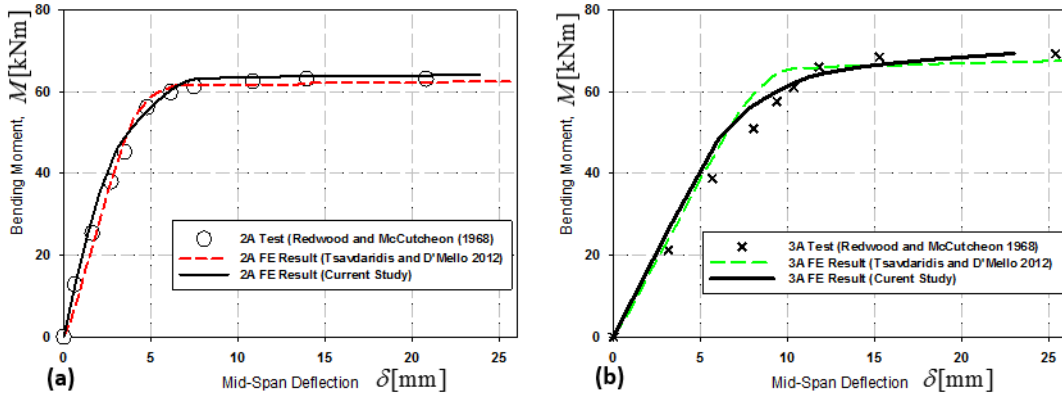
Vierendeel göçmesinde, kiriş; delik etrafında oluşan mafsallardan geçmektedir. Bu yüzden kirişin delik etrafına daha sık ve yoğun olacak bir sonlu elemanlar ağı tanımlaması yapılmıştır. Sonlu elemanlar ağı doğrulaması, sonlu elemanlar analizine başlanmadan önce yapılan önemli basamaklardan biridir. Çeşitli eleman boyutları kirişe uygulandıktan sonra maksimum eleman boyutu 20 mm ve elemanlar Shell 181 tipi eleman olarak seçilmiştir. Literatür taramalarında da bu tip

elemanların kullanıldığı görülmüştür (Tsavdaridis ve D'Mello (2012)). 2A ve 3A kirişlerine uygulanan sonlu elemanlar ağı Şekil 3.3'te görülebilir.



Şekil 3.3: 2A kirişi sonlu elemanlar ağı.

Şekil 3.4'te güncel çalışma ile Redwood ve McCutcheon (1968) ve Tsavdaridis ve D'Mello (2012)'nin yapmış oldukları çalışmaların karşılaştırması görülebilir.

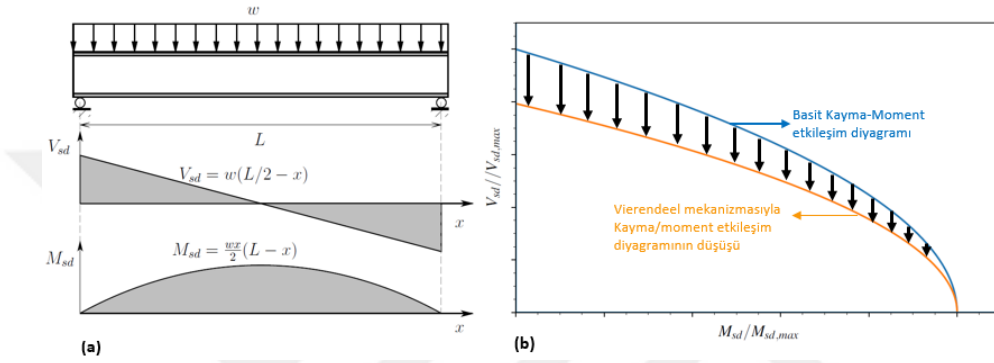


Şekil 3.4: 2A ve 3A kirişlerinin sonlu elemanlar analizi sonuçları.

2A ve 3A kirişleri için moment ve orta nokta sehim grafiği çizdirilmiştir. Bu çalışmada, Redwood ve McCutcheon (1968)'in yapmış olduğu testler ile Tsavdaridis ve D'Mello (2012)'nin çıkarmış olduğu sonlu elemanlar analizleri karşılaştırılmıştır. Buna göre Tsavdaridis ve D'Mello (2012)'nin yapmış olduğu testler ile 2A ve 3A kirişlerinin benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. İlk plastik mafsall oluşumunda aynı değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre sonlu elemanlar analizlerinin bi-lineer elastik-plastik malzeme için benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.

3.2 Kayma/Moment Etkileşim Eğrisinin Başka Bir Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Çalışmasıyla Doğrulanması

Kayma/moment etkileşim eğrisi, kirişin göçmesine sebep olan kayma ve moment değerlerinin kombinasyonu ile elde edilir. Bütün çıkarılan etkileşim eğrileri model olarak benzerdir. Basit çeyrek kübik eğriye, elipse veya daireye benzemektedir. Bahsedilen basit kübik kayma/moment etkileşim eğrisi Vierendeel mekanizmasının da etkisiyle aşağıya çekilir. Bu aşağı düşme de kayma oranı, moment oranına göre daha çok bir düşme göstermektedir. Vierendeel mekanizmasının kayma/moment etkileşim eğrisine etkisi Şekil 3.5’te görülebilir.



Şekil 3.5: (a) Basit mesnetleştirme ile sabitleştirilmiş ve dağılık yük (w) uygulanmış kiriş (b) Vierendeel mekanizmasının etkisiyle kayma/moment eğrisinin düşüşü.

Şekil 3.5 (a)'ya göre basit mesnetleştirme ile sabitlenmiş kirişin kayma/moment eğrisi Şekil 3.5 (b)'de mavi grafik ile görülebilmektedir. Bu eğri, Vierendeel mekanizmasının da etkisiyle aşağıda çekilmektedir (turuncu eğri).

Kayma/moment etkileşim eğrisi ile gösterilen x ve y eksenleri, sırasıyla kayma oranı ve moment oranını göstermektedir. Kayma oranı, global kayma kuvveti (V_{sd}) ve delikli kısmın teorik kayma kapasitesi ($V_{o,Rd}$) arasındaki orandır. Benzer bir şekilde moment oranı da global moment (M_{sd}) ile delikli kısmın teorik moment kapasitesi arasındaki orandır ($M_{o,Rd}$). Global kayma kuvveti ve global moment, sonlu elemanlar analizinden gelen göçme yükü (w) ile hesaplanmaktadır. Delikli kısmın kayma ve moment kapasitesi de analitik metotlar ile hesaplanır. Buna göre kayma/moment etkileşim eğrisi elde edilmektedir. Kayma/moment etkileşim eğrisinde, momentin maksimum olduğu durum deliğin tam ortada olduğu durumdur. Bu durumda kirişe uygulanan kayma oranı sıfır çıkmaktadır. Benzer bir durum kayma için de geçerlidir. Delikler en köşede kayma kuvveti en yüksek ol-

duğu zamandır. Bu sefer de moment değeri burada sıfır olmaktadır.

Köşe noktalarından basit mesnetleştirme ile sabitlenmiş ve üst başlık kısmından yayılı yük uygulanmış bir kirişin, delik üzerinde oluşan global kayma ve global moment değerleri Eşitlik (3.1) ve (3.2)'de verilmiştir.

$$V_{sd} = w\left(\frac{L}{2} - x\right) \quad (3.1)$$

$$M_{sd} = wx\left(\frac{L-x}{2}\right) \quad (3.2)$$

Bu formülasyonlarda L kirişin uzunluğunu, x ise delik mesafesini temsil etmektedir.

Delikli kirişin teorik kayma kapasitesi ($V_{o,Rd}$) ve teorik moment kapasitesi ($M_{o,Rd}$) sırasıyla Eşitlik (3.3) ve (3.4) ile elde edilebilir.

$$V_{o,Rd} = f_v A_{v0} \geq V_{sd}, \quad A_{v0} = ht_w - d_0 t_w, \quad f_v = \frac{0.577 f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.3)$$

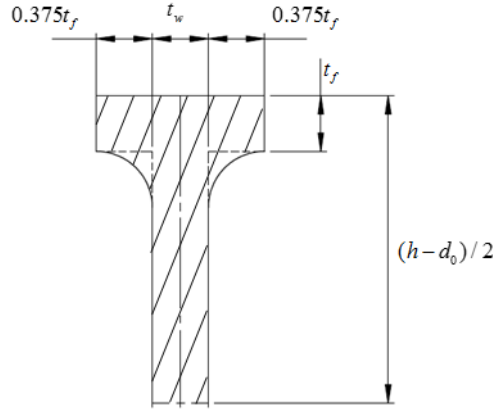
$$M_{o,Rd} = f_y W_{o,pl} \geq M_{sd}, \quad W_{o/pl} = W_{pl} - \frac{d_0^2 t_w}{4} \quad (3.4)$$

(3.3) ve (3.4) numaralı eşitliklerde verilmiş olan f_y akma gerilmesini, γ_{M0} güvenlik faktörünü (1 olarak alınmıştır) ve W_{pl} ise plastik modül demektir. Bunun dışındaki değişkenler Şekil3.7'den görülebilir.

Teorik kayma kapasitesinin hesaplanması formülasyonunda başlık kısmının alanları dahil edilmemektedir. Chung ve diğ. (2001), yaptıkları çalışma ile birlikte I-kesitli kirişin başlık kısmının da teorik kayma kapasitesi formülüne eklenmesi gerektiğini ileri sunmuşlardır (Şekil 3.6) ve bunu sonlu elemanlar analizleriyle doğrulamışlardır. Buna göre yeni sunulan başlık alanı hesabı (A_{vf}) Eşitlik (3.6)'da görülebilir.

$$A_{vf} = t_f(0.375t_f + t_w + 0.375t_f) \quad (3.5)$$

$$A_{vf} = t_f(t_w + 0.75t_f) \quad (3.6)$$



Şekil 3.6: Yeni sunulan kesme alanı hesabı Chung ve diğ. (2001).

Buna göre teorik kayma kapasitesi Eşitlik (3.8)'de görüldüğü gibi hesaplanabilir.

$$V_{o,Rd} = f_v [(ht_w + 2(0.75t_f^2) - d_0t_w)] > V_{o,Sd} \quad (3.7)$$

$$V_{o,Rd} = \frac{0.577f_y}{\gamma_{Mo}} [(ht_w + 2(0.75t_f^2) - d_0t_w)] > V_{o,Sd} \quad (3.8)$$

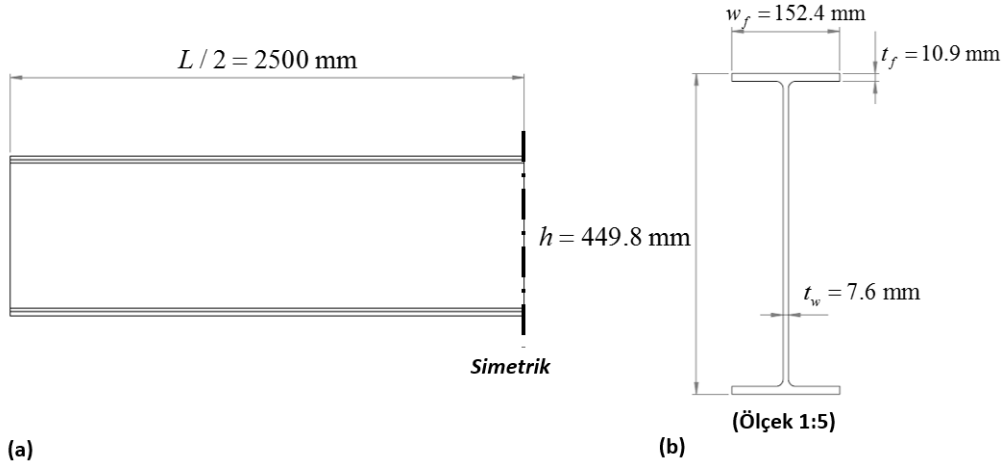
Bu formülasyonlar ile birlikte kayma oranı (3.9) ve moment oranı da Eşitlik (3.10)'a göre hesaplanabilir;

$$\bar{v} = \frac{V_{sd(FEA)}}{V_{o,Rd}} \quad (3.9)$$

$$\bar{m} = \frac{M_{sd(FEA)}}{M_{o,Rd}} \quad (3.10)$$

3.2.1 Kesit geometrisi

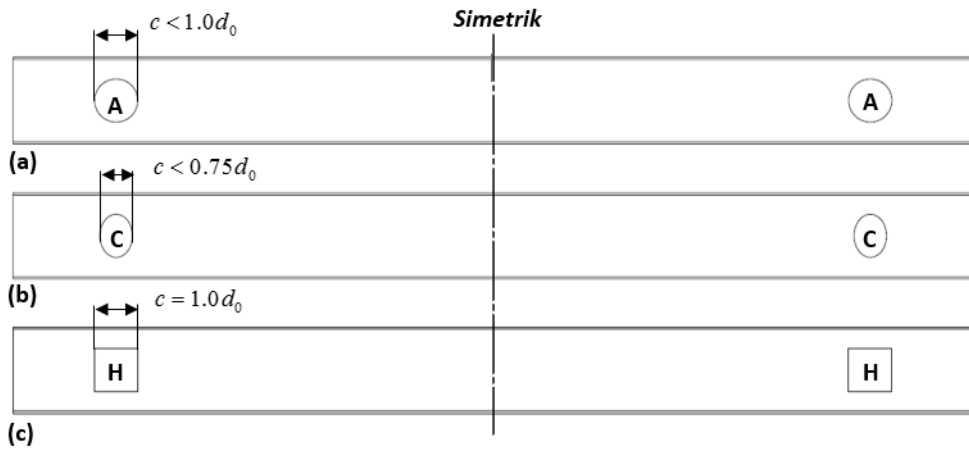
Üniversal kirişlerden UB 457x152x52 kirişi analiz edilmek için seçilmiştir. Bu kirişin seçilmesinin sebebi kirişin gövde kısmının kalınlığı, kirişin boyuna göre çok küçüktür. Bu da Vierendeel mekanizması geçmesine elverişli bir geometri sunmaktadır. Aynı kiriş Tsavdaridis ve D'Mello (2012) tarafından da analiz edilmek için seçilmiştir. Bu kiriş için geometri özellikleri Şekil 3.7'de görülebilir.



Şekil 3.7: UB457x152x52 kirişi geometrik boyutları (a) önden görünüm, (b) yandan görünüm.

Tsavdaridis ve D’Mello (2012)’nin yapmış olduğu çalışmadan açıklık A, C ve H halka tipi takviye uygulanması için seçilmiştir. Açıklık A, C ve H sırasıyla, dairesel eliptik ve kare delik açıklıklarını temsil etmektedir. Seçilen delik geometrileri Şekil 3.8’den görülebilir.

Seçilen üç farklı delik açıklıkları için geometriler Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8: Seçilen delik açıklıkları (a) dairesel (açıklık A), (b) eliptik (açıklık C), (c) kare (açıklık H).

Şekil 3.8’de listelenen üç farklı geometrinin seçimi sebebi, Tsavdaridis ve D’Mello (2012)’nin da makalelerinde bahsetmiş olduğu gibi, farklı kayma/moment eğilimleri göstermeleridir. Bu eğilimler kritik delik açıklığı (c) sebebiyle kaynaklanmaktadır. Kritik delik açıklığı dairesel delik için $c < 1.0d_0$, eliptik delik açıklığı için

$c < 0.75d_0$ ve kare delik açıklığı için $c = 1.0d_0$ 'dır.

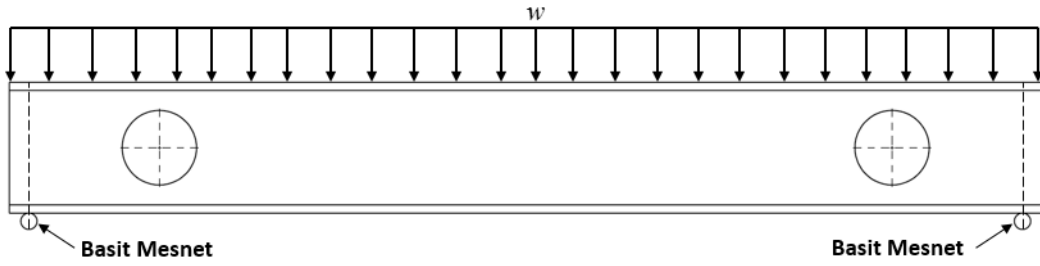
3.2.2 Sonlu elemanlar modeli

Üç farklı delik tipi için, kirişlerin delik çapları karşılaştırma yapabilmek için Tsavdaridis ve D'Mello (2012)'nin yaptığı gibi $d_0 = 0.5h, 0.65h$ ve $0.8h$ olarak seçilmiştir. Her bir delik tipi için ANSYS sonlu elemanlar programında parametrik modelleme metodları kullanılmıştır. Kiriş ANSYS programı bünyesinde tasarım modülü (design modeller) kullanarak parametrik olarak tasarlanmıştır. Yine ANSYS programı üzerinde sonlu elemanlar ağı tanımlaması yapılmıştır. Analiz özellikleri karşılaştırılabilir olması için Tsavdaridis ve D'Mello (2012) kullandığı özelliklerle benzer özelliklerle seçilmiştir. Seçilen özellikler aşağıdaki gibidir.

- S275 tipi malzeme kullanılmıştır.
- Malzemenin bi-linear plastik malzeme olduğu kabul edilmiştir ve buna göre elastik modülü 200GPa ve tanjant modülü 1 GPa olarak atanmıştır.
- Malzemenin von-Mises akma kriterine göre eğildiği kabul edilmiş ve bu doğrultuda, bir çok metal için daha uygun olan kinematik sertleşme kuralı tanımlanmıştır.
- Kiriş ortadan simetriktir ve her iki tarafta bir adet delik vardır.
- Kiriş yarım olarak modellenmiş ve ANSYS programının simetri özelliğinden yararlanılmıştır.
- ANSYS programında çözücü olarak tekrarlayan Newton-Rapson metodu seçilmiştir.
- Kirişin eğilmesi sırasında plastik bölgeye geçebilmesi için yüksek deformasyon (large deformation) özelliği seçilmiştir.
- Doğrusal olmayan geometrik ve malzeme özellikleri tanımlaması yapılmıştır.
- Kiriş iki ucundan basit mesnetleştirme ile sabitlenmiştir ve ortasından basma kuvveti yayvan olarak üst başlık kısmından uygulanmıştır.
- 4-noktalı SHELL 181 elemanı kullanılmıştır.

