

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**3 BOYUTLU YAPISAL ANALİZLERDE MİNİMUM MODEL
BÜYÜKLÜĞÜNÜN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hayri GÜLDAĞLI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

OCAK 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**3 BOYUTLU YAPISAL ANALİZLERDE MİNİMUM MODEL
BÜYÜKLÜĞÜNÜN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hayri GÜLDAĞLI
(503191512)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Atakan ALTINKAYNAK

OCAK 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503191512 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hayri GÜLDAĞLI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “3 BOYUTLU YAPISAL ANALİZLERDE MİNİMUM MODEL BÜYÜKLÜĞÜNÜN BELİRLENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Atakan ALTINKAYNAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Zeynep Parlar**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Birgül Aşçıoğlu TEMİZTAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 25 Ocak 2023
Savunma Tarihi : 25 Ocak 2023





Eşime ve aileme,



ÖNSÖZ

Tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen aileme ve her zaman yanımda olan eşime sabrı ve destekleri için teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgilerini paylaşan İTÜ Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Katı Cisimlerin Mekaniği Programı'nın değerli öğretim üyelerine ve türbin orta karkas yapının rotor kaynaklı dengesizlik yüklerine dayanımını hesaplamak için oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin eksenel büyüklüğünü etkileyen faktörlerin incelendiği ve model büyüklüğü hesaplaması için formüllerin oluşturulduğu bu çalışmanın hazırlanmasında emeği geçen, bilgilerini, deneyimlerini ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Atakan ALTINKAYNAK'a teşekkürü borç bilirim.

Aralık 2022

Hayri Güldağlı
Mekanik Analiz Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Gaz Türbini Tanımı, Modülleri ve İşlevi	1
1.2 Tepki Yüzeyi Yöntemi (Surface Response Method)	3
1.3 Tezin Amacı ve Kapsamı	4
1.4 Literatür Araştırması	4
2. GAZ TÜRBİNLERİNDE KARKAS YAPININ GEOMETRİK VE ANALİZ MODELLEMESİ	7
2.1 Karkas Yapının Geometrik Modeli	7
2.2 Karkas Yapı Montajı için Malzeme Tanımı	10
2.3 Karkas Yapı Montajının Ağ Yapısının(Mesh) Oluşturulması	10
2.4 Temas Yüzeylerinin Tanımlanması	12
2.5 Sınır Koşullarının Tanımlanması	13
2.6 Sonlu Elemanlar Analizinden Minimum Model Büyüklüğünün Belirlenişi....	14
3. KARKAS YAPININ SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	15
3.1 Sadece Mahfaza Modelinin Minimum Model Uzunluğunun Değişimi	15
3.2 Sadece Mahfaza Modelinin Doğrusal Olmayan Geometri Etkisine Bağlı Olarak Minimum Model Uzunluğunun Değişimi	20
3.3 Karkas Yapı Montajının Von Mises Gerilmesine Bağlı Minimum Model Uzunluğunun Belirlenmesi	21
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	31
KAYNAKLAR	37
EKLER	39



KISALTMALAR

CAD : Bilgisayar Destekli Tasarım





SEMBOLLER

t	: Parçanın kalınlığı
r	: Parçanın yarıçapı
L	: Minimum model uzunluğu
R^2	: Korelasyon katsayısının karesi





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Jet motoru istasyonları.....	7
Çizelge 2.2: Analizlerde kullanılan malzeme tanımı.....	10
Çizelge 2.3: Uygulanan yüklerin büyüklükleri.....	14
Çizelge 3.1: Minimum model uzunluğunun farklı malzemelere göre incelenmesi için kullanılan parametre değerleri.	15
Çizelge 3.2: Minimum model uzunluğunun farklı malzemelerdeki sonuçları.	18
Çizelge 3.3: 2., 3., 4., 5. ve 6. dereceden polinomların R2 kıyaslaması.	18
Çizelge 3.4: Doğrusal olmayan geometrik etkilerin dahil edildiği durumda minimum model uzunluğu.....	21
Çizelge 3.5: Karkas yapıya uygulanan kuvvetlerin büyüklüğü.....	24
Çizelge 3.6: Farklı yüklemeler altında elde edilen minimum model uzunluğu sonuçları.....	25
Çizelge 4.1 : Literatürde tanımlanan minimum model uzunluğu formülleri.....	32
Çizelge A.1: Sadece mahfaza modelinin seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).....	39
Çizelge A.1 (devam): Sadece mahfaza modelinin seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).....	40
Çizelge A.2: Sadece mahfaza modelinin seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal olmayan geometrik sonuçları (MPa).....	41
Çizelge A.2 (devam): Sadece mahfaza modelinin seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal olmayan geometrik sonuçları (MPa).....	42
Çizelge B.1: Karkas yapı modelinin 10 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).	43
Çizelge B.1 (devam): Karkas yapı modelinin 10 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).	44
Çizelge B.2: Karkas yapı modelinin 5 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).	45
Çizelge B.2 (devam): Karkas yapı modelinin 5 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).	46
Çizelge B.3: Karkas yapı modelinin nominal yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).	47
Çizelge B.3 (devam): Karkas yapı modelinin nominal yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).	48
Çizelge B.4: Karkas yapı modelinin 0.5 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).	49

Çizelge B.4 (devam): Karkas yapı modelinin 0.5 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).	50
Çizelge B.5: Karkas yapı modelinin 0.5 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).	51
Çizelge B.5 (devam): Karkas yapı modelinin 0.5 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).	52



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Gaz türbininin çalışma prensibinin temel gösterimi [1].	2
Şekil 1.2: Türbin orta karkas yapı [3].	3
Şekil 2.1: Jet motoru istasyonları.	7
Şekil 2.2: Karkas yapı, mahfazası ve bağlantı parçaları.	8
Şekil 2.3: Karkas yapı ile mahfazasının analizde kullanılan hali.	8
Şekil 2.4: Mahfazanın yarıçap ve kalınlık gösterimi.	9
Şekil 2.5: Karkas yapının geometrik ölçülendirmesi.	9
Şekil 2.6: Karkas yapı, mahfazası ve bağlantı parçaları.	10
Şekil 2.7: Karkas yapı mahfazasının ağ yapısı detayları.	11
Şekil 2.8: Bağlantı parçalarının ağ yapısı detayları.	11
Şekil 2.9: Karkas yapının ağ yapısı detayları.	12
Şekil 2.10: Parçalar arası temas elemanları.	13
Şekil 2.11: Sonlu elemanlar modeli periyodik sınır koşulları.	13
Şekil 2.12: Sonlu elemanlar analizinde her adımda silinen eleman sıraları.	14
Şekil 3.1: Sadece mahfaza modelinin radyal yöndeki şekil değiştirmesi (mm).	16
Şekil 3.2: Sadece mahfaza modelinin teğetsel yöndeki şekil değiştirmesi (mm).	16
Şekil 3.3: Sadece mahfaza modelinin eksenel yöndeki şekil değiştirmesi (mm).	17
Şekil 3.4: Sadece mahfaza modelinin Von Mises gerilmesi (MPa).	17
Şekil 3.5: Sadece mahfaza modelinin minimum model uzunluğunun kalınlık ve yarıçapa göre değişimi.	19
Şekil 3.6: Sadece mahfaza modelinin minimum model uzunluğunun $\sqrt{(r*t)}$ 'ye göre değişimi.	20
Şekil 3.7: Karkas yapının radyal yöndeki şekil değiştirmesi (mm).	22
Şekil 3.8: Karkas yapının teğetsel yöndeki şekil değiştirmesi (mm).	22
Şekil 3.9: Karkas yapının eksenel yöndeki şekil değiştirmesi (mm).	23
Şekil 3.10: Karkas yapı modelinde mahfazanın radyal yöndeki şekil değiştirmesi (mm).	23
Şekil 3.11: Mahfazanın Von Mises gerilmesi (MPa).	24
Şekil 3.12: Karkas yapının nominal yükleme altında minimum model uzunluğunun kalınlık ve yarıçapa göre değişimi.	25
Şekil 3.13: Karkas yapının nominal yükleme altında minimum model uzunluğunun $\sqrt{(r*t)}$ 'ye göre değişimi.	26
Şekil 3.14: Karkas yapının 10 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun kalınlık ve yarıçapa göre değişimi.	26
Şekil 3.15: Karkas yapının 10 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun $\sqrt{(r*t)}$ 'ye göre değişimi.	27
Şekil 3.16: Karkas yapının 5 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun kalınlık ve yarıçapa göre değişimi.	28
Şekil 3.17: Karkas yapının 5 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun $\sqrt{(r*t)}$ 'ye göre değişimi.	28

Şekil 3.18: Karkas yapının 0.5 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun kalınlık ve yarıçapa göre değişimi.	29
Şekil 3.19: Karkas yapının 0.5 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun $\sqrt{(r*t)}$ 'ye göre değişimi.	29
Şekil 3.20: Karkas yapının 0.1 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun kalınlık ve yarıçapa göre değişimi.	30
Şekil 3.21: Karkas yapının 0.1 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun $\sqrt{(r*t)}$ 'ye göre değişimi.	30
Şekil 4.1: Minimum model uzunluğunun %1 hassasiyetle farklı yüklemeler altında $\sqrt{(r*t)}$ 'ye göre değişimi.	31
Şekil 4.2: Minimum model uzunluğunun nominal yüklemeli ve %1 hassasiyetli tez çalışması sonucu ile referans çalışmalar arasındaki kıyaslama.	33
Şekil 4.3: Minimum model uzunluğunun %5 hassasiyetle $\sqrt{(r*t)}$ 'ye göre değişimi.	34
Şekil 4.4: Minimum model uzunluğunun %10 hassasiyetle $\sqrt{(r*t)}$ 'ye göre değişimi.	35



3 BOYUTLU YAPISAL ANALİZLERDE MİNİMUM MODEL BÜYÜKLÜĞÜNÜN BELİRLENMESİ

ÖZET

Yapılan tez çalışmasında üç boyutlu sonlu elemanlar modellerinin büyüklüğünü belirlemek için farklı parametreler incelendi. Sonlu elemanlar modelleri havacılık, otomotiv, beyaz eşya vb. pek çok sektörde düşük çevrimli ve yüksek çevrimli yorulma ömrü hesaplamaları, yapının rijitliği, yapının dinamik yüklere dayanım hesaplamaları gibi farklı konularda kullanılmaktadır. Bu çalışma yapılırken havacılıkta ulaşım amacıyla, şehirlerde anlık elektrik ihtiyacı artışı durumunda elektrik üretimini sağlamak amacıyla ya da akaryakıt firmalarında yer altından akaryakıt çıkarmak amacıyla kullanılan gaz türbinleri baz alınmıştır. Gaz türbinlerinin modülleri açıklanmıştır ve bu modüllerden yanma odası ile türbin arasında bulunan türbin orta karkas yapı, gerçekleştirilecek analizler için seçilmiştir. Türbin orta karkas yapıyı analiz etmek için kurulan sonlu elemanlar modelleri herhangi bir bilgisayarın kabul edilebilir zaman dilimlerinde çözebileceğinden çok daha büyük modeller olabilmektedir. Bu süre modelin büyüklüğüne ve amacına göre haftalar ya da aylar olabilmektedir. Bu yüzden model büyüklüğünün belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Model büyüklüğünde yapılacak %10 ya da %15 gibi bir azaltma, bu analiz süreleri göz önünde bulundurulduğunda çok büyük katkı sağlamaktadır.

Yapılan literatür taramasında, sonlu elemanlar modellerinin minimum model büyüklüğünü belirlemek için oluşturulan formüller temel olarak ince cidarlı basınçlı kap hesaplamalarına dayanmaktadır. Bu formüller $\sqrt{(\text{yarıçap} \cdot \text{kalınlık})}$ değerinin farklı doğrusal katları olarak verilmiştir.

Bu çalışmada türbin orta karkas yapının rotor kaynaklı dengesizlik yüklerine dayanımını hesaplamak için oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin eksenel büyüklüğünü etkileyen kalınlık, yarıçap ve uygulanan yük faktörleri incelenmiş ve bu faktörleri göz önünde bulundurarak model büyüklüğü hesaplaması için formüller oluşturulmuştur. Farklı yükleme çeşitleri ve büyüklüklerine göre ilgili sonucun, model büyüklüğüne karar verildiği aşamada kullanılması planlanmaktadır.

Malzeme seçimi yapılırken, oluşturulan karkas yapı modelinin sadece mahfaza kısmı doğrusal malzeme tanımıyla kullanılmıştır. Bu sonuçlardan elde edilen minimum model uzunluğu değerlerine göre malzeme seçimi yapılmıştır. Karkas yapının sonlu elemanlar modeli oluşturulurken yapının rijitliğini doğru olarak yansıtabilecek miktarda eleman kullanılmıştır. Mahfaza, karkas yapı ve bağlantı elemanları arasında temas yüzeyleri tanımlanırken 0.3 sürtünme katsayılı standart kontak kullanılmıştır. Karkas yapının tekrar eden kısmı modellenerek periyodik sınır koşullarıyla model oluşturulmuştur. Karkas yapının iç kısmına rotor dengesizliği kaynaklı radyal ve eksenel yükler, mahfazanın arka ucuna gaz yüklerini simüle eden eksenel yük uygulanmıştır. Sonuçlardan her bir kalınlık-yarıçap ikilisi için minimum model büyüklüğü belirlenirken, mahfazadan, her adımda bir eleman sırası silinmiştir ve

nominal gerilme değeriyle aradaki fark %1'i geçtiği uzunluk minimum model uzunluğu olarak tanımlanmıştır.

Yüzey tepki metodu kullanılarak, minimum model uzunluğu değerlerinin kalınlık ve yarıçapa bağlı değişimi yüzeyler üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca literatürdeki çalışmalar ile kıyaslama yapabilmek için $\sqrt{(\text{yarıçap} \cdot \text{kalınlık})}$ birleşik parametresine göre nasıl değiştiği de incelenmiştir. Karkas yapının iç kısmına ve mahfazanın arka ucuna uygulanan yük büyüklükleri değiştirilerek, farklı yük büyüklüklerinin, minimum model uzunluğunu nasıl etkilediği incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlarda sadece mahfazayı içeren doğrusal modelin, minimum model büyüklüğü açısından bir üst limit tanımladığı görülmüştür. Farklı büyüklüklerde yük uygulandığında, minimum model büyüklüğünün kalınlık-yarıçap parametrelerine göre farklı yollar izlediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmada uygulanan yüklerden yakın olanı seçilip ilgili kalınlık ve yarıçaptaki minimum model uzunluğunun hesaplanması sonucuna ulaşılmıştır.

Hassasiyet değeri olarak %1'e ek olarak, başlangıç seviye tasarım çalışmalarını göz önünde bulundurmak için %5 ve %10 değerleri de aynı şekilde incelenmiştir ve elde edilen minimum model uzunluğu sonuçları paylaşılmıştır.

CALCULATING MINIMUM MODEL SIZE IN 3-DIMENSIONAL STRUCTURAL ANALYSIS

SUMMARY

In many areas, modern computers affect mechanical solutions of structures as in many activities of people. New generation computers provide increased capacity to have solutions in more acceptable timeframe day by day. Finite element model is one of the quantitative methods that is widely used to obtain solution of mechanical, fluid, electrical, etc. fields. Finite element models are used to calculate low cycle fatigue and high cycle fatigue life results, stiffness of the structure and strength of the structure to resist dynamic loads in many different industries such as aerospace, automotive, and domestic appliances industries.

In this thesis, thickness, radius, and applied load parameters are investigated to determine the minimum model size of 3-dimensional finite element models. Gas turbines which are used for transportation in aerospace industry, instant demand matching of electricity in towns or extracting oil by oil companies are considered in the study. Modules of gas turbines are explained in general detail. Turbine mid frame which is located between combustor and turbine amongst all modules is selected to analyze the model size. The finite element models that are constructed to analyze turbine mid frame might be quite larger than a standard 3D finite element model that any computer with general specifications can solve in acceptable time frame. The duration of run time might be measured in weeks or months regarding the purpose of the analysis; thus, defining the correct model size is critically significant. 10% or 15% decrease in model size contributes significantly to reduce analysis duration regarding the total duration of the analyses to be performed.

In the literature review, the formulas which are used to calculate the minimum model size of finite element models are obtained based on the thin walled pressure vessel calculations. The formulas which are shared in the literature are defined as $\sqrt{(\text{radius} \times \text{thickness})}$ multiplied by different linear coefficients. This means that the larger $\sqrt{(\text{radius} \times \text{thickness})}$ value is, the larger minimum model size is.

Thickness, radius, and applied load which affect the axial length of finite element models that are constructed to calculate ability of strength of turbine mid frame to unbalance loads which are caused by rotor shaft unbalance or blade out situation are investigated in the study. Regarding these factors, formulas are constructed to calculate minimum model size of finite element models. The related formula considering the different load magnitudes is planned to be used to calculate minimum model size when it is decided in the project.

The casing portion of the turbine mid frame is used to determine material with linear material properties when material is required to select at the model construction phase. Material selection is performed based on the minimum model size results of the casing analyses with different material properties. Casing outer Radius is fixed to 300 mm. 10 different casing thickness is applied based on real life examples. 100 times nominal

load is applied to the casing-only analysis to obtain higher stress results with higher precision values. Since it is completely linear analysis, magnitude of the applied load changes only stress result but it doesn't affect the stress change ratio at each row deletion of the elements. Regarding the casing analysis results, aluminum is selected as the material to be used in turbine mid frame analyses.

The enough amount of elements are used to reflect the correct stiffness of turbine mid frame. Standard contact elements with 0.3 friction coefficient among casing, strut, bolts, and nuts are defined. The friction coefficient is selected the references for greased aluminum contacts. Repeating sections in tangential direction of turbine mid frame assembly is modeled with periodical boundary conditions.

Radial and axial loads which are caused by unbalance of the rotor shaft are applied to inner side of the turbine mid frame. Axial load which is caused by gas loads on structural components which are connected to casing is applied to aft side of the casing which is connected to turbine mid frame. The radial and axial load that are applied to inner side of the turbine mid frame are transferred to the casing through four bolted joint.

The location to evaluate Von Mises stress change is selected by regarding of being outside of contact locations, having highest stress result and being closest to the applied load at aft end of the case. Von Mises stress of the selected location is defined as nominal stress by using the original assembly results. In the process of calculating the minimum model size, a row of elements at the very aft end of the casing is removed at each step for every couple of thickness and radius. The model size when the percentage Von Mises stress difference between the Von Mises stress result of the analysed step and the nominal stress exceeds 1% is defined as the minimum model length.

The change of minimum model size regarding the thickness and radius is shown on the surfaces by using the surface response method. Regarding these surface results, casing thickness is more dominant than casing radius. Also, the change of minimum model size regarding the combined parameter $\sqrt{(\text{radius} \times \text{thickness})}$ is analyzed to be able to compare with the results obtained from the literature review.

It is investigated how applying different load magnitudes on inner side of turbine mid frame and aft end of the casing affects the minimum model size of 3-dimensional finite element models.

Regarding the results, it is observed that the minimum model size result of the linear casing finite element model defines upper limit to the all results obtained from turbine mid frame assembly. It is obtained that applying different magnitudes of loads to inner side of turbine mid frame and aft end of the casing affects the minimum model size definition based on separate radius and thickness parameters and $\sqrt{(\text{radius} \times \text{thickness})}$ combined parameter.

Literature review results show increase in finite element model size as $\sqrt{(\text{radius} \times \text{thickness})}$ increases. Unlike literature review results, analysis results show that minimum model length decreases until certain $\sqrt{(\text{radius} \times \text{thickness})}$ value at all magnitudes of applied forces. After reaching a threshold limit around 60, the minimum model length starts increasing for the results with nominal force and lower force than nominal force. By selecting the closest load magnitudes applied on the related locations of the assembly, the minimum model size is to be calculated in future projects which include 3-dimensional finite element models.

In the main chapter of the study, the precision value of 1% is selected to have accurate results; however, in the conceptual or preliminary design phases of the projects, 5% or 10% precision values might be accepted; thus, in this study, minimum model size results comparison with precision values of 5% and 10% are also shared. As expected, as the precision limit value gets higher, the size of the finite element model decreases.





1. GİRİŞ

İnsanın birçok aktivitesinde olduğu gibi, yapıların mekanik sorunlarının çözümü de hızla gelişim gösteren modern bilgisayarlardan etkilenmektedir. Günümüzde hızlı bir şekilde gelişen yeni nesil bilgisayarların hızları ve kapasiteleri her geçen gün daha çok artmaktadır. Bu gelişmeler zaman alan problemlerin daha kolay bir şekilde çözülmesini sağlamakta ve daha genel çözümler üretmemizi kolaylaştırmaktadır. Sayısal çözüm yöntemlerinin daha kullanışlı hale getirilmesi bilgisayar teknolojisinin gelişimine doğrudan bağlantılıdır. Sonlu elemanlar yöntemi, sayısal yöntemlerden biri olup bilgisayarların gelişmesiyle artık mekanik sorunların çözümlemesinde en genel araç olmuştur.

