

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UÇAK GÖVDESİ KİRİŞ YAPILARINDA KULLANILAN HAFİFLETME
DELİKLERİNİN ŞEKİL ENİYİLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yiğit Anıl YÜCESAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erdem ACAR

TEMMUZ 2018

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

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

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151511048 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Yiğit Anıl YÜCESAN** 'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**UÇAK GÖVDESİ KİRİŞ YAPILARINDA KULLANILAN HAFİFLETME DELİKLERİNİN ŞEKİL ENİYİLEMESİ**” başlıklı tezi **06.07.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Erdem ACAR**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mehmet Ali GÜLER (Başkan)**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. Melin ŞAHİN
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

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

Yiğit Anıl YÜCESAN

ÖZET

Yüksek Lisans

UÇAK GÖVDESİ KİRİŞ YAPILARINDA KULLANILAN HAFİFLETME

DELİKLERİNİN ŞEKİL ENİYİLEMESİ

Yiğit Anıl YÜCESAN

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

Danışman: Prof. Dr. Erdem ACAR

Tarih: Temmuz 2018

Havacılık endüstrisi için havacılık yapılarında ağırlık azaltımı her zaman çok büyük önem taşımıştır. Ana taşıyıcı havacılık yapılarında (kanat kiriş, gövde çerçeve, gövde kiriş vb.) kenarı güçlendirilmiş hafifletme deliklerinin kullanımı ağırlık azaltımı için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu tezde, yapısal mukavemeti ve burkulma stabilitesi ihlal edilmeden, T-625 Özgün Helikopter'in üst gövdesinde yanal olarak konumlanmış metalik gövde kirişinde bulunan hafifletme deliklerinin şekli eniyilenmiştir. İstenilen yanıtlar hesapsal maliyeti yüksek olan sonlu elemanlar analizleriyle elde edildiği için vekil model tabanlı eniyileme yaklaşımı kullanılmıştır. Vekil modeller maksimum von Mises gerilme değeri, minimum burkulma özdeğeri ve yapısal ağırlık için oluşturulmuştur. Çoklu başlangıç noktası yaklaşımı ile birlikte MATLAB'ın kısıtlı doğrusal olmayan çok değişkenli eniyileme fonksiyonu kullanılmıştır. Kiriş üzerindeki deliklerin özdeş olduğu durum ile kiriş merkezinden geçen eksene göre simetrik oldukları durum ayrı ayrı incelenmiştir. Sonuç olarak sözkonusu yapının ağırlığı yapısal dayanım ve stabiliteden feragat etmeden ilk tasarıma göre özdeş delikli eşit aralıklı durumda %8.69, özdeş olmayan delikli farklı aralıklı durumda ise %10.5 kadar azaltılmıştır. Özdeş delikli eşit aralıklı problemin

özümü olarak elde edilen eniyilenmiş tasarımda deliklerin dairesellikten çok fazla uzaklaşmadığı, dikey ekseninde daralırken yatay ekseninde genişledikleri görülmüştür. Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problem için ise elde edilen eniyilenmiş tasarımda merkezden uca ilerledikçe delik şekillerinde daireselleşme görülmektedir, bunun sebebi uç deliklerde gözlemlenen gerilme yığılmasının azaltılmasıdır. Son olarak ağırlık azaltımını destekleyecek şekilde merkez delik hariç diğer deliklerde yatay yarıçapın üst sınıra dayandığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapısal şekil eniyilemesi, Vekil model (metamodel), Havacılık yapıları, Hafifletme delikleri.



ABSTRACT

Master of Science

SHAPE OPTIMIZATION OF LIGHTENING HOLES USED IN AIRCRAFT

FUSELAGE BEAMS

Yiğit Anıl YÜCESAN

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

Supervisor: Prof. Dr. Erdem ACAR

Date: July 2018

Weight saving from aircraft structures has always been important in aircraft industry. Introducing flanged lightening holes to the primary aircraft structures (e.g., wing ribs, fuselage frame webs, and fuselage longerons) is a widely used approach to achieve weight savings. In this thesis, the lightening hole shapes in a metallic fuselage beam located laterally on the upper deck of Turkish Light Utility Helicopter (TLUH) is optimized for minimum structural weight, such that the structural strength and stability are maintained at certain levels. Since structural responses are computed through computationally expensive finite element analyses, surrogate based optimization approach is followed. Surrogate models are constructed for the maximum von Mises stress, the minimum buckling eigenvalue and the structural weight. Constrained nonlinear multivariable optimizer of MATLAB is used along with a multiple starting point approach for optimization. Optimization of the lightening holes on the beam is handled in two different cases: identical holes equal distance and non-identical holes non-equal distance assumptions. It is found that the structural weight of the fuselage beam can be reduced by 8.69% in identical hole equal distance assumption and 10.5% in non-identical hole non-equal distance

assumption compared to the initial design without sacrificing structural strength or stability. Optimum design of the identical hole equal distance problem shows that hole shapes are not significantly diverged from circular shapes. While it is observed that holes are enlarged horizontally, and shrunk vertically. When the design that is accepted as the optimum for the non-identical hole non-equal distance problem, it can be clearly deduced that hole shapes get more circular while moving from beam center to the tip in order to avoid stress concentration around the tip holes. Finally, to support the weight reduction, horizontal radii of the holes are increased and reached to the upper limit except for the central hole.

Keywords: Structural shape optimization, Surrogate model (metamodel), Aircraft structures, Lightning holes.

TEŐEKKÜR

Bu çalıőmayı mümkün kılan, tecrübe ve bilgi birikimi ile hem bu çalışma özelinde hem de ilerideki kariyerimde bana yön veren saygıdeğer tez danıőmanım; Prof. Dr. Erdem Acar'a, karőılıksız ve sonsuz destekleri ile her zaman yanımda olan kıymetli aileme, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen fotol yesi değerli yakın arkadaőlarıma ve lisans mezunu olduğum ODTÜ Havaçılık ve Uzay Mühendisliği'nden kader arkadaőlarıma ve sağladığı burs için TOBB Ekonomi ve Teknoloji niversitesi'ne çok teőekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tez İçeriği	2
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1 Hafifletme Delikleri	3
2.2 Vekil Model Tabanlı Eniyileme	7
2.3 Vekil Model Oluşturma.....	8
2.4 Latin Hiperküp Örnekleme ile Deney Tasarımı	9
2.5 Polinom Yanıt Yüzey Yöntemi	10
2.6 Radyal Tabanlı Fonksiyonlar	10
2.7 Kriging	11
2.8 Vekil Modellerin Doğrulanması	11
2.9 Normalleştirilmiş Karekök Ortalama Hata	12
2.10 Belirleme Katsayısı	12
2.11 Oluşturulan Vekil Modelle Eniyileme	13
2.12 İç Nokta Yöntemi	14
2.13 Vekil Model İyileştirme	15
3 PROBLEM TANIMI	17
3.1 Giriş.....	17
3.2 Eniyileme Problemi.....	20
3.3 Sonlu Elemanlar Modeli	23
4 ÖZDEŞ DELİKLİ EŞİT ARALIKLI PROBLEMİN VEKİL MODEL TABANLI ENİYİLEMESİ	33
5 ÖZDEŞ OLMAYAN DELİKLİ FARKLI ARALIKLI PROBLEMİN VEKİL MODEL TABANLI ENİYİLEMESİ	43
6 SONUÇ VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	57
EKLER	61
ÖZGEÇMİŞ	87

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Uçak yapısı üzerinde hafifletme deliği kullanımı (F-35).	1
Şekil 2.1: Eğrilik faktörü p 'nin farklı değerleri için delik şekli ($a = 30$, $b = 40$).....	5
Şekil 2.2: 10 örnekleme sayısı ve 2 tasarım değişkenli durum için latin hiperküp örnekleme.....	9
Şekil 2.3: Çoklu başlangıç noktalı gradyan-tabanlı eniyileme algoritmasının akış şeması.	14
Şekil 2.4: Vekil model ardışık iyileştirme algoritmasının akış şeması.	16
Şekil 3.1: T-625 Özgün Helikopter'in üst gövde konumu.	17
Şekil 3.2: Problemden söz konusu olan kirişin üst gövdedeki konumu (kırmızı).	18
Şekil 3.3: Kiriş ve üzerinde bulunan hafifletme deliklerinin başlangıç tasarımındaki boyutları (Kalınlık = 2 mm).	19
Şekil 3.4: Delik güçlendirme boyutları.	19
Şekil 3.5: Özdeş delikli eşit aralıklı durum için tasarım değişkenleri.....	20
Şekil 3.6: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı durum için tasarım değişkenleri.....	22
Şekil 3.7: Kiriş yapısının katı modeli.	23
Şekil 3.8: Yüklerin sonlu elemanlar modeline uygulanması.	25
Şekil 3.9: Kirişe sınır koşullarının uygulanması.	25
Şekil 3.10: Maksimum von Mises gerilmesinin eleman boyutuna göre değişimi.	27
Şekil 3.11: Minimum burkulma özdeğerinin eleman boyutuna göre değişimi.	27
Şekil 3.12: Çözüm ağı ve washer yöntemi.	29
Şekil 3.13: Doğrulamada analiz edilen parçanın boyutlandırması.....	30
Şekil 3.14: Tezde kullanılan ABAQUS yazılımının ANSYS yazılımı ve test sonucu ile doğrulanması.	30
Şekil 4.1: İyileştirme sürecinde vekil modellerdeki izafi hata değişimi.	38
Şekil 4.2: Sırasıyla (a) başlangıç ve (b) eniyilenmiş tasarım için von Mises gerilme dağılımı.	39
Şekil 4.3: Sırasıyla başlangıç ve eniyilenmiş tasarım için burkulma özvektör dağılımı.	40
Şekil 4.4: Ağırlık azaltımının hata eşik değerine bağlı değişimi.	42
Şekil 5.1: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problemin iyileştirme sürecinde vekil modellerin hata değişimleri.	47
Şekil 5.2: Sırasıyla (a) başlangıç tasarım, (b) eniyilenmiş özdeş delikli eşit aralıklı tasarım ve (c) eniyilenmiş özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarım için von Mises gerilme dağılımı.	49
Şekil 5.3: Sırasıyla (a) başlangıç tasarım, (b) eniyilenmiş özdeş delikli eşit aralıklı tasarım ve (c) eniyilenmiş özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarım için burkulma özvektör dağılımı.	50
Şekil 5.4: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problem için ağırlık azaltımının hata eşik değerine bağlı değişimi.	51

Şekil Ek.1: Başlangıç tasarımında bulunan (a) sol uç delik , (b) sol ara delik, (c) merkez delik, (d) sağ ara delik, (e) sağ uç delik için detaylı von Mises gerilme dağılımı.	84
Şekil Ek.2: Özdeş delikli eşit aralıklı tasarımda bulunan (a) sol uç delik , (b) sol ara delik, (c) merkez delik, (d) sağ ara delik, (e) sağ uç delik için detaylı von Mises gerilme dağılımı.	85
Şekil Ek.3: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarımda bulunan (a) sol uç delik , (b) sol ara delik, (c) merkez delik, (d) sağ ara delik, (e) sağ uç delik için detaylı von Mises gerilme dağılımı.	86



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Eniyileme algoritmalarının iki ana başlıkta karşılaştırması.....	13
Çizelge 3.1: Kiriş ve delik boyutları ve tanımları.....	18
Çizelge 3.2: Kılıflanmış alüminyum 2024 T3 mekanik özellikleri.....	24
Çizelge 3.3: Sonlu elemanlar modelinde uygulanan sınır koşulları.....	26
Çizelge 3.4: Farklı eleman boyutları için çözüm ağı özellikleri ve yanıtlar.....	28
Çizelge 3.5: Başlangıç tasarımının tasarım değişkenleri.....	28
Çizelge 3.6: Başlangıç tasarımının tasarım değişkenleri.....	31
Çizelge 3.7: Başlangıç tasarımı için elde edilen yanıt değerleri.....	31
Çizelge 4.1: Oluşturulan vekil modellerin hata metrikleri.....	34
Çizelge 4.2: Model ve sonlu elemanlar analizi çıktılarının kıyası.....	36
Çizelge 4.3: Maksimum von Mises gerilmesi yanıtı için iyileştirme boyunca izafi hata değişimi.....	37
Çizelge 4.4: Minimum burkulma özdeğeri yanıtı için iyileştirme boyunca izafi hata değişimi.....	37
Çizelge 4.5: Ağırlık yanıtı için iyileştirme boyunca izafi hata değişimi.....	37
Çizelge 4.6: Başlangıç tasarımı ve eniyilenmiş tasarımın kıyası.....	38
Çizelge 4.7: Başlangıç tasarımı ve eniyilenmiş tasarımın yanıtlarının kıyası.....	41
Çizelge 5.1: KR1 yöntemi ile oluşturulmuş vekil modellerin hata metrikleri.....	43
Çizelge 5.2: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problem için maksimum von Mises gerilmesi vekil modelinin iyileştirme boyunca izafi hata değişimi.....	44
Çizelge 5.3: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problem için minimum burkulma özdeğeri vekil modelinin iyileştirme boyunca izafi hata değişimi.....	45
Çizelge 5.4: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problem için ağırlık vekil modelinin iyileştirme boyunca izafi hata değişimi.....	46
Çizelge 5.5: Başlangıç tasarımı ve eniyilenmiş özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarımın kıyası.....	48
Çizelge 5.6: Başlangıç tasarımı, eniyilenmiş özdeş delikli eşit aralıklı tasarım ve eniyilenmiş özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarımın yanıtlarının kıyası.....	48
Çizelge Ek.1: Özdeş delikli eşit aralıklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 40 örneklem noktası ve yanıtları.....	61
Çizelge Ek.2: Özdeş delikli eşit aralıklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 30 test noktası ve yanıtları.....	63
Çizelge Ek.3: Özdeş olmayan delikli farklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 110 örneklem noktası ve yanıtları.....	64
Çizelge Ek.4: Özdeş olmayan delikli farklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 30 test noktası ve yanıtları.....	67

KISALTMALAR

PYY2	: Karesel Polinom Yanıt Yüzey Modeli
PYY3	: Kübik Polinom Yanıt Yüzey Modeli
İPE-RTF	: İnce-Plaka Eğrisi Radyal Tabanlı Fonksiyon Modeli
ÇK-RTF	: Çoklu-Karesel Radyal Tabanlı Fonksiyon Modeli
KR0	: Sabit Eğilim Fonksiyonlu Kriging Modeli
KR1	: Doğrusal Eğilim Fonksiyonlu Kriging Modeli
KR2	: Karesel Eğilim Fonksiyonlu Kriging Modeli



SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

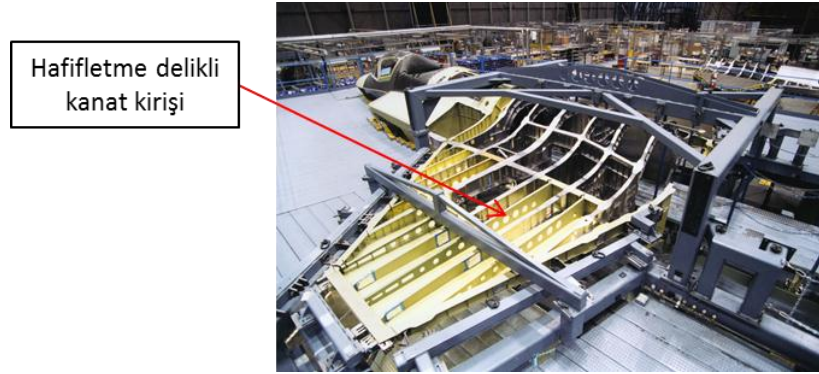
Simgeler	Açıklama
a	Delik yatay yarıçapı
b	Delik dikey yarıçapı
p	Delik eğrilik faktörü
s	İki delik merkezi arası mesafe
l	Kiriş uzunluğu
h	Kiriş yüksekliği
t	Kiriş kalınlığı
fh	Güçlendirme yüksekliği
fw	Güçlendirme genişliği
r	Delik büküm yarıçapı
x	Tasarım değişkenleri
$f(x)$	Amaç fonksiyonu
$h_j(x)$	Eşitlik kısıtları
$g_k(x)$	Eşitsizlik kısıtları
y_{se}	Sonlu elemanlar analizi yanıtı
y_{tahmin}	Vekil model yanıtı
R^2	Belirleme katsayısı
$RMSE_{norm}$	Normalleştirilmiş karekök ortalama hata
σ_{MaxVM}	Maksimum von Mises gerilmesi
σ_{ty}	Malzeme akma dayanımı
$\lambda_{Burkulma}$	Burkulma özdeğeri
E	Elastisite modülü
ρ	Özkütle
ν	Poisson oranı

1. GİRİŞ

Başlangıcından itibaren havacılık ve uzay endüstrisi daima yapısal bir parçanın getirdiği mekanik dayanım faydası ile bu parçanın getirdiği ağırlık külfeti arasında kalmıştır. Aradaki ince çizgide dengeyi kurmak hassas bir süreç olmakla birlikte aynı zamanda mühendisler için de bir meydan okuma olarak görülmektedir.

Yapısal ağırlığın azaltılması yakıt tüketimini direkt olarak etkilemesi sebebiyle uçuş performansını da aynı şekilde etkiler. Buradan yola çıkarak bütün havacılık tasarım şirketleri projelerinde yapının ağırlığını bir tasarım gereksinimi olarak projenin başlangıcında belirler.

Kompozit malzeme kullanımı havacılık endüstrisinde ağırlık azaltım yöntemleri içerisinde öncü olarak görülse de üretim ve işleme kolaylığı, maliyet etkin olması ve daha genel geçer ve kabul görmüş analiz yöntemlerinin mevcudiyeti sebebi ile metalik yapılar günümüzde de özellikle yük taşıma kapasitesi yüksek olması istenilen yapılarda sıklıkla kullanılmaya devam edilmektedir. Kullanım oranı sebebiyle metalik yapılar üzerinden yapılan ağırlık azaltımı çalışmaları çok büyük önem arzeder. Bu maksatla Şekil 1.1’de görüldüğü gibi kanat kiriş, gövde çerçeve ve gövde kiriş gibi ana taşıyıcı havacılık yapılarında kenarı güçlendirilmiş hafifletme delikleri uygulanmaya başlanmıştır. Beklenildiği üzere yapıda delik açma işlemi ağırlığı azaltıp dayanımın düşmesine yol açarken, delik kenarlarının bükülerek güçlendirilmesi kaybedilen dayanımı telafi eder.



Şekil 1.1: Uçak yapısında hafifletme deliği kullanımı (F-35).

1.1 Tez İçeriği

Bu tezde detaylı Şekilde anlatılan çalışmanın asıl amacı, hafifletme deliklerine sahip gövde kiriş yapısının maruz kaldığı yükler altında vekil modeller (metamodeller) ve hibrit yöntemler yardımıyla delik Şeklinin eniyilenmesidir. Bu doğrultuda izlenen yolun taslağı Şu Őekildedir: İlk olarak ele alınan kiriş yapısının özellikleri, maruz kaldığı kritik yükler ve sınır koşulları belirlenmiş, sonlu elemanlar modellemesinde kullanılacak eleman boyutu için yakınsama çalışması yapılmış ve çözülecek eniyileme probleminin tasarım değişkenleri, göz önünde bulundurulan kısıtlar ve amaç fonksiyonu tanımlanmıştır.

Eniyileme probleminin zmne geçmeden önce kısıt ve amaç fonksiyonları için vekil model çalışması yapılmıştır. Bu çalışmanın gerçekleŐtirilmesinin sebebi eniyileme aşamasında ortaya çıkabilecek çok sayıda sonlu elemanlar analizinin doğuracağı hesaplama maliyeti olarak açıklanabilir. Yapılan çalışmada polinom yanıt yüzey, radyal tabanlı fonksiyonlar, Kriging gibi vekil model oluşturma yöntemleri kullanılarak elde edilen modeller değerlendirilmiştir ve eniyileme çalışmasında kullanılacak vekil model yöntemi seçilmiştir.

Seçilen yöntem ile oluşturulan vekil modeller probleme en uygun olarak tercih edilen eniyileme algoritmasına gömülerek iki durum için sonuçlar elde edilmiştir. İlk durumda kiriş üzerindeki bütün delikler özdeş olarak ele alınırken ikinci durumda merkez delik, ara delikler ve uç delikler ayrı ayrı parametrize edilerek eniyileme sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçları iyileŐtirmek amaçlı ek olarak her iki durumda da ardışık vekil model iyileştirme çalışması da gerçekleştirilmiştir.

İkinci bölümde literatürde bulunan benzer çalışmalardan bahsedilmiŐtir. nc bölümde söz konusu problem tanımlanmıştır. Dördüncü bölümde problemin özdeş delikli eşit aralıklı hali için vekil model tabanlı eniyileme yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur. BeŐinci bölümde bir öncekine benzer Şekilde ancak bu sefer özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problem için sonuçlar elde edilmiş, ortaya çıkan sonuçların sunumu, yorumlanması ve yapılan çıkarımlar anlatılmıŐtır. Son bölümde ise sonuçlar hakkında yapılan genel yorumlar ve bu tez üzerine gelecekte yapılabilecek çalıŐmalar hakkında görüŐler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Hafifletme Delikleri

Erişebilirlik, kablaj rotalaması, bakım ve onarım gibi maksatlarla da kullanılan hafifletme deliklerinin önemi literatür incelendiğinde daha iyi anlaşılmaktadır. Güçlendirmeli hafifletme deliklerinin yapının kayma dayanımına olan etkisini inceleyen ilk çalışmalardan biri Kuhn (1942) tarafından yayımlanmıştır. Bu çalışma çeşitli kiriş ve delik geometrilerindeki numunelerle yapılan bir dizi testten yola çıkarak kirişin kayma yükü altında kritik burkulma gerilmesini kiriş ve delik geometrisine bağlayan deneysel bir formül ortaya koymuştur. Bu formül sonsuz uzunluktaki ve sonsuz delikli kiriş varsayımı yapmakla beraber delik kenarı 45° büküm olan delikleri ele almıştır. Bu formülün kullanımı testlerde kullanılan numunelerden dolayı boyutsal kısıtlara maruz kalmaktadır.

Durelli ve Rajaiiah (1979) çalışmalarında tek eksenli yükleme altındaki plakalarda bulunan hafifletme deliklerinin şekil eniyilemesini ele almışlardır. Çeşitli çap plaka genişliği oranları için gerçekleştirilen eniyileme çalışmasında, dairesel deliklerle karşılaştırıldığında, hem daha düşük gerilme konsantrasyon faktörleri hem de daha yüksek delik alanı elde edilmiştir. Böylece azımsanmayacak mukavemet ağırlık oranlarına ulaşılmıştır. Aynı zamanda elde edilen geometriler tasarımcıların kullanımını için eğriler halinde sunulmuştur.

Falzon vd. (1996) kompozit panellerde bulunan hafifletme deliklerine şekil eniyilemesi gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar kullandıkları evrimsel yapısal eniyileme yöntemi ile bastıç sonlu eleman modelinde delik çevresinde bulunan görece düşük gerilme seviyesindeki elemanları adım adım silerek şekil eniyilemesini gerçekleştirmişlerdir.

Yapısal eniyilemenin uygulama alanlarından ve umut vadeden geleceğinden bahsettiği makalesinde Bartholomew (1997) şekil eniyilemesine örnek olarak plakalardaki hafifletme deliklerinin şeklinin belirlenmesini anlatmıştır. Örnek

olarak belirtilen bir çalışmada delik çevresindeki sonlu eleman model noktalarının delik merkezinden radyal ekseninde uzaklaştırılarak yapılan tekrarlı analizler sonucunda yapıda %18 ağırlık azaltımı sağlandığını işaret etmiştir.

Heller vd. (1999) yaptıkları çalışmada gradyansız bir eniyileme metodu geliştirip bu metodu plakalarda bulunan delikler üzerinde kullanmışlardır. Yorulma analizi için kritik önem taşıyan gerilme konsantrasyon faktörü bu çalışmada amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Geliştirilen metotta delik çevresini tanımlayan noktalar hareket ettirilerek delik çevresindeki von-Mises gerilmesinin düzenli hale getirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca belirtmelidir ki geliştirilen eniyileme yöntemi çeşitli sonlu elemanlar yazılımları ile birlikte kullanılabilir şekilde oluşturulmuştur.

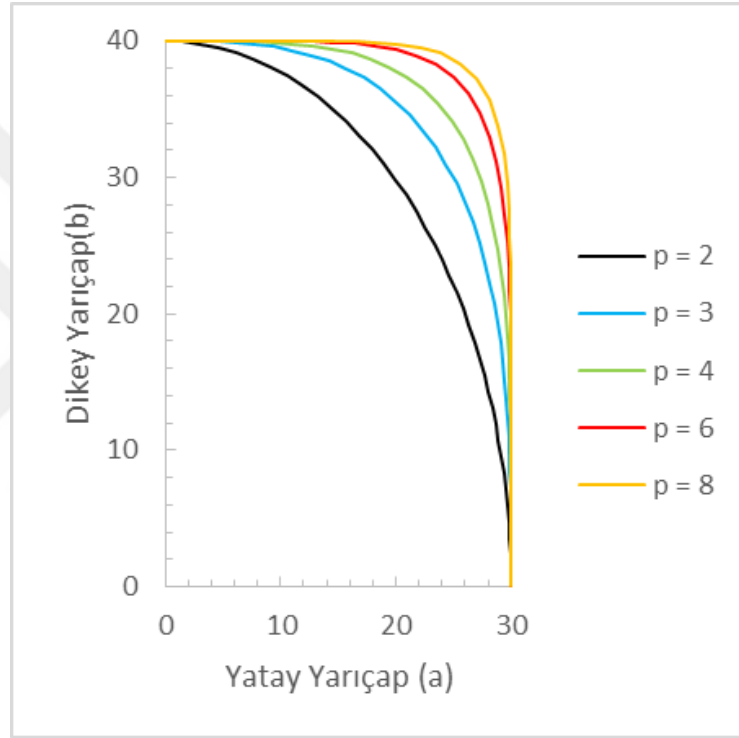
Young (2001) ise çalışmasında benimsediği sabit temel fonksiyonlu sonlu eleman şekil duyarlılık analizini bir kiriş üzerinde bulunan deliklerin eniyilenmesi için kullanmıştır. İki bölümden oluşan bu çalışmanın ilk bölümünde kiriş üzerindeki tek merkezi delik elips olarak formülize edilerek noktasal yükün uygulama noktasındaki deformasyonun en aza indirilmesi hedeflenmiştir. İkinci bölümde ise delik sayısı üçe çıkarılarak daha fazla tasarım değişkeni ile yapının ağırlığı amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak deformasyon %7 azaltılırken yapının ağırlığı ise %37.37 oranında azaltılmıştır.

Yalnızca havacılık ve uzay endüstrisi değil, gemi inşaat endüstrisi de hafifletme deliklerinin şekil eniyilemesi konusunu çalışmaya değer görmektedir. Algarra ve Perez (2009) nehir gemilerinin hafifletme deliği bulunan ana taşıyıcılarında ağırlık azaltımı amaçlamışlardır. Yazarlar topoloji eniyilemesini takiben şekil eniyilemesi uygulayarak mevcut yapıda %4.21 ağırlık azaltımı gerçekleştirmişlerdir.

Das ve Jones (2009) çalışmalarında üç boyutlu bir blok yapının ortasında yer alan deliğin şeklini kalıntı mukavemeti amaç fonksiyonu olarak belirleyerek eniyilemeyi amaçlamışlardır. Fakat bu uygulamadan önce delik yüzeyindeki gerilme ele alınmıştır. Herhangi bir yapısal elemanda bulunan keskin köşeli yapılar istenmeyen gerilme konsantrasyonlarına yol açacağı için delik şeklini temsil etmesi için Denklem (2.1)'de verilen eliptik formül esas alınmıştır. Bu denklemde a deliğin yatay yarıçapı, b deliğin dikey yarıçapı, Şekil 2.1'de etkisi görülen p ise eğrilik faktörüdür.

$$\left(\frac{x}{a}\right)^p + \left(\frac{y}{b}\right)^p - 1 = 0 \quad (2.1)$$

Tsavidaridis ve D'Mello (2011) çalışmalarında çelik kirişler üzerinde birbirlerine yakın olarak konumlandırılmış iki deliklerin davranışı üzerine deneysel ve analitik bir yaklaşım izlemişlerdir. Yürütülen deney kampanyası doğrultusunda çeşitli şekillerdeki deliklere sahip kirişlerin plastik davranışları hakkında önemli çıkarımlar yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre yüksek deformasyon değerleri yüksek kayma yüklerinde gözlemlenmektedir. Yapının burkulma sonrası davranışı ise deformasyonun ilk gözlemlendiği anın hemen ardından meydana gelmektedir.



Şekil 2.1: Eğrilik faktörü p 'nin farklı değerleri için delik şekli ($a = 30$, $b = 40$).

Abidin ve Izzuddin (2013) çeşitli boyut ve şekillerde delikler içeren kirişlerin yerel burkulma davranışı üzerine çalışmışlardır. Çözüm ağına gerek kalmadan sonuç elde edebildikleri yöntemde düzensiz delik şekillerini kolayca analiz ederek isabetli ve de verimli burkulma sonuçları elde etmişlerdir. Yöntemin karışık geometrideki delikler, kavisli kirişler ya da düzensiz yükseklikteki kirişler için uygulanabilirliği ön plana çıkmaktadır.

Kaveh ve Shokohi (2015) yayımladıkları çalışmada meta-sezgisel yaklaşımlar kullanarak delikli kiriş yapılarında maliyet eniyilemesi gerçekleştirmişlerdir. Delik

geometrisi olarak dairesel ve altıgen şekillerini ele aldıkları bu çalışmada hem kullandıkları eniyileme algoritmalarını hem de sözkonusu şekilleri birbirleriyle karşılaştırmışlardır ve sonuç olarak altıgen şekilli kirişin Çarpışan Cisimler Eniyilemesi ve Parçacık Sürüsü Eniyilemesi algoritmalarının karışımı bir yaklaşımla eniyilenmesiyle elde edilen sonucun en düşük maliyeti getirdiğini belirtmişlerdir.

Havacılık yapılarındaki delikler üzerindeki bir başka çalışma da Anuja ve Katukam (2015) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada güçlendirmeli ve güçlendirme yapılmamış deliklere sahip kirişlerin kayma ve çekme yükleri altında karşılaştırması yapılmış olup delik güçlendirmesi hakkında dikkate değer sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlara göre ana taşıyıcı yapılarda delik etrafına yapılan güçlendirmeler yapıda gözlemlenen gerilme seviyesini oldukça düşürerek pozitif güvenlik marjı sağlamaktadır.

Katukam (2015) ise literatürden derlediği, dairesel, eliptik, üçgensel, elmas ve dikdörtgensel şekillerdeki deliklere sahip kiriş yapılarının analizleri hakkındaki çıkarımlarını paylaşmıştır. Delik kenarlarının sivrileştikçe gerilme konsantrasyonunun arttığını, elmas şeklindeki deliklerin dairesel deliklere görece gerilme konsantrasyonunu düşürdüğünü, kirişin merkezine konumlandırılan bir deliğin daha düşük gerilmelere sebep olduğunu ve gerilme konsantrasyon faktörünün fiber oryantasyonu ve yükleme açısından fazlasıyla etkilendiğini aktarmıştır.

Dairesel delikli kenarları basit mesnetleştirilmiş konik kirişlerin kayma yükü altında elastik burkulma dayanımını inceleyen Gendy (2016), delik çapının burkulma dayanımına etkisine dair çeşitli çıkarımlarda bulunmuştur. Ortalama kiriş yüksekliğinin %30'undan daha küçük çapta açılan deliklerin burkulma dayanımına herhangi bir etkisi olmadığını öne süren yazar, bu değerden yüksek çapa sahip deliklerin kritik burkulma yükünü düşürdüğünü belirtmiştir. Aynı zamanda koniklik oranı arttıkça aynı boyuttaki deliklere sahip kiriş için kritik burkulma yükünün arttığını gözlemlemiştir.