- Analiz süresinin kısalması için sonlu elemanlar ağı çalışması yapılmıştır.

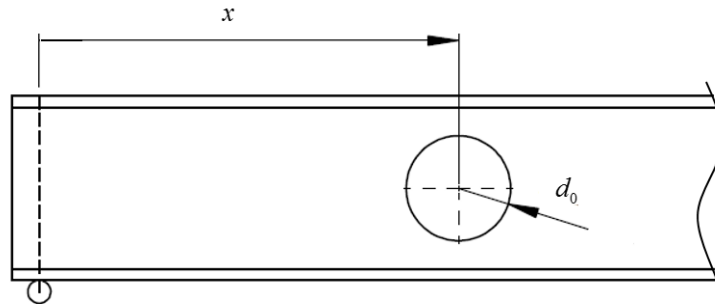
Örnek sınır koşulları açıklık A'ya göre Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9: Açıklık A için sınır koşulları.

3.2.3 Kayma/moment etkileşim eğrilerinin karşılaştırılması

Parabolik bir eğri elde edilebilmesi için kirişin her bir farklı delik çapı için farklı delik mesafelerine göre parametrik bir şekilde hesaplama yapılması gerekmektedir. Delik mesafesi (x), deliğin basit mesnete olan uzaklığını temsil etmektedir. Aynı zamanda Şekil 3.10'dan görülebilir.



Şekil 3.10: Delik mesafesi (x).

Analizler 10 farklı pozisyon için yapılmıştır. Bu pozisyonlar Çizelge 3.2'de görülebilir. Buna göre $x=0$ mm iken iki mesnet üzerinde de yarım delik vardır, $x=2500$ mm iken delik tam ortadır.

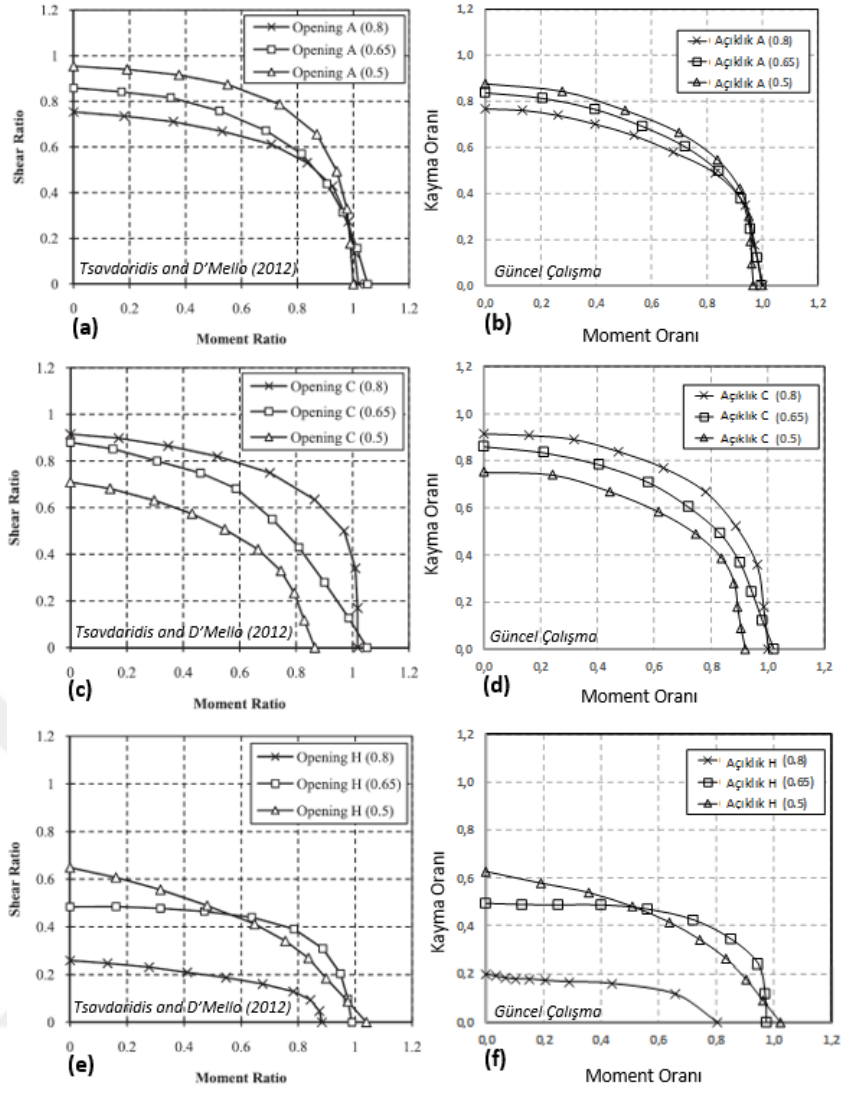
Çizelge 3.2: Delik mesafeleri (x) (Şekil 3.10'a bakınız).

Pozisyon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x [mm]	0	284	537	788	1039	1299	1573	1866	2177	2500

Kayma ve moment oranlarının hesaplanabilmesi için için sonlu elemanlar metotlarıyla hesaplanan V_{sd} ve M_{sd} değerlerindeki, göçme yüküne (w) ihtiyaç vardır. Sonlu elemanlar metotlarıyla yapılan analizlere göre kirişin göçme yükü (w)-orta nokta sehim eğrisi çizdirilmiştir. Malzeme bi-lineer malzeme özellikleri taşıdığı için çıkan grafikler de yine bi-lineer özellik göstermektedir. Bu grafiklere göre de göçme yüklemesi elde edilir. Yapılan her bir analizden elde edilen sonuçlar, tezin ek-2 kısmında verilmiştir.

Tsavdaridis ve D'Mello (2012) tarafından farklı delik tipleri için elde edilen doğrusal olmayan kayma/moment etkileşimi Şekil 3.11'den görülebilir. Bu sonuçlar; dairesel, eliptik ve kare tipi delikler için geçerlidir.

Tsavdaridis ve D'Mello (2012) 'nun yapmış olduğu çalışmaya göre dairesel delik açıklığı standart tipik bir yol izlemektedir. Bu standart yola göre; en büyük delik çapına sahip olan açıklık eğrinin en altında bulunmaktadır. Şekil 3.11 (b)'den de görülebileceği üzere güncel çalışmanın sonuçları Tsavdaridis ve D'Mello (2012)'nin yapmış olduğu çalışma ile (Şekil 3.11 (a)) benzer sonuçlar göstermektedir. Eliptik delik açıklığı sonuçları Şekil 3.11 (c) ve (d)'den görülebilir. Bu tip delik açıklığı diğer standart delik açıklıklarından farklı bir eğilim göstermektedir. Bu delik tipinde en büyük delik çapına sahip olan açıklık kayma/moment oranı en yüksektir. Bunun temel sebebi deliğin kritik delik açıklığının (c , Şekil 3.8 (b)) diğer tiplere göre daha küçük ($c < 0.75d_0$) olmasıdır. Küçük delik açıklığı yüksek global kayma kuvveti ($V_{sd(FEA)}$) sonuçları vermektedir. Kare tipi delik açıklığı için sonuçlar Şekil 3.11 (e) ve (f)'de görülebilir. Kare tipi delik açıklığı sonuçları, dairesel delik açıklığındakilerle benzer sonuçlar vermektedir. Kritik delik açıklığı (c) büyük olduğu için, büyük delik çapına sahip delik açıklıkları düşük kayma/moment oranları göstermektedir.

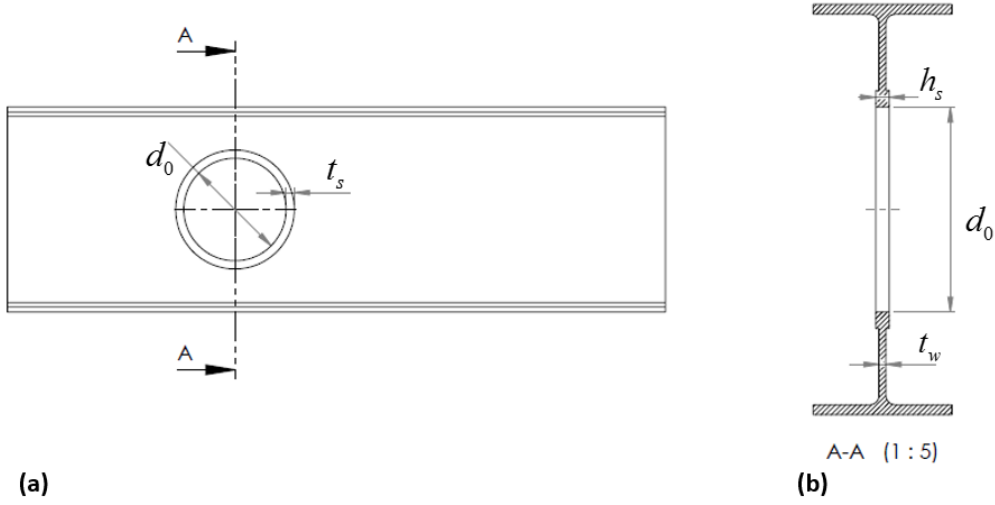


Şekil 3.11: Kayma/moment etkileşim eğrisi grafiği karşılaştırması (a) açıklık A (Tsavdaridis ve D’Mello (2012)), (b) açıklık A (Güncel Çalışma) , (c) açıklık C (Tsavdaridis ve D’Mello (2012)), (d) açıklık C (Güncel Çalışma), (e) açıklık H (Tsavdaridis ve D’Mello (2012)), (F) açıklık H (Güncel Çalışma).

3.3 Takviye Parametrelerinin Belirlenmesi

Bilindiği üzere takviyeler bir sürü yapısal elemanın bünyesinde mekanik özellikleri geliştirmek için kullanılmaktadır. Takviyeler farklı amaçlar için kullanılabilir. Örneğin, titreşimi azaltmak veya malzemenin mukavemetini arttırmak için takviyeler kullanılmaktadır. I-kesitli kirişler için farklı birkaç çeşit takviye kullanılmaktadır. Bunlar; yatay, dikey veya halka tipi takviye olarak geçer. Her biri I-kesitli kiriş farklı özellikler kazandırmaktadır. Bu takviyeler kirişe farklı kaynak metotlarıyla ya da perçinleme metotlarıyla bağlanabilmektedir. Bu çalışmada

kullanım alanlarından dolayı ve deliğin etrafında kolay bir şekilde monte edilebildiği için halka tipi takviyeler analiz edilmek için seçilmiştir. Takviye eklenmiş I-kesitli kirişin geometrisi Şekil 3.12’de görülebilir.



Şekil 3.12: Takviyeli kiriş geometrisi (a) önden görünüm, (b) kesit görünümü.

Takviyenin geometrik boyutlarını belirlemeden önce, detaylı bir şekilde literatür araştırması optimum ve uygun parametrelerin belirlenebilmesi için yapılmıştır. Menkulasi ve diğ. (2015), kastella kirişlerde konsantre yük altında takviyenin önemini araştırmışlardır. Araştırmalar sırasında doğrusal olmayan (non-linear) sonlu elemanlar analizleri kullanmışlardır.

Al-Thabhwawee ve Al-Kannoon (2018), halka tipi takviye eklenmiş kastella kirişleri araştırmışlardır. Burada da doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizlerini dört farklı kiriş tipi için gerçekleştirmişlerdir. Takviye sacı olan kirişlerin en iyi sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile , farklı yükler için, takviye sacının deplasmanı minimize ettiği ve maksimum çekme mukavemetini arttırdığı gözlemlenmiştir. Takviye sacının etkisi belirlendikten sonra, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri ile birlikte farklı takviye sacı kalınlıkları ve yüksekliklerinin kirişin mukavemet özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Takviye kalınlığı/delik çapı (t_s/d_0) oranı literatürde yapılan araştırmalara göre önemli bir oran olduğu görülmüştür. Al-Thabhwawee ve Al-Kannoon (2018), bu parametreyi 0.02, 0.03, 0.05 ve 0.07 olarak belirlemişlerdir. Takviye seçimi yaparken diğer bir önemli oran ise h_s/t_w takviye eni/gövde kalınlığıdır. Bu değer sabit 4 olarak çalışmalarında belirlenmiştir.

Orun ve Guler (2017), halka tipi takviyelerle ince kirişlerin burkulma davranışla-

rını incelemiştirlerdir. Analizlerinde doğrusal olmayan malzeme ve geometri özelliklerini birleşik yükler (basma, kayma ve eğilme) altında araştırmışlardır. Araştırmalarına göre delikli kirişin etrafındaki halka tipi güçlendirmeler için iki oran da dikkate alınmıştır. Buna göre t_s/d_0 oranı 0.033 ile 0.15 arasında değişmesi belirlenmiştir, h_s/t_w oranının ise 1.5 ile 4.5 arasında değişmesi belirlenmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre delik etrafındaki güçlendirmenin kirişin mukavemet özelliklerine etkisi görülmüştür. Bu oranlar artsa da burkulma sabitlerinin belirli bir yerden sonra aynı kaldığı gözlemlenmiştir. Orun ve Guler (2017) yaptıkları çalışmalar sonucunda birleşik yük altında etkileşim eğrilerini mühendislere kullanmaları için sunmuşlardır.

Yapılan literatür araştırmalarına göre güçlendirme (takviye) kalınlığı belirlenirken bakılması gereken en önemli iki oranın t_s/d_0 (takviye kalınlığı/delik çapı) ve h_s/t_w (takviye genişliği/gövde kalınlığı) olduğu gözlemlenmiştir. Takviye kalınlığı ve genişliğinin birbirinden ayrı olarak incelenebilmesi için; öncelikle h_s/t_w oranı sabit tutulup (2), t_s/d_0 oranı 0.03, 0.05, 0.07 ve 0.09 olarak belirlenmiştir.

Daha sonra t_s/d_0 oranı 0.05 (sabit) tutulup, h_s/t_w oranı 2, 3 ve 4 olarak belirlenmiştir.

Buna göre t_s ve h_s birbirinden ayrı olarak etkilerinin görülmesi planlanmıştır.

Her bir tip delik açıklığı için üç farklı delik çapı mevcuttur, bunlar, $d_0=0.5h$, $0.65h$ ve $0.75h$ delik çaplarıdır. $d_0=0.8h$ delik çapı daha önceki analizlerde kullanılmıştır ancak takviye eklenirken delik çapı çok fazla büyüdüğü için takviye eklemek pratik olmayacaktır. Bu sebepten ötürü $d_0=0.8h$ delik çapı analiz edilmek üzere seçilmemiştir, yerine $d_0=0.75h$ seçilmiştir.

3.4 Takviyeli Kirişlerin Kayma/Moment Etkileşim Diyagramları

Tezin bir önceki kısmında halka tipi takviyelerin kalınlığı ve genişliği ile ilgili bilgiler verilmiştir. Delikli I-kesitli kirişi takviyeden dolayı gelen ek kısmın, global kayma kuvveti ve global eğilme momenti formüllerine katılması gerekmektedir. Takviyeli I-kesitli kirişin geometrik özellikleri Şekil 3.12'den de görülebilir.

Kesit özelliklerini göre takviyeyle birlikte yeni takviyeli teorik kayma kapasitesi

$$V_{o,Rd,s} = \frac{0.577f_y}{\gamma_{Mo}} [(ht_w + 2(0.75t_f^2) - d_0t_w + 2t_s h_s)] \quad (3.11)$$

Yeni kesit özelliklerine göre takviyeli kirişin yeni teorik moment kapasitesi ise;

$$M_{o,Rd,s} = (W_{pl} - \frac{d_0^2 t_w}{4} + h_s t_s (d_0 + t_s)) \quad (3.12)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada formüle ekstra $2t_s h_s$ ve $h_s t_s (d_0 + t_s)$ değerleri eklenen takviye sebebiyle gelmektedir. Buna göre yeni kayma oranı ve moment oranı;

$$\bar{v} = \frac{V_{sd(FEA)}}{V_{o,Rd,s}} \quad (3.13)$$

$$\bar{m} = \frac{M_{sd(FEA)}}{M_{o,Rd,s}} \quad (3.14)$$

olarak hesaplanmaktadır.

Yeni sunulan kayma ve moment oranları ile takviyeli kirişin analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Sonlu elemanlar analizi özellikleri 'Kayma/Moment Etkileşim Eğrisinin Başka bir Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Çalışmasıyla Doğrulanması' kısmında kullanılan ile aynı özelliklerdedir. Sadece eklenen halka tipi takviyeye yeniden ağ örgüsü tanımlaması yapılmıştır. Yaklaşık 700 adet başarılı sonlu elemanlar analizi sonuçlarından sonra her bir farklı delik tipi için kayma/moment etkileşim eğrisi grafikleri elde edilmiştir.

Daha önce 'Kayma/Moment Etkileşim Eğrisinin Başka bir Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Çalışmasıyla Doğrulanması' kısmında da bahsedildiği gibi $V_{sd(FEA)}$ ve $M_{sd(FEA)}$ formüllerinde sonlu elemanlar analizlerinden gelen göçme yükü (w) değerleri vardır. Sonlu elemanlar analizlerinden gelen bu değere göre hesaplamalar yapılmıştır.

3.4.1 Analiz sonuçları

Yeni $V_{o,Rd,s}$ ve $M_{o,Rd,s}$, formülasyonuna göre takviyeli teorik kayma kapasitesi ve takviyeli teorik moment kapasitesi değerleri takviye sebebiyle artmaktadır. Bu da normale göre kayma ve moment oranının azalmasına yol açar. Ancak takviye ile yeni sonlu elemanlar analizinden gelen göçme yükünün (w) artması durumunda kayma oranı ve moment oranı sabit kalabilir veya artabilir. Bu da I-kesitli kirişlere uygulanan takviyelerin negatif veya pozitif etki yaratıp yaratmadığının yorumu-

nun yapılmasında yardımcı olacaktır.

Bu kısımda yapılan analizler sonucu elde edilen değerler, her bir delik tipine göre kendi bünyesinde incelenmiştir. Her bir delik tipi için sonuçlar iki farklı şekilde sunulmuştur. Öncelikle takviye kalınlığının (t_s) etkisine göre daha sonra da takviye genişliğinin (h_s) etkisine göre sonuçlar yorumlanmıştır.

