



**İnce Kesitli Havacılık Yapısal Parçalarda Yer Alan
Geometrik Unsurların ve Parça Sınır Koşullarının
Burkulma Dayanıma Olan Etkisinin İncelenmesi ve
İyileştirilmesi**

Mert SUBRAN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İnce Kesitli Havacılık Yapısal Parçalarda Yer Alan Geometrik Unsurların ve
Parça Sınır Koşullarının Burkulma Dayanıma Olan Etkisinin İncelenmesi ve
İyileştirilmesi**

Mert SUBRAN
0000-0002-0995-6311

Prof. Dr. Fatih KARPAT
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İnce Kesitli Havacılık Yapısal Parçalarda Yer Alan Geometrik Unsurların ve Parça Sınır Koşullarının Burkulma Dayanımına Olan Etkisinin İncelenmesi ve İyileştirilmesi

Mert SUBRAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih KARPAT

Havacılık sektöründe ve farklı sektörlerde ince kesit içeren yapısal parçalarda, yapının hafifletilmesi, erişim kolaylığı ve sistem gereksinimleri gibi amaçlardan dolayı delik sıklıkla tercih edilen geometrik unsurlardan birisidir. Deliğin yapı üzerinde konumu, şekli, sayısı, boyutu, delik kenarında güçlendirme olup olmaması gibi farklı özellikler yapının dayanımı ve yapı üzerinde oluşan gerilim dağılımı değiştirerek burkulma dayanımını etkilemektedir. Geometrik unsurlar ile birlikte yapıya uygulanan yükleme türü, sınır koşulları, plakanın en/boy oranı gibi özellikler de yapısal parçanın burkulma dayanımını değiştirmektedir. Farklılık gösteren plaka özellikleri ve sınır koşullarından dolayı, yapısal parçalarda burkulmadan kaynaklı oluşabilecek hasarı göz önünde bulundurarak tasarımları boyutlandırmak havacılık endüstrisinde oldukça önemlidir. Yükleme türündeki farklılık ve yapı üzerinde delik olması durumu için farklı çalışmalar literatürde yer almaktadır. Tez kapsamında basit mesnetli ve sabit mesnetli sınır koşulları için basma ve kayma gerilimleri için sonlu elemanlar metodu ile iki boyutlu modeller oluşturarak analiz simülasyonları gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu analiz simülasyonlarından burkulma katsayıları ve kritik burkulma yükleri elde edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada ayrıca diğer bir geometrik unsur olan konvansiyonel üretim yöntemleri ile üretilen parçalarda yer alan köşe yarıçapının; delik çapı ve yapının en/boy oranı ile ilişkisi üç boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak incelenmiştir. Ek olarak parçanın çalışma koşullarında maruz kalacağı yük ve sınır koşullarına uygun daha hafif ve burkulma dayanımı açısından isterleri sağlayan yarıçapı ve delik çapı boyut optimizasyonları gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Plaka Burkulması, Delikli Plaka, Elastik burkulma, Havacılık, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Boyut Optimizasyonu, Deney Tasarımı
2024, xiv + 67 sayfa.

ABSTRACT

MSc/PhD Thesis

Investigation and Improvement of the Effect of Geometric Dimensions and Boundary Conditions on Critical Buckling Strength for Thin Plate Structural Parts in Aerospace Industry

Mert SUBRAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Fatih KARPAT

In the aviation industry and different sectors, holes are a frequently preferred geometric element in structural parts containing thin sections, such as lightening the structure, ease of access, and system requirements. Different characteristics, such as the hole's location on the structure, shape, number, size, and reinforcement on the hole edge, change the structure's strength and stress distribution on the structure. Along with geometric elements, features such as the type of loading applied to the structure, boundary conditions, and the plate's aspect ratio also change the structural parts' buckling strength. Due to these different plate properties and boundary conditions, it is essential to dimension the designs by considering the damage that may occur due to buckling in structural parts in the aviation industry. Different studies are available in the literature regarding the difference in the type of loading and the presence of holes on the structure. Within the thesis scope, buckling coefficients and critical buckling loads were obtained by performing analysis simulations with the two-dimensional finite element model method for compressive and shear stresses for simply supported and fixed supported boundary conditions. In the study carried out, the corner radius in the parts produced with conventional production methods, which is another geometric element; The relationship between the hole diameter and the structure's aspect ratio was examined using a three-dimensional finite element model. In addition, radius and hole diameter dimension optimizations that are lighter and meet the requirements in terms of buckling strength have been carried out by the load and boundary conditions that the part will be exposed to under operating conditions.

Key words: Plate Buckling, Perforated Plate, Elastic Buckling, Aerospace, Finite Elements Method, Size Optimization, Design of Experiments

2024, xiv + 67 pages

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam boyunca kıymetli zamanını, tecrübelerini ve bilgilerini benimle paylaşan, mühendislik problemlerine farklı bakıő açısıyla bakmamı sağlayan, çalıőmalarım sırasında ilgi ve desteğini her zaman hissettiğim, öğrencisi olmaktan onur ve mutluluk duyduğum çok değerli hocam Prof. Dr. Fatih KARPAT'a teşekkür ve saygılarımı sunarım. Her zaman ve her koőulda beni destekleyen, sevgi ve emekleriyle beni bugünlere getiren aileme sonsuz minnetlerimi, teőekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Akademik çalıőmalarımı destekleyen çalıőmaktan büyük bir kıvanç ve gurur duyduğum Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ő. (TUSAŐ)'ne teşekkür ederim.

Mert Subran
06/03/2024



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1 . GİRİŞ	1
2 . KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 . Burkulma.....	8
2.2. Analitik Çözüm.....	10
2.3. Deney Tasarımı (Design of Experiments (DOE)).....	17
2.4. Yapısal Optimizasyon.....	19
2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	21
3 . MATERYAL ve YÖNTEM.....	25
3.1 . Geometrik Model.....	25
3.2 . Sınır ve Yükleme Koşulları.....	28
3.3 . Malzeme Özellikleri.....	31
3.4 Ağ Eleman Boyutu Seçimi.....	32
4 . BULGULAR.....	36
4.1 . İki Boyutlu Sonlu Eleman Modellerinin Analiz Bulguları.....	36
4.2 . Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modellerinin Analiz Bulguları.....	49
4.3 . Boyut Optimizasyonu Bulguları.....	59
5 . SONUÇ	62
6 . KAYNAKLAR	64
7 . ÖZGEÇMİŞ	68

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
a, b	Plakanın en ve boy ölçüleri
d	Delik çapı
ν	Poisson oranı
t	Plakanın kalınlığı
E	Elastisite Modülü
G	Kayma Modülü
ρ	Malzeme Yoğunluğu
σ_{Cr}^u	Tek eksenli kritik burkulma gerilimi delik olmayan plaka için
K_u^0, K_C, K_S, K_B	Burkulma Katsayısı delik olmayan plaka için
$\sigma_{ccrh}^u, \sigma_{bcrh}^u, \tau_{scrh}^u$	Kritik Burkulma gerilimi bası, eğilme, kesme gerilmeleri için
k_C, k_S, k_B	Burkulma katsayı parametreleri
C_1, C_2, C_3	Burkulma gerilim Sabitleri
P_{Cr}	Kritik burkulma kuvveti
A_{bt}	Boy ve kalınlık kenarına ait alan
ν_i	Deney tasarımı değişkenleri
L	Deney tasarımı değişkenin değer seviyesi
k	Deney tasarımı değişken sayısı
Q	Deney Tasarımı değerlendirme sayısı
g_i	Kısıt Fonksiyonu
x, y, z	Optimizasyon parametreleri
F, P	Yapıya Uygulanan Harici Yükleri
P_{cri}	i. mod için kritik burkulma yük değeri
K, K_0, K_σ	Rijitlik Matrisi, Burkulma öncesi rijitlik matrisi, gerilim rijitlik matrisi
u	Yapı üzerinde oluşan deplasman miktarı
λ_i	i. mod için burkulma özdeğer faktörü
R	Radyus yarıçapı değeri
f	Flanş genişliği
t_f	Flanş kalınlığı

Kısaltmalar Açıklama

FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Elements Method)
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
CNC	Bilgisayar Destekli Nümerik Kontrol (Computer Numeric Control)
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute)
MELS	Değiştirilmiş Genişletilebilir Kafes Dizisi (Modified Extensible Lattice Sequence)
DOE	Deney Tasarımı (Design Of Experiments)
BLF	Burkulma Yük Faktörü (Buckling Load Factor)

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1	Eksenel olarak yüklenmiş bir Çubuk için Yük-Deformasyon Davranışı (Revize edilmiştir) (Jones, 2006)	9
Şekil 2.2	Plakanın düzlem içi eksenel yüklemesi için yük deformasyon davranışı (Revize edilmiştir) (Jones, 2006)	10
Şekil 2.3	Yapı üzerine gelen yükleme türleri (a) Basma yükü b) Kesme yükü c) düzlem içi eğilme yükü (Revize edilmiştir) (Huet, 1999)	12
Şekil 2.4	Basma yükü altında yapıların burkulma şekil değişimi (a) kolon tipi b) flanş tipi c) plaka tipi) (Revize edilmiştir) (Huet, 1999)	14
Şekil 2.5	Kolon tipi, flanş tipi, plaka tipi için farklı sınır koşullarının gösterimi (revize edilmiştir) (Huet, 1999)	14
Şekil 2.6	Kesme yükü için sınır koşullarının gösterimi (revize edilmiştir) (Huet, 1999)	16
Şekil 2.7	Düzlem içi eğilme yükü için sınır koşullarının gösterimi (revize edilmiştir) (Huet, 1999)	17
Şekil 2.8	a) 2 değişken 4 değerlendirme için deney tasarımı değişken girdi şeması b) 3 değişken 3 değerlendirme için deney tasarımı değişken girdi şeması (Revize edilmiştir) (Cavazzuti, 2013)	19
Şekil 2.9	Yapısal Optimizasyon türleri örnekleri (revize edilmiştir) (Wang, Wang, Xia, & Poh, 2018)	20
Şekil 2.10	Sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen örnek bir yapı	22
Şekil 2.11	Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan ağ eleman türleri	23
Şekil 3.1	İki boyutlu sonlu elemanlar modelinde kullanılacak geometri parametrelerinin gösterimi	26
Şekil 3.2	Üç boyutlu sonlu elemanlar modelinde kullanılacak geometri parametrelerinin gösterimi	27
Şekil 3.3	İki boyutlu yapıya uygulanan sınır koşullarının köşe noktaları ve koordinat sisteminin gösterimi (Muameleci, 2014)	28
Şekil 3.4	Üç Boyutlu yapıya uygulanan sınır koşullarının gösterimi	30
Şekil 3.5	Her kenarı basit mesnetli 7050 AMS 4201 alüminyum alaşımı plaka için tek eksenli basma için yükü sonlu elemanlar modeli	32
Şekil 3.6	Kenar düğüm sayısına göre kirtik elastik burkulma geriliminin değişimi	34

Şekil 3.7	Her kenarı basit mesnetli plaka için 10 mm ve 0.5 mm ağ eleman boyutları için basma yükü altındaki a) Burkulma özdeğer faktörü grafikleri b) yer değiştirme (deplasman) miktarı grafikleri	35
Şekil 4.1	a) Basit mesnetli plakanın basma gerilmesi yüklemesi durumu b) Sabit mesnetli plakanın basma gerilmesi yüklemesi durumu c) basit mesnetli plakanın kayma gerilmesi yüklemesi durumu d) sabit mesnetli plakanın kayma gerilmesi yüklemesi durumu	36
Şekil 4.2	Bası gerilimi yüklemesi için her kenarı basit mesnetli plaka için a) burkulma özdeğer faktörleri b) kritik burkulma kuvveti c) burkulma eşdeğer katsayısı d) Maksimum von mises gerilimi grafikleri	38
Şekil 4.3	Bası gerilimi yüklemesi için her kenarı sabit mesnetli plaka için a) burkulma özdeğer faktörleri b) kritik burkulma kuvveti c) burkulma eşdeğer katsayısı d) Maksimum von mises gerilimi grafikleri	40
Şekil 4.4	Kayma gerilimi yüklemesi için her kenarı basit mesnetli plaka için a) burkulma özdeğer faktörleri b) kritik burkulma kuvveti c) burkulma eşdeğer katsayısı d) Maksimum von mises gerilimi grafikleri	42
Şekil 4.5	Kayma gerilimi yüklemesi için her kenarı sabit mesnetli plaka için a) burkulma özdeğer faktörleri b) kritik burkulma kuvveti c) burkulma eşdeğer katsayısı d) Maksimum von mises gerilimi grafikleri	44
Şekil 4.6	$a/b=2$ ve $d/b=0.3$ merkezi delikli plakanın a) sabit mesnetli bası gerilmesi yüklemesi plaka için burkulma özdeğer dağılımı b) kritik yükleme durumu için plaka üzerindeki von mises gerilim dağılımı c) sabit mesnetli kayma gerilmesi yüklemesi için burkulma özdeğer dağılımı d) kritik yükleme durumu için plaka üzerindeki von mises gerilim dağılımı e) basit mesnetli bası gerilmesi yüklemesi için burkulma özdeğer dağılımı f) kritik yükleme durumu için plaka üzerindeki vonmises gerilim dağılımı g) basit mesnetli kayma gerilmesi yüklemesi için burkulma özdeğer dağılımı h) kritik yükleme durumu için plaka üzerindeki von mises gerilim dağılımı	45
Şekil 4.7	Sabit Mesnetli kayma gerilimi yüklemesi için plaka üzerindeki farklı çaptaki delikler için 1. burkulma modu dağılımı	46

Şekil 4.8	Sabit Mesnetli basma gerilimi yüklemesi için plaka üzerindeki farklı çaptaki delikler için 1. burkulma modu dağılımı	46
Şekil 4.9	Basit mesnet sınır koşuluna sahip basma gerilmesi yüklemesi için radyus yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod kritik burkulma kuvvet değerleri	50
Şekil 4.10	Basit mesnet sınır koşuluna sahip basma gerilmesi yüklemesi için radyus yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod burkulma özdeğer faktörleri	51
Şekil 4.11	Sabit mesnet sınır koşuluna sahip basma gerilmesi yüklemesi için radyus yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod kritik burkulma kuvvet değerleri	52
Şekil 4.12	Sabit mesnet sınır koşuluna sahip basma gerilmesi yüklemesi için radyus yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod burkulma özdeğer faktörleri	53
Şekil 4.13	Basit mesnet sınır koşuluna sahip kayma gerilmesi yüklemesi için radyus yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod kritik burkulma basınç değerleri	54
Şekil 4.14	Basit mesnet sınır koşuluna sahip kayma gerilmesi yüklemesi için radyus yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod burkulma özdeğer faktörleri	55
Şekil 4.15	Sabit mesnet sınır koşuluna sahip kayma gerilmesi yüklemesi için radyus yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod kritik burkulma basınç değerleri	56
Şekil 4.16	Sabit mesnet sınır koşuluna sahip kayma gerilmesi yüklemesi için radyus yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod burkulma özdeğer faktörleri	57
Şekil 4.17	Optimizasyon 1 Sonuçlarına göre yapının güvenlik katsayısı dağılımı	60
Şekil 4.18	Optimizasyon 2 Sonuçlarına göre yapının güvenlik katsayısı dağılımı	60
Şekil 4.19	Optimizasyon 1 sonuçlarına göre yapının kritik burkulma bölgeleri	61



ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1	Tek eksenli basma yükü için burkulma sabitleri (Huet, 1999)	15
Çizelge 2.2	Kesme yükü için burkulma sabitleri (Huet, 1999)	16
Çizelge 2.3	Düzlem içi eğilme yükü için burkulma sabitleri (Huet, 1999)	17
Çizelge 2.4	2 Değişken 2 seviye için deney tasarımı kombinasyonları	18
Çizelge 3.1	Her kenarı basit mesnetli plaka için öteleme (U_1 , U_2 , U_3) ve dönme (R_1 , R_2 , R_3) serbestlik dereceleri (Muameleci, 2014)	29
Çizelge 3.2	Her kenarı sabit plaka için öteleme (U_1 , U_2 , U_3) ve dönme (R_1 , R_2 , R_3) serbestlik dereceleri (Muameleci, 2014)	29
Çizelge 3.3	Her kenarı basit mesnetli plaka için öteleme (U_1 , U_2 , U_3) Serbestlik dereceleri	30
Çizelge 3.4	Her kenarı sabit mesnetli plaka için öteleme (U_1 , U_2 , U_3) Serbestlik dereceleri	30
Çizelge 3.5	7050 AMS 4201 Alüminyum alaşımı malzeme özellikleri (Rice, Jackson, Bakuckas, & Thompson, 2003)	31
Çizelge 3.6	Farklı ağ boyutlarına göre elde edilen kritik elastik burkulma gerilimleri	34
Çizelge 4.1	Sınır Koşullarına göre yapının kütlelerinin karşılaştırma tablosu	47
Çizelge 4.2	Sınır Koşullarına göre yapının kütlelerinin karşılaştırma tablosu	48
Çizelge 4.3	Üç boyutlu sonlu elemanlar modellerinde kullanılan geometrilerin kütle değerleri	58
Çizelge 4.4	Boyut Optimizasyonu Sınır Koşulları	59
Çizelge 4.5	Optimizasyon Fonksiyonları ve Değişkenleri	59
Çizelge 4.6	Boyut Optimizasyonu Çıktıları	59

1. GİRİŞ

Yapısal parçalarda yer alan geometrik unsurlardan delik (cutout), ince kesitli yapısal parçalarda farklı amaçlar doğrultusunda; ağırlık azaltımı, kablolama, hidrolik hatlar ve kontrol bağlantıları için servis gereksinimi, montaj ve bakım için erişilebilirlik gibi havacılık, gemi inşaatı gibi farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapıda delik, köşe radyus gibi farklı geometrik unsurların yer alması durumunda parçada oluşacak gerilim dağılımı değiştirerek burkulma dayanımını etkilemektedir. Burkulma, yapının üzerine gelen yükleme doğrultusunda yapı üzerinde meydana gelebilecek kararsızlık durumudur. Yapının kararsızlık durumu burkulmadan kaynaklı malzemenin akma mukavemetinin oldukça altında daha düşük gerilim seviyesinde meydana gelebileceğinden dolayı yapısal parçaların burkulma dayanımı göz önünde bulundurularak boyutlandırılması oldukça önemlidir.

Plakaların burkulma dayanımlarının araştırılmasına yönelik literatürde farklı çalışmalar vardır. Plakalara uygulanan yükleme türü ve doğrultusu, plakanın sınır koşulları, plakaya eklenen takviye yapılarının şekli, plaka üzerinde yer alan unsurların boyutlarının değişiminin burkulma dayanımları etkisinin incelenmesi bu çalışmalardan bazılarıdır.

Plakaların burkulma dayanımlarının analitik hesaplamalarında boyutsuz burkulma katsayıları gereklidir. Çalışma kapsamında sonlu elemanlar yöntemini esas alan yazılım ile dört kenarı sabit ve basit mesnetli sınır koşullarına sahip dairesel delikli kare ve farklı en/boy oranlarına sahip dikdörtgen plakaların basma ve kayma gerilim yüklemeleri için lineer burkulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma ile birlikte farklı en/boy oranların, plaka üzerinde yer alan merkezi dairesel deliğin çap değişimindeki ilişkisi elde edilerek burkulma katsayısı verileri, yapının kritik burkulma dayanım yükü elde edilmiştir. Ek olarak kritik burkulma yükü esnasında yapı üzerinde oluşacak maksimum lineer statik yükü de elde edilerek yapının hangi gerilmeden kaynaklı hasar oluşacağı tespiti gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler ile literatürde yer alan aynı konfigürasyonlar için karşılaştırılarak doğrulamalar gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında diğer bir unsur olarak konvansiyonel üretim yöntemleri ile üretilen ince kesitli CNC parçaların köşe radyuslerinin, delik boyutu ile olan ilişkisi

araştırılarak burkulma dayanımına olan etkisi incelenmiştir. İncelenen sınır koşulları için ve farklı yükleme türüne göre parçadan istenen çalışma koşulları isterlerini sağlayacak şekilde boyut optimizasyonu gerçekleştirilerek hafif tasarımı sağlayan geometrik parametreler elde edilmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Uslu ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu çalışmada kare ve dairesel deliklerin yer aldığı farklı ince kesitli plakaların basma yükü için farklı parametrelerdeki değişimin burkulma dayanımına etkisi açısından incelenmeler gerçekleştirmişlerdir. Araştırma ile birlikte; delik şekilleri, narinlik oranları, toplam delik alanları gibi parametrelerdeki değişimin yapıda burkulma oluşması için gerekli kritik burkulma yüküne olan etkisi araştırılmıştır. Yapıların analizlerinde sonlu elemanları metodu kullanılmıştır. Delik şekil alanları kare ve dairesel delikler için aynı olacak şekilde tutularak karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışma ile aynı boşluk oranına sahip merkezi karesel delikli ince kesitli yapıların burkulması için merkezi dairesel delikli yapılara göre daha fazla yükleme yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır (Uslu, Saraçoğlu, & Albayrak, 2022) .

Musmar'ın gerçekleştirmiş olduğu çalışma kapsamında basit mesnetli sınır koşuluna sahip çelik malzemeli kare plakanın kenar boyu/kalınlık oranının minimum 100 olduğu durum için tek eksenli yükleme durumlarında güçlendirilmiş/güçlendirilmemiş düz plakaların, güçlendirilmiş/güçlendirilmemiş ve delik/deliklerin olduğu plakaların sonlu elemanlar yöntemi burkulma dayanımları araştırılmıştır. Çalışmada lineer elastik burkulma analizi ile birlikte lineer olmayan burkulma analizi simülasyonları da gerçekleştirilmiştir. Çalışma ile birlikte güçlendirme yapılmamış merkezi delikli yapıların, muadili delik olmayan yapıya göre plakanın maksimum dayanımı ile birlikte yapının burkulma dayanımı da azalttığı sonucuna varılmıştır. Yapılara yapılan güçlendirmelerin yapının burkulma dayanımını önemli ölçüde arttırdığı; güçlendirilmiş yapılara eklenen delikler, güçlendirilmiş delikli olmayan yapıya göre burkulma miktarını belli bir miktar azaltsa da yapının sünekliğini arttırdığını gözlemlemişlerdir (Musmar, 2022).

Wang ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu çalışmada her kenarı basit mesnet sınır koşuluna sahip tek eksenli basma yükleme durumu için merkezinde dairesel delik ve deliğin etrafında yer alan flanşlı kare plakadaki; flanşın ve geometrik yapıya ait farklı parametrelerin, yapının burkulma dayanımına olan etkilerini incelemişlerdir. Yapının burkulma davranışları elastik ve elasto plastik olarak incelenmiştir. Çalışma bulguları olarak geometrik parametrelerinin (plaka narinlik oranı ve delik yarıçapı oranı gibi) plakanın burkulma dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve flanşlı delikli

plakalar flanşsız olanlara göre daha yüksek burkulma mukavemetine sergilediği sonucuna varmışlardır (Wang, Ning, Wei, Mei, & Xu, 2023).

Wesheng ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu çalışmada flanşlı elips delik bulunan plakalar için elips boyutunun, flanş yüksekliğinin, elips konumunun ve elipsin dönme açısı gibi parametrelerin yapının burkulma dayanımına olan etkisini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında plakaya etki eden tek eksenli basma yükü için elasto-plastik burkulma analizleri gerçekleştirmişlerdir. Delik kenarına eklenen flanş yapının burkulma dayanımını verimli bir şekilde arttırdığı gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında incelenen diğer elipsin geometrik parametreleri yapının maksimum taşıma kapasitesi üzerinde önemli ölçüde etkilediği sonucuna varmışlardır (Wensheng, Huijun, & Xin, 2023).

Ghorbanhosseini ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu çalışmada farklı sınır koşulları için sahip delikli ince kesitli dikdörtgen plakalarda yer alan delik konumunun ve plakanın en/boy oranındaki değişimin elastik burkulma kapasitesine etkisi sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Çalışmada ayrıca yapının burkulma dayanımını arttırmak amacıyla iki farklı güçlendirme elemanlarının diziliminin yapının burkulma dayanımı araştırılmıştır. Eklenen takviyeler sayesinde yapının burkulma dayanımının %83 arttığı gözlemlenmiştir. Analizler sonucunda dört kenarı sabit kenar sınır koşulu olan plakanın burkulma katsayısının diğer plakaların burkulma katsayılarından daha fazla olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca en/boy oranının dörtten büyük olan yapılar için burkulma katsayısı önemli ölçüde değişmediği bulgusu elde edilmiştir (Ghorbanhosseini, Yaghoubi, & Bahrambeigi, 2021).

Kim ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu çalışmada yapı üzerinde oluşan yer değiştirme miktarından yapının burkulma dayanımı kapasitesinin elde edilmesi üzerinde araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında aksenal basınca maruz kalan basit mesnetli delikli çelik plakanın yanal yer değiştirmesini; deliğin boyutu ve plakanın en/boy oranı gibi değişkenleri dikkate alınarak burkulma deneyleri ve sonlu elemanlar metodu kullanan analiz programı ile elasto-plastik yer değiştirme analizleri gerçekleştirerek karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda farklı delik boyutlarına sahip plakalar yanal yer değiştirme miktarında belirgin bir fark olduğunu

göstermiştir. Lokal burkulma temel olarak delik çevresinde oluştuğu, delik çapındaki artış ile burkulma miktarında belirgin bir artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Çalışma ile birlikte lokal burkulma aşamasının sonunda delikli plakaların nihai dayanımı elde edilmiştir (Kim, Park, Kim, Kim, & Lee, 2021).

Baumgardt ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu çalışmada metalik plakaların yanal yük ile birlikte tek eksenli veya çift eksenli kombine yükleme durumu için plakaların burkulma mekanik davranışları sonlu elemanlar metodu analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ile literatürde bulunan çalışmalar karşılaştırılarak çalışmada kullanılan simülasyon modeli doğrulanmıştır. Doğrulan model ile birlikte çift eksenli basma yükleme durumu için beş farklı metalik malzeme için yapının burkulma davranışı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların tutarlı olduğu ve çift eksenli basma yükleme durumu için daha yüksek burkulma dayanımı gösteren ve yapı üzerinde daha az yer değiştirme meydana gelen yapıların malzemeleri sırasıyla AISI 4130 çeliği ve AH-36 çeliği olduğu gözlemlenmiştir (Baumgardt, ve diğerleri, 2023).

Silva ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu çalışmada dört kenarı da basit mesnetli merkezinde boyuna ve enine altıgen şekilli delik içeren kare ve dikdörtgen plakalarda yapının basma yükü altındaki mekanik kritik burkulma dayanımları ve nihai kritik burkulma dayanımlarının belirlenmesini amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında sonlu elemanlar metodunu temel alan ticari analiz yazılımı kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Altıgen delik genişliğinin delik uzunluğa oranı ve diğer bir parametre olarak delik hacmi oranının toplam plaka hacminin %10, %15, %20 ve %25 değerleri için burkulma davranışı üzerindeki değişimin etkisine yönelik araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma bulgularından birisi olarak, hacim oranlarının ve deliğin genişliğinin uzunluğa oranlarının tüm kombinasyonları için uzunlamasına altıgen deliğin plakalarının enlemesine altıgen delikli plakalara göre daha iyi bir burkulma dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir (Silva, ve diğerleri, 2019).

Scheperboer ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu çalışmada delik içeren basit mesnetli kare plakaların lokal burkulmasının incelenmesini ele almaktadır. Farklı narinlik oranlarına sahip plakalar tek eksenli basma yükü için incelenmiştir. Çalışma kapsamında yapı üzerinde tek bir delikten 25 deliğe kadar farklı delik dizilimleri için yapıların

burkulma kapasiteleri araştırılmıştır. Ek olarak plaka malzemelerinin burkulma dayanıma etkisi açısından birtakım alüminyum alaşımları ile A36 çelik sınıfı için karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgulardan biri olarak tek deliğe sahip yapının burkulma direncinin daha fazla delik içeren eşit toplam delik alanına sahip plakalardan daha yüksek olduğudur (Scheperboer, Efthymiou, & Maljaars, 2016).

Mauro ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu çalışmada çelik dikdörtgen plakalarda dairesel deliklerin elastik ve elastik olmayan burkulma üzerindeki değişiklikleri araştırmaktadır. Tek eksenli olarak yüklenen dairesel kesitli dikdörtgen plakaların elastik ve elastoplastik burkulma yükleri sonlu eleman yöntemi (FEM) ile değerlendirmişlerdir. Analizlerde plakanın kalınlığı, delik çapı ve plaka en/boy oranı değiştirilerek incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda dairesel deliğin bazı durumlarda elastik burkulma yükünü arttırabileceği, elasto-plastik burkulma yükünün delik varlığıyla azaldığını göstermektedir (Mauro, Isoldi, Damas, & Helbig, 2013).

Sayed tarafından gerçekleştirilen çalışmada çelik delikli saç yapılarının mekanik etkileri araştırılmıştır. Çalışmada üç boyutlu sonlu eleman modeli ve modelin doğruluğunu kanıtlamak için deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Delikli eşkenar dörtgen şeklinin etkisinin diğerlerine göre daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır (Sayed, 2019).

Saraçoğlu ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, delik şekillerinin plaka boyutları ile olan ilişkisi sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilerek incelenmiştir. Deliğin şekli kare ve dairesel delikler dahil 8 farklı delik şekilli model için incelemeler gerçekleştirilmiştir. Plakaların sınır koşulları olarak dört kenarı sabit ve basit mesnetli olmak üzere farklı sınır koşulları ile karşılaştırılmıştır. Plaka üzerinde delik şekli daire olması durumunda orta nokta sehiminin azaldığı sonucuna varılmıştır (Saraçoğlu, Uslu, & Albayrak, 2021).