Daha güncel bir çalışmada Örün ve Güler (2017) benzer bir yapıyı minimum ağırlık elde etmek maksadı ile saf ve birleşik yükleme koşulları altında incelemiştir. Yazarlar temel olarak saf basma, kayma ve eğilme yükleri altında güçlendirilmiş delik ve kiriş boyutlarından oluşan tasarım değişkenleri ile kritik burkulma gerilme değerini ilişkilendiren grafikler elde etmişlerdir. İdeal tasarımı belirledikten sonra bu

yapı birleşik yükleme altında analiz edilmiş ve kritik burkulma gerilmesini hesaplamışlardır. Son olarak parametrik etkileşim eğrileri oluşturulmuş ve en iyi tasarımı bulmak için bir örnek çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada yazarlar eniyilemeyi oluşturdukları eğrilerden yola çıkarak yapmışlardır.

2.2 Vekil Model Tabanlı Eniyileme

Eniyilemenin amacı sözkonusu operasyon için belirli kısıtları ihlal etmeden elde edilebilecek en iyi sonucu elde etmek olarak tanımlanabilir (Haftka ve Gürdal, 2012). Eğer bir gitarın tellerini düşünecek olursak istediğimiz bir notayı çalabilmek için bütün tellerin akordunun ona göre ayarlanması gerekmektedir. Bir telin akordunu gerçekleştirirken eğer teli çok gersek kopabilir, dolayısı ile bu bir kısıttır. Bütün teller istenilen notayı verecek şekilde ayarlandığında elde edilen tel grubu olabilecek en iyisidir ve akort yapılarak eniyileme gerçekleştirilmiştir.

Mühendislik bakış açısından bakacak olursak eniyilemenin çok geniş ölçüde uygulamasını görebiliriz. Bir üretim bandında işleri sıralamadan araç rotalamaya, bir rüzgar çiftliğinde verimi arttırmak için türbin lokasyonları belirlemekten istenen basınç dağılımını elde etmek için uçak kanatlarının kanat profilini belirlemeye kadar sayısız alan ve konuda eniyileme uygulaması kullanılmaktadır (Nearchou, 2011, Desrochers ve Desrosiers, 1992, Kusiak ve Song, 2010, Lewis ve Huyse, 2001).

Herhangi bir eniyileme uygulamasına teşebbüs etmeden önce problemi etraflıca tanımlamak ve formülize etmek büyük önem arzeder (Antoniou ve Lu, 2007). Bir eniyileme probleminin genelgeçer formülü aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \text{Bul} \quad & \mathbf{x} \\ \text{Enküçükle} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{Öyle ki} \quad & h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j=1, \dots, n_h \\ & g_k(\mathbf{x}) \leq 0 \quad k=1, \dots, n_g \\ & \mathbf{x}^L \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^U \end{aligned} \quad (2.2)$$

Denklem (2.2) bir eniyileme probleminin geleneksel tanımıdır. Bu denklemde f amaç fonksiyonudur. Tanım gereği eniyileme probleminde amaç fonksiyonunu minimize etmek amaçlanır. Bu sebeple eğer amaç fonksiyonu maksimize edilmek isteniyorsa

formülasyonda negatif ile çarpılarak kullanılır. Problem tanımında geçen h fonksiyonu eşitlik kısıtlarını temsil ederken, g eşitsizlik kısıtlarının sembolüdür. Bir problemde gerektiği kadar eşitlik ve eşitsizlik kısıtı kullanılabilir. Belirlenmiş olan kısıtlar tatmin edilmediği sürece eniyileme uygulaması başarılı sayılmaz. Formüldeki x ise tasarım değişkenlerini içeren vektördür ve eniyileme problemi çözüldüğünde kısıtları sağlayan ve amaç fonksiyonunu minimize etmiş tasarım değişkenleri elde edilir. Tasarım değişkenlerinin sayısı problemi tanımlayan kişinin tasarrufundadır. Tasarım değişkenlerinin sayısının fazla olması problemi daha iyi tanımlayabilecek iken aynı zamanda problemin kompleksliğini de arttırabilir.

Eniyileme problemini tanımlarken kullanılan amaç ve kısıt fonksiyonları ile tasarım değişkenleri daima kolay ve hesaplı bir girdi çıktı ilişkisi içerisinde olmayabilir. Bu durumda eniyileme sürecinde yapılacak çok sayıda fonksiyon hesabını çok vakit alacak analiz veya simülasyon yazılımları aracılığı ile gerçekleştirmek kabul edilebilir bir yaklaşım olmayabilir. Bu gibi durumlarda vekil model kullanımı amaca uygun bir yaklaşım olacaktır. Vekil modeller girdi ve çıktı arasındaki ilişkiye dair elde bulunan sınırlı sayıda veri ile bu ilişkiye kolay hesaplanabilir bir ilişki biçmeyi ve bu ilişkinin içerdiği hatayı sunmayı amaçlar (Queipo vd., 2005). Bir vekil model verilen girdiye karşılık verdiği çıktının isabeti ölçüsünde değerlidir.

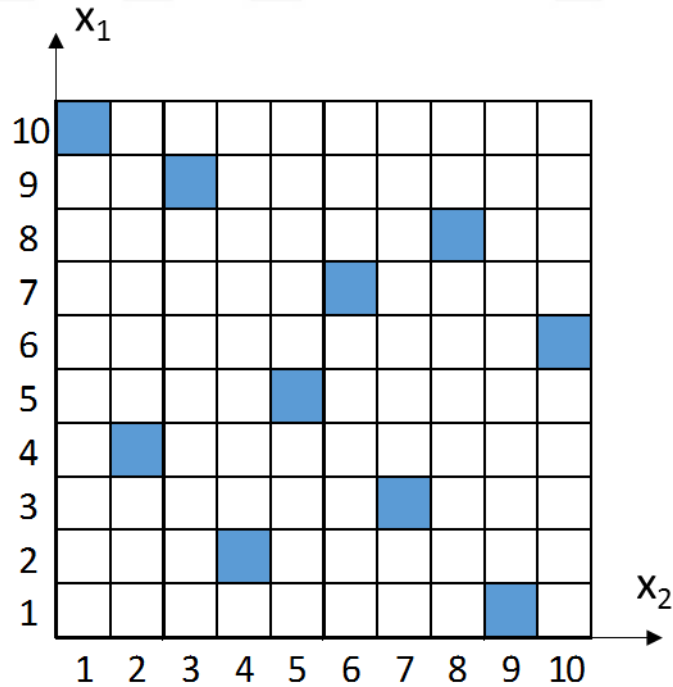
2.3 Vekil Model Oluşturma

Daha önceden tanımlandığı üzere vekil modeller belirli değişkenler ile bu değişkenlere bağlı yanıt değerleri arasındaki matematiksel bağıntıdır. Kurulan bu bağıntı neticesinde fonksiyon hesabı için harcanacak zamanın azaltılması hedeflenir. Vekil model oluşturulurken ilk olarak tasarım uzayında örneklem yapılacak veri noktaları belirlenir (deney tasarımı). Ardından seçilen veri noktalarında simülasyon gerçekleştirilerek bu veri noktalarına karşılık gelen yanıt değerleri elde edilir. Eldeki tasarım değişkenleri ve bunlara karşılık gelen yanıt değerlerinden oluşan veri seti kullanarak vekil model oluşturulur. Bu noktada kullanılacak vekil model yönteminin seçimi de büyük önem arzeder. Bu seçim ise modellerin belirlenen hata metrikleri kullanılarak doğrulanması sonucunda olur (Mack vd., 2007).

2.4 Latin Hiperküp Örnekleme ile Deney Tasarımı

Deney tasarımı herhangi bir deneyi sistematik olarak gerçekleştirmek ve elde edilen sonuçları yorumlamak maksatlı geliştirilen bir konsepttir (Park 2007). Vekil model uydurmada kullanılacak en az sayıda deneyi tasarlamak kritik bir süreçtir.

Yaygın deney tasarım yöntemlerinden olan latin hiperküp örnekleme, Iman (2008) tarafından da belirtildiği gibi, sayısız farklı alanda kullanılan yöntemlerden biridir. Latin hiperküp örnekleme yönteminde her tasarım değişkeninin menzili eşit olasılıkta önceden belirlenmiş örneklem sayısına bölünür. Tasarım uzayı eşit olasılıktaki hücrelere ayrılır. Eğer 2 tasarım değişkeni ve 10 örneklem sayısı var ise, tasarım uzayı 100 hücreye bölünür. Bu hücreler arasından 10 örneklem seçerken ilk olarak rastgele bir örneklem oluşturulur ve bu hücreye tasarım değişkenine tekabül eden bir kod atanır. Tek kural oluşturulan rastgele örneklemin daha önce çekilmiş bir örneklemin lokasyon kodu ile çakışmamasıdır. Her tasarım değişkeni için ayrılmış bölüm doldurulana kadar süreç devam eder. Şekil 2.2 latin hiperküp örnekleme kullanarak elde edilen veri noktalarının tasarım uzayındaki görüntüsünü göstermektedir.



Şekil 2.2: 10 örneklem sayısı ve 2 tasarım değişkenli durum için latin hiperküp örnekleme.

2.5 Polinom Yanıt Yüzey Yöntemi

Polinom yanıt yüzeyler tasarım değişkenleri ile istenilen yanıt arasındaki bağıntıyı bir polinom uydurarak sağlarlar. Uydurulacak polinomun derecesi arttıkça çoğunlukla modelin doğruluğu da artar. Ancak bu artış oranı gittikçe azalır ve kullanılması gereken veri noktasının sayısı, doğal olarak gerçekleştirilmesi gereken simülasyon sayısı da, logaritmik olarak artar (Rajashekhar ve Ellingwood, 1993).

En çok kullanılan polinom yanıt yüzey yöntemlerinden biri karesel polinomdur. Karesel yanıt yüzey uydurmalarında adından da anlaşılacağı gibi ikinci derece polinomlar kullanılır. Denklem (2.3) karesel polinom yanıt yüzeyinin (PYY2) genel matematiksel formülüdür.

$$\hat{y}(x) = b_0 + \sum_{i=1}^L b_i x_i + \sum_{i=1}^L b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j=i+1}^L b_{ij} x_i x_j \quad (2.3)$$

Bu formülde \hat{y} tahmin edilen fonksiyon, x tasarım değişkenleri, L tasarım değişkeni sayısı ve b değerleri ise modeli oluştururken hesaplanması gereken çarpanlardır.

Kullanımı yaygın olan bir diğer polinom yanıt yüzeyi yöntemi üçüncü derece, kübik, polinomdur. Denklem (2.4)'te kübik polinom yanıt yüzeyinin (PYY3) formülü verilmiştir.

$$\hat{y}(x) = b_0 + \sum_{i=1}^L b_i x_i + \sum_{i=1}^L b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j=i+1}^L b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{L-2} \sum_{j=i+1}^{L-1} \sum_{k=j+1}^L b_{ijk} x_i x_j x_k + \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L b_{ij} x_i^2 x_j \quad (2.4)$$

Model çarpanları olan b değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (2.5)$$

Daha yüksek dereceli polinomlar da yanıt yüzeyi yöntemi olarak kullanılabilir ancak daha önce de bahsedildiği gibi bu durum daha çok simülasyon gerektirecek olup vekil model kullanım amacının özüne aykırı olacaktır.

2.6 Radyal Tabanlı Fonksiyonlar

Radyal tabanlı fonksiyonlar dağınık veriye dayanan çok değişkenli fonksiyonları tahmin etmek için uygun yöntemlerdir (Broomhead ve Lowe, 1988). n veri noktası kullanılarak oluşturulan modeller için yanıt fonksiyonu aşağıdaki gibi tahmin edilebilir.

$$\hat{y}(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \phi(\|x - x_i\|) \quad (2.6)$$

Burada kullanılan x tasarım değişkenlerini içeren vektör, x_i i inci örneklem noktasındaki tasarım değişkenlerinin vektörü, $\|x - x_i\| = \sqrt{(x - x_i)^T(x - x_i)}$ radyal mesafe olarak kullanılan öklit normu, ϕ ise radyal olarak simetrik olan bir baz fonksiyondur. λ değerleri hesaplanması gereken interpolasyon katsayılarıdır.

En yaygın olarak kullanılan formülasyonlar arasında ince-plaka eğrisi radyal tabanlı fonksiyon (İPE-RTF) (Denklem (2.7)) ve çoklu-karesel radyal tabanlı fonksiyon (ÇK-RTF) (Denklem (2.8)) yer almaktadır.

$$\phi(r) = r^2 \log(r) \quad (2.7)$$

$$\phi(r) = \sqrt{r^2 + c^2} \quad (2.8)$$

İnterpolasyon katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\lambda = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T y \quad (2.9)$$

Burada y yanıt fonksiyonunun örneklem noktalarındaki değerlerini içeren vektördür.

2.7 Kriging

Kriging yöntemi de popüler vekil model oluşturma yöntemlerindedir. Yanıt fonksiyonu Denklem (2.10)'daki gibi iki bileşenden oluşan bir formül ile tahmin edilir.

$$\hat{y}(x) = p(x) + Z(x) \quad (2.10)$$

Bu formülasyonda p global olarak yanıtla yakınsayan polinom eğilim fonksiyonu iken Z modelin örneklem yanıt verisi arasında interpolasyon yapmasını sağlayan stokastik sapma fonksiyonudur. En yaygın eğilim fonksiyonları arasında sabit (KR0), doğrusal (KR1) ve karesel (KR2) modeller bulunmaktadır (Simpson vd., 2001). Stokastik sapma için en sık kullanılan fonksiyon ise Gauss korelasyon fonksiyonudur (Acar, 2013). Bu çalışmada Lophaven vd. (2002) tarafından geliştirilen MATLAB Kriging araç kutusu kullanılmıştır.

2.8 Vekil Modellerin Doğrulanması

Oluşturulan modellerin doğrulanması, bu modellerle elde edilen sonuçlara olan güven açısından oldukça kritik bir uygulamadır. Bazı vekil model yöntemlerinin

kullanılan veri noktalarının üzerinden geçmesi sebebiyle bütün yöntemlerle oluşturulan modellerin veri noktalarındaki performansının ölçülmesi modeller arasında tercih yapacak kişiyi yanlış sonuçlara sevk edebilir. Bu sebeple veri noktaları dışında deney tasarımı ile tasarım uzayının bütününden seçilecek olan test noktaları ile bu değerlendirmeyi gerçekleştirmek yapılacak en mantıklı iş olacaktır (Viana, 2009). Sıradaki bölümlerde hata ölçüm metriklerinden birkaçı detaylandırılmıştır.

2.9 Normalleştirilmiş Karekök Ortalama Hata

Vekil modellerin doğruluğunu belirlemek için kullanılan ölçülerden biri normalleştirilmiş karekök ortalama hatadır. Viana'nın (2011) da belirttiği gibi standart ve çokça kullanılan bir hata metriği olduğu için herhangi bir temsil modelinde bu değeri ele almak mümkündür. Normalleştirilmiş karekök ortalama hata için kullanılan formülasyon Denklem (2.11)'de verilmektedir.

$$RMSE_{norm} = \frac{1}{|y_{max} - y_{min}|} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.11)$$

Bu formülde n vekil modelin test edildiği nokta sayısı, y_i ve \hat{y}_i sırasıyla test noktalarında gerçek ve modelin tahmin ettiği yanıt değerleri ve $|y_{max} - y_{min}|$ test noktalarında alınan gerçek yanıtların aralığıdır. Hata metriğinin normalleştirilmesi yüzdesel olarak yorumlanmasına yardımcı olmaktadır.

2.10 Belirleme Katsayısı

Belirleme katsayısı da vekil modelin doğruluk derecesini belirlemek için kullanılan ölçütlerden birisidir (Barret, 1974). Bu metrik için kullanılan formülasyon Denklem (2.12)'de verilmektedir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (2.12)$$

Burada n modelin değerlendirildiği test noktalarının sayısı, y_i ve \hat{y}_i sırasıyla test noktalarında gerçek ve modelin tahmin ettiği yanıt değerleri ve \bar{y}_i gerçek yanıtların ortalama değeridir. Yüksek belirleme katsayısı bir modelin istenilen ilişkiyi ne kadar iyi temsil ettiğine işaret eder.

2.11 Oluşturulan Vekil Modelle Eniyileme

Bir problem özelinde en iyi çözümü ararken kullanılabilir çok sayıda eniyileme yöntemi bulunmaktadır. Hangi yöntemin tercih edileceği eldeki problemle ilişkilendirilebilir. Amaç ve kısıt fonksiyonlarının doğasına ve davranışlarına bağlı olarak gradyan-tabanlı veya popülasyon-tabanlı algoritmalarından biri tercih edilebilir.

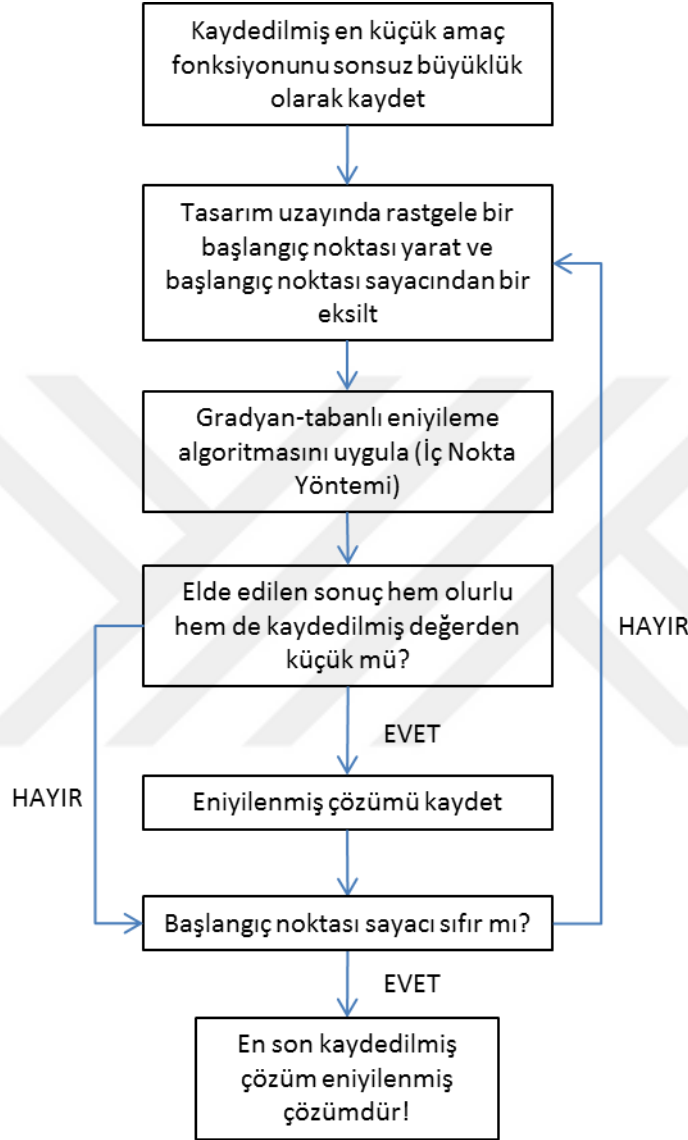
Friedl ve Kuczmann'ın (2014) açıkladığı üzere Çizelge 2.1 gradyan-tabanlı ve popülasyon-tabanlı algoritmaların en belirgin farklarını karşılaştırmalı olarak vermektedir.

Çizelge 2.1: Eniyileme algoritmalarının iki ana başlıkta karşılaştırması.

Gradyan-tabanlı Algoritmalar	Popülasyon-tabanlı Algoritmalar
Global bir çözüm elde etme konusunda etkili değildir.	Yerel eniyi çözümlerden kaçınma için uygundur.
Başlangıç tahminine bağlıdır.	Birden fazla başlangıç noktasına sahiptir.
Yakınsama hızı yüksektir.	Yakınsama hızı iterasyonlar ilerledikçe azalır.
Hızlıca bir çözüm elde eder.	Sonlu bir zaman diliminde en iyi çözümü garanti etmez.

Her iki yaklaşımın da iyi yanlarından yararlanabilmek için melez bir yaklaşım da kullanılabilir. Arama bölgesinde eniyiyi elde etmek için gradyan-tabanlı bir algoritmanın çözüm hızından yararlanırken, bu algoritmayı rastgele birden fazla başlangıç noktasından başlatmak da yerel eniyilerden kaçınmayı sağlar (Mantica, 2011). Bu sebeple oluşturulan algoritma yalnızca yüksek yakınsama hızına sahip olmakla kalmayarak başlangıç noktalarındaki rassallık sayesinde yerel eniyi çözümlerden de kaçabilir.

MATLAB'ın *fmincon* gömülü fonksiyonu gradyan-tabanlı bir çözüm algoritması sağlamaktadır. Bu fonksiyonun kullandığı iç nokta yöntemi bir sonraki başlık altında detaylandırılmıştır. Şekil 2.3 oluşturulan eniyileme sürecinin taslağını bir akış şeması olarak görsellemektedir.



Şekil 2.3: Çoklu başlangıç noktalı gradyan-tabanlı eniyileme algoritmasının akış şeması.

2.12 İç Nokta Yöntemi

Bir gradyan-tabanlı eniyileme algoritması olarak iç nokta yöntemi MATLAB'ın *fmincon* fonksiyonunun ilk tercihi olarak yer almaktadır. Bu fonksiyon kısıtlı bir eniyileme probleminde yerel eniyi arandığı zaman kullanılır.

İç nokta yöntemi eldeki eniyileme problemini bir dizi yaklaşık eniyileme problemini çözerek çözmeyi hedefler (Potra ve Wright, 2000). Problemin ilk hali Denklem (2.2)'de verildiği gibidir. Buradan yola çıkarak yaklaşık problem şu şekilde yakınsanır.

$$\begin{aligned}
 \text{Bul} \quad & \mathbf{x} \\
 \text{Enküçükle} \quad & f_{\mu}(\mathbf{x}, s) = \min f(\mathbf{x}) - \mu \sum_i \ln(s_i) \\
 \text{Öyle ki} \quad & h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j=1, \dots, n_h \quad (2.13) \\
 & g_k(\mathbf{x}) + s = 0 \quad j=1, \dots, n_g \\
 & \mathbf{x}^L \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^U
 \end{aligned}$$

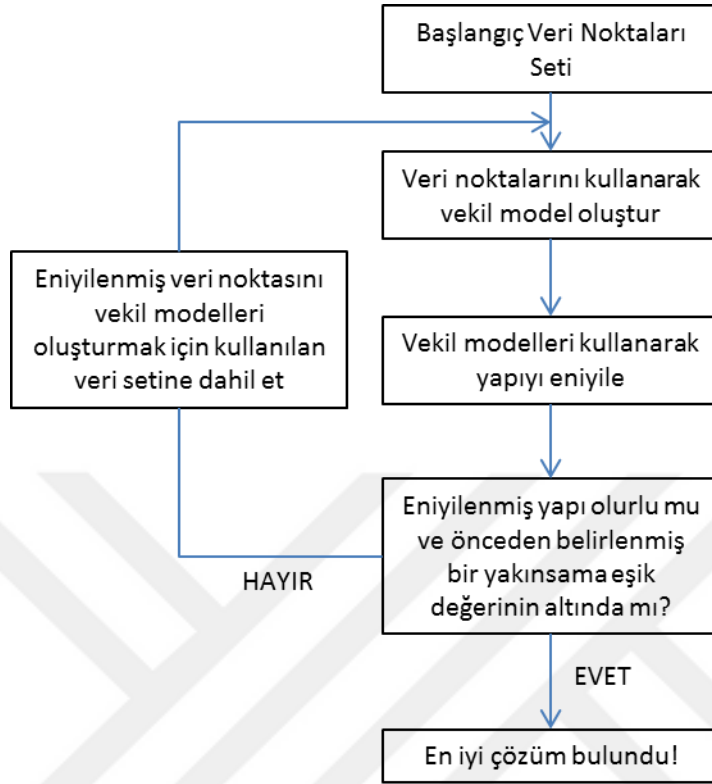
Burada s_i yapay değişkenlerdir. Yapay değişkenlerin sayısı eşitsizlik kısıtlarının sayısı kadardır. Amaç fonksiyonunun sağ tarafında bulunan logaritmik terim bariyer fonksiyonudur ve çözümü olurlu bölgede tutmakla görevlidir. Bariyer fonksiyonunun çarpanı olan μ sifıra yaklaştıkça yakınsanmış problem de orijinal eniyileme problemine yaklaşır.

2.13 Vekil Model İyileştirme

Oluşturulan vekil modeller her zaman istenilen performansı göstermeyebilirler. Eniyileme sonucu olarak elde edilen bir çözüm simülasyona sokulduğunda çok farklı sonuçlar verdiği görülebilir. Bu durumda vekil modelin çözüm alanı etrafındaki doğruluğunu arttırmak gerekebilir. Bu amaçla elde edilen eniyi çözümün bir veri noktası olarak vekil modellere dahil edilip ardışık olarak vekil model oluşturmak bir çözüm olabilir. Ardışık vekil model iyileştirme işlemi Şekil 2.4'te bir akış şeması olarak verilmektedir.

Bu yaklaşım özellikle Kriging gibi veri noktalarından geçen yöntemlerle oluşturulan vekil modeller ile kullanıldığında çözüm çevresinde doğruluğu arttıracaktır. Ancak belirtmelidir ki gerçekleştirilen iyileştirme yerel bir iyileştirme olarak anlaşılmalıdır. Modelin doğruluğu aranan en iyi çözüm etrafında artarken bu iyileştirmeden çözüm uzayının başka noktalarındaki doğruluk etkilenmeyecektir. Bu

sebeple bu iyileştirme yöntemi uygulandığında modeller vakaya özel vekiller haline dönüşecektir.



Şekil 2.4: Vekil model ardışık iyileştirme algoritmasının akış şeması.

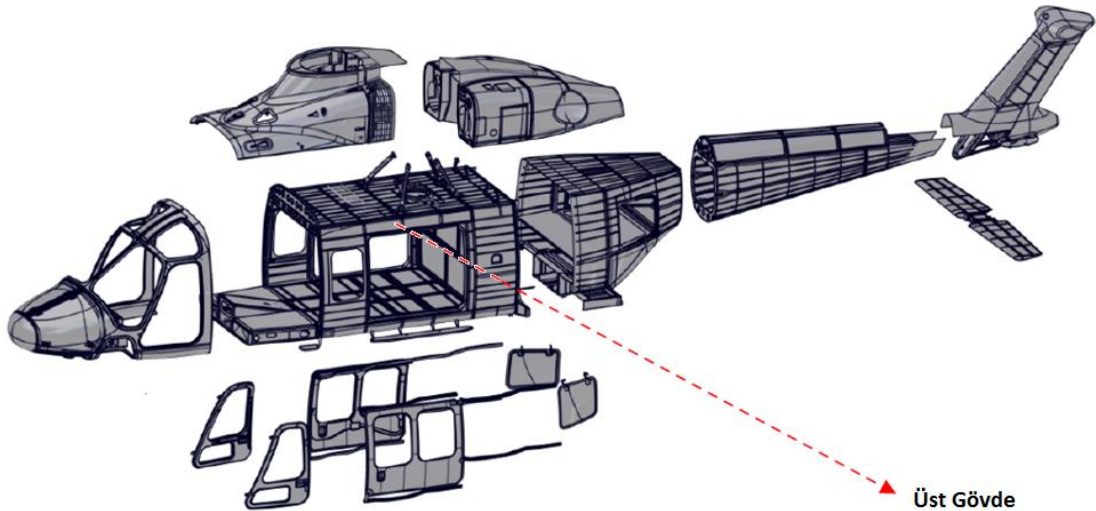
İterasyonu durdurmak için olurluluğun yanısıra kullanılan hata eşik değeri ise kullanıcı tarafından belirlenen bir metrik olmakla birlikte seçilen farklı değerlerdeki eşik değerleri farklı sonuçlara sebep olabilir. Bu çalışmada, farklı eşik değerleri kullanılarak sonuçlara olan etkisi incelenmiştir.

3 PROBLEM TANIMI

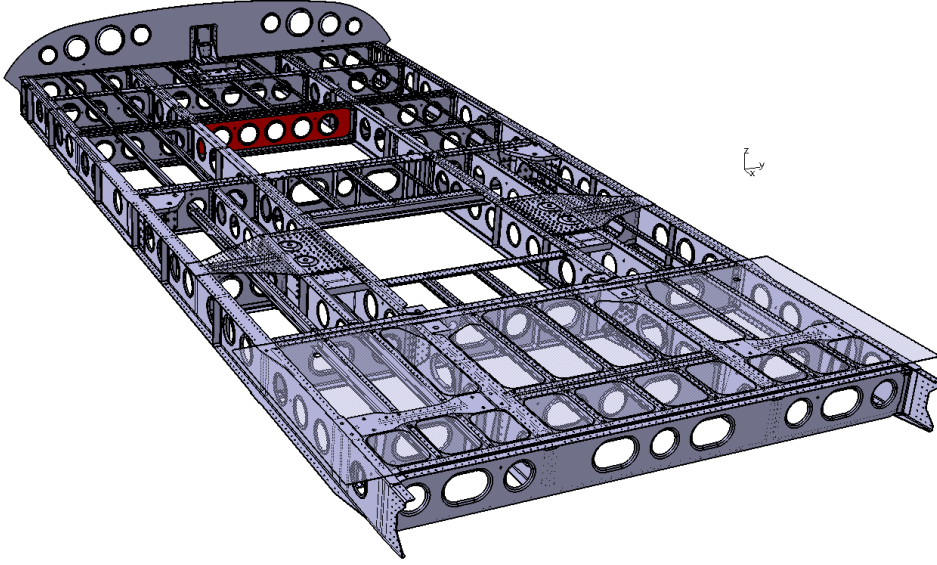
3.1 Giriş

Eldeki probleme bir çözüm önerisi sunmadan önce mevcut problemi bütün hatlarıyla tanımlamak sadece probleme uygun bir çözüm yöntemi bulmak konusunda değil aynı zamanda çözümün uygulandığı her adımı sebep sonuç ilişkisi içerisinde açıklayabilmek adına da büyük önem teşkil eder. Bu çalışmada problem olarak ele alınan yapısal parça, T-625 Özgün Helikopter'in üst gövdesinde yanal olarak konumlandırılmış bir kiriştir. Mevcut tasarımda, bu kirişin üzerinde beş adet güçlendirmeli hafifletme deliği bulunmaktadır. Kirişin bulunduğu bölge Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

Kirişin temel boyutları ve başlangıç tasarımındaki haliyle özdeş deliklerin aralarındaki mesafeler ve delik yarıçapı Şekil 3.3'te verildiği gibidir. Delik güçlendirmelerinin boyutları da Şekil 3.4'te belirtilmiştir. Aynı boyutlar tanımları ile birlikte Çizelge 3.1'de de sunulmaktadır.