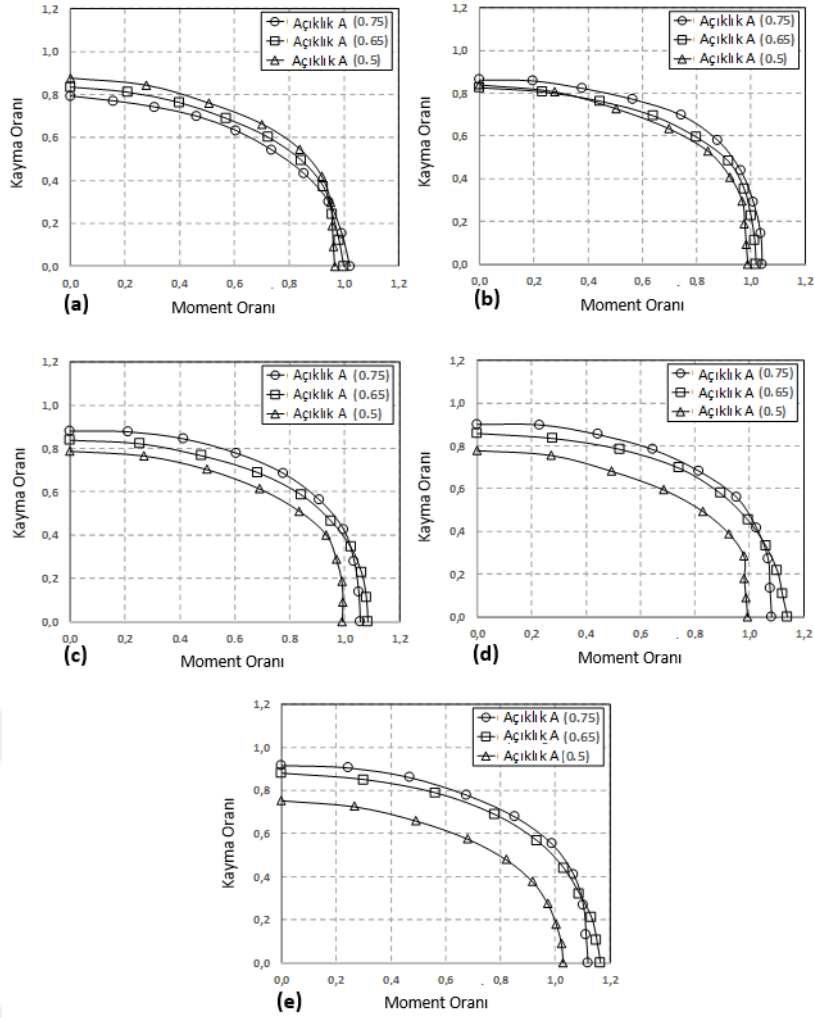
Kayma/moment etkileşim eğrisinin çıkarılması için SEA'dan gelen göçme yüküne (w) ihtiyaç vardır. Elde edilen göçme yükü değerleri, takviye kalınlığının (t_s) etkisinin incelendiği analizler için EK-3, takviye genişliğinin (h_s) etkisinin incelendiği analizler için ise EK-4'te sunulmuştur.

3.4.2 Takiye kalınlığına göre analiz sonuçları

Kayma/moment etkileşim diyagramları, açıklık A için, farklı t_s/d_0 oranlarına göre Şekil 3.13 ve 3.14'te çizdirilmiştir. t_s/d_0 oranı 0 ve 0.09 arasında değişmektedir. t_s/d_0 oranı 0 olduğu zaman takviye kullanılmamıştır.

Açıklık A için, daha önce de bahsedildiği gibi, delik çapının büyümesiyle birlikte kayma/moment oranlarının azaldığı görülmektedir. Bu genel eğilim takviye kullanılmasıyla tersine dönmüştür. Takviye eklenmesiyle, büyük delik çapları için, kayma ve moment etkileşim eğrileri pozitif bir eğilim göstermektedir. Kayma/moment oranları orta ve büyük delik çapları için artmaktadır. Bu da eğilimin tersine dönmesine yol açmaktadır. Şekil 3.13 (a)'da verildiği üzere t_s/d_0 oranı 0 olduğu zaman, en aşağıdaki eğri en büyük delik çapına sahip olan eğridir. t_s/d_0 oranı artmaya başladığı zaman en aşağıdaki eğri en küçük delik çaplı eğri haline gelmektedir. Bu da takviyenin büyük delik çapları için daha etkili olduğunu göstermektedir.

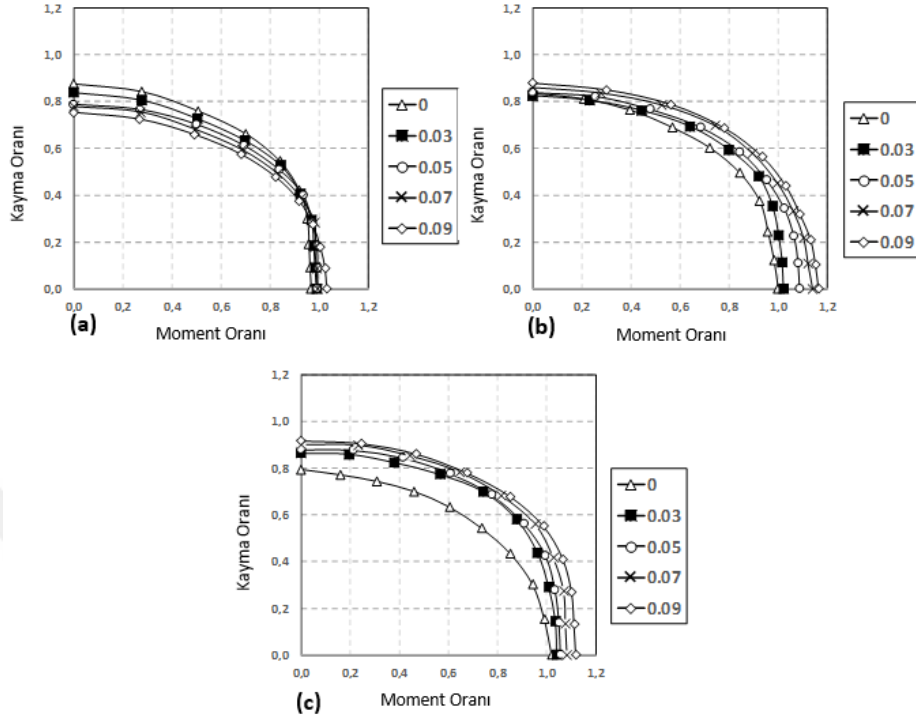
Delik çapının sabit tutulup t_s/d_0 oranının etkisinin gözlemlendiği sonuçlar Şekil 3.14'te görülebilir.



Şekil 3.13: Açıklık A için $h_s/t_w=2$ (sabit) iken kayma/moment etkileşim eğrileri (a) $t_s/d_0 = 0$, (b) $t_s/d_0 = 0.03$, (c) $t_s/d_0 = 0.05$, (d) $t_s/d_0 = 0.07$, (e) $t_s/d_0 = 0.09$.

Şekil 3.14 (a)'da, delik çapı $d_0 = 0.5h$ iken, göçme tipinin kirişin mesnetten 4'te 1'i uzaklıktan sonra sonra değiştiği görülmektedir (6. nokta, $x=1299$ mm, Çizelge 3.2'den görülebilir). 6.nokta aksi yönde eğilme noktasıdır (contra flexure point). 6.nokta ve sonrası göçme tipi Vierendeel tipi göçmeden eğilme göçmesine geçmektedir. Bu noktadan sonra eğilme yükü baskın hale gelmektedir ve takviye kullanımıyla kayma/moment oranları artmaktadır. Bu noktadan önce kirişte Vierendeel tipi göçme etkindir. Vierendeel tipi göçmede daha önce de bahsedildiği gibi kayma yüklemesi etkindir. Kayma yüklemesinde gerilme küçük delik çapı için ($d_0 = 0.5h$), 0 gerilmeden maksimum gerilmeye yüksek bir eğimle (yavaş bir şekilde) transfer olmaktadır. Gerilmenin yavaş transfer olması örneği Şekil 3.17'den görülebilir. Burada görüldüğü üzere küçük delik çapında kayma gerilmesi yüksek bir eğimle ilerlemektedir. Bu yüzden eklenen takviye gerilmeyi etkilememektedir

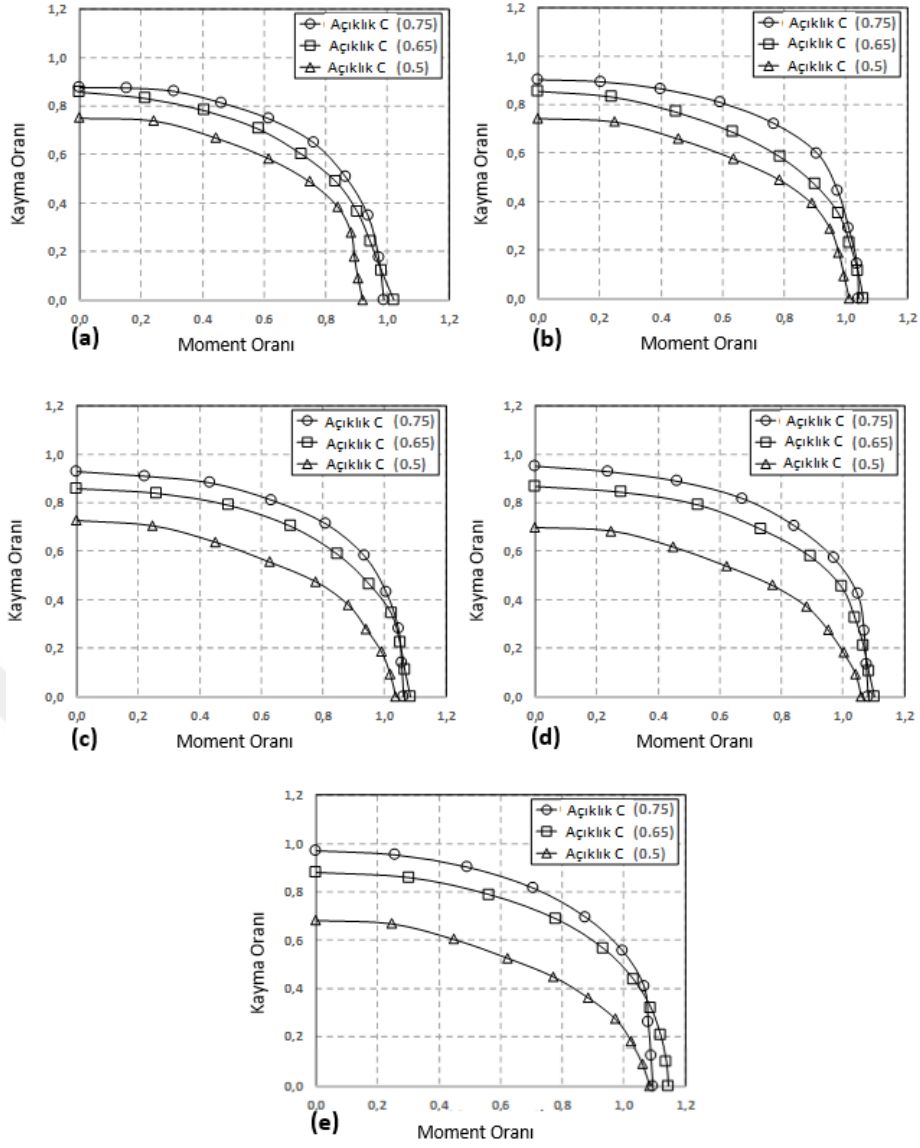
ve göçme yükü aynı kalmaktadır. Bu da kirişin kayma/moment oranının Vierendeel tipi göçmede düşmesine sebep olmaktadır. Yüksek kaymanın etkin olduğu noktalarda, takviyenin küçük delik çapında etkili olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.14: Açıklık A için farklı delik çaplarına göre kayma/moment etkileşim diyagramları ($h_s/t_w=2$) (a) $d_0 = 0.5h$, (b) $d_0 = 0.65h$, (c) $d_0 = 0.75h$ (legendların içindeki oranlar; t_s/d_0).

Büyük delik çaplarında $d_0 = 0.65h$ ve $d_0 = 0.75h$ iken kayma gerilmesi, 0 gerilmeden maksimum gerilmeye daha az eğimle (daha hızlı) transfer olmaktadır (Şekil 3.17'de orta ve büyük delik çaplarında kayma gerilmesinin hızı görülebilir). Bu sebepten ötürü büyük delik çaplarında Vierendeel tipi göçmenin etkin olduğu yerlerde de kayma oranı, takviye kullanımıyla artmaktadır. Artan t_s/d_0 oranıyla kayma/moment oranının da gittikçe iyileştiği görülmektedir.

Açıklık C deliklerine göre her bir t_s/d_0 oranının sonuçları Şekil 3.15'ten görülebilir.

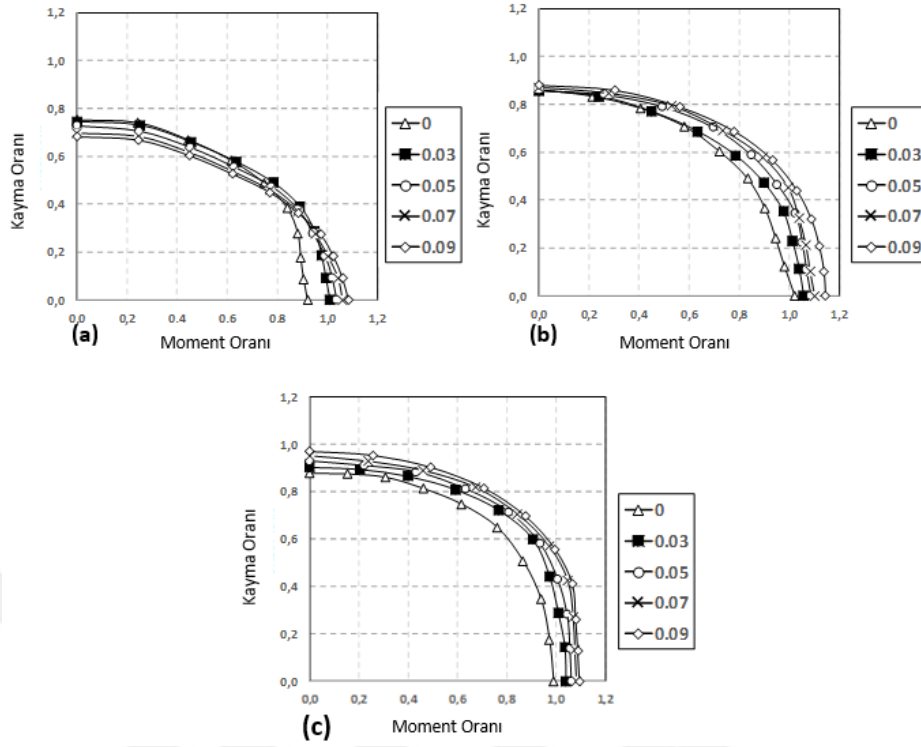


Şekil 3.15: Açıklık C için $h_s/t_w=2$ (sabit) iken kayma/moment etkileşim eğrileri (a) $t_s/d_0 = 0$, (b) $t_s/d_0 = 0.03$, (c) $t_s/d_0 = 0.05$, (d) $t_s/d_0 = 0.07$, (e) $t_s/d_0 = 0.09$.

Takviye kalınlığı'nın (t_s) artmasıyla, eliptik açıklığın da dairesel (standart) açıklıkta olduğu gibi benzer kayma/moment etkileşim eğrilerini izlediği görülmektedir. Buna göre en büyük delik çapı en yüksek kayma ve moment oranlarına sahiptir. Benzer eğilim takviye olmayan eliptik delik açıklıklarında da görülmektedir. (Şekil 3.15 (a)). Bu eğilim takviye eklenmesiyle ve t_s/d_0 oranının da artmasıyla korunmaktadır. Aynı zamanda, eliptik delik açıklığında, bütün delik çapları için göçme yüklerinin kritik delik açıklığı sebebiyle yakın olduğu not edilmiştir. ($c < 0.75d_0$).

Delik çapının sabit tutulup t_s/d_0 oranının değişimin gözlemlendiği sonuçlar Şekil

3.16’da görülebilir.



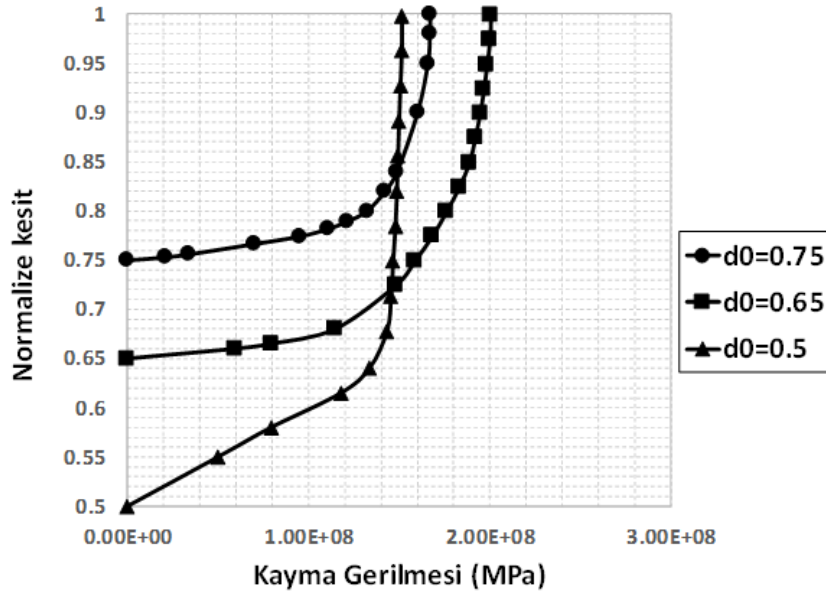
Şekil 3.16: Açıklık C için farklı delik çaplarına göre kayma/moment etkileşim diyagramları ($h_s/t_w=2$) (a) $d_0 = 0.5h$, (b) $d_0 = 0.65h$, (c) $d_0 = 0.75h$ (legendların içindeki oranlar; t_s/d_0).