Orun ve diğerlerinin gerçekleştirmiş olduğu çalışmada havacılık yapılarında kullanılan ince cidarlı yapıların kombine yüklemeler altında, deliklerin çevresinde bulunan güçlendirmelerin burkulma dayanımına etkisi araştırılmıştır. Burkulma analizi için gerçek boyutlara sahip bir gövde taban kirişi kullanılarak kirişin geometrik boyutları için farklı yükleme senaryoları için parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. İncelenen parametreler arasında delik çapının, delik çapının çevresinde yer alan güçlendirme

yapısının genişliğine oranları, güçlendirme yapısının yüksekliğinin plaka kalınlığına oranı ve plakanın en boy oranları yer almaktadır. İnce kesitli yapı malzemesi Al 7075 alaşımıdır. Çalışma kapsamında sonlu elemanlar yöntemini baz alan yazılım kullanılarak basma, kesme ve eğilme yükleri senaryoları ile birlikte kombine yükleme durumları için analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı yükleme senaryolarının burkulma mukavemeti üzerinde etkisi deliksiz, delik içeren ve delik kenarında güçlendirme olan durumlar için karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma ile ince kesitli bir yapının kombine yükleme durumları da dahil farklı yük durumları altında hasar görüp görmeyeceğini kontrol etmek için grafiksel veriler elde edilmiştir (Orun & Guler, 2017).

Yingjiang ve arkadaşlarının çalışması kapsamında eksenel basınç ve eğilme momentine maruz kalan delikli plaka kirişlerin hasar modlarını ve nihai yük kapasitesi durumlarını araştırmak için deneysel ve numerik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları ile numerik modellerin, gövdesi delik içeren plaka kirişlerinin hasar davranışlarını öngörebildiği gözlemlenmiştir. Çalışma ile özellikle gövdenin ortasına yakın delik konumunun plaka kirişlerin nihai kapasite yükü üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Deneysel ve sayısal araştırmalar sayesinde delik konumunun etkilerini hesaba katacak bir etki eğrisi önerilmiştir (Yingjiang, Renjun, & Hongxu, 2015).

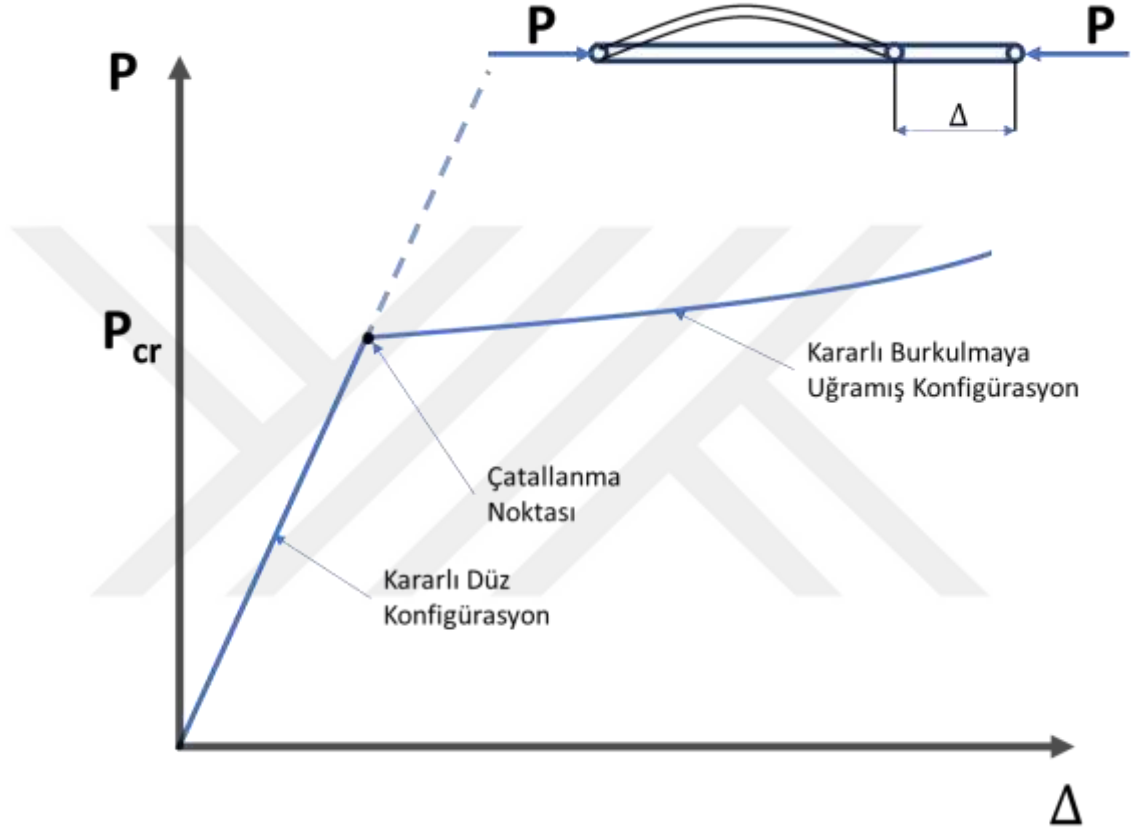
NASA tarafından gerçekleştirilen çalışma kapsamında merkezi delik içeren dikdörtgen plakalar üzerinde mekanik ve termal burkulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Plakaların üzerinde bulunan delikli şekilleri dairesel ya da kare delik şekilleri için değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Plakanın sınır koşulları, plaka en boy oranının delik geometrisi ve delik boyutunun plakaların mekanik ve termal burkulma mukavemetleri üzerindeki etkilerini sonlu elemanlar yapısal analiz yöntemi ile incelenmiştir. Delik boyutunun arttırılması ile plakaların termal burkulma mukavemeti arttırılabilmektedir. Plakaların basma burkulma dayanımı ise belirli sınır koşulları ve en boy ölçüleri altında artabilmektedir. Çalışma ile birlikte daire ve kare şekilli aynı delik alanı için, kare şeklinde delik içeren plakalarda burkulma mukavemeti daire şekilli deliğe göre daha yüksek olduğu elde edilmiştir (Ko, 1998).

2.1. Burkulma

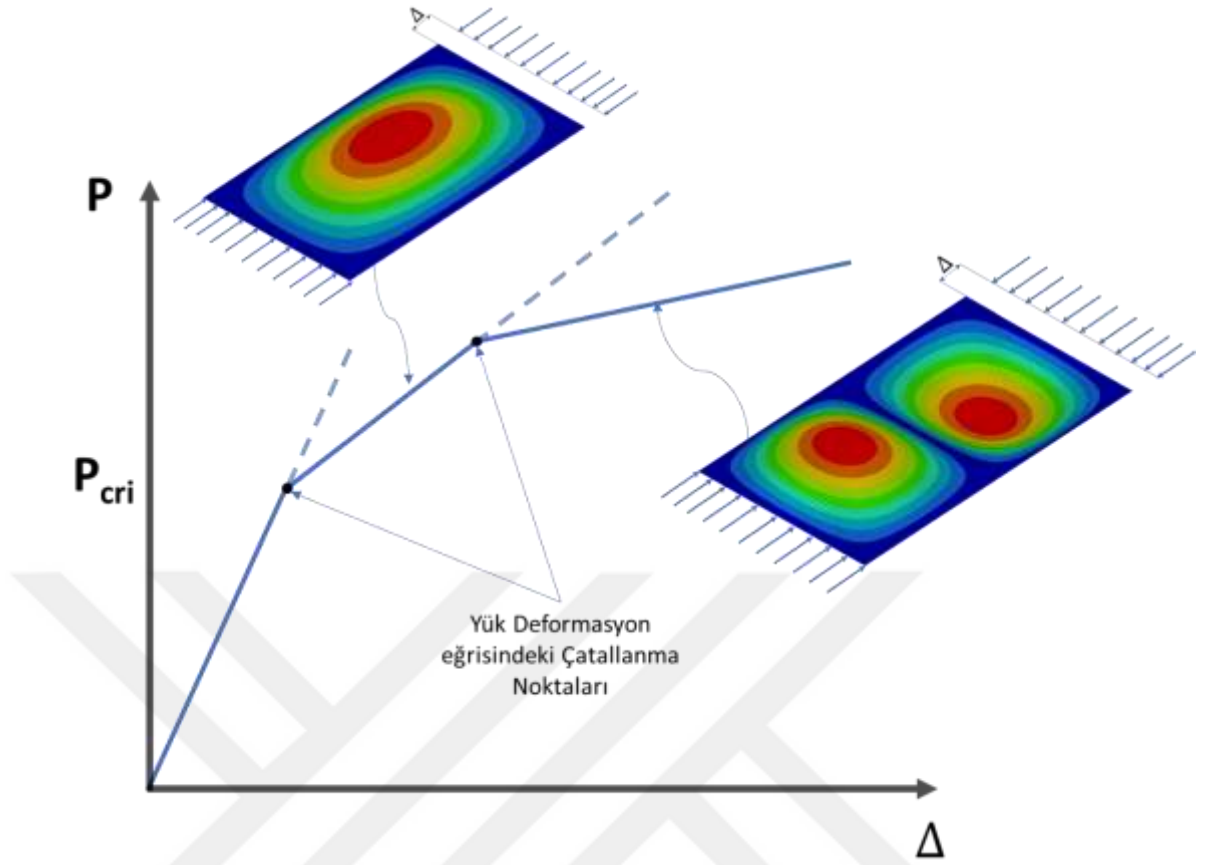
Burkulma, yapısal parçanın kararlı durumundan ani bir şekilde mevcut denge durumunu kaybederek kararsız duruma geçmesidir. Yapının kararsız duruma geçmesi için uygulanan yük büyüklüğü kritik burkulma yük değeridir. Kritik burkulma yükü yapının denge konumunda yapının taşıyabileceği yük kapasitesi değeridir. Burkulma yükü aşıldığında yapı üzerinde büyük deformasyon miktarı oluşabilmektedir. Örnek olarak aksel yüküne maruz kalan bir çubuğun boyu yük arttıkça aksel yönde kısalmaktadır. Burkulma yüküne ulaşıldıktan sonra ise yük değerinde en ufak bir artış olduğunda çatallanma noktası aşılar ve yapı üzerinde aksel ve yanal yönde yer değiştirme meydana gelmektedir. Dolayısıyla aksel bükülme yükünde düz çubuğun dengesi kararsız hale gelir. Aksel olarak yüklenmiş bir kolon için örnek yük-deformasyon davranışı Şekil 2.1'de yer almaktadır. Plakalar için ise farklı çatallanma burkulması yükleri bulunmaktadır. Her bir burkulma yükünde ise farklı bir burkulma modu oluşmaktadır. Plakalar için genellikle en az iki tane çatallanma burkulması mevcuttur. Şekil 2.2'de plaka üzerine yapılan yüklemde P kuvvetinin üzerinde yük-sapma eğrisi boyunca bir mod şeklinde stabil bir biçimde deforme olan burkulmuş bir plaka belirli bir yük sonrasında başka bir mod şeklinde burkulabilmektedir. Yapısal elemanda burkulma oluşmasındaki önemli özellikler deplasman modu şeklindeki değişiklik, kritik bir yükte ani deformasyon ve yük-deformasyon eğrisindeki eğri değişiklikliğini örnek olarak verilebilmektedir (Jones, 2006).

Çatallanma burkulma yükündeki burkulma yük değerine çatallanma burkulması yükü denir. Bir çubuğun çatallanma burkulmasını inceleyen ilk kişi Euler olduğu için Euler burkulma yükü olarak da adlandırılmaktadır (Euler, 1947) (Friedrichs, 1941). Maksimum yük ise yapının hasara uğramadan taşıyabileceği en büyük kuvvet değeridir. Yapının maksimum taşıyabileceği yük taşıma kapasitesi sadece burkulma yükü tarafından belirlenmemektedir. Burkulma sadece hasar modlarından birisidir. Yapı üzerinde hasar farklı şekillerde oluşabilmektedir. Fazla gerilimin oluşması nedeniyle gevrek malzemelerde kırılma veya sünek malzemeli yapılarda ise akma sınırının aşılmasından dolayı malzemede kalıcı şekil değişiminden dolayı hasar oluşabilmektedir. İnce plakalarda akma gerilimin çok altında olan ortalama kritik gerilme değerinde kararsızlık meydana gelebilmektedir. Bu gerilim değerine elastik burkulma gerilimi denir. Kalın

plakalarda ise kararsızlık plaka malzemesinin akma dayanımı aşıldıktan sonra gerinin sertleşmesi aşamasına girildikten sonra ortaya çıkabilir. Bu durumda plakanın burkulmasına elastik olmayan burkulma denilmektedir (El-Sawy & Nazmy, 2001). Tez çalışması kapsamında elastik burkulma üzerine incelemeler gerçekleştirilmiştir. Plaka malzemesinin ise lineer elastik olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 2.1 Eksnel olarak yüklenmiş bir Çubuk için Yük-Deformasyon Davranışı (Revize edilmiştir) (Jones, 2006)



Şekil 2.2 Plakanın düzlem içi aksel yüklemesi için yük deformasyon davranışı (Revize edilmiştir) (Jones, 2006)

2.2. Analitik Çözüm

Dikdörtgen plakanın elastik burkulması ilk kez Timoshenko tarafından incelenmiştir (Ghorbanhosseini, Yaghoubi, & Bahrambeigi, 2021) (Timoshenko & Gere, 1961). Timoshenko bir plaka için kritik gerilmenin plakanın boyutlarına, kalınlığına, elastik modülüne ve poisson oranına bağlı olduğunu; plakanın burkulma geriliminin hesabında gerekli olan plakanın sınır şartlarına, yükleme türüne ve plakanın en/boy oranına bağlı olan boyutsuz burkulma katsayısı parametresini tanıtmıştır. Bu parametrelere bağlı olarak basit mesnetli bir delik yer almayan plakanın tek eksenli basma yükü altındaki elastik burkulma gerilimi denklem 1 ile analitik olarak hesaplanmaktadır (Narayanan & Chow, 1984).

$$\sigma_{Cr}^u = K_u^0 \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (1)$$

Her kenarı basit mesnetli delik olmayan düz bir plaka için burkulma katsayısı denklem 2'deki formülle hesaplanabilmektedir (Narayanan & Chow, 1984). Farklı sınır koşulları, en boy oranları ve yükleme durumları için burkulma katsayıları gerçekleştirilen çalışmalarda yer almaktadır. (Bruhn, S., S., & E., 1973) (NIU, 1999).

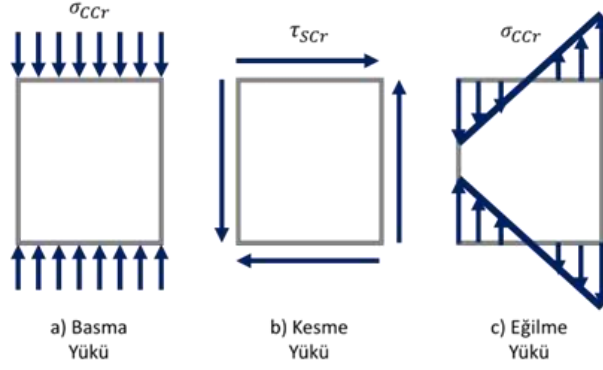
$$K_u^0 = \left(\frac{b}{a} + \frac{a}{b}\right)^2 \quad (2)$$

Basit mesnetli kare ($a = b$) plaka için 1 numaralı formül aşağıdaki hale indirgenebilmektedir (NIU, 1999).

$$\sigma_{Cr}^u = 3.62E \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (3)$$

Burkulma gerilimi hesabı için gerekli olan, burkulma katsayısı yapının en boy oranı, yapının kenar sınır koşulları ve yükleme tipine (Şekil 2.3) göre değişmektedir. NIU'nun gerçekleştirmiş olduğu çalışmada serbest kenar, sabit mesnetli kenar, basit mesnetli kenar ve dönme hareketi kısıtlanmış kenar gibi farklı sınır koşulları için burkulma katsayıları yapıya etki eden yükleme türü ve en boy oranına göre elde edilebilmektedir (NIU, 1999). Huet'in gerçekleştirmiş olduğu çalışmada ise basma, düzlem içi eğilme ve kesme yükleri için yapının burkulma gerilimleri 4 numaralı denklem ile hesaplanmaktadır (Huet, 1999).

$$\begin{aligned} \sigma_{crrh}^u &= K_C E \left(\frac{t}{b}\right)^2 \\ \sigma_{brrh}^u &= K_B E \left(\frac{t}{b}\right)^2 \\ \tau_{Cr_{scrh}}^u &= K_S E \left(\frac{t}{\min\{a, b\}}\right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$



Şekil 2.3 Yapı üzerine gelen yüklemeler türleri (a) Basma yükü b) Kesme yükü c) düzlem içi eğilme yükü (Revize edilmiştir) (Huet, 1999)

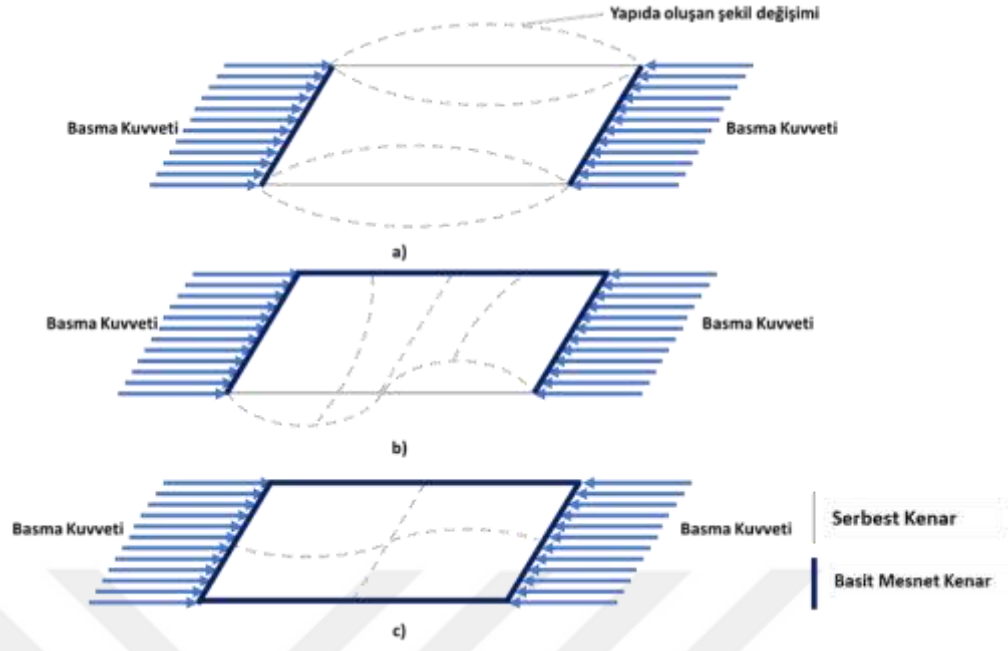
Formüllerde yapının yüklemeler tipine göre farklı formüllerle kritik burkulma gerilimi hesaplanmaktadır. Bası, eğilme ve kesme kuvvetleri için yapının burkulması için kritik gerilim değerleri sırası ile σ_{ccrh}^u , σ_{bcrh}^u , σ_{scrh}^u 'dir. Formüllerde yer alan K_C, K_B, K_S burkulma katsayılarını temsil etmektedir. Burkulma katsayıları yapının yüklemeler durumu ve kenar sınır koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Huet gerçekleştirmiş olduğu çalışmada üç yüklemeler durumu için ve farklı kenar sınır koşulları için formüllere yer vermiştir. Burkulma katsayısı için Huet'in çalışmasında yer alan formüller aşağıda bulunmaktadır.

$$\begin{aligned}
 K_C &= \frac{\pi^2 k_C}{12(1 - \nu^2)} \\
 K_S &= \frac{\pi^2 k_S}{12(1 - \nu^2)} \\
 K_B &= \frac{\pi^2 k_B}{12(1 - \nu^2)}
 \end{aligned} \tag{5}$$

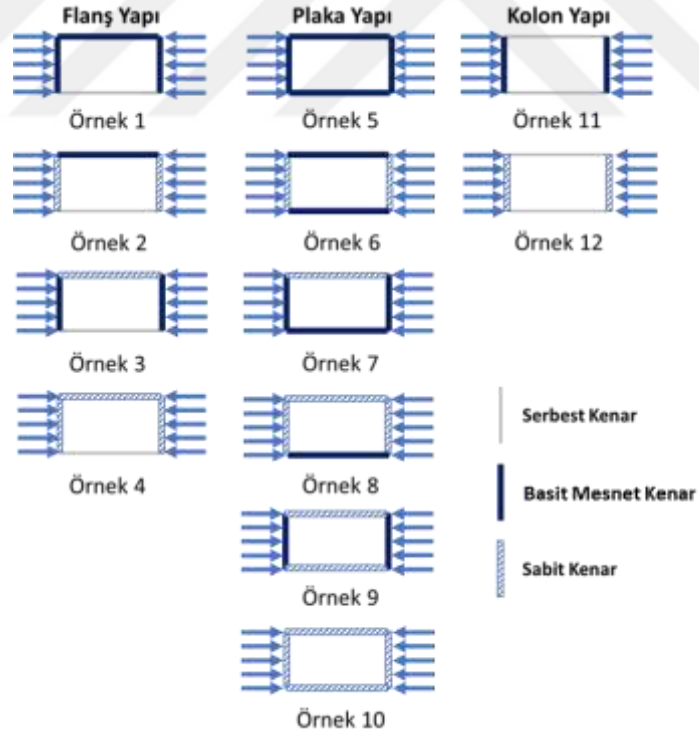
Formüllerde yer alan k_C, k_S, k_B burkulma katsayı parametreleri, yapının kenar sınır koşullarına göre yüklemeler durumuna göre elde edilmektedir. Tek eksenli basma yükü için burkulma katsayısı parametresini elde etmek için 6 numaralı denklem ile hesaplanmaktadır (Huet, 1999).

$$k_C = \begin{pmatrix} k_C = C_1 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + C_2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + C_3 & , 0 \leq \frac{a}{b} \leq Lim \\ k_C = k_{C\infty} & , \frac{a}{b} \geq Lim \end{pmatrix} \quad (6)$$

C_1, C_2, C_3 sabitleri kenar sınır koşullarına göre değişmektedir. Levhanın kenarlarındaki sınır koşullarına 4 kenarından 3 kenarının kısıtlı olduğu ve bir kenarının serbest olduğu flanş yapı (Free Flange), 4 kenarının sabit kenar (fixed/clamped) ve/veya basit destekli/menteşe kenar (hinged/simply supported) plaka yapı olarak Şekil 2.4'de sınıflandırılmıştır. Huet gerçekleştirmiş olduğu çalışmada tek eksenli basma yükü için flanş yapı, plaka yapı ve kolon yapı durumları için C_1, C_2, C_3 katsayıları yer almaktadır. a/b Oranının oldukça büyük olduğu durum için ise $k_C = k_{C\infty}$ olmaktadır. Şekil 2.4'de 3 yapının farklı sınır koşulları yer almaktadır. Farklı sınır koşulları için C_1, C_2, C_3 sabitleri ise Çizelge 2.1'de yer almaktadır. Tablodaki sabitler kullanılarak denklem 4, 5 ve 6 kullanılarak, yapının basma yükü için kenarlara uygulanması gereken kritik basma burkulma gerilim değeri elde edilir. Tabloda örnek 7 ve 8. Durumlar için burkulma katsayı parametresi yüklenme yapılmayan yanal kenarların basit mesnetli ve sabit kenarların k_C değerleri bağlı olarak tabloda yer aldığı şekilde elde edilmektedir (Huet, 1999).



Şekil 2.4 Basma yükü altında yapıların burkulma şekil değişimi (a) kolon tipi b) flanş tipi c) plaka tipi) (Revize edilmiştir) (Huet, 1999)



Şekil 2.5 Kolon tipi, flanş tipi, plaka tipi için farklı sınır koşullarının gösterimi (revize edilmiştir) (Huet, 1999)

Çizelge 2.1 Tek eksenli basma yükü için burkulma sabitleri (Huet, 1999)

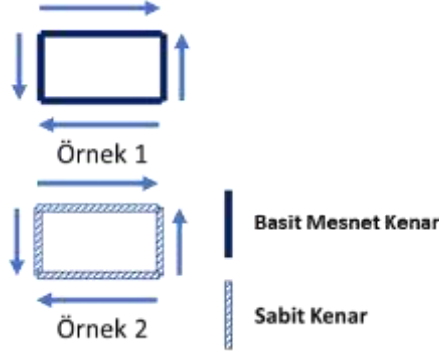
		C ₁	C ₂	C ₃	Lim	k _{C∞}
Flanş Yapı	Örnek 1	0	1	0.43	∞	0.43
	Örnek 2	0	4.143	0.384	9.49	0.43
	Örnek 3	0.136	0.987	0.551	1.64	1.28
	Örnek 4	0.007	3.923	0.94	4.34	1.28
Plaka Yapı	Örnek 5	1	1	2	1	4
	Örnek 6	0	2.7	4	∞	4
	Örnek 7	$k_C = \sqrt{k_{C(\text{yüksüz menteşe kenarlar})} k_{C(\text{yüksüz sabit kenarlar})}}$				
	Örnek 8					
	Örnek 9	4.885	0.965	2.638	0.66	6.98
	Örnek 10	0	2.9	6.98	∞	6.98
Kolon Yapı	Örnek 11	0	1	0	∞	0
	Örnek 12	0	4	0	∞	0

Yapıya etki eden yük kesme gerilimi olduğu durumda ise k_S değeri elde edilirken 7 numaralı denklem kullanılmaktadır. a/b Oranının oldukça büyük olduğu durum için ise $k_S = k_{S\infty}$ olmaktadır (Huet, 1999).

$$k_S = \begin{cases} k_S = C_1 \min \left\{ \frac{a}{b} ; \frac{b}{a} \right\} + C_2 & , 0 \leq \frac{a}{b} \leq Lim \\ k_S = k_{S\infty} = C_2 & , \frac{a}{b} \geq Lim \end{cases} \quad (7)$$

Kesme yükü için burkulma katsayı parametresinin belirlenmesinde iki farklı sınır koşulu (Şekil 2.6) için Çizelge 2.2'de yer almaktadır. Tabloda yer alan kesme yükü için

burkulma sabitleri denklem 7'de yerine yazılarak burkulma katsayı parametresi belirlenir. Kritik burkulma kesme gerilimi değeri ise denklem 4 ve 5 ile bulunur.



Şekil 2.6 Kesme yükü için sınır koşullarının gösterimi (revize edilmiştir) (Huet, 1999)

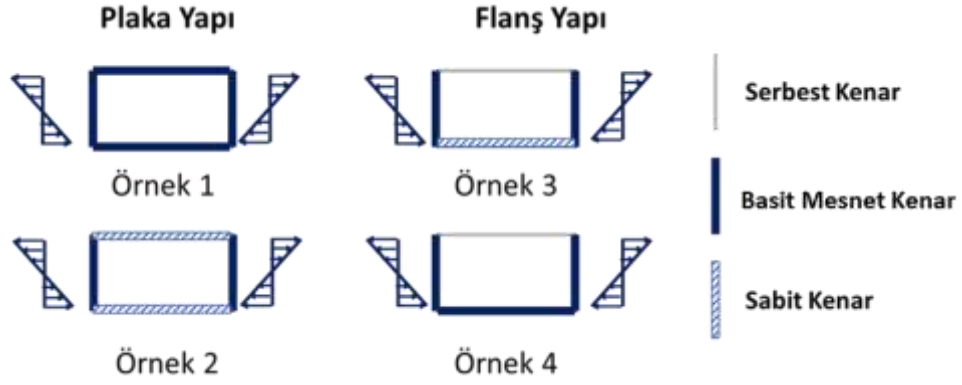
Çizelge 2.2 Kesme yükü için burkulma sabitleri (Huet, 1999)

	C ₁	C ₂
Örnek 1	3.8	5.35
Örnek 2	5.53	8.98

Yapıya etki eden yük düzlem içi eğilme gerilimi olduğu durumda ise k_B değeri elde edilirken 8 numaralı denklem kullanılmaktadır (Huet, 1999).

$$k_B = \begin{cases} k_B = C_1 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + C_2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + C_3 & , 0 \leq \frac{a}{b} \leq Lim \\ k_B = k_\infty & , \frac{a}{b} \geq Lim \end{cases} \quad (8)$$

Düzlem içi eğilme yükü için burkulma katsayı parametresinin belirlenmesinde dört farklı sınır koşulu Şekil 2.7'de yer almaktadır. Şekil 2.7'de yer alan düzlem içi eğilme yükü için burkulma sabitleri denklem 8 'de yerine yazılarak burkulma katsayı parametresi belirlenir. Örnek 3 ve Örnek 4 için $a/b < 1.3$ olduğu durum için güvenilir katsayı eğrileri bulunmamaktadır (Huet, 1999).



Şekil 2.7 Düzlem içi eğilme yükü için sınır koşullarının gösterimi (revize edilmiştir) (Huet, 1999)

Çizelge 2.3 Düzlem içi eğilme yükü için burkulma sabitleri (Huet, 1999)

	C_1	C_2	C_3	Uygun a/b aralığı	Lim	$k_{C\infty}$
Örnek 1	3.33	1.66	18.1	0.4-0.6	0.6	23.9
Örnek 2	52.3	2.2	20.4	0.3-0.45	0.45	41.8
Örnek 3					1.3	1.96
Örnek 4					1.3	0.85

Tez kapsamında yapıya basma ve kesme yüklemeleri için sabit ve basit mesnetli sınır koşulları altında çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2.3.Deney Tasarımı (Design of Experiments (DOE))

Deney tasarımı, mevcut veya yeni bir sürecin geliştirilmesinde farklı girdilerin gözlemlenen çıktılara olan etkisinin analiz edilmesi ve değerlendirilmesi için sıklıkla tercih edilen matematiksel metodolojidir (Antony, 2023) (Durakovic, 2017). Kullanılan değişkenlere ve değişkenlerin özelliklerine bağlı olarak farklı deney tasarımı türleri mevcuttur (Andersson, 2019). Altair Inspire programının içerdiği ve tez kapsamında kullanılan deney tasarımı yöntemleri hakkında bilgiler aşağıda yer almaktadır (Altair Engineering, Inc., 2023). Yazılımın içerdiği deney tasarımı türleri kullanılarak tez çalışması kapsamında farklı değişkenlerin burkulma dayanımı ve yapı üzerinde oluşan lineer statik gerilim dayanımı davranışı incelenmiştir.