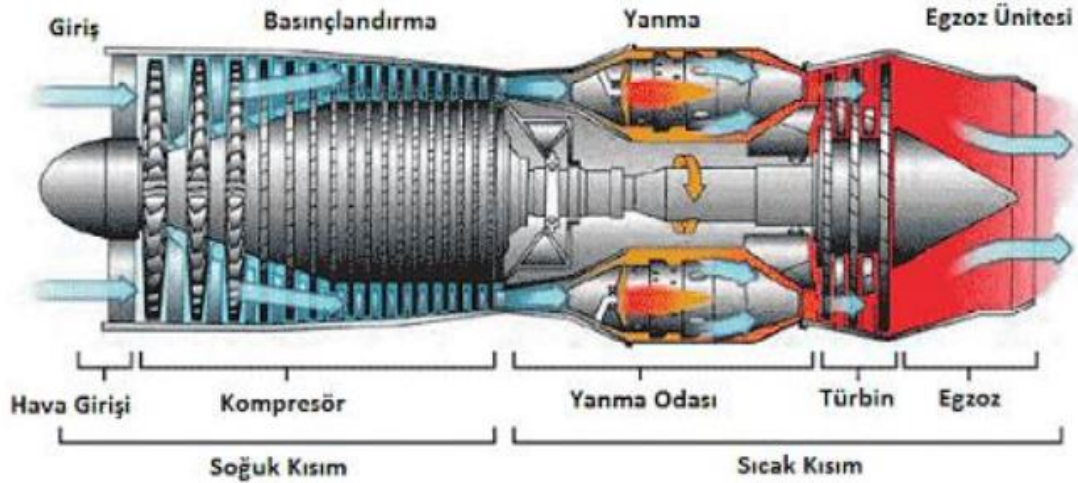
Sonlu elemanlar yöntemi sayısal bir çözümleme tekniğidir ve çeşitli mühendislik dallarındaki sorunların yaklaşık çözümlerinin bulunmasını sağlamaktadır. Farklı konularda kullanılabilecek bir çözümleme aracı olduğu için endüstride ve mühendislik okullarında karşılaşılan farklı sorunların çözümü için uygulanmıştır.

Havacılık, otomotiv, beyaz eşya vb. pek çok sektörde düşük çevrimli ve yüksek çevrimli ömür hesaplamaları, yapının rijitliği, yapının dinamik yüklere dayanım hesaplamaları gibi farklı konularda sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır.

1.1 Gaz Türbini Tanımı, Modülleri ve İşlevi

Gaz türbinlerinde temel olarak aksel kompresörden geçen hava sıkıştırılır ve motorun yakıt deposundan yanma odasına gelen yakıt ile karışarak yanar. Yüksek basınç ve sıcaklıktaki gazların motorun arka kısmından atılmasıyla itki sağlanmaktadır.

Gaz türbinleri havacılık sektöründe uçak kanatlarının alt ve üst yüzeyi arasında basınç farkının oluşmasını sağlayacak hıza ulaştıracak itkiyi oluşturmak için kullanılır. Ayrıca şehirlerde anlık elektrik ihtiyacı artışı durumunda elektrik üretimini sağlamak amacıyla kullanılır. Yer altından akaryakıt çıkarılması amacıyla yine gaz türbinleri kullanılmaktadır.



Şekil 1.1: Gaz türbininin çalışma prensibinin temel gösterimi [1].

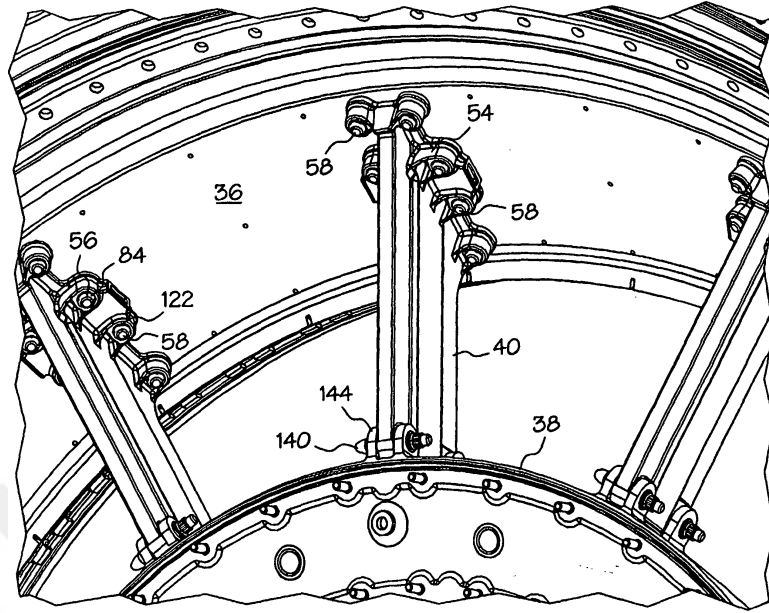
Hava, giriş kısmı ile motora girer ve giriş kısmının şekli motorun performansını azaltacak olan bozulmaların önüne geçecek şekilde düzgün bir akış sağlamaktadır.

Gaz türbinlerinde güçlü ve verimli bir yanma için basınçlı havaya ihtiyaç duyulmaktadır. Gaz türbinli motorlarda havayı sıkıştırabilmek için kompresör kullanılmaktadır. Kompresörün görevi yanma odasına sürekli olarak sıkıştırılmış hava akışı sağlamaktır. Kompresörün dönmesi şaft aracılığıyla türbinden sağlanmaktadır. Eksenel kompresör stator ve rotordan meydana gelmektedir. Rotorun hızlandırdığı havanın statora çarpmasıyla her kademedeki basınç yükseltilir. Kompresöre, istenen basınçlandırma oranına ulaşacak sayıda kademe eklenir.

Kompresör vasıtasıyla sıkıştırılan hava, yanma odasında, yakıt sprey nozullarından dışarıya atılan yakıt ile karıştırılıp yakılır. Ortaya çıkan ısı ile ivmelenen ve genişleyen hava, türbin için ihtiyaç duyulan sıcak gazdır. Türbinler, motorda dişli kutusu ve kompresörü tahrik edecek kuvveti oluşturmaktadır. Yanma odasından giriş yapan havanın enerjisinin işe dönüştürüldüğü birimdir. Hareketi kompresöre iletmek türbinin temel görevidir. Kompresörde havanın sıkıştırılmasıyla basınç yükseltilirken türbinde yüksek basınçlı havanın enerjisi mekanik şaft gücüne dönüştürülmektedir [2].

Yüksek basınçlı türbin ile düşük basınçlı türbin arasında türbin orta karkas yapı(turbine mid frame) olarak adlandırılan bir yapı bulunmaktadır. Bu yapı bir veya daha fazla rulmanı desteklemek ve bağlı bulunduğu mahfazalar ile dönmeyen parçaların taşınmasını sağlamakta kullanılır. Türbin orta karkas yapı yük taşıyan bir yapı olduğu için bu yapı tasarlanırken yük dayanımı önemli bir kriterdir. Dönen parçalardan bir veya birkaçının kopması ya da şaft kaynaklı dengesizlik yükleri bu

yapının dayanması gereken yüklere örnektir. Şekil 1.2’de türbin orta karkas yapıya bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 1.2: Türbin orta karkas yapı [3].

Türbinden gelen yüksek hızdaki sıcak yanmış gazlar egzoz ünitesine girer ve daha sonra nozuldan dışarı çıkarak uçaklarda itkiyi oluşturur ya da jeneratör veya yakıt pompasına bağlanarak elektrik üretmek ya da yakıt çıkarmak amaçlarıyla kullanılabilir. Egzozda ortaya çıkan fazla ısınmayı engellemek için, ön bölgeden giren soğuk havanın bir kısmı gövdenin iç kısmından egzozun dış bölümüne yönlendirilmekte ve bu kısmın soğutulması amacıyla kullanılmaktadır [4].

1.2 Tepki Yüzeyi Yöntemi (Surface Response Method)

Tepki yüzeyi yöntemi bir sürecin kalite karakteristikleri ve parametrelerinin arasındaki ilişkiyi modelleme, analiz etme ve optimum parametre düzeylerinin tespitinde kullanılmaktadır [5]. Tepki değişkeninin güvenilir ve yeterli bir şekilde ölçümünü gerçekleştiren deney tasarımını kullanarak en az sayıda gözlemlenebilir değer ile elde edilen veriler için en iyi tepki değerini veren unsur düzeylerini ve en iyi uyum sağlayacak matematiksel modelin ortaya çıkartılmasını kapsamaktadır [6]. Tepki Yüzeyi Metodolojisi ile kübik, doğrusal ve kuadratik gibi modeller kullanılmaktadır. Farklı parametrelerin belirli bir amaca yönelik incelenmesi için gerekli deney sayısının ve deney parametre değerlerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu

yöntem, bu çalışmada, belirlenen deney parametre değerlerinden elde edilen sonucun bu parametrelere göre nasıl değiştiğinin yüzey olarak tanımlanmasında kullanılmıştır.

1.3 Tezin Amacı ve Kapsamı

Farklı amaçlarla kurulan sonlu elemanlar modelleri herhangi bir bilgisayarın kabul edilebilir zaman dilimlerinde çözebileceğinden çok daha büyük modeller olabilmektedir. Bu süre modelin büyüklüğüne ve amacına göre haftalar ya da aylar olabilmektedir. Bu yüzden model büyüklüğünün belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Model büyüklüğünde yapılacak %10 ya da %15 gibi bir azaltma, bu analiz süreleri göz önünde bulundurulduğunda çok büyük katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada türbin orta karkas yapının rotor kaynaklı dengesizlik yüklerine dayanımını hesaplamak için oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin eksenel büyüklüğünü etkileyen kalınlık, yarıçap ve uygulanan yük faktörleri incelenmiş ve bu faktörleri göz önünde bulundurarak model büyüklüğü hesaplaması için formüller oluşturulmuştur. Farklı yükleme çeşitleri ve büyüklüklerine göre ilgili sonucun, model büyüklüğüne karar verildiği aşamada kullanılması planlanmaktadır.

1.4 Literatür Araştırması

İçi boş silindirlerle yapılan bir çalışmada, flanşlarının köşe kısımlarında oluşan gerilmeye konsantrasyon faktörü etkisini inceleyerek model uzunluğu için önerilen formül $L = \frac{\pi}{\beta}$ olarak tanımlanmıştır. Burada $\beta = \sqrt[4]{\frac{12(1-\nu^2)}{t^2 d_i^2}}$ [7]. Literatürdeki diğer çalışmalarda önerilen model uzunlukları $\sqrt{(\text{yarıçap} \times \text{kalınlık})}$ değerinin katları şeklindedir. Bu çalışmanın formülü, bu tezde kullanılan malzeme özellikleri kullanılıp aynı formata getirilirse elde edilen formül sabit yarıçapta en ince parça için $0.063 \times \sqrt{(\text{yarıçap} \times \text{kalınlık})}$ olurken, en kalın parça için $0.144 \times \sqrt{(\text{yarıçap} \times \text{kalınlık})}$ olmaktadır.

Sonsuz uzunluktaki kiriş teorisini kullanarak yapılan bir çalışmada, eksenel simetrik yükleme altındaki ve elastik bir zemindeki çelik basınçlı kabın, model uzunluğunun $4.9 \times \sqrt{(\text{yarıçap} \times \text{kalınlık})}$ formülüyle hesaplanabileceği belirtilmiştir [8].

Sonsuz uzunluktaki kiriş teorisini kullanarak yapılan diğer bir çalışmada, model uzunluğu için yine $4.9 \times \sqrt{(\text{yarıçap} \times \text{kalınlık})}$ formülü kullanılmıştır [9]. Ayrıca birden

fazla yük durumunda süperpozisyon prensibinin kullanıldığı da eklenmiştir. Yani her yükün etkisi diğer yüklerden bağımsız olarak belirlenir ve toplam etki, bireysel etkiler eklenerek belirlenebilir.

Elastik analizlerde farklı kalınlık-yarıçap oranlarında farklı eğim geçişleri ve köşe kırılmalar göz önünde bulundurularak yapılan bir çalışmada model uzunluğu için $\sqrt{(\text{yarıçap} \times \text{kalınlık})}$ formülünün yeterli kapsayıcılıkta olduğu belirtilmiştir [10].

Yayınlanan bir bildiride $2.5 \times \sqrt{(\text{yarıçap} \times \text{kalınlık})}$ formülünün yeterli uzunluk sağlayabileceği ancak sonuçları etkiliyor olma ihtimalinin bulunduğu bu yüzden $7.5 \times \sqrt{(\text{yarıçap} \times \text{kalınlık})}$ formülünün minimum model uzunluğu için yeterli uzunluk sağladığı belirtilmiştir [11].

Ana modelden oluşturulacak alt modeller için model büyüklüğü belirlenirken $1.25 \times \sqrt{(\text{yarıçap} \times \text{kalınlık})}$ formülünün kullanılabileceği belirtilmiştir [12].

Yer altında gömülü olan boru hatlarının analizinde minimum uzunluk için $\frac{L_a}{D} \approx (0.17 - 1.18 \log \varepsilon) \left(\frac{E_1 \times t}{K \times D} \right)^{0.25}$ formülü önerilmiştir [13]. Bu formülde hata oranı, rijitlik ve Young modülüs değerleri için belirli varsayımlar yapıldığında minimum uzunluk $(5-15) \times D$ olarak belirtilmiştir.

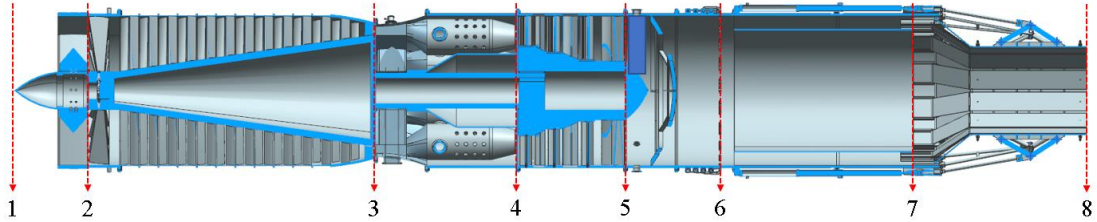


2. GAZ TÜRBİNLERİNDE KARKAS YAPININ GEOMETRİK VE ANALİZ MODELLEMESİ

Gaz türbinlerinde yanma odası ile türbin arasındaki, dönen ve dönmeyen yapılar arasındaki bağlantıyı sağlayan ve dönmeyen parçaları taşıyan türbin orta karkas yapının, 3 boyutlu geometri modellenmesinde NX 12.0 kullanılmıştır. 3 boyutlu geometrinin, Hypermesh 2022 programında ağ yapısı(mesh) oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapısının model kurma işlemleri ANSYS 17.2 kullanılarak tamamlanmış ve analizlerin tamamı ANSYS 17.2 programında yapılmıştır.

2.1 Karkas Yapının Geometrik Modeli

Karkas yapının 3 boyutlu geometrik modeli oluşturulurken jet motorunun CAD modellemesi baz alınmıştır [14]. Şekil 2.1’de jet motorunun kesiti gösterilmiştir ve modülleri numaralandırılarak tanıtılmıştır.



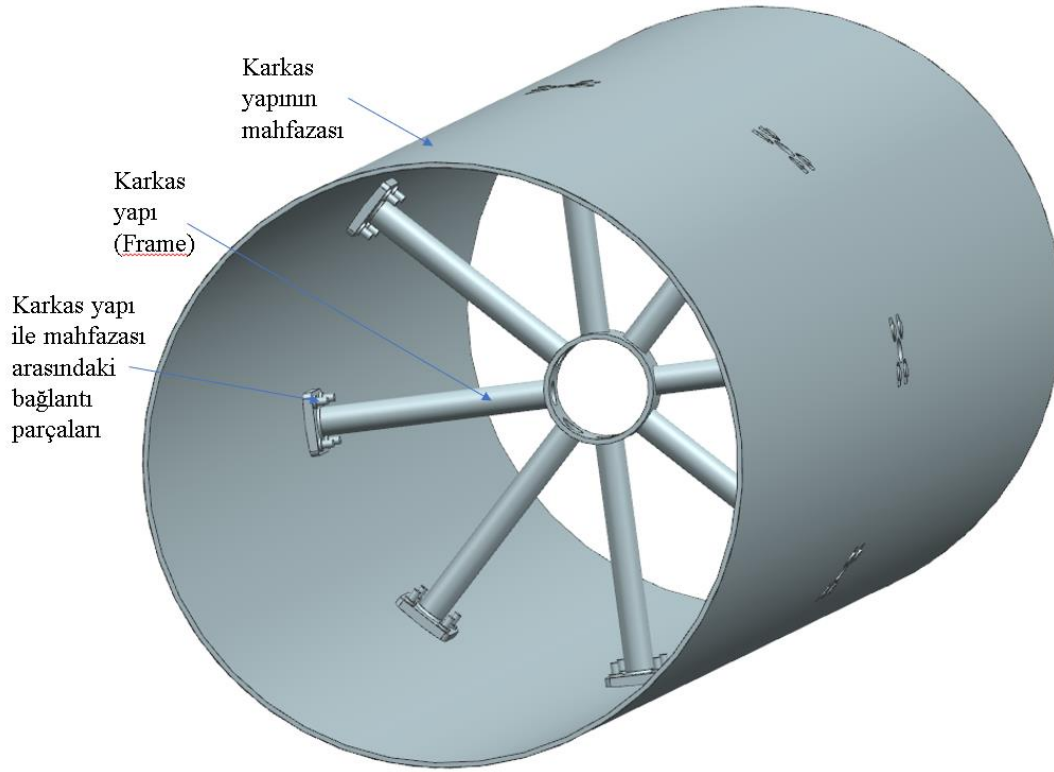
Şekil 2.1: Jet motoru istasyonları.

Jet motorunun modülleri, Çizelge 2.1’de, istasyon numaraları belirtilerek gösterilmiştir [15].

Çizelge 2.1: Jet motoru istasyonları.

İstasyon	Jet Motoru Modülü
1-2	Hava girişi kanalı (Inlet duct)
2-3	Kompresör
3-4	Yanma Odası
4-5	Türbin
5-6	Difüzör
6-7	Art yakıcı yanma odası
7-8	Egzoz nozulu (Exhaust nozzle)

Karkas yapı Şekil 2.2’de gösterilmiştir . İç kısımda rulmanlara monte edilirken dış kısımda karkas yapının mahfazası bulunmaktadır.



Şekil 2.2: Karkas yapı, mahfazası ve bağlantı parçaları.

Minimum model büyüklüğü hesaplaması yapılırken Şekil 2.3’teki geometri 3 boyutlu sonlu elemanlar analizinde kullanılmıştır.



Şekil 2.3: Karkas yapı ile mahfazasının analizde kullanılan hali.

A 3D perspective view of a curved beam. The beam is light blue and has a curved cross-section. It is supported by a vertical grey post. A dashed line indicates the original straight position of the beam. Dimension lines are shown: a vertical line labeled (r) indicating the radius of curvature, and a horizontal line labeled (t) indicating the thickness of the beam.

Karkas yapının geometrik ölçüleri Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

Bağlantı parçaları olarak standart ölçülerde M4 cıvata [16] ve somun [17] kullanılmıştır.

2.2 Karkas Yapı Montajı için Malzeme Tanımı

Bu çalışmada minimum model büyüklüğünü belirlemek adına analizler yapılırken kullanılacak malzemeye karar vermek için öncelikle sadece mahfaza kullanılarak Çizelge 2.2’de gösterilen Alüminyum, AISI 1059-Yüksek Karbonlu Çelik ve 302-Paslanmaz Çelik malzemeleriyle analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin sonucunda doğrusal malzeme tanımının model büyüklüğüne etkmediği görüldüğü için bütün parçalar için malzeme olarak alüminyum seçilmiştir.