Dairesel delik açıklığında yapılan ile benzer yorumlar eliptik delik açıklığında da yapılabilir. Dairesel delik açıklığında da olduğu gibi, Şekil 3.16 (a) $d_0 = 0.5h$ için, 6.nokta aksi yönde eğilme noktasıdır. Bu noktada, kirişin göçme mekanizması Vierendeel tipi göçmeden eğilme göçmesine geçmiştir. 6.noktadan önce Vierendeel tipi göçme etkin olduğu için kirişte kayma gerilmesi ön plandadır. Kayma gerilmesinde de küçük delik çaplarında kayma gerilmesinin 0 gerilmeden maksimum gerilmeye geçişi daha yavaş olmaktadır (Şekil 3.17’den maksimum gerilmeye geçiş görülebilir). Bu sebepten ötürü, dairesel delik açıklığında olduğu gibi, takviye göçme yükünü etkilememektedir. Değişmeyen göçme yükü, Vierendeel göçmesinin etkin olduğu kısımda, düşük kayma oranlarına sebep olur. 6.nokta sonrasında, kiriş eğilme mekanizmasıyla göçerken, göçme yüklerinin ve moment oranlarının t_s/d_0 oranının artmasıyla arttığı görülmektedir. Bunun sebebi kiriş eğilme yüklemesi altındayken gerilmenin delik açıklığı kesitindeki dağılımıyla alakalıdır.

Şekil 3.16’de (b) ve (c) şıklarında ise orta ve büyük delik çaplarındaki kayma/ moment oranları görülebilir. Buna göre; orta ve büyük delik çaplarında ($d_0 = 0.65h$

ve $d_0 = 0.75h$), kayma/moment oranlarının takviye kalınlığının artmasıyla artar. Bunun sebebi de orta ve büyük delik çaplarında, hem Vierendeel tipi göçmede hem de eğilme göçmesinde kesit üzerindeki gerilmedir. Kiriş Vierendeel tipi göçmedeyken büyük delik çapında kayma gerilmesi kesitte, 0 gerilmeden maksimum gerilmeye keskin (hızlı) bir şekilde geçmektedir (Şekil 3.17'den orta ve büyük delik çapları için görülebilir örnek gerilme görülebilir). Bu da küçük delik çapında olduğu gibi kayma oranının azalmasına değil, artmasına sebep olmaktadır. Kiriş eğilme göçmesi altındayken ($x=1299$ mm sonrası) delik kesitinde oluşan eğilme gerilmesi dağılımı sebebiyle takviye yine etkili olmaktadır. Genel olarak orta ve büyük delik çaplarında takviyenin daha etkili olduğu bu delik açıklığı için de görülmektedir.

Açıklık A ve C için kayma oranının düşmesine sebep olan, kirişin Vierendeel göçmesi bölgesinde, delik üzerinde oluşan kayma gerilmesi örneği Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17: Açıklık A ve C için delik kesitinde oluşan kayma gerilmesi örneği.

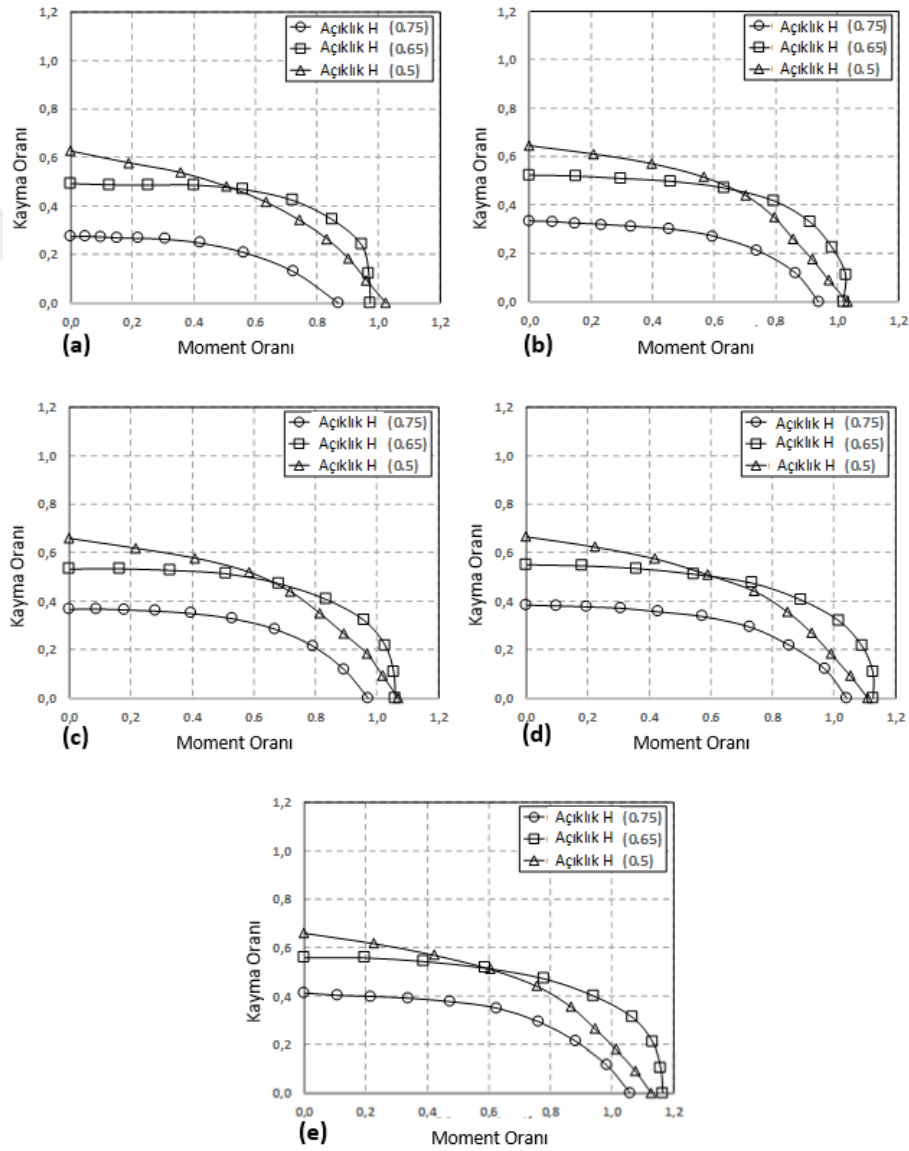
Şekil 3.17'de verilen grafik, açıklık A ve C için, kirişin Vierendeel tipi göçme kısmında, kesitte oluşan, kayma gerilmesini temsil etmektedir. Şekil 3.17'de x eksenini kirişin kesitte oluşan kayma gerilmesini, y eksenini ise delik çapının toplam kiriş boyuna normalize edilmesinin herhangi bir konumdaki örneğini göstermektedir.

Şekil 3.17'den de anlaşılacağı üzere Vierendeel göçmesinde, küçük delik çaplarında, kayma gerilmesi yavaş bir şekilde (yüksek bir eğim ile) 0 gerilmeden

maksimum gerilmeye transfer olmaktadır. Bu da açıklık A ve C için kayma oranının aksi yönde eğilme noktasına kadar düşmesinin sebebini göstermektedir.

Orta ve büyük delik çaplarında ise ($d_0 = 0.65h$ ve $d_0 = 0.75h$), kayma gerilmesi kesitte daha hızlı bir şekilde (düşük eğim ile) 0 gerilmeden maksimum gerilmeye transfer olur. Bu yüzden uygulanan takviye orta ve büyük delik çaplarında açıklık A ve C için etkilidir.

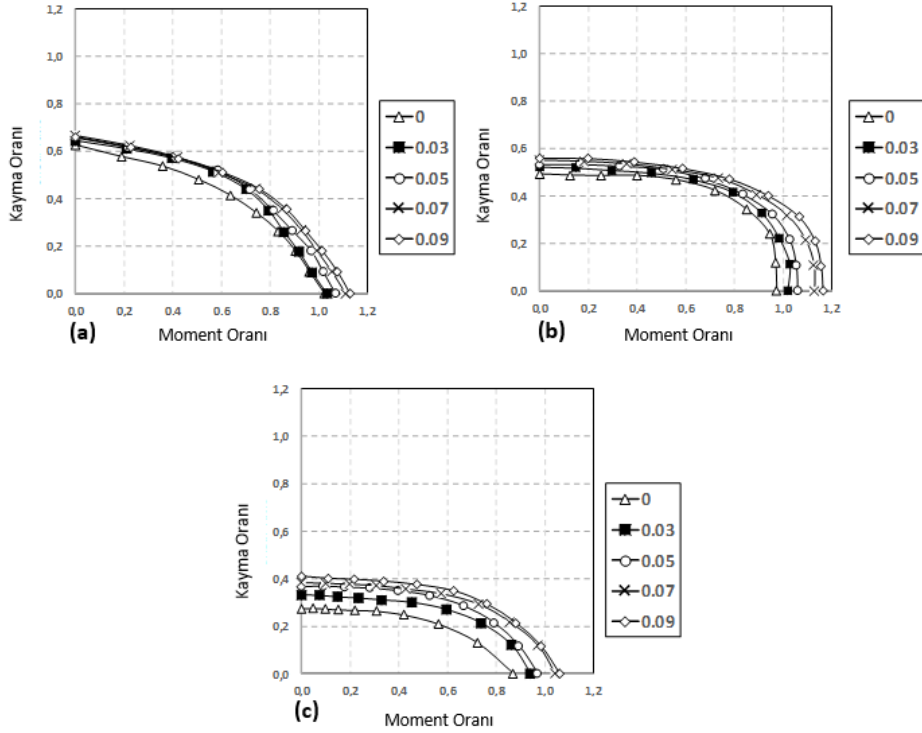
Açıklık H deliklerine göre her bir t_s/d_0 oranının sonuçları; aşağıdaki Şekil 3.18’de görülebilir.



Şekil 3.18: Açıklık H için $h_s/t_w=2$ (sabit) iken kayma/moment etkileşim eğrileri (a) $t_s/d_0 = 0$, (b) $t_s/d_0 = 0.03$, (c) $t_s/d_0 = 0.05$, (d) $t_s/d_0 = 0.07$, (e) $t_s/d_0 = 0.09$.

Bu tip delik açıklığında kiritik delik açıklığının kirişi yapısal olarak etkilediği görülmektedir ($c = 1.0d_0$). En büyük delik çapındaki delikli kiriş ($d_0 = 0.75h$), kayma/moment oranları açısından diğer delik açıklıklarına göre çok daha düşük bir eğilim gösterir. Takviye olmayan delik çapında olduğu gibi takviyelilerde de aynı eğilim belirgin bir şekilde gözükmemektedir.

Delik çapının sabit tutulup t_s/d_0 oranının değişiminin gözlemlendiği sonuçlar Şekil 3.19'da görülebilir.



Şekil 3.19: Açıklık H için farklı delik çaplarına göre kayma/moment etkileşim diyagramları ($h_s/t_w=2$) (a) $d_0 = 0.5h$, (b) $d_0 = 0.65h$, (c) $d_0 = 0.75h$ (legendların içindeki oranlar; t_s/d_0).

Orta ve büyük delik çapları için (Şekil 3.19 (b) ve (c)) kayma ve moment oranının takviye kalınlığı oranının artmasıyla belirgin bir şekilde arttığı, diğer delik tiplerinde de olduğu gibi, görülmektedir. Diğer delik açıklıklarından farklı olarak, kare delik açıklığında, delik çapı $0.5h$ iken kayma ve moment oranlarının Vierendeel tipi göçmenin hakim olduğu yerlerde de sabit kaldığı görülmüştür. Geniş delik açıklığı sebebiyle ($c = 1.0d_0$) kayma gerilmesi daha geniş bir alanda 0 gerilmeden maksimum gerilmeye çıkmıştır. Bu da kayma gerilmesinin 0 gerilmeden maksimum gerilmeye, diğer delik açıklıklarına göre, daha hızlı bir şekilde geçmesine sebep olur. Bu sebepten ötürü delik çapı $0.5h$ iken kayma/moment oranı sabit

kalmıştır Vierendeel tipi göçmenin etkin olduğu yerlerde de sabit kalmıştır.

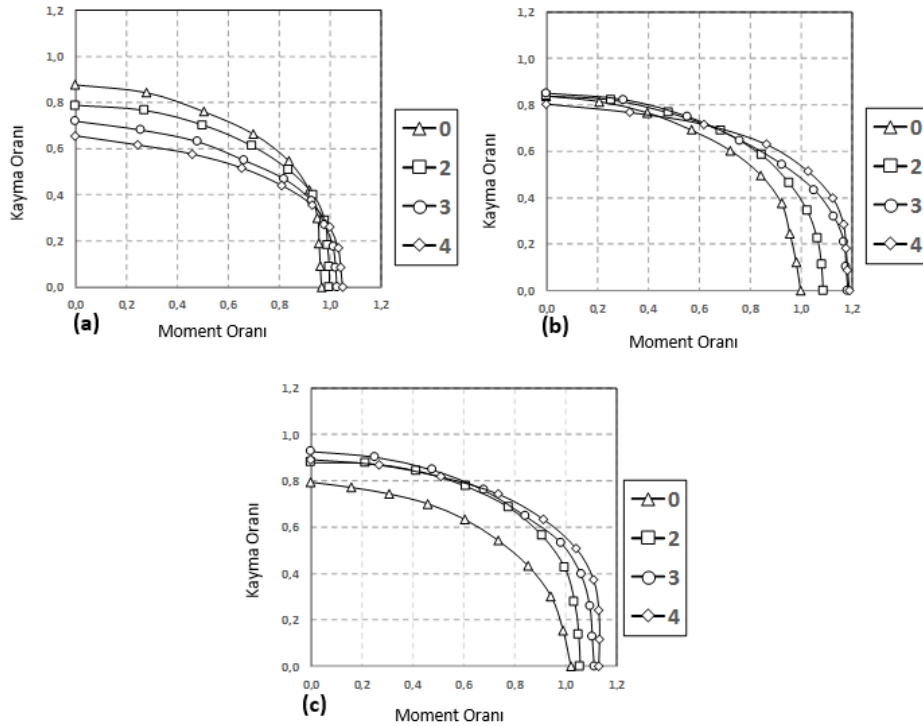
Orta ve büyük delik çaplarında da diğer delik çaplarında olduğu gibi, t_s/d_0 oranının artması, kirişin kayma/moment oranlarını arttırmıştır.

3.4.3 Takviye genişliğine göre analiz sonuçları

Bu kısımda h_s/t_w oranının artmasıyla kirişin gösterdiği kayma/moment etkileşim eğrisi eğilimi araştırılmıştır. Çizdirilen kayma/moment etkileşim eğrileri sonucu h_s/t_w oranının eğri eğilimlerini değiştirmedeği bu kısımda görülmüş ve bu nedenle tezde yer verilmemiştir. Yalnız her bir delik açıklığı için aynı delik çaplarına göre h_s/t_w oranının artışı incelenmiştir.

Bu kısımda t_s/d_0 oranı 0.05 olarak sabit tutulmuştur. h_s/t_w oranı 0 ve 4 arasında değişmektedir. h_s/t_w oranı 0 olduğu zaman takviye kullanılmamıştır.

Açıklık A için sabit delik çaplarına göre artan h_s/t_w oranları Şekil 3.20’de görülebilir.

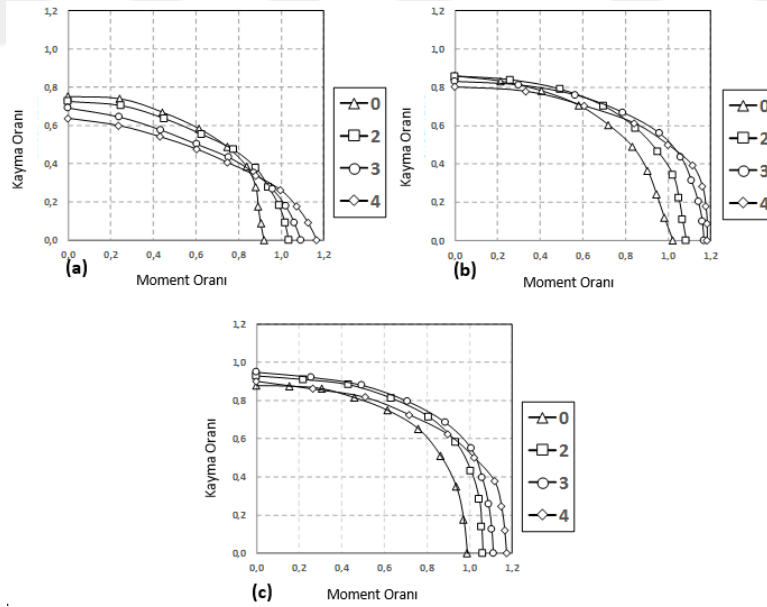


Şekil 3.20: Açıklık A için sabit delik çaplarına göre kayma/moment etkileşim eğrileri ($t_s/d_0 = 0.05$) (a) $d_0 = 0.5h$, (b) $d_0 = 0.65h$, (c) $d_0 = 0.75h$ (legendların içindeki sayılar h_s/t_w oranına aittir).

Küçük delik çaplı ($d_0 = 0.5h$) delik açıklığında kayma oranı açısından bir iyileşme görülmemektedir. Takviye genişliğinin etkisi kirişin göçme anındaki göçme yükünü etkilememektedir. Ancak, takviyenin teorik kayma kapasitesini $2t_s h_s$ (Eşitlik 3.11) terimiyle arttırdığı görülmektedir. Bu da kayma oranının düşmesine sebep olur. Ayrıca takviye kalınlığının t_s incelendiği kısımda da yapılan benzer yorumlar burada yapılabilir. Kirişin 4'te 1'inden sonra, kiriş eğilme yüklemesine geçmektedir (6.nokta, $x=1299$ mm). Bu noktadan sonra moment oranı artış göstermektedir (moment oranının kesitteki gerilme yayılımı sebebiyle). Ancak 6.nokta öncesi, kirişte Vierendeel tipi göçme etkindir ve burada kayma gerilmesi küçük delik çaplarında gerilme 0'dan maksimuma yavaş bir şekilde transfer olmaktadır. Yavaş transfer olmasıyla, takviye kirişin göçme yükünü iyi veya kötü etkilemez.

Daha büyük delik çapları için ($d_0 = 0.65h$ ve $d_0 = 0.75h$) takviye genişliğinin artmasıyla moment oranlarının arttığı görülmektedir. Kayma oranı belirli $h_s/t_w=3$ oranına kadar artmaktadır. Bu noktadan sonra takviye genişliği kirişin I kesitine normal yönde arttığı için herhangi bir etki göstermemektedir. Bu nedenle $h_s/t_w > 3$ değerleri için takviye kullanmak kirişin mukavemetinde herhangi bir iyileştirme göstermez, sadece ekstra ağırlık kirişe ekler.