2.3.1. Full Faktöriyel Deney Tasarımı

Full faktöriyel deney tasarımında değişkenler içerisinde her seferinde bir değişken değiştirilir ve kalan diğer değişkenler herhangi bir değişiklik oluşturmadan tüm kombinasyonlar için sonuç değerleri elde edilerek değiştirilen değişkenin sonuca olan etkisi gözlemlenmektedir (Box, Hunter, & Hunter, 2005). k Değişkenin kaç değer L seviyesi için değerlendirileceğine göre deney tasarımında oluşturulacak örneklem büyüklüğü L^k olmaktadır (Cavazzuti, 2013). Örneğin deney tasarımındaki v_1, v_2 değişkenlerinin -1 ve 1 değer seviyeleri için deney tasarımında örneklem büyüklüğü 4 olmaktadır. Deney tasarımı oluşturulacak tüm kombinasyonlar Çizelge 2.4'de yer almaktadır.

Çizelge 2.4 2 Değişken 2 seviye için deney tasarımı kombinasyonları

v_1	v_2	Sonuç değer
-1	-1	u_1
-1	1	u_2
1	-1	u_3
1	1	u_4

2.3.2. Değiştirilmiş Genişletilebilir Kafes Dizisi (Modified Extensible Lattice Sequence (MELS)) Deney Tasarımı

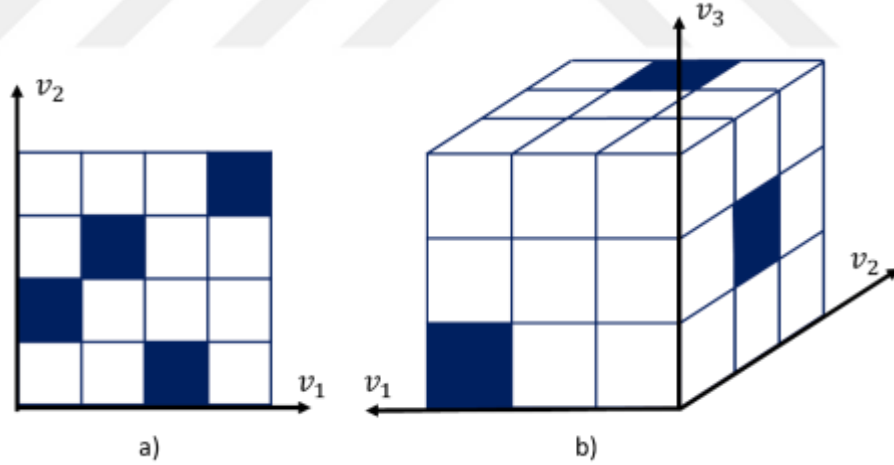
Değiştirilmiş Genişletilebilir Kafes Dizisi (MELS), deney tasarımındaki değişken değer aralıklarındaki boş bölgelerin en aza indirilmesi ve hemen hemen eşit olarak dağıtılması, numune noktalarının eşit olmayan kümelenmelerini önlenmesi için tasarım alanında simetrik olarak dağılan yarı rastgele bir deney tasarımı yöntemidir (Ollar, 2017). Yöntem sayesinde sonsuzca genişletilebilen nokta dizisi oluşturulabilmektedir. Oluşturulacak dizide değerlendirme sayısı kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir ancak tutarlı bir deney tasarımı oluşturmak için minimum değerlendirme sayısı aşağıdaki 1 numaralı denklem ile hesaplanmaktadır. Formülde Q değerlendirme sayısı k ise deney tasarımında kullanılan değişken sayısını temsil etmektedir (Andersson, 2019) (Altair Engineering, Inc. , 2023).

$$Q(k) = 1.1 (k + 1) \frac{k + 2}{2} \quad (9)$$

2.3.3. Latin HyperCube Deney Tasarımı

Latin HyperCube deney tasarımı k değişkenli bir deney tasarımı için her değişkenin değer aralığı eşit sayıda örneklem sayısına bölünerek deney tasarımı olası değişken değer uzayı elde edilmektedir. Değerlendirmelerde kullanılacak değişken değerleri oluşturulan deney tasarımı değişken uzayından her sütun ve satırda bir örnek olacak şekilde seçilerek deney tasarımı oluşturulur (Cavazzuti, 2013). Örnek olarak

Şekil 2.8 Şekil 2.8’de iki değişken dört değerlendirme ve üç değişken üç değerlendirme için deney tasarımı değişken girdileri şematik olarak yer almaktadır. Şekil 2.8’de görüldüğü üzere değişken değer uzayı içerisinde her satır, sütun ve sırada sadece bir eleman seçilerek deney tasarımı girdileri oluşturulmaktadır. MELS deney tasarımı olduğu gibi tutarlı bir deney tasarımı oluşturmak için minimum değerlendirme sayısı denklem 9 kullanılarak hesaplanmaktadır (Altair Engineering, Inc., 2023).

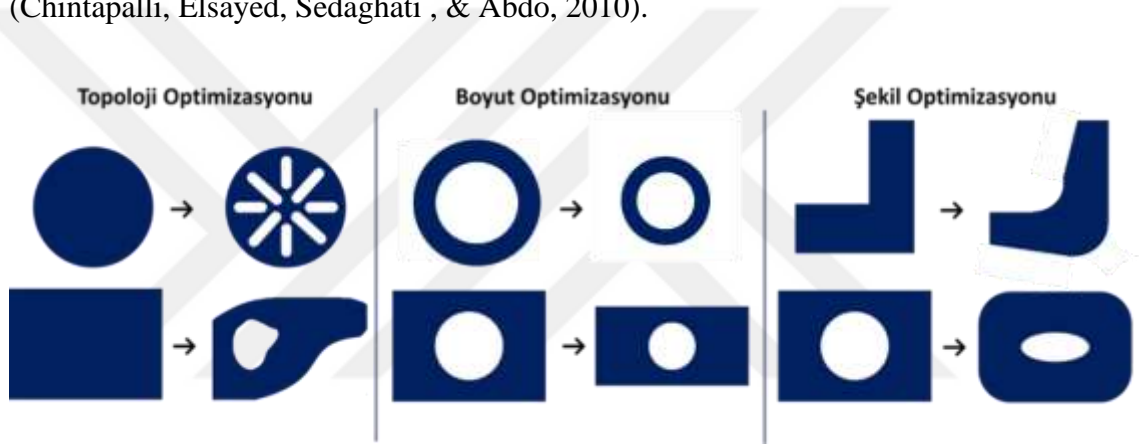


Şekil 2.8 a) 2 değişken 4 değerlendirme için deney tasarımı değişken girdi şeması b) 3 değişken 3 değerlendirme için deney tasarımı değişken girdi şeması (Revize edilmiştir) (Cavazzuti, 2013)

2.4.Yapısal Optimizasyon

Ürün tasarımı yapısal parçaların arzu edilen amaç doğrultusunda daha ideal seviyeye ulaştırılması için optimizasyon yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Yapısal parçaların optimizasyonu için kullanılan optimizasyon türleri genel olarak üç ana başlık altında

sınıflandırılmaktadır. Bu yöntemler: topoloji optimizasyonu, şekil optimizasyonu ve boyut optimizasyonudur. (Wang, Wang, Xia, & Poh, 2018) (Krog, Tucker, & Rollema, 2002) Bu yöntemlere ait örnek görseller Şekil 2.9’da yer almaktadır. Topoloji optimizasyonu belirli bir tasarım alanı içerisinde yapısal parçanın malzeme dağılımının ve miktarının belirlenmesini sağlayan optimizasyon yöntemidir (Zhu, Zhang, & Xia, 2016). Şekil optimizasyonu yönteminde tanımlanan şekil parametrelerinin sınırlarını değiştirerek ideal şeklin elde edilmesi yöntemidir (Wang, Zhao, Zhou, Sigmund, & Zhang, 2021) (Bendsoe & Kikuchi, 1988). Boyut optimizasyonunda yapısal parçanın malzeme dağılımı şekli sabit tutulurken yapıya ait kalınlık, boy, genişlik, delik çapı, köşe yarıçapı gibi parametrelerin ideal değerlerinin bulunması yöntemidir (Chintapalli, Elsayed, Sedaghati, & Abdo, 2010).



Şekil 2.9 Yapısal Optimizasyon türleri örnekleri (revize edilmiştir) (Wang, Wang, Xia, & Poh, 2018)

Yapısal optimizasyon problemi genel olarak denklem 10’da yer alacak şekilde ifade edilir. Denklemde optimizasyon parametreleri x, y, z iteratif olarak değiştirilerek amaç fonksiyonunu maksimum veya minimum yapan aynı zamanda g_1 ve g_2 kısıt fonksiyonlarını sağlayan değerlerin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Optimizasyon için gerekli olan amaç fonksiyonu ağırlık minimizasyonu, yapının rijitliğini arttırımı için kompiyans minimizasyonu, doğal frekans maksimizasyonu, burkulma dayanımı maksimizasyonu vb. şeklinde tanımlanabilmektedir. Optimizasyonun gerçekleştirilebilmesi için amaç fonksiyonuna ek olarak, kısıt fonksiyon veya fonksiyonlarının tanımlarının yapılması gerekmektedir. Kısıt fonksiyonları, yapısal parçanın yükleme durumunda parça üzerinde oluşan gerilim değerinin malzemenin akma sınırı gerilim değerinden küçük olması, yapının yükleme durumunda deplasman (yer

değiştirme) miktarı tasarımcının belirlediği deplasman miktarından küçük veya eşit olması, yapının ilk hacminin son hacmine oranı arzu edilen orana eşit veya küçük olması gibi kısıtlar örnek olarak verilebilmektedir. Optimizasyon parametreleri olarak topoloji optimizasyonu için optimizasyon hacmi, şekil optimizasyonu için tanımlanan şekil optimizasyon parametreleri, boyut optimizasyonu için parça kalınlığı, delik çapı, radyus değeri, genişlik ve boy gibi değerler örnek olarak verilebilir (Christensen & Klarbring, 2008) (Wang, Wang, Xia, & Poh, 2018).

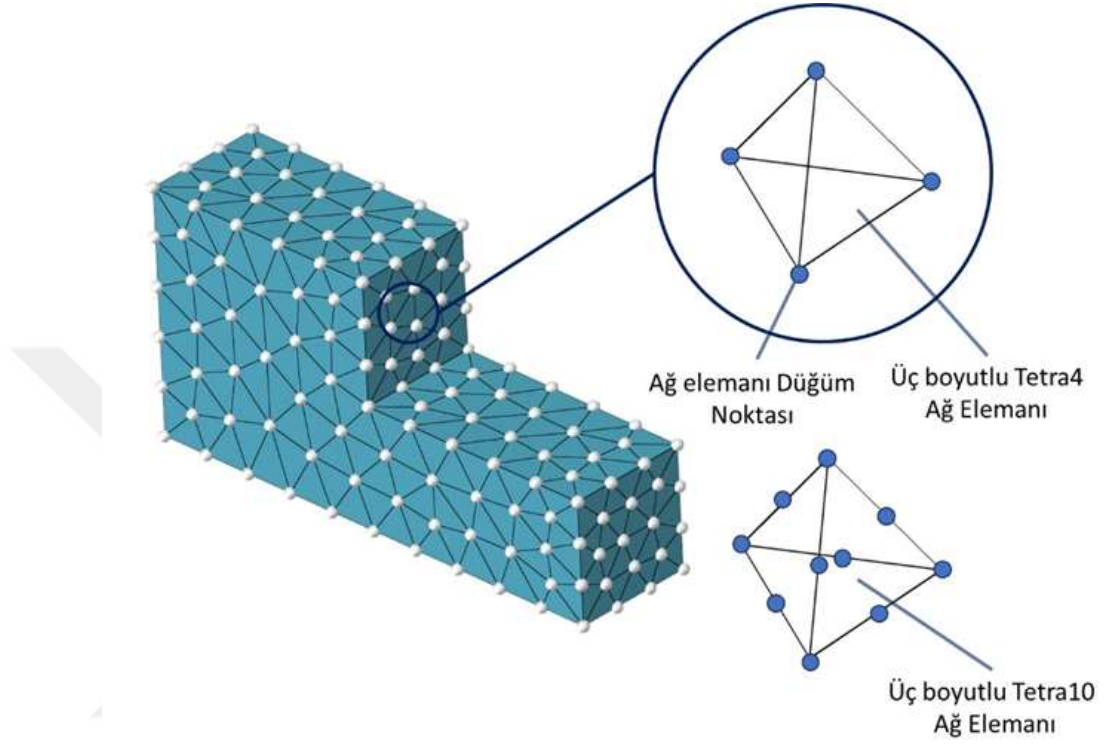
$$\begin{array}{ll}
 \text{Amaç Fonksiyonu} & \text{Min } f(x,y,z) \\
 \text{Kısıt Fonksiyonları} & g_1(x,y,z) \leq 0 \\
 & g_2(x,y,z) = 0 \\
 & \\
 \text{Parametreler} & x_l \leq x \leq x_u \\
 & y_l \leq y \leq y_u \\
 & z_l \leq z \leq z_u
 \end{array} \tag{10}$$

2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık problemlerin daha basit seviyeye indirgenilerek çözümün elde edilmesi yöntemidir. Sonlu elemanlar metodu ile geometri sonlu sayıda küçük ve birbirlerine düğüm noktaları ile bağlı alt bölgelere ayrılarak temsil edilmiş olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen örnek bir yapı Şekil 2.10'da yer almaktadır. Geometri birinci derece tetra ağ elemanı ile modellenmiştir. Birinci derece ağ eleman tipinde ağ eleman geometrisinin sadece köşelerinde düğüm noktası bulunmaktadır. İkinci derece ağ eleman tipinde ise ağ eleman geometrisinin köşe noktalarına ek olarak kenar orta noktalarında düğüm noktaları bulunmaktadır. Örnek olarak birinci derece tetra ağ elemanı için dört düğüm noktası bulunmaktadır ve tetra4 şeklinde ifade edilir. İkinci derece tetra ağ elemanı için ise on düğüm noktası bulunmaktadır ve tetra10 şeklinde ifade edilmektedir. İkinci derece ağ elemanları karmaşık geometriler için daha uygundur ve ikinci derece ağ elemanları ile doğruluğu daha yüksek sonuçların elde edilmektedir (More & Bindu , 2015). Buna karşın ikinci dereceli ağ elemanlı geometrinin analizin çözdürülmesi için muadili birinci dereceli ağ elemanlı geometriye göre daha fazla süre gerekmektedir (Rao, 2017) (Barkanov, 2001).

Sonlu elemanlar yönteminde ağ elemanı türü, boyutu ve boyut miktarının seçimi analiz türü ve çözüm zamanı gibi etkenlere bağlı olarak seçilmektedir. Modelde olan eleman

sayısı dolayısıyla düğüm sayısı geometri analizinin çözüm süresini etkilemektedir (Liu, Geni, & Yu, 2011). Şekil 2.11’de analizlerde kullanılan ağ eleman türleri yer almaktadır.



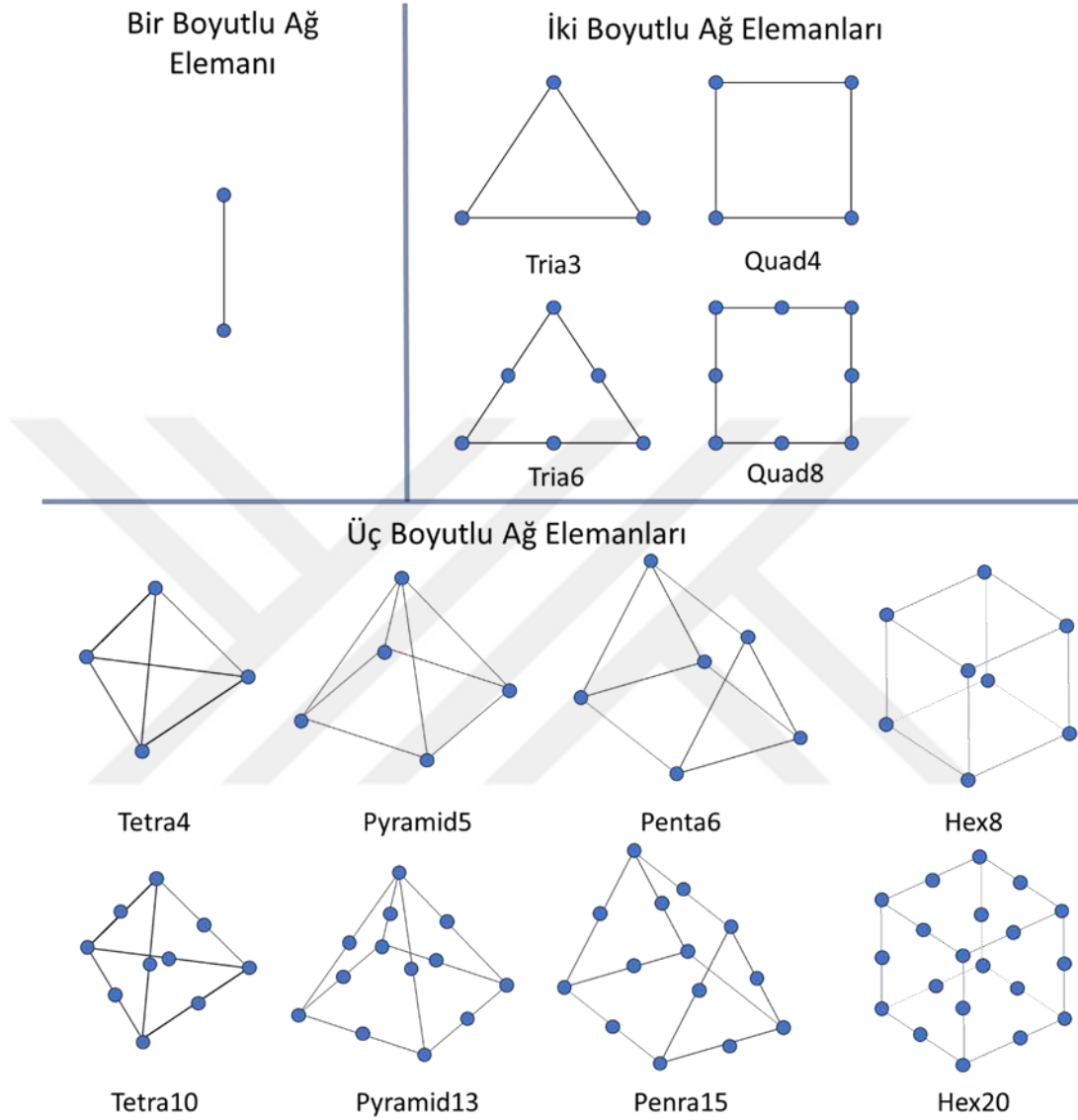
Şekil 2.10 Sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen örnek bir yapı

Yapıya uygulanan yükleme doğrultusunda yapının şekil değiştirme direncine rijitlik adı verilmektedir. Sonlu elemanlar analizinde yapıya uygulanan yükleme doğrultusunda ağ elemanları modellenen yapının her düğüm noktasında yer değiştirme meydana gelmektedir. Aşağıda yer alan denklem yapısal lineer statik analiz çözümü için genel denklem olup yapıda yer alan düğüm noktalarının yer değişim miktarlarının bulunmasında kullanılmaktadır (Clough & Wilson, 1979).

$$F = Ku \quad (11)$$

Denklemden yer alan F yapıya uygulanan harici yükleri, K rijitlik matrisini, u ise yer değiştirme miktarını temsil etmektedir. Örnek olarak bir boyutlu 2 düğüm noktalı bar

elemanın yapısal lineer statik sonlu elemanlar denklemi aşağıda yer almaktadır (Sabat & Kundu).



Şekil 2.11 Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan ağ eleman türleri

$$\begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{x2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{12} & K_{22} \end{bmatrix} x \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

Plakaların burkulması, genellikle çatallanma burkulması olarak adlandırılan bir sorundur. Yük deformasyon eğrisinde çatallanma noktasında deformasyon değişimi burkulma öncesi değişimden farklı şekilde değişime uğramaya başlamaktadır. Burkulma problem özdeğer problem olarak formüle edilmektedir ve aşağıdaki denkleme göre

hesaplanmaktadır (Thammakornbunjut, Meelapchotipong, Pakpia, Tammappattaragul, & Limpitipanich, 2022) .

$$\{F\} = \{u\}[K_0 + \lambda K_\sigma] \quad (13)$$

Denklem 13’de yer alan K_0 burkulma öncesi rijitlik matrisidir. K_σ ise burkulmaya bağlı olarak yapı üzerinde oluşan gerilimle ilişkili olan gerilim rijitlik matrisidir. λ ise yük çarpanı olarak adlandırılan bir öz değerdir. Burkulma noktasında rijitlik matrisinin determinanı 0 olmaktadır.

$$|K_0 + \lambda K_\sigma| = 0 \quad (14)$$

Determinantın çözümünden sonra kritik yük çarpanı olan özdeğerler elde edilmektedir. Denklem 14’de Özdeğer faktörü ile yapıya uygulanan yük büyüklüğünün çarpılmasıyla oluşacak burkulma için gerekli kritik burkulma yükleri elde edilmektedir. Burkulma yükleri mod sayısına göre değişmektedir. i mod sayıdır. λ_i ise i modunun özdeğeridir. P yapıya uygulanan yük değerini temsil etmektedir. P_{cri} ise i burkulma modu için gerekli kritik burkulma yük değeridir.

$$P_{cri} = \lambda_i P \quad (15)$$

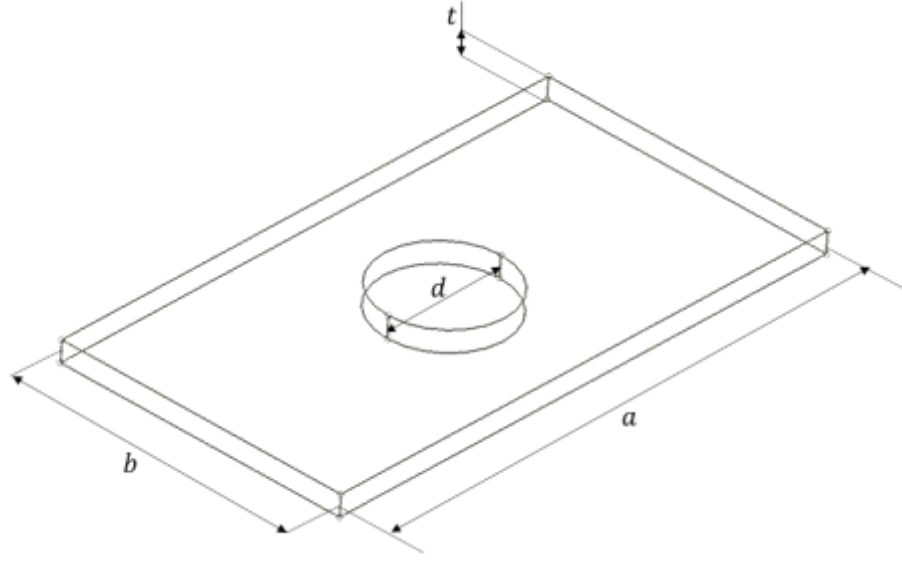
Tez çalışması kapsamında Hypermesh programı aracılığıyla sonlu elemanlar modeline uygulanan yük doğrultusunda elde edilen lineer elastik burkulma için elde edilen özdeğer 1’den büyük ise yapıda burkulma oluşmayacaktır (Altair HyperWorks 2021, 2024). Elde edilen özdeğer ile başlangıç yükü çarpıldığında yapının burkulma olması için gerekli kritik yük elde edilecektir. Kritik yükün üzerine çıkıldığında özdeğer 1’in altına düşecektir. Yapı üzerinde burkulma oluşacaktır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Havacılık sektöründe ve farklı sektörlerde yapının hafifletilmesi, erişim kolaylığı ve sistem gereksinimleri gibi amaçlardan dolayı plakalarda delik sıklıkla kullanılmaktadır. (Ko, 1998) (Mohammadzadeh & Noh, 2016). Deliğin yapı üzerinde konumu, şekli, sayısı, boyutu, delik kenarındaki güçlendirme yapısının olup olmaması gibi farklı durumlarda yapının dayanımı ve yapı üzerinde oluşan gerilim dağılımı değişmektedir. Yapı üzerinde delik olması durumu için farklı çalışmalar literatürde yer almaktadır. Plakaların farklı yüklemeler ve sınır koşulları için kritik burkulma gerilim dayanımı için literatürde yaygın çalışmalar yer almaktadır (Jayabalan, Dominic, Ebid, & Soleymani, 2022) (Shanmugam, Thevendran, & Tan, 1999) (El-Sawy & Nazmy, 2001). Tez Çalışması kapsamında iki boyutlu saç plakalar için düzlem içi basma ve kayma gerilmeleri için farklı sınır koşulları altında, delik çapının ve en boy oranındaki değişimin 2 boyutlu sonlu elemanlar modelleri kullanılarak yapının analiz sonuçları etkisi ile plakanın dayanımı incelenmiştir. Çalışma kapsamında konvansiyonel üretim yöntemleri ile üretilen NC parçalarda yer alan radyus değişiminin burkulma dayanımına olan etkisi ve iki boyutlu parçalarda gözlemlenen parametreler ile ilişkisi deney tasarımında 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada ek olarak ince kesit içeren yapısal parçaların çalışma koşullarındaki parametreler için boyut optimizasyonu yapılarak geometrik parametrelerin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

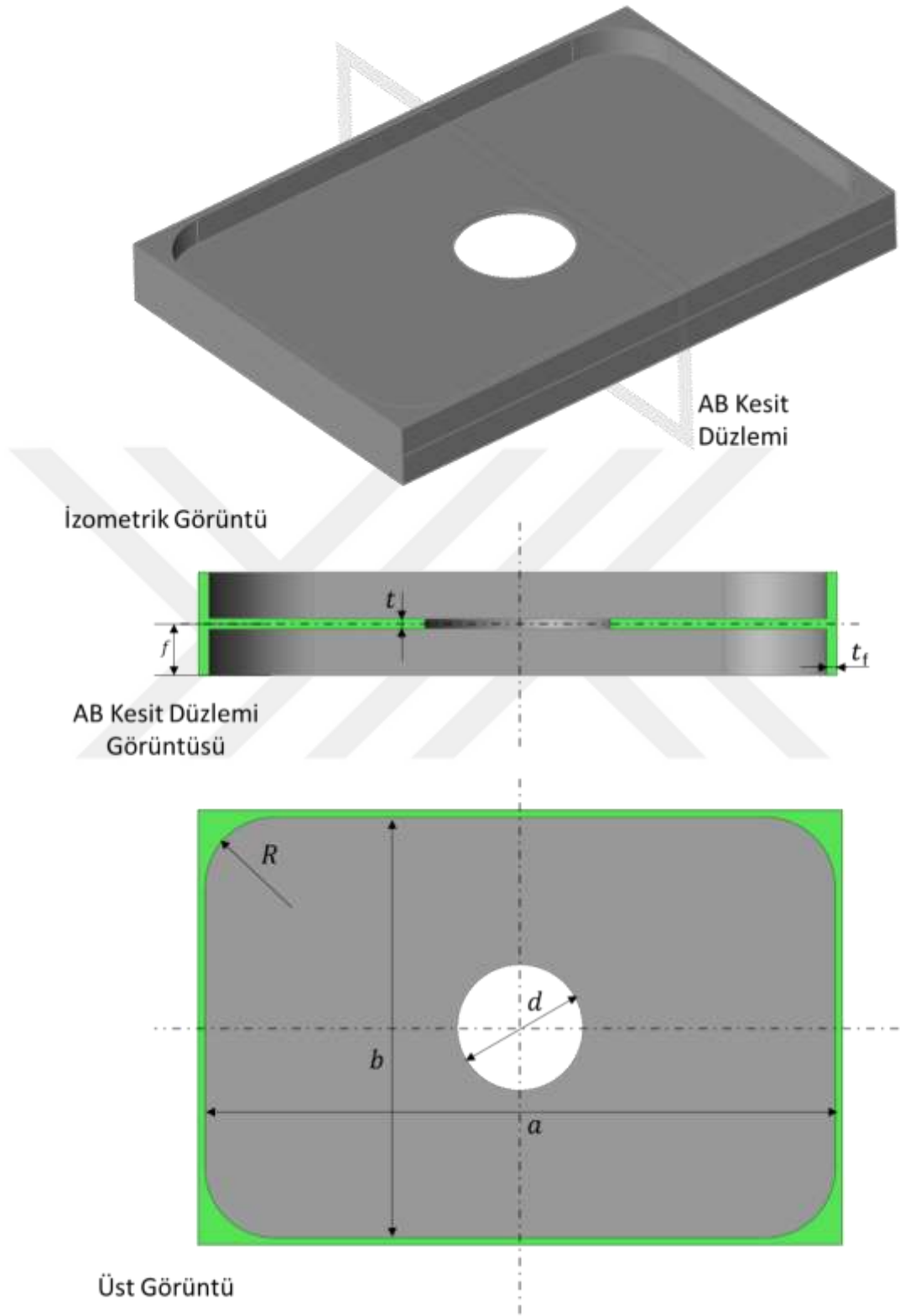
3.1. Geometrik Model

İki boyutlu sonlu elemanlar modellerinde kullanılacak geometriler için geometrik parametrelerinin şematik gösterimi Şekil 3.1’de yer almaktadır. Analizlerde plakaların kalınlığı (t) 2 mm ve plakanın kısa kenarı olan boy yüksekliği (b) ise 120 mm olarak sabit tutulmuştur. Plakanın uzun kenarı olan en genişliği (a) için en/boy oranı (a/b) 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6 tasarımları gerçekleştirilmiştir. En/boy oranlarına göre sonlu eleman modellerinde kullanılan en düşük en genişliği $a/b=1$ için 120 mm ve en büyük en genişliği $a/b=6$ için 720 mm’dir. Aynı zamanda plakanın delik çapı (d) plakanın kısa kenarına oranı (d/b) 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 için ve delik olmayan plakalar için analiz simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Böylelikle analiz modellerinde en küçük delik çapı $d/b=0.1$ için 12 mm ve en büyük delik çapı $d/b=0.6$ için 72 mm’dir.



Şekil 3.1 İki boyutlu sonlu elemanlar modelinde kullanılacak geometri parametrelerinin gösterimi

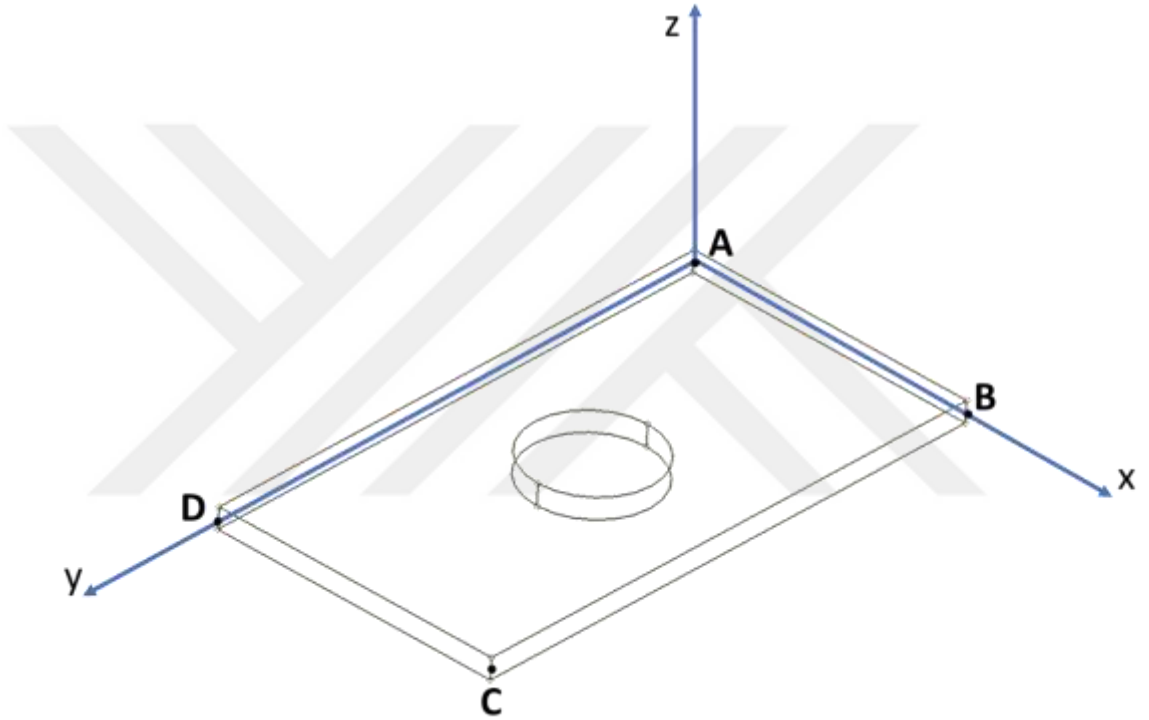
Üç boyutlu sonlu elemanlar modellerinde kullanılacak geometriler için geometrik parametrelerin şematik gösterimi Şekil 3.2’de yer almaktadır. Analizlerde incelenecek parametrelerden plakaların kalınlığı, a/b ve d/b oranları ki boyutlu analiz modellerindeki konfigürasyonlarla aynıdır. İki boyutlu plakalardan farklı olarak üç boyutlu modellerde yer alan köşe radyus (R) için 10, 20, 30, 40 ve 50 milimetre değerleri için sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur. Üç boyutlu yapısal parça tasarımlarında flanş genişliği olarak $f=10$ mm ve flanş kalınlığı $t_f = 2$ mm olarak sabit tutulmuştur. Çalışma kapsamında en/boy oranı, delik çapı/boy yüksekliği oranı ve radyus değerlerinin tüm kombinasyonları deney tasarım yöntemleri oluşturulmuştur.



Şekil 3.2 Üç boyutlu sonlu elemanlar modelinde kullanılacak geometri parametrelerinin gösterimi

3.2. Sınır ve Yükleme Koşulları

Çalışma kapsamında sabit ve basit mesnetli sınır koşulları için analizler gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu sonlu elemanlar modeli Şekil 3.3 için Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de sabit mesnet ve basit mesnet için yapının kenar ve köşe noktalarının öteleme ve dönme serbestlik dereceleri kısıtlandırılmış olanlar gösterilmektedir (Muamelecı, 2014).



Şekil 3.3 İki boyutlu yapıya uygulanan sınır koşullarının köşe noktaları ve koordinat sisteminin gösterimi (Muamelecı, 2014)

Yapı üzerine kayma geriliminin etki ettiği sonlu elemanlar modelinde yapının köşe noktalarına (A, B, C, D) herhangi bir yük uygulanmamıştır. Köşe noktaları arasında kalan düğüm noktalarına en ve boy kenarlarına aynı yük değeri oluşturmak için her düğüm noktası için kuvvet hesabı gerçekleştirilmiştir.

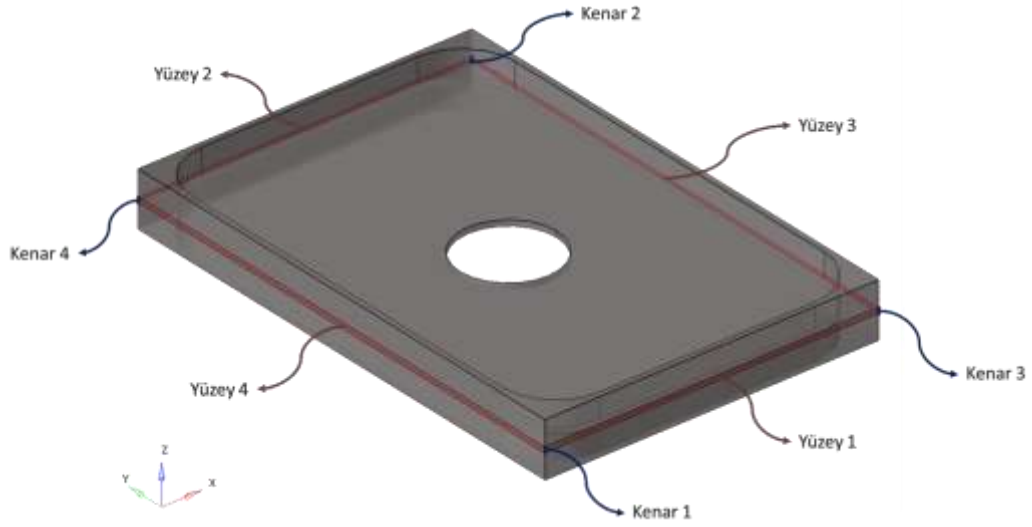
Çizelge 3.1 Her kenarı basit mesnetli plaka için öteleme (U_1 , U_2 , U_3) ve dönme (R_1 , R_2 , R_3) serbestlik dereceleri (Muamelecı, 2014)

Bölge	U_1	U_2	U_3	R_1	R_2	R_3
AB Kenarı			X			
BC Kenarı			X			
CD Kenarı			X			
DA Kenarı			X			
A Noktası	X	X	X			
B Noktası						
C Noktası		X				
D Noktası						

Çizelge 3.2 Her kenarı sabit plaka için öteleme (U_1 , U_2 , U_3) ve dönme (R_1 , R_2 , R_3) serbestlik dereceleri (Muamelecı, 2014)

Bölge	U_1	U_2	U_3	R_1	R_2	R_3
AB Kenarı			X	X		
BC Kenarı			X		X	
CD Kenarı			X	X		
DA Kenarı			X		X	
A Noktası	X	X	X			
B Noktası						
C Noktası		X				
D Noktası						

Üç boyutlu sonlu elemanlar modeli için, Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4’de Şekil 3.4’e göre sabit mesnet ve basit mesnet için iki boyutlu sonlu elemanlar modelinde kullanılan sınır koşullarına yakın sınır koşulları yer almaktadır. Şekil 3.4’de yer alan model Altair Inspire programında rengi farklı bölgenin yüzey ve bazı kenarları kısıtlandırılmıştır, deney tasarımları bu program aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz çözücüsü olarak Optistruct çözücüsü kullanılmıştır.



Şekil 3.4 Üç Boyutlu yapıya uygulanan sınır koşullarının gösterimi

Çizelge 3.3 Her kenarı basit mesnetli plaka için öteleme (U_1 , U_2 , U_3) Serbestlik dereceleri

Bölge	U_1	U_2	U_3
Kenar 1	X	X	X
Kenar 2		X	
Kenar 3			
Kenar 4			
Yüzey 1			X
Yüzey 2			X
Yüzey 3			X
Yüzey 4			X

Çizelge 3.4 Her kenarı sabit mesnetli plaka için öteleme (U_1 , U_2 , U_3) Serbestlik dereceleri

Bölge	U_1	U_2	U_3
Kenar 1	X	X	X
Kenar 2	X	X	X
Kenar 3	X	X	X
Kenar 4	X	X	X
Yüzey 1	X		X
Yüzey 2	X		X
Yüzey 3	X		X
Yüzey 4	X		X

Yükleme Durumu için iki boyutlu sonlu elemanlar modelinde basma gerilimi yüklemesi için kısa kenarda yer alan her bir düğüm noktasına 1 N yüklemeye toplamda 61 N yüklemeye gerçekleştirilmiştir. Kayma gerilmesi yüklemesi için ise köşe düğüm noktaları hariç çapraz köşelere doğru kayma gerilimi oluşturacak şekilde 1 N toplamda yaklaşık olarak her kenar için 0.25 MPa olarak yüklemeler gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu modellerde düğüm noktaları yerine Şekil 3.4’de yer alan yüzey 1, 2, 3, 4’e uygulanarak analiz simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

3.3. Malzeme Özellikleri

Aluminyum havacılık endüstrisinde tercih edilen malzemelerden birisidir. Aluminyum içeriğinde yer alan farklı alaşım elementleri sayesinde parçaların dayanımları çalışma koşullarına uygun hale getirilebilmektedir. Aluminyum alaşımları içerdiği alaşım elementleri türüne göre gruplandırılmaktadır. Alaşım gruplarından 2000 ve 7000 grupları hava aracı yapılarında sıklıkla kullanılmaktadır. 2000 Alaşım grubu için ana alaşım elementi bakır iken, 7000 alaşım gruplarında ana alaşım elementi çinkodur. 2000 Aluminyum Alaşım grubu malzemeleri çekme gerilimi dayanımı iyi olması istenilen yorulma ve hasar toleransının kritik olduğu yapısalarda, 7000 Aluminyum alaşım grubu malzemeleri ise basma gerilimi dayanımı iyi olması istenilen yorulma ve hasar toleransının kritik olmadığı yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır (NIU, 1999). Tez çalışması kapsamında 7050 AMS 4201 Aluminyum alaşımı özellikleri kullanılmıştır. Malzemeye ait özellikler Çizelge 3.5’de yer almaktadır.

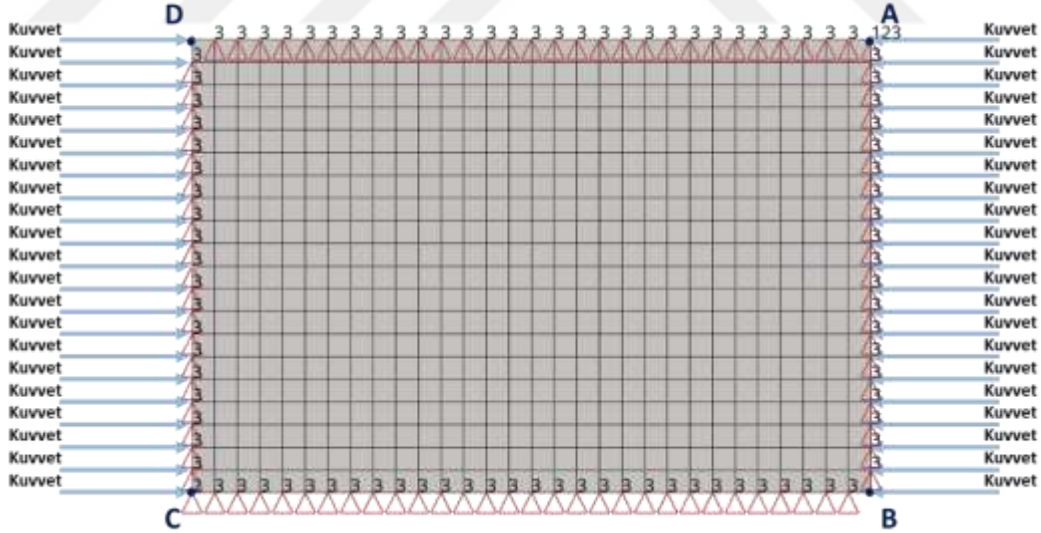
Çizelge 3.5 7050 AMS 4201 Aluminyum alaşımı malzeme özellikleri (Rice, Jackson, Bakuckas, & Thompson, 2003)

<i>E</i> (MPa)	71015
<i>G</i> (MPa)	27579
<i>v</i>	0.33
ρ (ton/mm³)	2.823x10 ⁻⁹
Akma Dayanımı (MPa) (L)	455.01 (66ksi)
Kopma Dayanımı (MPa) (L)	523.97 (75ksi)

3.4 Ağ Eleman Boyutu Seçimi

Tez çalışması kapsamında sonlu elemanlar modelinde kullanılan doğru ağ eleman boyutunun belirlenmesi için teorik hesaplamadan elde edilen sonuç değeri ile farklı ağ eleman boyutları için karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamda 120x180x2 mm boyutlarındaki sabit mesnetli 7050 AMS 4201 Alüminyum alaşımı düz plaka için yapıda burkulma oluşumunu neden olan ve yapının herhangi bir yerinde burkulma özdeğer faktörü 1 olacak şekilde 1. mod için yüklemeler gerçekleştirilmiştir. Yükleme yapı üzerinde AB ve CD kenarlarına tek eksenli yükleme yapılacak şekilde gerçekleştirilerek, kritik burkulma gerilim değerleri elde edilmiştir. Sabit mesnetli 7050 AMS 4201 Alüminyum alaşımı plaka için tek eksenli basma için yükü sonlu elemanlar modeli Şekil 3.5’de gösterilmektedir. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ve çözümü için Altair firmasının Hyperworks 2022 Akademik versiyonu içerisinde Optistruct arayüzü kullanılmıştır (Guide, 2011). Analizlerde ağ çeşidi olarak 2 boyutlu 1. Derece kare (Quad) eleman kullanılmıştır. Ağ eleman boyutu seçiminde kullanılan örnek sonlu elemanlar modeli Şekil 3.5’de yer almaktadır.



Şekil 3.5 Her kenarı basit mesnetli 7050 AMS 4201 alüminyum alaşımı plaka için tek eksenli basma için yükü sonlu elemanlar modeli

120x180x2 Ölçülerindeki her kenarı sabit mesnetli delik olmayan düz bir plaka için burkulma katsayısı Narayanan ve arkadaşlarının çalışmasına göre,

$$K_u^0 = \left(\frac{120 \text{ mm}}{180 \text{ mm}} + \frac{180 \text{ mm}}{120 \text{ mm}} \right)^2 = 4.694 \quad (17)$$

Huet'in çalışmasına göre,

$$k_C = C_1 \left(\frac{a}{b} \right)^2 + C_2 \left(\frac{b}{a} \right)^2 + C_3 = 1 \left(\frac{180 \text{ mm}}{120 \text{ mm}} \right)^2 + 1 \left(\frac{120 \text{ mm}}{180 \text{ mm}} \right)^2 + 2 = 4.694 \quad (18)$$

Teorik olarak elde edilen kritik elastik burkulma gerilimi hesabı ise,

$$\sigma_{Cr}^u = K_u^0 \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 = 4.694 \frac{\pi^2 71015}{12(1 - 0.33^2)} \left(\frac{2 \text{ mm}}{120 \text{ mm}} \right)^2 = 85.464 \text{ MPa} \quad (19)$$

Olarak elde edilmektedir. AB ve CD kenarlarına etki eden kritik burkulma kuvveti değeri ise,

$$P_{Cr} = \sigma_{Cr}^u \times A_{bt} = 85.464 \text{ MPa} \times 2 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} = 20,511 \text{ kN} \quad (20)$$

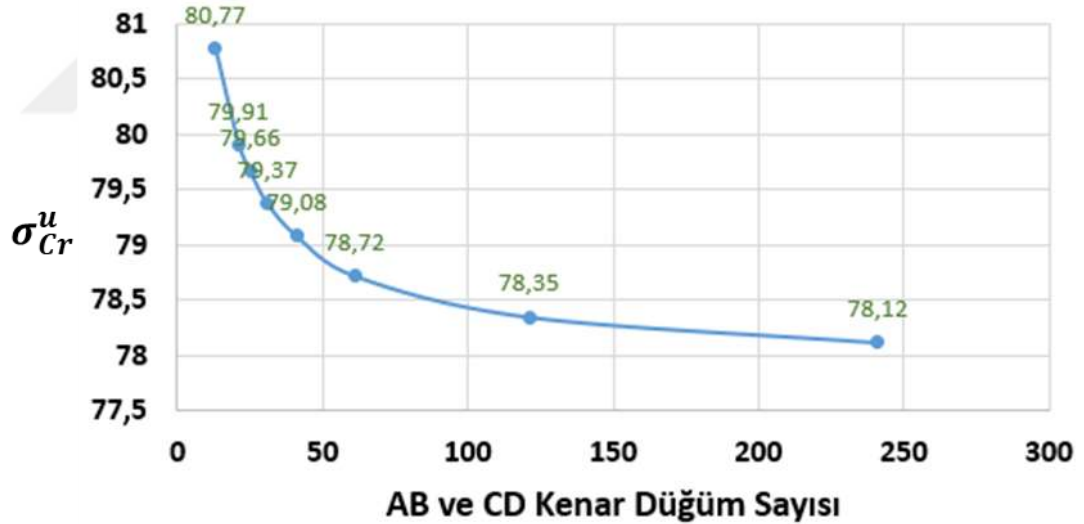
Narayanan'ın çalışmasındaki burkulma katsayısı ve Huet'in çalışmasındaki burkulma katsayısı parametresi karşılık geldiğinden ve iki sayı değeri de aynı olduğundan dolayı teorik hesaplamalarda da elde edilen kritik elastik burkulma değeri her iki formül için aynı değer elde edilmektedir.

Sonlu elemanlar metodu ile elde edilen analiz sonuçları Çizelge 3.5'da yer almaktadır. Yapının AB ve CD kenarlarına 1 MPa gerilim etki ettirilerek burkulma özdeğer faktörleri elde edilmiştir. Aynı zamanda elde edilen burkulma özdeğer faktörleri, yapının herhangi bir yerinde AB ve CD kenarlarına uygulandığı takdirde burkulma özdeğer faktörünü 1 olmasına neden olan kritik burkulma gerilimi değerleridir. Tabloda 8 farklı ağ eleman boyutu için karşılaştırmalar yapılmıştır. Eleman boyutu azaltıldıkça elde edilen kritik burkulma gerilim değeri yakınsadığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.6). Yapıda yer alan eleman sayısı arttığında analizin çözüm süresi arttığından tez çalışması kapsamında ağ eleman

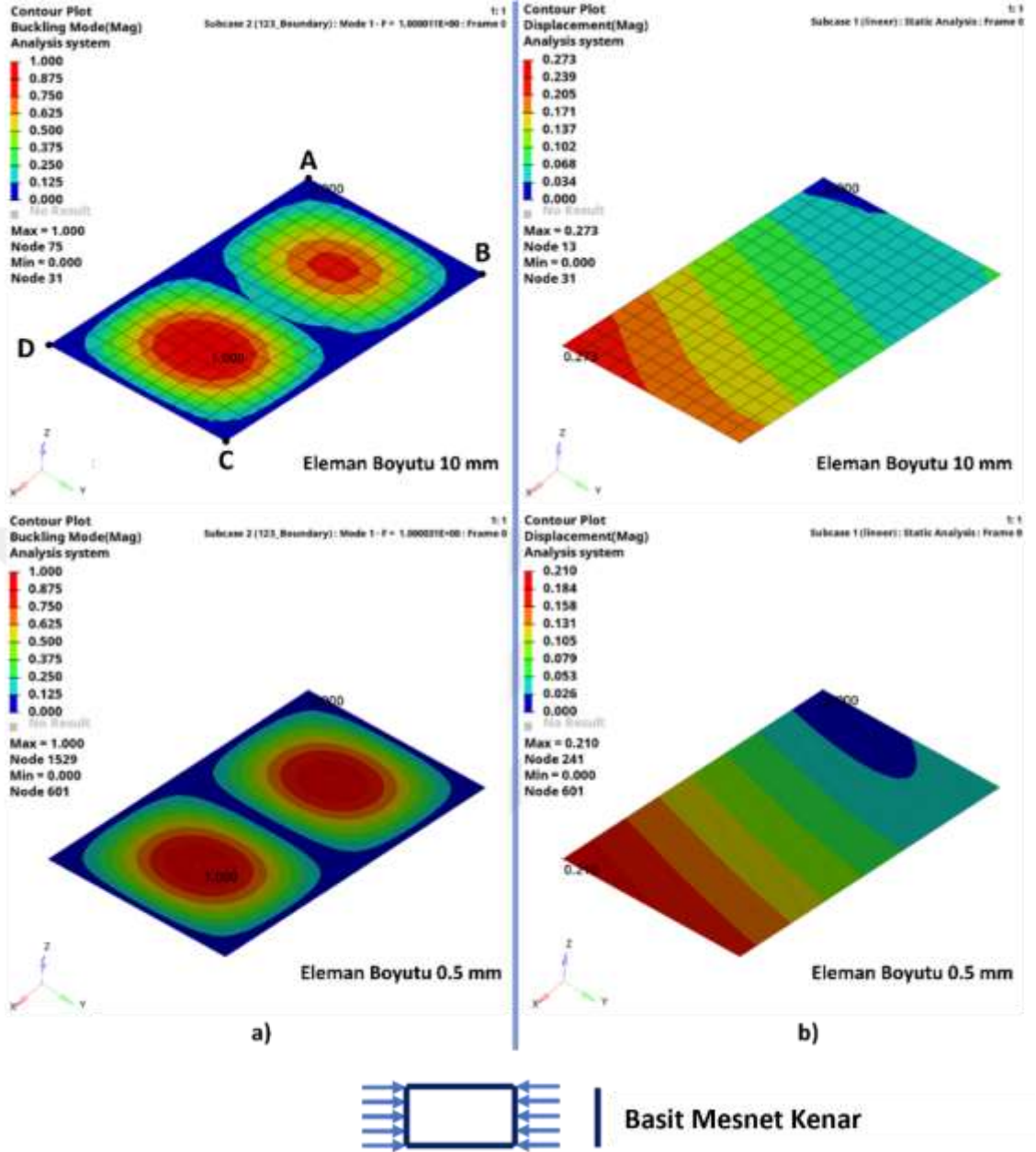
boyutu 2 mm kullanılmıştır. Yapı üzerindeki burkulma özdeğer faktörü ve bası altında yapı üzerinde meydana gelen yer değiştirme miktarlarına ağ eleman boyutuna olan etkisinin incelenmesi amacıyla en büyük ve en küçük ağ eleman boyutları için görseller Şekil 3.7’de yer almaktadır.

Çizelge 3.6 Farklı ağ boyutlarına göre elde edilen kritik elastik burkulma gerilimleri

Ağ Eleman Boyutu (mm)	Toplam eleman sayısı	Toplam düğüm (node) sayısı	AB ve CD Kenar düğüm sayısı	Düğüm başına uygulanan kuvvet (N)	AB ve CD kenarlarına etki eden toplam yük miktarı F_{Cr} (N)	Kritik Elastik Burkulma Gerilimi σ_{Cr}^u (MPa)
10	216	247	13	1491.1	19384.3	80.77
6	600	651	21	913.3	19179.3	79.91
5	864	925	25	764.7	19117.5	79.66
4	1350	1426	31	614.5	19049.5	79.37
3	2400	2501	41	462.9	18978.9	79.08
2	5400	5551	61	309.7	18891.7	78.72
1	21600	21901	121	155.4	18803.4	78,35
0.5	86400	87001	241	77.8	18749.8	78,12



Şekil 3.6 Kenar düğüm sayısına göre kirtik elastik burkulma geriliminin değişimi

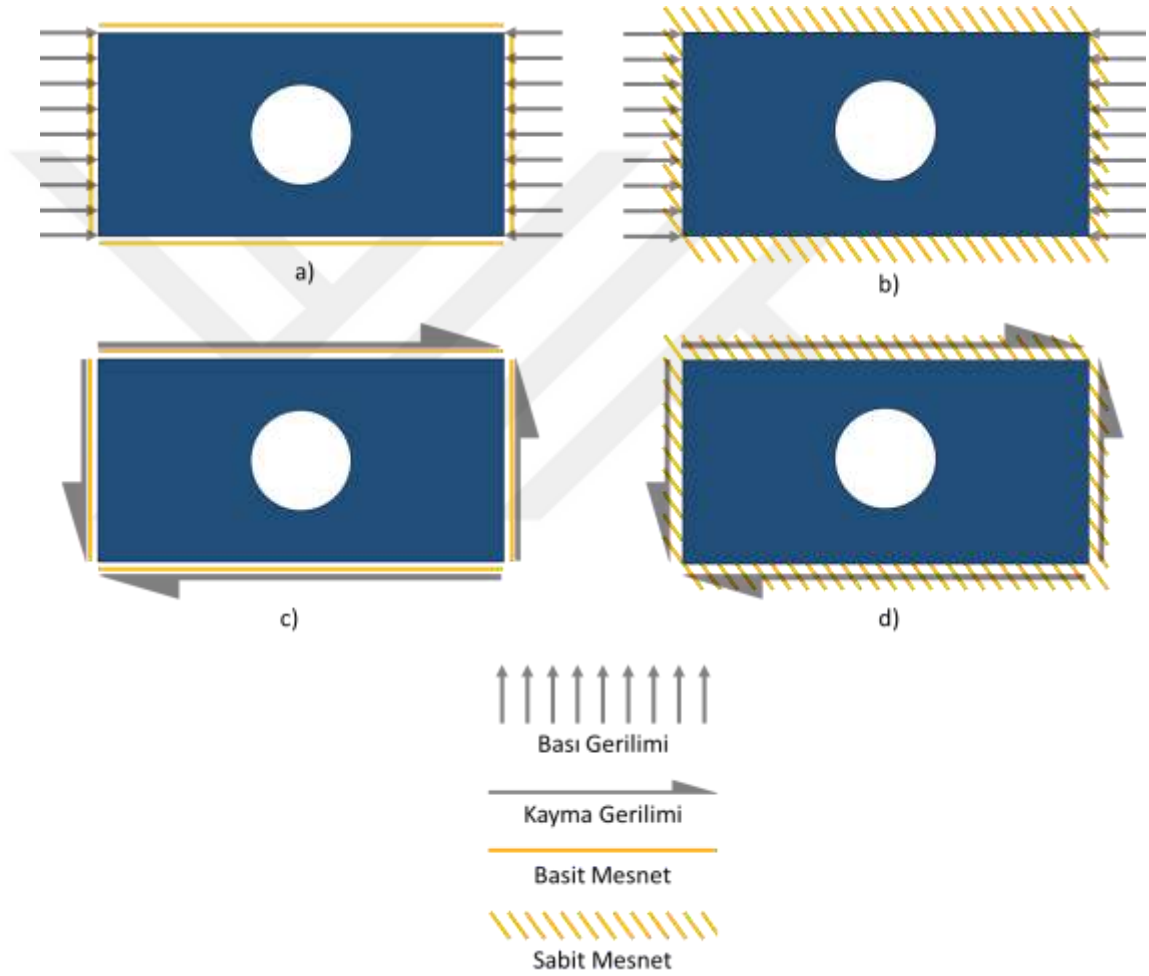


Şekil 3.7 Her kenarı basit mesnetli plaka için 10 mm ve 0.5 mm ağ eleman boyutları için basma yükü altındaki a) Burkulma özdeğer faktörü grafikleri b) yer değiştirme (deplasman) miktarı grafikleri

4. BULGULAR

4.1. İki Boyutlu Sonlu Eleman Modellerinin Analiz Bulguları

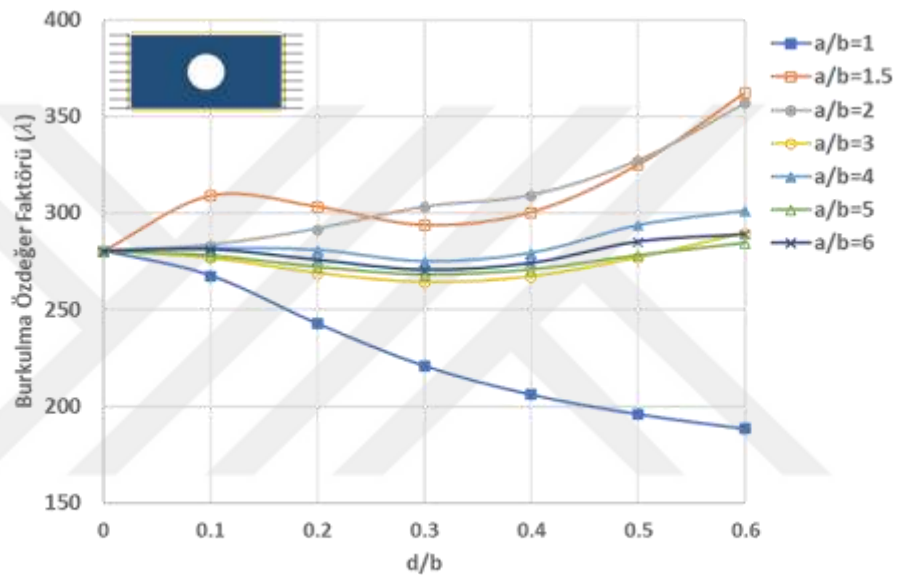
İki boyutlu sonlu elemanlar modeli için yedi farklı en/boy oranı altı farklı delik çapı durumu ve delik olmayan durum, iki farklı yükleme türü ve iki farklı sınır koşulu için toplamda iki boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak 196 analiz simülasyonu Hypermesh Optistruct programında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sınır koşulları ve yükleme türlerine ait şematik görseller Şekil 4.1’de yer almaktadır.



