

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KİRİŞ YAPILARINDAKİ HAFİFLETME DELİĞİ ETRAFINDAKİ
GÜÇLENDİRMENİN, BİRLEŞİK YÜKLER ALTINDA KRİTİK BURKULMA
GERİLMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Arif Emre ÖRÜN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Ali GÜLER

Mart 2017

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans/Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

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

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 141511013 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Arif Emre ÖRÜN** 'nün ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**KİRİŞ YAPILARINDAKİ HAFİFLETME DELİĞİ ETRAFINDAKİ GÜÇLENDİRMENİN, BİRLEŞİK YÜKLER ALTINDA KRİTİK BURKULMA GERİLMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**" başlıklı tezi **16,03,2017** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

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

Jüri Üyeleri :Doç. Dr. Erdem ACAR (Başkan)
TOBB Ekonomik 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 atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.



Arif Emre ÖRÜN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KİRİŞ YAPILARINDAKİ HAFİFLETME DELİĞİ ETRAFINDAKİ GÜÇLENDİRMENİN, BİRLEŞİK YÜKLER ALTINDA KRİTİK BURKULMA GERİLMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Arif Emre ÖRÜN

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

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Ali GÜLER

Tarih: Mart 2017

Bu yüksek lisans tezinde, havacılık alanında sıklıkla kullanılan ince cidarlı kirişler için birleşik yükleme altında burkulma analizinde delik etrafı güçlendirmenin etkisi ele alınmıştır. Burkulma analizi çalışması geometrik parametrelere bağlı olarak yürütülmüştür. İlk olarak çalışmanın yürütüleceği farklı parametrelerde kirişler tasarlanmıştır. Kiriş geometrisi olarak yolcu uçaklarında yer alan zemin kirişi ele alınmış ve parametre için üç temel geometrik değişken belirlenmiştir. Bunlar kiriş gövdesi (web) genişliğinin kiriş gövdesi yüksekliğine (aspect ratio) oranı (a/b), güçlendirme yüksekliğinin kiriş gövdesi et kalınlığına oranı (h/t) ve güçlendirme genişliğinin delik çapına oranıdır (w/d). Yine uçak yapıları baz alınmış ve kiriş malzemesi olarak alüminyum 7075 serisi seçilmiştir. Tasarlanan bu kirişler için yürütülen burkulma analizlerinde ticari bir sonlu elemanlar (SE) programı olan ABAQUS kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modellemesinden önce kullanılacak SE programı için doğrulama işlemi yürütülmüştür. Doğrulama işlemi, ABAQUS programından elde edilen analiz sonuçların; analitik el hesap ve literatürdeki uluslararası makalelerdeki test datalarının ve farklı SE programından elde edilen dataların karşılaştırılması ile yapılmıştır. SE programı kullanılarak saf yüklemeler

altında (saf basma, saf kayma, saf eğilme), tasarlanan yapının kritik burkulma gerilmesi değerlerinin farklı tasarım kriterlerine bağlı eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler yardımı ile hafifletme deliğine sahip kiriş yapısı için burkulma değeri ve kiriş ağırlığına bağlı olarak ideal tasarım belirlendi. İdeal geometrik parametrelerine sahip kiriş için bu defa birleşik yüklemeler (basma, kayma, eğilme) altında analizler yürütülmüş ve kritik burkulma gerilme değerleri hesaplanmıştır. Saf yüklemeler altında elde edilen kritik burkulma gerilmeleri değerine ve birleşik yükleme koşulundaki yükleme senaryolarına bağlı olarak yükleme oranları hesaplanmıştır. Sonuç olarak, basma, kayma ve eğilme yükleme oranlarına bağlı olarak parametrik etkileşim eğrileri elde edilmiştir. Etkileşim eğrileri deliksiz yapılar, delikli yapılar ve delik etrafı güçlendirmeye sahip yapılar için oluşturulmuştur. Daha sonra, güçlendirme etkisini görmek için bu eğriler yorumlanmış ve birbirleri ile karşılaştırılmış ve konunun daha rahat kavranabilmesi adına nümerik bir örnek verilmiştir. Bu çalışma ile elde edilen etkileşim eğrileri yardımı ile mühendisler tasarımlarının istenilen yük koşulunda burkulmaya sebebiyet verip vermeyeceğini grafik üzerinden gözlemleyebilecektir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar analizi, Burkulma, Delik güçlendirme, Birleşik yükler, Kiriş optimizasyonu, İnce cidarlı yapılar.

ABSTRACT

Master of Science

EFFECT OF HOLE REINFORCEMENT ON BUCKLING BEHAVIOUR UNDER COMBINED LOADS FOR A BEAM STRUCTURE

Arif Emre ÖRÜN

TOBB University of Economics and Technology

Institute of Natural and Applied Sciences

Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Ali GÜLER

Date: March 2017

In this master's thesis, the effect of hole reinforcement on the buckling behaviour of thin-walled beams mostly used in aviation field is considered for combined loading conditions. The buckling analysis was carried out based on the geometric parameters. Firstly, the beams are designed with different parameters. The fuselage floor beam on the passenger aircraft was selected as the beam geometry and three basic geometric variables were considered for the parametric analyses. These are the aspect ratio of the web plate (a/b), the ratio of reinforcement height to web plate thickness (h/t) and the ratio of reinforcement width to hole diameter (w/d). Once again based on aircraft structures, aluminium 7075 series was chosen as beam material. The commercial finite element (FE) analysis program, ABAQUS was used in the buckling analyses that are carried out for the designed beams. Validation was carried out for the finite element model with the analytical hand calculations. The verification process includes comparison between analysis results obtained from the ABAQUS program and the test data in the international articles in the literature and the data obtained from different FE programs. Using the FE program, the curves of the critical buckling stress values of the designed structure depending on different design criteria under pure loads (pure compression, pure shear, pure bending) are sketched. With the aid of these curves, the ideal design was determined for the beam

structure with the lighting hole depending on the critical buckling stress and the beam weight. For beams with ideal geometric parameters, analyses were then carried out under combined loads (compression, shear, bending) and critical buckling stress values were calculated. The loading rates were calculated based on the critical buckling stress values obtained under pure loads and loading scenarios under combined loading conditions. As a result, parametric interaction curves were obtained depending on compression, shear and bending loading rates. Interaction curves are designed for structures without holes, with holes and with reinforcement around the hole. After that these curves are interpreted and compared with each other to observe the effect of hole reinforcement. A numerical example is given in order to make it easier to comprehend interaction curve approach. With the help of the interaction curves obtained in this study, the engineers will be able to observe graphically whether their designs will cause buckling at their desired load condition or not.

Keywords: Finite element analysis, Buckling, Hole reinforcement, Combined loading, Beam optimization, Thin-walled structure.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Mehmet Ali Güler, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve destekleriyle her zaman yanımda olan sevgili eőim Hümevra Betül'e, kıymetli aileme ve başta Murat Çelik olmak üzere TUBİTAK UZAY'daki iş arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Ayrıca burs sağladığı için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR	xiv
SEMBOL LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	3
1.2.1 Delik açılması ve farklı delik tiplerinde burkulma analizleri	3
1.2.2 Burkulmaya karşı yapıyı güçlendirme	14
1.2.3 Ülkemizde yürütülmüş burkulma alanındaki çalışmalar	18
2. KİRİŞ GEOMETRİSİ VE MALZEME SEÇİMİ	21
2.1 Kiriş Geometrisi	21
2.2 Malzeme Özellikleri	22
3. SONLU ELEMANLAR MODELLEMESİ VE DOĞRULANMASI	27
3.1 Sonlu Elemanlar Modellemesi	27
3.1.1 ABAQUS burkulma analizi prensibi	27
3.1.2 ABAQUS SE modellemesi	35
3.1.3 Sınır şartı ve yükleme koşulu	36
3.1.4 Çözüm ağı, eleman tipi ve boyut optimizasyonu	39
3.1.5 Modelin koşturulması ve özdeğer çıktısı yorumlaması	41
3.2 Literatür Çalışmaları	42
3.3 Analitik Hesap	43
3.3.1 Flanş destek testi	44
3.3.2 Saf yüklemeler altında burkulma formülleri	45
3.3.3 Burkulma katsayısı yaklaşımları	45
3.3.4 Analitik hesap ile doğrulama	50
4. BURKULMA ANALİZLERİ	53
4.1 Kiriş Gövdesi Uzunluğunun Yüksekliğine Oranına (a/b) Bağlı Burkulma Analizi	53
4.2 Güçlendirme Yüksekliğinin Kiriş Gövdesi Kalınlığı Oranına (h/t) Bağlı Burkulma Analizi	59
4.3 Güçlendirme Genişliği Delik Çapı Oranına (w/d) Bağlı Burkulma Analizi	65
5. BİRLEŞİK YÜKLEME VE ETKİLEŞİM EĞRİSİ	73
6. ETKİLEŞİM EĞRİSİNİ KULLANIMI NÜMERİK ÖRNEĞİ	79
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR	87
EKLER	93
ÖZGEÇMİŞ	115

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Hafifletme deliği açılmış yolcu uçağı gövdesi (Airbus A350).....	1
Şekil 1.2 : Filetli altıgen delik ile dairesel delik karşılaştırması (a) yükleme konfigürasyonu, (b) elips delik modellemesi, (c) filetli altıgen delik modellemesi (Wang, 2014)	4
Şekil 1.3 : a) Farklı geometrik parametrelere sahip dairesel delikli model için burkulma eğrileri (b) kare delikli model için burkulma eğrileri (Pasinli, 2013)..	6
Şekil 1.4 : a) Plakalarda delik oranlarına bağlı, (b) C kesitli kirişlerde delik oranlarına bağlı kayma burkulma faktörü eğrileri (Pham,2017).....	8
Şekil 1.5 : (a) Geometrik parametreler, (b) basma yükünde sınır şartı, (c) eğilme yükü için sınır şartı (Moen,2009).....	10
Şekil 1.6 : Test düzeneği ve gerinim dataları (a) basma testi düzeneği, (b) uygulanan yüke bağlı gerinim davranış eğrileri (Feng,2016).....	12
Şekil 1.7 : Doğrulama işleminde kullanılan test çalışması (a) test düzeneği, (b) test numunesi (Tsavdaridis and D’Mello,2011)	13
Şekil 1.8 : Doğrulama işleminde kullanılan SE modeli (a) kiriş geometri parametreleri, (b) 3 farklı kiriş SE modeli (Panedpojaman et al.,2014)	14
Şekil 1.9 : (a) 4 farklı güçlendirme tiplerinin geometrik modellemesi, (b) güçlendirme tiplerinin kritik burkulma gerilmesi karşılaştırma eğrisi (Cheng and Zhao,2010)	16
Şekil 1.10 : Farklı delik çaplarında güçlendirmelerin SE analizleri (Cheng and Zhao,2010)	17
Şekil 1.11 : (a) 3 tip güçlendirme geometrisi, kopma mukavemetinin geometrik parametreye (b) ve ağırlığa (c) bağlı eğrisi (Kim et al., 2015).	18
Şekil 2.1 : Yolcu uçakları için genel iskelet gövdesi	21
Şekil 2.2 : Kiriş geometrisi ve parametreleri	23
Şekil 2.3 : Yolcu uçaklarında kullanılan malzeme seçenekleri ve dağılımı (Airbus A330, A380, A350 XWB (Escobar,2014)	23
Şekil 2.4 : Alüminyum 7075 T651 için gerilme-gerinim eğrisi (Military Handbook,1972).....	25
Şekil 3.1 : Quad4 ve Quad8 için düğüm noktaları numaralandırması	33
Şekil 3.2 : Lineer burkulma analizi prosedürü akış şeması (Frank,2012).....	35
Şekil 3.3 : Saf basma yükü için sınır şartı ve yükleme koşulu modellemesi	37
Şekil 3.4 : Saf eğilme yüklemesi için sınır şartı ve yükleme koşulu modellemesi	38
Şekil 3.5 : Saf kayma yüklemesi altında sınır şartı ve yükleme koşulu modellemesi ..	39
Şekil 3.6 : Birleşik yüklemesi için sınır şartı ve yükleme koşulu modellemesi	40
Şekil 3.7 : Çözüm ağı çalışması ve washer metodu görseli	41
Şekil 3.8 : Eleman sayısı optimizasyon eğrisi.....	41
Şekil 3.9 : Test (Tsavdaridis,2011), ANSYS modeli (Panedpojaman,2014) ve ABAQUS modelinin yük-deformasyon eğrisi üzerinde karşılaştırması.....	43
Şekil 3.10 : Flanşları kaldırılmış basit destekli plaka modeli	44
Şekil 3.11 : Basma yükü altında geometrik tasarımlar (caseler).....	47
Şekil 3.12 : Eğilme yükü altında geometrik tasarımlar (caseler)	48
Şekil 3.13 : Kayma yükü altında geometrik tasarımlar (caseler).....	49
Şekil 3.14 : Kayma yükü altında burkulma SE analizi sonuç görüntüsü	51

Şekil 4.1 Basma kuvveti altında a/b oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü	54
Şekil 4.2 Eğilme kuvveti altında a/b oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü	55
Şekil 4.3 Kayma kuvveti altında a/b oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü	56
Şekil 4.4 Basma kuvveti altında a/b oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi	57
Şekil 4.5 Eğilme kuvveti altında a/b oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi	58
Şekil 4.6 Kayma kuvveti altında a/b oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi	58
Şekil 4.7 Basma kuvveti altında h/t oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü	59
Şekil 4.8 Eğilme kuvveti altında h/t oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü	60
Şekil 4.9 Kayma kuvveti altında h/t oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü	60
Şekil 4.10 Basma kuvveti altında h/t oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi	61
Şekil 4.11 Eğilme kuvveti altında h/t oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi	63
Şekil 4.12 Kayma kuvveti altında h/t oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi	64
Şekil 4.13 Basma kuvveti altında w/d oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü	66
Şekil 4.14 Eğilme kuvveti altında w/d oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü	67
Şekil 4.15 Kayma kuvveti altında w/d oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü	68
Şekil 4.16 Basma kuvveti altında w/d oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi	69
Şekil 4.17 Eğilme kuvveti altında w/d oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi	70
Şekil 4.18 Kayma kuvveti altında w/d oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi	71
Şekil 5.1 : Referansta yer alan deliksiz plakalar için yürütülen etkileşim eğrisi (J.Huet,1999)	73
Şekil 5.2 : Delikli plakalar için yürütülen etkileşim eğrisi	76
Şekil 5.3 : Delik etrafı güçlendirmeye sahip plakalar için yürütülen etkileşim eğrisi	76
Şekil 5.4 : Etkileşim eğrisi metodu akış şeması	77
Şekil 6.1 : Yolcu uçağı zemin kiriş kesit görüntüsü alma örneğı	80
Şekil 6.2 : Etkileşim eğrisi kullanma örneğı	82
Şekil Ek1. ABAQUS geometri tanımlama	94
Şekil Ek 2. ABAQUS elasto-plastik malzeme tanıtımı	95
Şekil Ek 3.1 ABAQUS kesit tanıtımı	97
Şekil Ek 3.2 ABAQUS montaj ve bağlantı tanıtımı	98
Şekil Ek 4. ABAQUS çözüm ağı parametresi belirleme	99
Şekil Ek 5.1 ABAQUS burkulma analizi tipi tanıtımı	100
Şekil Ek 5.2 ABAQUS koşturma tanıtması	101
Şekil Ek 6.1 KRS300-314 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	102
Şekil Ek 6.2 KRS315-329 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	103
Şekil Ek 6.3 KRS331-345 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	103
Şekil Ek 6.4 KRS346-360 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	104
Şekil Ek 6.5 KRS361-375 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	104
Şekil Ek 7.1 KRS400-414 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	108

Şekil Ek 7.2 KRS415-429 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	109
Şekil Ek 7.3 KRS431-445 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	109
Şekil Ek 7.4 KRS446-460 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	110
Şekil Ek 7.5 KRS461-475 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	110



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : SEA ve test datalarının karşılaştırmasında kullanılan numunelerin geometri (Panedpojaman et al.,2014)	13
Çizelge 2.1 : Alüminyum 7075 T651 malzeme özellikleri (Military Handbook,1972)	24
Çizelge 3.1 : Quad4 ve Quad8 elemanlar için şekil fonksiyonları.....	33
Çizelge 3.2 : Basma yükü altında burkulma faktörü kat sayıları (J.Huet,1999)	48
Çizelge 3.3 : Eğilme yükü altında burkulma faktörü sabitleri (J.Huet,1999)	49
Çizelge 3.4 : Kayma yükü altında burkulma faktörü kat sayıları (J.Huet,1999).....	50
Çizelge 3.5 : Analitik ve SEA kritik burkulma gerilmeleri karşılaştırması.	52
Çizelge 4.1 : Basma yükü altında güçlendirme yüksekliğine bağlı hacim-gerilme kazanımı oranı hesabı tablosu	62
Çizelge 4.2 : Eğilme yükü altında güçlendirme yüksekliğine bağlı hacim-gerilme kazanımı oranı tablosu	64
Çizelge 4.3 : Kayma yükü altında güçlendirme yüksekliğine bağlı hacim-gerilme kazanımı oranı tablosu	65
Çizelge 4.4 : Basma yükü altında güçlendirme genişliğine bağlı hacim-gerilme kazanımı oranı hesabı tablosu	69
Çizelge 4.5 : Eğilme yükü altında güçlendirme genişliğine bağlı hacim-gerilme kazanımı oranı tablosu	70
Çizelge 4.6 : Kayma yüklemesi için güçlendirme genişliğine bağlı hacim-gerilme kazanımı oranı hesabı tablosu	72
Çizelge 5.1 : Delikli plakalarda etkileşim eğrisi çalışmasında kullanılan geometrik parametreler ve kritik burkulma gerilmeleri	74
Çizelge 5.2 : Delik etrafı güçlendirmeli plaka için etkileşim eğrisi çalışmasında kullanılan geometrik parametreler ve kritik burkulma gerilmeleri	74
Çizelge 6.1 : Nümerik örnek için geometrik parametreler ve atalet momenti	79
Çizelge 6.2 : Nümerik örnek için uygulanan kuvvetler, moment ve hesaplanan gerilmeler	79
Çizelge Ek2. Plastik gerilme-gerinim değerleri	96
Çizelge Ek 6.1 KRS300-314 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	105
Çizelge Ek 6.2 KRS315-329 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	105
Çizelge Ek 6.3 KRS331-345 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	106
Çizelge Ek 6.4 KRS346-360 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	106
Çizelge Ek 6.5 KRS361-375 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	107
Çizelge Ek 7.1 KRS400-414 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	111
Çizelge Ek 7.2 KRS416-430 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	111
Çizelge Ek 7.3 KRS431-445 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	112
Çizelge Ek 7.4 KRS446-460 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	112
Çizelge Ek 7.5 KRS461-475 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları	113

KISALTMALAR

SE	: Sonlu Elemanlar
SEM	: Sonlu Elemanlar Modeli
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
FE	: Finite Element (Sonlu Elemanlar)
GBT	: Genelleştirilmiş kiriş teorisi (generalized beam theory)
EFG	: Element Free Galerkin
RSA	: Rotational Spring Analogy
SFSM	: Spline Finite Strip Method
HS	: Harmonik Tekniği (Harmonic Sampling)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
CNC	: Bilgisayar Sayımlı Yönetim (Computer Numerical Control)
KRS	: Yükleme kombinasyonuna bağlı kiriş numunesi
2D	: İki boyutlu
3D	: Üç boyutlu

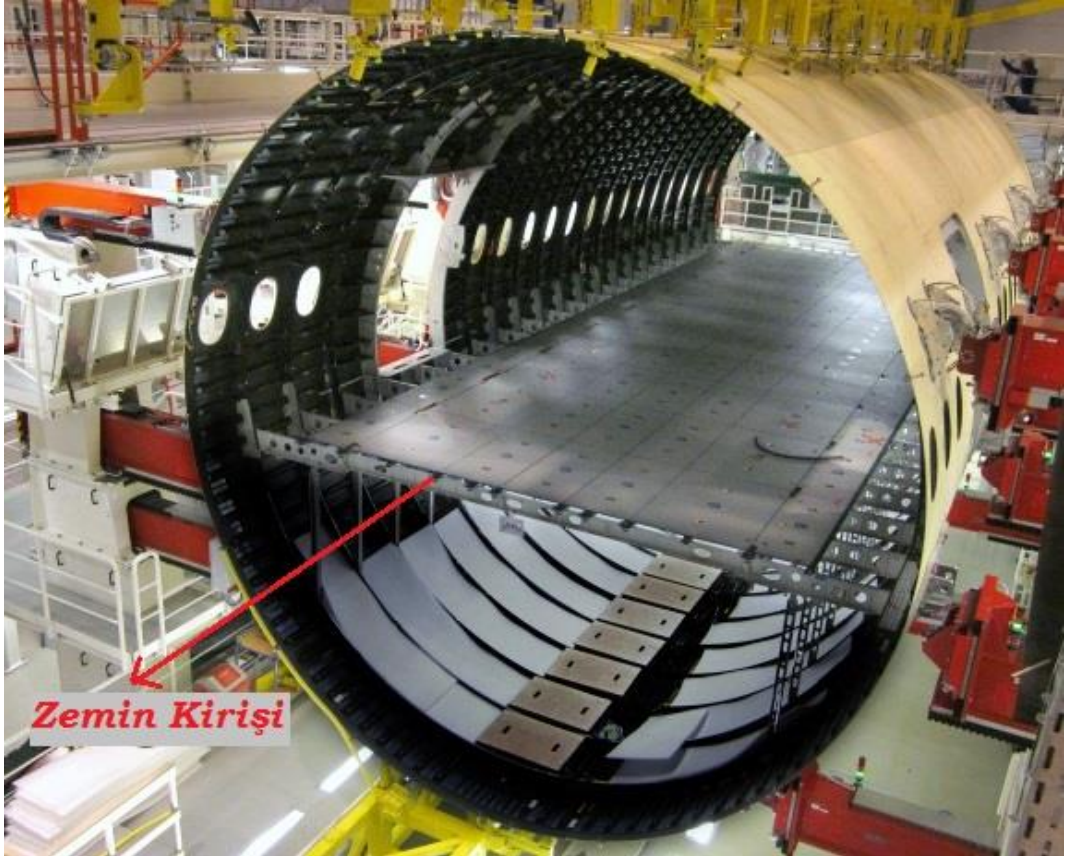
SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a	Kiriş gövdesi (web) uzunluğu
b	Web yüksekliği
d	Delik çapı
t	Web kalınlığı
h	Güçlendirme yüksekliği
w	Güçlendirme genişliği
F_{ccr}	Basma yükü altında kritik burkulma gerilmesi
F_{bcr}	Eğilme yükü altında kritik burkulma gerilmesi
F_{scr}	Kayma yükü altında kritik burkulma gerilmesi
K_c	Basma burkulma katsayısı
K_b	Eğilme burkulma katsayısı
K_s	Kayma burkulma katsayısı
k_c	Basma burkulma faktörü
k_b	Eğilme burkulma faktörü
k_s	Kayma burkulma faktörü
V_P	Plaka hacmi
V_H	Delik hacmi
V_S	Güçlendirme hacmi
V_{Pyeni}	Güçlendirme sonrası plaka hacmi
V_G	Kazanılan hacim
C	Uygulanan basma yükü oranı
B	Uygulanan eğilme yükü oranı
S	Uygulanan kayma yükü oranı
R_C	Basma oranı
R_B	Eğilme oranı
R_S	Kayma oranı
R_C^A	Uygulanan Basma oranı
R_B^A	Uygulanan Eğilme oranı
R_S^A	Uygulanan Kayma oranı

1. GİRİŞ

İsı Havacılık, otomotiv ve savunma sistemleri yapılarında, iskeletin en önemli parçalarından biri de kiriş yapısıdır. Bu alanlarda kullanılan kiriş yapılarında çeşitli tasarım prensiplerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlardan başlıcaları: elektrik kabloları, hidrolik boruları, temiz ve atık su borularını tasarımları olarak sayılabilir. Bu gereksinimlerden ve özellikle havacılık alanında sistemin olabildiğince hafif tasarlanması ihtiyacından ötürü kiriş gövdesi (web) üzerinde hafifletme deliği açılmaktadır (Panedpojaman, 2016), (Seo, 2011). Şekil 1.1'de Airbus A350 yolcu uçağının gövde iskeletini sunulmuştur. Bu görselde yolcu koltuklarının yerleştirileceği zemin kirişinde belirli şekillerde hafifletme deliği açıldığını görmekteyiz.



Şekil 1.1 : Hafifletme deliği açılmış yolcu uçağı gövdesi (Airbus A350)

İskelet yapılarında sistemin dayanımının kontrolü için bir takım yapısal analizler yapılmaktadır. Bu analizlerin en kritiklerinden birisi, burkulma analizidir. Kiriş üzerinde açılan delikler ile delik yarıçapına bağlı olarak kritik burkulma gerilmesi değerinde azalma meydana gelmektedir. Yani yapının burkulmaya karşı direncinde zayıflama olmaktadır. Bu zayıflamayı önlemek amacı ile delik etrafı güçlendirme metoduna başvurulmaktadır (Cheng, 2014), (Cheng, 2013), (Dimopoulos, 2015). Yapılan güçlendirme işlemi ile yapı hem burkulma açısından daha güçlü hale gelmekte hem de daha hafif bir tasarım sağlanmış olmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Havacılık uygulamalarında sıklıkla başvuru alan giriş gövdesinde delik açma ihtiyacı; bu yapılarındaki burkulma analizi çalışmalarının da önemini artırmıştır. Literatürde saf yüklemeler (saf basma Chneg(2016), Yao(2012), saf kayma Dgtyareva(2016), Gned(2015), Wang(2016), saf eğilme Moen(2009), Yingjiang(2015)), ikili yüklemeler yani basma ve kayma birlikte Weaver(2008) veya yanal burulmalı Horacek(2016), Panedpojaman(2016) gibi uygulamalar mevcut iken bu çalışmada birleşik yükleme koşulunda (aynı anda saf basma, saf kayma ve saf eğilme uygulanma koşulu) güçlendirmenin burkulma üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmaktadır.

Tez çalışması, giriş kısmının ardından beş başlık halinde organize edilmiştir. İkinci kısımda parametrik giriş geometrisi, malzeme seçimi ve malzeme özellikleri sunulmuştur. Sonlu elemanlar modelinin; test sonuçları, literatür çalışmaları ve analitik el hesabı ile doğrulama işlemine üçüncü başlıkta yer verilmiştir. Dördüncü kısımda, kullanılan SE programının temel prensipleri ve analiz süreci verilmiştir. Yine aynı kısımda, saf yüklemeler altında burkulma analizleri sonucunda elde edilen geometrik parametrelere bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrileri sunulmuş ve hacim-gerilim kazancı kriterine göre optimum giriş dizaynı yaklaşımı yapılmıştır. Saf yüklemelerin ardından birleşik yüklemelerde analizler yürütülmüş ve bu çalışmalardan etkileşim eğrileri elde edilmiştir. Birleşik yüklemeler altında parametrik burkulma etkileşim eğrileri çalışması beşinci kısımda sunulmuştur.

Altıncı kısımda, yürütülen çalışmaların daha iyi anlaşılabilmesi için nümerik bir örnekleme sunulmuştur. Son olarak, sonuç ve ileri dönemdeki planlanan çalışmalara yedinci başlıkta yer verilmiştir.

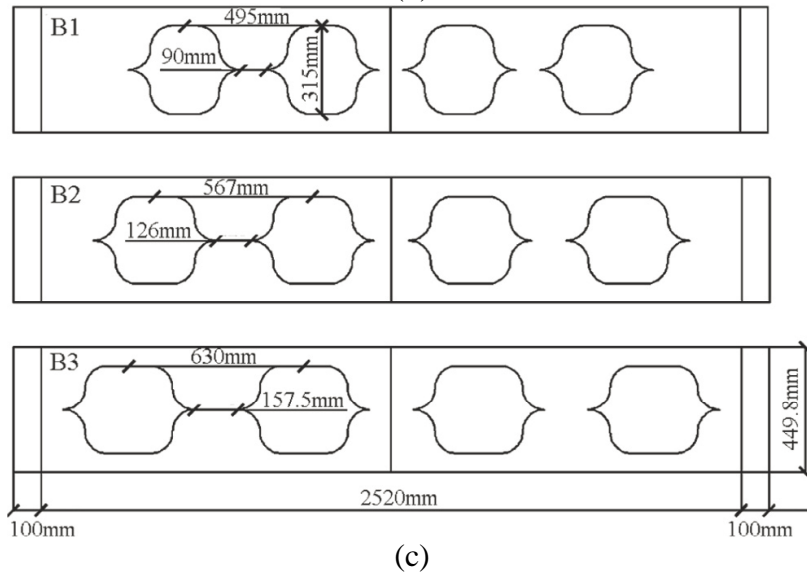
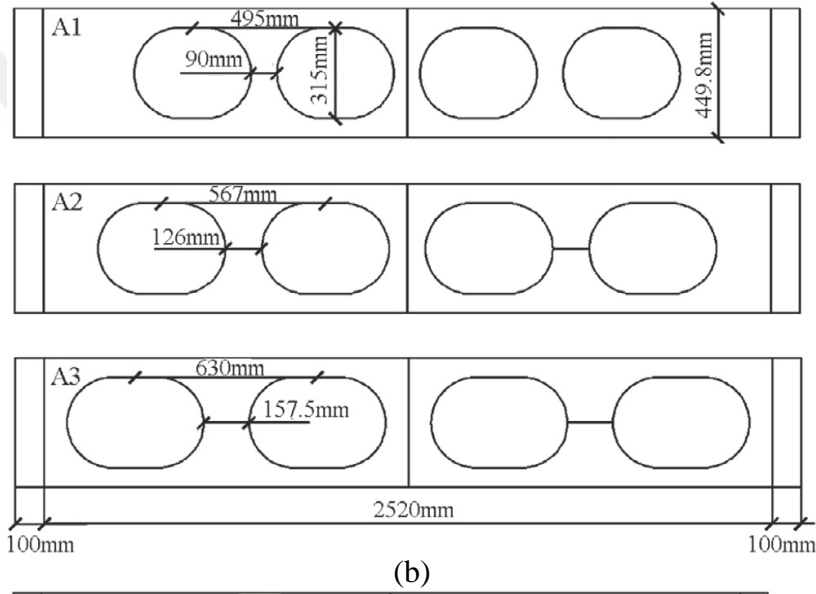
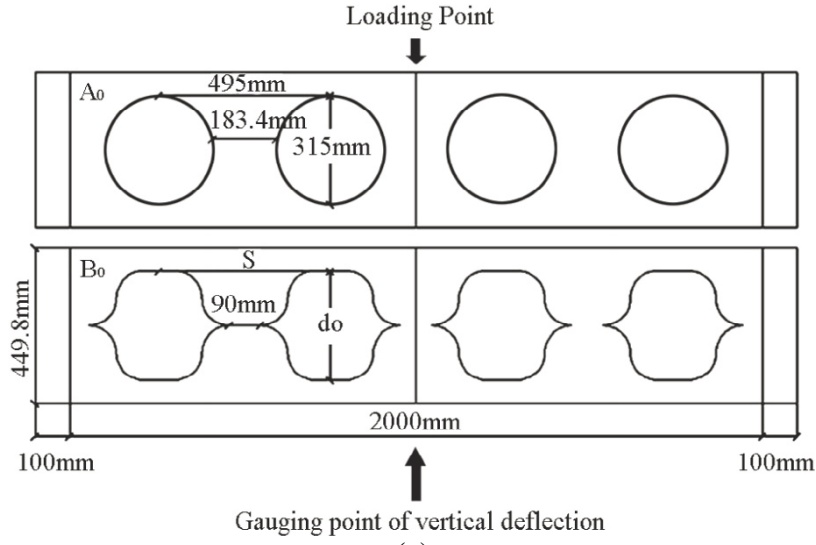
1.2 Literatür Araştırması

1.2.1 Delik açılması ve farklı delik tiplerinde burkulma analizleri

Giriş kısmında da bahsedildiği üzere gerekli tasarım prensipleri ve ağırlık hafifletmesi amaçları doğrultusunda kiriş gövdesinde delik açma işlemi uygulanmaktadır. Bu kısımda literatürde yer alan delik açma gereksinimi ve delik türlerine yer verilecektir. Aynı zamanda açılan bu deliklerden ötürü zayıflayan yapılar için analitik ve SE modellemesi ile yürütülen burkulma analizlerinden bahsedilecektir.

Çalışmalarda farklı tipte deliklere rastlanılmıştır. Cai and Moen(2016) dikdörtgen delikli ince cidarlı yapılar için geliştirilmiş kiriş teori (GBT) kullanılarak burkulma metodu çalışması yürütmüştür. Farklı boyutlardaki dikdörtgen hafifletme delikleri ile yürüttükleri metot çalışmalarını sonlu elemanlar analizleri ile karşılaştırmışlardır.

Wang et al.(2014) şeritli altıgen şekildeki delik ile dairesel deliğin burkulma açısından karşılaştırmasını yapmışlardır. Karşılaştırmalarında delik yüksekliği, delikler arası mesafe ve kiriş gövdesi kalınlığı parametrelerini kullanmışlardır (Şekil 1.2). Kayma yükü altında yürüttükleri burkulma analizleri sonucunda, yapısal olarak altıgen deliğin dairesel delik kadar güzel sonuç verdiğini savunmuşlardır.

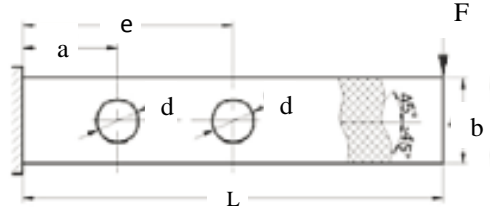


Şekil 1.2 : Filetli altıgen delik ile dairesel delik karşılaştırması (a) yükleme konfigürasyonu, (b) elips delik modellemesi, (c) filetli altıgen delik modellemesi (Wang, 2014)

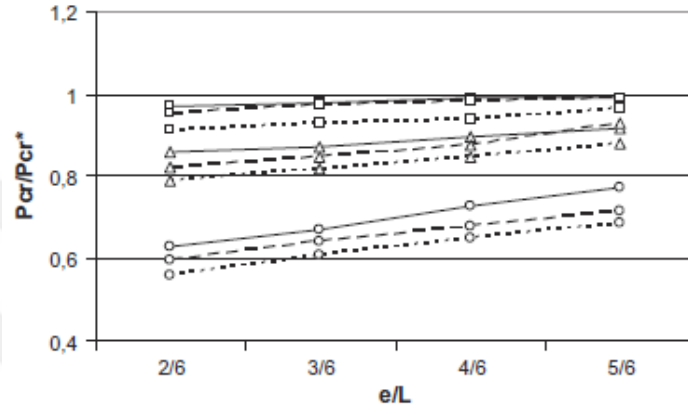
Komur and Sonmez(2015) dikdörtgen plakalarda açılan dairesel delikler için farklı yükleme koşullarında burkulma analizi çalışması yürütmüşlerdir. Delik açma işleminin, yapısal ve elektrik sistemlerine ulaşım veya malzeme azaltma işlemleri nedeni ile artık kaçınılmaz bir işlem olduğunu belirtmişlerdir. ANSYS sonlu elemanlar programında, çelik malzeme kullanılarak yükseklik - genişlik oranı bir ve iki olan plakalarda açılan 5 farklı dairesel çap oranı için basma kuvveti altında analiz yürütmüşlerdir.

Abidin and Izzuddin(2013) çelik konstrüksiyonlarda yaygın olarak kullanılan düzensiz farklı delik tiplerine sahip kiriş analizini ele almışlardır. Makalelerinde düzenli ve düzensiz delik tiplerinde efektif bir nümerik lokal burkulma analizi için Element Free Galerkin (EFG) ve Rotational Spring Analogy (RSA) metodunu kullanmışlardır. Bu iki metodun (EFG ve RSA) kombinasyonun iteratif olarak kullanıcıya avantaj sağlayacağını savunmuşlardır. Yaklaşımlarını SE programı ile karşılaştırmışlar ve oldukça benzer bir davranış elde etmişlerdir.

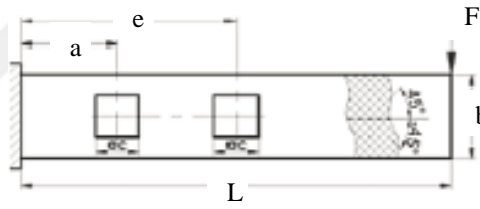
Pasinli(2013) makalesinde kare ve dairesel deliğe sahip kompozit kirişler için burkulma davranışlarını incelemiştir. Burkulma analizlerinde; deliklerin ölçüleri, şekilleri, pozisyonları ve kiriş kalınlığı parametreleri baz almıştır. İlk olarak deliksiz yapılar için analitik, deneysel ve nümerik (nümerik program olarak ANSYS kullanılmıştır) yöntemlerle sonuçlar elde etmiş ve birbirleri ile karşılaştırmıştır. Sonuçların bir biri ile yakın olduğu gözlemlendiğinden ANSYS programının analizlerde kullanılabilmesine karar vermiş ve bu program ile farklı parametreler için çalışmalar yürütmüştür. Sonuç olarak Şekil 1.3'deki karşılaştırma eğrilerine baktığımızda, dairesel deliğin burkulma açısından kare deliğe oranla daha avantajlı olduğunu savunmuştur.



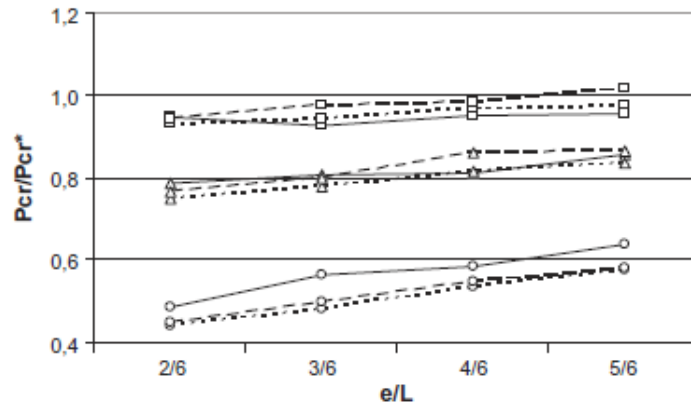
d/b	[(0/90) _s]	[(30/-60) _s]	[(±45) _s]
1/4	—○—	····□····	- - -□- - -
2/4	—△—	····△····	- - -△- - -
3/4	—○—	····○····	- - -○- - -



(a)



d/b	[(0/90) _s]	[(30/-60) _s]	[(±45) _s]
1/4	—□—	····□····	- - -□- - -
2/4	—△—	····△····	- - -△- - -
3/4	—○—	····○····	- - -○- - -



(b)

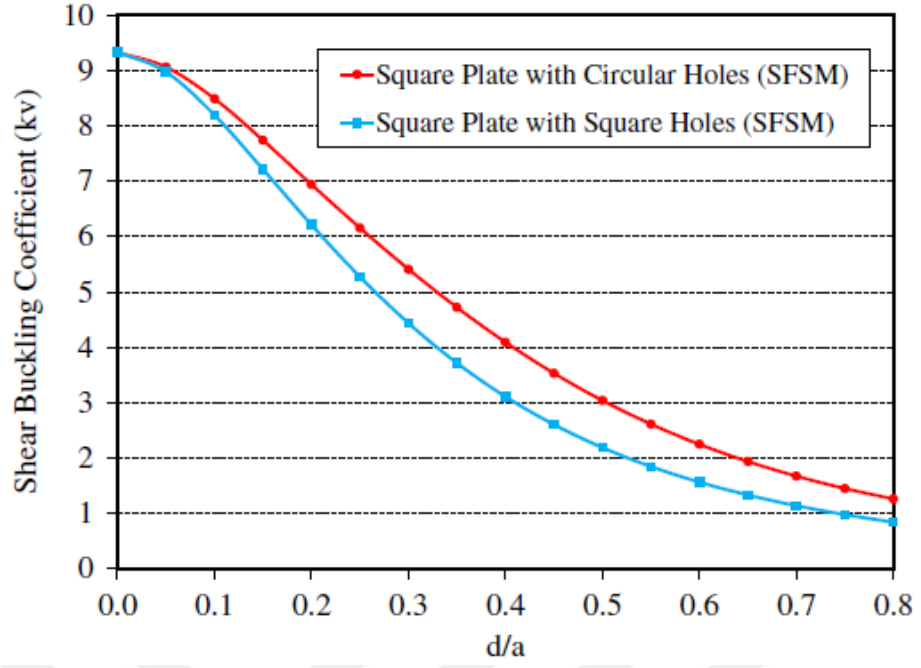
Şekil 1.3 : a) Farklı geometrik parametrelere sahip dairesel delikli model için burkulma eğrileri (b) kare delikli model için burkulma eğrileri (Pasinli, 2013)

Şekil 1.3'de Pasinli(2013) yaptığı kare ve dairesel delik için yürüttüğü karşılaştırma sunulmuştur. Şekildeki eğrilerde P_{cr}/P_{cr}^* delikli ve deliksiz yapı için kritik burkulma yükü oranını temsil etmektedir. 8 tabakalı toplam 1.5 mm kalınlığında kompozit kiriş için analiz yürütmüştür. Referans aldığı diğer geometrik parametreler aynı görselde belirtilmiştir. Şekil 1.3'te gözlemleneceği üzere her çap oranı ve delik pozisyonu için dairesel deliğin kare deliğe oranla kritik burkulma yükü değeri kaybı daha az olmuştur.

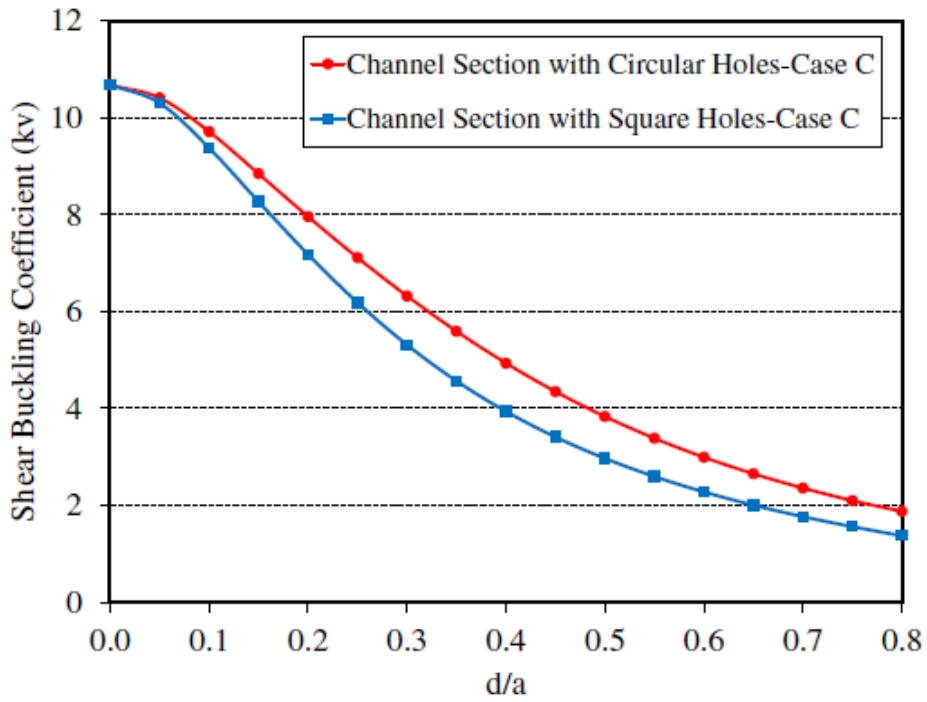
Pham(2017), ince cidarlı kiriş yapılarının; sıvı, elektrik ve ısı sistemleri gereği genellikle delikli olarak üretildiğini bildirmektedir. C kiriş ve plakalarda açılan farklı boyutlardaki kare ve daire deliklerin kayma burkulma davranışını incelemiştir. Çalışmasında Spline Finite Strip Method (SFSM) ile yürütmüş ve aynı zamanda ABAQUS SE programı ile karşılaştırmıştır. Şekil 1.4'de plaka üzerine ve C kiriş üzerine açılan delik tiplerinin karşılaştırması sunulmuştur.

Pham(2017)'ın makalesindeki amacı, kare ve dairesel deliğe sahip plakalar ve C kesitli kirişler için yaklaşık bir kayma burkulma faktörü denklemi oluşturmaktır. Oluşturduğu denklemlerle, kullanıcının geometrik parametreleri girerek kayma burkulma faktörünü hesaplanmasını amaçlamıştır. Yaklaşımlarından bir tanesi olan dairesel deliğe sahip kare plaka için çap oranına bağlı kayma burkulma faktörü denklemi Eşitlik 1.1'de sunulmuştur. Eşitlikte d delik çapını, a plaka genişliğini, k_0 plaka genişlik yükseklik denklemini ($k_0 = 5.34 + 4/(a/b)^2$), k_v ise kayma burkulma faktörünü temsil etmektedir.