Açıklık C için sabit delik çaplarına göre artan h_s/t_w oranları Şekil 3.21'de görülebilmektedir.

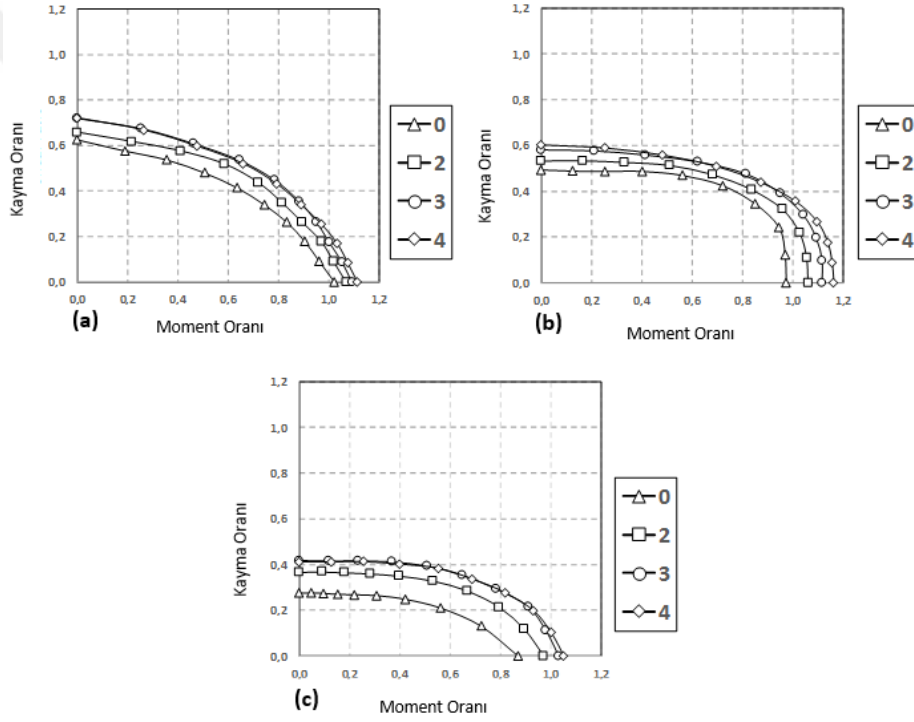


Şekil 3.21: Açıklık C için sabit delik çaplarına göre kayma/moment etkileşim eğrileri ($t_s/d_0 = 0.05$) (a) $d_0 = 0.5h$, (b) $d_0 = 0.65h$, (c) $d_0 = 0.75h$ (legendların içindeki sayılar h_s/t_w oranına aittir).

Açıklık C için, Açıklık A'da da olduğu gibi benzer sonuçlar çıkarılabilir. Şekil 3.21 (a)'dan da görülebileceği üzere, küçük delik çaplarında, takviye genişliğini arttırmak kayma oranı açısından bir iyileştirme göstermemektedir. Bu delik açıklığı için de 6.nokta aksi yönde eğilme noktasıdır. Bu noktadan sonra Vierendeel tipi göçme eğilme göçmesine doğru geçmektedir. Bunun sonucu da h_s/t_w oranının artmasıyla moment oranı artmaktadır. (>1.0 sınır değerini geçmektedir.)

Şekil 3.21 (b) ve (c)'de, orta ve büyük delik çapları için kayma/moment oranları verilmiştir. Buna göre kayma oranının neredeyse sabit olduğu ve moment oranının ise arttığı görülmüştür. Açıklık A'da da olduğu gibi $h_s/t_w > 3$ olduktan sonra kirişin kayma oranında herhangi bir iyileşme gözlemlenmemiştir.

Açıklık H için sabit delik çaplarına göre artan h_s/t_w oranları Şekil 3.22'de görülebilir.



Şekil 3.22: Açıklık H için sabit delik çaplarına göre kayma/moment etkileşim eğrileri ($t_s/d_0 = 0.05$) (a) $d_0 = 0.5h$, (b) $d_0 = 0.65h$, (c) $d_0 = 0.75h$ (legendların içindeki sayılar h_s/t_w oranına aittir).

Takviye genişliğinin artmasıyla kayma/moment oranının bütün delik çapları için geliştiği, kare tipi delik açıklığında görülmektedir. Geniş kritik açıklık sebebiyle, takviyenin kullanılması bu tip delik açıklığını önemli ölçüde etkilemektedir. Geniş kritik açıklık ve keskin köşelerden dolayı bu tip delik olan kirişler erken göçme

göstermektedir. Bu yüzden kullanılan her h_s/t_w oranında iyileşme ya da kayma/moment oranını koruma görülmüştür.

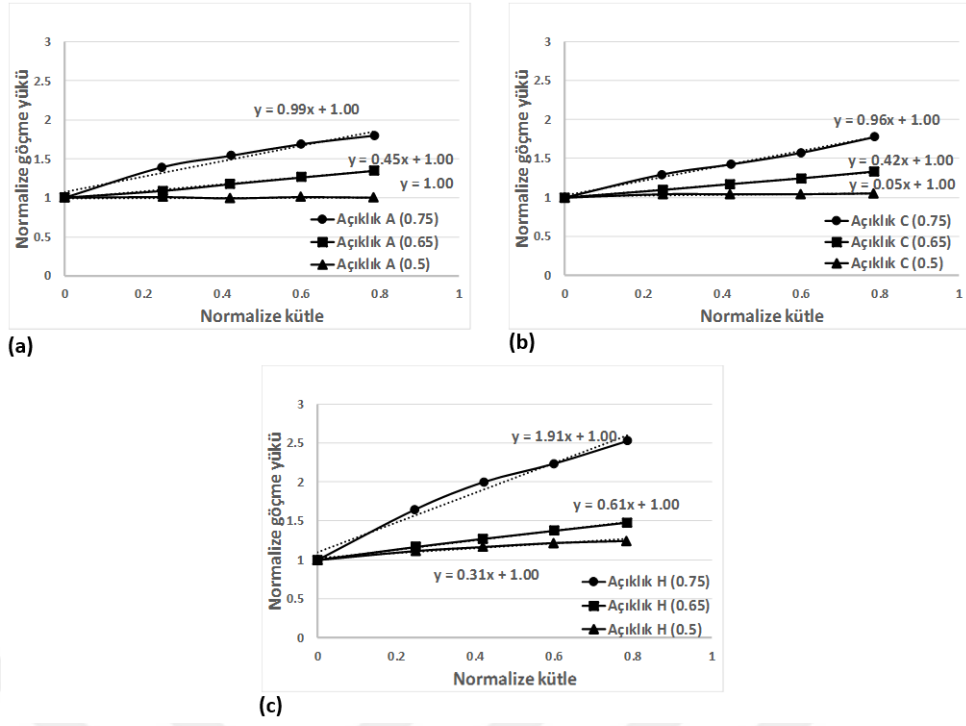
3.5 Takviyeli Kirişlerde Ağırlık ve Göçme Yüğü (w) Etkileşiminin İncelenmesi

Mühendislikte kullanılan kirişlerde delikler farklı sebeplerden ötürü açılabilir. Örneğin inşaat sektöründe çeşitli inşaat parçalarının geçebilmesi ve aynı zamanda, bina, stat, köprü vb. yapıların hafiflemesi için, kiriş üzerine delikler açılmaktadır. Açılan delikler ile yapı, taşıma gücünü kısmen kaybetmektedir. Havacılık sektöründe ise hafifletme, açılan delikler ile yapılmaktadır. Bu sayede daha uzun menzil ve yakıt tasarrufu sağlanır. Yakıt, havacılık sektöründe, en maliyetli unsurlardan biridir. Bu sebepten ötürü kirişlerde yapısal optimizasyon (ağırlığın azaltılması için), yapısal analiz/tasarım mühendislerinin üzerinde çalışmakta olduğu önemli bir konudur.

Hafifletme için açılan bu delikler ile yapılar, her iki sektörde de, güçsüzleşir. Buna göre delik yapısına takviye uygulayarak kirişin göçme yükü tölere edilebilmektedir. Bu kısımda, Açıklık A (dairese), C (eliptik) ve H (kare) için takviye ağırlığının göçme yükü ile ilişkisi incelenmiştir.

Takviye ağırlığının göçme yüküne etkisi araştırılırken, h_s/t_w oranı sabit (2), t_s/d_0 oranı ise 0 ile 0.09 arasında değiştiği analizler baz alınmıştır. Yapılmış olan çok fazla konumda çok fazla analiz olduğu için, Vierendeel tipi göçmenin en etkin olduğu, deliğin köşeye yakın olan değerlerden $x=284$ mm, ağırlık ve göçme yükü etkileşimini incelenmek için seçilmiştir. Benzer bir şekilde, kirişin eğilme göçmesi ile göçtüğü kısımda da $x=1866$ mm konumunda olan analizler, ağırlık ve göçme yükü etkileşimini incelerken seçilmiştir. Vierendeel tipi göçmede seçilen konumun, ağırlık ve göçme yükü etkileşim sonuçları Şekil 3.23'te görülebilir.

Kütle kirişin takviyesiz haline göre normalize edilmiştir ($m_{takviye}/m_{delik}$) ve her eklenen kütle x ekseninde artar şekilde gösterilmiştir. Grafiklerde y ekseni delik açıklığı $x=284$ mm'de iken olan göçme yükünün normalize edilmesini ($w_{takviye}/w_{delik}$) temsil etmektedir.



Şekil 3.23: Farklı delikler için normalize kütle ($m_{takviye}/m_{delik}$) oranının normalize göçme yüküne ($w_{takviye}/w_{delik}$) etkisi grafikleri (Vierendeel göçmesi, $x=284$ mm) (a) Açıklık A (dairese), (b) Açıklık C (eliptik), (c) Açıklık H (kare) ($h_s/t_w=2$, $t_s/d_0=0-0.09$).

Delik açıklığı A'ya göre (Şekil 3.23 (a)) k uk delik çapında ($d_0 = 0.5h$) takviyenin, kirişin göçme yüküne herhangi bir katkısı yoktur. Burada takviye ekleyerek kirişin ağırlığını arttırırken, kirişin göçme yükü açısından iyileşme gözükmemektedir. Ancak, büyük delik çapları için ($d_0 = 0.65h$ ve $0.75h$) takviye eklemek kirişin göçme yükünü arttırmaktadır. Bu yüzden delik açılınca düŐen kirişin göçme yükü, belirli bir noktaya kadar takviye eklenmesiyle ile tölere edilebilmektedir. Göçme yükü ile kütle arasında büyük delik çapları için tamamen doğrusal bir iliŐki vardır. Elde edilen doğrusal grafikler ile doğruların eğimleri gözükmektedir. Buna göre delik çapı arttığı takviyenin etkileme oranı da artmaktadır. $d_0 = 0.65h$ 'da eğim 0.45 iken, $d_0 = 0.75h$ eğim 0.99 olmuŐtur. Bu da delik çapı ne kadar büyük olursa takviyenin etkisinin o kadar arttığını göstermektedir.

Delik açıklığı C için (Şekil 3.23 (b)), delik açıklığı A ile benzer sonuçlar yorumlar elde edilebilmektedir. Delik apı $d_0 = 0.5h$ iken takviyenin kirişin göçme yüküne herhangi bir etkisi yoktur. Bu aynı zamanda $d_0 = 0.5h$ eğrisine oturtulan düzlemsel doğrunu eğimi ile de kanıtlanmaktadır (eğim: 0.055). K uk delik çaplarında takviye eklemek sadece yapımızı ağırlaştırmaktadır. Delik apı $0.65h$ ve $0.75h$

değerlerine eşit iken, delik açıklığı A'da da olduğu gibi takviye eklenmesi kirişin göçme yükünü tamamen lineer bir şekilde arttırmaktadır. Delik çapının büyümesiyle göçme yükünün etkisi de artar. $d_0 = 0.65h$ değerinde doğrunun eğimi 0.42 iken, $d_0 = 0.75h$ eğrisinde doğrunun eğimi 0.96'dır.

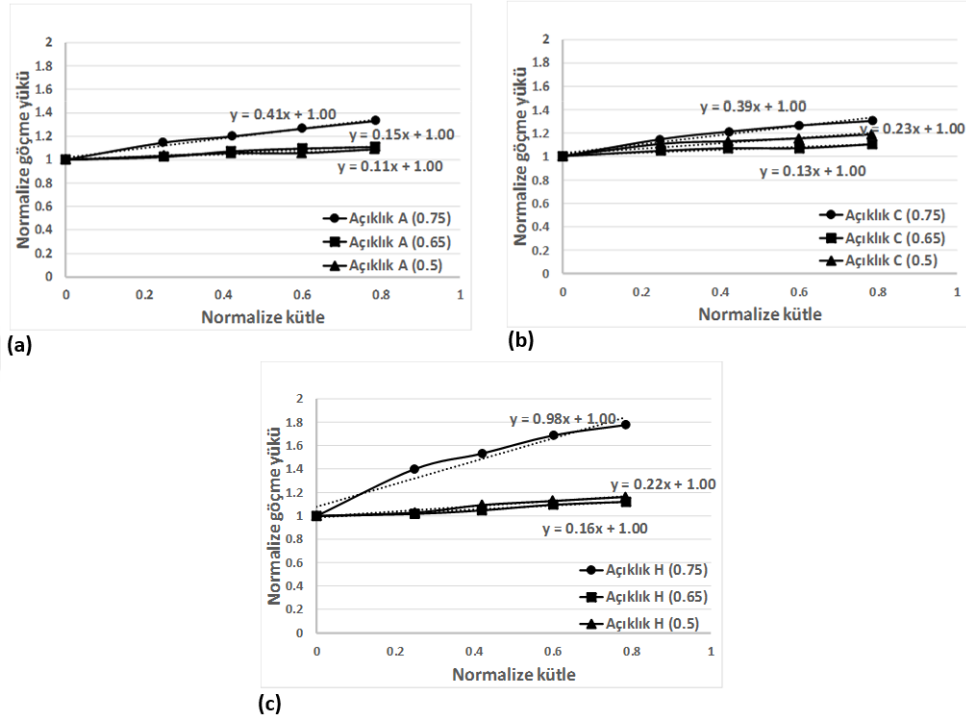
Delik açıklığı H için, diğer delik açıklıklarından farklı olarak. Küçük delik çapında da takviye kirişin göçme yükünü etkilemektedir. $d_0 = 0.5h$ olduğu değerlerde de takviye lineer (doğrusal) bir şekilde 0.31'lik bir eğim ile kirişin göçme yükünü artırır. Daha önceki kısımlarda yapılan yorumlarda da olduğu gibi kare delik açıklığının küçük delik çapında takviye kullanımı kirişin kayma/moment oranını sabit tutmuştur (Şekil 3.19 (a)). Orta ve büyük delik çaplarında da diğer delik açıklıklarında olduğu gibi bir iyileşme gözükmemektedir. Takviye eklenmesi kirişin göçme yükünü lineer bir şekilde artırır. Geniş ağ açıklığı ve keskin köşeler sebebiyle bu artış diğer delik açıklıklarına göre daha fazladır. $d_0 = 0.65h$ için doğrunun eğimi 0.61, $d_0 = 0.75h$ için doğrunun eğimi 1.91 değerlerinden de takviyenin kare delik açıklığında daha etkili olduğu görülebilmektedir. Özellikle kare delik açıklığında olan eğimin 1.91 olması, kare delik açıklıklarında takviyenin göçme yükünü daha çok etkilediği görülmektedir.

Daha önce de bahsedildiği gibi kirişin eğilme göçmesi ile göçtüğü kısımda da $x=1866$ mm konumundaki analizler, ağırlık ve göçme yükü etkileşimini incelenen seçilmiştir. Takviyenin göçme yükü ile etkileşim grafikleri eğilme yüklemesi için Şekil 3.24'te verilmiştir.

Şekil 3.24'de verilen grafiklerde x eksenini takviyenin delik kütesine göre normalize edilmesini temsil etmektedir ($m_{takviye}/m_{delik}$). Y eksenini ise kirişin $x=1866$ mm'de olan göçme yükünün takviyesiz göçme yüküne normalize edilmesini temsil etmektedir ($w_{takviye}/w_{delik}$).

Şekil 3.24 (a)'da dairesel delik (Açıklık A) için takviye kütesinin göçme yüküne etkisi görülebilmektedir. Buna göre Vierendeel göçmesinden farklı olarak, kirişin eğilme göçmesi kısmında, bütün delik çaplarında da takviyenin göçme yükünü etkilediği görülebilmektedir. Delik çapı $d_0 = 0.5h$ olduğu zaman takviye göçme yükünü arttırmaktadır. Doğrunun 0.11 eğim ile artması da bunu göstermektedir. Ayrıca $d_0 = 0.65h$ olan doğrunun da eğimi de 0.15'dir. Bu da her iki delik çapında eklenen takviyeye neredeyse aynı şekilde tepki verdiği ve benzer oranlar ile arttığını gösterir. Bunun sebebi ise, eğilme yüklemesi altındayken gerilmenin büyük bir kısmını başlık kısmı almaktadır. Gövde üstünde açılan delikler çok büyük olmadığı sürece, gövde üstüne açılan deliğin çapı çok büyük etken değildir

ve taşıma gücü çok fazla düşmez. Bu yüzden eklenen takviyeyyle, iki delik çapı da benzer şekilde iyileşme göstermektedir. Ancak büyük delik çaplarında, Şekil 3.24 (a)'dan da görülebileceği üzere, gövde üzerine açılan delik daha büyüktür ve asıl yükü taşıyan başlık kısmına daha yakındır. Bu sebepten ötürü, burada kullanılan takviyenin önemi daha fazladır. Eğri 0.41'lik bir eğimle artmaktadır ve her eklenen takviye göçme yükü açısından daha iyi sonuç vermektedir.



Şekil 3.24: Farklı delikler için normalize kütle ($m_{takviye}/m_{delik}$) oranının normalize göçme yüküne ($w_{takviye}/w_{delik}$) etkisi grafikleri (Eğilme göçmesi, $x=1866$ mm) (a) Açıklık A (dairesel), (b) Açıklık C (eliptik), (c) Açıklık H (kare) ($h_s/t_w=2$, $t_s/d_0=0-0.09$).