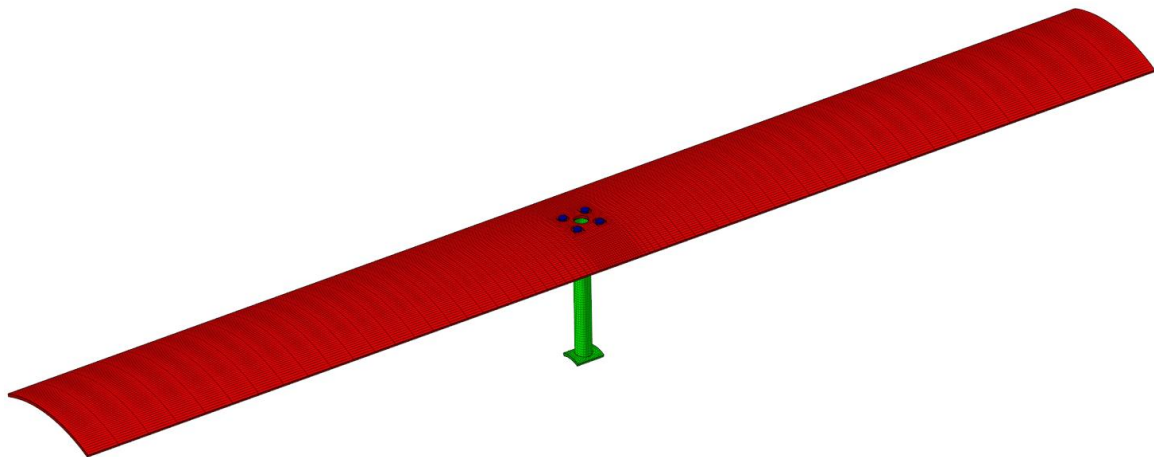
Çizelge 2.2: Analizlerde kullanılan malzeme tanımı.

Malzeme	Yoğunluk (kg/mm^3)	Elastisite Modülüsü (MPa)	Poisson Oranı
Alüminyum [18]	2.6989×10^{-6}	68000	0.36
AISI1059 Yüksek Karbonlu Çelik [19]	7.8700×10^{-6}	200000	0.29
302 Paslanmaz Çelik [20]	7.8600×10^{-6}	193000	0.25

2.3 Karkas Yapı Montajının Ağ Yapısının (Mesh) Oluşturulması

Karkas yapı montajının modellemesi için NX 12’de hazırlanan geometrinin, Hypermesh 2022 programında ağ yapısı oluşturulmuştur. Yapının analiz modellemesinde 3 boyutlu, 8 düğümlü (node), doğrusal SOLID45 elemanları kullanılmıştır.

Şekil 2.6’da karkas yapı montajının ağ yapısı gösterilmiştir.

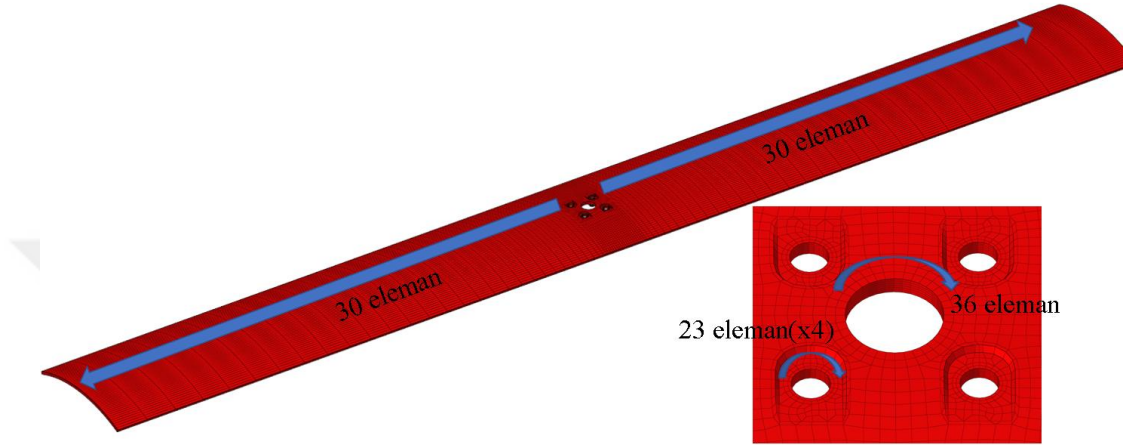


Şekil 2.6: Karkas yapı, mahfazası ve bağlantı parçaları.

Mahfazanın kalınlığı boyunca 6 eleman bulunmaktadır ve ortasında karkas yapının içine açılan deliğin etrafında 2 sıra boyunca 36 eleman kullanılmıştır. Cıvata

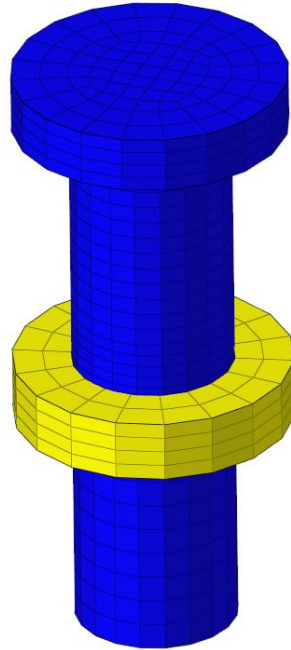
deliklerinin etrafında 23 eleman kullanılmıştır. Parçanın eksenel uzunluğu boyunca öne ve arkaya doğru 30'ar eleman kullanılmıştır.

Minimum model uzunluğunun deliğe daha yakın yerlerde olması beklendiği için eksenel uzunluktaki elemanlar 1.3 doğrusal yanlılık parametresi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu parametre ile eksenel yönde ilgili bölgeden uzaklaştıkça eleman büyüklüğünün artması sağlanmıştır. Mahfazanın ağ yapısı Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



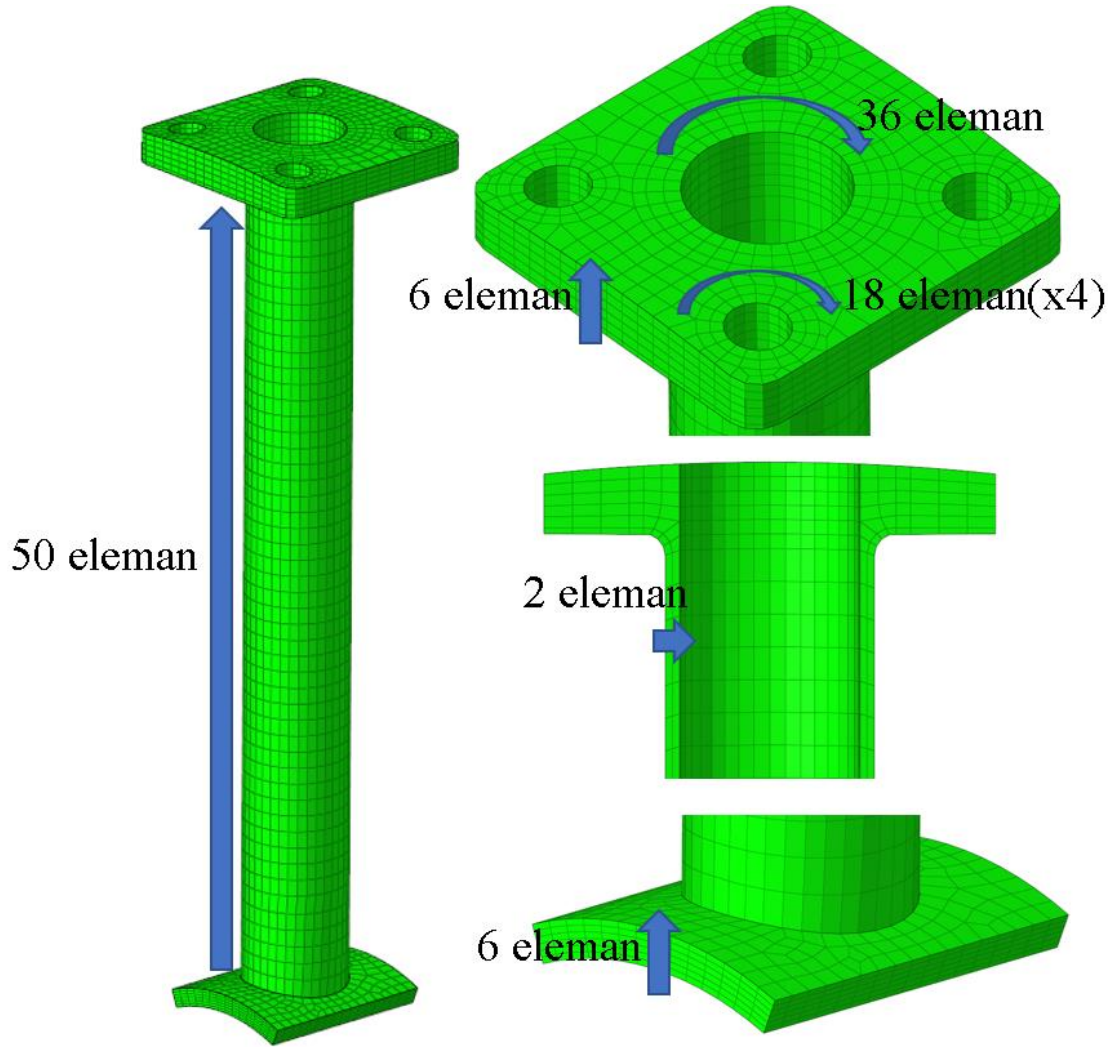
Şekil 2.7: Karkas yapı mahfazasının ağ yapısı detayları.

Mahfaza ile karkas yapı arasındaki bağlantıyı toplamda 32 civata ile somun sağlamaktadır. Bu parçaların ağ yapısı Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Bağlantı parçalarının ağ yapısı detayları.

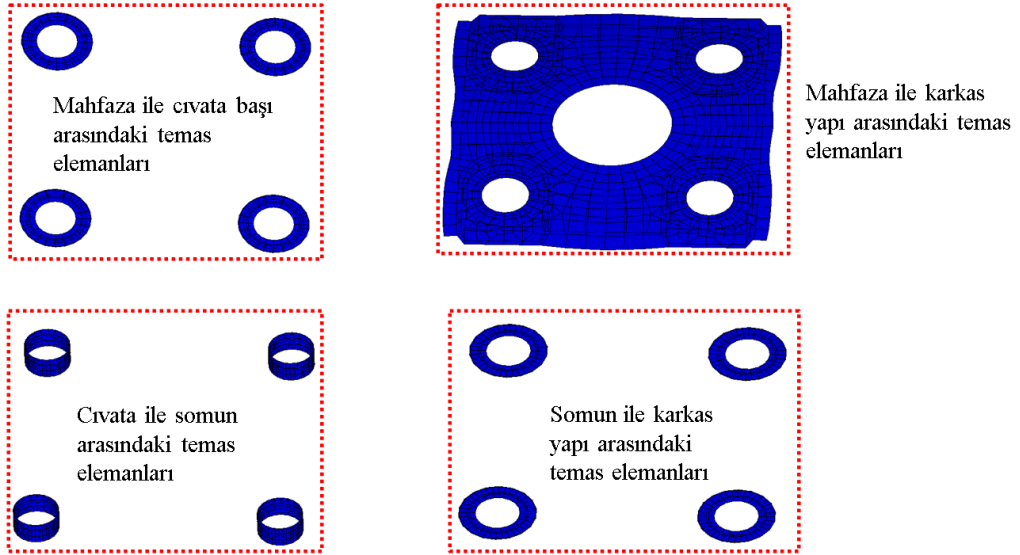
Karkas yapının ağ yapısı Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Karkas yapının ağ yapısı detayları.

2.4 Temas Yüzeylerinin Tanımlanması

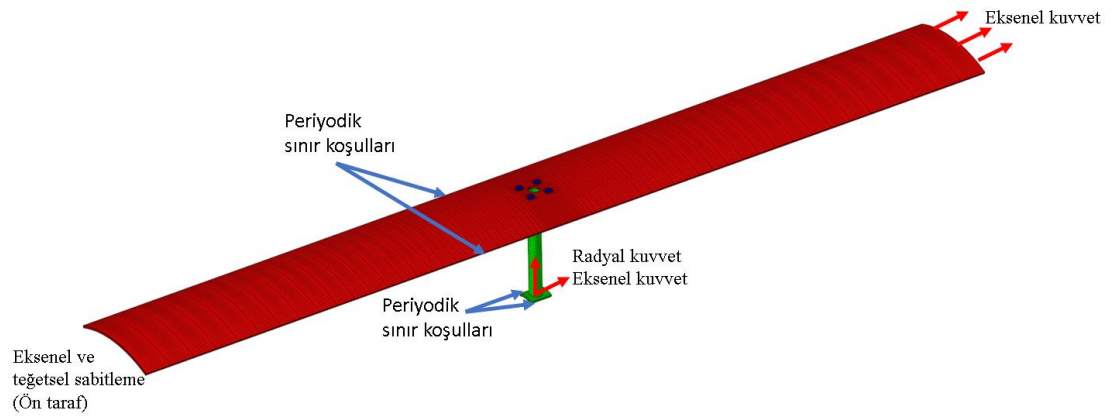
Karkas yapının montajı oluşturulurken kullanılan temas yüzeyleri Şekil 2.10'da tanımlanmıştır. Cıvata ile somun arasındaki dişleri temsilen yapışık (bonded) temas elemanları kullanılırken diğer yüzeylerde standart temas elemanları kullanılmıştır. Standart temas elemanları arasında tanımlanan sürtünme katsayısı yağlanmış alüminyum yüzeyler arası için kullanılan 0.3 değeridir [21].



Şekil 2.10: Parçalar arası temas elemanları.

2.5 Sınır Koşullarının Tanımlanması

Minimum model büyüklüğü belirlenirken mahfazanın ön ucu eksenel ve teğetsel (tangential) yönlerde sabitlenmiştir çünkü motorun sabitlendiği kısım, analiz yapılan modüle göre ön tarafta bulunmaktadır. Gaz yüklerinin etkisini yansıtmak için mahfazanın arka ucuna eksenel yönde kuvvet uygulanmıştır [22]. Rulmandan aktarılan dengesizlik kuvvetlerini yansıtmak için karkas yapının iç kısmına radyal [23] ve eksenel [24] yönlerde kuvvet uygulanmıştır. Karkas yapı 360°'de tekrar eden 8 bölüme sahip olduğu için 45°'lik kısmı alınarak periyodik sınır koşulları kullanılmıştır. Sınır koşulları bütün olarak Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Minimum model uzunluğu hesaplamak için seçilen node, 45°'lik sektörün yarısının alınması durumunda orta düzleme çok yakın olacağı için bu çalışmada düzlem simetrisi (plane symmetry-reflective symmetry) tanımlanmadan periyodik sınır koşullarıyla devam edilmiştir.



Şekil 2.11: Sonlu elemanlar modeli periyodik sınır koşulları.

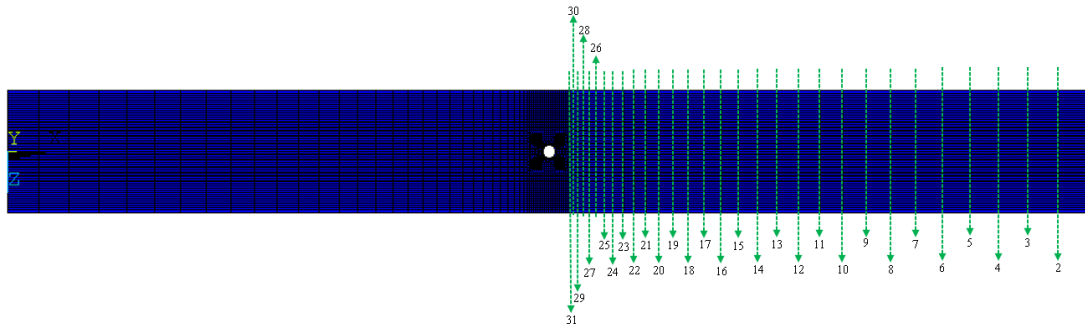
Mahfaza üzerinde taşınan dönmeyen parçalara uygulanan basınçtan ötürü oluşan eksenel yük, mahfazanın arka tarafına uygulanmıştır. Motorda pervane ya da kanat kopması veya kanat ucunun aşınması gibi sebeplerle dengesizlik yükleri oluşabilmektedir. Bu yükleri shaft ve rulmanlar üzerinden karkas yapıya aktarılmaktadır. Bu yükleri temsilen karkas yapının iç kısmına radyal yük ve eksenel yük uygulanmıştır. Yük değişiminin minimum model uzunluğuna etkisinin incelenmesi için nominal yükün farklı katlarıyla da analiz tekrarlanmıştır. Uygulanan yüklerin büyüklükleri farklı durumlar için Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3: Uygulanan yüklerin büyüklükleri.

	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4	Durum 5
Mahfaza eksenel yük (N)	11200	5600	1120	560	112
Karkas yapı eksenel yük (N)	51200	25600	5120	2560	512
Karkas yapı radyal yük (N)	132072	66036	13207.2	6603.6	1320.72

2.6 Sonlu Elemanlar Analizinden Minimum Model Büyüklüğünün Belirlenişi

Model kurulumu tamamlandıktan sonra her analiz için Şekil 2.12'de numaralandırılmış eleman sıraları her adımda teker teker silinmiştir. 1. adımda seçilen noktada hesaplanan maksimum Von Mises gerilmesi, her eleman sırası silindikten sonra kaydedilir ve ilk adımdaki değer ile kıyaslanır. Aradaki fark %1'in üzerine çıktığında bu uzunluğun minimum model uzunluğu olduğuna karar verilmiştir [25]. %1 limiti yapılacak analizden beklenen doğruluk seviyesine göre değiştirilebilir. Tezin içeriğinde kıyaslamalar %1 limitine göre yapılmaktadır ancak %5 ve %10 değişimin kabul edilebilir olduğu durumlar için sonucun nasıl değişeceği de özetlenecektir.



Şekil 2.12: Sonlu elemanlar analizinde her adımda silinen eleman sıraları.

3. KARKAS YAPININ SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

3.1 Sadece Mahfaza Modelinin Minimum Model Uzunluğunun Değişimi

Malzemenin minimum model büyüklüğüne etkisini görmek için sadece mahfazayı içeren bir model kurulmuştur. Çizelge 2.2’de verilen malzemeler kullanılarak yarıçap ve kalınlığın değişimine göre farklı malzemeler kullanıldığında minimum model uzunluğunun değişimi incelenmiştir.

Sadece mahfaza ile yapılan analizlerde, gerilme sonuç değişimini detaylı olarak görebilmek için mahfazaya, arka kısmında nominal yükün 10 katı uygulanmıştır. Bütün hesaplamalarda parçanın dış yarıçapı 300 mm olarak alınmıştır [26] ve kalınlığın değişmesine bağlı olarak parçanın yarıçapı denklem 3.1’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Parçanın yarıçapı: } r = 300 - (t/2) \quad (3.1)$$

Mahfazanın minimum model büyüklüğü, alüminyum malzeme özellikleri ile oda sıcaklığında hesaplanmıştır. Çizelge 3.1’de gösterilen parça kalınlığı ve yarıçap değerlerine bağlı olarak minimum model uzunluğunun nasıl değiştiği gösterilmiştir.

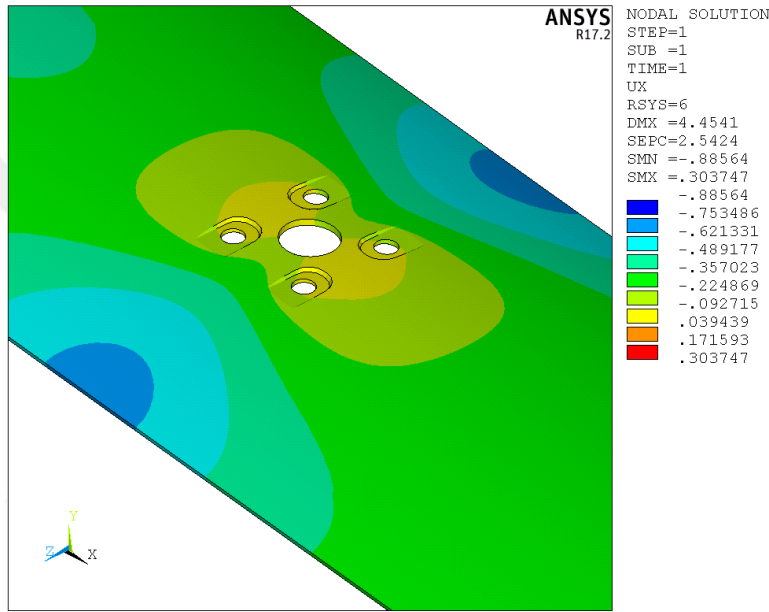
Çizelge 3.1: Minimum model uzunluğunun farklı malzemelere göre incelenmesi için kullanılan parametre değerleri.