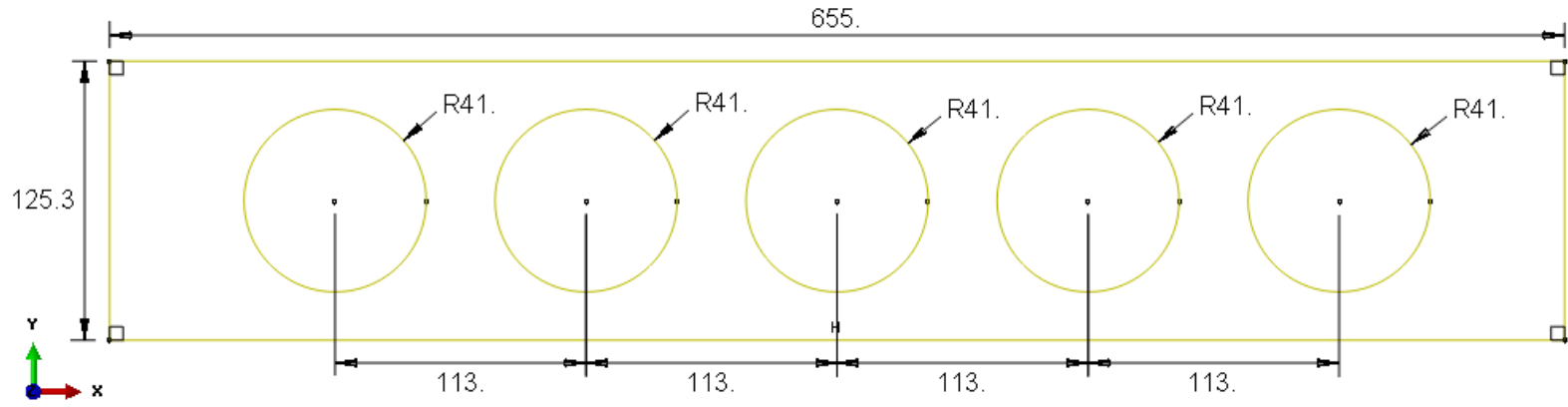
Şekil 3.1: T-625 Özgün Helikopter'in üst gövde konumu.



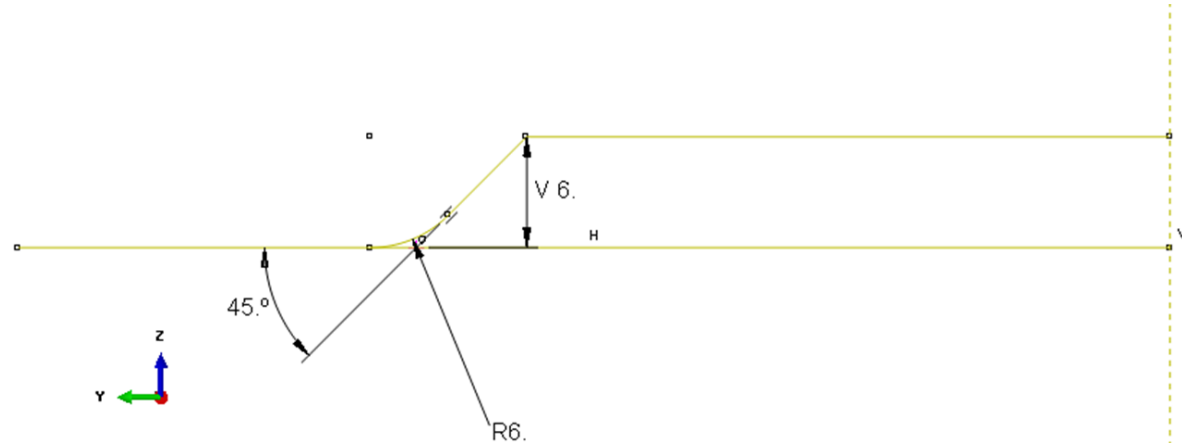
Şekil 3.2: Probleme söz konusu olan kirişin üst gövdedeki konumu (kırmızı).

Çizelge 3.1: Kiriş ve delik boyutları ve tanımları.

Kiriş uzunluğu	l	655.00 mm
Kiriş yüksekliği	h	125.30 mm
Kiriş kalınlığı	t	2.00 mm
Başlangıç tasarımında iki delik merkezi arası uzaklık	s_0	113.00 mm
Başlangıç tasarımında delik yarıçapı	a_0	41.00 mm
Güçlendirme yüksekliği	fh	6.00 mm
Güçlendirme genişliği	fw	6.00 mm
Delik büküm yarıçapı	r	6.00 mm



Şekil 3.3: Kiriş ve üzerinde bulunan hafifletme deliklerinin başlangıç tasarımındaki boyutları (Kalınlık = 2 mm).

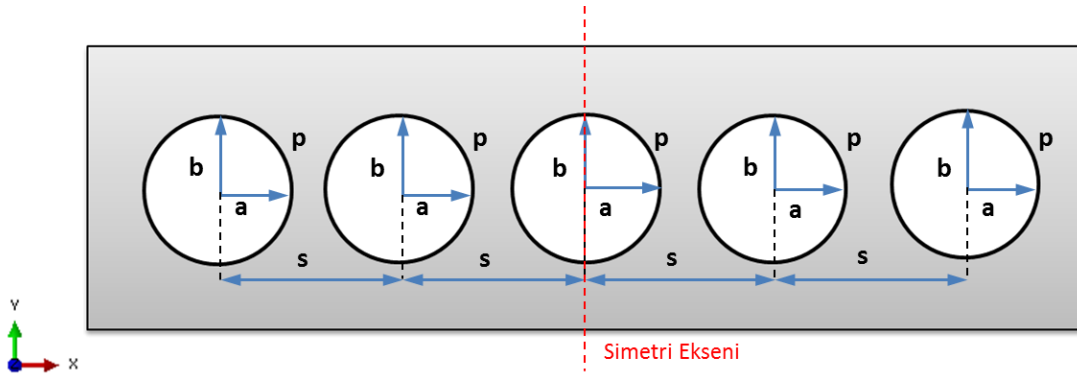


Şekil 3.4: Delik güçlendirme boyutları.

Problemin amacı gereği kiriş geometrisi değişken olarak ele alınmamaktadır. Delik geometrisi değişken olarak kullanılacağı için delik yarıçapı ve iki delik merkezi arası uzaklık için başlangıç değerleri olarak tanımlanmaktadır.

3.2 Eniyileme Problemi

Bir eniyileme problemini tanımlamak adına yapılacak ilk işlerden biri tasarım değişkenlerini belirlemektir. Bu problemde amaç delik şeklini optimize ederek yapının ağırlığını enküçükmek olduğu için, delik şeklini parametrize etmek doğru bir yaklaşım olacaktır. Bu yaklaşım ile Denklem (2.1)'i bir deliğin geometrisini tanımlamak için kullanmak oldukça uygun olacaktır. Denklem (2.1)'de bulunan değişkenlerden a delik yatay yarıçapını, b delik dikey yarıçapını, p ise delik eğrilik faktörünü temsil eder. Bir deliği bu şekilde formülize etmek keskin köşeli delik yapılarından kaçınarak gerilme konsantrasyonunun önüne geçer. Bu parametrelere ek olarak iki delik merkezi arasındaki mesafe s de bir tasarım değişkeni olarak seçilmiştir. Bu değişkeni ortaya koyarken merkez deliğin kirişin merkezinde olduğu ve sabit alındığı önkabulünü de belirtmek gerekir. Eğer başlangıç tasarımında olduğu gibi bütün delikler özdeş ve ardışık delikler arası mesafe de aynı kabul edilirse, 4 tasarım değişkenli bir optimizasyon problemi formülize edilebilir. Bu durum için tasarım değişkenlerinin görselleştirilmesi Şekil 3.5'te yapılmıştır.



Şekil 3.5: Özdeş delikli eşit aralıklı durum için tasarım değişkenleri.

Tasarım değişkenleri belirlendikten sonra amaç ve kısıt fonksiyonlarını belirlemek de problem tanımının bir parçası olarak görülebilir. Botkin (1982) yapısal şekil eniyilemesinin genel olarak iki amaç doğrultusunda yapıldığından bahsetmiştir. İlk

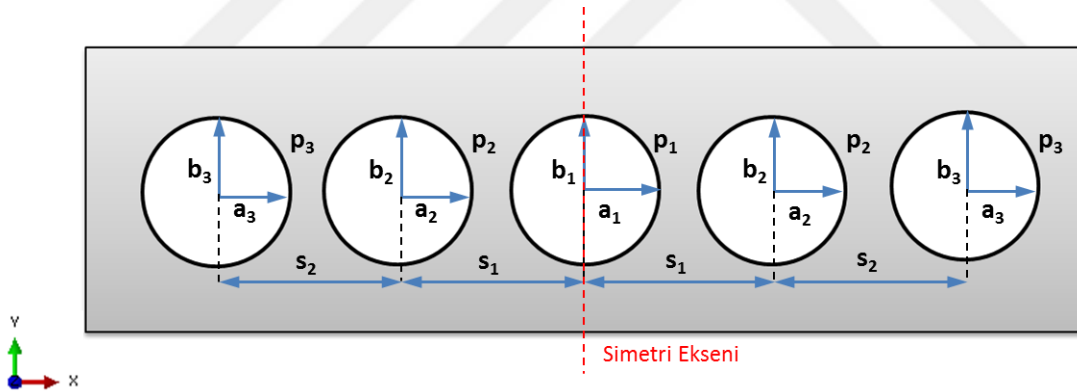
ve en genel amaç ağırlık azaltımıdır, ikinci amaç ise yapıdaki gerilmenin azaltımı olarak ele alınmaktadır. Bu çalışmada amaç fonksiyonu yapının ağırlığı olarak seçilmiştir. Kısıtlar göz önünde bulundurulduğunda parçanın yapısal olarak karşılaşılabileceği iki hasar kriteri olan yapının akma dayanımının aşılması ve burkulma dayanımının ihlal edilmesi ele alınmıştır. Doğrusal statik analiz sonucunda yapıda gözlenen maksimum von Mises gerilme değerinin yapıyı oluşturan malzemenin akma dayanım değerini geçmemesi istenir. Burkulma analizi ise çıktı olarak farklı modlar için bir burkulma özdeğeri verir. Bu özdeğer, yapının maruz kaldığı yüklerin kaç katı yük yapıya uygulanırsa ilgili modda burkulma gerçekleşeceğini belirtmektedir. Bu durumda ise, en küçük özdeğerin 1'in üstünde olması istenir. Bunlara ek olarak kiriş geometrisi de göz önünde bulundurularak ihlal edilmemesi gereken boyutsal kısıtlar da probleme dahil edilmiştir. Özdeş delikli eşit aralıklı, yani 4 tasarım değişkenli, problem için Denklem (2.2)'deki taslakta verildiği gibi bir optimizasyon formülasyonu aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \text{Bul} \quad & \mathbf{x} = \{a \ b \ p \ s\}^T \\
 \text{Enküçükle} \quad & \text{Ağırlık}(\mathbf{x}) \\
 \text{Öyle ki} \quad & \sigma_{MaxVM} - \sigma_{ty} \leq 0 \\
 & 1 - \lambda_{Burkulma} \leq 0 \\
 & 4s + 2a + 2r - l \leq 0 \\
 & 2a + 2r - s \leq 0 \\
 & 2b + 2r - h \leq 0 \\
 & 40.00 \leq a \leq 50.00 \\
 & 33.00 \leq b \leq 43.00 \\
 & 2.0 \leq p \leq 6.0 \\
 & 2\min(a) + 2r \leq s \leq (l - 2\min(a) - 2r)/4
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Burada a , b ve p değişkenleri için belirtilen alt ve üst sınır değerler yapıda yapılan öncül analizler sonucunda belirlenmiştir. Tasarım uzayını uygun bir şekilde sınırlamak, tasarım uzayındaki olurlu bölge oranını arttırırken, buna paralel olarak eniyileme sonucunda kabul edilebilir bir çözüm bulma ihtimalini de arttırır. Delik

merkezleri arası mesafe olan s değeri delik yatay yarıçapı a değeri ile aynı ekseninde bulunduğu için alt ve üst limit değerleri bu değere bağlı olarak belirlenebilir.

Problemi tanımlamak için ikinci bir seçenek ise konumlarına göre farklı delikleri ayrı ayrı parametrelerle ifade etmek olabilir. Daha önce de bahsedildiği gibi, merkez konumu sabitlenmiş orta deliğin merkezinden kirişin uzun kenarına dik olacak şekilde bir eksen geçirecek olursak, yükleme koşullarındaki simetriyi de göz önünde bulundurarak, merkez delik, ara delikler ve uç delikler olmak üzere üç farklı deliğin boyutlarını ve merkezler arası mesafelerini tasarım değişkeni olarak ele almak uygun bir yaklaşım olacaktır. Problemi bu şekilde tanımladığımızda elde edilen tasarım değişkenleri: merkez delik yatay yarıçapı a_1 , merkez delik dikey yarıçapı b_1 , merkez delik eğrilik faktörü p_1 , ara deliklerin yatay yarıçapı a_2 , ara deliklerin dikey yarıçapı b_2 , ara deliklerin eğrilik faktörü p_2 , uç deliklerin yatay yarıçapı a_3 , uç deliklerin dikey yarıçapı b_3 , uç deliklerin eğrilik faktörü p_3 , merkez delik ile ara delikler arasındaki delik merkezlerinin birbirlerine olan mesafesi s_1 , ara delikler ile uç delikler arasındaki delik merkezlerinin birbirlerine olan mesafesi s_2 olarak isimlendirilebilir. Bu durumda oluşan 11 tasarım değişkeni Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı durum için tasarım değişkenleri.

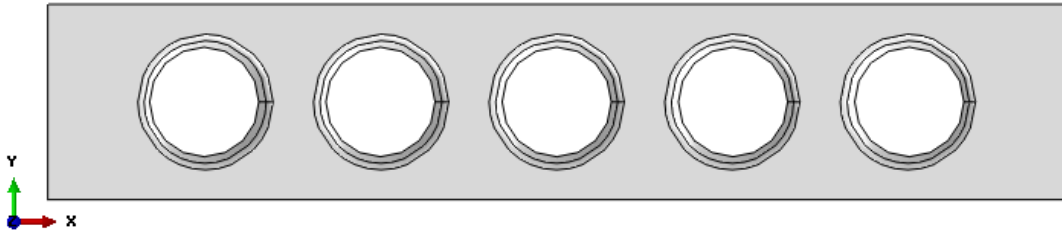
Özdeş delikli eşit aralıklı problem için olduğu gibi aynı amaç ve kısıt fonksiyonları ile birlikte 11 tasarım değişkenli durumun formülizasyonu yapıldığında Denklem (3.2)'deki gibi bir tablo ortaya çıkacaktır.

$$\begin{aligned}
 \text{Bul } \mathbf{x} &= \{a_1 \ b_1 \ p_1 \ s_1 \ a_2 \ b_2 \ p_2 \ s_2 \ a_3 \ b_3 \ p_3\}^T \\
 \text{Enküçüle } & \text{Ağırlık}(\mathbf{x}) \\
 \text{Öyle ki } & \sigma_{MaxVM} - \sigma_{ty} \leq 0 \qquad (3.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
1 - \lambda_{Burkulma} &\leq 0 \\
2s_1 + 2s_2 + 2a_3 + 2r - l &\leq 0 \\
a_1 + a_2 + 2r - s_1 &\leq 0 \\
a_2 + a_3 + 2r - s_2 &\leq 0 \\
2b_1 + 2r - h &\leq 0 \\
2b_2 + 2r - h &\leq 0 \\
2b_3 + 2r - h &\leq 0 \\
40.00 \leq a_1, a_2, a_3 &\leq 50.00 \\
33.00 \leq b_1, b_2, b_3 &\leq 43.00 \\
2.0 \leq p_1, p_2, p_3 &\leq 6.0 \\
\min(a_1) + \min(a_2) + 2r \leq s_1 \leq l/2 - 3r - \min(a_2) - 2\min(a_3) \\
\min(a_2) + \min(a_3) + 2r \leq s_2 \leq l/2 - r - \min(a_3) - \min(s_1)
\end{aligned}$$

3.3 Sonlu Elemanlar Modeli

Planlandığı üzere vekil model oluşturma sürecinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, oluşturulan kiriş modeli deney tasarımı ile elde edilen veri noktaları için koşutularak maksimum von Mises gerilme değeri, minimum burkulma özdeğeri ve yapının ağırlığı gibi eniyilemede amaç ve kısıt fonksiyonlarında yer alan yanıtlar elde edilmiştir. Bu tezde sonlu elemanlar analizleri için ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Yapıyı modellemede ilk etapta Çizelge 3.1’de belirtilen boyutlar kullanılmıştır. Oluşturulan iki boyutlu katı model Şekil 3.7’de verilmektedir.



Şekil 3.7: Kiriş yapısının katı modeli.

Parça geometrisini oluşturduktan sonra malzeme tanımlaması yapılmıştır. Yapı kılıflanmış (Clad) alüminyum 2024 T3 alaşımı sac malzemesinden üretilmiş olup malzemenin A-baz mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Verilen bu bilgiler doğrultusunda parça boyunca doğrusal malzeme (MAT1) modelde tanımlanmıştır.

Çizelge 3.2: Kılıflanmış alüminyum 2024 T3 mekanik özellikleri.

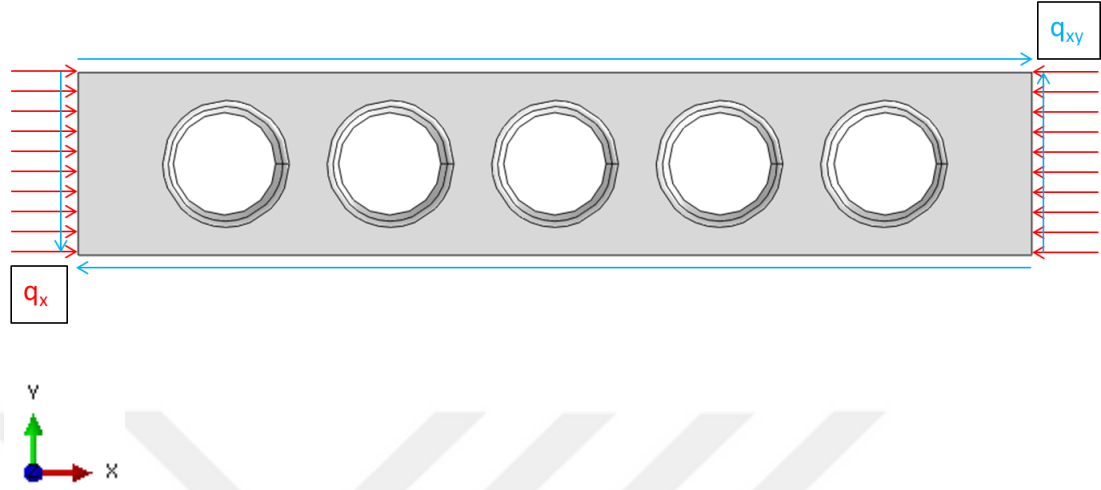
Özkütle (Density)	ρ	$2.77*10^{-3} \text{ g/mm}^3$
Elastisite Modülü (Young’s Modulus)	E	72395.00 MPa
Poisson Oranı (Poisson’s Ratio)	ν	0.33
Çekme Mukavemeti (Tensile Yield Strength)	σ_{ty}	310.00 MPa

Malzeme tanımlamasından sonra yapının hangi yükler altında eniyileneceği sorusunun cevabı büyük önem taşımaktadır. Bilindiği üzere bir hava aracı görev tanımı gereği kapasitesinin kaldırabileceği ölçüde bir çok manevra gerçekleştirebilir. Her farklı manevra durumunda yapı üzerinde oluşan yükün büyüklüğü ve dağılımı farklılık gösterir. Dolayısı ile bu dağılımı ve hangi yapısal elemanların hangi manevralarda daha kritik yüklere maruz kaldığını görebilmek için hava aracının bütün yapısal iskeletini içeren bir global sonlu elemanlar modeli hazırlanır ve kritik görülen bütün yük koşulları için koşturulur. Bu tarz modellerde amaç her taşıyıcı eleman özelinde bir analizden ziyade yükün hava aracı yapısı boyunca nasıl dağıldığını gözlemlemek olduğu için analiz süresi göz önünde bulundurularak yapısal parçalar görece daha büyük elemanlar kullanılarak temsil edilir. Kullanılan global sonlu elemanlar modeli TAI¹ için gizlilik arz ettiği için yalnızca yukarıda verilen kadar bilgi paylaşılabilir.

Global sonlu elemanlar modeli ile yapılan analiz sonucunda, eniyileme için seçilen kirişi temsil eden elemanlar üzerinde gözlemlenen en kritik yükler (i) $q_{xy} = 18.01 \text{ N/mm}$ ve (ii) $q_x = 113.31 \text{ N/mm}$ olarak kaydedilmiştir. Bu yüklere sebep olan yük koşulu ise 100 fit irtifada, -50°C sıcaklıkta, 100 rpm güç verilmiş konfigürasyonda, dalış hızında ve ana rotor ekseninde 3.5 yük faktörü hedeflenmiş manevrada görülmektedir. Bu yükler bileşik olarak uygulandığında yapı üzerinde daha kritik olacağı için tek yük koşulu altında birlikte uygulanmışlardır. Yüklerin model üzerinde uygulanışları Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Bileşik yüklemeler iki tür

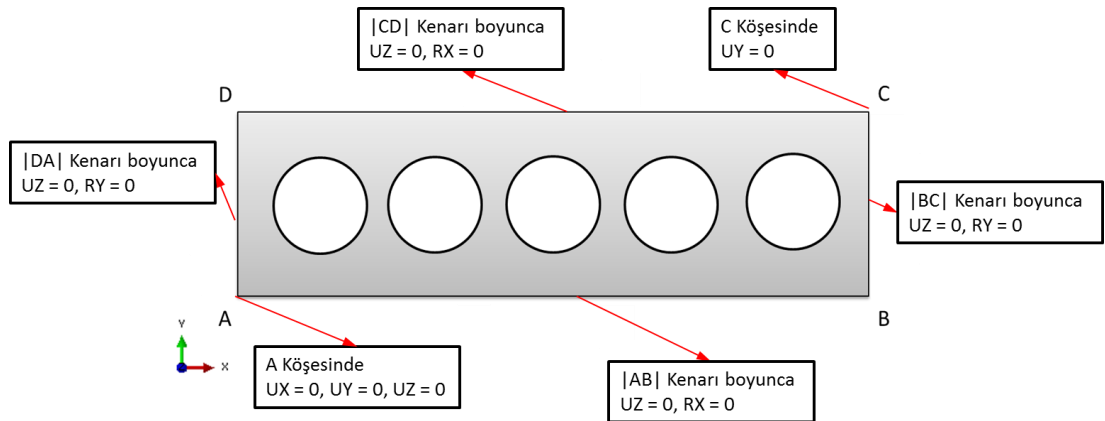
¹ TAI TUSAŞ - Fethiye Mahallesi, Havacılık Bulvarı No:17 06980 Kahramankazan/ANKARA

analizde kullanılmıştır: (i) doğrusal statik analiz ve (ii) burkulma özdeğer analizi. Doğrusal statik analiz çıktı olarak maksimum von Mises gerilmesi, burkulma özdeğer analizi ise minimum burkulma özdeğerini çıktı olarak sağlamaktadır.



Şekil 3.8: Yüklerin sonlu elemanlar modeline uygulanması.

En az uygulanan yükler kadar, yapıdan izole edilmiş kirişin sınır koşulları da modelin güvenilirliğini ve gerçekçiliğini arttırmak adına büyük önem arzeder. Bu çalışmada ele alınan kirişin dört kenarında da çift sıra perçin kullanılmıştır. Bu durumda sonlu elemanlar modeline uygulanacak kısıtları Şekil 3.9'da görselleştirilmiştir.



Şekil 3.9: Kirişe sınır koşullarının uygulanması.

Sınır koşullarını modele yansıtmak için kirişin kenar ve köşelerinde bulunan noktaların serbestlik derecelerini kısıtlamak gerekecektir. Bu çalışmada oluşturulan

sonlu elemanlar modelinde Çizelge 3.3'te verilen üç eksenle öteleme ve dönme serbestlikleri kısıtlanmıştır. (Muameleci, 2014).

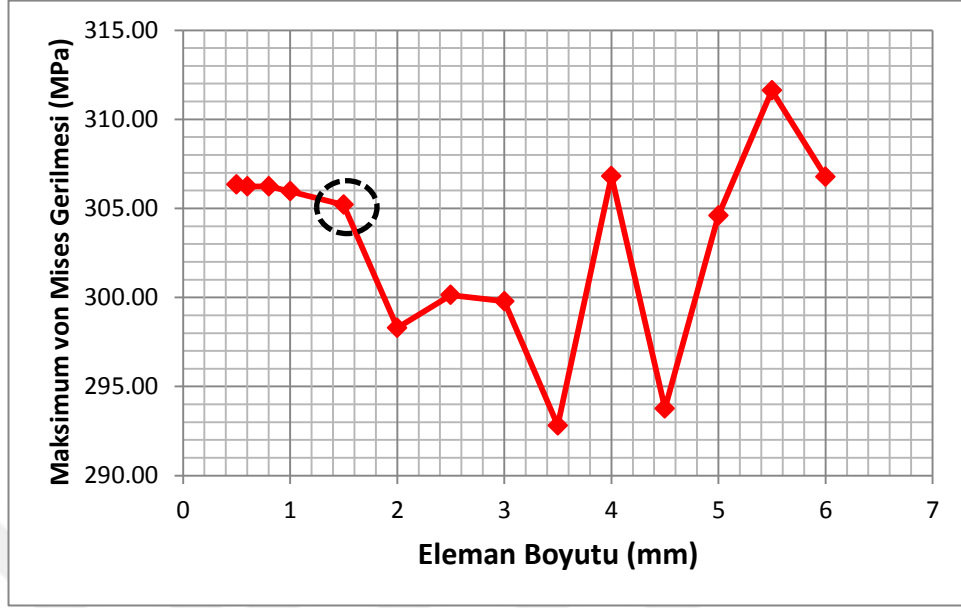
Çizelge 3.3: Sonlu elemanlar modelinde uygulanan sınır koşulları.

	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
Kenar AB			×	×		
Kenar BC			×		×	
Kenar CD			×	×		
Kenar DA			×		×	
Köşe A	×	×	×			
Köşe B						
Köşe C		×				
Köşe D						

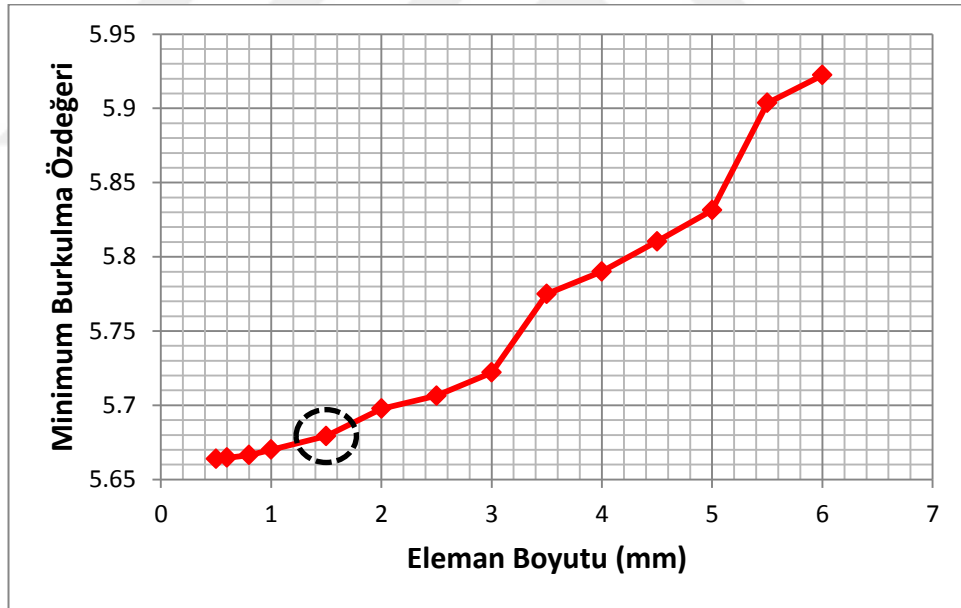
Parça geometrisi, malzeme tanımlama, uygulanacak yükler ve sınır koşulları belirlendikten sonra çözüm ağı oluşturmak için gerekli parametreler belirlenmiştir. Çözüm ağı oluştururken tercih edilen eleman tipi olarak dörtgen (quadrilateral) elemanlar (S4) kullanılmıştır. Oluşturulan model boyunca kullanılacak elemanların boyutu ise çözüm ağı duyarlılık analizi ile belirlenmiştir. Çözüm ağı duyarlılık analizinde başlangıç tasarımı farklı eleman boyutları ile modellenerek hem maksimum von Mises gerilme hem de minimum burkulma özdeğeri yanıtları için koşturulmuştur. Kõrgesaar ve Romanoff'un (2014) dikkat çektiği üzere eleman boyutu ne kadar küçük tercih edilirse model o kadar çok bölüme ayrıklaştırılır ve elde edilen sonucun doğruluğu o kadar artar. Ancak artan eleman sayısı sonlu elemanlar çözümündeki matris boyutunu da arttıracığı için bu durum çözüm süresine direkt olarak etki etmektedir. Bu sebeple tercih edilecek eleman boyutu ne doğruluktan taviz verecek kadar büyük, ne de başa çıkılamayacak çözüm sürelerine sebep olacak kadar küçük olmalıdır. Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de ilgilenilen yanıtların çeşitli eleman boyutlarına göre değişimi gösterilmektedir. Çizelge 3.4'te farklı eleman boyutlarında analiz süresi, eleman sayısı ve yanıt değerleri listelenmektedir.

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'den görülmektedir ki eleman boyutu 1.5 mm seçmek her iki yanıt için de gerekli doğruluk derecesini çözüm hızından feragat etmeden sağlayacaktır. Oluşturulan çözüm ağı Şekil 3.12'de verilmektedir. Delik etrafında

daha doğru sonuçlar elde edebilmek adına ağ geçişi daha düzgün oluşturulmuştur. Bu uygulamaya washer yöntemi denmektedir ve Şekil 3.12’de gözlemlenmektedir.



Şekil 3.10: Maksimum von Mises gerilmesinin eleman boyutuna göre değişimi.



Şekil 3.11: Minimum burkulma özdeğerinin eleman boyutuna göre değişimi.

Çözüm ağı da hazırlandıktan sonra kullanılan sonlu elemanlar yazılımı olan ABAQUS’un analiz sonuçlarının doğruluğunu göstermek adına bir çalışma yapılmıştır. Bu doğrulama işlemi sırasında Panedpojaman vd. (2014) ve Tsavdaridis ve D’Mello’nun (2011) çalışmalarından yararlanılmıştır. Gerçekleştirilen doğrulama işlemi temel olarak kayma yüklemesi altındaki boyutları Çizelge 3.5’te ve Şekil

3.13'te verilen dört farklı geometrideki kirişin yük deformasyon eğrilerinin karşılaştırılmasıdır.