Şekil 3.24 (b)'ten delik açıklığı C için takviyenin göçme yüküne etkisi gözükmemektedir. Burada da Açıklık A'da olduğu gibi küçük delik çaplarında bile takviye göçme yükünü etkilemektedir. $d_0 = 0.65h$ değeri ile $d_0 = 0.5h$ eğrileri, takviyenin ağırlının artmasıyla benzer bir göçme yükü artışı sergilemektedir. $d_0 = 0.5h$ değerindeki eğim 0.23 iken $d_0 = 0.65h$ değerindeki eğim 0.13'tür. Açıklık A'da açıklandığı gibi küçük ve orta delik çaplarında açılan bu delikler, kirişin asıl gerilmeyi taşıyan başlık kısmına kısmen uzaktır. Bu yüzden gösterdikleri iyileşme benzerdir. Delik çapının en büyük olduğu zaman $d_0 = 0.75h$ değerinde yine takviye kirişin göçme yükünün, asıl gerilmeyi taşıyan başlık kısmına yakın olduğu için, diğer delik çaplarına göre daha çok arttırmaktadır.

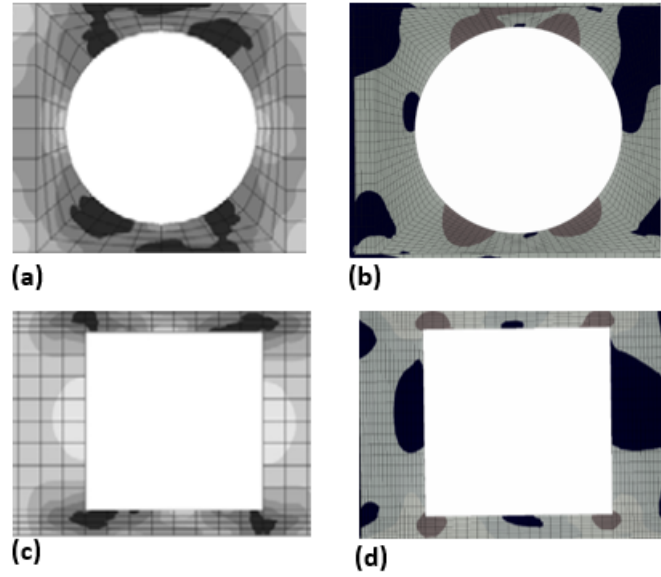
Şekil 3.24 (c)'ten görülebileceği üzere, açıklık H için, $d_0 = 0.5h$ ve $d_0 = 0.65h$ değerleri yine benzer göçme yükü artışları sergilemektedir. $d_0 = 0.5h$ doğrusunun eğimi 0.22 iken $d_0 = 0.65h$ değerinde ise doğrunun eğimi 0.16'dır. Bunun sebebi, diğer delik açıklıklarında da olduğu gibi açılan deliklerin kirişin başlık kısmına, büyük delik çapına göre, kısmen uzak olmasıdır. Delik çapının en büyük olduğu değerde ($d_0 = 0.75h$) ise diğer delik açıklıklarından farklı olarak göçme yükü daha büyük bir artış göstermiştir. Burada doğrunun eğimi 0.98'dir.

3.6 Takviyeli Kirişlerin Akma Gerilmeleri

Tezin bu kısmında, takviyeli kirişlerin akma gerilmeleri incelenmiştir. Vierendeel mekanizması sebebiyle deliğin köşelerinde 4 adet plastik mafsal oluşmaktadır. Bu plastik mafsallar global kayma kuvveti ve global momentten dolayı oluşur. Plastik mafsallar von-Mises akma gerilmeleriyle birlikte görülebilmektedir. Plastik mafsalların hareketlerini gözlemleyerek, delik açıklıklarının kritik delik açıklığı (c) değerleri belirlenebilir. Bu çalışmada kirişin Vierendeel mekanizmasıyla göçmesi araştırılırken von-Mises akma gerilmelerinden ve göçme yükü-orta nokta sehim eğrilerinden yararlanılmıştır. Kirişin Vierendeel mekanizmasıyla göçtüğü, delik açıklığının iki kenarının hareketlerinden anlaşılmaktadır. Burada deliğin iki kenarı birbirine relatif olarak hareket etmektedir ve analiz kısmında gözükür. Buna ek olarak, göçme yükü-orta nokta sehim eğrisinde de plastik deformasyon başladığı zaman eğri asimptotik olarak ilerlemektedir. Kirişin Vierendeel mekanizması ile göçtüğü buradan anlaşılabilir. Şekil 3.25'te güncel çalışma ile Liu ve Chung (2003) tarafından yapılmış olan çalışmanın açıklık A ve C açısından, delik çapının $d_0 = 0.75h$ olduğu durum için, karşılaştırılmıştır

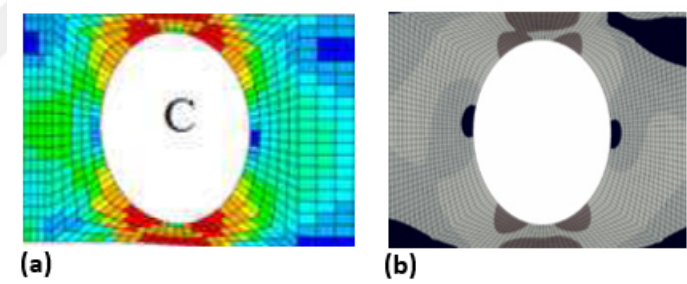
von-Mises akma gerilmesi değerleri elde edilirken, kirişin tam plastik deforme olduğu zaman seçilmiştir. Vierendeel göçmesinde tam plastik deformasyon sırasında, kiriş üst ve alt kesitte başlayan plastik mafsallardan başlayarak kirişin başlık kısmına kadar deforme olur.

Şekil 3.25'ten de görülebileceği üzere plastik mafsallar delik kenarlarında aynı bölgede ve benzer açılarda oluşmaktadır. Bu da von-Mises akma gerilmeleri açısından benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir.



Şekil 3.25: von-Mises akma gerilmelerinin karşılaştırılması (a) açıklık A (Liu ve Chung (2003)), (b) açıklık A (güncel çalışma), (c) açıklık H ((Liu ve Chung (2003)), (d) açıklık H (güncel çalışma).

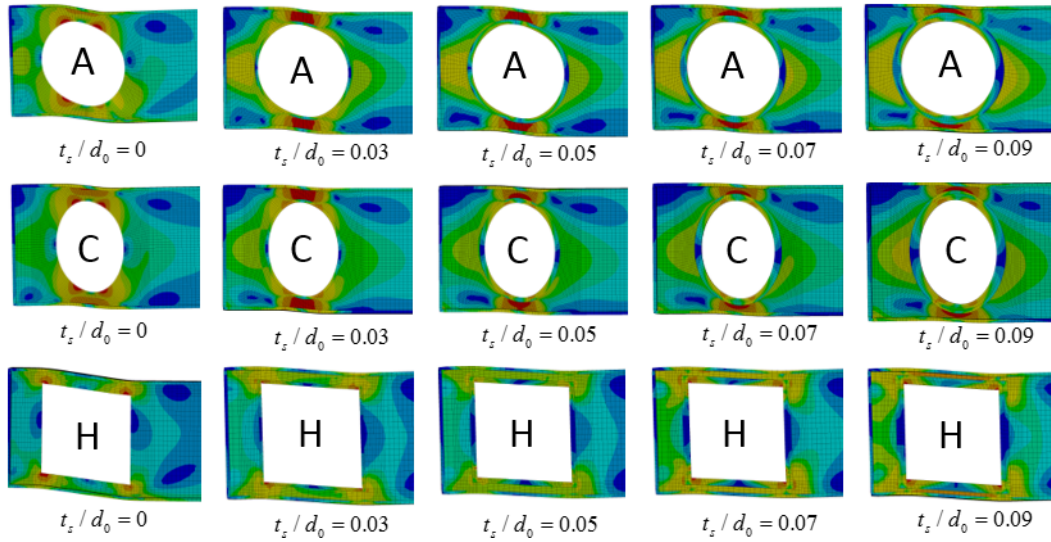
Şekil 3.26’da eliptik delik açıklığı için von-Mises akma gerilmeleri karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 3.26: von-Mises akma gerilmelerinin karşılaştırılması (a) açıklık C (Tsavdaridis ve D’Mello (2012)), (b) açıklık C (güncel çalışma).

Eliptik delik açıklığında da, üst ve alt T-kesitlerde başlayan plastik mafsallar, kesitte tam plastik deforme olana kadar kirişin başlık kısmına kadar ilerlemişlerdir. Bu açıklıkta da T-kesitlerde oluşan plastik mafsallar konum ve mafsal oluşumu önceliği açısından benzerdir.

UB457x152x52 kirişi için yapılan analizler sonucunda t_s/d_0 'nun etkisi grafiklerden delik çapı $d_0=0.75h$ olan delikler için Şekil 3.27’de görülebilir.



Şekil 3.27: Doğru ölçeklendirme (true scale) ile elde edilmiş von-Mises akma değerleri (delik mesafesi, $x=284$ mm ($d_0=0.75h$)).

Şekil 3.27’de elde edilen bütün grafikler; ANSYS programı analiz sonuçları gerçek deformasyon (1.0x) ölçeğinde gösterilmiştir. Bu da t_s/d_0 oranının artmasıyla, Vierendeel mekanizmasıyla oluşan deformasyonun azaldığını göstermektedir.

Şekil 3.27’de açıklık A ve C’nin takviye kalınlığının artmasıyla kirişin Vierendeel mekanizması tipi geçmeden çıkıp, dik kayma geçmesine geçiş yaptığı görülmüştür. Bu geçmeye göre, plastik deformasyon deliğin üst ve alt kısmından başlar ve dik yönde kirişin başlık kısmında kadar ilerler (eğilme geçmesinde olduğu gibi). Böylece, Vierendeel mekanizmasından dolayı oluşan mafsallar güçlendirilmiş, bölgenin kritikliği azaltılmış olur. Delik etrafında oluşan 4 adet plastik mafsal, takviyenin etkisiyle kaybolmuştur. Burada delik etrafının gerilme konsantrasyonunu azalmıştır.

Şekil 3.27’de yapılan analizlere göre açıklık H, Vierendeel mekanizmasıyla geçmeye devam etmektedir. Takviye kalınlığının artmasına rağmen, plastik mafsal oluşumu delik köşelerinde olmaya devam etmektedir. Bunun sebebi, kare deliğin köşelerinin keskin olması ve kritik delik açıklığının (c) fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Kare tipi delik köşelerinde ve bu bölgede gerilme yoğunluğu teorik olarak çok yüksektir. Bu nedenle bu bölge her zaman plastik deformasyonlar gösterir. Yine de açıklık H için geçme yükü açısından iyileşme gözlemlenmektedir. Buna ek olarak kirişteki sehim de azalmıştır.

3.7 Tasarım Önerileri

'Takviyeli Kirişlerin Kayma/Moment Etkileşim Diyagramları' kısmında elde edilen kayma/moment etkileşim grafikleri eğrilerinden, takviyeli kirişlerde kolay hesap yapılabilmesi için, tasarım formülasyonu çıkartılmıştır. Bu bağlamda, üç farklı tip delik açıklığı için ve takviye uygulanan kirişlerde, tasarım kayma oranı (\bar{v}_s) kolay kullanım için geliştirilmiştir. \bar{v}_s geliştirilirken Şekil 3.5 (a)'da verilen basit mesnetleştirme ile sabitlenmiş ve dağınık yük (w) uygulanan kiriş için teorik olarak kayma ve moment oranları hesaplanmıştır. Buna göre kayma;

$$V = \frac{wL}{2} - wx = \frac{wL}{2} \left(1 - 2\frac{x}{L}\right) \quad (3.15)$$

olarak hesaplanabilir. Maksimum kayma da mesnetlerde oluşur ve değeri;

$$V_{\max} = \frac{wL}{2} \quad (3.16)$$

olarak hesaplanır. Normalize edilmiş kayma, kaymanın, maksimum kaymaya bölümü ile elde edilir. Bu durumda normalize edilmiş kayma (3.17)'de verildiği şekliyle hesaplanabilir;

$$\frac{V}{V_{\max}} = 1 - 2\frac{x}{L} \quad (3.17)$$

Benzer şekilde kiriş boyunca moment;

$$M = \frac{wL}{2}x - \frac{wx^2}{2} = \frac{wL^2}{2} \left(\frac{x}{L}\right) - \frac{wL^2}{2} \left(\frac{x}{L}\right)^2 \quad (3.18)$$

olarak hesaplanabilir. Dağınık yük uygulanmış bir kirişte maksimum moment ise;

$$M_{\max} = M|_{x=\frac{L}{2}} = \frac{wL^2}{8} \quad (3.19)$$

şeklinde hesaplanabilir. Normalize edilmiş moment, momentin, maksimum momente bölünmesiyle elde edilir. Buna göre moment oranı Eşitlik (3.20)'de hesaplanmıştır.

$$\frac{M}{M_{\max}} = 4\left(\frac{x}{L}\right)\left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (3.20)$$

Normalize koordinat (3.17)'den çekilerek (3.21)'deki haliyle yazılabilir;

$$\frac{x}{L} = \left(1 - \frac{V}{V_{\max}}\right)\frac{1}{2} \quad (3.21)$$

Eşitlik (3.21)'de hesaplanan x/L değeri Eşitlik (3.20)'de yerine konulursa, moment oranı, kayma oranı cinsinden Eşitlik (3.23)'deki şekli ile hesaplanabilir;

$$\frac{M}{M_{\max}} = 4\left(\frac{1}{2}\right)\left(1 - \frac{V}{V_{\max}}\right)\left(1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\frac{V}{V_{\max}}\right) \quad (3.22)$$

$$\frac{M}{M_{\max}} = 1 - \left(\frac{V}{V_{\max}}\right)^2 \quad (3.23)$$

Benzer şekilde kayma oranı da, moment oranı cinsinden, Eşitlik (3.24)'de verilmiştir.

$$\frac{V}{V_{\max}} = \left(1 - \frac{M}{M_{\max}}\right)^{1/2} \quad (3.24)$$

Çıkarılan \bar{v}_s eşitliği, Eşitlik (3.24)'e benzetilmiştir. \bar{v}_s iki farklı durum için hesaplanmıştır. Bu durumlar maksimum bağlaşıp kayma oranının (\bar{v}) 0.7'den büyük ve küçük olduğu durumlar içindir. Bağlaşıp kayma oranı her farklı özelliğe (delik çapı, takviye kalınlığı ve takviye genişliği) sahip farklı delik açıklıkları için Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3: Maksimum bağlaşıklık kayma oranı (\bar{v}).

	t_s/d_0	h_s/t_w	$d_0=0.5h$	$d_0=0.65h$	$d_0=0.75h$
Açıklık A	0	0	0.86	0.82	0.76
	0.03	2	0.82	0.83	0.84
	0.05	2	0.78	0.83	0.86
	0.07	2	0.77	0.84	0.89
	0.09	2	0.75	0.89	0.91
	0.05	3	0.72	0.80	0.90
	0.05	4	0.70	0.77	0.87
Açıklık C	0	0	0.73	0.76	0.86
	0.03	2	0.73	0.75	0.87
	0.05	2	0.7	0.81	0.89
	0.07	2	0.69	0.85	0.92
	0.09	2	0.68	0.86	0.94
	0.05	3	0.70	0.75	0.93
	0.05	4	0.61	0.75	0.88
Açıklık H	0	0	0.63	0.49	0.27
	0.03	2	0.65	0.52	0.33
	0.05	2	0.65	0.53	0.36
	0.07	2	0.65	0.55	0.38
	0.09	2	0.65	0.56	0.41
	0.05	3	0.69	0.60	0.42
	0.05	4	0.69	0.60	0.41

Kayma/moment etkileşim eğrilerinden elde edilen tasarım kayma oranı (\bar{v}_s) formülasyonu Eşitlik (3.25) ve (3.26) 'da verilmiştir.

$\bar{v} \geq 0.7$ olduğu zaman;

$$\bar{v}_s = \bar{v} \left(c_1 - \left(\frac{m}{c_2} \right)^{p_1} \right)^{p_2} \quad (3.25)$$

$\bar{v} < 0.7$ olduğu zaman;

$$\bar{v}_s = \bar{v} - c_3 + c_3 \left(c_1 - (m)^{p_1} \right)^{p_2} \quad (3.26)$$

Bu denklemde p_1 , p_2 , c_1 , c_2 ve c_3 sabitleri Çizelge 3.4, 3.5 ve 3.6'dan sırasıyla,

açıklık A, C ve H için elde edilebilir.

Çizelge 3.4: Açıklık A için, (3.25) ve (3.26) numaralı eşitliklerde yer alan sabitler.

Açıklık A						
	t_s/d_0	h_s/t_w	p_1	p_2	c_1	c_2
$d_0 = 0.5h$	0	0	2.19	0.36	1.00	0.96
	0.03	2	2.24	0.39	1.00	0.98
	0.05	2	2.20	0.36	1.00	0.99
	0.07	2	2.15	0.38	1.00	0.99
	0.09	2	1.55	0.33	1.00	1.00
	0.05	3	0.98	0.91	1.00	0.91
	0.05	4	1.57	0.43	1.05	1.02
$d_0 = 0.65h$	0	0	1.54	0.42	1.10	0.94
	0.03	2	1.54	0.35	1.10	0.95
	0.05	2	1.97	0.42	1.10	1.03
	0.07	2	1.60	0.45	1.15	1.05
	0.09	2	1.68	0.41	1.15	1.06
	0.05	3	1.60	0.40	1.10	1.05
	0.05	4	1.60	0.35	1.20	1.06
$d_0 = 0.75h$	0	0	2.33	0.59	1.10	0.98
	0.03	2	2.01	0.37	1.10	0.99
	0.05	2	2.14	0.38	1.10	1.01
	0.07	2	1.80	0.36	1.10	1.02
	0.09	2	1.55	0.28	1.10	1.03
	0.05	3	1.33	0.27	1.10	1.02
	0.05	4	1.79	0.32	1.15	1.04

Çizelge 3.5: Açıklık C için, (3.25) ve (3.26) numaralı eşitliklerde yer alan sabitler.