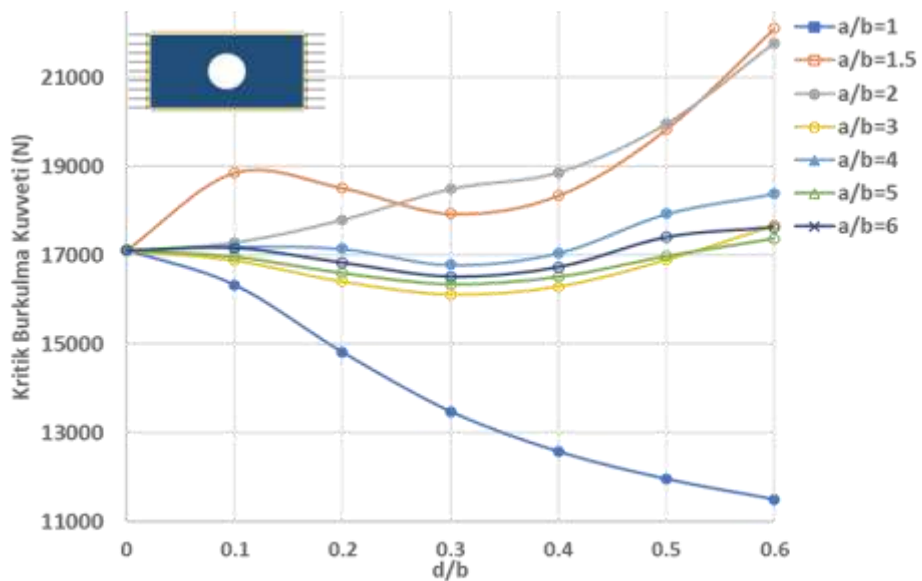
Şekil 4.1 a) Basit mesnetli plakanın basma gerilmesi yüklemesi durumu b) Sabit mesnetli plakanın basma gerilmesi yüklemesi durumu c) basit mesnetli plakanın kayma gerilmesi yüklemesi durumu d) sabit mesnetli plakanın kayma gerilmesi yüklemesi durumu

Çalışma kapsamında bası gerilmesi durumu için 2 boyutlu modellerde plakanın her kenar düğüm noktasına 1 N (yaklaşık olarak 0.25 MPa) yükleme gerçekleştirilmiştir.

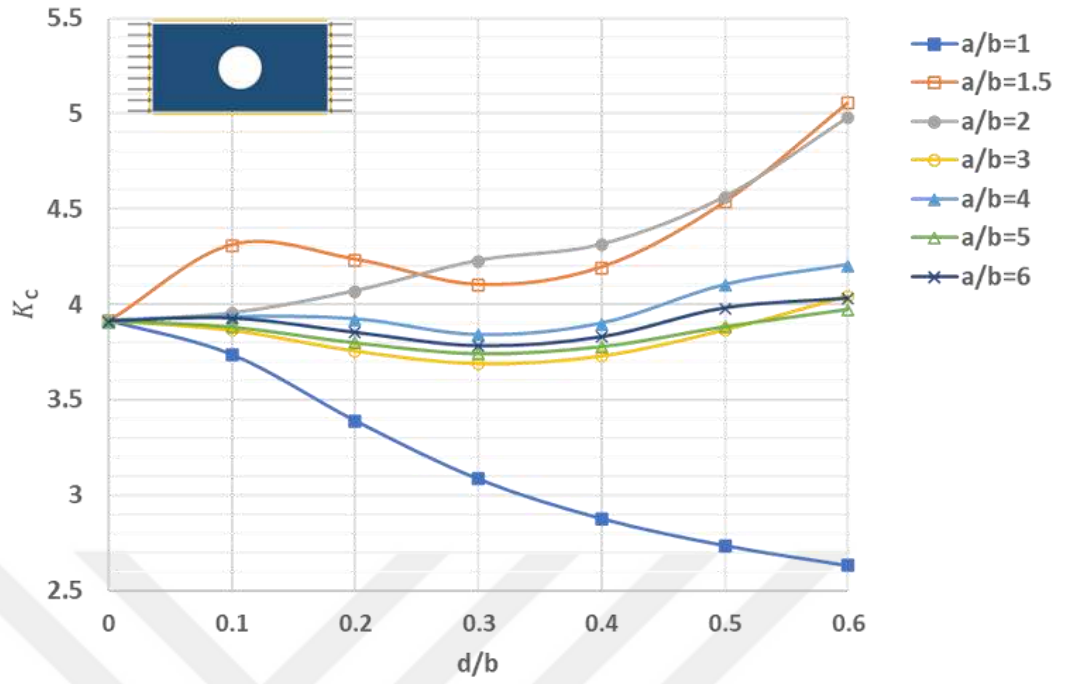
Kayma gerilmesi yüklemesi için ise plakanın köşe noktaları hariç aradaki noktalara 1 N (yaklaşık olarak 0.25 MPa) gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre plakaların en/boy oranı ve delik çapı/kenar uzunluğu oranına göre burkulma özdeğer faktörleri elde edilmiştir. Elde edilen burkulma özdeğerleri ile düğüm noktalarına uygulan kuvvet değerleri çarpılarak kritik burkulma kuvvetleri elde edilmiştir. Denklem 1 ve Denklem 2 kullanılarak burkulma eşdeğer katsayıları elde edilmiştir. Elde edilen lineer burkulma 1. Modu kritik yük değerleri yapıya uygulanarak yapı üzerinde lineer statik analiz sonucunda oluşan maksimum von mises gerilmeleri elde edilmiştir.



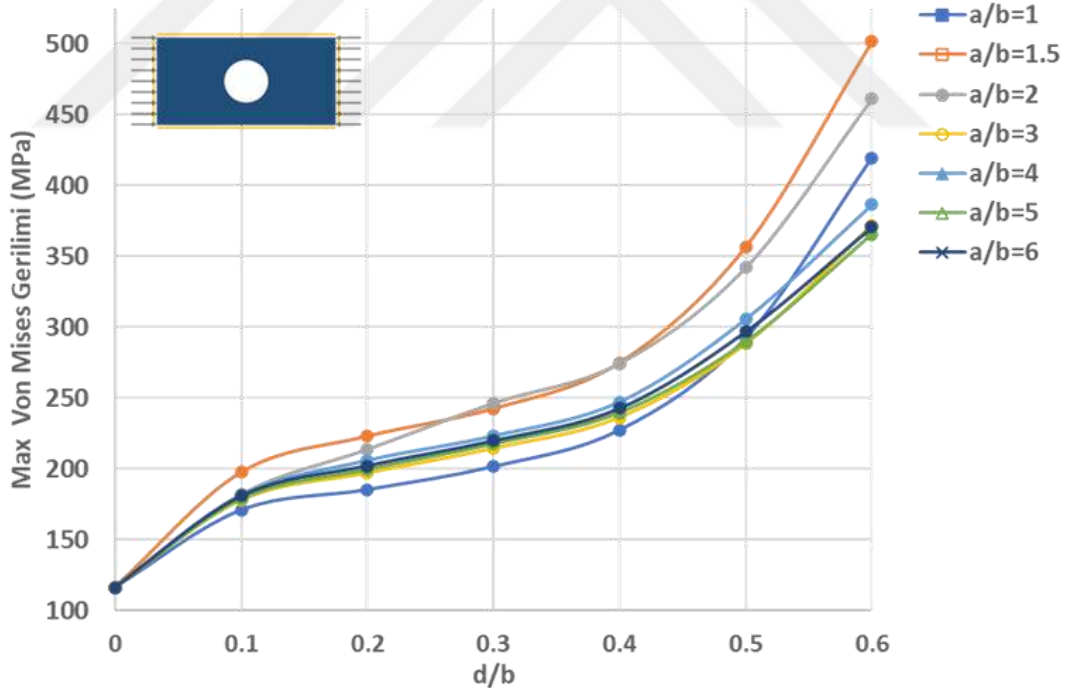
a)



b)

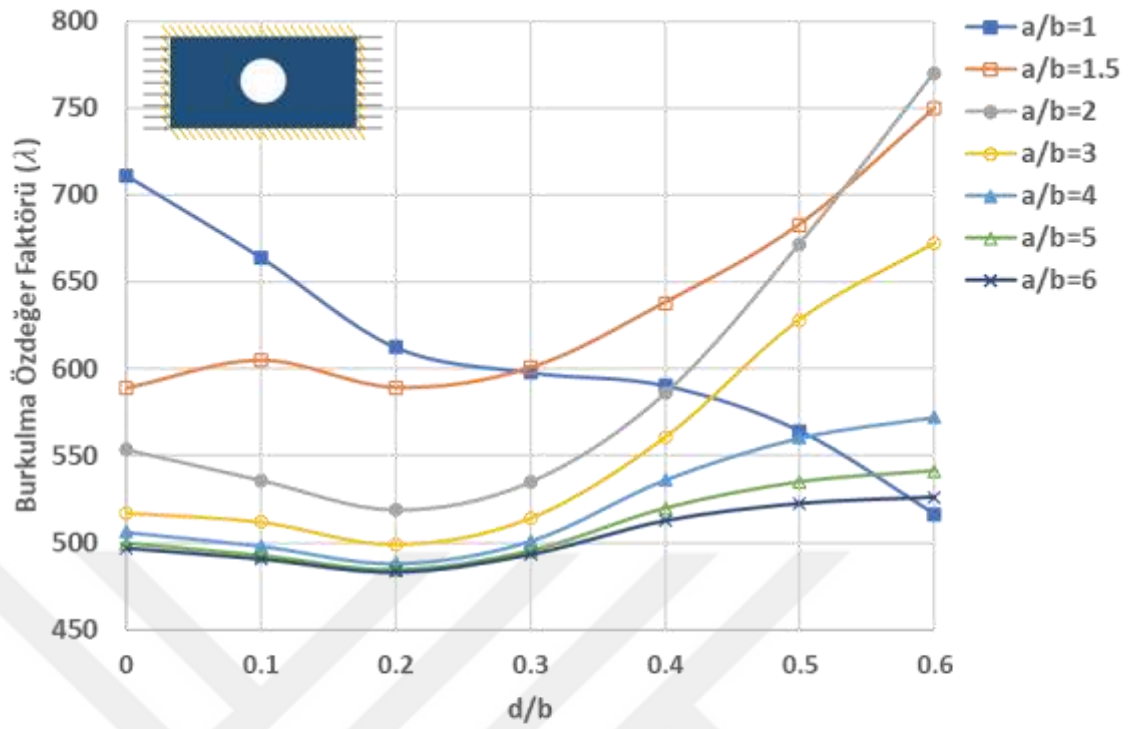


c)

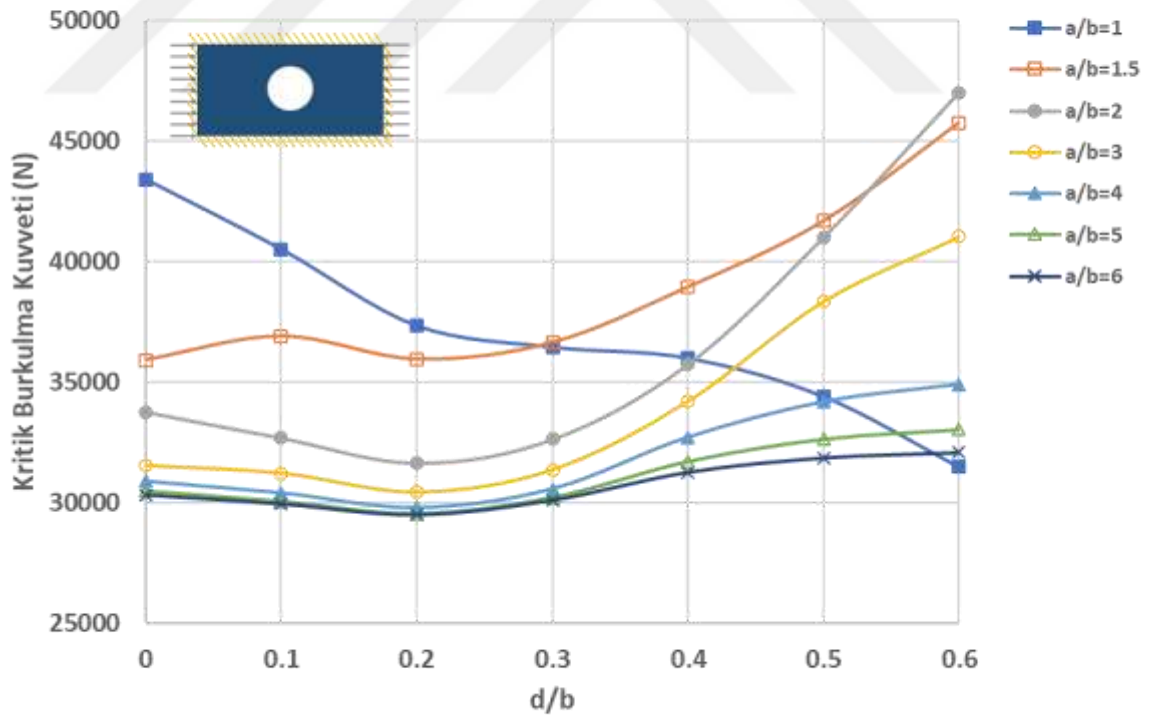


d)

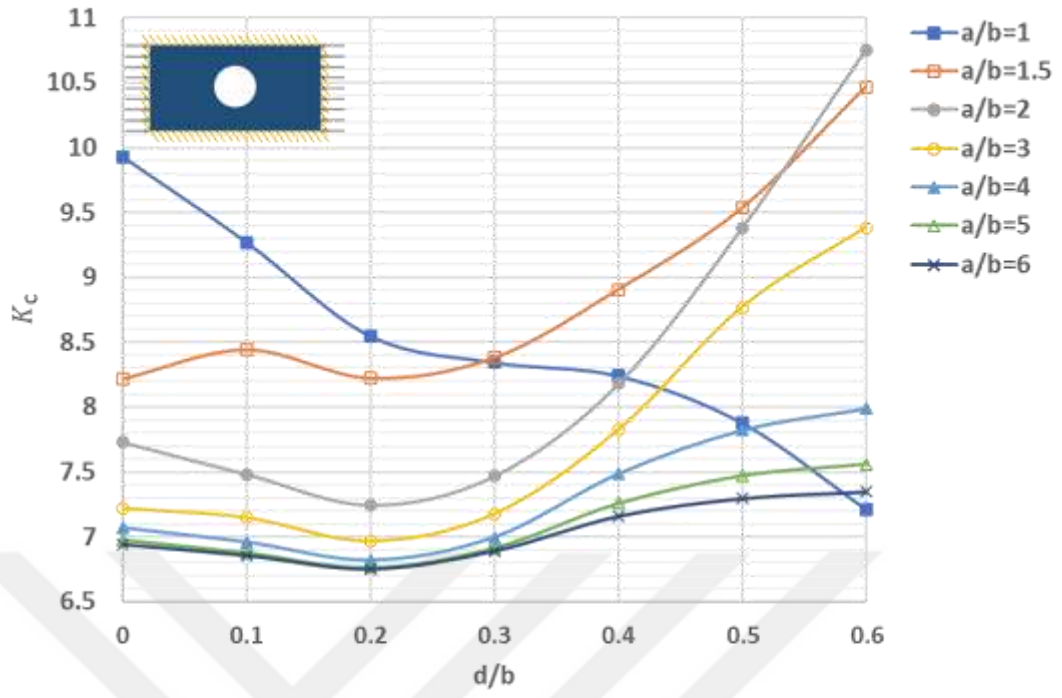
Şekil 4.2 Bası gerilimi yüklemesi için her kenarı basit mesnetli plaka için a) burkulma özdeğer faktörleri b) kritik burkulma kuvveti c) burkulma eşdeğer katsayısı d) Maksimum von mises gerilimi grafikleri



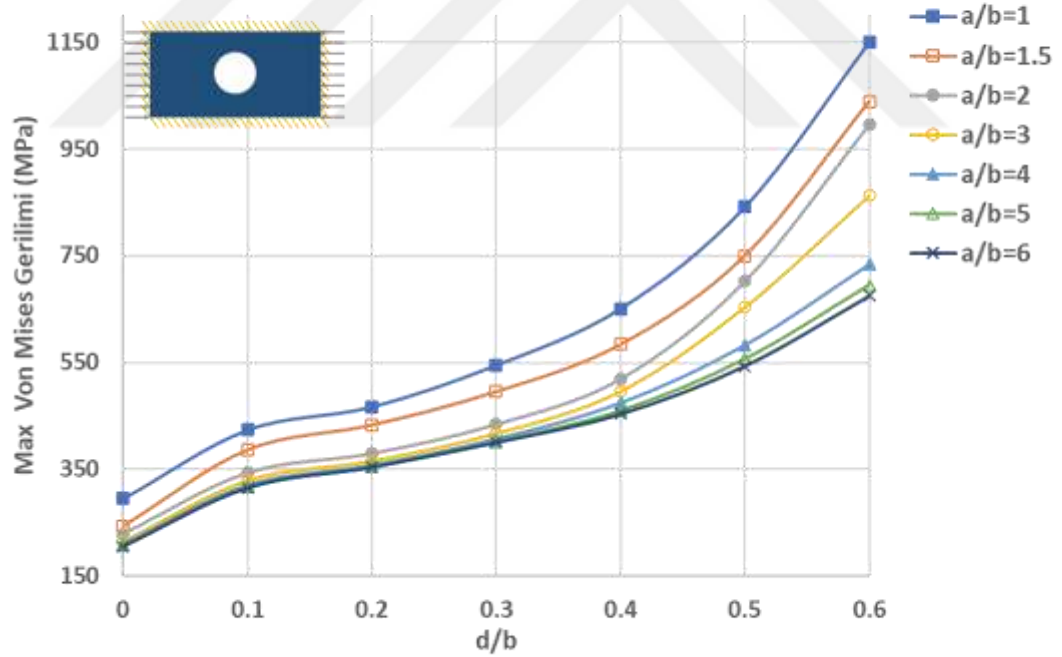
a)



b)

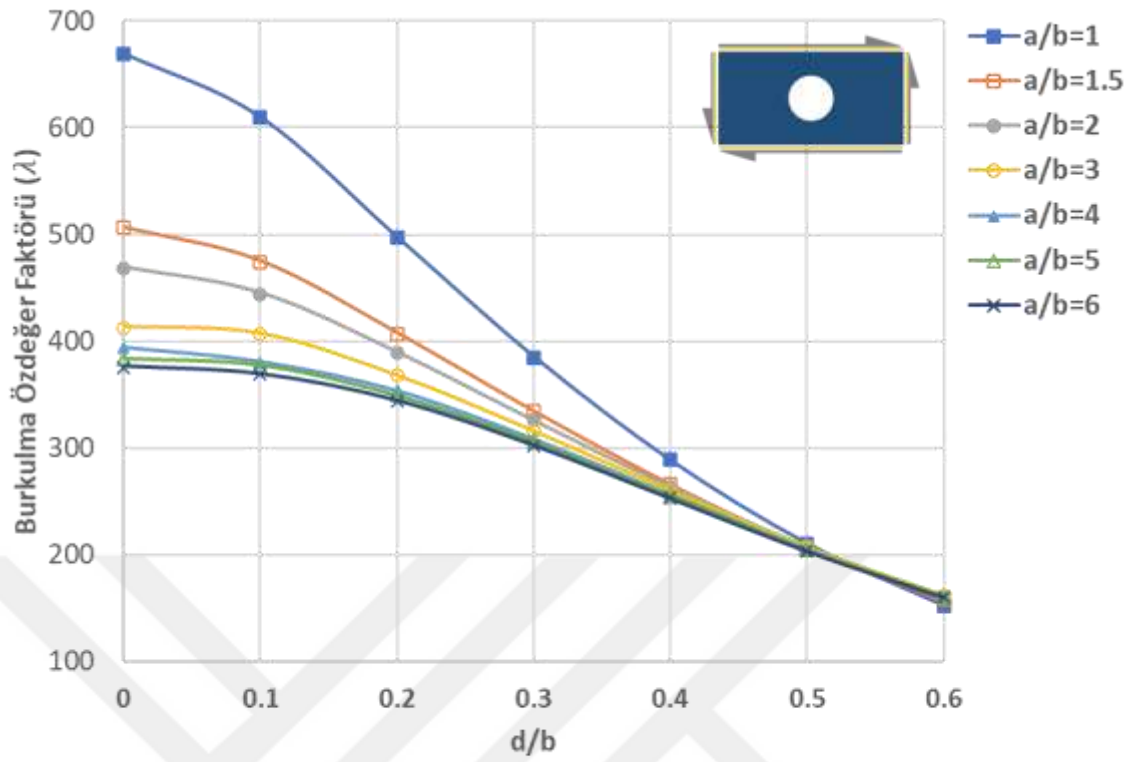


c)

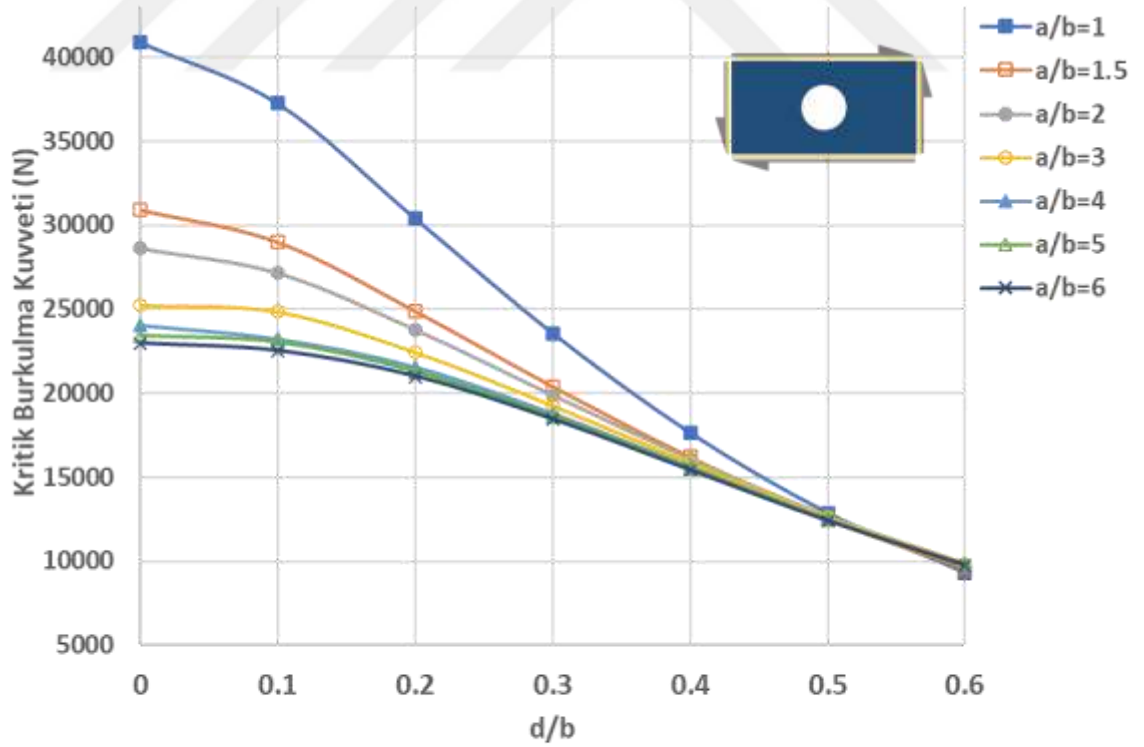


d)

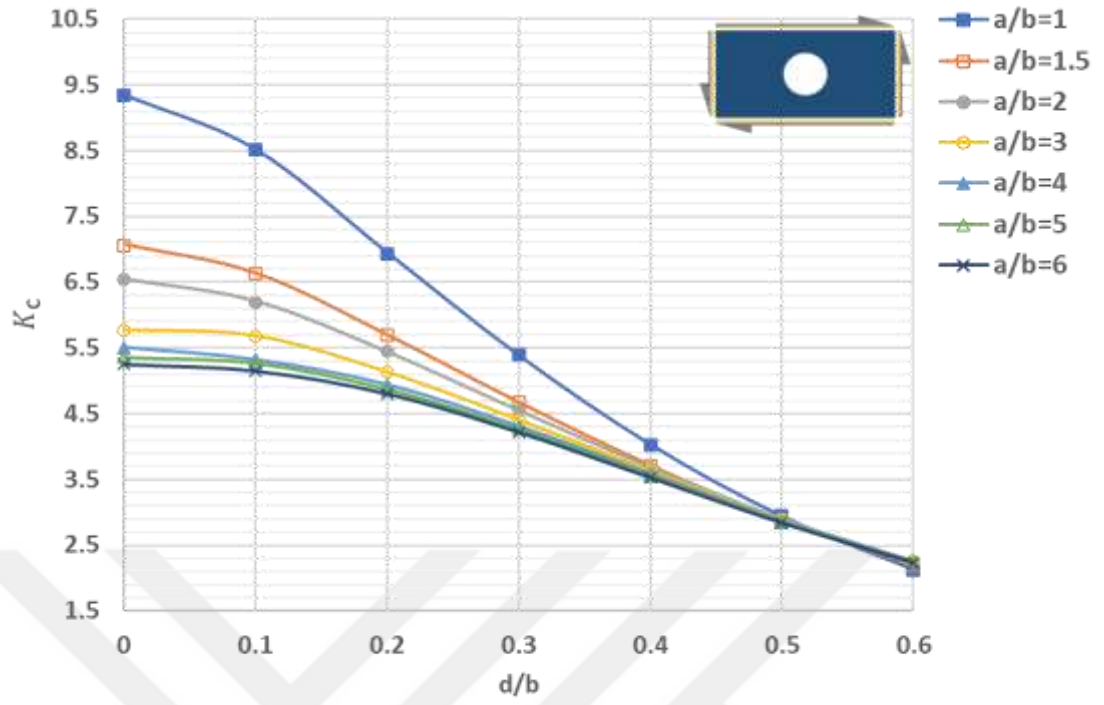
Şekil 4.3 Bası gerilimi yüklemesi için her kenarı sabit mesnetli plaka için a) burkulma özdeğer faktörleri b) kritik burkulma kuvveti c) burkulma eşdeğer katsayısı d) Maksimum von mises gerilimi grafikleri



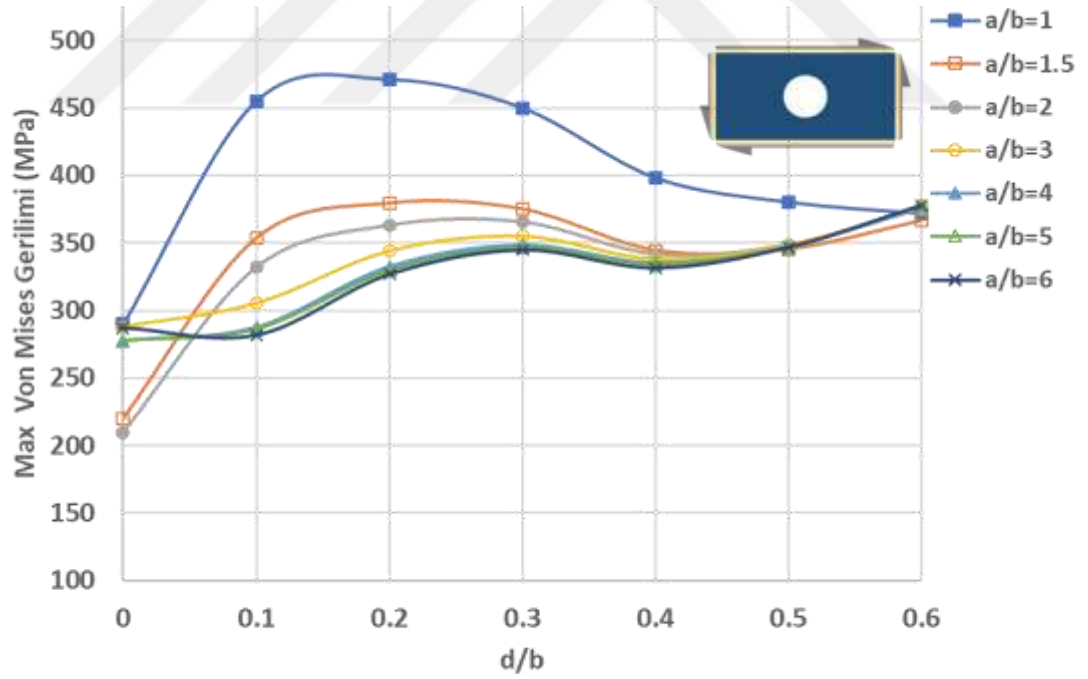
a)



b)