Analiz numarası	Parça kalınlığı – t (mm)	Parçanın yarıçapı – r (mm)
1	3.00	298.50
2	4.00	298.00
3	5.00	297.50
4	6.00	297.00
5	7.00	296.50
6	8.00	296.00
7	10.00	295.00
8	12.00	294.00
9	14.00	293.00
10	16.00	292.00

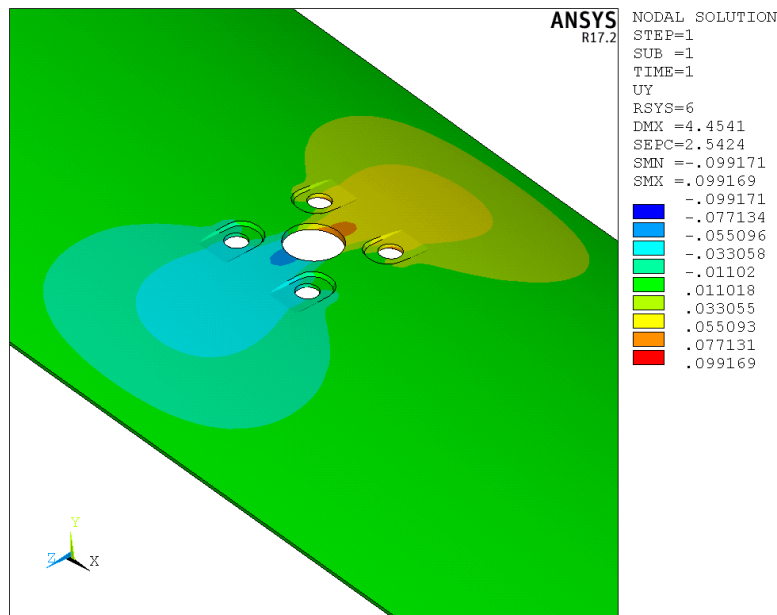
Minimum model uzunluğunun, kalınlık ve yarıçapa göre nasıl değiştiği yüzey cevap yöntemi (surface response method) kullanılarak Minitab programında incelenmiştir.

Literatürdeki çalışmalarda minimum model uzunluğu $\sqrt{r \times t}$ değerinin doğrusal katları olarak tanımlanmıştır. Bu sonuçlarla kıyaslama yapabilmek için ve kullanım kolaylığı açısından $\sqrt{r \times t}$ parametresine göre minimum model uzunluğu değişimi de incelenmiştir.

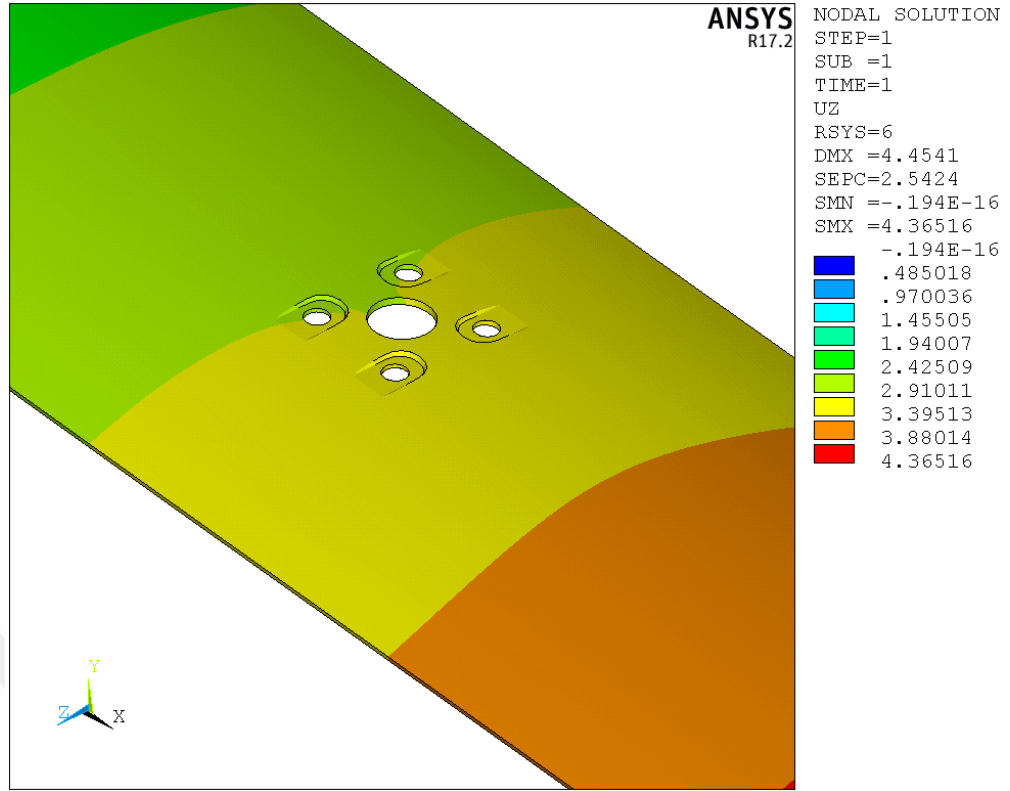
Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te resmin sol altında verilen koordinat sistemine göre X-eksenel, Y-radyal ve Z-teğetsel yönleri ifade etmektedir. Bu şekillerde görüldüğü gibi mahfaza üzerindeki şekil değiştirmede radyal ve eksenel şekil değiştirmeler baskındır.



Şekil 3.1: Sadece mahfaza modelinin radyal yöndeki şekil değiştirmesi (mm).

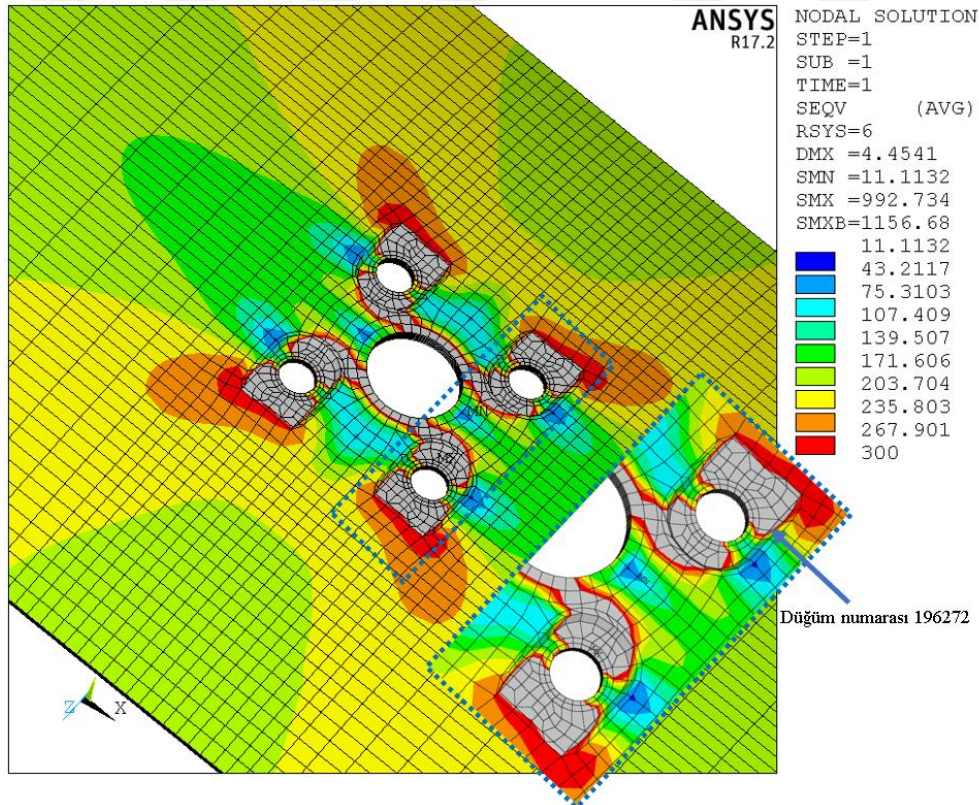


Şekil 3.2: Sadece mahfaza modelinin teğetsel yöndeki şekil değiştirmesi (mm).



Şekil 3.3: Sadece mahfaza modelinin eksenel yöndeki şekil değişimi (mm).

Şekil 3.4'te sadece mahfaza modelinin Von Mises gerilme sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Sadece mahfaza modelinin Von Mises gerilmesi (MPa).

Temas bölgeleri dışında kalan, en yüksek gerilmenin olduğu ve mahfazaya uygulanan aksenal yüke en yakın olan düğüm Şekil 3.4'te gösterildiği gibi 196272 numaralı düğümdür.

Minimum model uzunluğu hesaplanırken, gerçekleştirilen analizlerde 196272 numaralı düğüme ait Von Mises gerilmesinin, mahfazanın orijinal halindeki değeri, nominal değer olarak alınmıştır. Daha sonra mahfazadan her adımda bir eleman sırası kaldırılmış ve nominal değere göre bu düğümdeki Von Mises gerilmesinin değişim yüzdesi farklı durumlar için EK A'daki Çizelge A.1'de verilmiştir. Bu sonuçlardan elde edilen minimum model uzunluğu sonuçları Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2: Minimum model uzunluğunun farklı malzemelerdeki sonuçları.

Analiz numarası	$\sqrt{r \times t}$ (mm)	Alüminyum Minimum Model Uzunluğu (mm)	AISI 1059 Minimum Model Uzunluğu (mm)	302 Paslanmaz Çelik Minimum Model Uzunluğu (mm)
1	29.92	328.11	328.11	328.11
2	34.53	294.53	294.53	294.53
3	38.57	262.77	262.77	262.77
4	42.21	262.77	262.77	262.77
5	45.56	232.83	232.83	232.83
6	48.66	232.83	232.83	232.83
7	54.31	204.70	204.70	204.70
8	59.40	204.70	204.70	204.70
9	64.05	204.70	204.70	204.70
10	68.35	204.70	204.70	204.70

Farklı malzemelerin minimum model uzunluğu sonuçları birbiriyle aynıdır. Bu sonuca göre farklı doğrusal malzeme özelliklerinin minimum model uzunluğuna etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Bu yüzden çalışmanın bundan sonraki kısımlarında malzeme olarak alüminyum kullanılmıştır.

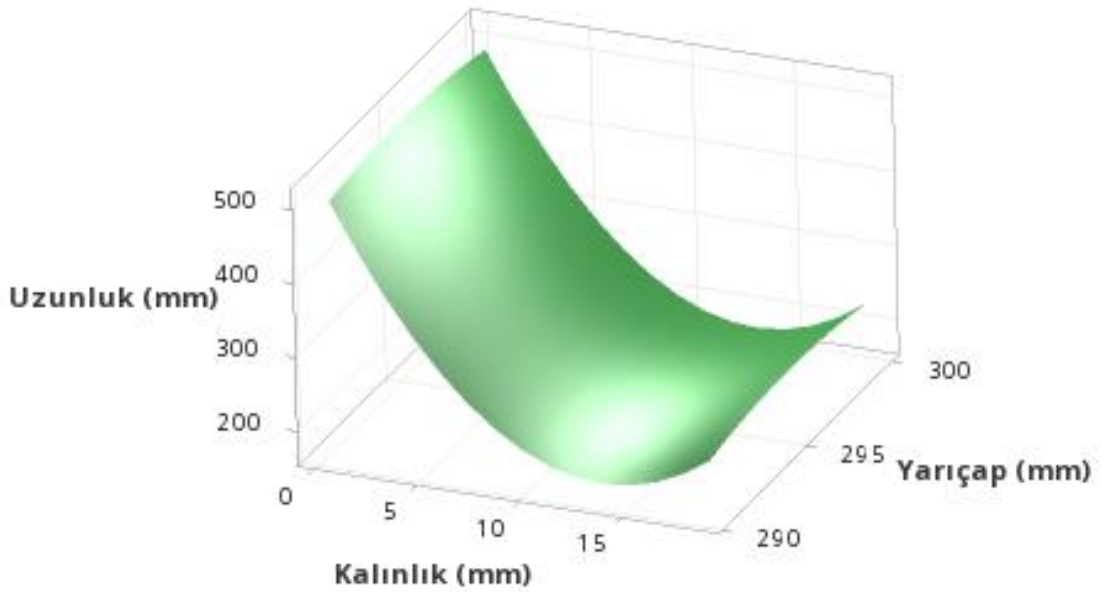
$\sqrt{r \times t}$ parametresine göre 2., 3., 4., 5. ve 6. dereceden polinomlar oluşturulup her polinomun R^2 değeri Çizelge 3.3'te kıyaslanmıştır.

Çizelge 3.3: 2., 3., 4., 5. ve 6. dereceden polinomların R^2 kıyaslaması.

Oluşturulan Polinom Derecesi	R^2
2.derece	0.982
3.derece	0.982
4.derece	0.983
5.derece	0.985
6.derece	0.986

R^2 sonuçları farklı dereceden polinomlar için birbirine oldukça yakın yani bütün bu ,farklı dereceden polinomlarda minimum model uzunluğu ile $\sqrt{r \times t}$ değeri arasında iyi bir korelasyon bulunmaktadır. Hem korelasyonun yeteri kadar iyi olması hem de kullanım kolaylığı ve formülle ilgili hataları azaltmak adına minimum model büyüklüğü için çalışmanın bundan sonraki kısmında ikinci dereceden bir denklem oluşturarak devam edilmiştir.

Şekil 3.5'te alüminyum malzeme tanımlanan mahfazanın minimum model uzunluğunun kalınlık ve yarıçapa bağlı değişimi gösterilmiştir.

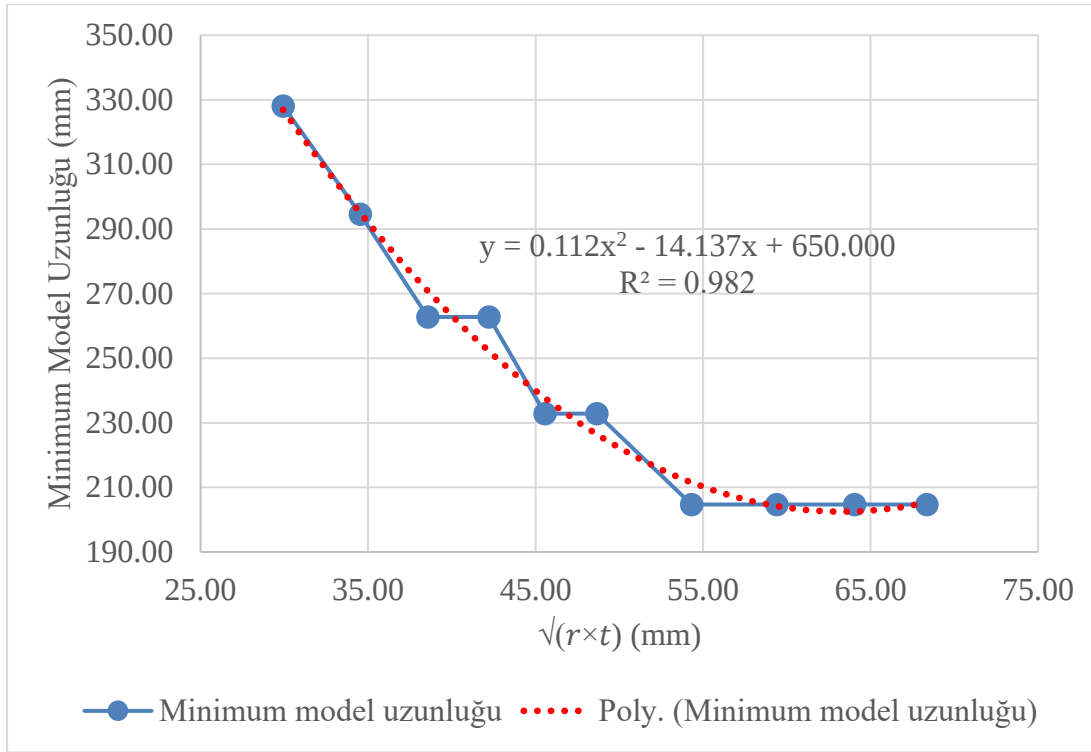


Şekil 3.5: Sadece mahfaza modelinin minimum model uzunluğunun kalınlık ve yarıçapa göre değişimi.

Şekil 3.5'te gösterilen yüzeye ait sonuçlar Denklem 3.2'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$L = 0.040 \times r \times t - 0.600 \times r^2 + 1.697 \times t^2 + 357 \times r - 57 \times t - 52083 \quad (3.2)$$

Şekil 3.6'da alüminyum malzeme tanımlanan mahfazanın minimum model uzunluğunun $\sqrt{r \times t}$ değerine göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Sadece mahfaza modelinin minimum model uzunluğunun $\sqrt{r \times t}$ 'ye göre değişimi.

Şekil 3.6'da gösterildiği gibi minimum model büyüklüğünü belirlemek için ikinci dereceden polinom oluşturulmuştur. Bu polinoma göre minimum model uzunluğu Denklem 3.3'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$L = 0.112 \times r \times t - 14.137 \times \sqrt{r \times t} + 650.000 \quad (3.3)$$

3.2 Sadece Mahfaza Modelinin Doğrusal Olmayan Geometri Etkisine Bağlı Olarak Minimum Model Uzunluğunun Değişimi

Karkas yapı modeli eleman ve düğüm sayısı bakımından sadece mahfaza modeline göre daha büyük olacağından ve temas elemanları gibi doğrusal olmayan tanımlamalar içereceğinden analiz sürelerini düşürebilmek için sadece mahfaza modelinde doğrusal olmayan geometri özelliğinin minimum model uzunluğuna etkisi olup olmadığı incelenmiştir. Bu etki ANSYS-17.2 programında “NLGEOM, ON” komutu kullanılarak dahil edilmiştir ve rijitlik matrisinin parçanın şekil değiştirmesine bağlı olarak güncellenmesine olanak sağlanmıştır. Doğrusal olmayan geometrik etkinin dahil edilmesi gerilme sertleşmesinin (stress stiffening) otomatik olarak aktif olmasını sağlamaktadır [27].

Çizelge 3.4'te doğrusal olmayan geometrik etkilerin dahil edildiği çalışmaların kalınlık ve yarıçapa bağlı değişimleri verilmiştir. Bu tablonun oluşturulduğu Von Mises gerilme sonuçları ve nominal değere göre değişim yüzdeleri EK A'daki Çizelge A.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.4: Doğrusal olmayan geometrik etkilerin dahil edildiği durumda minimum model uzunluğu.

Analiz numarası	$\sqrt{r \times t}$ (mm)	Minimum Model Uzunluğu (mm)
1	29.92	328.11
2	34.53	294.53
3	38.57	262.77
4	42.21	262.77
5	45.56	232.83
6	48.66	232.83
7	54.31	204.70
8	59.40	204.70
9	64.05	204.70
10	68.35	204.70

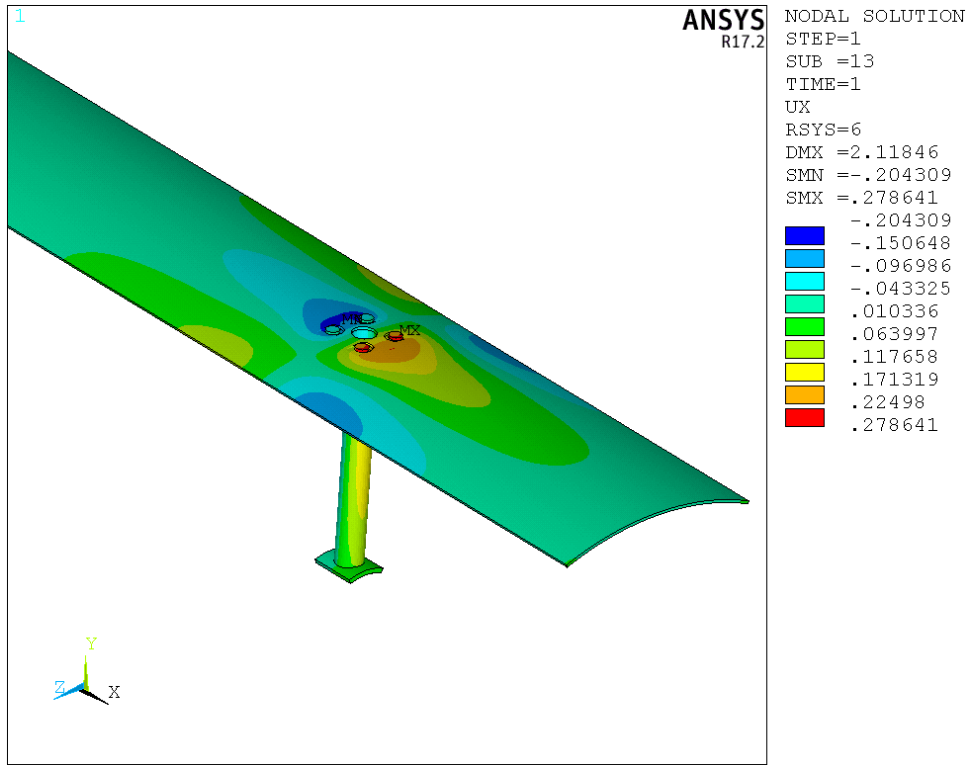
Burada verilen minimum model uzunluğu sonuçları, doğrusal olmayan geometrik etkilerin dahil edilmediği durum ile aynıdır. Doğrusal olmayan malzeme tanımlaması olmadığı için bu parametrenin sonucu etkilemediği doğrulanmıştır. Eksenel yükleme altındaki bir parçada doğrusal olmayan geometrik etkilerin, minimum model uzunluğu üzerinde farklılık oluşturmadığı görülmüştür ve minimum model uzunluğu hesabı için sadece mahfazalı durumda Denklem 3.2 kullanılabilir.