Açıklık C							
	t_s/d_0	h_s/t_w	p_1	p_2	c_1	c_2	c_3
$d_0 = 0.5h$	0	0	2.37	0.47	1.00	0.92	–
	0.03	2	2.04	0.43	1.00	1.00	–
	0.05	2	1.54	0.15	1.10	–	1.77
	0.07	2	1.35	0.29	1.10	–	0.99
	0.09	2	0.99	0.16	1.10	–	1.46
	0.05	3	1.31	0.57	1.10	1.01	–
	0.05	4	0.87	0.07	1.20	–	3.27
	0	0	3.34	0.82	1.10	0.99	–
$d_0 = 0.65h$	0.03	2	3.12	0.60	1.10	1.02	–
	0.05	2	2.64	0.53	1.10	1.04	–
	0.07	2	1.88	0.45	1.10	1.05	–
	0.09	2	1.63	0.42	1.15	1.05	–
	0.05	3	4.45	0.58	1.20	1.12	–
	0.05	4	1.85	0.33	1.20	1.07	–
	0	0	1.65	0.38	1.10	0.94	–
	0.03	2	2.09	0.37	1.10	0.99	–
$d_0 = 0.75h$	0.05	2	2.23	0.37	1.10	1.02	–
	0.07	2	1.91	0.34	1.10	1.03	–
	0.09	2	1.95	0.35	1.10	1.04	–
	0.05	3	1.86	0.31	1.10	1.05	–
	0.05	4	1.51	0.39	1.20	1.04	–

Çizelge 3.6: Açıklık H için, (3.25) ve (3.26) numaralı eşitliklerde yer alan sabitler.

Açıklık H						
	t_s/d_0	h_s/t_w	p_1	p_2	c_1	c_3
$d_0 = 0.5h$	0	0	1.51	0.62	1.00	0.64
	0.03	2	2.17	0.69	1.00	0.65
	0.05	2	1.15	0.37	1.10	0.89
	0.07	2	1.27	0.37	1.10	0.80
	0.09	2	1.33	0.37	1.10	0.78
	0.05	3	0.84	0.08	1.10	2.65
	0.05	4	0.79	0.08	1.10	2.62
	$d_0 = 0.65h$	0	0	2.80	0.35	1.00
0.03		2	2.50	0.33	1.00	0.46
0.05		2	1.60	0.14	1.10	0.92
0.07		2	1.20	0.12	1.10	0.95
0.09		2	1.18	0.09	1.20	1.48
0.05		3	1.00	0.19	1.10	0.68
0.05		4	1.20	0.18	1.20	0.91
$d_0 = 0.75h$		0	0	3.30	0.80	1.00
	0.03	2	2.14	0.01	1.00	16.3
	0.05	2	2.15	0.57	1.00	0.49
	0.07	2	3.07	0.43	1.00	0.39
	0.09	2	2.09	0.39	1.00	0.41
	0.05	3	2.70	0.47	1.00	0.42
	0.05	4	1.78	0.36	1.10	0.5

Pratik tasarım için, uygulanması gereken tasarım adımları aşağıda sunulmuştur.

1. Eşitlik (3.11) ve (3.12)'de verilen, takviyeli teorik kayma kapasitesini ($V_{o,Rd,s}$) ve takviyeli teorik moment kapasitesini ($M_{o,Rd,s}$) geometri ve sınır koşullarına göre hesaplayın.
2. Eşitlik (3.1) ve (3.2)'de verilen global kayma kuvvetini (V_{sd}) ve global momenti (M_{sd}) geometri ve sınır koşullarına göre hesaplayın.
3. Moment oranını (m), global momenti (M_{sd}), takviyeli teorik moment kapasitesine ($M_{o,Rd,s}$) bölerek hesaplayın.

4. Bağlaşık kayma oranını (\bar{v}) delik tipine ve delik çapına göre izelge 3.3'den seçin.
5. Bağlaşık kayma oranına göre (\bar{v}) Eşitlik (3.25) veya Eşitlik (3.26)'yı seçin.
6. Çizelge 3.4 ,3.5 ve 3.6'i kullanarak formülasyonlarda verilmiş olan sabitleri, delik tipi, delik çapı ve takviye özelliklerine göre belirleyin.
7. Eşitlik (3.25) veya (3.26)'yı kullanarak tasarım kayma oranını hesaplayın (\bar{v}_s)
8. Tasarım kayma oranını (\bar{v}_s), takviyeli teorik kayma kapasitesi ile arpın ($V_{o,Rd,s}$). ($\bar{v}_s V_{o,Rd,s}$)
9. 8 numaralı maddede hesaplanan formülün sonucu ($\bar{v}_s V_{o,Rd,s}$), 2 numaralı maddede hesaplanan global kayma kuvvetinden (V_{sd}) büyük veya eşit olmalıdır. ($\bar{v}_s V_{o,Rd,s} \geq V_{sd}$)

Sonucun küçük olması durumunda, sonucu etkileyen parametrelerin (delik çapı, delik tipi, yükleme vb.) değiştirilmesi/yeniden tasarlanması ve yeni özellikler ile tekrar hesaplama yapılması önerilir.



4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ağırlık azaltma delikleri I-kesitli kirişler başta olmak üzere havacılık ve uzay yapılarında sıklıkla kullanılan bir husustur. Uçağın menzilinin artması ve yakıt tasarrufu yapabilmesi için ağırlık azaltma delikleri kullanılır. Benzer bir şekilde inşaat sektöründe de çeşitli bina araçlarının (klima bacası, kablolar, pis/temiz su boruları vb) geçmesi için deliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Mevcut yapılarda bile gelişen inşaat gereksinimleri ile yeni delikler açılmaktadır. İki alanda da açılan delikler sonucu I-kesitli kiriş yapısı güçsüzleşmektedir. Bu yapıyı güçlendirmek için çeşitli metotlar kullanılmaktadır.

Bu tezde, delik açıldıktan sonra oluşan göçmelere göre, yoğunlaşılacak göçme tipi Vierendeel mekanizmasıdır. Vierendeel mekanizmasının etkisini geciktirmek için delik etrafına halka tipi takviyeler uygulanmıştır. Literatürde bulunan eksikliğe göre, eğilme yüklerine maruz kalan kirişlerin hafifletme deliği etrafındaki takviyenin Vierendeel mekanizmasına etkisi bu tez kapsamında araştırılmış ve gerekli çalışmaları yapılmıştır. Tezin ön çalışması olarak 'eğilme yüklemesi altında kirişlerin plastik moment kapasitesinin Hesaplanması' araştırılmış ve Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansında bir adet bildiri yayımlanmıştır.

Eğilme Yüklerine Maruz Kalan Kirişlerin Hafifletme Deliği Etrafındaki Takviyenin Vierendeel Mekanizmasına Etkisi kısmında, ilk olarak, sonlu elemanlar modeli deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır (Redwood ve McCutcheon (1968)). Daha sonra üç farklı delik açıklıkları (dairesel, eliptik ve kare) kayma/moment etkileşim eğrisi açısından literatür ile karşılaştırılmıştır (Tsavdaridis ve D'Mello (2012)). Literatürde yapılan doğrulamalardan bu tip deliklere eklemek üzere, halka tipi takviyeler tezin araştırma konusu olarak seçilmiştir. Yapılan araştırmalara göre; Orun ve Guler (2017), Al-Thabthabee ve Al-Kannoon (2018), Menkulasi ve diğ. (2015) takviye belirlerken iki tane önemli oranın olduğundan bahsetmiştir. Bunlar; t_s/d_0 ve h_s/t_w oranlarıdır. Öncelikle takviye kalınlığının (t_s) etkisi araştırılmak için h_s/t_w oranı sabit (2), t_s/d_0 oranı ise değişken (0.03, 0.05, 0.07 ve 0.09) olarak belirlenmiştir. Daha sonra takviye genişliğinin (h_s) etkisinin araştırılması için t_s/d_0 oranı sabit (0.05), h_s/t_w oranı ise değişken (2, 3 ve 4) olarak seçilmiştir. Yapılan 700 farklı doğrusal olmayan parametrik analiz sonucunda kayma/moment

etkileşim diyagramları elde edilmiştir. Bununla birlikte delik etrafında oluşan von-Mises akma gerilmeleri ANSYS programında gerçek deformasyon (true scale) gösteriminde elde edilmiştir. Elde edilen etkileşim eğrilerinden tasarım formülasyonu, mühendislere kullanabilmeleri için sunulmuştur. Takviye ağırlığının göçme yüküne etkisi araştırılabilmesi için, normalize takviye ağırlığı ve normalize göçme yükünün karşılaştırıldığı grafikler çizdirilmiştir. Bu tezde yapılan çalışmalar göre elde edilen sonuçlar aşağıda görülebilir.

- Takviye kalınlığı (t_s)'in, artmasıyla kirişin moment oranı, delik açıklığı ve delik çapı fark etmeksizin bağımsız olarak artmaktadır.
- t_s/d_0 oranının artmasıyla, kayma oranı sadece büyük delik çapları için etkilenmektedir.
- Delik açıklık tipinden bağımsız olarak $d_0 = 0.65h$ ve $0.75h$ delik çaplarında takviye kullanmak daha etkilidir.
- Orta ve büyük delik çapları için ($d_0 = 0.65h$ ve $0.75h$) moment oranı h_s 'nin artmasıyla artar.
- h_s/t_w oranı 3 olduktan sonra, takviye genişliğinin (h_s) arttırılmasının bir anlamı yoktur çünkü kayma/moment etkileşim diyagramı değişmemektedir.
- Genel olarak kirişin takviye kalınlığının (t_s), kirişin takviye genişliğine göre (h_s) Vierendeel tipi göçmede daha etkili olduğu görülmüştür.
- Açıklık A ve C'nin akma gerilmelerine göre, takviyeler kirişin göçme tipinin değiştirmektedir. Kirişler Vierendeel tipi göçmeden dik kayma göçmesi göçmesine geçmektedir. Delik etrafında oluşan dört adet plastik mafsallık yoktur. Bunun yerine plastik deformasyon deliğin üst ve alt kısımlarından başlar ve başlık kısmına kadar yayılır.
- Açıklık H'de, von-Mises akma gerilmelerine göre Vierendeel tipi göçmenin hala geçerli olduğu, geniş ağ açıklığı sebebiyle görülmektedir.
- Vierendeel tipi göçmenin etkin olduğu kısımlarda takviye ağırlığının göçme yüküne etkisinin incelenmesine göre, küçük delik çaplı kirişlerde takviye uygulanması sadece kiriş yapısını ağırlaştırmaktadır. Takviye uygulanması büyük delik çaplarında daha etkilidir ve kirişin göçme yükünü arttırır.
- Eğilme göçmesinin etkin olduğu kısımlarda takviye ağırlığı, her delik çapı için göçme yükünün pozitif olarak etkilemektedir.

- Pratik tasarımda mühendislerin kullanabilmesi için 2 adet tasarım formülasyonu çıkartılmıştır ve mühendislere uygulamalarında kullanılabilmesi için sunulmuştur.

Gelecekte yapılabilecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmuştur;

1. Halka tipi takviye, enine ve dikine takviye tipleriyle aynı malzeme miktarı uygulamak koşuluyla karşılaştırılabilir.
2. Bulunan sonlu elemanlar çalışmalarının doğruluğu için bu tip kirişlere deneysel çalışmalar yapılabilir.
3. Delik etrafında oluşan 4 adet plastik mafsala farklı açılarda köşegen takviye eklenerek Vierendeel mekanizmasına etkisi araştırılabilir.
4. Delik etrafında oluşan 4 adet plastik mafsala bölgesel halka takviyesi ekleyerek Vierendeel mekanizmasına etkisi araştırılabilir.



KAYNAKLAR

- Al-Dafafea, T., Durif, S., Bouchair, A., Fournely, E.** 2019. Experimental study of beams with stiffened large web openings. *Journal of Constructional Steel Research* 154, 149,160.
- Al-Thabhwae, H.W.A., Al-Kannoon, M.A.A.,** 2018. Improving behavior of castellated beam by adding spacer plat and steel rings. *Journal of University of Babylon* 26, 331,344.
- Christensen, P. W., Klarbring, A.,** An introduction to structural optimization. Vol. 153. Springer Science and Business Media. 2008.
- Chung, K., Liu, C., Ko, A.,** 2003. Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalised moment-shear interaction curve. *Journal of Constructional Steel Research* 59, 1177-1200.
- Chung, K., Liu, T., Ko, A.,** 2001. Investigation on vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings. *Journal of Constructional Steel Research* 57, 467-490.
- Erdal, F. and Saka, M.P.,** 2013. Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams. *Journal of constructional steel research*, 80, pp.355-368.
- Lawson, R., Lim, J., Hicks, S., Simms, W.,** 2006. Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings. *Journal of Constructional Steel Research* 62, 614-629.
- Liu, T.C.H. and Chung, K.F.,** 2003. Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: finite element investigation. *Journal of Constructional Steel Research*, 59(9), pp.1159-1176.
- Menkulasi, F., Moen, C.D., Eatherton, M.R., Kuruppuarachchi, D.,** 2015. Investigation of stiffener requirements in castellated beams, in: *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council Nashville, Tennessee.*

- Morkhade, S.G., Gupta, L.M.,** 2015. An experimental and parametric study on steel beams with web openings. *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)* 7, 249-260.
- Najafi, M., Wang, Y.,** 2017. Behaviour and design of steel members with web openings under combined bending, shear and compression. *Journal of Constructional Steel Research* 128, 579-600.
- Orun, A.E., Guler, M.A.,** 2017. Effect of hole reinforcement on the buckling behaviour of thin-walled beams subjected to combined loading. *Thin-Walled Structures* 118, 12-22.
- Panedpojaman, P., Rongram, T.,** 2014. Design equations for vierendeel bending of steel beams with circular web openings, in: *Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE 2014)*.
- Redwood, R.G.,** 1969. The strength of steel beams with unreinforced web holes. *Civil engineering and public works review* 64, 559-562.
- Redwood, R.G., McCutcheon, J.O.,** 1968. Beam tests with unreinforced web openings. *Journal of the Structural Division* .
- Rodrigues, F., Vellasco, P.C.d.S., de Lima, L.R., de Andrade, S.A.,** 2014. Finite element modelling of steel beams with web openings. *Engineering* 6, 886.
- Singer, J., Arbocz, J., Weller, T.,** 1998. Buckling experiments. *Experimental methods in buckling of thin-walled structure. Basic Concepts, Columns, Beams and Plates* 1.
- Stolarski, T., Nakasone, Y. and Yoshimoto, S.,** *Engineering analysis with ANSYS software.* Butterworth-Heinemann. 2018.
- Tsavdaridis, K.,** 2010. Failure modes of composite and non-composite perforated beams sections with various shapes and sizes of web openings. Ph.D. thesis. PhD thesis in preparation (supervised by Dr. C. D Mello).
- Tsavdaridis, K. D., D'Mello, C.,** 2012. Vierendeel bending study of perforated steel beams with various novel web opening shapes through non-linear finite-element analyses. *Journal of Structural Engineering* 138, 1214-1230.

Tsavdaridis, K.D., Galiatsatos, G., 2015. Assessment of cellular beams with transverse stiffeners and with closely spaced web openings. *Thin-Walled Structures* 94, 636-650.

Wang, P., Ma, Q. and Wang, X., 2014. Investigation on Vierendeel mechanism failure of castellated steel beams with fillet corner web openings. *Engineering Structures*, 74, pp.44-51.





EKLER

EK 1 : Plastik moment hesaplaması Phyton programlaması.

```
:
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

trep_centroid = lambda b1,b2,h: (b1+2*b2)/(b1+b2)*h/3.0

def plasticMomentOfIBeam(E,ET,Sy,Su,h,b,tf,tw):
    c=ET/E
    #~ yy = np.arange(h/2-1,h/2.0,1e-1)
    yyL = np.arange(0.01*h/2.0,h/2.0,1)
    ML=[]
    for yy in yyL:
        if (h/2.0-tf) < yy and yy< h/2.0 :
            Sc = (1-c+c*h/2.0/yy)*Sy
            if Sc>Su: Sc=Su
            Sb = Sy
            Sa = Sy*(h/2.0-tf)/yy

            F1 = (Sb+Sc)/2*(h/2.0-yy)*b
            y1 = yy+(Sb+2*Sc)/(Sb+Sc)*(h/2-yy)/3.0
            #~ y1 = trep_centroid(Sy,Sc,(h/2.0-yy))+yy
            M1 =F1*y1

            F2 = (Sa+Sb)/2*(yy-(h/2.0-tf))*b
            y2 = (h/2.0-tf)+(Sa+2*Sb)/(Sa+Sb)*(yy-(h/2-tf))/3.0
            #~ y2 = trep_centroid(Sy,Sc,(h/2.0-yy))+(h/2.0-tf)
            M2 =F2*y2

            F3= Sa*(h/2.0-tf)/2.0*tw
            y3=(h/2.0-tf)*2.0/3.0
            M3 = F3*y3
        if 0 < yy < (d/2.0-tf) :
            Sc = (1-c+c*h/2.0/yy)*Sy
            if Sc>Su: Sc=Su
            Sb = (1-c+c*(h/2.0-tf)/yy)*Sy
            Sa = Sy

            F1 = (Sb+Sc)/2*tf*b
            y1 = (h/2.0-tf)+(Sb+2*Sc)/(Sb+Sc)*tf/3.0
            #~ y1 = trep_centroid(Sb,Sc,tf)+yy
            M1 =F1*y1
```

```

F2 = (Sb+Sy)/2*(h/2.0-tf-yy)*tw
y2 = yy+(Sy+2*Sb)/(Sb+Sy)*(h/2-tf-yy)/3.0
#~ y2 = trep_centroid(Sy,Sb,d/2.0-tf-yy)+(h/2.0-tf)
M2 =F2*y2

F3= Sy*yy*tw/2.0
y3=yy*2.0/3.0
M3 = F3*y3
#~ plt.plot(yy,S3,yy,S2,'k-', linewidth=2)
#~ plt.plot(yy,S2,'r-', linewidth=2)
#~ plt.plot(yy,S3,'b-', linewidth=2)
#~ plt.show()

#~ M1 = F1*y1*2
#~ M2 = F2*y2*2
#~ M3 = F3*y3*2
Mtotal=(M1+M2+M3)*2
ML.append(Mtotal)
return yyL,np.array(ML)
# geometry of the section
b=133.4
d=206.38
tw=6.32
tf=8.23
fy_flange=352
fy_web=376
E_steel=200e3
ET_steel=20e3
#~ ET_steel=210.0*1e3
I = b*d**3/12.0-(b-tw)*(d-2.0*tf)**3/12.0

M_elastic = fy_web*I/(d/2.0)
yb = (b*tf*(d/2-tf/2)+(d/2.0-tf)**2/2*tw)/(b*tf+(d/2.0-tf)*tw)
A12 = b*tf+(d/2.0-tf)*tw
M_plastic = 2*fy_web*A12*yb
print("\n\t *** Theoretical calculations ***")
print( "\t I =",I)
print("\t M_elastic =",M_elastic)
print("\t M_plastic =",M_plastic)
print("\t Shape factor =",M_plastic/M_elastic)
print("\n\t *** Numerical calculations ***")
yd1,Md1=plasticMomentOfIBeam(E_steel,0.33*E_steel,fy_web,1.5*fy_web,d,b,tf,tw)
yd2,Md2=plasticMomentOfIBeam(E_steel,0.25*E_steel,fy_web,1.5*fy_web,d,b,tf,tw)
yd2,Md3=plasticMomentOfIBeam(E_steel,0.10*E_steel,fy_web,1.5*fy_web,d,b,tf,tw)