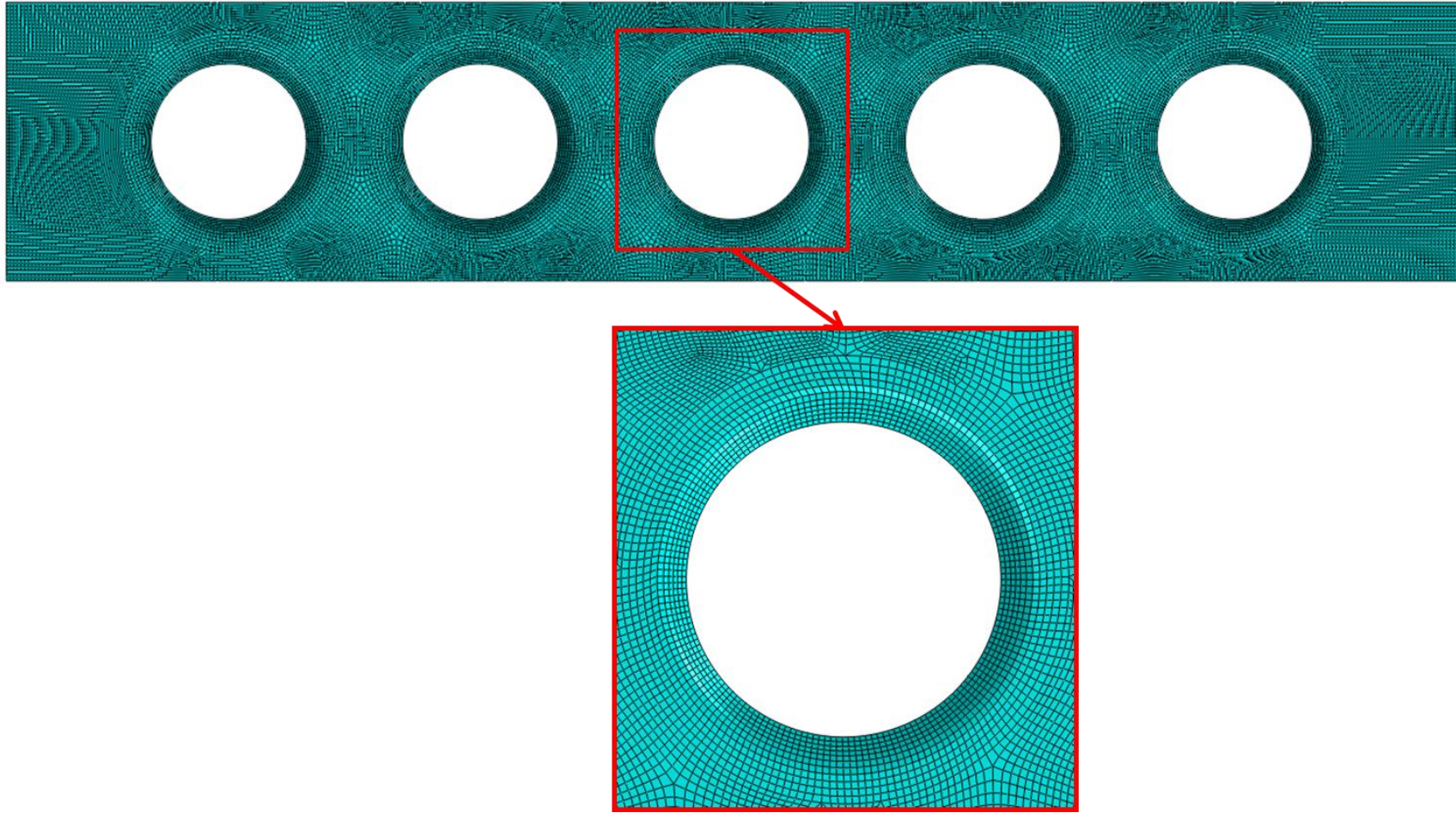
Çizelge 3.4: Farklı eleman boyutları için çözüm ağı özellikleri ve yanıtlar.

Eleman Boyutu (mm)	Eleman Sayısı	Analiz Süresi (s)	Maksimum von Mises Gerilmesi (MPa)	Minimum Burkulma Özdeğeri
6	1547	46.51	306.77	5.92
5.5	1789	48.50	311.62	5.90
5	2283	51.50	304.60	5.83
4.5	2694	54.54	293.76	5.81
4	3438	56.02	306.81	5.79
3.5	4387	61.80	292.81	5.78
3	6163	65.13	299.79	5.72
2.5	8537	76.89	300.13	5.71
2	13870	103.23	298.30	5.70
1.5	24751	157.45	305.20	5.68
1	56739	409.97	305.96	5.67
0.8	88184	1107.78	306.23	5.67
0.6	163664	2794.90	306.23	5.66
0.5	234659	7825.72	306.34	5.66

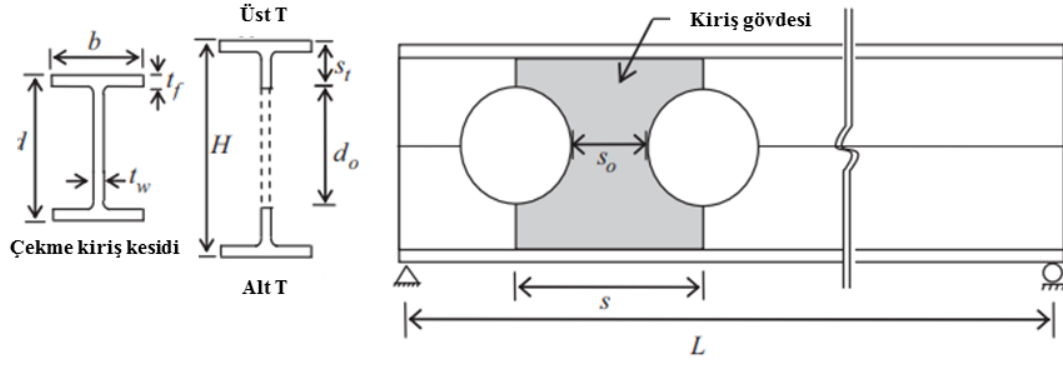
Çizelge 3.5: Başlangıç tasarımının tasarım değişkenleri.

Parça Kodu	Kiriş Kesidi	H (mm)	d_o (mm)	s (mm)	L (mm)
NB1	UB457x152x52	450	315	410	1700
NB2	UB457x152x52	450	315	378	1700
NB3	UB406x140x39	581	375	461	5250
NB4	UB305x102x25	463	325	400	7400

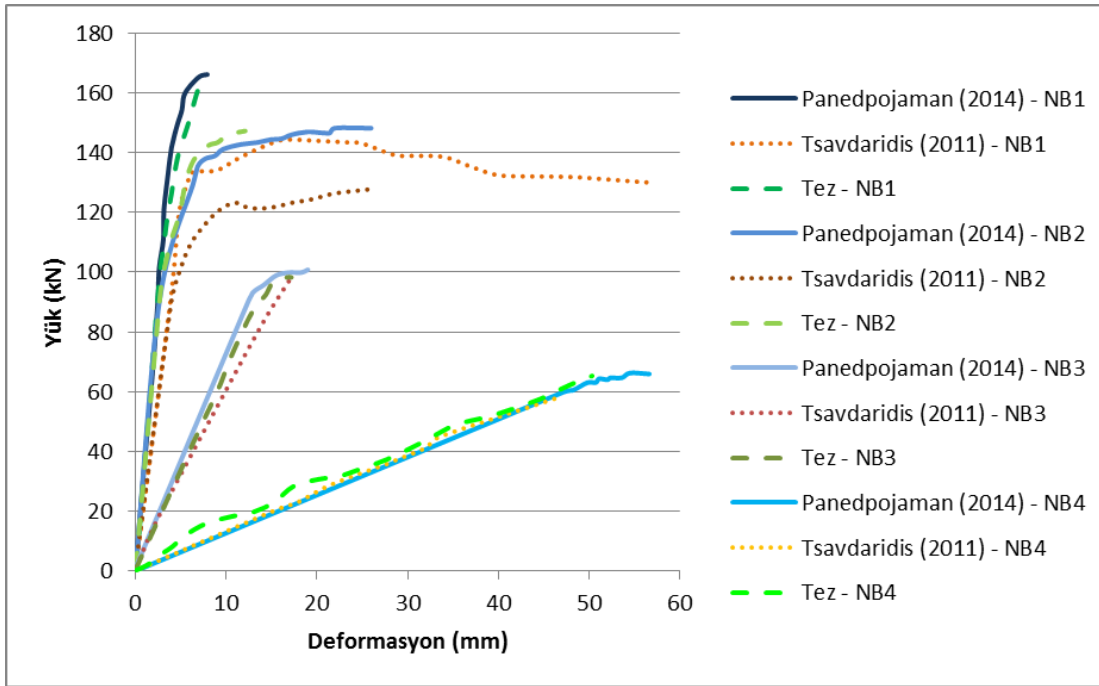
Halihazırda bulunan test sonuçları ve ANSYS yazılımı ile oluşturulmuş sonlu elemanlar modeli ile elde edilmiş sonuçların yanında ABAQUS ile oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile sonuçlar elde edilip Şekil 3.14'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.12: Çözüm ağı ve washer yöntemi.



Şekil 3.13: Doğrulamada analiz edilen parçanın boyutlandırması.



Şekil 3.14: Tezde kullanılan ABAQUS yazılımının ANSYS yazılımı ve test sonucu ile doğrulaması.

Şekil 3.14'ten anlaşılmaktadır ki tezde kullanılan ABAQUS yazılımı ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçları her dört numune için de özellikle doğrusal bölgede hem Tsavdaridis'in (2011) test sonuçlarıyla hem de Panedpojaman vd.'nin (2014) kullandığı ANSYS yazılımı ile elde ettiği sonuçlara büyük oranda yakınlık göstermektedir. Buradan yola çıkarak söylenebilir ki bu çalışmada ABAQUS sonlu elemanlar yazılımını kullanmakta bir sakınca görülmemektedir.

Sonlu elemanlar modelini koşturmak için bütün gerekli girdiler sağlandıktan sonra başlangıç tasarımı için koşturulmuş ve ilgili yanıtlar elde edilmiştir. Başlangıç

tasarımı ve bu tasarıma karşılık elde edilen yanıtlar Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7’de verilmektedir.

Çizelge 3.6: Başlangıç tasarımının tasarım değişkenleri.

TD	Değerler
<i>a</i> (mm)	41.00
<i>b</i> (mm)	41.00
<i>p</i>	2.00
<i>s</i> (mm)	113.00

Çizelge 3.7: Başlangıç tasarımı için elde edilen yanıt değerleri.

Yanıtlar	Değerler
Ağırlık (g)	362.86
Maks. von Mises (MPa)	304.94
Min. Burkulma Özdeğeri	5.68

Çizelge 3.7’de sunulan değerler ışığında görülmektedir ki yapı mevcut tasarım durumunda malzeme akma dayanımı değerine çok yakın bir maksimum gerilme değerine sahiptir. Minimum burkulma özdeğeri kritik seviyelerde gözlenmemektedir. İlerleyen bölümlerde gerçekleştirilecek eniyileme çalışması sonucunda başlangıç tasarımının ağırlığından daha düşük ağırlık elde edilmesi hedeflenmektedir.



4 ÖZDEŞ DELİKLİ EŞİT ARALIKLI PROBLEMİN VEKİL MODEL TABANLI ENİYİLEMESİ

Problem tanımı bölümünde bahsedildiği üzere eniyileme problemi için iki farklı alternatif durum ele alınmıştır. İlk durumda giriş üzerindeki tüm delikler özdeş kabul edilerek delik geometrisi ve delikler arası mesafe tasarım değişkenleri olarak belirlenerek toplamda 4 tasarım değişkeni ile eniyileme gerçekleştirilirken, ikinci durumda ise yapıdaki üç deliğin geometrisi ve delikler aralarındaki mesafeler tasarım değişkeni olarak ele alınarak toplamda 11 tasarım değişkeni ile eniyileme yapılmıştır. Bu bölümde özdeş delikli eşit aralıklı durum için 4 tasarım değişkeni ile formülize edilen eniyileme probleminin çözüm süreci ve sonuçları verilmektedir.

İlk etapta eniyileme algoritmasının her döngüsünde hesaplanacak olan amaç ve kısıt fonksiyonlarını temsil etmesi için oluşturulacak vekil modellerin seçimi gerçekleştirilmiştir. Amaç fonksiyonu olan yapının ağırlığı ve kısıt fonksiyonları maksimum von Mises gerilmesi ve minimum burkulma özdeğeri, belirlenen tasarım değişkenlerinin farklı değerleri için sonlu elemanlar analizi kullanılarak elde edilebilir. Ancak eniyileme sırasında çok sayıda fonksiyon hesabının gerçekleşeceği ön görüldüğü için bu fonksiyonları kabul edilebilir hatalarla matematiksel olarak ifade edebilmeyi mümkün kılan vekil model yaklaşımı benimsenmiştir.

İlk olarak özdeş delikli eşit aralıklı problemdeki 4 tasarım değişkeni için latin hiperküp örnekleme yöntemi ile 40 adet tasarım (örnekleme noktası) oluşturulmuştur. Oluşturulan tasarımlar bir önceki bölümde detayları açıklanan sonlu elemanlar modeli yardımıyla oluşturulup her tasarım için üç yanıt değeri elde edilmiştir. Elde edilen yanıt değerleri kullanılarak polinom yanıt yüzey yöntemi (PYY2, PYY3), radyal tabanlı fonksiyonlar (İPE-RTF, ÇK-RTF) ve Kriging yöntemi (KR0, KR1, KR2) ile ilgilenilen her yanıt için bir vekil model oluşturulmuştur. Bu süreçte her bir geometriyi ayrı ayrı ABAQUS grafiksel kullanıcı arayüzünden oluşturup analiz etmek yerine Ek 1’de verilen Python tabanlı olarak yazılmış bir kod yardımıyla bütün tasarımlar otomatik olarak oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar bir çıktı dosyasına yazılmıştır (Hibbit vd., 2001).

Vekil modelleri oluştururken kullanılan 40 örnekleme noktasından farklı olmak üzere ek olarak 30 test noktası oluşturulmuş ve test noktaları vekil modellerin doğruluklarını değerlendirmek için kullanılmıştır. Test noktalarında vekil modellerin normleştirilmiş karekök ortalama hata ($RMSE_{norm}$) ve belirleme katsayısı (R^2) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler doğrultusunda eniyileme aşamasında hangi vekil modelin tercih edileceği belirlenmiştir. Çizelge 4.1 üç yanıt için oluşturulan her vekil model için ortaya çıkan hata metrikleri verilmektedir.

Çizelge 4.1: Oluşturulan vekil modellerin hata metrikleri.

		Maksimum von Mises Gerilmesi	Minimum Burkulma Özdeğeri	Yapının Ağırlığı
PYY2	$RMSE_{norm}$	0.0941	0.1608	0.0726
	R^2	0.8623	0.6359	0.9343
PYY3	$RMSE_{norm}$	0.1482	0.1870	0.0781
	R^2	0.6587	0.5075	0.9239
İPE-RTF	$RMSE_{norm}$	0.0433	0.0638	0.0935
	R^2	0.9708	0.9443	0.8908
ÇK-RTF	$RMSE_{norm}$	0.0764	0.0693	0.1074
	R^2	0.9088	0.9341	0.8561
KR2	$RMSE_{norm}$	0.0901	0.0792	0.0741
	R^2	0.8738	0.9116	0.9314
KR1	$RMSE_{norm}$	0.0666	0.0530	0.0701
	R^2	0.9310	0.9605	0.9386
KR0	$RMSE_{norm}$	0.0570	0.0725	0.0744
	R^2	0.9495	0.9260	0.9309

Çizelge 4.1’de verilen sonuçlara göre karesel polinom yanıt yüzeyi yöntemi (PYY2) ile oluşturulan modellerin ağırlık yanıtı için doğruluğu yüksek sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ancak maksimum von Mises gerilmesi ve minimum burkulma özdeğeri gibi daha karmaşık hesaplar içeren fonksiyonların temsilinde yeterli doğruluğu sağlayamamıştır. Radyal tabanlı fonksiyonlar incelendiğinde oluşturulan vekil modellerin genel anlamda her yanıt için kabul edilebilir sonuçlar verdiği görülmüştür. Özellikle ince-plaka eğrisi baz fonksiyonunun kullanıldığı İPE-RTF modelinin maksimum von Mises gerilmesini tahmin etme noktasında bütün modeller

arasında en iyi temsil kabiliyetine sahip olduğu sonucu çıkarılmıştır. Sabit, doğrusal ve karesel eğilim fonksiyonlu Kriging modelleri incelendiğinde ise hata metrikleri bu yöntemin diğer yöntemlere kıyasla çok daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. Özellikle doğrusal eğilim fonksiyonlu KR1 vekil modelinin minimum burkulma özdeğeri ve ağırlık yanıtlarında yüksek doğruluk gösterdiği görülmektedir.

Ele alınan bütün yöntemlerle vekil model oluşturulduktan sonra bu modeller kullanılarak her yöntem için Bölüm 2.11’de detaylandırılan algoritma ile 40 başlangıç noktası kullanılarak eniyileme gerçekleştirilmiştir. Eniyileme sonucunda elde edilen tasarımların sonlu elemanlar analizinde verdiği yanıtlar ve bu yanıtların model çıktısı olan yanıtlar ve her ikisinin karşılaştırılması sonucu ortaya çıkan hata değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Hata hesaplamasında Denklem (4.1)’de formülü verilen yüzdesel metrik kullanılmıştır. İzafi hata hesabında mutlak değer kullanılmasının sebebi vekil modellerin net performanslarının önem taşımasından ötürüdür.

$$\text{İzafi Hata} = \frac{|y_{tahmin} - y_{se}|}{|y_{se}|} * 100 \quad (4.1)$$

Bu denklemde y_{se} sonlu elemanlar (SE) analizi çıktısını, y_{tahmin} ise vekil model tahminini belirtir.

Çizelge 4.2’den de görülmektedir ki KR1 vekil modelleri Çizelge 4.1’deki hata metriklerinin de belirttiği gibi minimum burkulma özdeğeri ve ağırlık yanıtları için bütün yöntemler arasında sonlu elemanlar çıktısına en yakın sonuçları vermiştir. Maksimum von Mises gerilmesi yanıtı için en iyi sonucu vermemiş olsa da diğer iki yanıtta performansı göz önünde bulundurulduğunda KR1 yöntemi eniyileme aşamasında kullanılacak vekil model olarak seçilmiştir.

Maksimum von Mises gerilmesi değeri için elde edilen sonuç kabul edilebilir izafi hata değerine sahip olsa da bu yanıt düşük olarak tahmin edilmiş ve malzeme akma değerini aşmıştır. Bu sebeple vekil modelin doğruluğunu artırma gerekliliği doğmuştur. Modellerin daha iyi tahmin yapabilmesi için uygulanan geliştirme yöntemi Bölüm 2.13’de detaylı olarak verilmiştir.

Kısaca tekrar etmek gerekirse eniyileme sonucu elde edilen tasarım noktası, modeli oluşturmakta kullanılan tasarım noktalarına eklenerek yeni bir vekil model oluşturulur. Bu döngü vekil modeller yardımıyla elde edilen eniyileme sonucu bütün

kısıtları ve belirlenen hata yakınsama kriterini sağlayana kadar devam eder. Bahsi geçen kısıtlar Denklem (3.1)'de verilmiş olup yakınsama kriteri olarak ise Denklem (4.1)'de verilen izafi hata değerinin %0.1 eşik değerinin altına düşmesi belirlenmiştir. Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5 her üç vekil model için uygulanan iyileştirme döngüsünün adım adım sonuçlarını göstermektedir. Bu çizelgelerde yeşil olarak işaretlenmiş çözümler o yanıt için hem kısıtın hem de yakınsama kriterinin sağlandığını belirtmektedir. Bütün yanıtlar için izafi hata değeri %0.1 eşik değerinin altına düştüğündedöngü noktalanmıştır.

Çizelge 4.2: Model ve sonlu elemanlar analizi çıktılarının kıyası.

		Vekil Model Tahmini	SE Analiz Çıktısı	İzafi Hata (%)
PYY2	Maks. vM (MPa)	309.94	388.30	20.18
	Min. Özdeğer	6.01	5.84	2.91
	Ağırlık (g)	309.21	307.79	0.46
PYY3	Maks. vM (MPa)	310.00	1342.23	76.90
	Min. Özdeğer	4.44	5.84	23.97
	Ağırlık (g)	230.93	207.74	11.16
İPE-RTF	Maks. vM (MPa)	310.00	290.44	6.73
	Min. Özdeğer	5.32	5.44	2.21
	Ağırlık (g)	327.18	346.54	5.59
ÇK-RTF	Maks. vM (MPa)	309.86	286.70	8.08
	Min. Özdeğer	5.47	5.69	3.87
	Ağırlık (g)	338.31	345.52	2.09
KR2	Maks. vM (MPa)	309.90	357.54	13.32
	Min. Özdeğer	5.77	6.33	8.85
	Ağırlık (g)	313.96	320.91	2.17
KR1	Maks. vM (MPa)	310.00	322.97	4.02
	Min. Özdeğer	5.08	5.06	0.40
	Ağırlık (g)	334.16	333.97	0.06
KR0	Maks. vM (MPa)	310.00	311.29	0.41
	Min. Özdeğer	5.32	5.28	0.76
	Ağırlık (g)	338.49	338.08	0.12

Çizelge 4.3: Maksimum von Mises gerilmesi yanıtı için iyileştirme boyunca izafi hata değişimi.

Tasarım Noktası Sayısı	SE Analiz Çıktısı	Vekil Model Tahmini	İzafi Hata (%)
41	320.16	310.00	3.17
42	306.02	310.00	1.30
43	306.70	310.00	1.08
44	309.73	310.00	0.09
45	308.84	310.00	0.38
46	310.12	310.00	0.04
47	310.16	310.00	0.05
48	309.99	310.00	0.00

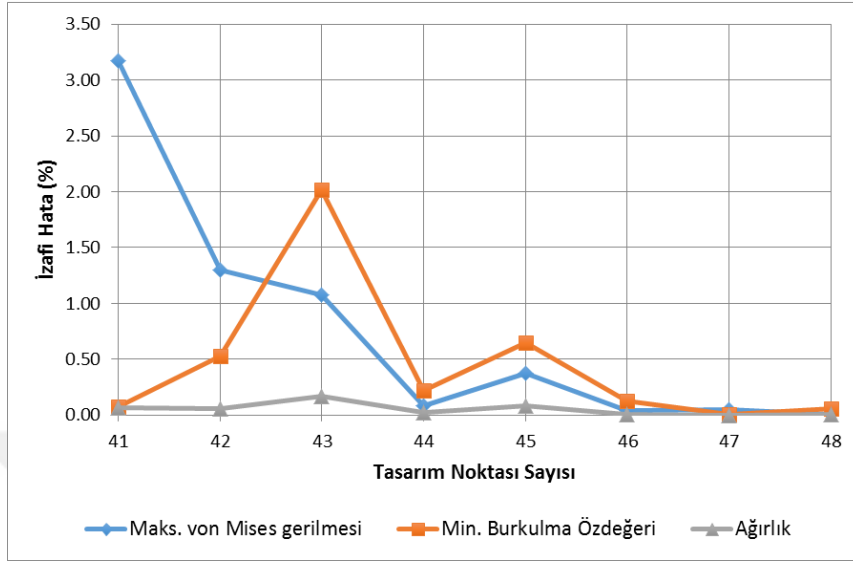
Çizelge 4.4: Minimum burkulma özdeğeri yanıtı için iyileştirme boyunca izafi hata değişimi.

Tasarım Noktası Sayısı	SE Analiz Çıktısı	Vekil Model Tahmini	İzafi Hata (%)
41	5.15	5.15	0.08
42	5.22	5.19	0.53
43	5.57	5.46	2.02
44	5.63	5.62	0.22
45	5.82	5.78	0.65
46	5.85	5.84	0.13
47	5.86	5.86	0.00
48	5.73	5.73	0.06

Çizelge 4.5: Ağırlık yanıtı için iyileştirme boyunca izafi hata değişimi.

Tasarım Noktası Sayısı	SE Analiz Çıktısı	Vekil Model Tahmini	İzafi Hata (%)
41	333.80	334.02	0.07
42	336.92	337.12	0.06
43	333.50	332.93	0.17
44	332.28	332.36	0.02
45	332.14	331.86	0.09
46	331.67	331.70	0.01
47	331.71	331.71	0.00
48	331.33	331.30	0.01

Çizelgelerden de görüldüğü üzere 8 iterasyon sonucunda bütün kısıtlar sağlanmış ve üç vekil model için de hata eşiğinin altına düşürülmüştür. Şekil 4.1’de tüm vekil modeller için iyileştirme süreci boyunca izafi hata değişimleri görülebilir.



Şekil 4.1: İyileştirme sürecinde vekil modellerdeki izafi hata değişimi.

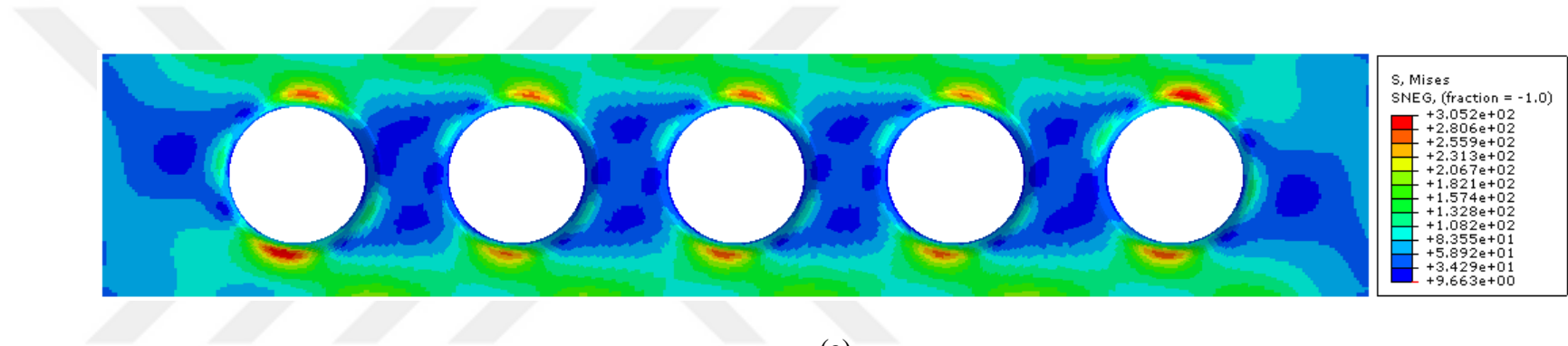
Eniyileme sonucunda elde edilen tasarımın tasarım değişkenleri başlangıç tasarımı ile kıyaslanması için Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6: Başlangıç tasarımı ve eniyelenmiş tasarımın kıyası.

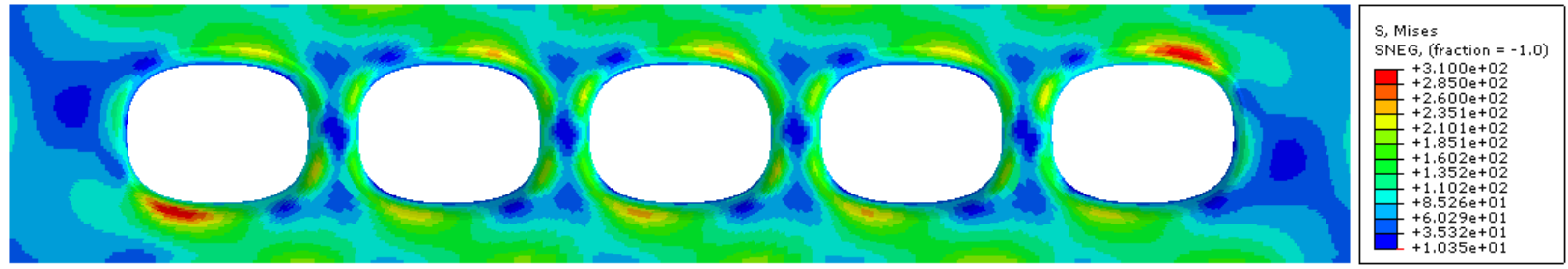
TD	Başlangıç Tasarımı	Eniyelenmiş Tasarım
<i>a</i>	41.00	50.00
<i>b</i>	41.00	39.31
<i>p</i>	2.00	2.60
<i>s</i>	113.00	112.47

Çizelge 4.6’da sunulan sonuçlara göre, deliklerin yatay yarıçapı olan *a* değeri ağırlığı azaltmak için büyürken dikey yarıçap *b* değeri kiriş kenarlarından uzaklaşıp gerilme konsantrasyonunu azaltmak için bir miktar küçülmüştür. Eğrilik faktörü *p*’nin küçük değişiminden anlaşılacağı üzere delikler dairesellikten çok uzaklaşmamışlardır. Merkezler arası delik mesafesi olan *s* değeri ise süreç sonucunda kayda değer değişim yaşamamıştır.

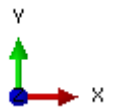
Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 başlangıç ve eniyelenmiş tasarımın sonlu elemanlar analizi sonuçlarını görselleştirmektedir.



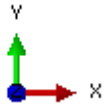
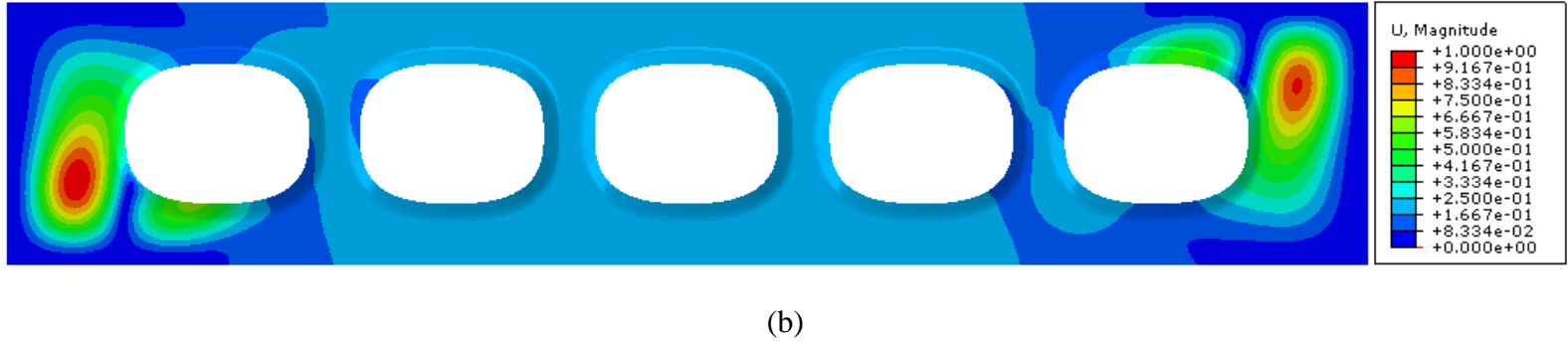
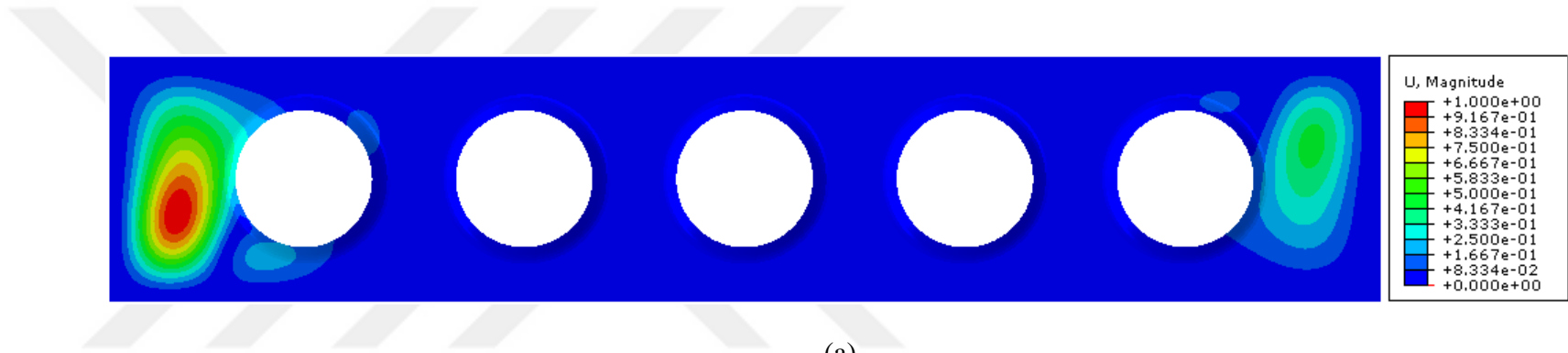
(a)



(b)



Şekil 4.2: Sırasıyla (a) başlangıç ve (b) eniyenmiş tasarım için von Mises gerilme dağılımı.



Şekil 4.3: Sırasıyla (a) başlangıç ve (b) eniyilenmiş tasarım için burkulma özvektör dağılımı.

Şekil 4.2'den açıkça gözlemlenmektedir ki von Mises gerilmesinin yapı boyunca dağılımı eniyilenmiş tasarımla beraber daha düzenli hale gelmiştir. Yapıdaki düşük gerilmeye sahip bölgeler genişleyen delikler sayesinde ağırlık azaltımı için kullanılmıştır. Şekil 4.3'ten ilk burkulma modundaki özvektörün de daha homojen hale geldiği görülmektedir.