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{a} \leq 0.2 &\rightarrow k_v = k_0 \left[1 - 0.5 \left(\frac{d}{a} \right) - 4.2 \left(\frac{d}{a} \right)^2 \right] \\
 0.2 < \frac{d}{a} < 0.6 &\rightarrow k_v = k_0 \left[1.15 - 2.3 \left(\frac{d}{a} \right) + 1.3 \left(\frac{d}{a} \right)^2 \right] \\
 \frac{d}{a} \geq 0.6 &\rightarrow k_v = k_0 \left[0.6 - 0.6 \left(\frac{d}{a} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{1.1}$$



(a)



(b)

Şekil 1.4 : a) Plakalarda delik oranlarına bağlı, (b) C kesitli kirişlerde delik oranlarına bağlı kayma burkulma faktörü eğrileri (Pham,2017)

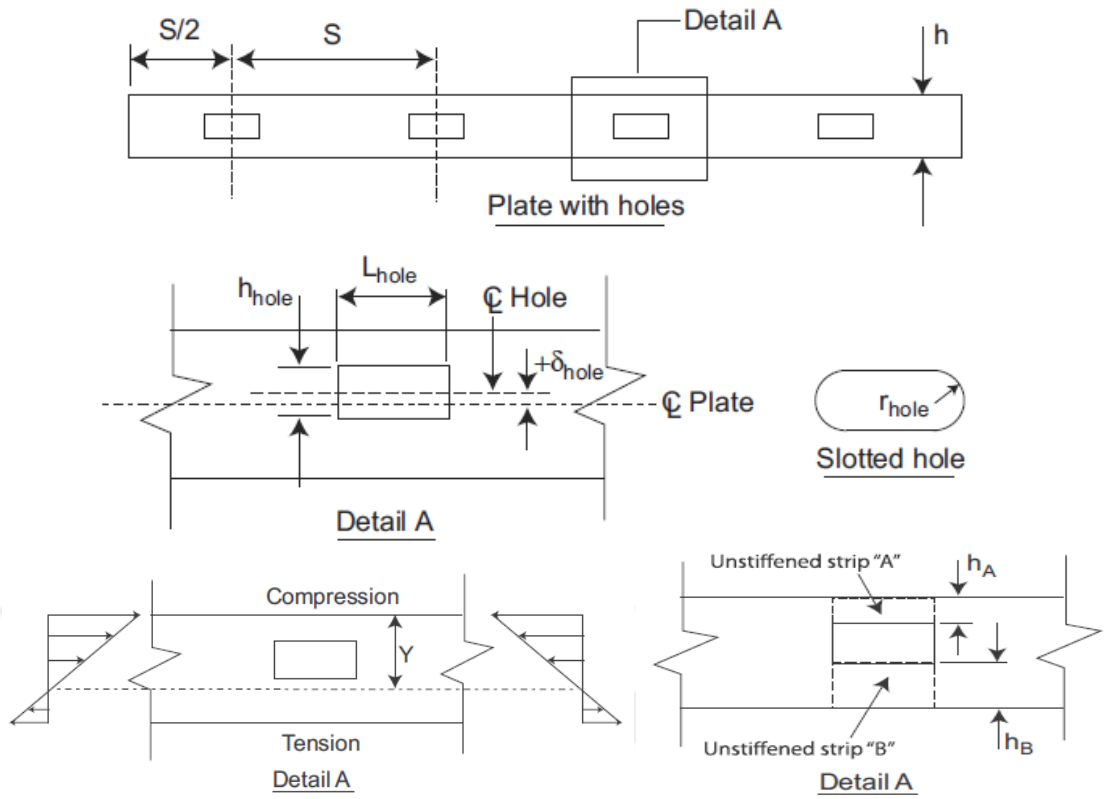
Scheperboer et al.(2016) sonlu elemanlar metodu ile basma kuvveti altında alüminyum ve çelik plakalar için lokal burkulma çalışması yürütmüşlerdir. Bu iki malzemedeki plakaların üzerine birden yirmi beşe kadar delikler açılarak modeller

hazırlanmışlardır. Çalışmalarının sonucu olarak; toplamda aynı alana sahip, merkezde açılan tek deliğin çoklu delikten daha dayanıklı olduğunu savunmuşlardır.

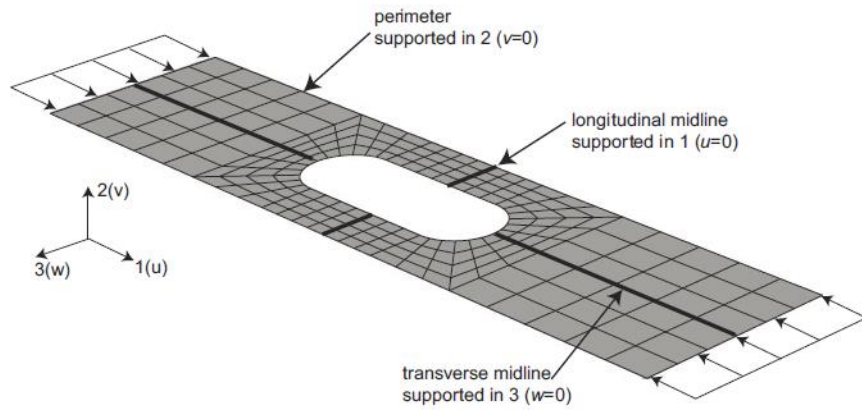
Moen and Schafer(2009) bir veya birden fazla deliğin eğilme veya basma kuvvetleri altında elastik burkulma analizi üzerinde etkisini inceleyen bir yaklaşım sunmaya çalışmışlardır. Çalışmalarını 4 tarafı ve 3 tarafı basit destekli plakalar için yürütmüşler ve ticari uygulamalar olan sonlu elamanlar programlarına alternatif oluşturmayı hedeflemişlerdir. Parametrik yaklaşımlarını, ABAQUS SE modellemesi ile doğrulamışlardır. SE modellemesinde delik sayısı, aralığı ve boyutunu değiştirmek için her defasında geometrik model oluşturmak gerekirken, Moen and Schafer(2009)'in doğrulanmış denklemleri mühendislere bu konuda kolaylık sunmaktadır. Makalelerinde kullanılan geometrik parametreler ve doğrulama işlemindeki SE modelleri Şekil 1.5'de sunulmuştur.

Şekil 1.5b ve c'de verilen SE modellemesi, yüksek lisans tezimde saf yüklemeler bölümünde referans olarak kullanılmıştır. Çalışmalarının sonucunda farklı yüklemeler için yaklaşımlar oluşturmuşlardır. Bunlardan basit destekli delikli yapılarda eğilme yükü altında kritik burkulma hesabı Eşitlik 1.2'de verilmiştir. Eşitlikte ψ çekme-basma gerilme oranını, "A" güçlendirmesiz bölgeyi, k burkulma faktörünü, f_{cr} burkulma gerilmesini temsil etmektedir.

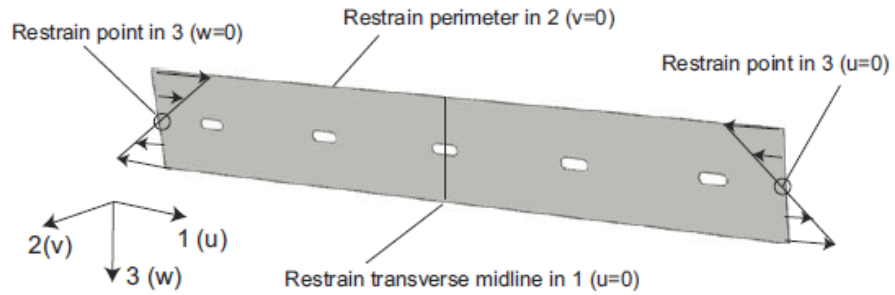
$$f_{crA} = k_A \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{h_A} \right)^2,$$
$$k_A = \frac{0.578}{\psi_A + 0.34} + \frac{2.70 - 1.76\psi_A}{0.024\psi_A + 0.35 + (L_{hole} / h_A)^2}, \quad (1.2)$$
$$\psi_A = \frac{Y - h_A}{Y}$$



(a)



(b)



(c)

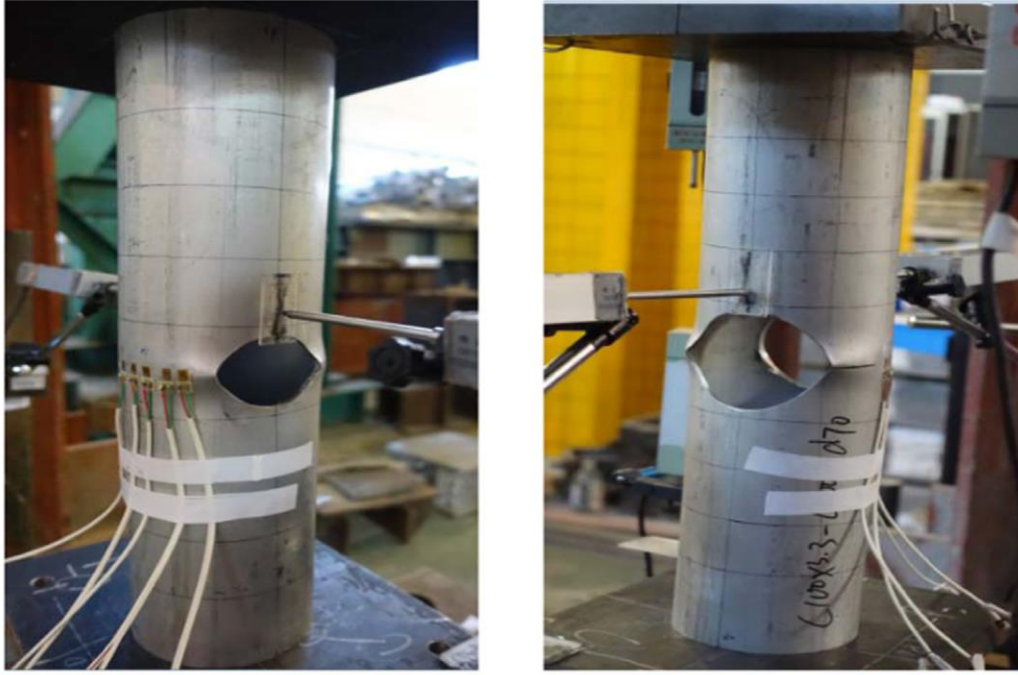
Şekil 1.5 : (a) Geometrik parametreler, (b) basma yükünde sınır şartı, (c) eğilme yükü için sınır şartı (Moen,2009)

Ueno and Redwood(1978) makalelerinde, dairesel ve dikdörtgen deliğin çelik kiriş yapısı üzerinde analitik ve deneysel olarak burkulma açısından etkisini incelemişlerdir. Burkulma analizlerini enerji metodu üzerine kurarak, gerilim dağılmasını baz alıp bir sonlu elemanlar yaklaşımı yapmışlardır. Bu SE metotları ile deney sonuçlarını karşılaştırmışlar ve oldukça yakın bir sonuç ortaya çıktığını savunmuşlardır. Bu çalışma ile kayma ve eğilme yükü altında farklı uzunluktaki plakalar için bir metot geliştirmeyi amaçlamışlardır.

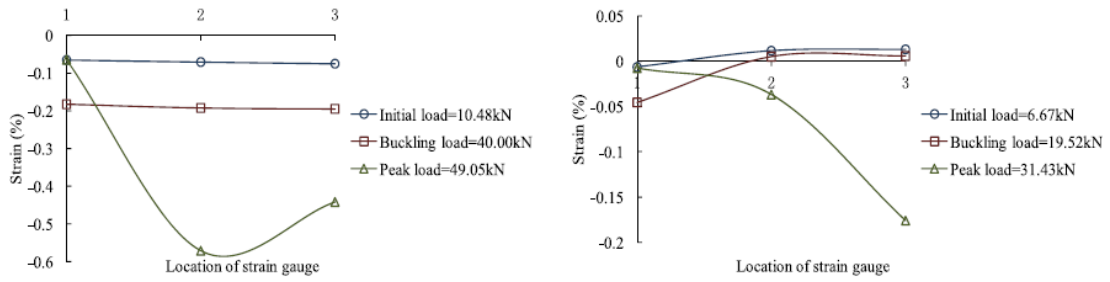
Erdal et al.(2011), delik çapı, delikler arası boşluk ve delik sayısına bağlı olarak farklı etkenler için optimum bir kiriş tasarımına yoğunlaşmışlardır. Çalışmaları esnasında gerekli dizayn kısıtlarını sağlarken aynı zamanda minimum yapı ağırlığını hedeflemişlerdir. Dünya genelinde kabul görmüş araştırma algoritmaları olan Harmonik Tekniği (HS) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) metotlarını kullanarak standart kiriş geometrileri için ideal delik-kiriş ağırlığı hesabı yapmışlardır.

Feng et al.(2016) makalelerinde dairesel delikler açılmış alüminyum kolon yapısı için basma kuvveti altında burkulma test çalışması yürütmüşlerdir. Açılan delik boyutu ve sayısının mukavemet üzerinde etkisini gözlemlemişlerdir. Çalışmaları için ekstrüzyon metodu ile üretilen 27 test düzeneği kullanılmıştır. İlerleyen akademik çalışmalarında, test üzerine de yoğunlaşmayı hedeflediğimden bu makalede yer alan gerinim ölçer (strain gage) yapıştırma, test düzeneği kurma ve uygulanan yüke bağlı gerinim davranışı yorumlama (Şekil 1.6) tecrübelerinden faydalanabilirim.

Tsavdaridis and D'Mello(2011) makalelerini delikli yapılar için burkulma davranışının test ortamında gözlemlenmesi üzerine kurmuşlardır. Farklı delik tipleri (dairesele, filetli dairesele ve eliptik) ve delikler arası mesafeye göre testler yapmışlardır. Şekil 1.7'de çalışmada kullanılan kayma yüklemesi altında test düzeneği ve test sonucu burkulmaya maruz kalmış bir test numunesini görmekteyiz.



(a)



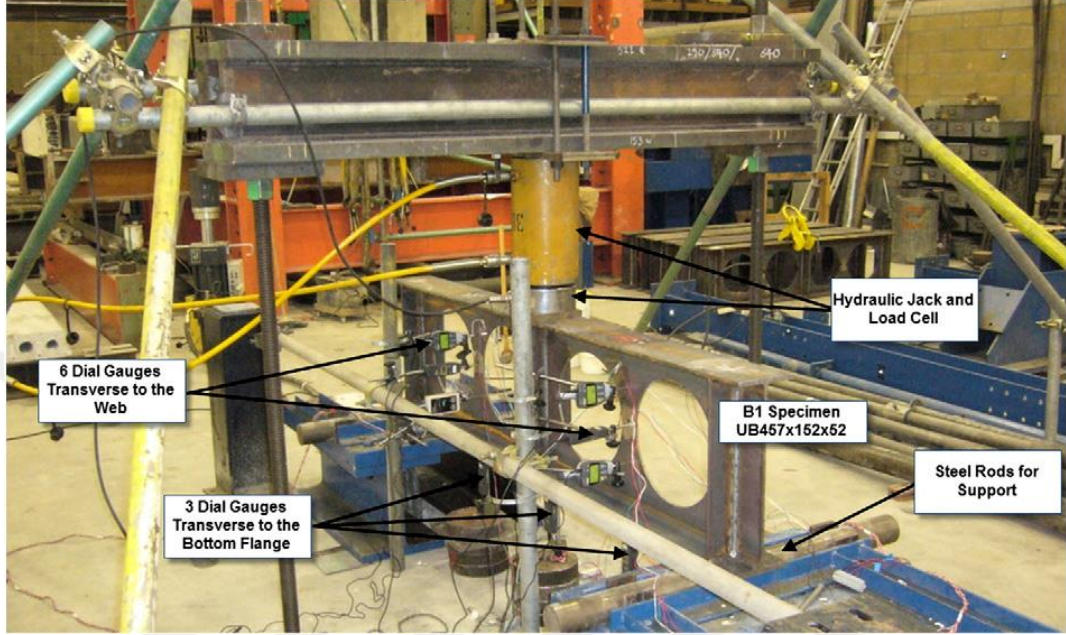
(b)

Şekil 1.6 : Test düzeneği ve gerinim dataları (a) basma testi düzeneği, (b) uygulanan yüke bağlı gerinim davranış eğrileri (Feng,2016)

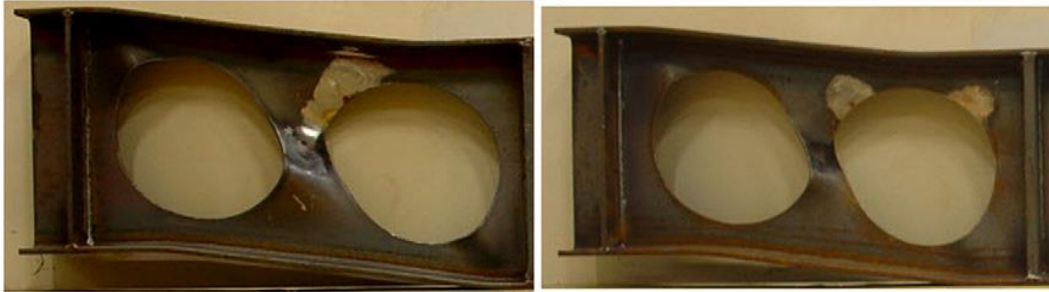
Panedpojaman et al.(2014) çalışmalarında Tsavdaridis and D'Mello(2011) benzer şekilde delikli kirişlerin burkulma analizi konusunu ele almışlardır. Çalışmalarını ticari bir SE programı olan ANSYS ile yürütmüşler ve öncesinde bu programı test sonuçları ile karşılaştırarak doğrulama işlemi yürütmüşlerdir. Şekil 1.8'de karşılaştırma sırasında kullandıkları geometrik modellemeler sunulmuştur.

Şekil 1.8b'de çelik malzeme kullanılarak oluşturdukları kiriş modellerinde, I. tasarım NB1 ve NB2 (aynı tasarımın delikler arası mesafesi farklı), II. tasarım NB3 ve III. tasarım NB4 test numunesi olarak ele almışlardır Panedpojaman et al.(2014), Çizelge

1.1 ve Şekil 1.8'a'da bu dört kiriş modelinin geometrik parametreleri sunulmuştur. Panedpojaman et al.(2014) ve Tsavdaridis and D'Mello(2011) çalışmaları doğrulama işleminde referans alınacaktır.



(a)

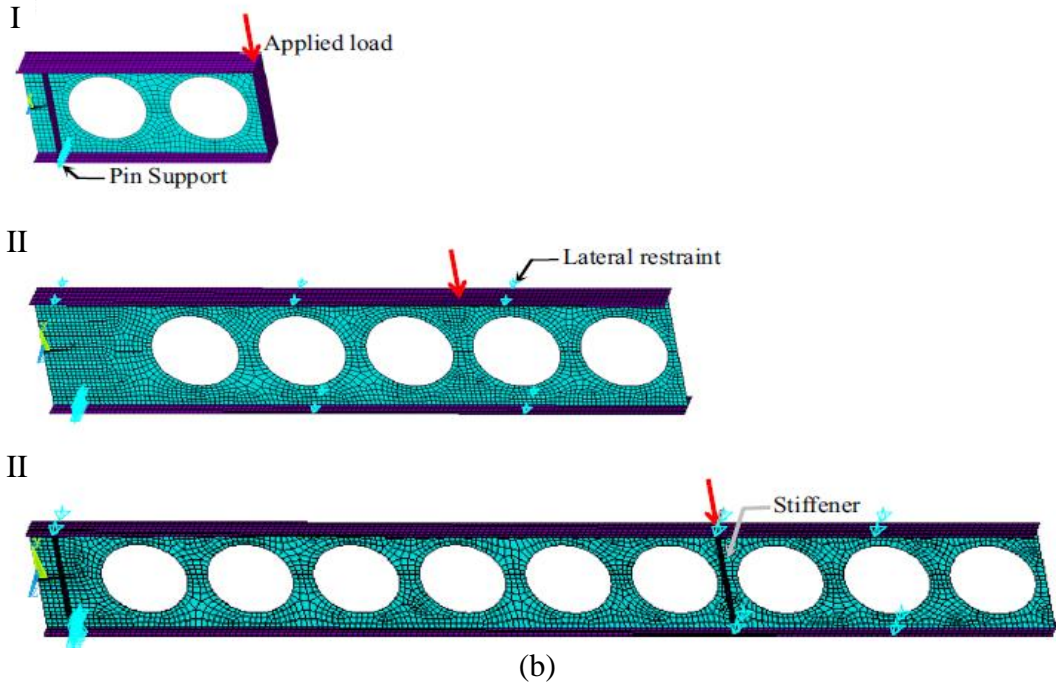
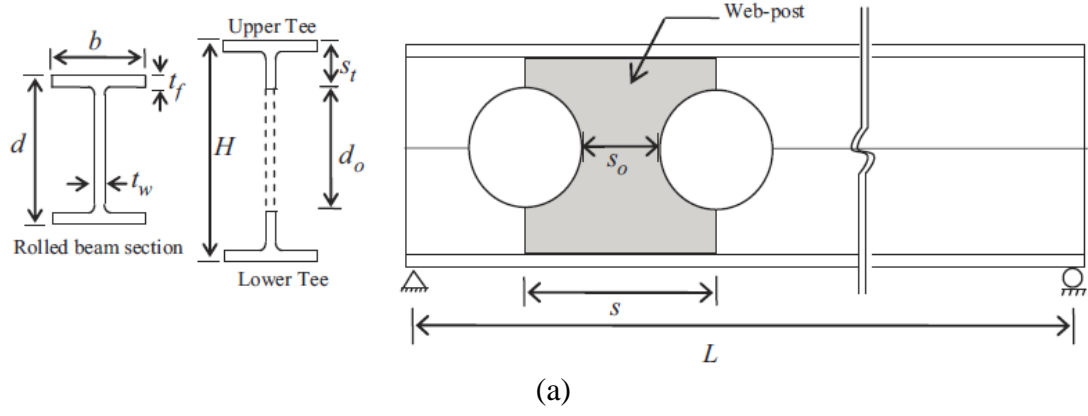


(b)

Şekil 1.7 : Doğrulama işleminde kullanılan test çalışması (a) test düzeneği, (b) test numunesi (Tsavdaridis and D'Mello,2011)

Çizelge 1.1 : SEA ve test datalarının karşılaştırmasında kullanılan numunelerin geometri (Panedpojaman et al.,2014)

Numune Kodu	Kiriş Kesiti	H (mm)	d ₀ (mm)	s (mm)	L (mm)
NB1	UB457x152x52	449.8	315	410	1700
NB2	UB457x152x52	449.8	315	378	1700
NB3	UB406x140x39	581	375	461	5250
NB4	UB305x102x25	463	325	400	7400



Şekil 1.8 : Doğrulama işleminde kullanılan SE modeli (a) kiriş geometri parametreleri, (b) 3 farklı kiriş SE modeli (Panedpojaman et al.,2014)

1.2.2 Burkulmaya karşı yapıyı güçlendirme

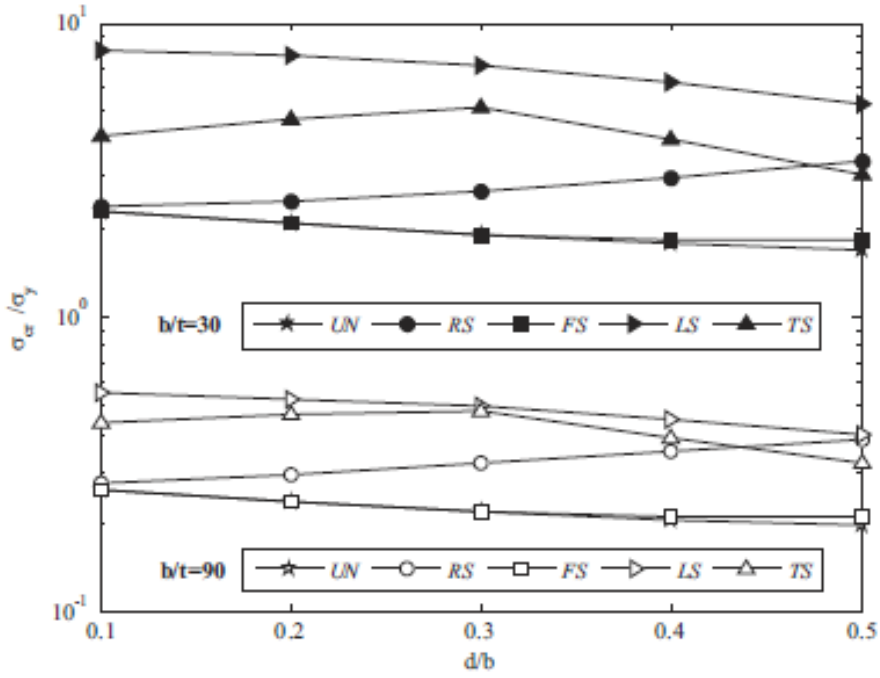
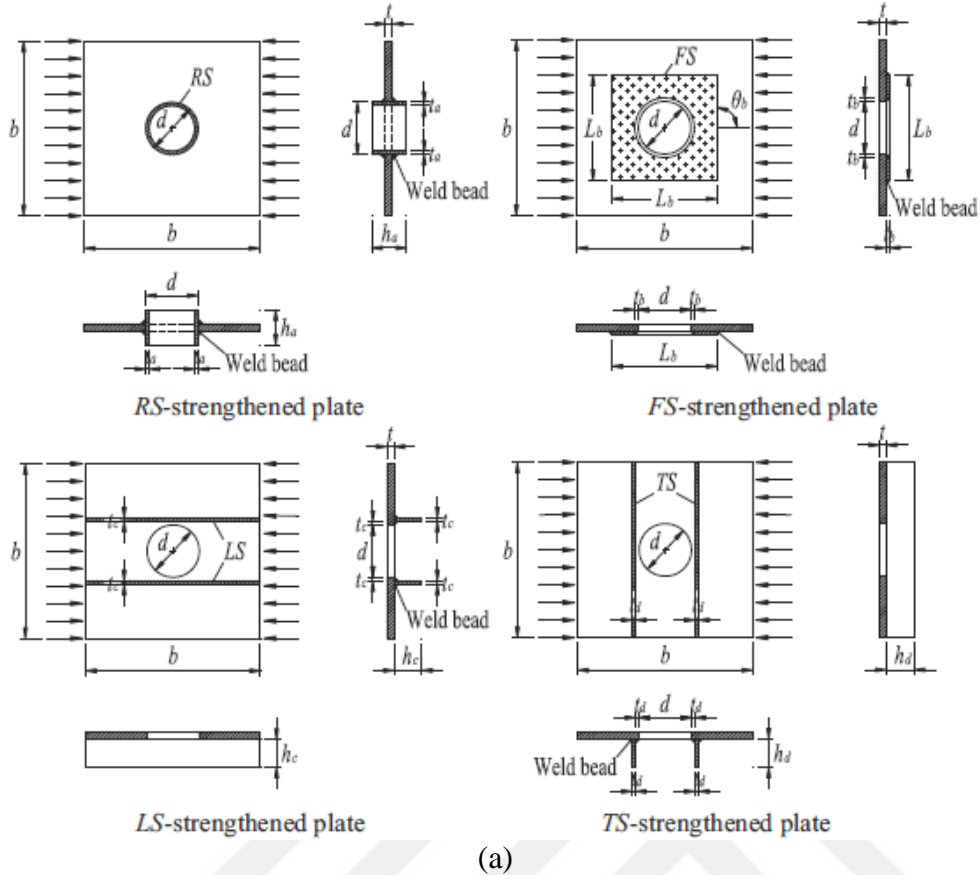
Bu bölümde delik açılarak zayıflayan yapılarda uygulanan güçlendirme metotlarından ve literatürde geçen analiz çalışmalarından bahsedilecektir.

Cheng and Zhao(2010) makelelerinde, basma kuvveti altında çelik plakalarda açılan hafifletme deliğinin güçlendirilmesi konusunu ele almışlardır. Kare plakanın merkezine açılan dairesel delik için uygulanan dört farklı güçlendirme metodunun burkulma üzerindeki etkisini incelemiştirler. Yüzük (*RS*), yüzeysel (*FS*),

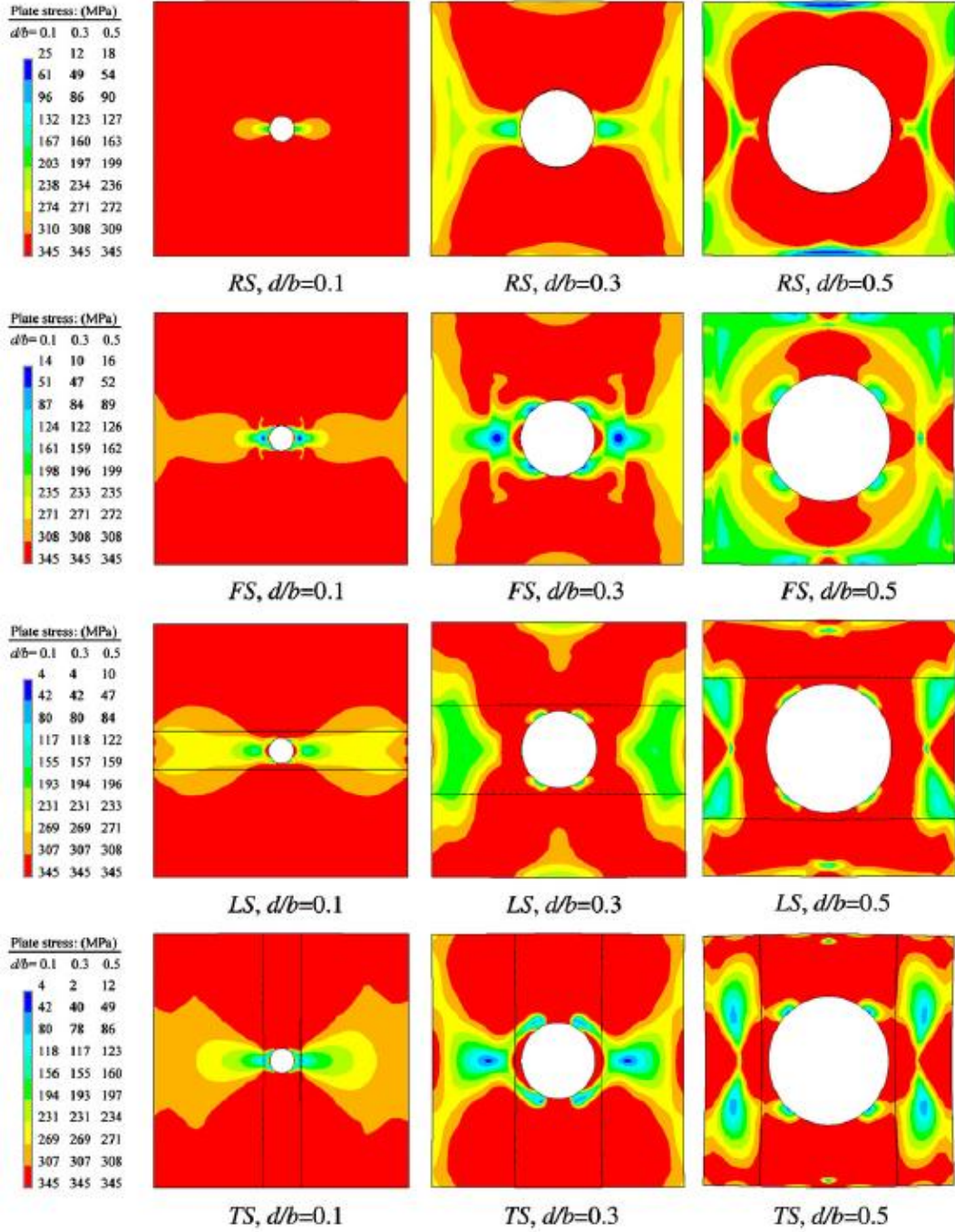
yanlamasına (*LS*) ve uzunlamasına (*TS*) olarak adlandırılan güçlendirme tipleri modellenmiş (Şekil 1.9a) ve bu tasarımları sonlu elemanlar metodu ile burkulma analizleri yapılarak karşılaştırmışlardır (Şekil 1.9b).

Şekil 1.10'da Cheng and Zhao(2010) tarafından yürütülen 3 farklı delik çapı oranına bağlı 4 çeşit güçlendirme tipi için basma kuvveti altında SE programından elde edilen Von Mises gerilme dağılımı gösterilmiştir. Karşılaştırma sonucunda yanlamasına (*LS*) ve uzunlamasına (*TS*) güçlendirme tipinin en avantajlı olduğu savunmuşlardır. Bunun nedeni olarak da bu güçlendirme tiplerinin basma kuvveti eksenini doğrultusunda olduğundan yüklemeyi taşımaya daha faydalı olmasını belirtmişlerdir.

Eiblmeier and Loughan(1997) makalelerinde kare kompozit plaka üzerinde açılan delik çapının ve delik etrafı güçlendirme genişliğinin basma veya saf kayma yüklemesi altında burkulma açısından etkisini ele almışlardır. Çalışmalarını test yaparak doğruladıkları MSC/NASTRAN SE programı ile yürütmüşlerdir. Yürütülen çalışma sonucunda elde edilen eğriler sayesinde optimum delik etrafı güçlendirme genişliğinin gözlemlenebileceğini belirtmişlerdir. Bu eğrilerin yanı sıra yazarlar açılan delik çapına ve delik güçlendirme genişliğine bağlı olarak yapının hacimsel değişimini gözlemlemişlerdir. Bu sayede ağırlık artışı olmadan burkulma açısından optimum mukavemet nasıl sağlanır onu göstermeyi amaçlamışlardır. Yüksek lisans tezinde, saf yüklemeler altında optimum giriş dizaynı bölümünde benzer bir yaklaşıma başvurulmuştur.



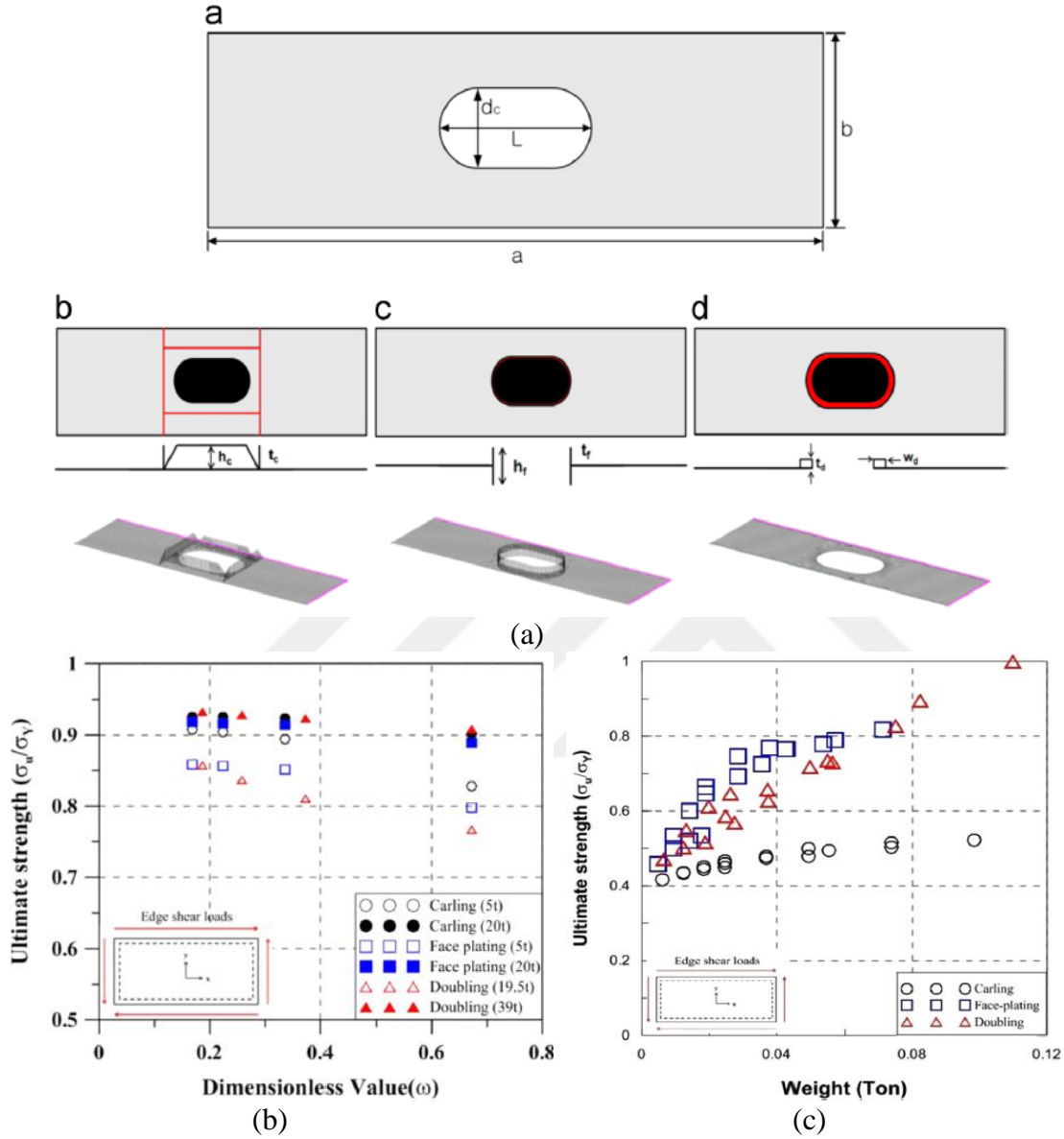
Şekil 1.9 : (a) 4 farklı güçlendirme tiplerinin geometrik modellenmesi, (b) güçlendirme tiplerinin kritik burkulma gerilmesi karşılaştırma eğrisi (Cheng and Zhao,2010)



Şekil 1.10 : Farklı delik çaplarında güçlendirmelerin SE analizleri (Cheng and Zhao,2010)

Boru geçişi ve ağırlık hafifletmesi gibi gereksinimlerden ötürü tıpkı havacılık, otomotiv ve inşaat alanlarında olduğu gibi gemi yapılarında da delik açma işlemi uygulanmaktadır (Kim et al., 2015). Kim et al.(2015) makalelerinde delik açılması ile burkulma ve mukavemeti açısından zayıflayan yapılara üç tip güçlendirme metodu uygulanmışlardır. ABAQUS SE programında yatay basma, dikey basma ve kayma yüklemeleri altında 144 model ile çalışma yürütülmüştür. Yapı ağırlığı ile

kopma mukavemeti değerleri karşılaştırılarak optimum gclendirme metodu belirlenmesini hedeflemişlerdir. Şekil 1.11'de sunulan eğrilere bakıldığında carling tipi gclendirmenin optimum gclendirme tipi olduğu savunulmuştur.



Şekil 1.11 : (a) 3 tip gclendirme geometrisi, kopma mukavemetinin geometrik parametreye (b) ve ağırlığa (c) bağlı eğrisi (Kim et al., 2015).

1.2.3 Ülkemizde yürütülmüş burkulma alanındaki alışmalar

Literatür taraması bölümünde, son olarak ülkemizde burkulma alanında yürütülen çalışmalardan ve yayımlanan yüksek lisans tezlerinden bahsedilecektir.

Ozturk(2015) yüksek lisans tezinde ince cidarlı silindirik kompozit yapılar için burkulma davranışının incelenmesine değinmiştir. Yanal basıncı altında; kompozit

fiber açıları, tabaka sayısı ve cidar kalınlığına bağı burkulma etkisini incelemiştir. MATLAB programı ile analitik çözümleme yapmış ve ABAQUS programı ile sonlu elemanlar çalışmasını karşılaştırmıştır. Tezin önemli bir bölümünde kompozit yapıların teorik ve analitik incelemesine yer vermiştir. Daha sonra detaylı bir şekilde MATLAB ve ABAQUS'de yürüttüğü çalışmaların detaylı modellenmesine değinip, farklı parametreler için kritik burkulma gerilmesi çıktısı üzerinden karşılaştırmasını yapmıştır. Sonuç kısmında yapılan çalışmanın, ince cidarlı kompozit silindirik yapılarda tabaka açılarının optimizasyonu konusunda kullanılabileceği belirtmiştir.

Sencan(2015) yüksek lisans tezinde, kompozit plaklarda delaminasyonun ve süreksizliklerin yeri ve şeklinin titreşim ve burkulma açısından etkisini incelemiştir. Bu etkilerin gözlemlenmesi için 35 adet numune hazırlanmış ve doğal frekansları deneysel olarak belirlemiştir. Delaminasyonların ve süreksizliklerin şekli, sayısı ve konumunun tabakalı kompozit plakaların serbest titreşim cevabı ve burkulma yüküne etkisi ANSYS programında sayısal olarak incelemiştir. Deneysel ve sayısal sonuçların uyumlu olduğu göstermek için sonlu elemanlar analizi yürütmüştür. Modelleme ve analizlerde ANSYS modülü olan APDL (ANSYS Parametric Design Language) kullanılarak bir bilgisayar kodu geliştirmiştir. Sonuç kısmında ise farklı geometriler için deneysel ve analitik olarak yürütülen çalışmaların titreşim ve burkulma açısından yorumlanması yapılmıştır.

Basoglu(2015) farklı sınır koşullarında tabakalı kompozit plakların kritik burkulma yükü açısından incelenmesi üzerine bir yüksek lisans tezi kaleme almıştır. ANSYS sonlu elemanlar paket programı ile tabakalanma, plaka üzerindeki delik tipi ve kenar formu olmak üzere üç farklı koşulun kombinasyonunu modellemiştir. Oluşturulan modeller üzerinden, lineer kritik burkulma yükü açısından analizler yürütmüştür. Elde edilen değerler irdelenerek sonuç kısmında değerlendirilmiş ve açılan deliğin varlığı ve tabakalamanın burkulmaya etkisinin kenar formu ve delik tipine oranla etkisinin daha fazla olduğundan bahsedilmiştir.

Akay(2015) yüksek lisans tezinde; kiriş destekli kompozit ince cidarlı bir hava aracı yapısının, kesme ve eksenel basma yükü altındaki burkulma öncesi ve sonrası

davranışlarını incelemiştir. Modelleme ve analiz çalışmalarını, literatürde yer alan test sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanan ANSYS sonlu elemanlar programı ile yürütmüştür. Farklı panel modellerinde uygulanan basma ve kayma yükleme oranının (P_x / P_y) kritik burkulma yükü değeri değişimi üzerindeki etkisini göstermiştir. Sonuç çıktısı olarak; eksenel basma yükünün yanında kesme yüküne de maruz kalan plakalarda, yapının tabaka dizim açıları gibi özelliklerine bağlı olarak, kesme yükünün yapının eksenel basma yükü kabiliyetine etkisi olduğunu göstermeyi hedeflemiştir.

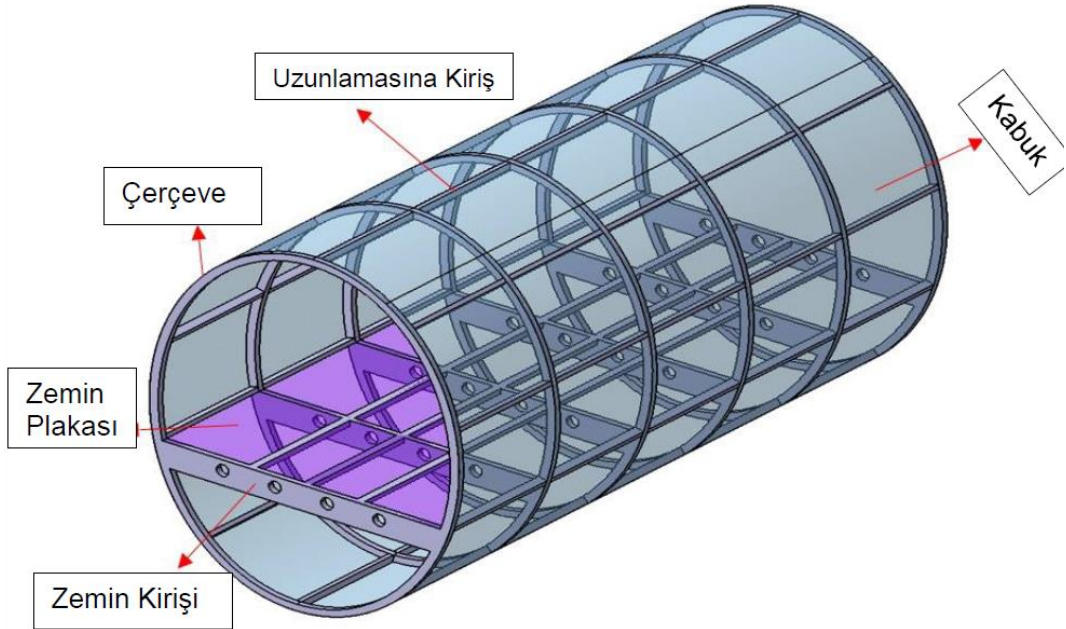


2. KIRIŞ GEOMETRİSİ VE MALZEME SEÇİMİ

Bu bölümde tez sürecinde kullanılacak geometrik parametrelerden ve malzeme seçiminden bahsedilecektir.

2.1 Kiriş Geometrisi

Uçak benzeri hava araçları iskeleti temelde 3 ana yapıdan oluşmaktadır. Bunlar: çerçeve (frame), uzunlamasına kirişler (longeron ve stringer) ve bu parçaları çevreleyen kabuk (skin) yapısıdır (Şekil 2.1). Giriş kısmında kısaca değinildiği üzere yolcu uçaklarında koltukların bağlandığı yolcuları taşıyan yere zemin plakası, bu plakayı taşıyan yapıya da zemin kirişi (floor beam) adı verilmektedir.



Şekil 2.1 : Yolcu uçakları için genel iskelet gövdesi

Şekil 1.1 ve Şekil 2.1'de gösterilen zemin kirişi örneğinde olduğu gibi uçak yapılarında tasarlanan bir çok kiriş elemanında çeşitli tasarım prensiplerinden ve ağırlık hafifletmesi gereksiniminden ötürü hafifletme deliği açma işlemi

yürütülmektedir. Bu işlem sonucu zayıflayan yapılar, üretim metoduna göre iki farklı yöntemle güçlendirmek mümkündür. Eğer kiriş saç bükme yöntemi ile üretiliyor ise delik kısmı dışa doğru bükülerek; eğer talaşlı imalat yöntemi (CNC) ile üretilmekte ise delik etrafında belirli genişlik ve yükseklikte güçlendirme yapısı bırakılarak kuvvetlendirme yoluna gidilmektedir. Birçok havacılık uygulamalarında ikinci yöntem tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, geometri olarak CNC metodu ile üretilen dairesel hafifletme deliğine sahip I-tipi zemin kirişi kullanılmıştır. Üç farklı parametrede toplamda 28 farklı model hazırlanmıştır. Parametrik değişkenlerin aralığı şu şekildedir:

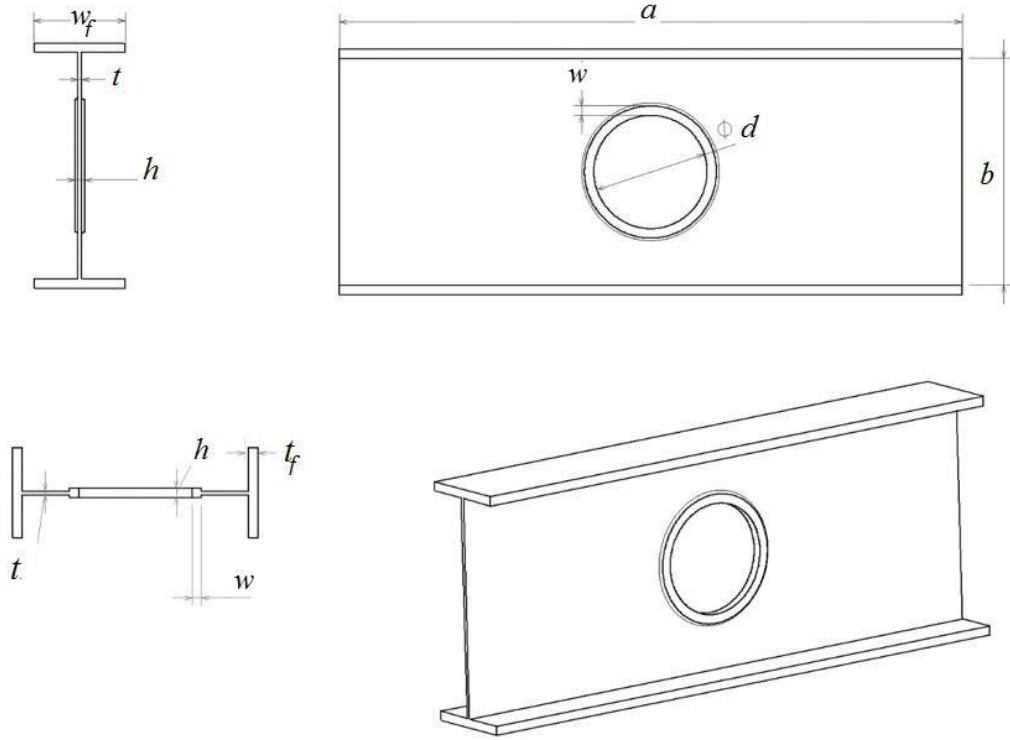
- i) Kiriş gövdesi genişlik - yükseklik oranı (aspect ratio) $a/b, 1.5 \leq a/b \leq 7.0$
- ii) Güçlendirme yüksekliği kiriş gövdesi (web) kalınlığı oranı $h/t, 1.5 \leq h/t \leq 4.5$
- iii) Güçlendirme genişliği delik çapı oranı $w/d, 0.033 \leq w/d \leq 0.150$

Bu parametre aralıklarında artış basamakları a/b , h/t ve w/d oranları için sırası ile 0.5, 0.5 ve 0.0167'dir. Parametrik çalışma yürütülürken başlangıçta kiriş geometrisinde belirli uzunlukların sabit alınması gerekmektedir. Web kalınlığı, t , flanş kalınlığı, t_f , flanş genişliği, w_f , delik çapı, d , ve web yüksekliği, b sırası ile 2, 5, 48, 60 ve 120 mm olarak sabit alınmıştır. Web uzunluğu, a , ise 330 mm olarak referans alınmıştır. Şekil 2.2'de tasarlanan I-tipi kiriş geometrisi ve çalışmada kullanılacak parametreler (w , h , a , b , t , t_f ve w_f) gösterilmiştir.

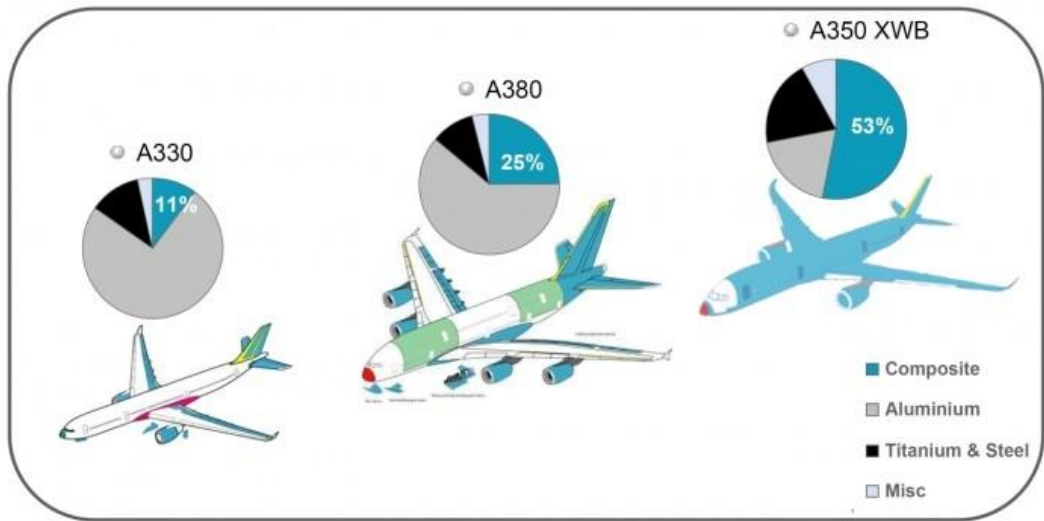
2.2 Malzeme Özellikleri

Havacılıkta üretim esnasında malzeme seçiminde; dizayn mukavemeti, yorulma karakteristiği, korozyon toleransı, malzeme yoğunluğu ve işlenebilirlik gibi önemli faktörler göz önüne alınmaktadır (Yurdakul,2002). Bu etkenler ışığında iskelet yapısında alüminyum alaşımlar, çelik, titanyum ve kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Genel olarak kritik bağlantı parçalarında ve motor bölümünde çelik ve

titanyum; dış kabuk ve kanatlarda olabildiğince kompozit ve kiriş-çerçeve yapılarında ise çoğunlukla alüminyum alaşımlar kullanılmaktadır. Şekil 2.3'de üç Airbus yolcu uçak modeline ait malzeme seçimi ve uçak üzerinde dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 2.2 : Kiriş geometrisi ve parametreleri



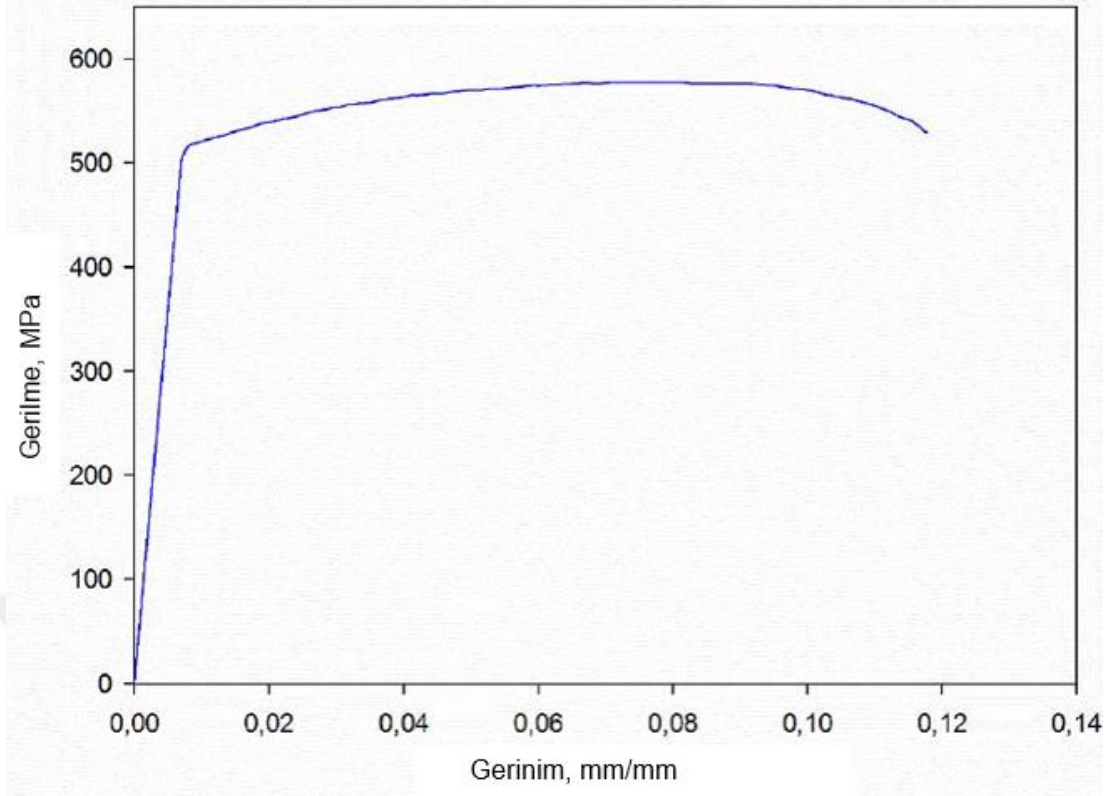
Şekil 2.3 : Yolcu uçaklarında kullanılan malzeme seçenekleri ve dağılımı (Airbus A330, A380, A350 XWB (Escobar,2014))

Kiriş yapılarında maruz kalacağı yük değeri ve bu bölümün başında belirtilen mukavemet gibi etkenlere bağlı olarak alüminyum alaşımın türü belirlenmektedir. Yolcu veya savaş uçaklarında kritik kiriş yapılarında 7000 serisi alüminyum alaşım tercih edilmektedir (Smith,2003). Bu çalışmada zemin kirişine yüklenecek yükler düşünülerek ve referanslarda yer aldığı şekilde 7075 T651 alüminyum alaşımı seçilmiştir. Analizlerde gerekli olan malzeme özellikleri Çizelge 2.1'de sunulmuştur. Malzeme bilgisi kaynağı olarak Military Handbook (1972) kullanılmıştır.

Çizelge 2.1 : Alüminyum 7075 T651 malzeme özellikleri (Military Handbook,1972)

ρ , Yoğunluk [g/mm^3]	2.81×10^{-9}
E , Esneklik Modülü [MPa]	71700
E_s , Kayma Modülü [MPa]	26900
F_{ty} , Akma Gerilmesi [MPa]	502
F_{tu} , Kopma Gerilmesi [MPa]	572
F_{su} , Kayma altında Kopma Gerilmesi [MPa]	331
ν , Poisson Oranı	0.33

Burkulma davranışının, malzemenin elastik mi plastik mi bölgesinde gerçekleşeceğini tam öngöremediğimiz için burkulma analizlerinde doğru sonuç alınabilmesi adına malzemenin plastik kısmındaki davranışı önem arz etmektedir. Military Handbook (1972)'de yer alan gerilme-gerinim (stress-strain) eğrisinden (Şekil 2.4) hem elastik hem plastik gerinme değerleri elde edilmiştir. SE modelinde non-linear malzeme özellikleri modülüne plastik gerinme değerleri (Çizelge Ek.2) girdisi eklenerek malzeme açısından elasto-plastik bir analiz yürütülmüştür.



Şekil 2.4 : Alüminyum 7075 T651 için gerilme-gerinim eğrisi (Military Handbook,1972)



3. SONLU ELEMANLAR MODELLEMESİ VE DOĞRULANMASI

Tez çalışmasında burkulma analizleri modellemek için ticari bir uygulama olan ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Bu program, analizlerde kullanılmadan önce literatürde yer alan test sonuçları, başka bir SE programı ile yürütülen çalışma ile ve analitik el hesabı ile karşılaştırarak doğrulama işlemi yürütülmüştür. Doğrulama işlemlerinden önce ABAQUS sonlu elemanlar modellemesi prensibi ve kullanımı adım adım anlatılacaktır. Bu bölüm, sonlu elemanlar modellemesi, literatür ve analitik hesap alt başlıkları halinde sunulacaktır.

3.1 Sonlu Elemanlar Modellemesi

SE modellemesi bölümüne, 5 alt başlıkta değinilecektir. Bunlar: SE programı sonlu elemanlar metodu ile burkulma analizi prensibi, SE programında geometri, malzeme, kesit (kalınlık) ve montaj tanıtımı, her saf yükleme ve birleşik yükleme koşulları için sınır şartları ve yükleme koşulu, çözüm ağı çalışması (mesh), eleman tipi, boyut ve optimizasyonu ve son olarak da özdeğer (eigenvalue) burkulma hesabı yorumlanmasıdır.

3.1.1 ABAQUS burkulma analizi prensibi

Bu bölümde, Simulia(2007) ABAQUS kullanıcı el kitabı "6.2.3 Eigenvalue buckling prediction" alt başlığında değinilen burkulma analizi sırasında programın kullanmış olduğu sonlu elemanlar metodu analitik formülleri ve yaklaşımları sunulmuştur.

Özdeğer burkulma problemlerinde, model rijitlik matrisinin tekil (singular) hale geldiği yükleri ararız, bu nedenle problem açık olmayan (nontrivial) çözümlere sahiptir.

$$K^{MN} \cdot v^M = 0 \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1'de K^{MN} yükleme uygulandığı andaki tanjant rijitlik matrisini, v^M ise açık olmayan yer değiştirme çözümlerini temsil etmektedir. Burada uygulanan yükleme basınç, tekil yük ve/veya termal yükten oluşabilir.

Özdeğer burkulma, genellikle katı (stiff) yapıların kritik burkulma yüklerini tahmin etmek için kullanılır. Katı yapılar, tasarım yüklerini eğilmeden ziyade aksel veya düzlem içi şeklinde taşırlar. Yükleme karşı davranışları genellikle burkulma başlamadan önce çok az deformasyon içerir. Katı yapı aniden eğildiği ve çok daha düşük bir sertlik sergilediği zaman Euler kirişi gibi davranır. Euler kiriş teorisinde, yapı kritik bir yük ulaşana kadar basma aksel yüküne oldukça katı bir davranış sergiler. Bununla birlikte, bir yapının çökmeye başlamadan önceki tepkisi doğrusal olmasa bile; genel bir özdeğer burkulma analizi yaklaşımı, burkulma modu şekilleri için tahminler sağlayabilir.

Burkulma yükleri, yapının temel durumuna göre hesaplanır. Özdeğer burkulma davranışı bir analizinin ilk basamağı ise, başlangıç koşulları temel durumu oluşturur; aksi halde, temel durum son genel analiz aşamasının sonunda modelin geçerli halidir. Böylece, temel durum önyüklemeleri, P^N içerebilir. Özdeğer burkulma problemlerinde, önyükleme genellikle sıfırdır.

i) Özdeğer problemi

Artımlı yükleme paterni, Q^N özdeğer burkulma tahmin adımı olarak tanımlanmıştır. Bu yüklemenin büyüklüğü önemli olmayıp özdeğer probleminde bulunan yük çarpanları, λ_i ile ölçeklendirilir.

$$(K_0^{NM} + \lambda_i K_{\Delta}^{NM}) v_i^M = 0 \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2'de;

K_0^{NM} : (varsa) önyüklemelerin, P^N etkilerini içeren temel duruma karşılık gelen rijitlik matrisini;

K_{Δ}^{NM} : diferansiyel başlangıç gerilimini ve artımsal yükleme paterni, Q^N nedeniyle oluşan yük katılık matrisini;

λ_i : özdeğerleri;

v_i^M : Burkulma modu şekillerini (özvektörler);

M ve N : Tüm modelin M ve N serbestlik derecelerini ve i : i 'inci burkulma modunu temsil etmektedir.

ABAQUS sadece simetrik matrisler için öz değerler ve özvektörler çıkarabilir; Bu nedenle K_0^{NM} ve K_{Δ}^{NM} simetrik olmalıdır. Kritik burkulma yükü artık $P^N + \lambda_i Q^N$ olarak ifade edilir. Normalde, λ_i 'nin en düşük değeri ile ilgilenmekteyiz. P^N ve Q^N farklı yüklemeler olabilir. Örneğin, P^N sıcaklık değişimi sonrası oluşan ısıl yük olabilirken Q^N basınç uygulaması sonucu oluşan bir yükleme olabilir.

Burkulma modu şekilleri, v_i^M normalize edilmiş vektörlerdir ve kritik yükteki deformasyonun gerçek büyüklüklerini temsil etmez. Maksimum yer değiştirme bileşeni 1.0 olacak şekilde normalize edilmiştir. Tüm yer değiştirme bileşenleri sıfırsa, maksimum dönüş bileşenleri 1.0'a normalize edilir. Yapının olası arıza modunu öngördükleri için, bu burkulma modu şekilleri özdeğer analizinin çoğu zaman en faydalı sonucudur.

Simulia(2007) ABAQUS kullanıcı el kitabındaki bilgilerin daha rahat kavranabilmesi için Cook et al.(2007) kitabında ve Wallin(2014) tez çalışmasında yer alan çalışmalar da aktarılacaktır.

Genel bir burkulma probleminin temeli statik bir doğrusal analizdir ve denge Eşitlik 3.3'de gibi ifade edilebilir. Eşitlikte $[K]$ katılık matrisini, $\{D\}$ yer değiştirmeyi ve $\{R\}_{ref}$ ise yapı üzerindeki yükü temsil etmektedir. Yer değiştirme biliniyorsa, $\{R\}_{ref}$ yüklemesi için $[K_{\sigma}]_{ref}$ gerilme matrisi bulunabilir. $[K_{\sigma}]_{ref}$ ile $\{R\}_{ref}$ birbirine orantılıdır. Aralarındaki artış oranı λ sabiti ile tanımlanabilir. $\{\delta D\}$ burkulma yer değiştirme adımını temsil etmektedir (Eşitlik 3.5).

$$[K]D = \{R\}_{ref} \quad (3.3)$$

$$([K] + \lambda_{crit}[K_{\sigma}]_{ref})\{D\}_{ref} = \lambda_{crit}\{R\}_{ref} \quad (3.4)$$

$$([K] + \lambda_{crit}[K_{\sigma}]_{ref})(\{D\}_{ref} + \{\delta D\}) = \lambda_{crit}\{R\}_{ref} \quad (3.5)$$

Burkulmada olduğu gibi, uygulanan yükte bir değişiklik yapılmaksızın bir yer değiştirmenin mümkün olduğu noktayı bifürkasyon noktası olarak adlandırılmaktadır. Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5 arasındaki fark, Eşitlik 3.6 özdeğer problemi eşitliğini verir. Buradaki en küçük kök, λ_{crit} bir çatallaşmanın bulunduğu en küçük yükü tanımlar, Eşitlik 3.7.

$$([K] + \lambda[K_{\sigma}]_{ref})\{\delta D\} = \{0\} \quad (3.6)$$

$$\{R\}_{crit} = \lambda_{crit}\{R\}_{ref} \quad (3.7)$$

Özdeğer probleminin çözümleri bağımsızdır; bu da Eşitlik 3.6'nın Eşitlik 3.8 gibi yazılabileceği anlamına gelir. Bununla birlikte, birçok SE programı, özdeğer problemleri için gömülü çözümler içerir, bu nedenle son adım her zaman gerekli değildir.

$$\det([K] + \lambda[K_{\sigma}]_{ref}) = 0 \quad (3.8)$$

Bir burkulma probleminde, hesaplanan özdeğer, λ_{crit} her zaman bir burkulma modu olarak adlandırılan özvektöre, $\{\delta D\}$ bağlanır. Bu burkulma modu, burkulma oluştuktan sonra yapının görünümünü temsil eder. Bununla birlikte, doğrusal bir burkulma probleminde; $\{\delta D\}$ değerinin büyüklüğü belirlenmediği için, burkulma modunun genliği halen bilinmemektedir.

Doğrusal bir burkulma probleminin teorik çözümünde, mükemmel geometri varsayımı yapıldığı için gerçek kritik yük hesaplanan kritik yükten daha düşük olacaktır. Dolayısıyla doğrusal bir burkulma hesabı, belirli bir geometri için burkulma yükünün üst sınırını verir.

ii) 2D elemanlar için Katılık Matrisi

Genel katılık matrisi $[K]$ yer değiştirme ile uygulanan yükleme arasındaki bağlantıyı verir. Genel olarak gerinim yer değiştirme integrali matrisi, $[B]$ ve elastik katılık matrisi $[E]$ ile tanımlanır. $[k^e]$ eleman katılık matrisidir ve sadece bir elemandaki katılığı ifade eder (bkz. Eşitlik 3.9). Tüm elemanların eleman katılık matrisini bir araya getirdiğimizde, genel katılık matrisi elde edilir.

$$[k^e] = \int [B]^T [E] [B] dV \quad (3.9)$$

$[E]$ matrisi, $[E']$ matrisinin koordinat dönüşümü, $[E] = [T]^T [E'] [T]$ (buradaki $[T]$ dönüşüm matrisidir) ile elde edilir. Tüm elemanlar aynı düzlemde tanımlı ise $[E] = [E']$. Eşitlik 3.10'da izotropik 2D elemanlar için $[E']$ matrisi sunulmuştur.

Eşitlikte $E' = E / (1 - \nu^2)$, $G = E / 2(1 + \nu)$, $G' = 5G / 6$, E elastik modülünü, ν Poisson oranını ifade etmektedir. 5/6 faktörü kalınlık yönündeki kayma gerinimi değişimini göstermektedir (Cook,2007). 2D eleman kullandığımız için matristeki üçüncü kolon ve sıra sıfırdır.

$$[E'] = \begin{bmatrix} E' & \nu E' & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu E' & E' & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G' \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.11'de verildiği üzere; $[B]$ matrisi bir elemana için gerinim, $\{\epsilon\}$ ve yer değiştirme, $\{d\}$ arasındaki ilişkiyi verir. 2D elemanlarda her düğüm noktasında üç yer değiştirme iki dönüşüm olmak üzere beş serbestlik derecesi vardır. Eşitlikte

$\{d\} = \{u_i \ v_i \ w_i \ \alpha_i \ \beta_i\}^T$, $\{\epsilon\} = \{\epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}\}^T$ ve i elemandaki düğüm noktası numaralarını ifade etmektedir.

$$\{\epsilon\} = [B]\{d\} \quad (3.11)$$

Gerinim ayrıca global, x, y, z (Eşitlik 3.12) ve lokal, ξ, η, ζ (Eşitlik 3.13-3.14) koordinat sistemine göre türev alınarak da ifade edilebilir. Yer değiştirilmenin x, y, z 'ye göre türevi $\{\delta\}$; ξ, η, ζ 'e göre ise $\{\delta\}_{\xi, \eta, \zeta}$ olarak gösterilir. İki türev arasındaki bağlantı, $\{\delta\} = [\tilde{J}^{-1}]\{\delta\}_{\xi, \eta, \zeta}$ şeklindedir.

$$\{\epsilon\} = [H]\{u_{,x} \ u_{,y} \ u_{,z} \ v_{,x} \ v_{,y} \ v_{,z} \ w_{,x} \ w_{,y} \ w_{,z}\}^T \quad (3.12)$$

$$\{\epsilon\} = [H][\tilde{J}^{-1}]\{u_{,\xi} \ u_{,\eta} \ u_{,\zeta} \ v_{,\xi} \ v_{,\eta} \ v_{,\zeta} \ w_{,\xi} \ w_{,\eta} \ w_{,\zeta}\}^T \quad (3.13)$$

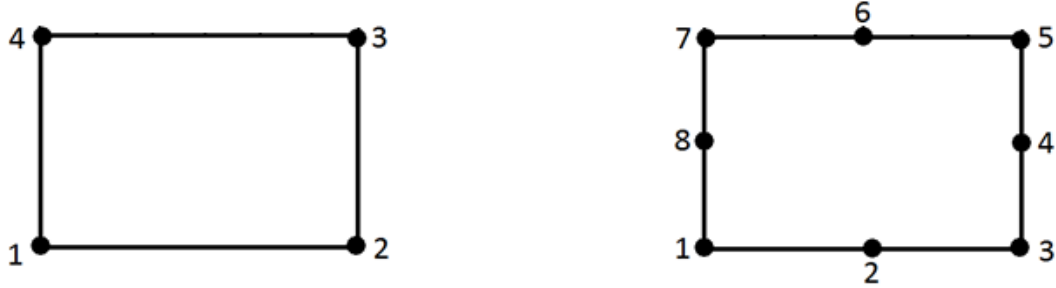
$$\{\delta\} = [\tilde{J}^{-1}]\{u_{,\xi} \ u_{,\eta} \ u_{,\zeta} \ v_{,\xi} \ v_{,\eta} \ v_{,\zeta} \ w_{,\xi} \ w_{,\eta} \ w_{,\zeta}\}^T \quad (3.14)$$

$[H]$ matrisi Eşitlik 3.15'de de görüldüğü üzere sadece 1 ve 0 ile tanımlanır. $[\tilde{J}^{-1}]$ Eşitlik 3.16'da tanımlanmıştır ($[J]^{-1}$ Jacobian matrisinin tersidir ve Eşitlik 3.17'de sunulmuştur). Eğer eleman deforme olmamışsa, Jacobian matrisi, $[J]$ eleman içerisinde sabittir. N_i , i numaralı düğüm noktası için şekil fonksiyonudur. Şekil fonksiyonları Çizelge 3.1'de tablolanmış ve 4 düğüm (Quad4) ve 8 düğüm noktalı (Quad8) elemanların düğüm noktası numaraları Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

$$[H] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$[\tilde{J}^{-1}] = \begin{bmatrix} [J]^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & [J]^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & [J]^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} x_{,\xi} & y_{,\xi} & z_{,\xi} \\ x_{,\eta} & y_{,\eta} & z_{,\eta} \\ x_{,\zeta} & y_{,\zeta} & z_{,\zeta} \end{bmatrix} = \sum \begin{bmatrix} N_{i,\xi} x_i & N_{i,\xi} y_i & N_{i,\xi} z_i \\ N_{i,\eta} x_i & N_{i,\eta} y_i & N_{i,\eta} z_i \\ N_{i,\zeta} x_i & N_{i,\zeta} y_i & N_{i,\zeta} z_i \end{bmatrix} \quad (3.17)$$



Şekil 3.1 : Quad4 ve Quad8 için düğüm noktaları numaralandırması

Çizelge 3.1 : Quad4 ve Quad8 elemanlar için şekil fonksiyonları

Quad4	Quad8
$N_1 = 1/4(1-\xi)(1-\eta)$	$N_2 = 1/2(1-\xi^2)(1-\eta)$
$N_2 = 1/4(1+\xi)(1-\eta)$	$N_4 = 1/2(1-\xi)(1+\eta^2)$
$N_3 = 1/4(1+\xi)(1+\eta)$	$N_6 = 1/2(1-\xi^2)(1+\eta)$
$N_4 = 1/4(1-\xi)(1+\eta)$	$N_8 = 1/2(1-\xi)(1-\eta^2)$
	$N_1 = 1/4(1-\xi)(1-\eta) - 1/2N_2 + N_8$
	$N_3 = 1/4(1+\xi)(1-\eta) - 1/2(N_2 + N_4)$
	$N_4 = 1/4(1+\xi)(1+\eta) - 1/2(N_4 + N_6)$
	$N_7 = 1/4(1-\xi)(1+\eta) - 1/2(N_6 + N_8)$

Son olarak $\{\delta\}_{\xi,\eta,\zeta}$ ve $\{d\}$ arası ilişki $\{\delta\}_{\xi,\eta,\zeta} = [W]\{d\}$ denklemi ile ifade edilir ([W] matrisi Eşitlik 3.18'de verilmiştir).

$$[W] = \sum \begin{bmatrix} N_{i,\xi} & 0 & 0 & -\zeta t_i N_{i,\xi} l_{2i} / 2 & \zeta t_i N_{i,\xi} l_{1i} / 2 \\ N_{i,\eta} & 0 & 0 & -\zeta t_i N_{i,\eta} l_{2i} / 2 & \zeta t_i N_{i,\eta} l_{1i} / 2 \\ 0 & 0 & 0 & -t_i N_i l_{2i} / 2 & t_i N_i l_{1i} / 2 \\ 0 & N_{i,\xi} & 0 & -\zeta t_i N_{i,\xi} m_{2i} / 2 & \zeta t_i N_{i,\xi} m_{2i} / 2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -t_i N_i n_{2i} / 2 & t_i N_i n_{1i} / 2 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Yer değiştirme matrisi, $[B]$; $[B] = [H][\tilde{J}^{-1}][W]$ eşitliği ile tahmin edilebilir böylelikle de katılık matrisi, $[K]$ hesaplanılabılır. Bu denklemden, katılık

matrisinin sadece yapının geometrisine bağlı olduğunu görmekteyiz. Bu nedenle, her analiz edilmiş geometri için her yükleme koşulunda değil sadece bir defa hesaplanacaktır.

iii) 2D elemanlar için Gerilme Katılık Matrisi

Gerilme katılık matrisi, $[K_\sigma]$ yükleme yapıldığında katılığın nasıl düştüğünü veya yükseldiği göstermektedir. Katılık matrisinden farklı olarak, gerilme katılık matrisi yapının hem geometrisine hem de gerilmesine bağlıdır.

İzotropik elemanlar için eleman gerilme katılık matrisinin, $[k_\sigma^e]$ gerilme matrisi $[S]$ ve $[G]$ matrisi cinsinden Eşitlik 3.19'da sunulmuştur. $[G]$ matrisi yer değiştirmenin x, y, z 'ye göre türevi ve yer değiştirme, $\{\delta\} = [G]\{d\}$ ile ilişkilidir ve $[G] = [\tilde{J}^{-1}][W]$ şeklinde tanımlanabilir (bkz. Eşitlik 3.13 – 3.14). Gerilme matrisi $[S]$ Eşitlik 3.20 – 3.21'de tanımlanmıştır (başlangıç gerilmeleri Eşitlik 3.22'den hesaplanmaktadır).

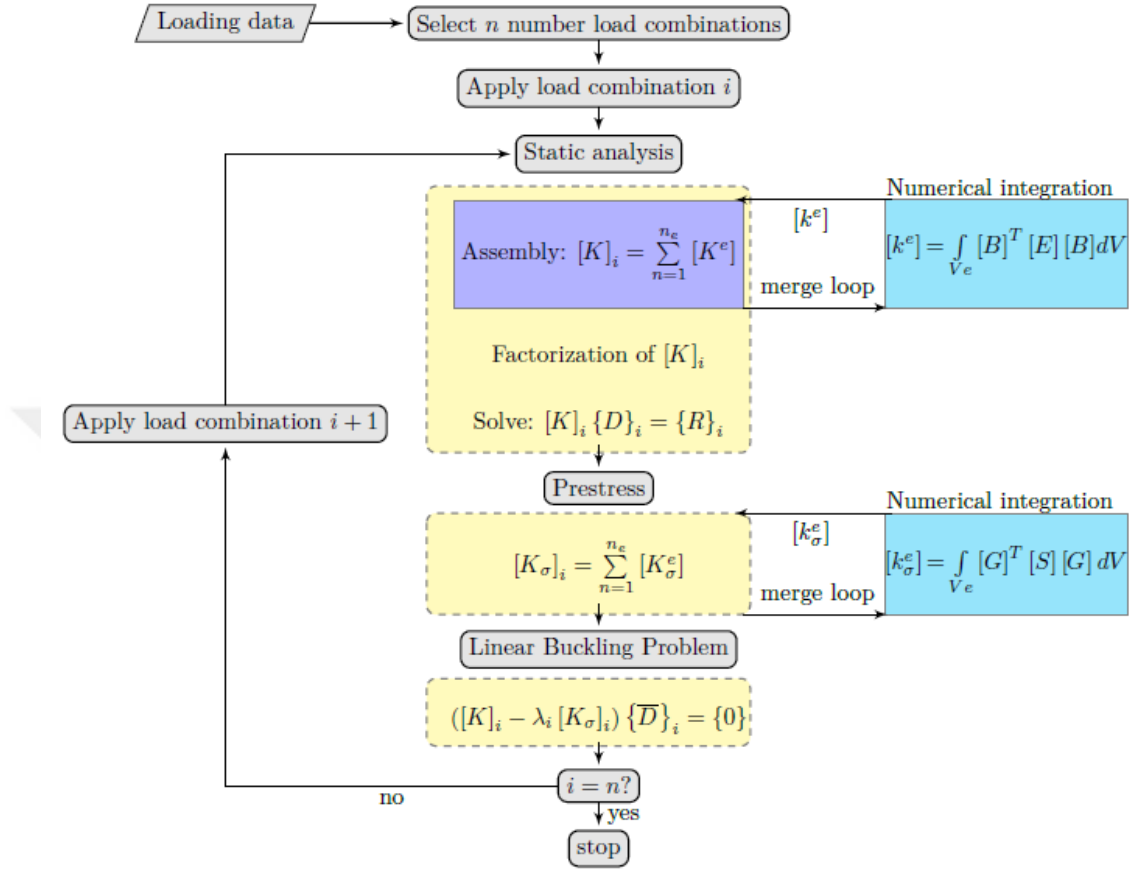
$$[k_\sigma^e] = \int [G]^T [S] [G] dV \quad (3.19)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} [s] & 0 & 0 \\ 0 & [s] & 0 \\ 0 & 0 & [s] \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$[s] = \begin{bmatrix} \sigma_{x0} & \tau_{xy0} & \tau_{xz0} \\ \tau_{xy0} & \sigma_{y0} & \tau_{yz0} \\ \tau_{xz0} & \tau_{yz0} & \sigma_{z0} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{x0} \\ \sigma_{y0} \\ \sigma_{z0} \\ \tau_{xy0} \\ \tau_{yz0} \\ \tau_{xz0} \end{Bmatrix} = [E][B]\{d\} \quad (3.22)$$

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yürütülen lineer standart bir burkulma analizi prosedürü, Frank(2012) tezinde akış şeması halinde verilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : Lineer burkulma analizi prosedürü akış şeması (Frank,2012)

3.1.2 ABAQUS SE modellemesi

Bölüm 2.1 Kiriş Geometrisi bölümünde bahsedildiği üzere 1 deliksiz, 7 farklı w/d oranı, 7 farklı h/t oranı ve 12 farklı a/b oranı olmak üzere toplam 27 farklı delikli plaka tasarımı yapılmıştır. SE analizinde daha hızlı çözüm alınabilmesi ve modelleme avantajı nedeni ile 2 boyutlu bir analiz yürütmek tercih edilmiştir. Bu nedenle ilk olarak ABAQUS geometri oluşturma biriminde (Parts modülü) Modelling Space olarak 3D, tip olarak deformable ve Base Feature olarak da Shell-Planar seçilerek geometri oluşturma birimine geçilmiştir. Ek.1'de hem bu girdinin görüntüsü hem de 2 boyutlu yüzeysel olarak tasarlanan geometri için örnek bir görüntü verilmiştir.

İkinci aşama SE programına malzeme tanıtılmasıdır. Bölüm 2.2 Malzeme Özellikleri bölümünde verilen elastik malzeme değerlerinden Esneklik Modülü ve Poisson Oranı ABAQUS Materials modülünde Mechanical -> Elasticity -> Elastic butonları takip edilerek izotropik malzeme olarak girilmiştir. Plastik yer değiştirme oranı değerleri ise Mechanical -> Plasticity -> Plastic modülüne girilerek eklenmiştir. Bu elasto-plastik malzeme girdisi işlemi görseli ve plastik gerilim-gerinim tablosu Ek.2'de sunulmuştur.

Sınır şartları girdisinden önceki son işlem ise kesit tanımlanıp atanması ve montaj işlemleridir. 2 boyutlu bir çalışma yürütüldüğünden ve geometri oluşturma birimde Shell-Planar modülü seçildiği için kesit bilgisi daha doğru bir ifade ile plaka kalınlık bilgisi şu şekilde girilecektir: ABAQUS Section modülünde kategori Shell, tip Homogeneous olarak seçilecektir. Gelen ekranda plaka kalınlık değeri (shell thickness value) plaka parçası için 2, Materials bölümünde ise tanımladığımız malzemeyi seçerek kalınlık bilgisi tanımlanmış olacaktır. Tanımlanan kesit bilgisi, kesit atama (Section Assignment) modülü ile tasarlanan geometriye tanıtılacaktır. Bu modülde Section bölümüne tanımlanan kesit, tanımlama (Definition) kısmına ise Middle surface seçeneği girilecektir. Bu sayede istenilen 2 boyutlu tasarım doğru bir şekilde modellenmiş olacaktır.

Ardından montaj (Assembly) modülüne girilerek malzemesi ve kesiti tanımlanmış plaka ve güçlendirme parçaları girilecektir. Bu iki parça Constraint -> Tie modülü ile birbirine bağlanmıştır. ABAQUS'de yürütülen bu işlemler Ek. 3'de görseller halinde verilmiştir.

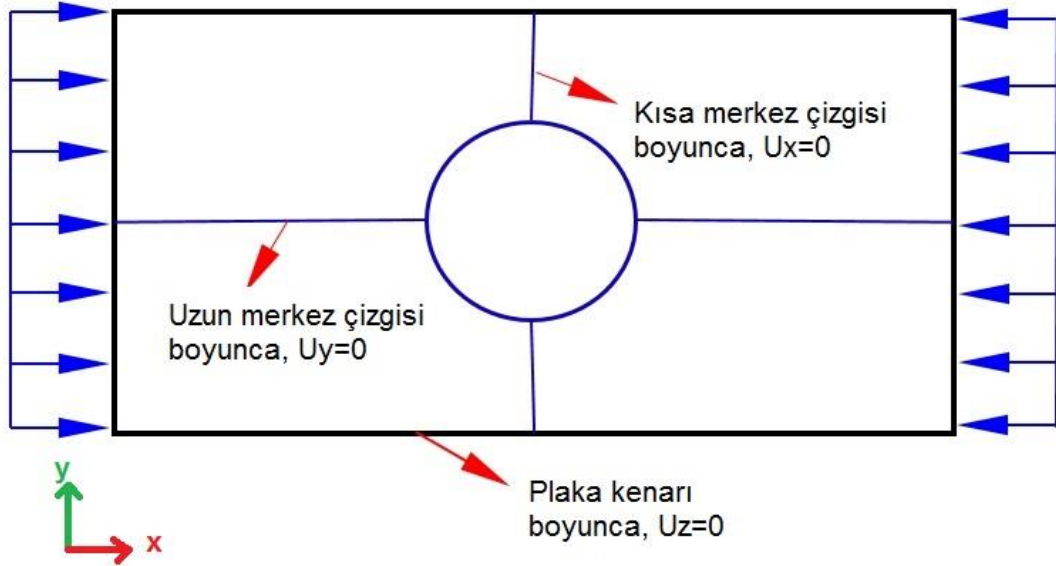
3.1.3 Sınır şartı ve yükleme koşulu

Analitik hesap kısmında sunulan flanş destek testi sonrası kiriş yapımızda flanşları atarak yapıyı dört tarafı basit destekli plaka modeli olarak düşünebileceğimiz belirtilmiştir. Bu nedenle ilk olarak saf basma, saf eğilme, saf kayma ve birleşik yükleme koşullarında SE modelleri 4 tarafından plaka düzlemine dik doğrultuda (z yönü) sabit tutulmuştur.

SE Modellemesi bölümünde, analiz çalışmasının 2 boyutlu olarak yürütüleceği belirtilmişti. O nedenle tüm durumla için yükleme şekli olarak ABAQUS Shell Edge Load modülü kullanılmıştır. Bu yükleme koşulunda yükün birimi [N/mm] cinsindedir. Diğer sınır şartı ve yükleme özellikleri her yükleme koşulu için ayrı ayrı sunulacaktır.

i) Saf Basma

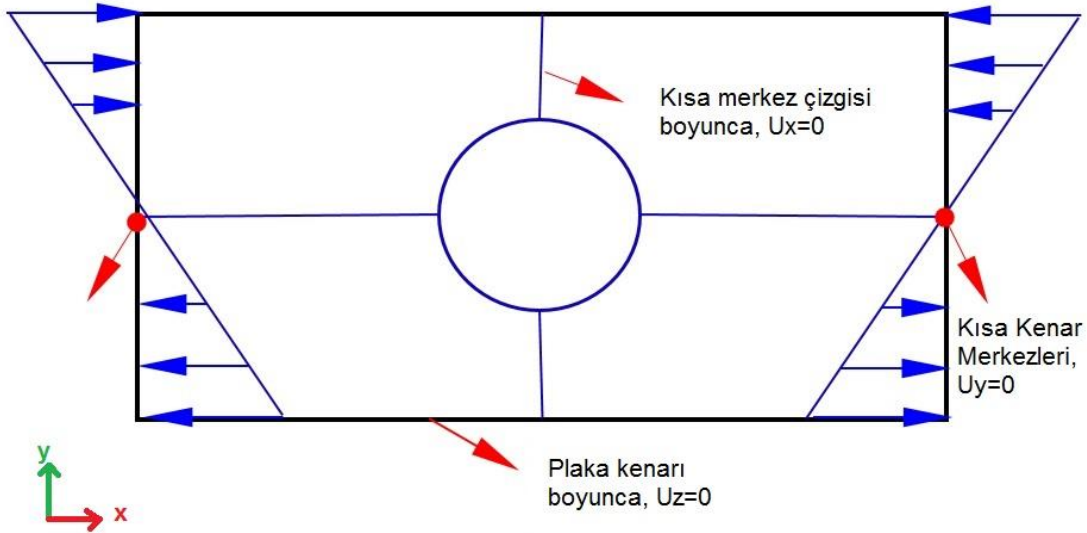
Saf basma kuvveti, plakanın kısa kenarından plakanın uzun eksenine paralel doğrultuda (x eksen yönünde) birim kalınlık yükü şeklinde uygulanmaktadır. Sınır şartı olarak da simetrik bir yükleme olduğundan merkez çizgileri tutulmuştur. Uzun merkez çizgisi yükleme doğrultusunda olduğundan x yönünde, kısa merkez çizgisi ise yüklemeye dik doğrultuda olduğundan y yönünde tutulmuştur. Sınır şartı çalışmasında Moen and Schafer(2009)'den esinlenilmiştir. Şekil 3.3'de saf basma yüklemesi için yükleme koşulu ve sınır şartı modellemesi sunulmuştur.



Şekil 3.3 : Saf basma yükü için sınır şartı ve yükleme koşulu modellemesi

ii) Saf Eğilme

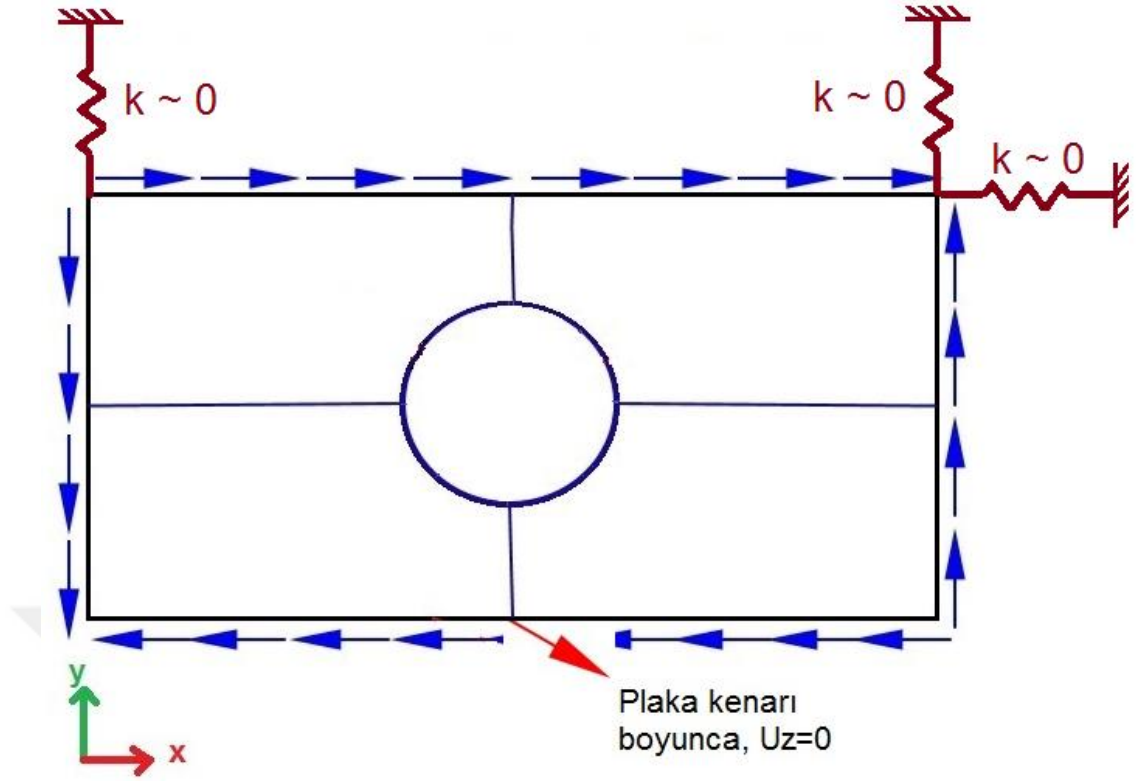
Saf eğilme yüklemesi, plaka kısa kenarında, kısa kenarın üst noktasında +1 birim alt köşesinde -1 olacak şekilde lineer bir fonksiyon olarak birim kenar yükü cinsinden uygulanmıştır. Tıpkı saf basma sınır şartında olduğu gibi eğilme yükleme koşulu içinde Moen and Schafer(2009) makalesi referans alınmıştır. Kısa merkez çizgisi yükleme koşulunda (x yönünde) tutulurken, kısa kenar merkezleri ise kuvvete dik y yönünde tutulmuştur. Sınır şartı ve yükleme koşulu Şekil 3.4'de sunulmuştur. Bu çalışma analitik hesaplarla doğrulanmıştır.



Şekil 3.4 : Saf eğilme yüklemesi için sınır şartı ve yükleme koşulu modellenmesi

iii) Saf Kayma

Saf kayma yüklemesi, plaka kenarı boyunca kayma doğrultusunda tıpkı diğer yüklemeler gibi birim kenar yükü cinsinden uygulanmıştır. Sınır şartı çalışmasında ise malzeme katılığına oranla çok düşük katılığa sahip (yaklaşık 0) yaylar kullanılarak sağlanmıştır. Şekil 3.5'de sağ üst köşedeki yaylar ile plakanın x ve y ekseninde tutulmuştur. Sol üst köşedeki yay ile birleşik düşünüldüğünde ise R_z dönüş ekseninin de tutulması sağlanmıştır.