```

```

yd2,Md4=plasticMomentOfIBeam(E_steel,0.05*E_steel,fy_web,1.5*fy_web,d,b,tf,tw)
yd2,Md5=plasticMomentOfIBeam(E_steel,0.01*E_steel,fy_web,1.5*fy_web,d,b,tf,tw)
yd2,Md6=plasticMomentOfIBeam(E_steel,0.0*E_steel,fy_web,1.5*fy_web,d,b,tf,tw)
#~ print(Md)
print("\t Quasi fully elastic",Md1[-1]/1e6)
print("\t Quasi fully plastic",Md1[0]/1e6)
print("\t Quasi ratio",Md1[0]/Md1[-1])

#-----

import numpy as np
import matplotlib
#~ matplotlib.rcParams['text.usetex'] = True
#~ matplotlib.rcParams['text.latex.unicode'] = True
import matplotlib.pyplot as plt

#-----
#~ plt.plot(yd, Md/1e6, yd,M_elastic*np.ones(len(yd)), 'b-', linewidth=2)
#~ plt.plot(yd/(d/2),M1d/1e6,"b--",yd/(d/2), M2d/1e6,"g+",yd/(d/2), M3d/1e6,'b-', linewidth=2)
plt.plot(yd1/(d/2), Md1/M_elastic, 'k-s', label="Et/E=1/3",linewidth=1)
plt.plot(yd1/(d/2), Md2/M_elastic,'k--+', label="Et/E=1/4", linewidth=1)
plt.plot(yd1/(d/2), Md3/M_elastic,'k-d', label="Et/E=1/10",linewidth=1)
plt.plot(yd1/(d/2), Md4/M_elastic,'k-.D', label="Et/E=1/20", linewidth=1)
plt.plot(yd1/(d/2), Md5/M_elastic,'k-.D', label="Et/E=1/100",linewidth=1)
plt.plot(yd1/(d/2), Md6/M_elastic,'k-.D', label="Et/E=0",linewidth=1)
plt.plot(yd1/(d/2),M_elastic/M_elastic*np.ones(len(yd1)), 'g-', linewidth=2)
plt.plot(yd1/(d/2),M_plastic/M_elastic*np.ones(len(yd1)), 'r-', linewidth=2)
#~ cc=0.1
#~ S3 = (1-cc+cc*d/2.0/yd)
#~ plt.plot(yd/(d/2),S3,'r-', linewidth=2)
plt.xlim(0,1.0)
#~ plt.ylim(0,4)
plt.grid()
plt.legend()
plt.show()

```

EK 2: Kayma/moment etkileşim eğrisi için SEA ile elde edilen göçme yüklemeleri.

Çizelge 4.1: Açıklık A, $t_s/d_0=0$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$	$w(d_0 = 0.8h)$
Pozisyon 1	0	105	73	52	42
Pozisyon 2	284	114	80	57	47
Pozisyon 3	537	116	85	62	51.5
Pozisyon 4	788	116	88	67	56
Pozisyon 5	1039	112	90	71	61
Pozisyon 6	1299	105	90	74	66
Pozisyon 7	1573	97	88	76.5	72
Pozisyon 8	1866	90	84	78	75
Pozisyon 9	2177	86	82	78	74
Pozisyon 10	2500	85	82	79	75

Çizelge 4.2: Açıklık C, $t_s/d_0=0$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$	$w(d_0 = 0.8h)$
Pozisyon 1	0	90	75	48	50
Pozisyon 2	284	100	82	54	56
Pozisyon 3	537	102	87	60	62
Pozisyon 4	788	102	90	65	67
Pozisyon 5	1039	100	90	70	72
Pozisyon 6	1299	96	89	74	76
Pozisyon 7	1573	90	86	75	77
Pozisyon 8	1866	84	83	75	77
Pozisyon 9	2177	81	82	74	75
Pozisyon 10	2500	81	84	74	75

Çizelge 4.3: Açıklık H, $t_s/d_0=0$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$	$w(d_0 = 0.8h)$
Pozisyon 1	0	43	73	15	11
Pozisyon 2	284	48	80	17	12
Pozisyon 3	537	54	85	19	13
Pozisyon 4	788	62	88	21.5	14.5
Pozisyon 5	1039	70	90	25	17
Pozisyon 6	1299	77	90	30	20
Pozisyon 7	1573	81	88	36.5	25
Pozisyon 8	1866	83	84	45	35
Pozisyon 9	2177	81	82	55	50
Pozisyon 10	2500	80	82	65	60



EK 3: Kayma/moment etkileşim eğrisi için SEA ile elde edilen göçme yüklemeleri ($t_s/d_0=0.03, 0.05, 0.07$ ve $0.09, h_s/t_w=2$ (sabit)).

'Takviye kalınlığına (t_s) göre analiz sonuçları' kısmında elde edilen sonuçlar burada listelenmiştir. Her pozisyondaki göçme yükü (w), ANSYS programında yapılan bir adet analizden elde edilmiştir.

Çizelge 4.4: Açıklık A, $t_s/d_0=0.03$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w (d_0 = 0.5h)$	$w (d_0 = 0.65h)$	$w (d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	106	79	65
Pozisyon 2	284	115	87	73
Pozisyon 3	537	117	93	79
Pozisyon 4	788	117	97	85
Pozisyon 5	1039	114	97.5	90
Pozisyon 6	1299	107	96	91
Pozisyon 7	1573	100	91	89
Pozisyon 8	1866	93	86	86
Pozisyon 9	2177	89	83	84
Pozisyon 10	2500	88	82	83

Çizelge 4.5: Açıklık A, $t_s/d_0=0.05$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w (d_0 = 0.5h)$	$w (d_0 = 0.65h)$	$w (d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	103	85	72
Pozisyon 2	284	113	94	81
Pozisyon 3	537	117	99	88
Pozisyon 4	788	117	102	93
Pozisyon 5	1039	114	101.5	96
Pozisyon 6	1299	109	98	96
Pozisyon 7	1573	101	94	94
Pozisyon 8	1866	95	90	90
Pozisyon 9	2177	90.7	87	87
Pozisyon 10	2500	89	86	86

Çizelge 4.6: Açıklık A, $t_s/d_0=0.07$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	105	92	79.5
Pozisyon 2	284	115	101	89.5
Pozisyon 3	537	117	107	96
Pozisyon 4	788	117	109	101
Pozisyon 5	1039	114	106	103
Pozisyon 6	1299	109	101	103
Pozisyon 7	1573	103	96	99
Pozisyon 8	1866	95	92	95
Pozisyon 9	2177	91	89	91
Pozisyon 10	2500	90	89	90

Çizelge 4.7: Açıklık A, $t_s/d_0=0.09$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	105	99	87
Pozisyon 2	284	114	108	97
Pozisyon 3	537	117	113	104
Pozisyon 4	788	117	113	108
Pozisyon 5	1039	114	109	110
Pozisyon 6	1299	109	103	109
Pozisyon 7	1573	103	97	105
Pozisyon 8	1866	98	93	100
Pozisyon 9	2177	95	90	96
Pozisyon 10	2500	94	89.5	95

Çizelge 4.8: Açıklık C, $t_s/d_0=0.03$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	94	82	68
Pozisyon 2	284	104	90	76
Pozisyon 3	537	106	94	83
Pozisyon 4	788	106.5	96	89
Pozisyon 5	1039	106	96	93
Pozisyon 6	1299	103	94	94
Pozisyon 7	1573	98	91	90
Pozisyon 8	1866	93	87	86
Pozisyon 9	2177	90	85	84
Pozisyon 10	2500	90	85	83

Çizelge 4.9: Açıklık C, $t_s/d_0=0.05$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	95	87	76
Pozisyon 2	284	104	96	84
Pozisyon 3	537	106	102	92
Pozisyon 4	788	106	104	97
Pozisyon 5	1039	106	102	100
Pozisyon 6	1299	103	98	99
Pozisyon 7	1573	98	94	95
Pozisyon 8	1866	95	89	91
Pozisyon 9	2177	93	86	87.5
Pozisyon 10	2500	93	86	86.5

Çizelge 4.10: Açıklık C, $t_s/d_0=0.07$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	94	93	84
Pozisyon 2	284	104	102	92.5
Pozisyon 3	537	106	108	100
Pozisyon 4	788	106	108	105.5
Pozisyon 5	1039	106	106	106.5
Pozisyon 6	1299	104	101	105
Pozisyon 7	1573	100	94	101
Pozisyon 8	1866	97	89	95
Pozisyon 9	2177	96	86	91
Pozisyon 10	2500	96	86	90

Çizelge 4.11: Açıklık C, $t_s/d_0=0.09$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	95	99	92
Pozisyon 2	284	105	109	102
Pozisyon 3	537	107	113	109
Pozisyon 4	788	107	113	113
Pozisyon 5	1039	107	109	113
Pozisyon 6	1299	105	103	110
Pozisyon 7	1573	103	97	105
Pozisyon 8	1866	100	92	98
Pozisyon 9	2177	98.5	89	94
Pozisyon 10	2500	99	88	93

Çizelge 4.12: Açıklık H, $t_s/d_0=0.03$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	81.5	50	25
Pozisyon 2	284	87	56	28
Pozisyon 3	537	92	62	31
Pozisyon 4	788	95	69.5	35
Pozisyon 5	1039	95	77	40
Pozisyon 6	1299	92	83	47
Pozisyon 7	1573	88.5	85	55
Pozisyon 8	1866	87.5	84.5	63
Pozisyon 9	2177	88	84	70
Pozisyon 10	2500	92	82	75

Çizelge 4.13: Açıklık H, $t_s/d_0=0.05$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	86	54	30
Pozisyon 2	284	91	61	34
Pozisyon 3	537	96	68	38
Pozisyon 4	788	99	76	43
Pozisyon 5	1039	98	82	49
Pozisyon 6	1299	95	86	56
Pozisyon 7	1573	93	88	63
Pozisyon 8	1866	93	87	69
Pozisyon 9	2177	93	85	74
Pozisyon 10	2500	96	84	79

Çizelge 4.14: Açıklık H, $t_s/d_0=0.07$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	90	59	34
Pozisyon 2	284	95	66	38
Pozisyon 3	537	99	73	42.5
Pozisyon 4	788	100.5	80	48
Pozisyon 5	1039	102	87	54
Pozisyon 6	1299	100	90.5	62
Pozisyon 7	1573	97.5	92	70
Pozisyon 8	1866	96	91	76
Pozisyon 9	2177	97	89.4	82
Pozisyon 10	2500	100.5	88	86.5

Çizelge 4.15: Açıklık H, $t_s/d_0=0.09$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	92	63	39
Pozisyon 2	284	97	71	43
Pozisyon 3	537	101	78	48
Pozisyon 4	788	104	85	54
Pozisyon 5	1039	105	91	61
Pozisyon 6	1299	103	94	69
Pozisyon 7	1573	100	95	75
Pozisyon 8	1866	99	93	80
Pozisyon 9	2177	100	90.5	85
Pozisyon 10	2500	103	89.5	90

EK 4: Kayma/moment etkileşim eğrisi için SEA ile elde edilen göçme yüklemeleri ($h_s/t_w=2,3$ ve 4 , $t_s/d_0=0.05$ (sabit)).

'Takviye genişliğine (h_s) göre analiz sonuçları' kısmında elde edilen sonuçlar burada listelenmiştir. Her pozisyondaki göçme yükü (w), ANSYS programında yapılan bir adet analizden elde edilmiştir.

Çizelge 4.16: Açıklık A, $h_s/t_w=2$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w (d_0 = 0.5h)$	$w (d_0 = 0.65h)$	$w (d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	103	85	72
Pozisyon 2	284	113	94	81
Pozisyon 3	537	117	99	88
Pozisyon 4	788	117	102	93
Pozisyon 5	1039	114	101.5	96
Pozisyon 6	1299	109	98	96
Pozisyon 7	1573	101	94	94
Pozisyon 8	1866	95	90	90
Pozisyon 9	2177	90.7	87	87
Pozisyon 10	2500	89	86	86

Çizelge 4.17: Açıklık A, $h_s/t_w=3$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w (d_0 = 0.5h)$	$w (d_0 = 0.65h)$	$w (d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	98	98	91
Pozisyon 2	284	105	107	100
Pozisyon 3	537	110	110	106
Pozisyon 4	788	110	109	109
Pozisyon 5	1039	109	107	109
Pozisyon 6	1299	106	104	109
Pozisyon 7	1573	101	99.5	105
Pozisyon 8	1866	96	95	100
Pozisyon 9	2177	92	91	96
Pozisyon 10	2500	90	90	95

Çizelge 4.18: Açıklık A, $h_s/t_w=4$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	97	104	102
Pozisyon 2	284	103	112	112
Pozisyon 3	537	109	118	119
Pozisyon 4	788	111	119	124
Pozisyon 5	1039	111	114	124
Pozisyon 6	1299	108	107	121
Pozisyon 7	1573	102	99	115
Pozisyon 8	1866	96	92	108
Pozisyon 9	2177	92	88	103
Pozisyon 10	2500	90	87	101

Çizelge 4.19: Açıklık C, $h_s/t_w=2$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	95	87	76
Pozisyon 2	284	104	96	84
Pozisyon 3	537	106	102	92
Pozisyon 4	788	106	104	97
Pozisyon 5	1039	106	102	100
Pozisyon 6	1299	103	98	99
Pozisyon 7	1573	98	94	95
Pozisyon 8	1866	95	89	91
Pozisyon 9	2177	93	86	87.5
Pozisyon 10	2500	93	86	86.5

Çizelge 4.20: Açıklık C, $h_s/t_w=3$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	98	92	91
Pozisyon 2	284	103	102	100
Pozisyon 3	537	104	108	108
Pozisyon 4	788	104	111	112
Pozisyon 5	1039	105	109	113
Pozisyon 6	1299	104	105	110
Pozisyon 7	1573	102	98	105
Pozisyon 8	1866	100	93	99.5
Pozisyon 9	2177	99	90	96
Pozisyon 10	2500	100	89	95

Çizelge 4.21: Açıklık C, $h_s/t_w=4$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	97	99	96
Pozisyon 2	284	103	110	107
Pozisyon 3	537	105	112	115
Pozisyon 4	788	106	112	118
Pozisyon 5	1039	106	111	119
Pozisyon 6	1299	107	106	119
Pozisyon 7	1573	108	98.5	116
Pozisyon 8	1866	107	92	110
Pozisyon 9	2177	107	88	106
Pozisyon 10	2500	109	86.5	105

Çizelge 4.22: Açıklık H, $h_s/t_w=2$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	86	54	30
Pozisyon 2	284	91	61	34
Pozisyon 3	537	96	68	38
Pozisyon 4	788	99	76	43
Pozisyon 5	1039	98	82	49
Pozisyon 6	1299	95	86	56
Pozisyon 7	1573	93	88	63
Pozisyon 8	1866	93	87	69
Pozisyon 9	2177	93	85	74
Pozisyon 10	2500	96	84	79

Çizelge 4.23: Açıklık H, $h_s/t_w=3$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w(d_0 = 0.5h)$	$w(d_0 = 0.65h)$	$w(d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	102	67	41
Pozisyon 2	284	108	75	46
Pozisyon 3	537	110	82	52
Pozisyon 4	788	111	89	59
Pozisyon 5	1039	109	94	66
Pozisyon 6	1299	105	94	72
Pozisyon 7	1573	101	92	77.5
Pozisyon 8	1866	98	89	83
Pozisyon 9	2177	98	86.5	85
Pozisyon 10	2500	100	85	88

Çizelge 4.24: Açıklık H, $h_s/t_w=4$.

Pozisyonlar	x [mm]	$w (d_0 = 0.5h)$	$w (d_0 = 0.65h)$	$w (d_0 = 0.75h)$
Pozisyon 1	0	110	78	47
Pozisyon 2	284	115	86	53
Pozisyon 3	537	116	92	60
Pozisyon 4	788	116	96	67
Pozisyon 5	1039	112.5	97	75
Pozisyon 6	1299	108	96	80
Pozisyon 7	1573	105	93	85
Pozisyon 8	1866	103	89	89
Pozisyon 9	2177	102	86	91
Pozisyon 10	2500	104	85	94

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Barış Mehmet Zeytinci
Uyruğu : TC
Doğum Tarihi ve Yeri : 03.11.1993 Ankara
E-posta : bariszeytinci1@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Çankaya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2019, TOBB Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
07.2018-devam ediyor	NanoManyetik Bilimsel Cihazlar	Mekanik Tasarım Mühendisi
02.2016-07.2017	Ortadoğu Rulman Sanayi	Mamül Dizayn ve Uygulama Mühendisi

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Zeytinci B.M.**, Sahin M., Guler M.A., Tsavdaridis K. D., Vierendeel Bending Capacity of Stiffened Perforated Beams with Various Opening Shapes, (2019), JCSR, (submitted)...
- **Zeytinci B.M.**, Güler M.A., Şahin M., Numerical and Finite Element Simulation of Laminate Beam with Bi-linear Plastic Behaviour Under Pure Bending Conditions, 1st International Conference on Advances in Mechanical and Mechatronics Engineering, ICAMMEN 2018, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara.
- **Zeytinci B.M.**, Güler M.A., Şahin M., Kompozit Yapıya Sahip I-kesitli Kirişlerin Plastik Moment Kapasitesinin Analitik Metotla Çözümü, 7. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 12-14 Eylül 2018, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun.