T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HELİKOPTERLERDE KULLANILAN AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİ TASARIMI VE YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Mehmet KEPENEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ

Mayıs, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HELİKOPTERLERDE KULLANILAN AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİ TASARIMI VE YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Mehmet KEPENEK tarafından hazırlanan tez çalışması 26.05.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Aslı GÜNAY BULUTSUZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Doruk GÜRKAN, Üye
Gedik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Helikopterlerde Kullanılan Ayarlı Kütle Sönümleyici Tasarımı ve Yorulma Davranışının İncelenmesi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mehmet KEPENEK

Aileme…

TEŞEKKÜR

Tamamlamış olduğum yüksek lisans tezim sürecinde başta desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen sayın danışmanım Doç. Dr. Binnur Sağbaş'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca eğitim hayatımın ilk gününden bu yana her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Tezimin belirlenmesi sürecinden tamamlanmasına kadar tüm aşamalarında bilgi ve paylaşımlarıyla her zaman destekçim olan yöneticilerim, tüm çalışma arkadaşlarım ve şirketim Türk Havacılık ve Uzay Sanayii'ne saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet KEPENEK

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xiii
ÖZET xiv
ABSTRACT xvi
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Taraması 1
1.2 Döner Kanat Hava Araçları İçin Pasif Titreşim Sönümleyiciler 3
1.2.1 Yay Tip Ayarlı Kütle Sönümleyici 6
1.2.2 Yaprak Yay Tip Ayarlı Kütle Sönümleyici 7
1.3 Havacılık Endüstrisinde Optimizasyon 8
1.3.1 Boyut Optimizasyonu 9
1.3.2 Şekil Optimizasyonu 10
1.3.3 Topoloji Optimizasyonu 10
1.4 Helikopter Yapısallarında Yorulma Yaklaşımı 10
1.4.1 Hasar Toleransı (Çatlak Büyümesi) Yaklaşımı 11
1.4.2 Gerilme-Çevrim (S-N Eğrisi) Yaklaşımı 12
1.4.3 Gerilim-Ömür Yaklaşımı 13
1.5 Tez Kapsamı 14
2 TASARIM VE PARAMETRELER 15
2.1 Tasarım Değişkenleri ve Kısıtlamaları 15
2.2 Ayarlı Kütle Sönümleyici Parçalarının Mekanik Özellikleri 15
2.2.1 Sönümleyici 16
2.2.2 Bağlayıcı 16
2.2.3 Ağırlık 16
2.3 Konsept Tasarım 17
2.3.1 Ana Sistem Tasarımı 18
2.3.2 Ayarlı Kütle Sönümleyici İlk Tasarımı 20

2.4 Sistem Doğal Frekansı İçin Denklem Çözümleri 22
3 SONLU ELEMANLAR MODELLEMESİ VE METODOLOJİ 24
3.1 Birincil Sistem (Lowerdeck) 24
3.1.1 SOL 103 Normal Modlar ve Özdeğer Analizi 29
3.1.2 Frekans Tepki Fonksiyonu (FRF) 33
3.2 Yaprak Yay Sönümleyici FEM Modeli 35
4 AYARLANMIŞ KÜTLE SÖNÜMLEYİCİ SİSTEM TASARIMI 38
4.1 Yük ve Sınır Koşulları 38
4.2 Başlangıç Tasarımlarının Oluşturulması 41
4.2.1 İlk Tasarım Kesitinin Belirlenmesi 43
4.2.2 Kesit Genişliğinin Belirlenmesi 46
4.3 Sönümleyici Son Tasarımının Oluşturulması 49
4.3.1 Ayarlı Kütle Sönümleyici Titreşim Modu 51
4.3.2 Ayarlı Kütle Sönümleyici Son Kütlenin Belirlenmesi 53
4.3.3 Sönümleyici Son Tasarım ve Ana Sistem Tasarımının Doğrulanması 55
5 SÖNÜMLEYİCİNİN YORULMA DAVRANIŞI 59
5.1 Yorulma Yaklaşımı 59
5.2 Sönümleyici Gerilme Sonuçları 60
5.3 Kt ve R Değerlerinin Belirlenmesi 63
5.4 Bağlayıcı Dayanımı 65
5.5 Sönümleyici Ömrü 69
6 SONUÇ 78
KAYNAKÇA 80
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 82

SİMGE LİSTESİ

f_r	Ana rotor dönüş frekansı (Hz)
RPM_r	Ana rotorun dönüş hızı (devir/dakika)
f_m	Ana tahrik frekansı
ω	Açısal frekans (radyan/saniye)
f_s	Birincil sistemin (Lowerdeck) doğal frekansı (Hz)
q	Çentik duyarlılığı
ρ	Çentik yarıçapı
d	Delik çapı
f_n	Doğal frekans (Hz)
S_{eq}	Eşdeğer gerilme
H(ω)	Frekans Tepki Fonksiyonu
S	Gerilme
R	Gerilme oranı
σ_{maks}	Gerilme yığılmasının olduğu yerdeki maksimum gerilme
σ_{nom}	Homojen bölgede nominal gerilme
ksi	Kilopound inç kare
m	Kütle (kg)
lbs	Libre's
a^*	Malzeme sabiti (mikroyapı boyutuyla ilgili)
P	Malzemeye bağlı yorulma katsayısı
MPa	Mega Paskal
mm	Milimetre
t	Parça kalınlığı
k	Rijitlik (N/m)
ζ	Sönümleme katsayısı (Ns/m)
m_d	Sönümleme sisteminin kütlesi (kg)
k_d	Sönümleme sisteminin sertliği (N/m)

f_d	Sönümleyicinin doğal frekansı (Hz)
R_n	Taşıma dayanımı
F_s	Taşıma kuvveti
E	Young Modülü
B	Yorulma eğrisinin eğim katsayısı
Kt	Yorulma gerilme konsantrasyon faktörü
Kf	Yorulma gerilme yoğunlaştırma katsayısı
A	Yorulma kesim noktası katsayısı
N_f	Yorulma ömrü

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
EASA	European Union Aviation Safety Agency
FEM	Finite Element Method
FRF	Frequency Response Functions
MMPDS	Metallic Materials Properties Development and Standardization
MTOW	Maximum Take-Off Weight
RBE2	Rigid Body Element Type 2
RBE3	Rigid Body Element Type 3
RPM	Revolutions Per Minute
S-N	Stress-Life
TMD	Tuned Mass Damper

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Klasik kütle-yay sönümleyici modeli **4**
Şekil 1.2 ABD Patent Ofisi'nden alınan Hermann Frahm'a ait patent başvurusu ... **5**
Şekil 1.3 Ayarlı kütle sönümleyici prensibi **5**
Şekil 1.4 Ayarlı kütle yaylı titreşim sönümleyici **6**
Şekil 1.5 Bell 407 genel maksat helikopterine ait yaylı titreşim sönümleyici **6**
Şekil 1.6 Kore genel maksat helikopterinde bulunan yaprak yay ayarlı kütle sönümleyici ve konumu **7**
Şekil 1.7 Sikorsky UH-60A helikopteri iniş takımında yer alan yaprak yay sönümleyici **8**
Şekil 1.8 Paris kanunu örnek grafiği **12**
Şekil 1.9 Örnek bir S-N eğrisi **13**
Şekil 1.10 Örnek bir gerilme eğrisi **13**
Şekil 2.1 Helikoptere ait temel yapısal parçalar **18**
Şekil 2.2 Ayarlı kütle sönümleyicinin bağlanacağı birincil sistem tasarımı **19**
Şekil 2.3 Frame yapısal bileşen isimlendirmesi **19**
Şekil 2.4 Ayarlı kütle yaprak yay sönümleyici ilk tasarımı **21**
Şekil 2.5 Sönümleyici parçalarının ilk geometrileri **21**
Şekil 3.1 Birincil sistem FEM modeli ve parça kalınlıkları **27**
Şekil 3.2 Bağlayıcı konumları **28**
Şekil 3.3 SOL103 ve kısıtlamalar (kırmızı düğüm noktaları) **29**
Şekil 3.4 Birincil sistemin modları **30**
Şekil 3.5 Birincil sistemin 4. moduna ait hareket **31**
Şekil 3.6 Birincil sistem için uygun sönümleyici konumu **32**
Şekil 3.7 Birincil sistemin diğer diğer doğal frekans mod hareketleri **32**
Şekil 3.8 Serbest ve sönümleyici olan durumlar için örnek FRF grafiği **33**
Şekil 3.9 FRF çözümü girdileri **34**
Şekil 3.10 Frekans-İvme Grafiği **35**
Şekil 3.11 Yaprak yay sönümleyici FEM modeli **36**
Şekil 3.12 Yaprak yay sönümleyiciye ait parçaların FEM modeli **37**

Şekil 3.13 Ayarlı kütle sönümleyici FEM bağlayıcı modeli **37**
Şekil 4.1 Kore Helikopteri Pilot ve co-Pilot zemin bölgesi için Z ekseni titreşim verileri **39**
Şekil 4.2 Kore Helikopteri kabin arka zemin bölgesi için Z ekseni titreşim verileri **39**
Şekil 4.3 Kore Helikopteri Ayarlanabilir titreşim sönümleyici konumları **39**
Şekil 4.4 Westland 30 Helikopterine ait uçuş test verileri **40**
Şekil 4.5 ABD Patent Enstitüsü'nden alınan ayarlı yay kütleli titreşim sönümleyici patenti **41**
Şekil 4.6 Sönümleyici ilk tasarımı **43**
Şekil 4.7 Bağlayıcı mesafe kuralları **44**
Şekil 4.8 Sönümleyici konsept tasarımlarının gerilme dağılımı **45**
Şekil 4.9 Farklı kesitler için sönümleyici tasarımı **47**
Şekil 4.10 Farklı kesitler için sönümleyici von-Mises gerilim dağılımı **48**
Şekil 4.11 Sönümleyici tasarımları gerilim dağılımı **49**
Şekil 4.12 Sönümleyici konsept tasarım ve son tasarım **50**
Şekil 4.13 Sönümleyici Yaprak Yay Son Tasarım **51**
Şekil 4.14 Sönümleyici Son Tasarım Z eksen hareketini sağlayan modu **51**
Şekil 4.15 Sönümleyici ilk 10 Modu **52**
Şekil 4.16 Sönümleyici elemanları ağırlıkları **52**
Şekil 4.17 Sönümleyici konsept tasarım ve son tasarım kütle değişimi **54**
Şekil 4.18 Sönümleyicinin yeni kütleyle Z eksen hareketini sağlayan modu **54**
Şekil 4.19 Son kütleye sahip sönümleyici ilk 10 Modu **54**
Şekil 4.20 Sönümleyici ve birincil sistem montaj FEM modeli **55**
Şekil 4.21 Sönümleyici ve birincil sistem FRF analizi modeli **56**
Şekil 4.22 Sönümleyici ile sistem ve serbest sistem frekans-ivme grafiği **56**
Şekil 4.23 Sönümleyici ile birincil sistem yer değişimi **57**
Şekil 4.24 Sönümleyiciyle birlikte birincil sistem sönümleme Z ekseni yer değiştirme hareketi **58**
Şekil 5.1 Titanyum Ti-6Al-4V Kt:3 için S-N eğrisi **59**
Şekil 5.2 Sönümleyiciye ait maksimum Principal gerilme dağılımı **61**
Şekil 5.3 Sönümleyici kesit alanı Principal gerilme dağılımı **62**
Şekil 5.4 Bağlayıcı ve kütleye ait maksimum Principal gerilme dağılımı **62**
Şekil 5.5 Örnek R gerilme oranı grafikleri **63**
Şekil 5.6 Delik bölgesi Kt hesaplanması **64**
Şekil 5.7 Tipik bağlayıcı hata modları **65**

Şekil 5.8 Ayarlı kütle sönümleyici bağlayıcı kuvvetleri **66**
Şekil 5.9 Tüm bağlayıcı kesme kuvvetleri ve konumları **66**
Şekil 5.10 Tipik ana çatlak ilerleme yönü **70**
Şekil 5.11 Delik bölgesi maksimum gerilme..... **71**
Şekil 5.12 Delik bölgesi maksimum ve minimum gerilme **72**
Şekil 5.13 Kesit bölgesi maksimum gerilme **73**
Şekil 5.14 Kesit bölgesi nominal gerilme bölgesi **74**
Şekil 5.15 Kesit bölgesi maksimum ve nominal gerilme bölgesi..... **74**
Şekil 5.16 Titanyum Ti-6Al-4V Kt:1 için S-N eğrisi **75**
Şekil 5.17 Titanyum Ti-6Al-4V Kt:1 ve Kt:3 için S-N eğrisi **76**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Kullanılacak ayarlı kütle sönümleyici malzeme bilgisi **17**
Tablo 3.1 Helikopter sınıfları ile pal sayısı ilişkisi **25**
Tablo 3.2 Helikopterlerin genel ana rotor hızları ve bazı örnek helikopterler **26**
Tablo 3.3 Ana sistem malzeme bilgileri **27**
Tablo 3.4 Bağlayıcı MS20470AD5'in özellikleri **28**
Tablo 4.1 Modelde uygulanacak yük bilgileri **40**
Tablo 4.2 Analiz edilecek modelin sınır koşulları **41**
Tablo 5.1 Sönümleyici Principal gerilme sonuçları **62**
Tablo 5.2 R değerleri arasındaki ilişki **63**
Tablo 5.3 Bağlayıcılarda oluşan kesme ve çekme kuvvetleri **67**
Tablo 5.4 Bağlayıcı taşıma kuvvetleri **68**
Tablo 5.5 Sönümleyici sistem bağlayıcı özellikleri **69**
Tablo 5.6 Kritik bölgeler için S-N verileri **75**
Tablo 5.7 Kritik bölgeler için ömür bilgileri **77**

ÖZET

Helikopterlerde Kullanılan Ayarlı Kütle Sönümleyici Tasarımı ve Yorulma Davranışının İncelenmesi

Mehmet KEPENEK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ

Havacılık sektöründe yüksek performanslı ve rekabetçi ürünlerin geliştirilmesi, regülasyonlara uygun biçimde farklı üretim yöntemleri ve malzeme kombinasyonlarıyla maksimum verimlilikte sistemlerin tasarlanmasını gerekli kılmaktadır. Hava araçlarında verimliliği etkileyen temel parametrelerden biri, sistemlerin minimum kütle ve hacimle, uçuş koşulları altında deformasyona uğramadan görevlerini sürdürebilmesidir.

Bu tez çalışmasında, dinamik yükler altında çalışan döner kanatlı hava araçlarında pasif titreşim sönümleyici olarak kullanılan ayarlı kütle sönümleyicilerin yapısal tasarımı ve yorulma dayanımı incelenmiştir. Amaç, gerçek bir helikopterde karşılaşılan tasarım kriterleri olan alan kısıtlamaları, montaj kolaylığı, üretilebilirlik, uygun malzeme seçimi ve dinamik dayanım gibi konular dikkate alınarak, optimum performansa ve uzun ömre sahip bir sönümleyici tasarımı elde etmektir.

Çalışma kapsamında, yaprak yaylı bir ayarlı kütle sönümleyici için ilk tasarım önceki akademik çalışmalar ve endüstriden örnekler ile oluşturulmuştur. Bu ilk tasarım iteratif yöntemlerle geliştirilmiş ve Siemens NX 2021 yazılımı üzerinden

sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarımın, sistemin doğal frekansı ile uyumlu çalışması sağlanarak efektif sönümleme performansı hedeflenmiştir. Ayrıca, gerçek uçuş yükleri altında yorulma dayanımı analiz edilerek, tasarımın sonsuz ömür kriterini sağlayıp sağlamadığı değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak hem etkin sönümleme kabiliyetine hem de uzun ömürlü yapısal performansa sahip, üretime uygun bir sönümleyici tasarımı ortaya konmuştur. Elde edilen bulguların, ayarlı kütle titreşim sönümleyicilerin havacılık uygulamalarına yönelik daha etkin şekilde optimize edilmesi sürecine katkı sağlaması ve bu alandaki literatüre teknik anlamda önemli bir referans oluşturması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ayarlı Kütle Sönümleyici, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Yapısal Tasarım, Titreşim, Yorulma.

ABSTRACT

Design and Investigation of the Fatigue Behavior of a Tuned Mass Damper Used in Helicopters

Mehmet KEPENEK

Department of Mechanical Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Binnur SAĞBAŞ

The development of high-performance and competitive products in the aerospace industry necessitates the design of highly efficient systems in compliance with regulatory requirements, utilizing various manufacturing methods and material combinations. One of the key parameters influencing efficiency in aircraft is the ability of systems to operate under flight conditions with minimal mass and volume, without undergoing structural deformation.

This thesis investigates the structural design and fatigue behavior of tuned mass dampers, which are used as passive vibration attenuation elements in rotary-wing aircraft operating under dynamic loads. The objective is to achieve an optimized tuned mass damper design with high performance and extended service life, by taking into account real-world helicopter design constraints such as spatial limitations, ease of assembly, manufacturability, appropriate material selection, and dynamic strength.

Within the scope of the study, an initial design for a leaf-spring-based tuned mass damper was developed using prior academic research and industrial examples as references. This preliminary design was refined through iterative methods, and

finite element analyses (FEA) were conducted using Siemens NX 2021 software. The design was tuned to match the natural frequency of the primary system, thereby ensuring effective damping performance. Furthermore, fatigue analysis was carried out under realistic flight loads to evaluate whether the design meets the infinite life criteria.

As a result, a damper design that possesses both effective damping capability and long-term structural performance, and is suitable for production, has been developed. The findings are expected to contribute to the process of more effectively optimizing tuned mass vibration dampers for aerospace applications and to serve as a significant technical reference in the related literature.

Keywords: Tuned Mass Damper, Finite Element Method, Structural Design, Vibration, Fatigue.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Taraması

Havacılık sektörü birçok faktörü ve paydaşların beraber çalışmasıyla ürünlerin ortaya çıkarıldığı multidisipliner bir sektördür. Çok fazla sistem ve alt sistemlerden oluşan ürünlerde, tüm fonksiyonların optimum olması için çeşitli mühendislik yaklaşımlarıyla sorunların çözümüne odaklanılır. Bu kapsamda hava araçlarında ürün tasarım çalışmasına başlamadan önce dikkat edilmesi gereken önemli noktalar vardır. Bunları çevresel şartlar, tasarım yükleri, sertlik, statik güç, dayanıklılık, üretilebilirlik, bakım kolaylığı, hasar toleransı ve çarpışma dayanıklılığı başlıkları altında listeleyebiliriz. Bu başlıklar hava aracı tasarımı için tasarım kriterlerini oluşturur.

Tüm bu kriterler ile hava aracında asıl istenilen daha hafif ve verimli bir tasarım olmuştur. Bunun için de çeşitli mühendislik yaklaşımlarıyla birlikte yöntemler geliştirilmiştir. Bunlarda en çok kullanılan yöntemlerinden birisi de yapısal optimizasyonudur. Yapısal optimizasyonun temel amacı olan yapısal bütünlüğün bozulmadan tasarım kriterlerini sağlanması ve minimum ağırlıkta yapının üretilmesidir. Bu yöntemle en iyi performansı yakalamak için en hafif ağırlık ve kompakt bir geometri oluşturulur. Bu oluşan geometride genellikle geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmesi zor yapılardır. Buda eklemeli imalat gibi daha yenilikçi yöntemlerin kullanılmasına fırsat sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında temel olarak bir yapısal parçanın 3 farklı noktadan incelemesini göreceğiz. Öncelikle titreşim sönümleyici bir parça tasarımı yapılacak olup, bu parça endüstri örneklerinin çeşitli iterasyonlar ile yapısal optimizasyonu gerçekleştirilerek final halini alacak ve yorulma davranışı üzerine incelemede

bulunulacak. Bu farklı başlıklar üzerine daha önce de çeşitli önemli çalışmalar yapılmıştır.

Helikopterler dikey iniş-kalkış yapabilme yetenekleri ve zorlu hava koşullarında görev yapabilme özellikleri nedeniyle uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan hava araçlarıdır. Ancak bu avantajlarının yanı sıra helikopterlerin kendilerine has bazı zorlukları da bulunmaktadır. Bu zorlukların başında ise titreşim problemi gelmektedir. Helikopterde oluşan titreşim hem yolcu ve pilot konforu hem de helikopterin yapısal bütünlüğünü olumsuz etkileyebilmektedir.

Titreşim sorunu, helikopterlerin yapısal bileşenlerinin aynı frekansta rezonansa girmesi durumunda kaza kırıma kadar varabilecek ciddi sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle, titreşim kontrolü, helikopter tasarımında kritik bir role sahiptir. Bu konuda yapılan önemli çalışmalarından biri de Kore genel maksat helikopterlerinin geliştirme aşamalarında oluşan titreşim problemleri için uçuş test verilerini kullanarak çeşitli aktif ve pasif titreşim sönümleyicilerinin etkinliğini değerlendirmesidir [1].

Titreşim kontrolüne yönelik bir diğer önemli çalışma ise ayarlanabilir kütleli sönümleyiciler üzerine yapılmıştır. Bu çalışma da optimum performansın sağlanabilmesi için farklı yay-kütle kombinasyonları değerlendirilmiş ve titreşimin minimum etkisinin nasıl oluşabileceği değerlendirilmiştir [2].

Ayrıca helikopterlerde titreşim verilerinin doğru ve verimli kullanılması oldukça önemlidir. Helikopterlerin karmaşık montaj ve geometrik yapıları her titreşim noktasına aktüatörlerin yerleştirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada da aktüatörlerin optimum kullanılması için optimum sayı ve konum için çeşitli analizler yapılmıştır [3].

Ayrıca aerodinamik yüklerin yüklere maruz kalan helikopter arka gövdesi gibi yapıların aerodinamik performans artırılması amacıyla çeşitli optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Farklı tasarıma sahip gövdeler için optimum yüzey alanları belirlenmiş ve çeşitli iyileştirme yöntemleri uygulanmıştır. Bu tür aerodinamik optimizasyonlar, hava araçlarının genel performansını direkt etkilemektedir [4].

Geçmişten günümüzde hava araçlarında ve özellikle helikopterlerde yapılan bu çalışmalarda gösteriyor ki hava da çalışan yapıların optimum şekilde güvenlik, uçuşa elverişlilik sınırlarını koruyarak tasarlanması temel önceliği olmuştur.

1.2 Döner Kanat Hava Araçları İçin Pasif Titreşim Sönümleyiciler

Döner kanat hava araçları ve bunların en bilinen çeşidi olan helikopterler sahip oldukları ana rotor, kuyruk rotoru ve motor dinamik yüklerin çok daha etkin olduğu çalışma yük koşullarında kullanılırlar. Bu yükleme ile hava aracı yapısında ciddi bir titreşime maruz kalmaktadır. Titreşim yapıya ciddi hasarlar vermekle birlikte yorulma hasarlarının daha hızlı gerçekleşmesini ve yapının ömrünü kısa sürmesine neden olmaktadır. Ayrıca yüksek titreşim hava aracında bulunan pilot, yolcu sağlığını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenlerle döner kanat hava araçlarında titreşimin kontrol edilmesi kritik bir öneme sahiptir.

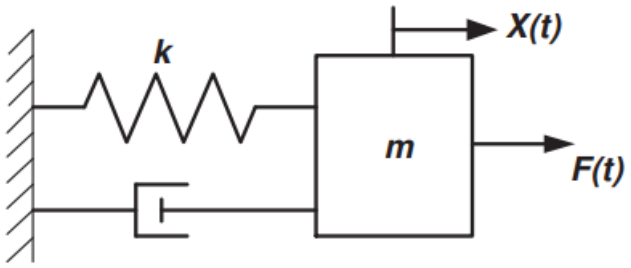
Bu sorunun çözümü için ise yapıdaki titreşim alanlarına titreşim sönümleyici elemanlar konularak çözüm aranır. Bunlar helikopterlerin ilk ortaya çıktığı zamandan bu yana kullanılan pasif titreşim sönümleyiciler, aktif titreşim sönümleyiciler ve elastomerik sönümleyiciler olarak sıralayabiliriz.

Bunlardan elastomerik sönümleyiciler ise aslında kauçuk gibi viskoelastik malzemeler kullanılarak bölgede sönümü sağlayan, bakım gerektirmeyen ve oldukça hafif olan malzemeler olarak tanımlaya biliriz. Çok efektif olmadıkları için titreşim etkisinin çok olmadığı yerlerde, genelde de rotor bağlantıların gövdeye bağlandığı bölgelerde kullanılır.

Aktif titreşim sönümleyiciler ise helikopterlerde genellikle rotor, gövde ve aviyonik alt sistemlerin de oluşan titreşimleri aktif olarak algılayıp ter titreşimle sönümlemeyi sağlayarak çalışırlar. Bu titreşim sönümleyiciler temel olarak 3 yapıdan oluşurlar, sensörler, aktüatörler ve kontrol ünitesi. Pasif titreşim sönümleyicilerin tersi olarak titreşimi pasif olarak sönümlemek yerine, karşı kuvvetler üreterek titreşimleri aktif olarak bastırmayı hedeflerler. Yapıdaki sensörler farklı noktalardaki hücreleriyle titreşim verilerini anlık olarak toplarlar, sonrasında kontrol ünitesi içerisinde yer alan işlemciler bu verileri inceleyerek titreşimi en aza indirecek karşı kuvveti hesaplar. Son olarak da aktüatörler de bu gelen kuvvetleri uygulayarak yapıyı sönümlemeye çalışır. Bu yöntem aktif olarak helikopterlerde kullanılmaya devam etmekte olup çeşitli dezavantajları bulunmaktadır. Öncelikle yapının enerjiye ihtiyaç duyması en büyük sorunlarından biri olup bakım maliyeti ve arıza sürelerinin kısa olması kullanımını kısıtlamaktadır. En önemli zorluk ise tüm bu bağlantıların kablolar ile

sağlanmasıdır, bağlantıların her zaman her noktaya erişememesi farklı çözümlerin üretilmesine neden olur.

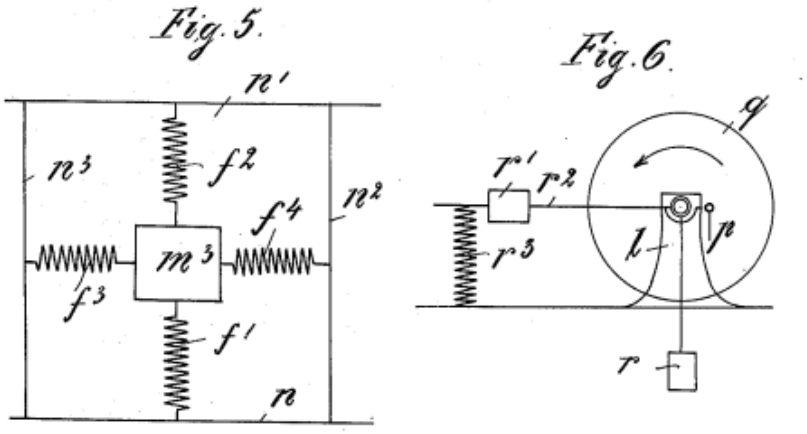
Çalışmamızın ana konusu olan ve son sönümleyici tipi olan pasif titreşim sönümleyiciler ise farklı geometriler ve tasarımlarıyla kendi içerisinde de farklı şekilde sıralanmaktadır. Çalışma konumuz olan kütle ayarlı yaprak yaylı sönümleyiciler ise yapıya eklenmesi ile pasif kontrol sağlanabilir. Bu tip dinamik titreşim sönümleyiciler titreşim kontrolünde yaygın olarak kullanılırlar. Sistemin yapısında sönümleme işlemi gören yay, doğal frekansın belirlenmesinde artırılarak veya azaltılarak eklenen ek kütle den oluşan sistem bir bağlayıcıyla birlikte titreşimi sönümlenecek yapıya bağlanır [5].



Şekil 1.1 Klasik kütle-yay sönümleyici modeli

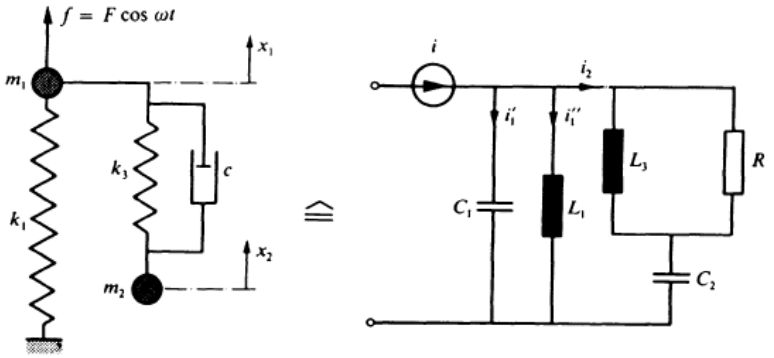
Yapıya harici kütle ekleme yöntemiyle titreşim sönümleme yöntemi ilk olarak 1901'de Alman Hermann Frahm tarafından keşfedilmiştir. Dinamik titreşim sönümleyici adı verilen bir titreşim kontrol cihazının patenti yine 1911'de Hermann Frahm [6] tarafından alınmış ve ilk kez ayarlı kütle sönümleyici (TMD) kavramı ortaya çıkmıştır. Bu nedenden ötürü de endüstride kullanılan ayarlı kütle sönümleyicilere Frahm adı verilir. Mekanizmanın çalışma prensibinde ise ayarlı kütle sönümleyici da yer alan kütle, helikopter yapısallarında bir bölgede oluşan istenmeyen belirli bir frekanstaki titreşim için rezonansa girer ve enerjiyi sönümler. Harici kütlenin bu kuvveti, yapı üzerindeki istenmeyen titreşim kuvvetlerine karşı etki ederek bu bölgede oluşan titreşim kuvvetlerini azaltır. Yukarıda da değindiğimiz gibi Ayarlı Kütle Sönümleyici 3 ana parçadan oluşur. Bunlar kütle, yay ve bağlayıcı olarak adlandırılabilir. Yapıların malzeme seçiminde de dikkat edilmesi gereken konular vardır. Kütle yapının frekansının çakışması için ve optimum tasarımı yakalamak için maksimum kütle ve minimum hacim olması tercih edildiği için Tungsten gibi yoğun metallerden üretilir. Yay ise kütle ile

birlikte oluşturacakları doğal frekanslarının yapıya takılacak bölgede frekans ile eşleşmesi için ve yapının yorulma ömrünün uzun olabilmesi çelik, titanyum gibi dayanımı yüksek ve uzun ömürlü metaller tercih edilir. Bağlayıcı yapı ise genelde bağlanacağı bölgedeki ana yapı ile aynı malzemeden üretilmesi tercih edilir.



Şekil 1.2 ABD Patent Ofisi'nden alınan Hermann Frahm'a ait patent başvurusu

Ayarlı Kütle Sönümleyicinin çalışma prensibini özetlemek gerekirse, mekanik bir sistemin titreşimlerini belirli bir frekans aralığında zayıflatan bir sistemdir. Ana sisteme bağlı yardımcı sistem olarak serbestlik derecesi sayısını ve dolayısıyla tüm sistemin rezonans sayısını artıran bir salınımlı yapıdan oluşur. Ana sistemdeki titreşimlerin azaltılması, bunların istenilen frekanslarda yardımcı sisteme aktarılmasıyla sağlanır [7].



Şekil 1.3 Ayarlı kütle sönümleyici prensibi

Ayarlı kütle sönümleyiciler genellikle belli bölgelerde kullanılırlar ve buna göre şekil alırlar. En çok kullanıldığı yerler Ana rotor ve kuyruk rotor sistemleri, Lowerdeck olarak adlandırılan pilot ve yolcu bölgesi, kuyruk bölgesi ilk akla gelen

yerlerdir. Ancak helikopterin doğası gereği farklı bir bölgede oluşacak titreşim senaryosu içinde kullanılabilirler.

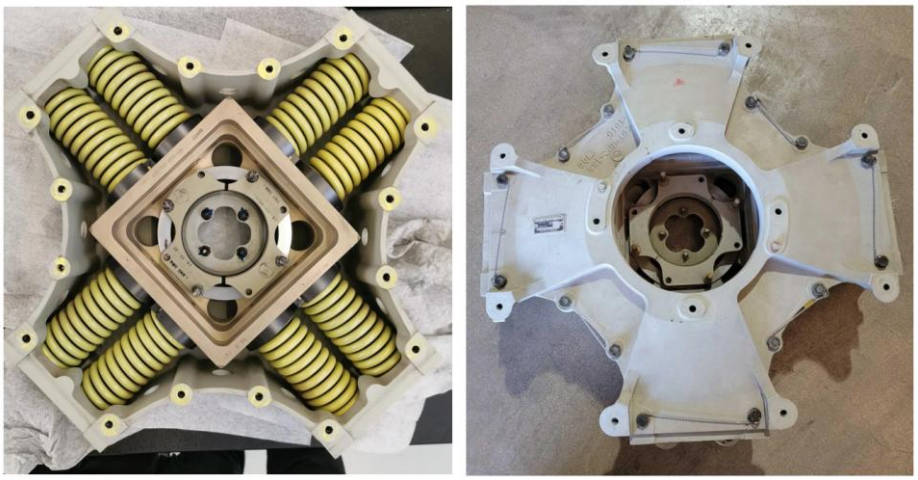
Frahm'ın yapmış olduğu çalışmalardan bu yana döner kanat hava araçları için farklı tasarımlar, boyutlarda çeşitli titreşim sönümleyiciler üretilmiştir. Bu yapının en çok bilinenler sırasıyla aşağıda ele alınmıştır.