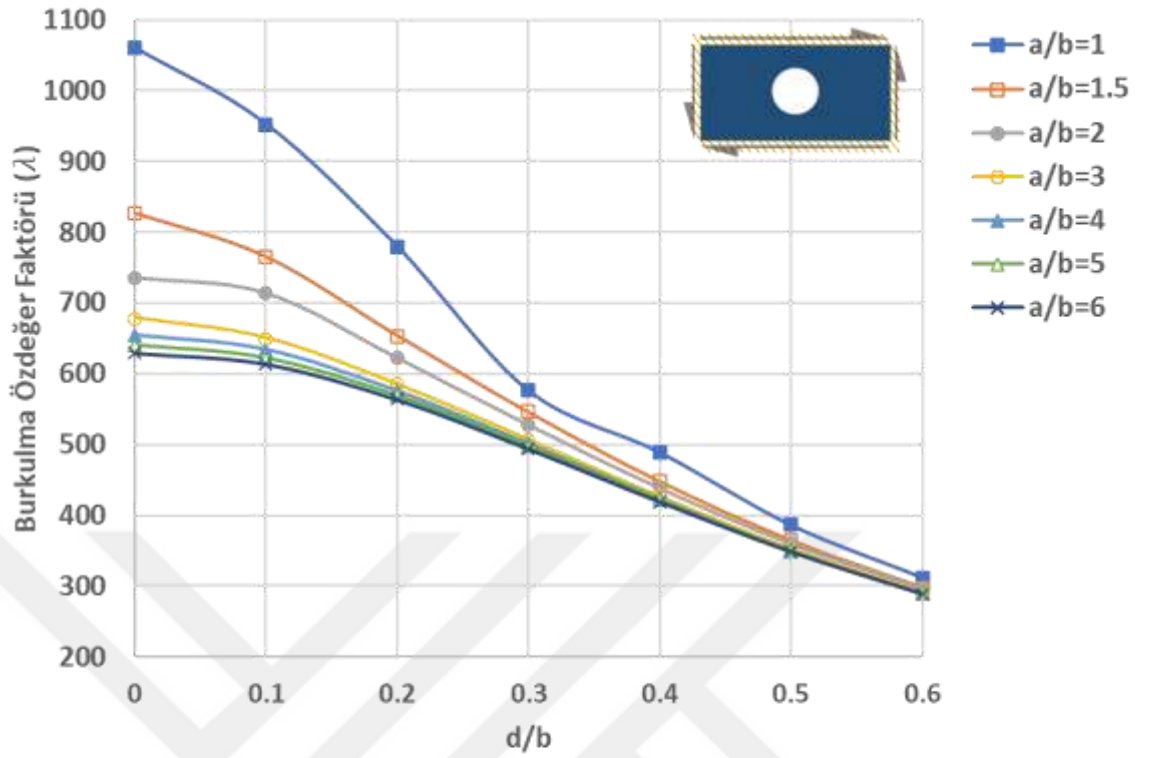


c)

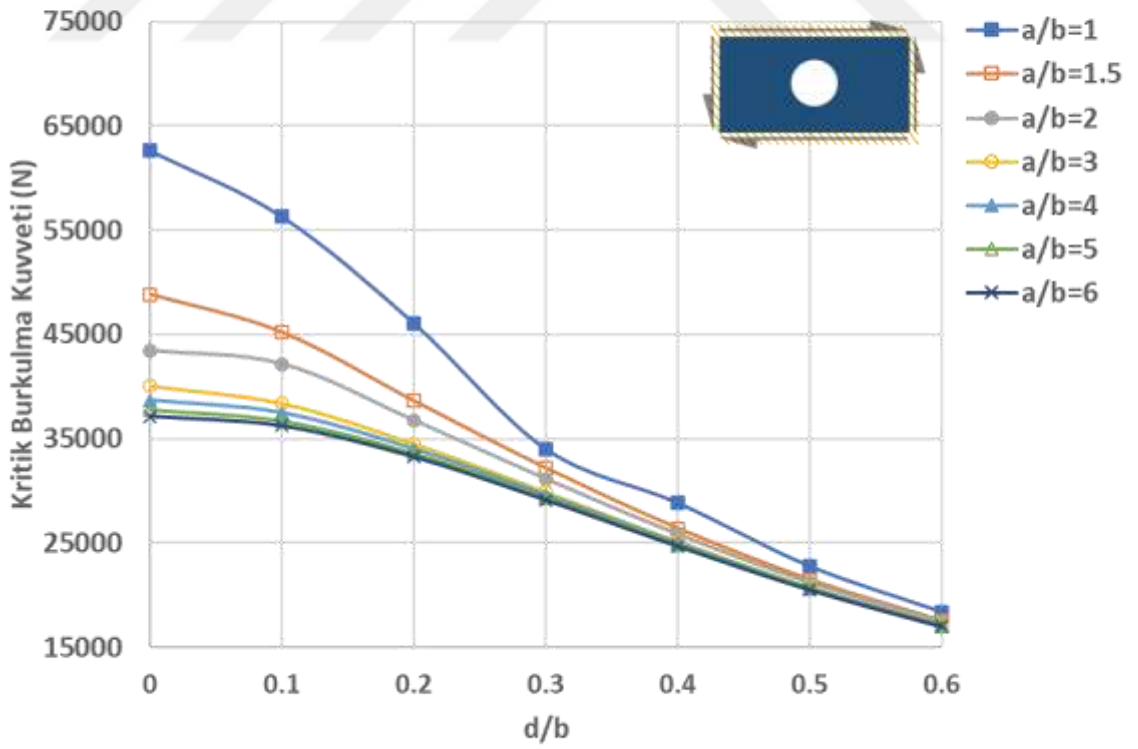


d)

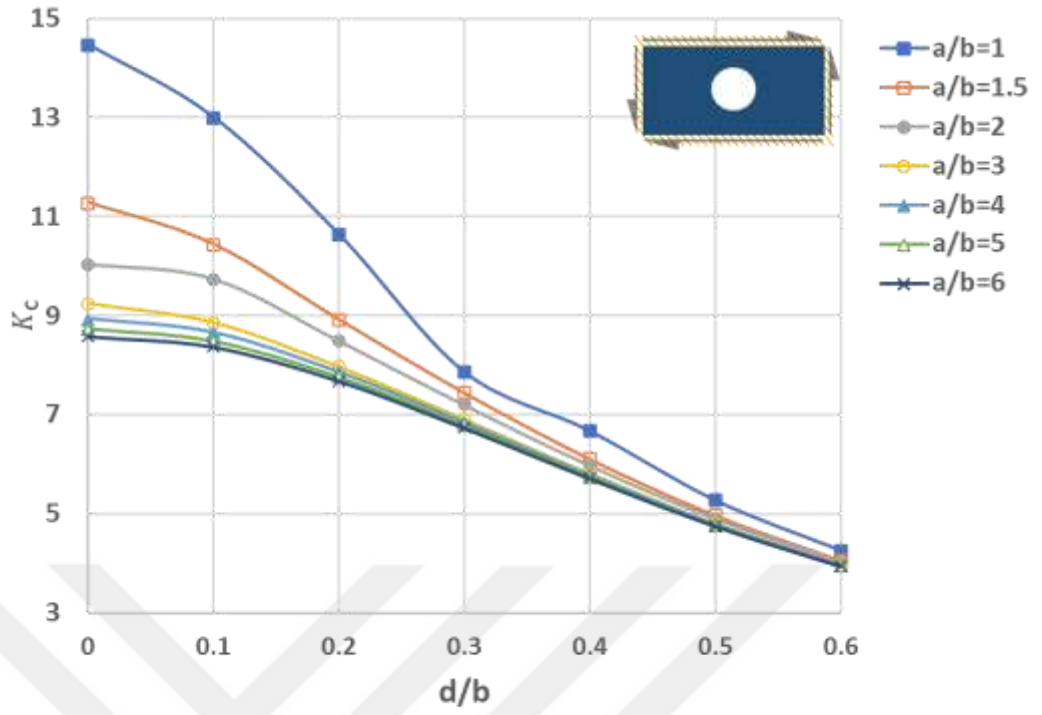
Şekil 4.4 Kayma gerilimi yüklemesi için her kenarı basit mesnetli plaka için a) burkulma özdeğer faktörleri b) kritik burkulma kuvveti c) burkulma eşdeğer katsayısı d) Maksimum von mises gerilimi grafikleri



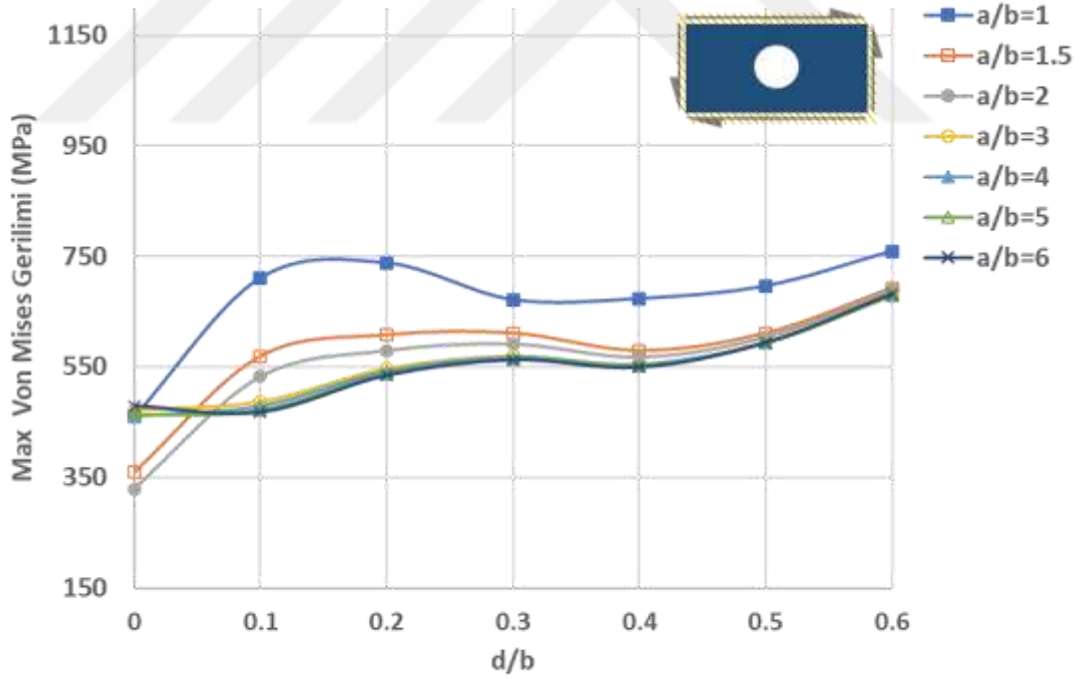
a)



b)

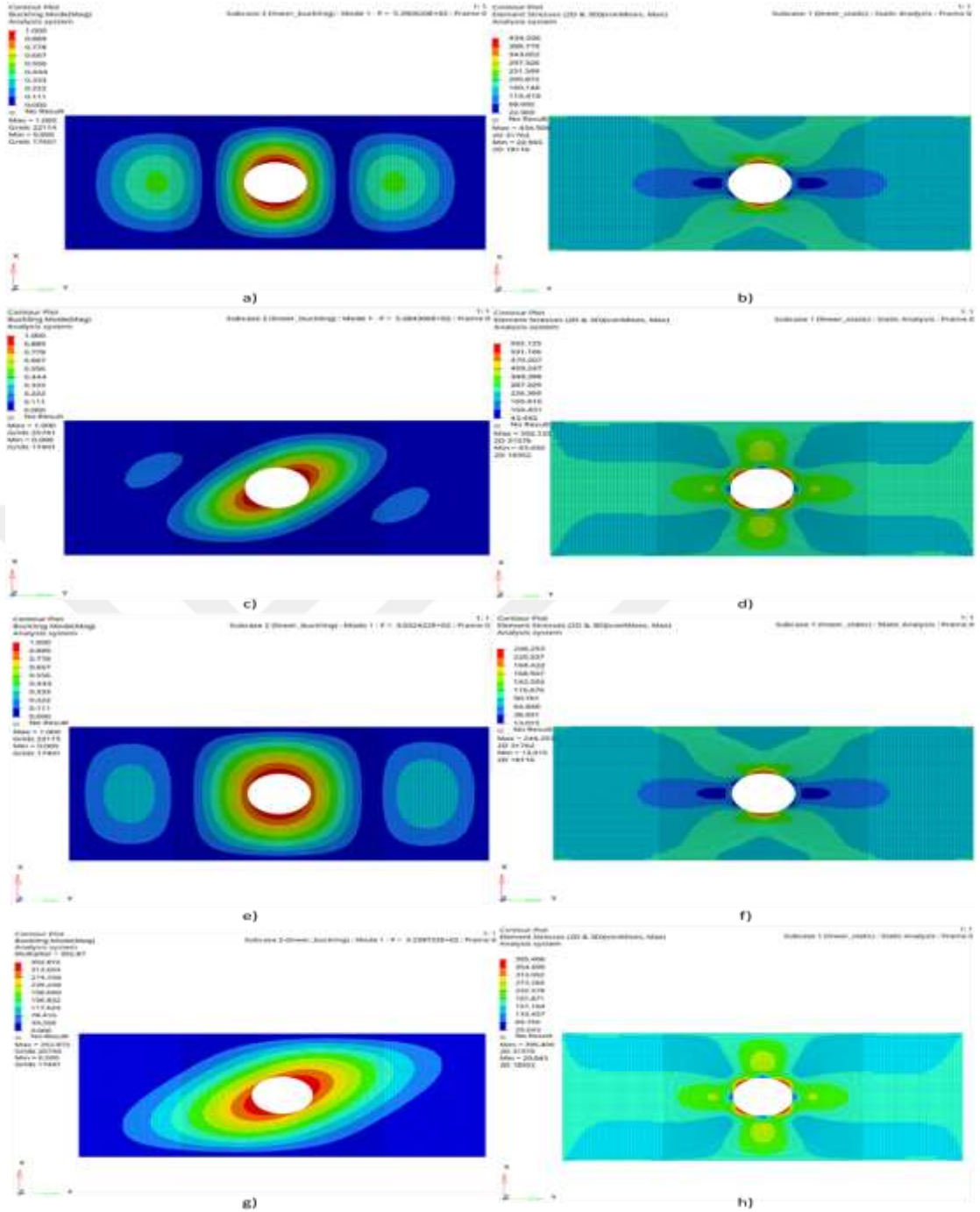


c)

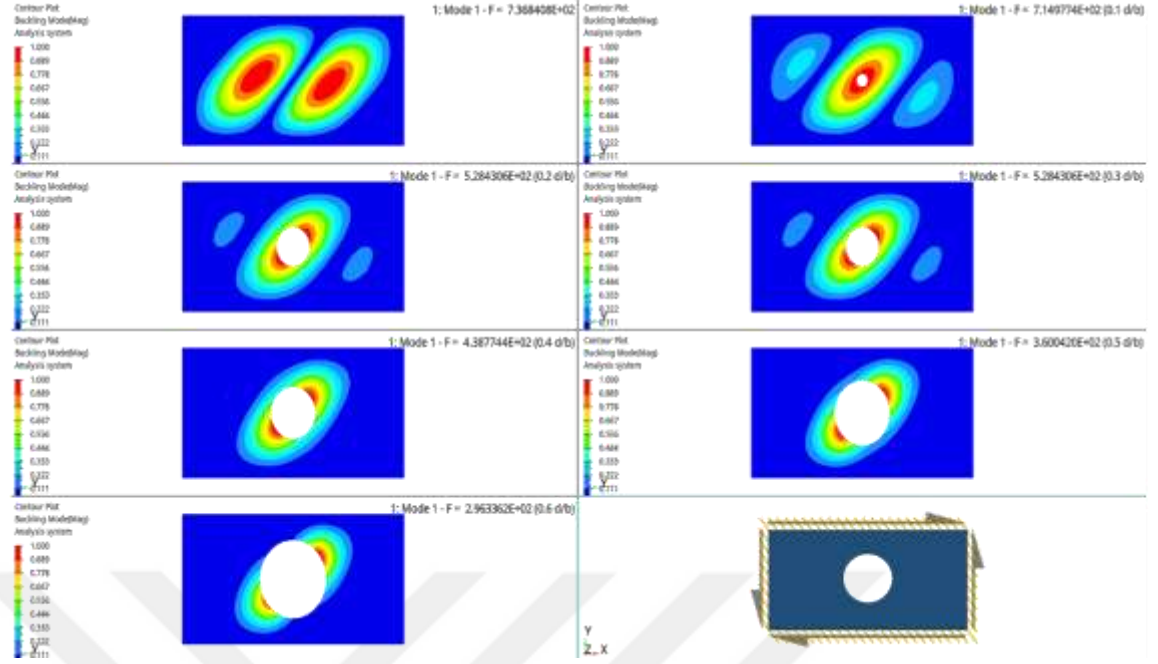


d)

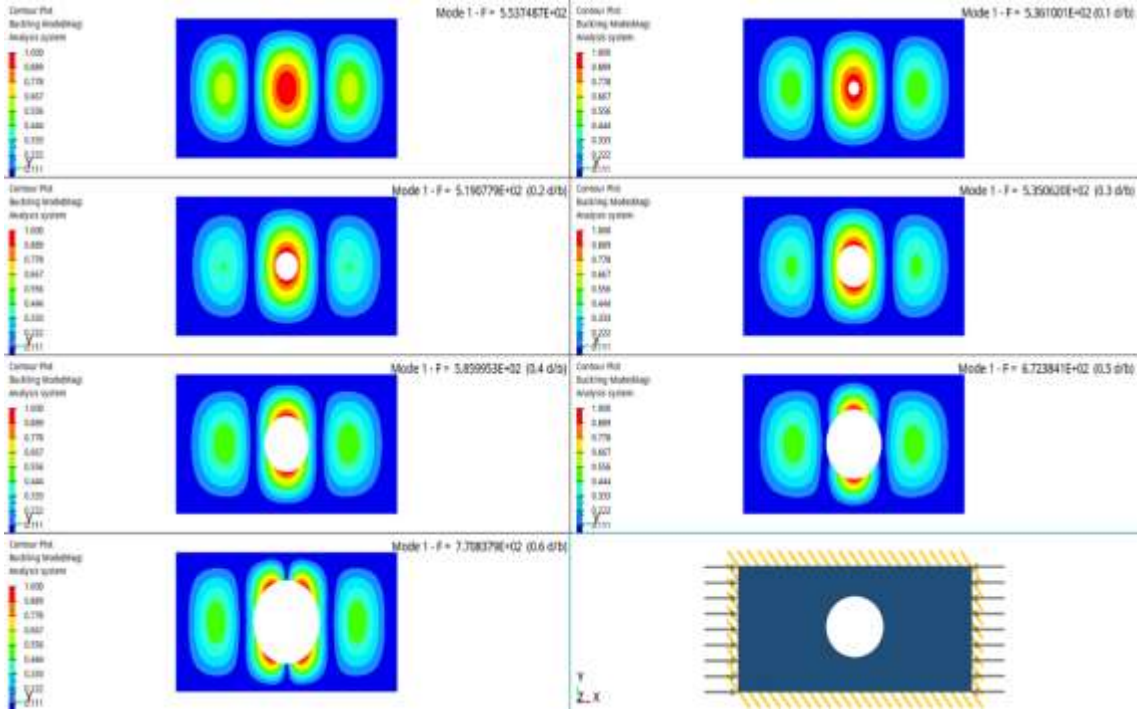
Şekil 4.5 Kayma gerilimi yüklemesi için her kenarı sabit mesnetli plaka için a) burkulma özdeğer faktörleri b) kritik burkulma kuvveti c) burkulma eşdeğer katsayısı d) Maksimum von mises gerilimi grafikleri



Şekil 4.6 $a/b=2$ ve $d/b=0.3$ merkezi delikli plakanın a) sabit mesnetli bası gerilmesi yüklemesi plaka için burkulma özdeğer dağılımı b) kritik yükleme durumu için plaka üzerindeki von mises gerilim dağılımı c) sabit mesnetli kayma gerilmesi yüklemesi için burkulma özdeğer dağılımı d) kritik yükleme durumu için plaka üzerindeki von mises gerilim dağılımı e) basit mesnetli bası gerilmesi yüklemesi için burkulma özdeğer dağılımı f) kritik yükleme durumu için plaka üzerindeki vonmises gerilim dağılımı g) basit mesnetli kayma gerilmesi yüklemesi için burkulma özdeğer dağılımı h) kritik yükleme durumu için plaka üzerindeki von mises gerilim dağılımı



Şekil 4.7 Sabit Mesnetli kayma gerilimi yüklemesi için plaka üzerindeki farklı çaptaki delikler için 1. burkulma modu dağılımı



Şekil 4.8 Sabit Mesnetli basma gerilimi yüklemesi için plaka üzerindeki farklı çaptaki delikler için 1. burkulma modu dağılımı

Çizelge 4.1 Sınır Koşullarına göre yapının kütesinin karşılaştırma tablosu

a/b	d/b	Kütle (gr)	Aynı a/b oranlı deliksiz plakaya göre kütledeki değişim miktarı (%)	Basit Mesnetli Plaka Kayma Gerilimi Yükleme için 1. Mod Kritik Burkulma Kuvveti (N)	Aynı a/b oranlı deliksiz plakaya göre Basit Mesnetli Plaka Kayma Gerilimi Yükleme için 1. Mod Kritik Burkulma Kuvvetindeki değişim miktarı (%)	Sabit Mesnetli Plaka Kayma Gerilimi Yükleme için 1. Mod Kritik Burkulma Kuvveti (N)	Aynı a/b oranlı deliksiz plakaya göre Sabit Mesnetli Plaka Kayma Gerilimi Yükleme için 1. Mod Kritik Burkulma Kuvvetindeki değişim miktarı (%)
1	0	83.23	-	40880.04	-	62639.47	-
1	0.1	82.58	-0.79	37242.95	-8.90	56291.68	-10.13
1	0.2	80.62	-3.14	30386.17	-25.67	46072.57	-26.45
1	0.3	77.35	-7.07	23550.52	-42.39	34024.43	-45.68
1	0.4	72.77	-12.57	17622.25	-56.89	28852.45	-53.94
1	0.5	66.89	-19.63	12858.61	-68.55	22788.67	-63.62
1	0.6	59.70	-28.27	9312.32	-77.22	18402.81	-70.62
1.5	0	124.85	-	30930.54	-	48865.76	-
1.5	0.1	124.19	-0.52	29011.60	-6.20	45220.70	-7.46
1.5	0.2	122.23	-2.09	24901.65	-19.49	38636.52	-20.93
1.5	0.3	118.96	-4.71	20416.77	-33.99	32219.91	-34.06
1.5	0.4	114.39	-8.38	16222.26	-47.55	26428.11	-45.92
1.5	0.5	108.51	-13.09	12558.39	-59.40	21505.41	-55.99
1.5	0.6	101.31	-18.85	9603.75	-68.95	17563.07	-64.06
2	0	166.46	-	28632.89	-	43473.61	-
2	0.1	165.81	-0.39	27157.93	-5.15	42183.67	-2.97
2	0.2	163.85	-1.57	23780.89	-16.95	36776.12	-15.41
2	0.3	160.58	-3.53	19878.22	-30.58	31177.41	-28.28
2	0.4	156.00	-6.28	16082.74	-43.83	25887.69	-40.45
2	0.5	150.12	-9.82	12665.79	-55.76	21242.48	-51.14
2	0.6	142.93	-14.14	9830.55	-65.67	17483.84	-59.78
3	0	249.70	-	25249.73	-	40057.93	-
3	0.1	249.04	-0.26	24851.88	-1.58	38393.49	-4.16
3	0.2	247.08	-1.05	22446.98	-11.10	34527.36	-13.81
3	0.3	243.81	-2.36	19260.15	-23.72	29908.95	-25.34
3	0.4	239.24	-4.19	15853.55	-37.21	25162.94	-37.18
3	0.5	233.35	-6.54	12615.45	-50.04	20783.01	-48.12
3	0.6	226.16	-9.42	9853.60	-60.98	17152.84	-57.18
4	0	332.93	-	24068.01	-	38670.19	-
4	0.1	332.27	-0.20	23249.46	-3.40	37464.90	-3.12
4	0.2	330.31	-0.79	21582.25	-10.33	34020.05	-12.03
4	0.3	327.04	-1.77	18816.90	-21.82	29626.35	-23.39
4	0.4	322.47	-3.14	15648.40	-34.98	25008.93	-35.33
4	0.5	316.59	-4.91	12528.04	-47.95	20703.59	-46.46
4	0.6	309.39	-7.07	9820.02	-59.20	17114.91	-55.74
5	0	416.16	-	23421.72	-	37823.62	-
5	0.1	415.51	-0.16	23036.62	-1.64	36744.12	-2.85
5	0.2	413.55	-0.63	21302.18	-9.05	33604.34	-11.16
5	0.3	410.28	-1.41	18625.91	-20.48	29376.91	-22.33
5	0.4	405.70	-2.51	15530.33	-33.69	24867.48	-34.25
5	0.5	399.82	-3.93	12465.84	-46.78	20630.57	-45.46
5	0.6	392.63	-5.65	9792.71	-58.19	17082.29	-54.84
6	0	499.39	-	22964.40	-	37135.64	-
6	0.1	498.74	-0.13	22524.95	-1.91	36222.14	-2.46
6	0.2	496.78	-0.52	21006.92	-8.52	33260.84	-10.43
6	0.3	493.51	-1.18	18447.55	-19.67	29143.69	-21.52
6	0.4	488.93	-2.09	15421.42	-32.85	24728.72	-33.41
6	0.5	483.05	-3.27	12407.66	-45.97	20557.59	-44.64
6	0.6	475.86	-4.71	9766.91	-57.47	17049.25	-54.09

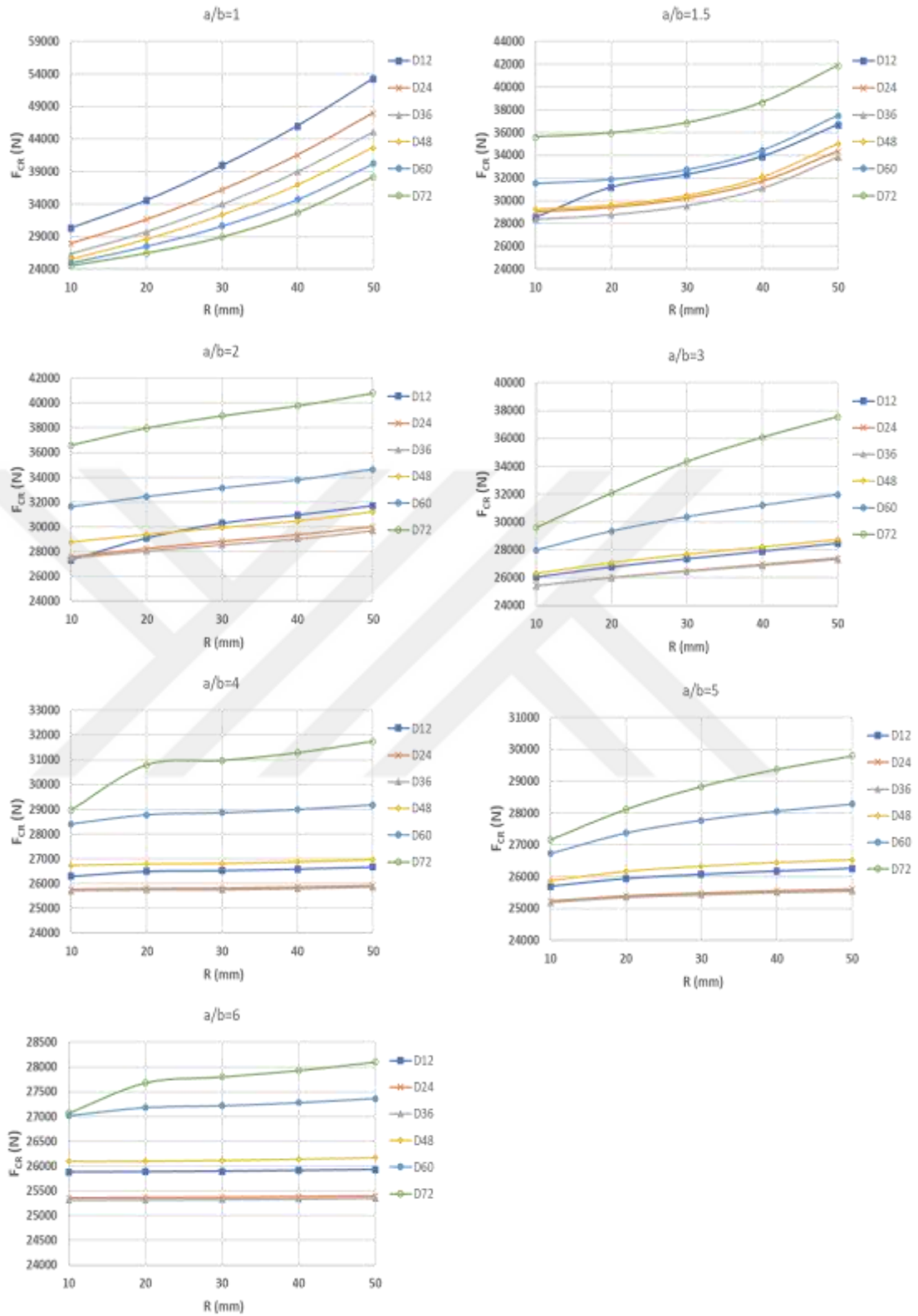
Çizelge 4.2 Sınır Koşullarına göre yapının kütlelerinin karşılaştırma tablosu

a/b	d/b	Kütle (gr)	Aynı a/b oranlı deliksiz plakaya göre kütledeki değişim miktarı (%)	Basit Mesnetli Plaka Bası Gerilimi Yükleme için 1. Mod Kritik Burkulma Kuvveti (N)	Aynı a/b oranlı deliksiz plakaya göre Basit Mesnetli Plaka Bası Gerilimi yükleme için 1. Mod Kritik Burkulma Kuvvetindeki değişim miktarı (%)	Sabit Mesnetli Plaka Bası Gerilimi Yükleme için 1. Mod Kritik Burkulma Kuvveti (N)	Aynı a/b oranlı deliksiz plakaya göre Sabit Mesnetli Plaka Bası Gerilimi yükleme için 1. Mod Kritik Burkulma Kuvvetindeki değişim miktarı (%)
1	0	83.23	-	17117.00	-	43404.89	-
1	0.1	82.58	-0.79	16332.47	-4.58	40520.79	-6.64
1	0.2	80.62	-3.14	14816.07	-13.44	37354.40	-13.94
1	0.3	77.35	-7.07	13479.77	-21.25	36464.71	-15.99
1	0.4	72.77	-12.57	12573.51	-26.54	36010.31	-17.04
1	0.5	66.89	-19.63	11956.38	-30.15	34417.67	-20.71
1	0.6	59.70	-28.27	11496.66	-32.83	31507.05	-27.41
1.5	0	124.85	-	17104.67	-	35919.98	-
1.5	0.1	124.19	-0.52	18854.20	10.23	36904.62	2.74
1.5	0.2	122.23	-2.09	18515.80	8.25	35950.88	0.09
1.5	0.3	118.96	-4.71	17935.64	4.86	36643.19	2.01
1.5	0.4	114.39	-8.38	18342.50	7.24	38943.76	8.42
1.5	0.5	108.51	-13.09	19838.90	15.99	41690.85	16.07
1.5	0.6	101.31	-18.85	22111.09	29.27	45768.60	27.42
2	0	166.46	-	17113.34	-	33778.67	-
2	0.1	165.81	-0.39	17294.47	1.06	32702.11	-3.19
2	0.2	163.85	-1.57	17803.22	4.03	31663.75	-6.26
2	0.3	160.58	-3.53	18497.77	8.09	32638.78	-3.37
2	0.4	156.00	-6.28	18870.00	10.26	35745.74	5.82
2	0.5	150.12	-9.82	19964.40	16.66	41015.43	21.42
2	0.6	142.93	-14.14	21778.37	27.26	47021.11	39.20
3	0	249.70	-	17110.74	-	31542.78	-
3	0.1	249.04	-0.26	16884.73	-1.32	31225.03	-1.01
3	0.2	247.08	-1.05	16403.82	-4.13	30436.73	-3.51
3	0.3	243.81	-2.36	16112.87	-5.83	31360.12	-0.58
3	0.4	239.24	-4.19	16292.00	-4.78	34205.15	8.44
3	0.5	233.35	-6.54	16900.28	-1.23	38351.22	21.58
3	0.6	226.16	-9.42	17688.39	3.38	41035.87	30.10
4	0	332.93	-	17109.52	-	30890.49	-
4	0.1	332.27	-0.20	17201.01	0.53	30405.46	-1.57
4	0.2	330.31	-0.79	17150.02	0.24	29794.10	-3.55
4	0.3	327.04	-1.77	16789.12	-1.87	30574.12	-1.02
4	0.4	322.47	-3.14	17055.87	-0.31	32719.52	5.92
4	0.5	316.59	-4.91	17936.18	4.83	34190.43	10.68
4	0.6	309.39	-7.07	18391.13	7.49	34917.58	13.04
5	0	416.16	-	17108.79	-	30496.96	-
5	0.1	415.51	-0.16	16964.12	-0.85	30063.90	-1.42
5	0.2	413.55	-0.63	16598.21	-2.98	29560.10	-3.07
5	0.3	410.28	-1.41	16348.20	-4.45	30226.54	-0.89
5	0.4	405.70	-2.51	16513.18	-3.48	31722.09	4.02
5	0.5	399.82	-3.93	16978.37	-0.76	32646.82	7.05
5	0.6	392.63	-5.65	17375.49	1.56	33038.18	8.33
6	0	499.39	-	17108.31	-	30326.85	-
6	0.1	498.74	-0.13	17167.03	0.34	29951.36	-1.24
6	0.2	496.78	-0.52	16836.43	-1.59	29492.40	-2.75
6	0.3	493.51	-1.18	16525.53	-3.41	30104.28	-0.73
6	0.4	488.93	-2.09	16737.18	-2.17	31277.93	3.14
6	0.5	483.05	-3.27	17408.55	1.75	31877.09	5.11
6	0.6	475.86	-4.71	17631.78	3.06	32097.08	5.84