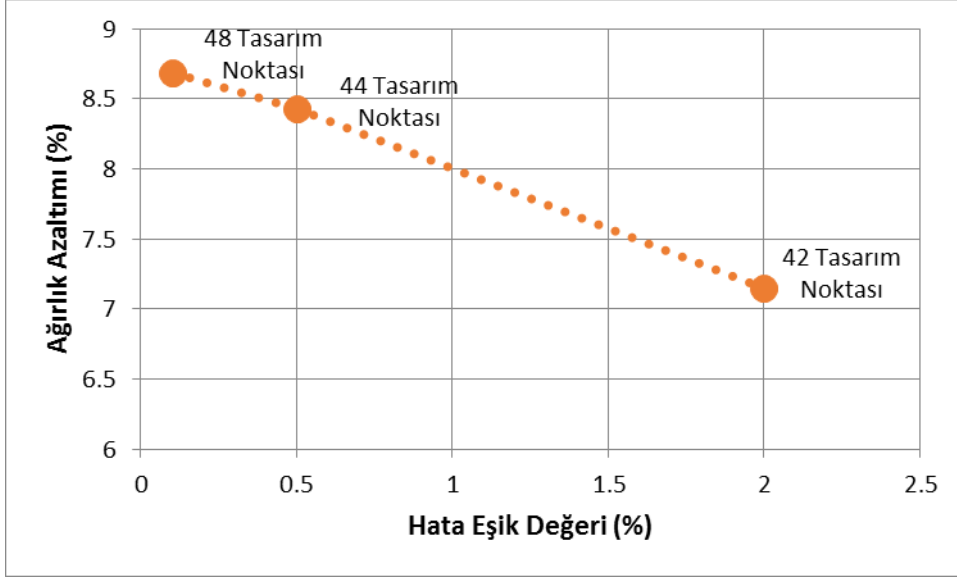
Çizelge 4.7'de eniyileme sonucunda elde edilmiş tasarımın ve başlangıç tasarımının sonlu elemanlar analizi çıktıları verilmektedir.

Çizelge 4.7: Başlangıç tasarımı ve eniyilenmiş tasarımın yanıtlarının kıyası.

Yanıtlar	Başlangıç Tasarımı	Eniyilenmiş Tasarım
Ağırlık (g)	362.86	331.33
Maks. von Mises Gerilmesi (MPa)	304.94	309.99
Min. Burkulma Özdeğeri	5.68	5.73

Çizelge 4.7'de verilen değerlere bakılarak söylenebilir ki maruz kaldığı yükler altında yapıda gözlemlenen maksimum von Mises gerilme değeri eniyileme ile birlikte malzemenin akma dayanımının hemen altındadır. Aynı zamanda yapının ilk mod burkulmasının uygulanan yükün ancak en az 5 katı yük seviyelerinde gerçekleşeceği görülmektedir. Bu sebeple eniyilenmiş yapı güvenli olarak kabul edilebilir. Eniyileme sonucunda yapının ağırlığı %8.69 azaltılmıştır.

Elde edilen ağırlık azaltımı değerinin vekil model iyileştirme aşamasında belirlenen izafi hata eşik değerine bağlı olduğunu göz ardı etmemek gerekir. Eğer daha büyük eşik değeri belirlenmiş olsaydı döngüyü daha büyük ağırlık değerlerine sahip tasarım noktasında sonlandırmak mümkün olabilirdi. Şekil 4.4'te ağırlık azaltım yüzdesinin hata eşik değerine bağlı değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.4: Ağırlık azaltımının hata eşik değerine bağlı değişimi.

5 ÖZDEŞ OLMAYAN DELİKLİ FARKLI ARALIKLI PROBLEMİN VEKİL MODEL TABANLI ENİYİLEMESİ

Eniyileme çalışması için göz önünde bulundurulanan problemin bir diğer durumunda giriş üzerindeki deliklerin özdeş olduğu varsayımından vazgeçerek üç deliğin parametreleri tasarım değişkeni olarak ele alınmıştır. Problem tanımında da belirtildiği gibi bu durumda 11 tasarım değişkeni ile eniyileme gerçekleştirilmiştir.

Vekil model yöntemi seçimi özdeş delikli eşit aralıklı problem için yapıldığından bu bölümde mevcut çalışmanın sonuçlarından yararlanılarak KR1 yöntemi kullanılmıştır. Latin hiperküp örnekleme yöntemi ile 110 tasarım noktası oluşturulmuş ve bu tasarım noktalarında elde edilen üç yanıt için vekil modeller oluşturulmuştur. Ardından vekil modelleri oluşturmak için tasarım noktalardan farklı olarak 30 test noktası daha oluşturulup vekil modeller bu 30 test noktasında değerlendirilmiştir. Çizelge 5.1’de KR1 yöntemi ile üç yanıt için oluşturulan vekil modellerin hata metrikleri görülmektedir.

Çizelge 5.1: KR1 yöntemi ile oluşturulmuş vekil modellerin hata metrikleri.

	Maksimum von Mises Gerilmesi	Minimum Burkulma Özdeğeri	Yapının Ağırlığı
RMSE _{norm}	0.0632	0.1016	0.1334
R ²	0.9174	0.7675	0.7071

Özdeş delikli eşit aralıklı problemle kıyasladığımız zaman tasarım değişkeni sayısının neredeyse 3 katına çıktığını göz önünde bulunduracak olursak vekil model performanslarında da düşme beklemek makul olacaktır. Ancak bu durum vekil model iyileştirme uygulaması ile telafi edilebilir.

Model iyileştirme safhasında döngüyü sonlandırmak için kullanılan hata eşik değeri %0.1 olarak belirlenip Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’te sunulan akış şemalarında

detaylandırılmış olan süreç 11 tasarım değişkenli problem için uygulanmıştır. Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'te her döngüde elde edilen tasarım çözümlerinin sonlu elemanlar yanıtları ve vekil model tahminleri ile birlikte izafi hatanın değişimi de verilmektedir. Hatırlatılmalıdır ki üç vekil model için de problem kısıtları sağlandığında ve hata eşik değerinin altında izafi hata değerleri elde edildiğinde döngü sonlandırılmıştır.

Çizelge 5.2: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problem için maksimum von Mises gerilmesi vekil modelinin iyileştirme boyunca izafi hata değişimi.

Tasarım Noktası Sayısı	SE Analiz Çıktısı	Vekil Model Tahmini	İzafi Hata (%)
110	326.50	310.00	5.05
111	300.16	310.00	3.28
112	443.85	310.00	30.16
113	316.13	310.00	1.94
114	330.57	310.00	6.22
115	309.79	310.00	0.07
116	321.89	310.00	3.69
117	328.19	310.00	5.54
118	333.35	310.00	7.01
119	316.55	310.00	2.07
120	314.02	310.00	1.28
121	323.97	310.00	4.31
122	318.34	310.00	2.62
123	313.22	310.00	1.03
124	307.48	310.00	0.82
125	308.62	310.00	0.45
126	313.51	310.00	1.12
127	330.66	310.00	6.25
128	309.68	310.00	0.10
129	313.36	310.00	1.07
130	313.67	310.00	1.17
131	311.60	310.00	0.51
132	341.51	310.00	9.23
133	304.45	310.00	1.82
134	309.52	310.00	0.15
135	309.27	310.00	0.23
136	309.90	310.00	0.03

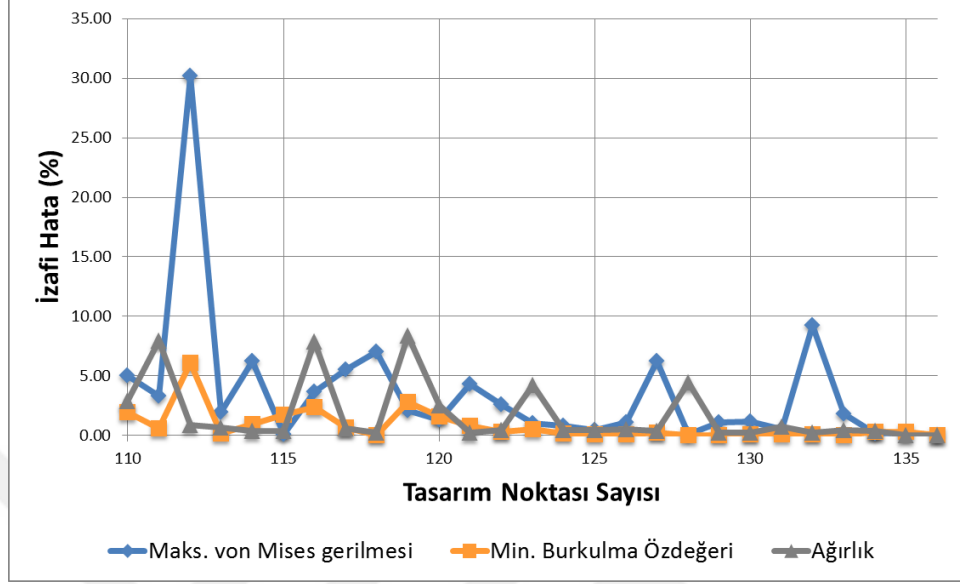
Çizelge 5.3: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problem için minimum burkulma özdeğeri vekil modelinin iyileştirme boyunca izafi hata değişimi.

Tasarım Noktası Sayısı	SE Analiz Çıktısı	Vekil Model Tahmini	İzafi Hata (%)
110	4.71	4.80	1.95
111	4.95	4.92	0.60
112	4.74	5.03	6.10
113	5.45	5.45	0.14
114	5.20	5.14	0.98
115	5.57	5.66	1.75
116	5.37	5.49	2.36
117	5.57	5.54	0.68
118	5.63	5.63	0.06
119	4.68	4.81	2.83
120	5.07	5.16	1.61
121	5.70	5.66	0.78
122	5.72	5.70	0.34
123	5.67	5.70	0.50
124	5.55	5.56	0.16
125	5.59	5.59	0.08
126	5.69	5.68	0.12
127	5.37	5.36	0.24
128	5.65	5.65	0.05
129	5.67	5.66	0.05
130	5.67	5.67	0.09
131	5.62	5.63	0.11
132	5.45	5.45	0.11
133	5.51	5.51	0.02
134	5.68	5.66	0.33
135	5.63	5.61	0.29
136	5.62	5.62	0.02

Çizelge 5.4: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problem için ağırlık vekil modelinin iyileştirme boyunca izafi hata değişimi.

Tasarım Noktası Sayısı	SE Analiz Çıktısı	Vekil Model Tahmini	İzafi Hata (%)
110	332.44	322.81	2.90
111	347.34	319.65	7.97
112	327.32	324.52	0.85
113	330.48	328.35	0.65
114	330.55	329.20	0.41
115	329.95	328.73	0.37
116	340.17	313.42	7.86
117	328.37	326.31	0.63
118	325.60	324.73	0.27
119	350.67	321.31	8.37
120	333.73	325.22	2.55
121	327.00	327.90	0.28
122	329.34	327.90	0.44
123	315.50	328.91	4.25
124	329.18	327.66	0.46
125	328.43	326.96	0.45
126	328.43	326.73	0.52
127	326.22	325.05	0.36
128	330.81	316.04	4.47
129	315.94	316.76	0.26
130	314.58	315.24	0.21
131	315.82	318.08	0.72
132	326.77	326.01	0.23
133	327.39	325.88	0.46
134	326.61	325.24	0.42
135	324.91	324.93	0.00
136	324.74	324.76	0.01

Çizelgelerden görülmektedir ki 26 iterasyon sonucunda tüm kısıtlar ve yakınsama kriterleri sağlanmıştır. Şekil 5.1’de ise vekil model hatalarının model iyileştirme döngüsü boyunca değişimleri görselleştirilmiştir.



Şekil 5.1: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problemin iyileştirme sürecinde vekil modellerin hata değişimleri.

Eniyilenmiş yapının tasarımın değişkenleri Çizelge 5.5’te sunulmaktadır. Başlangıç tasarımının boyutlarıyla kıyaslayacak olursak birkaç çıkarımda bulunulabilir. Uç ve ara deliklerin yatay yarıçapı olan a_2 ve a_3 değerleri ağırlık azaltımı amacı ile üst sınırlara dayanmakta iken, merkez deliğin yatay yarıçapı olan a_1 değerinde çok az bir artış görülmektedir. Arada küçük farklar olmasına rağmen uç deliğin dikey yarıçapı b_3 değeri kirişin ucundan başlayan gerilme konsantrasyonundan kaçınmak için diğer deliklerin dikey yarıçaplarına kıyasla daha küçük olarak elde edilmiştir. En ilgi çekici olarak değerlendirebileceğimiz çıkarım ise eğrilik faktörleri hakkındaki gözlemlerdir. Kiriş merkezinden ucuna ilerledikçe delikler daha dairesel şekil alma eğilimi göstermektedir. Bu sonuç aynı zamanda kirişin uç kısımlarında bulunan deliklerin gerilme konsantrasyonunun daha çok etkisinde kaldığı çıkarımını da desteklemektedir. Aynı eksende bulduklarından dolayı merkezler arası delik mesafelerinin deliklerin yatay yarıçapları tarafından doğrudan etkilendiklerini söylemek doğru olacaktır. Merkez delik ile ara delikler arası mesafe olan s_1 ile ara delikler ile uç delikler arası mesafe olan s_2 değerleri birbirlerinden farklı olarak

görülse de ilgili deliklerin yatay yarıçapları bu değerlerden çıkarıldığından görülecektir ki delikler arası kalan dolu mesafe birbirine çok yakın seyretmektedir.

Çizelge 5.5: Başlangıç tasarımı ve eniyilenmiş özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarımın kıyası.

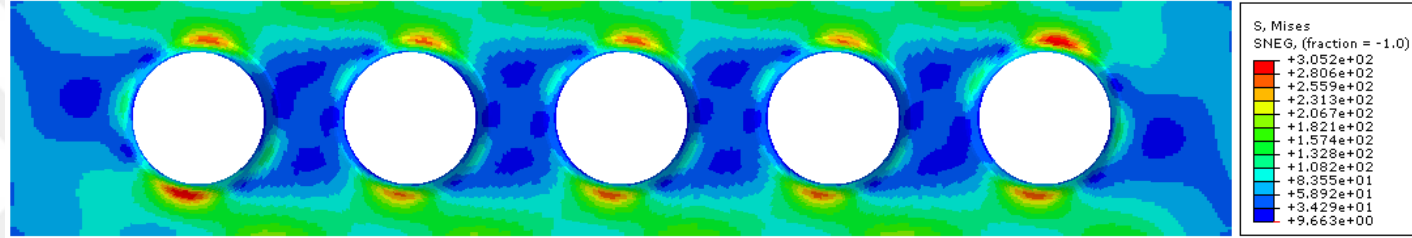
TD	Başlangıç Tasarımı	Eniyilenmiş Tasarım
a_1	41.00	44.74
b_1	41.00	40.92
p_1	2.00	4.15
s_1	113.00	106.74
a_2	41.00	50.00
b_2	41.00	43.00
p_2	2.00	2.93
s_2	113.00	114.76
a_3	41.00	50.00
b_3	41.00	39.95
p_3	2.00	2.25

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 başlangıç tasarım, eniyilenmiş özdeş delikli eşit aralıklı tasarım ve eniyilenmiş özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarımın sonlu elemanlar analizi sonuçlarını görsellemektedir.

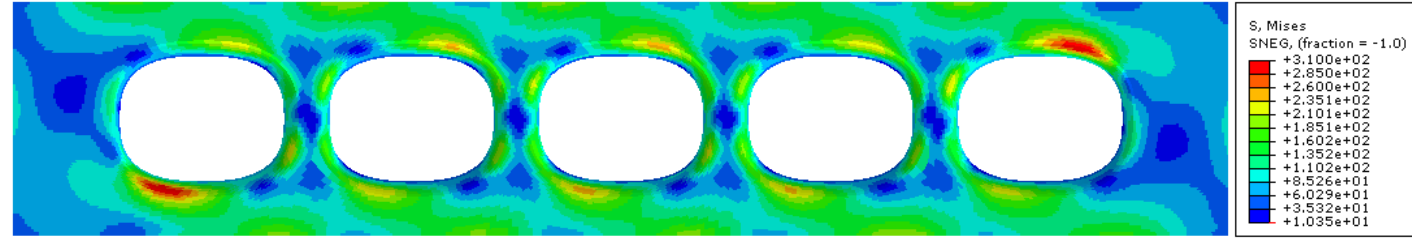
Şekil 5.2 göstermektedir ki von Mises gerilmesinin yapı boyunca dağılımı başlangıç tasarımından eniyilenmiş özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarıma doğru daha düzenli hale gelmiştir. Eniyilenmiş özdeş delikli eşit aralıklı ve özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarımlar arasındaki fark görsellerden belirgin olarak anlaşılmasa da Çizelge 5.6’da verilen değerlerden rahatlıkla farkedilebilir.

Çizelge 5.6: Başlangıç tasarımı, eniyilenmiş özdeş delikli eşit aralıklı tasarım ve eniyilenmiş özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarımın yanıtlarının kıyası.

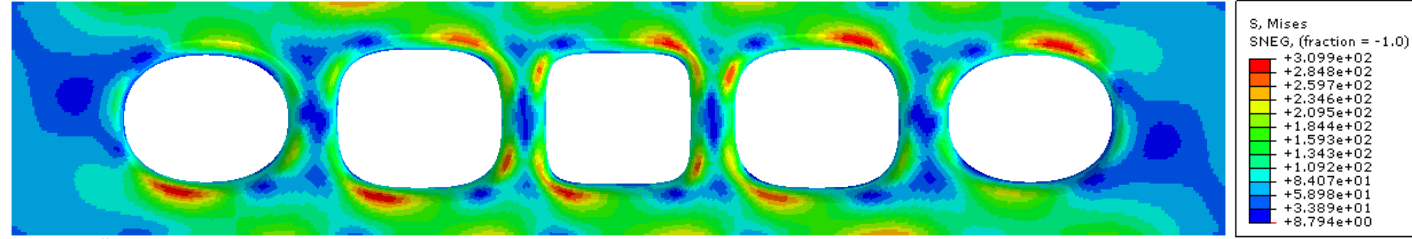
Yanıtlar	Başlangıç Tasarımı	Eniyilenmiş Özdeş Delikli Eşit Aralıklı Tasarım	Eniyilenmiş Özdeş Olmayan Delikli Farklı Aralıklı Tasarım
Ağırlık (g)	362.86	331.33	324.74
Maks. von Mises Gerilmesi (MPa)	304.94	309.99	309.90
Min. Burkulma Özdeğeri	5.68	5.73	5.62



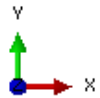
(a)



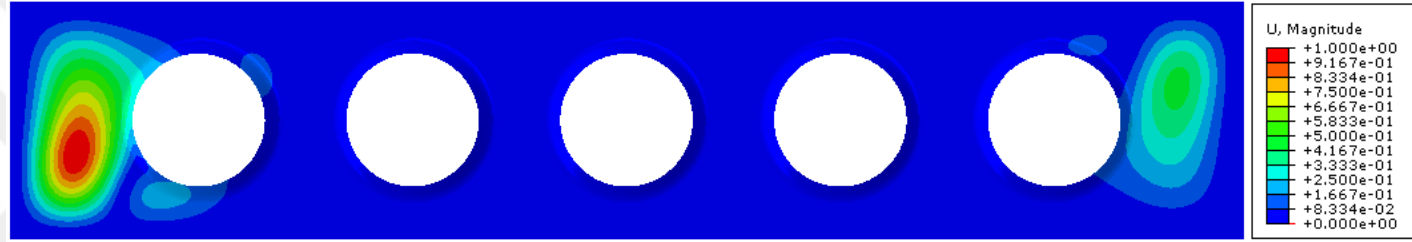
(b)



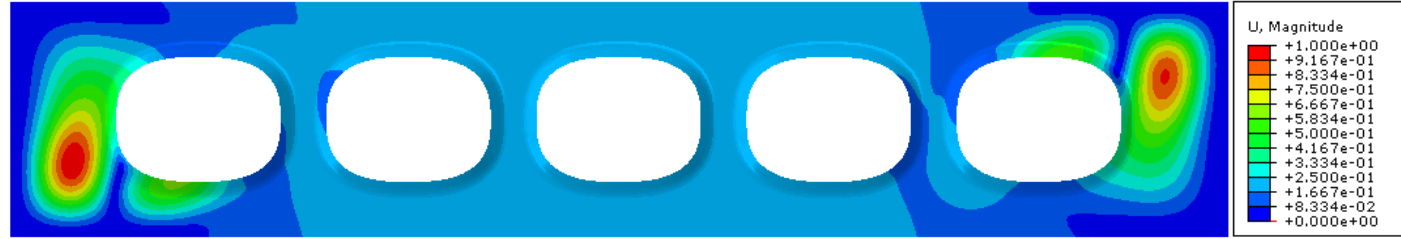
(c)



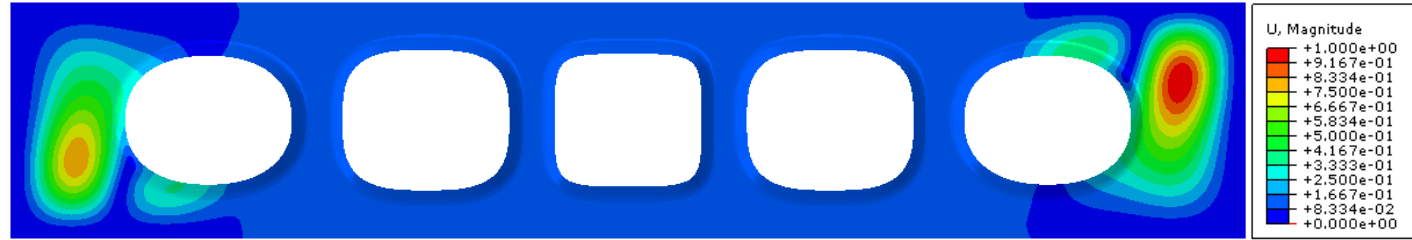
Şekil 5.2: Sırasıyla (a) başlangıç tasarımı, (b) eniyilenmiş özdeş delikli eşit aralıklı tasarımı ve (c) eniyilenmiş özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarımı için von Mises gerilme dağılımı.



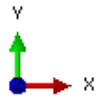
(a)



(b)



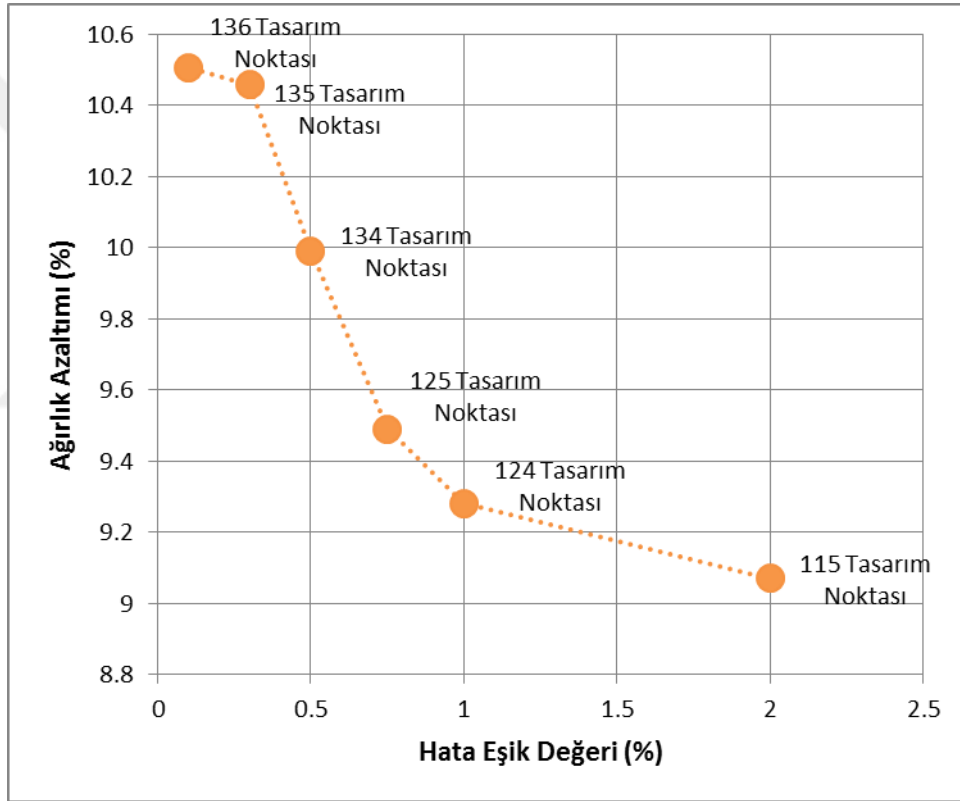
(c)



Şekil 5.3: Sırasıyla (a) başlangıç tasarım, (b) eniyilenmiş özdeş delikli eşit aralıklı tasarım ve (c) eniyilenmiş özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarım için burkulma özvektör dağılımı.

Daha fazla tasarım değişkeninin kullanılması ile özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarımın eniyilemesi sonucunda %10.5 ağırlık azaltımı kısıtları ihlal etmeden başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Özdeş delikli eşit aralıklı problem için yapıldığı gibi ağırlık azaltım yüzdesinin vekil model iyileştirme döngüsü öncesinde belirlenen hata eşik değerine olan bağımlılığını görsellemek için Şekil 5.4'teki grafik verilmiştir. Bu grafikten görülmektedir ki seçilen farklı hata eşik değerleri için farklı ağırlık azaltım yüzdeleri elde edilmektedir. Buradan çıkarılacak sonuç ise daha düşük seçilecek hata eşik değeri daha yüksek ağırlık azaltım yüzdelerine yol açabilir.



Şekil 5.4: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problem için ağırlık azaltımının hata eşik değerine bağlı değişimi.



6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Havacılık yapılarında kullanılan hafifletme delikleri, ağırlık azaltımı esas hedef olduğunda akla ilk gelen uygulamalardandır. Açılan deliğin alanının mümkün olan en büyük şekilde açılabilmesi bu uygulamanın verimliliğini de arttırmaktadır. Bu yüksek lisans tezinde hafifletme deliğinin alanının enbüyüklenmesi ağırlık azaltımı amacıyla bir eniyileme problemi olarak ele alınmıştır. Bu amaç doğrultusunda bir helikopter gövde yapısının ana taşıyıcı giriş yapılarından biri problemin öznesi kabul edilmiştir. Problem özdeş delikli eşit aralıklı ve özdeş olmayan delikli farklı aralıklı olmak üzere iki durum üzerinden incelenmiştir.

Bu problemin çözüm sürecinde bir kaç farklı yaklaşım birlikte kullanılmıştır. Hesapsal olarak maliyetli olan çok sayıda sonlu elemanlar analizinin önüne geçebilmek için ilgilenilen girdi ile çıktı arasında basit matematiksel ilişki kuran vekil modeller kullanılmıştır. Vekil model oluştururken kullanılacak çeşitli yöntemler arasından hangi yöntemin eniyilemede kullanılacağını belirlemek için bütün yöntemlerle oluşturulan modellerin performansları değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda doğrusal eğilim fonksiyonlu Kriging modelinin (KR1) kullanılmasına karar verilmiştir.

Eniyileme yöntemi olarak çoklu başlangıç noktalı gradyan-tabanlı eniyileme yöntemi kullanılmıştır. Çoklu başlangıç noktası kullanmak algoritmaya getirdiği rassallık ile yerel optimal çözümlerden kaçınmayı sağlarken gradyan-tabanlı eniyileme yöntemi kullanarak da çözüm elde etme hızında artış sağlanmıştır.

Vekil model tabanlı eniyileme sonucunda görülmüştür ki kullanılan modeller kabul edilebilir seviyelerde performans göstermektedirler ancak elde edilen çözüm olursuzdur. Bu noktada vekil modellere tekrarlı şekilde iyileştirme uygulanmıştır. Kurulan döngüye göre eniyilemede elde edilen her çözüm vekil model oluşturmada kullanılan örnekleme noktalarına eklenerek modeller güncellenmiştir. Bu döngü tüm

kısıtlar sağlanana kadar ve bütün vekil modeller belirlenen eşik değerinin altında hata değerine sahip olana kadar devam etmektedir.

Vekil modellerin ve çoklu başlangıç noktalı gradyan-tabanlı eniyileme algoritmasının yardımları ile özdeş delikli eşit aralıklı problem için 4 tasarım değişkeni ile %8.69, özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problem için 11 tasarım değişkeni ile %10.5 ağırlık azaltımı, malzeme akma kriterini ihlal etmeden ve de burkulmaya sebep vermeden başarılmıştır. Bu uygulamanın gövde yapısındaki tek giriş için örnek olarak yapıldığı belirtilmelidir. Uygulamayı yapı boyunca bulunan hafifletme deliği içeren girişler için yapıldığında azımsanamayacak miktarlarda ağırlık azaltımı değerlerine erişilebilir.

Eniyileme sonucu elde edilen tasarımlar incelendiğinde çeşitli çıkarımlar yapılabilir. Özdeş delikli eşit aralıklı problemin çözümü ile elde edilen eniyilenmiş tasarıma bakıldığında deliklerin dairesellikten fazla sapmadıkları görülmektedir. Aynı zamanda ağırlık azaltımı için delikler enine genişlerken gerilme konsantrasyonundan uzaklaşmak adına dikey olarak küçüklüğü de gözlenmektedir. Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problemin çözümünün sonucunda eniyi olarak kabul edilen tasarım incelendiğinde delik şeklinin giriş merkezinden uçlara ilerledikçe daireselleştiği çıkarımı rahatlıkla yapılabilir. Bunun sebebi olarak giriş ucunda bulunan deliklerden başlayan gerilme konsantrasyonundan kaçınma gösterilebilir. Deliklerin yatay yarıçapları göz önünde bulundurulursa eniyilenmiş tasarımda bu boyutların ağırlık azaltımı hedefi doğrultusunda tüm delikler için arttığı, hatta uç ve ara delikler için üst sınıra dayandığı gözlemlenebilir. Dikey yarıçaplardaki değişim fazla olmasa da yine gerilme konsantrasyonu sebebiyle uç deliklerde azalma görülmektedir.

Bu tezde anlatılan çalışmalara ek olarak:

- Tasarım değişkeni olarak delik güçlendirmesinin boyutları ele alınabilir.
- Mevcut durumda delik güçlendirme boyutları delik boyutlarından bağımsız olarak ele alınmıştır. Güçlendirme boyutlarının delik boyutuna göre değiştiği bir yapı göz önünde bulundurulabilir.
- Eniyileme için kullanılan vekil modellerde tek tip yerine her yanıt için farklı vekil model kullanılabilir.

- Bu çalışmada helikopterin pull-up manevrası sırasında oluşan yükler üzerinden bir eniyileme çalışması gerçekleştirilmiştir. Aynı çalışma helikopterin acil iniş veya roll manevrası gibi ekstrem durumları altında gerçekleştirilip hafifletme deliklerinin alacakları şekiller gözlemlenebilir.
- Başlangıç tasarımının, özdeş delik eşit aralık yaklaşımıyla eniyelenmiş tasarımın ve özdeş olmayan delik farklı aralık yaklaşımıyla eniyelenmiş tasarımın test vasıtası ile doğrulaması yapılabilir.