3.3 Karkas Yapı Montajının Von Mises Gerilmesine Bağlı Minimum Model Uzunluğunun Belirlenmesi

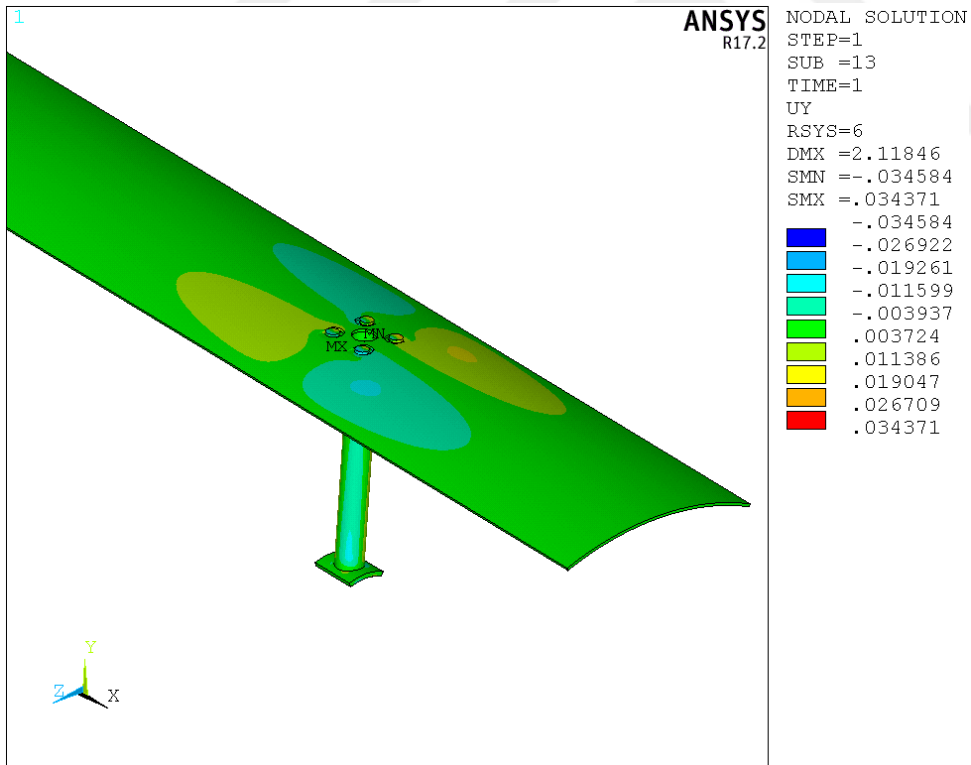
Karkas yapı modelinin çözüm süresini kısaltmak için doğrusal olmayan geometri etkisi göz ardı edilmiştir.

Uygulanan yüklerin yönleri göz önünde bulundurulduğunda, Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'dan görüldüğü gibi radyal ve eksenel şekil değiştirmeler baskındır.

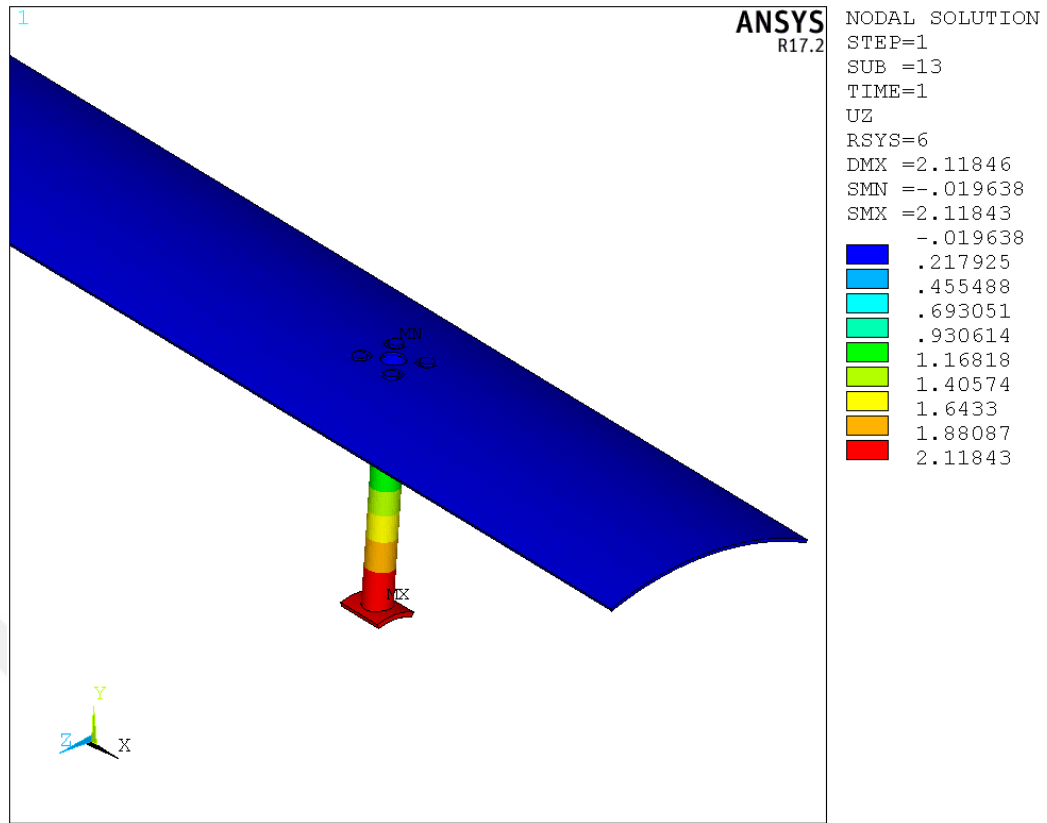
Bu şekil değiştirmeler sadece mahfazayı kapsayacak şekilde incelendiğinde baskın şekil değiştirmenin radyal yönde olduğu görülmüştür ve mahfazanın radyal şekil değiştirme sonuçları Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Radyal şekil değiştirmenin baskın olması, karkas yapının iç kısmına radyal ve eksenel yöndeki yüklerin etkisinin, mahfazanın arka ucuna uygulanan eksenel yükten daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.



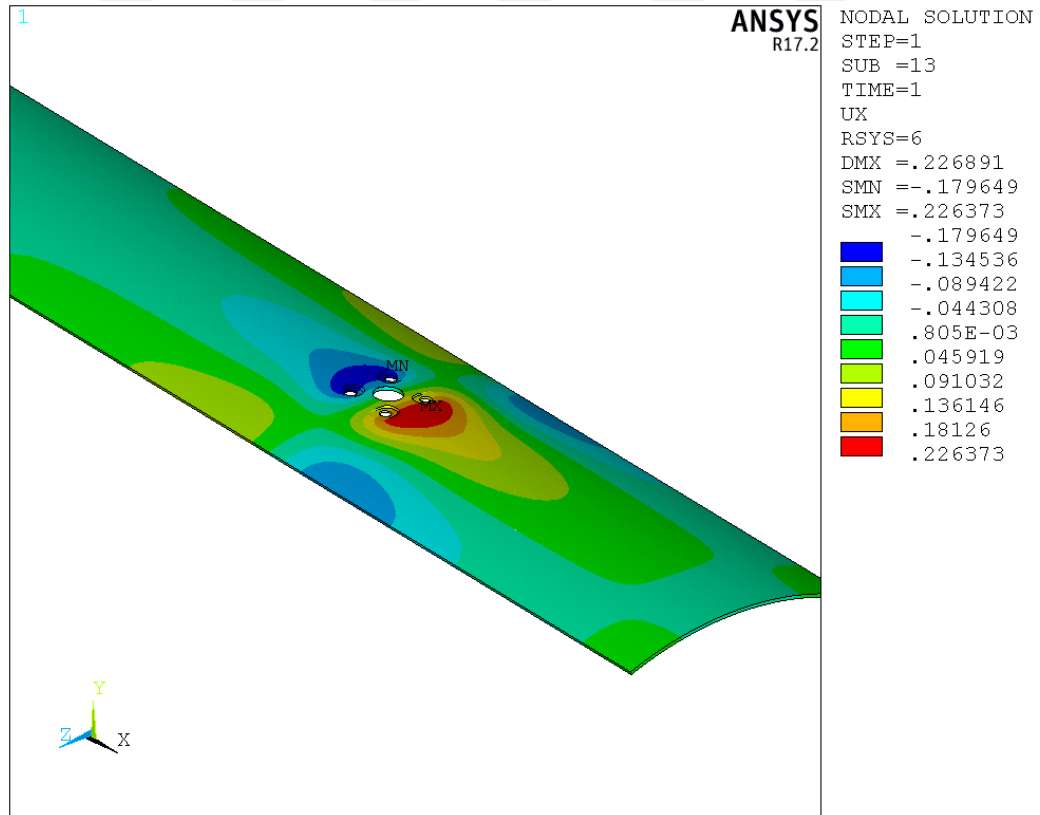
Şekil 3.7: Karkas yapının radyal yöndeki şekil değişimi (mm).



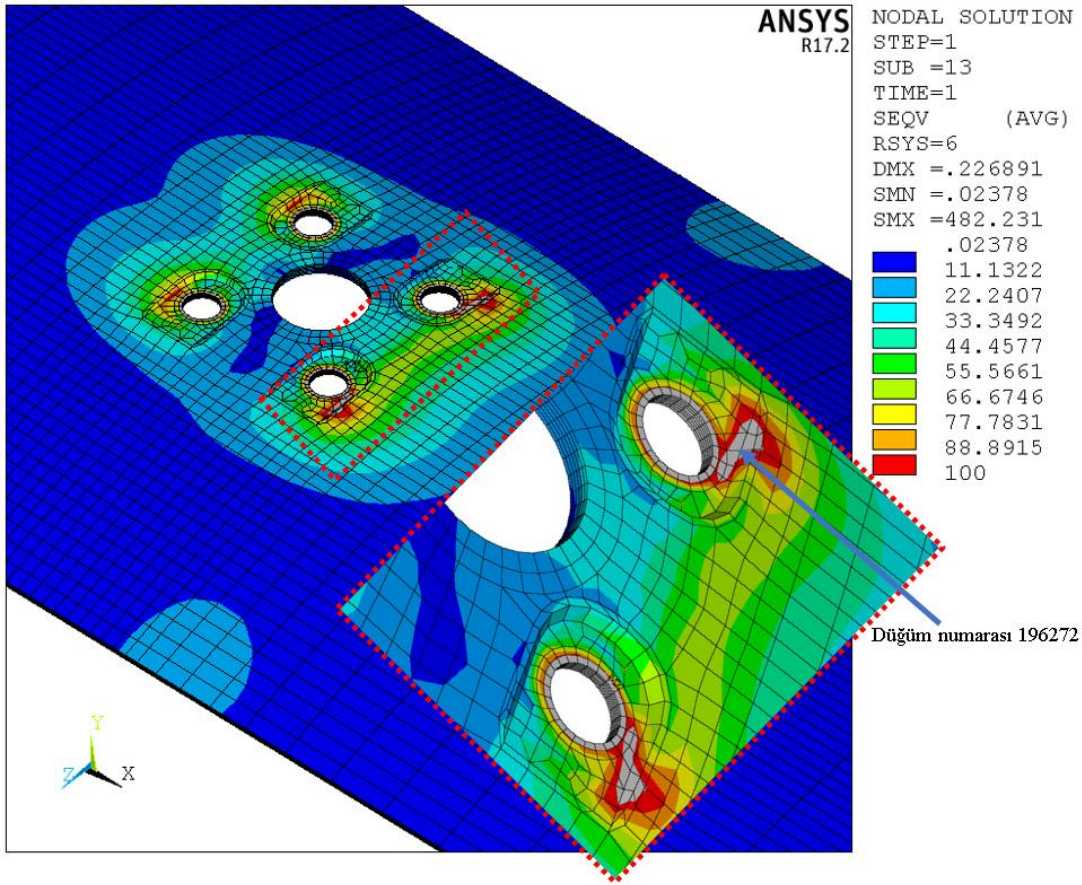
Şekil 3.8: Karkas yapının teğetsel yöndeki şekil değişimi (mm).



Şekil 3.9: Karkas yapının eksenel yöndeki şekil değişimi (mm).



Şekil 3.10: Karkas yapı modelinde mahfazanın radyal yöndeki şekil değişimi (mm).



Şekil 3.11: Mahfazanın Von Mises gerilmesi (MPa).

Şekil 3.11’de mahfazanın Von Mises gerilmesi sonuçları gösterilmiştir. Karkas yapı montajı kullanılarak farklı kalınlık ve yarıçaplarda ve farklı büyüklüklerde kuvvetlerin uygulandığı durumlarda Von Mises gerilmesine bağlı olarak minimum model büyüklüğünün nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu analizlere ait Von Mises gerilme sonuçları Ek B’deki çizelgelerde verilmektedir. Kullanılan yarıçap ve kalınlık değerleri Çizelge 3.1’de paylaşılırken, uygulanan kuvvetler Çizelge 3.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5: Karkas yapıya uygulanan kuvvetlerin büyüklüğü.

	Durum 1 (×10)	Durum 2 (×5)	Durum 3 (×1)	Durum 4 (×0.5)	Durum 5 (×0.01)
Mahfaza eksenel yük (N)	11200	5600	1120	560	112
Karkas yapı iç kısım eksenel yük (N)	51200	25600	5120	2560	512
Karkas yapı iç kısım radyal yük (N)	132072	66036	13207.2	6603.6	1320.72

Durum 3 nominal yüklemeyi ifade ederken 5 ve 10 kat büyük yükler ile 5 ve 10 kat küçük yükler sırasıyla Durum 1, Durum 2, Durum 4 ve Durum 5’i ifade etmektedir.

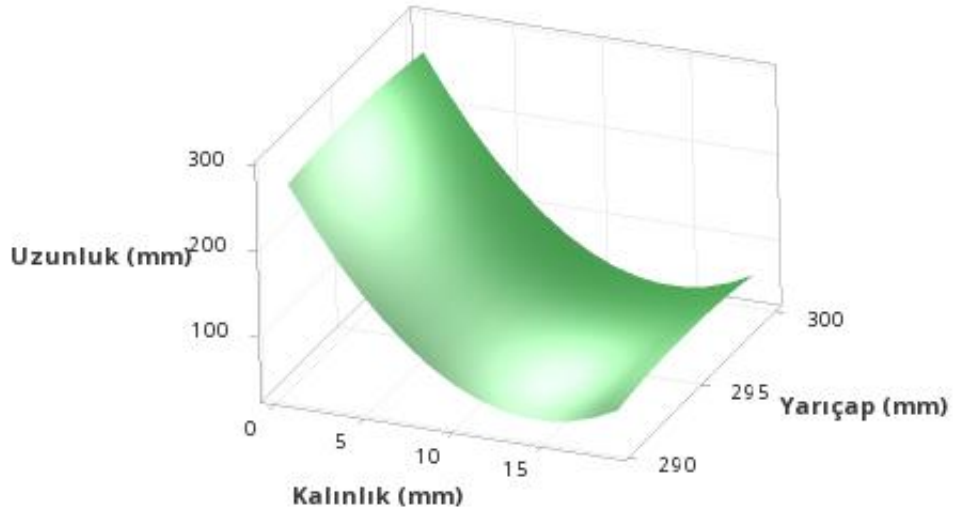
Bu yüklerin uygulanma yerleri ve yönleri Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Bu yükler uygulandığında elde edilen minimum model uzunluğu sonuçları Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6: Farklı yüklemeler altında elde edilen minimum model uzunluğu sonuçları.

$\sqrt{r \times t}$ (mm)	Sadece mahfaza ($\times 10$)	Durum 1 ($\times 10$)	Durum 2 ($\times 5$)	Durum 3 ($\times 1$)	Durum 4 ($\times 0.5$)	Durum 5 ($\times 0.01$)
29.92	328.11	178.39	153.89	153.89	153.89	110.33
34.53	328.11	153.89	153.89	153.89	131.20	91.27
38.57	262.77	131.20	131.20	110.33	110.33	58.61
42.21	262.77	131.20	131.20	110.33	91.27	45.00
45.56	232.83	131.20	131.20	91.27	58.61	45.00
48.66	232.83	110.33	110.33	91.27	58.61	33.20
54.31	204.70	91.27	74.03	58.61	58.61	58.61
59.40	204.70	74.03	74.03	58.61	58.61	58.61
64.05	204.70	74.03	74.03	58.61	58.61	58.61
68.35	204.70	74.03	74.03	58.61	58.61	58.61

Çizelge 3.6’da sadece mahfaza modelinden elde edilen minimum model büyüklüğü sonuçlarının detayları Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da paylaşılmıştı.

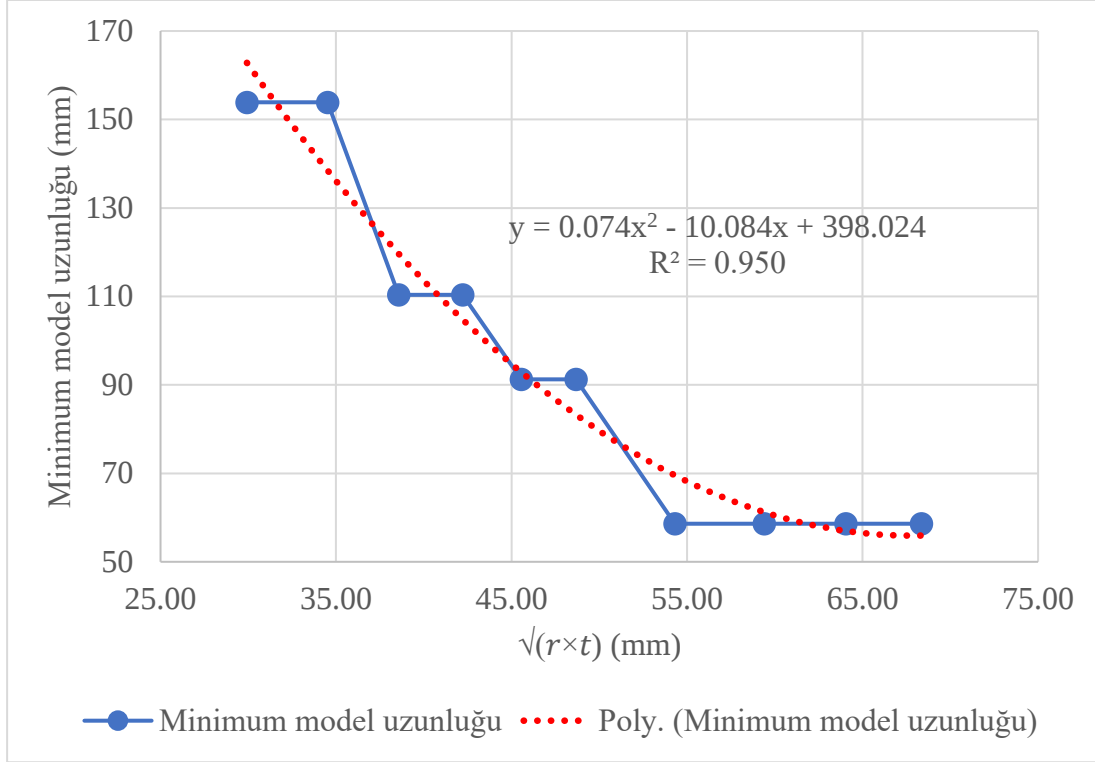
Nominal yükleme için verilen değerlerin kalınlık ve yarıçapa bağlı değişimi Şekil 3.12’de, $\sqrt{r \times t}$ parametre değerine göre değişimi Şekil 3.13’te gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Karkas yapının nominal yükleme altında minimum model uzunluğunun kalınlık ve yarıçapa göre değişimi.

Şekil 3.5’te gösterilen yüzeye ait sonuçlar Denklem 3.4’te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

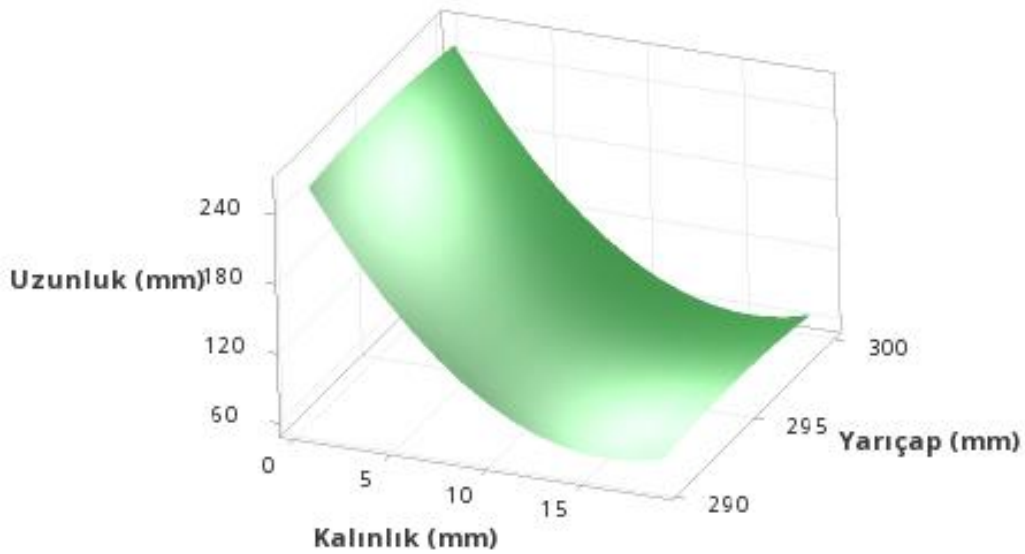
$$L = 0.023 \times r \times t - 0.431 \times r^2 + 1.211 \times t^2 + 254 \times r - 41 \times t - 37215 \quad (3.4)$$



Şekil 3.13: Karkas yapının nominal yükleme altında minimum model uzunluğunun $\sqrt{r \times t}$ 'ye göre değişimi.

Şekil 3.5'te gösterildiği gibi minimum model büyüklüğünü belirlemek için ikinci dereceden polinom oluşturulmuştur. Bu polinoma göre minimum model uzunluğu Denklem 3.5'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

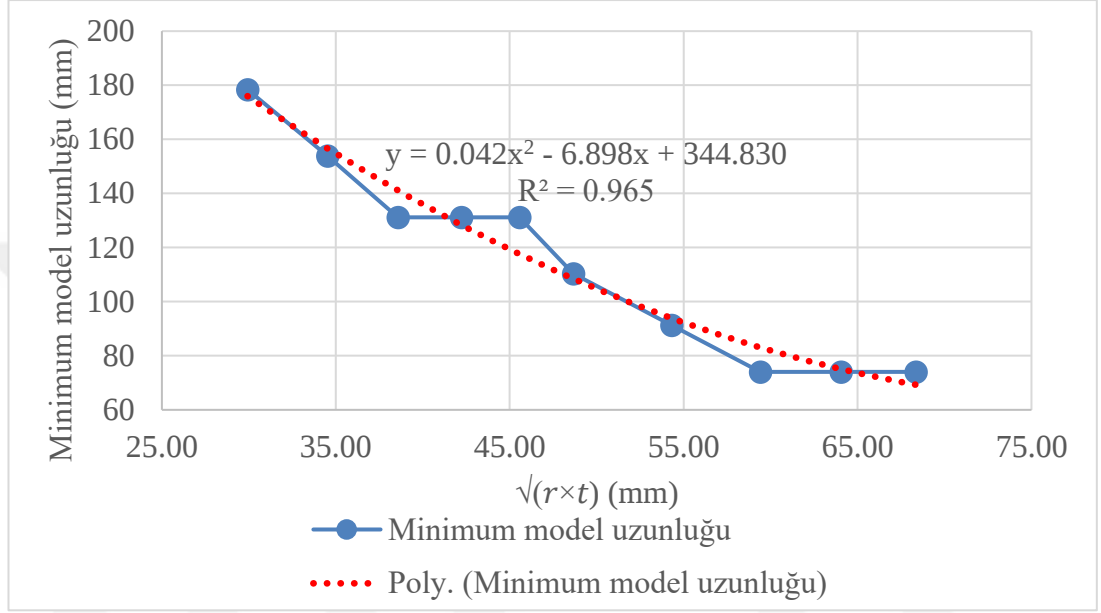
$$L = 0.074 \times r \times t - 10.084 \times \sqrt{r \times t} + 398.024 \quad (3.5)$$



Şekil 3.14: Karkas yapının 10 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun kalınlık ve yarıçapa göre değişimi.

10 kat yükleme durumu için verilen değerlerin kalınlık ve yarıçapa bağlı değişimi Şekil 3.14'te, $\sqrt{r \times t}$ parametre değerine göre değişimi Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Şekil 3.14'te gösterilen yüzeye ait sonuçlar Denklem 3.6'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$L = 0.007 \times r \times t - 0.295 \times r^2 + 0.828 \times t^2 + 174 \times r - 27.9 \times t - 25385 \quad (3.6)$$



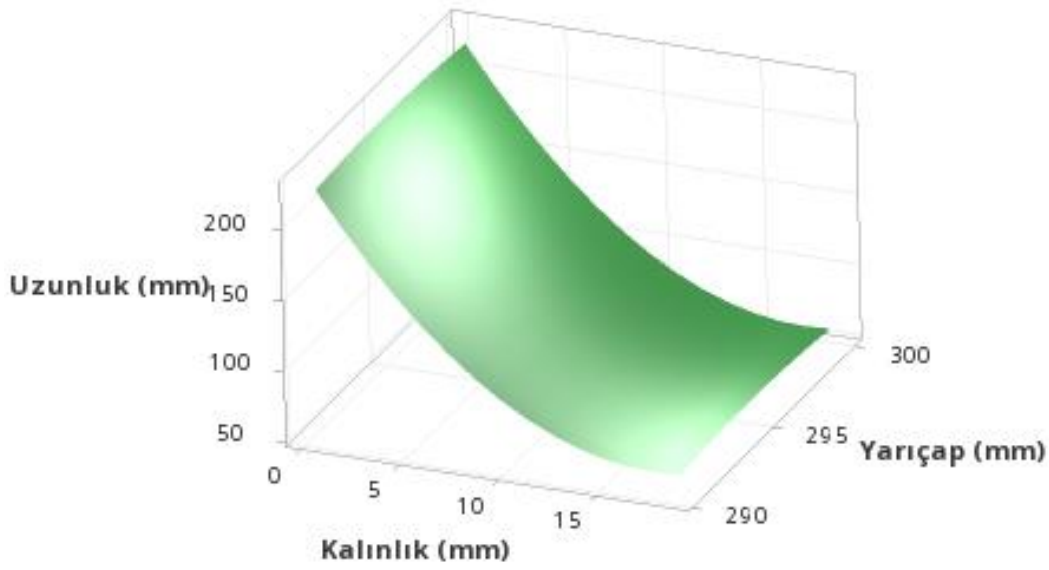
Şekil 3.15: Karkas yapının 10 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun $\sqrt{r \times t}$ 'ye göre değişimi.

Şekil 3.15'te gösterilen minimum model uzunluğu Denklem 3.7'de paylaşılmıştır.

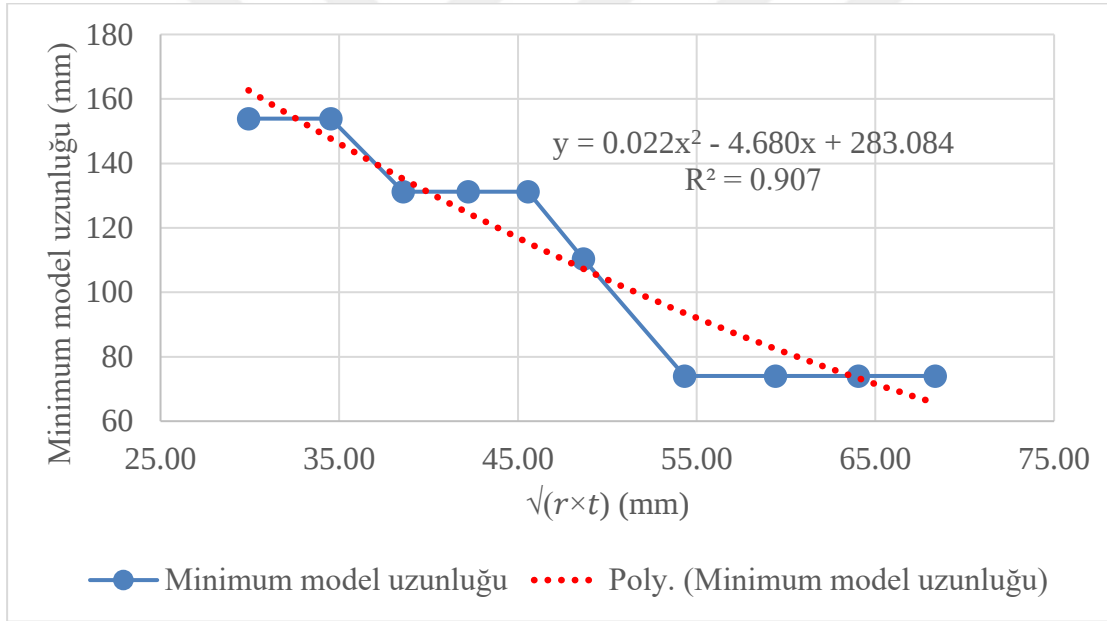
$$L = 0.042 \times r \times t - 6.898 \times \sqrt{r \times t} + 344.830 \quad (3.7)$$

5 kat yükleme durumu için elde edilen minimum model uzunluğu sonuçlarının kalınlık ve yarıçapa bağlı değişimi Şekil 3.16'da, $\sqrt{r \times t}$ parametre değerine göre değişimi Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Şekil 3.16'da gösterilen yüzeye ait sonuçlar Denklem 3.8'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$L = -0.002 \times r \times t - 0.200 \times r^2 + 0.562 \times t^2 + 118 \times r - 18.9 \times t - 17174 \quad (3.8)$$



Şekil 3.16: Karkas yapının 5 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun kalınlık ve yarıçapa göre değişimi.



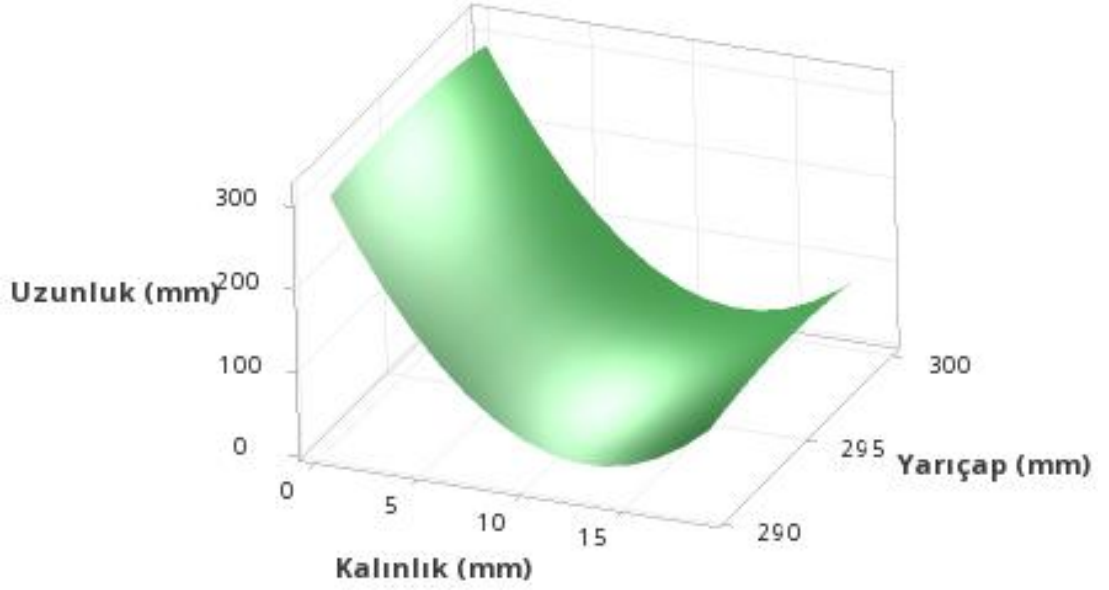
Şekil 3.17: Karkas yapının 5 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun $\sqrt{(r \times t)}$ 'ye göre değişimi.

Şekil 3.17'de gösterilen minimum model uzunluğu Denklem 3.9'da paylaşılmıştır.

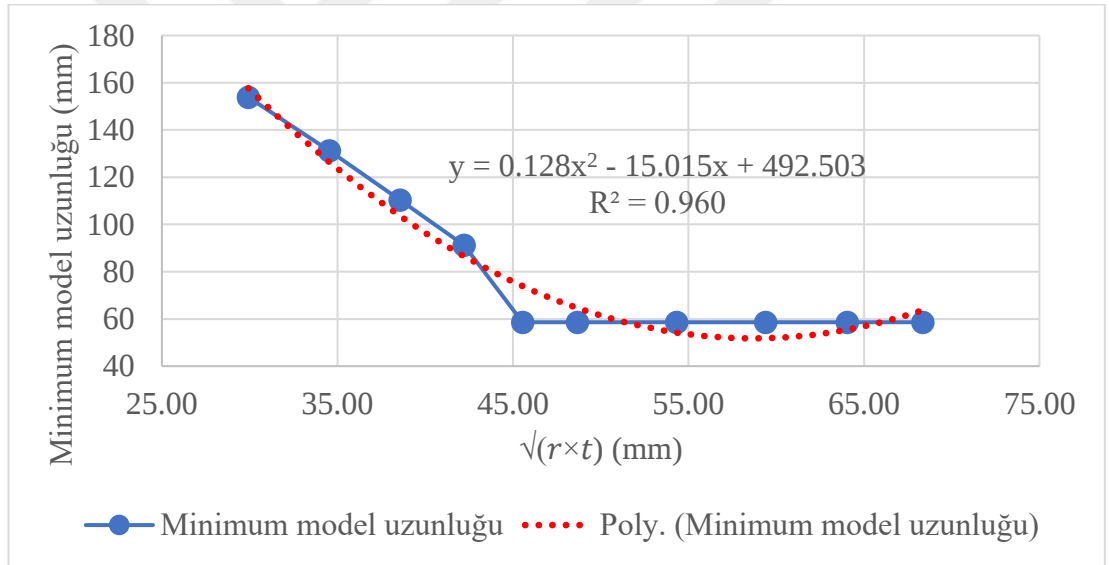
$$L = 0.022 \times r \times t - 4.680 \times \sqrt{r \times t} + 283.084 \quad (3.9)$$

0.5 kat yükleme durumu için verilen değerlerin kalınlık ve yarıçapa bağlı değişimi Şekil 3.18'de, $\sqrt{r \times t}$ parametre değerine göre değişimi Şekil 3.19'da gösterilmiştir. Şekil 3.18'de gösterilen yüzeye ait sonuçlar Denklem 3.10'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$L = 0.052 \times r \times t - 0.640 \times r^2 + 1.803 \times t^2 + 379 \times r - 61 \times t - 55516 \quad (3.10)$$



Şekil 3.18: Karkas yapının 0.5 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun kalınlık ve yarıçapa göre değişimi.



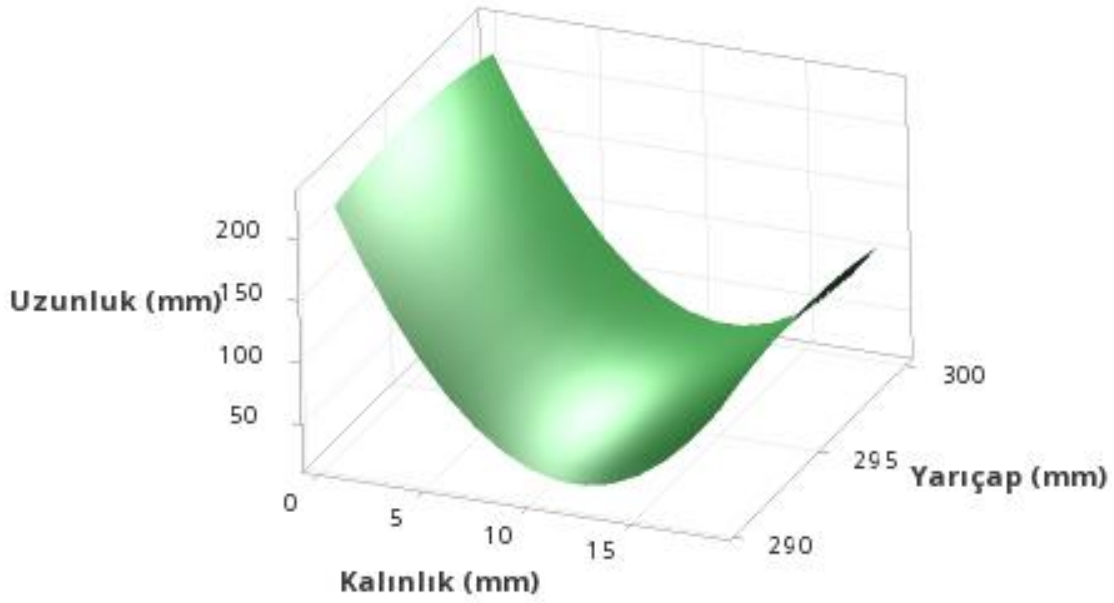
Şekil 3.19: Karkas yapının 0.5 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun $\sqrt{r \times t}$ 'ye göre değişimi.

Şekil 3.19'da gösterilen minimum model uzunluğu Denklem 3.11'de paylaşılmıştır.

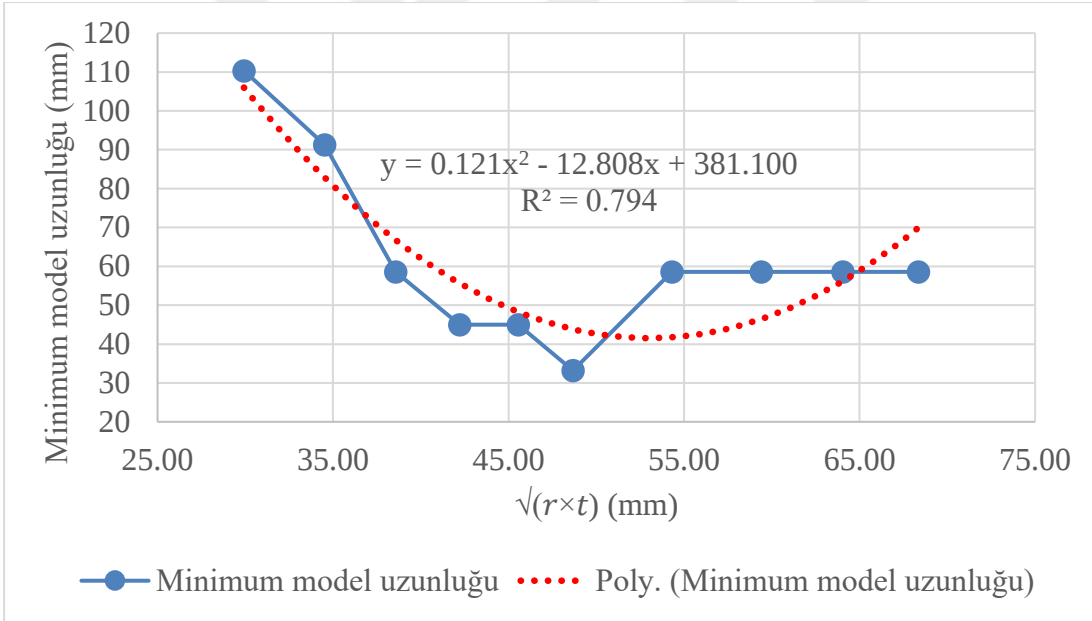
$$L = 0.128 \times r \times t - 15.015 \times \sqrt{r \times t} + 492.503 \quad (3.11)$$

0.1 kat yükleme durumu için verilen değerlerin kalınlık ve yarıçapa bağlı değişimi Şekil 3.20'de, $\sqrt{r \times t}$ parametre değerine göre değişimi Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Şekil 3.20'de gösterilen yüzeye ait sonuçlar Denklem 3.12'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$L = 0.056 \times r \times t - 0.548 \times r^2 + 1.538 \times t^2 + 323 \times r - 52 \times t - 47394 \quad (3.12)$$



Şekil 3.20: Karkas yapının 0.1 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun kalınlık ve yarıçapa göre değişimi.



Şekil 3.21: Karkas yapının 0.1 kat yükleme altında minimum model uzunluğunun $\sqrt{(r \times t)}$ 'ye göre değişimi.

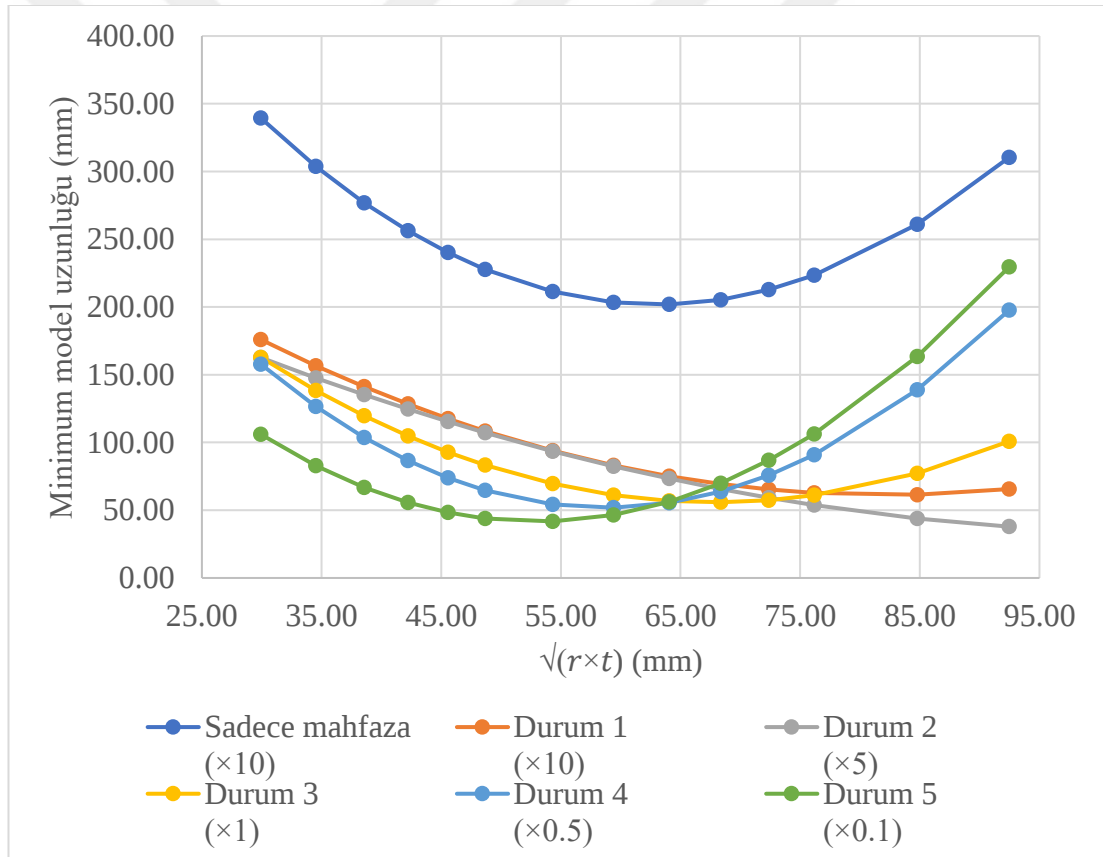
Şekil 3.21'de gösterilen minimum model uzunluğu Denklem 3.13'te paylaşılmıştır.

$$L = 0.121 \times r \times t - 12.808 \times \sqrt{r \times t} + 381.100 \quad (3.13)$$

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Karkas yapının sonlu elemanlar modelinin büyüklüğünü belirlemek için yapılan analizlerde kalınlık, yarıçap ve kuvvet büyüklüklerinin etkisi incelenmiştir. İncelenen kalınlık ve yarıçap değerleri Çizelge 3.1’de paylaşılırken, uygulanan yük değerleri ise Çizelge 3.5’te paylaşılmıştır. Bu model büyüklüğü sonuçları Von Mises gerilmesinde %1 değişimin görüldüğü uzunluğa bakılarak elde edilmiştir.

Bu analizler sonucunda farklı kalınlık, yarıçap ve yüklemeler için elde edilen minimum model uzunlukları Şekil 4.1’de kıyaslanmıştır.



Şekil 4.1: Minimum model uzunluğunun %1 hassasiyetle farklı yüklemeler altında $\sqrt{r \times t}$ 'ye göre değişimi.

Durum 3, nominal yüklemeyi ifade etmektedir. Durum 4 ve durum 5 sırasıyla yarım kat yükleme ile onda bir kat yüklemeyi ifade ederken, durum 1 ve durum 2 sırasıyla 10 kat ve 5 kat yüklemeleri ifade etmektedir.

Genel sonuç olarak $\sqrt{(r \times t)}$ değeri belirli bir değere erişinceye kadar minimum model uzunluğu azalırken, bu eşik değeri geçtikten sonra minimum model uzunluğunun arttığı görülmektedir. Nominal yükleme altında model büyüklüğü, $\sqrt{(r \times t)}$ değeri 68.38'e erişinceye kadar azalırken sonrasında bu değer artmaya başladığı görülmüştür.

Yükleme miktarı arttıkça, eşik değere kadar, model büyüklüğünün nominal yüklemeye göre daha büyük olduğu ancak eşik değerini geçtikten sonra artan yüklemelerde model büyüklüğünün azalmaya devam ettiği görülmüştür.

Yükleme miktarı azaldıkça, eşik değere kadar, model büyüklüğünün nominal yüklemeye göre daha küçük olduğu ancak eşik değerini geçtikten sonra azalan yüklemelerde model büyüklüğünün nominal yüklemeye göre daha hızlı artmaya devam ettiği görülmüştür.

Sadece mahfazanın bulunduğu modelden elde edilen model büyüklüğü sonuçları Şekil 4.1'de görüldüğü gibi model büyüklüğü hesaplaması için bir üst sınır tanımlamaktadır. Montaja uygulanan gerçek yükleme büyüklükleri göz önünde bulundurularak Durum 1-5 sonuçlarından ilgili olan yükleme durumu kullanılabileceği gibi konservatif kalmak için bazı durumlarda sadece mahfaza modelinden elde edilen model büyüklüğü sonuçları da kullanılabilir.

Analizi gerçekleştirilen kalınlık değerleri ile yarıçap değerleri kendi içerisinde birbirine yakın değerlerdir. İki parametre de kendi içerisinde birbirine yakın değerler olduğu durumlarda Şekil 3.12, Şekil 3.14, Şekil 3.16, Şekil 3.18 ve Şekil 3.20'de model uzunluğu hesaplamasında baskın olan parametrenin parçanın kalınlığı olduğu görülmektedir.

Literatürde minimum model büyüklüğünü belirlemek için kullanılan hesaplamalar Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

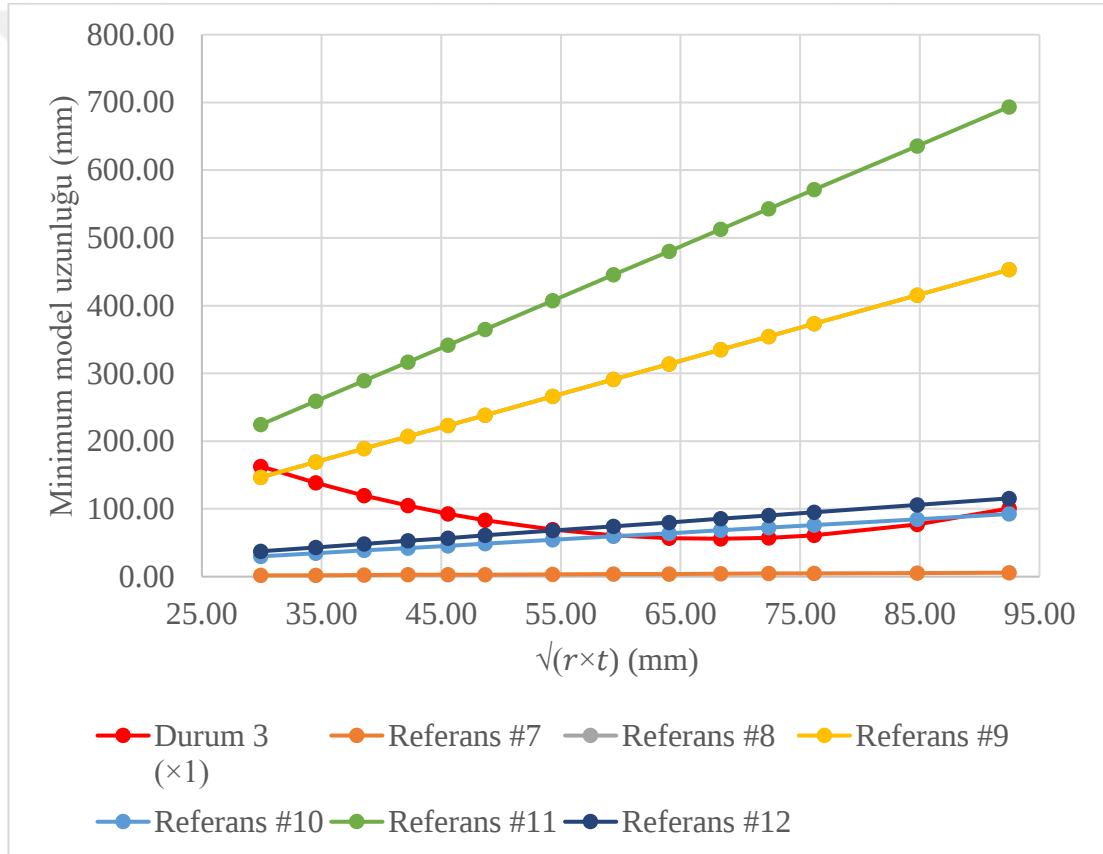
Çizelge 4.1 : Literatürde tanımlanan minimum model uzunluğu formülleri.

Literatür çalışması	Minimum model uzunluğu
Referans #7	$(0.063 - 0.144) \times \sqrt{(r \times t)}$
Referans #8	$4.900 \times \sqrt{(r \times t)}$
Referans #9	$4.900 \times \sqrt{(r \times t)}$
Referans #10	$1.000 \times \sqrt{(r \times t)}$
Referans #11	$7.500 \times \sqrt{(r \times t)}$
Referans #12	$1.250 \times \sqrt{(r \times t)}$
Referans #13	$(5 - 15) \times 2 \times r$

Şekil 4.2’de, bu çalışmadaki nominal yükleme ve %1 hassasiyet oranı kullanılarak elde edilen minimum model uzunluğu sonuçları ile literatürde paylaşılan formüllerden elde edilen değerler kıyaslanmıştır.

Literatürde $\sqrt{(r \times t)}$ değerinin doğrusal katları olarak tanımlanan minimum model uzunluğu $\sqrt{(r \times t)}$ değeri arttıkça model büyüklüğünün artması gerektiğini belirtirken çalışmadan elde edilen sonuca göre model uzunluğu $\sqrt{(r \times t)}$ 68.35’e erişinceye kadar azalırken sonrasında artmaya başlamaktadır.

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi $\sqrt{(r \times t)}$ değeri 55’e erişinceye kadar Referans#9 ile Referans#12 arasında kalırken bu değeri aştıktan sonra Referans#11’de belirtilen sonuca ve Referans#12’deki çalışmaya yakın sonuçlar ve eğilim göstermektedir.



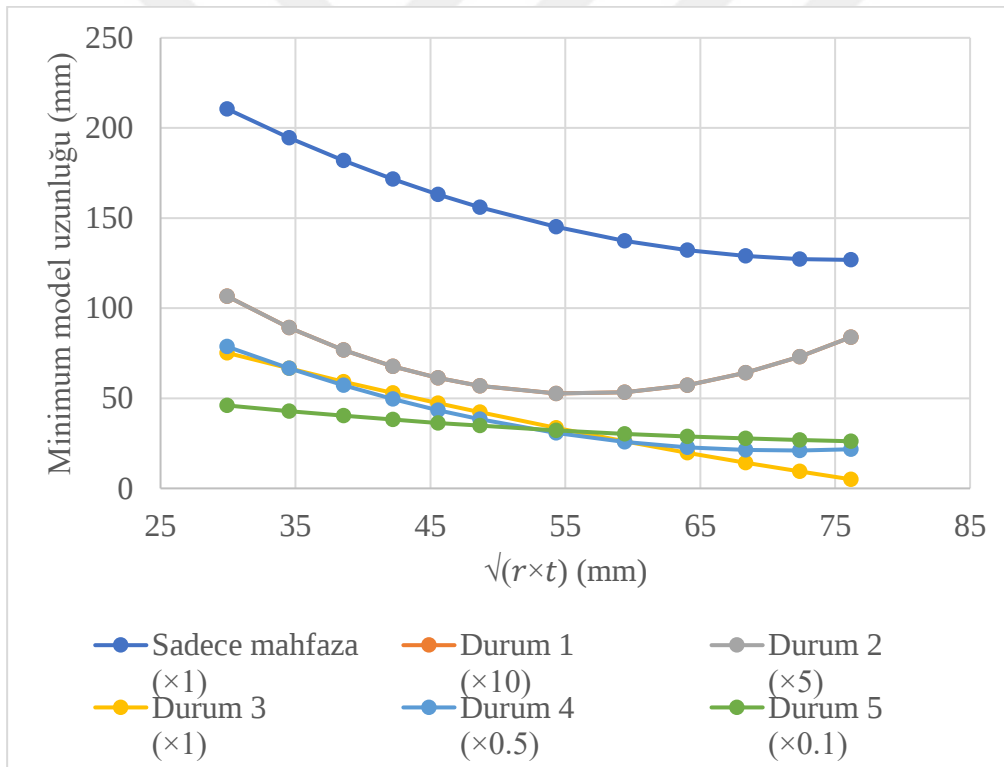
Şekil 4.2: Minimum model uzunluğunun nominal yüklemeli ve %1 hassasiyetli tez çalışması sonucu ile referans çalışmaları arasındaki kıyaslama.

Literatürdeki çalışmalar basınçlandırılmış ince cidarlı kaplar için yapılırken bu çalışma kalın cidarlı parçayı içerecek şekilde yapılmıştır. $\sqrt{(r \times t)}$ değeri 59.4’e erişinceye kadar kalın cidarlı parçalarda minimum model uzunluğunun $\sqrt{(r \times t)}$ değeri arttıkça azaldığı görülmektedir. Bu değer geçildikten sonra kalın cidarlı parça ile Referans #10 ve

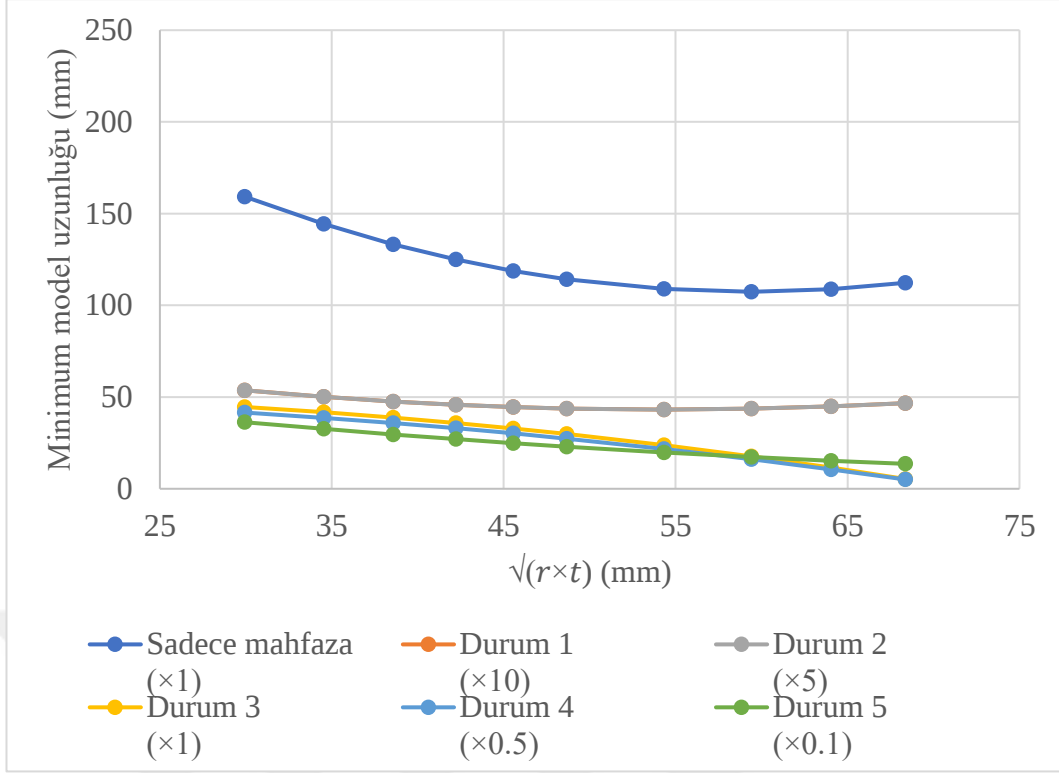
Referans #12'deki ince cidarlı parça sonuçları benzerlik göstermekte yani kalın cidarlı parça bu değerden sonra ince cidarlı gibi davranmaktadır.

Bazı durumlarda sonuçlardaki hassasiyetin %1 fark gibi az olması yerine %5 ya da %10 gibi daha yüksek değerler kabul edilebilir. Özellikle gaz türbinlerinde konsept ya da başlangıç seviye tasarım çalışmaları esnasında daha büyük farklar kabul edilebilir. Bu çalışmalar için %5 ve %10 hassasiyetle minimum model uzunluğu değişimi sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Beklenen hassasiyet değeri düştükçe, beklenildiği gibi, minimum model büyüklüğünün de düştüğü görülmektedir. Başlangıç seviye tasarım çalışmaları için %5 hassasiyet oranında model eksenel uzunluğu yaklaşık olarak %30 azaltılabilirken, %10 hassasiyet oranında model eksenel uzunluğu yaklaşık olarak %50 azaltılabilmektedir.



Şekil 4.3: Minimum model uzunluğunun %5 hassasiyetle $\sqrt{r \times t}$ 'ye göre değişimi.



Şekil 4.4: Minimum model uzunluğunun %10 hassasiyetle $\sqrt{r \times t}$ 'ye göre değişimi.

Çalışmaya ek olarak, karkas yapının şeklinin dairesel olduğu duruma ek olarak eliptik şekil incelenebilir ve bu şekil kendi etrafında farklı açılarda konumlandırılıp minimum model uzunluğuna etkisi incelenebilir. Ayrıca mahfazanın tek parça olduğu durum yerine farklı mahfazaların birbirine monte edildiği durumda, flanşın minimum model uzunluğuna etkisi olup olmadığı incelenebilir. Montajdaki parçalar üzerinde sıcaklık gradyanının etkisini de göz önünde bulundurabilmek için sıcaklığa bağlı malzeme tanımıyla, montaj hareketi daha iyi anlaşılabilir.

Bu çalışmada parçanın dış yarıçapı sabit tutulup, mahfazanın et kalınlığı değişimine bağlı elde edilen yarıçap değeri analizlerde kullanılmıştır. Bunun yerine daha farklı büyüklüklerdeki motorları göz önünde bulundurarak yarıçap değerleri radikal şekilde değiştirilerek minimum model uzunluğu hesaplanabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Claire, S.** (2015). Gas Turbines - A Handbook of Air, Land and Sea Applications, 2. Edition, Elsevier.
- [2] **MEGEP.** (2012). Uçak Bakım, Motor Kısımları.
- [3] **European Patent Office.** (2015). Turbine Frame Assembly. EP 1 149 986 B1. <<https://data.epo.org/publication-server/document?iDocId=2719539&iFormat=2>>, alındığı tarih 30.08.2022.
- [4] **Karakoç, T. H.** (2008). Gaz Türbinli Motorların Yakıt Sistemleri, T.C Anadolu Üniversitesi Yayınları; No 984, Eskişehir, 9-17.
- [5] **Özdemir, M.** (2019). Yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme parametrelerinin etki oranlarının yüzey yanıt yöntemi kullanarak analizi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7(3), 639-648.
- [6] **Chehrehgani, S., Noaparast, M., Rezai, B. ve Shafaei, S. Z.** (2017). Bonded-particle model calibration using Response Surface Methodology. *Particuology*, 32, 141–152.
- [7] **Gowhari-Anaraki, A. R., Hardy, S. J., Adibi-Asl, R.** (2004). Stress concentration factor and minimum hub length predictions for hollow tubes with internal and external flanges subjected to axial loading. *J. Strain Analysis* Vol. 39 No. 6.
- [8] **Harvey, J. F.** (1985). Theory and Design of Pressure Vessels, s. 173.
- [9] **Moss, D. R. ve Basic, M.** (2013). Pressure Vessel Design Manual, s. 448.
- [10] **Cloud, R. L. ve Rodabaugh, E. C.** (1965). Proposed Reinforcement design procedure for radial nozzles in spherical shells with internal pressure, s. 20.
- [11] **Porter, M. A. Martens, D. H. ve Marcal, P.** (1999). On Using Finite Element Analysis for Pressure Vessel Design. ASME, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP 388.
- [12] **Nayak, R.** (2011). Submodeling technique in stress analysis. HCL Technologies. <<https://www.scribd.com/document/313959782/Submodeling-Technique-in-Stress-Analysis>>, alındığı tarih 29.08.2022.
- [13] **Kouretzis, G. P., Karamitros, D. K. ve Sloan, S. W.** (2014). Analysis of buried pipelines subjected to ground surface settlement and heave, Vol. 52, No. 8, pp. 1058 – 1071, s. 13.
- [14] **Url-14** <<https://grabcad.com/library/jet-engine-with-afterburner-model-1>>, alındığı tarih 17.05.2022.
- [15] **MEGEP.** (2012). Uçak Bakım, Uçak Motorları.

- [16] **Url-16** <<https://sites.google.com/site/standardbasicengineering/home/standard-bolt-size>>, alındığı tarih 29.07.2022.
- [17] **Url-17** <<https://www.chinajinrui.net/nut/hex-nut/gb-hex-nut.html>>, alındığı tarih 29.07.2022.
- [18] **Url-18** <www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=0cd1edf33ac145ee93a0aa6fc666c0e0>, alındığı tarih 17.05.2022.
- [19] **Url-19** <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=7f65ee276ac48a5bede2f72537b429d>>, alındığı tarih 27.08.2022.
- [20] **Url-20** <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=2bcd9ffe0e134163889b247ae5f83165>>, alındığı tarih 27.08.2022.
- [21] **Url-21** <https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html>, alındığı tarih 21.11.2022.
- [22] **Langston, L. S.** (2016). Some details of jet engine thrust. *ASME. Mechanical Engineering*, Vol. 138-09, s. 76-77. <https://doi.org/10.1115/1.2016-Sep-6>.
- [23] **Hojić, D.** (2009). Mechanical loads on a turbofan engine structure at blade-off. [Master's Thesis, Lulea University of Technology]. Diva Portal. <<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1030140/FULLTEXT01.pdf>>, alındığı tarih 29.08.2022.
- [24] **Langston, L. S.** (2016). Some details of jet engine thrust. *ASME. Mechanical Engineering*, 138(09): 76-77. <https://doi.org/10.1115/1.2016-Sep-6>.
- [25] **Nayak, R.** (2011). Submodeling technique in stress analysis. *HCL Technologies*. <<https://www.scribd.com/document/313959782/Submodeling-Technique-in-Stress-Analysis>>, alındığı tarih 29.08.2022.
- [26] **Yahya, S. M.** (2011). Specifications of Some Aircraft Engines. *Turbines, Compressors and Fans. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education*. <<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070707023/back-matter/appendix1>>, alındığı tarih 01.09.2022.
- [27] **Url-27** <www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_cmd/Hlp_C_NLGEOM.html>, alındığı tarih 17.05.2022.

EKLER

EK A: Sadece Mahfaza Modelinin Seçilen Düğümdeki Von Mises Gerilmesi Sonuçları

Çizelge A.1: Sadece mahfaza modelinin seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).

Yarıçap (mm)	298.50	298.00	297.50	297.00	296.50
Kalınlık (mm)	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
1	351.13	249.53	192.24	156.74	132.38
2	352.33	249.83	192.31	156.74	132.37
3	353.18	250.17	192.45	156.81	132.39
4	355.81	251.18	192.91	157.04	132.53
5	358.46	252.52	193.66	157.49	132.82
6	363.38	254.91	195.00	158.33	133.39
7	368.62	257.99	196.96	159.66	134.35
8	376.41	262.48	199.88	161.70	135.88
9	384.39	267.91	203.75	164.60	138.15
10	394.65	274.85	208.85	168.52	141.31
11	404.35	282.55	214.97	173.47	145.40
12	415.55	291.25	222.05	179.32	150.33
13	425.27	299.85	229.43	185.59	155.73
14	436.31	308.57	236.80	191.88	161.20
15	446.48	316.91	243.93	198.03	166.61
16	460.42	326.54	251.66	204.55	172.29
17	478.10	339.05	261.34	212.39	178.88
18	510.25	359.26	275.87	223.71	188.14
19	568.99	396.76	302.56	243.84	203.90

Çizelge A.1 (devam): Sadece mahfaza modelinin seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).

Yarıçap (mm)	296.00	295.00	294.00	293.00	292.00
Kalınlık (mm)	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00
1	114.71	90.73	74.91	63.65	55.23
2	114.69	90.72	74.90	63.65	55.22
3	114.70	90.72	74.89	63.64	55.22
4	114.78	90.75	74.91	63.66	55.23
5	114.99	90.87	74.99	63.71	55.28
6	115.40	91.12	75.17	63.85	55.39
7	116.13	91.60	75.52	64.13	55.62
8	117.34	92.42	76.14	64.62	56.03
9	119.17	93.72	77.14	65.42	56.68
10	121.79	95.64	78.62	66.61	57.66
11	125.25	98.22	80.64	68.24	59.01
12	129.48	101.43	83.19	70.32	60.76
13	134.16	105.07	86.13	72.77	62.84
14	138.98	108.91	89.32	75.47	65.17
15	143.80	112.83	92.62	78.30	67.64
16	148.83	116.90	96.04	81.25	70.21
17	154.53	121.40	99.75	84.34	72.81
18	162.31	127.13	104.18	87.90	75.84
19	175.06	136.31	111.67	94.54	82.01

Çizelge A.2: Sadece mahfaza modelinin seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal olmayan geometrik sonuçları (MPa).

Yarıçap (mm)	298.50	298.00	297.50	297.00	296.50
Kalınlık (mm)	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
1	349.48	249.04	192.06	156.67	132.35
2	350.62	249.34	192.13	156.67	132.33
3	351.35	249.66	192.27	156.74	132.36
4	353.79	250.63	192.72	156.97	132.49
5	356.14	251.91	193.46	157.41	132.79
6	360.67	254.20	194.77	158.24	133.35
7	365.40	257.15	196.69	159.56	134.31
8	372.59	261.46	199.54	161.57	135.83
9	379.94	266.68	203.33	164.43	138.07
10	389.63	273.41	208.35	168.32	141.21
11	398.93	280.92	214.39	173.23	145.29
12	409.97	289.50	221.39	179.03	150.20
13	419.79	298.05	228.73	185.28	155.58
14	431.09	306.79	236.09	191.57	161.05
15	441.49	315.18	243.23	197.72	166.46
16	455.46	324.80	250.94	204.22	172.13
17	472.77	337.14	260.54	212.01	178.68
18	503.93	356.94	274.86	223.22	187.88
19	560.73	393.65	301.19	243.17	203.54

Çizelge A.2 (devam): Sadece mahfaza modelinin seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal olmayan geometrik sonuçları (MPa).

Yarıçap (mm)	296.00	295.00	294.00	293.00	292.00
Kalınlık (mm)	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00
1	114.69	90.73	74.90	63.65	55.23
2	114.68	90.71	74.89	63.65	55.22
3	114.69	90.71	74.89	63.64	55.22
4	114.77	90.75	74.91	63.66	55.23
5	114.97	90.86	74.99	63.71	55.28
6	115.38	91.11	75.16	63.85	55.39
7	116.11	91.59	75.52	64.13	55.62
8	117.31	92.42	76.14	64.62	56.03
9	119.14	93.71	77.13	65.42	56.68
10	121.75	95.62	78.61	66.61	57.66
11	125.20	98.20	80.63	68.24	59.01
12	129.41	101.40	83.18	70.32	60.76
13	134.08	105.04	86.13	72.77	62.84
14	138.90	108.89	89.31	75.47	65.17
15	143.72	112.81	92.61	78.30	67.64
16	148.74	116.87	96.03	81.24	70.21
17	154.42	121.36	99.74	84.33	72.80
18	162.16	127.07	104.15	87.89	75.83
19	174.85	136.22	111.63	94.52	81.99

EK B: Karkas Yapı Modelinin Seçilen Düğümdeki Von Mises Gerilmesi Sonuçları

Çizelge B.1: Karkas yapı modelinin 10 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).

Yarıçap (mm)	298.50	298.00	297.50	297.00	296.50
Kalınlık (mm)	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
1	1042.67	658.83	449.74	325.87	249.18
2	1042.35	658.30	449.73	325.87	249.18
3	1042.16	658.65	449.73	325.87	249.18
4	1042.17	658.90	449.74	325.88	249.19
5	1042.82	657.72	449.75	325.97	249.20
6	1041.51	658.14	449.76	325.99	249.22
7	1040.07	658.04	449.68	325.98	249.21
8	1036.36	657.16	449.35	325.77	249.19
9	1029.66	654.69	448.44	325.32	248.83
10	1018.78	650.70	446.60	324.14	248.14
11	1003.11	643.25	442.27	321.47	246.67
12	983.55	632.10	437.29	318.49	244.69
13	960.86	618.81	430.74	315.03	242.61
14	939.41	606.69	420.80	311.09	239.40
15	923.17	594.65	410.64	303.06	231.96
16	894.59	569.25	389.46	286.85	218.81
17	812.13	518.55	358.48	267.81	206.77
18	682.11	464.17	344.59	265.38	211.25
19	603.01	457.63	367.12	299.84	246.19

Çizelge B.1 (devam): Karkas yapı modelinin 10 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).

Yarıçap (mm)	296.00	295.00	294.00	293.00	292.00
Kalınlık (mm)	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00
1	201.55	138.86	102.86	81.47	66.00
2	201.55	138.86	102.86	81.47	65.52
3	201.55	138.86	102.86	81.47	65.55
4	201.56	138.86	102.86	81.47	64.25
5	201.57	138.86	102.86	81.48	65.45
6	201.58	138.88	102.87	81.50	65.48
7	201.60	138.90	102.78	81.49	65.57
8	201.58	138.89	102.89	81.38	65.69
9	201.41	138.81	102.73	81.51	65.81
10	200.90	138.63	102.78	81.58	65.88
11	199.97	138.28	102.73	81.54	66.12
12	198.75	137.94	102.70	81.58	66.16
13	197.25	137.08	102.01	80.95	65.41
14	194.50	134.48	99.50	78.68	63.52
15	187.74	128.81	94.46	74.41	59.79
16	177.08	120.79	88.11	69.55	56.20
17	168.64	115.63	85.84	68.27	56.11
18	175.92	123.64	93.72	76.43	63.85
19	207.91	149.89	116.26	95.13	79.46

Çizelge B.2: Karkas yapı modelinin 5 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).

Yarıçap (mm)	298.50	298.00	297.50	297.00	296.50
Kalınlık (mm)	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
1	500.16	331.62	240.15	175.20	135.78
2	499.97	331.71	240.15	175.20	135.70
3	500.41	331.45	240.01	175.14	135.70
4	500.44	332.01	240.16	175.14	135.70
5	499.82	333.34	239.89	175.15	135.71
6	500.08	332.47	239.87	175.19	135.63
7	499.60	331.42	239.99	175.21	135.64
8	497.75	331.29	239.76	175.15	135.30
9	495.34	330.46	239.25	174.88	135.32
10	490.50	327.94	238.69	174.98	134.85
11	484.62	323.91	236.65	173.16	134.19
12	473.61	319.35	234.03	171.83	133.22
13	463.93	314.42	230.55	169.55	131.77
14	453.52	309.09	227.91	167.66	130.57
15	446.01	303.77	222.93	163.58	126.73
16	432.23	291.43	211.89	154.42	119.09
17	389.75	263.06	192.74	142.28	111.00
18	322.37	230.77	178.25	137.70	110.77
19	282.38	223.21	182.69	150.41	125.05

Çizelge B.2 (devam): Karkas yapı modelinin 5 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).

Yarıçap (mm)	296.00	295.00	294.00	293.00	292.00
Kalınlık (mm)	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00
1	109.83	73.03	52.69	42.10	34.73
2	109.83	73.07	52.70	42.10	34.73
3	109.83	73.07	52.68	42.22	34.73
4	109.95	73.08	52.68	42.22	34.73
5	109.95	73.03	52.68	42.10	34.73
6	109.96	73.09	52.70	42.22	34.73
7	109.96	73.09	52.71	42.10	34.73
8	109.93	73.09	52.68	42.21	34.72
9	109.84	73.08	52.68	42.21	34.64
10	109.17	72.83	52.61	42.18	34.77
11	109.11	72.75	52.64	42.27	34.86
12	108.65	72.81	52.66	42.37	34.89
13	107.66	72.39	52.37	42.05	34.58
14	106.62	71.21	51.19	41.02	33.75
15	103.01	67.71	48.62	38.98	32.18
16	97.38	63.19	45.36	36.77	30.54
17	91.12	60.10	44.35	36.41	30.66
18	92.75	63.92	48.85	40.67	34.54
19	106.37	76.66	59.91	49.57	42.12

Çizelge B.3: Karkas yapı modelinin nominal yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).

Yarıçap (mm)	298.50	298.00	297.50	297.00	296.50
Kalınlık (mm)	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
1	107.49	73.71	61.21	48.32	40.43
2	107.78	73.71	61.21	48.32	40.43
3	107.64	73.71	61.21	48.32	40.43
4	107.82	73.71	61.21	48.32	40.44
5	107.72	73.71	61.21	48.33	40.44
6	107.65	73.71	61.21	48.33	40.44
7	107.26	73.68	61.20	48.33	40.44
8	107.28	73.61	61.18	48.32	40.43
9	106.87	73.65	61.11	48.28	40.42
10	106.04	72.91	60.96	48.19	40.56
11	104.46	72.52	60.69	48.00	40.20
12	102.90	71.88	60.42	47.74	40.05
13	100.88	70.85	59.94	47.51	39.96
14	99.16	70.12	59.62	47.27	39.78
15	97.73	69.40	58.72	46.37	38.92
16	94.95	66.09	55.85	43.72	36.94
17	86.96	59.93	50.78	39.29	33.75
18	73.29	51.73	43.76	35.19	31.29
19	62.44	48.54	41.57	34.55	31.41

Çizelge B.3 (devam): Karkas yapı modelinin nominal yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).

Yarıçap (mm)	296.00	295.00	294.00	293.00	292.00
Kalınlık (mm)	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00
1	35.05	24.92	21.81	20.47	19.69
2	35.03	24.92	21.81	20.47	19.69
3	35.05	24.92	21.81	20.47	19.69
4	35.03	24.92	21.81	20.46	19.69
5	35.05	24.92	21.81	20.47	19.69
6	35.05	24.92	21.81	20.47	19.69
7	35.05	24.89	21.81	20.46	19.69
8	35.05	24.89	21.74	20.46	19.69
9	35.04	24.85	21.80	20.46	19.78
10	34.79	24.89	21.73	20.47	19.71
11	34.91	24.84	21.80	20.50	19.73
12	34.88	24.91	21.72	20.53	19.75
13	34.69	24.96	21.88	20.51	19.73
14	34.59	24.79	21.78	20.40	19.63
15	34.01	24.25	21.38	20.14	19.45
16	32.35	22.97	20.66	19.79	19.31
17	29.95	21.89	20.05	19.53	19.37
18	28.59	21.52	20.15	19.63	19.50
19	29.30	22.47	20.97	19.95	19.49

Çizelge B.4: Karkas yapı modelinin 0.5 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).

Yarıçap (mm)	298.50	298.00	297.50	297.00	296.50
Kalınlık (mm)	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
1	65.92	44.04	41.09	32.70	28.73
2	65.91	43.87	41.09	32.70	28.70
3	65.91	43.88	41.09	32.70	28.73
4	65.91	43.88	41.09	32.70	28.73
5	65.90	43.87	41.09	32.70	28.73
6	65.72	44.04	41.09	32.70	28.73
7	65.83	44.03	41.09	32.70	28.73
8	65.66	44.00	41.08	32.69	28.72
9	65.41	43.80	41.05	32.68	28.69
10	64.98	43.68	40.98	32.64	28.67
11	64.38	43.34	40.84	32.55	28.64
12	63.49	42.99	40.60	32.43	28.58
13	62.42	42.60	40.35	32.34	28.60
14	61.49	42.19	40.14	32.25	28.58
15	60.65	41.80	39.56	31.70	28.16
16	59.30	40.08	37.55	29.97	26.79
17	54.60	35.84	33.59	27.04	24.63
18	44.86	30.25	28.98	23.95	22.58
19	36.94	27.61	26.57	22.43	21.78

Çizelge B.4 (devam): Karkas yapı modelinin 0.5 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).

Yarıçap (mm)	296.00	295.00	294.00	293.00	292.00
Kalınlık (mm)	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00
1	25.68	20.28	20.34	20.13	19.87
2	25.68	20.32	20.34	20.13	19.87
3	25.68	20.28	20.34	20.13	19.87
4	25.68	20.32	20.34	20.13	19.87
5	25.68	20.32	20.34	20.13	19.87
6	25.68	20.32	20.34	20.13	19.87
7	25.68	20.32	20.30	20.13	19.87
8	25.68	20.23	20.30	20.13	19.88
9	25.67	20.33	20.16	20.13	19.88
10	25.66	20.33	20.33	20.13	19.88
11	25.63	20.26	20.21	20.14	19.89
12	25.65	20.37	20.23	20.15	19.89
13	25.74	20.45	20.36	20.16	19.87
14	25.75	20.40	20.26	20.04	19.80
15	25.39	20.02	20.04	19.85	19.66
16	24.36	19.35	19.50	19.54	19.59
17	22.97	18.51	19.10	19.17	19.34
18	21.67	17.79	18.69	18.78	19.07
19	21.45	17.56	18.37	18.30	18.41

Çizelge B.5: Karkas yapı modelinin 0.5 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).

Yarıçap (mm)	298.50	298.00	297.50	297.00	296.50
Kalınlık (mm)	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
1	30.81	20.97	25.42	21.00	19.91
2	30.82	20.97	25.42	20.96	19.91
3	30.78	20.97	25.42	21.00	19.91
4	30.81	20.97	25.42	21.00	19.91
5	30.78	20.97	25.42	21.00	19.91
6	30.77	21.00	25.42	20.96	19.91
7	30.80	20.99	25.42	21.00	19.91
8	30.67	20.99	25.41	20.96	19.91
9	30.72	20.91	25.41	21.00	19.91
10	30.62	20.90	25.40	20.96	19.91
11	30.51	20.83	25.38	20.96	19.90
12	30.25	20.85	25.33	20.98	19.93
13	30.03	20.66	25.30	21.02	20.00
14	29.77	20.50	25.29	21.06	20.05
15	29.70	20.41	25.03	20.80	19.88
16	29.10	19.57	23.93	19.97	19.23
17	26.56	17.30	21.73	18.26	18.02
18	21.92	14.12	19.17	16.36	16.65
19	17.07	12.45	17.12	14.76	15.48

Çizelge B.5 (devam): Karkas yapı modelinin 0.5 kat yüklemeli durumda seçilen düğümdeki Von Mises gerilmesinin doğrusal geometrik sonuçları (MPa).

Yarıçap (mm)	296.00	295.00	294.00	293.00	292.00
Kalınlık (mm)	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00
1	18.76	17.89	20.13	20.37	20.43
2	18.76	17.89	20.13	20.37	20.43
3	18.76	17.89	20.13	20.37	20.43
4	18.76	17.89	20.13	20.37	20.43
5	18.76	17.88	20.13	20.37	20.43
6	18.76	17.88	20.14	20.37	20.43
7	18.76	17.92	20.14	20.37	20.43
8	18.76	17.92	20.14	20.37	20.44
9	18.76	17.92	20.13	20.38	20.44
10	18.75	17.91	20.13	20.38	20.44
11	18.75	17.89	20.10	20.38	20.44
12	19.09	17.88	20.11	20.36	20.44
13	19.13	17.91	20.06	20.32	20.40
14	18.88	17.87	20.02	20.20	20.31
15	18.75	17.69	19.81	20.03	20.17
16	18.61	17.26	19.44	19.78	19.93
17	17.82	16.64	18.88	19.29	19.65
18	16.89	15.92	18.27	18.64	19.14
19	16.27	15.11	17.43	17.70	18.05

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Hayri Güldağlı

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği.
- **Lisans** : 2015, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2015-2017 yılları arasında TUSAŞ Motor Sanayi(TEI) firmasında Ürün Mühendisi olarak çalıştı.
- 2017 yılı itibariyle GE Aerospace firmasında Analiz Mühendisi olarak çalışmaktadır.