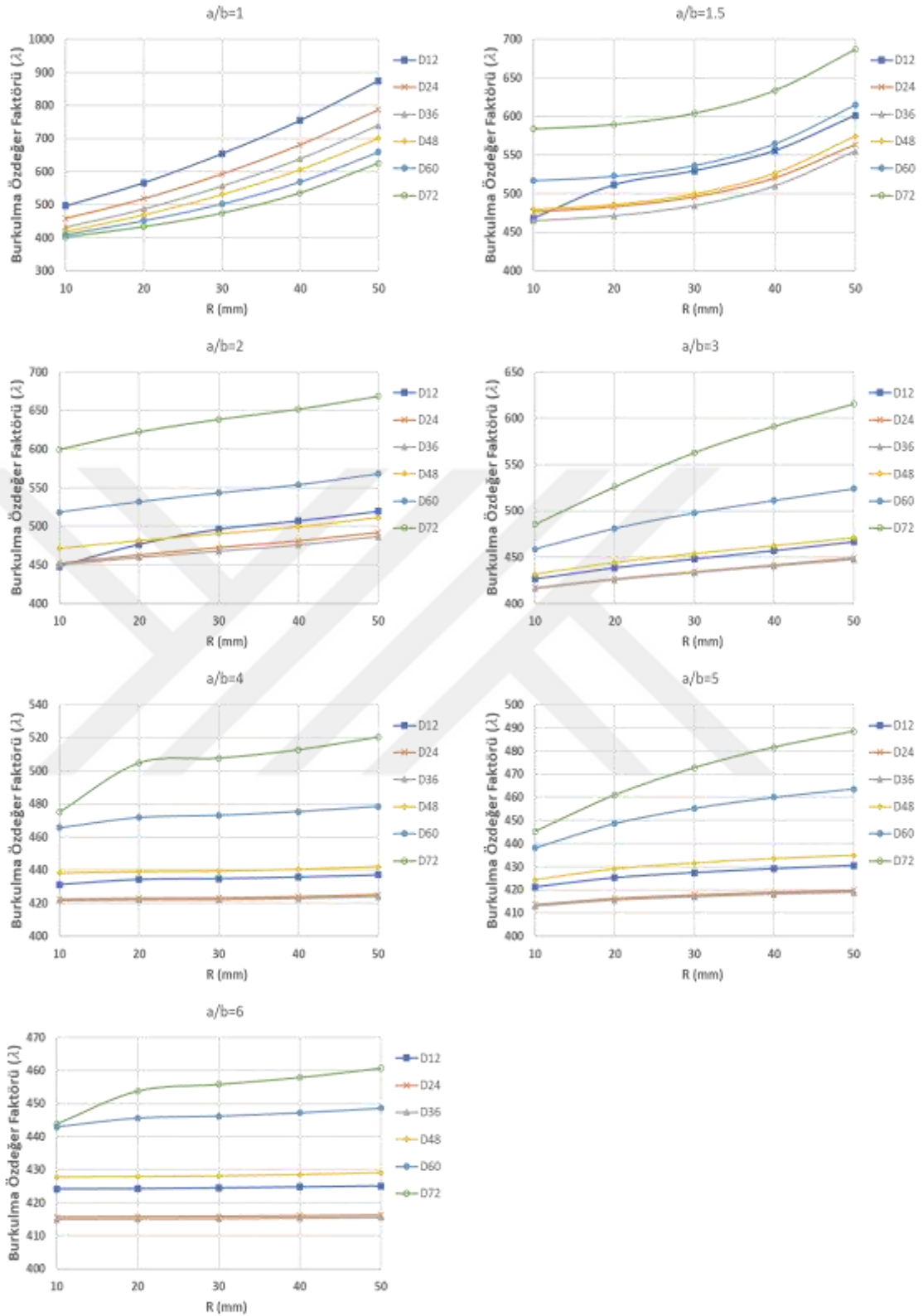
4.2. Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modellerinin Analiz Bulguları

Üç boyutlu sonlu elemanlar modeli simülasyonlarından elde edilen veriler Şekil 4.9-Şekil 4.16 yer almaktadır. İki boyutlu modellerde olduğu gibi aynı yük değerleri yapılaraya uygulanmıştır. Analizler Altair Inspire programında deney tasarımları oluşturarak 840 analiz simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda kritik burkulma kuvvetleri ve burkulma özdeğer faktörleri elde edilmiştir. Deney Tasarımlarında 4 farklı sınır koşulu 7 farklı a/b oranı 6 farklı d/b (0.1-0.6) oranı ve 5 farklı Radyus yarıçapı (R) için değişken tanımları gerçekleştirilmiştir.

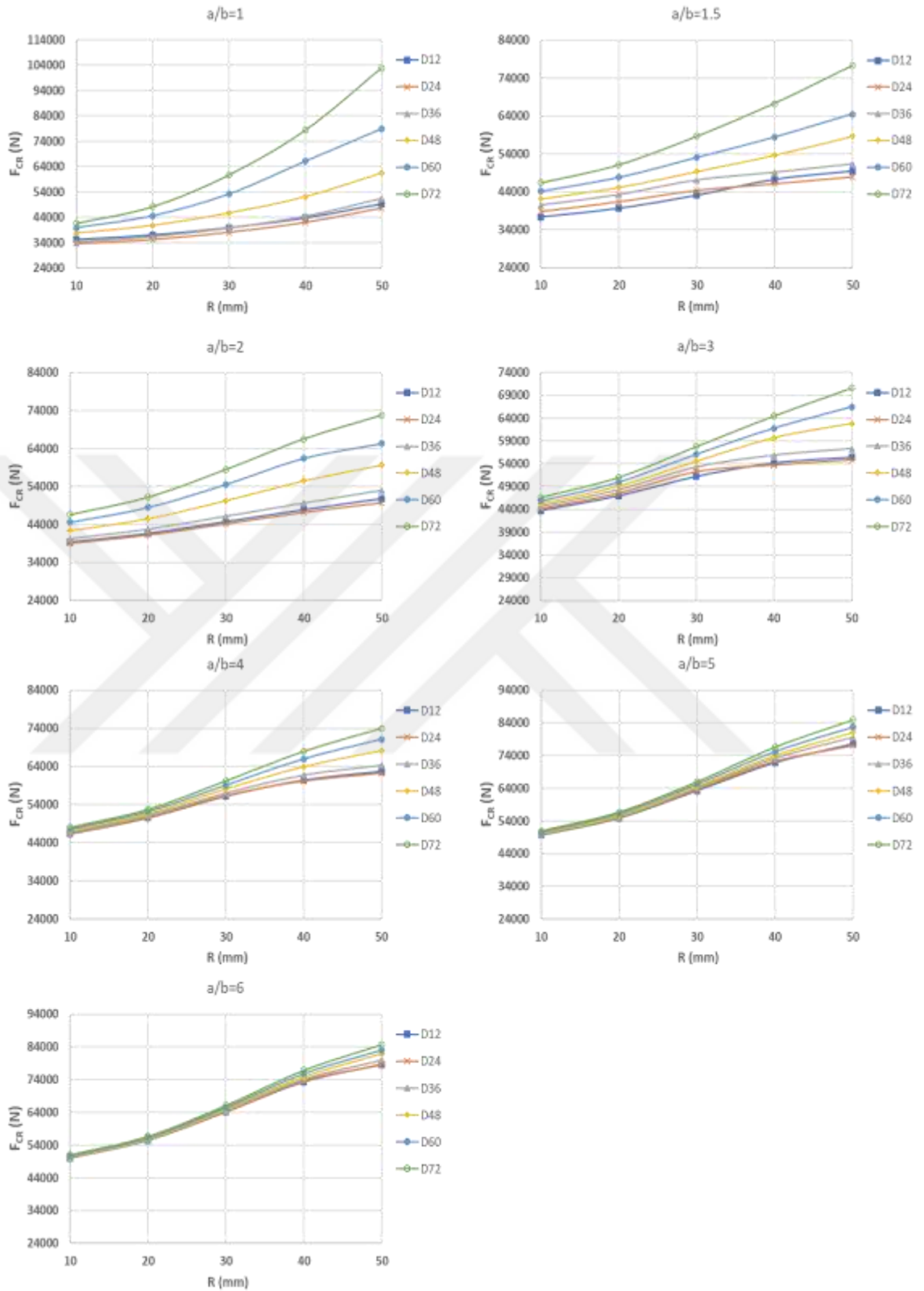




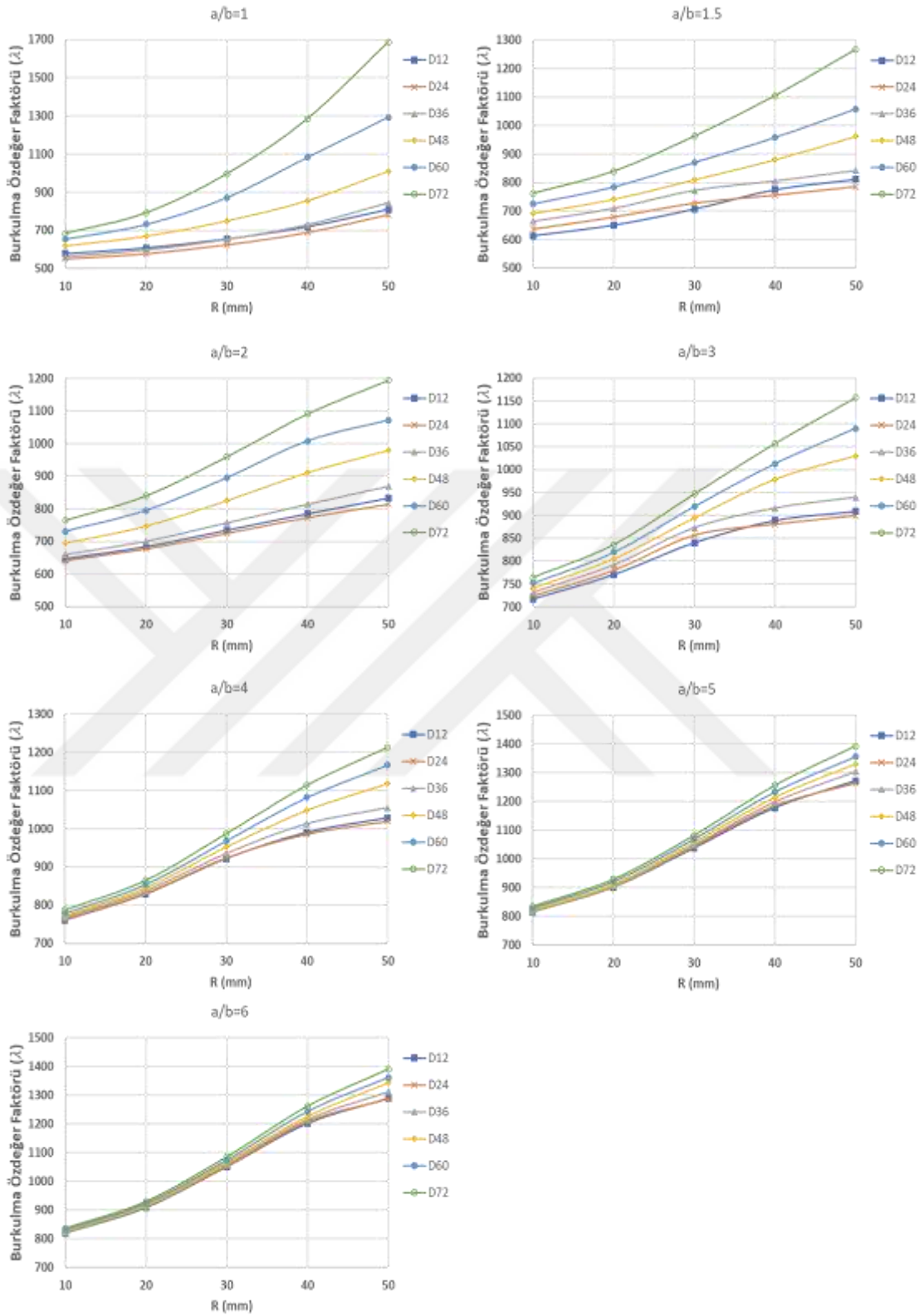
Şekil 4.9 Basit mesnet sınır koşuluna sahip basma gerilmesi yükleme türü için radyus yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod kritik burkulma kuvvet değerleri



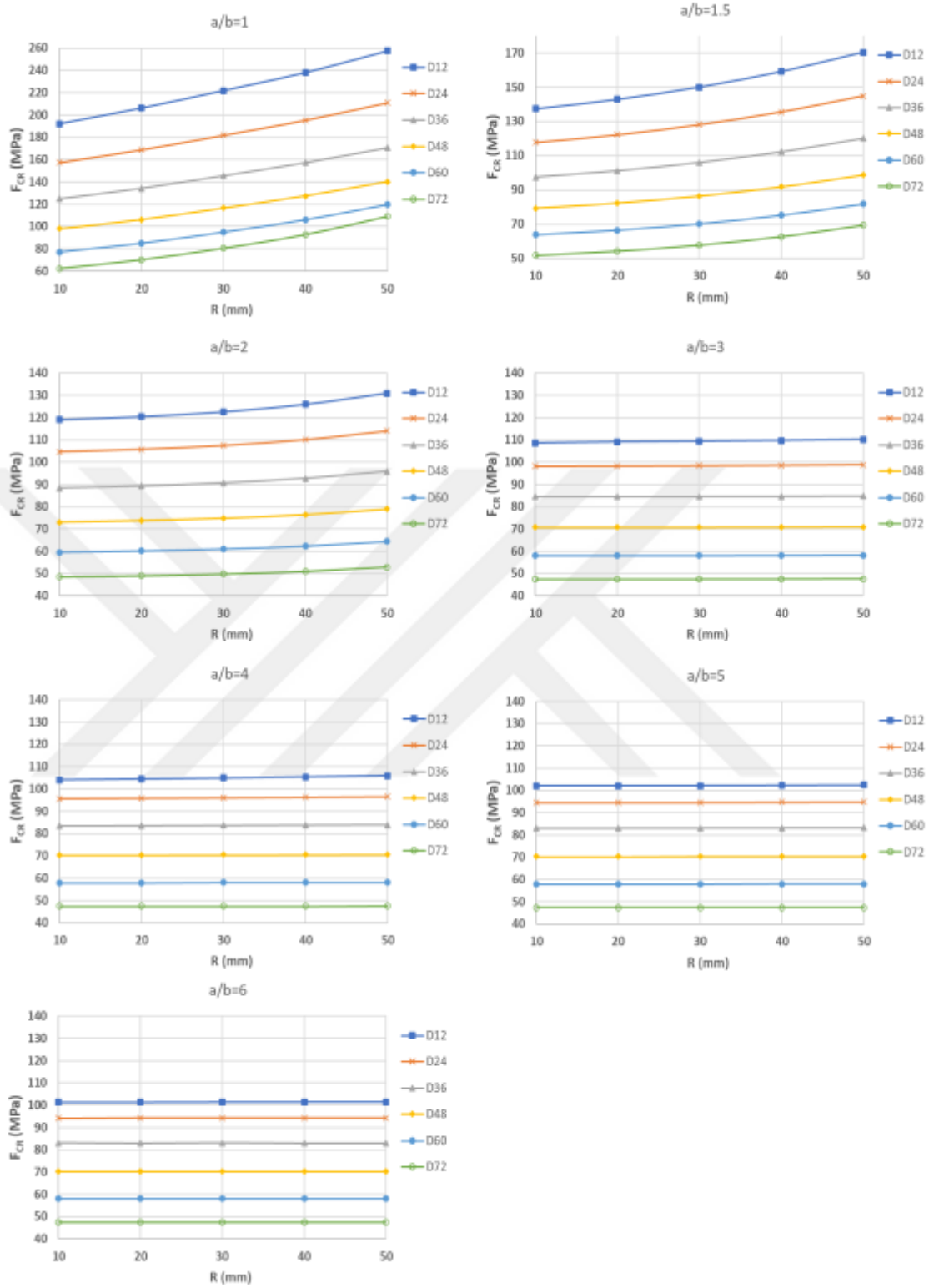
Şekil 4.10 Basit mesnet sınır koşuluna sahip basma gerilmesi yükleme türü için yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod burkulma özdeğer faktörleri



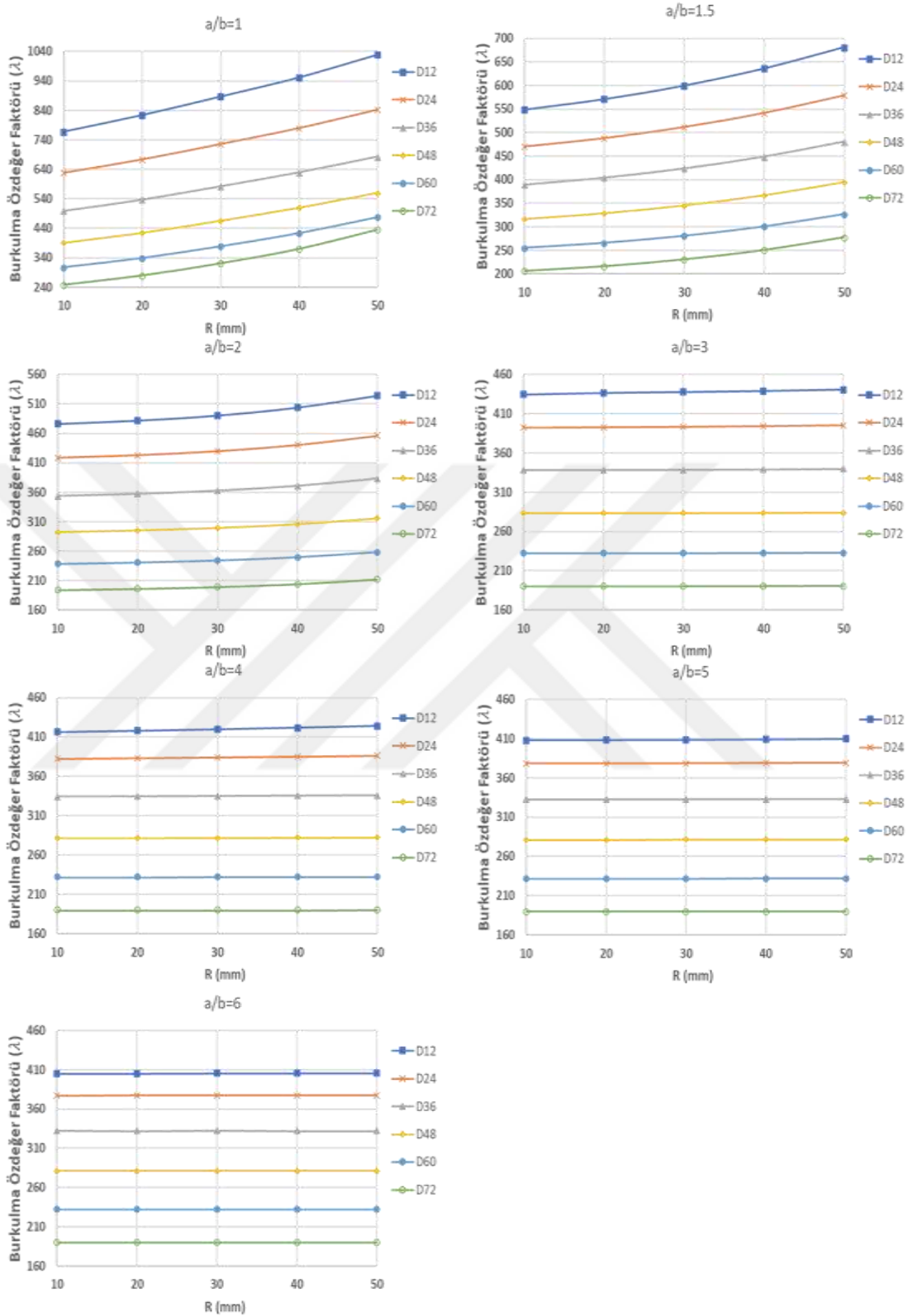
Şekil 4.11 Sabit mesnet sınır koşuluna sahip basma gerilmesi yükleme türü için yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod kritik burkulma kuvvet değerleri



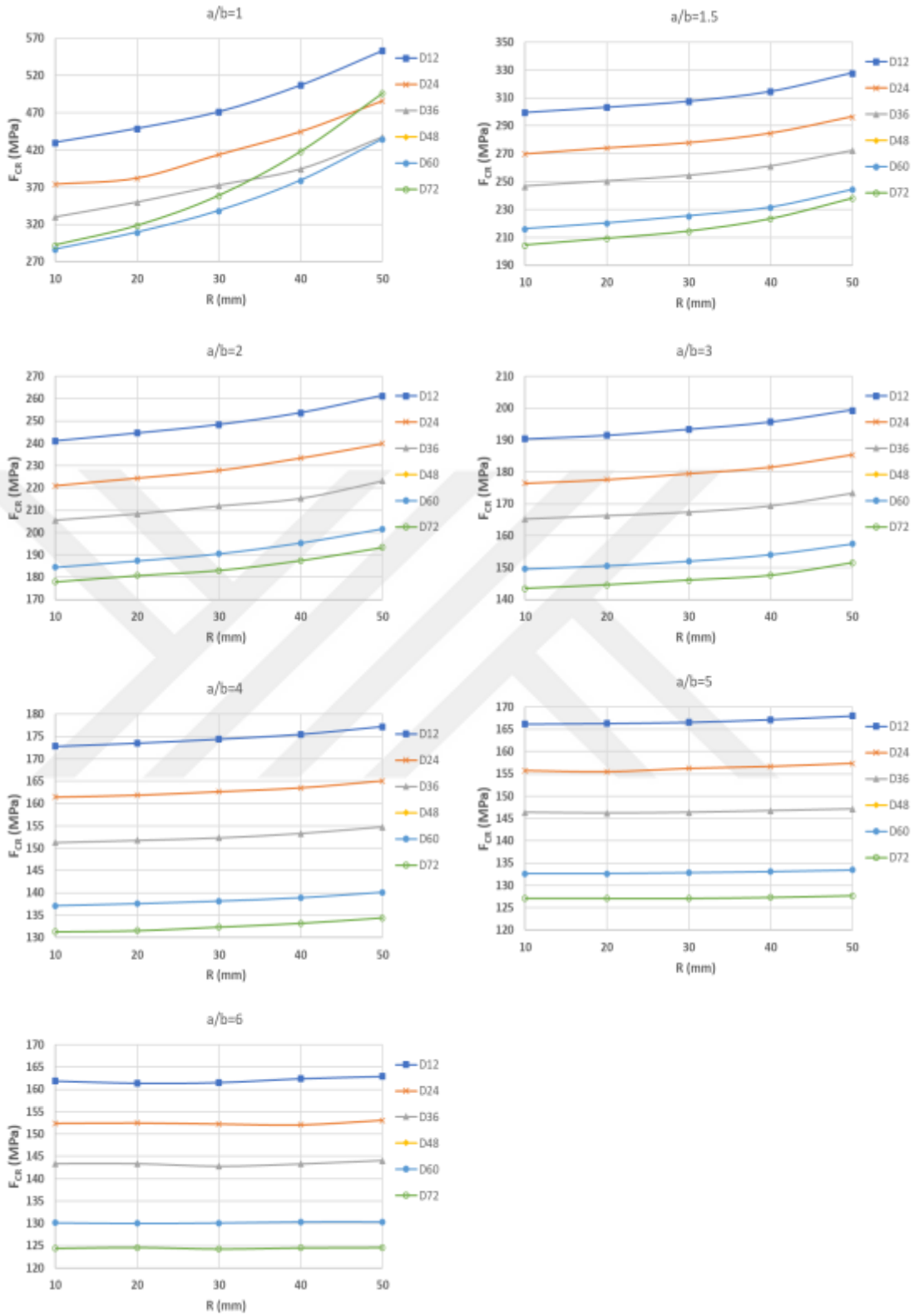
Şekil 4.12 Sabit mesnet sınır koşuluna sahip basma gerilmesi yükleme türü için yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod burkulma özdeğer faktörleri



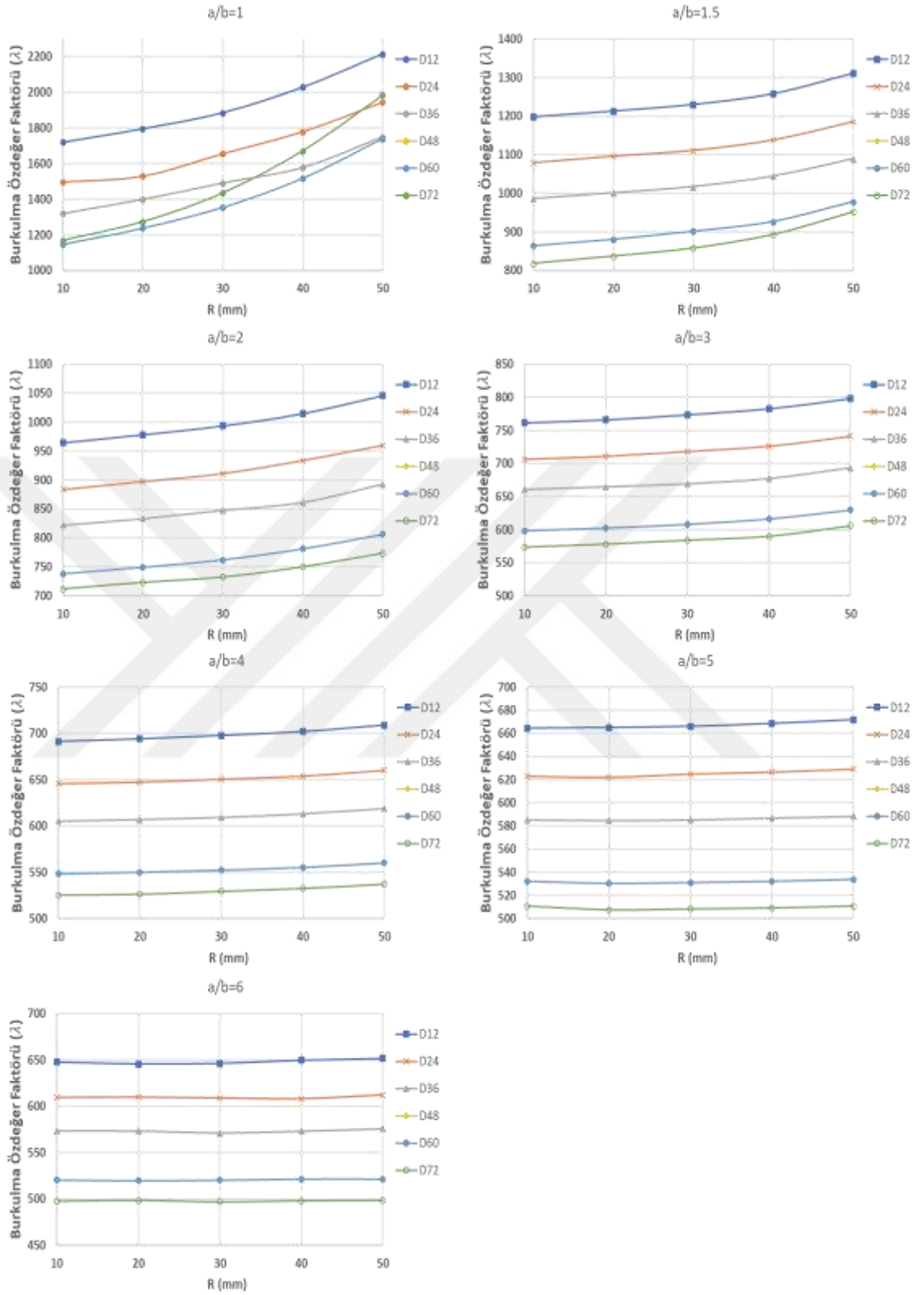
Şekil 4.13 Basit mesnet sınır koşuluna sahip kayma gerilmesi yükleme türü için yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod kritik burkulma basınç değerleri