KAYNAKLAR

- Abidin, A. Z., & Izzuddin, B. A.** (2013). Meshless local buckling analysis of steel beams with irregular web openings. *Engineering Structures*, 50, 197-206.
- Acar, E.** (2013). Effects of the correlation model, the trend model, and the number of training points on the accuracy of Kriging metamodels. *Expert Systems*, 30(5), 418-428.
- Antoniou, A., & Lu, W. S.** (2007). *The Optimization Problem* (pp. 1-26). Springer US.
- Anuja, G., & Katukam, R.** (2015). Parametric studies on the cutouts in heavily loaded aircraft beams. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 1568-1576.
- Barrett, J. P.** (1974). The coefficient of determination—some limitations. *The American Statistician*, 28(1), 19-20.
- Bartholomew, P.** (1997). A future for structural optimization in aerospace. *Engineering Optimization*, 29(1-4), 1-21.
- Broomhead, D. S., & Lowe, D.** (1988). Radial basis functions, multi-variable functional interpolation and adaptive networks (No. RSRE-MEMO-4148). Royal Signals and Radar Establishment Malvern (United Kingdom).
- Das, R., & Jones, R.** (2009). Designing cutouts for optimum residual strength in plane structural elements. *International journal of fracture*, 156(2), 129-153.
- Desrochers, M., Desrosiers, J., & Solomon, M.** (1992). A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Operations research*, 40(2), 342-354.
- Durelli, A. J., & Rajaiah, K.** (1979). Optimum hole shapes in finite plates under uniaxial load. *Journal of Applied Mechanics*, 46(3), 691-695.
- Falzon, B. G., Steven, G. P., & Xie, Y. M.** (1996). Shape optimization of interior cutouts in composite panels. *Structural optimization*, 11(1-2), 43-49.
- Friedl, G., & Kuczmann, M.** (2014). Population and gradient based optimization techniques, a theoretical overview. *Acta Technica Jaurinensis*, 7(4), 378-387
- Gendy, B. L.** (2016). Critical Shear Buckling Load of Tapered Plate with Circular Opening. *HBRC Journal*, 12(3), 296-304.
- Haftka, R. T., & Gürdal, Z.** (2012). *Elements of structural optimization* (Vol. 11). Springer Science & Business Media.

- Hibbitt, Karlsson, & Sorensen.** (2001). ABAQUS/Standard user's manual (Vol. 1). Hibbitt, Karlsson & Sorensen.
- Heller, M., Kaye, R., & Rose, L. R. F.** (1999). A gradientless finite element procedure for shape optimization. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 34(5), 323-336.
- Iman, R. L.** (2008). Latin hypercube sampling. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*.
- Katukam, R., & Reddy, K. A.** (2015). Cut-outs in Structural Design: A Review.
- Kaveh, A., & Shokohi, F.** (2015). Cost optimization of end-filled castellated beams using metaheuristics algorithms. *Int. J. Optim. Civil Eng*, 5(3), 333-354.
- Kuhn, P.** (1942). The Strength and Stiffness of Shear Webs with Round Lightening Holes Having 45 Flanges. NACA.
- Kusiak, A., & Song, Z.** (2010). Design of wind farm layout for maximum wind energy capture. *Renewable energy*, 35(3), 685-694.
- Lewis, R. M., & Huysse, L.** (2001). Aerodynamic shape optimization of two dimensional airfoils under uncertain conditions (No. ICASE-2001-1). Institute for Computer Applications In Science And Engineering Hampton, VA.
- Lophaven, S. N., Nielsen, H. B., & Søndergaard, J.** (2002). DACE: a Matlab kriging toolbox (Vol. 2). IMM, Informatics and Mathematical Modelling, The Technical University of Denmark.
- Mack, Y., Goel, T., Shyy, W., & Haftka, R.** (2007). Surrogate model-based optimization framework: a case study in aerospace design. In *Evolutionary computation in dynamic and uncertain environments* (pp. 323-342). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Mantica, S., Cominelli, A., & Mantica, G.** (2001). Combining global and local optimization techniques for automatic history matching production and seismic data. In *SPE Reservoir Simulation Symposium*. Society of Petroleum Engineers.
- 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.
- Nearchou, A. C.** (2011). Maximizing production rate and workload smoothing in assembly lines using particle swarm optimization. *International Journal of Production Economics*, 129(2), 242-250.
- Orun, A. E., & Guler, M. A.** (2017). Effect of hole reinforcement on the buckling behavior of thin-walled beams subjected to combined loading. *Thin-Walled Structures*, 118, 12-22.
- Panedpojaman, P., Thepchatri, T., & Limkatanyu, S.** (2014). Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams. *Thin-walled structures*, 76, 92-104.
- Park, G. J.** (2007). Design of experiments. *Analytic Methods for Design Practice*, 309-391.

- Potra, F. A., & Wright, S. J.** (2000). Interior-point methods. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 124(1-2), 281-302.
- Queipo, N. V., Haftka, R. T., Shyy, W., Goel, T., Vaidyanathan, R., & Tucker, P. K.** (2005). Surrogate-based analysis and optimization. *Progress in aerospace sciences*, 41(1), 1-28.
- Rajashekhar, M. R., & Ellingwood, B. R.** (1993). A new look at the response surface approach for reliability analysis. *Structural safety*, 12(3), 205-220.
- Simpson, T. W., Mauery, T. M., Korte, J. J., & Mistree, F.** (2001). Kriging models for global approximation in simulation-based multidisciplinary design optimization. *AIAA journal*, 39(12), 2233-2241.
- Tsavdaridis, K. D., & D'Mello, C.** (2011). Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(10), 1605-1620.
- Viana, F. A.** (2011). Multiple surrogates for prediction and optimization. University of Florida. Gainesville, FL.
- Viana, F. A., Haftka, R. T., & Steffen, V.** (2009). Multiple surrogates: how cross-validation errors can help us to obtain the best predictor. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 39(4), 439-457.
- Young, C.** (2001). Shape sensitivity analysis using a fixed basis function finite element approach (Doctoral dissertation, National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada).



EKLER

EK 1: Özdeş delikli eşit aralıklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 40 örneklem noktası ve yanıtları.

Çizelge Ek.1: Özdeş delikli eşit aralıklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 40 örneklem noktası ve yanıtları.

	a	b	p	s	VM	Burkulma	Ağırlık
Örneklem-1	41.00	41.00	2.00	113.00	304.94	5.68	362.86
Örneklem-2	36.02	42.19	5.62	94.44	399.04	3.46	352.70
Örneklem-3	43.66	44.91	4.24	109.91	422.32	5.48	318.25
Örneklem-4	30.69	43.97	3.67	137.67	530.34	6.13	372.25
Örneklem-5	47.35	32.14	7.51	132.77	491.10	4.60	353.07
Örneklem-6	44.73	46.12	5.14	127.63	567.24	5.55	306.96
Örneklem-7	41.18	30.62	7.04	138.62	587.62	4.40	374.60
Örneklem-8	32.98	39.57	2.68	85.22	298.55	3.03	380.33
Örneklem-9	37.52	43.22	7.24	110.27	446.79	5.04	342.54
Örneklem-10	37.75	44.71	2.20	115.68	357.95	6.13	358.32
Örneklem-11	49.25	38.42	7.59	134.02	773.35	4.36	319.87
Örneklem-12	45.69	43.42	7.70	122.26	547.90	5.29	312.46
Örneklem-13	47.86	47.29	5.42	118.87	546.61	5.49	288.71
Örneklem-14	41.81	35.95	2.83	123.06	284.39	5.73	364.03
Örneklem-15	34.92	32.63	3.08	129.62	272.40	4.83	389.98
Örneklem-16	46.49	34.81	6.45	120.04	357.80	4.96	344.41
Örneklem-17	36.86	37.18	7.19	89.95	368.35	3.17	365.44
Örneklem-18	33.40	36.56	2.31	139.19	363.97	5.20	389.67
Örneklem-19	34.17	47.52	6.65	82.75	544.25	2.98	342.15
Örneklem-20	42.42	31.70	7.93	115.87	319.13	4.80	366.42
Örneklem-21	40.53	41.15	4.51	97.54	372.59	3.80	342.30
Örneklem-22	43.94	33.35	5.94	112.77	305.47	5.09	357.96
Örneklem-23	49.54	46.72	4.71	129.69	650.41	4.96	286.21
Örneklem-24	48.24	33.80	3.51	112.71	277.42	5.19	350.50
Örneklem-25	39.06	40.36	6.86	132.87	510.04	5.43	347.80
Örneklem-26	48.67	49.95	6.61	125.57	741.08	4.46	272.45
Örneklem-27	31.59	37.78	3.93	94.86	290.93	3.33	382.89
Örneklem-28	31.18	31.11	5.79	87.94	264.82	2.99	398.49
Örneklem-29	33.91	34.43	4.93	92.96	280.75	3.23	383.14
Örneklem-30	41.42	39.01	2.53	125.87	324.68	6.21	358.43
Örneklem-31	38.23	36.89	2.02	89.28	265.56	3.21	380.98
Örneklem-32	46.13	35.28	5.32	123.38	350.49	5.12	344.88
Örneklem-33	39.47	48.08	3.78	116.53	460.70	6.49	325.95
Örneklem-34	35.48	42.43	4.33	121.84	379.18	6.46	356.28

Çizelge Ek.1: (Devamı) Özdeş delikli eşit aralıklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 40 örneklem noktası ve yanıtları.

Örneklem-35	40.22	49.29	4.00	140.12	1060.68	4.52	317.77
Örneklem-36	43.24	40.04	3.00	112.23	310.71	5.61	344.81
Örneklem-37	30.47	48.48	4.78	90.84	474.18	3.21	359.77
Örneklem-38	45.15	30.22	6.19	131.44	373.96	4.56	367.34
Örneklem-39	32.56	41.36	3.30	125.50	351.80	6.41	373.59
Örneklem-40	36.20	45.76	6.00	107.22	451.09	4.73	340.00



EK 2 Özdeş delikli eşit aralıklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 30 test noktası ve yanıtları.

Çizelge Ek.2: Özdeş delikli eşit aralıklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 30 test noktası ve yanıtları.

	a	b	p	s	VM	Burkulma	Ağırlık
Test-1	35.42	33.19	4.19	134.26	336.70	4.82	383.85
Test-2	32.33	31.43	7.67	99.69	289.87	3.45	390.43
Test-3	46.81	48.09	5.29	135.40	891.10	4.26	290.19
Test-4	39.68	47.81	4.72	129.90	588.11	6.16	321.87
Test-5	45.45	34.26	4.56	127.53	343.53	5.12	352.50
Test-6	44.45	48.81	5.04	114.77	548.11	5.80	297.54
Test-7	34.02	46.03	2.17	101.03	374.18	3.97	368.37
Test-8	33.15	44.72	6.10	83.46	454.23	2.99	354.89
Test-9	40.62	49.74	7.60	106.64	666.51	4.99	305.62
Test-10	49.50	30.56	2.36	125.94	243.24	5.32	359.18
Test-11	42.78	38.80	6.50	115.82	386.95	5.47	340.39
Test-12	46.05	40.59	5.83	129.32	512.89	5.24	280.94
Test-13	41.12	42.56	7.97	119.09	451.27	5.57	332.89
Test-14	38.13	32.43	3.25	138.02	345.39	4.76	382.08
Test-15	42.31	45.43	7.06	101.97	516.79	4.33	317.31
Test-16	35.02	30.94	4.99	111.32	251.74	4.60	390.51
Test-17	47.45	41.61	2.70	126.85	393.99	6.09	328.68
Test-18	30.03	46.72	3.61	87.69	411.36	3.08	368.74
Test-19	49.28	39.62	5.78	128.12	487.18	5.05	315.93
Test-20	30.86	43.33	6.25	76.67	442.70	2.86	367.69
Test-21	36.51	34.79	2.47	120.17	252.49	5.48	384.61
Test-22	33.73	44.26	4.28	143.06	828.12	5.32	358.01
Test-23	31.82	37.68	3.10	111.86	275.89	4.81	385.69
Test-24	41.44	33.82	7.29	113.94	315.17	5.06	364.29
Test-25	38.67	37.16	3.91	98.16	296.93	3.71	363.34
Test-26	43.57	36.35	6.78	99.86	384.39	3.82	346.91
Test-27	36.86	35.85	3.54	132.05	340.99	5.32	373.90
Test-28	44.71	43.97	6.89	134.14	743.01	5.01	314.00
Test-29	37.54	41.22	2.87	99.99	313.41	3.93	359.88
Test-30	48.29	38.49	5.41	113.04	383.84	5.16	324.70

EK 3: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 110 örneklem noktası ve yanıtları.

Çizelge Ek.3: Özdeş olmayan delikli farklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 110 örneklem noktası ve yanıtları.

	a1	b1	p1	s1	a2	b2	p2	s2	a2	b3	p3	VM	Br.	Ağırlık
Örn.-1	41.00	41.00	2.00	113.00	41.00	41.00	2.00	113.00	41.00	41.00	2.00	305.20	5.68	362.86
Örn.-2	49.73	38.54	3.77	118.23	47.26	36.17	2.42	106.32	47.02	41.85	5.62	422.46	5.57	332.19
Örn.-3	47.65	38.96	4.57	114.63	44.24	40.18	2.83	111.70	47.18	35.22	5.42	327.77	5.18	339.14
Örn.-4	40.50	34.90	3.07	98.97	45.11	40.92	5.68	102.70	42.94	37.57	3.13	351.79	4.03	345.62
Örn.-5	45.34	42.47	4.89	116.88	41.22	39.18	4.20	100.06	40.66	40.68	2.06	343.78	4.99	348.63
Örn.-6	40.70	40.78	5.54	120.24	48.98	35.34	4.77	106.95	43.55	40.32	5.93	408.99	5.01	336.36
Örn.-7	44.77	41.99	2.08	105.31	43.98	33.08	4.29	102.37	44.04	34.49	4.44	296.50	4.28	356.31
Örn.-8	47.08	38.01	5.06	100.55	40.25	41.57	3.64	100.08	40.56	40.72	3.01	321.73	4.04	344.47
Örn.-9	49.28	39.52	4.65	117.82	49.27	39.85	4.89	109.12	45.74	42.04	4.31	403.40	5.50	319.05
Örn.-10	48.63	38.14	5.49	124.82	46.38	33.48	2.12	103.09	43.14	40.19	4.16	345.36	5.41	348.23
Örn.-11	46.46	40.34	2.86	123.50	45.18	35.96	2.29	100.52	42.71	34.89	2.97	272.56	5.17	357.27
Örn.-12	47.96	35.88	5.28	113.98	47.55	40.34	5.75	106.92	45.55	37.02	4.09	354.81	4.96	332.04
Örn.-13	49.98	34.54	5.22	131.76	40.62	37.63	3.81	96.26	42.78	38.39	5.37	376.69	4.93	347.33
Örn.-14	41.64	41.97	5.23	106.68	42.19	33.43	2.79	114.97	48.76	41.17	5.71	396.56	5.56	339.94
Örn.-15	43.57	35.46	2.35	116.22	47.72	35.90	5.36	107.96	47.89	42.47	5.39	442.47	4.90	331.99
Örn.-16	41.31	41.46	4.41	95.98	42.45	37.20	5.43	138.58	40.34	38.20	2.30	345.15	4.94	340.51
Örn.-17	41.17	37.73	5.59	112.29	48.46	38.39	3.31	109.83	48.57	38.51	2.80	307.83	5.48	337.48
Örn.-18	46.35	37.57	3.17	112.79	41.60	37.54	4.16	104.50	45.03	39.54	5.79	385.09	4.97	325.91
Örn.-19	45.29	42.20	2.88	115.14	43.38	39.77	2.74	120.99	40.84	40.90	3.64	341.34	6.27	343.44
Örn.-20	49.10	36.35	4.23	113.31	49.87	38.67	2.05	110.35	46.93	41.06	3.09	333.97	5.77	336.21
Örn.-21	41.66	40.65	5.31	107.60	44.58	40.07	3.92	106.16	43.67	36.10	4.34	313.22	4.59	329.77
Örn.-22	40.86	41.37	5.00	121.46	49.44	42.66	3.18	110.08	44.44	34.97	5.55	341.93	5.01	333.27
Örn.-23	43.77	38.70	2.61	113.67	49.67	42.29	5.26	110.83	41.41	39.61	3.38	374.06	5.34	331.51
Örn.-24	42.15	36.50	5.40	107.70	43.30	36.44	2.02	114.40	48.36	38.72	3.83	317.29	5.58	329.66
Örn.-25	42.29	41.23	4.70	112.72	48.80	35.76	5.58	112.49	47.99	41.51	2.13	326.58	5.60	336.16
Örn.-26	40.30	41.79	2.25	130.76	48.24	35.42	5.51	103.33	42.52	39.38	5.75	406.95	4.74	342.65
Örn.-27	49.84	36.02	5.80	135.29	46.55	40.57	5.05	101.49	42.31	36.47	5.51	385.26	4.95	335.65
Örn.-28	42.36	34.02	4.19	111.49	46.46	36.56	5.14	114.29	47.39	38.91	3.73	331.39	5.40	340.49
Örn.-29	44.92	37.88	3.99	101.56	42.71	41.75	5.17	121.46	45.97	36.35	2.01	364.40	5.31	346.35
Örn.-30	40.56	40.24	3.27	134.78	41.16	41.68	5.45	97.98	43.49	34.58	4.40	370.17	4.99	347.57
Örn.-31	45.20	37.41	4.93	108.60	49.51	35.01	4.82	112.54	49.26	33.63	3.54	294.91	4.94	342.32
Örn.-32	48.53	40.91	3.20	108.77	47.98	35.69	2.52	111.92	49.92	40.54	4.81	378.73	5.48	330.04
Örn.-33	41.49	39.97	2.76	104.35	42.86	34.42	4.35	119.29	46.34	39.50	4.64	344.06	5.57	331.37
Örn.-34	45.67	33.12	2.50	106.54	45.62	42.83	4.56	125.91	44.00	39.04	2.38	351.48	5.99	341.92
Örn.-35	48.82	33.75	2.40	129.49	40.53	41.32	4.62	98.81	41.07	35.38	3.40	345.20	5.22	354.22
Örn.-36	42.80	39.30	2.56	107.71	44.68	38.91	3.74	109.59	49.43	38.07	2.15	278.39	5.30	344.71
Örn.-37	42.04	42.58	5.37	130.58	43.20	36.80	5.40	102.35	43.83	35.81	2.64	354.87	5.25	349.54

Çizelge Ek.3: (Devamı) Özdeş olmayan delikli farklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 110 örneklem noktası ve yanıtları.

Örn.-38	42.94	34.64	3.35	104.50	43.08	34.65	3.65	116.76	46.24	38.28	5.13	339.77	5.33	340.08
Örn.-39	41.20	39.78	5.11	128.79	49.16	33.95	4.43	102.30	40.49	40.82	2.49	332.85	4.87	348.90
Örn.-40	44.19	37.20	5.67	127.07	42.95	42.63	3.55	101.45	45.96	33.73	3.66	337.16	4.97	343.94
Örn.-41	45.91	41.33	3.92	118.84	47.64	35.61	5.98	107.99	46.72	40.09	3.28	345.22	5.19	332.80
Örn.-42	41.05	39.07	3.65	117.46	46.32	41.19	4.65	114.45	44.38	41.14	3.16	342.64	5.83	333.23
Örn.-43	47.22	42.87	2.78	115.88	44.21	41.87	4.24	108.93	47.33	42.70	3.71	384.61	5.81	322.18
Örn.-44	45.74	40.00	3.44	118.77	41.74	37.97	2.37	116.43	43.06	33.51	5.84	302.77	5.23	355.90
Örn.-45	40.07	35.05	6.00	120.65	45.00	39.53	4.04	105.75	44.73	42.10	4.86	405.72	5.21	329.22
Örn.-46	48.21	33.89	3.13	116.62	49.62	42.53	2.89	111.73	44.56	42.41	5.88	436.13	5.65	325.12
Örn.-47	48.05	34.39	2.42	110.39	46.72	36.30	2.28	109.44	47.71	36.27	2.45	263.85	5.29	355.03
Örn.-48	46.16	42.92	3.88	114.58	47.37	41.15	3.03	107.99	46.19	42.57	2.20	336.03	5.81	329.50
Örn.-49	48.80	42.79	4.94	113.34	41.30	39.95	3.85	110.07	47.48	38.64	5.09	359.32	5.39	330.47
Örn.-50	40.15	41.86	3.24	120.44	44.36	35.25	2.86	104.79	47.91	36.20	2.68	299.34	5.47	352.45
Örn.-51	43.36	40.82	2.15	101.93	40.09	33.30	4.98	93.77	40.23	35.96	3.23	284.65	3.72	364.76
Örn.-52	45.09	39.23	5.47	104.72	42.62	34.19	2.98	121.48	47.14	38.01	3.05	317.63	5.69	341.13
Örn.-53	49.06	33.45	4.53	111.93	48.39	37.83	5.60	108.84	45.61	42.75	3.44	378.83	5.32	329.51
Örn.-54	47.26	41.04	2.45	113.68	48.87	36.91	5.23	109.82	48.51	34.45	5.27	347.10	4.76	335.84
Örn.-55	44.78	38.42	4.47	113.39	44.11	35.11	4.09	120.65	41.34	35.05	2.71	279.71	5.53	357.05
Örn.-56	44.32	37.81	2.65	109.42	40.80	40.66	4.00	103.44	49.86	33.27	2.40	302.89	4.64	351.78
Örn.-57	47.57	42.43	5.64	117.22	46.07	38.46	5.81	106.66	48.30	40.45	5.30	420.69	5.19	321.18
Örn.-58	40.74	35.65	5.88	124.98	42.08	42.99	3.51	102.16	45.81	34.83	4.74	345.27	5.01	338.32
Örn.-59	47.05	34.69	4.04	113.11	45.46	37.31	4.11	104.71	46.80	35.45	2.84	280.95	4.95	334.67
Örn.-60	46.92	33.20	3.00	109.89	48.08	36.72	5.54	119.60	42.02	36.61	4.57	314.77	5.41	346.32
Örn.-61	47.76	35.37	3.70	124.54	40.37	40.78	3.01	98.99	46.52	35.86	2.37	296.31	5.21	352.37
Örn.-62	49.71	41.08	2.01	114.39	49.79	42.74	3.77	112.56	45.39	39.81	4.92	385.14	5.48	322.13
Örn.-63	46.03	33.51	3.55	106.64	44.87	35.55	2.47	111.06	40.06	34.67	5.93	307.52	4.64	361.55
Örn.-64	43.73	42.16	4.16	113.08	45.28	37.02	5.65	109.45	49.45	36.77	4.87	348.03	5.07	333.59
Örn.-65	47.38	37.38	5.61	107.36	46.65	42.05	2.64	113.75	48.95	38.47	5.70	371.17	5.21	327.45
Örn.-66	48.12	35.12	2.97	108.64	43.74	40.81	4.46	105.90	44.20	33.14	5.18	318.51	4.41	342.34
Örn.-67	44.64	36.29	4.74	103.86	44.45	33.27	4.53	110.94	45.42	39.09	2.91	298.17	5.10	349.73
Örn.-68	49.36	34.22	2.14	123.44	47.94	33.77	4.57	106.51	42.39	37.39	2.10	282.87	5.35	358.22
Örn.-69	40.93	35.25	5.19	116.78	47.09	38.21	4.24	108.97	47.68	39.32	4.19	361.93	5.28	301.12
Örn.-70	40.19	36.64	4.83	110.26	47.46	37.76	4.71	110.30	42.87	40.35	5.98	395.18	5.11	338.32
Örn.-71	42.70	39.86	3.61	125.97	45.82	35.04	3.08	106.84	42.10	33.88	4.55	295.76	5.36	355.66
Örn.-72	43.63	39.61	4.30	108.87	46.17	36.35	3.98	114.73	43.36	41.36	2.93	323.94	5.70	341.23
Örn.-73	48.44	36.46	3.48	105.05	42.00	39.63	3.16	117.31	40.78	34.01	4.47	286.12	4.95	337.03
Örn.-74	49.26	33.62	3.42	120.38	48.71	34.37	2.92	107.80	45.21	34.20	5.65	323.67	5.09	350.69
Örn.-75	48.57	38.65	4.82	122.83	40.92	37.37	4.95	105.01	42.12	42.90	4.27	388.39	5.31	338.65
Örn.-76	45.86	38.97	5.44	141.93	43.59	34.05	4.85	96.97	41.24	39.72	3.20	346.61	4.66	349.41
Örn.-77	49.55	40.52	4.55	115.81	48.56	33.13	2.18	111.58	46.10	37.04	3.56	326.46	5.65	346.28
Örn.-78	42.63	42.70	4.43	113.70	47.82	34.90	5.93	109.64	49.08	42.92	5.07	439.92	5.03	323.69

Çizelge Ek.3: (Devamı) Özdeş olmayan delikli farklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 110 örneklem noktası ve yanıtları.

Örn.-79	46.07	33.01	4.37	120.25	41.48	39.26	3.37	102.88	49.15	37.73	2.83	302.67	5.32	346.18
Örn.-80	46.79	34.81	3.31	112.50	49.18	38.69	3.45	118.50	42.58	36.51	2.60	271.58	5.66	335.18
Örn.-81	47.81	42.30	2.83	112.51	48.29	38.56	5.27	110.10	49.30	41.67	2.57	343.00	5.78	324.34
Örn.-82	46.80	33.69	4.35	127.00	41.89	33.65	2.19	102.04	43.64	39.94	4.98	361.90	5.12	355.77
Örn.-83	43.10	36.99	5.15	107.16	45.51	39.14	2.58	112.15	45.12	33.07	4.71	283.53	4.84	350.79
Örn.-84	43.44	35.81	2.72	124.79	43.41	39.34	5.32	105.20	41.71	41.61	2.28	329.43	5.43	348.89
Örn.-85	41.81	35.02	5.02	101.21	46.82	38.25	2.33	114.30	49.78	33.35	4.77	296.50	4.81	348.94
Örn.-86	46.68	37.07	3.85	113.66	42.48	41.50	3.49	106.95	49.64	41.30	2.23	317.50	5.70	335.95
Örn.-87	46.30	36.03	5.94	121.32	46.93	41.02	3.42	114.83	41.85	33.46	5.24	305.75	5.14	344.11
Örn.-88	48.91	33.95	3.52	116.67	47.20	41.93	3.10	108.77	47.60	39.23	4.38	368.23	5.43	329.79
Örn.-89	42.40	34.33	5.91	122.31	40.88	39.99	3.59	110.77	40.45	37.42	5.48	344.63	5.30	353.11
Örn.-90	42.01	38.28	3.96	124.25	45.96	34.49	2.09	105.85	44.91	36.71	2.53	274.16	5.72	359.66
Örn.-91	47.50	38.85	4.75	110.02	42.21	42.19	3.22	102.71	46.69	38.84	4.21	349.32	4.76	320.07
Örn.-92	43.13	36.89	2.95	96.22	40.66	40.48	5.89	117.16	44.60	37.89	3.30	342.60	4.84	346.60
Örn.-93	48.30	39.45	5.82	108.06	41.75	36.11	2.68	109.57	44.30	42.35	3.34	341.46	5.40	342.16
Örn.-94	41.45	36.83	5.75	131.58	49.95	42.14	3.34	104.52	41.81	33.78	2.74	323.28	5.15	343.99
Örn.-95	45.52	41.56	2.55	135.76	40.01	41.42	3.27	99.02	43.24	37.26	3.96	333.12	5.59	346.44
Örn.-96	44.28	41.66	2.27	132.81	43.89	34.78	4.92	104.06	41.58	35.65	4.97	332.88	5.20	341.05
Örn.-97	41.85	35.70	2.69	108.79	47.05	40.35	5.82	105.99	44.80	35.11	3.61	359.53	4.58	333.25
Örn.-98	44.08	33.36	4.10	102.85	42.79	38.07	5.73	106.94	49.62	35.57	5.59	355.31	4.45	343.00
Örn.-99	40.42	37.22	3.82	114.81	43.77	36.61	2.72	96.95	41.13	34.31	3.77	282.04	4.33	361.18
Örn.-100	43.30	38.41	3.06	119.46	43.49	34.12	2.50	119.43	40.96	37.18	3.48	296.93	5.91	361.00
Örn.-101	42.56	36.75	5.72	116.83	46.02	34.71	2.24	104.64	45.32	40.03	4.00	340.60	5.45	348.56
Örn.-102	44.51	40.15	3.37	114.38	44.68	33.91	3.69	111.83	43.86	35.73	3.84	288.67	5.41	352.37
Örn.-103	42.85	36.12	4.07	116.75	45.73	37.05	5.09	106.90	48.82	37.84	4.61	359.98	5.14	337.62
Örn.-104	45.46	35.52	2.31	111.57	49.05	42.42	5.88	115.14	46.50	36.92	3.89	400.60	5.36	330.51
Örn.-105	49.50	40.56	3.68	128.70	40.37	37.89	3.90	110.18	40.14	41.97	4.02	372.49	5.69	342.82
Örn.-106	43.94	37.68	4.62	106.58	44.82	33.58	5.04	117.08	41.50	41.78	4.51	361.43	5.32	345.76
Örn.-107	45.04	40.29	2.18	115.69	41.07	39.06	4.40	106.36	48.13	34.03	5.01	319.82	4.97	347.09
Örn.-108	44.48	38.09	4.26	113.30	42.35	39.49	4.31	104.08	48.69	37.66	3.93	334.42	5.02	337.72
Örn.-109	44.00	34.12	3.74	113.72	41.38	38.85	2.60	99.61	42.22	42.22	5.20	392.30	4.83	347.68
Örn.-110	46.52	39.38	2.07	104.67	45.40	37.42	4.73	112.72	48.17	34.14	4.11	290.98	4.88	344.80

EK 4: Özdeş olmayan delikli farklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 30 test noktası ve yanıtları.