Şekil 3.5 : Saf kayma yükleme altında sınır şartı ve yükleme koşulu modellenmesi

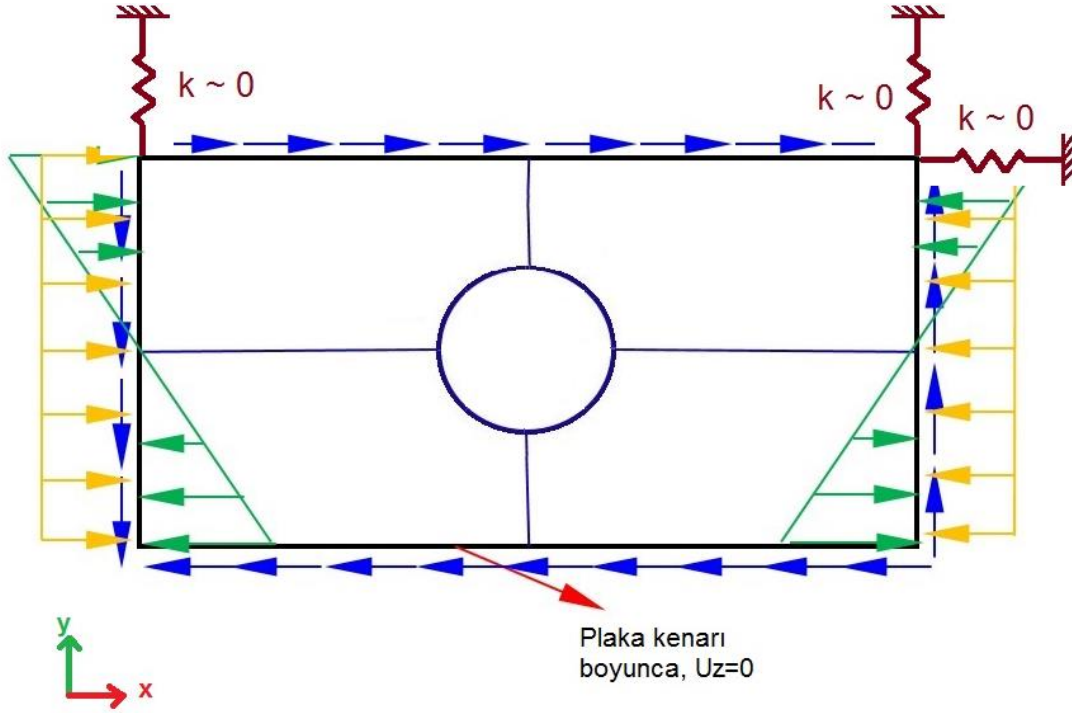
iv) Birleşik Yükleme

Birleşik yükleme koşulu, tüm saf yüklemelerin (saf basma, saf eğilme, saf kayma) aynı anda uygulandığı durumdur. Yüklemeler üç saf yükleme koşulunun birlikte uygulaması ile yapılır. Birleşik yükleme için sınır şartı ise saf kayma yüklemesi sınır şartı ile aynıdır. Benzer şekilde üst iki köşe küçük yay sabitlerine sahip yaylar ile tuturulmuştur. Birleşik yükleme için yükleme koşulu ve sınır şartı Şekil 3.6'da verilmiştir.

3.1.4 Çözüm ağı, eleman tipi ve boyut optimizasyonu

Sonlu elemanlar çalışması daha önce belirtildiği gibi 2 boyutlu elemanlar ile yürütülmüştür. Çözüm ağı aşamasında dikkat edilmesi gereken unsurlar gerçeğe yakın sonuç elde etmek ve sonucu çözdürürken makul sürede analizin sonlanmasıdır. Daha net sonuç alınması adına üçgen değil dikdörtgen elemanlar kullanılmış ve kullanılan elemanlarda 4 düğüm noktası yerine 8 düğüm noktası tercih edilmiştir

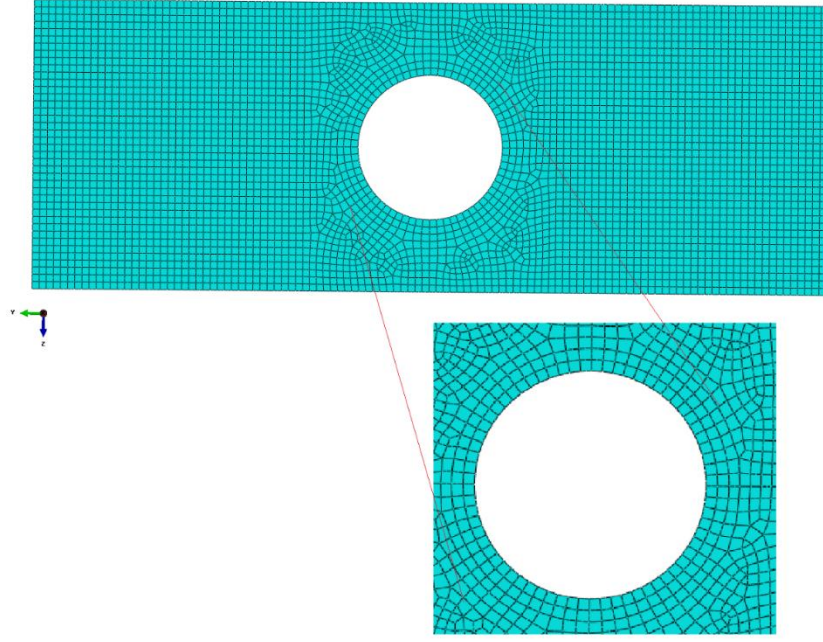
(Simulia,2014). ABAQUS'de 8 düğüm noktalı dikdörtgen elemanlar kullanmak için S4 veya S4R tipi elemanlar yerine S8R5 tipi elemanlar kullanılmıştır (çözüm ağı tipi belirlemesi Ek 4'de sunulmuştur). S8R5, çözüm matrisini küçülterek hızlı sonuç almak adına plakaya dik doğrultudaki dönüş hareketi (R_z) kaldırılarak her biri 5 serbestlik dereceli 8 düğüm noktasına sahip olan eleman tipidir.



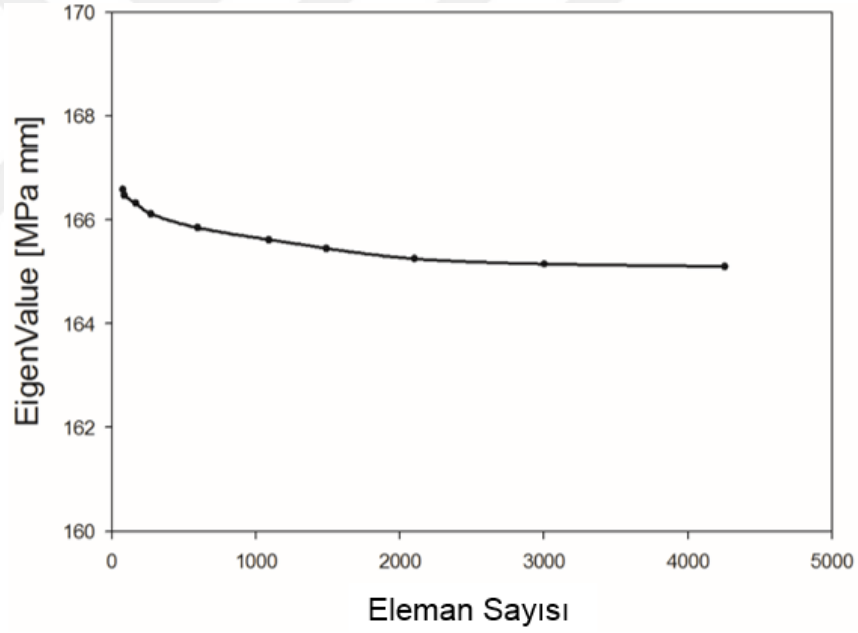
Şekil 3.6 : Birleşik yükleme koşulu için sınır şartı ve yükleme koşulu modellenmesi

Delik etrafındaki burkulmanın daha net gözlenebilmesi adına delik etrafı ağı geçişinin daha düzgün ve olabildiğince karesel olması hedeflenmiştir. Şekil 3.7'de gösterilen bu işlem, washer çözüm ağı olarak adlandırılmaktadır.

Eleman tipi belirlendikten sonra program bizden eleman boyutunu istemektedir. Burada amaç burkulma gerilmesi değerinin yakınsayacağı eleman sayısı bulmaktır. Farklı eleman boyutunda çözümler yapılarak eleman sayısı özdeğer (eigenvalue) eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 3.8). Görselde görülebileceği üzere eleman sayısı 2000'i geçtikten sonra özdeğer eğrisi yakınsamaya başlamıştır. Bu eleman sayısında eleman boyutu yaklaşık olarak 5 mm'dir. Bu nedenle SE analizlerinde çözüm süresini azaltmak adına eleman boyutu 5 mm olarak alınmıştır (Ek. 4).



Şekil 3.7 : Çözüm ağı çalışması ve washer metodu görseli



Şekil 3.8 : Eleman sayısı optimizasyon eğrisi

3.1.5 Modelin koşturulması ve özdeğer çıktısı yorumlaması

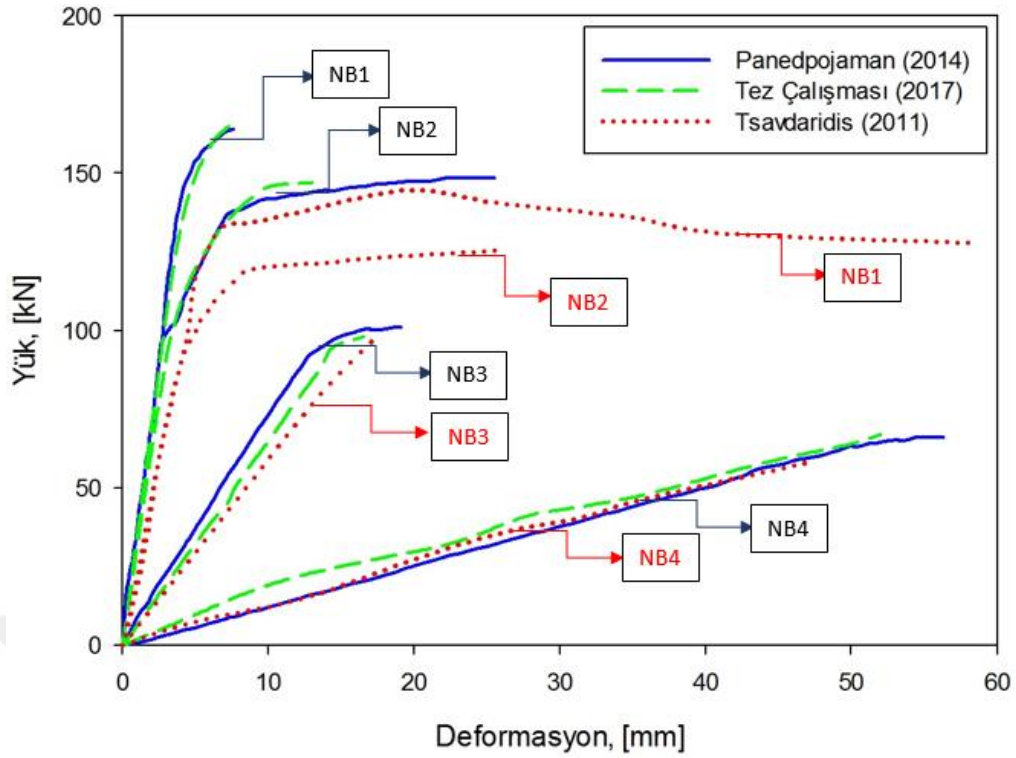
Çözüm ağı ve yükleme çalışmasının ardından sıra ABAQUS Step modülünden ne tür bir analiz yapılacağını tanımlanmasına gelmiştir. Burada prosedür tipi olarak Linear Perturbation sekmesinden Buckle modülü seçilmiştir. Burkulma analizi çözücü olarak Subspace ve Lanczos seçenekleri sunulmaktadır. Lanczos çözücüsünün bir

takım kısıtları olduğundan Subspace tercih edilmiştir (Simulia,2007). İstenilen eigenvalue sayısı olarak 5, iterasyon sayısı olarak da 200 seçilmiştir. Bu aşamalar ile SE modellemesi tamamlanmış analiz işlemine geçilmiştir. Jobs kısmından analiz süresince iş istasyonunda (bilgisayar) ne kadar hafıza ve çekirdek kullanılacağı seçilecektir. Burada yüzde 90 hafıza kullanımına müsaade ederek Job tanımlanmıştır. Tanımlanan Job'a sağ tıklayarak Submit seçilir ve SEM koşturulmaya başlanır (Bu işlemler Ek.5'de sunulmuştur).

Koşturma aşaması sonrası, "başarıyla tamamlandı (completed successfully)" bildirimini alırsak çözümümüz tamamlanmış demektir. Şimdi yine tanımlanan Job'a sağ tıklayarak Result sekmesini seçerek sonuç çıktına geçilebilir. ABAQUS programında Buckling (Burkulma) analizi sonucu, sonuç kısmında [MPa·mm] biriminde özdeğer çıktısı vermiştir. Yüklemeler birim kalınlık için yürütüldüğünden, özdeğeri yapının kalınlığına (2 mm) bölerek kritik burkulma gerilmesi elde edilmektedir. Şekil 3.14'de verilen örnek için kritik burkulma gerilmesi değeri, özdeğer ikiye bölünerek 107.775 [MPa] olarak hesaplanmaktadır.

3.2 Literatür Çalışmaları

Bu bölümde doğrulama işleminde Panedpojaman et al.(2014) ve Tsavdaridis and D'Mello(2011) makaleleri referans alınmıştır. Tez çalışmasında kullandığımız SE programı ile Çizelge 1.1 ve Şekil 1.8'de verilen tasarımlar oluşturulmuş ve Şekil 3.9'da verilen yükleme koşullarına göre analiz edilmiştir. Kayma yüklemesi altında elde edilen deformasyon değerleri ile farklı geometrik modeller için eğriler oluşturulmuştur. Bu sayede ABAQUS SE programının; test sonucu ve ANSYS SE modellemesi ile karşılaştırılması sağlanmıştır.



Şekil 3.9 : Test (Tsavdaridis,2011), ANSYS modeli (Panedpojaman,2014) ve ABAQUS modelinin yük-deformasyon eğrisi üzerinde karşılaştırması

Şekil 3.9'da verilen eğrilerde NB3 ve NB4 tasarımları için yürüttüğümüz analizlerin, hem test [39] hem de SE programı [28] ile elde edilen sonuçlarla oldukça yakın olduğu görülmektedir. NB1 ve NB2 modeli için ise yine SE modeli ile oldukça benzer davranış sergilemiştir. NB1 ve NB2 modellerini test sonuçları ile kıyasladığımızda; lineer bölgede yakın sonuç verse de lineer olmayan plastik bölgede farklı bir görüntü çizdiği görülmektedir. Bu 4 tasarımdan elde edilen yüklem-deformasyon eğrileri sonucuna bakıldığında, tercih edilen SE programının analizlerde kullanılabileceğini söyleyebiliriz.

3.3 Analitik Hesap

Analitik el hesabı formülleri ve yaklaşımlarında Airbus havacılık uygulamalarında kullanılan bir statik gerilme maneli olan J. Huet [19] kaynağı kullanılmıştır. Bu kitapta geçen burkulma uygulamaları sadece plaka yapıları için geçerlidir. Bu nedenle öncelikle bir kiriş yapısının plakaya indirilmesi, daha sonra saf yüklemeler için burkulma hesabı ve geometri ile sınır şartına bağlı olarak belirlenen burkulma katsayısı yaklaşımlarından bahsedilecektir.

3.3.1 Flanş destek testi

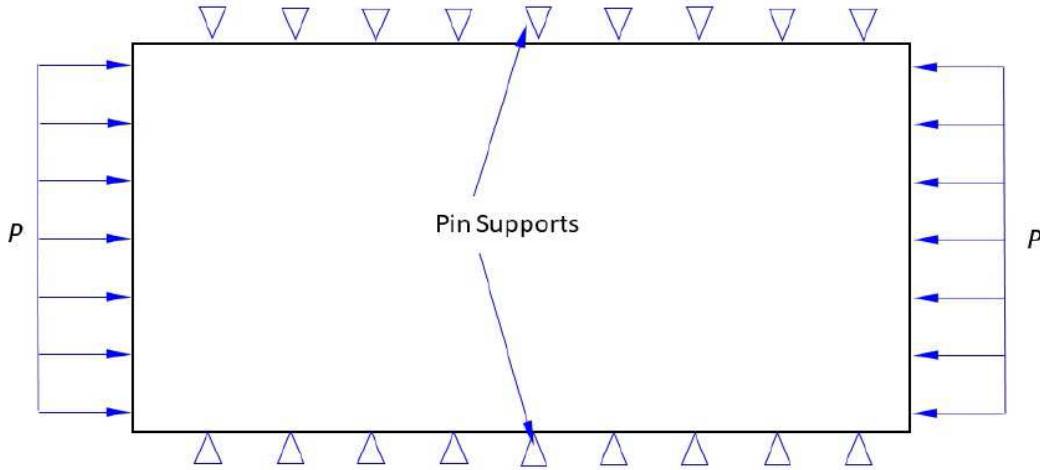
Eğer ki bir kiriş yapısında kiriş gövdesini destekleyecek yeterlilikte flanş alanı varsa, flanşlar kaldırılıp kiriş gövdesi dört tarafı destekli plaka gibi düşünülebilir (J.Huet,1999). Flanşın kiriş gövdesini destekleyip destekleyemeyeceği ölçmek için ise Eşitlik 3.23'te yer alan flanş destek testi uygulanmaktadır.

$$2.73 \frac{I_t}{h_a e_a^3} - \frac{A_t}{h_a e_a} \geq 5, \quad (3.23)$$

Eşitsizlikte; I_t flanşın atalet momentini, A_t flanşın kesit alanını, h_a kiriş gövdesinin yüksekliğini ve e_a kiriş gövdesi kalınlığını simgelemektedir. Kiriş Geometrisi bölümde verilen referans geometri değerlerini denkleme yerleştirdiğimizde:

$$2.73 \times 24^3 \times 5 \div (3 \times 120 \times 2^3) - 24 \times 5 \div (120 \times 2) = 65.02$$

eşitsizliğin sol tarafının değeri yaklaşık 65 olarak hesaplanmakta ve eşitsizliğin sağ tarafında verilen 5 değerinden çok yüksek bir değer elde edilmektedir. Bu nedenle tasarladığımız kiriş yapısı için flanşlar atılarak dört tarafı basit destekli (four-side simply supported) plaka olarak düşünülebilir (Şekil 3.10) ve böylelikle manuelde yer alan analitik el hesabı formülleri kullanılabilir.



Şekil 3.10 : Flanşları kaldırılmış basit destekli plaka modeli

3.3.2 Saf yüklemeler altında burkulma formülleri

Yüksek lisans tezimin analizler kısmında ilk olarak yapı ayrı ayrı saf basma, saf kayma ve saf eğilme yüklemelerine maruz bırakılarak burkulma çalışması yapılacaktır. Bu kapsamda analitik çalışmalarda referans alacağımız kaynakta verilen saf yüklemeler altında kritik burkulma gerilmesi formüllerine değinilecektir (J.Huet,1999). SE programında analiz modeli oluşturulmadan önce, SE doğrulama bölümünde bu kısımda verilen denklemlerden elde edilen sonuçlarla SE modelinden elde edilen sonuçların karşılaştırması yapılacaktır. Bu karşılaştırma SE modeli doğrulaması bölümünde verilecektir. Saf yüklemeler için kritik burkulma gerilmesi formülleri şu şekilde verilmiştir (J.Huet,1999):

$$F_{ccr} = K_c E_c \left(\frac{t}{b} \right)^2 \leq F_{cy}, \quad (3.24)$$

$$F_{bcr} = K_b E_c \left(\frac{t}{b} \right)^2 \leq F_{cy}, \quad (3.25)$$

$$F_{scr} = K_s E_c \left(\frac{t}{\min(a; b)} \right)^2 \leq F_{sy}, \quad (3.26)$$

Eşitliklerde yer alan F_{ccr} basma yükü altında kritik burkulma gerilmesini, F_{bcr} eğilme yükü altında kritik burkulma gerilmesini, F_{scr} kayma yükü altında kritik burkulma gerilmesini, F_{cy} basma altında akma gerilmesini, F_{sy} kayma altında akma gerilmesini, E_c basma elastik modülünü, t web kalınlığını, b web yüksekliğini ve a web uzunluğunu simgelemektedir. K_c, K_b ve K_s ise sırası ile basma, eğilme ve kayma burkulma katsayılarıdır. Burkulma katsayıları plakanın uzunluk genişlik oranına ve sınır şartına bağlıdır. Eşitlik 3.24 – 3.26'dan kritik burkulma gerilmesini hesaplamak için öncelikle burkulma katsayısı yaklaşımlarından bahsedilecektir.

3.3.3 Burkulma katsayısı yaklaşımları

Bu bölümde Şekil 3.10'da verilen dört tarafı basit destekli geometri için her bir saf yükleme için burkulma katsayısı hesaplanmalarında kullanılan yaklaşımlara

değınilecektir. Aşağıda Eşitlik 3.27 – 3.29'da burkulma katsayısı formülleri sunulmuştur:

$$K_c = \frac{\pi^2 k_c}{12(1-\nu_e^2)}, \quad (3.27)$$

$$K_b = \frac{\pi^2 k_b}{12(1-\nu_e^2)}, \quad (3.28)$$

$$K_s = \frac{\pi^2 k_s}{12(1-\nu_e^2)}, \quad (3.29)$$

Eşitliklerde yer alan ν_e , poisson oranını, k_c basma yükü altında burkulma faktörünü, k_b eğilme yükü altında burkulma faktörünü ve k_s kayma yükü altında burkulma faktörünü simgelemektedir. Bu bölüme kadar geçen formüller diğer burkulma teorisinin verildiği kaynaklarda da benzer şekilde verilmiştir ((Niu,1997), (Pilkey,1994), (Singer,1998)). Referans alınan manuelede sınır şartı ve plaka genişlik yükseklik oranına bağlı (a/b) burkulma faktörleri hesapları sunulmaktadır (J.Huet,1999). Üç saf yükleme için üç alt başlıkta yaklaşımlar verilecektir:

i) Basma yükü altında burkulma faktörü

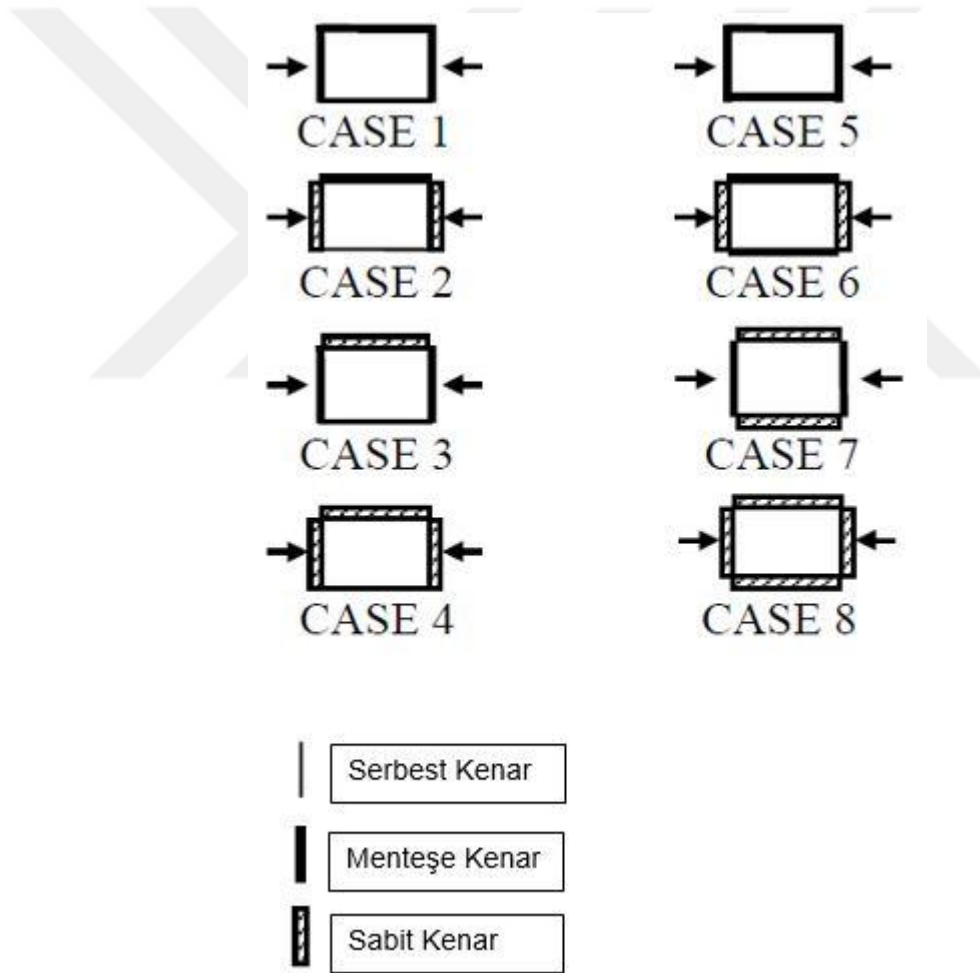
Eşitlik 3.30'da k_c basma yükü altında burkulma faktörü denklemi sunulmuştur.

$$k_c = \begin{cases} C_1 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + C_2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + C_3 & \text{if } 0 \leq \frac{a}{b} \leq \text{Lim} \\ k_{c\infty} & \text{if } \frac{a}{b} \geq \text{Lim} \end{cases} \quad (3.30)$$

Denklem; a/b oranı, Lim aralık kısıtı, $k_{c\infty}$ değeri ve C sabitlerine bağlıdır. C_1, C_2, C_3 , Lim ve $k_{c\infty}$ değerleri sınır şartlarına bağlıdır. Şekil 3.11'de 8 farklı geometrik tasarım (case) sunulmaktadır. İlk 4 tasarım bir kenarı serbest (free) olmasından anlaşıldığı üzere giriş flanşı yapısıdır. Sonraki 4 tasarımda ise ankastre

yapılarda olduğu gibi sabit (fixed) destekli veya flanşların giriş gövdesini desteklediği gibi basit/menteşeli (hinged) destekli plaka geometrileri verilmiştir.

Eşitlik 3.30'daki bilinmeyen sabitler, Çizelge 3.2'de verilen 8 tasarıma bağlı olarak tablo halinde sunulmuştur. Bu Çizelgeden bulunan değerler denkleme yerleştirilerek burkulma faktörü bulunabilecektir. Daha sonra elde edilen faktör Eşitlik 3.27'de yerine koyularak basma yükü altında burkulma katsayısına ulaşıyoruz. Son olarak da bu katsayı Eşitlik 3.24'e eklenerek basma yükü altında kritik burkulma gerilmesini elde etmiş oluyoruz.



Şekil 3.11 : Basma yükü altında geometrik tasarımlar (caseler)

Çizelge 3.2 : Basma yükü altında burkulma faktörü kat sayıları (J.Huet,1999)

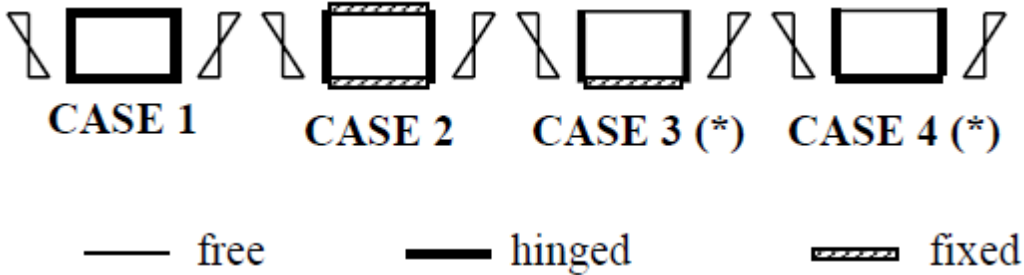
	C_1	C_2	C_3	Lim	k_{∞}
Case 1	0	1.00	0.43	∞	0.43
Case 2	0	4.14	0.38	9.49	0.43
Case 3	0.14	0.99	0.55	1.64	1.28
Case 4	0.01	3.92	0.94	4.34	1.28
Case 5	1.00	1.00	2.00	1.00	4.00
Case 6	0	2.70	4.00	∞	4.00
Case 7	4.89	0.97	2.64	0.66	6.98
Case 8	0	2.90	6.98	∞	6.98

ii) Eğilme yükü altında burkulma faktörü

k_b eğilme yükü altında burkulma faktörü denklemi, Eşitlik 3.31'de sunulmuştur.

$$k_b = \begin{cases} C_1 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + C_2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + C_3 & \text{if } 0 \leq \frac{a}{b} \leq \text{Lim} \\ k_{b\infty} & \text{if } \frac{a}{b} \geq \text{Lim} \end{cases} \quad (3.31)$$

Eşitlikte yer alan C_1, C_2, C_3 , Lim ve $k_{b\infty}$ değerleri sınır şartlarına bağlıdır. Şekil 3.12'de 4 farklı plaka geometrik tasarımı (case) sunulmaktadır. İlk tasarımda 4 tarafı basit destekli, ikincisi 2 tarafı sabit 2 tarafı basit destekli, üçüncüsünde 2 tarafı yükleme yeri basit bir kenarı serbest bir kenarı sabit (flanş yapısı), dördüncü tasarımda ise yine eğilme yüklemesinin uygulandığı 2 taraf basit diğer kenarları ise basit ve serbest (flanş yapısı) desteklidir.



Şekil 3.12 : Eğilme yükü altında geometrik tasarımlar (caseler)

Eşitlik 3.31'den burkulma faktörünü hesaplamak için gerekli bilinmeyen sabitler, Çizelge 3.3'de 4 farklı tasarım için sunulmuştur. Daha sonra elde edilen faktör, Eşitlik 3.28'de yerine koyularak eğilme yükü altında burkulma katsayısına

ulaşılacaktır. Bu katsayı Eşitlik 3.25'de eğilme yükü altında kritik burkulma gerilmesini elde etmek için kullanılacaktır. 3. ve 4. tasarımlarda a/b oranı 1.3'ten küçük olması halinde güvenilir bir çözüme ulaşamadığından bu değer altındaki oranlar için sabitler sunulmamıştır.

Çizelge 3.3 : Eğilme yükü altında burkulma faktörü sabitleri (J.Huet,1999)

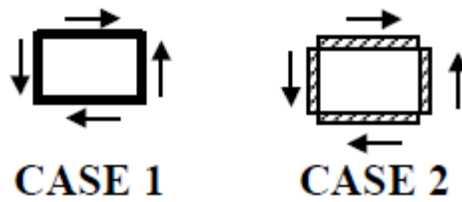
	C_1	C_2	C_3	Lim	$k_{b\infty}$
Case 1	3.33	1.66	18.1	0.60	23.9
Case 2	52.3	2.20	20.4	0.45	41.8
Case 3				1.30	1.96
Case 4				1.30	0.85

iii) Kayma yükü altında burkulma faktörü

Eşitlik 3.32'de k_s , kayma yükü altında burkulma faktörü hesabı verilmiştir.

$$k_s = C_1 \left\{ \min\left(\frac{a}{b} : \frac{b}{a}\right)^2 \right\} + C_2 \quad (3.32)$$

Denklemden verilen C_1 ve C_2 değerleri sınır şartlarına bağlı sabitlerdir. Şekil 3.13'de biri 4 tarafı basit destekli diğeri 4 tarafı sabit destekli olmak üzere iki model sunulmuştur.



Şekil 3.13 : Kayma yükü altında geometrik tasarımlar (caseler)

Çizelge 3.4'de 2 kayma yüklemesi tasarım modeli için sabitler tablosu verilmiştir. C_1 ve C_2 Eşitlik 3.32'de yerine koyularak burkulma faktörü hesaplanmaktadır. Ardından elde edilen faktör Eşitlik 3.29'da yerine koyularak kayma yükü altında burkulma katsayısına ulaşılır. Son olarak bu katsayı Eşitlik 3.26'ya eklenerek kayma yükü altında kritik burkulma gerilmesini elde etmiş oluruz.

Çizelge 3.4 : Kayma yükü altında burkulma faktörü kat sayıları (J.Huet,1999)

	C_1	C_2
Case 1	3.80	5.35
Case 2	5.53	8.98

3.3.4 Analitik hesap ile doğrulama

Bu bölümde, saf yüklemeler altında analitik el hesabı sonuçları ile SE programında elde edilen üç saf yükleme için ayrı ayrı sonuçların karşılaştırması yapılacaktır.

Analitik çalışmalar bölümünde burkulma analizlerinin sınır şartı ve plaka uzunluk yükseklik oranına (a/b) bağlı olduğu belirtilmişti. Yine aynı bölümde tasarladığımız kiriş geometrisinde flanşların kiriş gövdesini desteklediği ve yapının Şekil 3.10'daki gibi 4 tarafı basit destekli plaka gibi düşünülebileceğinden bahsedilmişti. 2.1 Kiriş Geometrisi bölümünde referans alınan geometrik parametreler kullanılacaktır. Web uzunluğu, a 330 mm ve web yüksekliği, b 120 mm alındığından a/b oranı 2.75 olarak hesaplarda baz alınmıştır. Formüllerde gerekli olan malzeme değerleri de 2.2 Malzeme Özellikleri bölümünde verilmiştir.

i) Basma Yükü Altında Burkulma Gerilmesi

Şekil 3.11'e baktığımızda 4 tarafı basit destekli plaka yapısını Case 5 tasarımının temsil ettiğini görmekteyiz. Çizelge 3.2'de Case 5 için sabitleri ve a/b oranını Eşitlik 3.30'da yerine koyduğumuzda basma yükü altında burkulma faktörü, k_c 4 olarak bulunmuştur.

Hesaplanan faktör Eşitlik 3.27'ye eklendiğinde basma burkulma katsayısı, K_c 3.69 ve bu katsayı da Eşitlik 3.24'de yerine koyulduğunda basma yükü altında burkulma gerilmesi, F_{ccr} analitik hesaba göre 73.53 [MPa] olarak bulunmuştur.

ii) Eğilme Yüğü Altında Burkulma Gerilmesi

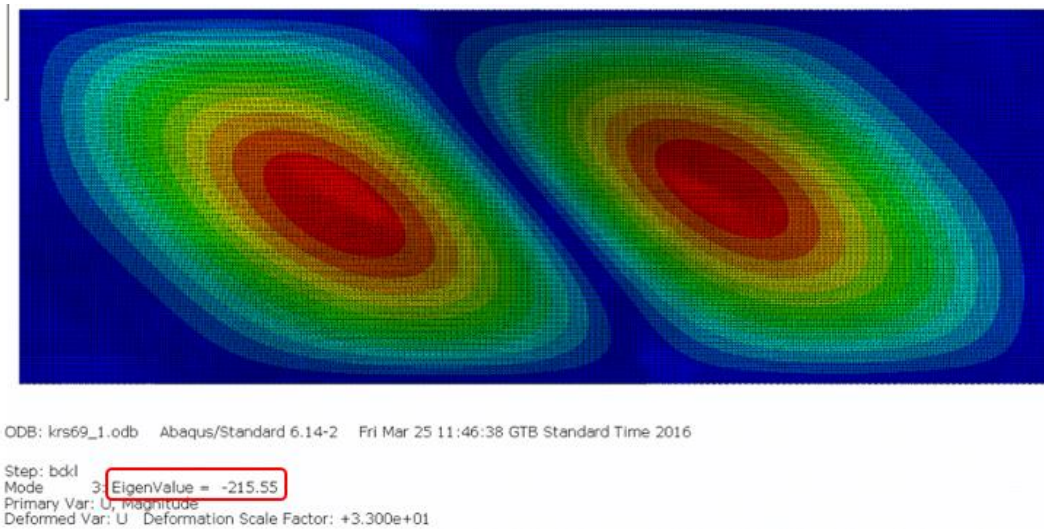
Şekil 3.12'de eğilme yüğü altında 4 tarafı basit destekli plaka yapısını Case 1 temsil etmektedir. Çizelge 3.3'den elde ettiğimiz Case 1 için sabitler ve a/b oranı Eşitlik 3.31'de yerleştirildiğinde burkulma faktörü, k_b 23.9 olarak hesaplanmıştır.

Bu faktör Eşitlik 3.28'de yerine koyulduğunda eğilme burkulma katsayısı, K_b 22.06 ve eğilme yüğü altında burkulma gerilmesi, F_{ber} ise Eşitlik 3.25'den 439.35 [MPa] olarak hesaplanmıştır.

iii) Kayma Yüğü Altında Burkulma Gerilmesi

Kayma yükleme için geometrik tasarımlara bakıldığında (bkz. Şekil 3.13) Case 1'in 4 tarafı basit destekli plaka yapısını temsil ettiği görülmektedir. Çizelge 3.4'deki Case 1 için sabitleri ve a/b oranını; Eşitlik 3.32'de yerine koyduğumuzda kayma yükleme için burkulma faktörü, k_s 5.85 olarak bulunmuştur.

Bulunan faktör Eşitlik 3.29'a eklendiğinde kayma burkulma katsayısı, K_s 5.40 ve bu katsayı da Eşitlik 3.26'ya yerleştirildiğinde kayma yüğü altında burkulma gerilmesinin, F_{scr} analitik değeri 107.54 [MPa] olarak hesaplanmış olacaktır.



Şekil 3.14 : Kayma yüğü altında burkulma SE analizi sonuç görüntüsü

SE analizinin detaylı modellenmesi, ağ çalışması ve yorumlanmasına 3.1 Sonlu Elemanlar Modellemesi bölümünde detaylı değinilmiştir. Şekil 3.14'de sadece örnek görüntü olarak kayma yükü altında burkulma analizi sonucu verilmiştir. Görselde verilen çıktı değeri EigenValue plaka kalınlığı 2 mm olduğu için kritik burkulma değerinin 2 katıdır. Bu değeri ikiye böldüğümüzde kayma yükü altında kritik burkulma gerilmesi değeri 107.775 [MPa] olarak bulunmuş olacaktır. Çizelge 3.5'de analitik çalışmada kullanılan geometrik ve malzeme özellikleri girilerek yürütülen Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen saf yüklemeler altında kritik burkulma gerilmesi sonuçları ve analitik sonuç ile SEA sonucu arasındaki hata oranı yüzde oranı olarak sunulmuştur. Çizelge 3.5'de gözleneceği üzere 3 saf yükleme şartı için de hata oranı en fazla yüzde 1 gelmektedir. Bu da SE analizleri için oldukça kabul edilebilir bir seviyedir.

Çizelge 3.5 : Analitik ve SEA kritik burkulma gerilmeleri karşılaştırması.

Kritik Burkulma Gerilmesi Tipi	Analitik Sonuç [MPa]	SEA Sonucu [MPa]	Hata Oranı (%)
F_{cer}	73.531	73.515	0.021
F_{bcr}	439.346	434.855	1.022
F_{scr}	107.539	107.775	0.220

Hem literatürde yer alan test ve farklı SE programı ile yürütülen çalışmalarda hem de analitik hesaplar ile yapılan karşılaştırmalarda seçilen sonlu elemanlar programının oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu işlemler ile doğrulanmış olan ABAQUS SE programı, tez çalışmalarımında kullanılabilir.

4. BURKULMA ANALİZLERİ

Bu bölümde, yüksek lisans tez çalışmamın temelini oluşturan doğrulanmış sonlu elemanlar programı ABAQUS ile yürütülen analizlerden elde edilen sonuçlar sunulacaktır. Etrafi güçlendirilmiş deliğe sahip basit destekli plakalar için yürütülen burkulma analizleri sonucu elde edilen kritik burkulma gerilmesi değerlerinin, geometrik parametrelere bağlı değişim eğrileri yorumlanacaktır.

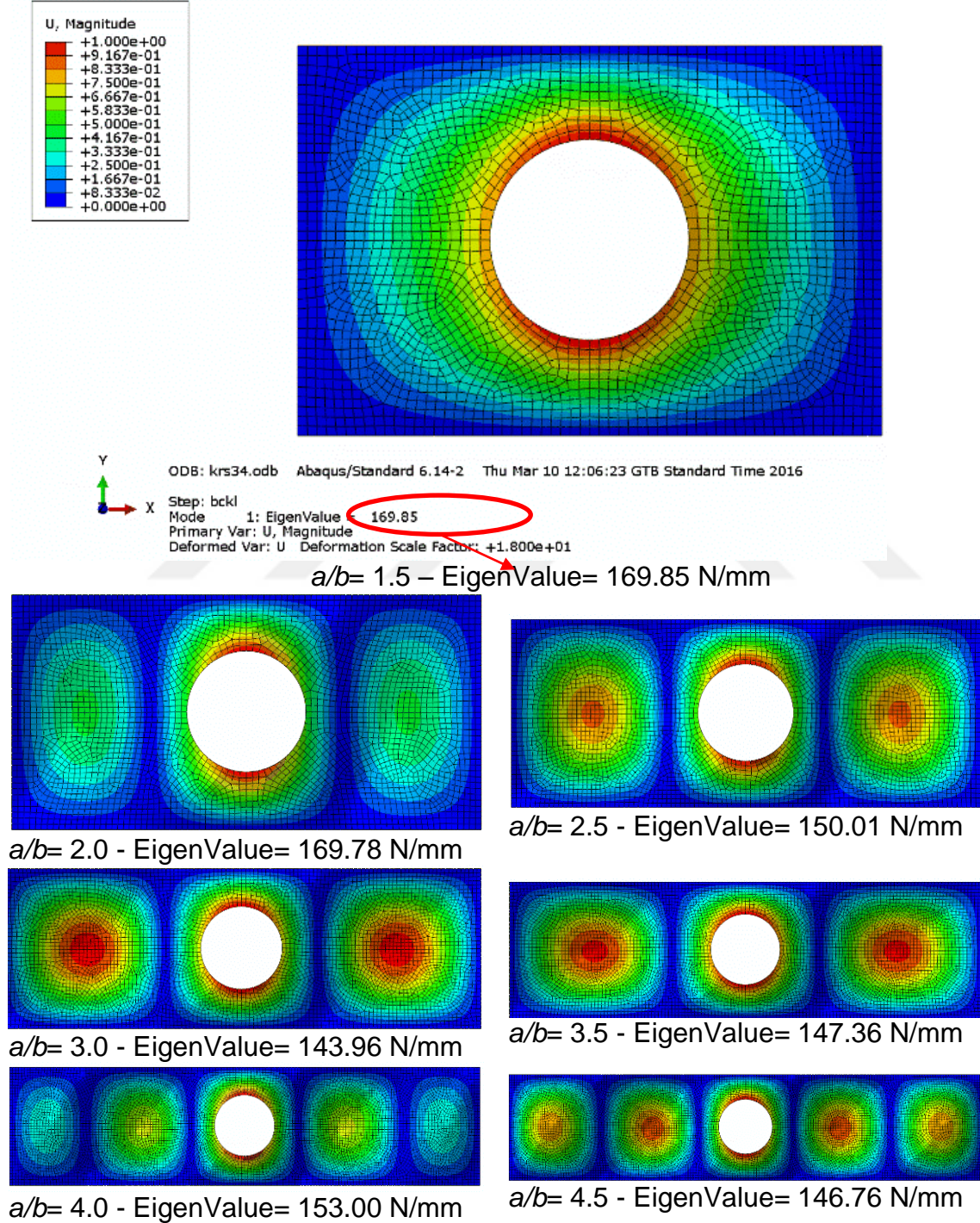
Kiriş Geometrisi bölümünde bahsedildiği gibi a/b , h/t ve w/d olmak üzere 3 farklı geometrik parametre kullanılmıştır. Yine aynı bölümde bu parametrelerin aralıkları sunulmuştur. Bu aralık değerleri için 3 saf yükleme durumunda toplamda 9 eğri verilerek yorumlanacaktır.

Bu eğriler hem birleşik yükleme bölümünde etkileşim eğrileri oluşturulurken gerekli olan kritik burkulma gerilmesi değerinde kullanılacak hem de kirişlerde yükleme durumuna bağlı optimum delik etrafi güçlendirme kalınlığı ve genişliği belirleme yaklaşımı yapılmasını sağlayacaktır. İlk olarak güçlendirilmemiş delikli plakalarda plaka ebadı etkisi (a/b) irdelenecek, daha sonra güçlendirme yüksekliği, h ve güçlendirme genişliğinin, w ağırlık kazancına etkisi belirtilecek ve hacim-gerilme yaklaşımına göre optimum güçlendirme yükseklik, genişlik yorumlaması yapılarak tasarım dizaynı yaklaşımı sunulacaktır.

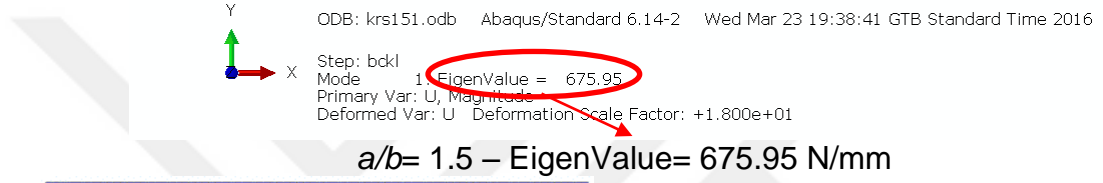
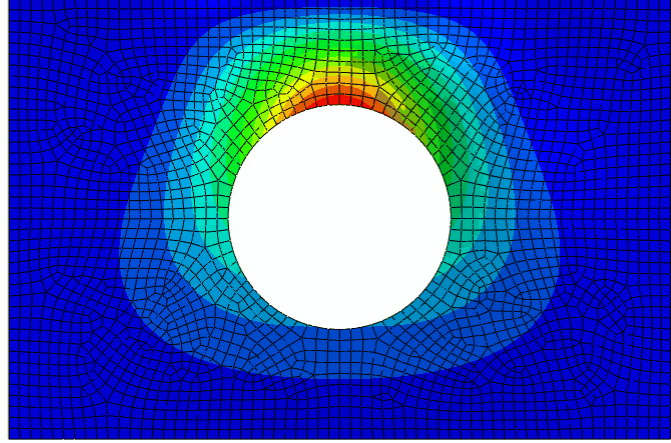
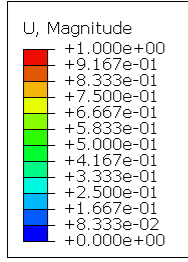
4.1 Kiriş Gövdesi Uzunluğunun Yüksekliğine Oranına (a/b) Bağlı Burkulma Analizi

Şekil 4.1'de saf basma kuvveti altında, Şekil 4.2'de saf eğilme yükü altında ve Şekil 4.3'de saf kayma yüklemesi altında ABAQUS'de elde edilen burkulma sonlu elemanlar analizi (SEA) sonuç görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.4 – 4.6'da ise kritik

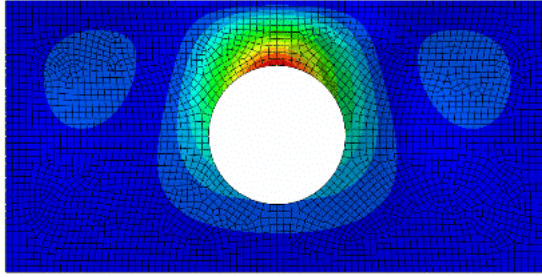
burkulma gerilmesi değerinin kiriş gövdesi uzunluk - yükseklik oranına (a/b) bağlı değişimleri sunulmuştur. Bu bölümde kiriş gövdesi uzunluğu, a değeri değiştirilirken; b değeri 120 mm, delik çapı d değeri 60 mm, kiriş gövdesi kalınlığı, t değeri 2 mm, güçlendirme değerleri h ve w 0 alınmıştır.



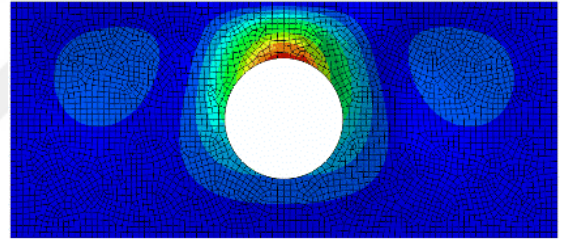
şekil 4.1 Basma kuvveti altında a/b oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü



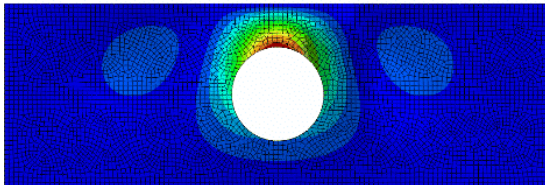
$a/b = 1.5$ – EigenValue= 675.95 N/mm



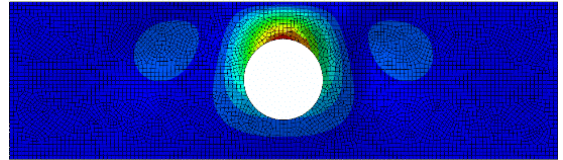
$a/b = 2.0$ - EigenValue= 656.45 N/mm



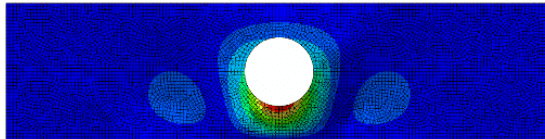
$a/b = 2.5$ - EigenValue= 655.32 N/mm



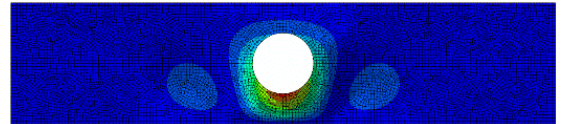
$a/b = 3.0$ - EigenValue= 657.93 N/mm



$a/b = 3.5$ - EigenValue= 657.61 N/mm

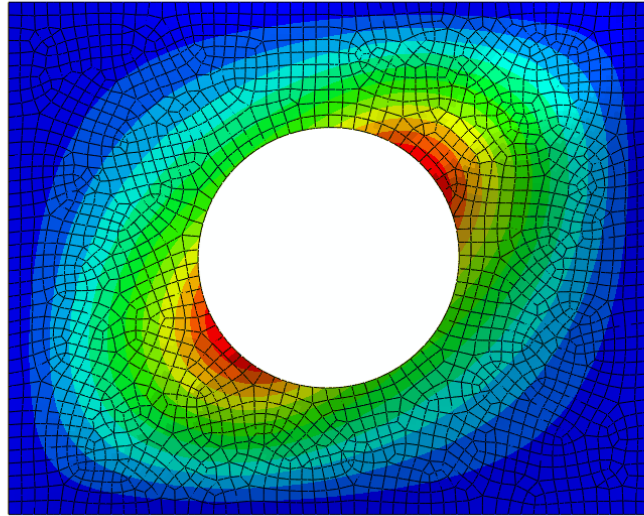
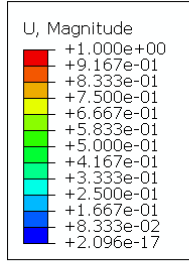


$a/b = 4.0$ - EigenValue= 657.57 N/mm



$a/b = 4.5$ - EigenValue= 657.56 N/mm

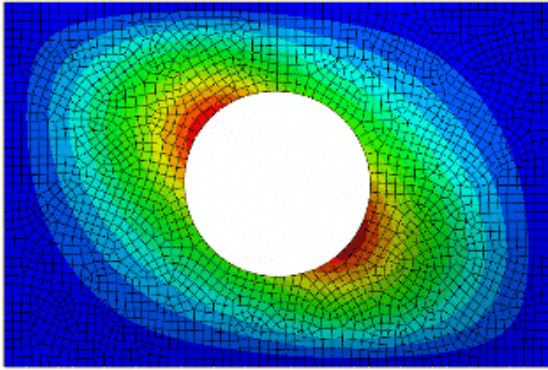
Şekil 4.2 Eğilme kuvveti altında a/b oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü



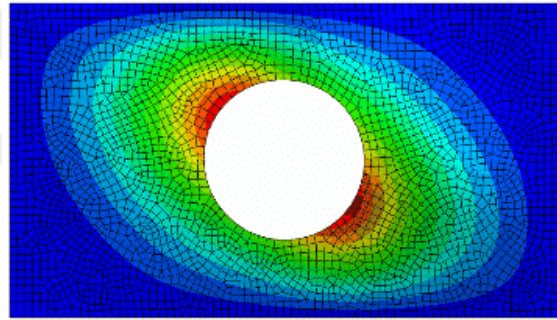
ODB: krs108.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Sat Mar 26 14:17:53 GTB Standard Time 2016

Step: bckl
 Mode: EigenValue = 103.77
 Primary Var: U, Magnitude
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.500e+01

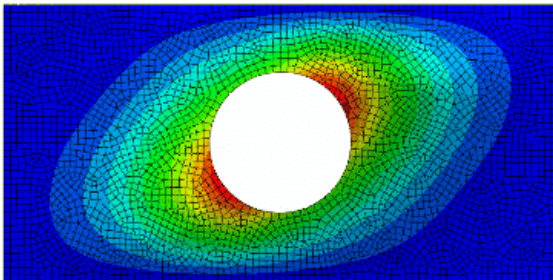
$a/b = 1.25$ - EigenValue = 103.77 N/mm



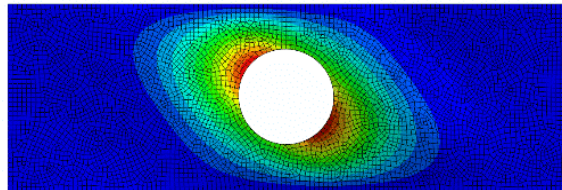
$a/b = 1.5$ - EigenValue = 104.00 N/mm



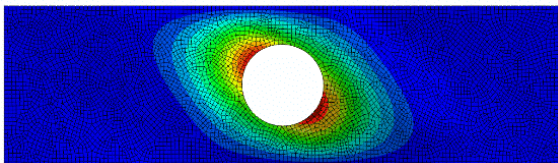
$a/b = 1.75$ - EigenValue = 104.62 N/mm



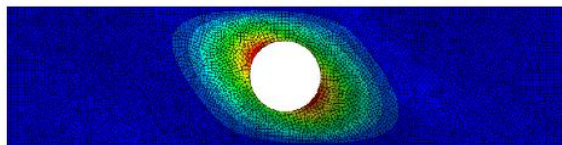
$a/b = 2.0$ - EigenValue = 104.97 N/mm



$a/b = 3.0$ - EigenValue = 104.74 N/mm



$a/b = 3.5$ - EigenValue = 104.59 N/mm

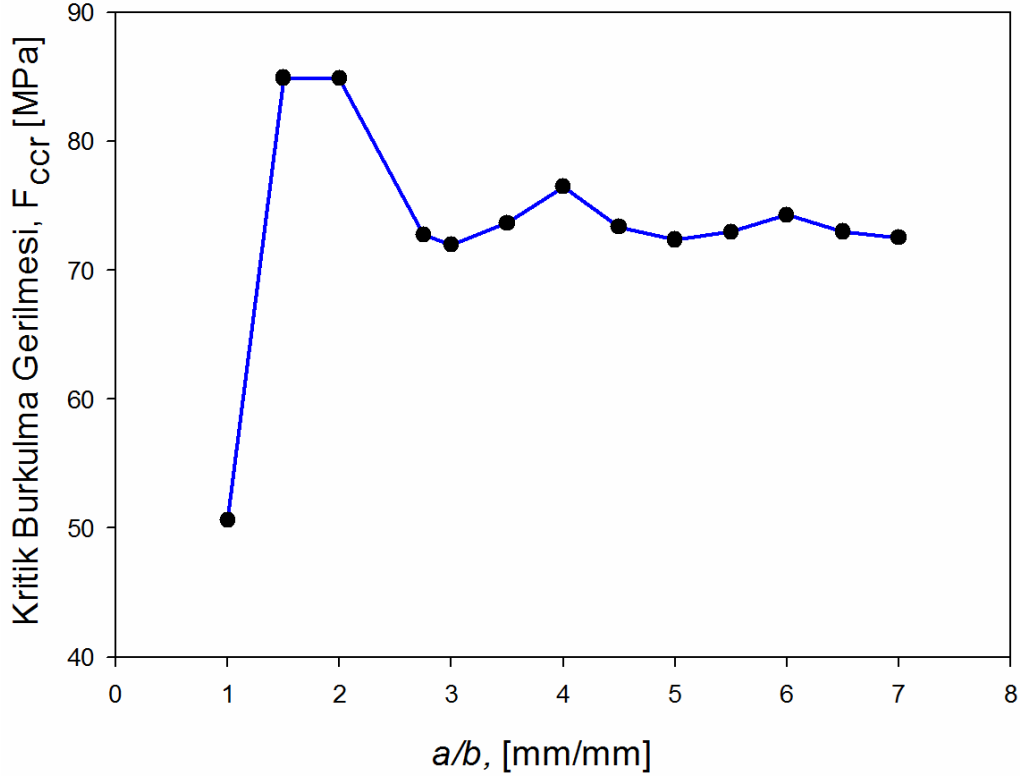


$a/b = 4.0$ - EigenValue = 104.50 N/mm

Şekil 4.3 Kayma kuvveti altında a/b oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü

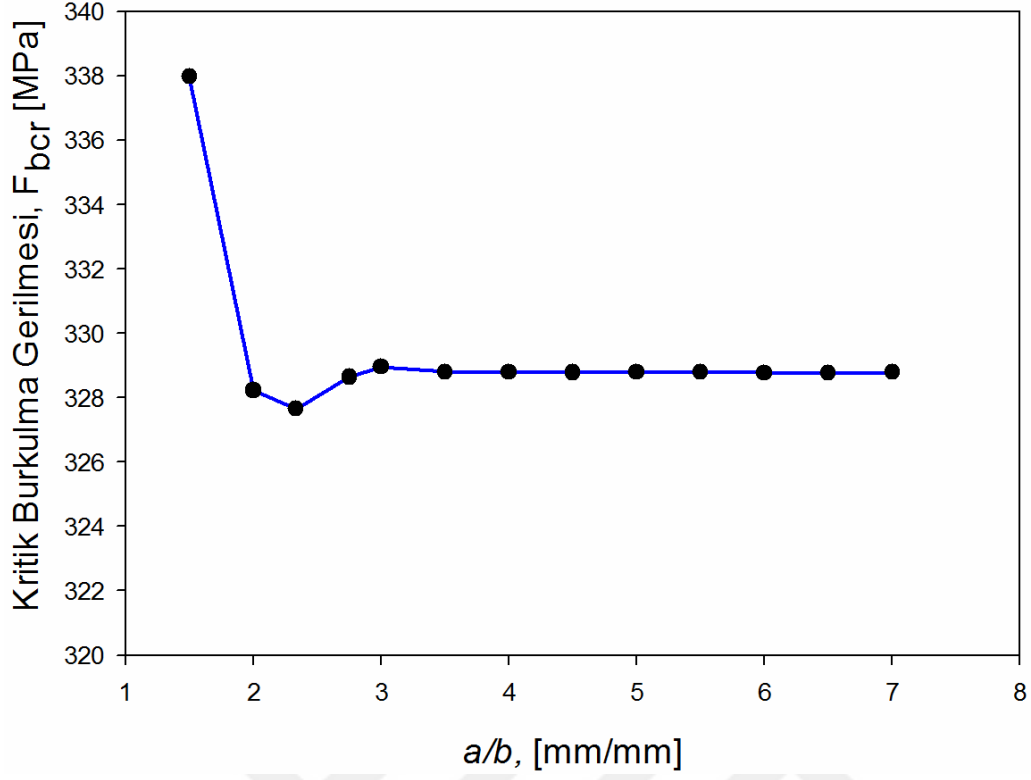
Javidinejad(2014) kitabında ve birçok kaynakta rastlayacağımız üzere basma kuvveti altında deliksiz plakalarda burkulma analizlerinde her birim yükseklik uzunluk oranı için bir yükselti alçaltı oluşmaktadır (Şekil 4.1). Ayrıca, plaka yüksekliği sabit iken plaka uzunluğu değiştirildiği zaman burkulma gerilmesi değeri her sayma sayısında (1,2,3.) belirli bir değere teğet geçmektedir.

Şekil 4.4'de delikli yapılar için yürütülen basma kuvveti altındaki analizlerde ise sayma sayısı değil tek sayılarda (1,3,5) benzer bir durum olduğu gözlemlenmiştir ve kritik burkulma gerilmesi değeri 72.5 MPa'a teğet geçmiştir. Bu nedeni ise açılan delikle birlikte kiriş genişliğinin, b daralmış olmasıdır.

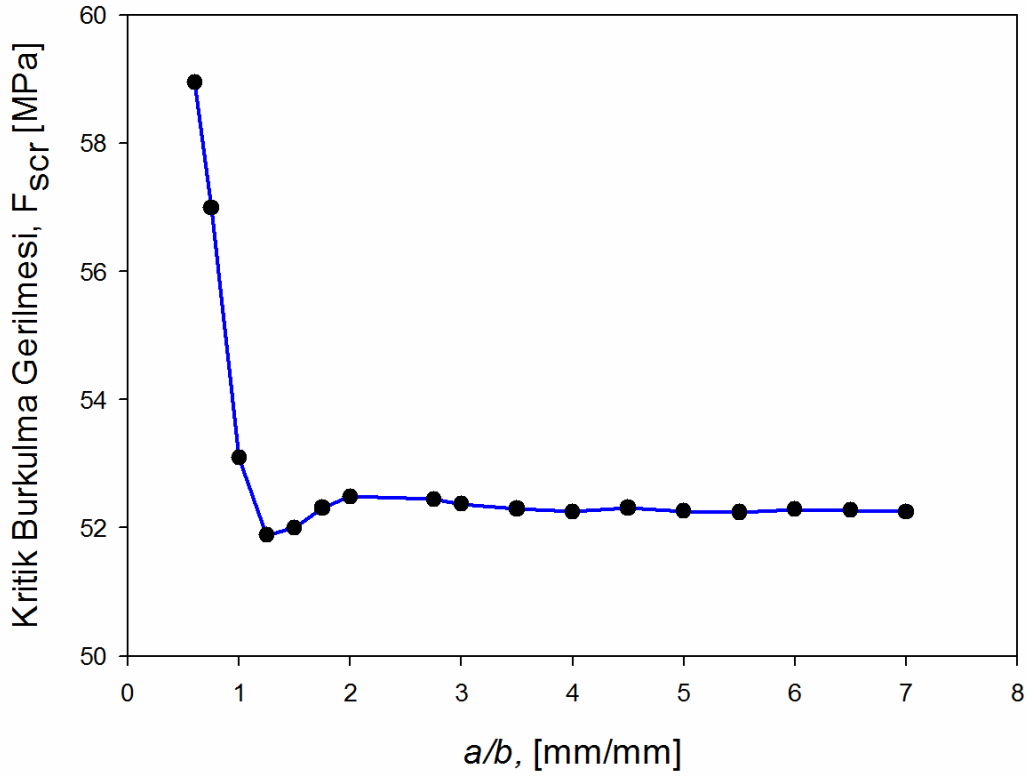


Şekil 4.4 Basma kuvveti altında a/b oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi

Saf basma yüklemesinin aksine, saf eğilme ve saf kayma yüklemesinde burkulma delik etrafına konsantre olmuş (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3) ve bu nedenle eğri plaka uzunluğuna bağlı olarak osilasyon yapmamıştır. Kritik burkulma gerilmesi Şekil 4.5'de saf eğilme yüklemesi altında 328.8 MPa değerine, Şekil 4.6'da saf kayma yüklemesinde 52.3 MPa'a yakınsamaktadır.



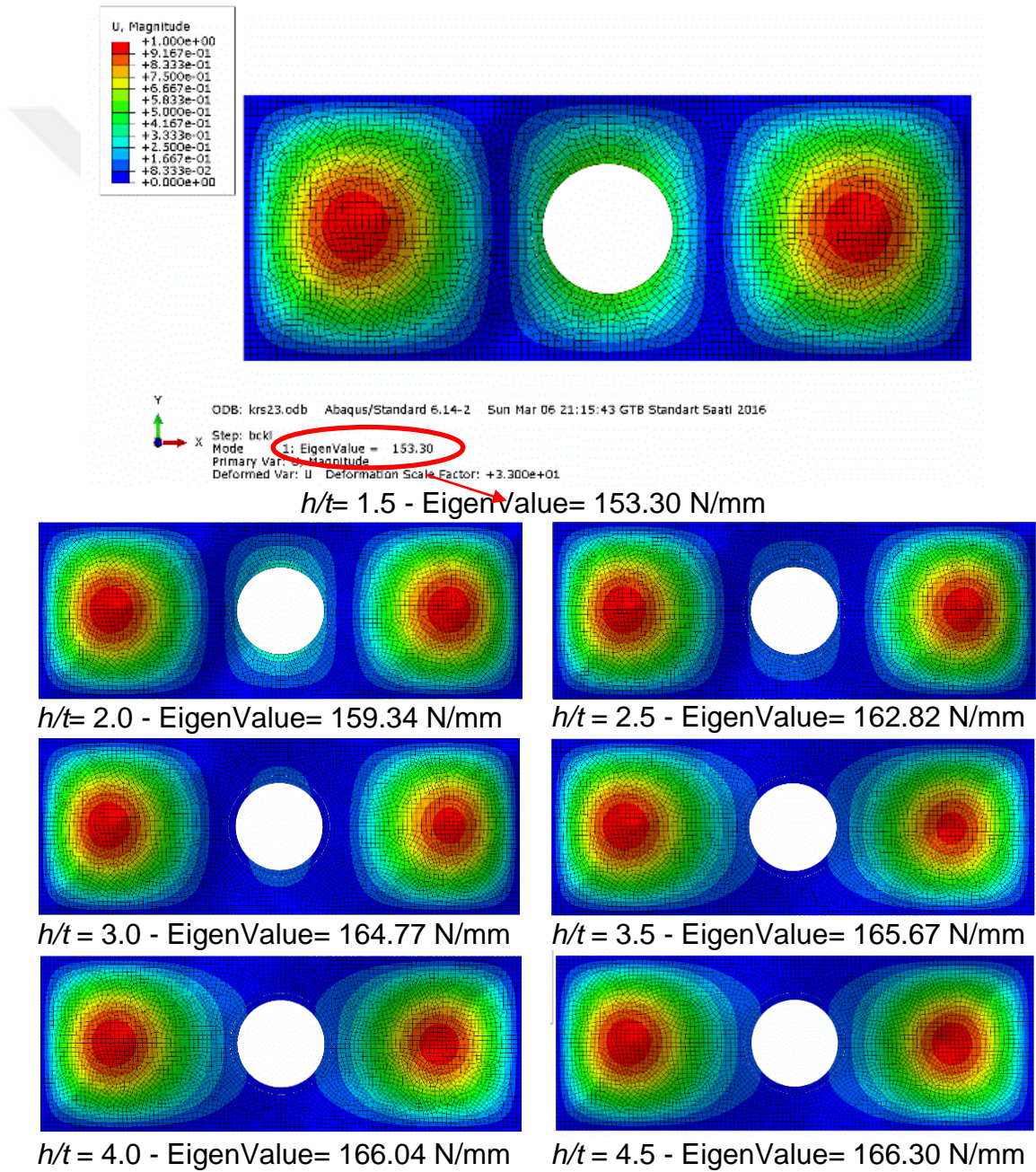
Şekil 4.5 Eğilme kuvveti altında a/b oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi



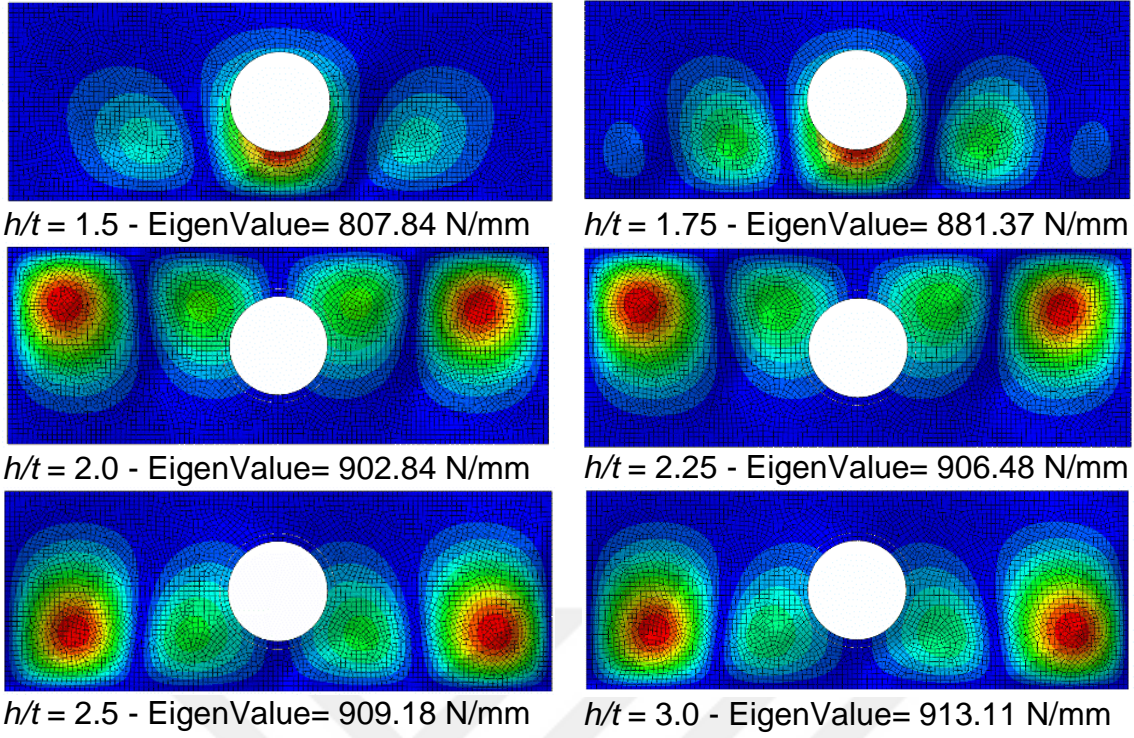
Şekil 4.6 Kayma kuvveti altında a/b oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi

4.2 Güçlendirme Yüksekliğinin Kiriş Gövdesi Kalınlığı Oranına (h/t) Bağlı Burkulma Analizi

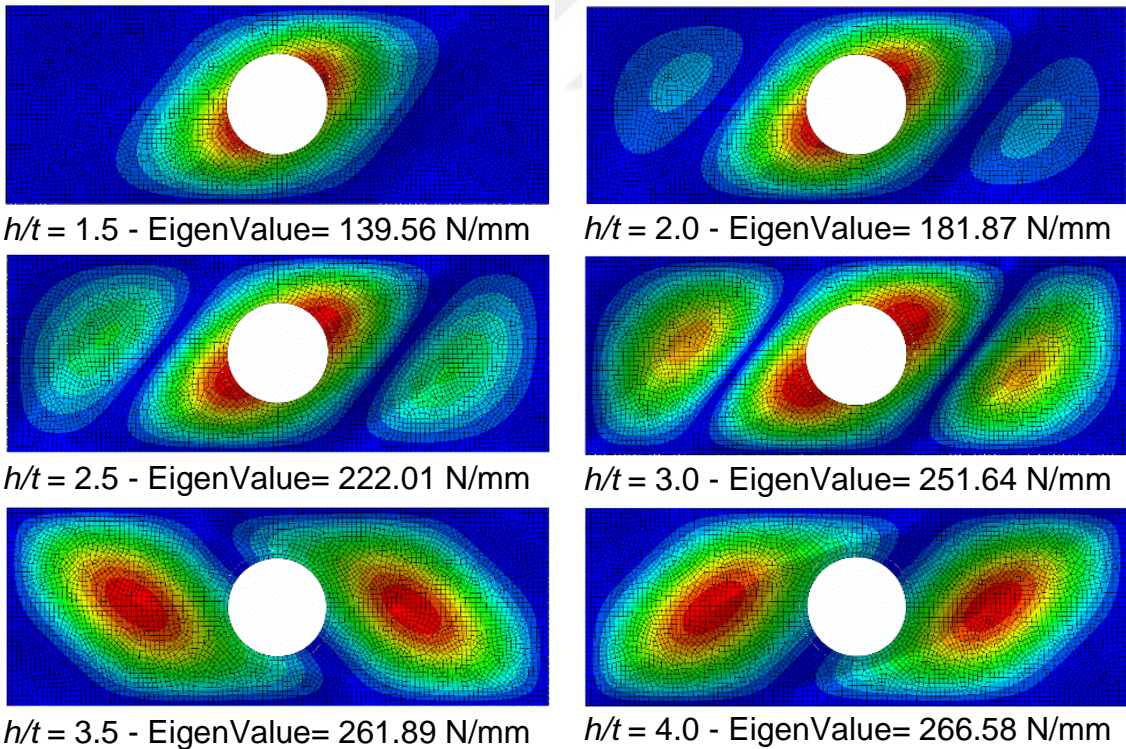
Şekil 4.7'de saf basma, Şekil 4.8'de saf eğilme ve Şekil 4.9'da saf kayma yüklemeleri altında güçlendirme yüksekliği kiriş gövdesi kalınlığı oranına (h/t) bağlı burkulma SEA sonuç görüntüleri verilmiştir. Analizlerde kullanılan geometrik parametreler a , b , d , t ve w sırası ile 330 mm, 120 mm, 60 mm, 2 mm ve 5 mm'dir. Her 3 görselde de görüldüğü üzere h/t oranı artıkça delik etrafının katılık değeri (stiffness) artığından delik etrafı gerilme yoğunluğu azalmaktadır.



Şekil 4.7 Basma kuvveti altında h/t oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü

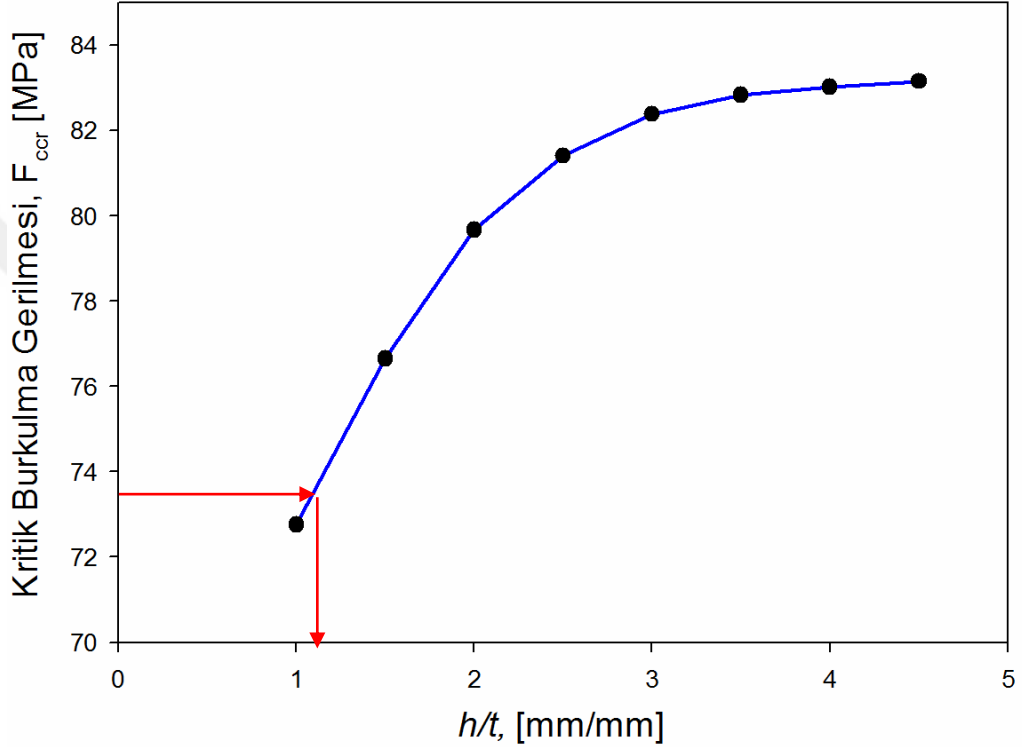


Şekil 4.8 Eğilme kuvveti altında h/t oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü



Şekil 4.9 Kayma kuvveti altında h/t oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü

Bu bölümde, yürütülen SE analizleri sonucu elde edilen eğriler yardımı ile güçlendirme etkisi ile sağlanan ağırlık kazancına değinilecektir. Çizelge 3.5'de saf yüklemeler altında deliksiz plakalar için elde edilen kritik burkulma gerilmesi değerleri sunulmuştur. Şekil 4.10 – 4.12 çizilen eğrilerde, Çizelgede verilen gerilme değerine denk gelen güçlendirme yüksekliği bulunmuştur. Bu yükseklik, bize sisteme delik açtığımız halde; sistemin deliksiz yapı kadar katılık göstereceği değeri belirtmiş olacaktır.



Şekil 4.10 Basma kuvveti altında h/t oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi

Basma yüklemesi altında elde edilen Şekil 4.10'daki eğriden görülebileceği üzere h/t oranı 1.2 olması durumunda, kritik burkulma gerilmesi değeri deliksiz yapı için elde edilen gerilme değerine (73.515 MPa) ulaşmaktadır. Plaka kalınlığı 2 mm olduğundan, 1.2 oranında h değeri 2.4 mm'e eşittir. Aşağıdaki hacimsel tabanlı bir ağırlık kazancı oranı yapılmıştır:

$$V_p = abt = 79200 \text{ mm}^3 \quad (4.1)$$

$$V_H = \pi d^2 t \div 4 = 5654.866 \text{ mm}^3 \quad (4.2)$$

$$V_S = (h-t)\pi((d+2w)^2 - d^2) \div 4 = 408.407 \text{ mm}^3 \quad (4.3)$$

$$V_G = V_H - V_S = 5246.459 \text{ mm}^3 \quad (4.4)$$

$$V_{Pyeni} = V_P - V_G = 73953.541 \text{ mm}^3 \quad (4.5)$$

Hacim kazancı oranı= $V_G / V_P = \%6.6$

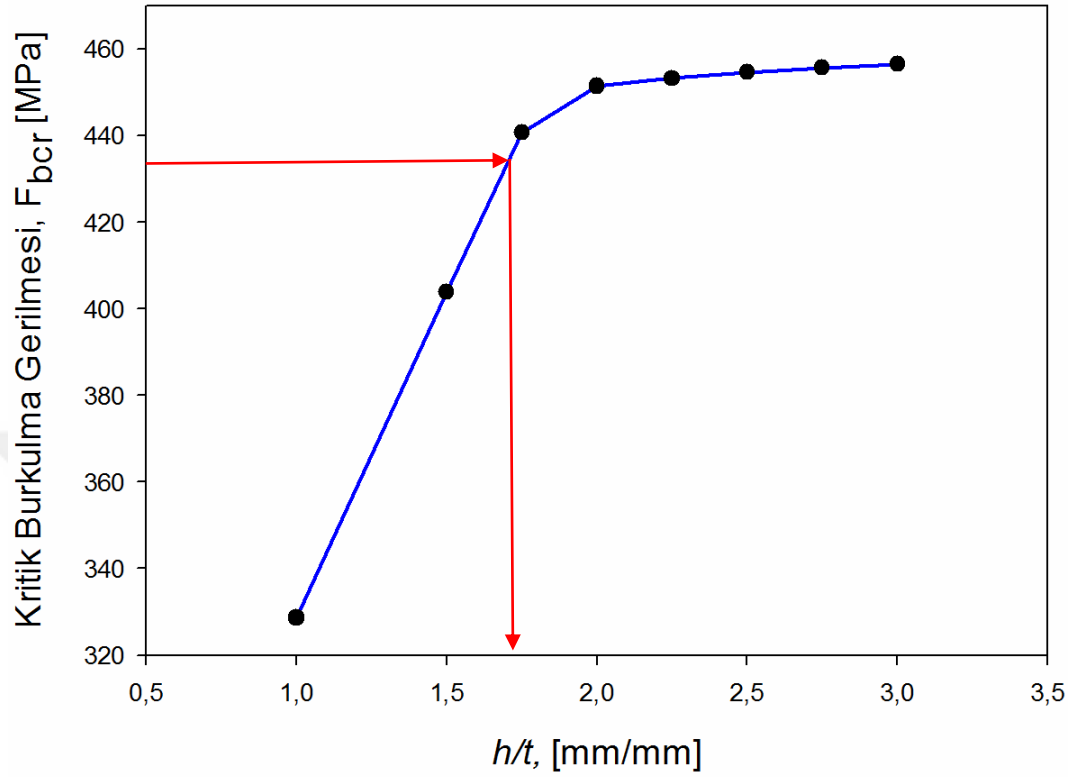
Eşitlik 4.1 – 4.5'de V_P, V_H, V_S ve V_{Pyeni} sırası ile plaka, delik, güçlendirme ve güçlendirme sonrası yeni oluşan plaka hacimlerini; V_G ise hacim kazancını temsil etmektedir. Yapılan hesaplar neticesinde; 0.5 d/b oranına sahip delikli bir plaka için 1.2 h/t oranında güçlendirme eklersek %6.6'lık bir ağırlık kazancı sağlandığını görmekteyiz.

Üsteki hesap ile deliksiz yapının kritik burkulma gerilmesi temel olarak hesaplar ve ağırlık kazancı sunulmuştur. Optimum tasarım için ise yeni plaka hacmi, V_{Pyeni} ile kritik burkulma gerilmesini, σ_{cr} oranlayarak bir yaklaşım sunulacaktır. Çizelge 4.1'de güçlendirme yüksekliğine bağlı SE analizinden elde edilen σ_{cr} ve Eşitlik 4.1 – 4.5 kullanılarak V_S ve V_{Pyeni} sunulmuş bu değerler oranlanarak V_{Pyeni} / σ_{cr} değeri elde edilmiştir. Bu değerinin en az olduğu tasarım optimum dizaynı vermektedir. Ayrıca bu yaklaşım ile elde edilen hacim-gerilme kazanım oranları yüzde cinsinde aynı çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Basma yükü altında güçlendirme yüksekliğine bağlı hacim-gerilme kazanımı oranı hesabı tablosu

h/t	σ_{cr} [MPa]	V_S [mm ³]	V_{Pyeni} [mm ³]	V_{Pyeni} / σ_{cr} [mm ³ /MPa]	Kazanım Oranı
Deliksiz	73.5	0.0	79200	1077	0.0%
1.2	73.5	408.4	73954	1006	6.6%
1.5	76.7	1021.0	74566	973	9.7%
2.0	79.7	2042.0	75587	949	11.9%
2.5	81.4	3063.1	76608	941	12.7%
3.0	82.4	4084.1	77629	942	12.5%
3.5	82.8	5105.1	78650	949	11.9%
4.0	83.0	6126.1	79671	960	10.9%
4.5	83.2	7147.1	80692	970	9.9%

Çizelge 4.1'de en büyük kazanım oranına bakıldığında saf basma yüklemesi altında optimum tasarım için en uygun h/t oranının 2.5 civarı olduğu söylenebilir.



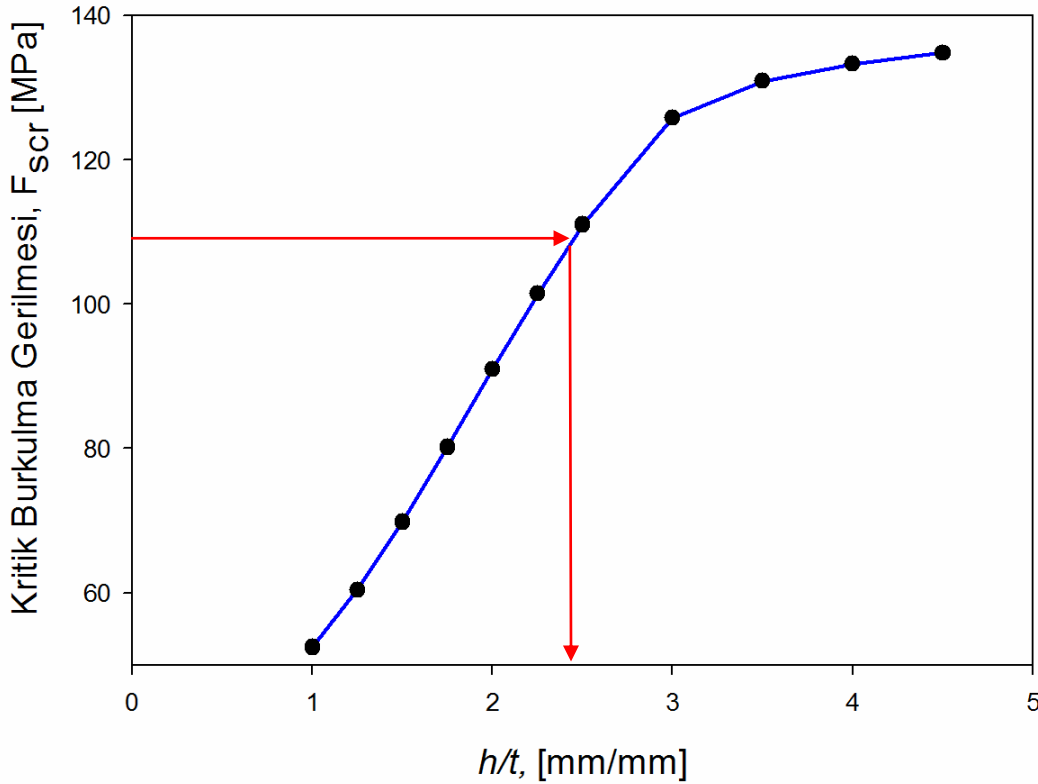
Şekil 4.11 Eğilme kuvveti altında h/t oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi

Şekil 4.11'de eğilme yüklemesi altında yürütülen analizler sonucu elde edilen egride gösterildiği üzere h/t oranı 1.7 olması durumunda, kritik burkulma gerilmesi değeri deliksiz yapı için elde edilen gerilme değerine (434.855 MPa) eşitlenmektedir. Saf basma yüklemesi için yürütülen hacim-gerilme kazanım oranı çalışması saf eğilme içinde yapılmış ve Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2'de en büyük kazanım oranına (yaklaşık %8) bakıldığında saf eğilme yüklemesi altında optimum tasarım için en uygun h/t oranının 2.0 civarı olduğu görmekteyiz.

Çizelge 4.2 : Eğilme yükü altında güçlendirme yüksekliğine bağlı hacim-gerilme kazanımı oranı tablosu

h/t	σ_{cr} [MPa]	V_S [mm ³]	V_{Pyeni} [mm ³]	V_{Pyeni} / σ_{cr} [mm ³ /MPa]	Kazanım Oranı
Deliksiz	434.9	0	79200	182	0.0%
1.5	403.9	1021	74566	185	-1.4%
1.7	434.9	1470	75015	173	5.3%
1.8	440.7	1532	75077	170	6.5%
2.0	451.4	2042	75587	167	8.1%
2.3	453.2	2553	76098	168	7.8%
2.5	454.6	3063	76608	169	7.5%
2.8	455.7	3574	77119	169	7.1%
3.0	456.6	4084	77629	170	6.6%



Şekil 4.12 Kayma kuvveti altında h/t oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi

Kayma yüklemesi altında h/t oranı 2.4 olması durumunda, kritik burkulma gerilmesi değeri deliksiz yapı için elde edilen gerilme değerine (107.775 MPa) ulaşmaktadır (Şekil 4.12). Diğer iki saf yükleme için yapılan hacim-gerilme kazanım oranı çalışması saf kayma için de yürütülmüş ve Çizelge 4.3'de sunulmuştur.

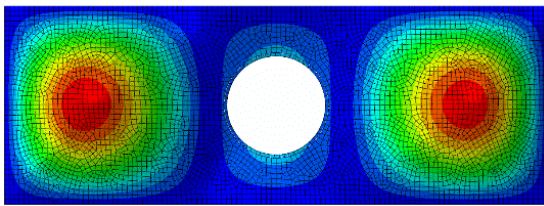
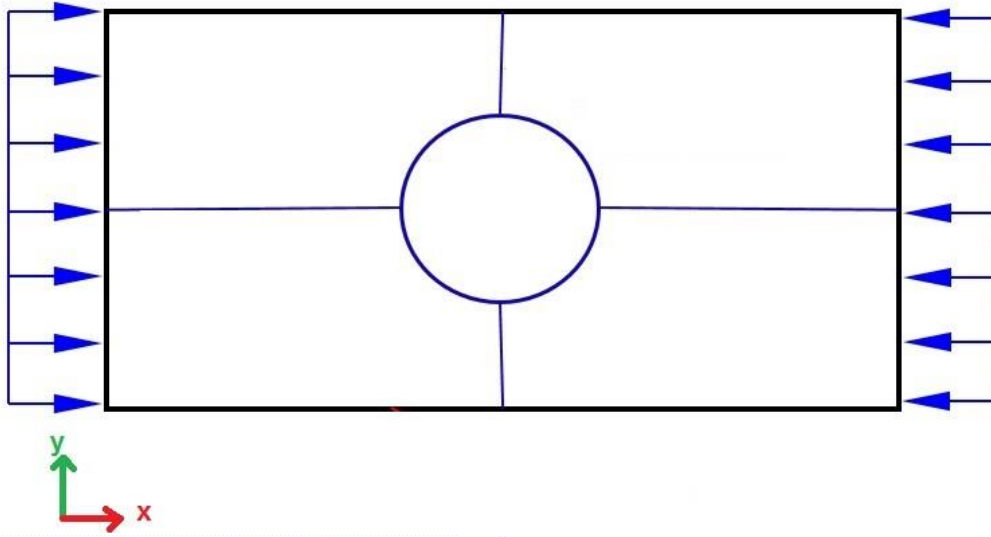
Çizelge 4.3 : Kayma yükü altında güçlendirme yüksekliğine bağlı hacim-gerilme kazanımı oranı tablosu

h/t	σ_{cr} [MPa]	V_S [mm ³]	V_{Pyeni} [mm ³]	V_{Pyeni} / σ_{cr} [mm ³ /MPa]	Kazanım Oranı
Deliksiz	107.8	0	79200	735	0.0%
1.5	69.8	1021	74566	1069	-45.4%
2.0	90.9	2042	75587	831	-13.1%
2.4	107.8	2874	76419	709	3.5%
2.5	111.0	3063	76608	690	6.1%
3.0	125.8	4084	77629	617	16.0%
3.5	130.9	5105	78650	601	18.3%
4.0	133.3	6126	79671	598	18.7%
4.5	134.8	7147	80692	598	18.6%

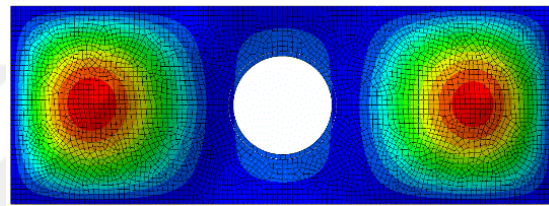
Çizelge 4.3'de hacim-gerilme kazanım oranının maksimum olduğu değere bakıldığında saf kayma yüklemesi altında optimum tasarım için en uygun h/t oranının 4-4.5 arası olduğunu söyleyebiliriz. Aynı Çizelgede kazanım oranlarını tekrar incelediğimizde h/t oranı 2.4'ün altında olması durumunda negatif kazanç yani faydasız bir tasarımla karşılaştığımızı görmekteyiz. Benzer durum saf basma ve saf eğilme yüklemesi için de geçerlidir fakat saf kayma yüklemesi fayda edilmesi için gereken yükseklik oranı değeri daha fazladır. Bu da tasarım esnasında dikkat edilmesi gereken bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

4.3 Güçlendirme Genişliği Delik Çapı Oranına (w/d) Bağlı Burkulma Analizi

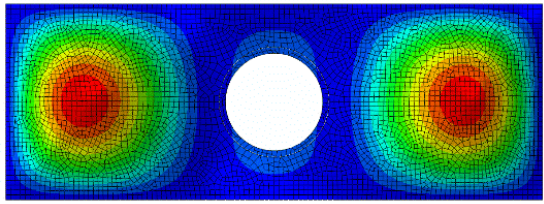
Şekil 4.13 – 4.15'de sırası ile saf basma, saf eğilme ve saf kayma yüklemeleri altında güçlendirme genişliği delik çapı oranına (w/d) bağlı burkulma SEA çıktı sonuçları sunulmuştur. Analizlerde kullanılan geometrik parametreler a , b , d , t sırasıyla 330 mm, 120 mm, 60 mm, 2 mm ve h ise basma yükü için 6 mm, eğilme ve kayma analizleri için 4 mm'dir. Her 3 görselde de görüldüğü üzere w/d oranı arttıkça burkulma delik etrafından panelin diğer bölgelerine doğru geçmektedir. Bu nedeni tıpkı güçlendirme yüksekliği artırılınca olduğu gibi w değeri de genişletilince katılık değeri (stiffness) artmaktadır.