1.2.1 Yay Tip Ayarlı Kütle Sönümleyici

Bu tip ayarlı kütle sönümleyiciler, ayarlı kütle sönümleyicilerin helikopterler için bir titreşim sönümleyici yapı olduğu ilk günden bu yana helikopterlerde kullanılmıştır. Sistem 2 veya daha fazla yayın belirli bir kütleye birlikte bağlanması ve bunların yapısal parçaya bağlanabilmesi için de bir gövde ya da bağlayıcı ile bir arada tutulmasıyla oluşur. Günümüzde ve geçmişte farklı yay sayıları ve tasarımlarda çeşitli helikopterlerde kullanılmıştır [8] [9].



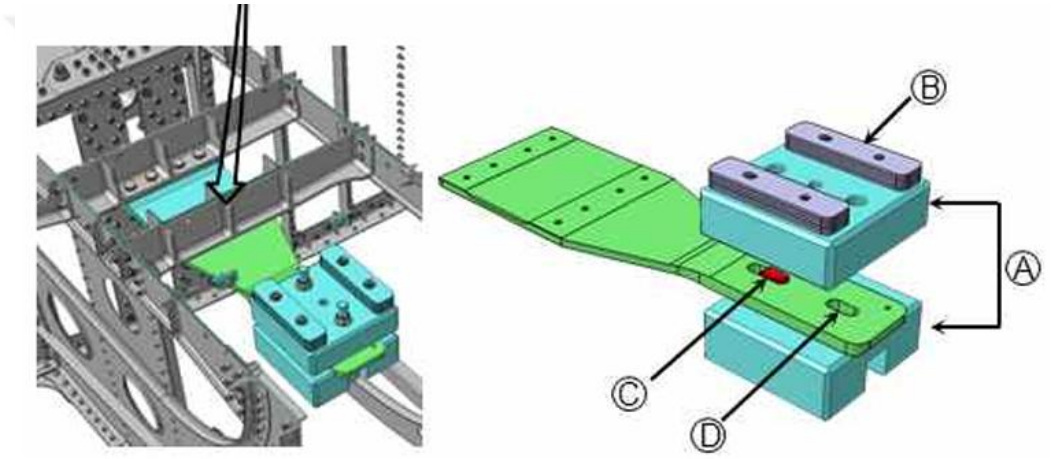
Şekil 1.4 Ayarlı kütle yaylı titreşim sönümleyici



Şekil 1.5 Bell 407 genel maksat helikopterine ait yaylı titreşim sönümleyici

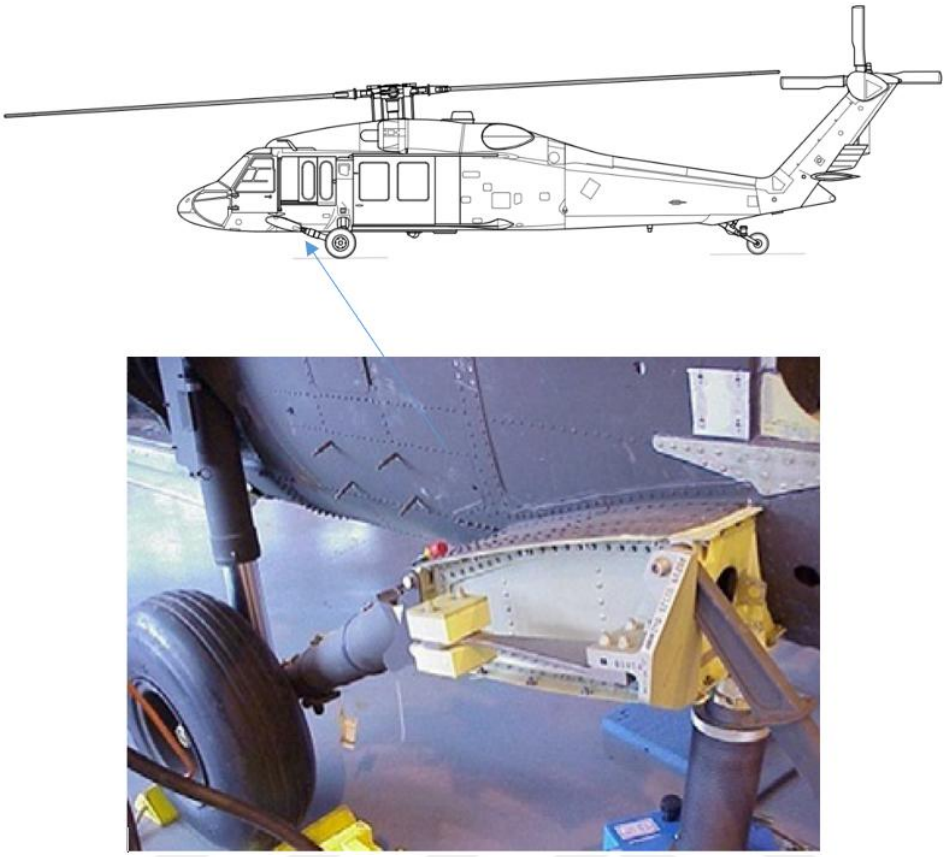
1.2.2 Yaprak Yay Tip Ayarlı Kütle Sönümleyici

Yay tip ayarlı kütle sönümleyiciler çok fazla kullanılan ekipmanlar da olsa helikopterlerde kullanılacak bölgeler çoğu zaman dar hacimdeki alanlarda ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda sönümleyicinin de bu dar olanlara uygun olarak yeniden tasarlanmasına ihtiyaç duymuştur. Bu da yaprak yay ayarlı kütle sönümleyici kullanılmasını sağlamıştır. Yaprak yay ayarlı kütle sönümleyiciler, yay tip ayarlı kütle sönümleyicilerden farklı olarak sönümü sağlayan parça yaylar yerine adını da aldığı büyük bir çubuk şeklinde olan yaprak yay parçadan oluşur [10].



Şekil 1.6 Kore genel maksat helikopterinde bulunan yaprak yay ayarlı kütle sönümleyici ve konumu

Bu tarz titreşim sönümleyiciler, helikopterlerin kullanılmaya başlandığı ilk günlerden bu yana titreşim çözümü için kullanılmıştır. Bunun içinde 1974 yılında ilk seri üretimine başlayan Sikorsky UH60 helikopterinden, 2010'ların üretimi Kore genel maksat helikopterine kadar görüleceği gibi neredeyse tüm helikopter ve üretime başlamış döner kanat araçlarında yolcu konforu ve pilotun sürüş kolaylığını artırmak için kullanılmaktadır [11].



Şekil 1.7 Sikorsky UH-60A helikopteri iniş takımında yer alan yaprak yay sönümleyici

1.3 Havacılık Endüstrisinde Optimizasyon

Optimizasyon havacılık endüstrisinde gittikçe daha önemli bir yer kaplamaktadır. Hava araçlarında yarışmacı bir hava aracı yapılmak istenirken yapının minimum ağırlık maksimum dayanım esasında inşa edildiği için sıklıkla daha kompleks yapılara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda yapısal parçaların optimizasyonunda yapıların boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu yöntemleriyle güncellenmesi aktif olarak kullanılmaktadır.

Aslında bu 3 optimizasyon yöntemi birbirlerini tamamlayan halkanın zincirleri gibi sıralı ve bağlı olarak çalışır. Bu tüm optimizasyon yöntemleri de yapısal tasarım optimizasyonunu oluşturmaktadır.

Hava araçlarının üretildiği ilk günlerden bu yana optimizasyon yöntemleri aktif olarak kullanılmaktadır. Kullanılmaya başlanılan ilk yöntem boyut optimizasyonudur. İlk uçaklarda kullanılan bu yöntemi daha sonrasında şekil

optimizasyonu takip etmiştir. En güncel yöntem ise topoloji optimizasyonudur. Tüm bu yöntemleri ortak ve ana çalışma prensibinde yapı belirli sınır koşullarında tasarım parçanın şeklinin ve malzemesinin optimum tasarıma ulaşması olarak özetlenebilir.

Çalışma prensibinde ise mevcut bilgi ve tecrübe ile uygun metot ve ekipmanların kullanımıyla başlangıç yapısı oluşturulur, bu yapıya başlangıç topolojisi de denir. Sonrasında şekil optimizasyonu yöntemiyle dış hat sınırları belirlenir ve daha sonra aerodinamik ve yapısal performansa dayalı geometriyi iyileştirmek için uygulanır. Son olarak da hafif, uygun maliyetli olmalarını ve tüm mukavemet, sertlik ve dayanıklılık gereksinimlerini karşılamalarını sağlamak için yapısal bileşenlerin boyutlarını ince oluşursa yeniden boyutlanması ve son halini alması için boyut optimizasyonu uygulanır.

Tüm bu optimizasyon yöntemlerinin helikopterler için birçok ortak avantajı vardır. Bunlar ağırlık azaltımı sağlaması, verimliliği artırması, araç performansının artması, güvenilirlik sağlaması, maliyet tasarrufu gibi sıralanabilir. Tüm bu faydalar günümüz helikopter tasarımlarında yöntemlerin kullanmasını sağlamaktadır.

1.3.1 Boyut Optimizasyonu

Boyut optimizasyonu helikopter yapılarında, güvenliği, performansı ve yapısal bütünlüğü koruyup iyileştirirken sistemdeki yapıların ağırlığını ve malzeme kullanımını en aza indirmeye odaklanır. İyi bir helikopter tasarlamak için yakıt verimliliğini, manevra kabiliyetini ve yük taşıma kapasitesini artırmak için mümkün olan en hafif yapılar tercih edilirken hava aracı yüksek dinamik yüklere, titreşime ve strese maruz kalacağı için de bu dayanımı sağlayabilecek bir tasarıma ihtiyaç duyar. Bu karmaşık yapının kullanımı için de boyutların ayarlanması sürecine boyut optimizasyonu denir. Helikopter için temel boyut optimizasyonu faktörlerini ise ağırlık azaltma, yük taşıma kapasitesi, stres ve yorulma davranışı, aerodinamik davranışı, gelen yükün dağılımı, titreşim ve gürültü kontrolü ile çarpışma senaryoları gibi etmenler oluşturur.

1.3.2 Şekil Optimizasyonu

Şekil optimizasyonu, boyut optimizasyonunda olduğu gibi sistemin malzeme kullanımını azaltırken yapının performansını iyileştirmek için boyut sınırlarının içerisinde yapı bileşenlerinin geometrisini değiştirmeye odaklanır. Optimizasyonu gerçekleştirmesi için çeşitli kısıtlamalar uygulanır. Bu kısıtlamalar helikopterler için aerodinamik performans, yüksek kaldırma kuvveti, düşük titreşim hareketi, yapısal dayanım gibi konularda olur. Bunun haricinde ürünün üretilebilirliği ve estetik olarak da uygun olması ürün satışı öncesi önemli bir kriterdir. Tüm bu koşullar ile helikopterde en çok motor kapağı geometrisi, gövde yüzeyi, pallerin geometrisi şekil optimizasyonunun en çok kullanıldığı bölgelerdir.

1.3.3 Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu, diğer optimizasyon yöntemlerinde olduğu gibi ağırlık azaltma temelli çalışan en gelişmiş optimizasyon yöntemlerinden biridir. Yüksek dayanımın sağlanması, titreşim azaltımı ve ağırlığı azaltmak için belirli bir tasarım alanı içinde optimum malzeme dağılımı belirleyen daha gelişmiş ve karmaşık bir yöntemdir.

Yöntemin kullanımında ilk olarak sınırlayıcı olan stres, hacim veya ağırlık gibi faktörler seçilerek yapının ilk yapısı oluşturulur. Bu ilk çalışmayla yapının ihtiyaç duyulan yerlerde güçlü olmasını ve daha az kritik alanlarda minimum malzemeye sahip olması sağlanmaktadır. Bu ilk tasarıma başlangıç topolojisi adı da verilir. Yapıya gelen yük çeşidi ve büyüklüğüne bağlı olarak beklentilerin değiştiği tasarımda iteratif yaklaşımlarla yüksek dayanım ve düşük deformasyon ile optimum tasarım oluşturulur. Optimum tasarım sonrası oluşan karmaşık geometriler üretilebilirlik açısından doğrulanır ve buna uygun olarak son kez tasarlanır.

1.4 Helikopter Yapısallarında Yorulma Yaklaşımı

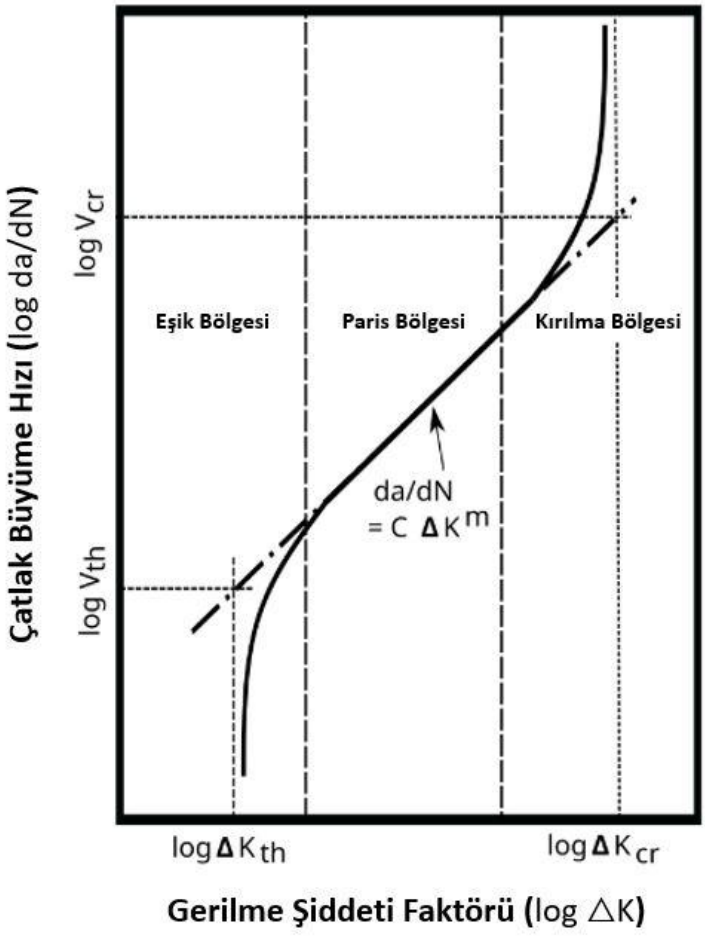
Yorulma, yapısal parçalar için malzeme nihai mukavemetinin altında tekrarlı yüklemeler altında zaman içerisinde yapısal hasar gerçekleşmesi olayı olarak tanımlanabilir. Parçaların yüksek statik yüklemler anında oluşan hatalardan farklı

olarak, yorulma yapının kademeli olarak dayanımını yitirmesine neden olur. Hava araçları çalışma ortamları gereği yüksek ve kritik yüklemler altın da çalışan araçlardır. Helikopterler ise uçaklardan farklı olarak sürekli dinamik yükler altında çalıştıkları için yorulma süresi yapısal parçaların da daha kritik bir hal almaktadır. Bu nedenler helikopter yapısal parçalarının tasarımında yapısal en kritik faktörlerden birinin yorulma olmasına neden olur. Buda birincil yapısal parçaların yorulmaya göre tasarlanması sağlamaktadır. Helikopter yapısallarının yorulma karşısında kritik bir süreç olmasının birkaç nedeni vardır. Bunların en önemlisi rotor ve transmisyon sistemlerinden gelen döngüsel gerilimler ve dinamik yüklemlerdir. Ayrıca kompleks bir yapıya sahip olan helikopterler de aynı bölgede birden fazla farklı yüklemeler aynı anda yapı üzerinde görülebilmektedir. Ayrıca titreşim ve aerodinamik yüklerde yapı üzerinde daha fazla yük oluşmasına neden olur.

Yapısal parçanın yorulma süreci, çatlak başlangıcı ve çatlak ilerlemesi olmak üzere iki ana aşamada incelenir, bu süreçlerin sonunda son olarak parçanın kırımı gerçekleşir. Bu aşamaları takip etmek ve parçaların ömrünü çıkarmak için çeşitli yorulma teorileri geliştirilmiştir. Yorulma ömürlerini öğrenmek için üç ana yaklaşım kullanılmaktadır.

1.4.1 Hasar Toleransı (Çatlak Büyümesi) Yaklaşımı

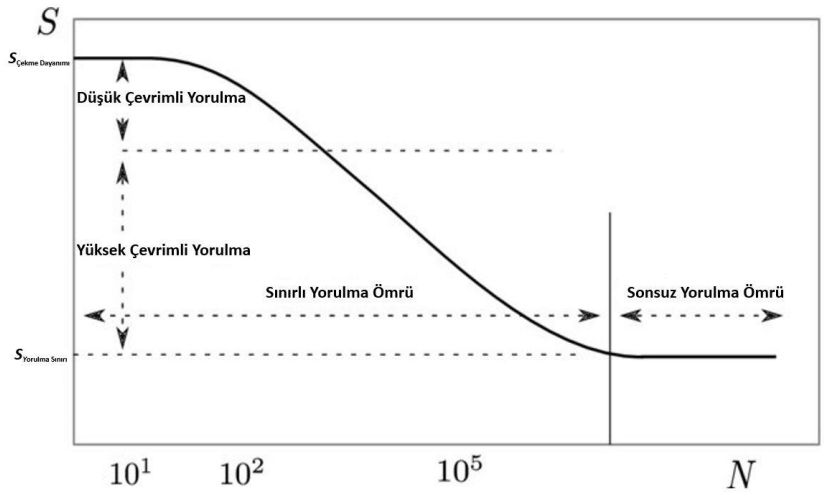
Hasara tolerans yaklaşımında yapısal parçada mevcut olan çatlak ve kusurların zaman içinde ilerlemesini inceleyerek yapının ömrünün çıkarıldığı yöntemdir. Yöntemin ilk olarak 1963 yılında Paul C. Paris tarafından geliştirilmiştir. Paris Yasası olarak da adlandırılan bu yöntemde çatlak ilerleme hızı ve gerilme yoğunluğu faktörü arasındaki bir fonksiyon olarak tanımlanır. Kırılma mekaniği ve matematiğin ilk defa bir araya bu yöntemle gelmesini sağladı. Bu yöntem sayesinde helikopterde buluna yorulmaya karşı kritik parçaların bakım periyodlarını hesaplamak için etkin olarak kullanılır. Özellikle helikopter iniş takımları ve gövde yapısal elemanlarında ömür sürelerinin çıkarılması için kullanılan en önemli yorulma yaklaşımıdır. Tüm bu avantajlarına karşın Paris Kanun belirli bi aralıktaki (Paris Bölgesi) eğriler için doğru bilgiyi veriyor olması ve çatlağın özel olarak tahribatsız muayene yöntemleri ile takip edilmesi ihtiyacı verimliliği düşürür.



Şekil 1.8 Paris kanunu örnek grafiği

1.4.2 Gerilme-Çevrim (S-N Eğrisi) Yaklaşımı

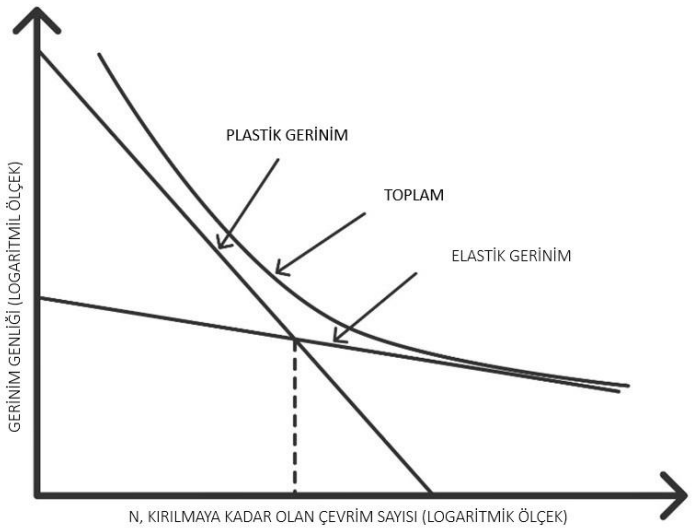
Stres-Ömür yaklaşımı ya da diğer bir adıyla S-N Eğrisi yaklaşımında malzemenin döngüsel yüklemeler altında kırılmadan önceki dayanabileceği yükleme sayısını hesaplayarak parça ömrünün çıkarıldığı bir yorulma analizi yaklaşımıdır. Yöntemde deneysel olarak uygulanan döngüsel gerilim genliği (S) ile yükleme döngüsü sayısı (N) arasındaki ilişki ile parçaların ömrünü hesaplamaya odaklanılır. Döngüsel yüklemenin olduğu bu yapılarda yüzey kalitesi yüksek, stres konsantrasyonun olmadığı yapılar için oldukça doğru sonuçlar verebilir. Helikopterlerde yüksek döngü sayılarına maruz kalan yapısal bölgelerde kullanımı oldukça fazla olup rotor palleri, transmisyon sistemi gibi yapılarda bu yaklaşım kullanılır. Düşük döngü sayılarında diğer yaklaşımların kullanılması daha doğru sonuçlar verecektir.



Şekil 1.9 Örnek bir S-N eğrisi

1.4.3 Gerilim-Ömür Yaklaşımı

Gerilim-ömür yaklaşımı ya da diğer adıyla Coffin-Manson yaklaşımı parçanın her yükleme döngüsünde plastik deformasyonun meydana geldiği, düşük sayıda döngüde yüklemeye maruz kalan yapıların yorgunluk ömrünü tahmin etmek için kullanılan bir yorulma yaklaşımıdır. Stres-ömür yaklaşımın aksine sadece elastik davranışı değil hem elastik hem de plastik gerilimleri hesaba katarak yorulma davranışlarını inceler. Yöntemde ortalama gerilim ve plastisite etkilerini hesaba kattığı için karmaşık yükleme koşullarında diğer yaklaşımlara oranla daha gerçekçi sonuçlar elde edilir. Ayrıca yöntem ile yüksek gerilim altında, düşük çevrimli yorulmalar analiz edilir.



Şekil 1.10 Örnek bir gerilme eğrisi

1.5 Tez Kapsamı

Bu tez çalışması, helikopter projelerinde yaygın olarak karşılaşılan titreşim sorunlarına karşı geliştirilen pasif titreşim sönümleyicilerden biri olan ayarlı kütle yaprak yay titreşim sönümleyici mekanizmasının optimize edilmiş bir tasarımını ve yorulma davranışını incelemektedir. Çalışmanın temel amacı, sönümleyici mekanizmasının optimum geometriye sahip olacak şekilde tasarlanması ve uzun ömürlü bir yapının elde edilmesidir. Bu doğrultuda, helikopterlerin titreşim konusunda en kritik bölgelerinden biri olan ve Lowerdeck olarak adlandırılan pilot ile yolcu bölgesinin zeminin oluşturan bölge çalışma alanı olarak belirlenmiştir.

Lowerdeck bölgesi yani birincil sistem, helikopterin alt yapısal bölümlerini içeren ve iniş takımlarına yakın konumlandırılan bölgeyi ifade eder. Bu alan, helikopterin ana tahrik frekansına doğrudan maruz kaldığı için, titreşim sönümleyici elemanların kullanımı açısından kritik bir bölge olarak kabul edilmektedir. Tez kapsamında, bu bölgeye uygun olarak tasarlanan ayarlı kütle sönümleyicisinin etkinliği ve dayanımı detaylı olarak incelenmiş, optimize edilmiş bir geometri ile uzun ömürlü bir yapı oluşturulmaya çalışılmıştır.

Tez kapsamında titreşim sönümleme prensipleri ve mekanik sistemlerdeki rolü incelenmiştir. Sönümleyicinin helikopter yapılarında kullanımı ve farklı tasarımların etkinlikleri araştırılmıştır. Birincil sistem bölgesinin yapısal özellikleri, malzeme seçimi ve mekanik yükler detaylandırılmıştır. Sönümleyici mekanizmasının bu bölgeye uygun olarak entegrasyonu ve tasarım parametreleri belirlenmiştir. Doğal frekans analizleri ile optimum titreşim sönümleme kapasitesine sahip bir tasarım elde edilmiştir. Boyut optimizasyonu, malzeme seçimi ve montaj gereksinimleri gibi faktörler değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar için sönümleyicinin dinamik davranışı ve yorulma dayanımı, sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Titreşim sönümleme kapasitesinin etkinliği ve sistem performansı değerlendirilmiştir. Son olarak sönümleyicinin uzun vadeli performansını belirlemek için yorulma analizleri ile parça ömrü hesaplanmıştır.

Bu tez, havacılık endüstrisinde titreşim sönümleme çözümlerine yönelik önemli bir araştırma ve optimizasyon sürecini kapsamaktadır. Elde edilen bulgular, sönümleyicilerin daha verimli ve uzun ömürlü tasarımlarının geliştirilmesine katkı sağlamayı amaçlamıştır.

2
TASARIM VE PARAMETRELER

2.1 Tasarım Değişkenleri ve Kısıtlamaları

Yapılan çalışmalarda kullanılacak ortam helikopterler de titreşim sönümleyicilerin en çok kullanıldığı bölgelerden olan zemin bölgesi seçilmiştir. Bu nedenle tasarımı etkileyecek en önemli etken bu bölgedeki alan kısıtlamaları olacaktır. Ayarlı kütle sönümleyicilerin çalışma prensibi olarak helikopterlerin ana tahrik frekansından kaynaklı olarak çeşitli yapısal parçalarda doğal frekansların birbirine yakın olması nedeniyle bölgesel titreşimlere neden olur, bu tasarımı belirleyecek ilk etmenin bölgedeki etkin doğal frekans olacaktır. Doğal frekansın belirlenmesinde sonrasında ise o bölgedeki yüklemeler ile sönümleyicinin ağırlığını ve geometrisini etkileyecek temel unsurlar olacaktır. Özetlemek gerekirse sönümleyici için belirleyici kısıtlamalar; alan genişliği, bağlanacağı yapının doğal frekansı ve bölgeye gelecek yüktür.

2.2 Ayarlı Kütle Sönümleyici Parçalarının Mekanik Özellikleri

Titreşim sönümleyiciler çeşitli mekanik sistemler de rezonans titreşimi azaltarak yapının stabilitesini sağlamak için kullanılırlar. Birincil sistemin frekansına uyumlu bir kütle-yay sistemi ekleyerek titreşimi minimize edilmesi amaçlanır. Bu kütle-yay sistemini oluşturan bileşenler kendi geometrileri ve malzeme seçimiyle dinamik davranışı iyileştirirler.

Ayarlı kütle sönümleyicilerin etkin sönümleme için bir şekilde yapabilmesi için çeşitli mekanik özelliklerine bağlıdır. Bunların başında malzemelerin sertliği en önemli faktördür ve sertliği rezonans frekansının ayarlanmasında temel etmendir. Diğer önemli kriterler ise malzemenin sönümleme katsayısı ve kütle oranı olarak söylenebilir. Tüm bu bilgiler ışığında ayarlı kütle sönümleyicinin 3 temel bileşeni

tasarlanır ve üretilir. Bu temel bileşenler sönümleyici, bağlayıcı ve ağırlık olarak sınıflandırılır.

2.2.1 Sönümleyici

Ayarlı kütle sönümleyicinin bir parçası olarak sönümleyiciler yani kiriş veya yay parçalar, sistemde titreşim enerjisini yutarak yapının daha sağlıklı ve kararlı çalışmasına fayda sağlayan bileşenlerdir. Uzun süre döngüsel ve dinamik yükleme altında çalışan yapının parçası olarak yorulma direnci ve dayanımı yüksek malzemelerden seçilirler. Bu malzemeler genellikle yay çeliği ve titanyum olarak havacılık sektöründe kullanılırlar. Yapı belirli bir doğal frekans değerinde çalıştığı için sönümleme kapasitesini artırmak için farklı geometriler ve konfigürasyonlarla sistemin doğal frekansına uygun hale getirilerek optimum sönümleme etkisi sağlanır.

2.2.2 Bağlayıcı

Bağlayıcı eleman, sönümleme mekanizmasının etkin çalışabilmesi için sönümleyicinin takılacağı yapıdan titreşim enerjisini verimli bir şekilde sönümleyecek olan parçaya iletmesi ve ana sistemle uyumlu hareket etmesini için yapıya doğru bir şekilde bağlanması gereklidir. Bu aktarım sırasında yapının mekanik bütünlüğünü sağlamak ve maksimum yük aktarımı için mukavemeti yüksek malzemeler ile bağlayıcılar tercih edilir. Bunun içinde yorulma dayanımı yüksek, sürtünme ve sıcaklık değişimine karşı dirençli, titreşim kaynaklı gerilim yığılmalarını minimize eden bir tasarım geometrisi dikkate alınır ve bu kriterlerde bir malzeme tercihi istenilir. Helikopter yapısallarında oluşabilecek özel durumlar dışında bağlayıcılar genellikle alüminyum alaşımdan üretilir. Özellikle 2024 T3, 2024 T42 ve 7050 T7451 serisi alüminyum alaşımlar havacılık endüstrisinde en çok kullanılan bağlayıcı malzemeleridir.

2.2.3 Ağırlık

Sönümleyici yapısının son elemanı olan ağırlık ise, yapıdaki istenilen titreşim frekanslarını sağlamak ve en verimli sönümlemeyi gerçekleştirmek için kullanılırlar. Titreşim sönümleyici dar alanlarda çalıştığı için genellikle yoğun malzemelerden tercih edilir. Ağırlığın sönümleyici parça üzerinde yerleştirileceği konum istenilen doğal frekans değerini yakalamak içi kullanılır. Ağırlık-frekans dengesini sağlamak içinde genellikle tungsten ve kurşun gibi metaller kullanılır.

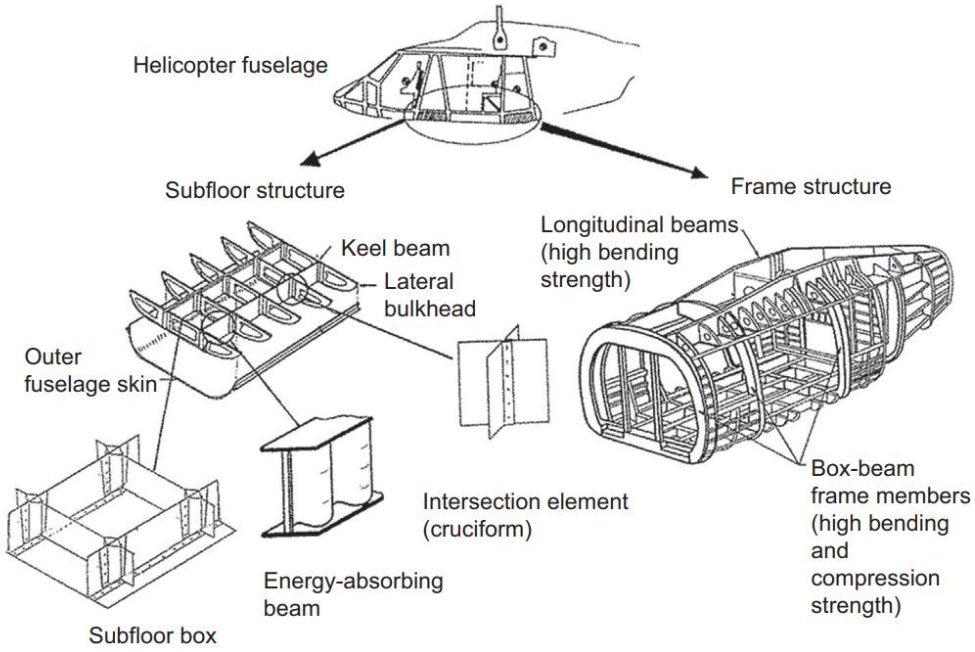
Tablo 2.1 Kullanılacak ayarlı kütle sönümleyici malzeme bilgisi

Ayarlı Kütle Sönümleyici Elemanı	**Malzeme**	**Young Modülü (E)**	**Poisson Oranı (ν)**	**Yoğunluk (ρ)**	**Akma Gerilmesi (σ_y)**
Sönümleyici	Titanyum Ti-6Al-4V	110 GPA	0.31	4425 kg/m^3	900 MPa
Bağlayıcı	Alüminyum 7050 T7451	70 GPa	0.33	2820 kg/m^3	250 MPa
Ağırlık	Tungsten	400 GPa	0.28	19250 kg/m^3	750 MPa

Yukarıda listelenen kriterler ve parça bazlı olarak aranılan nitelikler doğrultusunda çalışma için malzeme tercihi yapıldı [12]. Böylece bağlayıcı olarak alüminyum, sönümleyici için titanyum ve ağırlık olarak da tungsten tercih edilmiştir.

2.3 Konsept Tasarım

Bu bölümde ayarlı kütle sönümleyicinin bağlanacağı bölge olan birincil sistem ve sönümleyicinin kendisi için yapılan ilk konsept tasarım hazırlanmıştır. Çalışmadaki ana yapıyı oluşturan birincil sistem bölgesi, helikopterin ana yük taşıyıcı yapılarından biri olup, Frame'ler tarafından oluşturulan önemli bir yapısal bileşendir. Yapı bulunduğu bölge nedeniyle, dinamik ve aerodinamik uçuş yüklerini taşıyan, yapısal bütünlüğü sağlayan, helikopterin temel parçalarından birisidir. Helikopterin diğer yapısal bölümleriyle (Upperdeck, Kuyruk vb.) birlikte çalışarak sağlam bir yapı oluşturur. Daha önceki bölümler de yapılan değerlendirmeler ve endüstride yapılan örnek çalışmalar göz önünde bulundurarak, ayarlı kütle sönümleyicisi ve ana yapı için ilk konsept tasarım tamamlanmıştır. Birincil sistem tasarımı son haline yapılacak ilk analizler ile karar verilecek ve ana yapı oluşturulacaktır. Sönümleyici konsept tasarımı için ise çalışmanın ilerleyen aşamasında çeşitli analizler ve yapısal optimizasyon çalışmaları ile daha detaylı hale getirilecek ve nihai tasarım süre sonunda meydana gelecektir [13].

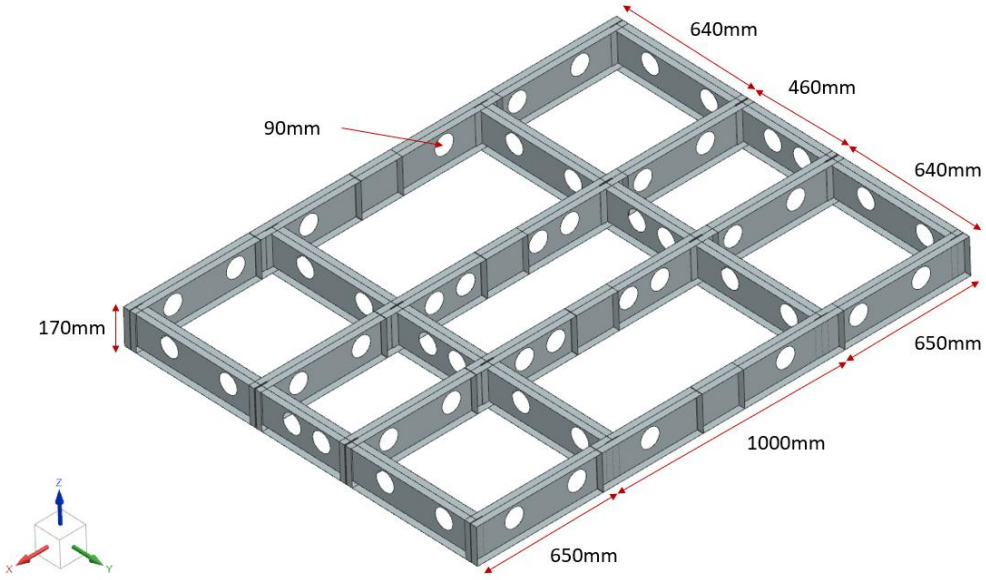


Şekil 2.1 Helikoptere ait temel yapısal parçalar

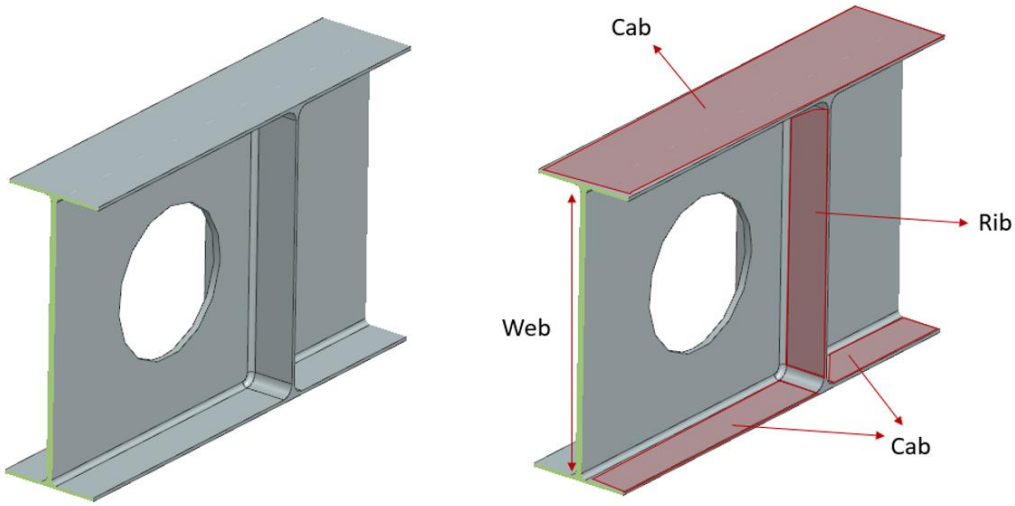
2.3.1 Ana Sistem Tasarımı

Neredeyse tüm helikopterin alt zemin bölgesini oluşturan ve Lowerdeck olarak adlandırılan bölge, yakıt tankı, aviyonik alt sistemler, kargo ve bagaj bölümleri ile iniş takımı mekanizması gibi birçok zorunlu temel sistemin yer aldığı kritik bir yapısal bölümdür. Yapı itibariyle tüm helikopter Frame adı verilen kirişlerin birbirine dik olarak yer alması ile yük taşıyıcı ana iskeletin o bölgedeki halini oluştururlar. Tasarımı oluşturan teknik isterlerle birlikte Avrupa havacılık otoritesi EASA (Avrupa Birliği Havacılık Emniyet Ajansı) gibi otoritelerde güvenli ve uçuşa elverişli bir hava aracı yapılması için yönetmelikleri ile tasarım kriterleri tamamlanır. Ana sistem bölgesi üzerinde ise en temel etmenler iniş takımların iniş kalkış yükleri, titreşim yükleri ve aerodinamik yükler olarak sıralanabilir. Bu yükler eşliğinde ise malzeme seçilir, teknik ve yönetmelik kriterleri ile ilk tasarım ortaya çıkarılır.

Bu çalışmada da endüstride yer alan helikopter ve literatür çalışmalarındaki sonuçlar göz önünde tutularak helikopterlerin temel ortak bölgelerinden olan bir birincil sistem tasarlanmıştır.



Şekil 2.2 Ayarlı kütle sönümleyicinin bağlanacağı birincil sistem tasarımı



Şekil 2.3 Frame yapısal bileşen isimlendirmesi

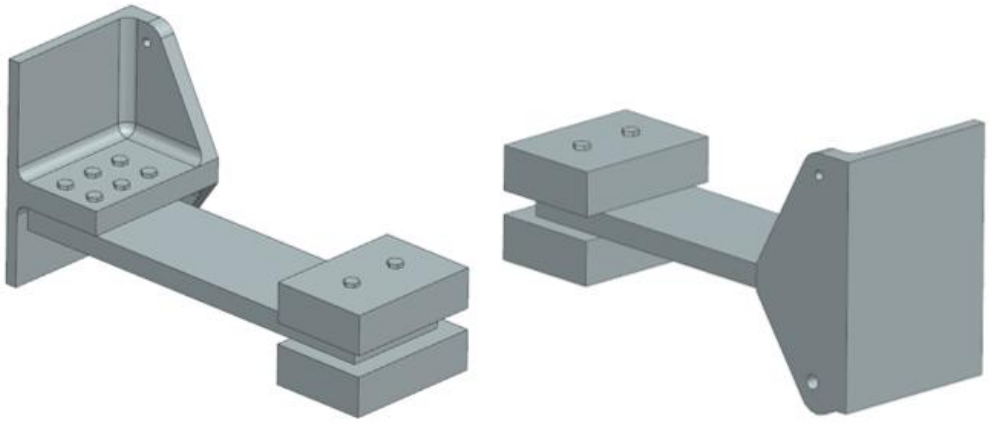
Hava araçlarında ana taşıyıcı yapılardan olan Frame'ler web, cab ve rib olarak adlandırılan bileşenlerden oluşur. Bu yapılar uçağın veya helikopterin gövde ve kanatlarında farklı yükleri taşımak için tasarlanmıştır. Bunların her biri, farklı yönlerden gelen kuvvetleri karşılamak ve yapının dayanıklılığını artırmak için kullanılır.

İlk olarak web olarak adlandırılan dik plaka şeklindeki yapısal bölüm genellikle dikdörtgen kesitli kirişlerin bir parçasıdır. Ana görevi kesme kuvvetlerini taşımaktır. Örneğin, bir kanat kirişinin *web* plakası, bölgeye gelen aerodinamik yüklerin yarattığı kesme kuvvetlerini taşır. Diğer yapısal eleman olan *cab* ise temel kullanım amacı bölgede oluşacak kaldırma kuvvetlerini ve burulma momentlerini taşımaktır. Son olarak *rib* in çalışma şekli kesme yükünü taşımak ile kirişin yükler altında geometrisini korumak, burulma ve eğilme momentlerini karşılamak olarak sınıflandırılabilir.

2.3.2 Ayarlı Kütle Sönümleyici İlk Tasarımı

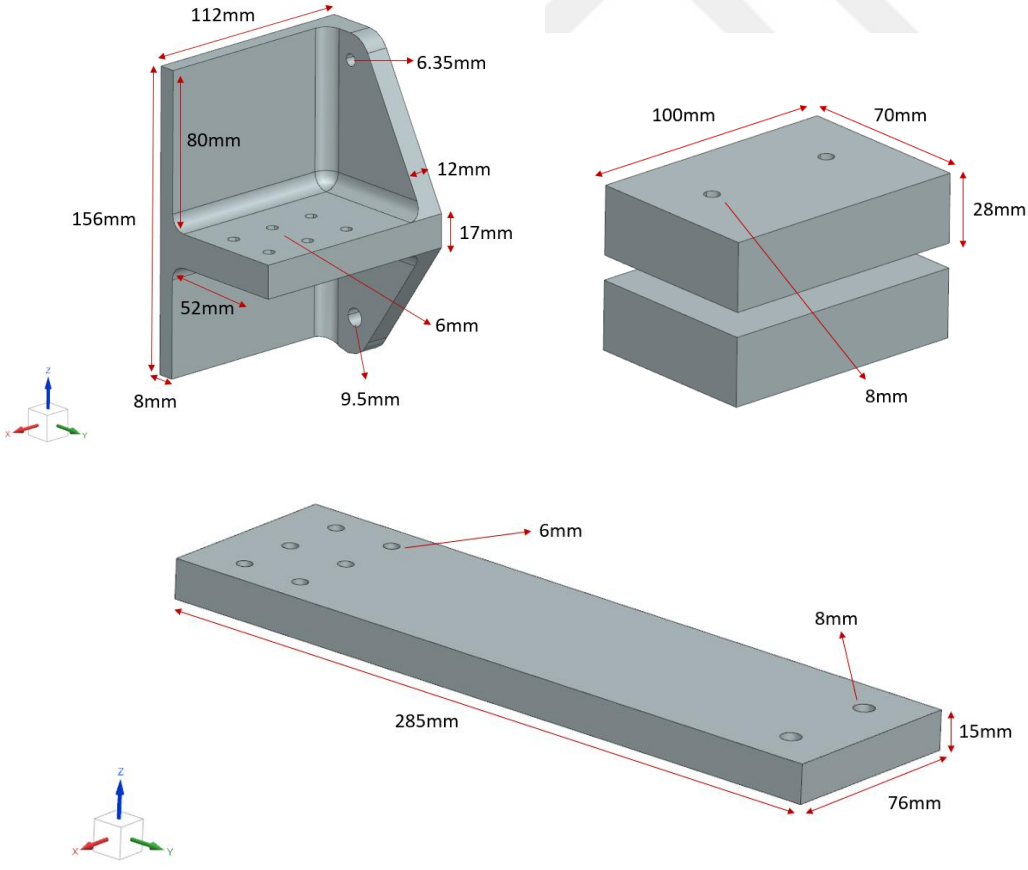
Endüstride hala aktif olarak kullanılan ve tercih edilen ayarlı kütle sönümleyiciler yapısal mühendisliğinin önemli bir ürünü olarak çeşitli kriterler ve daha önce yapılmış tasarım çalışmaları sonucunda ilk tasarımı oluşturulmuştur. Yapının öncelikli işi olarak titreşim azaltma ve yüksek dinamik yükü sönümlemeye odaklanır. Bunu kendi doğal frekansını, helikopterin uçuş koşullarıyla oluşacak rezonansı önlemek sistemin ana tahrik frekansı ile aynı frekansa getirerek yapar. Tüm bunları da havacılık standartlarına uygun olarak üretmeli ve uygulamalıdır. Ayrıca helikopterlerin montajı zor noktalarında da sönümleyiciye ihtiyacı olabileceği için parçalarının uzun ömürlü olması ve parça değişiminin kolay olması önemlidir. Düşük frekans aralıklarında çalıştıkları için frekans değişimini sağlamak için ilk tasarım üzerinde fazla değişiklik yapmadan sorunun çözülmesi sağlanmalıdır.

Çalışma da bu tasarım kriterleri ve montaj isterleri göz önüne alınarak ilk tasarım ortaya çıkarılmıştır. Bu tasarım yapının ilk halini oluşturacak olup süreç içerisinde yapılacak analizler ve optimizasyon sonucunda son halini alıp ürün ortaya çıkacaktır.



Şekil 2.4 Ayarlı kütle yaprak yay sönümleyici ilk tasarımı

Ayarlı kütle yaprak yay sönümleyiciyi oluşturan parçalar olan sönümleyici optimizasyon içerisinde son geometrisini alacak olup, bağlayıcı oluşacak yükün sönümleyiciye iletilmesini sağlayacağı için ağırlık ise bize frekans değerini yakalamak için kütlenin artırarak veya azaltarak katkı sağlayacağından tasarım değişikliğine dahil edilmeyecektir.



Şekil 2.5 Sönümleyici parçalarının ilk geometrileri

2.4 Sistem Doğal Frekansı İçin Denklem Çözümleri

Çalışmanın en önemli noktası olan ana sistem ile ayarlı kütle sönümleyicinin doğal frekansını belirlemek için temel parametreler, sistemin kütlesi (m), rijitliği (k) ve sönümleyici karakteristiği olarak sıralanabilir. Sistemlerin ayrı ayrı doğal frekansının hesaplanması için tek serbestlik dereceli sistemler de kullanılan kütle-yay sistemi ile gösterilebilir ve şu şekilde hesaplanır:

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.1}$$

Bu denklem ile sistemlerin kendi temel salınım frekansını bulunabilir. Ancak helikopterler için ile ayarlı kütle sönümleyiciler birincil bir sistemin titreşim kaynağını sönümlemek için yapıya bağlanan ikincil bir sistem olarak tanımlanabilir. Bu aslında TMD ve ana sistemin birlikte iki serbestlik dereceli bir sistem oluşturduğunu gösterir. Bu durumda sönümleyici ve ana sistemin doğal frekansı şu şekilde hesaplanır:

$$r = \frac{f_d}{f_s} \tag{2.2}$$

İlk denklemde oranın bire yaklaşması için TMD'nin doğal frekansını birincil sistemin doğal frekansına yakınlaştırmaya çalışırız. Oranı yaklaşık 1 yaptıktan sonra temel denklem ile sistemi birleştirerek:

$$f_s = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_d}{m_d}} \tag{2.3}$$

Bu denklemler, sistemler teorik olarak mükemmel olduğu için diğer etmenleri dışarıda tutarak sistemin doğruluğu kabul eder. Ancak gerçeklik de sistemler uygulamaya geçtiğinde hava direnci ve malzeme özellikleri gibi nedenlerden sönümleme faktörü devreye girer. Bu durumda çözümler şu şekilde hesaplanır:

$$f_d = f_n\sqrt{1-\zeta^2} \tag{2.4}$$

Sönümleme katsayısı her malzeme ve geometriye gelen yüke bağlı olarak değişse de havacılık endüstrisinde ve literatürde metal havacılık yapısalları için sönümleme katsayısı 0,02 olarak alınır.

3
SONLU ELEMANLAR MODELLEMESİ VE METODOLOJİ

3.1 Birincil Sistem (Lowerdeck)

Helikopterlerde yaşanılan titreşim senaryolarını en doğru şekilde simüle edebilmek için gerçek helikopter ve literatür örneklerinden yola çıkarak bir ana sistem tasarımı hazırlandı. Tasarımda gerçek helikopterlerde olduğu gibi farklı alt sistemler ve çalışma durumları göz önünde tutularak bir ana sistem ortaya çıkarıldı. Tasarımın belirleyici kriteri, tüm gerçek senaryoları düşünerek ana tahrik frekansının belirlenmesi ve bu frekanstan kaynaklanan titreşimlerin analiz edilmesidir. Sönümleyicinin bağlanacağı bu sistemde öncelikli beklenti helikopterlerde sönümleyicinin kullanılma nedeni olan bir ana tahrik frekansı belirleyip bu frekanstan kaynaklı titreşimin en fazla yer değiştirmeye neden olduğu bölgeye yerleştirilmesi olacaktır.

Helikopterin ana tahrik frekansı, ana rotor sisteminde motor tarafında sağlanan gücün paller üzerinde oluşturduğu dönme frekansıdır. Bu frekans, ana rotorun dönüş hızı, dişli oranları ve pal sayısı gibi parametrelere bağlı olarak hesaplanır. Ana rotorun dönme frekansı, rotorun dakika içerisinde bir noktadan geçme sayısı olarak şu şekilde hesaplanır:

$$f_r = \frac{RPM_r}{60} \tag{3.1}$$

Ana tahrik frekansı ise motorun gücünü rotor sistemine aktaran mekanizmanın ana bileşenidir. Bu sistemde dişli oranları önemli rol oynar. Eğer ana tahrik mili ile ana rotor mili arasında bir dişli oranı varsa ana tahrik dönüş frekansı bu oranla çarpılır. Ancak genelde helikopterlerde bu oran 1 olacak şekilde dişli oranları ayarlanır. Diğer noktada ana tahrik frekansını belirleye ise helikopterin ana rotor sistemin deki

pal sayısıdır. Her bir palin dönüşü, belirli bir periyotta bir darbe frekansı oluşturur. Gün sonunda ise ana tahrik frekansı, ana rotorun dönüş frekansı ile pal sayısının çarpımı ile bulunur:

$$f_m = \frac{RPM_r}{60} \times n \tag{3.2}$$

Bu denklem den de görüleceği gibi daha fazla pal sayısı daha yüksek ana tahrik frekansı anlamına gelir. Bu durum da daha yüksek ana tahrik frekansı, düşük frekansta büyük titreşimleri azaltarak daha stabil bir uçuş sağlayacağı değerlendirilebilir ancak herhangi bir helikopter için optimum rotor pal sayısını belirlemek için aerodinamik yükler, kaldırma kapasitesi, verimlilik, ağırlık ve titreşim gibi birçok branşın ve birden fazla faktörün bir arada değerlendirmesiyle karar verilebilir.

Pal sayısı hakkında genel bir değerlendirme yapacak olursak, pal yüzey alanı ile helikopter ağırlığının oranı, motor itme kuvveti ve pal yüzey alanı arasındaki oran pal sayısının önemli belirleyicisidir. Bu faktörler ve şu ana kadar hayata geçen helikopter projelerini göz önüne aldığımızda görev profili ve maksimum kalkış ağırlığı sınıflamasından helikopterler için optimum pal sayısına karar verilebilir.

Tablo 3.1 Helikopter sınıfları ile pal sayısı ilişkisi

Helikopter Sınıfı	**Maksimum kalkış ağırlığı (MTOW)**	**Örnek**	**Pal Sayısı**
Hafif Sınıf	< 7.000 lbs	Robinson R44, Bell 206, Airbus H125	2-3
Orta Sınıf	> 7.000 –20.000 lbs <	Sikorsky UH-60, Airbus H145, Bell 412	4-5
Ağır Sınıf	> 20.000 lbs	Boeing CH-47, Sikorsky CH-53K, Mi-26	6-8

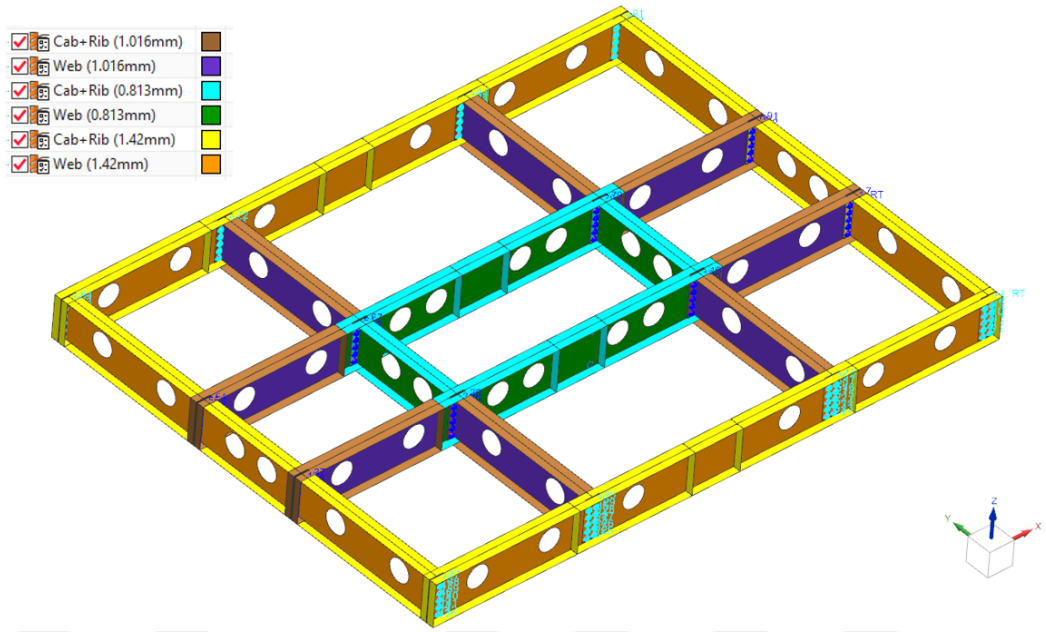
Ana tahrik frekansının pallerden sonra diğer belirleyici faktörü helikopterin türüne ve tasarımına bağlı olarak değişen ana rotorun dönüş hızıdır. Bir helikopterin ana rotor hızı (RPM) boyutuyla ters orantılıdır. Helikopterler büyüdükçe, aerodinamik verimliliği, yapısal bütünlüğü ve kaldırma performansını korumak için rotor hızları azalır. Ayrıca daha büyük rotor çapına sahip helikopterler daha düşük RPM ile çalışırlar. Yüksek hız ve manevra kabiliyeti gereken helikopterler genellikle daha yüksek rotor hızlarına sahiptir.

Tablo 3.2 Helikopterlerin genel ana rotor hızları ve bazı örnek helikopterler

Helikopter Sınıfı	**Ana Rotor Hızı (RPM)**	**Örnek**
Hafif Sınıf	400 – 600 RPM	Eagle HeliCycle (615 RPM) Robinson R22 (530 RPM) MD 500 (490 RPM)
Orta Sınıf	250 – 400 RPM	UH-60 Black Hawk (258 RPM) Bell 412 (324 RPM)
Ağır Sınıf	150 – 250 RPM	CH-47 Chinook (225 RPM) CH-53K King Stallion (185 RPM) Mi-26 (130 RPM)

Verilen teorik denklemler ve çeşitli helikopter örneklerinden de görüleceği gibi ana tahrik frekansı için helikopter sınıfları arasında genel bir aralık kabul edilebilir. Bu bilgilere ek olarak ayarlı kütle yaprak yay sönümleyicilerin genellikle orta ve ağır sınıf helikopterlerde kullanıldığı göz önünde de bulundurursak sönümleyicinin bağlanacağı ana sistemin ana tahrik frekansının 10Hz-60Hz arasında olabileceği ön görülebilir. Tabi ki bu helikopterin tasarımına bağlı olarak değişebilir olmakla birlikte kabul edilebilir seviyededir.

Bu bilgiler etrafında hedef olarak 20-40Hz aralığında bir mod yakalanmak istenmiş ve kurgudan yola çıkılarak gerçek helikopter gereksinimleri gözetilerek tasarıma geçilmiştir.



Şekil 3.1 Birincil sistem FEM modeli ve parça kalınlıkları

Yukarıdaki model de farklı kalınlıklarda frame'ler kullanılarak bir ana yapı tasarlanmıştır. Kalınlıkların seçiminde helikopterlerde frame'ler de havacılık da belirli kriterlerle kullanılan kalınlıklar dikkate alınarak 5mm boyutunda elemanlar ile bir FEM modeli hazırlanmıştır. Model çıktısında ise helikopterde ana tahrik frekansının titreşim yönü olan Z ekseninde yüksek değerli bi mod yakalanmak istenmiş ve modun 20Hz- 40Hz arasında olması hedeflenmiştir. Birincil ana sistem de malzeme olarak helikopter frame'lerin de en çok kullanılan 7050 T7451 Serisi alüminyum kullanılmıştır. İlgili FEM modeli 2021 NX Simcenter programı üzerinden hazırlanmıştır.

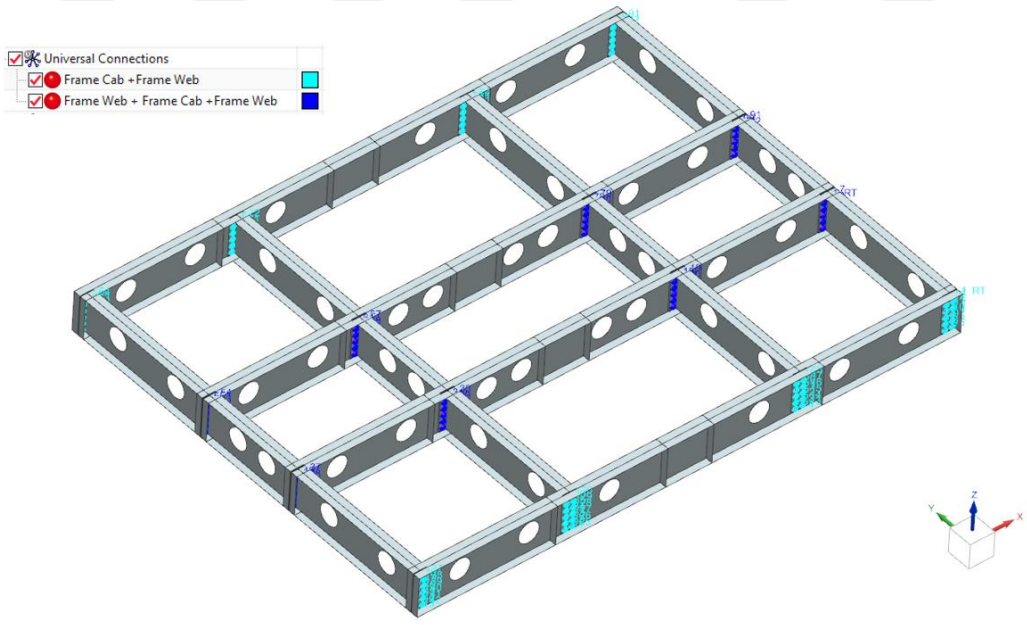
Tablo 3.3 Ana sistem malzeme bilgileri

Malzeme Özelliği	**Alüminyum 7050 T7451**
Kütle Yoğunluğu	2820 kg/m^3
Young Modülü (E)	71000 MPa
Poisson Oranı	0.33

Frame bağlantılarında ise yine helikopter yapısalları içerisinde en çok kullanılan bağlayıcılardan olan sert alaşım alüminyum perçin MS20470AD5 kullanılmıştır. Bu bağlayıcının havacılık da en çok kullanılanlardan biri olmasının nedeni fiyatına karşılık verdiği yüksek dayanım ile gereksinimleri sağlamasıdır [12].

Tablo 3.4 Bağlayıcı MS20470AD5'in özellikleri

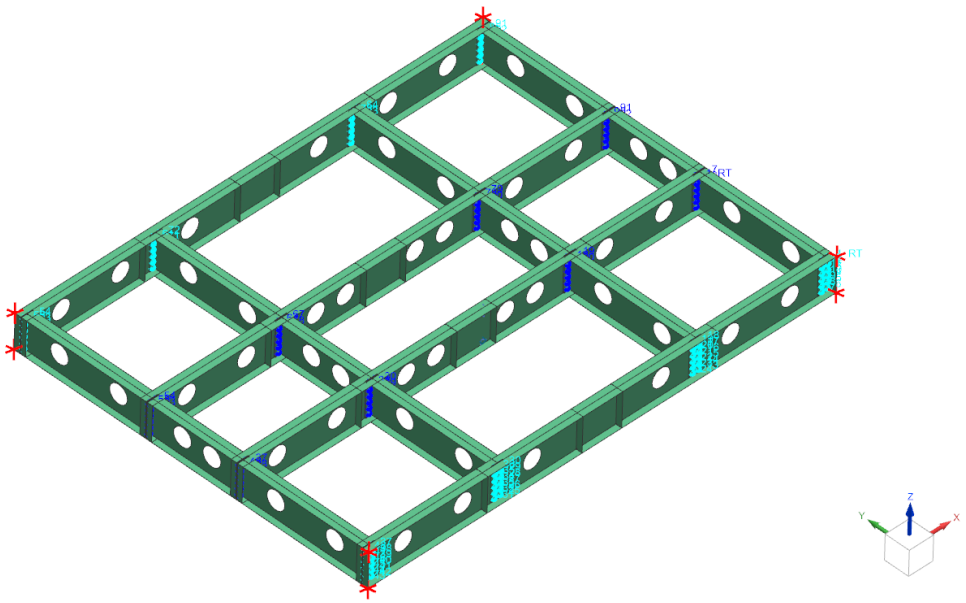
Bağlayıcı İsmi	**MS20470AD5**
Bağlayıcı Kuvveti	**2650 N**
Malzeme	**2117 T4 Alüminyum Alaşım**
Ortalama Çap	**3.97 mm**



Şekil 3.2 Bağlayıcı konumları

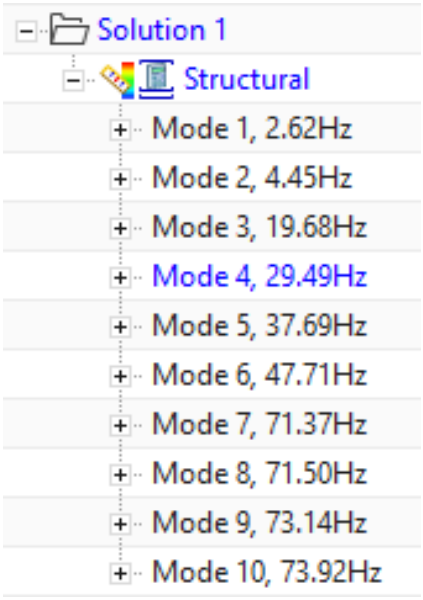
3.1.1 SOL 103 Normal Modlar ve Özdeğer Analizi

Tasarımın tamamlanmasının ardından yapının ana tahrik frekansı olan yani titreşime neden olan doğal frekans modlarını bulmak ve ilgili modlardaki hangi eksenlerde nasıl bir hareket yaptığını gözlemlemek için NX Simcenter 2021 programı üzerinden SOL 103 çözücüsü kullanılmıştır. İlk olarak program üzerinden yapının modlarını bulmak için yapıya kısıtlamalar tanımlanmıştır. Ana sistemin dört köşesinin en üst ve en alt köşe düğüm noktaları seçilerek yapı 6 serbestlik derecesinden de sabitlenerek model hazırlanmıştır. Yapının tamamının sabitlenmesinin nedeni tam gerçek bir helikopter modelinde de zemin yapısallarının köşeleri sürekliliğini bitirip farklı yönlerde yapı devam ettiği için bu şekilde kısıtlamalar verilmiştir.



Şekil 3.3 SOL103 ve kısıtlamalar (kırmızı düğüm noktaları)

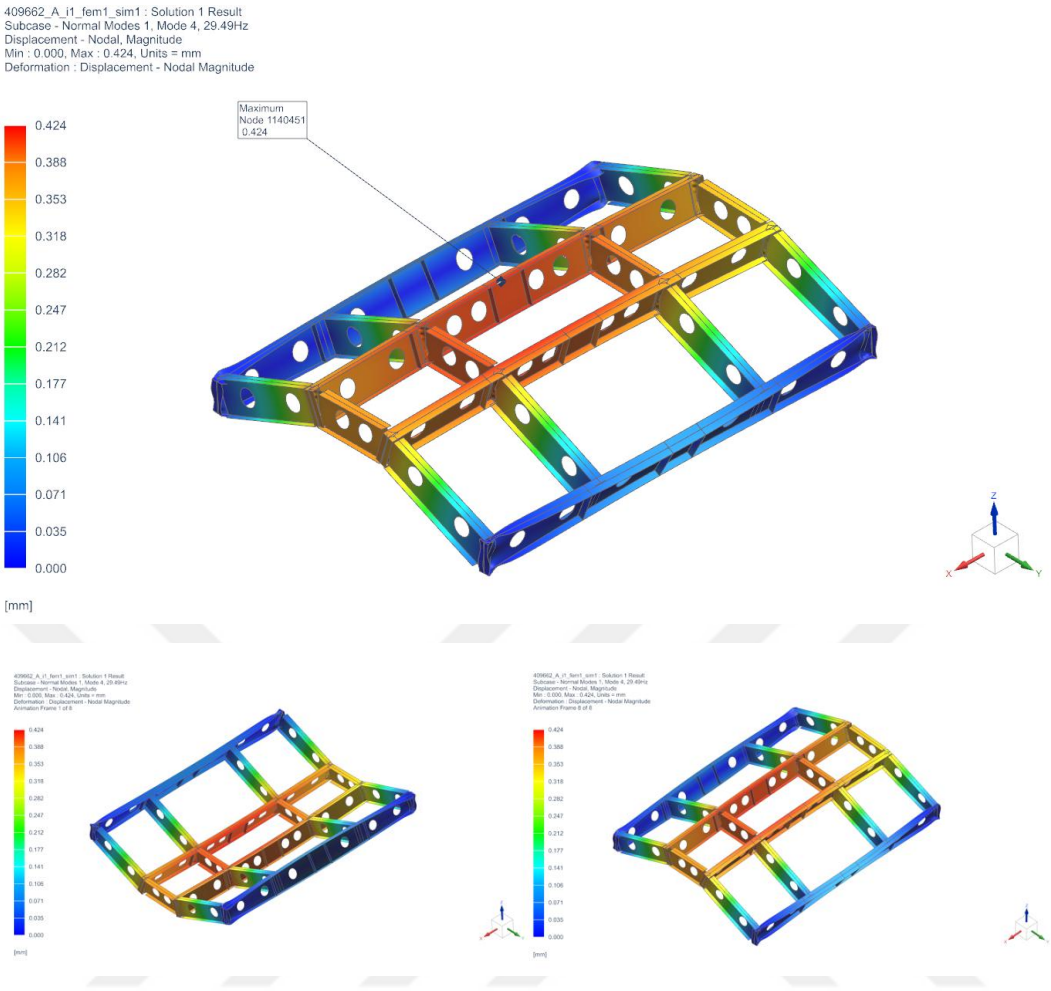
Bu kısıtlamalar sonrasında ise herhangi bir ek kısıtlama veya yük tanımlamadan yapının doğal frekanslarını bulmak için SOL103 Özdeğer Analiz çözücüsü ile model çözdürülmüş ve yapının ilk 10 doğal frekans modu listelenmiştir. Listelenen doğal frekans modlarında hangi hareketleri yaptığı incelenip, yapının Z yönünde baskın olan hareketi seçilmiş ve sönümleyicinin konuşlanacağı uygun bölge seçimi yapılmıştır.



Şekil 3.4 Birincil sistemin modları

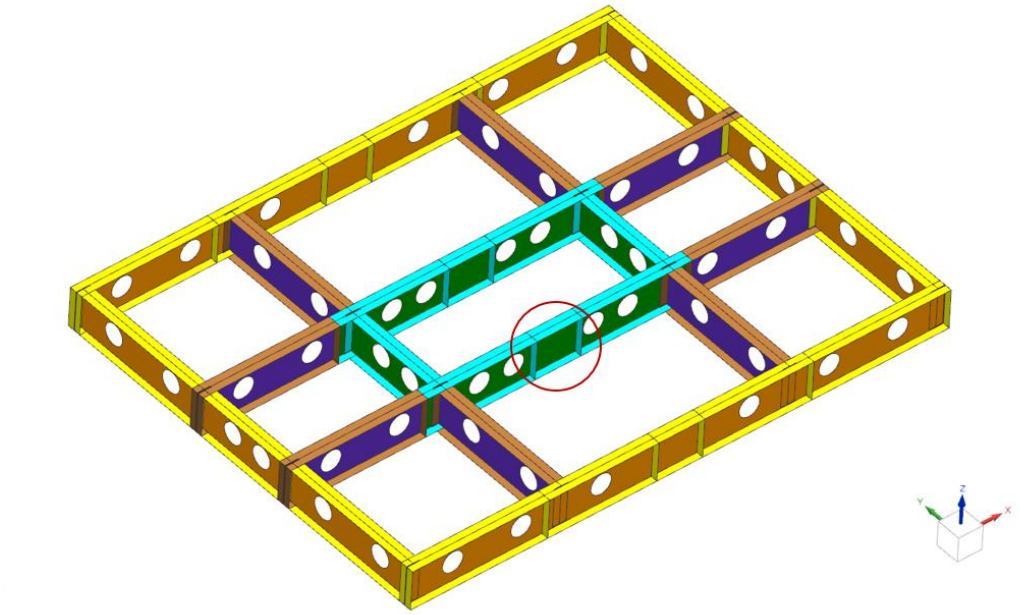
SOL103 çözümü sonrası elde ettiğimiz ilk 6 doğal frekans modu sırasıyla 2.62Hz, 4.45Hz, 19.68Hz, 29.49 Hz, 37.69Hz ve 47.71Hz olarak elde edildi. 7. ve sonrasında oluşan modlar yapının birbirini tekrar eden modları olduğu ve etkinliği sadece yapı üzerinde lokal kaldığı için dikkate alınmamıştır. Bu noktadan sonra her bir modun hareketi incelenip titreşim yönü olan Z ekseninde titreşimi sönümleyebilecek modun seçimi yapılmıştır.

Doğal frekans modlarının hareketi incelendiğinde ana tahrik frekansı kaynaklı olarak yapının doğal frekansı ile çakışarak global eksende +Z ve -Z yönünde yapılan salınım hareketinin 4. Modda olduğu ve hareketin titreşim enerjisini sönümlemek için yaprak yay sönümleyicinin kullanımının doğru olacağı gözlemlendi.

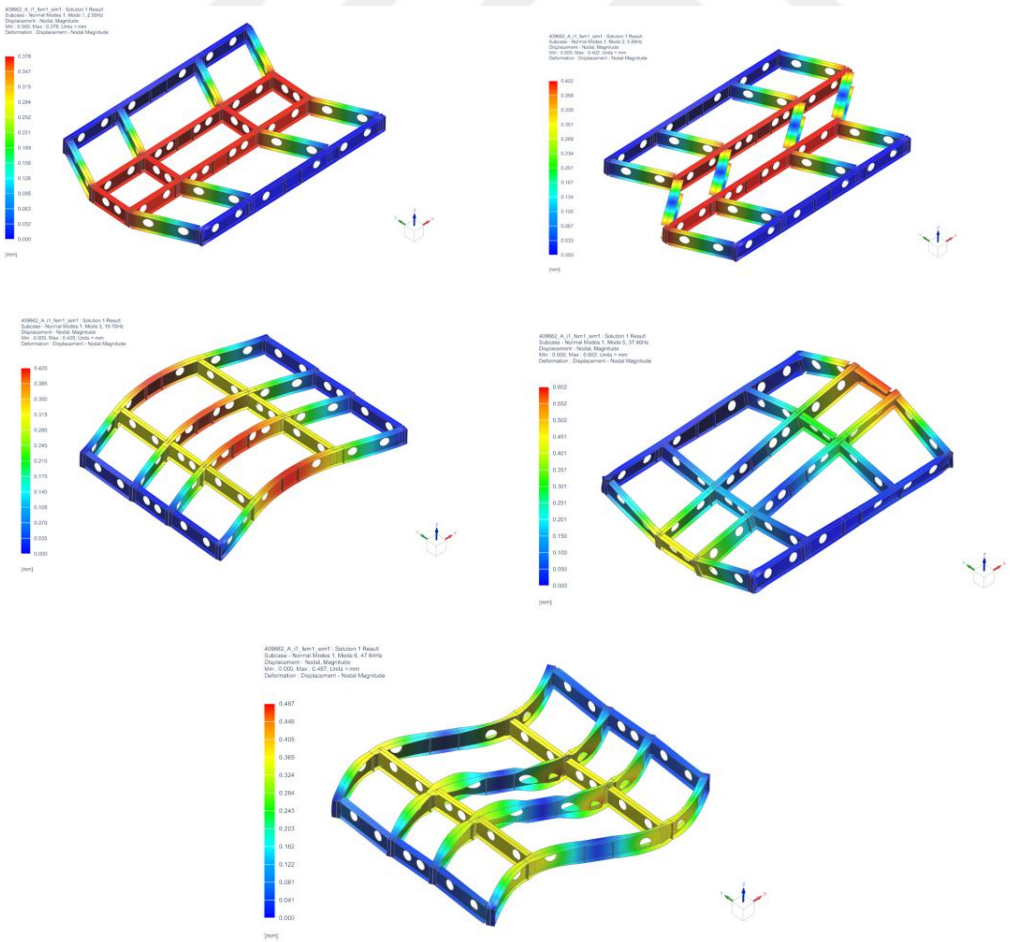


Şekil 3.5 Birincil sistemin 4. moduna ait hareket

Hareket incelendikten sonra yaprak yay sönümleyicinin bağlanması için yapıda hareketin hangi alanda gözlemlendiği değerlendirilmelidir. Şekil 3.19'de de görüleceği gibi hareket zemin yapısallarının tüm orta alanında bir titreşime neden olmaktadır ve bu yapıya tasarım sırasında verilen kalınlıklar sonrasında beklenen bir durumdur. Bu durum göz önüne alındığında yapının tamamının sönümlenebilmesi için sönümleyici hareketin tam ortasında bir noktada konumlanması en doğru seçim olarak seçilmiştir.



Şekil 3.6 Birincil sistem için uygun sönümleyici konumu



Şekil 3.7 Birincil sistemin diğer diğer doğal frekans mod hareketleri

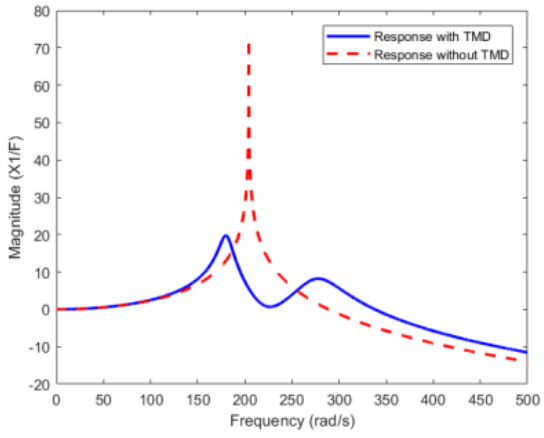
Yukarıda çıktılardan sonra sistemin ana tahrik frekansı olarak yapının 4. modda görülen doğal frekans modunun olduğu anlaşılmıştır. Bunun üzerine ana sistemin sönümleyici için seçilen konumların doğruluğu ve yapının modlarının doğruluğu için 2017 MSC Patran yazılımı üzerinden frekans tepki fonksiyonu üzerinden sonucun doğrulanması için model FRF analizi ile kontrol edilecektir.

3.1.2 Frekans Tepki Fonksiyonu (FRF)

Frekans Tepki Fonksiyonu (FRF), bir sistemin ya da yapının maruz kaldığı sistemin harmonik bir girdiye yani bir yüke karşın verdiği dinamik tepkinin frekans bazında analiz edilmesini sağlayan matematiksel bir fonksiyon ve analiz yöntemidir. Özellikle de mekanik sistemlerde, titreşim analizi ve dinamik sistemlerin karakterizasyonu için kullanılır. Helikopterlerde yaprak yay sönümleyiciler de titreşimleri azaltmak amacıyla kullanıldıkları için bağlanacağı yapının frekans tepki fonksiyonu sistem tasarımı ve optimizasyonu için kritik bir parametredir. FRF, sistemin girişine uygulanan kuvvet, ivme ile buna karşılık verilen çıkış deplasmanı, hız veya ivme arasındaki oran olarak şu şekilde gösterimi yapılır:

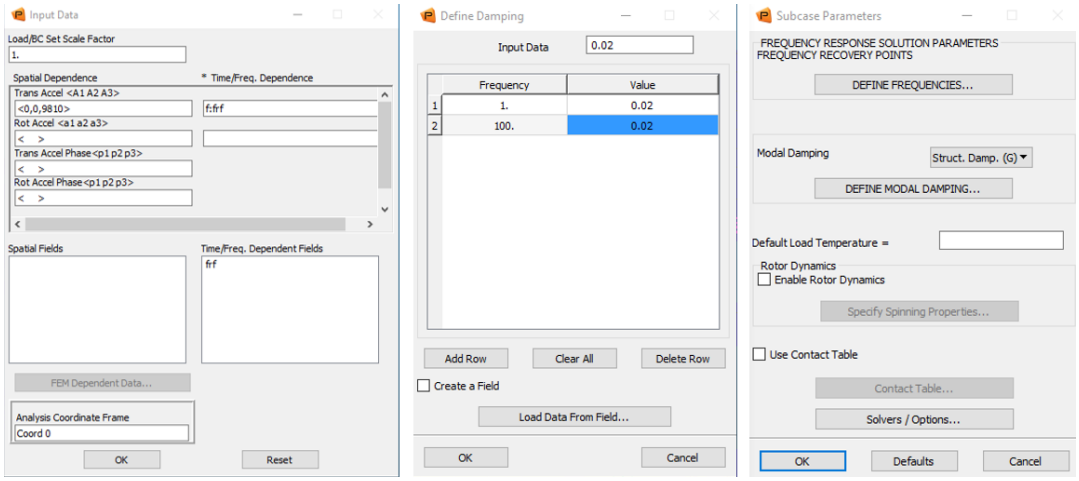
$$H(\omega) = \frac{Çıktı\ Yanıtı}{Giriş\ Uyarımı} \tag{3.3}$$

FRF grafiklerinde genellikle büyüklük, genlik, faz bilgisi ve frekans eğrileri ile gösterilir. Gösterimde rezonans frekansında büyük bir tepe noktası görülür. Bu noktadaki frekans için sönümleme oranı arttıkça, tepe noktası azalır, sistemin titreşim genliği düşer [14].



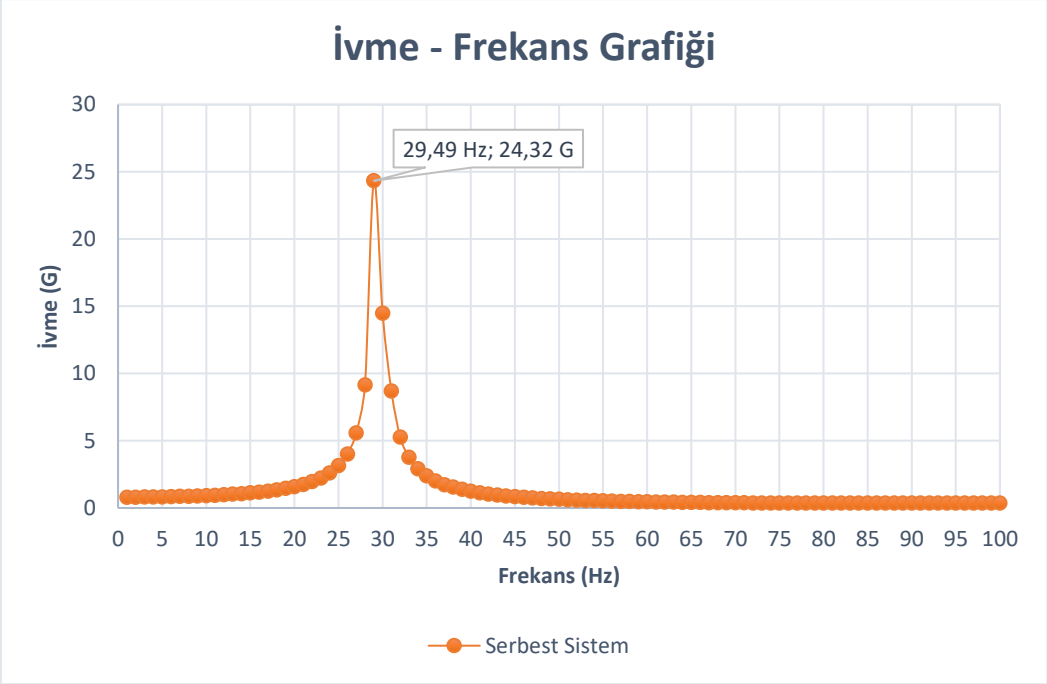
Şekil 3.8 Serbest ve sönümleyici olan durumlar için örnek FRF grafiği

Daha önce 2021 NX Simcenter üzerinde yaptığımız modeli ve SOL103 çıktılarını alarak 2017 Patran'a model aktarılmıştır. Daha önce NX Simcenter da hazırlanan model ile kısıtlamaları korunarak devam edilmiş, SOL103'ten farklı olarak FRF'nun bir şartı için uyarıcı girdi olarak kısıtlama verilen düğüm noktaları üzerinde 0.8G kuvvet ile yük verilmiştir. Burada verilen yük temsili bir yük olup, yükün değişikliği sadece çalışma sonrası elde edilecek ivme-frekans grafiği üzerinde büyüklüğünü etkileyecek olup frekansın doğruluğuna bir etkisi olmamaktadır.



Şekil 3.9 FRF çözümü girdileri

Hazırlanan model ile daha önce konsept olarak sönümleyicinin konumlanabileceği alanlar üzerinden bir düğüm noktası seçilerek o bölge için alınan veriler sonrası aşağıdaki grafik oluşmuştur.

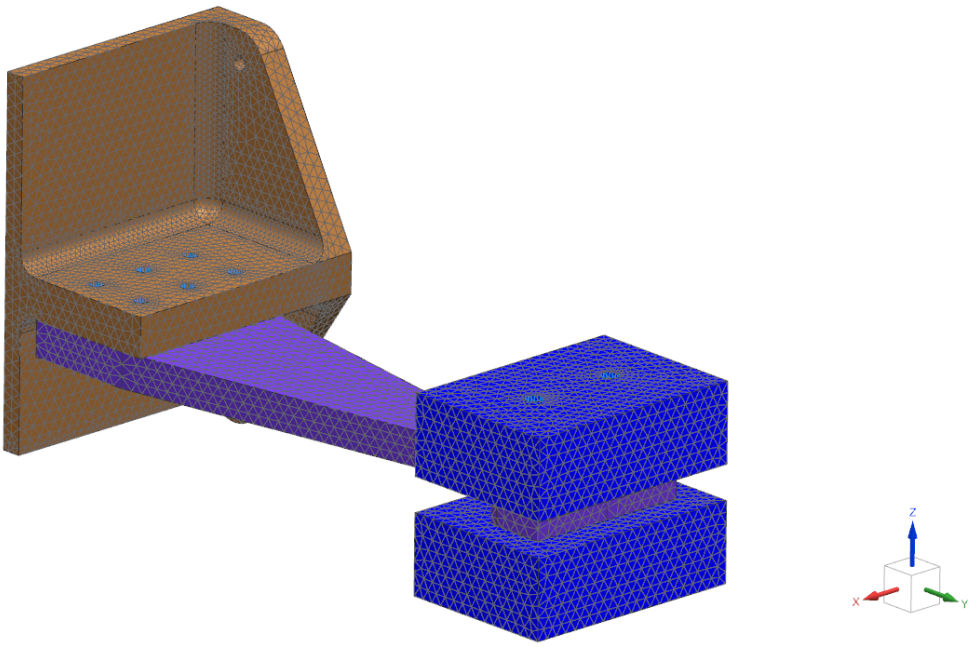


Şekil 3.10 Frekans-İvme Grafiği

Sonuç grafiği SOL103'te aldığımız doğal frekans moduyla aynı çıkarak çalışmanın tutarlı olduğunu göstermiş oldu. Ayrıca seçilen lokasyondaki ivmenin 1G girdiye karşın yaklaşık 24.5G'lik çıktıyla da seçilen lokasyonun uygun olduğunu gösterdi.

3.2 Yaprak Yay Sönümleyici FEM Modeli

Yaprak yay sönümleyiciler, helikopter gibi hava araçlarında titreşim azaltma amacıyla kullanılan dinamik sönümleme sistemleridir. Yapısal optimizasyona geçmeden önce, konsept tasarım aşamasında dikkate alınması gereken bazı temel prensipler ve tasarım kriterleri bulunmaktadır.

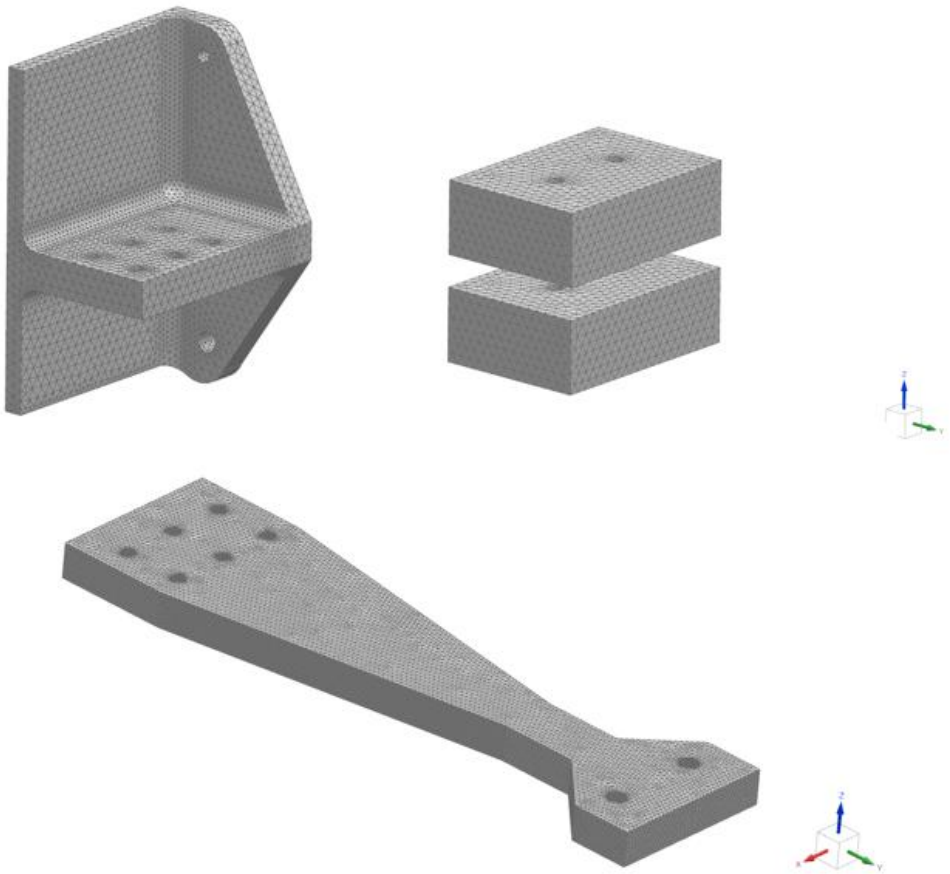


Şekil 3.11 Yaprak yay sönümleyici FEM modeli

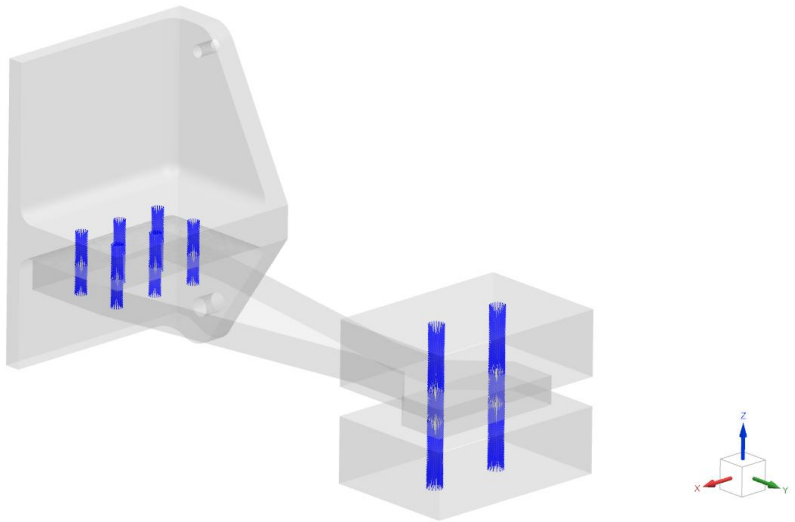
Konsept aşamasında yaprak yay sönümleyicinin dinamik performansı, üretilebilirliği ve montaj edilebilirliği gibi bir dizi kritik faktör vardır. Öncelikle yapının minimum ağırlıkla maksimum sönümleme sağlanması hedeflenir malzeme ve geometri buna göre şekillenir. Konum olarak da maksimum titreşim enerjisini sönümlemesi için en yüksek yer değiştirmeye yakın bir bölge belirlenmeli ve bu konum özelinde en uygun montaj için tasarım hazırlanmalıdır.

Bu bakış açısıyla sönümleyicinin bağlanacağı alan çeşitli alt sistemler ve aviyonik sistemlerin geçtiği ayrıca kablaj miktarının fazla olduğu yer olan zemin yapısallarından oluşan bölgedir. Bu nedenle alandan maksimum kazanç sağlamak için yaprak yay sönümleyicinin frame'e paralel bağlanması en uygun tasarım olacaktı. Ayrıca yapının helikoptere montajı ve sonrasında yapının bakımının kolay uygulanabilir olması için sönümleyici ve bağlayıcı arasındaki perçinlerin helikopter içerisinden yapılacak olan +Z yönünde olacak şekilde tasarlanmıştır.

İlgili FEM modelinde parçaların eleman tipi olarak 5mm boyutunda CTETRA (10) elemanlar kullanılmıştır. Sönümleyici tasarımı tamamlandıktan sonra ise sönümleyici 2mm boyutunda CHEXA (20) eleman ile modellenmiştir. Bağlayıcılar ise delik çevresi noktalar RBE2 ile tek noktada örülmüş, bu noktalar ise CBUSH ile birbirine bağlanmıştır.



Şekil 3.12 Yaprak yay sönümleyiciye ait parçaların FEM modeli



Şekil 3.13 Ayarlı kütle sönümleyici FEM bağlayıcı modeli

4
AYARLANMIŞ KÜTLE SÖNÜMLEYİCİ SİSTEM TASARIMI

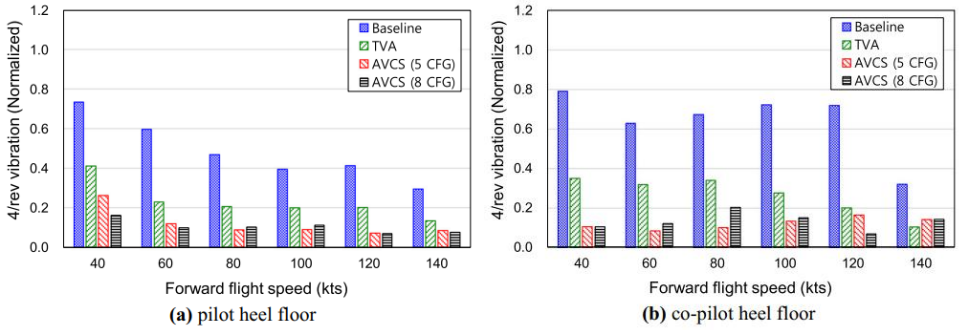
4.1 Yük ve Sınır Koşulları

Her helikopter sistemi ne kadar belirli kriterler çevresinde tasarlansa da kullanım amacı, kullanım sınıfı, kullanım alanları gibi hizmet ettiği alanlar açısından ayrışırlar. Tasarım aşaması öncesi hizmet edecekleri alanda nasıl bir profil de çalışacağına dair kullanım spektrumu adında bir çalışma yapılır. Bu çalışma aslında helikopterin kullanım ömrü süresince hangi manevraları ne sıklıkla yapacağına dair bir ön çalışma maiyetindedir. Böylece helikopterin hangi yükü ne sıklıkla hangi miktarda alacağı müşteri isterine göre tasarım öncesinden belli olur ve tasarım buna göre şekillenir. Ayrıca helikopterin aviyonik sistemleri başta olmak üzere havalandırma sistemleri, hidrolik sistemler ve iniş sistemleri gibi sistemlerde helikopterin uçuşu sırasında yapı üzerinde çeşitli yüklemeler oluşturur. Bunun gibi nedenlerle helikopterler için belirli bir noktasına gelen yükün genel olarak bir yaklaşımla bulunması oldukça zordur. Sönümleyici gibi sistemlerin konulması gereken noktaların belirlenmesinde mutlaka uçuş verilerine ihtiyaç duyulur.

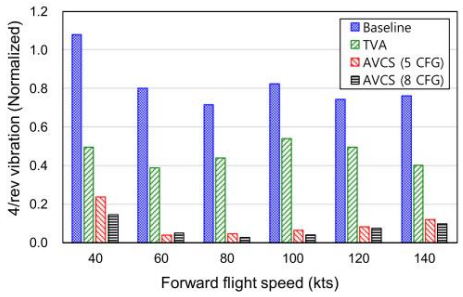
Uçuş verileri ise helikopter projelerinin ilk üretilen prototiplerinin uçuş testleri ile elde edilemeye başlanır. Veriler helikopterde olabildikçe çok noktada veri toplamak için farklı noktalara yerleştirilen ivme ölçerler sayesinde toplanılır. Ancak tüm bu süreçler şirketlerin gizlilik altında yürüttüğü süreçlerdir, bu nedenle spesifik gerçek uçuş verileri bulmak açık kaynaklar için oldukça zordur.

Bu çalışmamızda da kullanılacak yükler ise daha önce Haziran 2013 ve Ocak 2014 tarihleri arasında Kore genel maksat helikopteri projesinde kullanılacak olan aktif ve pasif titreşim sönümleyiciler için yapılan uçuş test datalarından elde edilmiştir. Daha önce seçtiğimiz ana tahrik frekansı ve ana sistem tasarımı Kore genel maksat

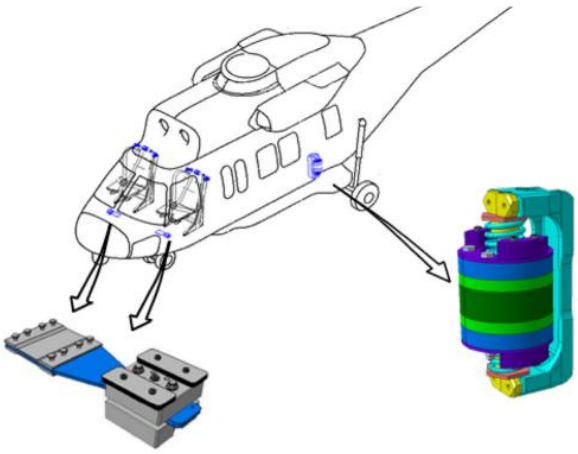
helikopteri ile paralel bir tasarım da ilerlemesi itibariyle uygulanabilir olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca Kore helikopterinin elde edilen ivme datalarında çalışmamızdaki model de olduğu pilot ve yolcu bölümü birincil sistemin de ki verilerin verilmiş olması çalışma için uçuş test datalarının uygunluğunu göstermektedir.



Şekil 4.1 Kore Helikopteri Pilot ve co-Pilot zemin bölgesi için Z ekseni titreşim verileri



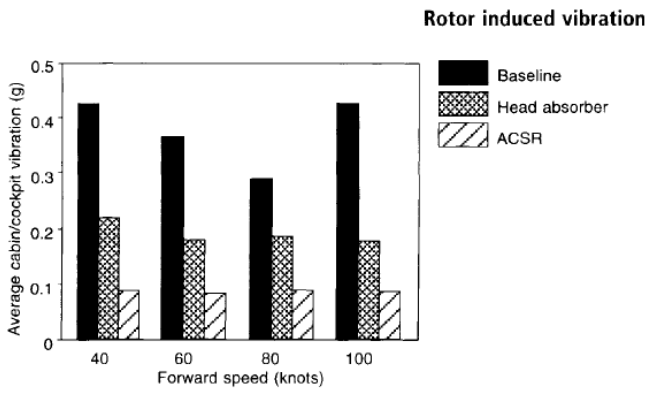
Şekil 4.2 Kore Helikopteri kabin arka zemin bölgesi için Z ekseni titreşim verileri



Şekil 4.3 Kore Helikopteri Ayarlanabilir titreşim sönümleyici konumları

Bu bilgiler ile model üzerinde kullanılacak yükleme belirlenmiş oldu. Aslında helikopter de ait yüklemeler sürekli olarak aynı yük ile devam etmez. Helikopterin manevraları ile bölgesel yüklenmeler sürekli olarak değişiklik gösterir. Ancak helikopterin kullanım spektrumu kullanım amacıyla değişeceği için tüm manevralar içerisinde en yüksek yükün geldiği senaryoyla tasarım şekillenecek ve bu yöntemle parça ömürleri çıkarılacaktır.

Açık kaynaklarda yer alan bir diğer uçuş verisi ise Westland 30 helikopterine ait bir kaynaktır [15]. Bu kaynak da benzer helikopterler benzer titreşim verilerinin oluşacağını göstermektedir. Her helikopter farklı alt sistem, yapısal malzemelerden oluşsa dahi benzer titreşim verilerinin oluşması beklenen bir durumdur.



Şekil 4.4 Westland 30 Helikopterine ait uçuş test verileri

Böylece Kore helikopterinde ana sistem tasarımımıza en uygun bölge olan pilot bölgesindeki en yüksek kuvvet olan 0.8G yapıya uygulanacak yük olarak tercih edilmiştir.

Tablo 4.1 Modelde uygulanacak yük bilgileri

Yükleme	**0.8 G**	**7.845m/s^2**

Sonrasında ise sisteme verilecek sınır koşullarına karar verilmiştir. Yaprak yay sönümleyicinin birincil sistem bölgesinde frame web'ine paralel olarak konumlanması daha önceki analizler ile karar verilmişti. Bu senaryoda sönümleyicinin hangi hareketleri yapabileceği değerlendirilmiş ve tüm sınır

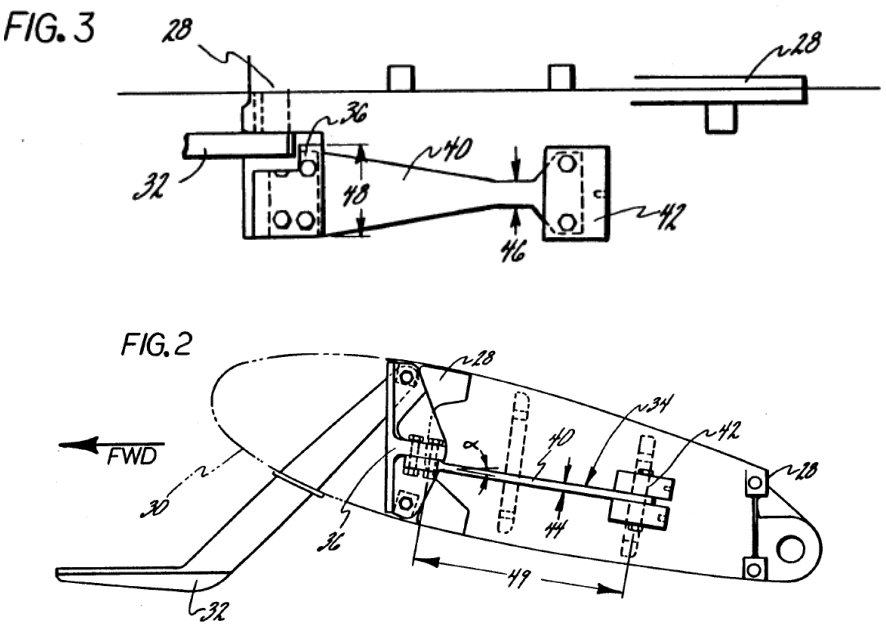
koşullarından sabit tutularak analizin gerçekleşmesinin daha doğru bir simülasyon olacağı anlaşılmıştır. Bu kararda sönümleyicinin frame web'ine bağlı olduğu ve tüm eksenlerde hareketinin kısıtlandığı ayrıca dönme hareketi için bağlantının buna izin vermediğinin belirlenmesiyle bu seçim tercih edilmiştir.

Tablo 4.2 Analiz edilecek modelin sınır koşulları

X Öteleme	Y Öteleme	Z Öteleme	X Dönme	Y Dönme	Z Dönme
0	0	0	0	0	0

4.2 Başlangıç Tasarımlarının Oluşturulması

Ayarlanmış kütle sönümleyicileri tasarlarken dikkat edilmesi gereken temel mühendislik kriterleri mevcuttur. Özellikle helikopter gibi hava aracında kullanılacak olması tasarımın çok farklı etmenler doğrultusunda şekillenmesini sağlamaktadır [16].



Şekil 4.5 ABD Patent Enstitüsü'nden alınan ayarlı yay kütleli titreşim sönümleyici patenti

Öncelikle genel tasarım kriterlerine değinmek gerekirse temel amacı olan titreşim sönümlemesi için birincil yapının titreşim frekansına en yakın şekilde titreşim sağlayacak bir frekansa sahip olmalıdır. Havacılık uygulamalarının neredeyse tüm noktalarında kütle önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle maksimum verimi sağlamak için en düşük kütlede maksimum dayanım sağlayacak malzemeler tercih edilir. Bu çalışmada da bu yüzden sönümleyici malzemesi olarak titanyum tercih edilmiştir. Ayrıca helikopterin alt sistemleri, aviyonik sistemleri ve hidrolik hatları gibi elemanlar nedeniyle sönümleyici genellikle dar alanlara monte edilir. Bu nedenle sınırlı alanda etkili çalışabilecek bir tasarım oluşturulmalıdır. Bu nedenle bağlantı noktaları yük aktarımını verimli sağlayacak ve titreşimleri etkin şekilde sönümleyecek şekilde seçilmesi gerekmektedir.

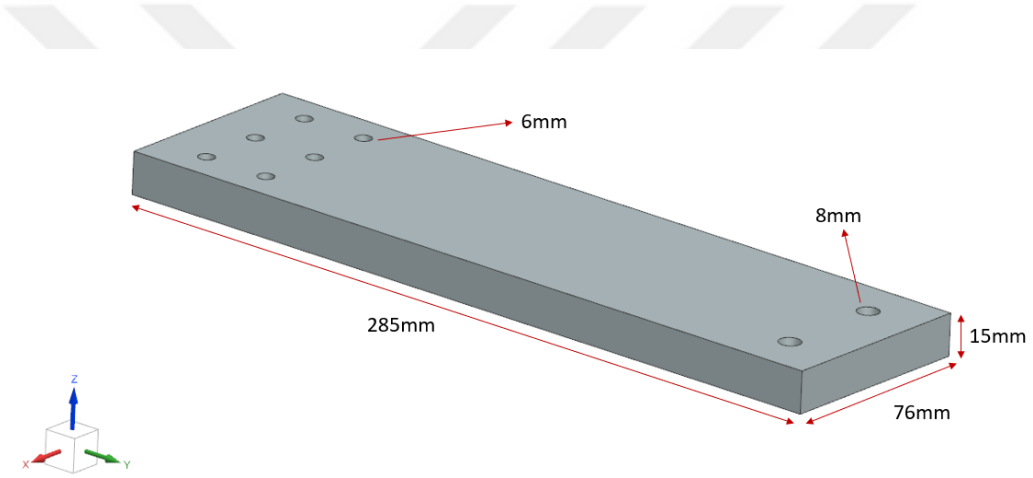
Tüm malzeme kriterlerine değinmek gerekirse optimum çözüm için sönümleme kaybı düşük, elastik kabiliyetiyle dinamik hareketleri tekrarlayabilecek, yüksek yorulma dayanımı: gösteren, korozyona karşı dayanıklı olması en önemli kriterlerdendir. Ayrıca yayların uygun rijitlikte olması gereklidir. Çok sert yaylar yeterli sönümleme sağlamaz, çok yumuşak yaylar ise fazla deformasyon göstererek kırılabilir

Bunlara istinaden geometride önemli faktörler tasarımı şekillendirir. Sönümleyici kirişin kalınlığı ve uzunluğu, sistemin doğal frekansına uygun olacak şekilde hesaplanmalıdır. İnce yaylar daha az kütle barındırdığı için düşük frekanslarda, kalın yaylar ise daha fazla kütle barındırdığı için yüksek frekanslarda çalışır. Geometrideki belki de en önemli unsur bağlayıcı ve ağırlığın bağlanacağı delikler olacaktır. Deliklerin çapı, gerilim yığılmalarını en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır. Ayrıca tüm bunların uygun montaj şartlarına göre tasarlanması zorunlu bir ihtiyaçtır.

Diğer bir önemli konuda parçaların üretilebilirliği konusudur. Şu an için güncel çalışmalar ve endüstri faaliyetlerinde kiriş sönümleyici üretimi için soğuk veya sıcak haddeleme, su jeti kesimi veya lazer kesim gibi yöntemler tercih edilebilir. Üretim toleransları sıkı olmalıdır, çünkü küçük sapmalar bile titreşim sönümleme performansını etkileyebilir. Tüm bunlara ek olarak sönümleyicilerin bakım ve değişim kolaylığı sağlayacak şekilde tasarlanma ihtiyacıdır. Özetle tüm bu isterler göz önünde bulundurularak farklı tasarım çalışmaları geliştirilmiş ve en uygun çözüm için değerlendirmeler yapılmıştır.

4.2.1 İlk Tasarım Kesitinin Belirlenmesi

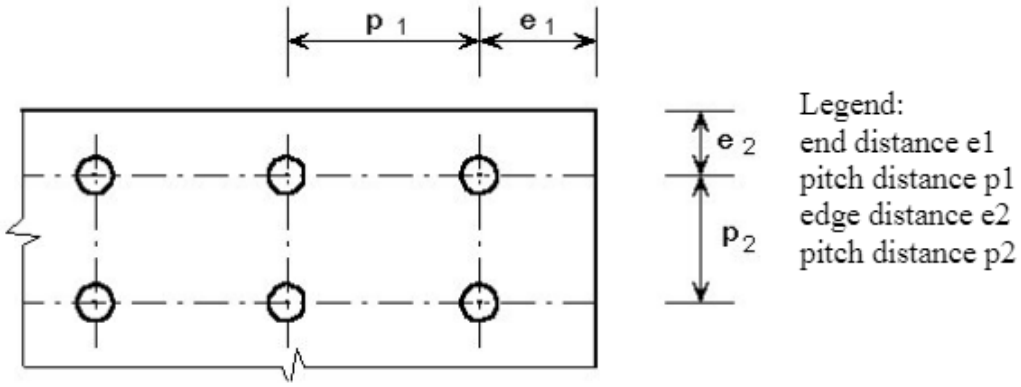
Konu özelinde daha önce endüstride yapılan çalışmalar ve literatürde yer alan örnekler üzerinden sönümleyici için çeşitli tasarımlar oluşturuldu. İlk olarak hazırlanan ilk tasarım geliştirildi. Bu tasarım basit bir çubuk olarak yapıya eklenmişti ve son tasarım öncesinde temel şekli oluşturması amaçlanmıştı. İkinci tasarım ise daha önce helikopterlerde kullanılan ve çeşitli patentler ile tasarımı alınmış olan daralan kesitli yapı değerlendirildi. Son olarak ise ikinci tasarımdan farklı olarak daha keskin daralmanın olduğu bir tasarım oluşturulmuştur. Bu üç tasarımla oluşturulabilecek tüm kestiler değerlendirilmiş ve en optimum tasarım başlangıç tasarımını oluşturmak için seçilmiştir.



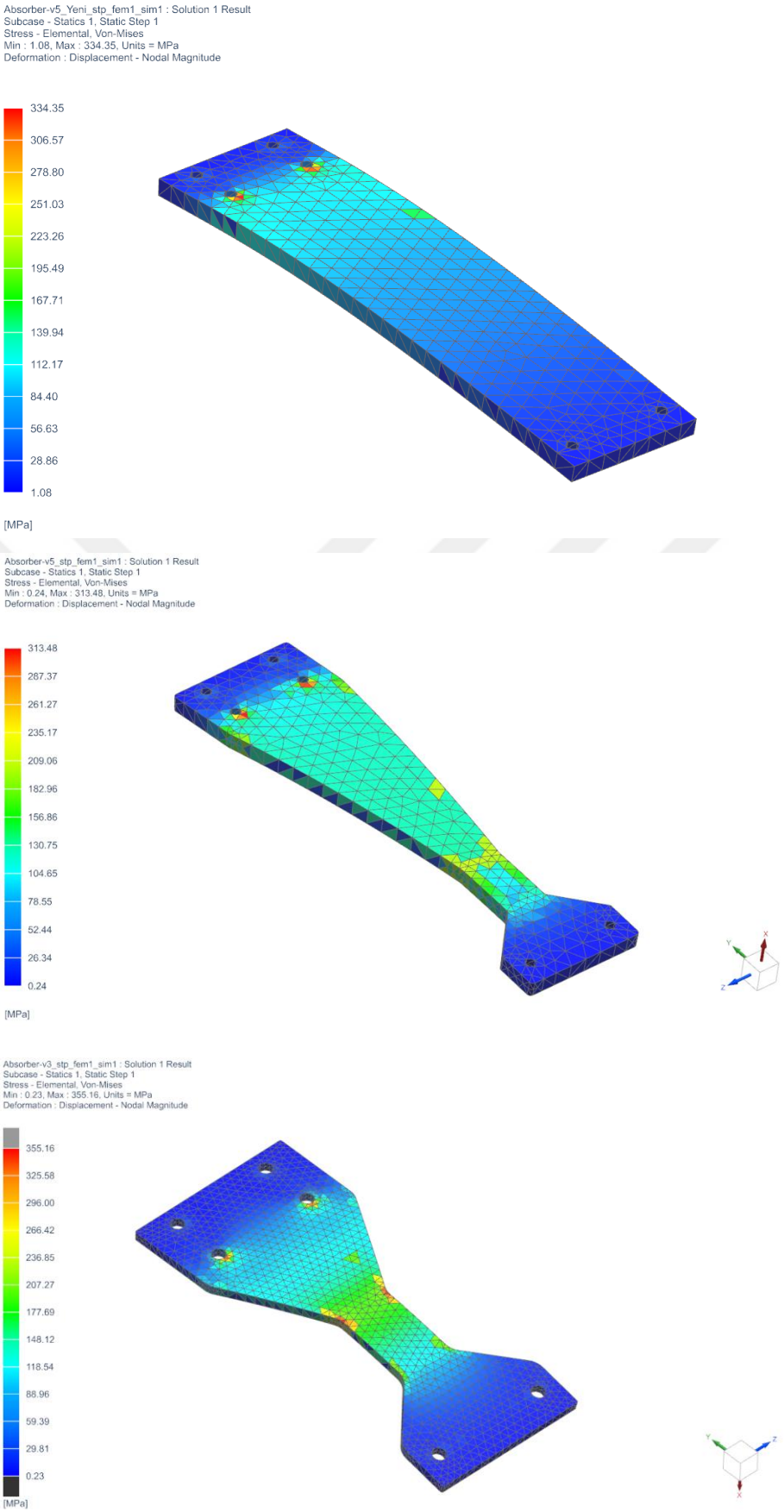
Şekil 4.6 Sönümleyici ilk tasarımı

Oluşturulan tasarımlar sonucunda aynı sınır koşulları ve yük altında sönümleyiciler için FEM modelleri oluşturulmuş ve NX Simcenter programı üzerinden SOL101 çözücüsü üzerinden sonuçlar elde edilmiştir. Bu noktada asıl istenilen yapı üzerinde homojen bir gerilme dağılımı görmek olacaktır. Stresin doğru şekilde dağıtılması, yorulma hasarını önlemek için kritik bir unsurdur. Keskin köşeler, aniden daralan veya genişleyen kesitler, bağlantı delikleri gibi noktalar gerilme yığılmasının oluşabileceği kritik bölgelerdir. Bunu önlemek için köşe ve bağlantı noktalarına kavis eklenerek gerilim yığılmaları azaltılmalıdır. Kalınlık ve kesit geçişlerinde kademeli değişim tercih edilmelidir.

Havacılık endüstrisinde de bu durumlar için bağlayıcı mesafeleri için belirli gereksinimler vardır. Bu ilişki bağlayıcı çapı ile ilişkilidir. Bağlayıcının en yakın serbest kenara olan uzaklığı en az 2D + 1mm olacak şekilde olmalı, haricinde bağlayıcının devamında farklı yönde yeni bir yüzey başlıyor ise be yüzey ile delik arasında en az D + 2mm mesafe bulunmalıdır. Son olarak da sıralı olarak devam eden bağlayıcı delikleri arasında 4D / 6D arasında bir mesafe olması gerekmektedir [17].



Şekil 4.7 Bağlayıcı mesafe kuralları



Şekil 4.8 Sönümleyici konsept tasarımlarının gerilme dağılımı

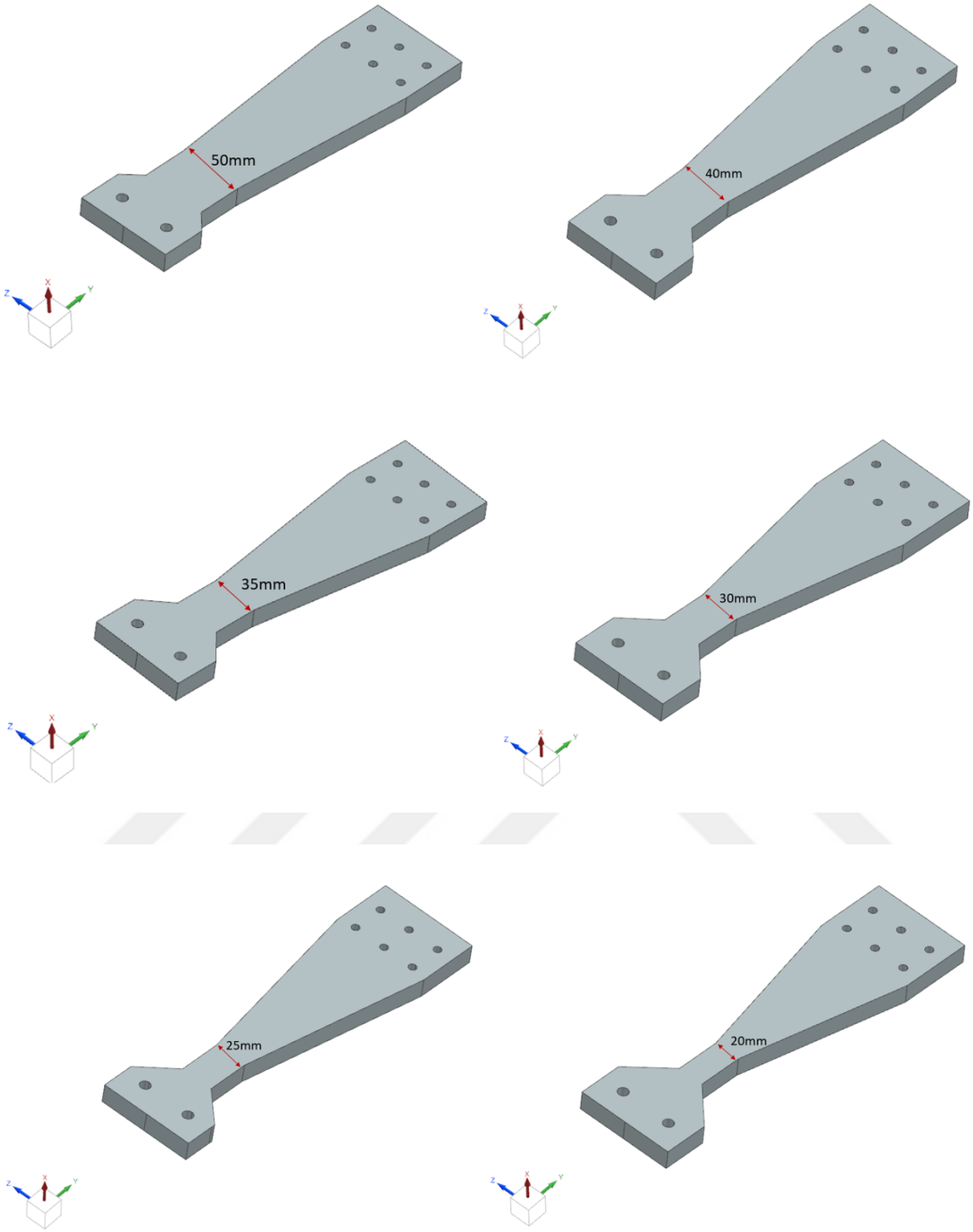
İlk konsept tasarımlardaki gerilmeler incelendiğinde ilk tasarımın bağlayıcı çevresi hariç neredeyse hiç gerilmeye maruz kalmadığı ve homojen bir yayılım göstermediği anlaşılmıştır. Bu durum gereksiz malzeme kullanımı ve ağırlık artışına neden olmakla birlikte yorulma başlangıcının delik çevresinde olmasını sağlar. Bu nedenler ile ilk tasarımı kullanmak sistemin verimsiz olmasına neden olur. Üçüncü tasarım ise daha keskin ve net hatların kullanılmasıyla kesitin daralmasının yapı üzerindeki etkisi incelenmek istenmiştir. İncelenen sonuçlar ile daha keskin geçişler yapıda geçiş bölgelerinde yüksek gerilme göstermesine neden olmuştur. Bu nedenle bölgelerde gerilme yığılmalarına uygun bi hal almasını sağlar ve yorulmaya karşı dayanıksız bir yapı oluşturur. Bu nedenler ile yapının tasarıma uygun olmadığı değerlendirilebilir. Son olarak ikinci tasarım incelendiğinde yapıda gerilmenin oldukça homojen dağıldığı görünmektedir. Ayrıca diğer çözümlere oranla delik çevresindeki kritik gerilmenin bir miktar daha az olduğu belirlenmiştir. Konsept tasarımlar sonucu endüstride de sık olarak tercih edilen kesite sahip ikinci konseptin daha verimli ve homojen bir sonuç verdiği değerlendirilmiştir.

Son tasarım öncesi bu ikinci konsept tasarım üzerinden çeşitli kesit genişliğinde sönümleyiciler değerlendirilmek üzere incelenmiş ve optimum tasarım oluşturulmak için gerilmeler incelenmiştir.

4.2.2 Kesit Genişliğinin Belirlenmesi

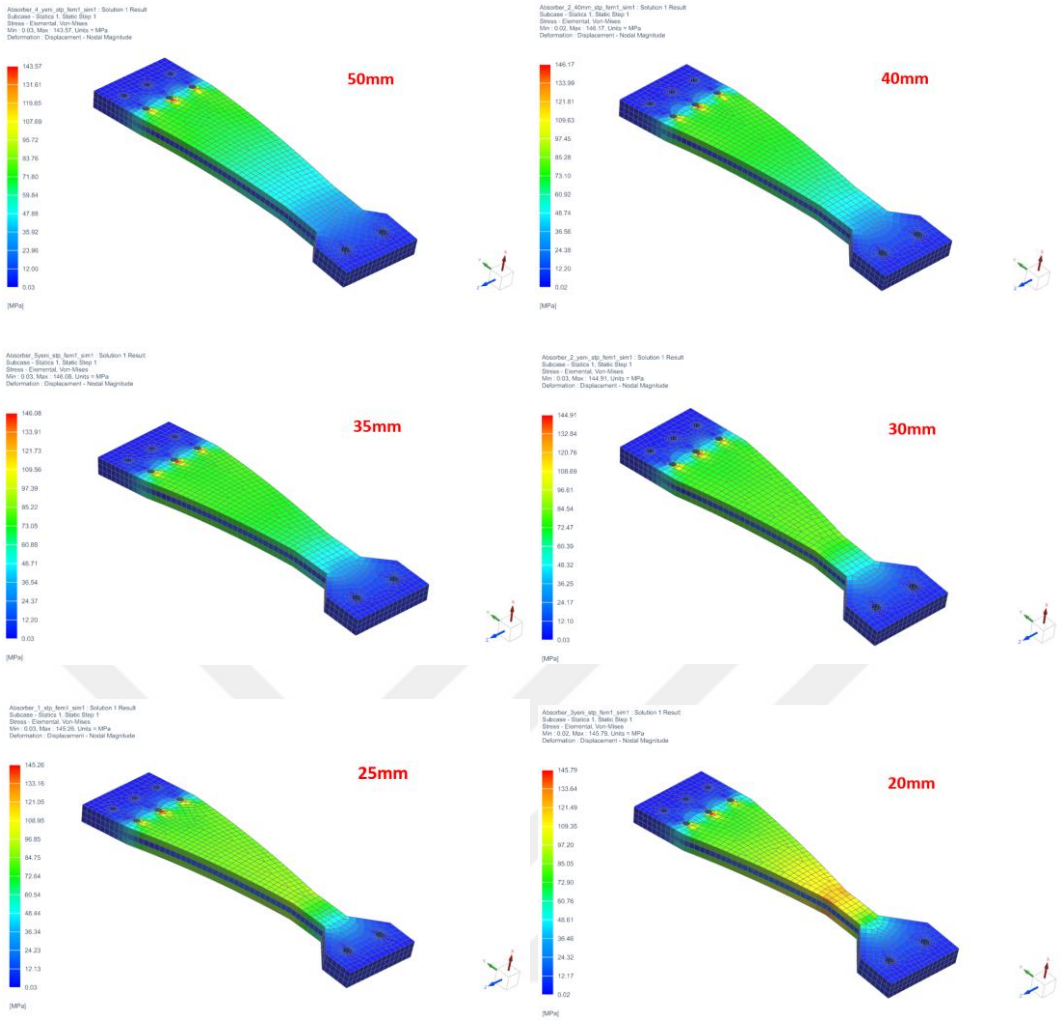
Diğer adımda ise elde edilen konsept tasarımın en verimli çözümü için birkaç iterasyon yaparak optimum sönümleyici tasarımı elde etmek amaçlanmıştır. Bunun için tasarımın belirleyici noktası olan daralan kesit alnında en dar kesit için farklı genişlikler için gerilim dağılımının en optimumu bulunması amaçlanmıştır.

En geniş 50cm ve en dar 20cm olacak şekilde bir dizi sönümleyici tasarımı oluşturuldu ve bunların gerilim dağılımları incelenmek istendi. Burada kritik faktör olan homojen gerilim dağılımını sağlamak hedeflendi.



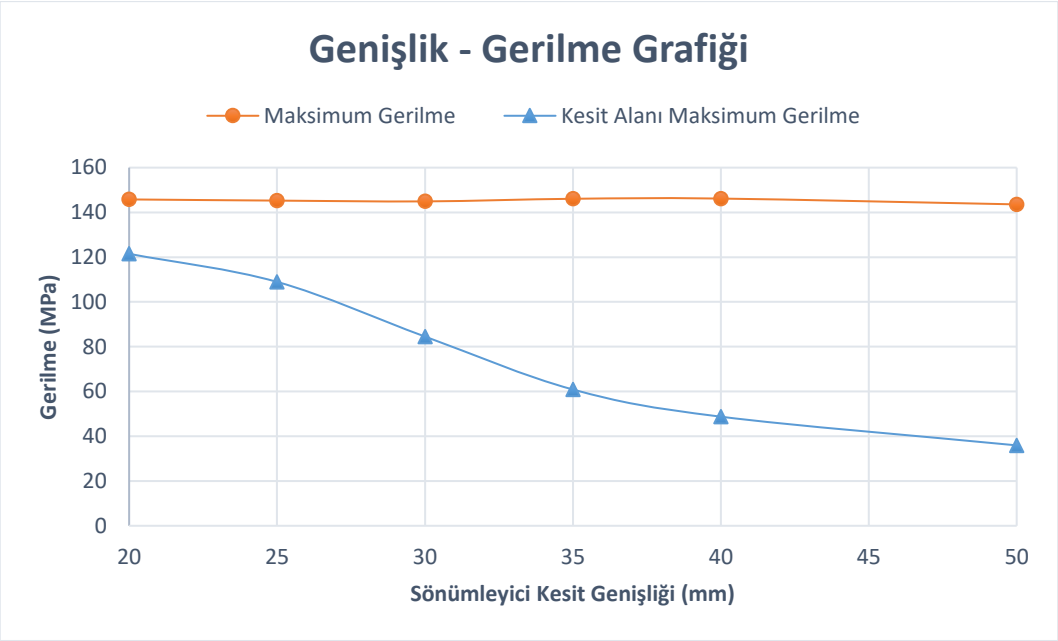
Şekil 4.9 Farklı kesitler için sönümleyici tasarımı

İlgili tasarımlar için havacılık standartlarında kullanılan bağlayıcı delik mesafelerinin kurallarına uyarak tasarım aşaması tamamlanmış ve aynı sınır koşulları ve aynı yükler altında yapılar üzerindeki gerilme dağılımı incelenmiştir.



Şekil 4.10 Farklı kesitler için sönümleyici von-Mises gerilim dağılımı

NX Simcenter programının SOL101 Doğrusal Statik Analizi Simcenter Nastran çözücüsünden alınan gerilim sonuçları üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Yüksek genişlik olması durumunda gerilim yeteri kadar sönümleyici boyunca iletilemediği ve bağlayıcı çevresinde yüksek gerilimler görüldüğü tespit edildi. İterasyon süresince 50mm kalınlıkla başlanıp 5mm'lik farklar ile yapı üzerinde gerilimin gittikçe daha homojen hal almaya başladığı gösterildi. Son durumda 25mm'lik genişlikten 20mm'lik genişliğe geçilince gerilimin kesit alanında kritik bir duruma geldiği ve yorulma için olumsuz bir davranış gösterdiği görüldü. Bu nedenle optimum sönümleyici tasarımının 25mm kesite sahip tasarımın olduğu değerlendirildi.



Şekil 4.11 Sönümleyici tasarımları gerilim dağılımı

İlk konsept tasarımı ile başlayan ve çeşitli iterasyonlar ile son tasarıma ulaşılmaya çalışılan ayarlı kütle titreşim sönümleyici tasarımının, sönümleyici kiriş tasarımına da karar verilerek optimum tasarım oluşturulmuştur. Bu noktadan sonra ayarlı kütle titreşim sönümleyicinin uygun frekansta çalışabilmesi için kütle üzerinde teorik olarak hesaplamalar yapılacak ve tasarım olarak yapının titreşim bölgesine uygulanmasına geçilecektir.

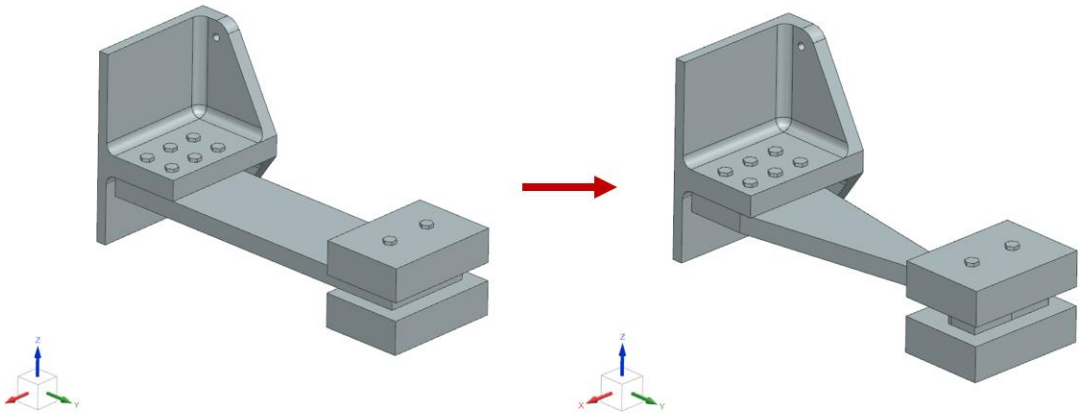
4.3 Sönümleyici Son Tasarımının Oluşturulması

Sönümleyici tasarımının ilk aşamasında, farklı konsept tasarımlar oluşturulmuş ve bunlar NX Simcenter programında sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Optimum tasarımın belirlenmesi amacıyla farklı konfigürasyonları test edilmiş, özellikle gerilme yığılmasını azaltan ve titreşim sönümleme kapasitesini arttıran yapılar üzerinde yoğunlaşılmıştır. Optimizasyon aşamasında, temel hedefler arasında yapının rijitliğini korurken ağırlığı minimuma indirmek yer almaktadır. Analizler göstermiştir ki, belirli bir kesit geometrisi ve bağlayıcı yerleşim stratejisi, gerilme yığılmasını optimize ederek yorulma dayanımını arttırmaktadır.

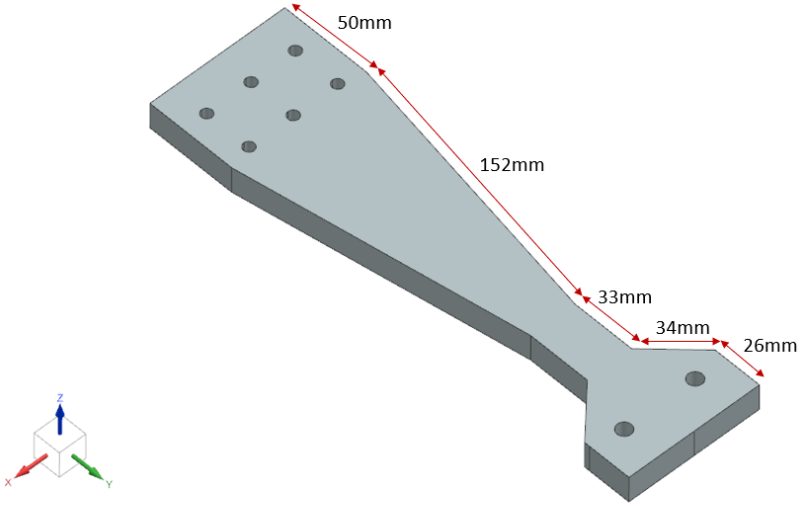
Gerilim analizi sonuçları, kesit genişliğinin sönümleme performansı üzerinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Farklı kesit genişliğindeki tasarımlar üzerinde yapılan iterasyonlar sonucunda, optimum kesit genişliğinin 25 mm olarak belirlenmesi uygun bulunmuştur. Daha geniş kesitlerde gerilmenin yeterince homojen dağılamadığı ve bağlayıcı bölgelerde kritik gerilme yığılması oluştuğu gözlemlenmiştir. Daha dar kesitlerde ise yapının yorulma dayanımını olumsuz etkileyen kritik gerilim noktaları tespit edilmiştir.

Havacılık endüstrisindeki standartlar göz önünde bulundurularak, bağlayıcı delik mesafeleri ve konumları optimize edilmiştir. Optimum tasarımda bağlayıcıların serbest kenara olan uzaklığının en az 2D + 1 mm, yeni bir yüzey başlıyor ise D + 2 mm ve sıralı delikler arasındaki mesafenin 4D ile 6D arasında tutulması gerektiği belirlenmiştir. Bu ölçüler, bağlayıcı bölgelerde gerilme yığılmasını azaltarak yorulma dayanımını arttırmaktadır.

Son tasarımın belirlenmesiyle birlikte, bu aşamada ayarlı kütle sönümleyicisinin son tasarımının oluşturulması için yapının ana tahrik frekansına yakın bir frekansa getirilmesi için çeşitli iterasyonlar yapılacaktır. Bu aşamada bağlayıcı ve sönümleyici üzerinden değişikliğe gidilmeyecek olup yapıda yer alan kütle miktarının değişimiyle istenilen frekansa ulaşılma hedeflenmiştir.



Şekil 4.12 Sönümleyici konsept tasarım ve son tasarım

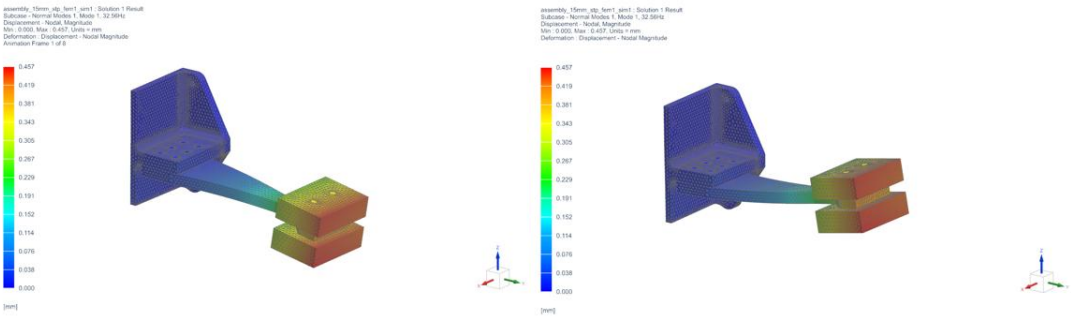


Şekil 4.13 Sönümleyici Yaprak Yay Son Tasarım

4.3.1 Ayarlı Kütle Sönümleyici Titreşim Modu

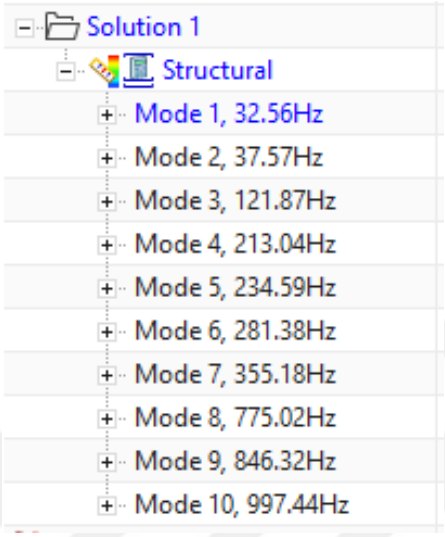
Sönümleyici yayın son tasarımını almasıyla birlikte artık yapının ana tahrik frekansıyla benzer yakın bir modu yakalaması amaçlanmıştır. Öncelikle son tasarım için NX Simcenter programı üzerinden SOL103 Özdeğerler Analizi yapılarak mevcut modları bulunacaktır.

Yapılan ilk analizler sonucunda yapının elde edilen ilk 6 modları sırasıyla 32.56Hz, 37.57Hz, 121,87Hz, 213.04Hz, 234,59Hz ve 281,38Hz olarak bulunmuştur. Nu noktada ana tahrik frekansımızın hangi modla sönümleneceğine modların hareketlerine bakılarak karar verilmiştir. 1. modun Z ekseninde salınım hareketiyle aynı hareketi yapan mod olduğu belirlenmiştir.



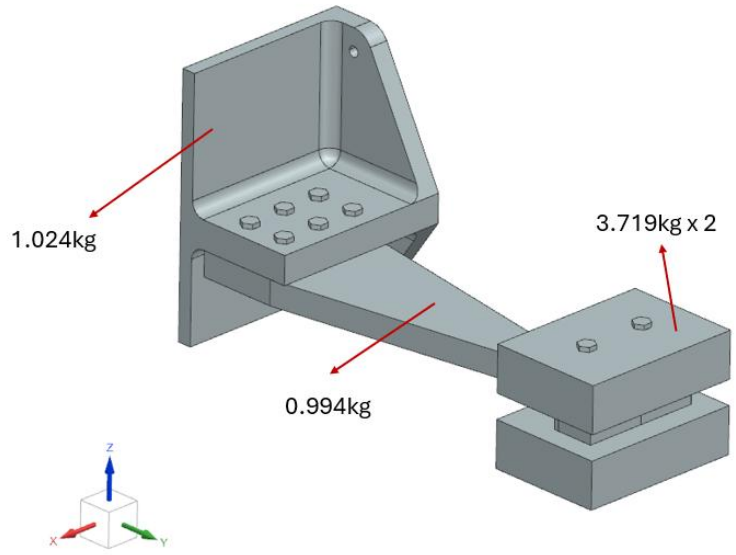
Şekil 4.14 Sönümleyici Son Tasarım Z eksen hareketini sağlayan modu

Bu noktadan sonra mevcut modun titreşim frekansının 32,56Hz olduğu görünmektedir. Birincil sistemimiz olan Lowerdeck modelimizde ana tahrik frekansımız 29,49Hz olarak bulunmuştu. Böylece verimli bir sönümleyici sisteminin olması için sönümleyici modunun birincil sistem ana tahrik moduna yaklaştırılması gerekmektedir.



Şekil 4.15 Sönümleyici ilk 10 Modu

Bunu sağlayabilmek içinde sönümleyici sisteminde bu görev için kullanılan kütle üzerinde yapılan değişiklikler ile frekansın birincil sisteme yaklaştırılması hedeflenmiştir. Bölüm 2.4'te yer alan formüller üzerinden yapının modunun birincil sisteme nasıl yakınlaşacağı hesaplanacaktır.



Şekil 4.16 Sönümleyici elemanları ağırlıkları

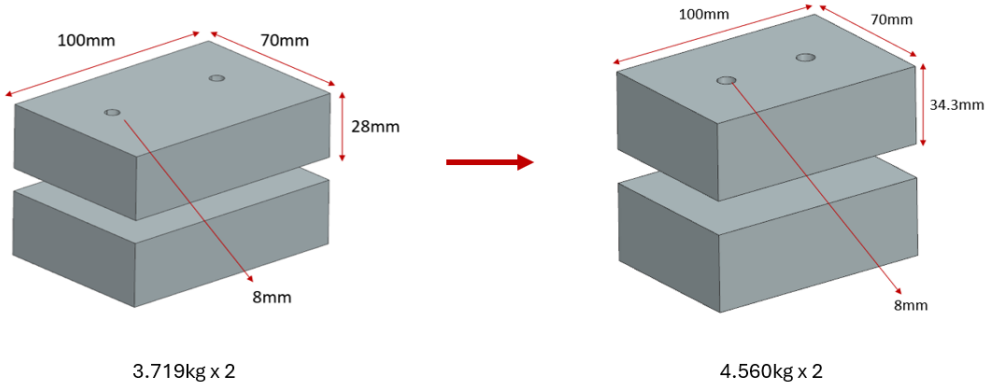
Öncelikle sönümleyici yaprak yay için yapılan optimizasyon ile yayın ağırlığı 1.407kg'dan 0.994kg'ye çekilerek yaklaşık 0.413kg'lik bir hafifleme sağlanmıştır. Ve havacılık yapısallarında kullanılan metaller içerisinde en pahalılarından biri olan titanyumdaki azalma ürün bazlı üretim maliyetini azalmasına fayda sağladı. Bağlayıcı için ilk tasarım korunarak devam edildi. Bağlayıcı geometrisi, sönümleyicinin bağlanacağı birincil yapının geometrisine uygun olması gerektiği için tasarlanan geometriyle devam edildi. Ayrıca 1.024kg'lık ağırlığıyla ve nispeten diğer kullanılan metallere karşın daha uygun fiyatıyla alüminyum yapı için doğru bir malzeme kararı olduğunu gösterdi. Ağırlık ise 3.719kg'lik 2 parçasıyla yapıyı tamamladı. Malzeme olarak tungsten in seçilmesi yoğunluğu yüksek bir metalle dar bir hacimde çalışması ve yorulmaya karşı yüksek direnci için uygun bir seçim olduğunu kanıtladı.

Bu noktada yapının modunu ana tahrik frekansına getirmek için birkaç iterasyon yardımıyla kütle parçasının ağırlığı artırılarak hedef frekansa ulaşılmıştır.

4.3.2 Ayarlı Kütle Sönümleyici Son Kütlenin Belirlenmesi

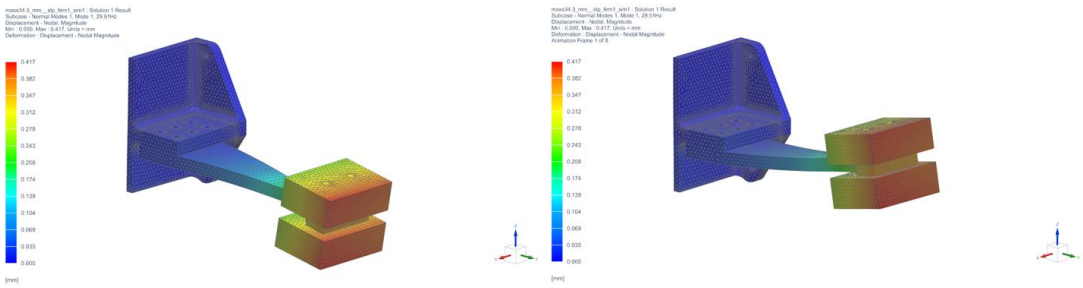
Bu bölümde sönümleyici yaprak yayın ve bağlayıcı elemanın son tasarımını aldığı yapının kütlesi ile değişiklik yapılarak hedeflenen ana tahrik frekansındaki Z ekseninde salınım hareketi yapan moda ulaşılması hedeflenmiştir.

Öncelikle bir önceki tasarım da elde edilen ve istenilen hareketi sağlayan modun frekansı 32.56Hz olarak hesaplanmıştı. Bu moda ait frekansı düşürmek için kütlenin artırılması gerektiği daha önce açıklanan formüller ile gösterilmişti. Yapılan iterasyonlar ile 2 farklı parçadan oluşan kütlelerin kalınlıkları 28mm'den 34.3mm'ye çıkarıldı ve bir parça için ağırlık 3.719kg'dan 4.560kg'ya çıkarılarak yapının istenilen ana tahrik frekansına yaklaşması sağlandı.

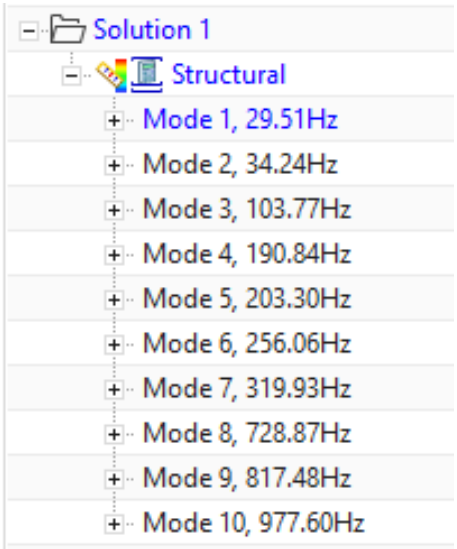


Şekil 4.17 Sönümleyici konsept tasarım ve son tasarım kütle değişimi

Yapılan bu iterasyon sonucu sönümleyici mekanizmanın modu 29.51Hz'ye çekilerek istenilen hedefe yaklaşık olarak eşitlenmiştir. Böylece sönümleyici mekanizmanın tasarımı tamamlanmıştır.



Şekil 4.18 Sönümleyicinin yeni kütleyle Z eksen hareketini sağlayan modu

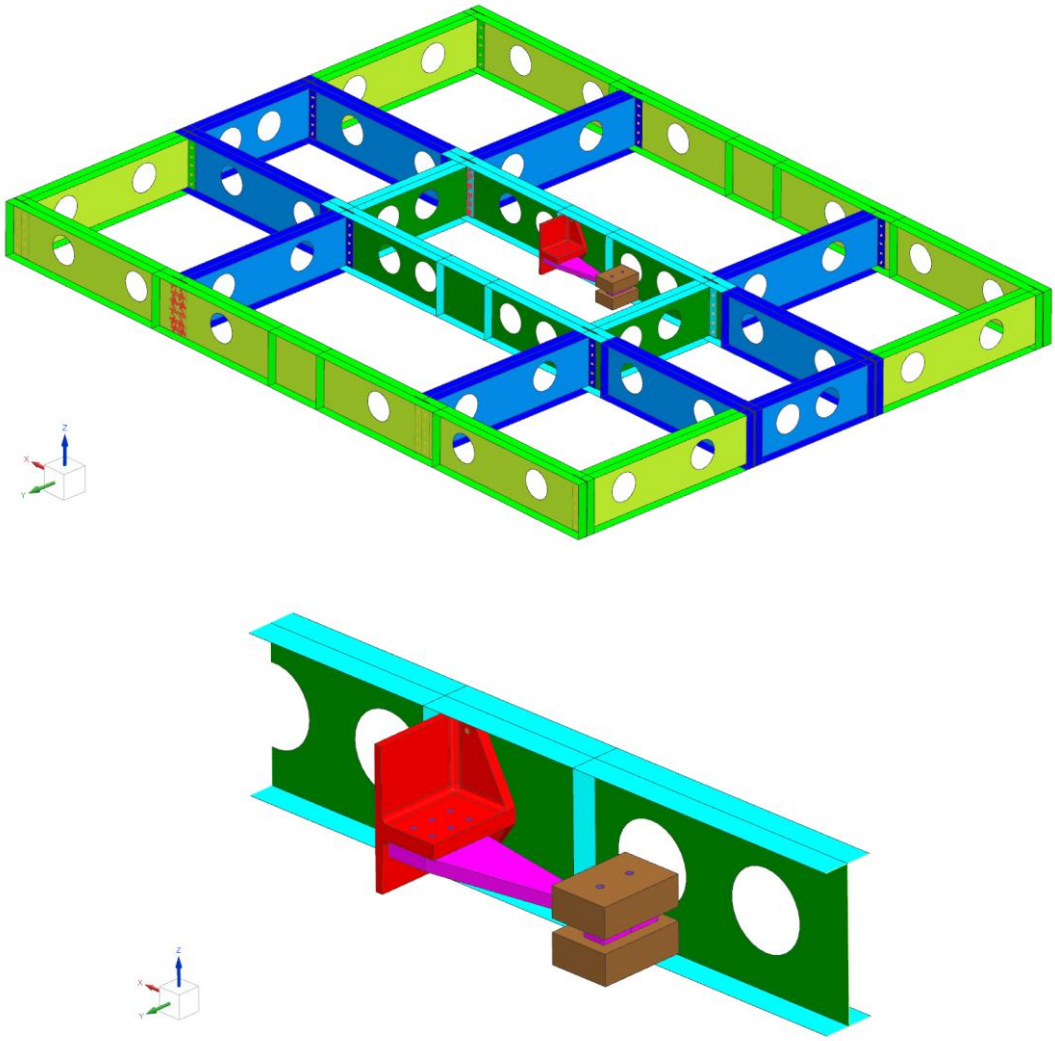


Şekil 4.19 Son kütleye sahip sönümleyici ilk 10 Modu

Ortaya çıkarılan son tasarım ile istenilen hedefe ulaşılmış ve birincil yapıda oluşan titreşimi sönümlemek için gerekli frekans ve modun hareketi sağlanmıştır. Bu noktadan sonra birincil sistem ve sönümleyici birlikte modellenecek ve hareketleri incelenerek tasarımın son halinin doğrulanması sağlanacaktır.

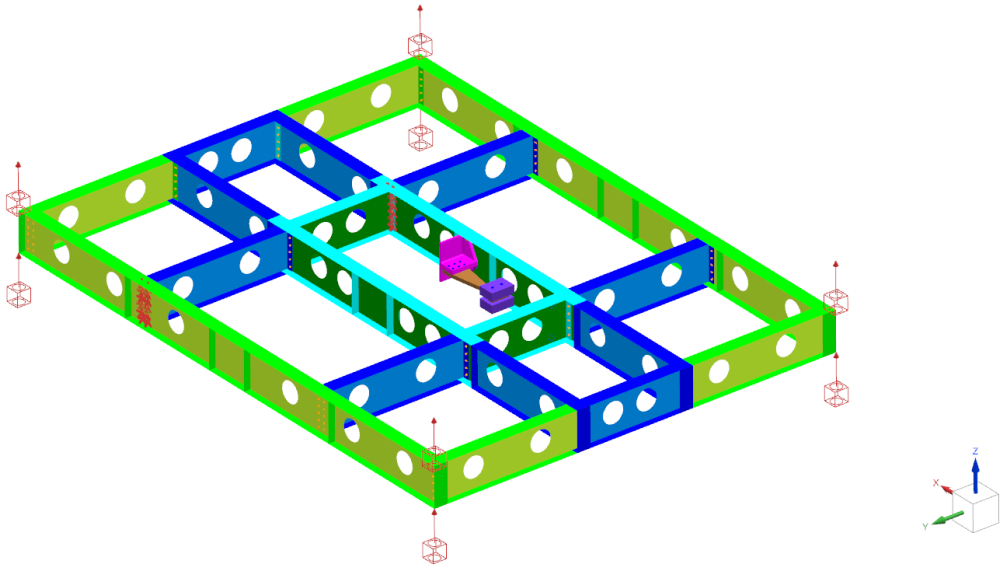
4.3.3 Sönümleyici Son Tasarım ve Ana Sistem Tasarımının Doğrulanması

Yapılan birçok iterasyon ve analiz çalışmaları sonucunda sönümleyici mekanizması son tasarımına ulaştı. Birincil ve ikincil yapının yaklaşık aynı frekans ve aynı mod hareketini yaptığı frekansları belirlenerek sistemler birleştirilmeye uygun hale geldi. En verimli titreşim sönümlemesinin sağlanması için yapının en fazla yer değiştirmeye ulaşan bölgesine sahip bölgeye sönümleyici monte edilmiştir. Bu bölge daha önceki birincil yapının analiz çalışmalarında gösterilmişti.

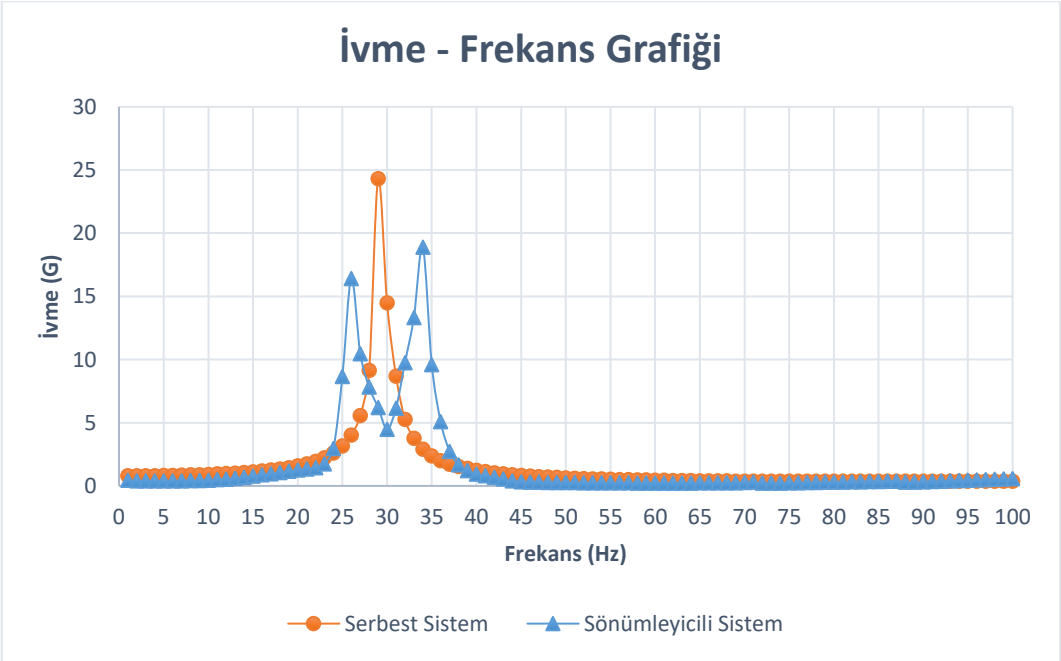


Şekil 4.20 Sönümleyici ve birincil sistem montaj FEM modeli

Bu aşamada 2021 NX Simcenter üzerinde yaptığımız modeli 2017 Patran'a aktarılmıştır. Ana sistemin en köşe noktalarından kısıtlamalar verilmiş ve yapı çalışma yükü olan 0.8G ile analiz koşturulmuştur. Bu analiz sonucu elde edilen frekans-ivme grafiği oluşturulmuş ve yapının ilgili frekans da titreşimi sönümlemesi gözlemlenmiştir.



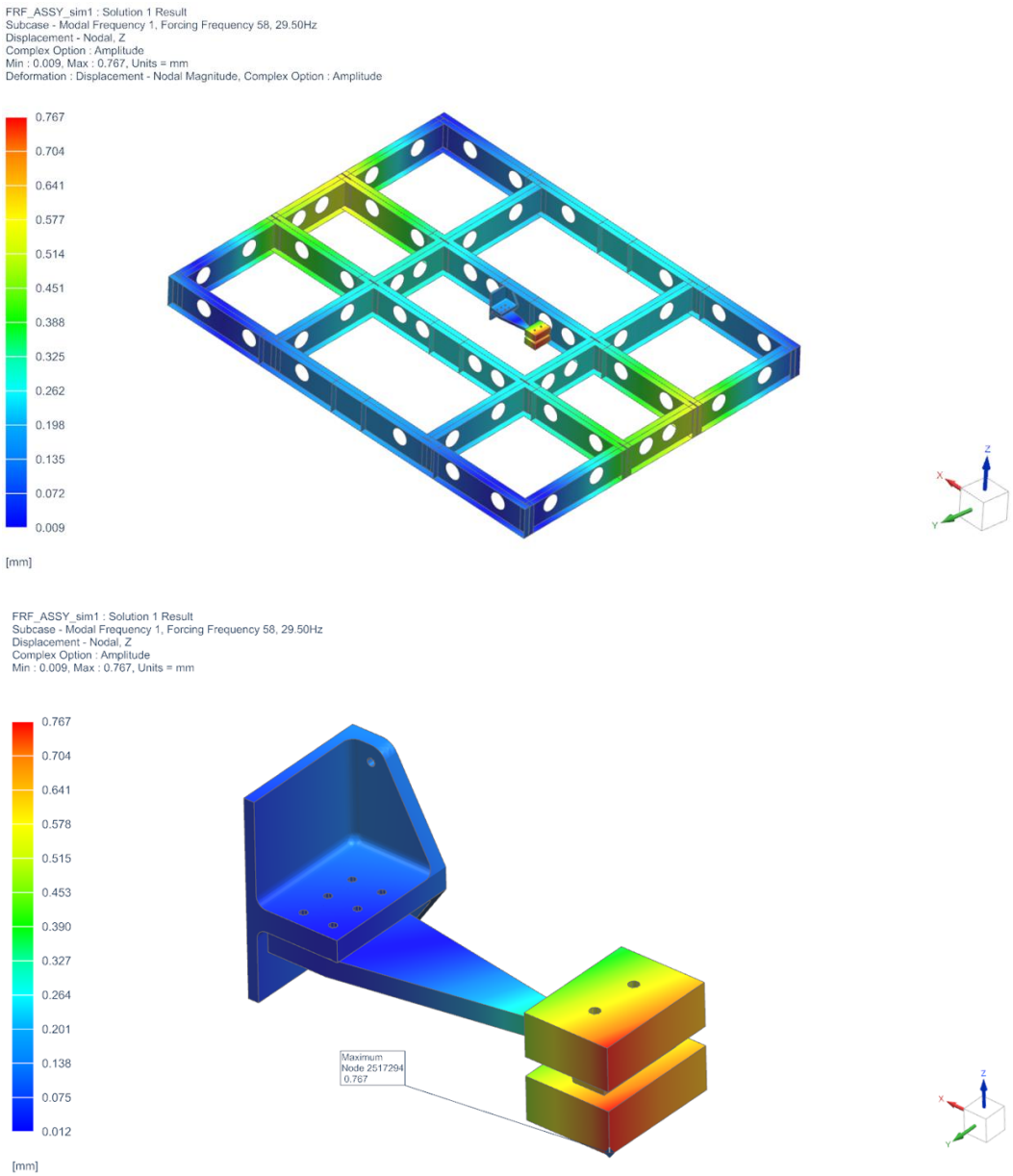
Şekil 4.21 Sönümleyici ve birincil sistem FRF analizi modeli



Şekil 4.22 Sönümleyici ile sistem ve serbest sistem frekans-ivme grafiği

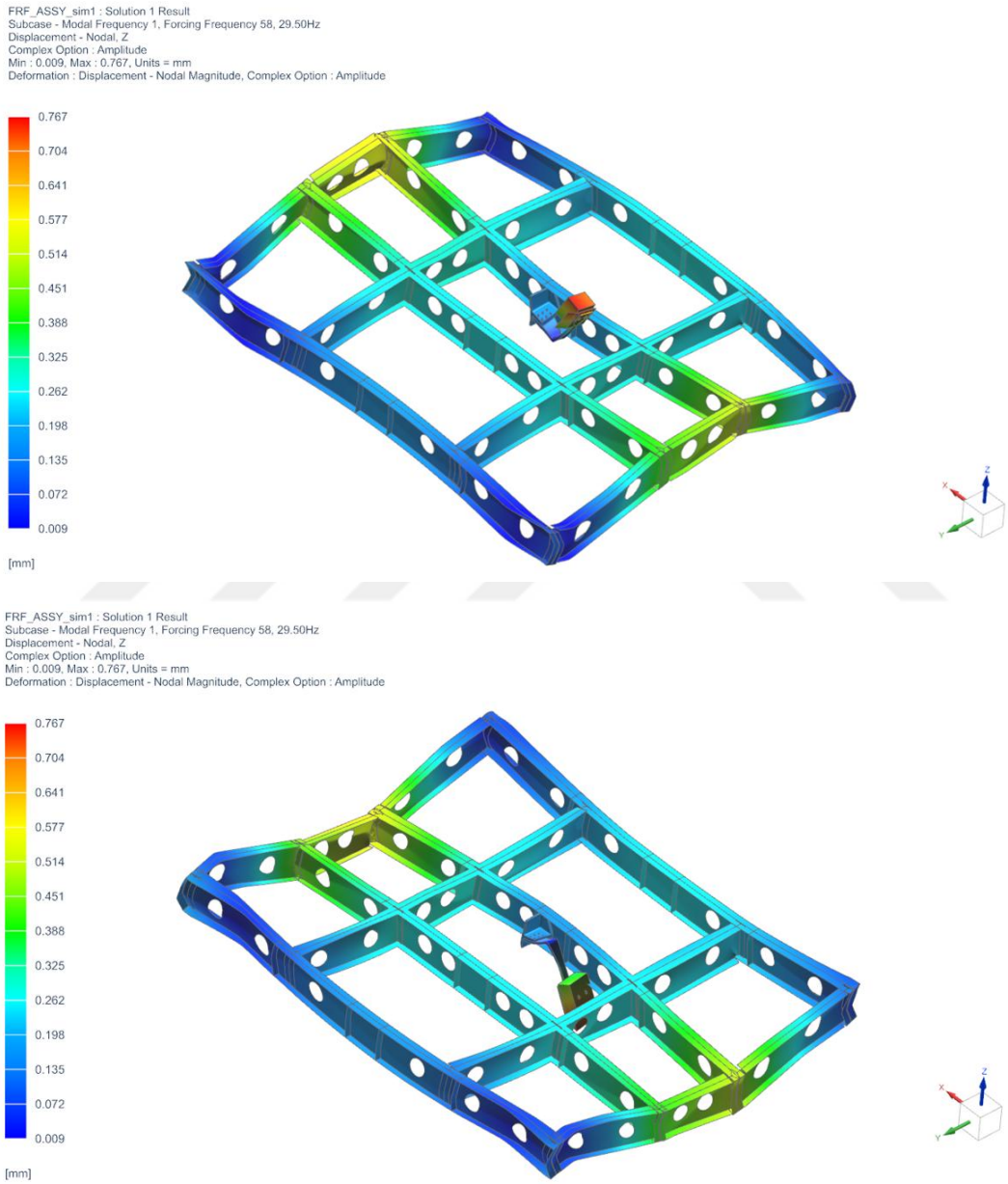
Sonuç olarak elde edilen grafikler karşılaştırıldığında yapının tasarlanan yaprak yay sönümleyici ile istenildiği gibi yapıyı sönümlemeyi başardığı anlaşılmıştır. Böylece ilgili tasarımın uygunluğu doğrulanmıştır.

Yapılan analiz sonucu elde edilen frekans ivme grafiği birincil sistemin sönümleyici ve sönümleyici olmadan yaptığı yer değiştirme hareketinin incelenmesiyle doğru olduğu farklı bir noktadan da doğrulanmıştır. Sıradaki şekil incelendiğinde titreşim bölgesindeki yer değişiminde ciddi bir azalım olduğu görünmektedir.



Şekil 4.23 Sönümleyici ile birincil sistem yer değişimi

Bu çalışmalar sonrasında yaprak yaylı sönümleyici için tasarım tamamlanmış oldu. Tüm çalışma faktörlerin göz önüne alınarak yapıldığı çalışma ile helikopterlerde kullanılan bir sönümleyicinin gerçek ve uygun tasarımı gerçekleştirilmiş oldu. Son olarak yapının yorulma davranışı incelenerek hangi ömür de bir kullanım sağladığı ve kullanımı için uygunluğu değerlendirilecektir.

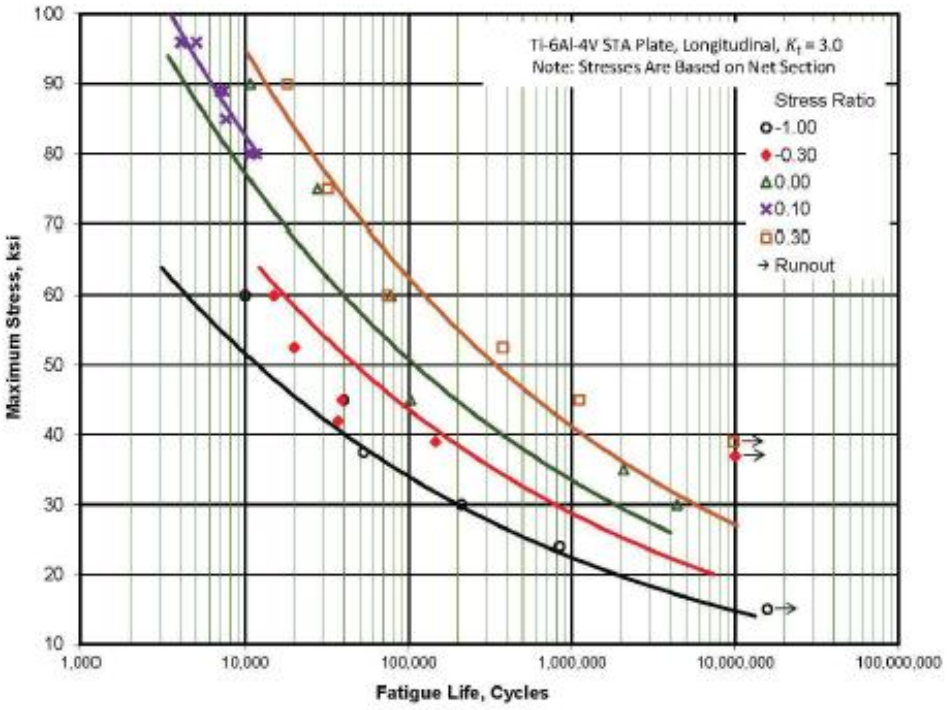


Şekil 4.24 Sönümleyiciyle birlikte birincil sistem sönümleme Z ekseni yer değiştirme hareketi

5
SÖNÜMLEYİCİNİN YORULMA DAVRANIŞI

5.1 Yorulma Yaklaşımı

Helikopterlerde birçok farklı yorulma analizi yönteminden daha önce değinmiştik. Bölgedeki yük davranışına göre yapılarda çeşitli metotlar bulunmaktadır. Yaprak yay sönümleyici yüksek döngü sayılarına maruz kalan bir yapı olarak, yüksek döngülü yüklemlerde kullanılan yöntemlerin başında gelen S-N eğrisi yöntemi parçanın yorulma davranışını anlamak için kullanılacaktır.



Şekil 5.1 Titanyum Ti-6Al-4V Kt:3 için S-N eğrisi

S-N eğrisi denklemi, belirli bir gerilme seviyesi için kırılmaya kadar geçen çevrim sayısını belirlemek amacıyla yorulma analizinde kullanılır. İlgili analiz metodunda gerilme oranı şu şekilde hesaplanır:

$$R = \frac{Smin}{Smax} \tag{5.1}$$

Sonrasında bu orana ek olarak eşdeğer gerilmenin bulunması gerekmektedir. Bunun için de maksimum gerilme ile gerilme oranı arasındaki ilgili denklem ile ulaşılır:

$$S_{eq} = S_{max}(1 - R)^P \tag{5.2}$$

Bu ölçüm ile yapı üzerine gelen çekme basma kuvvetlerinin etkilerinin denkleme dahil edilmesiyle bulunur. Eşdeğer gerilmenin de bulunmasıyla birlikte parçanın ömrünü bulmak için aşağıdaki denklem kullanılır:

$$\log \mathrm{N_{f,i}} = A - B \log S_{eq,i} \tag{5.3}$$

Böylece yapısal bir parçanın S-N eğrisi yöntemiyle ömrünün nasıl bulunacağının denklem çözümleri gösterilmiş oldu. Denklemler bulunan katsayı bilgileri MMPDS'de bulunan ilgili S-N eğrisi üzerinden alınmıştır.

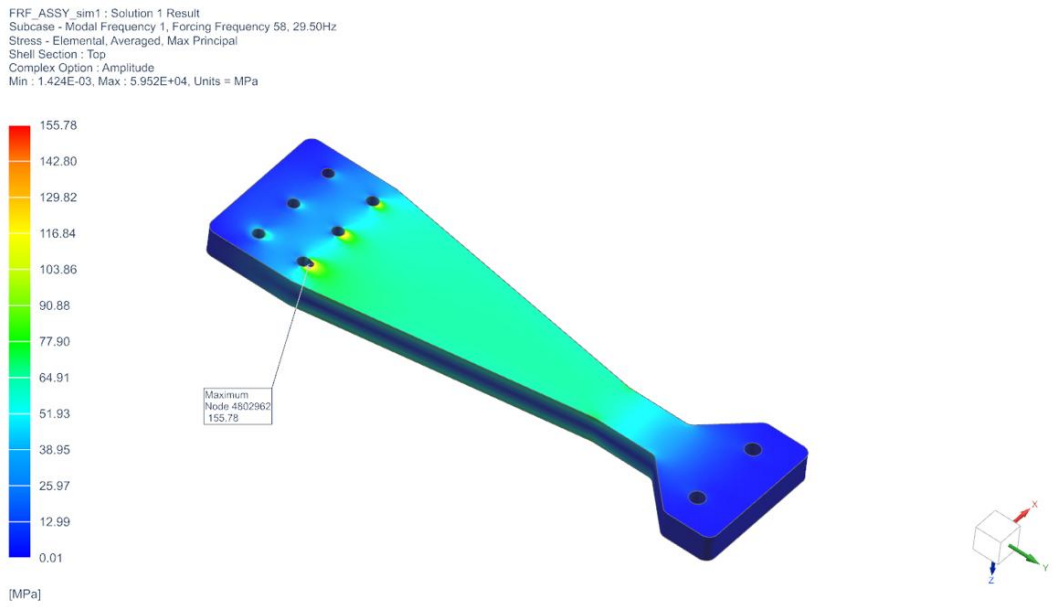
5.2 Sönümleyici Gerilme Sonuçları

Final tasarımı sonrasında yapılan analizler sonucunda sönümleyici için gerilme sonuçları elde edilmiştir. Analiz çıktısı olarak yapısal parçaların ömür hesabında kullanılan Principal gerilme sonuçları incelenmiştir. Principal gerilmenin kullanılmasında birkaç neden vardır. Öncelikle Principal gerilme en kritik gerilme bileşenini gösterir. Yani bir noktadaki maksimum ve minimum normal gerilmeleri temsil eder bu da özellikle malzemenin yorulma davranışı için önemlidir çünkü malzemeler genellikle maksimum çekme gerilmesine karşı en çok yorulmaya maruz kalır, genellikle de bu maksimum çekme asal gerilme yönünde başlar.

Diğer bir neden ise Principal gerilme, gerilme düzlemlerinde sadece normal gerilme vardır, kayma gerilmesi sıfırdır. Bu yüzden bu düzlemler gerçek mekanik yüklemeyi en gerçekçi biçimde gösterir.

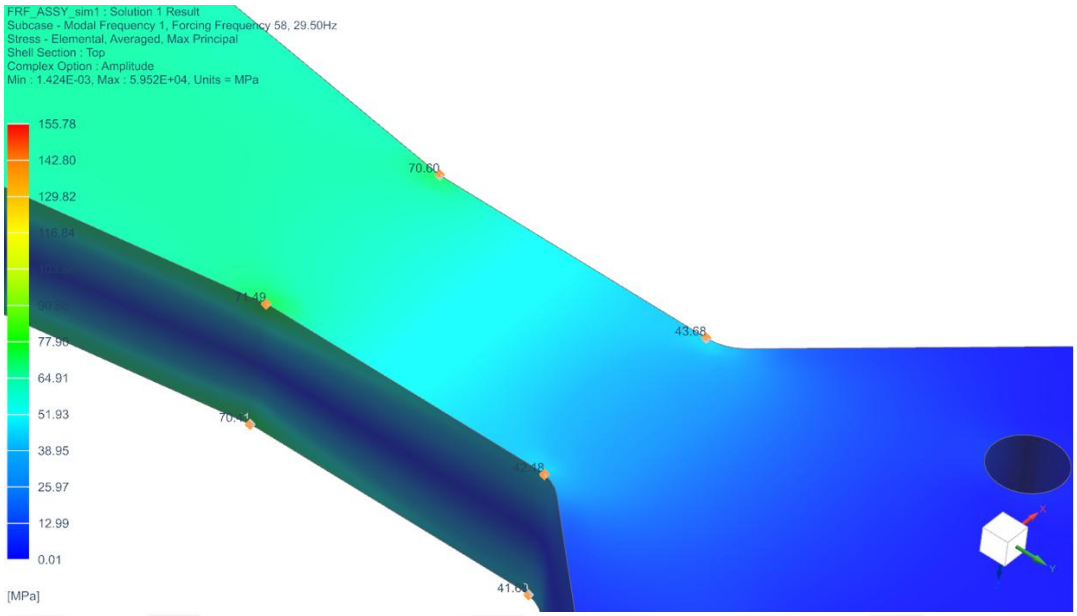
Tüm bu nedenler ile en önemli neden ise yorulma analizlerinde standarttı sağlamaktır. S-N eğrileri, Goodman, Soderberg, Gerber gibi birçok yorulma analiz metodu doğrudan Principal gerilme üzerinden çalışır. Çünkü yorulma testleri de genelde tek eksenli (Principal) gerilmeye göre yapılır. Böylece de tüm çalışmalar için ortak bir dil yakalanmaya çalışılır.

Bu bilgiler dahilinde analiz sonuçları incelenmiştir. Daha önce de sönümleyici tasarımın oluşmasını sağlayan kesit alanı ve delik bölgesi gerilmenin en yüksek olması beklenen alanlardır. Çünkü yorulma bölgelerinin, endüstri ve daha önce yapılmış araştırmalarında ışığında en çok bağlantı bölgeleri ve keskin geometrik geçişler de olduğunu biliyorduk.



Şekil 5.2 Sönümleyiciye ait maksimum Principal gerilme dağılımı

Yapılan analizler sonucunda en yüksek gerilmenin delik çevresinde olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte gerilmenin en önemli olduğu yerlerden biri olan kesit bölgesindeki gerilme oranları da incelenmiştir. Her ne kadar gerilme miktarı ömürlerin çıkarılması ve yorulmanın önce başlayacağı alanın belirlenmesinde kritik bir faktör olsa dahi gerilme kesitlerindeki *Kt* oranı parça ömrünün belirlenmesinde temel öneme sahiptir. Bu nedenle hem delik çevresi hem de kesit alanının yorulma davranışları incelenmiştir.

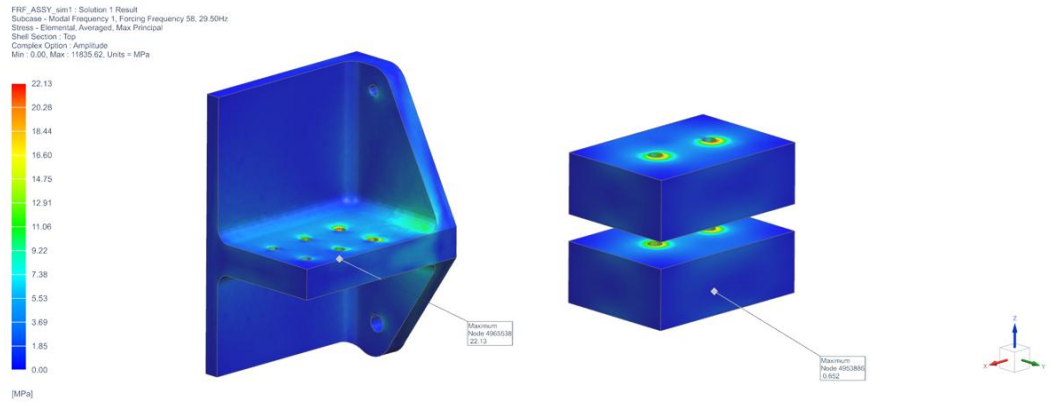


Şekil 5.3 Sönümleyici kesit alanı Principal gerilme dağılımı

Tablo 5.1 Sönümleyici Principal gerilme sonuçları

Gerilme Bölgesi	**Büyüklük**
Delik Bölgesi Principal Gerilme	155.78 MPa
Kesit Bölgesi Principal Gerilme	71.49 MPa

Sistemimizde gerçek sönümlemeyi yapan ve asıl yükü taşıyan sönümleyici parçası olduğu için diğer parçaların yorulma ömrü sönümleyiciye oranla çok yüksek olacağı için yorulma için analiz edilmeye ihtiyaç olmadığı gerilme sonuçlarında da görülmektedir.



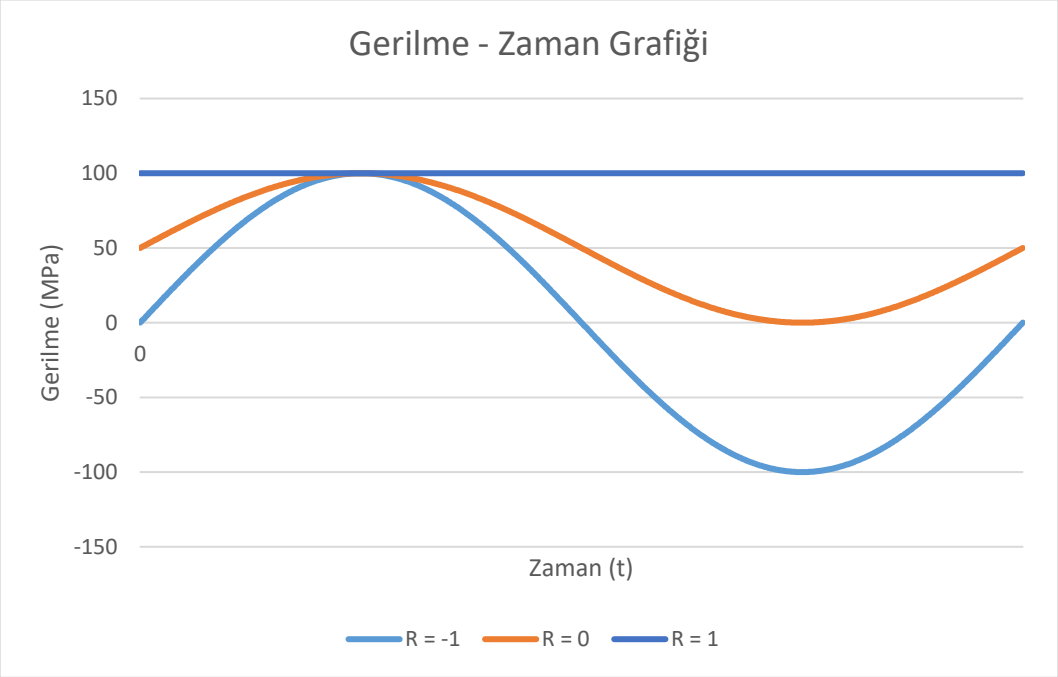
Şekil 5.4 Bağlayıcı ve kütleye ait maksimum Principal gerilme dağılımı

5.3 Kt ve R Değerlerinin Belirlenmesi

Havacılık yapısallarında parçaların ömürlerinin hesabında birçok faktör ve katsayı bulunmaktadır. Bunların en önemli ikisi ise gerilme oranı R ve gerilme yığılma katsayısı Kt'dir. R yani gerilme oranı, bir yükleme döngüsünde en küçük ve en büyük gerilme değerlerinin oranı olarak ifade edilir. Bu oran ile parçanın nasıl bir yükleme altında çalıştığı ifade edilir.

Tablo 5.2 R değerleri arasındaki ilişki

R Değeri	Yükleme		Açıklama
-1	Çekme-Basma	$-\sigma_{min} = \sigma_{max}$	Tam tersinir yükleme
0	Çekme	$\sigma_{min} = 0,\ \sigma_{max} > 0$	Tam çekme döngüsü
1	Statik	$\sigma_{min} = \sigma_{max}$	En az yorulma etkisi



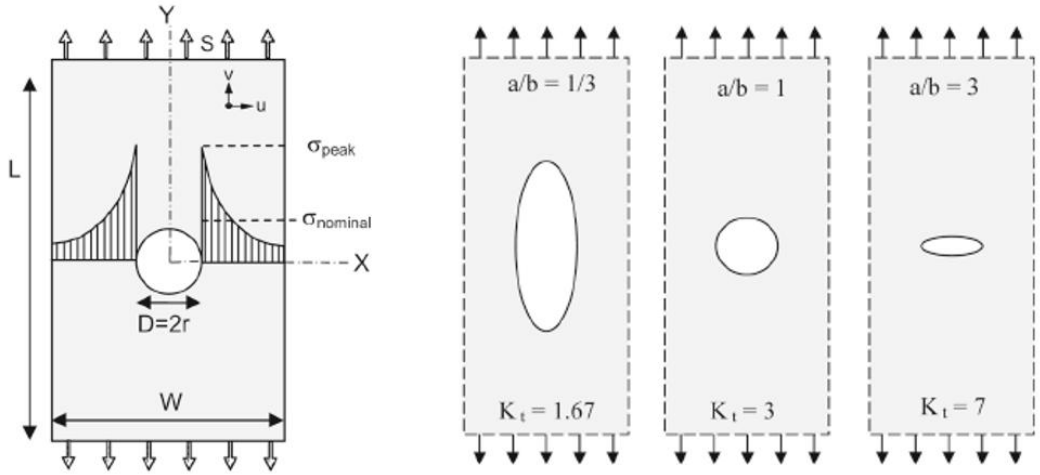
Şekil 5.5 Örnek R gerilme oranı grafikleri

İlgili grafik ve tabloda özetlendiği gibi yorulma için yükleme senaryoları belirli R değerlerinin davranışı gösterilmiştir. Tüm bunların ışığında sönümleyiciler için hangi R değerinin seçileceği belirlenmiştir. Sönümleyiciler doğası gereği dinamik titreşim yükleri altında çalıştıkları için eşit büyüklükte hem çekme hem basma olarak uygulanır. Buda helikopter elemanları olan amortisörler, transmisyon şaftı ve sönümleyiciler için R değerinin -1 olması gerektiğini gösterir. Böylece sistemimizde yer alan yaprak yay sönümleyicimizi ömür hesabında **R= -1** kullanılmasının doğru olacağını göstermektedir.

Yapısal parçaların ömür hesabındaki diğer önemli faktör ise Kt değeridir. Gerilme konsantrasyon faktörü olarak adlandırılan Kt bir parçanın belirli bir geometrik özelliği (örneğin delik, çentik, daralma, keskin köşe) nedeniyle oluşan gerilme yığılmasının, aynı parçanın aynı kesitinde yer alan homojen kısmındaki nominal gerilmeye oranı olarak adlandırılır.

$$Kt = \frac{\sigma max, lokal}{\sigma nominal} \tag{5.4}$$

Birçok mühendislik yaklaşımı ve yorulma testler sonucunda ilgili Kt değerleri kullanılarak birçok S-N diyagramı hazırlanmıştır. Bu diyagramların kullanılmasıyla da çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir.



Şekil 5.6 Delik bölgesi Kt hesaplanması

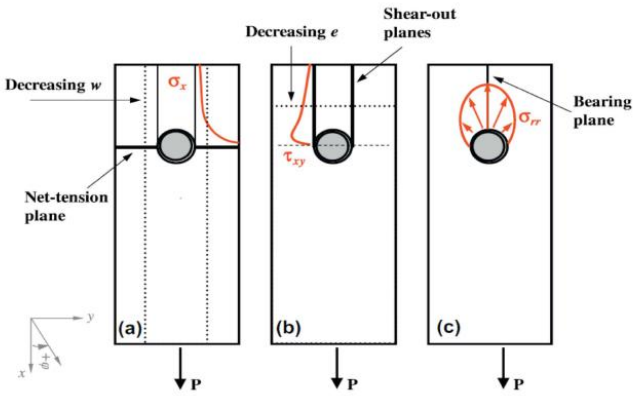
Bunlardan biri de yorulma başlangıcının en çok görüldüğü bölgelerden biri olan delik bölgesidir. Yapılan çalışmalar ve örnekler ile birlikte sönümleyici tasarımında kullandığımız gibi eliptik olmayan düzgün geometriye sahip deliklerin analizlerinde **Kt= 3** ait S-N eğrisi kullanılarak ömür hesabı yapılmalıdır ve bu eğrinin kullanılması için maksimum gerilmenin 3'e bölünmesi gerekmektedir [18]. Diğer spesifik bölgeler için ise Kt'nin hesaplanmasına ihtiyaç vardır.

Grafiklerde belirtilen $S_{endurance}$, belirli bir çevrim sayısından sonra S-N eğrisinin yatay devam etmeye başladığı konumdaki yorulma dayanımı anlamına gelir. Yani, bu değerin altında bir gerilme uygulanırsa sonsuz çevrimde bile parçanın kırılmayacağı varsayılır. Bu sonsuz ömrün başladığı nokta titanyum için 10^7N döngü sınırı olarak kabul edilir bu döngünün bulunduğu gerilmenin altı sonsuz ömürlü olarak değerlendirilir.

5.4 Bağlayıcı Dayanımı

Sönümleyici ömür sonuçlarını elde etmeden önce ise sönümleyici içerisinde bulunan bağlayıcıların çalışma yükleri altında çalışmaya uygun olup olmadığını belirlemek gerekmektedir.

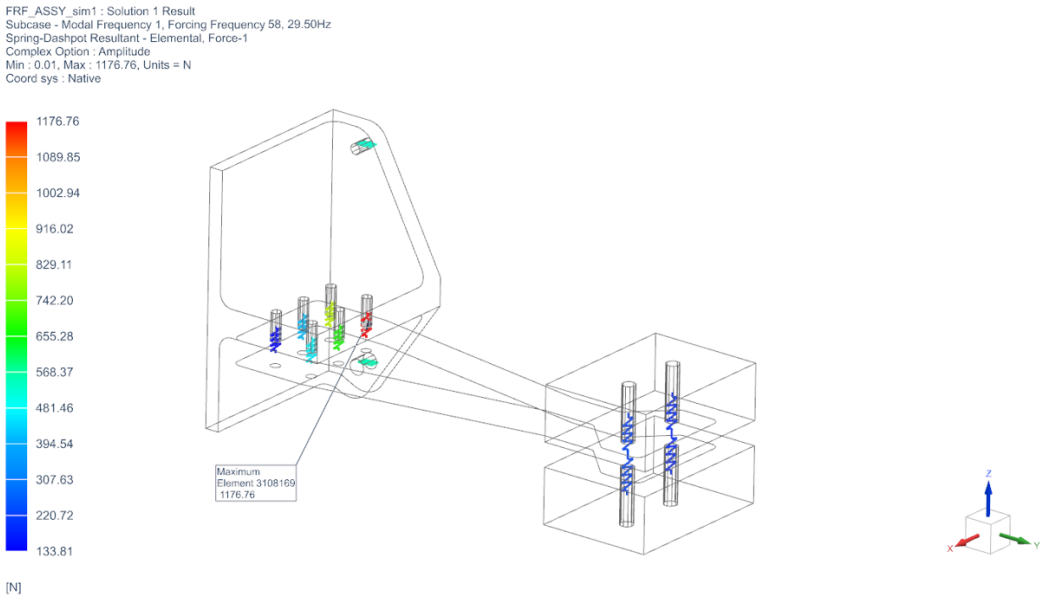
Havacılık yapısallarında bağlayıcıların çalışma koşullarına bağla farklı faktörlerin değerlendirilmesi mümkün olsa da temel olarak 3 hata moduna karşı kontrol edilmesi gerekir. Bunlar sırasıyla taşıma hasarı, kesme hasarı ve çekme hasarı olarak adlandırılır [19].



Şekil 5.7 Tipik bağlayıcı hata modları

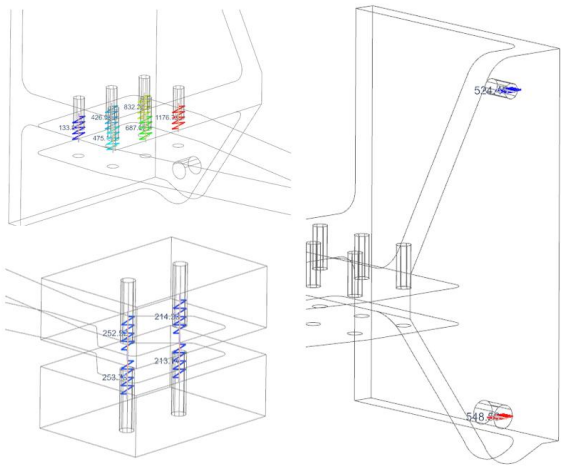
Bu hataların önüne geçmek için ise bağlayıcı kuvveti ve çaplarına uygun olarak bağlayıcı seçimi yapmak olacaktır. Bu hata modlarının oluşmasının çeşitli nedenleri

vardır. Bunların en temelinde bağlayıcı montajında fazla torklanması ve bu uygulanan kuvvetin malzemenin yataklama dayanımını aşmasıyla deformasyon oluşur. Diğer nedenler ise uygun delik mesafelerinin sağlanamaması ve daha büyük veya küçük deliklerin açılması olarak sıralanabilir. Bu bilgiler eşliğinde bağlayıcı kuvvet bilgilerine geçilmiştir.



Şekil 5.8 Ayarlı kütle sönümleyici bağlayıcı kuvvetleri

Analizler sonucunda bağlayıcı üzerine gelen yük bilgileri NX Simcenter FRF analiz sonucunda elde edildi. Bu değerler ile ilgili denklemler kullanılarak kesme kuvveti ve çekme kuvvetinin oluşturacağı maksimum kuvvetler bulunmuş oldu. Bağlayıcı maksimum kuvvetlerin incelenmesi diğer kuvvetleri de kapsayacağı için yeterli olacaktır.



Şekil 5.9 Tüm bağlayıcı kesme kuvvetleri ve konumları

Tablo 5.3 Bağlayıcılarda oluşan kesme ve çekme kuvvetleri

Bağlayıcılar				**Kesme Kuvveti**	**Çekme Kuvveti**
Konum	*X*	*Y*	*Z*	*X*	$\sqrt{Y^2 + Z^2}$
Frame + Bağlayıcı	524.45 N	1090.68 N	1659.04 N	524.45 N	1985.45 N
	548.59 N	1734.91 N	1033.73 N	548.59 N	**2019.53 N**
Sönümleyici + Ağırlık	253.76 N	51.20 N	29.63 N	253.76 N	59.16 N
	252.52 N	38.26 N	26.70 N	252.52 N	46.66 N
	214.30 N	39.72 N	27.56 N	214.30 N	48.35 N
	213.14 N	48.49 N	26.52 N	213.14 N	55.26 N
Sönümleyici + Bağlayıcı	475.14 N	142.43 N	224.08 N	475.14 N	265.52 N
	1176.76 N	234.55 N	210.80 N	**1176.76 N**	315.36 N
	832.22 N	262.95 N	184.71 N	832.22 N	321.34 N
	687.07 N	229.02 N	62.84 N	687.07 N	237.48 N
	133.81 N	180.48 N	115.94 N	133.81 N	214.51 N
	426.95 N	187.51 N	8.62 N	426.95 N	187.70 N

Minimum kesme ve çekme dayanımı için bilgiler elde edildikten sonra maksimum taşıma kuvvetini öğrenmeye ihtiyaç duyulmuştur. Taşım kuvvetini bulmak için bağlayıcı çapı, bağlandığı parçanın kalınlığı ve malzeme çekme dayanımı üzerinden ilgili aşağıdaki denklem ile sonuç elde edilmiştir.

$$R_n = F_s . t . d \tag{5.5}$$

Formülden yola çıkarak mevcut kesme kuvvetleri, konumdaki parçaların kalınlıkları ve delik çapı üzerinden maksimum taşıma kuvvetinin uygunluğu değerlendirilmiştir.

Tablo 5.4 Bağlayıcı taşıma kuvvetleri

Bağlayıcı Konumu	**Delik Çapı**	**Parça Kalınlıkları**	**Bağ. No**	**Kesme Kuvveti**	**Taşıma Kuvveti (MPa)**	
					1. Kalınlık	**2. Kalınlık**
Frame + Bağlayıcı	6.35 mm	12mm (Bağlayıcı)	1.	524.45N	6.88	**101.59**
	9.5 mm	0.813mm (Frame)	2.	548.59 N	4.81	71.03
Sönümleyici + Ağırlık	8 mm	15mm (Sönümleyici)	1.	253.76 N	2.11	**0.92**
				252.52 N	2.10	0.92
		34.3mm (Ağırlık)	2.	214.30 N	1.78	0.78
				213.14 N	1.77	0.77
Sönümleyici + Bağlayıcı	6 mm	15mm (Sönümleyici)	1.	475.14 N	5.28	4.66
			2.	1176.76 N	**13.07**	11.54
			3.	832.22 N	9.24	8.16
		17mm (Bağlayıcı)	4.	687.07 N	7.63	6.74
			5.	133.81 N	1.48	1.31
			6.	426.95 N	4.74	4.18

Yapılan analizler sonucunda frame, sönümleyici, bağlayıcı ve ağırlık için aynı malzeme de elde edilen maksimum taşıma kuvvetleri bulunmuş ve tablo 5.4'te

kırmızı ile gösterilmiştir. Bu bilgilerle birlikte 500 MPa taşıma dayanımı olan Alüminyum 7050 T7451 için 101.59 MPa, 820 MPa taşıma dayanımı olan Titanyum Ti6-Al4-V için 13.07 MPa ve 750 MPa taşıma dayanımı olan [12] Tungsten için ise 0.92 MPa maksimum taşıma kuvveti oluşmuştur ve taşıma kuvveti açısından tüm bağlayıcıların uygun olduğu gösterilmiştir.

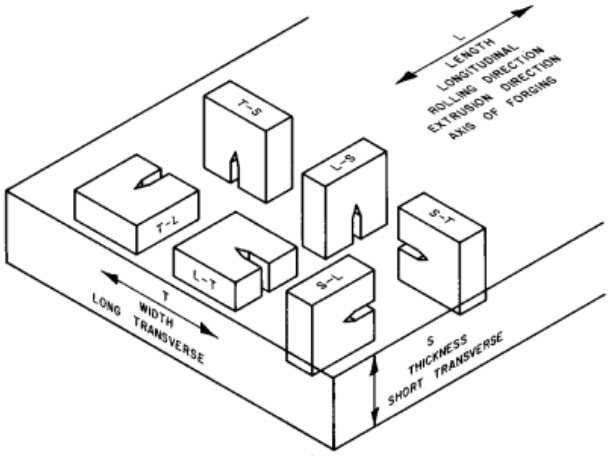
Taşıma dayanımını sağladıktan sonra bağlayıcının maruz kaldığı maksimum çekme ve kesme kuvvetine karşın uygun bağlayıcı seçimi yapılmıştır. Görece düşük kalan bu kuvvetler altında NAS1994 bağlayıcısının uygun olduğu gösterilmiştir.

Tablo 5.5 Sönümleyici sistem bağlayıcı özellikleri

Bağlayıcı Tipi	**NAS1994**
Bağlayıcı Kuvveti	**12500 N**
Malzeme	**Titanyum Dövme Alaşım**

5.5 Sönümleyici Ömrü

Önceki bölümlerde elde ettiğimi gerilme değerleri, Kt ve R oranları ile artık parça ömürlerini çıkarmaya geçile bilinecektir. Bu bilgiler doğru S-N eğrisinin seçilmesini sağlamakla birlikte son bir bilgiye de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da yapısal parçanın üretileceği kütüklerden parçaların çıkarılacağı eksenlerdir. Bu eksen yönleri parça dayanımı açısından önemli oldukları ve yorulmaya direkt etki ettikleri için oldukça önemlidir.



Şekil 5.10 Tipik ana çatlak ilerleme yönü

Bu bağlamda bir parçanın 3 temel yönde çıkarılarak üretilebilir. Bunlar sırasıyla L (Boyuna Yön), LT (Enine Yön) ve ST (Kalınlık Yönü) yönleri malzemenin farklı mekanik özellikler gösterdiği ana eksenleri olarak ifade edilir.

İlk olarak L yönü aslında malzemenin haddeleme veya çekme yönü boyunca uzanan ana ekseni olarak adlandırılabilir. Bu yönde nerdeyse tüm malzemeler için en yüksek mukavemet ve tokluk değerleri elde edilir. Bu nedenle de havacılık sektöründe yüksek mukavemetli uçak yapısal parçaları genellikle L yönünde yük taşıması istenir ve bu nedenle parçalar bu yönde işlenilerek üretilir.

Diğer bir ana eksen yönü olan LT ise L yönüne dik yani genişliğine paralel olan eksendir. L'ye kıyasla daha düşük mukavemet ve sünekliğe sahiptir.

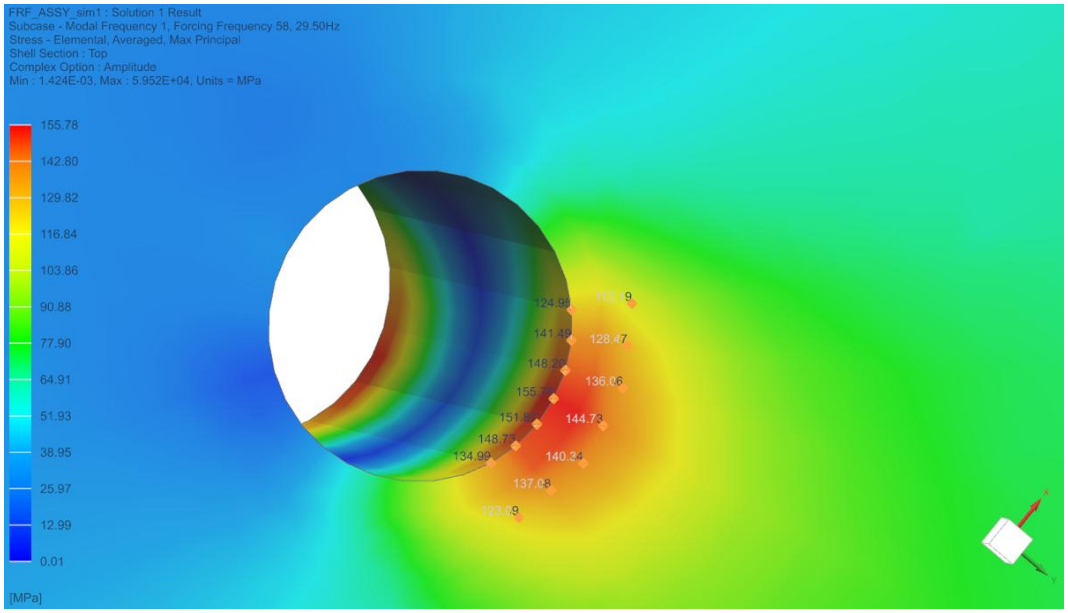
Sonunca ana eksen ise ST yönüdür.ST, malzemenin en kısa eksenidir ve kalınlık yönünü ifade eder. Malzemenin bu yöndeki mukavemeti en düşük seviyededir. İç gerilmeler, segregasyon ve tabakalanma gibi kusurlar en çok bu yönde görülür. Bu nedenle uçak yapısında bu yöndeki yüklemelerden kaçınılır.

Bu bilgiler ışığında sönümleyici parçasının L yönünde üretilmesinin tercih edilmesi gerektiğini göstermiş olduk. Böylece S-N eğrisi için L yönüne ait eğrilerin tercih edilmesine karar verilmiştir.

Kütük yönünün de belirlenmesi ile sönümleyici ömrünü bulmak için tüm isterler tamamlanmıştır. Böylece sönümleyicini yorulma kritik bölgeleri için S-N eğrisi üzerinden incelemeye geçilmiştir. Daha önce de değindiğimiz gibi yorulmaya

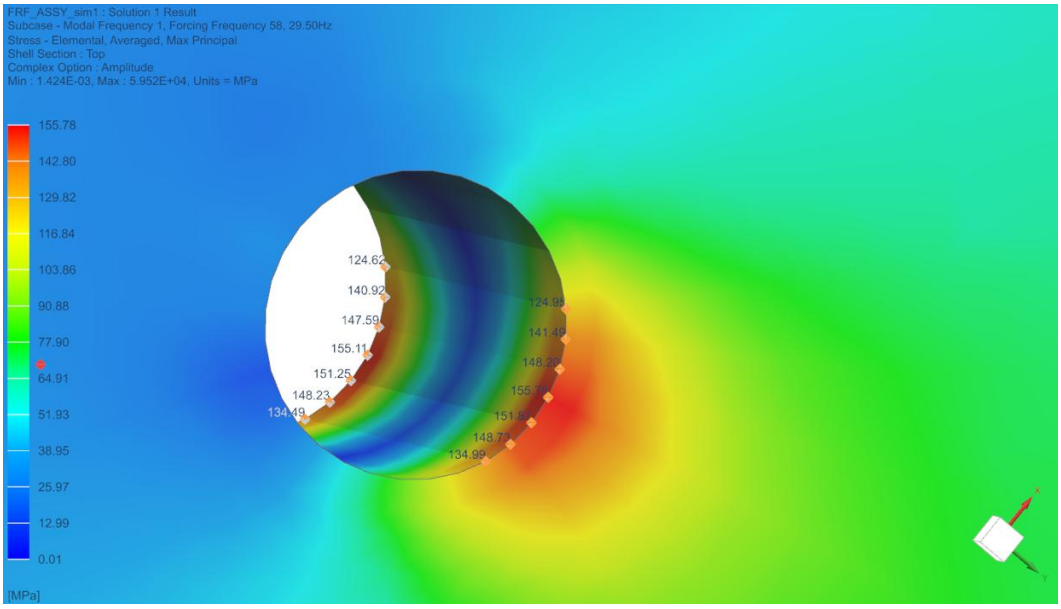
karşın en kritik bölgeler delik çevresi ve radyus geçişleri olarak bahsedilebilir. Elde edilen gerilme sonuçları da incelendiğinde maksimum gerilmenin göründüğü delik bölgesi ve düz kesit alanın başladığı bölge ilk incelemeler ve mevcut bilgiler ışığında belirlenmiştir.

İlk olarak delik bölgesi incelendiğinde sönümleyici üzerinde maksimum gerilmenin bu bölgede olduğu ön görüldüğü gibi gerçekleşmiştir. FEM modeli sonucunda delik bölgesinin ilk noktalarında maksimum gerilme olduğu görünmektedir. Yapılan analiz modellemesinde delik çevresi ve içerisindeki ilk noktalar FEM modellemesi doğası gereği bağlayıcı modellemesinde RBE2 veya RBE3 ile modellenerek o bölgede rijit bir yapı oluştururlar. Çalışmamızda da ilgili bölgede yükün direkt aktarılması için RBE2 ile modellenmiş ve sönümleyicinin parçalarının deliklerindeki bu RBE2'lar CBUSH ile birbirlerine bağlanarak bağlayıcı modeli tamamlanmıştır. Bu modelleme yöntemi nedeniyle ilk noktalarda gösterilen gerilmeler gerçek gerilmeden farklı olmasına neden olmaktadır. Bu durumda delik çevresin deki gerilmeyi ilk nokta değil ondan sonra gelen ilk noktadaki gerilmenin daha doğru bir değer verdiği değerlendirildiği için bu çalışmada da bu noktadaki gerilme kullanılmıştır.



Şekil 5.11 Delik bölgesi maksimum gerilme

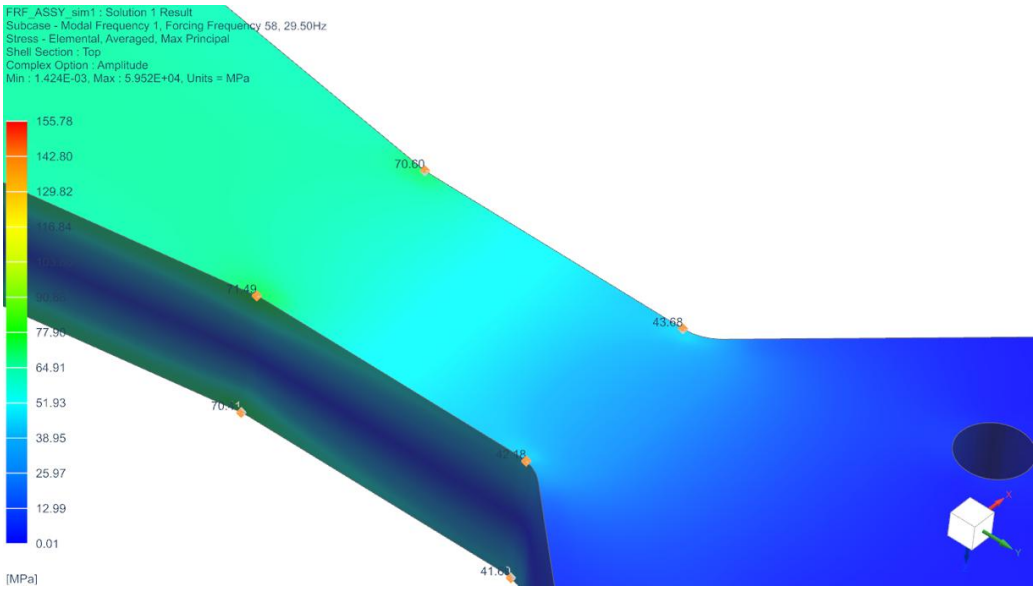
Böylece delik bölgesinde ömür hesabında kullanılacak maksimum gerilme 144.73 MPa olarak belirlenmiştir. Daha önce de değindiğimiz gibi delik bölgelerinde kullanılacak K_t değeri 3 olarak alınacağı nedenleri ile belirlenmişti. Son olarak bu bölge için belirlenmesi gereken R değeri ise dinamik sistemlerde görülen maksimum ve minimum gerilmenin eksi olarak birbirine eşit olması nedeniyle -1 olarak belirlenmiştir. Bizim çalışmamız da bu maksimum ve minimum değerler FEM modeli üzerinden 148.20 MPa ve 147.59 MPa ölçülerek yaklaşık olarak -1'e eşit olduğu gösterilmiştir.



Şekil 5.12 Delik bölgesi maksimum ve minimum gerilme

FEM modelinde bası ve çeki altında çalışan sönümleyicinin analiz çıktılarında NX Simcenter çalışma prensibi olarak çubuğun her iki yüzeyinden maksimum çekme veya basmadaki gerilmesini tek bir sonuçta vermektedir. Deliğin iki ucundaki yaklaşık aynı değer ve orta kesitteki yaklaşık 0 değeri bunu göstermektedir.

Böylece delik bölgesi için gerekli bilgiler belirlenmiş olup diğer kritik bölge olan kesit bölgesinin değerlerine geçilmiştir. Bu bölgede ilk olarak maksimum gerilmenin görüldüğü bölge belirlenmiştir.

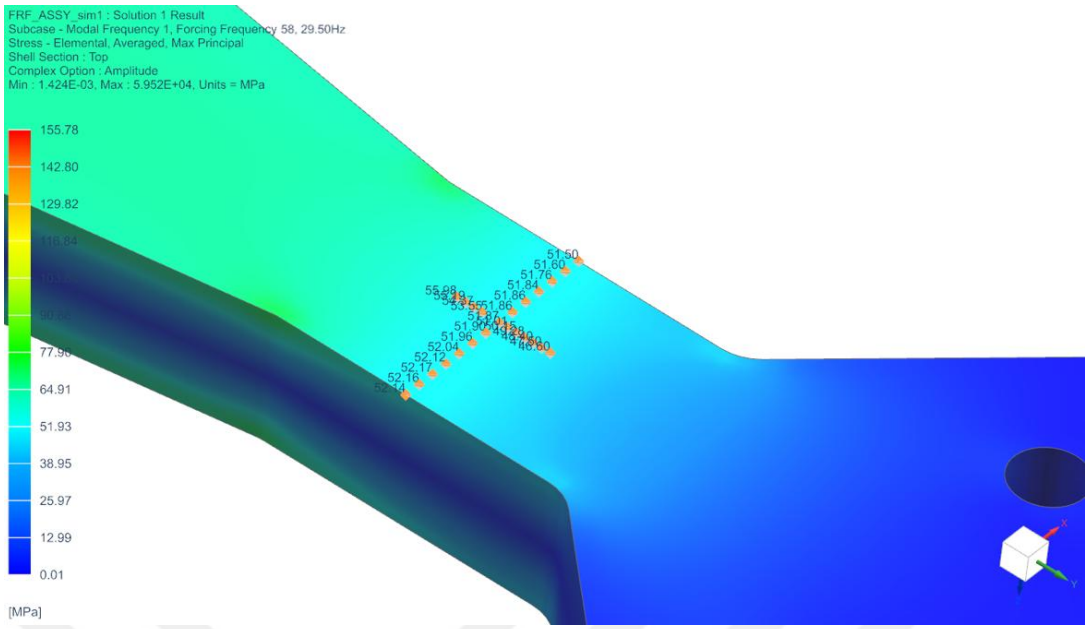


Şekil 5.13 Kesit bölgesi maksimum gerilme

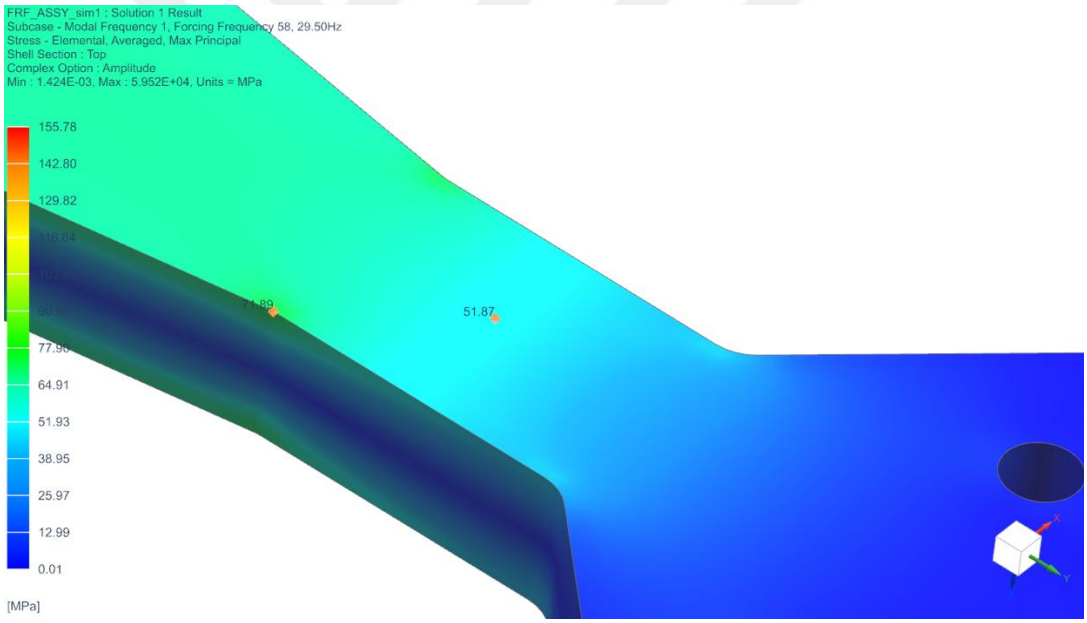
Maksimum ve minimum gerilme incelendiğinde 71.49 MPa ve 70.41 MPa olduğu görünmektedir ve bu da R değeri için yaklaşık olarak -1'e eşit olduğu göstermektedir. Böylece bu bölge içinde R değerinin -1 kullanılmasının uygun olduğu görünmektedir. Bundan sonrasında ise Kt değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kt değerini ise kesitin başladığı alan ile kesitte bulunan nominal değerin arasındaki oran belirleyecektir. Kt belirlenirken, nominal gerilme çentik, delik veya keskin köşeler gibi gerilme yoğunlaşmasının olduğu yerden önceki geniş kesitten alınır. Yani maksimum gerilmenin başladığı radyus veya geçiş bölgesinden sonra devam eden yük yolunun düz devam ettiği alanın orta kesitinden alınması daha doğru sonuçlar vereceği bilinmektedir. Nominal gerilmeler genellikle şu formülle hesaplanır,

$$\sigma_{nom} = \frac{F}{A_{nom}} \tag{5.6}$$

Uygulanan kuvvet ve kesit alanıyla dönüştürülen bur formülle ilgili nominal bölge belirlenmiştir. Elde edilen değerler sonucunda bölgedeki maksimum gerilme 71.49 MPa ve nominal gerilme ise 51.87 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerler sonucunda Kt değeri yaklaşık 1,4 olarak bulunmuş oldu.



Şekil 5.14 Kesit bölgesi nominal gerilme bölgesi

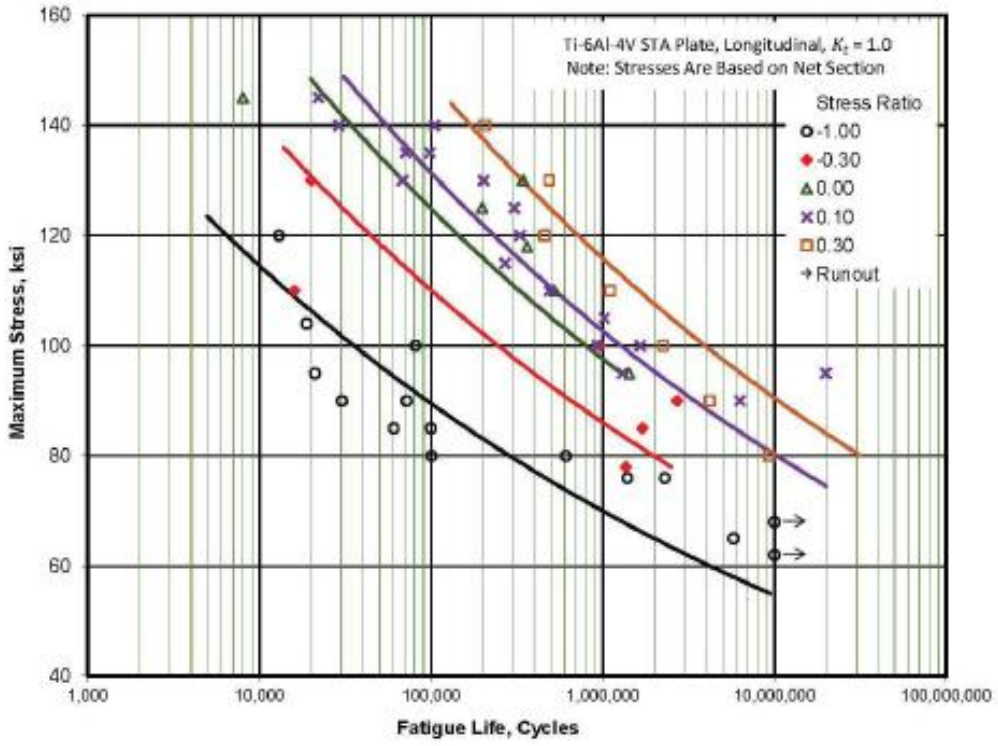


Şekil 5.15 Kesit bölgesi maksimum ve nominal gerilme bölgesi

Ancak elde ettiğimiz Kt:1.4 için S-N eğrilerini kullanacağımız MMPDS'de [12] uygun eğride bir veri bulunmamaktadır. Çeşitli kupon testleriyle hazırlanan bu eğrilerde Kt:3 değeri delik bölgesi için ve Kt:1 değeri de parçanın geri kalan bölgeler için kullanılmaktadır. Bu tarz ara değerler için ise çeşitli yakınsamalar yapılmaktadır. Bunun için geliştirilen formül aşağıdaki gibidir,

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} = \frac{1}{1 + \alpha^* / \rho} \tag{5.7}$$

Peterson tarafında geliştirilen formül ile Kf yani yorulma gerilme yoğunlaştırma katsayısı ile arasındaki oran mevcut S-N eğrilerine gerilmeyi taşımak için kullanılır. Bunun için mevcut Kt'nin Kt=1'e olan oranı ile gerilmelerin oranının eşitliğiyle bu işlem gerçekleştirilir [18].



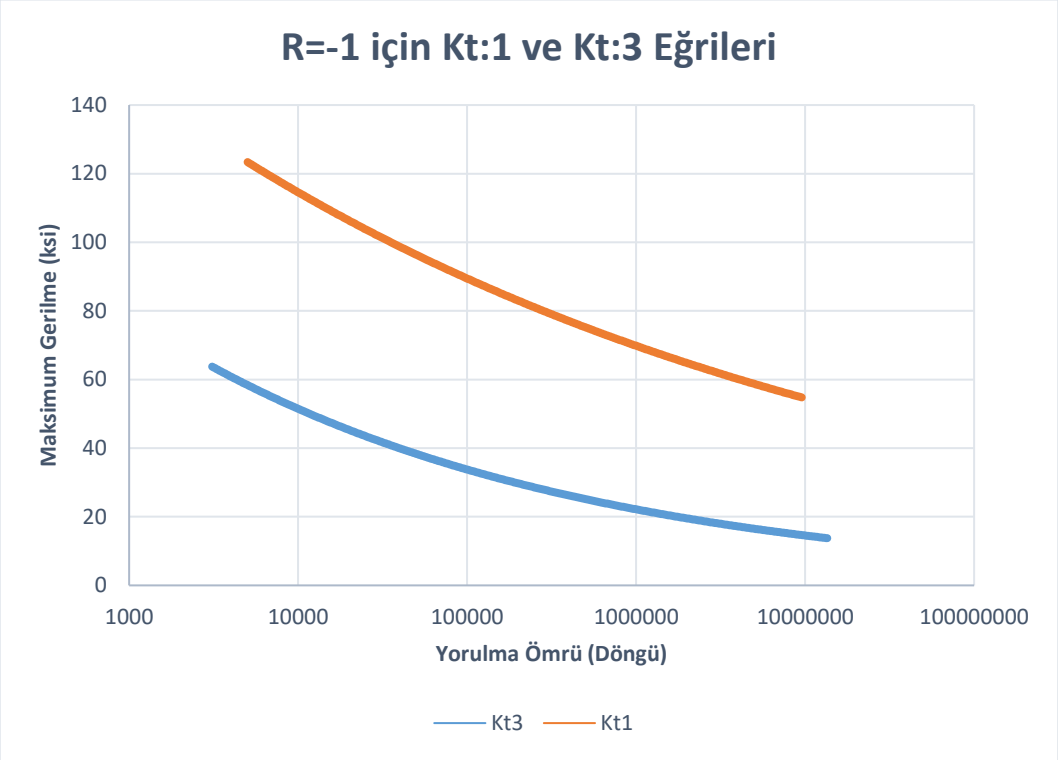
Şekil 5.16 Titanyum Ti-6Al-4V Kt:1 için S-N eğrisi

Tablo 5.6 Kritik bölgeler için S-N verileri

Bölge	**Kt**	**R**	**Maksimum Gerilme**	**Kullanılacak Gerilme**	
Delik Alanı	3	-1	144.73 MPa	48.24 MPa	6.99 ksi
Kesit Alanı	1.4	-1	71.49 MPa	100.08 MPa	14.51 ksi

Eğriler ve ilgili denklemler üzerinden sonuçları belirlemeye geçmeden önce grafiği yorumlamaya ihtiyaç duyulmuştur. Burada titanyum malzemeler için 1.10^7 döngü

sonrası eğrilerin giderek yatay hareket ettiği için bu noktada eğrinin altında kalan gerilmelerdeki parçaların sonsuz ömürlü olduğu değerlendirilir [18].



Şekil 5.17 Titanyum Ti-6Al-4V Kt:1 ve Kt:3 için S-N eğrisi

Delik bölgesi ve kesit bölgesi Kt değerleri farklı olduğu için farklı S-N eğrileri üzerinden değerlendirilecektir. İlk olarak bölgeler için gerçekleşen eşdeğer gerilmeler için kupon testleri sonucu elde edilen [12] katsayılar ile denklemler aşağıdaki gibi gerçekleşmiştir.

$$S_{eq,i} = S_{max}(1-R)^{0.58} \quad \text{(Kt:3)} \tag{5.8}$$

$$S_{eq,i} = S_{max}(1-R)^{0.48} \quad \text{(Kt:1)} \tag{5.9}$$

Bu denklemler sonucu elde edilen eşdeğer gerilmeler ile parçaların ömrü yani dayanabilecekler maksimum döngü sayısının elde edileceği denklemlere geçilecektir.

$$\log N_f = 14.45 - 5.51 \log(S_{eq,i}) \quad \text{(Kt:3)} \tag{5.10}$$

$$\log N_f = 24.6 - 9.35 \log(S_{eq,i}) \quad \text{(Kt:1)} \tag{5.11}$$

Bu denklemler sonrasında elde edilen veriler ile yapıların ömürleri ilgili S-N eğrileri üzerinden belirlenmiştir.

Tablo 5.7 Kritik bölgeler için ömür bilgileri

Bölge	**Eşdeğer Gerilme**		**Yorulma Ömrü**
Delik Alanı	10.46 ksi	72.12 MPa	$6{,}66.10^{8}$
Kesit Alanı	20.24 ksi	139.56 MPa	$2{,}43.10^{12}$

Elde edilen veriler ve değerlendirmeler sonrasında parçaların mevcut sistem için elde edilen ömürlerin sonsuz ömür olarak adlandırılan 1.10^{7} döngü sayısının altında kalarak sönümleyicinin sonsuz ömürde olduğu değerlendirilmiştir. Yapı için ise daha kritik olan bölgenin ise beklenildiği gibi delik çevresi olduğu gözlemlenmiştir.

6
SONUÇ

Bu tez çalışması, helikopterlerde kullanılan ayarlı kütle yaprak yaylı sönümleyicinin optimum tasarımının ve yorulma davranışının incelenmesini amaçlamış ve bu bağlamda gerçekleştirilen çalışmalar ile belirli bulgular elde edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, belirlenen tasarım parametrelerinin ve optimizasyon yöntemlerinin sistem performansına etkisi değerlendirilmiş ve en uygun sonuçlara ulaşılmıştır.

Tez kapsamında incelenen ana bileşenlerden biri olan ayarlı kütle yaprak yaylı sönümleyicisinin, titreşim miktarının azaltması noktasında analizler sonucunda, tasarlanan yapının ana tahrik frekansına yaklaşan modunun belirlenmesiyle titreşim sönümleme kapasitesinin arttırıldığı görülmüştür. FEM analizleri ile sönümleyicinin farklı kesit tasarımları üzerinden gerilim dağılımları değerlendirilmiştir. Son tasarımda belirlenen kesit genişliğinin optimum sönümleme performansı sağladığı ve gerilme yığılmasını minimize ettiği gösterilmiştir. Ayrıca, sönümleyici elemanın parçalarının yorulma ömrünün uzatılması için optimize edilen ayarlı kütle yaprak yaylı sönümleyicinin dayanım analizleri yapılmış ve belirlenen tasarım kriterlerinin endüstriyel uygulamalara uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Genel olarak, tez kapsamında yapılan tüm analizler sonucunda, helikopterlerde kullanılan ayarlı kütle yaprak yaylı sönümleyicinin tasarımının optimizasyonunun titreşim sönümleme de başarılı olduğunu, gerilme yığılmasını azalttığı ve yapının uzun ömürlülüğünü sağladığı gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasından elde edilen bulgular, helikopter yapılarında kullanılan titreşim sönümleyicilerin optimizasyonu konusunda önemli bilgiler sunmaktadır. Gerçekleştirilen analizler ve optimizasyon çalışmaları sonucunda belirlenen en iyi tasarım kriterleri, ileriye dönük çalışmalar için bir temel oluşturabilir.

İleride yapılacak çalışmalarda sistemler üzerinde yapılacak ileri seviye testlerle, analizlerde elde edilen sonuçların gerçek sistemlerle doğrulanması, çalışmanın endüstriyel uygulanabilirliğini arttıracaktır. Diğer bir noktada farklı malzemeler ile yapılacak analizler hem titreşim sönümleme kapasitesini hem de yapının toplam ağırlığını optimize edebilirliği araştırılabilir. Ayrıca, farklı konsept ve kullanım alanı olan helikopterlere ait farklı uçuş senaryolarından elde edilecek kullanım spektrumu ile sönümleyicinin performansını değerlendirmek için yeni uçuş testleri ile desteklenebilir. Helikopterlerde hala kullanımda olan farklı tip sönümleyiciler olan pasif ve aktif titreşim kontrol sistemlerinin birleştirilerek daha etkili bir sönümleme mekanizması oluşturulabilir.

Sonuç olarak, bu tezde gerçekleştirilen analizler ve optimizasyon çalışmaları helikopterlerde kullanılan pasif titreşim sönümleyicilerinin etkinliğini arttırma konusunda önemli katkılar sunmuştur. Gelecekte yapılacak çalışmalar ile bu sistemlerin daha hafif, dayanıklı ve verimli hale getirilmesi mümkün olabilecektir.

KAYNAKÇA

[1] Do-Hyung Kim, Dong-II Kwak, Qi Song, “Demonstration of Active Vibration Control System on a Korean Utility Helicopter”, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, vol. 20, pp. 249–259, March 2019, doi: 10.1007/s42405-018-0106-3

[2] S. S. Harel,” Frequency Tuning Of Vibration Absorber Using Topology Optimization,” M.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Univ. of Texas at Arlington, Arlington, TX, USA, 2017.

[3] CHENG Qi-you, DENG Jing-hui, HUANG Jian-ping, LING Ai-min, LU Ke, “Optimization Selection Approach for Distribution of Actuators in Active Vibration Control of Helicopter”, in *Proc. 34th Chinese Control Conf.*, Hangzhou, China, Jul. 28-30, 2015.

[4] A.S. Batrakova, A.N. Kusyumova, S.A. Mikhailova, G.N. Barakos, “Aerodynamic optimization of helicopter rear fuselage,” Aerospace Science and Technology, vol 77, pp. 704–712, March 2018.

[5] J. F. Gómez-Aguilar, H. Yépez-Martínez, C. Calderón-Ramón, I. Cruz-Orduña, R. F. Escobar-Jiménez, and V. H. Olivares-Peregrino, “Modeling of a mass-spring-damper system by fractional derivatives with and without a singular kernel,” Entropy, vol. 17, no. 9, pp. 6289–6303, Sep. 2015.

[6] H. Frahm, 'Device for damping vibrations of bodies,' U.S. Patent 989,958, Apr. 18, 1911. [Online]. Available: https://patents.google.com/patent/US989958A/en [Accessed: May 16, 2025].

[7] M. Del Pedro and P. Pahud, *Vibration Mechanics: Linear Discrete Systems*, pp. 156–171, 1991.

[8] ITT Enidine, Rotorcraft Components – Frahm Damper Overview, product brochure, Oct. 14, 2024. [Online]. Available: https://www.enidine.com/rotorcraft [Accessed: May 31, 2025].

[9] “Bell 407 Frahm vibraiton damper opened for inspection,” Reddit, r/aviationmaintenance, Jan. 4, 2021. [Online]. Available: https://www.reddit.com/r/aviationmaintenance/comments/ky0m6q/bell_407_frahm_vibraiton_damper_opened_for/ [Accessed: May 31, 2025].

[10] Se-Un Jung, Dong-Il Kwak, Se-hee Kim, Jong-ho Choi and Dai-Sung Shim, 'Vibration reduction devices for Korean utility helicopter,' *J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci.*, vol. 41, pp. 987–993, Dec. 2013.

[11] William A. Welsh, Morphing Wing Technologies, Large Commercial Aircraft and Civil Helicopters, Chapter 27 - Helicopter Vibration Reduction, pp. 865-892, 2018.

[12] MMPDS-2023, metallic material properties development and standardization (MMPDS). Washington, D.C: Federal Aviation Administration, July, 2023.

[13] A. F. Johnson, R. S. Thomson, M. David, M. W. Joosten, and M. Waimer, "Design and testing of crashworthy aerospace composite components," in *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, P. E. Irving and C. Soutis, Eds., 2nd ed. Cambridge, U.K.: Woodhead Publishing, 2020, pp. 371–414.

[14] A. Abu Hanieh, "Reducing airplane cabin and fuselage noise using active and passive control techniques," Int. J. Vehicle Noise and Vibration, vol. 19, no. 1/2, pp. 67–77, 2023.

[15] A. R. S. Bramwell, David Balmford, George Done, Bramwell's Helicopter Dynamics, Chapter 8 Rotor induced vibration, pp. 290-318, April 2001.

[16] T. W. Sheehy, D. S. Jenney, and P. Mordaunt, 'Roll vibration absorber,' U.S. Patent 5,118,051, Jun. 2, 1992.

[17] Sofia Teixeira de Freitas, Experimental research project on bolted connections in bearing for high strength steel, Delft University of Technology, July 2005.

[18] S. Suresh, Fatigue of Structures and Materials, 2nd ed. Cambridge, U.K., Cambridge University Press, 1998.

[19] A. Galińska, “Mechanical Joining of Fibre Reinforced Polymer Composites to Metals - A Review. Part I: Bolted Joining,” Polymers, vol. 12, no. 10, pp. 2252, Sep. 2020.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. M. Kepenek ve B. Sağbaş, “Helikopterlerde Kullanılan Ayarlı Kütle Yaprak Yaylı Sönümleyicilerin Yorulma Temelli Tasarım Kriterleri”, 6. Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, İstanbul, Türkiye, Mart 08-09 2025.