Çizelge Ek.4: Özdeş olmayan delikli farklı problem için latin hiperküp yöntemi ile oluşturulan 30 test noktası ve yanıtları

	a1	b1	p1	s1	a2	b2	p2	s2	a2	b3	p3	VM	Br.	Ağırlık
Test-1	41.96	36.81	3.12	119.58	47.62	40.38	4.17	107.63	46.16	33.46	5.30	334.98	4.78	341.65
Test-2	41.56	42.55	2.59	114.07	43.73	42.47	4.07	114.41	45.65	35.01	2.29	323.62	5.37	346.00
Test-3	47.84	39.78	5.13	108.01	48.00	38.98	5.77	114.87	49.23	42.29	5.87	453.62	5.33	315.04
Test-4	45.48	33.04	5.62	111.41	45.23	37.75	5.22	111.10	40.36	42.88	4.85	394.41	5.36	340.66
Test-5	46.59	36.45	4.67	111.56	49.47	37.17	2.73	108.78	47.26	34.03	5.09	321.90	4.85	342.87
Test-6	44.79	37.96	4.58	103.23	44.34	41.60	3.05	104.04	41.13	34.76	2.62	302.86	4.13	344.11
Test-7	40.11	35.98	4.49	139.11	42.20	33.26	3.18	96.63	41.77	39.90	4.77	372.31	4.70	357.10
Test-8	49.54	38.83	3.77	114.80	41.26	39.91	2.19	109.02	44.73	41.58	2.99	328.26	5.77	336.40
Test-9	49.13	39.39	3.88	114.29	42.99	40.77	2.51	109.50	47.80	39.25	5.81	382.99	5.40	332.91
Test-10	42.25	40.10	5.32	124.77	46.16	41.09	2.11	108.12	42.56	36.00	2.90	309.61	5.65	350.22
Test-11	45.25	35.08	4.33	120.09	40.40	42.83	3.47	106.64	41.48	40.09	4.35	350.13	5.50	343.90
Test-12	40.62	36.23	5.84	131.75	43.02	40.17	5.39	100.26	44.57	37.87	4.06	361.91	5.09	342.62
Test-13	48.69	41.96	2.18	129.77	48.92	34.00	4.96	105.73	42.84	39.62	3.22	340.94	5.05	342.12
Test-14	49.96	33.90	3.03	124.94	46.39	36.46	2.37	108.55	43.29	34.53	2.51	255.78	5.54	359.22
Test-15	47.40	33.35	3.61	104.73	41.95	39.36	3.28	113.70	47.52	40.44	4.42	356.54	5.34	338.97
Test-16	45.92	42.25	4.97	113.47	40.25	37.63	3.36	117.55	40.71	36.37	5.37	344.32	5.56	350.24
Test-17	48.05	40.34	3.48	114.73	41.47	41.85	3.99	104.76	48.07	33.93	2.19	308.41	4.89	345.64
Test-18	46.71	35.65	3.22	122.59	45.76	33.48	4.86	103.58	45.19	38.34	3.77	333.57	4.96	347.42
Test-19	40.74	34.34	2.03	110.31	45.58	42.06	2.82	109.38	45.92	36.23	3.62	308.54	5.04	336.79
Test-20	43.03	43.00	2.79	120.47	46.92	36.74	4.34	106.64	46.85	41.00	4.94	404.83	5.28	330.99
Test-21	44.59	38.45	5.36	109.47	48.64	34.89	3.85	110.97	48.78	36.83	3.08	306.63	5.28	340.59
Test-22	43.81	34.83	4.12	108.22	47.33	34.42	5.14	123.82	44.01	35.52	3.48	280.23	5.24	351.53
Test-23	46.26	41.01	5.52	126.38	43.59	38.31	5.49	106.48	43.38	38.29	2.76	341.41	5.36	319.05
Test-24	47.07	39.10	3.34	112.39	42.60	35.94	4.77	109.74	49.39	41.74	3.96	372.98	5.64	332.72
Test-25	44.10	41.39	4.80	107.17	49.77	39.27	2.66	111.76	49.79	37.37	4.59	344.04	5.09	328.91
Test-26	42.77	38.32	5.97	112.23	48.04	36.23	5.63	104.15	40.29	41.03	4.23	365.81	4.88	340.23
Test-27	48.49	40.76	4.26	107.58	44.82	34.27	5.99	108.15	46.61	33.23	3.42	318.57	4.73	347.17
Test-28	43.49	34.01	2.36	107.24	49.20	35.10	4.41	115.55	42.21	38.91	2.12	286.23	5.42	355.02
Test-29	42.42	37.35	2.50	116.73	44.26	38.43	3.67	104.98	48.40	42.48	5.52	443.47	5.38	314.25
Test-30	41.27	37.02	2.88	127.66	40.96	35.37	4.56	99.01	43.74	37.30	5.72	365.86	5.04	354.11

EK 5: Özdeş delikli eşit aralıklı problem için ABAQUS'te örneklem noktalarını otomatik koşturmak için yazılan Python kodu.

```
from abaqus import *
from abaqusConstants import *
from odbAccess import *
backwardCompatibility.setValues(includeDeprecated=True, reportDeprecate
ted=False)

import os.path
import displayGroupMdbToolset as dgm
import regionToolset
import part
import sketch
import material
import section
import assembly
import mesh
import step
import load
import visualization

#####YAPIDAKI MAKSIMUM VON MISES GERILMESINI ELDE ETME
FONKSIYONU#####
def getMaxMises(odbName,elsetName):
    elset = elemset = None
    region = "over the entire model"
    odb = openOdb(odbName.name)
    assembly = odb.rootAssembly

    if elsetName:
        try:
            elemset = assembly.elementSets[elsetName]
            region = " in the element set: " + elsetName;
        except KeyError:
            print 'An assembly level elset named %s does'\
                'not exist in the output database %s'\
                % (elsetName, odbName)
            odb.close()
            exit(0)

    maxMises = -0.1
    maxElem = 0
    maxStep = "_None_"
    maxFrame = -1
    Stress = "S"
    isStressPresent = 0
    for step in odb.steps.values():
        print 'Processing Step:', step.name
        for frame in step.frames:
            allFields = frame.fieldOutputs
            if(allFields.has_key(Stress)):
                isStressPresent = 1
                stressSet = allFields[Stress]
                if elemset:
                    stressSet = stressSet.getSubset(region=elemset)
                for stressValue in stressSet.values:
                    if (stressValue.mises > maxMises):
                        maxMises = stressValue.mises
```

```

        maxElem = stressValue.elementLabel
        maxStep = step.name
        maxFrame = frame.frameId
    if (isStressPresent):
        print 'Maximum von Mises stress %s is %f in element
%d'%(region, maxMises, maxElem)
        print 'Location: frame # %d step: %s'%(maxFrame, maxStep)
    else:
        print 'Stress output is not available in\'
        'the output database: %s\n'%(odb.name)
    odb.close()
    return maxMises

```

#####ORNEKLEM TASARIM DEGISKENLERI LISTESI#####

```

X_doe =
{"aVals": [35.4190319, 32.32826519, 46.80745122, 39.68464624, 45.44746553
, 44.45167894, 34.01590231, 33.14785931, 40.6181128, 49.49918426, 42.77920
759, 46.0517746, 41.11531714, 38.13062049, 42.30783311, 35.02447008, 47.45
283317, 30.03206233, 49.28248474, 30.86088596, 36.51004904, 33.73406963, 3
1.82125038, 41.44499112, 38.66975079, 43.56683268, 36.86403145, 44.711797
87, 37.54156497, 48.28776405], \

```

```

"bVals": [33.18813864, 31.42763092, 48.09266116, 47.81070733, 34.25640477
, 48.81367367, 46.03010179, 44.7202645, 49.7434562, 30.55823799, 38.802165
72, 40.59078855, 42.5607838, 32.42944792, 45.43482762, 30.94481254, 41.609
21489, 46.71610801, 39.61661449, 43.32668174, 34.79374848, 44.26079443, 37
.68005755, 33.82103989, 37.16126908, 36.34599364, 35.84843901, 43.9675984
7, 41.22050546, 38.49436913], \

```

```

"pVals": [4.19366214, 7.671532169, 5.286625817, 4.724718091, 4.557490324,
5.041568632, 2.170911304, 6.10217151, 7.597430851, 2.362677595, 6.5029539
09, 5.832354785, 7.971788606, 3.253556603, 7.061786617, 4.993101476, 2.702
228547, 3.605721918, 5.777509724, 6.251357245, 2.472291726, 4.281163417, 3
.100275497, 7.286429468, 3.91469915, 6.784752112, 3.541882669, 6.88773299
1, 2.873333306, 5.413844828], \

```

```

"sVals": [134.2607805, 99.68708054, 135.3982045, 129.9015054, 127.5335442
, 114.7689839, 101.0292156, 83.46010695, 106.6411003, 125.9441537, 115.815
0525, 129.322076, 119.0939209, 138.0156346, 101.9703708, 111.3154136, 126.
8501487, 87.6857028, 128.1178577, 76.66754793, 120.1699788, 143.0638468, 1
11.8554887, 113.9378066, 98.15950379, 99.85561468, 132.0516351, 134.13733
46, 99.99234383, 113.0425586]}

```

```

#####CIKTI YAZMA DOSYASI OLUSTUR#####
reportFile = open('ResponseSurfaceExp.txt', 'w')
reportFile.write("Max Von Mises      Min Eigenvalue      Weight\n")

```

#####COZUM DONGUSU#####

```

for SizeMesh in MeshSize:
    for designIndex in range(len(X_doe["aVals"])):
        #####MODEL NESNESI OLUSTUR#####
        myModel = mdb.Model(name='Model-' + str(designIndex))

        #####PARCA NESNESI OLUSTUR#####
        myPart = myModel.Part(name='ResistantWeb',
dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)

```

#####KIRIS VE DELIK GEOMETRISI GIRDISI#####

```

webHeight = 125.295
webLength = 655.0

```

```

webThickness = 2.0

a = float(X_doe["aVals"][designIndex])
b = float(X_doe["bVals"][designIndex])
p = float(X_doe["pVals"][designIndex])
holeSpacing = float(X_doe["sVals"][designIndex])

#####DELİK MERKEZLERİNİ BELİRT#####
holeCenterLocations = ((-2*holeSpacing,0.0), (-holeSpacing,0.0), (0.0,0.0), (holeSpacing,0.0), (2*holeSpacing,0.0))

#####DELİK GUCLENDİRME BOYUTLARI#####
flange_h = 6.0
flange_w = 6.0

mySketch = myModel.ConstrainedSketch(name='Sketch A',sheetSize=800.0)

#####INSAAT EKSEN VE DUZLEMLERİNİ OLUSTUR#####
flangePlane =
myPart.DatumPlaneByPrincipalPlane(principalPlane=XYPLANE,
offset=flange_h)
yAxis =
myPart.DatumAxisByPrincipalAxis(principalAxis=YAXIS)
zAxis =
myPart.DatumAxisByPrincipalAxis(principalAxis=ZAXIS)
sweepPlane =
myPart.DatumPlaneByPrincipalPlane(principalPlane=XZPLANE,
offset=0.0)
xyPlane =
myPart.DatumPlaneByPrincipalPlane(principalPlane=XYPLANE,
offset=0.0)

#####KIRIS SKECI OLUSTUR#####
webCoords = ((-webLength/2, webHeight/2), (webLength/2,-webHeight/2))
mySketch.rectangle(webCoords[0], webCoords[1])

#####DELİK OLUSTURMA DONGUSU#####
flangeSketch =
myModel.ConstrainedSketch(name='FlangeSketch',sheetSize=800.0)
for hole in range(len(holeCenterLocations)):
    xvals=[]
    yvals=[]

    pointCount = 40
    thetarad = [2*i*pi/(pointCount) for i in
range(0,pointCount)]
    radius =
[a*b/(abs(b*cos(i))**p+abs(a*sin(i))**p)**(1/p) for i in thetarad]

    for i in range(len(thetarad)):

        xvals.append(radius[i]*cos(thetarad[i])+holeCenterLocations[hole][0])

        yvals.append(radius[i]*sin(thetarad[i])+holeCenterLocations[hole][1])

    pointCoords = []

```

```

        counter = 0
        for i in xvals:

            pointCoords.append((xvals[counter],yvals[counter]))
            counter += 1

            pointCoords.append((xvals[0],yvals[0]))

            mySketch.Spline(pointCoords)
            flangeSketch.Spline(pointCoords)

            #####GUCLENDIRMESIZ DELIK OLUSTUR#####
            myPart.BaseShell(sketch=mySketch)

            #####DELIGE GUCLENDIRME EKLE#####
            webFace=                mdb.models['Model-']                +
str(designIndex)].parts['ResistantWeb'].faces[0]
            shortEdge1=                mdb.models['Model-']                +
str(designIndex)].parts['ResistantWeb'].edges[8]
            myPart.ShellExtrude(sketch=flangeSketch, sketchPlane=
webFace,sketchPlaneSide= SIDE1, sketchUpEdge= shortEdge1, depth=
flange_h, draftAngle= -45.0)

            #####BUKUM YARICAPI VER#####
            holeEdge1                =                mdb.models['Model-']                +
str(designIndex)].parts['ResistantWeb'].edges.findAt((a, 0.0, 0.0),
)
            holeEdge2                =                mdb.models['Model-']                +
str(designIndex)].parts['ResistantWeb'].edges.findAt((a+holeSpacing,
0.0, 0.0), )
            holeEdge3                =                mdb.models['Model-']                +
str(designIndex)].parts['ResistantWeb'].edges.findAt((a+2*holeSpacin
g, 0.0, 0.0), )
            holeEdge4                =                mdb.models['Model-']                +
str(designIndex)].parts['ResistantWeb'].edges.findAt((a-holeSpacing,
0.0, 0.0), )
            holeEdge5                =                mdb.models['Model-']                +
str(designIndex)].parts['ResistantWeb'].edges.findAt((a-
2*holeSpacing, 0.0, 0.0), )
            myPart.Round(radius=6.0, edgeList=                (holeEdge1,
holeEdge2, holeEdge3, holeEdge4, holeEdge5,))

            partMassProperties = myPart.getMassProperties()

            #####MALZEME YARAT#####
            materialDensity = 0.00276799 #g/mm^3
            Al2024 = myModel.Material(name='Al2024')
            elasticProperties=(72394.95, 0.33)
            Al2024.Elastic(table=(elasticProperties, ))

            #####MALZEME KESITI YARAT#####
            mySection                =
myModel.HomogeneousShellSection(name='WebSection',
material='Al2024',thickness=webThickness)

            #####MALZEME KESITI ATA#####
            region = (myPart.faces,)
            myPart.SectionAssignment(region=region,
sectionName='WebSection')

```

```

#####MONTAJ YARAT#####
myAssembly = myModel.rootAssembly
myInstance = myAssembly.Instance(name='WebInstance',
part=myPart, dependent=OFF)

#####COZUM AGI OLUSTUR#####
region = (myInstance.faces,)
flangeRegion = (mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].faces[1],mdb
.models['Model-'
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].faces[4],mdb
.models['Model-'
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].faces[6],mdb
.models['Model-'
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].faces[8],mdb
.models['Model-'
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].faces[10],)
elemType = mesh.ElemType(elemCode= QUAD,
elemLibrary=STANDARD)
myAssembly.setElementType(regions=region,
elemTypes=(elemType,))
myAssembly.seedPartInstance(regions=(myInstance,),
size=1.5)
myAssembly.setMeshControls(regions=region[0],
elemShape=QUAD, algorithm=MEDIAL_AXIS)
myAssembly.setMeshControls(regions=flangeRegion[0:5],
elemShape=QUAD, algorithm=ADVANCING_FRONT)
myAssembly.generateMesh(regions=(myInstance,))

#####DOGRUSAL STATIK ADIM YARAT#####
myModel.StaticStep(name='StaticLinear',
previous='Initial',timePeriod=1.0, initialInc=0.1,
description='Shear flow of web.')

#####YUKLERI UYGULA#####
all4Edges = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].edges.findAt
(((webLength/2,0.0,0.0),),((webLength/2,0.0,0.0),),((0.0,webHeight/2,0.
0),),((0.0,-webHeight/2,0.0),))
EdgesRegion =
regionToolset.Region(circumEdges=all4Edges)
shortEdges = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].edges.findAt
(((webLength/2,0.0,0.0),),((webLength/2,0.0,0.0),))
shortEdgesRegion =
regionToolset.Region(circumEdges=shortEdges)
longEdges = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].edges.findAt
(((0.0,webHeight/2,0.0),),((0.0,-webHeight/2,0.0),))
longEdgesRegion =
regionToolset.Region(circumEdges=longEdges)
myModel.ShellEdgeLoad(name='NormalFlow',
createStepName='StaticLinear', region=shortEdgesRegion,
magnitude=113.310375, traction=NORMAL)
myModel.ShellEdgeLoad(name='ShearFlowShort',
createStepName='StaticLinear', region=shortEdgesRegion,
magnitude=18.009, traction=SHEAR)

```

```

myModel.ShellEdgeLoad(name='ShearFlowLong',
createStepName='StaticLinear', region=longEdgesRegion, magnitude=-
18.009, traction=SHEAR)

```

```

#####SINIR KOSULLARINI UYGULA#####
myModel.DisplacementBC(name='ClampedLongEdges',
createStepName='Initial', region=(longEdges,), u3=0.0, ur1=0.0)
myModel.DisplacementBC(name='ClampedShortEdges',
createStepName='Initial', region=(shortEdges,), u3=0.0, ur2=0.0)
pointA = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].vertices.fin
dAt((-webLength/2,-webHeight/2,0.0),)
myModel.DisplacementBC(name='FixedPoint',
createStepName='Initial', region=(pointA,), u1=0.0, u2=0.0, u3=0.0)
pointC = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].vertices.fin
dAt((webLength/2,webHeight/2,0.0),)
myModel.DisplacementBC(name='OppositePoint',
createStepName='Initial', region=(pointC,), u2=0.0)

```

```

#####DOGRUSAL STATIK ANALIZI KOSTUR#####
jobName = 'LinearStaticCombined'
myJob = mdb.Job(name=jobName, model='Model-' +
str(designIndex))
myJob.submit()
myJob.waitForCompletion()

```

```

#####ANALIZ TIPINI BURKULMAYA CEVIR#####
myModel.BuckleStep(name='Buckling', previous='Initial',
numEigen=1, vectors=10, maxIterations=200, description='Buckling of
web.')
mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].steps['StaticLinear'].suppress()

```

```

#####YUK VE SINIR KOSULLARINI TEKRAR YARAT#####
myModel.ShellEdgeLoad(name='ShearFlowShort',
createStepName='Buckling', region=shortEdgesRegion,
magnitude=18.009, traction=SHEAR)
myModel.ShellEdgeLoad(name='ShearFlowLong',
createStepName='Buckling', region=longEdgesRegion, magnitude=-
18.009, traction=SHEAR)
myModel.ShellEdgeLoad(name='NormalFlow',
createStepName='Buckling', region=shortEdgesRegion,
magnitude=113.310375, traction=NORMAL)
myModel.DisplacementBC(name='ClampedLongEdges',
createStepName='Initial', region=(longEdges,), u3=0.0, ur1=0.0)
myModel.DisplacementBC(name='ClampedShortEdges',
createStepName='Initial', region=(shortEdges,), u3=0.0, ur2=0.0)
myModel.DisplacementBC(name='FixedPoint',
createStepName='Initial', region=(pointA,), u1=0.0, u2=0.0, u3=0.0)
myModel.DisplacementBC(name='OppositePoint',
createStepName='Initial', region=(pointC,), u2=0.0)

```

```

#####BURKULMA ANALIZI KOSTUR#####
jobName = 'BucklingCombined'
myJob = mdb.Job(name=jobName, model='Model-' +
str(designIndex))
myJob.submit()
myJob.waitForCompletion()

```

```

#####CIKTI VERITABANINA ERIS#####
odbLSCombined =
visualization.openOdb('LinearStaticCombined.odb')
odbBCCombined =
visualization.openOdb('BucklingCombined.odb')

#####CIKTI DOSYASINA YAZ#####
LSCombinedMaxMises = getMaxMises(odbLSCombined, None)
reportFile.write(str(LSCombinedMaxMises) + " ")

BCombinedEigenvalue =
float(odbBCCombined.steps.values()[0].frames[1].description[28:])
reportFile.write(str(BCombinedEigenvalue) + " ")

partWeight = materialDensity * webThickness *
partMassProperties["area"]
reportFile.write(str(partWeight) + "\n")

print 'Minimum Buckling Eigenvalue for Combined
Buckling: %f'%(BCombinedEigenvalue)
print 'Weight of the Part is: %f grams'%(partWeight)

#####ACIKSA CIKTI VERITABANLARINI KAPAT#####
if session.odbData.has_key('D:/ABAQUS
Temp/LinearStaticCombined.odb'):
    session.odbs['D:/ABAQUS
Temp/LinearStaticCombined.odb'].close()
if session.odbData.has_key('D:/ABAQUS
Temp/LinearStaticCompression.odb'):
    session.odbs['D:/ABAQUS
Temp/LinearStaticCompression.odb'].close()
if session.odbData.has_key('D:/ABAQUS
Temp/LinearStaticShear.odb'):
    session.odbs['D:/ABAQUS
Temp/LinearStaticShear.odb'].close()
if session.odbData.has_key('D:/ABAQUS
Temp/BucklingCombined.odb'):
    session.odbs['D:/ABAQUS
Temp/BucklingCombined.odb'].close()
if session.odbData.has_key('D:/ABAQUS
Temp/BucklingCompression.odb'):
    session.odbs['D:/ABAQUS
Temp/BucklingCompression.odb'].close()
if session.odbData.has_key('D:/ABAQUS
Temp/BucklingShear.odb'):
    session.odbs['D:/ABAQUS
Temp/BucklingShear.odb'].close()

reportFile.close()

```


EK 6: Özdeş olmayan delikli farklı problem için ABAQUS'te örneklem noktalarını otomatik koşturmak için yazılan Python kodu.

```
from abaqus import *
from abaqusConstants import *
from odbAccess import *
backwardCompatibility.setValues(includeDeprecated=True, reportDeprecate
ted=False)

import os.path
import displayGroupMdbToolset as dgm
import regionToolset
import part
import sketch
import material
import section
import assembly
import mesh
import step
import load
import visualization

#####YAPIDAKI MAKSIMUM VON MISES GERILMESINI ELDE ETME
FONKSIYONU#####
def getMaxMises(odbName, elsetName):
    elset = elemset = None
    region = "over the entire model"
    odb = openOdb(odbName.name)
    assembly = odb.rootAssembly

    if elsetName:
        try:
            elemset = assembly.elementSets[elsetName]
            region = " in the element set: " + elsetName;
        except KeyError:
            print 'An assembly level elset named %s does'\
                'not exist in the output database %s'\
                % (elsetName, odbName)
            odb.close()
            exit(0)

    maxMises = -0.1
    maxElem = 0
    maxStep = "_None_"
    maxFrame = -1
    Stress = "S"
    isStressPresent = 0
    for step in odb.steps.values():
        print 'Processing Step:', step.name
        for frame in step.frames:
            allFields = frame.fieldOutputs
            if(allFields.has_key(Stress)):
                isStressPresent = 1
                stressSet = allFields[Stress]
                if elemset:
                    stressSet = stressSet.getSubset(region=elemset)
                for stressValue in stressSet.values:
                    if (stressValue.mises > maxMises):
                        maxMises = stressValue.mises
```

```

        maxElem = stressValue.elementLabel
        maxStep = step.name
        maxFrame = frame.frameId
    if (isStressPresent):
        print 'Maximum von Mises stress %s is %f in element
%d'%(region, maxMises, maxElem)
        print 'Location: frame # %d step: %s'%(maxFrame, maxStep)
    else:
        print 'Stress output is not available in\'
        'the output database: %s\n'%(odb.name)
    odb.close()
    return maxMises

```

#####ORNEKLEM TASARIM DEGISKENLERI LISTESI#####

```

X_doe =
{"a1Vals": [41.0, 49.7255, 47.6465, 40.5013, 45.3417, 40.6969, 44.7681, 47.0
771, 49.2778, 48.6302, 46.4585, 47.9632, 49.9760, 41.6417, 43.5694, 41.3104,
41.1718, 46.3494, 45.2921, 49.0983, 41.6632, 40.8579, 43.7713, 42.1458, 42.2
879, 40.3003, 49.8353, 42.3615, 44.9162, 40.5560, 45.1965, 48.5263, 41.4887,
45.6710, 48.8155, 42.7963, 42.0440, 42.9438, 41.1994, 44.1857, 45.9079, 41.0
456, 47.2203, 45.7449, 40.0658, 48.2142, 48.0468, 46.1625, 48.8010, 40.1484,
43.3572, 45.0938, 49.0628, 47.2644, 44.7766, 44.3238, 47.5708, 40.7362, 47.0
472, 46.9168, 47.7562, 49.7068, 46.0271, 43.7323, 47.3757, 48.1224, 44.6449,
49.3634, 40.9255, 40.1865, 42.6995, 43.6304, 48.4399, 49.2637, 48.5691, 45.8
595, 49.5470, 42.6321, 46.0705, 46.7859, 47.8110, 46.7977, 43.1019, 43.4390,
41.8101, 46.6840, 46.3029, 48.9121, 42.3984, 42.0056, 47.4960, 43.1312, 48.2
993, 41.4499, 45.5189, 44.2824, 41.8454, 44.0786, 40.4153, 43.2950, 42.5592,
44.5098, 42.8544, 45.4600, 49.4969, 43.9397, 45.0403, 44.4777, 44.0040, 46.5
198], \

```

```

"b1Vals": [41.0, 38.5433, 38.9582, 34.9034, 42.4718, 40.7756, 41.9921, 38.01
33, 39.5212, 38.1413, 40.3439, 35.8804, 34.5374, 41.9740, 35.4625, 41.4637, 3
7.7329, 37.5667, 42.2025, 36.3533, 40.6473, 41.3654, 38.6976, 36.4967, 41.22
72, 41.7887, 36.0225, 34.0224, 37.8788, 40.2373, 37.4070, 40.9081, 39.9652, 3
3.1191, 33.7523, 39.3016, 42.5756, 34.6407, 39.7814, 37.2009, 41.3345, 39.06
62, 42.8721, 40.0017, 35.0499, 33.8917, 34.3920, 42.9198, 42.7900, 41.8622, 4
0.8153, 39.2340, 33.4499, 41.0444, 38.4217, 37.8095, 42.4339, 35.6532, 34.69
29, 33.1988, 35.3722, 41.0823, 33.5145, 42.1642, 37.3759, 35.1165, 36.2935, 3
4.2162, 35.2544, 36.6431, 39.8561, 39.6063, 36.4573, 33.6191, 38.6473, 38.97
34, 40.5159, 42.6958, 33.0074, 34.8095, 42.3006, 33.6888, 36.9902, 35.8138, 3
5.0169, 37.0719, 36.0291, 33.9539, 34.3293, 38.2758, 38.8523, 36.8864, 39.44
61, 36.8301, 41.5638, 41.6610, 35.7028, 33.3590, 37.2212, 38.4057, 36.7533, 4
0.1545, 36.1235, 35.5185, 40.5591, 37.6777, 40.2891, 38.0912, 34.1190, 39.37
53], \

```

```

"p1Vals": [2.0, 3.7704, 4.5696, 3.0674, 4.8872, 5.5395, 2.0789, 5.0560, 4.652
0, 5.4884, 2.8560, 5.2848, 5.2168, 5.2342, 2.3544, 4.4092, 5.5881, 3.1718, 2.8
830, 4.2275, 5.3056, 5.0010, 2.6073, 5.4044, 4.6981, 2.2469, 5.8035, 4.1885, 3
.9942, 3.2741, 4.9336, 3.1975, 2.7610, 2.4983, 2.3963, 2.5585, 5.3713, 3.3452
, 5.1077, 5.6742, 3.9248, 3.6493, 2.7775, 3.4437, 5.9957, 3.1274, 2.4209, 3.88
14, 4.9422, 3.2393, 2.1496, 5.4728, 4.5307, 2.4533, 4.4654, 2.6451, 5.6402, 5.
8823, 4.0436, 2.9955, 3.7032, 2.0091, 3.5503, 4.1641, 5.6095, 2.9654, 4.7438,
2.1361, 5.1851, 4.8314, 3.6112, 4.3049, 3.4766, 3.4233, 4.8240, 5.4430, 4.552
8, 4.4330, 4.3693, 3.3089, 2.8262, 4.3482, 5.1540, 2.7208, 5.0177, 3.8490, 5.9
419, 3.5154, 5.9079, 3.9605, 4.7536, 2.9487, 5.8248, 5.7545, 2.5461, 2.2657, 2
.6850, 4.1036, 3.8203, 3.0593, 5.7205, 3.3653, 4.0701, 2.3096, 3.6814, 4.6234
, 2.1848, 4.2551, 3.7411, 2.0663], \

```

```

"s1Vals": [113.0, 118.2324, 114.6323, 98.9692, 116.8812, 120.2373, 105.3149
, 100.5475, 117.8220, 124.8205, 123.5034, 113.9817, 131.7585, 106.6818, 116.

```

2248,95.9796,112.2931,112.7877,115.1408,113.3118,107.5967,121.4623,1
13.6656,107.6969,112.7235,130.7613,135.2870,111.4920,101.5640,134.78
49,108.6018,108.7705,104.3512,106.5444,129.4925,107.7130,130.5766,10
4.4952,128.7946,127.0733,118.8442,117.4575,115.8799,118.7713,120.648
4,116.6206,110.3885,114.5809,113.3372,120.4410,101.9348,104.7202,111
.9326,113.6751,113.3876,109.4249,117.2158,124.9837,113.1096,109.8892
,124.5386,114.3876,106.6356,113.0786,107.3577,108.6363,103.8597,123.
4423,116.7816,110.2613,125.9679,108.8665,105.0458,120.3771,122.8332,
141.9331,115.8129,113.7023,120.2458,112.5010,112.5123,127.0025,107.1
601,124.7879,101.2104,113.6634,121.3228,116.6710,122.3058,124.2494,1
10.0170,96.2224,108.0595,131.5811,135.7636,132.8127,108.7947,102.851
6,114.8134,119.4571,116.8318,114.3838,116.7489,111.5665,128.7042,106
.5808,115.6896,113.2987,113.7180,104.6727],\

"a2Vals": [41.0,47.2610,44.2364,45.1106,41.2215,48.9793,43.9769,40.25
02,49.2700,46.3839,45.1759,47.5503,40.6158,42.1895,47.7191,42.4489,4
8.4550,41.6016,43.3799,49.8719,44.5806,49.4365,49.6674,43.2983,48.79
77,48.2384,46.5546,46.4635,42.7143,41.1575,49.5133,47.9843,42.8594,4
5.6177,40.5346,44.6774,43.1951,43.0791,49.1622,42.9545,47.6399,46.32
21,44.2135,41.7413,45.0035,49.6215,46.7202,47.3721,41.3019,44.3582,4
0.0934,42.6245,48.3946,48.8651,44.1051,40.7972,46.0727,42.0802,45.45
95,48.0765,40.3663,49.7929,44.8710,45.2814,46.6487,43.7394,44.4463,4
7.9421,47.0949,47.4640,45.8192,46.1734,42.0022,48.7112,40.9180,43.58
97,48.5551,47.8151,41.4823,49.1848,48.2858,41.8895,45.5082,43.4131,4
6.8183,42.4838,46.9332,47.2024,40.8759,45.9623,42.2072,40.6621,41.74
66,49.9526,40.0131,43.8859,47.0496,42.7923,43.7665,43.4876,46.0176,4
4.6835,45.7251,49.0511,40.3694,44.8209,41.0746,42.3492,41.3776,45.40
17],\

"b2Vals": [41.0,36.1745,40.1818,40.9156,39.1759,35.3378,33.0846,41.57
14,39.8458,33.4781,35.9601,40.3355,37.6264,33.4290,35.8974,37.2026,3
8.3945,37.5429,39.7670,38.6725,40.0703,42.6623,42.2882,36.4426,35.75
75,35.4153,40.5710,36.5616,41.7461,41.6773,35.0064,35.6897,34.4165,4
2.8260,41.3245,38.9099,36.8006,34.6452,33.9472,42.6323,35.6076,41.18
69,41.8668,37.9701,39.5318,42.5317,36.2969,41.1461,39.9483,35.2488,3
3.2965,34.1936,37.8300,36.9099,35.1127,40.6639,38.4590,42.9850,37.30
65,36.7163,40.7830,42.7440,35.5458,37.0197,42.0544,40.8096,33.2667,3
3.7673,38.2147,37.7626,35.0402,36.3455,39.6323,34.3651,37.3689,34.04
72,33.1265,34.9026,39.2612,38.6902,38.5636,33.6540,39.1393,39.3414,3
8.2517,41.4950,41.0170,41.9289,39.9855,34.4915,42.1879,40.4780,36.11
08,42.1354,41.4174,34.7791,40.3524,38.0729,36.6100,34.1206,34.7050,3
3.9071,37.0548,42.4180,37.8896,33.5826,39.0550,39.4897,38.8502,37.41
94],\

"p2Vals": [2.0,2.4216,2.8302,5.6827,4.1958,4.7678,4.2910,3.6353,4.889
3,2.1214,2.2945,5.7466,3.8102,2.7858,5.3607,5.4298,3.3073,4.1608,2.7
351,2.0456,3.9243,3.1773,5.2604,2.0242,5.5787,5.5130,5.0505,5.1402,5
.1651,5.4536,4.8171,2.5210,4.3500,4.5628,4.6184,3.7389,5.4048,3.6519
,4.4333,3.5547,5.9844,4.6481,4.2401,2.3686,4.0370,2.8889,2.2807,3.03
15,3.8483,2.8593,4.9823,2.9780,5.6022,5.2269,4.0865,4.0038,5.8140,3.
5131,4.1136,5.5415,3.0116,3.7732,2.4716,5.6471,2.6368,4.4614,4.5297,
4.5707,4.2368,4.7093,3.0814,3.9765,3.1649,2.9214,4.9461,4.8478,2.182
0,5.9275,3.3694,3.4516,5.2730,2.1868,2.5797,5.3180,2.3318,3.4945,3.4
182,3.1031,3.5942,2.0870,3.2175,5.8938,2.6826,3.3410,3.2668,4.9211,5
.8222,5.7306,2.7176,2.4952,2.2441,3.6887,5.0944,5.8830,3.8993,5.0423
,4.3984,4.3129,2.5991,4.7322],\