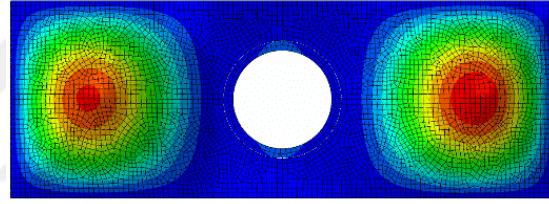
$w/d = 0.03$ - EigenValue= 160.20 N/mm



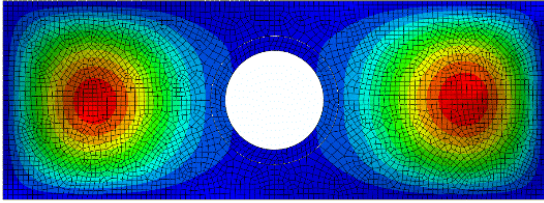
$w/d = 0.05$ - EigenValue= 162.44 N/mm



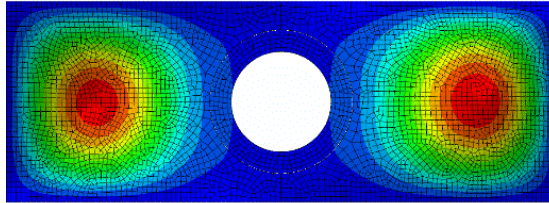
$w/d = 0.07$ - EigenValue= 163.74 N/mm



$w/d = 0.12$ - EigenValue= 166.33 N/mm

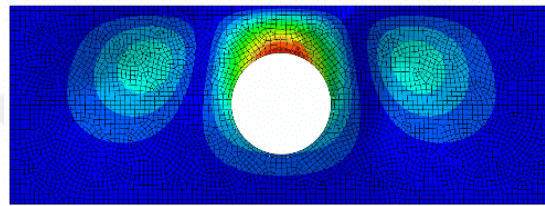
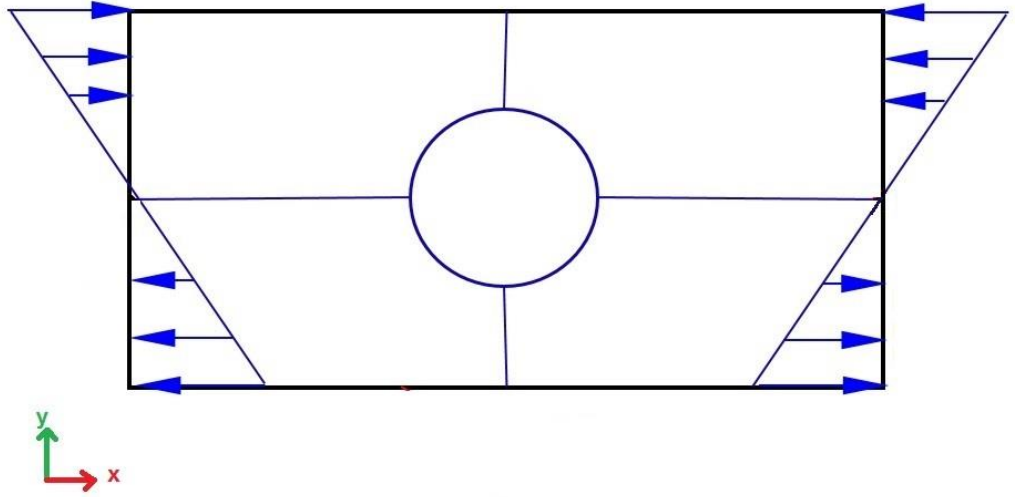


$w/d = 0.15$ - EigenValue= 167.42 N/mm

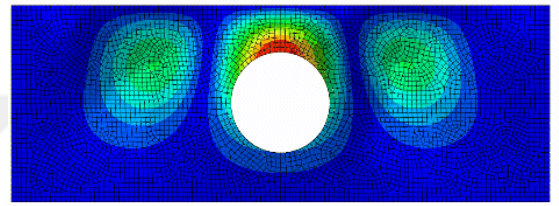


$w/d = 0.22$ - EigenValue= 169.71 N/mm

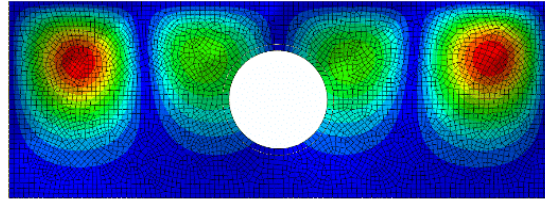
Şekil 4.13 Basma kuvveti altında w/d oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü



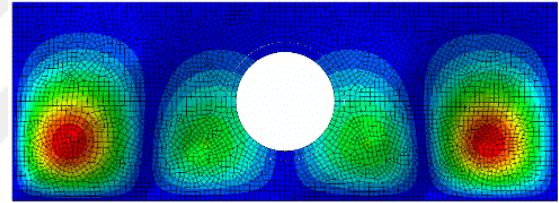
$w/d = 0.03$ - EigenValue= 782.32 N/mm



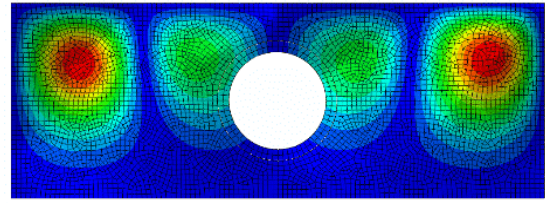
$w/d = 0.05$ - EigenValue= 870.42 N/mm



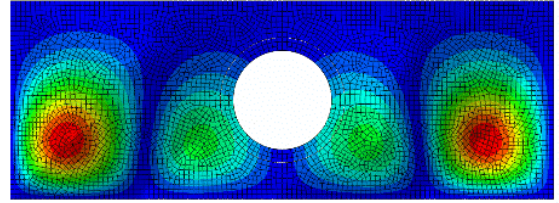
$w/d = 0.07$ - EigenValue= 900.10 N/mm



$w/d = 0.10$ - EigenValue= 905.26 N/mm

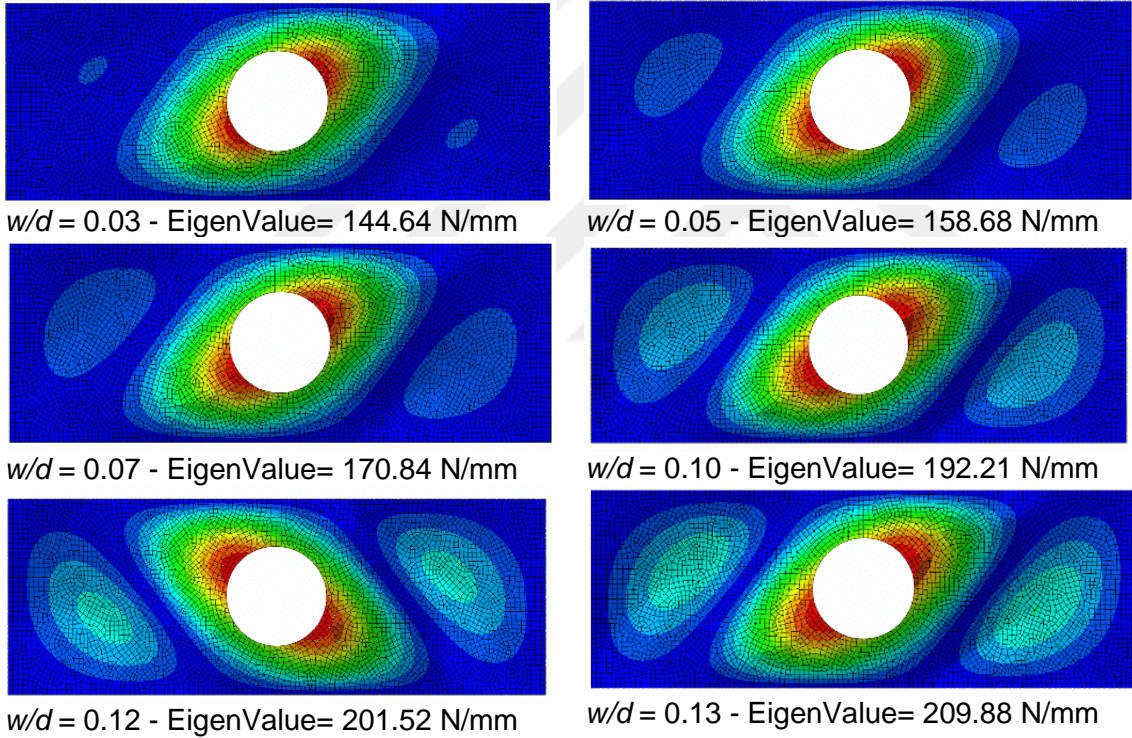
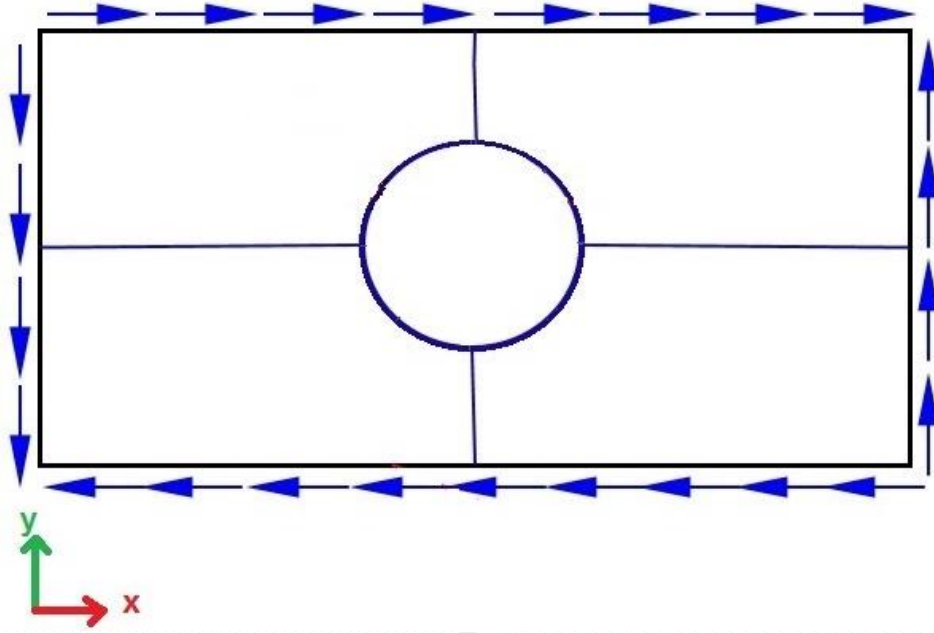


$w/d = 0.12$ - EigenValue= 907.27 N/mm



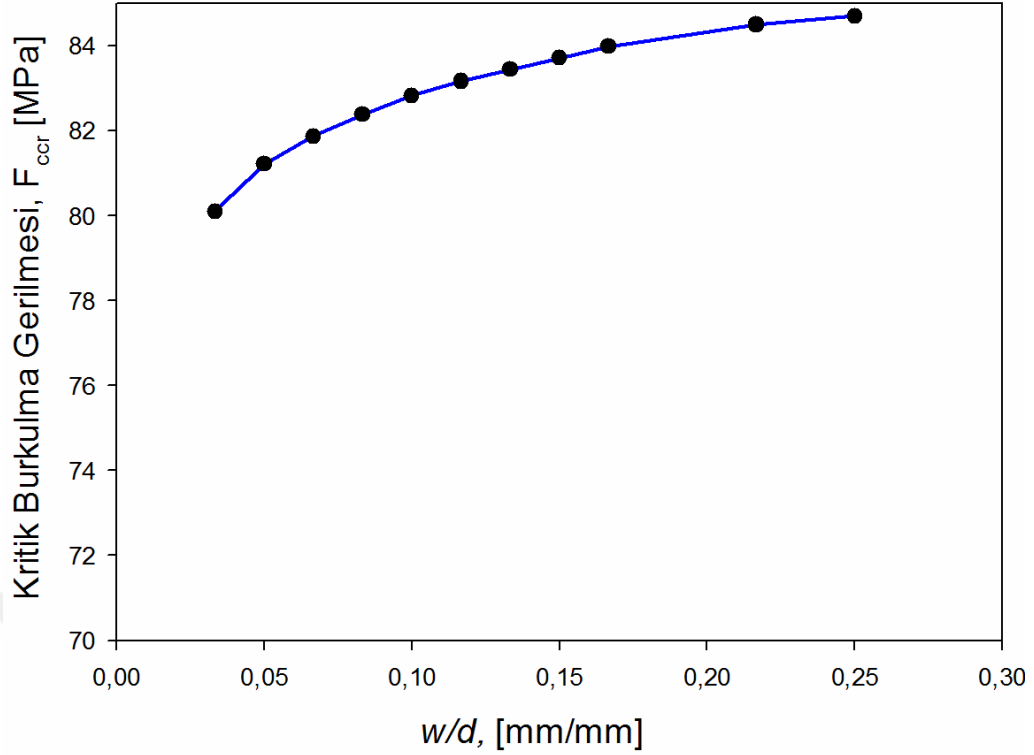
$w/d = 0.13$ - EigenValue= 909.01 N/mm

Şekil 4.14 Eğilme kuvveti altında w/d oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü



Şekil 4.15 Kayma kuvveti altında w/d oranına bağlı burkulma SEA görüntüsü

Şekil 4.16 – 4.15'de yürütülen analizler sonucunda elde edilen w/d oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrileri sunulmuştur. h/t değişime bağlı yapılan optimum tasarım çalışması w/d parametresi için de yürütülmüştür.

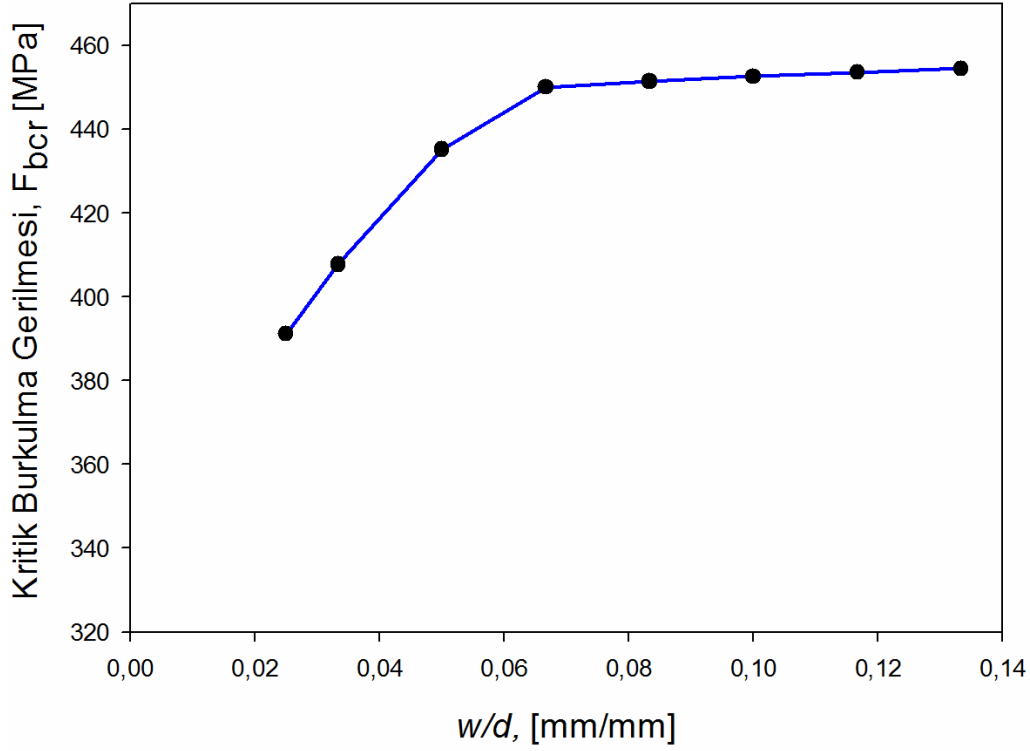


Şekil 4.16 Basma kuvveti altında w/d oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi

Şekil 4.16'da saf basma yüklemesi altında kritik burkulma gerilmesi eğrisi oluşturulurken kullanılan analiz sonuçları, σ_{cr} ve h optimizasyon çalışmasında belirtilen hacim değerleri V_S ve V_{Pyeni} Çizelge 4.4'de sunulmuştur. Çizelgenin son sütununda verilen hacim-gerilim kazanım oranlarına bakıldığında; en büyük kazanım oranına w/d 0.05 civarında iken ulaştığı görülmektedir.

Çizelge 4.4 : Basma yükü altında güçlendirme genişliğine bağlı hacim-gerilme kazanımı oranı hesabı tablosu

w/d	σ_{cr} [MPa]	V_S [mm ³]	V_{Pyeni} [mm ³]	V_{Pyeni} / σ_{cr} [mm ³ /MPa]	Kazanım Oranı
Deliksiz	73.5	0	79200	1077	0.0%
0.03	80.1	1558	75103	938	13.0%
0.05	81.2	2375	75920	935	13.2%
0.07	81.9	3217	76762	938	13.0%
0.08	82.4	4084	77629	942	12.5%
0.10	82.8	4976	78521	948	12.0%
0.12	83.2	5894	79439	955	11.3%
0.13	83.4	6836	80381	963	10.6%
0.15	83.7	7804	81349	972	9.8%

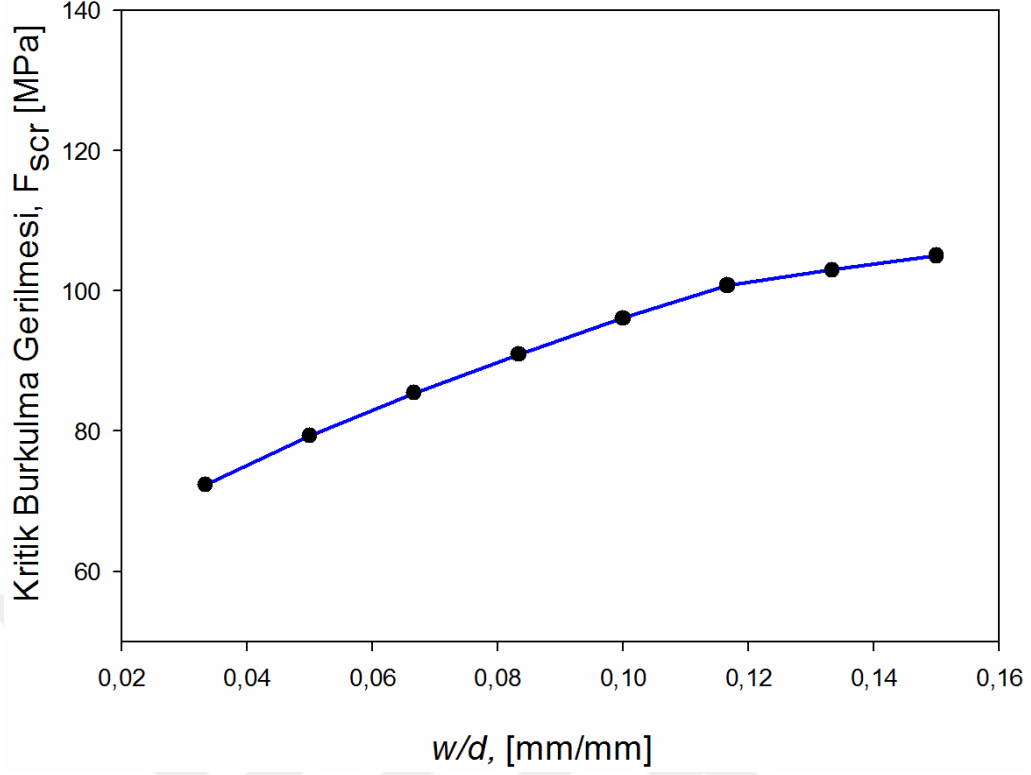


Şekil 4.17 Eğilme kuvveti altında w/d oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi

Şekil 4.17'de saf eğilme yüklemesi altında kritik burkulma gerilmesi eğrisi çizilirken kullanılan analiz değerleri, σ_{cr} , V_S , V_{Pyeni} ve V_{Pyeni} / σ_{cr} verileri Çizelge 4.5'de tablolanmıştır. Çizelgedeki hacim-gerilim kazanım oranlarına bakıldığında; w/d 0.07 civarında iken en büyük kazanım oranına ulaşmıştır.

Çizelge 4.5 : Eğilme yükü altında güçlendirme genişliğine bağlı hacim-gerilme kazanımı oranı tablosu

w/d	σ_{cr} [MPa]	V_S [mm ³]	V_{Pyeni} [mm ³]	V_{Pyeni} / σ_{cr} [mm ³ /MPa]	Kazanım Oranı
Deliksiz	434.9	0	79200	182	0.0%
0.03	391.2	580	74125	189	-4.0%
0.03	407.8	779	74324	182	-0.1%
0.05	435.2	1188	74733	172	5.7%
0.07	450.1	1608	75154	167	8.3%
0.08	451.4	2042	75587	167	8.1%
0.10	452.6	2488	76033	168	7.8%
0.12	453.6	2947	76492	169	7.4%
0.13	454.5	3418	76963	169	7.0%



Şekil 4.18 Kayma kuvveti altında w/d oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrisi

Saf kayma yüklemesi altında kritik burkulma gerilmesi eğrisi Şekil 4.18'de sunulmuştur. Çizelge 4.6'da kritik burkulma değerleri, σ_{cr} , V_S , V_{Pyeni} ve V_{Pyeni} / σ_{cr} verileri verilmiştir. w/d oranı 0.13'e ulaşana kadar sisteme eklenen güçlendirmenin faydalı olmadığı görülmektedir. Tıpkı yine kayma yüklemesi altında yürütülen h/t çalışmasında belirtildiği gibi w/d optimizasyonunda tasarımcıların dikkat etmesi gerekecektir.

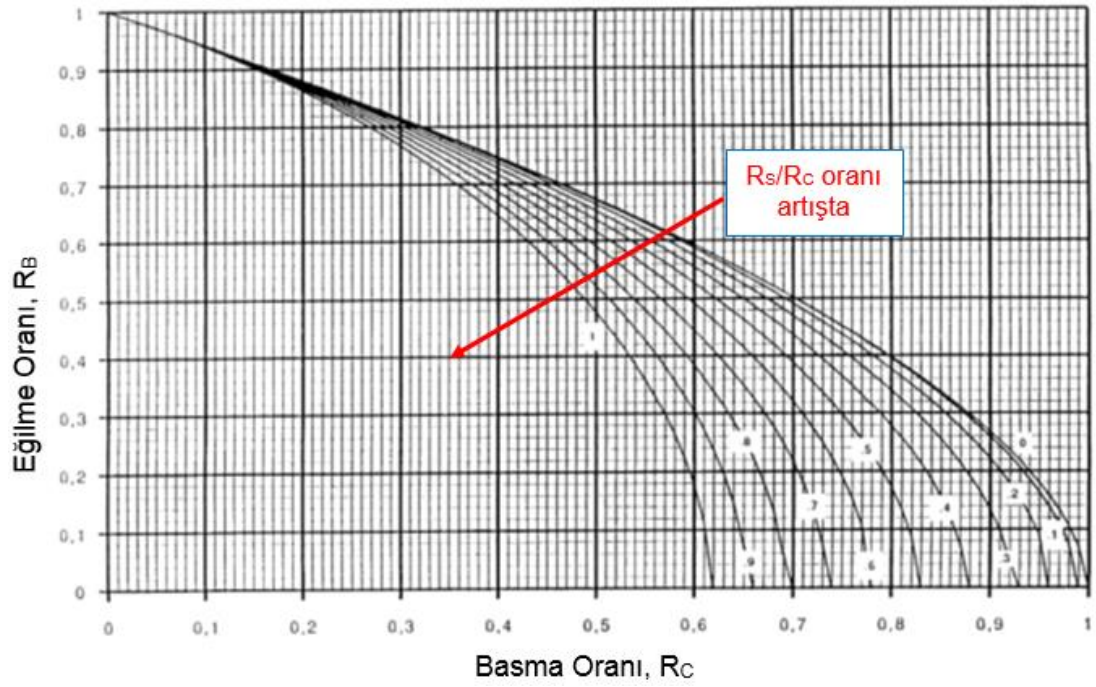
Saf yüklemeler altında yürütülen burkulma analizleri sonucu elde edilen 9 eğri ile hem bir dizayn yaklaşımı sunulmuş hem de bir sonraki bölümde birleşik yüklemelerde oluşturulan etkileşim eğrisinde kullanılacaktır.

Çizelge 4.6 : Kayma yüklemesi için güçlendirme genişliğine bağlı hacim-gerilme kazanımı oranı hesabı tablosu

w/d	σ_{cr} [MPa]	V_s [mm ³]	V_{Pyeni} [mm ³]	V_{Pyeni} / σ_{cr} [mm ³ /MPa]	Kazanım Oranı
Deliksiz	107.8	0	79200	735	0.0%
0.03	72.3	779	74324	1028	-39.9%
0.05	79.3	1188	74733	942	-28.2%
0.07	85.4	1608	75154	880	-19.7%
0.08	90.9	2042	75587	831	-13.1%
0.10	96.1	2488	76033	791	-7.7%
0.12	100.8	2947	76492	759	-3.3%
0.13	104.9	3418	76963	733	0.2%
0.15	109.4	3902	77447	708	3.7%

5. BİRLEŞİK YÜKLEME VE ETKİLEŞİM EĞRİSİ

Bu bölümde yürütülen çalışmalarda, J. Huet(1999) havacılık yapısal el kitabında yer alan deliksiz plakalarda birleşik yükler altında etkileşim eğrisi çalışması referans alınmıştır. Şekil 5.1'de oluşturulan eğride R_C , R_B ve R_S birimsiz oranlar vardır. Bu katsayıların hesaplanması, işlem adımları, etkileşim eğrisi için gerekli olan SEA sonuçları, delikli yapılarda etkileşim eğrisi ve delik etrafı güçlendirme yapısına sahip plakalar için etkileşim eğrileri sunulacak ve yorumlanacaktır.



Şekil 5.1 : Referansta yer alan deliksiz plakalar için yürütülen etkileşim eğrisi (J.Huet,1999)

İlk olarak kullanıcının geometrik parametreleri belirlemesi gerekmektedir. Ve bu geometrik parametrelere bağlı saf yüklemeler için oluşturulan eğriler yardımı ile basma, eğilme ve kayma kritik burkulma gerilimleri (F_{ccr} , F_{bcr} ve F_{scr}) hesaplanır. Baz alınan geometri girdileri ve güçlendirmesiz delikli plaka için elde edilen kritik

burkulma gerilmesi değerleri izelge 5.1'de güçlendirmeli delikli plaka için değerler ise izelge 5.2'de tablolanmıştır.

Çizelge 5.1 : Delikli plakalarda etkileşim eğrisi çalışmasında kullanılan geometrik parametreler ve kritik burkulma gerilmeleri

a [mm]	b [mm]	d [mm]	h [mm]	w mm]	F_{ccr} [MPa]	F_{bcr} [MPa]	F_{scr} [MPa]
330	120	60	0	0	69.9	328.6	52.4

Çizelge 5.2 : Delik etrafı güçlendirmeli plaka için etkileşim eğrisi çalışmasında kullanılan geometrik parametreler ve kritik burkulma gerilmeleri

a [mm]	b [mm]	d [mm]	h [mm]	w mm]	F_{ccr} [MPa]	F_{bcr} [MPa]	F_{scr} [MPa]
330	120	60	4	5	79.7	451.4	90.9

Şekil 5.1'deki deliksiz referans eğrisinin doğrulanması için 75, güçlendirmesiz ve güçlendirmeli delikli plakalar için de 75'er olmak üzere toplam 225 farklı birleşik yükleme oranlarında burkulma analizleri yürütülmüştür. Ek.6'da güçlendirmesiz delikli modeller için Ek.7'de ise delik etrafı güçlendirmeli modeller için yürütülen sonlu elemanlar analizi sonuç görüntüleri verilmiştir. Bu analizler sayesinde birleşik yüklemeler altında dayanabileceği burkulma gerilmesi, σ_{all} bulunmuştur.

Yürütülen SE analizlerinin düzenli olması adına yükleme modellerine kodlama yapılmış ve her kiriş yüklemesi KRS olarak numaralandırılmıştır. KRS100-180 9 saf yükleme eğrisi, KRS200-275 deliksiz etkileşim eğrisi doğrulanması, KRS300-375; Şekil 5.2'deki güçlendirmesiz delikli etkileşim eğrisi ve KRS400-475; Şekil 5.3'de gösterilen güçlendirmeli delikli etkileşim eğrisi oluşturulması için yürütülen SEA kodları aralığıdır.

Uygulanan (applied) basma yükü, uygulanan eğilme yükü ve uygulanan kayma yükü oranları sırası ile C , B , ve S olarak tanımlanmıştır. Basma oranı, R_C , eğilme oranı, R_B ve kayma oranı, R_S sırası ile Eşitlik 5.1 – 5.3'deki formüllerle hesaplanmaktadır:

$$R_C = C \frac{\sigma_{all}}{F_{ccr}}, \quad (5.1)$$

$$R_B = B \frac{\sigma_{all}}{F_{bcr}}, \quad (5.2)$$

$$R_S = S \frac{\sigma_{all}}{F_{scr}}, \quad (5.3)$$

R_C , R_B ve R_S etkileşim eğrisini oluşturmak için elde edilen dayanabileceği oranlardır. Etkileşim eğrisinin kullanımı için ise uygulanan oranlara ihtiyaç olacaktır. Uygulanan basma oranı R_C^A , uygulanan eğilme oranı, R_B^A ve uygulanan kayma oranı,

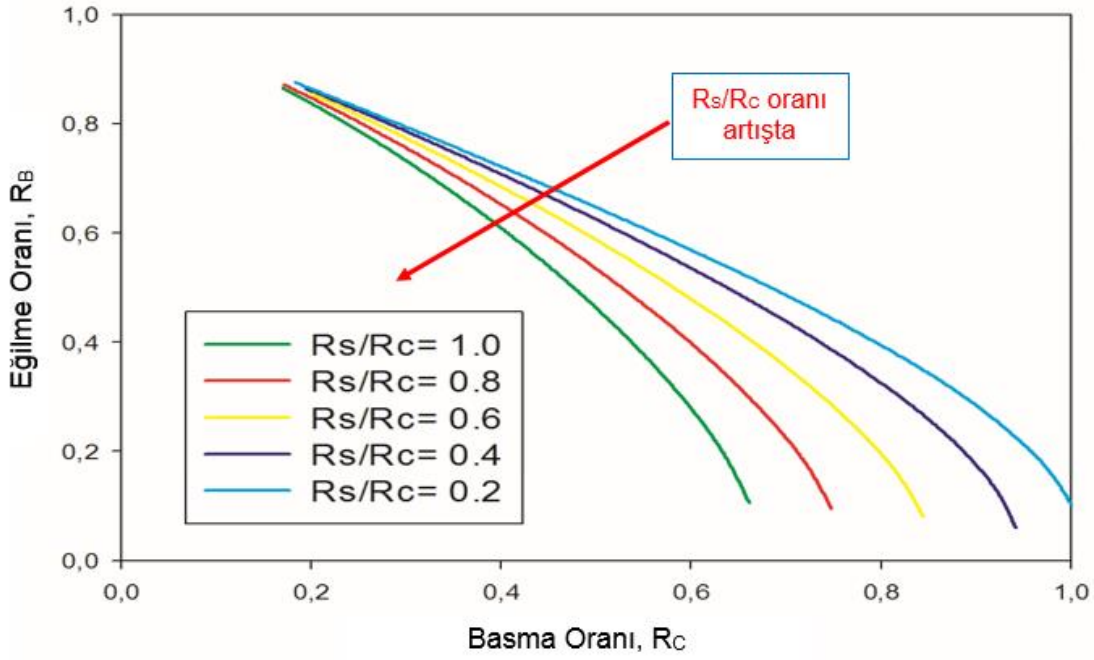
R_S^A şu şekilde hesaplanacaktır:

$$R_C^A = \frac{\sigma_C}{F_{ccr}} \quad (5.4)$$

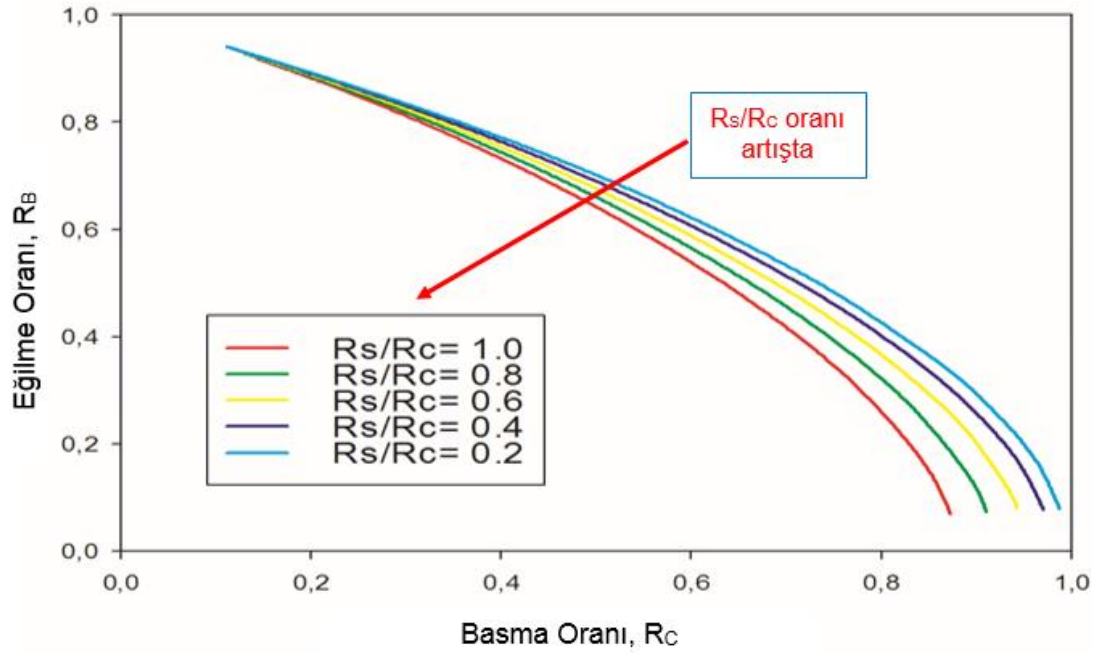
$$R_B^A = \frac{\sigma_B}{F_{bcr}} \quad (5.5)$$

$$R_S^A = \frac{\tau_{max}}{F_{scr}} \quad (5.6)$$

0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ve 1.0 olmak üzere beş kayma/basma (R_S / R_C) yükleme oranı belirlenmiştir. Kayma yükü oranı, S tüm hesaplamalarda 1.0 olarak alınır. Basma yükü oranı, C ise kayma yükü oranı göre hesaplanır. Beş yükleme oranı için, 15 farklı eğilme yükü oranı, B için analizler yürütülmüştür. Yürütülen 75 analiz sonucu elde edilen R_C , R_B ve R_S oranları ve σ_{all} değerleri güçlendirmesiz delikli yapılar için olanları Ek.6'da, güçlendirmeli delikli yapılar için olanları ise Ek.7'de Çizelge halinde verilmiştir. Bu işlemler sonrasında, R_S / R_C değişimine bağlı $R_B - R_C$ etkileşim eğrileri oluşturulmuştur.



Şekil 5.2 : Delikli plakalar için yürütülen etkileşim eğrisi

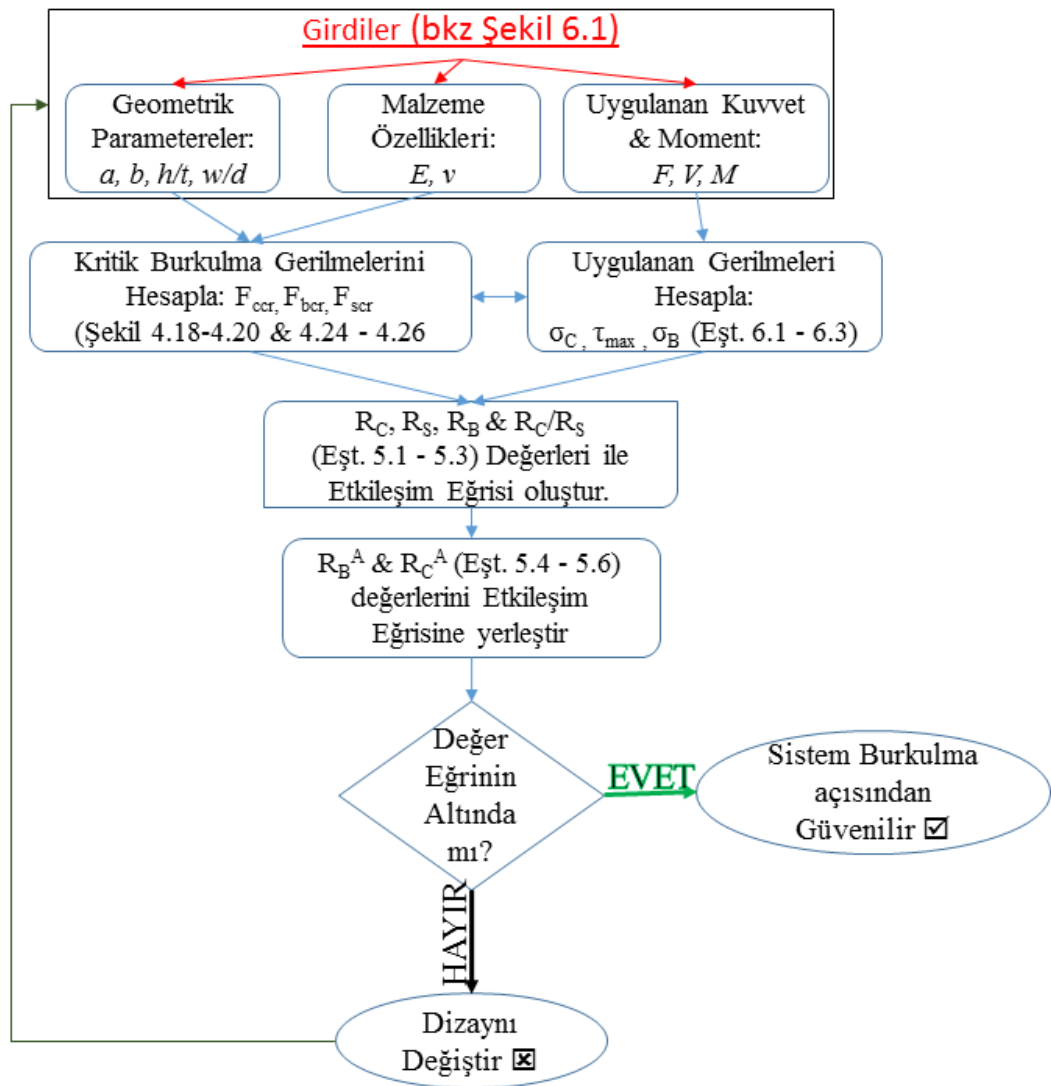


Şekil 5.3 : Delik etrafı güçlendirmeye sahip plakalar için yürütülen etkileşim eğrisi

Kullanıcı, belirlediği geometrik parametreler ve uyguladığı yüklemelere bağlı elde ettiği R_C^A ve R_B^A değerleri Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de yerine koyduğunda; eğer oranlar ilgili etkileşim eğrisinin altında kalırsa sisteminin burkulma açısından dayanımlı olduğuna karar verebilecektir. Eğrinin üstünde kalması halinde ise güçlendirme kalınlığını veya yüksekliğini artırarak yeniden etkileşim eğrisi işlemi yapması

gerecektir. Şekil 5.1 – 5.3 karşılaştırıldığında Şekil 5.3'te eğriler altında kalan alanın diğerlerine oranla daha geniş olduğu görülmektedir. Bu da bize delikli güçlendirmeli yapıların, deliksiz ve güçlendirmesiz delikli yapılardan burkulma açısından daha fazla dayanıklı olduğunu göstermektedir.

Tez sürecinde yürütülen işlemler, etkileşim eğrisi oluşturma ve sistemi kontrol etme süreci, Şekil 5.4'de akış şeması (flowchart) halinde sunulmuştur.



Şekil 5.4 : Etkileşim eğrisi metodu akış şeması



6. ETKİLEŞİM EĞRİSİNİ KULLANIMI NÜMERİK ÖRNEĞİ

Kullanıcıların etkileşim eğrisi kullanımını daha kolay kavrayabilmesi adına adım adım bir nümerik örnekleme verilecektir.

1) Kullanıcı Şekil 6.1'de görüldüğü üzere ilgili bölgenin; kiriş geometrisini (a , b , h_0 , w ve d) ve kesit özelliklerini t , t_f ve w_f) belirler. Bu örnek için tanımlanan geometrik ve kesit alanı parametreleri Çizelge 6.1'de sunulmuştur. Kiriş malzemesi olarak da Al 7075 T651 ($E= 71700$ [MPa] ve $\nu= 0.33$) seçilmiştir. SE analizi ile kesite etki eden normal kuvvet, F , kayma kuvveti, V ve moment, M elde edilir. Kuvvetler ve moment Şekil 6.1'de çizilmiş ve Çizelge 6.2'de değerler tablo halinde sunulmuştur.

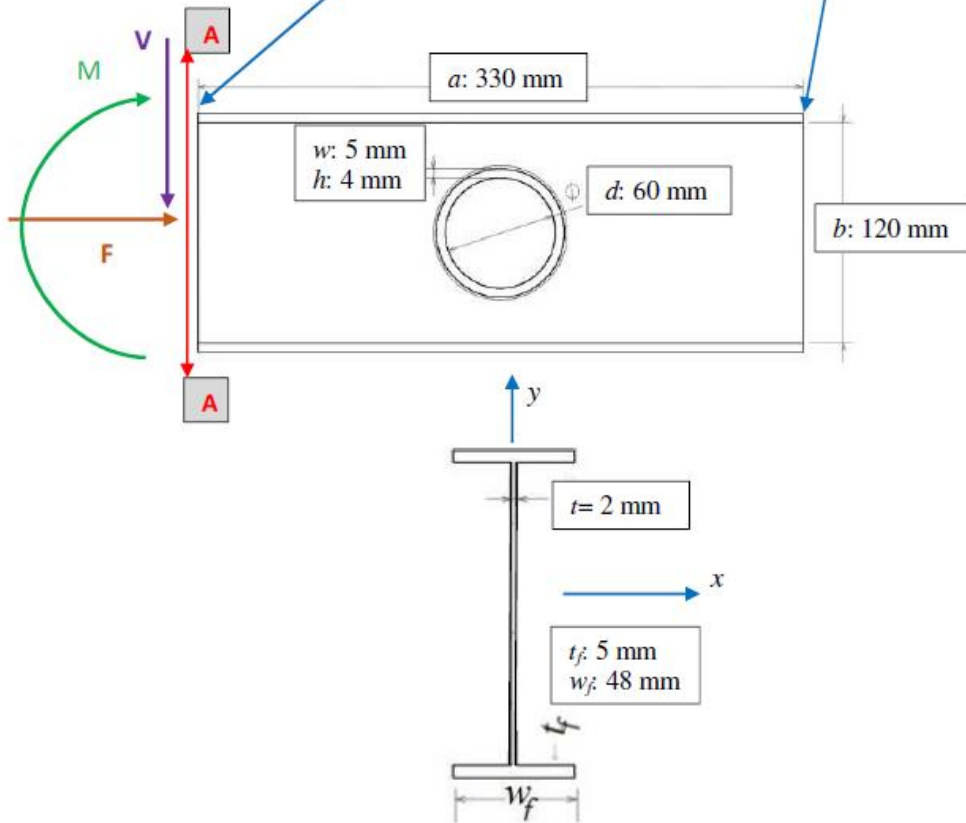
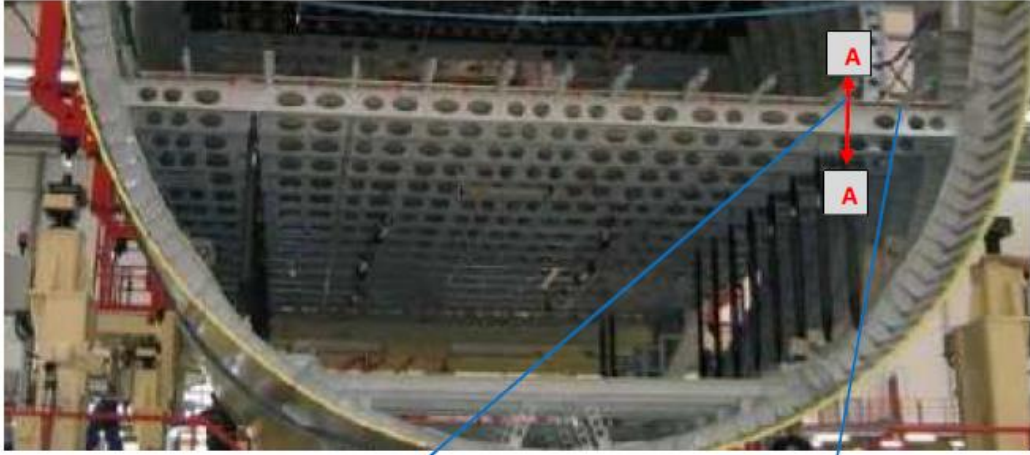
2) Şekil 6.1'deki geometrik parametreleri (Çizelge 6.1) ve kritik burkulma gerilmesi eğrilerini kullanarak; gerilme değerleri şu şekilde bulunacaktır:
 $F_{ccr} = 76.65$ MPa (Şekil 4.10), $F_{bcr} = 403.92$ MPa (Şekil 4.11) ve
 $F_{scr} = 69.78$ MPa (Şekil 4.12).

Çizelge 6.1 : Nümerik örnek için geometrik parametreler ve atalet momenti

a [mm]	b [mm]	d [mm]	h_0 [mm]	w [mm]	t [mm]	t_f [mm]	w_f [mm]
330.0	120.0	60.0	3.0	5.0	2.0	5.0	48.0
A [mm ²]	Q [mm ³]	I_x [mm ⁴]	I_y [mm ⁴]	h_l [mm]			
720	18600	2164000	92240	3.0			

Çizelge 6.2 : Nümerik örnek için uygulanan kuvvetler, moment ve hesaplanan gerilmeler

F [N]	V [N]	M [N mm]	σ_C [MPa]	τ_{xy} [MPa]	σ_B [MPa]	C	S	B
31680	9310	7990000	44	40	240	1.1	1.0	6.0



Şekil 6.1 : Yolcu uçağı zemin kirişi kesit görüntüsü alma örneğı

3) Uygulanan basma, σ_C , kayma, τ_{max} ve eğilme, σ_B gerilmeleri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\sigma_C = \frac{F}{A} \quad (6.1)$$

$$\sigma_B = \frac{Mc}{I_x} \quad (6.2)$$

$$\tau_{max} = \frac{VQ}{I_x t} \quad (6.3)$$

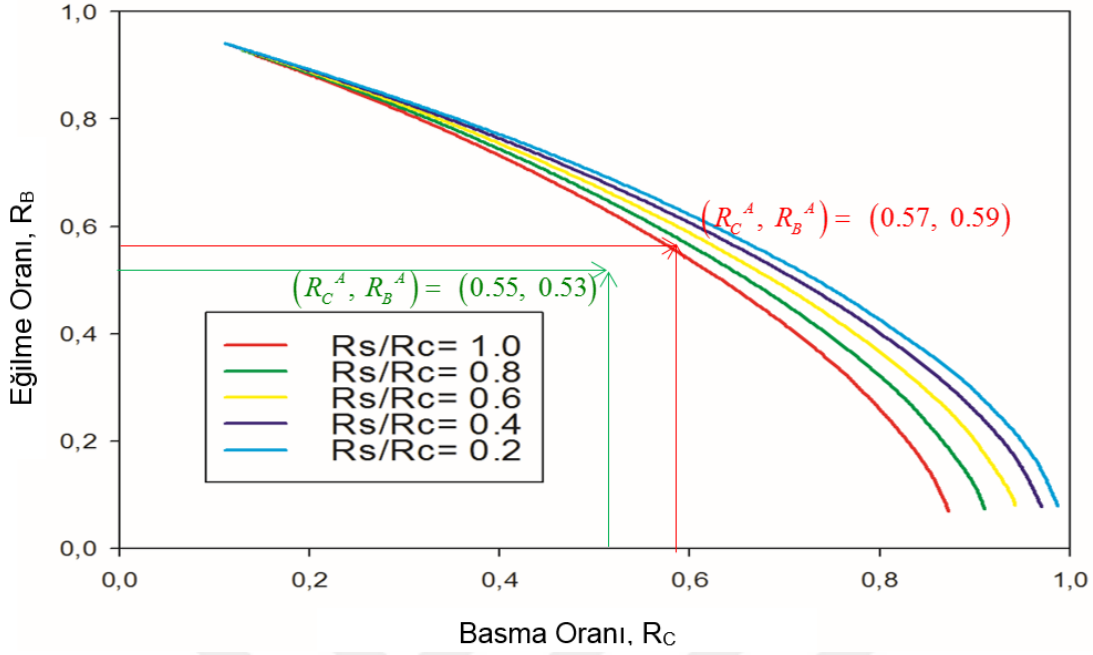
Eşitliklerde A , kesit alanını, Q , ilk atalet momenti, I_x , x eksenine göre atalet momentini ve c ise kiriş boyunun yarısını ($c = b/2 + t_f = 65$ mm) ifade etmektedir. Çizelge 6.1'deki geometrik parametreler ve Çizelge 6.2'de verilen uygulanan yük değerlerini Eşitlik 6.1 – 6.3'de yerine koyduğumuzda; basma, eğilme ve kayma gerilmeleri sırası ile şu şekilde hesaplanmıştır: $\sigma_C = 44$ [MPa], $\sigma_B = 240$ [MPa] ve $\tau_{max} = 40$ [MPa].

4) Etkileşim eğrisi yaklaşımımızın uygulanması için kayma yükü oranı, S 1.0 olarak alınır. Bu nedenle 3. adımda elde edilen tüm gerilme değerleri kayma gerilmesine (40 [MPa]) bölünür. Ve böylelikle C , S ve B sırası ile 1.1, 1.0 ve 6.0 olarak elde edilir (Çizelge 6.2). Ek.7'deki Çizelgelerin kullanılabilmesi için ilk olarak R_S/R_C oranına ihtiyacımız olacak. Eşitlik 5.1 ve Eşitlik 5.3 kullanılarak R_S/R_C oranı 1.0 olarak bulunur.

5) Eşitlik 5.4 – 5.6'da uygulanan basma oranı, R_C^A , eğilme oranı, R_B^A ve kayma oranı, R_S^A sırasıyla 0.57, 0.59 ve 0.57 olarak hesaplanmıştır.

6) Şekil 6.2'de gösterildiği üzere R_C^A ve R_B^A değerleri etkileşim eğrisi üzerine yerleştirilir. Şekilde, kırmızı renkte gösterilen $R_S/R_C = 1.0$ eğrisine baktığımızda uygulanan basma ve eğilme oranlarının eğrinin üstünde kaldığını görmekteyiz.

7) Bu durumda kullanıcı akış şemasında başa dönerek güçlendirme parametrelerini, kullandığı malzemeyi veya sistemine maruz kalan yükü değiştirmesi gerekecektir. Örnekte 3.0 olan h_0 değeri 4.0 olarak değiştirilmiş ve h_1 şeklinde ifade edilmiştir.



Şekil 6.2 : Etkileşim eğrisi kullanma örneği

8) Güçlendirme yüksekliği değeri güncellenerek kritik burkulma gerilme değerleri aynı işlemleri izleyerek şu şekilde bulunmuştur: $F_{ccr} = 79.67$ MPa,

$F_{bcr} = 451.42$ MPa ve $F_{scr} = 90.94$ MPa.

9) Aynı formüller uygulandığında oranlar sırası ile $R_S/R_C = 0.8$, $R_C^A = 0.55$, $R_B^A = 0.53$ ve $R_S^A = 0.44$ olarak hesaplanmıştır.

10) Yeni bulunan R_C^A ve R_B^A yeniden etkileşim eğrisi üzerine yerleştirilir. Şekil 6.2'de, yeşil renkte gösterilen $R_S/R_C = 0.8$ eğrisine baktığımızda bu kez uygulanan basma ve eğilme oranlarının eğrinin altında kaldığını gözlemlenmektedir. Kullanıcı, ikinci bir kontrol olarak Ek.7'de elde edilen Çizelgeleri kullanabilir. Örnek yükleme oranlarını ($C = 1.1$, $S = 1.0$ ve $B = 6.0$) KRS422 numune kodunu temsil ettiğini görmekteyiz. Bu numune kodu için

$R_C= 0.594$ ve $R_B= 0.572$ 'e eşittir ve bu değerler uygulanan R_C^A (0.55) ve R_B^A (0.53) (9. adımda hesaplanmıştır) değerlerinden daha yüksektir.

Sonuç olarak, nümerik örnekte verilen yüklemeler altında zemin kirişi ilk olarak burkulma açısından güvenilir olmadığı görülmüş daha sonra güçlendirme yüksekliği artırılarak burkulma açısından güvenilir hale getirilmiştir.





7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek lisans tezimde temel hedef, birleşik yüklemeler altında burkulma davranışına karşı bir dizayn stratejisi belirlemektir. Burkulma analizleri, havacılık ve savunma endüstrilerinde sıklıkla başvuru alan delik etrafı güçlendirilmiş kiriş yapısı için yürütülmüştür.

İlk olarak literatürde yer alan uluslararası makaleler ve ulusal tezlerden konu ile ilgili çalışmalar taranmıştır. Bazılarında güçlendirmeyi ((Cheng,2010), (Eiblmeier,1997)) de ele alan farklı yükleme koşullarında çeşitli tipte deliğe (dikdörtgen (Cai,2016) daire (Komur,2015), altıgen (Wang,2014)) sahip yapılar için birçok burkulma analizi araştırması incelenmiştir. Ancak aynı anda saf basma, saf eğilme ve saf kayma yüklerinin aynı anda uygulandığı birleşik yükler altında burkulma analizi çalışmasına rastlanamamıştır.

Geometri ve yükleme açısından parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Öncelikle kiriş ebadı ve güçlendirme boyut oranlarına bağlı tasarım süreci ve malzeme belirlenmesi anlatılmıştır. Daha sonra analiz sürecine başlamadan kullanılan SE programı, hem literatürde yer alan test sonuçları ve farklı bir program ile yürütülen çalışmalarla hem de analitik hesaplarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen eğrilerin davranışının birbirine benzer ve hata oranları %1'in altında olduğu sonucu çıkmış ve böylelikle kullandığımız program doğrulanmıştır. Başta çözüm ağı çalışması ve sınır şartlarının belirlenmesi olmak üzere SE programının nasıl kullanılacağı çok önem arz etmektedir. Adım adım sonlu elemanlar kullanımı prosesleri sunulmuştur.

Analizlerin ilk aşamasında, saf yüklemeler altında farklı geometrik parametrelerde SEA yürütülerek, kritik burkulma gerilmesi eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler ile hacim-gerilme kazancı yaklaşımı kriterine bağlı olarak; optimum güçlendirme yükseklik - genişlik hesabı yapılmıştır. Saf yükleme altında elde edilen gerilme

değerleri ve uygulanan yüklere bağlı yük oranları ile etkileşim eğrileri oluşturulmuştur. Etkileşim eğrisinin kullanımına kadar gelen işlemler akış şeması halinde gösterilmiştir (Şekil 5.2).

Tez çalışması sonucu elde edilen etkileşim eğrilerinin yardımı ile mühendisler, tasarım parametrelerine ve sistemlerinin maruz kalacağı yük koşullarına bağlı olarak sistemlerinin burkulma açısından dayanımlı olup olmayacağını gözlemleyebilecektir.

Önümüzdeki dönemdeki hedeflerimiz ise tasarlanan kiriş geometrilerinin, test ortamında burkulmalarının gözlemlenmesi ve böylelikle SE çalışmalarının test datalarımız ile doğrulanmasını sağlamak olacaktır. Bu kapsamda test edilmeye uygun şekilde 20 numune, analizlerde kullandığımız alüminyum malzemedan, talaşlı imalat yöntemi ile üretilmiştir. Aynı zamanda oluşturulan saf yükleme eğrilerinin, hacim-gerilme kazanım yaklaşımının ve etkileşim eğrilerinin denklemler haline dönüştürülmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abidin, A.Z., Izzuddin, B.,**(2013). Meshless local buckling analysis of steel beams with irregular web openings, *Engineering Structure*, 50, 197-206.
- Akay, E.,** (2015). Numerical investigation of stiffened composite panel into buckling and post buckling analysis under combined loading (Master's thesis), *Middle East Technical University*.
- Basoglu, M.F.,** (2015). Cesitli sinir kosullarina sahip tabakali kompozit plaklarin sonlu elemanalar metodu kullanilarak kritik burkulma yuku acisindan incelenmesi (Master's thesis), *Ondokuz Mayis Universitesi*.
- Cai, J., Moen, C.D.,** (2016). Elastic buckling analysis of thin-walled structural members with rectangular holes using generalized beam theory. *Thin-Walled Structures* 107, 274-286.
- Cheng, B., Shi, P., Wang, J., Li, C.,** (2014). Opening reinforcement for box-section walls containing continuous elliptical holes in steel pylons. *Journal of Constructional Steel Research* 103, 89-100.
- Cheng, B., Wang, J., Li, C.,** (2013). Compression tests and numerical analysis of perforated plates containing slotted holes in steel pylons. *Thin-Walled Structures* 67, 129--143.
- Cheng, B., Zhao, J.,** (2010). Strengthening of perforated plates under uniaxial compression: Buckling analysis. *Thin-Walled Structures* 48 (12), 905-914.
- Cheng, S., et al.,** (2016). Shear effect on buckling of cellular columns subjected to axially compressed load. *Thin-Walled Structures* 98, 416--420.
- Cook, R.D., et al.,** (2007). Concepts and applications of finite element analysis. *John Wiley & Sons*.
- Degtyareva, N., Degtyarev, V.,** (2016). Experimental investigation of cold-formed steel channels with slotted webs in shear. *Thin-Walled Structures* 102, 30-42.

- Dimopoulos, C.A., Gantes, C.J.,** (2015). Numerical methods for the design of cylindrical steel shells with unreinforced or reinforced cutouts. *Thin-Walled Structures* 96, 11--28.
- Eiblmeier, J., Loughlan, J.,** (1997). The influence of reinforcement ring width on the buckling response of carbon fibre composite panels with circular cut-outs. *Composite structures* 38 (1), 609-622.
- Erdal, F., Dogan, E., Saka, M.P.,** (2011). Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers. *Journal of Constructional Steel Research* 67 (2), 237--247.
- Escobar, M. M.,** (2014). Materiales compuestos en la industria aeronautica. [Online; accessed 14-January-2017]. URL <http://www.nanotubo.com.ar/nota.php?id=15>
- Feng, R., Mou, X., Chen, A., Ma, Y.,** (2016). Tests of aluminium alloy chs columns with circular openings. *Thin-Walled Structures* 109, 113-131.
- Frank, M.,** (2012). Methods for decreasing the total solution time of linear buckling finite element analyses (Master's thesis), *Aalborg University*.
- Gendy, B.L.,** (2015). Critical shear buckling load of tapered plate with circular opening. *HBRC Journal*.
- Horacek, M., Melcher, J., Pesek, O., Brodniansky, J.,** (2016). Focusing on problem of lateral torsional buckling of beams with web holes. *Procedia Engineering* 161, 549-555.
- J.Huet, J.I.,** (1999). Static stress manual, metallic materials. *MTS*.
- Javidinejad, A.,** (2014). Essentials of Mechanical Stress Analysis. *CRC Press*.
- Kim, J.-H., Jeon, J.-H., Park, J.-S., Seo, H.-D., Ahn, H.-J., Lee, J.-M.,** (2015). Effect of reinforcement on buckling and ultimate strength of perforated plates. *International Journal of Mechanical Sciences* 92, 194-205.
- Komur, M.A., Sonmez, M.,** (2015). Elastic buckling behavior of rectangular plates with holes subjected to partial edge loading. *Journal of Constructional Steel Research* 112, 54-60.

- Military Handbook, S.**, (1972). Metallic materials and elements for aerospace vehicle structures. *Department of Defense*, Washington DC (Nov. 1990), 9-16.
- Moen, C.D., Schafer, B.**, (2009). Elastic buckling of thin plates with holes in compression or bending. *Thin-Walled Structures* 47 (12), 1597--1607.
- Niu, M. C.Y.**, (1997). Airframe stress analysis and sizing. Vol. 2. *Conmilit Press Hong Kong*.
- Ozturk, M.E.**, (2015). Ince cidarli silindirik kompozit yapıların yanal basınç altında burkulma davranışının analitik ve sonlu elemanlar yöntemleriyle incelenmesi (Master's thesis), *Istanbul Teknik Üniversitesi*.
- Panedpojaman, P., Sae-Long, W., Chub-uppakarn, T.**, (2016). Cellular beam design for resistance to inelastic lateral--torsional buckling. *Thin-Walled Structures* 99, 182-194.
- Panedpojaman, P., Thepchatri, T., Limkatanyu, S.**, (2014). Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams. *Thin-walled Structures* 76, 92-104.
- Pasinli, A.**, (2013). Shape and position effects of double holes on lateral buckling of cantilever composite beams. *Composites Part B: Engineering* 55, 433-439.
- Pham, C.H.**, (2017). Shear buckling of plates and thin-walled channel sections with holes. *Journal of Constructional Steel Research* 128, 800-811.
- Pilkey, W.D., Pilkey, W.D.**, (1994). Formulas for stress, strain, and structural matrices. *J. Wiley* New York.
- Scheperboer, I.C., Efthymiou, E., Maljaars, J.**, (2016). Local buckling of aluminium and steel plates with multiple holes. *Thin-Walled Structures* 99, 132-141.
- Sencan, C.**, (2015). Kompozit plakalarda delaminasyonun yeri ve şeklinin serbest titreşim cevabına ve burkulma yüküne etkisi (Master's thesis), *Dokuz Eylul Üniversitesi*.

- Seo, J.K., Mahendran, M., Paik, J.K.,** (2011). Numerical method for predicting the elastic lateral distortional buckling moment of a mono-symmetric beam with web openings. *Thin-Walled Structures* 49 (6), 713-723.
- Simulia Corp.,** (2007). Abaqus analysis users manual. *Systemes, Dassault, Providence, RI, USA.*
- Simulia Corp.,** (2014). Simulia, ABAQUS/CAE Users Manual. *SYSTEMES, DASSAULT.*
- Singer, J., Arbocz, J., Weller, T.,** (1998). Buckling experiments. Experimental methods in buckling of thin-walled structure. *Basic Concepts, Columns, Beams and Plates 1.*
- Smith, B.,** (2003). The boeing 777. *Advanced Materials and Processes* 161 (9), 41-44.
- Tsavdaridis, K. D., D'Mello, C.,** (2011). Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes. *Journal of Constructional Steel Research* 67 (10), 1605-1620.
- Ueno, M., Redwood, R.,** (1978). Buckling of webs with openings. *Computers & Structures* 9 (2), 191-199.
- Wallin, M.,** (2014). A finite element tool for linear buckling analysis (Master's thesis), *Linkoping Institute of Technology, Linkoping University.*
- Wang, P., Guo, K., Liu, M., Zhang, L.,** (2016). Shear buckling strengths of web-posts in a castellated steel beam with hexagonal web openings. *Journal of Constructional Steel Research* 121, 173-184.
- Wang, P., Wang, X., Ma, N.,** (2014). Vertical shear buckling capacity of web-posts in castellated steel beams with fillet corner hexagonal web openings. *Engineering Structures* 75, 315-326.
- Weaver, P.M., Nemeth, M.P.,** (2008). Improved design formulas for buckling of orthotropic plates under combined loading. *AIAA journal* 46 (9), 2391-2396.

Yao, Z., Rasmussen, K.J., (2012). Inelastic local buckling behaviour of perforated plates and sections under compression. *Thin-Walled Structures* 61, 49-70.

Yingjiang, Z., Renjun, Y., Hongxu, W., (2015). Experimental and numerical investigations on plate girders with perforated web under axial compression and bending moment. *Thin-Walled Structures* 97, 199-206.

Yurdakul, M., Ozbay, O.Y.T., (2002). Havacilik alanında kullanılan alüminyum alaşımlarının seçimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 17 (2).





EKLER

EK 1: ABAQUS geometri oluşturma

EK 2: ABAQUS malzeme tanıtımı ve plastik gerilim-gerinim tablosu

EK 3: ABAQUS kesit ve montaj tanımlama

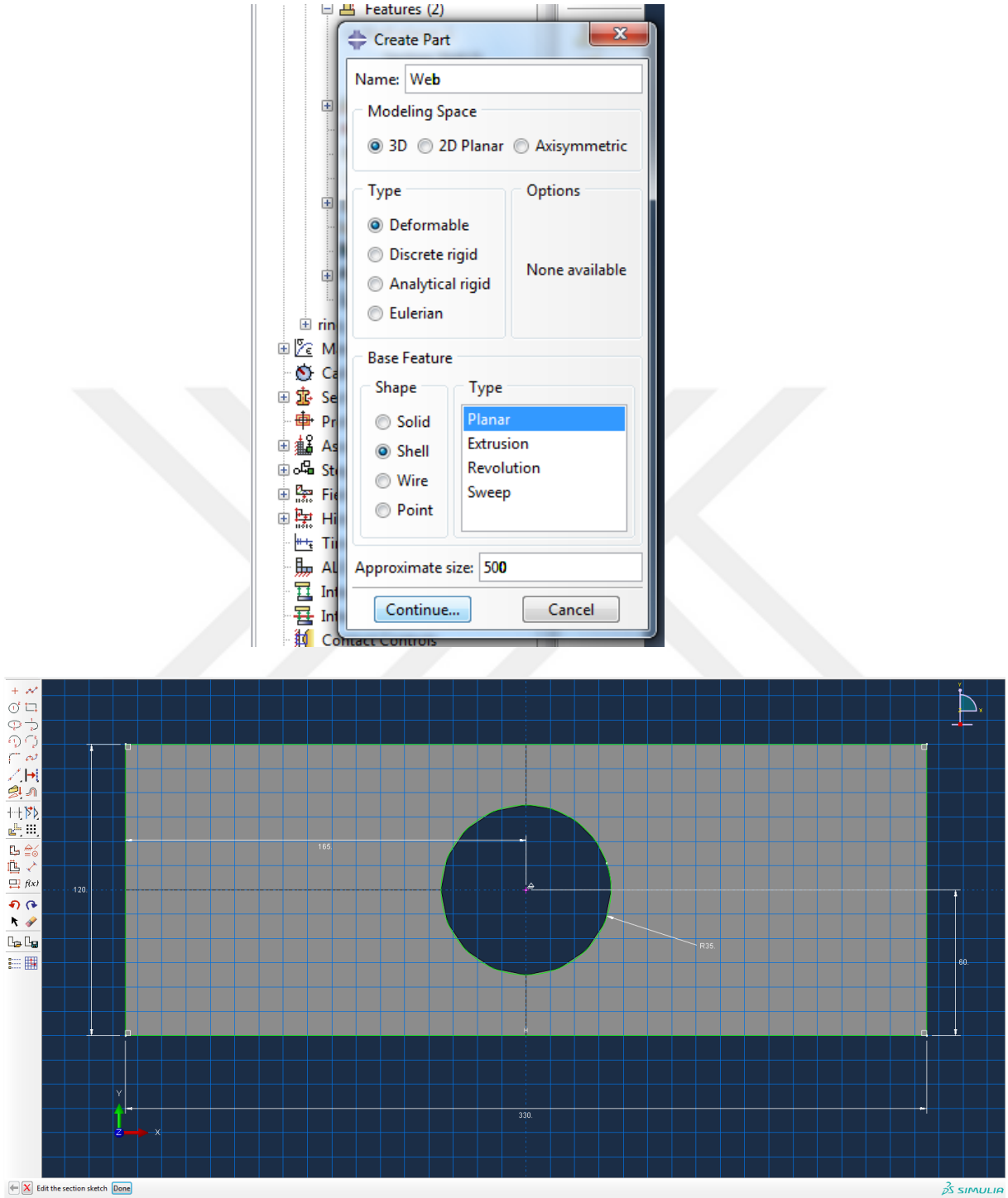
EK 4: ABAQUS özüm ağı tanımlama

EK 5: ABAQUS burkulma analizi koşturma tanıtımı

EK 6: Güçlendirmesiz delikli plakalar için yürütölen etkileşim eğrisi yük oranları tablosu ve SEM ıktıları

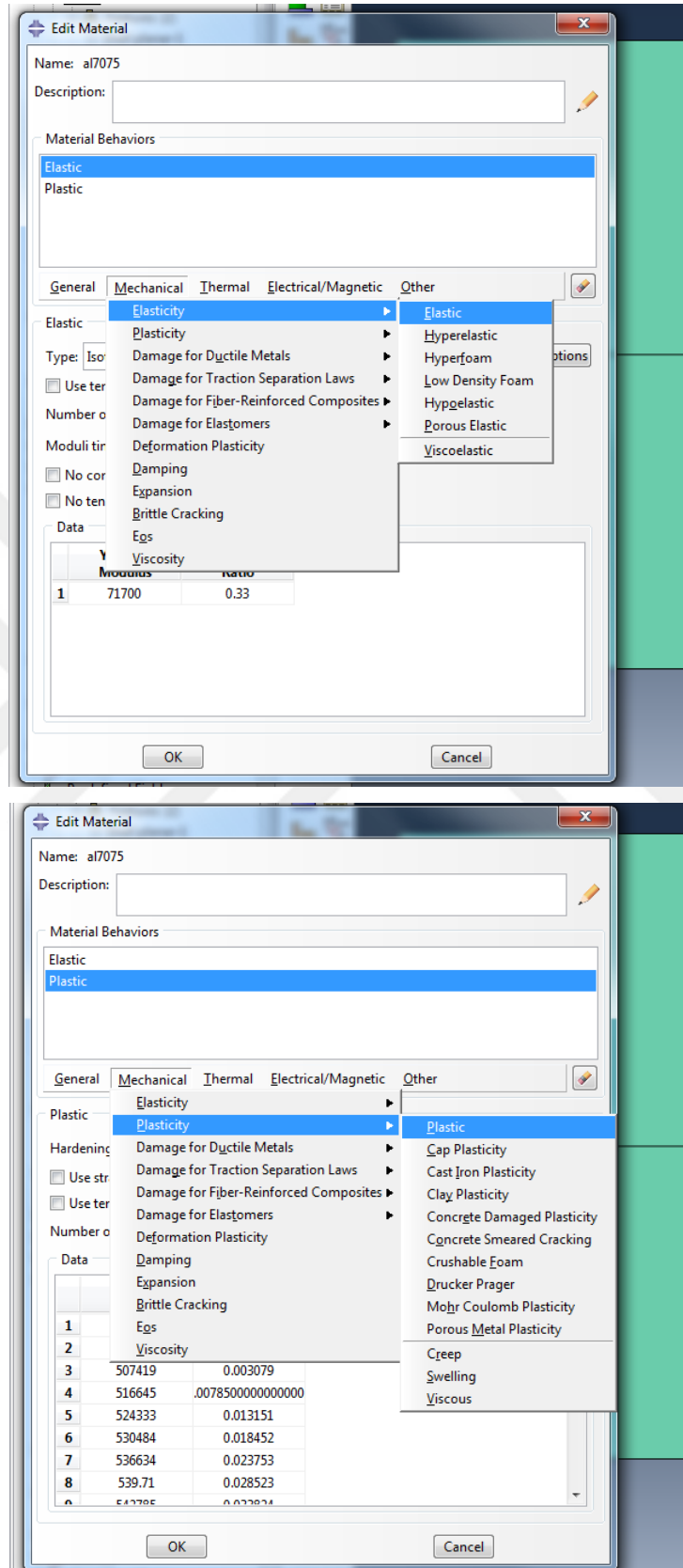
EK 7: Delik etrafı güçlendirmeli plakalar için yürütölen etkileşim eğrisi yük oranları tablosu ve SEM ıktıları

EK 1: ABAQUS Geometri Oluşturma



Şekil Ek1. ABAQUS geometri tanımlama

EK 2: ABAQUS malzeme tanıtımı ve plastik gerilim-gerinim tablosu

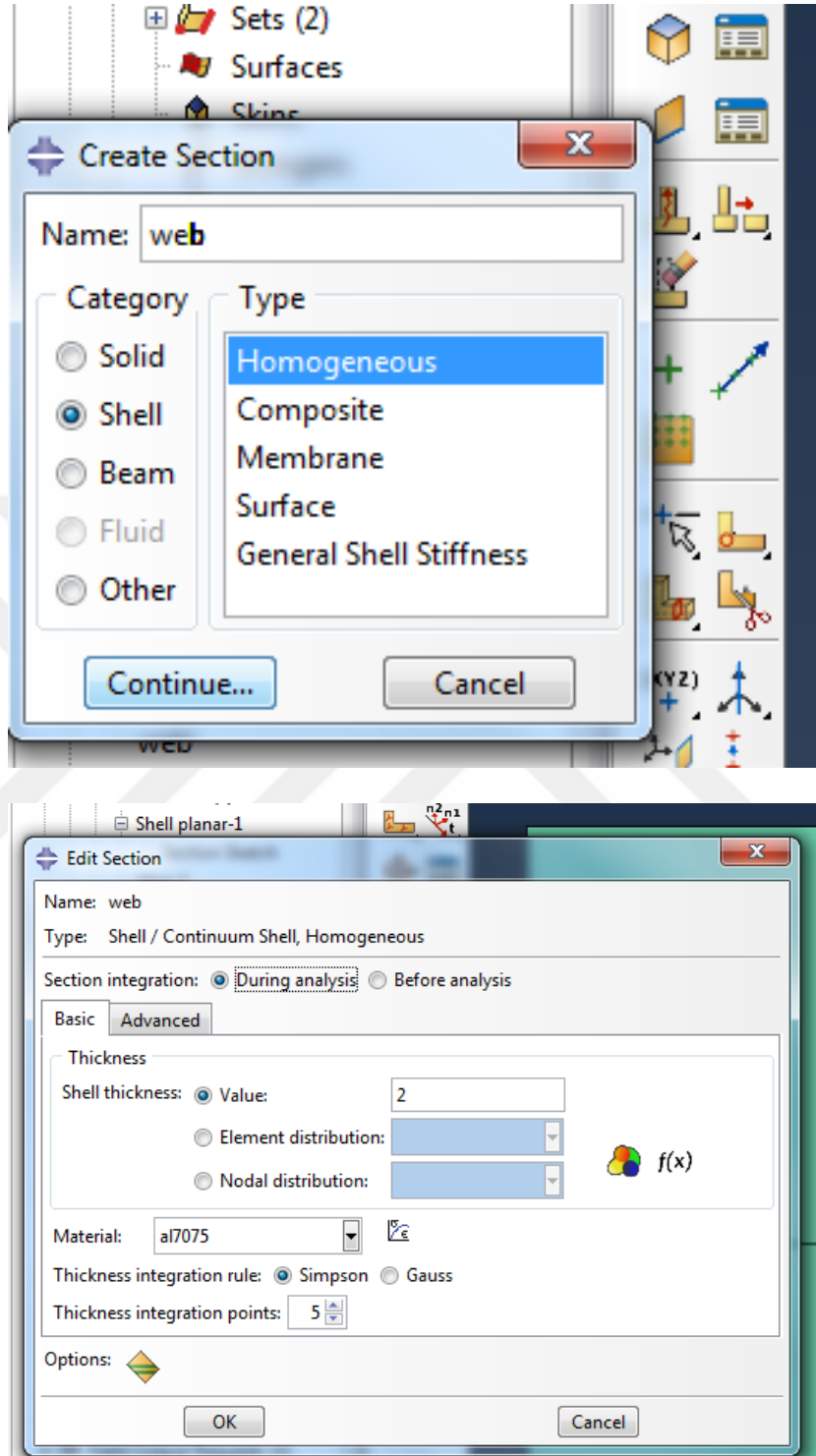


Şekil Ek 2. ABAQUS elasto-plastik malzeme tanıtımı

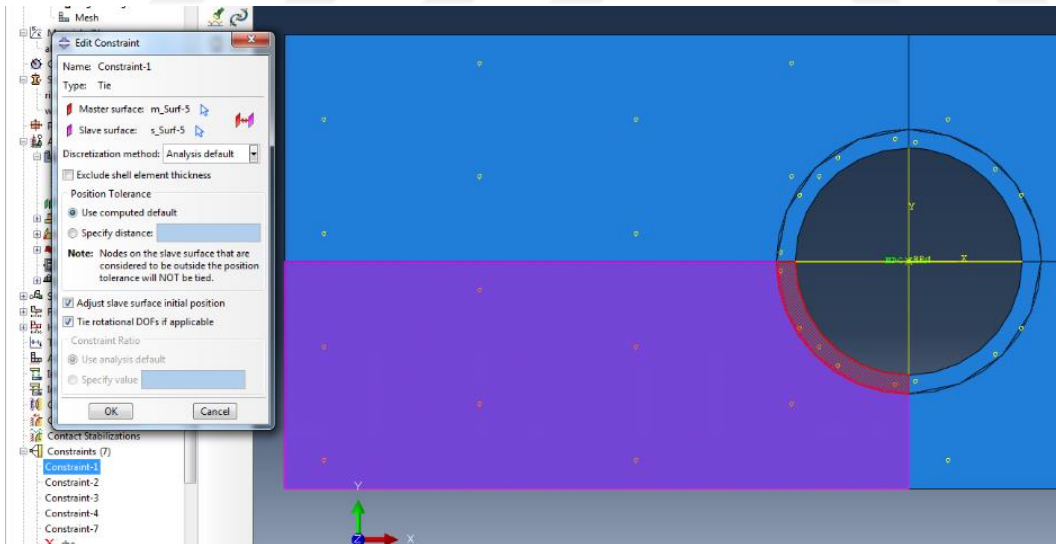
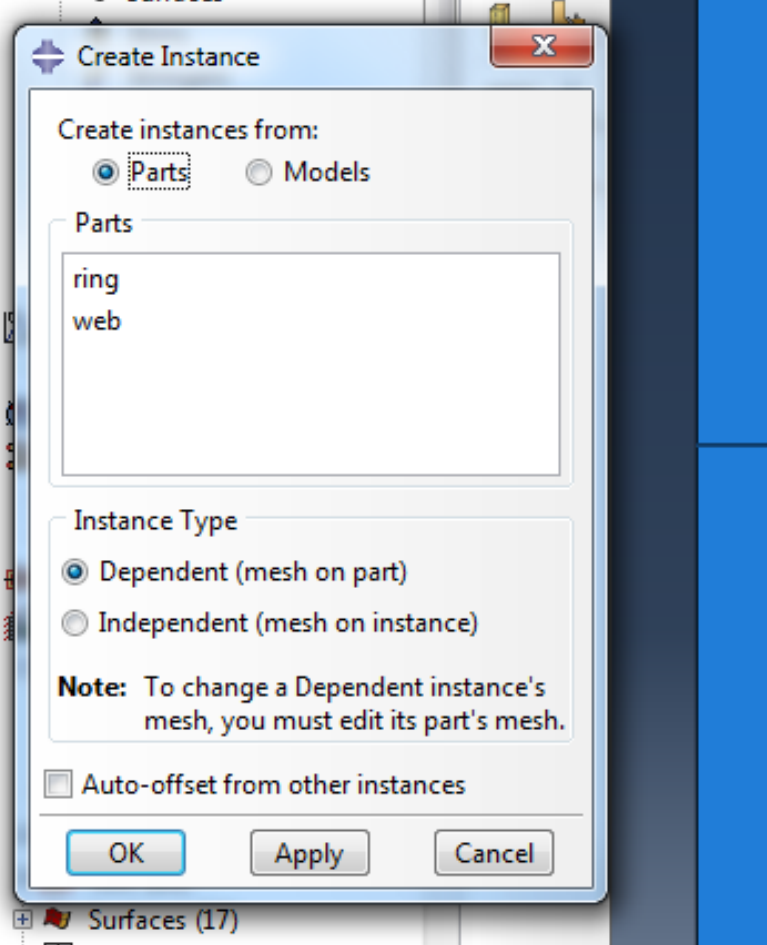
Çizelge Ek2. Plastik gerilme-gerinim değerleri

Gerilme [MPa]	Plastik Gerinim [mm/mm]
502.0	0.000
502.3	0.001
507.4	0.003
516.7	0.008
524.3	0.013
530.5	0.018
536.6	0.024
539.7	0.029
542.8	0.034
545.9	0.039
548.9	0.044
552.0	0.049
553.6	0.054
555.1	0.059
556.6	0.064
558.2	0.069
559.7	0.074
561.2	0.079
562.8	0.085
564.3	0.089
565.8	0.097
567.4	0.105
568.9	0.110
570.5	0.123
572.0	0.130

EK 3: ABAQUS kesit ve montaj tanımlama

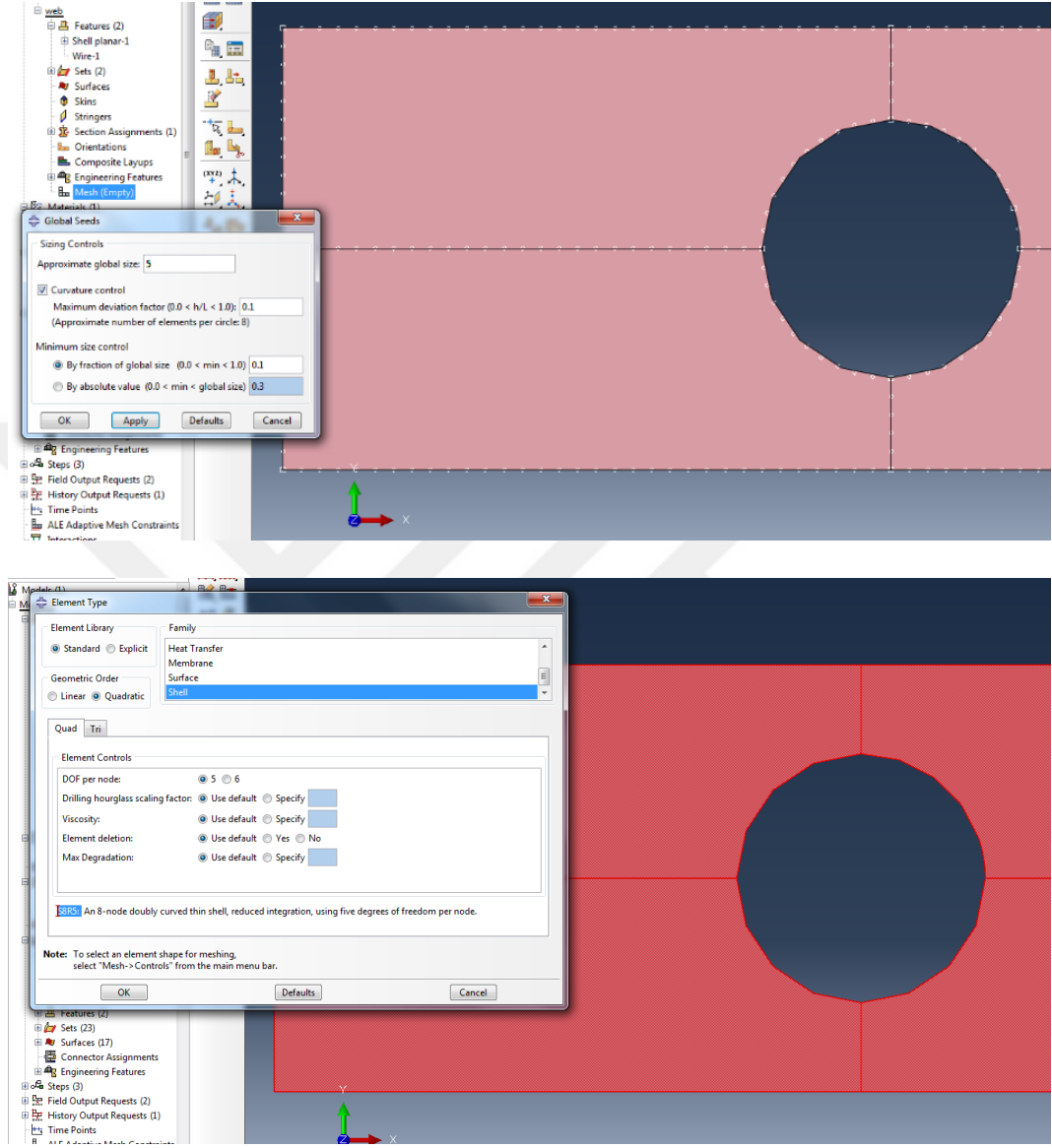


Şekil Ek 3.1 ABAQUS kesit tanıtımı



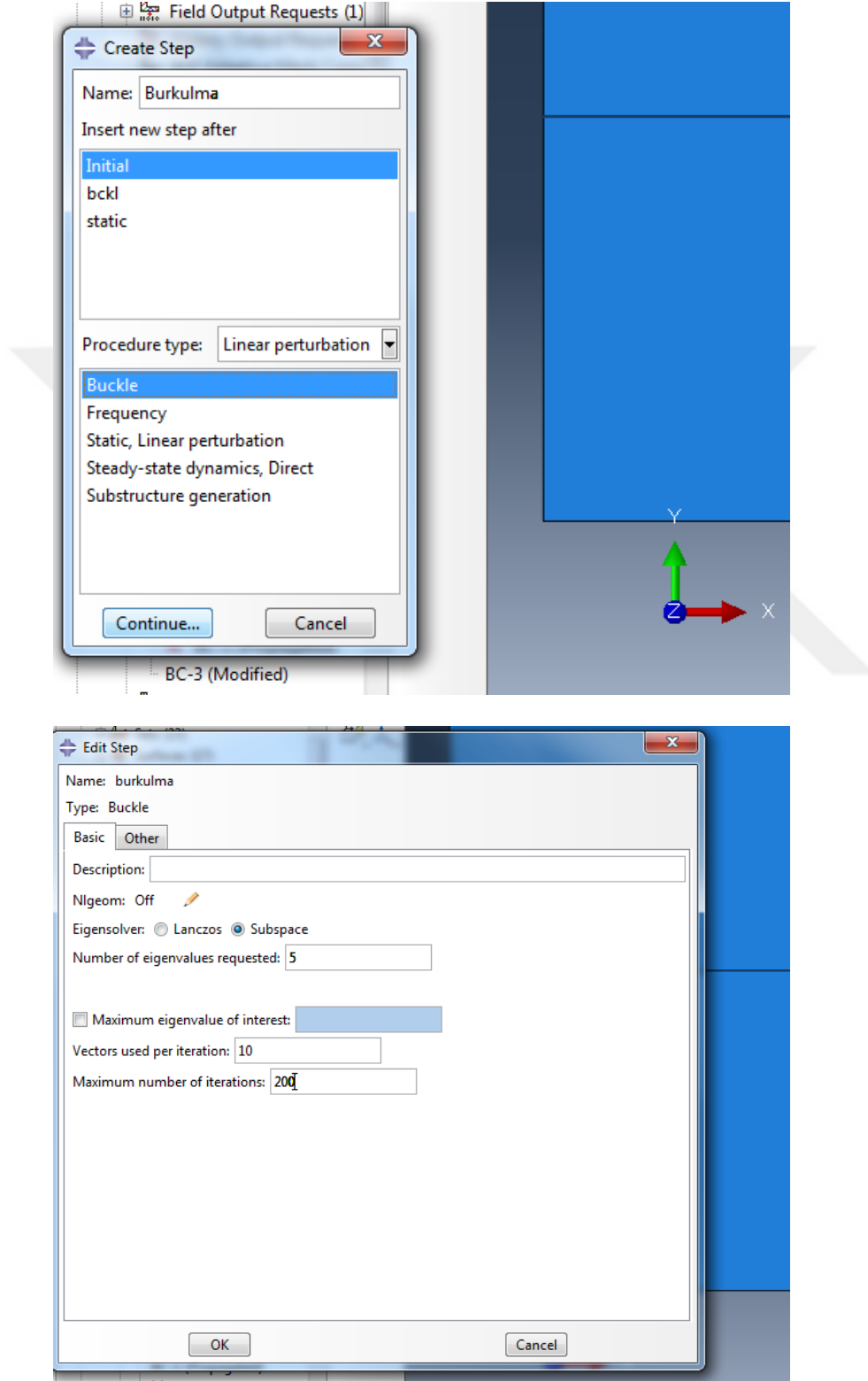
Şekil Ek 3.2 ABAQUS montaj ve bağlantı tanıtımı

EK 4: ABAQUS çözüm ağı tanımlama

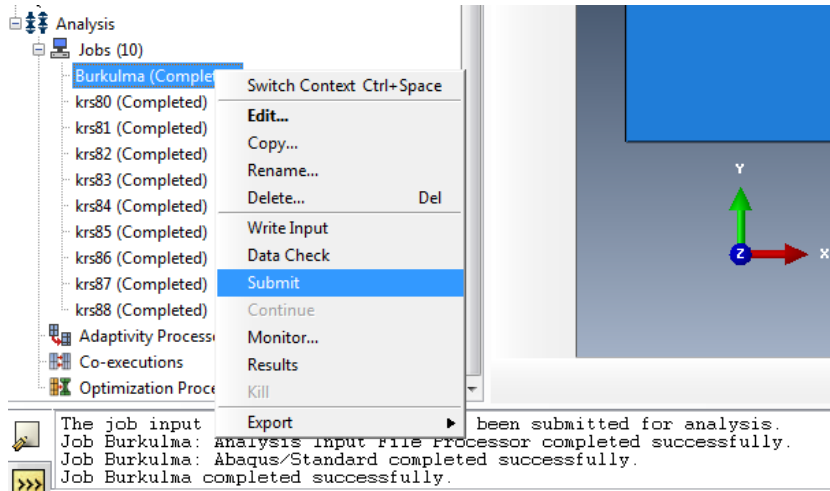
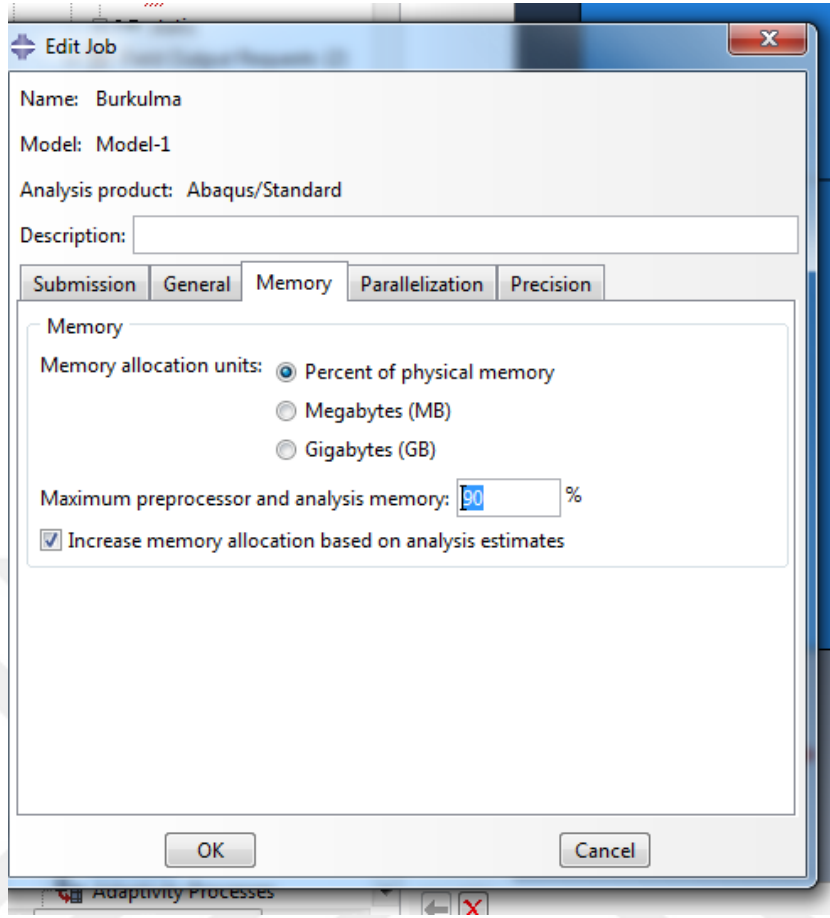