Şekil 4.14 Basit mesnet sınır koşuluna sahip kayma gerilmesi yükleme türü için yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod burkulma özdeğer faktörleri



Şekil 4.15 Sabit mesnet sınır koşuluna sahip kayma gerilmesi yükleme türü için radyus yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod kritik burkulma basınç değerleri



Şekil 4.16 Sabit mesnet sınır koşuluna sahip kayma gerilmesi yükleme türü için radyus yarıçapı ve delik çapı parametrelerinin en/boy oranına göre 1. mod burkulma özdeğer faktörleri

Çizelge 4.3 Üç boyutlu sonlu elemanlar modellerinde kullanılan geometrilerin kütle değerleri

d (mm)	R (mm)	a/b=1 için kütle (gr)	a/b=1.5 için kütle (gr)	a/b=2 için kütle (gr)	a/b=3 için kütle (gr)	a/b=4 için kütle (gr)	a/b=5 için kütle (gr)	a/b=6 için kütle (gr)
12	10	140.368	194.704	249.04	356.58	466.95	574.49	684.86
12	20	153.669	208.005	262.341	370.73	478.27	588.64	696.18
12	30	175.46	229.796	283	393.37	500.91	611.28	718.82
12	40	206.024	260.36	314.13	424.5	532.04	639.58	749.95
12	50	245.361	299.98	353.75	464.12	571.66	679.2	789.57
24	10	138.67	193.006	247.342	356.58	464.12	574.49	682.03
24	20	151.688	206.024	260.36	367.9	478.27	585.81	696.18
24	30	173.479	227.815	282.151	390.54	500.91	608.45	715.99
24	40	204.043	258.379	314.13	421.67	529.21	639.58	747.12
24	50	243.38	297.15	350.92	461.29	568.83	679.2	786.74
36	10	135.274	189.61	243.946	353.75	461.29	582.98	679.2
36	20	148.575	202.911	257.247	365.07	475.44	568.83	690.52
36	30	170.366	224.702	279.038	387.71	495.25	582.98	713.16
36	40	200.93	255.266	308.47	418.84	526.38	605.62	744.29
36	50	240.267	294.32	348.09	458.46	566	636.75	783.91
48	10	130.746	185.082	239.418	348.09	455.63	676.37	673.54
48	20	144.047	198.383	252.719	362.24	469.78	566	687.69
48	30	165.838	220.174	274.51	382.05	492.42	577.32	710.33
48	40	196.402	250.738	305.64	413.18	523.55	599.96	738.63
48	50	235.739	291.49	345.26	452.8	563.17	631.09	778.25
60	10	125.086	179.422	233.758	342.43	449.97	670.71	667.88
60	20	138.104	192.44	246.776	356.58	464.12	560.34	682.03
60	30	160.178	214.514	268.85	376.39	486.76	571.66	704.67
60	40	190.742	245.078	299.98	407.52	517.89	594.3	732.97
60	50	230.079	283	339.6	447.14	554.68	625.43	772.59
72	10	118.011	172.347	226.683	336.77	444.31	665.05	662.22
72	20	131.312	185.648	239.984	348.09	458.46	551.85	673.54
72	30	153.103	207.439	261.775	370.73	478.27	566	696.18
72	40	183.667	238.003	291.49	401.86	509.4	588.64	727.31
72	50	223.004	277.34	331.11	441.48	549.02	616.94	766.93

4.3. Boyut Optimizasyonu Bulguları

Sabit mesnetli sınır koşulu için basma ve kayma gerilmesi yüklemesi için boyut optimizasyonları Altair Inspire programında gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon gerçekleştirilecek yapı için optimizasyon amacı olarak yapının kütlesinin minimize edilmesi, kısıtlar olarak burkulma özdeğer faktörünün 1'den büyük olması ve yapı üzerinde oluşan maksimum lineer statik Von-mises geriliminin 400 MPa altında olması istenmektedir. Bu amaç ve kısıtlar doğrultusunda 50 iterasyonlu boyut optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen optimizasyonlara yönelik girdiler Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'de yer almaktadır. Optimizasyon ile birlikte delik çapı ve köşe yarıçap değerleri istenilen yük koşulları için daha hafif tasarımlar elde edilmiştir. Lineer statik analizlerden elde edilen maksimum Von-Mises gerilmeleri yapının köşe sınır koşullarına yakın yerlerde bölgeler tekillik probleminden dolayı optimizasyona dahil edilmemiştir.

Çizelge 4.4 Boyut Optimizasyonu Sınır ve Yük Koşulları

	Yüklem Türü	Yük Büyüklüğü	a/b	Sınır Koşulu
Optimizasyon 1	Kayma Gerilmesi	220 MPa	2	Sabit
Optimizasyon 2	Bası Gerilmesi	54600 N		

Çizelge 4.5 Optimizasyon Fonksiyonları ve Değişkenleri

Amaç Fonksiyonu	Kısıt Fonksiyonları	Değişkenler
Kütle Minimizasyonu	Maksimum Von Mises Gerilimi ≤ 400 MPa $1 \leq 1$. Mod Burkulma özdeğer faktörü	$12 \leq d$ (Delik Çapı) ≤ 72 $10 \leq R$ (radyus Yarıçapı) ≤ 50

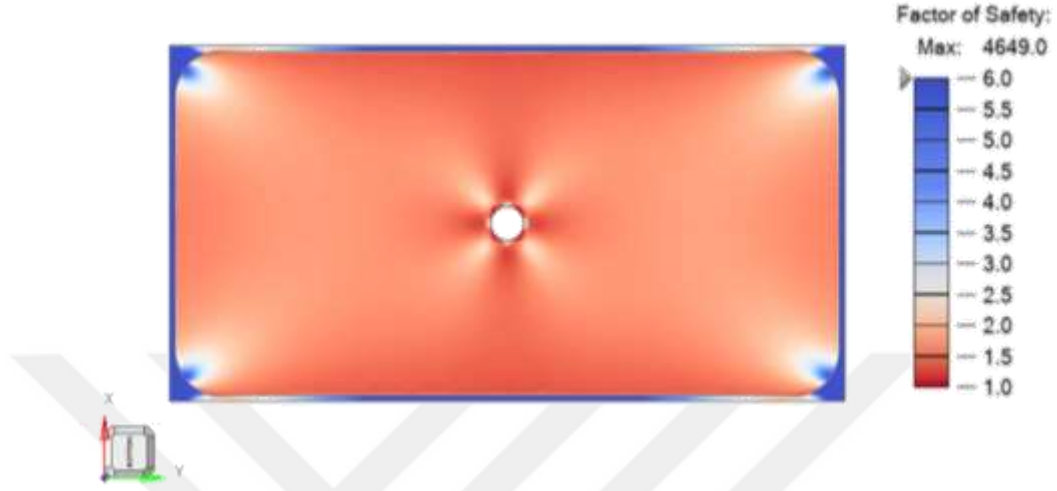
Optimizasyon sonucunda elde edilen çıktılar Çizelge 4.6'da yer almaktadır.

Çizelge 4.6 Boyut Optimizasyonu Çıktıları

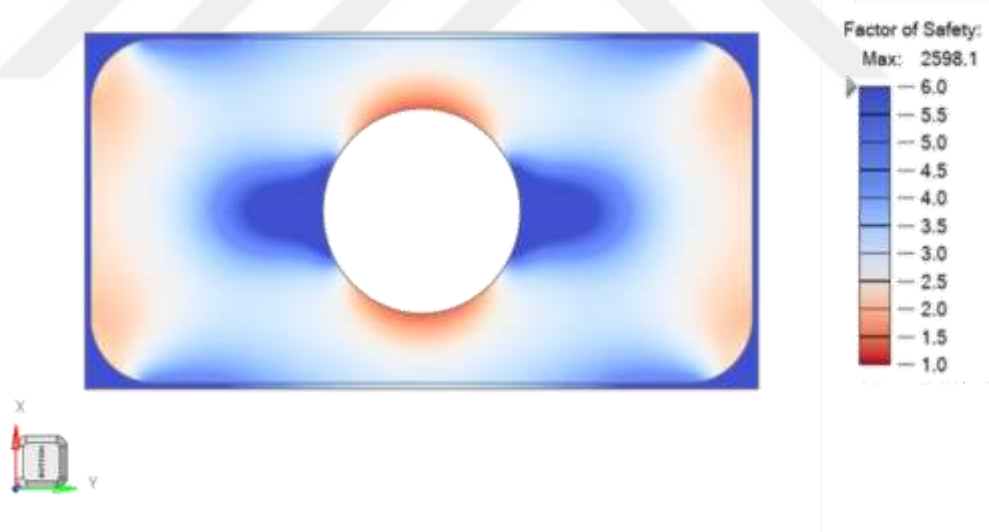
	d (mm)	R (mm)	Kütle (gr)	Burkulma Kısıtı	Stress Kısıtı (MPa)	İterasyon Adımı
Optimizasyon 1	12	15.515	255	1.133	399.8	49
Optimizasyon 2	71.556	23.093	245	1.011	257.1	27

Optimizasyon sonuçlarına göre basma ve kayma gerilmelerine maruz kalan ince kesitli plaka içeren yapısal parçanın lineer statik olarak kritik bölgeleri Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de yer almaktadır. Güvenlik faktörü katsayısı (Factor of Safety) 1'e eşit ve yakın

yerlerde uygulanan yük büyüklüğü arttırıldığında akma sınırının aşılması durumunda malzemenin kalıcı şekil değiştirebilmesinden kaynaklı hasar oluşumu gerçekleşmesi kaçınılmazdır.



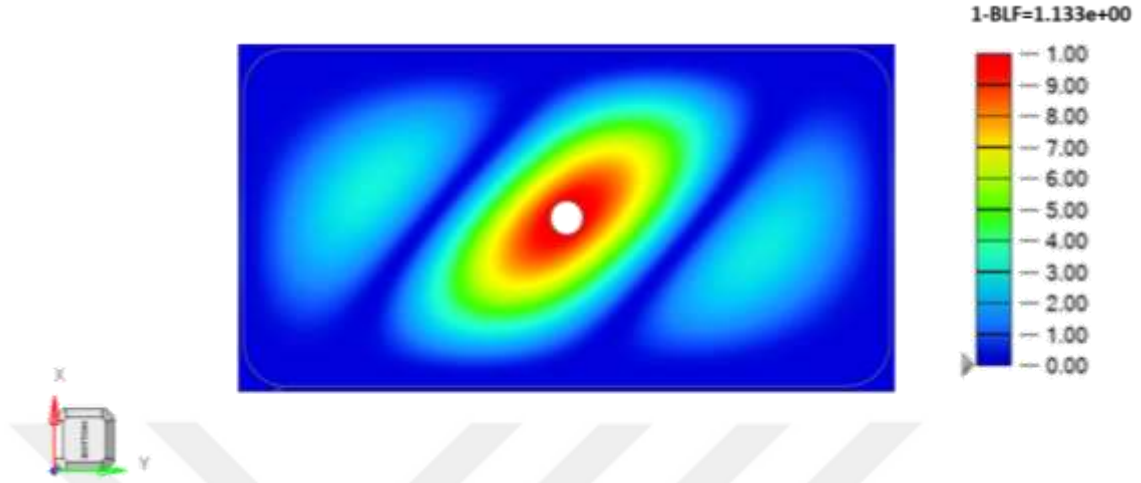
Şekil 4.17 Optimizasyon 1 Sonuçlarına göre yapının güvenlik katsayısı dağılımı



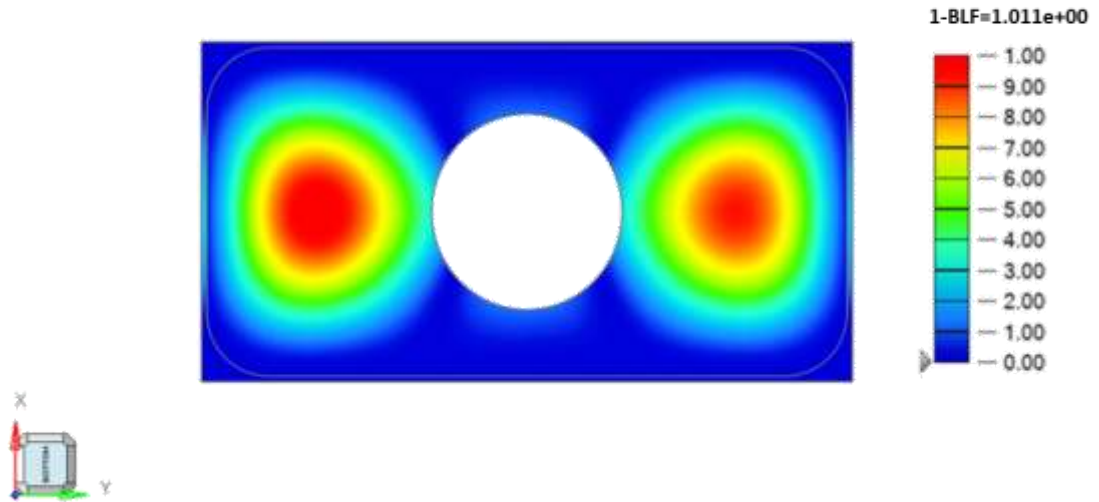
Şekil 4.18 Optimizasyon 2 Sonuçlarına göre yapının güvenlik katsayısı dağılımı

Optimizasyon sonuçlarına göre basma ve kayma gerilimlerine maruz kalan ince kesitli plaka içeren yapısal parçanın lineer burkulma analizi sonucunda kritik bölgeler Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de yer almaktadır. Burkulma yük faktörünün (Buckling Load Factor (BLF)) 1’e eşit ve yakın olan bölgelerde uygulanan yük büyüklüğü arttırıldığında burkulmadan

kaynaklanan hasar oluşumu gerçekleştirecektir. Kontur grafiklerinde bu bölgeler 0 ile 1 arasında olan bölgelerdir.



Şekil 4.19 Optimizasyon 1 sonuçlarına göre yapının kritik burkulma bölgeleri



Şekil 4.20 Optimizasyon 2 sonuçlarına göre yapının kritik burkulma bölgeleri

5. SONUÇ

İki boyutlu sonlu elemanlar modelleri ile gerçekleştirilen analiz çıktılarında basma yükleme durumlarından kare plakaların kritik burkulma kuvvet miktarında dört durum içinde sürekli bir azalış meydana gelmiştir. Sınır koşulları sabit ve basit mesnetli sınır koşulları olan bası gerilimi için ince dikdörtgen plakalarda, delik çapının artırılmasıyla burkulma için gerekli kritik burkulma kuvvetinde sürekli olarak bir artış veya azalış gözlemlenmemiştir. Delik çapının arttırılmasıyla bası yükleme durumu ve farklı sınır koşulu için a/b oranının 1.5 olması durumunda benzer ancak sabit mesnetli plakaların burkulması için daha fazla kuvvet gerektirdiğini gözlemlenmiştir. a/b oranının 2 olması durumunda sabit mesnetli sınır koşuluna sahip plakalarda delik çapının d/b oranının 0.2'ye kadar azalmaktadır. 0.2'den büyük değerlerde ise kritik burkulma basma yüklemesinde artış gözlenmektedir. a/b oranın 3,4,5,6 olması durumunda ise a/b oranının 2 gibi benzer bir davranış ancak d/b oranının 0.2 ye kadar daha az azalış ve artış gözlenmektedir. Basit mesnetli plakalarda ise a/b oranının 2 olması durumu için delik çapının artmasıyla elastik bası kritik burkulma kuvvetinde artış elde edilmiştir. Basit mesnetli plakalar için a/b oranının 2'den büyük olduğu durumlar için d/b oranı 0.3'e eşit olduğu durumda kritik bası burkulma kuvveti en düşük olduğu parameter değerleridir. Delik çapının arttırılması ile kritik burkulma kuvvetinde bir miktar artış gözlenmektedir. Sabit mesnetli kayma yüklemesi durumu için ince plakalarda kritik burkulma kuvveti her durum için belirgin bir şekilde azalmaktadır.

Üç boyutlu sonlu elemanlar modelleri ile gerçekleştirilen analiz çıktılarında her iki sınır koşuluna sahip plakalar için kayma gerilmesi yüklemesi için radyus yarıçapının arttırılması ile yapının burkulma dayanımı için en/boy oranının 3 ve üzeri olduğu durumlarda belirgin bir artış gözlenmediği elde edilmiştir. Kayma gerilmesine maruz kalan yapılarda delik çapının köşe radyus yarıçapına göre daha önemli ölçüde etkilediği ve delik çapının arttırılması ile yapının burkulma dayanımında azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Kayma gerilimine maruz kalan plakalarda üretimden dolayı eşit köşe radyus değerlerinde daha küçük çaplı delik kullanımı seçilmelidir. Bası gerilimine maruz kalan plakalarda ise delik çapının arttırılmasıyla delik çevrelerinde yer alan bölgeler kolon burkulması benzer şekilde burkulma davranışı sergilediğinden dolayı delik çapı ve radyus yarıçapı arttırılması ile birlikte burkulma dayanımları artmaktadır. Yapının kritik

burkulma kuvveti iyileşmesine karşın yapının statik dayanımı kontrolünün sağlanması gerekmektedir. Basma gerilimi yüklemesi için delik çapının arttırılması ile yapının lineer statik gerilimi artmaktadır. Çalışmada gerçekleştirilen boyut optimizasyonları ile yapının statik ve burkulma kritik bölgelerinin farklı olabileceği, bu nedenle her iki durum için de inceleme gerçekleşmesi gerektiği gözlenmektedir.

Analiz sonuçlarında burkulma kuvvetinin üzerinde yüklemeler gerçekleştirildiğinde burkulmadan kaynaklı 1. burkulma modu için oluşacak olası hasar bölgeleri basma yüklemelerinde delik çevresinde yapının boyuna olacak şekilde gerçekleşmektedir. Kayma yüklemelerinde ise plaka üzerinde yükleme yönüne bağlı olarak diagonal bir şekilde oluşacaktır. Ancak yapıda hasar sadece burkulmadan kaynaklı olmayabilmektedir. Yükleme ile birlikte yapı üzerinde meydana gelen gerilimin akma dayanımından fazla olması durumunda yapıda kalıcı şekil değiştirme meydana gelerek hasar oluşabilmektedir. Bu yüzden hasar kontrolü akma dayanımı açısından da incelenmesi gerekmektedir.

Çalışma ile birlikte en/boy oranları, delik çapı değişiminin ve radyus yarıçapı değişiminin kritik burkulma kuvvetine etkisi öngörülebilmektedir. Çalışma kapsamında teorik olarak kritik burkulma yükünün hesaplanmasında gerekli olan burkulma katsayıları elde edilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen her sınır koşulu şartı için kare plakalarda kritik burkulma yük değeri delik çapının artmasıyla azaldığından olabildiğince düşük delik çapları tercih edilmelidir. Dikdörtgen plakalarda ise kare plakalarda olduğu gibi kayma yüklemesi sınır koşulunda sabit mesnetli sınır koşulu için olabildiğince düşük delik çapları tercih edilmelidir. En/boy oranının 1'den farklı olduğu durumlarda kritik burkulma yükü değiştiğinden yapı üzerinde oluşan gerilim ile akma dayanımını göz önünde tutularak delik çapı seçilmelidir.

6. KAYNAKLAR

- Altair Engineering, Inc.* . (2023, 11 14). Modified Extensible Lattice Sequence (MELS): https://2021.help.altair.com/2021/hwdesktop/hst/topics/design_exploration/method_modified_extensible_lattice_sequence_doe_r.htm adresinden alındı
- Altair Engineering, Inc.* (2023, 11 15). DOE Methods: https://2021.help.altair.com/2021/hwdesktop/hst/topics/design_exploration/methods_doe_r-1.htm adresinden alındı
- Altair Engineering, Inc.* (2023, 11 15). Latin HyperCube: https://2021.help.altair.com/2021/hwdesktop/hst/topics/design_exploration/method_latin_hypercube_doe_r.htm adresinden alındı
- Altair HyperWorks 2021.* (2024, 01 10). <https://2021.help.altair.com/2021/hwdesktop/hwd/index.htm> adresinden alındı
- Andersson, V. (2019). Engineering design of a radar structure using Design of Experiments and Structural Optimization.
- Antony, J. (2023). *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. Elsevier.
- Barkanov, E. (2001). *Introduction to the finite element method*. Riga: Institute of Materials and Structures Faculty of Civil Engineering.
- Baumgardt, G. R., Fragassa, C., Rocha, L. A., dos Santos, E. D., da Silveira, T., & Isoldi, L. A. (2023). Computational Model Verification and Validation of Elastoplastic Buckling Due to Combined Loads of Thin Plates. *Metals* 13(4).
- Bendsoe, M. P., & Kikuchi, N. (1988). Generating Optimal Topologies In Structural Design Using a Homogenization Methods. *Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering* 71, 197-224.
- Box, G. E., Hunter, J. S., & Hunter, W. G. (2005). *Statistics for Experimenters*. Hoboken: Wiley series in probability and statistics.
- Bruhn, E. F., S., B., S., M., & E., C. (1973). *Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*.
- Cavazzuti, M. (2013). Design of experiments. M. Cavazzuti içinde, *Optimization methods: from theory to design scientific and technological aspects in mechanics* (s. 13-42). Springer.
- Chintapalli, S., Elsayed, M. S., Sedaghati , R., & Abdo, M. (2010). The development of a preliminary structural design optimization method of an aircraft wing-box skin-stringer panels. *Aerospace Science and Technology* 14, s. 188-198.
- Christensen, P. W., & Klarbring, A. (2008). *An Introduction to Structural Optimization*. Springer Science & Business Media, Vol:153.
- Clough, R. W., & Wilson, E. L. (1979). Dynamic analysis of large structural systems with local nonlinearities. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 17, 107-129.
- Durakovic, B. (2017). Design of experiments application, concepts, examples: State of the art. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, s. 421–439.
- El-Sawy, K. M., & Nazmy, A. S. (2001). Effect of aspect ratio on the elastic buckling of uniaxially loaded plates with eccentric holes. *Thin-Walled Structures* 39, 983-998.
- El-Sawy, K. M., & Nazmy, A. S. (2001). Effect of aspect ratio on the elastic buckling of uniaxially loaded plates with eccentric holes. *Thin-Walled Structures* 39, 983-998.
- Euler, L. (1947). On the strength of columns. *American journal of physics* 15.4, 315-318.

- Friedrichs, K. O. (1941). On the minimum buckling load for spherical shells. *Theodore von Karman anniversary volume. Pasadena, Calif.: California Institute of Technology.*
- Ghorbanhosseini, S., Yaghoubi, S., & Bahrambeigi, M. R. (2021). A Comprehensive Study on the Effects of the Boundary Conditions on the Elastic Buckling Capacity of a Perforated Plate. *ADMT Journal 14(3)*, 45-53.
- Guide, H. (2011). *HyperWorks 11.0*. Altair, US.
- Huet, J. (1999). *Static Stress Manual*. Metallic Materials.
- Jayabalan, J., Dominic, M., Ebid, A. M., & Soleymani, A. (2022). Estimating the buckling load of steel plates with center cut-outs by ANN, GEP and EPR techniques. *Designs 6(5)*, 84.
- Jones, R. M. (2006). *Buckling Of Bars, Plates, And Shells*. Blacksburg, Virginia United States of America: Bull Ridge Publishing.
- Kim, J. H., Park, D. H., Kim, S. K., Kim, J. D., & Lee, J. M. (2021). Lateral Deflection Behavior of Perforated Steel Plates: Experimental and Numerical Approaches. *Journal of Marine Science and Engineering, 9(5)*.
- Ko, W. L. (1998). Mechanical- and Thermal-Buckling Behavior of Rectangular Plates With Different Central Cutouts. NASA.
- Ko, W. L. (1998). Mechanical- and Thermal-Buckling Behavior of Rectangular Plates With Different Central Cutouts. *Dryden Flight Research Center, National Aeronautics and Space Administration*,.
- Krog, L., Tucker, A., & Rollema, G. (2002). Application of topology, sizing and shape optimization methods to optimal design of aircraft components. *Proc. 3rd Altair UK HyperWorks users conference*.
- Liu, W., Geni, M., & Yu, L. (2011). Effect of Mesh Size of Finite Element Analysis in Modal Analysis for Periodic Symmetric Struts Support. *Key Engineering Materials 462*, 1008-1012.
- Mauro, D. R., Isoldi, L. A., Damas, A. P., & Helbig, D. (2013). Elastic and elasto-plastic buckling analysis of perforated steel plates. *VETOR-Revista de Ciências Exatas e Engenharias 23.2*, 61-70.
- Mohammadzadeh, B., & Noh, H. C. (2016). Investigation into the buckling coefficients of plates with holes considering variation of hole size and plate thickness. *Mechanics 22.3*, 167-175.
- More, S. T., & Bindu, D. S. (2015). Effect of Mesh Size on Finite Element Analysis of Plate Structure. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) 4(3)*, (s. 181-185).
- Muameleci, M. (2014). Linear and nonlinear buckling analyses of plates using the finite element method. Linköping, Sweden: Master thesis in Solid Mechanics performed at Linköping University.
- Musmar, M. A. (2022). Structural performance of steel plates. *Frontiers in Built Environment 8*.
- Narayanan, R., & Chow, F. Y. (1984). Ultimate Capacity of Uniaxially Compressed Perforated. *Thin-Walled Structures 2*, 241-264.
- NIU, M. C. (1999). *Airframe Stress Analysis And Sizing*.
- Ollar, J. (2017). *A multidisciplinary design optimisation framework for structural problems with disparate variable dependence*. Doctoral dissertation, Queen Mary University of London.

- Orun, A. E., & Guler, M. A. (2017). Effect of hole reinforcement on the buckling behaviour of thin-walled beams subjected to combined loading. *Thin-Walled Structures* 18, 12-22.
- Rao, S. S. (2017). *The finite element method in engineering*. Butterworth-heinemann.
- Rice, R. C., Jackson, J. L., Bakuckas, J., & Thompson, S. (2003). *Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS)*. USA: FAA.: FAA/ARMMPDS-01. Technical report.
- Sabat, L., & Kundu, C. K. (tarih yok). History of finite element method: a review. B. B. Das, S. Barbhuiya, R. Gupta, & P. Saha içinde, *Recent Developments in Sustainable Infrastructure: Select Proceedings of ICRDSI 2019* (s. 395-404). Springer.
- Saraçoğlu, M. H., Uslu, F., & Albayrak, U. (2021). Investigation of hole shape effect on static analysis of perforated plates with staggered holes. *International Journal of Engineering and Innovative Research* 3.2, 133-144.
- Sayed, A. M. (2019). Numerical analysis of the perforated steel sheets under uni-axial tensile force. *Metals* 9.6, 632.
- Scheperboer, I. C., Efthymiou, E., & Maljaars, J. (2016). Local buckling of aluminium and steel plates with multiple holes. *Thin-Walled Structures* 99, 132-141.
- Shanmugam, N. E., Thevendran, V., & Tan, Y. H. (1999). Design formula for axially compressed perforated plates. *Thin-Walled Structures* 34, 1-20.
- Silva, C. C., Helbig, D., Cunha, M. L., dos Santos, E. D., Rocha, L. A., Real, M. d., & Isoldi, L. A. (2019). Numerical buckling analysis of thin steel plates with centered hexagonal perforation through constructal design method. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (41), 1-18.
- Thammakornbunjut, E.-u., Meelapchotipong, P., Pakpia, J., Tammappattaragul, S., & Limpitpanich, P. (2022). Buckling of Square Plates with Different Central Cutouts. *Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)* 10(2), 13-20.
- Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (1961). *Theory of elastic stability*. New York: ,2rd ed, McGraw-Hill.
- Uslu, F., Saraçoğlu, M. H., & Albayrak, U. (2022). Buckling of Square and Circular Perforated Square Plates Under Uniaxial Loading. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology* 4(2), 61-75.
- Wang, C., Zhao, Z., Zhou, M., Sigmund, O., & Zhang, X. S. (2021). A comprehensive review of educational articles on structural and multidisciplinary optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 1-54.
- Wang, W., Ning, H., Wei, H., Mei, Q., & Xu, L. (2023). Influence of flanged-cutout on the buckling behaviors of square plate under uniaxial compression. *AIP Advances*, 13(2).
- Wang, Y., Wang, Z., Xia, Z., & Poh, L. H. (2018). Structural Design Optimization Using Isogeometric Analysis: A Comprehensive Review. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences* 117(3), s. 455-507.
- Wensheng, W., Huijun, N., & Xin, S. (2023). Ultimate strength of hyper-ellipse flangedperforated plates under uniaxial compression loading. *Applied Rheology*, 33(1).
- 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.

Zhu, J.-H., Zhang, W.-H., & Xia, L. (2016). Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures. *Archives of computational methods in engineering* 23, 595-622.