"s2Vals": [113.0,106.3225,111.6954,102.6966,100.0611,106.9487,102.366
9,100.0826,109.1212,103.0859,100.5224,106.9246,96.2626,114.9748,107.
9604,138.5753,109.8291,104.4991,120.9925,110.3537,106.1606,110.0833,

```
110.8327,114.4012,112.4885,103.3286,101.4895,114.2907,121.4620,97.98
24,112.5399,111.9241,119.2929,125.9144,98.8126,109.5934,102.3517,116
.7635,102.2958,101.4472,107.9929,114.4457,108.9286,116.4251,105.7457
,111.7263,109.4446,107.9850,110.0676,104.7931,93.7661,121.4787,108.8
376,109.8184,120.6506,103.4430,106.6586,102.1601,104.7080,119.6032,9
8.9853,112.5634,111.0642,109.4503,113.7518,105.8995,110.9420,106.510
1,108.9692,110.2957,106.8360,114.7349,117.3053,107.7974,105.0117,96.
9654,111.5756,109.6438,102.8815,118.5035,110.1015,102.0385,112.1502,
105.2017,114.3003,106.9457,114.8266,108.7664,110.7698,105.8502,102.7
058,117.1565,109.5736,104.5208,99.0231,104.0601,105.9862,106.9393,96
.9539,119.4256,104.6414,111.8346,106.9019,115.1393,110.1824,117.0840
,106.3564,104.0849,99.6129,112.7189],\
```

```
"a3Vals": [41.0, 47.0236, 47.1818, 42.9384, 40.6557, 43.5500, 44.0418, 40.55
59, 45.7377, 43.1392, 42.7123, 45.5465, 42.7836, 48.7579, 47.8863, 40.3443, 4
8.5650, 45.0298, 40.8389, 46.9328, 43.6742, 44.4392, 41.4103, 48.3614, 47.98
92, 42.5182, 42.3101, 47.3893, 45.9661, 43.4857, 49.2575, 49.9180, 46.3426, 4
3.9995, 41.0712, 49.4282, 43.8313, 46.2425, 40.4936, 45.9581, 46.7244, 44.37
93, 47.3269, 43.0598, 44.7279, 44.5649, 47.7112, 46.1949, 47.4816, 47.9101, 4
0.2305, 47.1449, 45.6141, 48.5148, 41.3358, 49.8617, 48.3027, 45.8142, 46.79
58, 42.0176, 46.5153, 45.3947, 40.0591, 49.4509, 48.9465, 44.2048, 45.4166, 4
2.3875, 47.6785, 42.8746, 42.0959, 43.3551, 40.7757, 45.2091, 42.1151, 41.24
18, 46.1039, 49.0756, 49.1478, 42.5845, 49.3027, 43.6420, 45.1248, 41.7090, 4
9.7816, 49.6369, 41.8457, 47.5961, 40.4507, 44.9121, 46.6860, 44.6049, 44.29
87, 41.8137, 43.2379, 41.5799, 44.7992, 49.6222, 41.1315, 40.9617, 45.3165, 4
3.8616, 48.8173, 46.5031, 40.1445, 41.5041, 48.1302, 48.6925, 42.2225, 48.16
81], \
```

```
"b3Vals": [41.0, 41.8498, 35.2223, 37.5747, 40.6779, 40.3200, 34.4925, 40.72
02, 42.0368, 40.1863, 34.8871, 37.0160, 38.3855, 41.1656, 42.4661, 38.2006, 3
8.5104, 39.5411, 40.9026, 41.0632, 36.0981, 34.9748, 39.6130, 38.7247, 41.50
88, 39.3814, 36.4712, 38.9093, 36.3464, 34.5829, 33.6289, 40.5415, 39.4987, 3
9.0350, 35.3836, 38.0684, 35.8060, 38.2843, 40.8155, 33.7307, 40.0930, 41.14
18, 42.6963, 33.5061, 42.0984, 42.4096, 36.2738, 42.5683, 38.6387, 36.1990, 3
5.9577, 38.0081, 42.7468, 34.4531, 35.0492, 33.2662, 40.4521, 34.8328, 35.45
07, 36.6050, 35.8613, 39.8146, 34.6674, 36.7717, 38.4731, 33.1401, 39.0850, 3
7.3936, 39.3177, 40.3542, 33.8813, 41.3642, 34.0072, 34.1950, 42.8985, 39.72
33, 37.0407, 42.9233, 37.7341, 36.5063, 41.6723, 39.9425, 33.0699, 41.6084, 3
3.3541, 41.2998, 33.4581, 39.2319, 37.4172, 36.7061, 38.8352, 37.8874, 42.35
49, 33.7763, 37.2631, 35.6537, 35.1115, 35.5659, 34.3145, 37.1827, 40.0316, 3
5.7287, 37.8354, 36.9197, 41.9681, 41.7795, 34.0327, 37.6584, 42.2192, 34.13
62], \
```

```
"p3Vals": [2.0, 5.6234, 5.4161, 3.1348, 2.0552, 5.9255, 4.4391, 3.0140, 4.305
4, 4.1562, 2.9699, 4.0893, 5.3687, 5.7123, 5.3863, 2.3023, 2.7955, 5.7901, 3.6
436, 3.0901, 4.3370, 5.5525, 3.3846, 3.8326, 2.1314, 5.7487, 5.5100, 3.7275, 2
.0122, 4.4013, 3.5350, 4.8077, 4.6442, 2.3787, 3.3993, 2.1478, 2.6447, 5.1271
, 2.4918, 3.6641, 3.2822, 3.1612, 3.7078, 5.8408, 4.8609, 5.8752, 2.4461, 2.20
34, 5.0899, 2.6834, 3.2272, 3.0494, 3.4407, 5.2737, 2.7100, 2.4042, 5.3034, 4.
7359, 2.8448, 4.5745, 2.3657, 4.9202, 5.9281, 4.8694, 5.6954, 5.1844, 2.9109,
2.0959, 4.1928, 5.9817, 4.5539, 2.9250, 4.4747, 5.6464, 4.2705, 3.1955, 3.562
8, 5.0740, 2.8317, 2.6016, 2.5688, 4.9791, 4.7069, 2.2803, 4.7721, 2.2297, 5.2
417, 4.3815, 5.4826, 2.5262, 4.2135, 3.2966, 3.3408, 2.7359, 3.9586, 4.9716, 3
.6140, 5.5944, 3.7699, 3.4830, 4.0031, 3.8416, 4.6121, 3.8919, 4.0190, 4.5114
, 5.0114, 3.9338, 5.1983, 4.1098] }
```

```
#####CIKTI YAZMA DOSYASI OLUSTUR#####
reportFile = open('ResponseSurfaceExp.txt', 'w')
reportFile.write("Max Von Mises      Min Eigenvalue      Weight\n")
```

```

#####COZUM DONGUSU#####
for designIndex in range(len(X_doe["a1Vals"])):
    #####MODEL NESNESI OLUSTUR#####
    myModel = mdb.Model(name='Model-' + str(designIndex))

    #####PARCA NESNESI OLUSTUR#####
    myPart = myModel.Part(name='ResistantWeb',
dimensionality=THREE_D,type=DEFORMABLE_BODY)

    #####KIRIS VE DELIK GEOMETRISI GIRDISI#####
    webHeight = 125.295
    webLength = 655.0
    webThickness = 2.0

    a1 = float(X_doe["a1Vals"][designIndex])
    b1 = float(X_doe["b1Vals"][designIndex])
    p1 = float(X_doe["p1Vals"][designIndex])
    holeSpacing1 = float(X_doe["s1Vals"][designIndex])
    a2 = float(X_doe["a2Vals"][designIndex])
    b2 = float(X_doe["b2Vals"][designIndex])
    p2 = float(X_doe["p2Vals"][designIndex])
    holeSpacing2 = float(X_doe["s2Vals"][designIndex])
    a3 = float(X_doe["a3Vals"][designIndex])
    b3 = float(X_doe["b3Vals"][designIndex])
    p3 = float(X_doe["p3Vals"][designIndex])

    #####DELİK MERKEZLERİNİ BELİRT#####
    holeCenterLocations = ((-holeSpacing1-holeSpacing2,0.0), (-
holeSpacing1,0.0), (0.0,0.0), (holeSpacing1,0.0), (holeSpacing1+holeSpa
cing2,0.0))

    #####DELİK GUCLENDİRME BOYUTLARI#####
    flange_h = 6.0
    flange_w = 6.0

    mySketch = myModel.ConstrainedSketch(name='Sketch
A',sheetSize=800.0)

    #####İNSAAT EKSEN VE DÜZLEMLERİNİ OLUSTUR#####
    flangePlane =
myPart.DatumPlaneByPrincipalPlane(principalPlane=XYPLANE,
offset=flange_h)
    yAxis = myPart.DatumAxisByPrincipalAxis(principalAxis=YAXIS)
    zAxis = myPart.DatumAxisByPrincipalAxis(principalAxis=ZAXIS)
    sweepPlane =
myPart.DatumPlaneByPrincipalPlane(principalPlane=XZPLANE,
offset=0.0)
    xyPlane =
myPart.DatumPlaneByPrincipalPlane(principalPlane=XYPLANE,
offset=0.0)

    #####KIRIS SKECİ OLUSTUR#####
    webCoords = ((-webLength/2, webHeight/2), (webLength/2,-
webHeight/2))
    mySketch.rectangle(webCoords[0], webCoords[1])

    #####DELİK OLUSTURMA DONGUSU#####
    flangeSketch =
myModel.ConstrainedSketch(name='FlangeSketch',sheetSize=800.0)
    for hole in range(len(holeCenterLocations)):

```

```

xvals=[]
yvals=[]
if hole == 0 or hole == 4:
    a = a3
    b = b3
    p = p3
elif hole == 1 or hole == 3:
    a = a2
    b = b2
    p = p2
else:
    a = a1
    b = b1
    p = p1

    pointCount = 40
    thetarad = [2*i*pi/(pointCount) for i in
range(0,pointCount)]
    radius = [a*b/(abs(b*cos(i))**p+abs(a*sin(i))**p)**(1/p) for
i in thetarad]

    for i in range(len(thetarad)):
xvals.append(radius[i]*cos(thetarad[i])+holeCenterLocations[hole][0]
)
yvals.append(radius[i]*sin(thetarad[i])+holeCenterLocations[hole][1]
)

    pointCoords = []
    counter = 0
    for i in xvals:
        pointCoords.append((xvals[counter],yvals[counter]))
        counter += 1

    pointCoords.append((xvals[0],yvals[0]))

    mySketch.Spline(pointCoords)
    flangeSketch.Spline(pointCoords)

#####GUCLENDIRMESIZ DELIK OLUSTUR#####
myPart.BaseShell(sketch=mySketch)

#####DELIGE GUCLENDIRME EKLE#####
webFace= mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].parts['ResistantWeb'].faces[0]
shortEdge1= mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].parts['ResistantWeb'].edges[8]
myPart.ShellExtrude(sketch=flangeSketch, sketchPlane=
webFace,sketchPlaneSide= SIDE1, sketchUpEdge= shortEdge1, depth=
flange_h, draftAngle= -45.0)

#####BUKUM YARICAPI VER#####
holeEdge1 = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].parts['ResistantWeb'].edges.findAt((a1, 0.0, 0.0),
)
holeEdge2 = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].parts['ResistantWeb'].edges.findAt((a2+holeSpacing
1, 0.0, 0.0), )

```

```

holeEdge3 = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].parts['ResistantWeb'].edges.findAt((a3+holeSpacing
1+holeSpacing2, 0.0, 0.0), )
holeEdge4 = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].parts['ResistantWeb'].edges.findAt((-a2-
holeSpacing1, 0.0, 0.0), )
holeEdge5 = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].parts['ResistantWeb'].edges.findAt((-a3-
holeSpacing1-holeSpacing2, 0.0, 0.0), )
myPart.Round(radius=6.0, edgeList= (holeEdge1, holeEdge2,
holeEdge3, holeEdge4, holeEdge5,))

partMassProperties = myPart.getMassProperties()

#####MALZEME YARAT#####
materialDensity = 0.00276799 #g/mm^3
Al2024 = myModel.Material(name='Al2024')
elasticProperties=(72394.95, 0.33)
Al2024.Elastic(table=(elasticProperties, ))

#####MALZEME KESITI YARAT#####
mySection = myModel.HomogeneousShellSection(name='WebSection',
material='Al2024',thickness=webThickness)

#####MALZEME KESITI ATA#####
region = (myPart.faces,)
myPart.SectionAssignment(region=region,
sectionName='WebSection')

#####MONTAJ YARAT#####
myAssembly = myModel.rootAssembly
myInstance = myAssembly.Instance(name='WebInstance',
part=myPart, dependent=OFF)

#####COZUM AGI OLUSTUR#####
region = (myInstance.faces,)
flangeRegion = (mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].faces[1],mdb
.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].faces[4],mdb
.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].faces[6],mdb
.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].faces[8],mdb
.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].faces[10],)
elemType = mesh.ElemType(elemCode= QUAD, elemLibrary=STANDARD)
myAssembly.setElementType(regions=region, elemTypes=(elemType,))
myAssembly.seedPartInstance(regions=(myInstance,), size=1.5)
myAssembly.setMeshControls(regions=region[0], elemShape=QUAD,
algorithm=MEDIAL_AXIS)
myAssembly.setMeshControls(regions=flangeRegion[0:5],
elemShape=QUAD, algorithm=ADVANCING_FRONT)
myAssembly.generateMesh(regions=(myInstance,))

#####DOGRUSAL STATIK ADIM YARAT#####
myModel.StaticStep(name='StaticLinear',
previous='Initial',timePeriod=1.0, initialInc=0.1,
description='Shear flow of web.')
```

```

#####YUKLERI UYGULA#####
all4Edges = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].edges.findAt
(((webLength/2,0.0,0.0),), ((webLength/2,0.0,0.0),), ((0.0,webHeight/2,0.
0),), ((0.0,-webHeight/2,0.0),))
EdgesRegion = regionToolset.Region(circumEdges=all4Edges)
shortEdges = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].edges.findAt
(((webLength/2,0.0,0.0),), ((webLength/2,0.0,0.0),))
shortEdgesRegion = regionToolset.Region(circumEdges=shortEdges)
longEdges = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].edges.findAt
(((0.0,webHeight/2,0.0),), ((0.0,-webHeight/2,0.0),))
longEdgesRegion = regionToolset.Region(circumEdges=longEdges)
myModel.ShellEdgeLoad(name='NormalFlow',
createStepName='StaticLinear', region=shortEdgesRegion,
magnitude=113.310375, traction=NORMAL)
myModel.ShellEdgeLoad(name='ShearFlowShort',
createStepName='StaticLinear', region=shortEdgesRegion,
magnitude=18.009, traction=SHEAR)
myModel.ShellEdgeLoad(name='ShearFlowLong',
createStepName='StaticLinear', region=longEdgesRegion, magnitude=-
18.009, traction=SHEAR)

#####SINIR KOSULLARINI UYGULA#####
myModel.DisplacementBC(name='ClampedLongEdges',
createStepName='Initial', region=(longEdges,), u3=0.0, ur1=0.0)
myModel.DisplacementBC(name='ClampedShortEdges',
createStepName='Initial', region=(shortEdges,), u3=0.0, ur2=0.0)
pointA = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].vertices.fin
dAt((-webLength/2,-webHeight/2,0.0),)
myModel.DisplacementBC(name='FixedPoint',
createStepName='Initial', region=(pointA,), u1=0.0, u2=0.0, u3=0.0)
pointC = mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].rootAssembly.instances['WebInstance'].vertices.fin
dAt((webLength/2,webHeight/2,0.0),)
myModel.DisplacementBC(name='OppositePoint',
createStepName='Initial', region=(pointC,), u2=0.0)

#####DOGRUSAL STATIK ANALIZI KOSTUR#####
jobName = 'LinearStaticCombined'
myJob = mdb.Job(name=jobName, model='Model-' + str(designIndex))
myJob.submit()
myJob.waitForCompletion()

#####ANALIZ TIPINI BURKULMAYA CEVIR#####
myModel.BuckleStep(name='Buckling', previous='Initial',
numEigen=1, vectors=10, maxIterations=200, description='Buckling of
web.')
```

```

mdb.models['Model-' +
str(designIndex)].steps['StaticLinear'].suppress()

#####YUK VE SINIR KOSULLARINI TEKRAR YARAT#####
myModel.ShellEdgeLoad(name='ShearFlowShort',
createStepName='Buckling', region=shortEdgesRegion,
magnitude=18.009, traction=SHEAR)

```



```

myModel.ShellEdgeLoad(name='ShearFlowLong',
createStepName='Buckling', region=longEdgesRegion, magnitude=-
18.009, traction=SHEAR)
myModel.ShellEdgeLoad(name='NormalFlow',
createStepName='Buckling', region=shortEdgesRegion,
magnitude=113.310375, traction=NORMAL)
myModel.DisplacementBC(name='ClampedLongEdges',
createStepName='Initial', region=(longEdges,), u3=0.0, ur1=0.0)
myModel.DisplacementBC(name='ClampedShortEdges',
createStepName='Initial', region=(shortEdges,), u3=0.0, ur2=0.0)
myModel.DisplacementBC(name='FixedPoint',
createStepName='Initial', region=(pointA,), u1=0.0, u2=0.0, u3=0.0)
myModel.DisplacementBC(name='OppositePoint',
createStepName='Initial', region=(pointC,), u2=0.0)

#####BURKULMA ANALIZI KOSTUR#####
jobName = 'BucklingCombined'
myJob = mdb.Job(name=jobName, model='Model-' + str(designIndex))
myJob.submit()
myJob.waitForCompletion()

#####CIKTI VERITABANINA ERIS#####
odbLSCombined = visualization.openOdb('LinearStaticCombined.odb')
odbBCombined = visualization.openOdb('BucklingCombined.odb')

#####CIKTI DOSYASINA YAZ#####
LSCombinedMaxMises = getMaxMises(odbLSCombined, None)
reportFile.write(str(LSCombinedMaxMises) + " ")

BCombinedEigenvalue = float(odbBCombined.steps.values()[0].frames[1].description[28:])
reportFile.write(str(BCombinedEigenvalue) + " ")

partWeight = materialDensity * webThickness *
partMassProperties["area"]
reportFile.write(str(partWeight) + "\n")

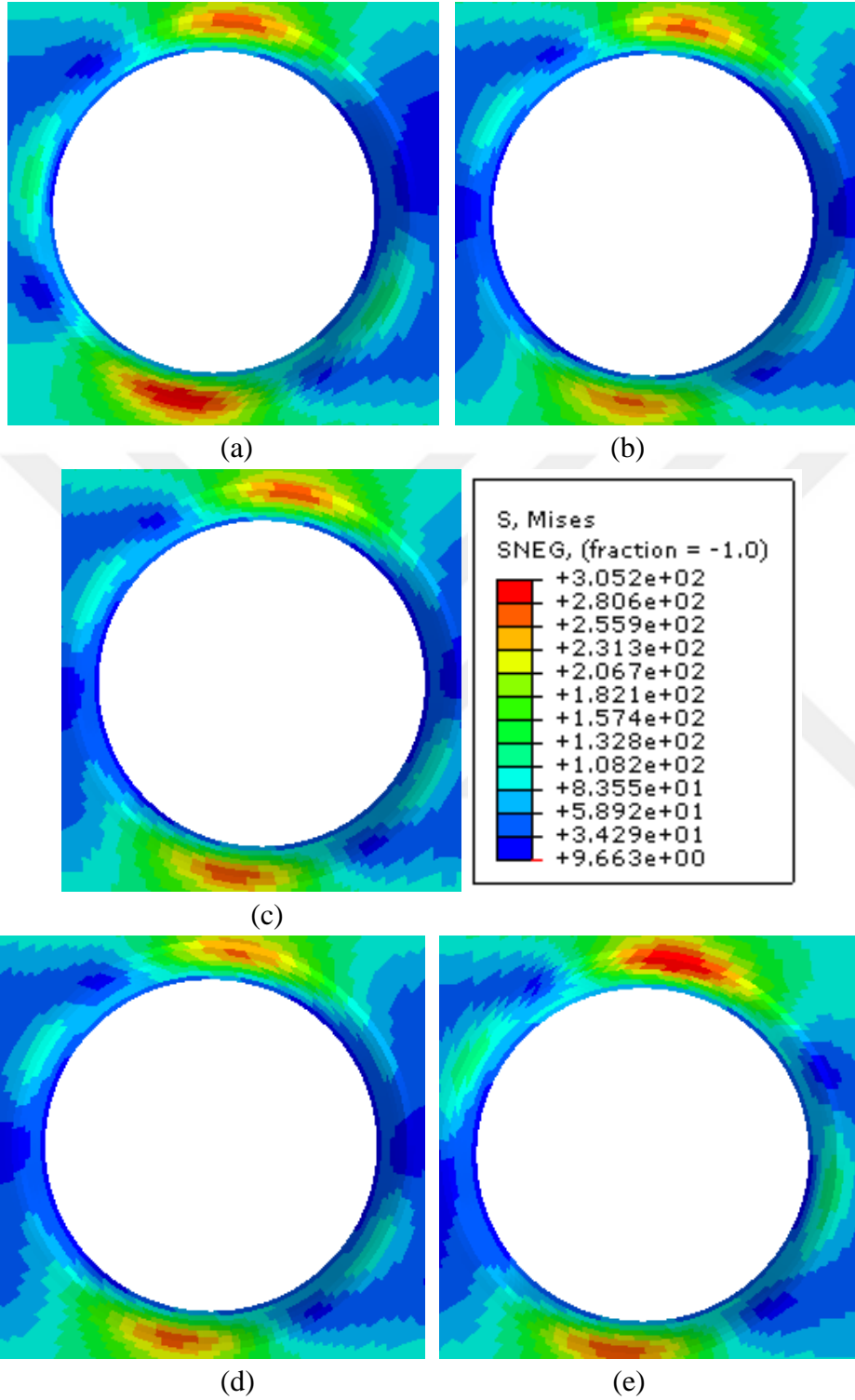
print 'Minimum Buckling Eigenvalue for Combined Buckling:
%f'%(BCombinedEigenvalue)
print 'Weight of the Part is: %f grams'%(partWeight)

#####ACIKSA CIKTI VERITABANLARINI KAPAT#####
if session.odbData.has_key('C:/Temp/LinearStaticCombined.odb'):
    session.odbs['C:/Temp/LinearStaticCombined.odb'].close()
if
session.odbData.has_key('C:/Temp/LinearStaticCompression.odb'):
    session.odbs['C:/Temp/LinearStaticCompression.odb'].close()
if session.odbData.has_key('C:/Temp/LinearStaticShear.odb'):
    session.odbs['C:/Temp/LinearStaticShear.odb'].close()
if session.odbData.has_key('C:/Temp/BucklingCombined.odb'):
    session.odbs['C:/Temp/BucklingCombined.odb'].close()
if session.odbData.has_key('C:/Temp/BucklingCompression.odb'):
    session.odbs['C:/Temp/BucklingCompression.odb'].close()
if session.odbData.has_key('C:/Temp/BucklingShear.odb'):
    session.odbs['C:/Temp/BucklingShear.odb'].close()

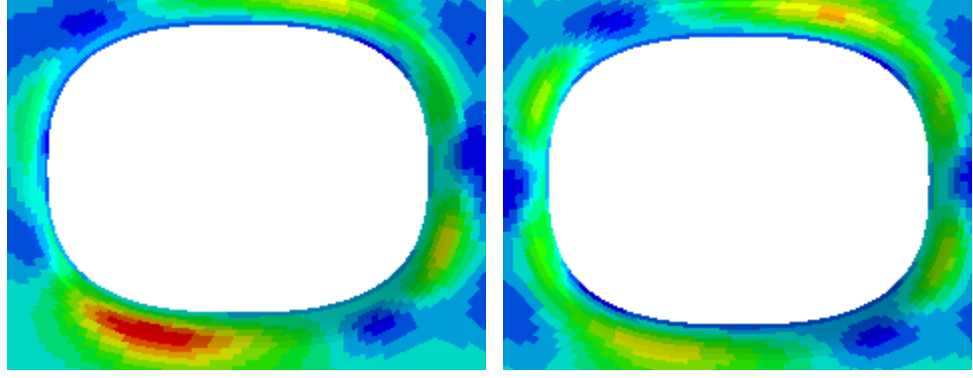
reportFile.close()

```

EK 7: Başlangıç tasarımı, özdeş delikli eşit aralıklı tasarım ve özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarımın delik çevresi von Mises gerilme dağılımları.

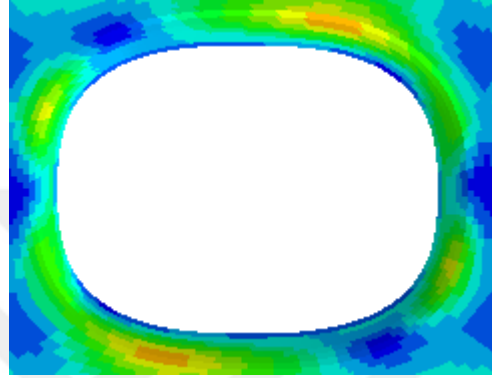


Şekil Ek.1: Başlangıç tasarımında bulunan (a) sol uç delik , (b) sol ara delik, (c) merkez delik, (d) sağ ara delik, (e) sağ uç delik için detaylı von Mises gerilme dağılımı.

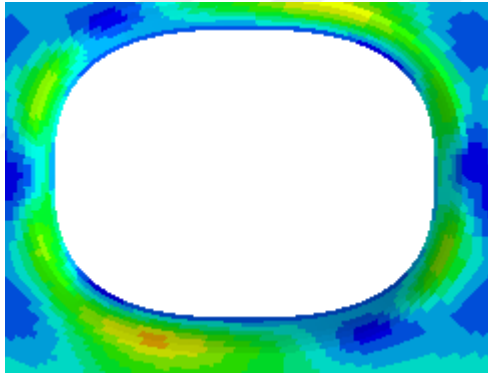
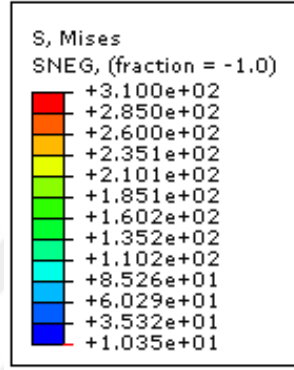


(a)

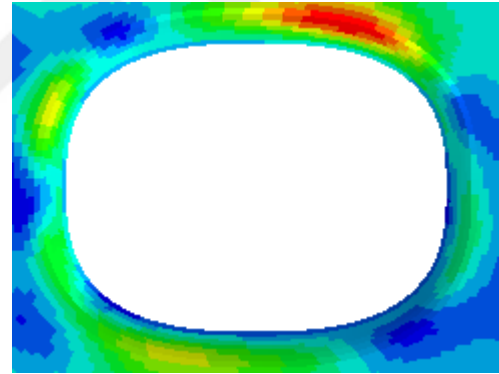
(b)



(c)

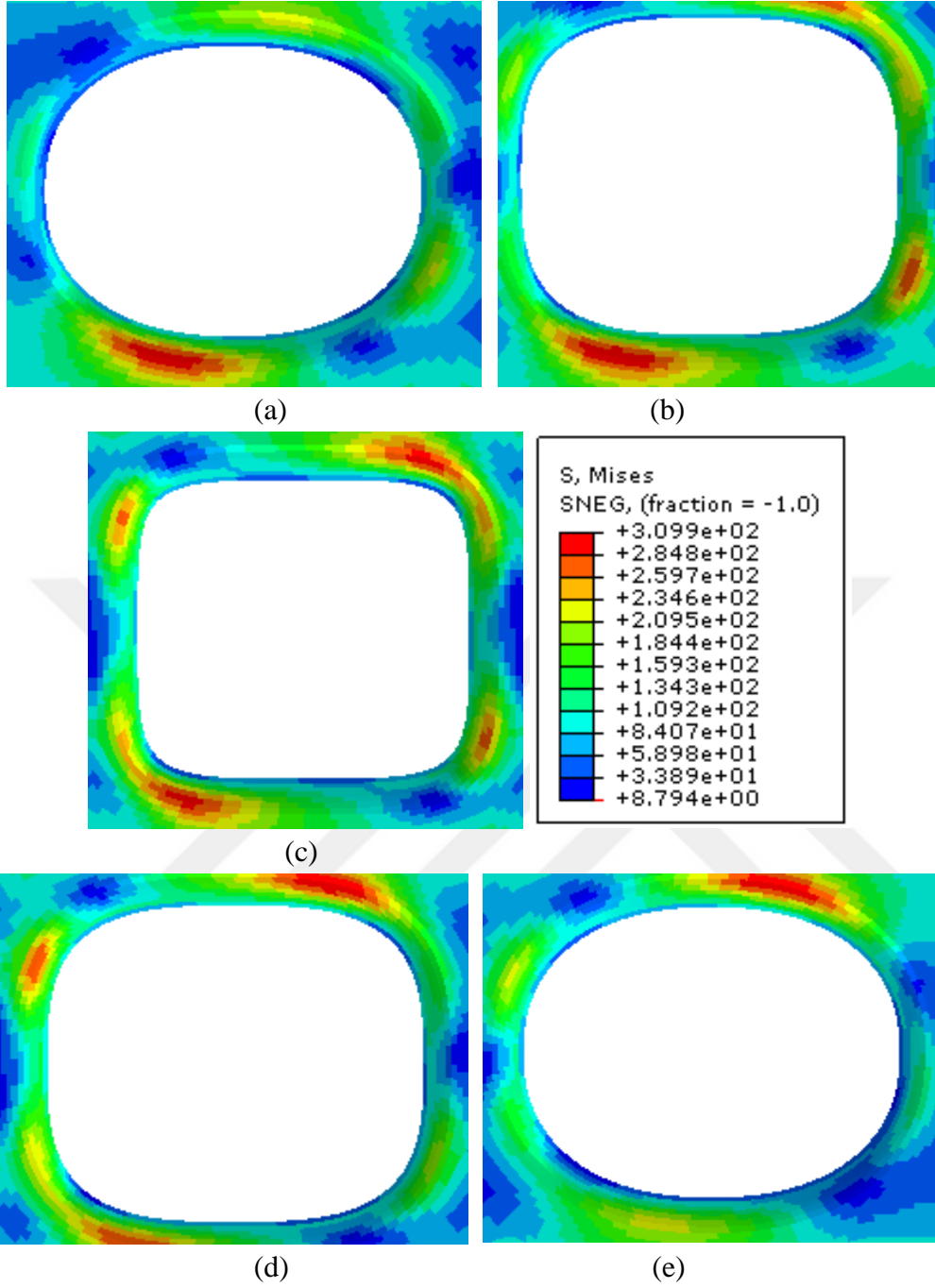


(d)



(e)

Şekil Ek.2: Özdeş delikli eşit aralıklı tasarımda bulunan (a) sol uç delik , (b) sol ara delik, (c) merkez delik, (d) sağ ara delik, (e) sağ uç delik için detaylı von Mises gerilme dağılımı.



Şekil Ek.3: Özdeş olmayan delikli farklı aralıklı tasarımda bulunan (a) sol uç delik , (b) sol ara delik, (c) merkez delik, (d) sağ ara delik, (e) sağ uç delik için detaylı von Mises gerilme dağılımı.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Yiğit Anıl Yücesan
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 28.01.1992, Ankara
E-posta : yigitanilyucesan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, ODTÜ, Havacılık ve Uzay Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2018, TOBB ETÜ, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2016-2018	TAI TUSAŞ	Tasarım Mühendisi
2014-2015	Karakamlar A.Ş.	Yarı Zamanlı Mühendis
2013	Eskişehir 1. Hava İkmal Bakım Merkez Komutanlığı	Stajyer

YABANCI DİL:

İngilizce (YDS 86.25/100, TOEFL IBT 101/120)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

Uluslararası Konferans Yayınları

- **Yücesan, Y. A., Acar, E.** (2017) Shape Optimization of Lightning Holes Used in Aircraft Fuselage Beams. 4th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN 2017), ANTALYA 2017