Şekil Ek 4. ABAQUS çözüm ağı parametresi belirleme

EK 5: ABAQUS burkulma analizi koşturma tanıtımı

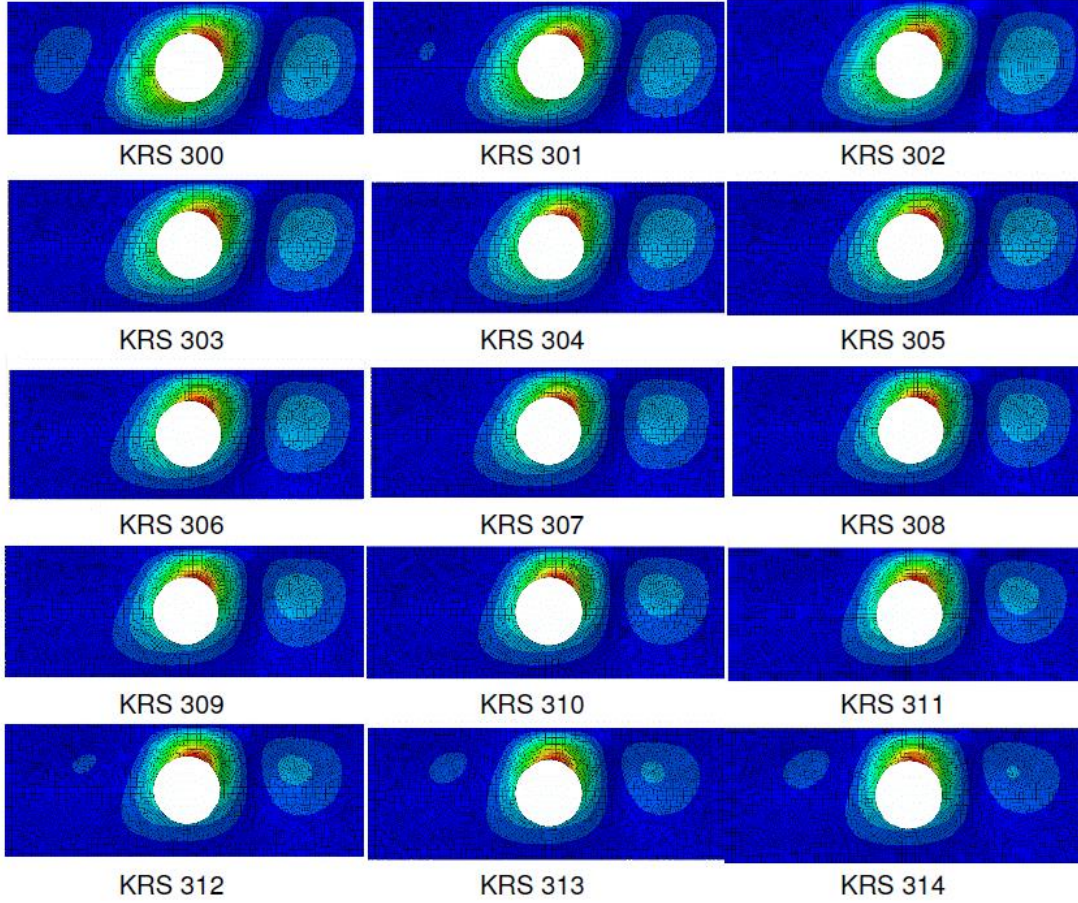


şekil Ek 5.1 ABAQUS burkulma analizi tipi tanıtımı

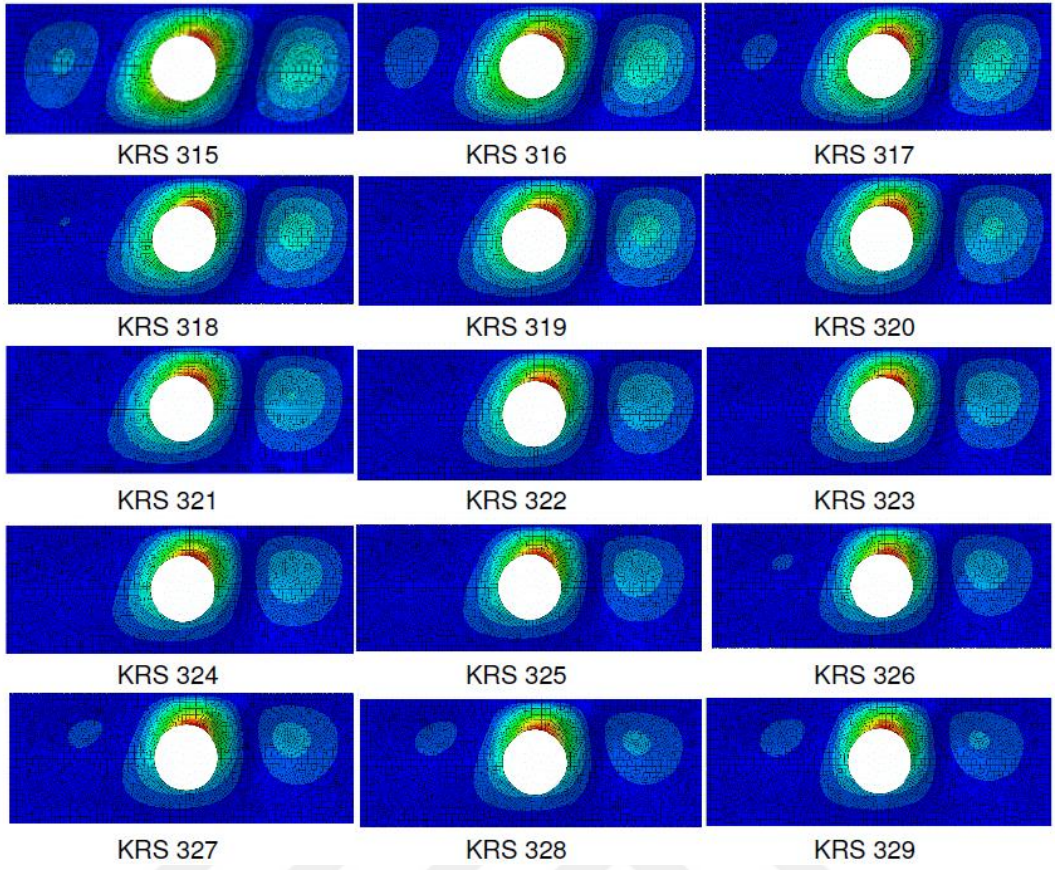


Şekil Ek 5.2 ABAQUS koşturma tanıtması

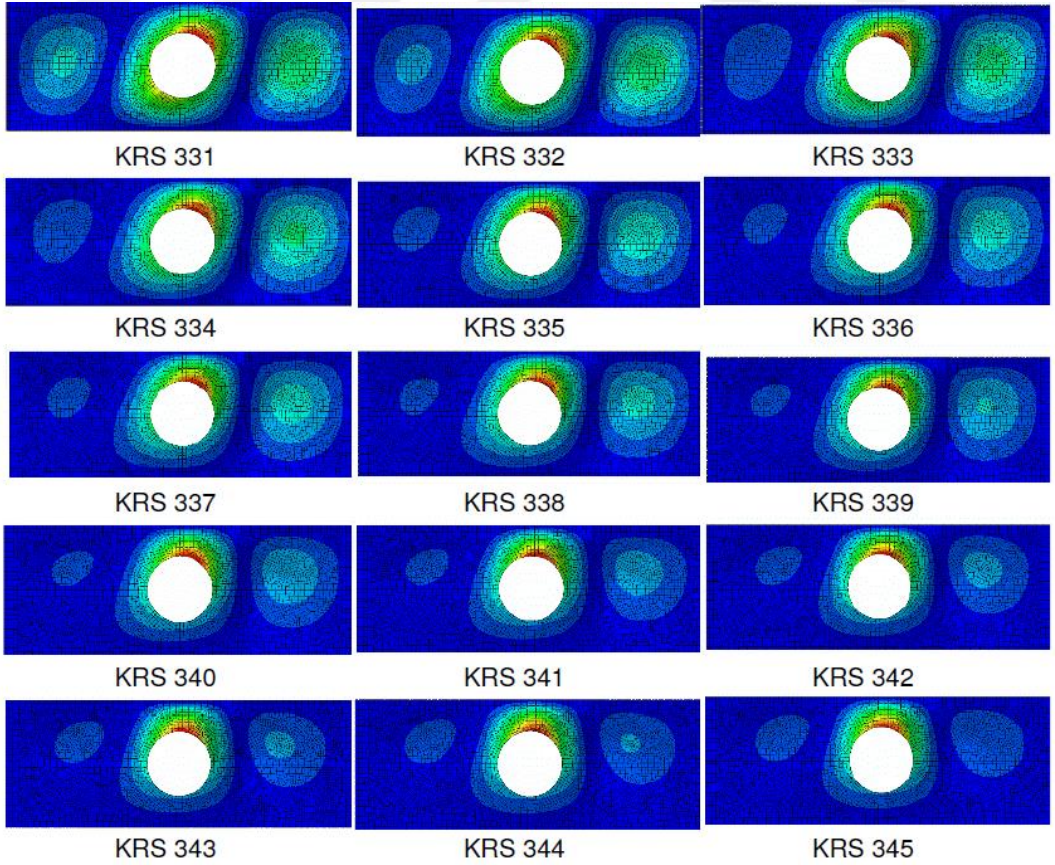
EK 6: Güçlendirmesiz delikli plakalar için yürütülen etkileşim eğrisi yük oranları tablosu ve SEM çıktıları: KRS300-375 Şekil 5.2'deki güçlendirmesiz delikli etkileşim eğrisi oluşturulması için yürütülen SEA kodları aralığıdır



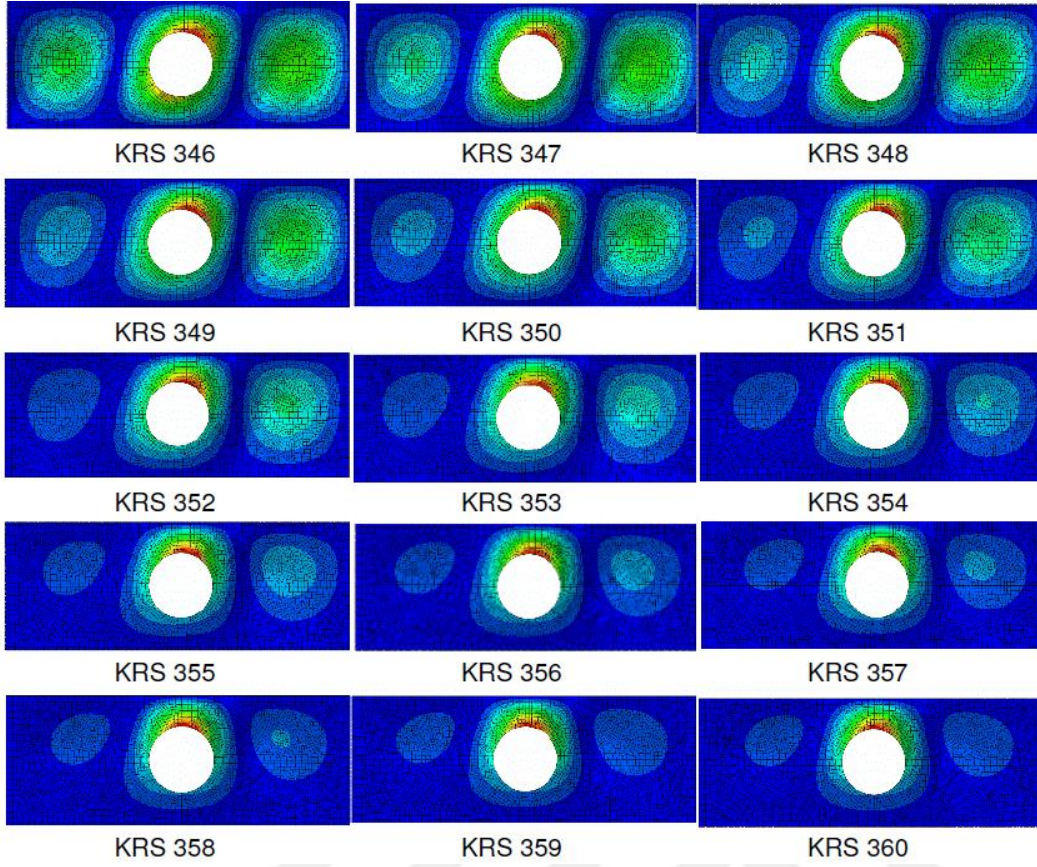
Şekil Ek 6.1 KRS300-314 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları



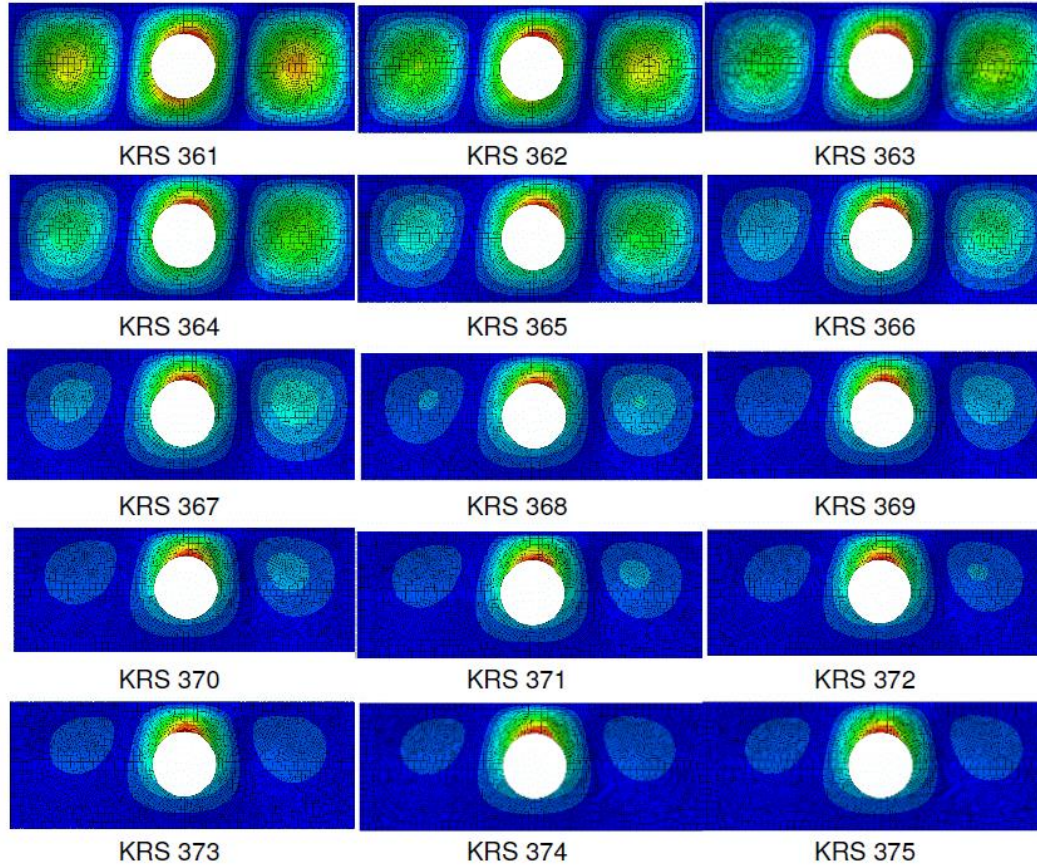
Şekil Ek 6.2 KRS315-329 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları



Şekil Ek 6.3 KRS331-345 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları



Şekil Ek 6.4 KRS346-360 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları



Şekil Ek 6.5 KRS361-375 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları

Çizelge Ek 6.1 KRS300-314 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları

Numune kodu	Basma Yüğü <i>C</i>	Kayma Yüğü <i>S</i>	Eğilme Yüğü <i>B</i>	σ_{all} [MPa]	R_C	R_S	R_B
					R_S/R_C	1.0	
KRS300	1.33	1.0	1.0	34.760	0.661	0.663	0.106
KRS301	1.33	1.0	2.0	33.225	0.632	0.634	0.202
KRS302	1.33	1.0	3.0	31.364	0.597	0.598	0.286
KRS303	1.33	1.0	4.0	29.463	0.560	0.562	0.359
KRS304	1.33	1.0	5.0	27.642	0.526	0.527	0.421
KRS305	1.33	1.0	6.0	25.945	0.493	0.495	0.474
KRS306	1.33	1.0	7.0	24.386	0.464	0.465	0.519
KRS307	1.33	1.0	8.0	22.962	0.437	0.438	0.559
KRS308	1.33	1.0	9.0	21.666	0.412	0.413	0.593
KRS309	1.33	1.0	10.0	20.486	0.390	0.391	0.623
KRS310	1.33	1.0	12.0	18.433	0.351	0.352	0.673
KRS311	1.33	1.0	15.0	15.967	0.304	0.305	0.729
KRS312	1.33	1.0	19.0	13.499	0.257	0.257	0.780
KRS313	1.33	1.0	25.0	10.917	0.208	0.208	0.830
KRS314	1.33	1.0	32.0	8.902	0.169	0.170	0.867

Çizelge Ek 6.2 KRS315-329 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları

Numune kodu	Basma Yüğü <i>C</i>	Kayma Yüğü <i>S</i>	Eğilme Yüğü <i>B</i>	σ_{all} [MPa]	R_C	R_S	R_B
					R_S/R_C	0.8	
KRS315	1.67	1.0	1.0	31.313	0.748	0.597	0.095
KRS316	1.67	1.0	2.0	30.088	0.719	0.574	0.183
KRS317	1.67	1.0	3.0	28.564	0.682	0.545	0.261
KRS318	1.67	1.0	4.0	26.980	0.644	0.515	0.328
KRS319	1.67	1.0	5.0	25.441	0.608	0.485	0.387
KRS320	1.67	1.0	6.0	23.990	0.573	0.458	0.438
KRS321	1.67	1.0	7.0	22.645	0.541	0.432	0.482
KRS322	1.67	1.0	8.0	21.407	0.511	0.408	0.521
KRS323	1.67	1.0	9.0	20.272	0.484	0.387	0.555
KRS324	1.67	1.0	10.0	19.232	0.459	0.367	0.585
KRS325	1.67	1.0	12.0	17.406	0.416	0.332	0.636
KRS326	1.67	1.0	15.0	15.186	0.363	0.290	0.693
KRS327	1.67	1.0	19.0	12.934	0.309	0.247	0.748
KRS328	1.67	1.0	25.0	10.543	0.252	0.201	0.802
KRS329	1.67	1.0	30.0	9.121	0.218	0.174	0.833

Çizelge Ek 6.3 KRS331-345 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları

Numune kodu	Basma Yüğü <i>C</i>	Kayma Yüğü <i>S</i>	Eğilme Yüğü <i>B</i>	σ_{all} [MPa]	R_C	R_S	R_B
					R_S/R_C	0.6	
KRS331	2.22	1.0	1.0	26.581	0.844	0.507	0.081
KRS332	2.22	1.0	2.0	25.769	0.818	0.491	0.157
KRS333	2.22	1.0	3.0	24.702	0.784	0.471	0.225
KRS334	2.22	1.0	4.0	23.545	0.747	0.449	0.287
KRS335	2.22	1.0	5.0	22.385	0.711	0.427	0.341
KRS336	2.22	1.0	6.0	21.267	0.675	0.406	0.388
KRS337	2.22	1.0	7.0	20.210	0.642	0.385	0.430
KRS338	2.22	1.0	8.0	19.222	0.610	0.367	0.468
KRS339	2.22	1.0	10.0	17.452	0.554	0.333	0.531
KRS340	2.22	1.0	13.0	15.260	0.484	0.291	0.604
KRS341	2.22	1.0	17.0	13.010	0.413	0.248	0.673
KRS342	2.22	1.0	22.0	10.946	0.347	0.209	0.733
KRS343	2.22	1.0	28.0	9.172	0.291	0.175	0.781
KRS344	2.22	1.0	35.0	7.701	0.224	0.147	0.820
KRS345	2.22	1.0	45.0	6.257	0.199	0.119	0.857

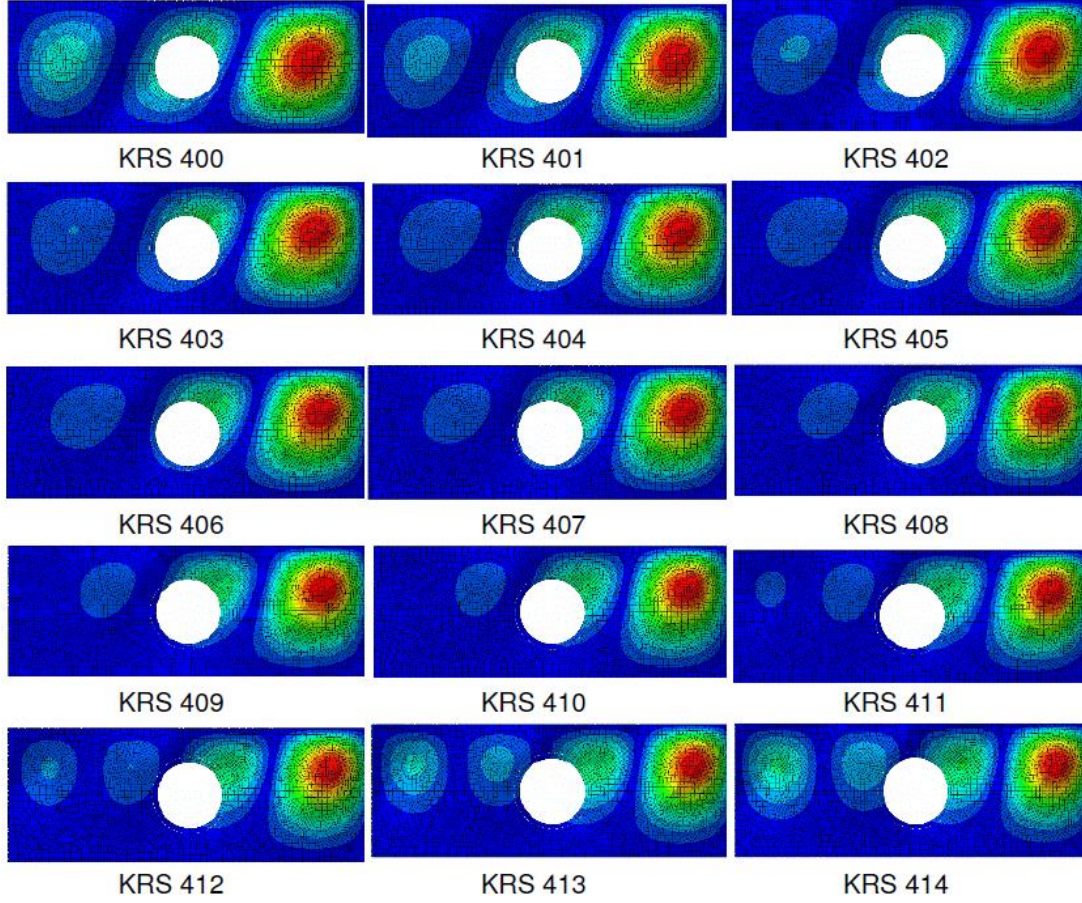
Çizelge Ek 6.4 KRS346-360 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları

Numune kodu	Basma Yüğü <i>C</i>	Kayma Yüğü <i>S</i>	Eğilme Yüğü <i>B</i>	σ_{all} [MPa]	R_C	R_S	R_B
					R_S/R_C	0.4	
KRS346	3.33	1.0	1.0	19.772	0.942	0.377	0.060
KRS347	3.33	1.0	2.0	19.431	0.925	0.371	0.118
KRS348	3.33	1.0	3.0	18.933	0.902	0.361	0.173
KRS349	3.33	1.0	4.0	18.340	0.873	0.350	0.223
KRS350	3.33	1.0	5.0	17.700	0.843	0.338	0.269
KRS351	3.33	1.0	6.0	17.045	0.812	0.325	0.311
KRS352	3.33	1.0	8.0	15.767	0.751	0.301	0.384
KRS353	3.33	1.0	11.0	14.045	0.669	0.268	0.470
KRS354	3.33	1.0	15.0	12.164	0.579	0.232	0.555
KRS355	3.33	1.0	20.0	10.364	0.494	0.198	0.631
KRS356	3.33	1.0	26.0	8.771	0.418	0.167	0.694
KRS357	3.33	1.0	34.0	7.262	0.346	0.138	0.751
KRS358	3.33	1.0	45.0	5.861	0.279	0.112	0.803
KRS359	3.33	1.0	55.0	4.983	0.237	0.095	0.834
KRS360	3.33	1.0	70.0	4.065	0.194	0.078	0.866

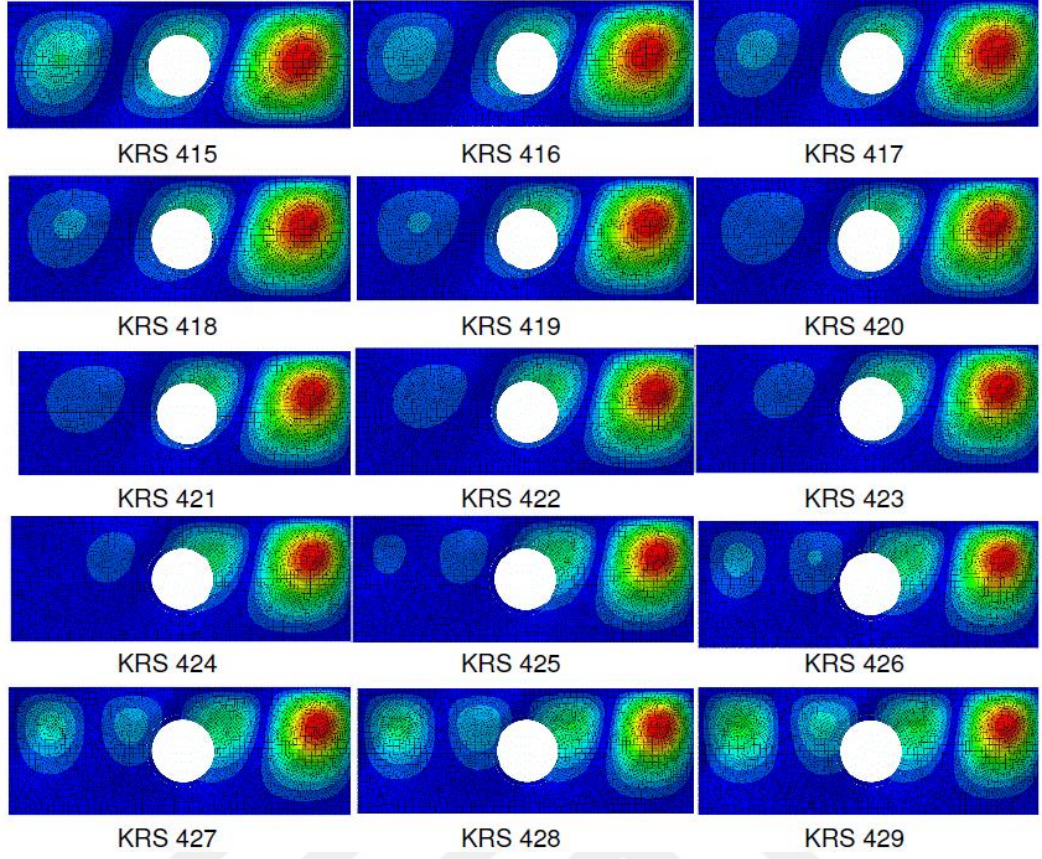
Çizelge Ek 6.5 KRS361-375 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları

Numune kodu	Basma Yüğü C	Kayma Yüğü S	Eğilme Yüğü B	σ_{all} [MPa]	R_C	R_S	R_B
					R_S/R_C	0.2	
KRS361	6.67	1.0	1.0	10.636	1.014	0.203	0.032
KRS362	6.67	1.0	3.0	10.511	1.003	0.200	0.096
KRS363	6.67	1.0	5.0	10.279	0.980	0.196	0.156
KRS364	6.67	1.0	7.0	9.968	0.951	0.190	0.212
KRS365	6.67	1.0	10.0	9.422	0.899	0.180	0.287
KRS366	6.67	1.0	14.0	8.659	0.826	0.165	0.369
KRS367	6.67	1.0	20.0	7.615	0.726	0.145	0.463
KRS368	6.67	1.0	27.0	6.621	0.632	0.126	0.544
KRS369	6.67	1.0	35.0	5.738	0.547	0.109	0.611
KRS370	6.67	1.0	45.0	4.905	0.468	0.094	0.672
KRS371	6.67	1.0	57.0	4.172	0.398	0.080	0.724
KRS372	6.67	1.0	70.0	3.587	0.342	0.068	0.764
KRS373	6.67	1.0	85.0	3.086	0.294	0.059	0.798
KRS374	6.67	1.0	110.0	2.502	0.239	0.048	0.838
KRS375	6.67	1.0	150.0	1.920	0.183	0.037	0.876

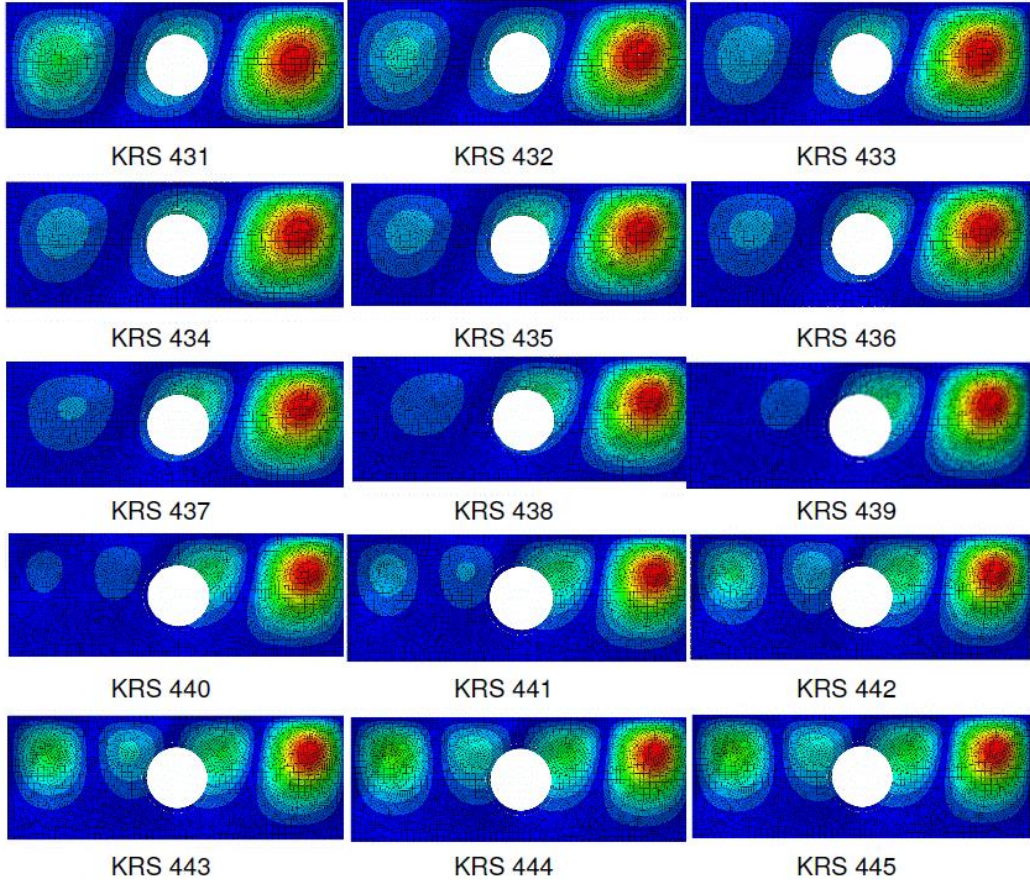
EK 7: Delik etrafı güçlendirmeli plakalar için yürütülen etkileşim eğrisi yük oranları tablosu ve SEM çıktıları: KRS400-475 Şekil 5.3 güçlendirmeli delikli etkileşim eğrisi oluşturulması için yürütülen SEA kodları aralığıdır



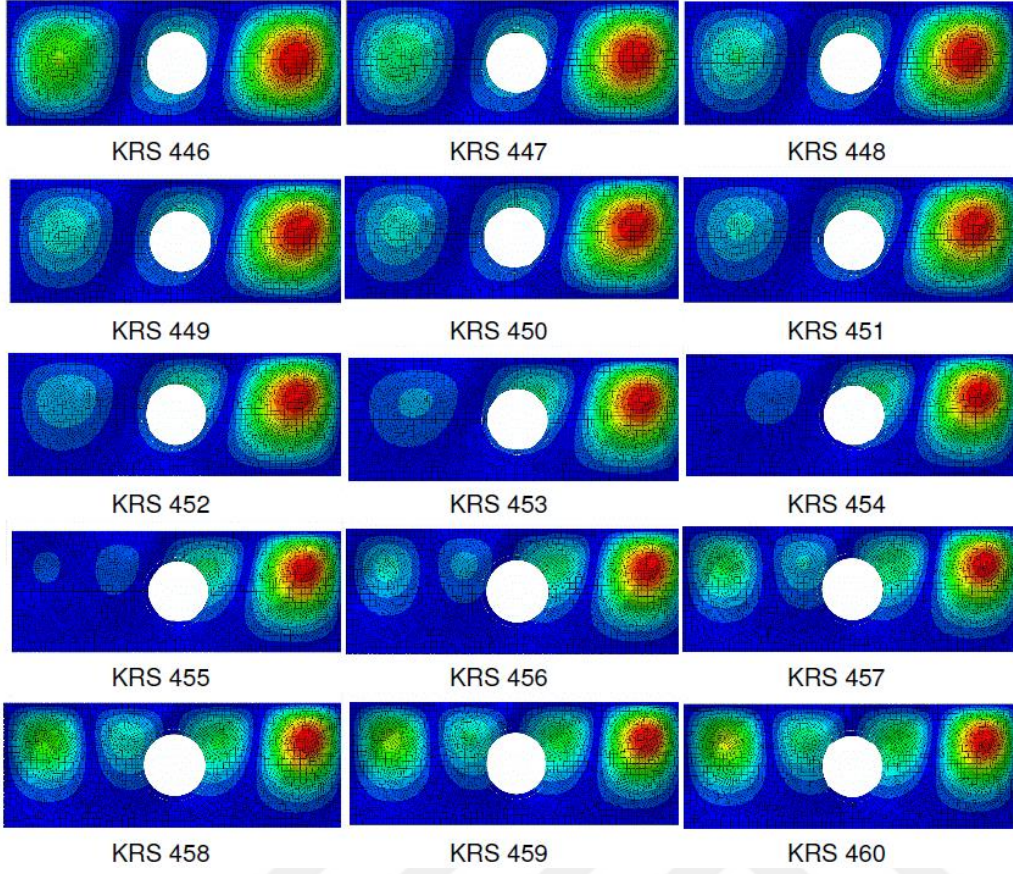
Şekil Ek 7.1 KRS400-414 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları



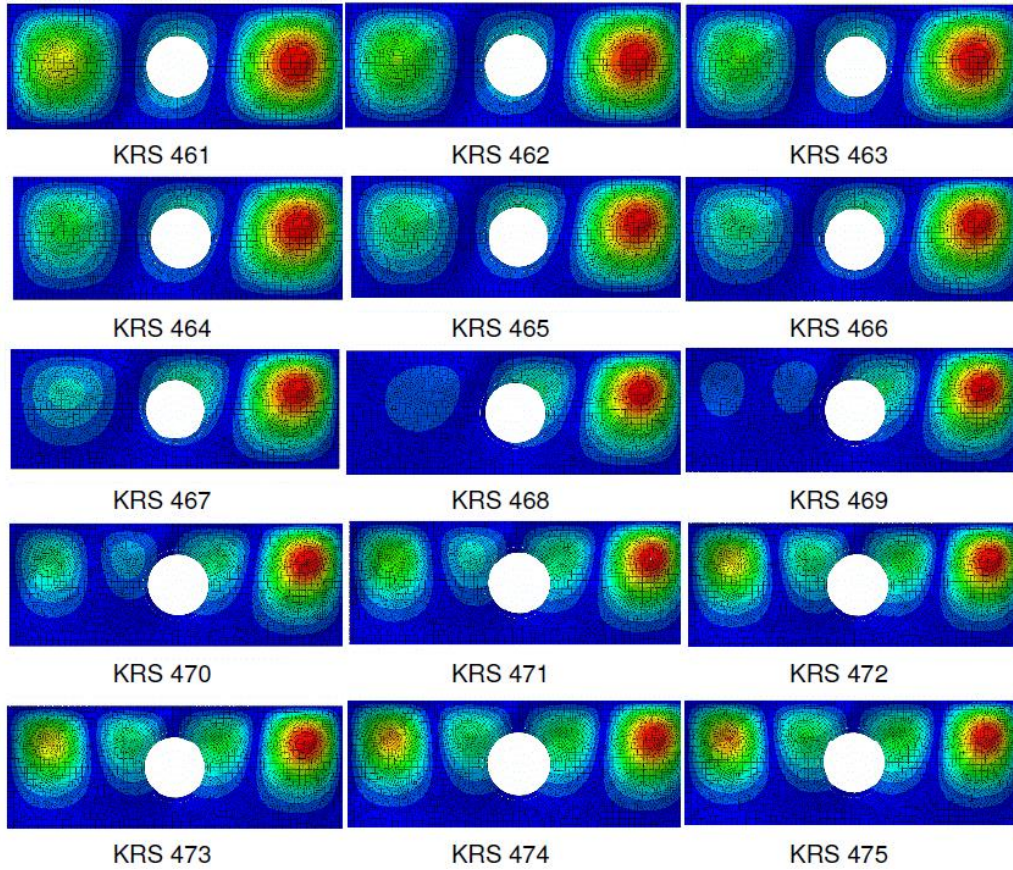
Şekil Ek 7.2 KRS415-429 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları



Şekil Ek 7.3 KRS431-445 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları



Şekil Ek 7.4 KRS446-460 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları



Şekil Ek 7.5 KRS461-475 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları

Çizelge Ek 7.1 KRS400-414 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları

Numune kodu	Basma Yüğü <i>C</i>	Kayma Yüğü <i>S</i>	Eğilme Yüğü <i>B</i>	σ_{all} [MPa]	<i>R_C</i>	<i>R_S</i>	<i>R_B</i>
					<i>R_S/R_C</i>	1.0	
KRS400	0.88	1.0	0.4	78.962	0.872	0.868	0.070
KRS401	0.88	1.0	1.0	76.286	0.843	0.839	0.169
KRS402	0.88	1.0	2.0	69.930	0.772	0.769	0.310
KRS403	0.88	1.0	3.0	63.208	0.698	0.695	0.420
KRS404	0.88	1.0	4.0	57.023	0.630	0.627	0.505
KRS405	0.88	1.0	5.0	51.610	0.570	0.568	0.572
KRS406	0.88	1.0	6.0	46.954	0.519	0.516	0.624
KRS407	0.88	1.0	7.0	42.962	0.475	0.472	0.666
KRS408	0.88	1.0	8.0	39.530	0.437	0.435	0.701
KRS409	0.88	1.0	9.0	36.563	0.404	0.402	0.729
KRS410	0.88	1.0	10.0	33.981	0.375	0.374	0.753
KRS411	0.88	1.0	12.0	29.728	0.328	0.327	0.790
KRS412	0.88	1.0	15.0	24.969	0.276	0.275	0.830
KRS413	0.88	1.0	19.0	20.534	0.227	0.226	0.864
KRS414	0.88	1.0	25.0	16.182	0.179	0.178	0.896
KRS415	0.88	1.0	32.0	12.960	0.143	0.143	0.919

Çizelge Ek 7.2 KRS416-430 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları

Numune kodu	Basma Yüğü <i>C</i>	Kayma Yüğü <i>S</i>	Eğilme Yüğü <i>B</i>	σ_{all} [MPa]	<i>R_C</i>	<i>R_S</i>	<i>R_B</i>
					<i>R_S/R_C</i>	0.8	
KRS416	1.10	1.0	0.5	65.947	0.911	0.725	0.073
KRS417	1.10	1.0	1.0	64.502	0.891	0.709	0.143
KRS418	1.10	1.0	2.0	60.321	0.833	0.663	0.267
KRS419	1.10	1.0	3.0	55.584	0.767	0.611	0.369
KRS420	1.10	1.0	4.0	50.977	0.704	0.561	0.452
KRS421	1.10	1.0	5.0	46.767	0.646	0.514	0.518
KRS422	1.10	1.0	6.0	43.023	0.594	0.473	0.572
KRS423	1.10	1.0	8.0	36.834	0.509	0.405	0.653
KRS424	1.10	1.0	10.0	32.041	0.442	0.352	0.710
KRS425	1.10	1.0	13.0	26.688	0.368	0.293	0.769
KRS426	1.10	1.0	17.0	21.740	0.300	0.239	0.819
KRS427	1.10	1.0	22.0	17.601	0.243	0.194	0.858
KRS428	1.10	1.0	28.0	14.303	0.197	0.157	0.887
KRS429	1.10	1.0	35.0	11.726	0.162	0.129	0.909
KRS430	1.10	1.0	45.0	9.319	0.129	0.102	0.929

Çizelge Ek 7.3 KRS431-445 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları

Numune kodu	Basma Yüğü C	Kayma Yüğü S	Eğilme Yüğü B	σ_{all} [MPa]	R_C	R_S	R_B
					R_S/R_C	0.6	
KRS431	1.46	1.0	0.7	51.436	0.943	0.566	0.080
KRS432	1.46	1.0	1.0	50.969	0.934	0.560	0.113
KRS433	1.46	1.0	2.0	48.739	0.893	0.536	0.216
KRS434	1.46	1.0	3.0	45.967	0.842	0.505	0.305
KRS435	1.46	1.0	4.0	43.058	0.789	0.474	0.382
KRS436	1.46	1.0	5.0	40.230	0.737	0.442	0.446
KRS437	1.46	1.0	6.0	37.586	0.689	0.413	0.500
KRS438	1.46	1.0	8.0	32.965	0.604	0.363	0.584
KRS439	1.46	1.0	11.0	27.566	0.505	0.303	0.672
KRS440	1.46	1.0	15.0	22.449	0.411	0.247	0.746
KRS441	1.46	1.0	20.0	18.126	0.332	0.199	0.803
KRS442	1.46	1.0	26.0	14.676	0.269	0.161	0.845
KRS443	1.46	1.0	35.0	11.390	0.209	0.125	0.883
KRS444	1.46	1.0	45.0	9.110	0.167	0.100	0.908
KRS445	1.46	1.0	60.0	7.000	0.128	0.077	0.930

Çizelge Ek 7.4 KRS446-460 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları

Numune kodu	Basma Yüğü C	Kayma Yüğü S	Eğilme Yüğü B	σ_{all} [MPa]	R_C	R_S	R_B
					R_S/R_C	0.4	
KRS446	2.19	1.0	1.0	35.283	0.970	0.388	0.078
KRS447	2.19	1.0	2.0	34.510	0.949	0.380	0.153
KRS448	2.19	1.0	3.0	33.422	0.919	0.368	0.222
KRS449	2.19	1.0	4.0	32.153	0.884	0.354	0.285
KRS450	2.19	1.0	5.0	30.800	0.847	0.339	0.341
KRS451	2.19	1.0	7.0	28.089	0.772	0.309	0.436
KRS452	2.19	1.0	10.0	24.432	0.672	0.269	0.541
KRS453	2.19	1.0	14.0	20.548	0.565	0.226	0.637
KRS454	2.19	1.0	19.0	16.989	0.467	0.187	0.715
KRS455	2.19	1.0	25.0	13.986	0.384	0.154	0.775
KRS456	2.19	1.0	35.0	10.745	0.295	0.118	0.833
KRS457	2.19	1.0	48.0	8.231	0.226	0.091	0.875
KRS458	2.19	1.0	65.0	6.294	0.173	0.069	0.906
KRS459	2.19	1.0	80.0	5.208	0.143	0.057	0.923
KRS460	2.19	1.0	100.0	4.234	0.116	0.047	0.938

Çizelge Ek 7.5 KRS461-475 kodlu Kiriş modellerinin SE sonuçları

Numune kodu	Basma Yüğü <i>C</i>	Kayma Yüğü <i>S</i>	Eğilme Yüğü <i>B</i>	σ_{all} [MPa]	R_C	R_S	R_B
					R_S/R_C	0.2	
KRS461	4.38	1.0	2.0	17.954	0.987	0.197	0.080
KRS462	4.38	1.0	4.0	17.586	0.967	0.193	0.156
KRS463	4.38	1.0	6.0	17.045	0.937	0.187	0.227
KRS464	4.38	1.0	8.0	16.400	0.902	0.180	0.291
KRS465	4.38	1.0	15.0	13.962	0.768	0.154	0.464
KRS466	4.38	1.0	20.0	12.407	0.682	0.136	0.550
KRS467	4.38	1.0	27.0	10.626	0.584	0.117	0.636
KRS468	4.38	1.0	35.0	9.064	0.498	0.100	0.703
KRS469	4.38	1.0	45.0	7.615	0.419	0.084	0.759
KRS470	4.38	1.0	60.0	6.112	0.336	0.067	0.812
KRS471	4.38	1.0	80.0	4.823	0.265	0.053	0.855
KRS472	4.38	1.0	105.0	3.812	0.210	0.042	0.887
KRS473	4.38	1.0	135.0	3.044	0.167	0.033	0.910
KRS474	4.38	1.0	170.0	2.464	0.135	0.027	0.928
KRS475	4.38	1.0	210.0	2.023	0.111	0.022	0.941



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Arif Emre ÖRÜN

Uyruğu: T.C.

Doğum Tarihi ve Yeri: 25.05.1990 Ankara

E-posta: arif.orun@tubitak.gov.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2017, TOBB ETÜ, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2014 -	TÜBİTAK UZAY	Yapısal Tasarım ve Analiz Mühendisi
2014-2017	TOBB ETÜ	ARGE Burlu Yüksek lisans öğrencisi

YABANCI DİL:

İngilizce (YDS 74/100)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Orun, A.E.**, Guler, M.A., Celik M., 2016. Kiriş Yapılarındaki Hafifletme Deliği Etrafındaki Güçlendirmenin, Birleşik Yükler Altındaki Kritik Burkulma Gerilmesi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, *Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı*, September 28-30, Kocaeli, Turkey
- Guler, M.A., **Orun, A.E.**, 2017 (submitted). Effect of hole reinforcement on buckling behaviour under combined loads for a thin-walled structure, *Thin Walled Structure*